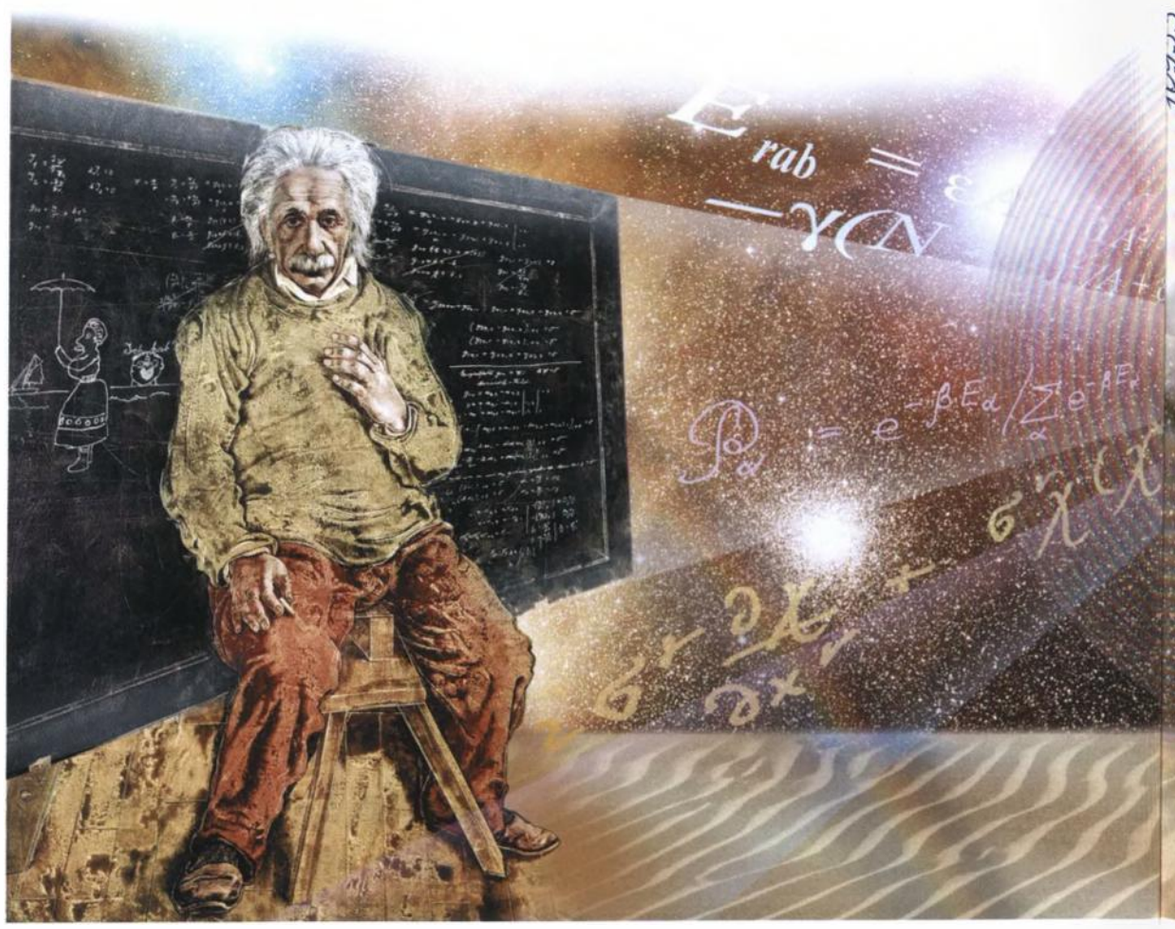
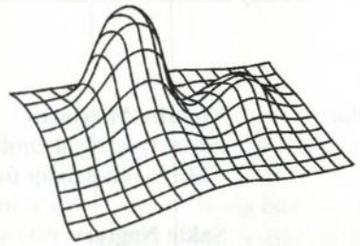
LÜĞƏT VƏ ENSİKLOPEDİYALAR



UŞAQLAR ÜÇÜN

ENSİKLOPEDİYA



FİZİKA

İkinci hissə

Elektrik və maqnetizm
Termodinamika və kvant mexanikası
Nüvə və elementar zərrəciklər fizikası

PREZİDENT KİTABXANASI

"Şərq-Qərb"
Bakı
2008

ICES
INTERNATIONAL CENTRE OF EDUCATIONAL SYSTEMS (ICES)
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ (МЦОС)
CENTRE INTERNATIONAL DES SYSTEMES D'EDUCATION (CISE)
INTERNATIONALES ZENTRUM FUR AUSBILDUNGSSYSTEME (IZAS)
UNESCO/ICES BEYNƏLXALQ KAFEDRA-ŞƏBƏKƏSİ
"TEXNİKİ VƏ PEŞƏKAR TƏHSİL VƏ KADRLARIN HAZIRLANMASI"

"Uşaqlar üçün ensiklopediya"lar Beynəlxalq təhsilverici sistemlər mərkəzi (BTSM) və YUNESKO/BTSM Beynəlxalq kafedra-şəbəkəsi tərəfindən hamı üçün fasiləsiz təhsil (continuing longlife education for all) sistemlərində dərs vəsaiti kimi tövsiyə edilmişdir.

Azərbaycan nəşri üzərində işləyənlər:

Abdulla Muxtarov
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor,
AMEA-nın müxbir üzvü

Şakir Nağıyev
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

ISBN 978-9952-34-189-8

530.03-dc22
Uşaq ensiklopediyası – Fizika

Uşaqlar üçün ensiklopediya. Fizika. II hissə
Elektrik və maqnetizm. Termodinamika və kvant mexanikası. Nüvə və elementar zərrəciklər fizikası
Bakı, "Şərq-Qərb", 2008, 424 səh.

© "Şərq-Qərb", 2008

OXUCUYA

Bir dəfə Eynşteyndən soruşurlar ki, dahiyanə kəşflər necə meydana çıxır? "Hər şey çox sadədir, – Eynşteyn cavab vermişdir. – Bütün alimlər hesab edirlər ki, bu, ola bilməz. Lakin bununla razılaşmayan bir axmaq tapılır və isbat edir ki, niyə ola bilər".

(*Tarixdən*)

Fizika – hər kəsin həyatı ilə bilavasitə əlaqəsi olan bir elmdir. Adi həyatla, gündəlik həyatla, o həyatla ki, orada biz hər gün, hər saat fiziki kəşflərin və ixtiraların nəticələrindən istifadə edirik. Biz termometrə baxarkən, fotoaparatın düyməsini basarkən, telefon zənginə cavab verərkən, velosipedlə gedərkən, radioya qulaq asarkən və ya hamam otağında işığı yandırarkən fiziki hadisələri bizim üçün işləməyə məcbur edirik, onlarla əməkdaşlıq edirik.

Bir dəfə ixtisasca filoloq olan gənc alpinist düşərgəsinə istirahət etməyə getdi və alpinistlərə yalvarıb dağın başına qalxarkən onu da özləri ilə aparmalarını xahiş etdi. Onlar toplaşıb yüksəklikdə nə yeyəcəklərini müzakirə edəndə, o dedi ki, özü ilə mal ətindən bir parça götürəcək və dadlı bir şorba bişirəcək. Alpinistlər gülüşdülər. Buna baxmayaraq o, əti götürdü və yüksəkliyə qalxandan sonra qaynayan suda onu saat yarım bişirdi. Lakin ət yarıçiy qalmışdı. Ətin bişməməsi təcrübəli alpinistlərin heç birini təəccübləndirmədi. Yüksəklikdə suyun qaynama temperaturu başqadır, bəzən 50 dərəcə də ola bilər, bu isə zülalın pıxtalaşması üçün qətiyyən kifayət deyil, ona görə də orada nə əti, nə yumurtanı bişirmək mümkün deyildir.

Ana qızının əsil şokoladlı kökə bişirmək xahişini yerinə yetirmək üçün, adi xəmir yoğurdu və şokolad parçasını da qıraraq ona qatdı. Ana əmin idi ki, yüksək temperaturda şokolad əriyəcək və xəmirə hopacaqdır. O, sobadan qızarmış şokolad parçası ilə birlikdə adi kövrək undan hazırlanmış kökəni çıxaranda necə təəccübləndiyini bilməməyi onu pis vəziyyətdə qoyacaq. Çünki şokolad damcısının səthi gərilməsi elədir ki, o, hətta çox yüksək temperaturda da xəmirə hopa bilməz. Bu cür misallardan çox çəkmək olar. Onların hamısı maraqlı və... ibrətamizdir.

Fizika tarixçiyə və ya gələcək filoloqa, maliyyəçiyə, hüquqşünasa nə üçün lazımdır? Razılaşın ki, bu tam məntiqi və tez-

tez verilən sualdır. Biz belə bir faktı şübhə altına almırıq ki, müasir təhsilli insan ana dilində savadlı yazmağa və danışmağa, tarixi və ədəbiyyatı bilməyə borcludur. Bu tələb həm müəllimlərə, həm biznesmenlərə, həm həkimlərə, həm hüquqşünaslara, həm də fiziklərə aiddir. Tam eynilə fizika qanunlarını, fiziki proses və hadisələri bilmək istənilən müasir insanın təhsilinin ayrılmaz hissəsidir.

Fizika da, riyaziyyat kimi, sistemli düşünməyi, verilən məlumatları təhlil etməyi, qanunauyğunluqları tapmağı və səbəb-nəticə əlaqələrini görməyi öyrədir. Bütün bu vərdiş və bacarıqlar yalnız məsələ həlli və ya eksperimentlərin aparılması prosesində gərək olmur. Hər bir uğurlu rəhbər bu bacarıqlara malikdir, əbəs yerə deyildir ki, naşirlər arasında bu qədər çox fizik və riyaziyyatçılar var.

İnsanın bilik diapazonu geniş olduqca, o, həyatda bir o qədər çox imkanlara və sərbəstliyə malik olur.

Tükənmək bilməyən informasiya axınından baş çıxarmaq ona daha asan olur. Başlıcası isə budur ki, o, "Bu ola bilməz!" deyən kəsə kor-koranə etibar etməyəcəkdir. Həyatda nəyə isə nail olmuş – böyük kəşf etmiş, nəhəng biznes qurmuş, əhəmiyyətli nə isə bir şey yaratmış şəxsiyyətlər ömürlərində heç olmazsa bir dəfə də olsa həmin bu "ola bilməz"i şübhə altına almasaydılar, həyatda heç nəyə nail ola bilməzdilər. Eynşteynin epiqrafa çıxarılmış fikrini başqa şəkildə söyləməklə, həyatda baş vermiş istənilən hadisənin tarixi haqqında belə danışmaq olar. "Hər şey çox sadədir. Bütün insanlar hesab edirlər ki, bunu etmək mümkün deyildir. Lakin bununla razılaşmayan bir qoçaq tapılır..."

5

DÜNYANIN SAHƏ MƏNZƏRƏSİ

Yüklər, cərəyanlar və sahələr. Optikanın əsasları. Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi. Ümumi nisbilik nəzəriyyəsi



BOŞLUQ – EFİR – SAHƏ

Fransız şairi Pol Valeri (1871-1945) idrakın yolları və elm tarixinin gözlənilməz dəyişiklikləri haqqında düşünərkən elektrik bəhsinin və maqnetizmin çox uzun müddət elmi maraqlar sferasından kənarda qalmasına təəccüb etmişdi.

O təəccüblə deyirdi: "Ağıl və zəka üçün bu kiçik kəhrəba parçasının tarixçəsindən daha anlaşılmaz nə ola bilər, elə kəhrəba parçasının ki, bütün təbiətdə gizli qalan, ola bilsin, bütün təbiətdən ibarət olan və axırıncı əsrdən başqa, bütün əsrlər boyu yalnız həmin parçada özünü bu qədər itaətkarlıqla göstərən qüvvə təzahür edir".

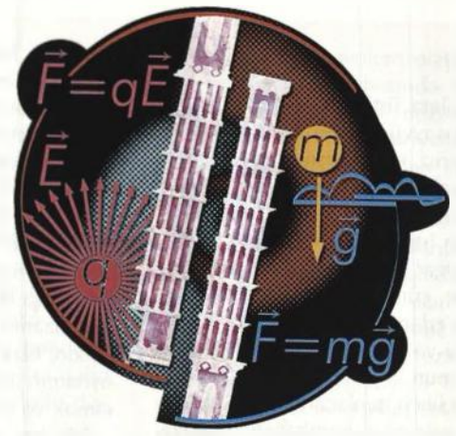
Bizi əhatə edən maddi aləmin tam mənası ilə qarşılıqlı elektromaqnit təsirinin müxtəlif təzahürlərilə dolu olduğuna baxmayaraq, bu qarşılıqlı təsir heyrətamiz dərəcədə uzun müddət alimlərin diqqətindən yayınmışdır. Təbiət elektromaqnit qüvvələrinə ən geniş fəaliyyət sahəsi vermişdir – atom örtüklərinin quruluşu, atomların molekullar şəklində birləşməsi və qazların, mayelərin, kristalların əmələ gəlməsi. Elektromaqnit qüvvələri olmadan nə yazmaq, nə də bu kitabı oxumaq olmazdı, ona görə ki, hətta işıq da elektromaqnit təbiətə malikdir. Əgər elektromaqnetizm birdən-birə yox olsaydı, onda ani olaraq elementar zərrəciklərdən: elektronlardan, nuklonlardan, neytrinolardan... başqa heç nə qalmazdı.



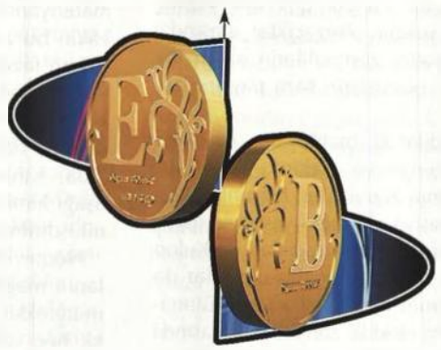
Elektrik və maqnit hadisələrinin təbiətinin dərk edilməsində bir neçə mərhələni ayırırlar. Faktik olaraq XVII əsrin ortalarına qədər davam etmiş ən uzun birinci mərhələni şərti olaraq "tibb mərhələsi" adlandırmaq olar. Cisimləri elektrikləndirməyin müxtəlif üsulları kəşf olunmuşdu, aydınlaşdırılmışdı ki, yüngül cisimləri farfor da, şüşə də cəzb etməyə qadirdir. Həkimlər, ara həkimləri naxoşluqları müalicə etmək üçün bu xassələri tətbiq etməyə cəhd edirdilər; elektriklənməmiş cisimlərə nisbətən daha çox hissediləcək effekt verən maqnitlər xüsusilə şöhrət qazanmışdı. Hesab olunurdu ki, maqnit ər və arvadı barışdırmağa, "cadunu" götürməyə və s. qadirdir.

Təəccüblü deyildir ki, maqnit və "elektrik" materiallarının xassələrinin ilk sistemləşdirilmiş təsviri ingilis kraliçası I Yelizavet Tüdorun saray həkimi olmuş tibb doktoru Uilyam Hilbertin qələminə məxsusdur. Məhz o, hər şeyə nüfuz edən efir haqqındakı antik ideyaya müraciət etmiş, belə ki, efir yüklənmiş cisimləri ətraf fəzaya yayır.

Sonra elektrik və maqnit hadisələrini Nyutonun cazibə nəzəriyyəsinə analoji olaraq şərh edən zaman "mexaniki" mərhələ başladı. Əgər cismin $F = Gm_1m_2/r^2$ *ümumdünya cazibə qanununa* daxil olan m kütləsinə qravitasiya yükü kimi baxsaq, görərik ki, elektrostatikanın əsas qanunu olan $F = kq_1q_2/r^2$, Kulon qanunu Nyuton qanununun q elektrik yükləri üçün yazılmış dəqiq surətidir.



Bizim dövrdə sahənin intensivliyi anlayışının fiziki mənasını izah etmək üçün adətən bu analogiyadan istifadə edirlər. Belə ki, hər iki qanunu $\vec{F} = m\vec{g}$ (ümumdünya cazibə qanunu) və $\vec{F} = q\vec{E}$ (Kulon qanunu) şəklində yazmaq mümkün olduğundan elektrostatik sahənin $\vec{E}$ intensivliyi q yükləri üçün, qravitasiya sahəsinin $\vec{g}$ intensivliyi m kütləli cismin hamı tərəfindən hiss edilən sərbəstdüşmə təcilinin oynadığı rolu oynayır.



Nyuton kimi, Kulon da qüvvənin məsafəyə ani ötürülməsi haqqındakı təsəvvürə və ya *uzağatəsir konsepsiyasına* əsaslanmışdı. Bu, onlara göy cisimlərinin və yüklənmiş cisimlərin müşahidə olunan məlumatları ilə çox dəqiq üst-üstə düşən hərəkət qanunlarını almağa mane olmamışdı. İndi məlumdur ki, niyə bütün bu cisimlər nisbətən kiçik sürətlərlə hərəkət edir, qarşılıqlı təsirlər isə işıq sürətilə həyata keçirilir və ona görə də onların praktik olaraq ani baş verdiyini hesab etmək olar.

1831-ci ildə Maykl Faradey aşkar etdi ki, zamana görə dəyişən maqnit sahəsi elektrik sahəsi doğurur. Bununla da o, *elektromaqnit induksiya* qanununu müəyyən etdi. Aydın oldu ki, nə isə yeni bir mahiyyət – *elektromaqnit sahəsi* ilkindir, elektrik və maqnit sahələri isə onun müxtəlif təzahürləridir. Sonralar Maksvell elektromaqnit sahəsinin tabe olduğu tənliklər sistemini tapmağa müvəffəq oldu. Əgər Nyuton sxeminə yalnız zərrəciklər haqqında təsəvvürlər daxil idisə və onların qarşılıqlı təsirinin xarakteri isə postulə edilirdisə də, Faradeyin və Maksvellin əsərlərində isə yeni obyekt – yükləri və cərəyanları əlaqələndirən elektromaqnit sahəsi yarandı.

Doğrudur, Faradey və Maksvell sahəyə universal elastiki mühitdə – köhnə xeyirxah efirdəki mexaniki gərginliklər kimi baxırdılar. Yeni eksperimental faktlar kəşf olunduqca efirə ən ziddiyyətli xassələr aid etmək lazım gəlirdi: o, özünü sürətlə baş verən rəqslər zamanı bərk cisim kimi aparmalı və eyni zamanda planetlərin hərəkətinə müqavimət göstərməməli idi. Efiri gah maye, gah da qatran hesab edirdilər, lakin həmişə müşahidə olunmaz elan edilirdi.

FİZİKİ REALLIQ NƏDİR?

Fiziklər Nyutonun açdığı yollara üstünlük verərkən fiziki reallıq haqqında aşağıdakı təsəvvür hakim olur: reallıq – bu materiyadır; materiya yalnız elə dəyişikliklərə məruz qalır ki, biz onları fəzada hərəkət kimi qavrayırıq. Hərəkət, fəza, zaman – bunlar real formalardır. Fəzanın fiziki reallığını inkar etmək üçün edilən istənilən cəhd ətalət qanunu ilə toqquşaraq alt-üst olur. Əgər təcili reallıq hesab etsək, onda fəza da reallıq olmalıdır, çünki cisimlər fəzanın ölçüləri daxilində təcillə hərəkət edən cisimlər kimi qavranılır.

Nyuton bunu başa düşürdü və ona görə də fəzanı "mütləq fəza" adlandırmışdı. Onun nəzəri qurumunda asılı olmayan reallığın daha bir üçüncü (toplananı) tərkib hissəsi – maddi nöqtələr arasında təsir edən hərəkətverici qüvvə də var idi. Gözləmək olardı ki, bu cür qüvvələr yalnız zərrəciklərin vəziyyətindən asılıdır. Zərrəciklər arasında təsir edən bu qüvvələrə, əlbəttə, zərrəciklərin özləri ilə bağlı qüvvələr kimi baxılırdı; qüvvələrin fəza paylanması dəyişməz qanuna tabe idi.

XIX əsr fizikləri hesab edirdilər ki, materiyanın iki növü mövcuddur: çəkisi olan materiya və elektrik. Fərz olunurdu ki, çəkisi olan materiyanın zərrəcikləri bir-birilə Nyuton qanununa tabe olan qravitasiya qüvvələri vasitəsilə qarşılıqlı təsirdə olur. Elektrik materiyasının zərrəcikləri isə Kulon qüvvələri vasitəsilə qarşılıqlı təsirdə olur. Bu qüvvələr də zərrəciklər arasındakı məsafənin kvadratı ilə tərs mütənasibdir. Çəkisi olan zərrəciklərlə elektrik zərrəcikləri arasında təsir edən qüvvələrin təbiətinə dair heç bir müəyyən və hamı tərəfindən qəbul edilmiş baxışlar mövcud deyildi.

FƏZANIN KÖHNƏ NƏZƏRİYYƏSİ

Tamamilə boş fəza fiziki dəyişmələrin və proseslərin daşıyıcısı kimi yolverilməz idi. Əgər belə demək mümkünsə, fəza maddi olaraq iştirak edən şəxslərin dram oynadığı səhnə idi. Buradan aydındır ki, Nyuton boş fəzada işığın yayılması faktını nəzərdən keçirərək, belə bir hipotez qəbul etməli oldu ki, işıq da xüsusi qüvvələrin vasitəsilə çəkisi olan materiya ilə qarşılıqlı təsirdə olan maddi zərrəciklərdən əmələ gəlmişdir. Bu mənada Nyutonun təbiətə baxışlarına materiyanın başqa formalarından əmələ gəlmiş maddi zərrəciklərin üçüncü növü daxil idi. İşıq zərrəcikləri faktik olaraq doğulmağa və udulmağa qadirdir. Artıq XVIII əsrdə təcrübi məlumatlardan məlum idi ki, işıq boş fəzada müəyyən sürətlə yayılır. Aydındır ki, bu fakt Nyutonun nəzəri sxeminə pis uyğun gəlirdi: doğrudan da, hansı mülahizələrə görə zərrəciklər fəzadan keçərkən ixtiyari sürətlə hərəkət edə bilməzlər? Ona görə də təəccüblənmək lazım gəlmir ki, Nyutonun qurduğu nəzəri sistem işıq nəzəriyyəsini devirdi. Bu, Hüygens – Yunq – Frenel dalğa nəzəriyyəsi ilə ləğv edilmişdi, elə bir nəzəriyyə ki, inadla müqavimət göstərən fiziklərin interferensiya və difraksiya hadisələr məcmusu ona gətirib çıxarmışdı. Bu nəzəriyyə əsasında ən incə detallarına qədər hadisələrin geniş dairəsini qabaqcadan xəbər vermək mümkün idi. Bu, fizikləri heyran etmişdi. Nəzəriyyənin şərhinə çoxlu sayda monoqrafiyalar və dərsliklər həsr olunmuşdu. Ona təəccüblənməyə dəyərmi ki, alimlər bu nəzəriyyənin onların əbədi sitayiş etdikləri abidədə doğurduğu çatı görmədilər. Çünki faktik olaraq bu nəzəriyyə belə bir inamı dağıtdı ki, dünyada real olan hər şeyi zərrəciklərin fəzadakı hərəkəti kimi başa düşmək olar. Bu nəzəriyyəyə görə işıq dalğaları boş fəzanın rəqsi hallarından başqa bir şey deyildir və beləliklə, fəza daha fiziki hadisələr üçün passiv səhnə rolunu oynamır. Efir hipotezi ilə həmin çatın üstünü ört-basdır etmək və onu nəzərə çarpmaz etmək mümkün oldu.

Efir hər yerə nüfuz edir, bütün fəzanı doldurur; onu materiyanın yeni forması kimi qəbul etmək lazım gəlirdi. Lakin bu zaman gözdən qaçırmışlar ki, bununla müstəqil olaraq fəzaya həyat verdilər, fəzanı canlandırdılar. Müəyyən mənada efir fəzanın özü ilə eynidir və elə bir şey idi ki, fəzanın özünə əlavə edilmişdir. İndi işığa fəzanın özündə baş verən dinamik bir proses kimi baxılırdı. Beləliklə, sahə nəzəriyyəsi Nyuton fizikasının qeyri-qanuni uşağı kimi dünyaya gəldi, halbuki bu uşağın dərhal qanuniləşdirilməsi məntiqə daha uyğun olardı.

Nöqteyi-nəzərdəki dönüşü tam dərk etmək üçün məsələnin məğzinə dərhal göz yetirə bilən son dərəcə orijinal mütəfəkkir, zəka sahibi tələb olunurdu, elə bir mütəfəkkir ki, heç vaxt düsturlara qapılıb qalmasın. Bu cür seçilmiş mütəfəkkir Faradey oldu. O, instinktiv olaraq qüvvələrin məsafəyə birbaşa təsiri ideyasına qarşı etiraz etdi – bu ideya ona istənilən sadə müşahidəyə zidd ideya kimi görünürdü. Əgər hər hansı elektriklənmiş cisim ikinci cismi cəzb edir və ya itələyirsə, onda bu heç də birinci cismin ikinci cismə birbaşa təsirilə yox, müəyyən aralıq təsir vasitəsilə yerinə yetirilir. Birinci cisim özünün bilavasitə yaxınlığındakı fəzanı müəyyən hala gətirir ki, bu hal tamamilə müəyyən bir fəza-zaman yayılma qanununa uyğun olaraq, fəzanın daha uzaq hissələrinə yayılır. Fəzanın bu halı məhz "elektrik sahəsi" adlanır. İkinci cisim qüvvənin təsirinə məruz qalır, çünki o, birinci cismin təsir sahəsində yerləşir və əksinə. Beləliklə, "sahə" bizi məsafəyə təsir haqqındakı təsəvvürlərdən xilas olmağa imkan verən müəyyən bir mühakimələr sxemi ilə təmin edir. Məlum şərtlər daxilində sahələrin onları doğuran cisimlərdən ayrıla və sonra fəzada sərbəst sahələr şəklində hərəkət edə bilməsinə dair cəsarətli fikir də Faradeyə məxsusdur: bu, məhz Faradeyin işığa verdiyi şərh idi.

Sonralar Maksvell düsturların heyrətamiz məcmusunu tapdı ki, bu da hazırda bu gün bizə sadə görünür və o, elektromaqnit nəzəriyyəsi ilə işıq nəzəriyyəsi arasında körpü salmışdır. Məlum olmuşdur ki, işıq sürətlə ossilyasiya edən elektrik və maqnit sahələrindən ibarətdir. <...>

NƏZƏRİYYƏNİN DUALİZMİ FİZİKLƏRİ TƏMİN ETMİR

Yüzilliyin sonuna yaxın fiziklərdə belə bir hiss yaranmışdı ki, iki növ fundamental fiziki reallığa, bir tərəfdən – sahələrə, digər tərəfdən – maddi zərrəciklərə, yol verən nəzəriyyə onları təmin etmir. Maddi zərrəcikləri sahənin struktur törəmələri kimi, məsələn, onun ən çox sıxlaşdığı, ən çox toplandığı yer kimi təsəvvür etmək cəhdləri olmuşdur. Sahə nəzəriyyəsi əsasında zərrəciklərin bu cür təsəvvür edilməsinin istənilən üsulu böyük nailiyyət olardı, lakin alimlərin bütün səylərinə baxmayaraq, cəhdlər nəticəsiz qaldı... [Kvant nəzəriyyəsində] kontinuum nəzəriyyəsi (sahə nəzəriyyəsi) ilə elementar strukturların və proseslərin diskret şərhi öz aralarında kəskin mübarizə aparır.

<...> Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi öz mənbələrinə görə başlıca olaraq elektromaqnit sahəsinin Maksvell nəzəriyyəsinə borcludur. Bu nəzəriyyədən (həmçinin təcrübi müəyyən olunmuş o faktdan ki, hərəkətin heç bir fiziki aşkar oluna bilən halı mövcud deyil, elə bir halı ki, onu "mütləq sükunət" adlandırmaq mümkün olardı) fəza və zamanın yeni nəzəriyyəsi yarandı. Bu nəzəriyyə bir-birindən fəzaca ayrılmış iki hadisənin eyni zamanlılığı haqqındakı təsəvvürün mütləq xarakterindən imtina etdi. Məlumdur ki, bəzi filosoflar var gücləri ilə gurultulu, lakin boş sözlər yığını vasitəsilə bu sadə nəzəriyyədən qorunmağa çalışırdılar.

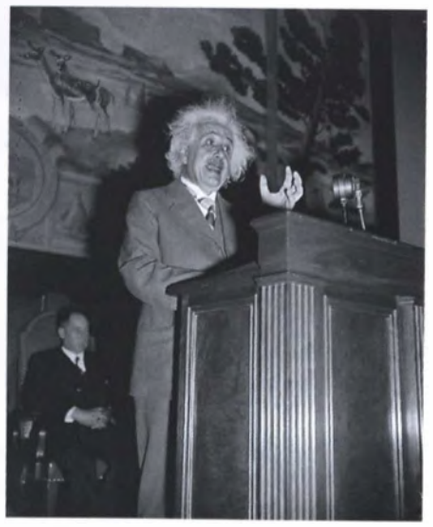
Digər tərəfdən, ən azı, xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin öz yaradıcı üçün – elektromaqnit sahəsinin Maksvell nəzəriyyəsi üçün oynadığı rol başa düşülmüşdür. Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi yaranana qədər elektrik və maqnit sahələrinə, onlar arasında Maksvell tənlikləri ilə təyin olunan sıx səbəbiyyət əlaqəsinə baxmayaraq, asılı olmadan mövcud olan sahələr kimi baxılırdı. Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi üzə çıxardı ki, həmin səbəbiyyət əlaqəsi əslində bu iki növ sahənin eyniliyinə uyğundur. Doğrudan da, fəzanın bir koordinat sistemində sırf maqnit sahəsi kimi təşkil edən eyni bir halı eyni zamanda nisbi hərəkətdə olan başqa bir koordinat sistemində elektrik sahəsi kimi təzahür edir və əksinə. Sahə nəzəriyyəsinin müxtəlif təsvirlərinin eyniliyini aşkara çıxaran, onun daxili məntiqi uyğunluğunu artıran bu növ münasibətlər xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin xarakterik xüsusiyyətləridir. Məsələn, xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi ətalət kütləsi və enerji anlayışlarının fundamental eyniliyini aşkar etdi. Bütün bunlar hamıya məlumdur və yalnız ona görə xatırladılır ki, nəzəriyyənin bütün inkişafında üstünlük təşkil edən birləşməyə, vəhdətə doğru meyli vurğulayaq.

Nisbilik nəzəriyyəsinin inkişafının ikinci dövrünə, ümumi nisbilik nəzəriyyəsi adlanan nəzəriyyəyə müraciət edək. Bu nəzəriyyə də indiyədək öz qənaətbəxş izahını almamış bir təcrübi fakta – ətalət və qravitasiya kütlələrinin eyniliyinə əsaslanır və ya, başqa sözlə, Qaliley və Nyuton dövründən yaxşı məlum olan bir fakta əsaslanır, o fakta ki, Yerin cazibə sahəsində bütün cisimlər eyni təcillə düşür. Ümumi nisbilik nəzəriyyəsi, bünövrə kimi, əsas kimi xüsusi nisbilik nəzəriyyəsindən istifadə edir və onun şəklini dəyişdirir: hərəkətin fiziki olaraq nə cürsə seçilə bilən heç bir halının mövcud olmadığının, yəni yalnız sürətin deyil, təcilin də mütləq qiyməti olmadığının qəbul edilməsi nəzəriyyənin başlanğıc nöqtəsini təşkil edir.

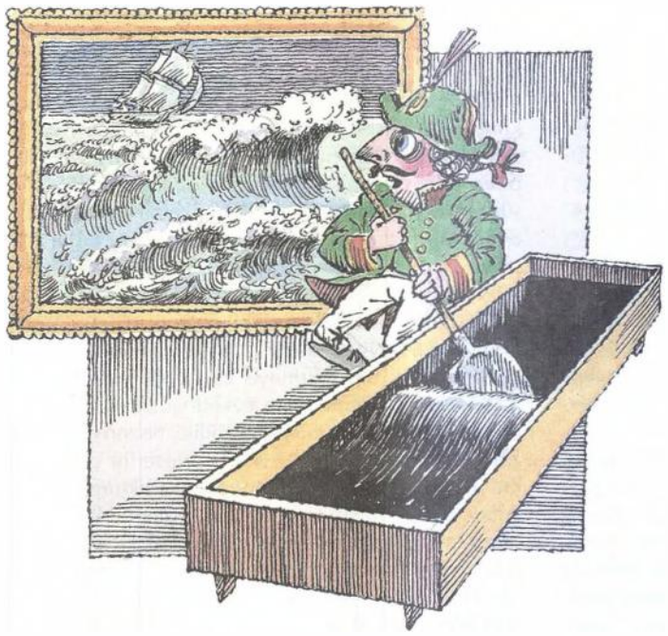
Bu, fəza və zaman haqqındakı təsəvvürlərin, xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi ilə bağlı olan şəkil dəyişmələrindən xeyli daha dərin şəkil dəyişməsini doğurur. Çünki əgər xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi hətta fəza və zamanı bir dördölçülü kontinuumda birləşdirməyə bizi məcbur etdisə də, bu nəzəriyyədə kontinuumun evklid xarakteri xeyli dərəcədə dəyişməz qalır. Ümumi nisbilik nəzəriyyəsində fəza-zaman kontinuumunun evklid xarakterini qəbul edən bu hipotez qalmalıdır. Kontinuumun strukturu riman fəzası adlanan fəzanın strukturu ilə təyin olunur.

Ümumi nisbilik nəzəriyyəsi qravitasiya sahəsinin dəqiq nəzəriyyəsidir; məlum oldu ki, bu sahə kontinuumun metrik xassələrilə müəyyən əlaqədədir. Nyuton dövründən bəri heç cür irəliləməmiş qravitasiya nəzəriyyəsi Faradeyin sahə konsepsiyasına qoşulmuş oldu. Bu o deməkdir ki, sahə qanununun heç bir ixtiyari seçimi edilməmişdir. Buna baxmayaraq, cazibə və ətalət eyni zamanda ayrılmaz vəhdətdə birləşmişdir.

(A.Eynşteynin 1929-cu ildə "Nyu-York Tayms" qəzetində çap olunmuş "Köhnə və yeni sahə nəzəriyyələri" məqaləsindən.)

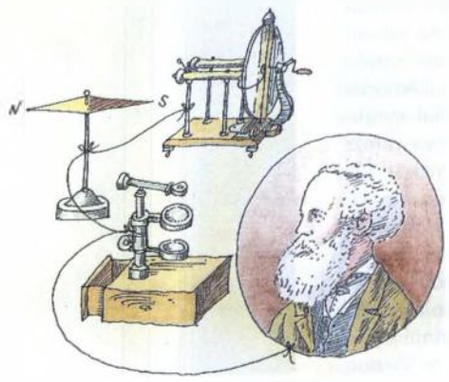


A.Eynşteyn.



Efirə çoxsaylı və ziddiyyətli "vəzifələr" həvalə etməklə XIX əsrin fizikləri efir konsepsiyasını (anlayışını) ölümə məhkum etdilər ki, bu da XX yüzilliyin əvvəlində baş verdi.

İlk dəfə Hendrik Lorens mikroskopik elektrodinamikanı işləyib hazırlayarkən anladı ki, sahə və maddə – materiyanın prinsipial müxtəlif formalarıdır. Efirə həmişə nə isə maddi mühit kimi baxıldığından, nəticədə sahələri efirdən də ayırdılar. Lorens efiri qarşılıqlı təsirlərin daşıyıcısı olmaq funksiyasından azad etsə də, bununla belə, efir ideyasının seçilmiş tərpənməz hesablama sistemi kimi qalmasına xeyli qüvvə sərf etdi. Əslində cisimlərin hərəkət istiqamətində miqyasların qısalması hipotezini Lorens həmin məqsədlə də irəli sürmüşdü, bu isə xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinə gətirib çıxardı.



Digər faktlar qrupu optikaya aiddir. İşığın dalğavari və korpuskulyar xassələrini uzlaşdırmağa çalışan Nyuton işıq korpuskullarına xüsusi hallar – "xəfif qayıtma və sınma hadisələrini" ayırıb vermişdi ki, bu da mexaniki sxemin əsas müddəalarına zidd idi. Sonralar Yunqun və Frenelin əsərlərində başqa nəzəriyyə işlənib hazırlandı. Bu nəzəriyyəyə görə işıq – efirin dalğavari həyəcanlanmasıdır. Dalğavari nəzəriyyə interferensiya və difraksiya hadisələrini daha tam izah etməyə imkan verdi. Bundan başqa, Frenel boş fəzada işığın yayılmasının düzxətli olduğunu dəqiq isbat etdi. İşığın Hüygens tərəfindən kəşf olunmuş polyarizasiyasını gözdən keçirən Frenel belə fərziyyə irəli sürdü ki, işıq dalğası eninə dalğadır. Maksvellin elektromaqnit sahəsi nəzəriyyəsi işığı elektromaqnit dalğaları ilə eyniləşdirdi. Məlum oldu ki, işıq dalğaları həqiqətən eninə dalğalardır.

Efiri, daha dəqiq, "efir küləyini" aşkar etmək üçün çox sayda, lakin həmişə uğursuz cəhdlər edilmişdir. Albert Maykelson və Edvard Morlinin apardıqları həlledici təcrübə 1887-ci ildə həyata keçirilmiş və mənfi nəticə vermişdir.

"Efir küləyinin" müşahidə olunmasının qeyri-mümkünlüyü haqqındakı tezisi Albert Eynşteyn xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi üçün əsas götürdü (1905-ci il). Bu nəzəriyyəyə görə heç bir seçilmiş (o cümlədən tərpənməz

EFİRİN NƏSİL TARİXİ

Rusiyalı nəzəriyyəçi fizik Moisey Aleksandroviç Markovun (1908-1994) sözlərinə görə, materiyanın dərin iç xassələri haqqındakı bizim müasir biliklərimiz qədim yunanların dünya haqqındakı biliklərindən müəyyən mənada çox da uzağa getməmişdir. Onlar fərz edirdilər ki, dünyada hər şey dörd ünsürdən – oddan, sudan, havadan və torpaqdan əmələ gəlmişdir. Biz isə hesab edirik ki, Kainatdakı bütün proseslər dörd növ qarşılıqlı təsirlə təyin olunur... Bunlar qədimlilərin həmin "dörd ünsürüdür". Markov işlərinin birində qədim və müasir ünsürləri müqayisə etmişdir (əlbəttə, kifayət qədər şərti). Onun fikrincə, güclü qarşılıqlı təsirə – "torpaq", zəif qarşılıqlı təsirə – "hava", elektromaqnit qarşılıqlı təsirə – "su", qravitasiya qarşılıqlı təsirə isə – "od" uyğundur. Fiziklərin, özünü müxtəlif şəraitlərdə müxtəlif qarşılıqlı təsirlər şəklində göstərən müəyyən bir vahid qarşılıqlı təsirin axtarışı ilə bağlı cəhdləri indiyədək həll olunmamış məsələ kimi qalır.

Məlumdur ki, Aristotel Levkippin və Demokritin boşluq anlayışına alternativ olaraq beşinci ünsür daxil etmişdi. Bu ünsür sonralar latınca *quinta essentia* ("beşinci mahiyyət") adını almışdır. Levkipp və Demokrit hələ e.ə. V əsrdə belə nəticəyə gəlmişdilər ki, dünyada hər şey daha sonra bölünməyən zərrəciklərdən – atomlardan və onları ayıran boşluqdan əmələ gəlmişdir. Yunanlar boşluğu yunanca "kenon" adlandırmışdılar; lakin fizikada latın sözü olan "vakuum" yaşadı. Demokritə görə, yalnız boşluğun sayəsində daşları və ağacları, dənizi və buludları və ümumiyyətlə, bütün varlığı əmələ gətirən atomların kombinasiyaları mümkündür. Yalnız atomlar arasında boşluğun olması çörək parçasını kəsməyə, toxanı torpağa sancmağa, suda üzməyə və havada hərəkət etməyə imkan verir. Zenonun öz aporiələrində aydın nümayiş etdirdiyi kimi, boşluqsuz heç bir dəyişiklik və heç bir hərəkət real deyildir.

Aristotelin boşluğa qarşı arqumentlərindən biri belədir: boşluqda cisimlər müqavimətsiz, deməli, sonsuz sürətlə hərəkət edə bilər. Bir halda ki, sonsuz sürət mövcud deyil, boşluq da mövcud deyil. Lakin nə torpağın, nə odun, nə havanın, nə də suyun olmadıqları yeri nəsə tutmalıdır. Ona görə də Aristotel "ilkin əsaslara" beşinci ünsürü, digər ünsürlərlə eyni-hüquqlu olmayan, müəyyən bir ilkin materiyanı, bütün şeylərin mahiyyətini, qalan təbiət elementlərinin təməlini əlavə etməli oldu.



Ola bilsin ki, Aristotel bu yeniliyin əhəmiyyətini dərk edərək, onun üçün qədim yunan mifologiyasında dərin kökləri olan "efir" adını seçmişdir. Əfsanələrə görə Efir yeraltı zülmət olan Erebeylə böyük Gecənin ittifaqının məhsulu kimi yaranmışdı; efir ən yüngül ünsür, allahların Olimp dağının zirvəsindəki məskəninə aid olan xüsusi havadır. Belə bir fikri Pifaqora aid edirlər ki, "Yer ətrafındakı hava – durğun və pisdir; bu havada olan hər şey ölümə məhkumdur, ali hava isə əbədi hərəkətdədir, saf və sağlamdır, onda olan hər şey əbədidir və ona görə ilahidir". Qədim yunan filosofu və riyaziyyatçısı havanı soyuq efir dənizi və ümumiyyətlə, suyu sıx efir adlandırmışdır; onun üçün ruh efirin – həm isti, həm də soyuq efirin bir hissəsidir və ruh gözəgörünməzdir, çünki efir gözəgörünməzdir... Efirin mifik nəsil tarixini davam etdirərək, yunanlar hökm edirdilər ki, Gündüzlə kəbin əlaqəsinə girərək, o, Yeri və Göyü, Dənizi və Okeanı və hətta yeraltı ölülər aləmini – Tartar doğurdu. Bir sözlə, dünyada, demək olar ki, hər şey öz mənşəyinə görə ilahi nəfəs almağa yararlı olan xüsusi mahiyyətə – Efirə borcludur. Aristotel efiri əbədi və ilahi adlandırmışdı, onun adını isə "həmişə qaçan" kimi açıqlamışdı.

Təbiət hadisələrinin təsvirində bu gün də öz aktuallığını itirməmiş olan iki keyfiyyətcə əks ideya – təmayül belə yarandı. Atomistik (korpuskulyar və ya diskret) ideyaya uyğun olaraq, maddi aləm çox kiçik, daha bölünməyən zərrəciklərdən – korpuskullardan, atomlardan əmələ gəlmişdir; bu zərrəciklər onları əhatə edən boşluqda hərəkət edir. Əksinə, kontinual (kəsilməz və ya "efir") ideyasının tərəfdarları materiyanın sonsuz bölündüyünü və bütün fəzanı kəsilməz olaraq doldurduğunu hesab edirlər. Fizika elminin sonrakı inkişafı bu iki təmayülün dəyişən uğurları fonunda baş vermişdir.

efirlə bağlı olan) hesablama sistemi mövcud deyildir, çünki bütün inersial hesablama sistemləri tamamilə bərabərhüquqludur. Bu prinsipin sayəsində Eynşteyn zərrəciklərin – yükdaşıyıcıların hərəkət qanunlarını və elektromaqnit sahəsinin Maksvell nəzəriyyəsi ilə təyin olunan inkişaf



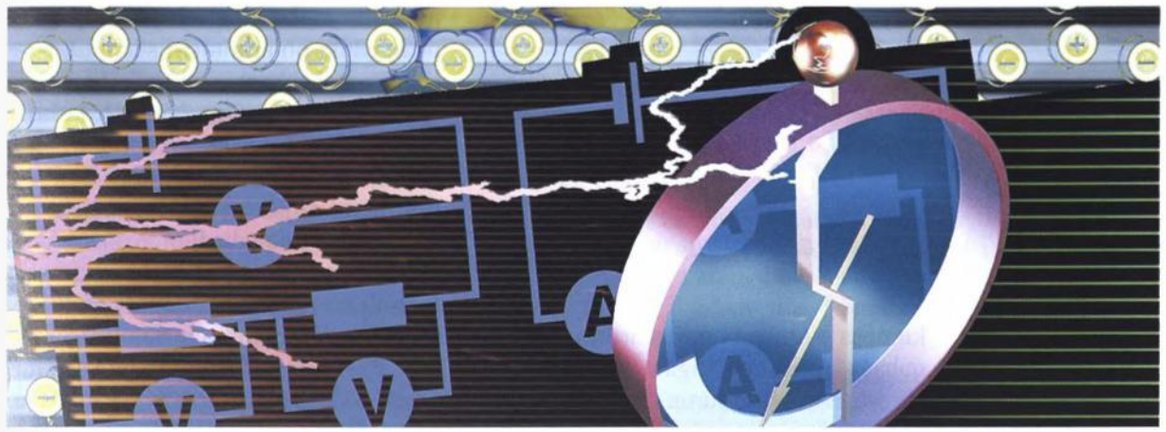
(təkamül) qanunlarını uyğunlaşdırdı. Zərrəciklərin Nyuton dinamikasına yenidən baxıldı və o, relyativistik tənliklərlə əvəz olundu. Nisbilik nəzəriyyəsi nə üçün zərrəciklərin qravitasiya və Kulon qarşılıqlı təsirlərinə baxarkən sahə konsepsiyası olmadan da keçinmək mümkün olduğunu başa düşməyə imkan verdi.

Nə qədər ki, söhbət qeyri-relyativistik proseslərdən gedir, sahə anlayışını daxil etməmək olar – kifayət qədər təqribi uzağatəsir konsepsiyası kifayətdir. Yaxına təsirə yalnız relyativistik fizikada mühüm ehtiyac yaranır. Beləliklə, efir konsepsiyası çərçivəsində yaranmış sahə təsəvvürləri tədricən köhnə efir ideyasını əvəz etdi.

1897-ci ildə ingilis fiziki Cozef Con Tomson (1856-1940) ilk elementar zərrəciyi – ən kiçik elektrik yükünün daşıyıcısı olan elektronu kəşf etdi. Məlum oldu ki, sonralar kəşf olunmuş bütün digər zərrəciklərin yükləri, bu ən kiçik yükün tam misllərdir.

XX əsrin başlanğıcına yaxın ətraf aləmin quruluşuna dair aşağıdakı baxışlar formalaşmış oldu: o, maddəni əmələ gətirən yüklü zərrəciklərdən (atomlardan və molekullardan) və fəzanı dolduran elektromaqnit sahəsindən əmələ gəlmişdir. Sonra dünyanın kvant-statistik mənzərəsi qalib gəldi: zərrəciklər – yüklərin daşıyıcıları, həmçinin onlar arasındakı qarşılıqlı təsirlərin daşıyıcıları – yenə də zərrəciklər, lakin başqa növ zərrəciklər mövcuddur. Elektronlar fotonlarla mübadilə edərək, nüvələrlə qarşılıqlı təsirdə olur; nüvələr isə öz aralarında yalnız elektromaqnit yolu ilə deyil (böyük məsafələrdə), həm də bilavasitə daha ağır zərrəciklərin – bozonların (pionların, ρ-mezonların və s.) mübadiləsi ilə qarşılıqlı təsirdə olurlar ki, bu da güclü qısatəsir radiuslu nüvə qüvvələrinin yaranmasına gətirib çıxarır.

XX-XXI əsrlərin qovuşuğunda, kəşf olunmuş zərrəciklərin sayı bir neçə yüzə çatdığı bir vaxtda Eynşteynin qeyri-xətti sahə konsepsiyası yenidən məşhurlaşdı: zərrəciklər hansısa bir (təbiəti hələ məlum olmayan) maddi sahənin laxtalarından ibarətdir, yəni kiçik fəza oblastında lokallaşmış törəmələrdir, xüsusən toqquşmalar zamanı zərrəciklərin qarşılıqlı çevrilməsi faktı bu nöqteyi-nəzərin xeyrinə dəlalət edir. Bir çox məşhur fiziklər: Lui de Broyl, Verner Heyzenberq, Dmitri İvanenko, Toni Skirm, Yakov Terletski, Lüdviq Faddeyev və b. zərrəciklərin qeyri-xətti sahə nəzəriyyəsinin müxtəlif variantlarına baxmışlar.



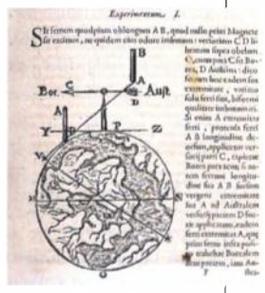
YÜKLƏR, CƏRƏYANLAR VƏ SAHƏLƏR

İLKİN TƏSƏVVÜRLƏR

ELEKTRİK VƏ MAQNETİZM HAQQINDA

Bu gün insanın yaxşı öyrənilmiş və bununla yanaşı, sirli olan elektrik hadisələri ilə daim əlaqəsi olur. İnsanların bu hadisələrlə tanışlığı hələ çox qədim dövrlərdə başlanmışdı: misirlilər və yunanlar ildırım boşalmalarını və onları müşayiət edən itiuclu metal əşyaların işıqlanmasını, elektrik skatlarının (çarxlarının) "hücumlarını" təsvir etmişlər (amma onları öz aralarında heç cür əlaqələndirmədən). Metal əşyaların iti uclarındakı işıqlanma orta əsrlərdə "müqəddəs Elmo işıqları" adını almışdı, çünki o, çox vaxt Fransada Müqəddəs Elmo kilsəsinin xaçlarında və şpillərində (binanın təpəsində uzun millər) müşahidə olunurdu. Yunla sürtüldükdən sonra kəhrəbanın yüngül cisimləri özünə cəzb etmək xassəsi lap çoxdan qeyd edilmişdi. Rəvayətdə deyilir ki, məşhur qədim yunan riyaziyyatçısı və filosofu Miletli Falesin gənc qızı, nə qədər cəhd etsə də, kəhrəba mili ona yapışmış tozcuqlardan və sapcıqlardan təmizləyə bilməmişdi: onlar yenidən və yenidən geriyə yapışırdılar.

Daha qədim anılma maqnitlərə (*yun.* "maq-ne tis" – "maqnitli") – dəmir əşyaları cəzb etməyə qadir olan maqnitli dəmir filizi parçaları aiddir. Maqnitdən kompas kimi istifadə edilməsinə dair ən ilkin məlumatlar e.ə. təqribən 1100-cü ildə tərtib olunmuş Çin salnamələrində vardır. Məsələn, imperator Xuanq Ti sıx dumanda arxadan düşmənə hücum edərək, onun üzərində qəti qələbə çalmışdı. Döyüşçülərə düzgün istiqamətlənməkdə sadə



Kompasın iş prinsipini izah edən qravüra. Maqnitin xassələrinə dair A.Kirxerin traktatından. Köln. 1643-cü il.

Maqnetit (maqnitli dəmir filizi) – dəmirin əsas filizi olan mineraldır. Təbiətdə Yerin sahəsi tərəfindən güclü maqnitlənib.

Maqnit dəmirə toxunduqda, onu yeni maqnitə çevirdiyinə görə, Sokrat (e.ə. təqribən 470-399) maqniti incəsənət adamlarını ruhlandıran muza (ilham mənbəyi) ilə müqayisə etmişdir; elə incəsənət adamlarını ki, onlar da öz növbəsində digərlərini ruhlandırırlar.

"Elektrik" termini (*yun.* "elektron" – "qatran", "kəhrəba") 1600-cü ildə ingilis təbiətşünası və kraliça I Yelizavetanın saray həkimi Uilyam Hilbert (1544-1603) tərəfindən daxil edilmişdir.

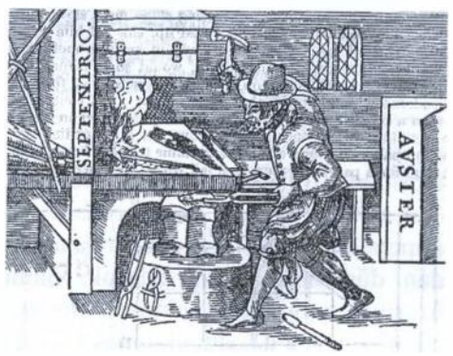


Cerolamo Kardano. Onun "Şeylərin zərifliyinə dair" traktatından qravüra. Bazel. 1560-cı il.

kompas – arabada quraşdırılmış və əli qabağa uzadılmış ağac adam fiquru kömək etmişdi; fiqurun daxilində maqnetit yerləşdirilmişdi. Əl həmişə cənubu göstərir.

Qədim yunan filosofu, Platonun dediyinə görə, "maqnit" adını onun həmvətənlisi, məşhur faciələr müəllifi Evripid (e.ə. təqribən 480-406) elmə daxil etmişdi. Bununla belə, öküz otaran Maqnus haqqında Böyük Plininin (23 və ya 24-79) 37 cildlik "Təbii tarix" əsərində xatırladığı gözəl bir rəvayət də maqnitlə bağlıdır. Maqnus naxırla birlikdə dolaşarkən, gözlənilmədən aşkar etmişdi ki, onun dəmir əl ağacı və altına dəmir mıxlar vurulmuş səndəlləri torpaqdan çətinliklə qopur.

Sonralar, aydınlaşdırıldığı kimi, yuxarıda sadalanan hadisələrin əksəriyyəti elektrik mənşəyinə malik olmuşdur. Lakin uzun müddət elektrik hadisələri maqnit hadisələrinin "kölgəsində" qalmışdır. Təbiətşünasları ilk növbədə məhz maqnitlər maraqlandırırdı; çünki onların təsiri stabildir, sürtülmüş kəhrəbanın elektrik xassələri isə tez yox olur. Ona görə də, kəhrəbadan təkcə fokuslar göstərmək üçün istifadə edirdilər, maqnitləri isə yalnız dəniz səyahətçiləri yox, həm də həkimlər tətbiq edirdilər.



Döymə üsulu ilə maqnitin hazırlanması. Şimal-cənub istiqamətində duran dəmir parçası çəkicin zərbələri altında Yerin sahəsi tərəfindən maqnitlənir. U.Hilbertin "Maqnit haqqında..." traktatından qravüra. 1600-cü il.

Maqnitin ilk elmi təsviri Pereqrin ləqəbli və "Maqnit haqqında məktub" (1269-cu il) traktatının müəllifi, fransız Pyer de Merikura məxsusdur. Onun tədqiqatlarının başlıca məqsədi maqnitlərin köməyilə "daimi işləyən maşın" yaratmaq idi. Daimi mühərrik yaratmaq mümkün olmadı, lakin Pereqrin müəyyən etdi ki, hər bir maqnitin iki qütbü – maqnit təsirinin ən güclü olduğu yerləri vardır; maqnitin eyniadlı qütbləri itələnir, müxtəlifadlı qütbləri isə cəzb olunur; yarıya bölünmüş maqnit iki maqnitə çevrilir, dəmir isə ona toxunduqda maqnitlənir.

Pereqrinin elektrik və maqnit hadisələrinin öyrənilməsi işindəki ardıcıllarından biri italyan riyaziyyatçısı, təbiətşünası və həkimi Cerolamo Kardano (1501 və ya 1506-1576) olmuşdur. Təcrübədə o inandı ki, cisimlərin elektrik qarşılıqlı təsirləri maqnit qarşılıqlı təsirlərindən xeyli fərqlənir. Məsələn, sürtülmüş kəhrəba müxtəlif maddələrdən olan yüngül cisimləri cəzb edə bilər, maqnit isə yalnız dəmiri cəzb edir. Öz müşahidələrinin nəticələri haqqında alim "Fərasətlilik haqqında" traktatında (1551-ci il) məlumat vermişdir.

SEYRDƏN ANLAMAĞA DOĞRU

Elektrikin və maqnetizmin tədqiq edilməsində ən böyük nailiyyətlərə XVI əsrdə Uilyam Hilbert nail olmuşdu. O, "Maqnit haqqında, maqnit cisimlər və böyük maqnit – Yer haqqında" əsərində (1600-cü il) özünün bütün sələflərinin işlərinə və 18 illik öz məxsusi axtarışlarına yekun vurmuşdur. Hilbertin xidməti ondadır ki, o, təbiət hadisələrini öyrənmək üçün eksperimental metoddan istifadə etmişdir. Bu metodun əsasında təcrübədən alınmış faktların təhlili dururdu; onları izah etmək üçün uyğun hipotezlər irəli sürülür, hipotezləri yoxlamaq üçün isə yeni eksperimentlər qoyulurdu. Dəqiq ölçmələr aparmaq üçün Hilbert sadə *elektroskop* (versor): kompas əqrəbinə oxşar olaraq, şaquli ox ətrafında fırlanan yüngül metal əqrəb düzəltmişdi. Versorun köməyilə tədqiqatçı müəyyən etmişdi ki, müxtəlif maddələr elektriklənmiş halda ola bilər.

Traktatda maqnitlərlə aparılan təcrübələr də təsvir olunmuşdur. Hilbertin çıxardığı ən maraqlı nəticə Yerin nəhəng maqnit olması idi. Sonralar



Uilyam Hilbert.

UİLYAM HİLBERTİN "MAQNİT HAQQINDA, MAQNİT CİSİMLƏR VƏ BÖYÜK MAQNİT – YER HAQQINDA. BİR ÇOX DƏLİLLƏR VƏ TƏCRÜBƏLƏRLƏ SÜBUT OLUNMUŞ YENİ FİZİOLOGİYA" TRAKTATI



"Maqnit haqqında..." traktatın birinci nəşrinin titul vərəqi.

Uilyam Hilbertin "Maqnit haqqında..." kitabı (1600-cü il) yeni elmin ilk monoqrafiyalarından biri olmuşdur. Başlıca dəlili avtoritetə – antik klassikin əsərinə və ya Əhdicədidə (Müqəddəs yazıya) istinad etməkdən ibarət olan köhnə, skolastik elmdən fərqli olaraq, yeni elm müşahidəyə, eksperimentə və riyazi hesablamaya əsaslanırdı. Hilbert müqəddimədə "maqnitin fəlsəfəsilə məşğul olan xeyirxah oxucuya müraciət edərək", öz kitabının məqsədi haqqında aydın deyir: "Sirləri tədqiq edərkən və şeylərin gizli səbəblərini axtararkən dəqiq təcrübələr və onlara əsaslanan dəlillər sayəsində, təkcə yalnız fərziyyələrin doğruya bənzərliyinə və vulqar filosofların mülahizələrinə söykənən sübutlara nisbətən daha güclü sübutlar alındığına görə, biz indiyədək tamamilə naməlum olan böyük bir maqnitin – ümumi anamızın [Yerin] əsil mahiyyətini və bu kürənin çox gözəl və nəzərə çarpan qüdrətini aydınlaşdırmaq üçün hamıya məlum olan daş və dəmir maqnitlərdən, maqnit cisimlərdən və Yerin bizə ən yaxın olan, əlimizlə yoxlamaq və hisslərimizlə qavramaq mümkün olan hissələrindən başlamağı; sonra bunu maqnitlərlə olan əyani təcrübələrlə davam etdirməyi və beləliklə, ilk dəfə olaraq Yerin daxili hissəsinə nüfuz etməyi öz qarşımıza məqsəd qoyduq...

Mən... maqnit haqqında elmin bu əsaslarını – fəlsəfənin yeni növünü... bilikləri yalnız kitablarda deyil, həm də şeylərin özündə axtaran həqiqi filosoflar, nəcib xadimlər olan sizə tapşırıram. Əgər kimsə mülahizələrlə və paradokslarla razılaşmaq istəmirsə, onda o, qoy yenə də təcrübələrin və kəşflərin (başlıca olaraq məhz onların sayəsində hər cür fəlsəfə çiçəklənir) böyük çoxluğuna müraciət etsin. Bu təcrübələr və kəşflər bizim böyük səylərimiz, yuxusuz qalmağımız və xərclərimiz hesabına düşünülüb tapılmış və həyata keçirilmişdir. Onlardan həzz alın və əgər bacarırsınızsa, onlardan yaxşı istifadə edin. Başa düşürəm, köhnəyə – yeni görkəm, sönənə – parıltı, qaranlığa – aydınlıq, zəhlətökənə – zəriflik, şübhə doğurana – yəqinlik vermək necə çətindir, lakin ümumi fikrin əksinə olaraq, yeni və eşidilməmiş olan bir şeyə nüfuz, etibar qazandırmaq və onu əsaslandırmaq daha da çətindir".

Hilbertin əsərinə alimin apardığı 600-dən çox təcrübənin təsviri daxil idi. Onların nəticələrini təhlil edərək, tədqiqatçı müəyyən etdi ki, maqnitin həmişə iki qütbü – cənub və şimal qütbləri vardır (hətta onu mişarlamaqla da yalnız birqütblü maqnit almaq qeyri-mümkündür), həm də eyniadlı qütblər itələnir, müxtəlifadlı qütblər isə cəzb olunur. Yerin modelinin – terellin (maqnitlənmiş dəmirdən hazırlanmış kiçik kürənin) maqnit xassələrini öyrənərək, Hilbert mühüm bir kəşf etdi: bizim planet böyük maqnitdir. Maqnitlənmiş miniatür əqrəb, kompasın əqrəbi Yerin qütbünü göstərdiyi kimi, terellin qütbünü göstərirdi.

Müəllifin müasiri və həmkarı Eduard Rayt əsərə yazdığı "Tərifəlayiq ön söz"də "ən hörmətli və elmli insan olan Uilyam Hilbertə, görkəmli tibb doktoruna və maqnitin fəlsəfəsinin atasına" müraciət edərək qeyd etmişdi: "Sənin maqnit haqqındakı bu kitabların, əyanların məqbərəsi üzərinə qoyulmuş heykəllər kimi, sənin məqbərən üzərinə qoyulacaq heykəlindən daha çox sənin adının əbədiləşməsinə səbəb olacaqdır". Bununla razılaşmamaq qeyri-mümkündür

10933
Azərbaycan Respublikası Prezidentinin İşlər İdarəsi
PREZİDENT KİTABXANASI



▲
Otto fon Gerike.



▶
O. fon Gerikenin əsərinin titul vərəqi. Amsterdam. 1672-ci il

Qaliley etiraf etmişdi ki, Hilbertin traktatında bu onu hər şeydən çox valeh etmişdir: belə çıxırdı ki, kosmik proseslər və Yerdəki proseslər eyni qanunlara tabedir – deməli, kosmik miqyasdakı hadisələri laboratoriyada da öyrənmək olar.

Hilbertin davamçıları eksperimentin texnikasını təkmilləşdirməkdə davam etmişlər. 1672-ci ildə alman şəhəri Maqdeburqun burqomistri (bələdiyyə rəisi) Otto fon Gerike (1602-1686) "Boş fəza ilə yeni, Maqdeburq təcrübələri" adlı kitab nəşr etdirdi.

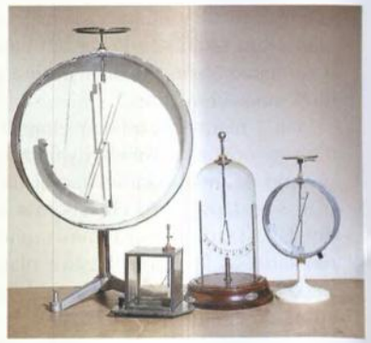
Orada ilk *elektrik maşınının* – əridilmiş kükürddən hazırlanmış və dəmir oxa taxılmış kürənin təsviri verilmişdi. Fırlanan kürənin ovuclarla sürtülməsi çox güclü elektrik effektləri yaradırdı, kürəyə birləşdirilmiş kətan ip isə başqa cisimləri elektrikləndirmək qabiliyyəti qazanırdı. Elektrikin məsafəyə ötürülməsi (düzdür, cəmi-cümlətanı yarım metr məsafəyə) beləcə aşkar olundu. Bir neçə on il keçdikdən sonra, 1706-cı ildə ingilis Frensis Qauksbi (1666-1713) kükürd küreni şüşə kürə ilə əvəz etməklə, daha güclü elektriklənməyə nail oldu.

Gerikenin və Qauksbinin nailiyyətləri sayəsində elektrik təcrübələri hamı üçün əlçatan oldu və yeni kəşflər özlərini çox gözlətmədi. 1729-cu ildə ingilis Stefen Qrey (1666-1736) təsirlə (bilavasitə kontakt olmadan) elektriklənmə hadisəsini və elektrikləndirmə qabiliyyətinin bir neçə yüz fut məsafəyə ötürülməsini tədqiq etdi. Bundan başqa, Qrey müəyyən etdi ki, maddələr iki sinfə bölünür: elektriki daşımağa qadir olan keçiricilər və bu xassəyə malik olmayan izolyatorlar. Lakin elektrik effektlərinə dair məlumatların sistemləşdirilməsində ən böyük nailiyyətlərə fransız fiziki Şarl Fransua Dyufe (1698-1739) müvəffəq oldu. O, elektrik hadisələrini öyrənmək üçün böyük bir proqram tərtib etdi və nəticədə iki növ elektriki kəşf etdi: "şüşə elektriki" və "qatran elektriki" (indi onları müsbət və

Keçirici cismi elektrik sahəsində yerləşdirsək, təsirlə elektriklənmə və ya elektrostatik *induksiya* (*lat.* inductio – "həyəcanlanma") müşahidə olunar. Naqil polyarlaşır, onun müxtəlif hissələri işarəcə əks yüklər qazanır, lakin bütövlükdə elektrikcə neytral qalır.



İlk elektrik maşını.
O. fon Gerikenin əsərinə illüstrasiya.



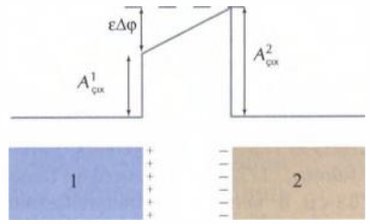
Müasir elektroskoplar və elektrometrlər.

ELEKTRİKLƏNMƏ... LAKİN SÜRTÜNMƏ İLƏ YOX!

Hələ qədim yunanlara məlum olan "əlin törətdiyi", "əl ilə yaradılan" elektrik hadisəsinin – *sürtünmə ilə elektriklənmənin* – təbiətini yalnız 1969-cu ildə müəyyən etmək mümkün olmuşdur. Rus fiziki M.İ.Kornfeld aydınlaşdırdı ki, burada sürtünmə yalnız dielektriklərin səthlərini daha sıx yaxınlaşdırmaq üçün lazımdır.

Bizi əhatə edən cisimlər, adətən, elektrikcə neytraldır, yəni onlardakı mənfi və müsbət yüklər yüksək dəqiqliklə bir-birini kompensasiya edir. Cismin daxilində elektronların istilik hərəkəti və sürətlərə görə paylanması nəticəsində onların bir hissəsi cisimdən kənara çıxmaq üçün kifayət qədər kinetik enerjiyə malik olur. Belə enerji *termoelektron çıxış işi* $A_{çıx}$ adlanır və müxtəlif cisimlər üçün müxtəlif qiymətlərə malikdir. Nəticədə cisimlərin səthi yaxınlığında elektron qazı əmələ gəlir. Adi şəraitdə dinamik tarazlıq baş verir: cismi tərk edən və ona daxil olan elektronların sayı təxminən bərabər olur. Cisimlərin səthləri o qədər sıx yaxınlaşır ki, qalınlığı $d = 10^{-10}$ m olan elektron təbəqələri bir-birini örtür, onda elektronlarla mübadilə baş verir: elektronlar çıxış işi az olan cisimdən çıxış izi çox olan cismə keçir.

Əgər cisimləri elə aralaşdırsaq ki, onların elektron təbəqələri bir-birini örtməsin, onda naqillərdə (yüklərin mütəhərrikliyi sayəsində) yüklər qalmır, dielektriklərdə isə yüklər – qiymətcə bərabər və işarəcə əks yüklər meydana çıxır. Ona görə də U.Hilbert almazı, şüşəni, yaqutu, surğucu elektrik cisimləri, yəni kəhrəbaya bənzər cisimlər, bütün metalları isə qeyri-elektrik cisimləri adlandırmışdır. Beləliklə, sürtünmə ilə elektriklənmə mənasız fikirdir, bilavasitə *cisimlərin kontaktı ilə elektriklənmə* demək daha düzgündür.



Cisimlərin kontaktı ilə elektriklənmə.

Müxtəlif çıxış işli $A^1_{çıx} < A^2_{çıx}$ cisimlər toxunan zaman elektronların 1 cisminidən 2 cisminə keçidi, elektronların sonrakı hərəkətinə mane olan kontakt potensiallar fərqi $|\varepsilon\Delta\phi|$ yarandıqdan sonra kəsilir. Bu zaman 1 cismi müsbət yük, 2 cismi isə mənfi yük aparır.

KONDENSATOR

Kondensatorun yaradılma tarixini adətən Niderland fiziki, Leyden universitetinin professoru Piter van Muşenbrukun (1692-1761) təcrübələri ilə əlaqələndirirlər. O, elektrik yükünü toplamaq üçün içərisində su olan qabdan istifadə etmişdir.

Sonralar içərisində su olan qab daxilində və xaricində metal folqadan ibarət köynəkləri olan şüşə banka ilə əvəz olundu. Bencamin Franklin müstəvi kondensatorlar hazırladı və effekti gücləndirmək üçün onları batareyada paralel birləşdirdi. Turin universitetinin professoru, "Süni və təbii elektrik haqqında" ensiklopedik əsərin (1753-cü il) müəllifi Cambattista Bekkaria (1716-1781) köynəkləri şüşə, sürğuc, kükürd, qatran ilə ayrılmış müstəvi kondensatorlar düzəldirdi. O, elektrik müqaviməti anlayışını elmə daxil etmiş və ilk dəfə nümayiş etdirdi ki, naqillərdə elektrik yükü səth üzrə paylanır. Bekkaria aşkar etdi ki, müxtəlif maddələrlə "içi doldurulmuş" ("müxtəlif içlikli") kondensatorların yük toplamaq qabiliyyəti eyni deyildir. 1756-cı ildə Peterburq Akademiyasının üzvü Frans Ulrix Teodor Epinus (1724-1802) göstərdi ki, Leyden bankasının toplama xassəsi elektrik mayesinin bir köynəkdən digərinə axıb keçə bilməməsi ilə bağlıdır və buna əsasən hava kondensatoru quraşdırdı.



Rahib Nollenin elektrikə aid təcrübələri. Paris. XVIII əsrin əvvəli.

"Elektrik yükü" termininin yaranmasına görə biz B.Franklinə borcluyuq. Kondensatora da, batareyaya da adı o vermişdir. Ən birinci kondensatoru fransız fiziki rahib Jan Antuan Nolle (1700-1770) Leyden bankası adlandırmışdır.

BENCAMİN FRANKLİN

Paris müasir İncəsənət Muzeyində fransız rəssamı Raul Dyüdşin "Elektrik pərisi" adlı nəhəng (60×10 m) rəsm əsəri də vardır. Burada Falesdən tutmuş Edisona və Lorensə qədər elektrik sahəsində çalışan alimlər və ixtiraçılar təsvir olunmuşlar. Onların arasında Bencamin Franklinin (1706-1790) şəxsiyyəti tamaşaçıların diqqətini cəlb edir. O, dövlət xadimi və siyasi xadim, diplomat, maarifçi ABŞ-ın Müstəqillik Bəyannaməsinin və Konstitusiyasının yaradıcılarından biri olmaqla, həm də ixtiraçı və ilk Amerika fiziki idi. Onun eksperimentləri və kəşfləri haqqında Avropanın elm aləmi danışırdı.

Franklinin fəaliyyət dairəsi həqiqətən hüdudsuzdur. O, Şimali Amerika müstəmləkələrinin Böyük Britaniyadakı diplomatik elçisi, ABŞ-ın Fransadakı diplomatik nümayəndəsi vəzifələrini tutmuş, 1778-ci il Amerika-Fransa müqaviləsinin və 1783-cü il Versal sülh müqaviləsinin bağlanmasında iştirak etmişdir. 1785-ci ildə Franklin Pensilvaniya ştatının Qanunverici Məclisinin sədri olmuşdur.

Franklinin maarif sahəsindəki xidmətləri heç də az əhəmiyyətli deyildir. O, Filadelfiyada öz şəxsi mətbəəsində "Pensilvaniya qəzeti" nəşr etdirmiş, Şimali Amerika müstəmləkəsində ilk ümumi kitabxana, Pensilvaniya universitetinin, Amerika Fəlsəfə Cəmiyyətinin əsasını qoymuşdur.

Öz-özünə öyrənmiş alim Franklin o dövrün elmində hökmran olan ehkamların və dəbdə olan cərəyanların tərəfdarı olmamışdı. Nyutonun "Natural fəlsəfənin riyazi əsasları"nı və "Optika"sını dərindən öyrənərək, o, bu böyük əsərlərin yalnız məzmununu yox, həm də stilini, üslubunu mənimsəmişdi. Franklinin təcrübələri öz mənasına görə gözəl, yerinə yetirilməsinə görə sadə və nəticələrinə görə isə inandırıcıdır. O, bərk cisimlərin, xüsusilə metalların istilik keçirməsindən tutmuş, səsin havada və suda sürətinin ölçülməsinə qədər, fizikanın müxtəlif problemlərilə maraqlanırdı. Ancaq ona ən çox şöhrəti elektrikə aid tədqiqatları qazandırdı. Franklin müstəvi kondensator (dielektrik qatı ilə ayrılmış iki metal lövhə), ildırımötürən, qənaətli soba (Franklin sobası) ixtira etmiş, elektrik qığılcımı ilə barıtın partladılması üsulunu təklif etmişdir.

Franklin elm tarixinə "ildırımı göylərdən yerə endirmiş" eksperimentator kimi daxil olmuşdur. Nazik məftil vasitəsilə Leyden bankasına birləşdirilmiş hava çərpələngi buraxmaqla, 1752-ci ildə Franklin göstərdi ki, "göy" elektriki çərpələngi "yer" elektrikindən heç də pis olmayan yükləməyə qadirdir. Atmosfer elektriklə Yer elektrikinin müxtəlif təbiətli olmasına dair şübhələri aradan qaldıraraq, o, ildırımın elektrik təbiətli olduğunu müəyyən etdi.

Elektrik yükü anlayışı da Franklinin əsərlərinə gedib çıxır. 1750-ci ildə o, elektrik hadisələrinin vahid nəzəriyyəsini işləyib hazırlamışdır. O dövrdə yayılmış iki maye nəzəriyyəsi elektrik hadisələrinin rəngarəngliyini (müxtəlifliyini) bu mayelərin axıb gəlməsi və axıb getməsi ilə izah edirdi. Franklin isə bütün cisimlərin içərisindən maneəsiz keçən bir "elektrik materiyasının" mövcud olduğunu deyirdi. Cisimdə onun artıqlığı ona səbəb olur ki, cisim müsbət yük alır. Elektrik mayesinin çatışmaması cismin mənfi yükü kimi qavranılır.

London Kral Cəmiyyətinin üzvü P.Kollinsona Franklinin ona ünvanladığı məktubları çap etdirdiyinə görə, Avropanın elmi dairələrində Franklinin adı geniş şöhrət tapmışdı. Franklin bu məktubunda öz tədqiqatları haqqında müntəzəm olaraq dostuna məlumat verirdi. Mixail Vasilyeviç Lomonosov amerikalı həmkarının nailiyyətlərini yüksək qiymətləndirirdi. Lakin iki maye nəzəriyyəsinin tərəfdarı olan fransız təbiətşünası rahib Jan Antuan Nolle dərhal inanmamışdı ki, uzaq Filadelfiyada "hansı isə bir" Franklin yaşayır və çox maraqlı eksperimentlər aparır. O, böyük amerikalının məktublarının nəşrini öz düşmənlərinin və bədxahlarının məkrli fitnəsi kimi qəbul etmişdi.

Bencamin Franklinin Amerika xalqı qarşısındakı xidmətləri o qədər danılmazdır ki, o, hətta Birləşmiş Ştatların milli ləyaqətinin özünəməxsus meyarına çevrilmişdir: axı, 100 dollarlıq kupyuranı bu qeyri-adi insanın portreti bəzəyir.



Bencamin Franklin oğlu ilə təcrübə aparır.

mənfi elektrik yükləri adlandırırlar); birinci olaraq qarşılıqlı elektrik təsirlərini tədqiq etdi və sübuta yetirdi ki, elektriklənmiş eyniadlı cisimlər birbirindən itələnir, elektriklənmiş əksadlı cisimlər isə cəzb olunur. Dyufe eksperimentlərində artıq elektroskopdan yox, yükün miqdarını ölçməyə imkan verən *elektrometrdən* istifadə etmişdi. "Keçirici" və "izolyator" terminlərini 1742-ci ildə ingilis fiziki Jan Teofil Dezaqüle (1683-1744) işlətmişdi. Ona qədər dielektrikləri sürtünmə ilə elektrikləndirmək mümkün olmayan "qeyri-elektrik" keçiricilərinin (naqillərin) əksinə olaraq "elektrik cisimləri" adlandırırdılar.

KULON QANUNUNA NECƏ GƏLİB ÇIXMIŞLAR

O dövrdə elektrikin Franklin nəzəriyyəsindən başqa digər nəzəriyyələri də mövcud idi: məsələn, ingilis Robert Simon müsbət və mənfi olmaqla iki elektrik mayesi haqqında danışırdı. Bu mayelərin axıb gəlməsi və axıb getməsi elektrik hadisələrinin rəngarəngliyini, müxtəlifliyini təyin edirdi. Lakin istənilən baxışın tərəfdarları bir şeydə həmrəy idilər: elektrik qarşılıqlı təsirinin miqdarı qanununu müəyyən etmək lazımdır.

Buna ilk addım Bencamin Franklinin "Bekkaria quyusu" ilə təklif etdiyi və sonralar bir çox tədqiqatçılar tərəfindən təkrar edilmiş təcrübə oldu: izoləedici altlıq üzərində olan içi boş metal qab – "quyu" sınaq cisminin (uzun izoləedici çubuğa bərkidilmiş kiçik metal kürəciyin) köməyilə yüklənirdilərdi. Sınaq cisminin özü yükü elektroforun diskindən alırdı. Sınaq cismi ilə qaba daxildən toxunduqda, cisim özünün bütün yükünü qabın xarici divarına verirdi və bundan sonra qabla heç bir qarşılıqlı təsirdə olmurdu. Sınaq cismi ilə qabın xarici



H.Kavendişin təcrübə sxemi.

ELEKTROFOR ELEKTRİK STANSİYASININ ƏCDADIDIR

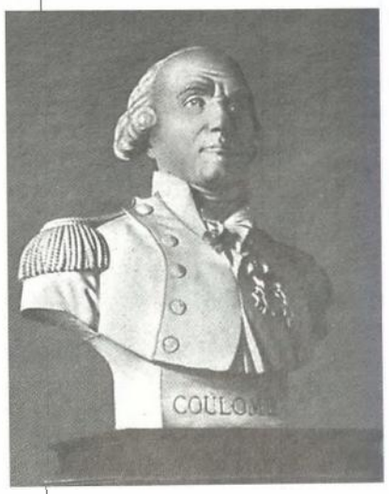
1759-cu ildə Frans Epinus elektrostatik induksiyaya aid eksperiment təsvir etmişdi: əgər (müsbət) elektriklənmiş şüşə çubuğa bürünc xətkeşin bir ucunu yaxınlaşdırsaq, həmin ucda mənfi yük, o biri ucda isə müsbət yük yaranacaqdır. Eyni prinsip induksiyalı (kontaktsız) elektrostatik maşının iş prinsipinin əsasında durur. Elektrostatik maşının ilkin nümunəsi Alessandro Voltun elektroforu olmuşdur.

Bu sadə cihaz surğuc döşəkcədən və şüşə dəstəyi olan metal diskdən ibarətdir. Diski xəzlə sürtünmüş döşəkcənin üzərinə qoyurdular. Diskin xarici tərəfinə barmaqla toxunmaqla, mənfi yükü götürürdülər və disk müsbət yüklənirdi. Prosesi dəfələrlə təkrar etmək mümkün idi. Voltun elektroforu uzun müddət fizika laboratoriyalarında (ən məşhur) geniş yayılmış cihaz olmuşdur.

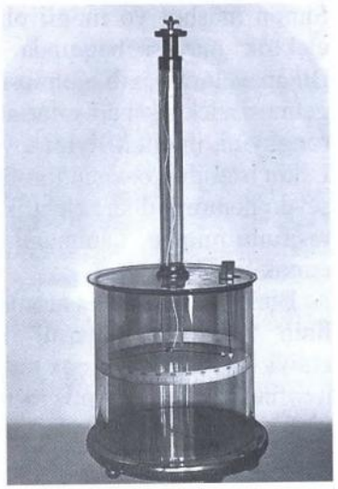


Elektrostatik maşın.





▲ Şarl Oqyusten Kulon.



▶ Kulonun fırlanma tərəzisi. Paris. 1785-ci il.

səthinə toxunduqda isə, yükün yalnız bir hissəsi qaba verilirdi və sınaq cismi divardan itələnirdi. Bu hadisəni izah etmək üçün rusiyalı fizik Frans Ulrix Teodor Epinus fərz etmişdi ki, elektrik mayesinin (müasir terminologiyaya görə, elektrik yüklərinin) kiçik hissələri bu yüklərin miqdarı ilə düz mütənasib olan qüvvə ilə bir-birini itələyir: $F \sim q_1 q_2$. 1771-ci ildə ingilis fiziki Henri Kavendiş (1731-1810) belə fikir irəli sürdü ki, yüklər arasındakı qarşılıqlı təsirin məsafədən asılılığın qüvvət üstlü xarakterlidir: $F \sim r^{-n}$, burada n – müsbət ədəddir. Hesablamalar vasitəsilə o, tezliklə təsdiq etdi ki, Franklin-Bekkaria təcrübəsində yüklərin qabın ancaq xarici səthində toplanması yalnız $n=2$ olduqda mümkündür. Onda qarşılıqlı təsir qanunu aşağıdakı şəkli alır:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

(k – mütənasiblik əmsalıdır).

Kavendiş o dövrlər üçün çox dəqiq olan və sonralar bütün fizika dərsliklərinə daxil edilən bir təcrübə apardı. Alim metal kürə və onu kip əhatə edən iki metal yarımsfera götürdü. O, küreni yükləyib, yarımsferaları onun üstünə qoydu, sonra isə onları kürədən ayırıb uzaqlaşdırdı. Bu zaman kürə öz yükünü tam itirdi. Deməli, doğrudan da, yüklənmiş naqilin bütün yükü onun səthində yerləşir. Buna baxmayaraq, Kavendiş belə hesab etmişdi ki, aldığı məlumatlar kifayət deyil və öz nəticələrini çap etdirməmiş, onları yalnız gündəliyinə etibar etmişdi. Ona görə də iki yükün qarşılıqlı təsirini təsvir edən qanun fransız hərbi mühəndisi Şarl Oqyusten Kulonun (1736-1806) adını daşıyır. Kulon əvvəlcə iplərin yalnız fırlanma deformasiyalarına aid tədqiqatları ilə tanınırdı. Kulon bu deformasiyaların qanunlarını ətraflı surətdə öyrənərək, çox kiçik qüvvələri: mayelərdə sürtünməni, bərk cisimlərin diyirlənmə və sürüşmə sürtünmələrini ölçməyə imkan verən məşhur fırlanma tərəzisini düzəltdi. O, 1785-ci ildə fırlanma tərəzisinin köməyilə elektrik və maqnit qüvvələrini tədqiq etdi. O, eyniadlı yüklərin itələmə qüvvəsini ölçməkdən başladı və sonralar onun adını daşıyan qanuna gəlib çıxdı. Sonralar məlum oldu ki, bu qanun əksadlı yüklərin cazibəsi halında da doğrudur. Eksperimentin etibarlılığı üçün Kulon "kiçik rəqslər metodunu" işləyib hazırladı və tətbiq etdi. Bu metod sistemin tarazlıq vəziyyəti yaxınlığındakı rəqslərinin tezliyinin Kulon qanunundakı qüvvə üstün asılılığını əsaslandırdı.

Kulon qanununu vektorial şəkildə də yazmaq olar. Qüvvənin istiqamətini işarə etmək üçün, adətən yükləri birləşdirən $\vec{r}$ radius-vektoru boyunca yönələn vahid uzunluqlu $\vec{e}_r$ vektorundan istifadə edirlər:

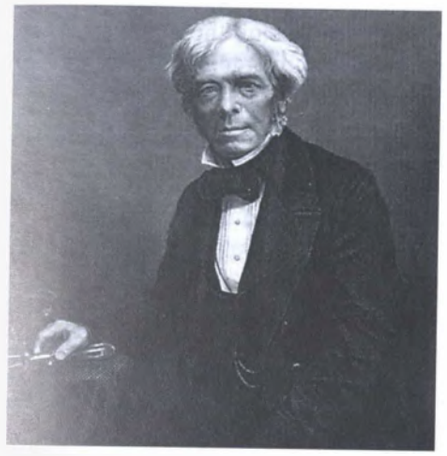
$\vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{r}$ (r – radius-vektorun uzunluğudur, yəni yüklər arasındakı məsafədir). Onda bir yükə digəri tərəfindən təsir edən qüvvə belə yazılar:

$$\vec{F} = -k\frac{q_1 q_2}{r^2}\cdot\frac{\vec{r}}{r} = -k\frac{q_1 q_2}{r^3}\vec{r}$$

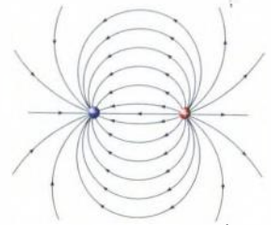
($\vec{r}$ vektorunu tədqiq olunan yükdən təsiri baxılan yükə tərəf çəkirlər; mənfi işarəsi qüvvənin istiqamətini, cazibəni və ya itələməni nəzərə alır).

ELEKTROSTATİKANIN ƏSASLARI

Az-az olur ki, tədqiqatçı yeni kəşf etdiyi qanunun mahiyyətini başa düşməsin. Lakin Kulon qanunu ilə məhz bu cür olmuşdur: eksperimentator yüklərin necə və nə üçün qarşılıqlı təsirdə olduğu haqqında düşünməmiş, qarşılıqlı təsirin yalnız xarici təzahürünü – qüvvəni öyrənmişdir. Ümumdünya cazibə hadisəsini təsvir edən Nyuton da öz vaxtında eyni cür hərəkət etmişdi; doğrudur, böyük ingilis alimi öz yanaşmasının məhdudluğunu dərk edirdi. O yazmışdı: "...bir cisim digərilə məsafədən boşluq vasitəsilə kənar heç nəyin iştirakı olmadan qarşılıqlı təsirdə ola bilər, ...təsir və qüvvə nəyinsə vasitəsilə birindən digərinə ötürülə bilər – bu, mənə... mənasız görünür".



Nə Nyutona, nə də Kulona elektrikin və qravitasiyanın sirlərini açmaq



Qiymətcə bərabər və işarəcə əks olan iki yükün elektrik sahəsi.

◀ Maykl Faradey.

ELEKTRİK TUTUMU

Qiymətcə bərabər, işarəcə əks $Q_1 = Q$, $Q_2 = -Q$ yükləri daşıyan və φ_1, φ_2 potensiallarına malik olan, bir-birindən dielektriklə ayrılmış iki keçirici cismə – elektrik kondensatoruna baxaq. Belə sistem üçün yeni xarakteristika – elektrik tutumu anlayışı daxil etmək olar:

$$C = \frac{Q}{U},$$

burada $U = \varphi_2 - \varphi_1$ – cisimlərin (kondensatorun köynəklərinin) potensiallar fərqi və ya kondensatordakı gərginlikdir. "Gərginlik" (iki nöqtədəki və ya iki naqildəki potensialların fərqini işarə etmək üçün) və "elektrik tutumu" terminlərini 1778-ci ildə italyan fiziki Alessandro Volta daxil etmişdir. BS-də gərginlik voltlarla (V), tutum isə faradlarla (F) ölçülür. 1F = 1 Kl/1V. Bu çox böyük vahiddir: 1 farad təxminən Yerin elektrik tutumudur. SQS sistemində tutum sm-lərlə ölçülür:

$$1\ \text{F} = (2{,}99792458)^2 \cdot 10^{11}\ \text{sm}.$$

Bəzən tək naqilin tutumu anlayışından istifadə etmək əlverişlidir; bu zaman ikinci naqil kimi potensialı $\varphi = 0$ olan sonsuz radiuslu sferaya baxırlar. Belə sfera bu cür naqilin elektrik sahəsinə heç cür təsir etmir və ona görə də, tərifə uyğun olaraq, onun tutumu

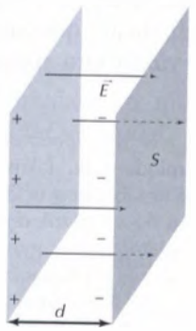
$$C = \frac{Q}{\varphi - \varphi_\infty} = \frac{Q}{\varphi}.$$

Xüsusi halda, r radiuslu keçirici kürənin potensialı $\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$ (BS-də) və ya $\varphi = \frac{Q}{r}$ (SQSE-də). Deməli, kürənin tutumu BS-də $C = 4\pi\varepsilon_0 r$, SQSE-də isə $C = r$-dir, yəni kürənin tutumu onun radiusuna bərabərdir.

Yükü Q olan kondensatorda toplanmış elektrik sahəsinin W_e enerjisi nəyə bərabərdir? Tutaq ki, kondensator boşalır, ΔQ yükü isə bir lövhədən digərinə axır. Bu zaman elektrik sahəsi aşağıdakı işi görür:

$$\Delta A = \Delta Q \cdot U = \Delta Q(Q/C) = \Delta(Q^2/2C) = \Delta W_e,$$

buradan kondensatordakı elektrik sahəsinin enerjisini tapırıq:

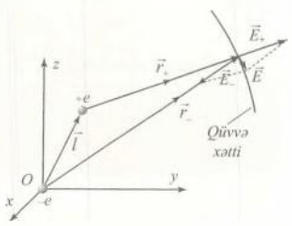


$$W_e = Q^2/2C.$$

Hər birinin sahəsi S olan, bir-birindən d məsafəsində yerləşən iki yüklənmiş lövhələr arasında bircins $\vec{E}$ elektrik sahəsi yaranır. Belə müstəvi kondensator $C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ tutumuna malik olur.

DİPOLLAR VƏ DİELEKTRİKLƏR

Praktik olaraq istənilən atom (və ya molekul) elektrik sahəsinə düşdükdə kiçik dipola çevrilir: bütün müsbət yüklər (nüvə və ya nüvələr) bir tərəfə, mənfi yüklər (elektronlar) isə digər tərəfə toplaşmağa çalışır. Adətən elektrik qüvvələri elektronu nüvədən qoparmağa kifayət etmir, lakin bu cür atom (o, *polyarlaşmış* atom adlanır, çünki iki elektrik qütbünə malik olur) özünün məxsusi elektrik sahəsini yaradır. Asanlıqla inanmaq olar ki, həmin sahənin qüvvə xətləri dipolu yaradan sahənin əksinə yönəlmişdir və onların intensivlikləri çıxılır. Superpozisiya prinsipindən çıxır ki, maddə daxilində sahə polyarlaşmanı doğuran xarici sahədən kiçikdir.



Dipolun bir-birindən l məsafəsində yerləşən və qiymətcə bərabər iki $+e$ və $-e$ yüklərinin $\vec{E}$ sahəsini koordinat başlanğıcını yüklərdən biri üzərində götürməklə, hesablamaq çətin deyildir.

müyəssər olmadı. "Cisimlər bir-birinə ətraf mühiti gərilmiş hala gətirməklə məsafədən təsir edir" fikri ağlına gələn ilk adam Maykl Faradey olmuşdu. Yüklərin yaxınlığında fəzanın halının dəyişməsinə, yeni mahiyyətin (sonralar *elektrik sahəsi* adlandırılmış mahiyyətin) yaranmasına dair ideya çox səmərəli oldu. Ceyms Klark Maksvell bu ideyaya əsaslanaraq, elektrik hadisələrinin indiyədək istifadə olunan nəzəriyyəsini yaratdı.



Karl Fridrix Qauss.

Deməli, yükün ətrafındakı fəza boşluqdan fərqlənir (hətta yük vakuumda yerləşdikdə də). Bu halda istənilən digər yükə təsir etməyə qadir olan elektrik sahəsinin iştirakından danışırlar. Məsələn, nöqtəvi yüklərin qarşılıqlı təsir qüvvəsi onların hər birinin yüklərinin miqdarı ilə mütənasibdir (Kulon qanunu). Ona görə də sahəni təsvir etmək üçün, onun vahid müsbət yükə göstərdiyi təsir qüvvəsi anlayışına müraciət edirlər: bu cür xarakteristika *sahənin intensivliyi* $\vec{E}$ adlanır. Sahəyə gətirilmiş q yükünün miqdarını bilərək, hər bir konkret halda $\vec{F}=q\vec{E}$ qüvvəsini hesablamaq olar, çünki Kulon qanunundan çıxır ki, hər bir tərpənməz nöqtəvi q yükü intensivliyi $\vec{E}=k\frac{q}{r^2}\cdot\frac{\vec{r}}{r}$ olan sahə ilə əhatə olunmuşdur. Çox vaxt əlverişlilik üçün Kulon qanunundakı k mütənasiblik əmsalını $1/4\pi\varepsilon_0$ şəklində yazırlar, burada $\varepsilon_0=8{,}85\cdot10^{-12}$ F/m – elektrik sabitidir. Nəticədə elektrostatikanın bir çox düsturları (Kulon qanununun özündən başqa) sadə görünür.

Düsturlar öz yerində, ancaq elektrik sahəsini təsvir etməyin başqa bir üsulu da var. Maykl Faradey riyaziyyatı pis bilirdi, yəqin ona görə də sahənin *qüvvə xətləri* terminini daxil etmişdir.

ƏGƏR YÜK NÖQTƏ DEYİLSƏ

Əgər iki tərpənməz q_1 və q_2 nöqtəvi yükləri götürsək, onda onlara yaxınlaşdırılan q sınaq yükü hər bir yük tərəfindən ayrıca təsir edən qüvvələrin həndəsi cəminə bərabər olan bir qüvvə ilə ya cəzb olunacaq, ya da itələnəcəkdir. Ümumi sahənin intensivliyi isə ayrı-ayrı yüklərin yaratdığı sahələrinin intensivlikləri cəmi olacaqdır, yəni $\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2$. Bu münasibət *superpozisiya prinsipi* kimi məşhurdur.

Superpozisiya prinsipi istənilən yüklər sisteminin yaratdığı sahəni təsvir etməyə imkan verir. Lakin yüklər çox olduqda hesablamalar zamanı çətinliklər yaranır. İntensivliyi r^{-2} ilə mütənasib olaraq azalan istənilən qüvvə sahələri üçün doğru olan bir teorem bu çətinlikləri aradan qaldırmağa kömək edir. Həmin teoremi alman riyaziyyatçısı, astronomu və fiziki Karl Fridrix Qauss (1777–1855) ifadə etmişdir. *Qauss teoreminin* mahiyyəti aşağıdakına gətirilir. Əgər istənilən miqdarda yükləri fikrən qapalı S səthilə əhatə etsək, onda elektrik sahəsi intensivliyinin elementar ΔS sahəsindən keçən selini $\Delta\Phi = E\cos\alpha\Delta S$ kimi yazmaq olar, burada α – meydançanın normalı ilə intensivlik vektoru $\vec{E}$ arasındakı bucaqdır. Bütün səthdən keçən tam sel isə bu səth daxilində ixtiyari tərzdə paylanmış bütün yüklərin selləri cəminə bərabər və bu yükün miqdarı ilə mütənasib olacaqdır: $\Phi=4\pi kQ$, burada

$$Q=\sum_{i=1}^{n}q_i.$$

Yüklər arasındakı qarşılıqlı təsirə baxmaq lazım gəlmədiyindən sahələrin hesablanması xeyli sadələşir. Qauss teoremi hətta sonsuz sayda

Superpozisiya prinsipindən, məsələn, elektrik *dipolunun* – bir-birindən l məsafəsində yerləşən bərabər q miqdarında, lakin əks işarəli iki yükün elektrik sahəsinin intensivliyini hesablamaq üçün istifadə etmək olar. Dipolun qiymətini $\vec{p}=q\vec{l}$ vektoru ilə – elektrik *dipol momenti* ilə xarakterizə edirlər. Dipoldan kifayət qədər böyük məsafələrdə $(r\gg l)$ ayrı-ayrı yüklərin sahələrinin intensivliklərini toplamaqla alarıq ki, dipolun sahəsinin intensivliyi məsafənin artması ilə r^{-3} kimi azalır, yəni nöqtəvi yükün sahəsindən (r^{-2} kimi) daha sürətlə azalır.

SUPERPOZİSİYA PRİNSİPİ NƏ VAXT DOĞRUDUR

Bir yükün sahəsi digər yükün sahəsinə heç cür təsir etmir – fikri quruluşsuz (nöqtəvi) yüklərə baxdıqda doğrudur. İki real (ölçüsü olan) elektriklənmiş cisimlər bir-birinə, qarşılıqlı polyarlaşma (yəni onların hər birində yüklərin yenidən paylanması, yerdəyişməsi) yaratmaqla təsir edir və yekun sahə ilkin sahələrin cəmindən fərqlənəcəkdir: $\vec{E}'=\vec{E}_1'+\vec{E}_2'$, burada $\vec{E}_1'$ və $\vec{E}_2'$ sahələrin bir-birindən təcrid olunmuş cisimlərin sahələrinin intensivliklərindən fərqlənən yeni intensivliklərdir.

Beləliklə, superpozisiya prinsipini yalnız nöqtəvi yüklər halında və ya onların bir-birilə qarşılıqlı təsiri də olmadığı halda doğru hesab etmək olar. Fiziki cisimlərdə elektrik sahəsinin mənbələri, yükü $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ olan elektronlar və ya yükləri elektronun yükünün tam misillərinə bərabər olan atom nüvələri olduğundan, superpozisiya prinsipinin ödənmə dəqiqliyini qiymətləndirmək çətin deyildir. Əgər fərz etsək ki, zərrəciklərin – mənbələrin ölçüləri $r_0\sim10^{-15}$ m tərtibində, zərrəciklər arasındakı orta məsafə isə $d\sim10^{-9}$ m tərtibindədir, onda makroskopik elektrodinamikada superpozisiya prinsipinin ödəndiyi dəqiqlik

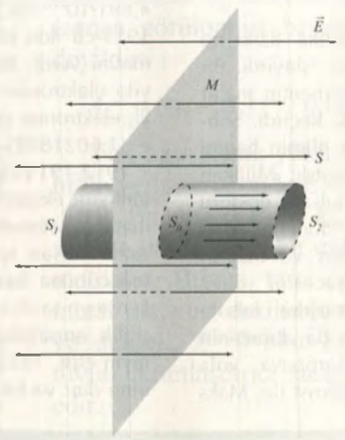
$$|\vec{E}_1'-\vec{E}_2'|/E_1\sim(r_0/d)^3\sim10^{-18}.$$

SONSUZ MÜSTƏVİNİN SAHƏSİ

Bərabər yüklənmiş müstəvinin sahəsinin intensivliyini hesablayaq (onun vahid səthində $q/S=\sigma$ yükü yerləşir; σ-ya *elektrik yükünün səth sıxlığı* deyilir).

Verilmiş müstəvinin S_0 sahəsi $Q=\sigma S_0$ qədər yük daşıyır. Əgər bu sahəni fikrən ixtiyari hündürlüklü silindrlə müstəvidən kəsib ayırsaq, elə silindrlə ki, onun yan səthi müstəviyə perpendikulyar olsun və müstəvi tərəfindən yarıya bölünsün, onda aşağıdakını müəyyən etmək olar:

1. Müstəvinin yaratdığı sahənin intensivliyi onun hər bir nöqtəsində silindrin yan səthinə paraleldir. Yüklənmiş müstəvini ona perpendikulyar olan istənilən düzxət ətrafında fırlatdıqda yüklərin fəzada paylanması dəyişməyəcəkdir, yəni bu zaman sahənin intensivliyi də sabit qalır (intensivlik fırlanma oxuna paraleldir). Deməli, silindrin yan səthindəki istənilən sahədən keçən intensivlik seli sıfıra bərabərdir, çünki yan səthin normalı və intensivlik bir-birinə perpendikulyardır.



2. Oturacaqların bütün nöqtələri ilkin müstəvidən bərabər uzaqlıqdadır və bu nöqtələrdə E intensivliyi eynidir. İntensivliyin istiqamətini bilərək, oturacaqdan keçən seli hesablayaq: $\Phi_{otur}=ES_0$. Oturacaq iki, yan səthdən keçən sel isə sıfır olduğundan, tam sel $\Phi_{tam}=2ES_0$ olacaq. Qauss teoreminə görə $2ES_0=4\pi kQ=4\pi k\sigma S_0$, yəni $E=2\pi k\sigma$.

Beləliklə, gözlənilməz nəticə alınır: sonsuz yüklənmiş müstəvinin elektrik sahəsinin intensivliyi, bu müstəvidən istənilən məsafədə sabit qalır.

yüklərin sahəsini hesablamağa imkan verir. Doğrudur, bunu yalnız yüklərin simmetrik paylandığı ayrı-ayrı hallarda, əlverişli səth (elə səth ki, ondan keçən seli hesablamaq asan olsun) seçmək mümkün olduqda etmək olar. Yüklənmiş keçirici kürənin daxilində yerləşdirilmiş sınaq yükü heç bir qüvvə

ROBERT ENDRUS MİLLİKEN

Amerika ştatı Ohayoda Aberdin kollecinin nəzdindəki hazırlıq məktəbində fizikanın tədrisilə məşğul olmaq təklifi bakalavrı təzəcə bitirmiş Robert Endrus Millikeni (1868-1953) qəfil yaxaladı. Bir tərəfdən, əlavə qazanc heç də pis olmazdı, digər tərəfdən fizika sahəsində onun biliyi çox az idi. Buna baxmayaraq, təklif qəbul edildi və 1891-ci ildən 1893-cü ilə qədər Milliken, öz biliyindəki boşluqları dərsliklər vasitəsilə doldıraraq, vicdanla ümumi fizikadan dərs dedi. Bu kursa görə, Aberdin kolleci ona magistr dərəcəsi verdi, məşğələlərin rəhbərlik tərəfindən Kral kollecinə (1896-cı ildən Nyu-Yorkda Kolumbiya universiteti olmuşdur) göndərilmiş konspektləri isə Millikenə təqaüd verilməsinə səbəb oldu ki, bunun da sayəsində Robert təhsilini davam etdirə bildi.

Kolumbiya universitetində Milliken Amerika fiziki və ixtiraçısı Maykl İ.Pyupinin rəhbərliyi altında işləyirdi. Bir yayı o, Çikaqo universitetində fiziki eksperimentin mahir bilicisi olan Albert A.Maykelsonun yanında keçirdi. Şöhrət qazanmış eksperimentatorla görüş gənc alimin həqiqi qabiliyyətinə olan axırıncı şübhələrini dağıtdı: Milliken fizik olmağı qəti qərara aldı. Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün dissertasiya müdafiəsindən sonra (orta əsrlər dövründən bəri, bakalavr və magistr dərəcəsindən fərqli olaraq, doktorluq dərəcəsini yalnız universitetlər vermək hüququna malik olmuşdur; fəlsəfə ali biliklər dairəsinə daxil idi ki, buradan da dərəcənin adı müəyyən olunmuşdur). Milliken Avropaya yola düşdü. Orada o, Anri Bekkerel ilə, Valter Nernst ilə, Maks Plank ilə və Anti Puankare ilə tanış oldu. Amerikaya qayıdan Robert Maykelsonun assistenti oldu və 1896-cı ildən 1921-ci ilə qədər Çikaqo Universitetində işlədi. Məhz həmin vaxtlarda Milliken orta məktəblər və kolleclər üçün ilk Amerika fizika dərsliklərini yaratdı; fizikanı dörddə bir əsrdən çox həmin dərsliklər üzrə öyrəndilər. Əvvəllər ABŞ-da bu elmi tərcümə olunmuş alman və fransız kitablarından öyrənirdilər. Tezliklə Millekini elektronun yükünün təyin edilməsinə dair olduqca maraqlı, ancaq son dərəcədə çətin bir məsələ cəlb etdi. Elektron 1897-ci ildə ingilis fiziki Cozef Con Tomson (1856-1940) tərəfindən kəşf olunmuşdu; Tomson bu zərrəciyin yalnız yükünün kütləsinə olan nisbətini tapmağa müvəffəq olmuşdu.



Qüvvətli elektrik sahəsi yaratmaq üçün güclü batareya quraşdıran Milliken "yüklü damcı" metodunu işləyib hazırladı. O, kondensatorun köynəkləri arasında bir neçə su damcısını "asmağa" və onları 45 saniyə ərzində tam buxarlanana qədər tutub saxlamağa nail oldu. 1909-cu ilə yaxın Milliken müəyyən etdi ki, damcının yükü həmişə eyni bir e kəmiyyətinin – elektronun yükünün tam mislinə bərabərdir. Suyu uçucu olmayan yağ ilə əvəz edərək, alim eksperimentin davametmə müddətini 4,5 saatadək çatdırdı. Müxtəlif xətaların mənbələrini ən incəliklə aradan qaldıraraq, Milliken 1910-cu ildə elektronun yükünün $4{,}891 \cdot 10^{-10}$·1SQSE-yə bərabər olan qiymətini çap etdirdi, 1913-cü ildə isə dəqiqləşdirilmiş $4{,}774 \cdot 10^{-10}$·1 SQSE qiymətini verdi. Bu qiymət 70 il, ən yeni metodların köməyilə elektronun yükü ölçülənə qədər qaldı; məlum oldu ki, elektronun yükü $4{,}80298 \cdot 10^{-10}$·1 SQSE-dir (son qiyməti: $e = 1{,}60218925 \cdot 10^{-19}$ Kl).

1912-1914-cü illərdə Milleken fotoeffekt üçün Eynşteyn tənliyini eksperimental yoxlamağa girişdi. Bu tənliyə görə metalın səthindən qoparılan elektronların kinetik enerjisi səthə düşən işığın tezliyilə mütənasib olmalıdır. Onun təəccübünə baxmayaraq, o aşkar etdi ki, fotoeffekt üçün Eynşteyn tənliyi doğrudur, eyni zamanda həm də mütənasiblik əmsalının – məşhur Plank sabitinin qiymətini də təyin etdi. 1923-cü ildə "elementar elektrik yükünün təyininə dair və fotoelektrik effektinə dair işlərinə görə" Milliken Nobel mükafatına layiq görüldü.

1921-ci ildən 1945-ci ilə qədər Millikenin həyatı Kaltexlə – Kaliforniya Texnoloji İnstitutu ilə qırılmaz bağlıdır. O, Millikenin aktiv iştirakı ilə qabaqcıl elmi və mühəndis fikrinin dünya mərkəzinə çevrildi. Kaltexdə Millikenin həyata keçirdiyi ilk proyektlərdən biri kosmik şüaların öyrənilməsi oldu.

Özünün Nobel mühazirəsində Milliken müasir fizikanın tərəqqisini necə başa düşdüyünü izah etmişdir: "Elm iki ayağı – nəzəriyyə və eksperiment üzərində irəli gedir. Bəzən bir ayaq, bəzən də o biri ayaq qabağa çıxır, lakin daimi tərəqqi o zaman əldə olunur ki, hər iki ayaq eyni qədər addımlasın".



Faradey qəfəsi.

təsirinə məruz qalmır, çünki orada sahənin intensivliyi sıfıra bərabərdir. Naqillərin öz daxilində xarici elektrik sahəsini kompensasiya etməsi xassəsi onlarda sərbəst yüklərin (metallarda elektronların) olması ilə izah olunur. Bu sərbəst yüklər yenidən elə paylanır ki, onların yaratdığı sahə xarici sahəni tamamilə neytrallaşdırır. Bu xassə elektrik sahəsinin təsir etmədiyi fəza oblastı yaratmaq üçün istifadə olunur: həmin oblastı metal torla (*Faradey qəfəsi*) əhatə etmək kifayətdir. Bu qayda ilə həssas cihazları və insanları xarici elektrik sahələrinin təsirlərindən qorumaq olar. Faradeyin özü məftil qəfəsdə kiçik heyvanlar yerləşdirməklə kompensasiya effektini nümayiş etdirmişdir. Qəfəsə verilən güclü elektrik yükü heyvanlara heç bir ziyan verməmişdi.

POTENSİAL

Maraqlıdır ki, qapalı metal örtüklərin ekranlaşdırıcı təsirini ilk dəfə nəzəri olaraq 1813-cü ildə fransız riyaziyyatçısı və fiziki Simeon Deni Puasson (1781-1840), 1828-ci ildə isə ingilis riyaziyyatçısı və fiziki Corc Qrin (1793-1841) qabaqcadan xəbər vermişdilər. Alimlər müəyyən etmişlər ki, elektrostatik sahə *potensiallı* sahədir, yəni q sınaq yükünün $\vec{r}_1$ nöqtəsindən $\vec{r}_2$ nöqtəsinə köçürülməsi zamanı sahənin gördüyü iş köçürülmə yolundan asılı deyil, yalnız yükün başlanğıc və son vəziyyətlərilə təyin olunur. Doğrudan da, tutaq ki, sahəni koordinat başlanğıcında yerləşdirilmiş nöqtəvi e yükü yaradır. Onda q yükünün kiçik $\Delta\vec{r}$ yerdəyişməsi zamanı sahənin gördüyü elementar iş

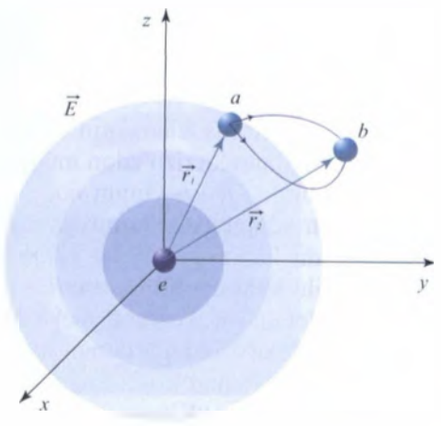
$$\Delta A = q(\vec{E}\Delta\vec{r}) = kqr(\vec{r}\Delta\vec{r})/r^3 = \\ = kqe\Delta r/r^2 = -kqe\Delta(1/r) \equiv -q\Delta\varphi,$$

burada $\varphi = ke/r$ – *elektrik potensialıdır*.

Göstərilən düsturdan q yükü $\vec{r}_1$ nöqtəsindən $\vec{r}_2$ nöqtəsinə köçürülən zaman görülən işi hesablamaq çətin deyildir:

$$A = q\,(\varphi_1 - \varphi_2) = -\,q\,(\varphi(\vec{r}_1) - \varphi(\vec{r}_2)).$$

Yox əgər sınaq yükü keçirici mühitdə yerləşirsə, onda $E = 0$ və deməli, $A = 0$. Bu ona görədir ki, naqilin daxilində bütün nöqtələr eyni potensiala malikdir. Bunun tam eynilə qapalı metal örtüyün daxilində də $\varphi = \text{const}$ və deməli, $E = 0$ olur ki, bu da örtüyün ekranlaşdırıcı xassəsinə dəlalət edir.



Elektrostatik sahədə elementar q yükünün köçürülməsi zamanı görülən iş yoldan asılı deyil.

"Potensial" termini 1840-cı ildə Qauss tərəfindən təklif olunmuşdur. Çoxlu zərrəciklərdən ibarət sistem üçün nöqtənin potensialı yüklərdən hər birinin yaratdığı potensialların cəbri cəminə bərabərdir.

SABİT ELEKTRİK CƏRƏYANI QANUNLARI



Georq Simon Om.

Termocüt ucları birləşdirilmiş müxtəlif növ metal məftillərdir. Alman fiziki Tomas İohann Zeebek (1770-1831) termocütü öyrənərkən aşkar etmişdir (1821-ci il) ki, əgər birləşmə nöqtələri müxtəlif temperaturlara malikdirsə, onda dövrədə EHQ yaranır. Bu hadisə termoelektrik Zeebek effekti adlanır. Bu cür EHQ-nin qiyməti temperaturdan asılıdır və müxtəlif metal cütləri üçün müxtəlifdir.

A.Volta tərəfindən etibarlı elektrik mənbəyinin – qalvanik elementin yaradılması və X.Ersted tərəfindən elektrik cərəyanının maqnit təsirinin kəşfi elektrik ölçmələri texnikasının intensiv inkişafına bir təkan oldu. Burada görkəmli rol alman fiziki Georq Simon Oma (1787-1854) məxsusdur. Cərəyan şiddətini təyin etmək üçün o, Kulonun fırlanma tərəzi prinsipindən istifadə etdi. Naqildən cərəyan axarkən naqilin yaxınlığında elastiki ipdən asılmış maqnit əqrəbi meyil edirdi. O, ipi burmaqla əqrəbi əvvəlki vəziyyətinə qaytarır və burulma bucağının qiymətinə görə naqildəki I cərəyan şiddəti haqqında fikir yürüdürdü. Om cərəyan mənbəyinin əsas xarakteristikası kimi açıq dövrə halında qalvanik elementin elektrodlarındakı $\mathscr{E}$ gərginliyi götürürdü. Bu $\mathscr{E}$ kəmiyyətini o, *elektrik hərəkət qüvvəsi* (*EHQ*) adlandırdı. Om ilk təcrübələrində cərəyan mənbəyinə müxtəlif materiallardan (gümüş, mis, qızıl) olan, lakin eyni en kəsiyinə malik naqillər qoşurdu. Onların l uzunluğunu dəyişməklə, Om eyni bir I cərəyan şiddəti alırdı. Ölçmələrin nəticələrini ümumiləşdirərək, o, aşağıdakı münasibəti çıxardı.

$$I=\frac{\mathscr{E}}{r_i+R}, \qquad (1)$$

burada r_i – qalvanik elementin *daxili müqavimətini* xarakterizə edən müəyyən bir sabitdir, R isə Omun *naqilin müqavimət*i adlandırdığı kəmiyyətdir; məlum oldu ki, bu kəmiyyət naqilin uzunluğu ilə mütənasibdir, yəni $R \sim l$. Omun "Metalların kontakt elektriki keçirməsinin tabe olduğu qanun haqqında ilkin məlumat" adlı məqaləsi 1826-cı ildə alman "Kimya və fizika" jurnalında çapdan çıxdı. Ölçmələrin dəqiqliyi o qədər də yüksək deyildi və Om tanınmış alman fiziki İohann Kristian Poqqendorfun (1796-1877) məsləhəti ilə cərəyan mənbəyini daha stabil EHQ olan başqa mənbə ilə – mis-vismut *termocütü* ilə əvəz etdi.

Ölçmələrin dəqiqliyi xeyli artdı və alim onların nəticələrini "Riyazi işlənib hazırlanmış qalvanik dövrə" (1827) kitabında təqdim etdi. Om layiq olduğu adı yalnız ömrünün sonunda aldı: 1841-ci ildə ona London Kral Cəmiyyətinin ən yüksək mükafatı – Kopli medalı təqdim olundu.

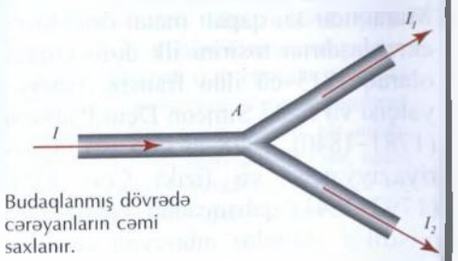
"Qalvanik dövrə..." kitabında Om cərəyan sıxlığı vektoru $\vec{j}$ daxil edərək, öz qanununa diferensial forma verdi ($\vec{j}$ -un istiqaməti cərəyanın istiqaməti ilə, qiyməti isə I cərəyan şiddətinin naqilin S en kəsiyinə nisbəti ilə üst-üstə düşür), yəni

$$j=|\vec{j}|=\frac{I}{S}. \qquad (2)$$

Om həmçinin

$$U = E\Delta l \qquad (3)$$

götürməklə, naqilin Δl uzunluqlu kiçik hissəsində gərginlik düşküsü U-nu daxil etdi, burada E – elektrik sahəsinin naqil daxilindəki intensivliyidir. Omun terminologiyasına görə $E = U/\Delta l - \Delta l$ hissəsində, bu hissənin vahid uzunluğuna düşən "elektroskopik qüvvələr"



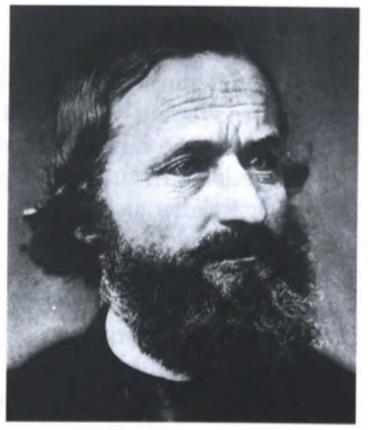
Budaqlanmış dövrədə cərəyanların cəmi saxlanır.

QUSTAV ROBERT KİRXHOF

1859-1861-ci illərdə Heydelberq universitetinin iki fizika professoru Qustav Robert Kirxhofun (1824-1887) və Robert Vilhelm Bunzenin (1811-1899) etdikləri bir şey istedadlı fantast yazıçının təxəyyülünü geridə buraxır: alimlər ulduzların, o cümlədən Günəşin kimyəvi tərkibini dürüst təyin etməyə imkan verən metod işləyib hazırladılar.

Kirxhof Königberq universitetini bitirdikdən artıq bir il sonra (1846-cı il) budaqlanmış elektrik dövrələrində cərəyanlar və gərginliklər üçün bu gün hər bir məktəbliyə məlum olan iki qayda (Kirxhof qaydaları) müəyyən etdi. O, bu tədqiqatları hələ tələbə olarkən başlamışdı. Kirxhof Berlində sonra isə Breslauda (indiki Vrotslavda, Polşa) dərs demişdir. Breslauda o, istedadlı eksperimentator, indi dünyanın heç bir laboratoriyasının onsuz keçinə bilmədiyi bunzen odluğunun ixtiraçısı Bunzenlə dostlaşdı. 1854-cü ildə Kirxhof Heydelberq universitetinin fizika professoru oldu. Bura onu Bunzenin məsləhətilə dəvət etmişdilər. Müxtəlif maddələrin közərmiş buxarlarını və qazlarını öyrənən Kirxhof və Bunzen təbii-elmi tədqiqat metodlarından birinə çevrilmiş spektral analizin əsasını qoydular. Kirxhof aydınlaşdırdı: 1) istənilən közərmiş cisim müəyyən tezliklər küllüsünə malik işıq – spektr buraxır; 2) şüalanmanın ən yüksək intensivliyi onun mənbəyinin temperaturu böyük olduqca, bir o qədər böyük tezliyə uyğun gəlir (yəni temperaturun artması ilə şüanın maksimum intensivliyi spektrin bənövşəyi oblastına sürüşür). Buraxma spektrlərindəki işıqlı xətləri müşahidə edərək və onları udulma spektrlərindəki qara xətlərlə müqayisə edərək, Kirxhof belə bir hipotez irəli sürdü ki, Yerdə yayılmış kimyəvi elementlərin əksəriyyətinə Günəşdə və digər ulduzlarda da rast gəlinir, sonra isə spektrlərdə xətlərin üst-üstə düşdüyünü sübut edərək, öz fərziyyəsini eksperimental olaraq təsdiq etdi.

1859-cu ildə Kirxhof termodinamikanın ikinci qanununa əsaslanaraq, istilik şüalanmasının əsas qanunlarından birini söyləmişdir. (Məlum oldu ki, bu qanun nadir bir qanundur: o, ancaq istilik tarazlığı şüalanması üçün doğrudur, başqa heç nə üçün doğru deyildir.) Kirxhof qanununa görə şüaburaxma qabiliyyətinin udma qabiliyyətinə nisbəti cismin təbiətindən asılı deyil, yalnız onun temperaturu ilə və şüalanmanın dalğa uzunluğu ilə təyin olunur. Başqa sözlə, cisim verilmiş temperaturda hər hansı uzunluqlu dalğanı yaxşı buraxırsa, onda onları həm də yaxşı udmalıdır. Alim nəzəri çıxardığı qanunu eksperimentlə təsdiq etdi. Sadə görünməsinə baxmayaraq, Kirxhof qanunu trivial deyil və hətta paradoksaldır: yarıya qədər qara platin minası ilə örtülmüş olan közərmiş platin lövhəcik közərən zaman onun qaralmış ucu işıqlı ucuna nisbətən daha parlaq işıq saçır.



Kirxhof özündə incə fiziki intuisiyaya malik olan, riyazi aparatı gözəl bilən görkəmli nəzəriyyəçi və təbiətə verilən sualları dəqiq ifadə etməyi və onlara birqiymətli cavablar almağı bacaran mahir eksperimentator keyfiyyətlərini birləşdirmişdi. Difraksiyanın dəqiq riyazi nəzəriyyəsi ona məxsusdur (1882-ci il). Kirxhof elastikliyin, lövhələrin rəqslərinin, cisimlərin mayedə hərəkətinin, şırnağın sərbəst formasının təyini problemlərilə məşğul olaraq, mexanika sahəsində çox və səmərəli işləmişdir. Dalğa tənliyinin elektrik siqnallarının kabeldə yayılmasını təsvir edən variantlarından biri Kirxhofun adı ilə bağlıdır.

1875-ci ildən 1887-ci ilə qədər Kirxhof Berlin universitetinin nəzəri fizika kafedrasına başçılıq etmişdir. Burada onun xələfi (davamçısı) Maks Plank oldu. Kirxhof həyatının Berlin dövründə özünün "Riyazi fizikadan mühazirələr"ini nəşr etdirdi (1876-cı il); kitaba yazdığı ön sözdə o, fiziki tədqiqatın vəzifə və məqsədlərinə olan öz baxışlarını şərh etmişdi: səbəbiyyət əlaqələrini yox, funksional əlaqələri müəyyən etmək, yəni "nə üçün" sualına yox, "necə" sualına cavab axtarmaq lazımdır. Məsələn, Nyutonun ümumdünya cazibə qanunu Kainatdakı istənilən iki cismin qarşılıqlı təsirini təsvir edir, lakin qravitasiyanın təbiəti necədir sualını cavabsız buraxır. Bununla əlaqədar Kirxhof qeyd etmişdi: "Adətən mexanikanı qüvvələr haqqında elm kimi, qüvvələri isə hərəkəti doğuran və ya doğurmağa çalışan səbəblər kimi təyin edirlər. Şübhəsiz, bu cür təyin mexanikanı yaradarkən olduqca faydalı idi və adi, gündəlik həyat təcrübəsindən götürülmüş qüvvələr misalında bu elmi öyrədərkən də faydalı olaraq qalır. Lakin bu cür təyin edilməyə bir anlaşılmazlıq xasdır; səbəb və meyil anlayışları bu anlaşılmazlıqdan azad deyildir. Bu anlaşılmazlıq özünü, məsələn, ümumdünya cazibə qanunu və ya qüvvələr paraleloqramı haqqında teoremi təcrübənin nəticəsi, yoxsa aksiom və məntiqi yolla isbatı mümkün və lazım olan teorem hesab edib-etməməyə dair baxışların müxtəlifliyində göstərir. Mexanikada hökmün (nəticənin) yol verdiyi dəqiqliyi nəzərə almaqla, mexanikadan buna bənzər aydın olmayan yerləri, hətta onun vəzifə və məqsədlərinin məhdudlaşdırılması hesabına aradan qaldırmaq yaxşı olardı. Buna əsasən mən mexanikanın məsələsini təbiətdə baş verən hərəkətləri ən dolğun və ən sadə tərzdə təsvir etməkdə görürəm. Bununla mən demək istəyirəm ki, söhbət yalnız hansı hadisələrin baş verdiyini təyin etməkdən gedir, qətiyyən onların səbəblərini müəyyən etməkdən yox".


Die
galvanische Kette,
mathematisch bearbeitet
von
Dr. G. S. Ohm.
Mit einem Figurentafel.
Berlin, 1827.

G.S.Omun "Riyazi işlənib hazırlanmış qalvanik dövrə" kitabının titul vərəqi. Berlin. 1827-ci il.

fərqidir. $U/\Delta l$ nisbətinin elektrik sahəsinin intensivliyi ilə eyniliyini sonralar alman fiziki Qustav Robert Kirxhof aşkara çıxardı. Dövrə hissəsi üçün (1) əsas qanununu aşağıdakı şəkildə yazaq:

$$I=\frac{U}{R}, \qquad (4)$$

burada R – bu hissənin müqavimətidir. (2) və (3) münasibətlərini (4) ifadəsində yerinə yazaraq, cərəyanın j sıxlığı və sahənin naqil daxilindəki E intensivliyi arasında xətti əlaqə taparıq:

$$j=\sigma E, \qquad (5)$$

burada σ – naqilin hazırlandığı maddənin xarakteristikasıdır, onun xüsusi keçiriciliyidir (xüsusi müqavimətin tərsi olan kəmiyyətdir). Naqilin baxılan hissəsinin müqaviməti

$$R=\frac{l}{\sigma S} \qquad (6)$$

münasibətilə təyin olunur və xüsusi vahidlərlə – omlarla ölçülür. Bu zaman (4)-ə uyğun olaraq, 1 Om = 1 V/1 A.

Omun işləri ilk illərdə gözə çarpmamışdı, onu aldığı nəticələr isə dəfələrlə digər tədqiqatçılar tərəfindən yenidən kəşf olunmuşdu. Fransız fiziki Klod Puye (1790-1868) budaqlanan dövrələrdə keçiriciliklərin (müqavimətlərin tərsi) toplanması qanununu çıxardı (1837-ci il), Kirxhof isə bu qanun əsasında xətti dövrələr nəzəriyyəsini – Kirxhofun məşhur qanunlarını yaratdı.

Birinci qanunu çıxararkən Kirxhof elektrik yükünün saxlanması qanununa istinad etdi. Əgər keçirici dövrənin A budaqlanmasına şiddəti I olan cərəyan daxil olursa, I_1 və I_2 cərəyanları isə çıxırsa, onda Δt müddətində budaqlanma oblastına $\Delta Q=I\Delta t$ qədər elektrik yükü daxil olur, $\Delta Q_1+\Delta Q_2=I_1\Delta t+I_2\Delta t$ qədər yük isə çıxır. Bu kəmiyyətləri bərabərləşdirərək, alarıq:

$$I=I_1+I_2. \qquad (7)$$

Əgər düyündə n naqil toplaşırsa, onda

$$\sum_{i=1}^{n} I_i=0, \qquad (8)$$

burada I_i dedikdə cərəyan şiddətinin cəbri qiyməti başa düşülür; cərəyan düyünə daxil olanda cəbri qiymət müsbət işarə ilə, çıxanda isə mənfi işarə ilə götürülür.

Kirxhofun ikinci qanunu Om qanununun (4) birbaşa nəticəsidir. Tutaq ki, müqaviməti R olan AB dövrə hissəsinin uc nöqtələrinin elektrik potensialları φ_A və φ_B-dir. Onda tərifə görə AB hissəsində U gərginliyi

$$U=\varphi_A-\varphi_B \qquad (9)$$

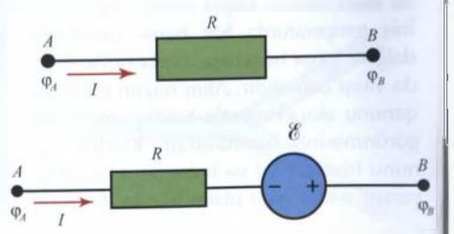
olur, Om qanunu isə aşağıdakı şəkli alır:

$$\varphi_A-\varphi_B=IR. \qquad (10)$$

AB hissəsində EHQ $\mathscr{E}$ olan cərəyan mənbəyi varsa, onda potensiallar fərqi $\Delta U=\pm\mathscr{E}$ kəmiyyəti qədər dəyişir, burada işarə mənbəyin qoşulma qütblüyündən asılı olaraq seçilir (cərəyan istiqamətində olanda – plyus və ya cərəyanın əksinə olanda – minus). (10) münasibəti aşağıdakı şəkli alır:

$$\varphi_A-\varphi_B\pm\mathscr{E}=IR. \qquad (11)$$

Əgər dövrə mürəkkəbdirsə, onda A nöqtəsindən B nöqtəsinə gedən yolda EHQ-ləri $\mathscr{E}_i$ olan m sayda cərəyan mənbəyi və hər biri üzrə I_k cərəyan axan n sayda R_k müqavimətləri rast



Dövrə hissəsinin uclarındakı potensiallar fərqi bu hissədəki gərginlik düşküsünə bərabərdir. Əgər dövrəyə cərəyan mənbəyi qoşulmuşdursa, onda EHQ qoşulmanın qütblüyündən asılı olaraq, potensiallar fərqinin qiymətinə toplanır və ya ondan çıxılır.

gələ bilər. Onda dövrə hissəsi üçün Kirxhofun "ikinci qanunu" belə yazılar:

$$\varphi_A-\varphi_B+\sum_{i=1}^{m}\mathscr{E}_i=\sum_{k=1}^{n}I_kR_k. \qquad (12)$$

Om qanununun kəşfi cərəyanın istilik təsiri sahəsində də tədqiqatlara təkan verdi. Nə qədər paradoksal olsa da, deyilən hadisə miqdarca pis öyrənilmişdi, baxmayaraq ki, onun haqqında Cambattista Bekkaria, Bencamin Franklin və digər alimlər bilirdilər.

Cərəyanın istilik təsirinin miqdarı qanununu kəşf etmək şərəfi ingilis fiziki Ceyms Preskott Coula (1818-1889) məxsusdur. 1841-ci ildə o müəyyən etdi ki, naqildə ayrılan istilik miqdarı onun müqaviməti ilə və cərəyan şiddətinin kvadratı ilə düz mütənasibdir.

Couldan asılı olmadan rusiyalı fizik Emili Xristianoviç Lens (1804-1865) 1842-ci ildə həmin qanunauyğunluğu tapdı və sonralar bu qanunauyğunluq *Coul-Lens qanunu* adını aldı. (4)-dən istifadə edərək, onu çıxaraq. Əgər R müqavimətli naqildən şiddəti I olan cərəyan axırsa, onda Δt müddətində naqildən $q=I\Delta t$ yükü keçər. Naqilə $U=IR$ gərginliyi tətbiq olunduğundan, EHQ mənbəyi yükün köçürülməsi zamanı $A=qU$ işini görər. Axırıncı ifadədə U və q-nin qiymətlərini yerinə yazsaq, alarıq:

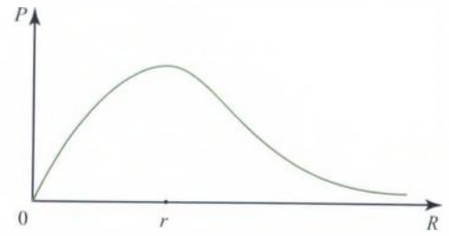
$$A=UI\Delta t=I^2R\Delta t=U^2\Delta t/R. \qquad (13)$$

Bu işin hamısı naqildə ayrılan istiliyə çevrilir, ona görə də (13) münasibəti məhz Coul-Lens qanununu ifadə edir.

(13) ifadəsinə əsasən naqildə ayrılan istiliyin gücü

$$P=A/\Delta t=I^2R. \qquad (14)$$

Coul-Lens qanununu EHQ mənbəyinin özünün R_i daxili müqavimətə malik olduğu və R müqavimətli faydalı yükə qoşulduğu hala da tətbiq edək. Onda dövrədə I cərəyanı



Lens-Botto qrafiki. Verilən güc generatorun və yükün müqavimətlərinin bərabərliyi zamanı maksimaldır.

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R_i+R} \qquad (15)$$

münasibətilə təyin olunacaqdır.

Yükün sərf etdiyi P gücünün

$$P=I^2R=\frac{\mathscr{E}^2R}{(R_i+R)^2} \qquad (16)$$

nə zaman maksimal olduğunu aydınlaşdıraq. P gücünə R müqavimətinin funksiyası kimi baxsaq, görərik ki, o, $R=R_i$ olduqda, yəni yükün müqavimətilə generatorun müqaviməti üst-üstə düşdükdə özünün maksimal qiymətinə çatır (*Lens-Botto teoremi*). Bu fakt 1844-cü ildə Lens tərəfindən, 1845-ci ildə isə Turində fizika professoru Domeniko Botto (1791-1865) tərəfindən müəyyən edilmişdir.

Elektrik enerjisinin məsafəyə, məsələn, fabrik və zavodlarda dəzgahlara ötürülməsi ehtiyacı yaranan zaman Lens-Botto teoremi praktik əhəmiyyət kəsb etmiş oldu. Burada R faydalı yük rolunu dəzgahların elektrik mühərriklərinin müqaviməti oynayır, daxili R_i müqavimətinə isə, o cümlədən elektrikverilmə xətlərinin müqaviməti də daxildir. Bu müqavimət zavoddan elektrik stansiyasına qədər olan l məsafəsindən xətti asılı olaraq artır. Problemin mahiyyətini anlamaq üçün xəttin faydalı iş əmsalı (FİƏ) anlayışını daxil edək. FİƏ dedikdə əldə olunan P gücünün (dəzgahların gücünün) elektrik stansiyasının P_e gücünə nisbəti başa düşülür. Stansiya-


Emili Xristianoviç Lens.

C.Coulun şərəfinə BS-də iş vahidi coul adını almışdır: 1 C = 1 Kl · 1 V.


Ceyms Preskott Coul.

nın elektrogeneratorunun EHQ $\mathscr{E}$-ni və xətdəki I cərəyan şiddətini bilərək, stansiyanın gücünü hesablamaq asandır:

$$P_e = \mathscr{E} I. \qquad (17)$$

(14), (15) və (17) ifadələrindən xəttin (η) FİƏ-ni tapırıq:

$$\eta = \frac{P}{P_e} = \frac{I^2 R}{I \mathscr{E}} = \frac{1}{1 + R_i/R}. \qquad (18)$$

(18) düsturundan görünür ki, maksimal FİƏ qətiyyən maksimal ötürülən gücə uyğun deyil, çünki bu halda, Lens-Botto teoreminə görə, $R_i = R$, yəni $\eta = 0{,}5$. FİƏ-ni artırmaq üçün məftilləri daha yoğun etməklə xəttin R_i müqavimətini azaltmaq olar, lakin bu halda bahalı metalın sərfi artır. Məsələyə başqa cür yanaşmağa çalışaq. Sərf olunan P gücünü fiksə edərək, I cərəyanını aradan götürək və faydalı yükün R müqavimətini tapaq: $R = U^2/P$ və bunu xəttin FİƏ-nin (18) düsturunda yerinə yazaq:

$$\eta = \frac{1}{1 + R_i P/U^2}. \qquad (19)$$

Beləliklə, əgər verilmiş P gücü üçün gərginliyi $U \sim \sqrt{R_i} \sim \sqrt{I}$ qanunu ilə artırsaq, R_i-nin, yəni məsafənin artması ilə xəttin FİƏ azalmayacaqdır.

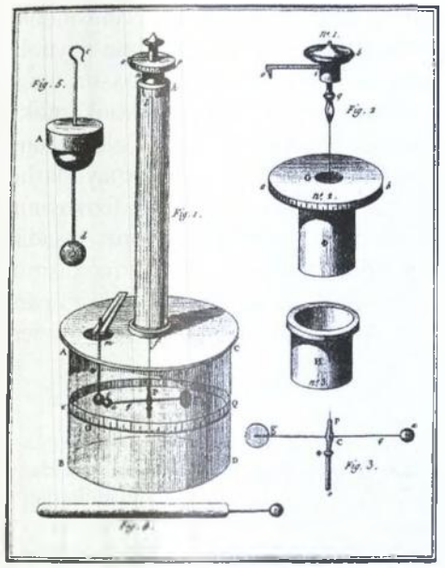
Elektrik enerjisinin uzaq məsafələrə verilməsində yüksək gərginlikdən istifadə etmək fikrinə Marsel Depre gəlmişdi. O, öz nəzəri sxemini Parisdə 1881-ci ildə elektriklərin Ümumdünya konqresində şərh etdi. Bir il sonra, Münxendə 1882-ci ilin beynəlxalq elektrotexniki sərgisində Marsel teleqraf xətləri vasitəsilə generatorun 2400 V gərginliyində 0,4 kVt-a yaxın gücünü Misbaxdan Münxenə (təxminən 56 km məsafəyə) ötürdü. Xəttin FİƏ 20%-ə yaxın olsa da, mühərrik onun qəbul (o biri) ucunda kiçik bir dekorativ su şəlaləsinin nasosunu hərəkətə gətirərək saz işləyirdi. 1880-ci illərin axırına yaxın verilən güclər artıq onlarca kilovata; gərginlik 6 kV-a, xəttin FİƏ isə 90%-ə çatmışdı.

ELEKTRİK + MAQNETİZM = ELEKTROMAQNETİZM

Az adam bilir ki, Kulon elektrik yüklərinin qarşılıqlı təsirini tədqiq etdikdən sonra iki maqnit arasında təsir edən qüvvəni ölçmüşdür. Bu mürəkkəb və maraqlı məsələ idi: nöqtəvi yük düzəltmək xeyli asandır, ancaq maqnitin həmişə (elektrik dipolu kimi) iki qütbü var.

Kulon eksperimentator üçün adi olan yolla getdi: əgər hər hansı bir hadisəni (yəni maqnitin hər iki qütbü ilə eyni zamanda qarşılıqlı təsiri) "yox etmək" qeyri-mümkündürsə, onda onu nəzərə alınmayacaq dərəcədə kiçik olana qədər azaltmaq lazımdır. Kulon o qədər uzun olan iki maqnitlənmiş mil düzəltdi ki, onların uzaqdakı qütblərinin qarşılıqlı təsiri əhəmiyyətsiz dərəcədə, çox cüzi oldu. 1788-ci ildə Kulon fırlanma tərəzisinin köməyilə nöqtəvi maqnit yüklərinin qarşılıqlı təsirinin miqdarı qanununu aldı: bu qütblərin qarşılıqlı təsir qüvvəsi onlar arasındakı məsafənin kvadratı ilə tərs mütənasibdir.

İlk baxışda Kulonun hər iki qanunu eyni cür görünürdü. Onlar arasında hər hansı bir əlaqə varmı, əgər maqnit yüklərinə (qütblərinə), dipollar kimi, həmişə cüt-cüt rast gəlinirsə, onda maqnetizmə də, elektrikə analoji baxmaq olarmı ("Maqnit monopolları: ümidlər və reallıqlar" əlavə oçerkinə bax). Məlum oldu ki, bu sualın cavabına doğru gedən yolun başlanğıcı artıq İtaliyada, yenə də qeyri-professional fizik tərəfindən qoyulmuşdur.





◄◄ Kulonun burulma tərəzisi. Qravüra. 1785-ci il. Uzun nazik ipdən bir ucunda yüklü kürəcik olan üfüqi mil (tərəzi qolu) asılıb. İkinci yük tərəzinin qapağından keçirilmiş milə bərkidilmişdir. Yüklərin qarşılıqlı təsiri zamanı tərəzi qolu dönür. Tərəzinin yuxarı hissəsindəki başlığı fırlatmaqla ipi burub, tərəzi qolunu ilkin vəziyyətə qaytarırdılar. Burulma bucağına görə yüklərin qarşılıqlı təsir qüvvəsini onlar arasındakı məsafədən asılı olaraq hesablamaq olar.

◄ Qalvani qurbağadan hazırlanmış preparatla təcrübə nümayiş etdirir.

QURBAĞA PƏNCƏSİ VƏ VOLTA SÜTUNU

1780-ci ilin noyabrında anatomiya professoru Luici Qalvani (1737-1798) öz laboratoriyasında qurbağadan hazırlanmış preparatları öyrənərkən aşkar etdi ki, onların pəncələri hərdənbir yığılıb dartılır. Tədqiqatçı dərhal başa düşdü ki, bu hərəkətlərin səbəbi elektrikdir – yaxınlıqda elektrofor maşını işləyirdi. Aşağıdakıları müəyyən etmək üçün 11 il gərgin tədqiqatlar aparmaq lazım gəldi: elektrik hadisələri yalnız elektrofor maşınında yox, həm də iki müxtəlif metalın kontaktı zamanı da yaranır.

Qalvaninin təcrübələri alimlərin diqqətini cəlb etdi; bu təcrübələrlə artıq həmin dövrdə tanınmış alim olan Alessandro Volta da maraqlandı.

Qalvani fərz etdi ki, metallar ölü qurbağanın əzələləri yığılan zaman, mənbəyi orqanizmin özündə yerləşən "heyvan elektrikinin" passiv keçiriciləri rolunu oynayır. 1792-ci ilin martında bu təcrübələri təkrar edən Volta belə nəticəyə gəldi: eksperimentdə qurbağa həssas elektrometr rolunu icra edir, elektrikin mənbəyi isə qurbağanın pəncəsinə qoşulmuş metallardır. Hazırda məşhur olan kontakt gərginliklər qanunu bu cür kəşf olunmuşdur: iki müxtəlif metalı birləşdirən zaman onlar arasında müəyyən potensiallar fərqi qərarlaşır.

1796-cı ildə o, elektroskopun köməyilə kontakt gərginliyi ölçdü, bundan sonra isə effekti gücləndirməyə çalışaraq, müxtəlif naqillərdən ibarət dövrələri tədqiq etməyə başladı. Məlum oldu ki, kənardakı naqillər arasında, onların bilavasitə kontaktı zamanı olduğu kimi gərginlik yaranır. 1799-cu ilin sonunda Voltanı müvəffəqiyyət gözləyirdi: bir-birindən duzlu su ilə isladılmış (rütubəti saxlamaq üçün) kartonla ayrılmış bir neçə on sink və gümüş qutu cütlərini bir-birinin



Luici Qalvani.

üzərinə qoyaraq, o, yeni güclü elektrik mənbəyi – Volta sütunu aldı.

Daim işləyən cərəyan mənbəyinin yaradılması dünyada elektrikə olan marağın kəskin artmasına səbəb oldu. 1800-cü ilin sentyabrında Paris Elmlər Akademiyasındakı məruzəsindən sonra Voltanı Napoleon qəbul etdi. Fransanın gələcək imperatoru alimin böyük pərəstişkarına çevrildi. O dövrdə konsul olan Bonapart elmlərə himayədarlıq edirdi və elektrik sahəsindəki tədqiqatlara görə Volta adına beynəlxalq mükafat təsis etdi. Şəxsən onun sərəncamı əsasında Politexnik məktəbində rekord ölçülərdə Volta sütunları hazırladılar. Bu cür himayədarlıq özünü tez göstərdi: fransız fizikasının qızıl dövrü 1820-ci illərə təsadüf edir; həmin dövrdə fransız fizikasının üfüqlərində bütöv bir adlar bürcü parladı: Araqo, Bio, Savar, Laplas, Amper.

ALESSANDRO VOLTA



İtaliya şəhəri Paviya universitetinin fizika professoru Alessandro Voltanı (1745-1827) müasirləri əvvəlcə elektrik maşınının – qatranlı elektroforun (1775-ci il), həssas elektroskopun (1781-ci il) və kondensatorun (1783-cü il) yaradıcısı kimi tanıyırdılar. İtaliyanın Paviya şəhərindəki universitetinin professoru Luici Qalvaninin "qurbağa" təcrübələri haqqında eşidən Volta onları təkrar etmək qərarına gəldi (1792-ci il) və ilk vaxtlar guya heyvanların əzələlərində xüsusi, məsələn, metallara toxunan zaman ölü qurbağa pəncəsini yığılmağa məcbur edən "canlı elektrikin" mövcud olduğunu söyləyən Qalvani ilə razılaşmağa meyil göstərdi. Lakin 1793-cü ildə İsveçrə alimi İohann Georq Zultserin (1720-1779) təcrübələrini təkrar edərək, Volta başqa nəticəyə gəldi. Zultser müəyyən etmişdi ki, iki metalın birləşdiyi yerə dillə toxunduqda ağızda metaldan asılı olaraq zəif turşulu və ya zəif qələvili dad əmələ gəlir. Eyni cür hisslər elektroforun müsbət və ya mənfi qütbünə dillə toxunduqda da yaranır. Zultserin müşahidələrinin doğruluğuna əmin olan Volta başa düşdü ki, heç bir "canlı elektrik" mövcud deyil və Qalvaninin təcrübəsində qurbağa pəncəsi, onun düşündüyü kimi elektrik mənbəyi rolunu yox, iki müxtəlif metalı birləşdirən naqil rolunu oynayır. Volta öz təcrübələrində müəyyən etdi ki, Qalvaninin təcrübələrində başlıca olan iki metalın kontaktıdır ki, bu zaman kontakt elektriki yaranır: əgər qurbağa pəncəsi yalnız bir metala toxunursa, onda bu pəncədə heç bir yığılma müşahidə olunmur. Eyni zamanda elektroskopun göstərişləri onu göstərir ki, bu metalları ayırdıqda, onların hər birində elektrik yükü qalır. Bir çox cəhdlərdən sonra Volta müşahidə olunan effekti gücləndirməyə və kifayət qədər güclü sabit cərəyan mənbəyi – məşhur Volta sütununu qurmağa nail oldu.

Voltanın özü London Kral Cəmiyyətinin prezidenti ser Cozef Benksə yazdığı məktubunda (1800-cü il) öz ixtirasını belə təsvir etmişdir: "Bəli, mənim haqqında danışdığım və Sizi mütləq heyrətə gətirəcək qurğu müəyyən ardıcıllıqla bir-birinin dalınca düzülmüş müəyyən sayda yaxşı naqillərdən başqa bir şey deyildir. Hər biri qalay və ya yaxşı olar, sink lövhələrin üzərinə qoyulmuş 30, 40, 60 və ya daha çox mis və ya, yaxşı olar, gümüş lövhələr və bir o qədər çox sayda sudan və ya adi sudan daha yaxşı keçirici olan istənilən digər mayedən, məsələn, duzlu su, qələvi və s. ibarət olan və ya da göstərilən mayelərin hopdurulduğu kağız, dəri parçalarından və s. ibarət olan ara qatlardan ibarətdir. Bu parçalar hər bir cütün lövhələri arasına və ya iki müxtəlif metalın hər bir kontaktına qoyulur. Üç növ naqilin həmişə eyni bir ardıcıllıqla bu cür növbələşməsi – yeni cihazı əmələ gətirən hər şey bundan ibarətdir. Artıq deyildiyi kimi, yeni cihaz Leyden bankaları və ya elektrik batareyaları kimi eyni cür sarsıntı doğuraraq, eyni növ təsir yaradır, lakin qüvvədə və partlayışların, qığılcımların səsküyündə, boşalmanın davametmə müddətində güclü yüklənmiş batareyalardan geri qalır. Öz təsirinə görə yeni cihaz son dərəcə böyük tutuma malik olan zəif yüklənmiş batareya ilə müqayisə oluna bilər, lakin batareyanın qüvvə və imkanlarını sonsuz üstələyir, çünki hər dəfə ona nəsə toxunduqda boşalma verməsi üçün, bu toxunmalar nə qədər tez-tez olsa da, batareyadan fərqli olaraq, əvvəlcədən kənar elektriklə yüklənməyə ehtiyac yoxdur".

1801-ci ildə Volta Zn, Cu, Ag metallarının gərginlik sırası adlanan sırasını qurdu (müasir gərginlik sırası xeyli uzundur): bu sırada iki metal bir-birindən nə qədər aralı yerləşirsə, onlardan düzəlmiş Volta sütunu bir o qədər çox gərginlik verir.

İstilik haqqında təlimin inkişafında Karno tsiklinin oynadığı katalizator rolunu elektrik və maqnetizm haqqındakı təlimin inkişafında eynilə Volta cərəyan mənbələri oynamışdır. Elektrik gərginliyinin vahidi (V) Voltanın adı ilə adlandırılmışdır.



A.Volta özünün ixtira etdiyi elektrik batareyasını Fransanın birinci konsulu Napoleon Bonaparta nümayiş etdirir. 1800-cü il.

MÜXTƏLİF SİMALARDAKI VƏHDƏTİ NECƏ GÖRMƏLİ

1820-ci il fevralın ortalarında Danimarka fiziki, Kopenhagen universitetinin professoru Hans Kristian Ersted tələbələrə mühazirə oxuyurdu. O, elektrik batareyasının qütblərini məftil parçası ilə birləşdirərək xatırlatdı ki, elektrik cərəyanının təsiri altında naqil qızır və hətta közərənə qədər qıza bilər. Dinləyicilərin baxışları məftilə yönəlmişdi, lakin mühazirəçinin assistenti təsadüfən yaxınlıqda duran kompasa baxdı. Cavan oğlan əqrəbin titrədiyini və azca döndüyünü gördü. O, bu haqda dərhal professora xəbər verdi. Ersted üçün bu hadisə tamamilə gözlənilməz idi. Alim kompası məftilə yaxınlaşdıraraq təcrübəni dönə-dönə təkrarladı və aydınlaşdırdı ki, əqrəb naqilə perpendikulyar dönməyə çalışır. Beləliklə, Ersted müəyyən etdi ki, elektrikin o dövrə qədər məlum olan iki növündən – statik və mütəhərrik (Volta) növlərindən yalnız axırıncısının (o dövrün terminologiyasına görə elektrik konfliktinin) maqnetizmlə əlaqəsi vardır. Elektrikin maqnit təzahürünə ilk diqqət yetirən Ersted olmamışdır. Hələ 1751-ci ildə Amerika alimi Bencamin Franklin elektrik batareyasının boşalmasını naqillərdən buraxaraq, onların maqnit xassələrini aşkar etmişdi. Onun nəticələrini Moskva universitetinin professoru İvan Alekseyeviç Dviqubski (1771 və ya 1772-1840) təsdiq etdi. O, Leyden bankası boşalmasını maqnit iynəsindən buraxdı və əqrəbin qütblüyünün dəyişdiyini müşahidə etdi.



H.K.Ersted təcrübəsi. R.Ştorxun qravürası.

Fransız Araqo elektrik boşalmasının maqnit təsirinə dair faktların çox böyük kolleksiyasını toplamışdı. Ona məlum idi ki, ildırımın düşdüyü gəmilərdə çox vaxt kompas sıradan çıxır, qalan polad əşyalar (saatların yayları, silahlar) isə maqnitlənirdi. Erstedin çıxardığı nəticələrin qeyri-adiliyi onda idi ki, əqrəbin maqnit qütbünə təsir edən qüvvə, bu qütbü məftillə birləşdirən radius-vektor boyunca yönəltmirdi. Bu, Nyuton mexanikası çərçivəsinə sığışmırdı; Nyuton mexanikası üçün yalnız radial qüvvələr adi hesab olunurdu.

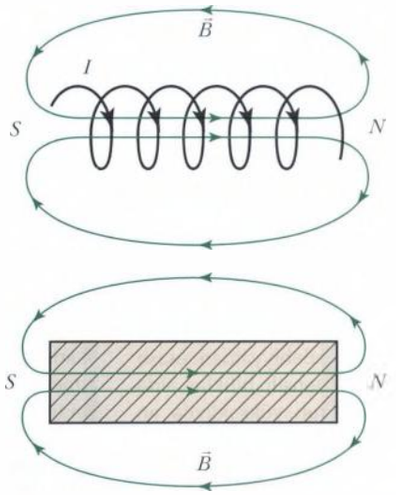
Ersted öz müşahidələri haqqında 1820-ci il iyulun 21-də "Elektrik konfliktinin maqnit əqrəbinə təsirinə dair təcrübələr" məqaləsində məlumat vermişdir. Sonra hadisələr sürətlə inkişaf etdi: həmin ilin sentyabrında fransız fiziki Dominik Fransua Araqo (1786-1853) Paris Elmlər Akademiyasının iclasında Erstedin təcrübələri haqqında danışmış və onları təkrar etmişdi. Nümayişdə başqa bir akademik, riyaziyyatçı Andre Mari Amper iştirak edirdi. O fərz etdi ki, yeni kəşf olunmuş hadisənin mahiyyəti – yükün hərəkətindədir və özü lazımi ölçmələri aparmağı qərara aldı.

Amper əmin idi ki, qapalı cərəyanlar maqnitlərə ekvivalentdir. 1820-ci il sentyabrın 24-də o, Volta sütununa iki məftil spiral birləşdirdi və onlar maqnitə çevrildi: eyni ucları ilə itələnir, digər ucları ilə isə cəzb olunurdu. İki adi düzxətli cərəyanlı məftilləri yanyana yerləşdirməklə, Amper müəyyən etdi ki, onlar da qarşılıqlı təsirdə olur: cərəyanlar eyni istiqamətə yönəldikdə onlar cəzb olunur, cərəyanlar əks istiqamətlərə yönəldikdə itələnir. Sonrakı gün Amper öz müşahidələri haqqında akademiyada məlumat verdi və "bütün maqnit hadisələrini sırf elektrik effektləri kimi izah etdi".

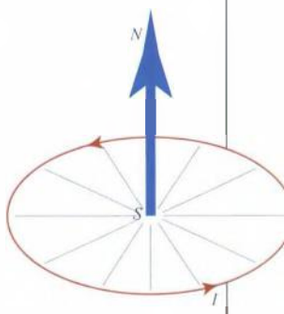
Amper elektromaqnitin ilk nümunəsini yaratdı: o aşkar etdi ki, polad tircik cərəyanlı spiralın daxilində yerləşdirildikdə maqnitlənir və maqnit sahəsini dəfələrlə gücləndirir.

Belə çıxır ki, hərəkət edən yüklər (cərəyanlar) öz ətrafında əlavə maqnit sahəsi də yaradır. Lakin bu sahədə maqnitə və ya digər cərəyana təsir edən qüvvə elektrik qüvvəsindən istiqamətilə fərqlənir – maqnit əqrəbi məftilə perpendikulyar yönəlməyə çalışır. Digər cərəyana təsir edən qüvvənin öyrənilməsi böyüyüb ayrıca tədqiqata çevrildi və gözlənilməz nəticələrə gətirdi: məlum oldu ki, qüvvə həmişə maqnit sahəsinə gətirilmiş naqilə (tədqiqatın sadəliyi üçün naqil düzxətli idi) perpendikulyar yönəlir. Bu qüvvə (*Amper qüvvəsi*) üçün riyazi ifadəni vektorial hasil şəklində yazmaq daha sadədir: $\vec{F}=I[\vec{L}\times\vec{B}]$, burada I – naqildən axan cərəyan; $\vec{L}$ – naqilin uzunluq vektoru olub, cərəyanın axdığı tərəfə yönəlir; $\vec{B}$ – sahənin xarakteristikasıdır. $\vec{B}$ kəmiyyəti *maqnit induksiyası* adlanır və elektrik intensivliyinin analoqudur.

Amper qanunu həm nəzəriyyədə, həm də praktikada aparıcı rol oynamışdır: bu qanundan istifadə etməklə, birbaşa ya maqnit induksiyasının qiymətini, ya da naqildən axan cərəyanın



Cərəyanlı sarğac düz maqnitin sahəsi kimi sahə yaradır.



H.K.Erstedin təcrübəsində maqnit əqrəbi cərəyanlı məftilə perpendikulyar bərqərar olur.

İngilis kimyaçısı Hamfri Devi (1778-1829) 1810-cu ildə güclü batareyanı iki kömür tirciyə qoşmaqla elektrik qövsü aldıqdan sonra elektrik cərəyanının istilik təsiri yaxşı öyrənildi. Elektrik qövsünün köməyilə Devi hətta volframı da əridə bildi. Daha əvvəl, 1802-ci ildə elektrik qövsünü Sankt-Peterburqda Tibbi Cərrahiyyə Akademiyasının professoru Vasili Vladimiroviç Petrov (1761-1834) kəşf etmiş və işıqlanma üçün istifadə etməyə çalışmışdı, lakin Qərbdə onun işlərindən xəbərsiz idilər. Lakin Pavel Nikolayeviç Yabloçkov (1847-1894) tərəfindən patentləşdirilmiş qövs lampası ("Yabloçkov şamı") "rus işığı" adı altında, demək olar ki, bütün dünyanı dolandı.

Naqilin en kəsiyindən vahid zamanda daşınan yükün miqdarı, Amperin təklifi ilə *cərəyan şiddəti* (I) adlandırıldı. BS-də bu kəmiyyətin vahidi amper (A) adını aldı, tarixi olaraq cərəyanın istiqaməti bu cərəyanı yaradan müsbət yüklərin hərəkət edəcəyi istiqamət hesab olunmuşdur.

HANS KRİSTİAN ERSTED

Fiziki hadisələrin rəngarəngliyi arxasında onların qarşılıqlı əlaqəsini, dünyanın vəhdətini Hans Kristian Ersted (1777-1851) öz kolleqalarının hər birindən daha aydın hiss edirdi. Kopenhagen universitetinin məzunu (1797-ci il), sonralar isə professoru (1806-cı ildən) olan Ersted bütün ömrü boyu, əslində, bir problemin həlli ilə məşğul olmuşdur: hadisələrin qarşılıqlı əlaqəsini müəyyənləşdirmişdir. Onun əldə etdiyi nailiyyətlərdən ən əhəmiyyətlisi, ümumi fikrə görə, 1820-ci ildə etdiyi kəşf hesab olunur: cərəyanlı naqilə yaxınlaşdırılan maqnit əqrəbi meyil edir. Beləliklə, Ersted elektriklə maqnetizm arasındakı qarşılıqlı əlaqəni aşkar etdi; bu əlaqənin mövcudluğuna o heç vaxt şübhə etməmişdi (lakin daxili inam, o nə qədər dərin olsa da, bir şeydir, qabaqcadan duyulan hadisənin reallığına heç bir şübhə yeri qoymayan eksperiment isə tamam başqa şeydir).

Yalnız Erstedin taleyində yox, həm də fizika tarixində əlamətdar olan bu hadisə haqqında 1830-cu ildə Şotlandiyanın paytaxtı Edinburqda nəşr olunmuş qədim ensiklopediya görün necə yazır: "Elektromaqnetizm 1820-ci ildə Kopenhagen universitetinin professoru Hans Kristian Ersted tərəfindən kəşf olunmuşdur. Özünün elm sahəsindəki bütün fəaliyyəti müddətində o, belə bir fikrin tərəfdarı olmuşdur ki, maqnit təsirləri də, elektrik təsirləri kimi, eyni qüvvələr tərəfindən yaradılır, özü də adi səbəblərdən çox fəlsəfi prinsipi rəhbər tuturdu; bu prinsipə görə bütün hadisələri eyni bir ilkin qüvvəyə aid etmək lazımdır..."

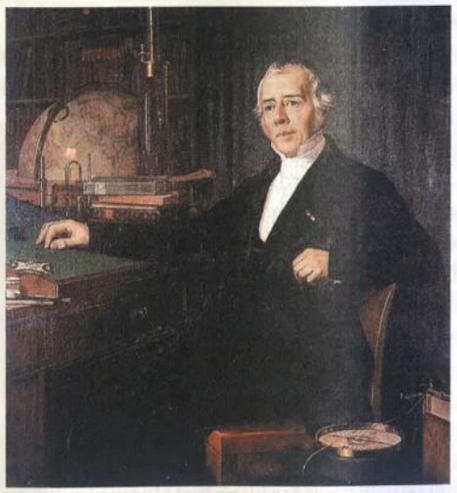
1820-ci ildə o, öz təcrübələrini xeyli böyük qalvanik elementlə təkrar etdi. Bu dəfə effekt tam gözə çarpırdı, halbuki ilk təcrübələrdə çox zəif idi, çünki həddən artıq nazik naqillərdən istifadə olunurdu. Əgər qalvanik cərəyan istilik və işıq təsirləri göstərmirsə, Ersted artıq yenicə fərz etmişdi ki, ümumiyyətlə heç bir maqnit təsiri yoxdur, lakin həmin anda məlum oldu ki, böyük diametrli naqillərlə daha güclü maqnit effekti alınır".

1821-ci ildə Ersted birincilər sırasında işığın elektromaqnit təbiəti haqqında hipotez irəli sürmüşdü (bu hipotez yalnız yarım əsr keçdikdən, yəni Maksvell elektromaqnit sahəsinin nəzəriyyəsini qurduqdan sonra fizikada "vətəndaşlıq hüququ" qazandı). 1823-cü ildə alim, termoelektrik effektini kəşf etməklə (Zeebekdən və Furyedən asılı olmadan), istilik və elektrik hadisələri arasındakı qarşılıqlı əlaqəni müəyyən etdi.

Bəzi dielektriklərin səthinə mexaniki təsir etmək nəticəsində elektrik yükləri meydana çıxa bilər (pyezoelektrik effekti). Səs rəqsləri, o cümlədən bu cür təsirlərə aiddir. Pyezoelektrik effektinin kəşfini qabaqcadan duyaraq, Ersted səsin təsirilə elektrik yüklərinin yarandığını aşkar etməyə çalışmışdı (doğrudur, uğursuz olmuşdur): onun zehni, ağlı qarşısında səslə elektrikin qarşılıqlı asılılığının mənzərəsi dayanmışdı.

1824-cü ildə Ersed Danimarkada təbii-elmi bilikləri yayan Cəmiyyət – kütləvi mühazirələr oxumaq ənənəsi olan London Kral İnsitutunun analoqunu yaratdı. Danimarkada ilk fizika laboratoriyasını da o yaratmışdır. Alim 1829-cu ildən Kopenhagen universitetində fizika kafedrasını tərk etmədən Kopenhagen politexnik məktəbinin direktoru oldu.

Ersted bir çox xarici akademiyaların, o cümlədən Peterburq Elmlər Akademiyasının da üzvü idi.



Hans Kristian Ersted. V.N.Marstrandın portret işi. Fridrixsborq. Şəhərin milli tarixi muzeyi.

ANDRE MARİ AMPER

Görkəmli fransız fiziki Andre Mari Amper 1775-ci ildə Lion şəhərində anadan olmuşdur. Onun atası Jan Jak Amper yalnız bəxti gətirmiş kommersant olmamış, həm də çox elmli bir adam olmuşdur. Andre oxumağı çox erkən öyrənmişdi və atasının əla seçilmiş kitabxanasında tapdığının, demək olar ki, hamısını heyranlıqla mənimsəmişdi: bu oğlan heç vaxt məktəbə getməmişdi, lakin çox yaxşı ev təhsili almışdı. O, 13 yaşında özünün ilk riyazi məruzəsini Lion akademiyasına təqdim etmişdir. 18 yaşına qədər yunan, latın və italyan dillərini mənimsəmiş, fizikadan, ali riyaziyyatdan, botanikadan, ədəbiyyatdan əsaslı surətdə biliyə malik olmuşdur. Şəxsi təhsili biliklər əldə etməyin başlıca üsulu sayan Amper ruh yüksəkliyilə ən müxtəlif elmlərlə məşğul olmuşdur.

1793-cü ildə o dövrdə Lionun prokuroru işləyən Jan Jak Amperi inqilabi tribunalın əmrilə gilyotində edam etdilər. Onun ölümü ilə ailə, demək olar ki, bütün gəlir mənbələrini itirdi və Andre Lionda riyaziyyatdan, fizika və kimyadan xüsusi dərslər verməli oldu.

1802-ci ildə o, Burqa şəhərinin Mərkəzi məktəbində fizikadan dərs deməyə başladı. Amper, görünür, məhz burada, riyaziyyatdan məşğələlərini dayandırmadan fizika elmilə ciddi maraqlandı. Həmin ildə də ehtimal nəzəriyyəsinə aid "Oyunların riyazi nəzəriyyəsinə dair mülahizələr" adlı kiçik məqalə yazdı. Məqalə bir neçə alim tərəfindən yüksək qiymət aldı; onların arasında məşhur fransız riyaziyyatçısı P.S.Laplas da var idi. Amperi Lionda açılmış liseydə dərs deməyə dəvət etdilər, 1803-cü ilin oktyabrında isə Paris Politexnik Məktəbində – Fransanın ən məşhur ali texniki məktəbində repetitor vəzifəsinə təyin etdilər. Beş il keçəndən sonra o, riyazi analiz üzrə professor oldu, 1814-cü ildə isə riyazi elmlər qrupu üzrə Fransa akademiyasına üzv seçdilər. Alimin həyatının ən məhsuldar dövrü başladı. O, düz 1815-ci ilədək özünün bütün boş vaxtlarını kimyaya, diferensial tənliklərə və ehtimallar nəzəriyyəsinə həsr etdi. Onun riyaziyyata aid işləri Laqranjı və Laplası heyran edirdi.

1820-ci ilin yayında Kopenhagen universitetinin professoru H.K.Erstedin təcrübələri elmi cəmiyyəti vəcdə gətirdi. Amper danimarkalının nəticələrinin əhəmiyyətini dərhal anladı və elektrikin maqnetizmlə əlaqəsini öyrənməyə başladı. Artıq bir həftədən sonra o, özünün tapdığı və cərəyanlı naqilin yaxınlığındakı kompas əqrəbinin dönmə istiqamətini təyin edən "üzgüçü qaydası" haqqında danışaraq, akademiyada çıxış etdi, daha bir həftə keçdikdən sonra isə ikicərəyanlı naqilin əvvəllər məlum olmayan qarşılıqlı təsiri haqqında məlumat verdi. Danışırmışlar ki, Amper məruzə edən vaxt onun kolleqalarından biri söz atıb: "Axı burada yeni nə var ki? Aydındır ki, əgər iki cərəyan maqnit əqrəbinə təsir edirsə, onda onlar bir-birinə də təsir edər". Özünü itirən tədqiqatçının köməyinə Araqo gəlmişdir. O, cibindən iki açar çıxarmış və demişdir: "Onların da hər biri əqrəbə təsir edir, ancaq bir-birinə isə onlar heç cür təsir etmir".

Amperin bu kəşfi onun yeni bir elmi – elektrodinamikanı yaratmasına səbəb oldu. Hesab edirlər ki, alim elektrodinamikanın əsas ideyalarını tam mənası ilə iki həftə ərzində işləyib hazırlamışdır, baxmayaraq ki, buna qədər elektriklə, demək olar, məşğul olmamışdır.

Amper eyni zamanda dərs deməyi davam etdirirdi: 1818-ci ildən o, ali normal məktəbdə məntiqdən, Sorbonnada isə astronomiyadan mühazirə oxumuşdur; bir ildən sonra fəlsəfə professoru adını aldı. 1824-cü ildə Amperi Fransanın ən qədim tədris və elmi tədqiqat müəssisələrindən biri olan de Frans kollecində fizika kafedrasının rəhbəri seçdilər. O, ömrünün axırına qədər bu vəzifəni tutdu. Həmin 1824-cü ildə də Amper Edinburqdakı Kral Elmi Cəmiyyətinin, İsveçrə Təbiəti Yoxlayanlar Cəmiyyətinin və bunlardan heç də az tanınmayan təşkilatların üzvü oldu.

Şəxsi həyatında Amper xoşbəxt deyildi: birinci arvadı tamamilə gənc ikən ölmüşdür, ikinci arvadından isə o özü aralanmışdı. Amperin himayəsində (əllərində) iki uşaq qalmışdı. Daimi pul çatışmazlığı üzündən o, həmişə bütün ölkəni gəzərək, məktəblərdə və liseylərdə inspektor işləmişdir. 45 yaşında alimin səhhəti kəskin pisləşdi: stenokardiya başladı. Dostlarından birinə o yazmışdı: "Mən heç vaxt bu cür bədbəxt olmamışam, iztirablardan bu cür əziyyət çəkməmişəm və işlə həddən artıq yüklənməmişəm". Buna baxmayaraq, Amper elektrikin və maqnetizmin tədqiqatları ilə ruh yüksəkliyilə maraqlanmaqda davam edirdi". Daha bir neçə elmi cəmiyyət, o cümlədən Sankt-Peterburq Elmlər Akademiyası da (1830-cu il) onu öz üzvlüyünə seçdi.



Fransanın cənub rayonlarına etdiyi yoxlama səfərlərindən birində Amper, 1836-cı il iyunun 10-da Marselin kiçik mehmanxanasında vəfat etdi. 1869-cu ildə onun cənazəsini Parisə gətirdilər və Monmartr qəbiristanlığında dəfn etdilər. Başdaşında belə yazılmışdı: "O, böyük olduğu kimi də xeyirxah və sadə olmuşdur".

şiddətini ölçmək olar. Bu qanun əsasında elektrik cərəyanının şiddətini ölçmək üçün ilk cihazlar – *qalvanometrlər* qurulmuşdur.

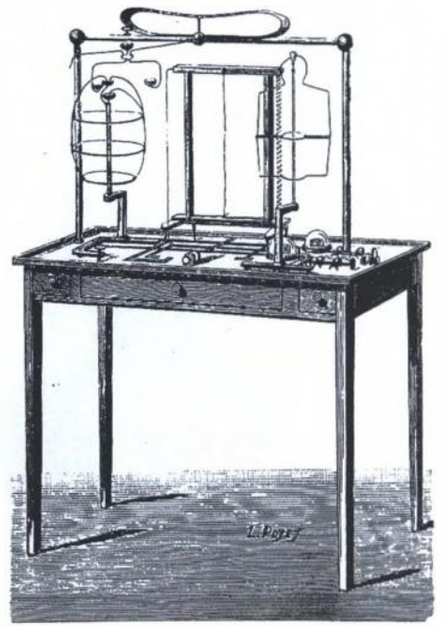
ELEKTRODİNAMİKANIN YARANMASI

Ersted tərəfindən elektrik cərəyanının maqnit təsiri kəşf olunduqdan sonra Fransua Araqo bu hadisənin hamıya təbii görünən izahını təklif etdi: naqil ondan axan elektrik cərəyanının sayəsində maqnitə çevrilir. Araqonun bu nöqteyi-nəzərini müdafiə etmək üçün maqnit yüklərinin naqildə (maqnitin qütblərinə analoji olan) paylanmasının çox incə modellərini qurmaq lazım gəldi. Buna baxmayaraq, Araqonun bu nöqteyi-nəzəri geniş yayıldı.

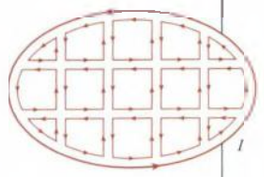
Maqnit sahəsinin cərəyana təsirinin (*Amper qanununun*) kəşfindən sonra buna bənzər qurmaların süniliyi aydın oldu. Tətbiq olunmuş maqnit sahəsinə perpendikulyar olan qüvvəni maqnit yüklərinin cərəyanlı naqil boyunca paylanması ilə izah etmək olmaz: çünki onların istənilən paylanması zamanı məftilə təsir edən qüvvə sahə boyunca yönələrdi!

Amper Araqonun təsvir etdiyi mənzərəni tamamilə inkar edən öz məxsusi izahını verdi. O fərz etdi ki, maqnit müəyyən daxili qapalı cərəyanlar sistemindən ibarətdir. Bundan başqa, Amper göstərdi (həm təcrübədə, həm də hesablamaların köməyilə) ki, kiçik dairəvi cərəyan sarğının mərkəzində onun müstəvisinə perpendikulyar yerləşən kiçicik maqnitə ekvivalentdir, deməli, istənilən cərəyanlı konturu maqnit vərəqciklə – sonsuz kiçik qalınlıqlı maqnitlə əvəz etmək olar.

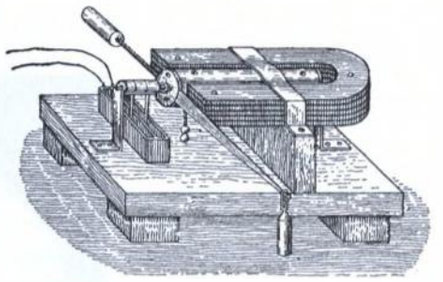
Amperin istənilən maqnitin daxilində qapalı cərəyanlar mövcuddur hipotezi, sonralar *molekulyar cərə-*



Maqnit qapalı cərəyanlar sistemindən ibarətdir.



Amper qalvanometri.



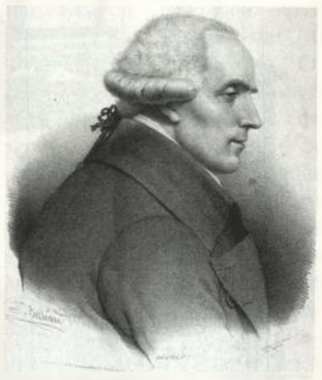
D'Arsonval qalvanometri.

$\vec{a}$ və $\vec{b}$ vektorlarının vektorial hasili $\vec{c} = [\vec{a} \times \vec{b}]$ elə vektora deyilir ki, onun qiyməti $c = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \sin\alpha$-ya bərabərdir, burada $|\vec{a}|$, $|\vec{b}|$ – vuruqların modullarıdır (uzunluqlarıdır), α – onlar arasındakı bucaqdır. $\vec{c}$ vektorunun istiqaməti burğu qaydası ilə təyin olunur: burğunu ən qısa qövs üzrə bir vektordan digər vektora fırladan zaman burğunun irəliləmə hərəkəti vektor hasilinin istiqamətini göstərəcəkdir.

Ən sadə qalvanometri – multiplikatoru 1820-ci ildə alman fiziki İohann Şveygger (1779-1857) quraşdırmışdı. Cihaz, üzərinə məftil sarınmış və mərkəzində maqnit əqrəbi olan düzbucaqlı çərçivədən ibarətdir. Xeyli sonra, 1882-ci ildə fransız fizikləri Marsel Depre (1843-1918) və Jak Arsen d'Arsonval (1851-1940) yüksək həssaslığa malik qalvanometr hazırladılar: qalvanometrdə ölçülən cərəyan güclü sabit maqnitin sahəsində yerləşdirilmiş yüngül mütəhərrik sarğacdan keçir.

BİO-SAVAR-LAPLAS QANUNU

Fransızlar Jan Batist Bio (1774-1862) və Feliks Savar (1791-1841) düz cərəyanlı naqilin yaratdığı maqnit induksiyasını təsvir edən miqdarı qanunu tapmağa çalışmışlar. Onlar hələ Kulon tərəfindən istifadə olunmuş burulma rəqsləri metodunu tətbiq etdilər: əgər maqnit sahəsində yerləşən maqnit əqrəbini tarazlıq vəziyyətindən yüngülcə meyil etdirsək, onda əqrəb periodu ona təsir edən qüvvənin qiymətindən asılı olan periodla rəqs edəcəkdir. Nəticədə Bio və Savar müəyyən etdilər ki, cərəyanlı düz məftilin maqnit sahəsinin induksiyası məftildən hesablanan r məsafəsilə tərs mütənasib olaraq zəifləyir.



Pyer Simon Laplas.

Məşhur fransız astronomu, fiziki və riyaziyyatçısı Pyer Simon Laplas (1749-1827) Bio ilə söhbətdən bu nəticələri eşidərək təklif etmişdir: əgər cərəyanlı məftili kiçik $d\vec{l}$ parçalarına (elektrostatikada nöqtəvi yüklərin analoqları olan cərəyan elementlərinə) bölsək, onda belə element məsafənin kvadratı ilə tərs mütənasib olan dəyişən $d\vec{B}$ maqnit induksiyası yaratmalıdır. Ölçmələrin nəticələrini təhlil edərək, Bio və Savar cərəyan elementinin doğurduğu $d\vec{B}$ maqnit induksiyasını hesabladılar:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}.$$

Bu münasibət Bio-Savar-Laplas qanunu adını almışdır.

Əgər düz məftilin bütün cərəyan elementlərinin maqnit induksiyasına verdikləri $d\vec{B}$ paylarını cəmləsək, onda tam induksiya $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ olar. Maqnit induksiyasının qiyməti naqilə qədər olan məsafədən tərs mütənasib olaraq azalır ki, bu da Bio və Savarın eksperimentlərində müşahidə olunmuşdur.

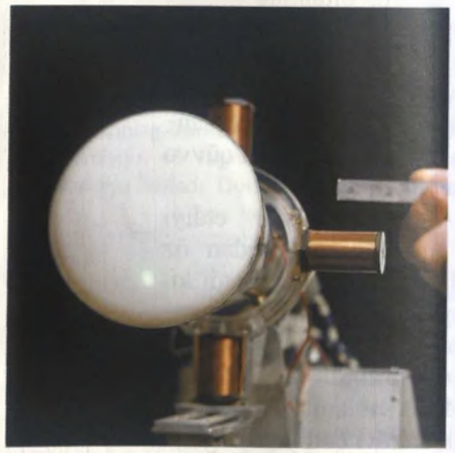
LORENS QÜVVƏSİ

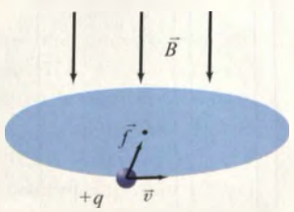
Amper qanunundan asanlıqla fundamental fiziki münasibətlərdən birini: maqnit sahəsində hərəkət edən yüklü zərrəciyə təsir edən qüvvənin – Lorens qüvvəsinin ifadəsini almaq olar.

Tutaq ki, hər birinin yükü q olan zərrəciklər en kəsiyi S, uzunluğu L olan məftilin daxilində $\vec{v}$ sürətilə hərəkət edir. Əgər n – zərrəciklər sayının sıxlığıdırsa, onda cərəyan şiddəti $I = qnSv$ olar. Naqilə təsir edən $F = ILB\sin\alpha = qnSvLB\sin\alpha$ Amper qüvvəsini (SL-in naqilin V həcmi, nV-nin isə $nV = N$ cərəyan yaradan yüklərin ümumi sayı olduğunu nəzərə almaqla) $F = NqvB\sin\alpha$ kimi göstərmək olar.

Deməli, hər bir yükə $f = qvB\sin\alpha$ və ya vektorial şəkildə $\vec{f} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ qüvvəsi təsir edir (çünki bu qüvvə hərəkət edən yüklərin həm $\vec{v}$ sürətlərinə, həm də $\vec{B}$ maqnit induksiya vektoruna perpendikulyardır).

İlk dəfə bu ifadəni Niderland fiziki Hendrik Anton Lorens çıxarmışdır. Bu düsturun gözəlliyi ondadır ki, onu prinsipial olaraq yeni, qeyri-maddi olan obyekti – sahəni daxil etmədən izah etmək olmaz.

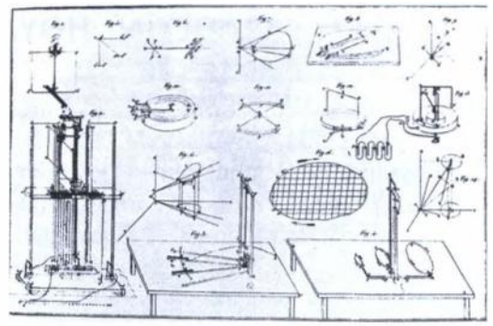


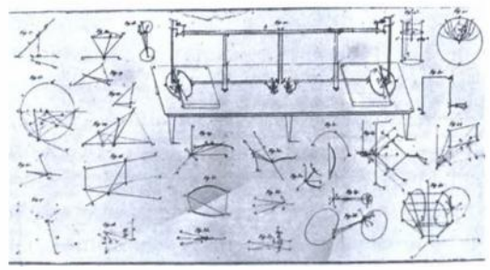


Axı istənilən elastiki mühit (məsələn, dünya efiri) həyəcanlanmanı mənbədən (maqnitdən) qəbuledicyə (yüklü zərrəciyə) radial istiqamətdə ötürür və qəbuledicyə təsir edən qüvvə mexanika üçün bu qədər qəribə olan tərzdə yönələ bilməz.

Maqnit sahəsində uçan zərrəciyə Lorens qüvvəsi təsir edir. Bu qüvvə maqnit sahəsinin induksiya vektoruna və zərrəciyin sürətinə perpendikulyar yönəlmişdir. Elektron-şüa borusuna yaxınlaşdırılan maqnit sahəsində elektronlar seli aşağı yerini dəyişir.

yanlar haqqında hipotez adını aldı və cərəyanların mükəmməl qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsinin – *elektrodinamikanın* əsasında durdu. Onun yaradıcısı Amper idi. Elektrodinamika maqnit hadisələrini elektrik cərəyanlarının təsirilə izah etdi və beləliklə, hərəkət edən elektrik yüklərinin – cərəyanların qarşılıqlı təsirinə baxaraq, Kulon elektrostatikasını tamamladı. Amper özünün riyazi hesabladığı iki elementar cərəyanın qarşılıqlı təsir qanununa əsaslanaraq, nəzəri yolla Bio-Savar-Laplas qanununu, maqnit qütbləri üçün Kulon qanununu, həmçinin cərəyanlar sistemi kimi baxılan iki maqnitin qarşılıqlı təsir qanununu çıxardı. 1821-ci ildə Amper, Yer kürəsində daxili cərəyanların mövcud olması fərziyyəsinə əsaslanaraq, Yerin maqnit sahəsi mənşəyinin nəzəriyyəsini yaratdı. Maraqlıdır ki, İtaliya ordusunun kapitanı, Amper nəzəriyyəsinə aludə olan Leopoldo Nobili (1784-1835) qlobusa paralellər boyunca məftillər sarıyaraq və onlara cərəyan mənbəyi – volta sütunu qoşaraq, 1822-ci ildə Yer cərəyanlarının modelini qurdu. İki il keçdikdən sonra Yer maqnetizminin həmin modelini ingilis fiziki və riyaziyyatçısı Piter Barlou (1776-1862) təklif etdi; bu model *Barlou kürəsi* adı altında geniş yayıldı.







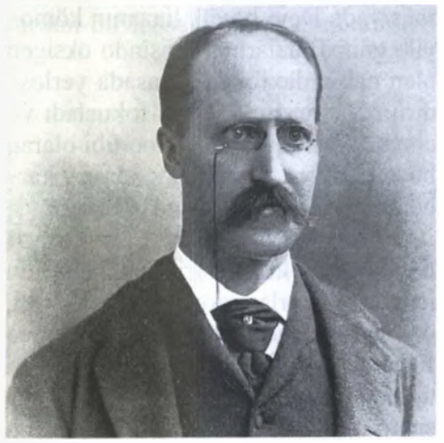
THÉORIE

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES,

PAR ANDRÉ-MARIE AMPÈRE,

A PARIS,

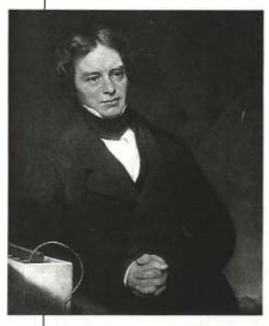
A.Amperin "Elektrodinamik hadisələrin yalnız təcrübədən çıxarılmış nəzəriyyəsi" kitabının ilk nəşri. Titul vərəqi və şəkillər. Paris. 1826-cı il.



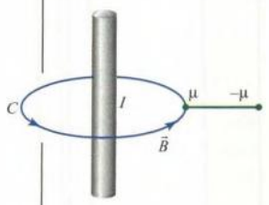
Henri Rouland.

Əslində Amper öz işlərilə laxlamış binanı – Nyutonun mexaniki konsepsiyasını, onun tətbiq oblastını xeyli genişləndirməklə möhkəmlətdi. Amper tədqiqatlarının nəticələrini "Elektrodinamik hadisələrin yalnız təcrübədən çıxarılmış nəzəriyyəsi" adlı yekun əsərində şərh etmişdir; bu əsər 1826-cı ildə işıq üzü görmüşdür. Amper nəzəriyyəsinin əsas postulatının bilavasitə təsdiqi yalnız 1876-cı ildə Amerika fiziki Henri Rouland (1848-1901) tərəfindən alındı. Rouland ebonitdən hazırlanmış dişli çarxı fırlatdıqda, çarxın dişləri elektriklənirdi və müsbət yük qazanırdı. Yaxınlıqda maqnit əqrəbi asıldığına görə, təkəri sürətlə fırladan zaman əqrəb çarxın çevrəsi boyunca cərəyanlı məftil yerləşdirildikdə neçə meyil edərdisə, dəqiq olaraq elə də meyil edirdi. Bu cür daşınan yüklərin yaratdığı elektrik cərəyanı adi naqillərdəki *keçiricilik* cərəyanından fərqli olaraq, *konveksiya cərəyanı* adını almışdı.

MAYKL FARADEYİN HƏYATI VƏ KƏŞFLƏRİ



Maykl Faradey gəncliyində. T.Fillpsin portret işi.



μ maqnit qütbünün *I* cərəyanlı məftil ətrafında fırlanması.

İlk dinamo maşınlardan biri ("Barlou çarxı") 1822-ci ildə Faradeyin həmyerlisi Piter Barlou (1776-1862) tərəfindən quraşdırılmışdı.

1791-ci il sentyabrın 22-də dəmirçi Ceyms Faradeyin ailəsində bir oğlan doğuldu, onun adını Maykl qoydular. Vaxt keçəcək və Maykl Faradey məşhur alim olacaq, çoxlu sayda mühüm kəşflər edəcək, elmə yeni fiziki anlayışlar daxil edəcəkdi. Halbuki onun ibtidai təhsili, sonralar onun özünün dediyi kimi, "ən adi bir təhsildən ibarət olmuşdur və adi gündüz məktəbində alınan oxumaq, yazmaq və hesablama bacarıqlarından ibarət idi".

Maykl 12 yaşında Corc Ribonun kitab mağazasında xidmətçi vəzifəsinə daxil oldu. Sonralar, o, bu mağazada şagird, sonra isə cildçi usta köməkçisi olanda yeniyetmə özünün cildləməli olduğu elmi kitabları oxumaq imkanı əldə etdi.

Faradeyin həyatında 1810-cu il dönüş ili oldu: məhz onda kitab mağazasının daimi müştərilərindən biri – cənab Dens ona məşhur kimyaçı, Kral institutunun professoru ser Hemfri Devinin mühazirəsinə biletlər hadiyyə etdi. Bu hadisəni Faradey belə xatırlayırdı: "Mən usta köməkçisi olanda, H.Devinin axırıncı dörd mühazirəsini dinləmək şərəfinə nail oldum. Mən bu mühazirələrin qısa konspektini tutdum, sonra isə onları bütövlükdə yenidən yazdım və bacardığım şəkillərlə təchiz etdim. Elmi işlə, heç olmasa, ən primitiv elmi işlə məşğul olmaq arzusu məndə, kübar dairələrinə mənsub qaydaları bilməyən naşıda, o dövrdə London Kral Cəmiyyətinin sabiq prezidenti ser Cozef Beniksə səmimi sadəlövhlüklə məktub yazmağa vadar etdi. Tamamilə təbiidir ki, mən qapıçıya müraciət edəndə öyrəndim ki, mənim xahişim cavabsız qalacaqdır". Xoşbəxtlikdən Maykl elmlə ünsiyyətdə olmaq ümidlərini kəsmədi və cənab Dens tərəfindən həvəsləndirilərək, ser Hemfri Deviyə məktub yazdı və öz niyyətlərində ciddi olduğunun sübutu kimi, ...onun sonuncu dörd mühazirəsinin yazılarını göndərdi. Cavab dərhal gəldi: xeyirxah və münasib cavab.

ASSİSTENTDƏN "EKSPERİMENTİN SEHRBAZINA" QƏDƏR

Faradeyin üzünə xoşbəxtlik 1813-cü ildə güldü: Devi onu özünün assistenti etdi. Faradeyin gələcəkdə işləyəcəyi Kral institutu 1799-cu il martın 7-də qraf Rumfordun təşəbbüsü ilə "bilikləri yaymaq, hər yerdə mexaniki ixtiraların və təkmilləşmələrin tətbiq edilməsinə kömək etmək, habelə gündəlik həyati problemlərin həllinə elmin tətbiqini öyrətmək (mühazirələrin və eksperimental işlərin köməyilə) üçün" təsis edilmişdi.

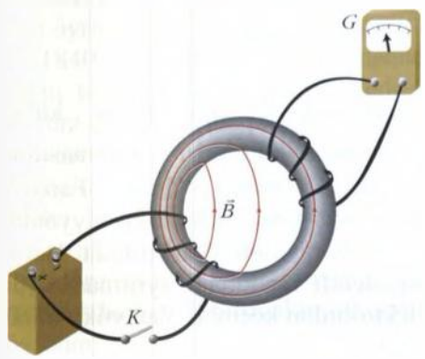
1813-cü ilin oktyabrından 1815-ci ilin aprelinə qədər olan müddətdə Faradey Devini, onun Avropaya səyahəti zamanı müşayiət etmiş, kimyəvi və fiziki eksperimentlərin aparılmasında iştirak etmişdir. Məsələn, Florensiyada Devi böyük linzanın köməyilə günəş şüalarını içərisində oksigen olan qabın daxilindəki kasada yerləşdirilmiş almazın üzərinə fokusladı və almaz yanaraq qaraldı! Təcrübi olaraq bu cür sübut olundu ki, almaz karbonun modifikasiyalarından biridir.

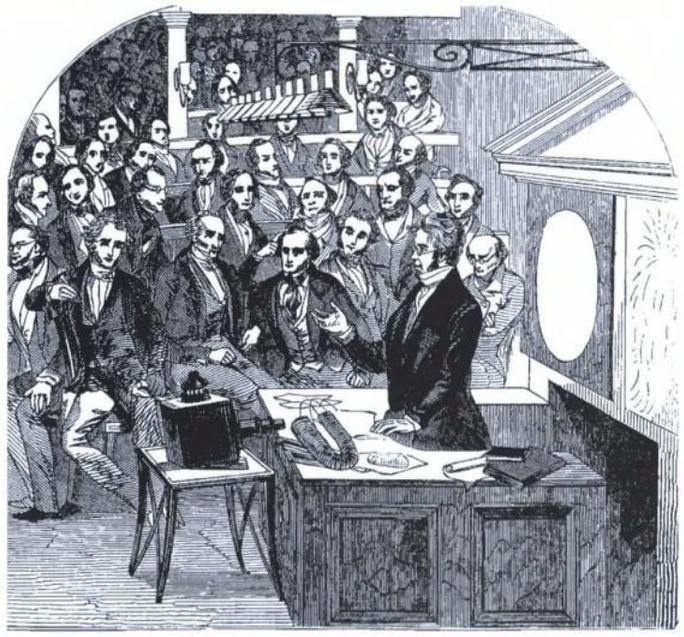
1821-ci ildə Faradey o dövrə qədər məlum olan elektrik hadisələrinin icmalını hazırlayarkən qərara aldı ki, öz məqaləsində haqqında danışmaq fikrində olduğu bütün eksperimentləri təkrar etsin. Bu təcrübələrin gedişində alim onu göstərməyə müvəffəq

oldu ki, cərəyanlı naqilin yaxınlığında maqnit qütbünə, onu naqilin ətrafında dairələr cızmağa məcbur edən qüvvə təsir edir. Faradeyin kəşfi dinamomaşının iş prinsipinin əsasında durdu.

1823-cü ildə Faradey "Kral cəmiyyətinin əsərləri"ndə maye xlorun alınmasının şərhi verilmiş məqalə çap etdirdi. Həmin ildə də, mayın 1-də Cəmiyyətə Faradeyi onun üzvü seçmək təklifi daxil oldu: "Cənab Maykl Faradey, kimyəvi elmləri çox gözəl bilən alicənab insan və "Kral cəmiyyətinin əsərləri"ndə bir neçə məqalənin müəllifi, Cəmiyyətin üzvü olmaq arzusunu bildirir; biz, aşağıda imza edənlər, şəxsi tanışlığımız əsasında ona, ən yüksək dərəcədə bu şərəfə layiq bir insan kimi, cəmiyyətin yəqin faydalı və qiymətli üzvü olacaq bir insan kimi, zəmanət veririk". 1824-cü ilin yanvarında hər şeylə maraqlanan tədqiqatçının elmi nailiyyətləri rəsmi nüfuz qazandı: o, seçilmişlərin sırasında oldu.

1825-ci ildə Faradeyi Kral İnstitutu laboratoriyasının direktoru təyin etdilər, həmin o laboratoriyanın ki, 1813-cü ildə ser Hemfri Devi ona başçılıq edirdi. Faradeyin təşəbbüsü ilə Kral Cəmiyyətinin üzvləri hər cümə günü axşam mühazirələrinə yığışmağa başladılar. Maykl Faradeyin mühazirələrinin bir hissəsi dünya elmi-kütləvi





Maykl Faradey Kral İnstitutunda mühazirə oxuyur. Qravüra. XIX əsr.

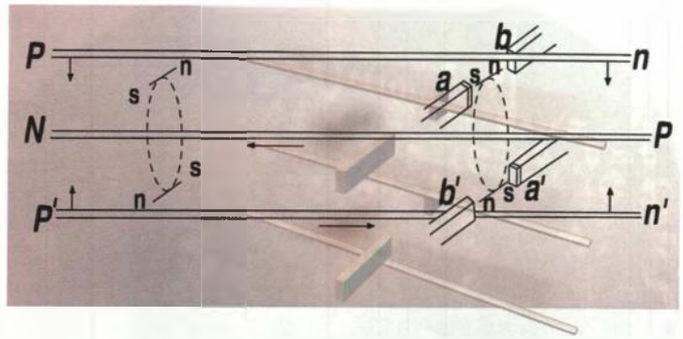
ədəbiyyatının ən yaxşı əsərlərindən birinin – "Şamın tarixi" kitabının əsasında durmuşdur.

BÖYÜK KƏŞFLƏRİN ZƏNCİRİ

1831-ci ildə bir sıra uğursuz təcrübələrdən sonra Faradey, indi onun adını daşıyan, elektromaqnit induksiya qanununu kəşf etdi.

Faradeyi bu kəşfə gətirib çıxaran eksperimenti "Elektrik cərəyanlarının induksiyasına dair" (1831-ci il) məqaləsində təsvir etmişdir: "Enli ağac makaraya uzunluğu 203 fut olan mis məftil sarınmış, onun sarğıları arasına isə birinci məftildən kətan iplə izolə olunmuş, eyni uzunluqlu məftil sarınmışdır. Bu spirallardan biri qalvanometrlə, digəri isə güclü batareya ilə birləşdirilmişdi... Dövrəni qapayarkən qalvanometrə ani, lakin olduqca zəif təsir müşahidə olunurdu və həmin cür təsir cərəyan kəsiləndə də yaranırdı. Spiralların birindən cərəyan arasıkəsilmədən keçərkən qalvanometrin

◄ Faradeyin təcrübəsi. İki sarğısı, cərəyan mənbəyi və qalvanometri olan dəmir halqa – transformatorun "ulu babası".



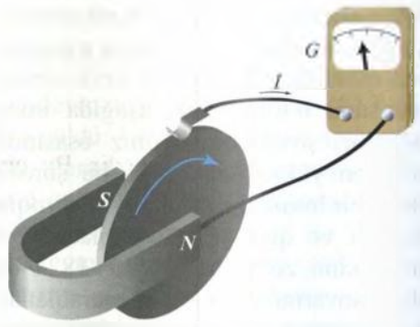
İnduksiya cərəyanının yaranması. Faradeyin izahı.

meyil etdiyini aşkar etmək mümkün olmurdu..."

İndi kəşflər bir-birinin ardınca baş verirdi. 1831-ci il sentyabrın 17-də Faradey yalnız maqnitin köməyilə elektrik cərəyanı aldı: "Diametri 3/4 dyüm, uzunluğu 8 və 1/2 dyüm olan silindrik maqnit çubuğun bir ucu məftildən düzəldilmiş silindrik spiralın ən kənarına yaxınlaşdırılır, bundan sonra çubuq bütün uzunluğu boyu spiralın daxilinə dartılır – bu zaman qalvanometrin əqrəbi hərəkətə gəlir; çubuq kəskin olaraq çıxarılır – əqrəb yenidən hərəkətə gəlir, ancaq əks tərəfə doğru. Bu effekt hər dəfə, maqnit daxil edildikdə və ya çıxarıldıqda müşahidə olunur, bu zaman elektrik dalğası yaranır".

1831-ci il oktyabrın 28-nə aid olan daha bir yazı: "Mis diski Kral Cəmiyyətinin böyük nalşəkilli maqnitinin qütbləri arasında fırlanmağa məcbur etdim. Diskin oxu və kənarındakı bir nöqtə qalvanometrlə birləşdirilmişdir. Diski fırladarkən qalvanometrin əqrəbi hərəkə gəlirdi". Beləliklə, metallarda induksiya cərəyanını aşkar etmək və ilk elektrogeneratoru – *Faradey təkərini* qurmaq mümkün oldu.

1833-1834-cü illərdə Faradey təcrübi yolla sonralar onun adını daşıyacaq elektroliz qanunlarını müəyyən etmişdir.



Birinci qanuna görə anodda ayrılan maddənin m kütləsi cərəyanın t elektrolitdən keçmə müddətilə və I cərəyan şiddəti ilə düz mütənasibdir:

$$m = kIt.$$

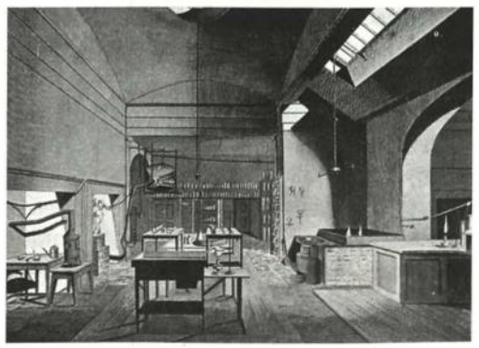
Mütənasiblik əmsalı k *maddənin elektrokimyəvi ekvivalenti* adlanır.

Elektrolizin ikinci qanunu k elektrokimyəvi ekvivalenti A kimyəvi ekvivalent vasitəsilə təyin edir:

$$k = \frac{1}{F}A,$$

burada $A = \frac{\mu}{n}$, μ – molyar kütlə, n – valentlikdir. $1/F$ mütənasiblik əmsalı $F = 96500$ Kl/mol Faradey sabitinin tərsi olan kəmiyyətdir; F ədədi qiymətcə elektrodda 1 mol birvalentli maddənin ayrılması üçün elektrolitdən keçməli olan yükə bərabərdir.

Faradey "anod", "katod", "elektrod", "elektroliz" və "elektrik plitəsi" terminlərini fizikaya daxil etmişdir.



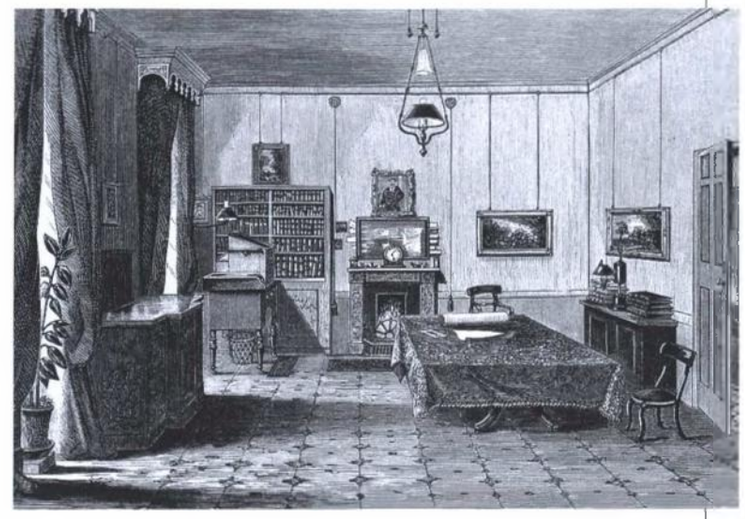
Faradeyin dövründə Kral İnstitutu laboratoriyası. Qravüra. XIX əsr.

1837-1839-cu illərdə Faradey dielektriklərin xassələrini öyrənmişdir. Nəticədə elmi dildə "dielektrik", "dielektrik nüfuzluğu" terminləri meydana çıxdı, dielektrik nüfuzluğunu ölçmək üsulları işlənib hazırlandı, dielektriklərin polyarizasiyası kəşf edildi. 1831-ci ildən 1855-ci ilə qədər çap olunmuş "Elektrikə aid eksperimental tədqiqatlar" məqalələr seriyasının birində deyilir: "Təsəvvür edək ki, yüklənmiş kürənin ətrafındakı fəza izoləedici dielektriklə (məsələn, yağla, terpentinlə və ya hava ilə) kiçicik, qırma kimi yumru, naqillərin qarışığı ilə doldurulmuşdur, həm də sonuncular kiçik məsafələrdə yerləşmiş, lakin bir-birindən izolə edilmişdir. Bu cür sistem öz halına və təsirinə görə



mənim dielektrik hissəciklərinə aid etdiyim hala və təsirə uyğun olardı. Əgər kürə yüklənibsə, onda bütün kiçik keçirici kürəciklər polyarlaşır; yox əgər kürənin yükü boşalırsa, onda kürəciklər normal hala qayıdır ki, kürə yüklənən zaman yenidən polyarlaşsınlar". Həmin vaxt Faradey həm də seyrəldilmiş havada elektrik boşalmasını öyrənirdi.

1840-cı illərdə Faradey maqnetizmi tədqiq etməkdə davam edirdi. O fərz edirdi ki, maqnit sahəsi təkcə maqnit xassələrinə malik olan dəmir xəlitələrinə yox, istisnasız olaraq, bütün maddələrə təsir edir. Alim qeyri-maqnetikləri dia- və paramaqnetiklərə ayırmış (hər iki termin ona məxsusdur) və birinciləri diqqətlə öyrənmişdir.



Kral İnstitutunda Faradeyin kabineti.

◄ Maqnit sahəsinin işığa təsirinə dair Faradeyin əlyazmasından bir fraqment. 13 sentyabr 1845-ci il.

Müxtəlif fiziki hadisələr arasındakı qarşılıqlı əlaqənin olması haqqındakı hipotezə əsaslanaraq, Faradey maqnit sahəsi ilə işığın qarşılıqlı əlaqəsinə baxmışdır. Çoxsaylı eksperimentlərdən sonra o, maddədə sabit maqnit sahəsi boyunca yayılan xətti polyarizə olunmuş işığın rəqs müstəvisinin fırlanmasını aşkar etmişdir (*Faradey effekti*). 1848-ci ildə alim kristalın maqnit xassələrinin ondakı sahənin istiqamətindən asılılığını – kristalların maqnit anizotropiyasını (bundan əvvəl alman riyaziyyatçısı və fiziki Yulius Plyukker (1801-1868) tərəfindən kəşf olunmuş) aşkar etdi.

BAŞLICA NƏTİCƏ

Faradeyin elektromaqnit hadisələrinin fizikasına verdiyi əsas pay, Nyutonun uzağatəsir prinsipindən əl çəkib, sahə – başdan-başa qüvvə xətlərilə dolu olan fəza anlayışı daxil etməsindən ibarətdir. Ceyms Klark Maksvell Faradeyin dahiliyinə haqq qazandıraraq, "Elektrik və maqnetizm haqqında traktat" əsərində yazmışdı: "Riyaziyyatçıların məsafədən təsir edərək cazibə yaradan qüvvə mərkəzlərini



gördükləri yerlərdə, Faradey öz zəkası ilə bütün fəzanı deşib keçən, bütün fəzaya nüfuz edən qüvvə xətlərini görürdü".

Faradey onların məsafədən başqa heç nə görmədikləri yerlərdə mühit görürdü. Faradey mühitdə baş verən real proseslərdə hadisələrin olduğu yeri görürdü, onlar isə onunla kifayətlənirdilər ki, bu yeri elektrik mayelərinə tətbiq olunmuş məsafəyə təsir qüvvəsində tapırdılar.

...Riyaziyyatçıların kəşf etdiyi ən səmərəli metodlardan bəziləri Faradeydən götürülmüş terminlərlə onların öz orijinal formadakı ifadəsinə nisbətən xeyli yaxşı formada ifadə oluna bilərdi".

FARADEYİN FİZİKİ QÜVVƏ XƏTLƏRİ

Faradeyin riyazi qabiliyyətlərinin olmaması ciddi nöqsan kimi görünə bilər, lakin nəticələr çıxarmağa tələsməyək. Bu nöqsan onu elektromaqnit hadisələri haqqında əyani nümunələrin köməyilə düşünməyə vadar edirdi ki, bu da özünü tezliklə büruzə verdi, lakin riyazi çərçivəyə salınmasa da onun nəzəriyyələri başlanğıcda sadəlövh görünürdü.

Məsələn, kiçik maqnit əqrəbinin nalşəkilli maqnitə cəzb olunduğu sadə halı götürək. Riyaziyyata bələd olan fizik üçün burada ən başlıcası maqnit materiallarıdır və maqnit qütbləri arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsi üçün tərs kvadrat qanunudur. Faradey üçün isə bütün bunlar xüsusi əhəmiyyət kəsb etməmişdir. Bütün bu maqnitlər, əqrəblər, necə deyərlər, onlara toxunmaq mümkün olsa da, özözlüyündə onun üçün bitməmiş, ölü, cansız şeylərdir. Məsələn, nalşəkilli maqnit ona gözəgörünməz və bütün fəzanı deşib keçən caynaqlar çoxluğu ilə əhatə olunmuş kimi görünürdü, bu maqnitin qütbləri məhz həmin caynaqlar vasitəsilə maqnit əqrəbini özünə cəzb edir və maqnit qüvvələrinə həssas olan digər obyektlərə təsir edir. Həm də bu caynaqları dəmir tozcuqların köməyilə görmək mümkün olardı, baxmayaraq ki, Faradeyin fikrincə, baxılan yerdə dəmir tozunun olub-olmamasından asılı olmayaraq onlar mövcuddur.

Faradey onları qüvvə xətləri adlandırdı və Faradey üçün onlar ən ilkin maqnit reallığıdır. Maqniti əhatə edən fəza boş deyildir: o, bu maqnit caynaqları ilə həmişə gərilmiş, həmişə öz qonşularını sıxışdıran və nəticədə Faradeyin maqnit sahəsi adlandırdığı şeydən ibarət olan caynaqlarla doludur. Faradey eyni qayda ilə hesab edirdi ki, elektrik yüklərilə də elektrik qüvvə xətləri əlaqədardır. Məhz onlar Faradey üçün ilkin elektrik reallıqları idi və onun elektrik sahəsi adlandırdığı şeyi əmələ gətirirdi.

Qüvvə xətlərində hər hansı bir reallıq varmı, yoxsa onlar yalnız riyaziyyatdan uzaq olan Faradeyə öz eksperimentlərində nə isə dumanlı bir nizamlıq tapmağa imkan verən xəyali obrazdırmı?

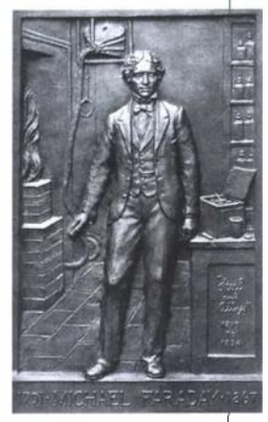
Riyaziyyatdan baş çıxaran fiziklərin belə məharətlə və məqamında yaza bildikləri düsturlarla müqayisədə bütün bu caynaqlar sadəlövhlük qədər sadə və qeyri-dəqiq bir şey kimi görünürdü. Lakin nə qədər təəccüblü də olsa, məlum oldu ki, onlarda zəngin riyazi mahiyyətin təməli qoyulmuşdur. Dörddə bir əsr və ya bundan nisbətən çox sonra (xoşbəxtlikdən, Faradey həmin günlərə qədər yaşadı) Maksvell bu riyazi mahiyyətdən çox gözəl istifadə etdi. Əgər hesablama tələb edən bəzi cəhətləri nəzərə almasaq, onda sadə misal üzərində başa düşmək çətin deyil ki, caynaqlara bənzəyən qüvvə xətləri mənzərəsinin köməyi ilə dəqiq riyazi nəticələr almaq mümkündür.

Gəlin Faradeyin etdiyi kimi, fərz edək ki, qüvvə xəttinin doğurduğu güc, xəttin uzunluğundan asılı deyil. Bir də fərz edək (məhz burada riyazi cəhət meydana çıxır) ki, qüvvə xətləri o qədər nazik və o qədər çoxdur ki, onlar öz fərdiliyini saxlasalar da, onların arasında heç bir ara qalmır. İndi öz qüvvə xətləri ilə – caynaqları ilə birlikdə yeganə bir yükə baxaq; onun qüvvə xətləri yükdən radial olaraq bütün istiqamətlərdə çıxır.

HƏYATININ SON İLLƏRİ

Faradey həyatının son illərində qravitasiya ilə elektromaqnit sahəsi arasında əlaqəni müəyyən etməyə səmərəsiz cəhdlər etdi. Onun işlərinin birində deyilir: "Mən qəti əminəm ki, ağırlıq qüvvəsi həmişə təbiətin digər qüvvə formaları ilə əlaqədədir və eksperimental tədqiqatların həqiqi obyektini təşkil edir, əvvəllər verilmiş imkandan istifadə etdim və ağırlıq qüvvəsilə elektrik arasında münasibəti (düzdür, nəticəsi yoxdur) müəyyən etməyə çalışdım. Sonralar mən, eyni əminlikdə olmaqla, bu qüvvənin elektriklə və ya istiliklə əlaqəsini müəyyən etməyə çalışdım".

Faradey hələ gəncliyində tədqiqatçının idealını ifadə etmişdir: "Alim istənilən fərziyyəyə qulaq asmağa çalışan adam olmalıdır, lakin bu fərziyyənin doğru olub-olmadığını özü müəyyən edir. Hadisələrin xarici əlamətləri alimin mühakimələrinin qarşısını almamalıdır, onun sevimli hipotezi olmamalıdır, o hər hansı cərəyandan kənarda olmağa və nüfuza malik olmağa borcludur. O, şəxsiyyətlərə deyil, obyektlərə hörmətlə yanaşmalıdır. Həqiqət onun tədqiqatlarının başlıca məqsədi olmalıdır. Əgər bu



M.Faradey.
F.C.Helnonun
barelyef işi.

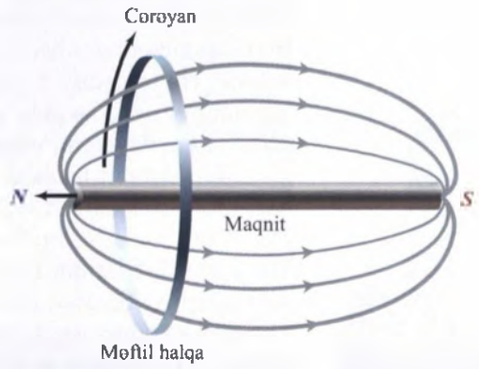
Tamamilə aydındır ki, qüvvə xətlərinin hamısı mərkəzi bu yükdə olan xəyali sferik səthi kəsəcəkdir. (Burada hesab olunur ki, bu yük bütünlüklə xəyali sferanın daxilində yerləşən ya nöqtəvi, ya da sferik yükdür.)

Vahid radiuslu sferadan başlayaq. Əgər bu sferanın hər hansı hissəsində çox da böyük olmayan yükə malik nazik pərdə yerləşmişdirsə, onda ona müəyyən sayda qüvvə xətləri təsir edəcəkdir, həm də bu pərdəyə mərkəzi yük tərəfindən təsir edən tam qüvvə ona bütün təsir edən fərdi qüvvə xətlərinin güclərinin cəminə bərabər olacaqdır. Sferanın radiusunu iki dəfə artıraq – onun sahəsi dörd dəfə artacaq və deməli, qüvvə xətləri onu daha seyrək kəsəcək. İndi sferanın vahid səthindən əvvəlkindən dörd dəfə az qüvvə xətləri keçəcək və deməli, həmin yüklü pərdəyə (lakin böyük sfera üzərində yerləşən) təsir edən qüvvə də dörd dəfə kiçik olacaqdır.

Əgər sferanın radiusunu, onunla birlikdə isə pərdə ilə mərkəzi yük arasındakı məsafəni də üç dəfə artırsaq, onda qüvvə xətləri həmin sayda qalmaqla, doqquz dəfə böyük səthi kəsməli olacaqdır, belə ki, pərdənin vahid səthinə təsir edən qüvvə ilkin qiymətindən doqquz dəfə kiçik olacaqdır. Beləliklə, riyazi mənaya malik olmayan qüvvə xətləri, sanki, çoxdan məlum olan bir nəticəni almağa imkan verir: elektrik qüvvəsi məsafənin kvadratı ilə tərs mütənasib olaraq dəyişir.

Qalileyin dövründə insanlar "Cisimləri hərəkətdə nə saxlayır?" məsələsini qarşılarına məqsəd qoyduqları zamanlarda böyük italyan alimi sübut etdi ki, əslində o səbəblə maraqlanmaq lazımdır ki, həmin səbəb üzündən cisimlər dayanır və ya öz hərəkət halını dəyişir. Faradey də şeylərin təbiətinə baxışlarda oxşar çevrilişin təşəbbüskarı oldu. Hamı əsas diqqətini hiss olunan, duyulan və real maqnitlərə, maqnit əqrəblərinə və bunlara bənzər bütün mümkün maqnit sistemlərinə topladıqları bir vaxtda Faradey bütün bu dəmircikləri əhatə edən zəngin, lakin gözdən gizlənmiş fəza, yəni elektromaqnit sahəsi haqqında düşünməyə çağırır. Nyuton Qalileyin əsas ideyalarını fövqəladə riyazi ustalıq və fiziki intuisiya ilə inkişaf etdirdiyi kimi, Maksvell də Faradeyin ideyalarını ümumiləşdirdi və inkişaf etdirdi.

B.Qotfmanın "Nisbilik nəzəriyyəsinin kökləri" kitabından.



keyfiyyətlərə zəhmətsevərlik də əlavə olunsa, onda o, təbiətin məbədində aydınlıq gətirəcəyinə ümid edə bilər".

Bu idealı Faraday öz həyatında təcəssüm etdirmişdir. O, 1867-ci il avqustun 25-də vəfat etmişdir.

FARADEYİN ELEKTROMAQNİT İNDUKSİYA QANUNU



Andersen, Faradeyin assistenti.

Elektromaqnit induksiya hadisəsinin kəşfini müşayiət edən gərgin, həyəcanlı hadisələrdə keçmiş artilleriya serjantı, Faradeyin təvazökar assistenti Andersenə əhəmiyyətli rol qismət olmuşdur. Faradey təcrübələr üçün ən həssas qalvanometr seçmişdi və təsadüfi xarici maneələrdən cihazın göstərişinə ediləcək təsirlərdən ehtiyat edərək, onu eksperiment zamanı assistent olan otağa qoydu. Faradey dövrəni bağlayan və ya açan, yaxud sarğacda dəmir içliyi hərəkət etdirən anlarda qalvanometrin əqrəbinin meyil etdiyini, məhz, Andersen müşahidə etmişdi.

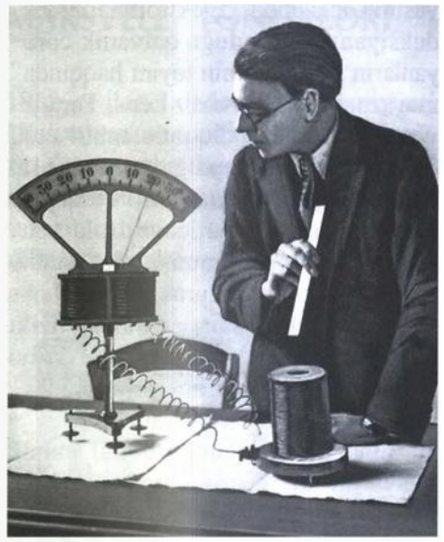
Dramın başqa bir aktı hələ Faradeyin təcrübələrindən əvvəl, Amperin ev laboratoriyasının divarları arasında oynanılmışdı. O da qalvanometr əqrəbinin rəqslərini aşkar etmək ümidilə sarğaca dəmir içlik daxil etmişdi; təsadüfi olaraq o da qalvanometri qonşu otaqda yerləşdirmişdi. Lakin əgər Faradey köməkçisi ilə işləyirdisə, Amper özü içliyi daxil etməli və cihazın göstərişini qeyd etməli olmuşdu. Təbii ki, eksperimentator heç bir effekt müşahidə etməmişdir: o, qalvanometrə yaxınlaşan vaxt əqrəb artıq neytral vəziyyətdə dayanmış olurdu!

Cozef Henri.



Lakin dramın üçüncü, daha gərgin aktı da olmuşdur. Xəyalən Atlantik okeanının o biri tərəfinə, Amerika Birləşmiş Ştatlarının kiçik bir şəhərciyi olan Olbaniyə gedək. Burada, Olban Akademiyasında 1826-cı ildən fizika və riyaziyyatı Cozef Henri (1797-1878) tədris edirdi. Boş vaxtlarında o, elektromaqnitlərin hazırlanması ilə maraqlanırdı və təsir bağışlayan nailiyyətlər qazanmışdı: məsələn, maqnitlərdən birinin köməyilə kütləsi bir ton olan platformanı tutub saxlaya bilmişdi! Faradey kimi Henri də maqnitlərin köməyilə elektrik cərəyanı almaq problemi üzərində düşünürdü. Onun çoxsaylı sələfləri maqnitlənmiş dəmir parçasına məftili dolamışlar və səmərəsiz olaraq qığılcım almağa çalışmışlar. Henri isə dəyişən maqnit sahəsindən istifadə etməyi qərara aldı və tezliklə kəşf etdi ki, əgər qapalı məftil parçası yaxınlığında, sadəcə, maqniti gəzdirsək, onda bu məftildə elektrik cərəyanı yaratmaq olar. Henri 1829 və 1831-ci illərin yay aylarında bir neçə mühüm eksperimentlər yerinə yetirdi. O, dövrəyə qoşulmuş reostatın sürgüsünü hərəkət etdirməklə, məftildən dəyişən elektrik cərəyanı buraxdı. Məlum oldu ki, bu zaman yaxınlıqda olan məftildə elektrik cərəyanı induksiya olunur. Nəhayət, bütün dərsliklərə daxil edilmiş eksperiment qoyuldu. Henri biri böyük və digəri kiçik olan iki sarğac düzəltdi. O hesabla ki, biri digərinə sərbəst daxil olsun. Sonra kiçik sarğacı elektrik batareyasına, böyük sarğacı isə qalvanometrə qoşdu və birincini ikinciyə daxil edərək, əqrəbin meylini qeydə aldı.

Bu azmış kimi, hələ 1829-cu ildə Henri öz-özünə induksiya hadisəsini kəşf etdi. O aşkar etdi ki, sarğac, sanki, ondakı cərəyanın dəyişməsinə



◄ Elektromaqnit induksiyasının aşkar edilməsinə dair Faradey təcrübəsi. Müasir rekonstruksiya.

müqavimət göstərir: artan cərəyana mane olur, azalan cərəyanı isə saxlayır, ona kömək edir. Henri özünün əsas nəticələrini yalnız 1832-ci ildə, yəni artıq Faradeydən sonra çap etdirə bildi. Beləliklə, elektromaqnit induksiya qanununu ilk kəşf etmək şərəfi ona müyəssər olmadı. Buna baxmayaraq, bu çox maraqlı ideyalar dramının son səhnələrini, hər halda, uğurlu saymaq olar. Baxın, 1838-ci ilin yazında Londonda Henri ilə Faradeyin görüşü haqqında nələr danışırlar.

Henri Böyük Britaniyanın paytaxtına gələrək, Faradeyin laboratoriyasına tələsdi, özünü təqdim etdi və onun hansı problem üzərində işlədiyi ilə maraqlandı. Faradey Henriyə bir lehimli tərəfi içərisində buz olan qaba, o biri lehimli tərəfi isə közərmiş sobacıqda yerləşən termocütü göstərdi. Faradey termocütün məftillərinin uclarını bir-birinə yaxınlaşdırdı və onların arasında qığılcım almağa çalışdı, lakin buna nail ola bilmədi. Onda Henri termocütün məftillərindən birini barmağına dolayaraq spiral düzəltdi, bu spirala dəmir içlik saldı və məftillərin uclarını birləşdirdi. Məftilləri aralayan zaman qığılcım yaranırdı! Heyrətlənmiş Faradey qonağa əl çaldı. Beləliklə, Henri Faradeyə öz-özünə induksiya effektini nümayiş etdirdi.

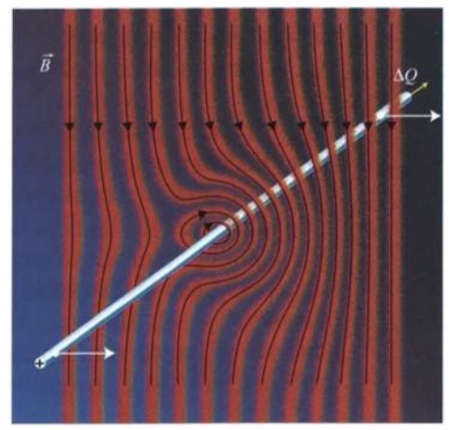
Faradey öz təcrübələrini dəfələrlə təkrar etdi və belə nəticəyə gəldi ki, qapalı naqillə (konturla) maqnit qüvvə xətlərini istənilən cür kəsəndə bu konturdan müəyyən bir ΔQ elektrik yükü axır. Bu yük naqilin kəsdiyi qüvvə xətlərinin $\Delta\Phi$ sayı ilə düz, konturun R elektrik müqaviməti ilə tərs mütənasibdir:

$$\Delta Q = \alpha \frac{\Delta \Phi}{R}, \qquad (1)$$

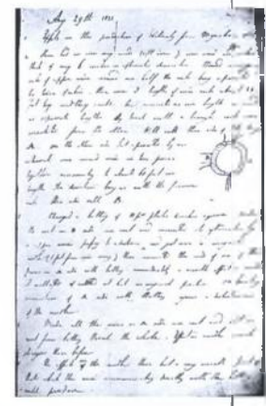
burada α – mütənasiblik misalıdır. Xətlərin kəsilməsi ya naqilin hərəkəti, ya da maqnit sahəsinin özünün dəyişməsi nəticəsində baş verə bilərdi.

Məhz (1) münasibətini *Faradeyin elektromaqnit induksiya qanununun* miqdarı ifadəsi hesab etmək qəbul olunmuşdur. Lakin (1) düsturunun tapılması Faradeyi qane etməmişdir. İki səbəbə görə. Onlardan biri dərhal gözə çarpmışdı – naqilin kəsdiyi maqnit qüvvə xətlərini ($\Delta\Phi$) hesablamaq üçün üsul yox idi.

İkinci səbəb ondan ibarət idi ki, (1) ifadəsində elektrik müqaviməti R,



Naqil maqnit sahəsini kəsir.



Faradeyin gündəliyindən elektromaqnit induksiyasının kəşfinə dair qeydlə birlikdə bir səhifə. 1853-cü il.



German Lüdviq Ferdinand Helmholts.

başqa sözlə, konturun özünün xarakteristikası iştirak edirdi. Bu isə ətraf fəzadakı prosesləri təsvir etmək üçün bu qanundan istifadə etməyə imkan vermirdi. Faradey isə həmin prosesləri təsvir etməyə can atırdı. İkinci səbəbi aradan qaldırmaq üçün isə $\mathscr{E} = IR$ Om qanununa müraciət etmək kifayət idi, yəni

$$R = \frac{\mathscr{E}}{I}, \qquad (2)$$

burada R – konturun müqaviməti, I və $\mathscr{E}$ – uyğun olaraq konturdakı cərəyan şiddəti və elektrik hərəkət qüvvəsidir (EHQ). Qeyd edək ki, Faradeyin fikrincə, $\mathscr{E}$ dedikdə məhz induksiya cərəyanını doğuran EHQ-ni, yəni *induksiya EHQ-ni* başa düşmək lazımdır. Əgər indi həm də xatırlasaq ki, cərəyan şiddəti I – məftilin en kəsiyindən Δt zaman müddətində keçən ΔQ elektrik yükünün miqdarıdır və ya

$$\Delta Q = I\Delta t, \qquad (3)$$

onda (1), (2) və (3) münasibətlərindən induksiya EHQ-ni tapmaq çətin deyildir:

$$\mathscr{E} = \alpha \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (4)$$

(4) ifadəsinə görə, qapalı keçirici konturda təsir edən induksiya EHQ bu konturun maqnit qüvvə xətlərini kəsmə sürətilə təyin olunur. Bununla belə, $\Delta\Phi$-ni və induksiya cərəyanının istiqamətini necə müəyyən etmək məsələsi anlaşılmaz qalırdı. Sonuncu çatışmazlığı tezliklə rusiyalı fizik Emili Xristianoviç Lens (1804-1865) aradan götürdü: 1833-cü il noyabrın 29-da o, Peterburq Elmlər Akademiyasının iclasında "Elektrodinamik induksiyanın doğurduğu qalvanik cərəyanların istiqamətinin təyini haqqında" məruzəsi ilə çıxış etdi. Lens, Faradeyin təcrübələrini diqqətlə təhlil etdi, onları Amperin tapdığı cərəyanların qarşılıqlı təsir qanunları ilə müqayisə etdi və sadə bir nəticəyə gəldi: induksiya cərəyanı həmişə elə yönəlmişdir ki, onu doğuran səbəbə əks təsir göstərsin. Sonralar alman fiziki German Helmholtsu müəyyən etdiyi kimi, Lens qaydası enerjinin saxlanması qanunu ilə sıx bağlıdır.

Buna inanmaq üçün qəbul etmək kifayətdir ki, enerji cərəyan şiddəti ilə birlikdə artır (müasir fizikada bu hökm, elektromaqnit sahəsinin enerjisinin müsbətliyi haqqında hipotez kimi məlumdur). Doğrudan da, tutaq ki, Lens qaydası doğru deyildir. Onda induksiya cərəyanı yaranaraq yalnız güclənəcəkdir, onunla bağlı olan enerji isə artacaqdır ki, bu da enerjinin saxlanması qanununa ziddir.

Deyilənlər baxımından bunun tərsi də doğrudur: bir halda ki, Lens qaydası təcrübədə təsdiq olunur, onda enerji, əgər o saxlanırsa, mənfi ola bilməz.

Beləliklə, Lens qaydasına görə (4) münasibətində α əmsalını müsbət hesab edərək, mənfi işarəsi seçmək lazımdır:

$$\mathscr{E} = -\alpha \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (5)$$

Lakin Faradeyin elektromaqnit induksiya qanununun dəqiq ifadəsini, başqa sözlə, (5) münasibətindəki $\Delta\Phi$ artımının mənasını açmaq yalnız Faradeyin məşhur həmyerlisi, fizik Ceyms Klark Maksvellə (1831-1879) müyəssər oldu.

MAKSVELL TƏNLİKLƏRİ

1938-ci ildə London Kral Cəmiyyəti kitabxanasının əməkdaşları Faradeyin arxivini araşdırarkən 1832-ci il tarixli ağzı möhürlənmiş saralmış konvert aşkar etdilər; konvertin üzərində "Hazırda Kral cəmiyyətinin arxivində



saxlanılmalı olan yeni baxışlar" yazısı var idi. Konvertdə Faradeyin uzaq nəsillərə məktubu var idi. Məktubda o, elektromaqnit dalğalarının mövcudluğuna əmin olduğunu bildirirdi və təəssüf edirdi ki, müasirləri onun baxışları ilə şərik olmayıblar. Faradey yazmışdı: "Mən belə nəticəyə gəlmişəm ki, maqnit təsirinin yayılması üçün vaxt, həm də çox cüzi vaxt tələb olunur. Mən həmçinin hesab edirəm ki, elektromaqnit induksiyası da eyni cür yayılır. Mən hesab edirəm ki, maqnit qüvvələrinin maqnit qütbündən yayılması həyəcanlandırılmış su səthinin rəqslərinə bənzəyir... Mən analoji olaraq, rəqslər nəzəriyyəsinin elektrik induksiyasına tətbiqini mümkün hesab edirəm".

Bu məktubda hakim söz "analogiyadır". Faradey məhz elektromaqnit təsirlərinin və su səthinin həyəcanlanmalarının yayılmasındakı analogiyaya əsaslanaraq başlıca nəticəni çıxarmışdı. Analogiya metodu Maksvellin elektromaqnit sahəsi nəzəriyyəsinin yaradılmasına dair işlərində də həlledici rol oynamışdır; bu nəzəriyyəni o, mexaniki modellərdən geniş istifadə edərək qurmuşdur.

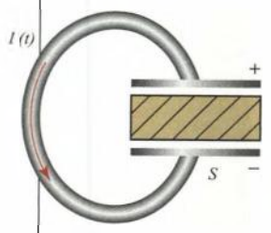
Maksvell yazmışdı: "Elektriki öyrənməyə başlamazdan əvvəl mən belə qərara gəldim ki, Faradeyin "Elektrikə aid eksperimental tədqiqatlarını" mükəmməl öyrənənə qədər bu mövzuya aid heç bir riyazi işləri oxumayım. Mənim xəbərim var idi ki, hadisələrin izahının Faradey metodu ilə riyaziyyatçıların metodları arasında fərqin olmasına dair fikir söylənirdi, belə ki, nə Faradey, nə də riyaziyyatçılar bir-birinin dilindən razı deyildi".

Maksvell Faradeyin fikirlərinin dərinliyini anlayan ilk insan olmuşdur. Böyük tədqiqatçının təsəvvürlərinin gözəlliyinə heyran olmuş Maksvell onun odlu tərəfdarına çevrildi. Lakin ətraf fəzadakı elektrodinamik prosesləri təsvir etmək üçün əyani mənzərəni qəbul edən Maksvell bu proseslərin mexaniki təbiətinin olmasına şübhə etmirdi; o fərz edirdi ki, həmin proseslər hər hansı bir elastiki mühitdə – efirdə baş verir.

Ceyms Klark Maksvell.



Alim efirin mexaniki xassələrini elektrik və maqnit qüvvələrilə əlaqələndirərək, onun nəzəriyyəsini qurmağı qarşısına məqsəd qoydu. O, Faradeyin əsərlərini diqqətlə öyrənib belə nəticəyə gəldi ki, elektrik sahəsinin intensivliyi $\bar{E}$ efirdəki



Dielektriklə doldurulmuş kondensatorun boşalması. Köynəkləri birləşdirən naqildə keçiricilik cərəyanı, dielektrikdə isə yerdəyişmə cərəyanı yaranır.

Maksvell riyaziyyatçılar deyəndə Laplası, Puassonu və Amperi, həmçinin onların ardıcıllarını nəzərdə tuturdu. Onlar yüklərin və cərəyanların müəyyən qarşılıqlı təsir qanununun olması fərziyyəsinə əsaslanaraq, riyazi cəhətdən gözəl olan uzağatəsir elektrodinamikasını qurmuşdular. Faradey isə həmin yüklərin və cərəyanların qarşılıqlı təsir mexanizmini tapmağa çalışırdı; bunun üçün o, yüklər və ya cərəyanlar arasındakı fəzaya nüfuz edən və onu dolduran qüvvə xətlərinin əyani surətlərini qurmuşdu.

elastiki gərilmələrlə (gərginliklərlə), maqnit induksiyası $\vec{B}$ isə onun burulğanlı hərəkətləriləelan olunur.

Maksvell $\vec{E}$ və $\vec{B}$ sahələrinin mexaniki şərhini seçərək, Faradeyin

$$\mathscr{E} = -\alpha \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (1)$$

elektromaqnit induksiya qanununa müraciət etdi.

$\mathscr{E}$ induksiya EHQ-nin təsir etdiyi yerdə qapalı keçirici C konturuna baxaraq, Δt zaman müddətində konturun kəsdiyi maqnit qüvvə xətlərinin $\Delta\Phi$ sayını almaq üçün Maksvell konturu elementar ΔS meydançalarına bölünmüş hər hansı bir S səthi ilə "örtdü" və Φ-i bütün səthdən keçən maqnit seli ilə eyniləşdirdi, yəni

$$\Phi = \sum_{\Delta S} B\Delta S \qquad (2)$$

götürdü.

Maksvell (1) və (2) münasibətlərini birləşdirərək, elektromaqnit induksiya qanununun düsturuna gəlib çıxdı:

$$\mathscr{E} = -\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (3)$$

Lakin Faradeyin təcrübələrində induksiya EHQ həm hərəkət edən, həm də sükunətdə olan keçirici C konturunda, əgər ikinci halda kontur dəyişən maqnit sahəsində yerləşmişdirsə, qeydə alınırdı. Burada həmçinin tərpənməz naqildə yükləri hərəkətə gətirən kənar qüvvələrin təbiəti məsələsi qarşıya çıxdı. Maqnit qüvvələri sükunətdəki yüklərə təsir etmədiyinə görə yeganə bir imkan qalırdı: induksiya cərəyanı konturda yaranan elektrik sahəsi $\vec{E}$ ilə şərtlənmişdir. Lakin elektrostatikanın əsas teoreminə görə, istənilən qapalı kontur üzrə vahid yükün yerdəyişməsi zamanı elektrostatik sahənin işi sıfıra bərabərdir. Deməli, konturda elektrostatik (potensiallı) sahə yox, *burulğanlı* sahə yaranır və onun işi EHQ ilə mütənasibdir:

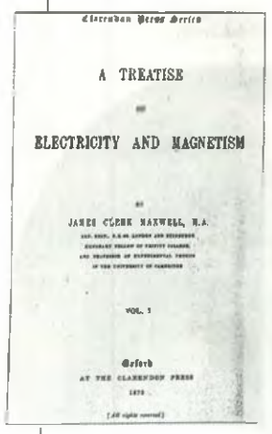
$$\mathscr{E} = \oint_C (\vec{E}\cdot d\vec{l}) \neq 0.$$

Onda Faradeyin elektromaqnit induksiya qanunu daha ümumi şəkildə belə yazılır:

$$\oint_C (\vec{E}\cdot d\vec{l}) = -\frac{d}{dt}\iint_S (\vec{B}\cdot d\vec{S}), \qquad (4)$$

burada tənliyin sol tərəfindəki inteqral $\vec{E}$ vektorunun qapalı C konturu üzrə (ona görə inteqral işarəsi dairəciklə yazılır) sirkulyasiyası adlanır, sağ tərəfində isə Φ maqnit selinin dəyişmə sürəti durur; Φ maqnit seli C konturunu "örtən" S səthi üzrə inteqral kimi hesablanır. Məhz bu cür ümumiləşmiş şəkildə elektromaqnit induksiya qanunu Maksvellin tənliklər sisteminə daxil oldu.

Faradey qanununun tələb olunan konkret naqillərdən və onların hərəkətlərindən deyil, sahələrin $\vec{E}$ və $\vec{B}$ xarakteristikalarından asılı olan ifadəsini verərək, Maksvell maqnit sahələrinin mənbələri üzərində düşündü. Belə çıxırdı ki, elektrik sahələri həm yüklər, həm də dəyişən maqnit sahəsi tərəfindən yaradılır, maqnit sahələri isə yalnız hərəkət edən yüklər tərəfindən yaradılır. Bəlkə dəyişən elektrik sahələri də maqnit sahələri yaratmağa qadirdir? Maksvell Amper qanununu ümumiləşdirməyə çalışaraq, bu suala cavab verdi.



C.Maksvellin "Elektrik və maqnetizm haqqında traktat" əsərinin ilk nəşrinin titul vərəqi. Oksford. 1873-cü il.

Amper qanununa görə, $\vec{B}$ maqnit sahəsinin sirkulyasiyası C konturu ilə məhdudlanan səthdən keçən cərəyan şiddəti I ilə mütənasibdir:

$$\oint_C (\vec{B}\cdot d\vec{l}) = \mu\mu_0 I. \qquad (5)$$

Maksvell Faradeyin dəyişən elektrik sahəsində dielektriklərin polyarizasiya olunması haqqındakı ideyalarını inkişaf etdirərək, Amper qanununu qeyri-stasionar $I(t)$ cərəyanları halına da şamil etdi. O, dielektriklə doldurulmuş kondensatorun köynəklərini birləşdirən naqil vasitəsilə onun boşalmasını öyrəndi və müəyyən etdi ki, əgər en kəsiyi S olan naqildə yüklər $v = \Delta l/\Delta t$ (Δl – yüklərin yerdəyişməsidir) sürətilə hərəkət edirsə və keçiricilik cərəyanı

$$I = \rho v S = \rho S \frac{\Delta l}{\Delta t} \qquad (6)$$

düsturu ilə ifadə olunursa (ρ – yükün sıxlığıdır), onda dielektrikdə dəyişən elektrik sahəsinin təsiri altında dipolların dönməsinin doğurduğu cərəyanlar yaranır. Maksvell bu cərəyanları *yerdəyişmə cərəyanları* adlandırdı və (6) düsturuna analoji olaraq təsvir etdi:

$$I_{yerd} = kS\frac{\Delta D}{\Delta t}, \qquad (7)$$

burada k – mütənasiblik əmsalıdır, BS-də $k = 1$.

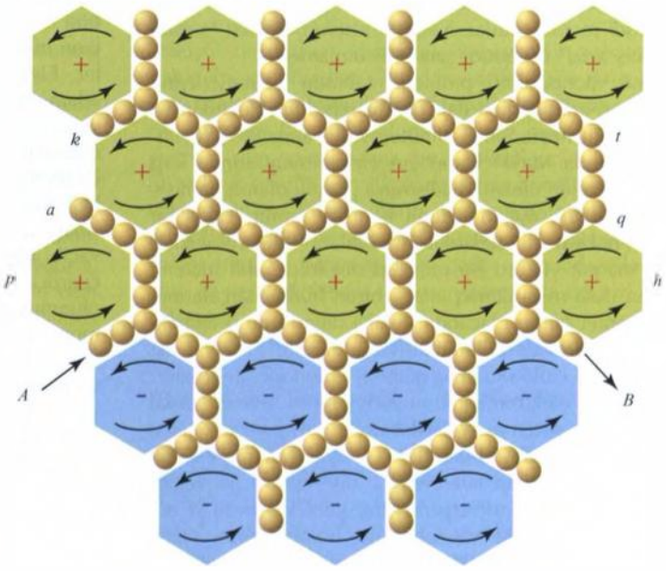
Maksvell (7) ifadəsindəki $\vec{D}$ vektorunu elektrik yerdəyişməsi adlandırdı və elastiklik nəzəriyyəsinin köməyilə təyin etdi. Huk qanununa görə yerdəyişmə elastiki gərginliklə mütənasibdir; Maksvell hesab etdi ki, elastiklik gərginliyin rolunu elektrik sahəsinin $\vec{E}$ intensivliyi oynayır. Deməli, $\vec{D} \sim \varepsilon\vec{E}$, burada ε – dielektriki xarakterizə edən dielektrik nüfuzluğudur (BS sistemində $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$, ε_0 – elektrik sabitidir).

Nəticədə ümumiləşmiş Amper qanunu alındı:

$$\oint_C (\vec{B}\cdot d\vec{l}) = \mu\mu_0(I + I_{yerd}). \qquad (8)$$

Maksvell (8) Amper qanununu, elektromaqnit induksiya qanununu, Qauss teoremini birləşdirərək, aşağıdakı tənliklər sisteminə gəlib çıxdı:

$$\left.\begin{aligned} &\oint_C (\vec{B}\cdot d\vec{l}) = \mu\mu_0(I + I_{yerd});\\ &\oint_C (\vec{E}\cdot d\vec{l}) = -\frac{d}{dt}\iint_S (\vec{B}\cdot d\vec{S});\\ &\oiint_S (\vec{D}\cdot d\vec{S}) = Q;\\ &\oiint_S (\vec{B}\cdot d\vec{S}) = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$



Molekulyar burulğanlar üçün Maksvell modeli. Müəllif elektromaqnit sahəsinin tənliklər sistemini alarkən bu modeldən istifadə etmişdir. Şəkil onun ümumi "Fiziki qüvvə xətlərinə dair" (1861-1862-ci illər) adı altındakı işlər seriyasından götürülmüşdür. "...AB elektrik cərəyanını təmsil edir... AB-dən yuxarıdakı və aşağıdakı altıbucaqlılar – burulğanlardır, onları ayıran kiçik çevrələr isə ... elektriki ... təsvir edir". Cərəyan axan zaman AB xəttindəki "təkərciklər" burulğanları hərəkətə gətirir, onlar da onu digər təkərciklər vasitəsilə daha uzağa ötürür. Burulğanların oxları maqnit sahəsinin qüvvə xətləri üzrə yönəlmişdir, burulğanın bucaq sürəti isə maqnit sahəsinin induksiyası ilə mütənasibdir.

(9) Maksvell tənlikləri elektromaqnit sahəsinin təkamülünü təsvir edir.

Tənlikləri çıxararkən Maksvellin istifadə etdiyi mexaniki modelin əhəmiyyətini yada salmamaq olmaz. Əslində onun özü bu barədə, "Elektromaqnit sahəsinin dinamik nəzəriyyəsi" işində demişdir. Hər şeyə nüfuz edən elastiki mühitin mövcudluğu haqqındakı hipotezin gərəkliyini və faydalılığını etiraf edən alim bununla bərabər söyləyir: "Hazırkı məruzədə mən bu növ hər hansı hipotezdən qaçıram və cərəyanların induksiyası və dielektriklərin polyarizasiyası kimi məlum hadisələrə yanaşmada elektromaqnit hərəkət miqdarı və ya elektrik elastikliyi kimi sözlərdən istifadə etməklə, mən yalnız oxucunun fikrini mexaniki hadisələrə yönəltmək istəyirəm; həmin hadisələr elektrik hadisələrini başa düşməkdə oxucuya kömək edə bilər. Hazırkı məqalədə bütün buna bənzər ifadələrə izahetmə kimi yox, misallarla aydınlaşdırma kimi baxılmalıdır". Başqa sözlə, Maksvell etiraf edirdi ki, mexaniki model onun qurmalarında yalnız köməkçi rol oynamışdır. Bu model müstəqil maddi mahiyyət kimi elektromaqnit sahəsinin mürəkkəb təkamül (evolyusiya) proseslərini təsvir edən düzgün münasibətlər almağa imkan vermişdir. Maksvell yazırdı: "Mənim təklif etdiyim nəzəriyyə elektromaqnit sahəsinin nəzəriyyəsi adlandırıla bilər, çünki bu nəzəriyyənin elektrik və maqnit sahələrini əhatə edən fəza ilə əlaqəsi var. O, həmçinin dinamik nəzəriyyə də adlandırıla bilər, çünki yol verir ki, bu

MAQNİT MONOPOLLARI: ÜMİDLƏR VƏ REALLIQLAR

1981-ci ildə fiziklər heç bir rəsmi təqvimlərdə göstərilməyən özünəməxsus bir yubileyi qeyd etdilər. Söhbət maqnit monopollarından – 1931-ci ildə yaranmış nəzəri ideyadan gedir. Bu ideya birbaşa eksperimental təsdiqini tapmamasına baxmayaraq (indiyədək heç bir maqnit monopolu qeydə alınmayıb), o, yalnız fizikada deyil, həm də riyaziyyatda yeni istiqamətlərin yaranmasına təkan verdi. Fiziklər cəbri topologiyanın qeyri-standart riyazi aparatından istifadə etməyə başladılar, topoloqlar fiziki problemlərlə ciddi maraqlandılar. Yəqin ki, hələ heç vaxt "yerinə yetməmiş arzu" bu qədər səmərəli olmamışdır.

Maqnit monopolları problemi təbiətin ədalətsizliyinə və ya qeyri-ardıcıllığına dair parlaq misaldır. Elektrikin və maqnetizmin heyranedici simmetriyası yalnız XIX yüzilliyin ortalarında Maykl Faradeyin eksperimentlərində kəşf olundu: istənilən elektrik hadisəsinə praktik olaraq həmişə, güzgüdəki kimi, uyğun maqnit hadisəsi tapılır. Lakin bir çaşdırıcı hal var idi: elektrikin mənbələri – elektrik yükləri vardır, maqnit yükləri isə mövcud deyildir. Sabit maqniti istənilən dəfə mişarlamaq olar – onun bütün parçalarının iki-iki maqnit qütbü olacaqdır. Fizika dilində bu o deməkdir ki, təbiətdə yalnız ikiqütblü (*lat.* "dipollu") maqnit sistemləri var və izolə olunmuş qütblər – monopollar yoxdur.

Maksvellin elektromaqnit nəzəriyyəsinin əsasını təşkil edən tənliklər sistemində də iki: $\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho$ və $\operatorname{div} \vec{H} = 0$ tənlikləri yazılmışdır, burada $\vec{E}$, $\vec{H}$ – uyğun olaraq elektrik və maqnit sahələrinin intensivliyi, "div" işarəsi isə vektor analizinin əmələ gətirdiyi – divergensiyanı, yəni vektorun ($\vec{E}$ və ya $\vec{H}$-ın) ayrılmasıdır və sahələrin mənbələrinin axma dərəcəsini və ya zənginlik, doluluq ölçüsünü xarakterizə edir. Birinci tənliyin sağ tərəfində elektrik yüklərinin həcmi sıxlığı yerləşir. İkinci tənlikdən çıxır ki, maqnit yüklərinin sıxlığı sıfıra bərabərdir. Başqa sözlə, maqnit sahəsinin mənbəyi yoxdur! Bütün qalan hallarda elektrik və maqnit sahələri Maksvell tənliklərinə tamamilə simmetrik daxil olur. Sual yaranır: "Elektrik və maqnit sahələrinə münasibətdə bu qədər hüquq bərabərsizliyi təbiətə nə üçün lazım olmuşdur?" Bəlkə, maqnit monopolları mövcuddur, lakin hansısa səbəbdən onları aşkar etmək olmur? Onda bu hansı səbəblərdir?

Monopol problemilə ilk maraqlananlardan biri ingilis mühəndisi, fiziki və riyaziyyatçısı Oliver Hevisayd (1850-1925) olmuşdur; o yalnız fizikada deyil, əməliyyat hesabını işləyib hazırlamaqla riyaziyyatda da parlaq iz qoymuşdur. Riyaziyyatda son dərəcədə eksperimental elmi görən Hevisayd əməliyyat hesabının bütün müddəalarını empirik olaraq almışdır. Xüsusi halda, Maksvell tənliklərinə məhz Hevisayd və German Hers, onları dörd vektorların münasibətləri kimi yazmaqla, müasir formanı vermişlər. Elmi dairələrdə Hevisayd adamayovuşmaz – qəribə adam adını qazanmışdı; onun çıxardığı nəticələr və ağıllı yanaşmaları, ola bilsin ki, doğrudur, ancaq o qədər də inandırıcı görünmür və həm də, bir qayda olaraq əsaslandırılmır. Ona görə də jurnallar onun məqalələrini nadir hallarda çap üçün qəbul edirdilər. Hevisaydın özü isə isbata vaxt və güc sərf etmək istəmirdi, onun üçün nəticə vacib idi. Çox hallarda da Hevisaydın nəticələri doğru çıxırdı, ancaq ... vaxtı qabaqlayırdı! Onun az sayda çap olunmuş işlərindən biri – 1891-ci ilə aid olan işi maqnit monopolu probleminə həsr olunmuşdur. Alim ümumiləşmiş Maksvell tənliklərini tam simmetrik şəkildə – elektrik və maqnit yükləri ilə birlikdə yazdı. Lakin məqaləni duymadılar və onun davamı olmadı.

Əsrin əvvəlində Avstriya alimi, 20 il ərzində 50-dən çox iş çap etdirmiş Feliks Erenqaft (1879-1952) monopolu kəşf etməyə cəhd etmişdi. Erenqaft təsdiq edirdi ki, təcrübədə maqnit yüklərini müşahidə edir. O, maqnit sahəsində dəmir tozcuqlar yerləşdirdi və onları güclü işıq şüası ilə işıqlandırdı. Belə olduqda tozcuqlar öz hərəkət trayektoriyasını elə dəyişir ki, sanki, işıq onlardan maqnit yükləri vurub çıxarır. Sonralar Erenqaftın təcrübələrini digər fiziklər təkrar etdilər, lakin işığın təsiri ilə dəmir tozcuqlarının anomal hərəkətinin (Erenqaft effektinin) indiyədək ağlabatan izahı verilməmiş, həm də vurulub çıxarılmış maqnit yüklərinin izləri də aşkar olunmamışdır.

Nəhayət, 1931-ci il gəldi və elektrodinamikada elektrik və maqnit yüklərinin bərabərhüquqluluğunu bərpa etməyə ən istedadlı nəzəriyyəçi fiziklərdən biri olan ingilis Pol Adrien Moris Dirak (1902-1984) girişdi. O, aşağıdakı suala cavab verməyə çalışarkən maqnit monopolu ideyasına gəlib çıxdı: "Nə üçün zərrəciklərin elektrik yükləri həmişə elektronun yükünün tam misilləridir?"

Doğrudan da, zərrəciklərin digər xarakteristikaları (kütlə, enerji, impuls və s.) heç bir məhdudiyyət olmadan ixtiyari qiymətlər qəbul edə bilər, ancaq yüklər isə mütləq elektronun yükünün tam misilləridir, mütənasiblik əmsalı isə tam qiymətlər və ya sıfır alır. Fiziklər deyirlər ki, "yük artıq klassik səviyyədə kvantlanmışdır". Bu kvantlanmanın səbəbi nədədir?

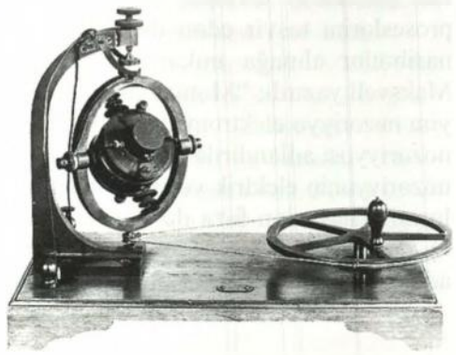
Dirak "Elektromaqnit sahəsində kvant sinqulyarlıqları" (1931-ci il) məqaləsində göstərmişdir ki, əgər $e \cdot \mu = n\hbar c/2$ şərti ödənilərsə, onda maqnit monopolları hipotezi Maksvell elektrodinamikasının müddəalarına zidd deyildir (Hevisaydın nəticələri bunu faktik olaraq təsdiq etmişdir). Burada e – elektrik yükü, μ – maqnit yükü, c – işıq sürəti, n – tam ədəddir. Deməli, əgər monopollar mövcuddursa, onda *Dirakın kvantlanma şərti* adlanan və yuxarıda verilən düsturdan dərhal zərrəciklərin yüklərinin kvantlandığı çıxır. Əgər təbiət belə imkandan istifadə etməyibsə, onda bu baxımdan çox təəccüblü olardı!" – deyə Dirak məqaləsinin sonunda haray salır.

Dirak monopolları bir sıra maraqlı xassələrə malikdir. Onlar üçün maqnit yüklərinin saxlanması qanunu ödənir, elementar maqnit yükünün özü isə elektronun yükündən 137/2 dəfə böyükdür. Deməli, monopollar arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvəsi, eyni məsafədə iki elektron arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvəsindən 4692 dəfə böyükdür. Dirak hesab edir ki, "Belə böyük cazibə qüvvəsi, ola bilsin, əks işarəli qütblərin nə üçün heç vaxt ayrılmadığını izah edir".

Heç bir aşkar eksperimental təsdiqə malik olmayan Dirak hipotezinə 40 ilə yaxındır ki, çox gözəl, lakin olduqca qeyri-adi, ekzotik hipotez kimi baxılmışdır. O, ikinci həyatı yalnız 1974-cü ildə, sovet fiziki Aleksandr Markoviç Polyakov (1945-ci ildə doğulub) və Niderland fiziki Gerard t'Hooft (1946-cı ildə doğulub) tərəfindən praktik olaraq eyni zamanda Maksvell nəzəriyyəsinin qeyri-xətti ümumiləşməsində, yəni Yanq-Mills sahələri üçün monopol halları aşkar edilən zaman qazandı ("Kalibrləmə sahələri" məqaləsinə bax). Dirak monopolundan fərqli olaraq, t'Hooft – Polyakov monopolu sonlu ölçülərə, enerji və impulsun sonlu qiymətlərinə və s. malikdir. Lakin ən maraqlısı odur ki, t'Hooft – Polyakov monopollarının maqnit yükü qeyri-trivial topoloji təbiətə malikdir, onların kütləsi isə 10000 dəfə protonun kütləsindən böyükdür (zülal molekulunun kütləsinə uyğundur).

Böyük birləşmə modellərində qabaqcadan xəbər verilən daha ağır monopollar protondan artıq 1016 dəfə ağırdır, yəni bakteriya hüceyrələrinin kütləsilə müqayisə olunmalıdır. Aydındır ki, "mikroaləmin bu cür mamontlarını" doğurmaq üçün nəinki yalnız müasir sürətləndiricilərdə, hətta ən yüksək enerjili kosmik şüalarda da enerji kifayət etmir. Lakin Kainatın təkamülünün ilkin mərhələlərində, enerji bol olan vaxtlarda monopollar tamamilə mümkündür ki, yarana bilər və bizim günlərə qədər qala bilərdilər. Ona görə də yerətrafı fəzada və yaxın kosmosda onların axtarışı dayanmır.

1984-cü ildə monopolların aşkar edilməsinin mümkün yollarından birini gənc rusiyalı nəzəriyyəçi Valeri Anatolyeviç Rubakov və amerikalı Kurtis Kallan "qələmin ucunda" kəşf etdilər (*Kallan-Rubakov effekti*). Məlum oldu ki, monopolun iştirakı ilə proton ani olaraq pozitrona və mezonlara parçalanır ("Protonun parçalanmasını biz görə biləcəyikmi?" əlavə oçerkinə bax). Lakin monopolun özü bütöv və sağ-salamat qalır (maqnit yükünün saxlanması qanununa görə) və əvvəlki kimi maddəni parçalamağa qadirdir. Ona görə də maddədə monopolun izini "proton fəlakətləri" zəncirinə görə qeydə almaq çətin deyildir. Protonların parçalanması zamanı nəhəng miqdarda enerji ayrılır və proton-monopol katalizi sayəsində nisbətən asanlıqla istənilən enerji problemlərini həll etmək olardı: ulduzlara uçan aparatlar sadəcə olaraq kosmik tozu toplayardılar, təyyarələr isə havadakı protonların parçalanması hesabına uçardı. Yalnız monopolları tapmaq lazımdır...



Elektromaqnit induksiyasının C.Maksvell tərəfindən qurulmuş mexaniki modeli. Kavendiş laboratoriyası. Kembric.

fəzada hərəkətdə olan materiya var, müşahidə olunan elektromaqnit hadisələri isə məhz onun vasitəsilə icra edilir". Hersin belə bir fikri ilə razılaşmamaq olmaz ki, "Maksvell nəzəriyyəsində başlıca olan... Maksvell tənlikləridir". Onların köməyilə həm Kainat miqyasında, ulduzların və planetlərin daxilində, həm də mikroaləmdə, atomun daxilində gedən olduqca geniş hadisələr dairəsini təsvir etmək mümkün oldu.

ELEKTROMAQNİT DALĞALARI

Kainat elektromaqnit şüalanmaları okeanıdır. İnsanlar, onların əksəriyyəti ətraf fəzaya nüfuz edən dalğaları hiss etmədən, bu okeanda yaşayır. Buxarının yanında qızınmaqla və ya şamı yandırmaqla insan bu dalğaların mənbəyini, onların xassələri haqqında fikirləşmədən işləməyə vadar edir. Lakin bilik qüvvədir: bəşəriyyət elektromaqnit şüalanmasının təbiətini müəyyən edərək, XX yüzillik ərzində onun ən müxtəlif növlərini mənimsəmiş və öz xidmətinə vermişdir.

MÜƏMMALI TƏSADÜFLƏR

Elektromaqnit dalğalarının mövcudluğunu ilk dəfə ingilis fiziki Ceyms Klark Maksvell xəbər vermişdir. Maksvell elektromaqnetizmin ona qədər kəşf olunmuş qanunlarına cəmi bir düzəliş etmişdir. Məlum idi ki, elektrik sahəsini ya elektrik yükləri, ya da dəyişən maqnit sahəsi doğurur; sonuncunun isə yalnız bircə mənbəyi var: elektrik cərəyanı. Bu "ədalətsizliyi" Maksvell əlavə həddin köməyilə aradan qaldırdı: maqnit sahəsi həm də elektrik sahəsi dəyişəndə yaranır (bu cür dəyişməni o, yerdəyişmə cərəyanı adlandırdı).

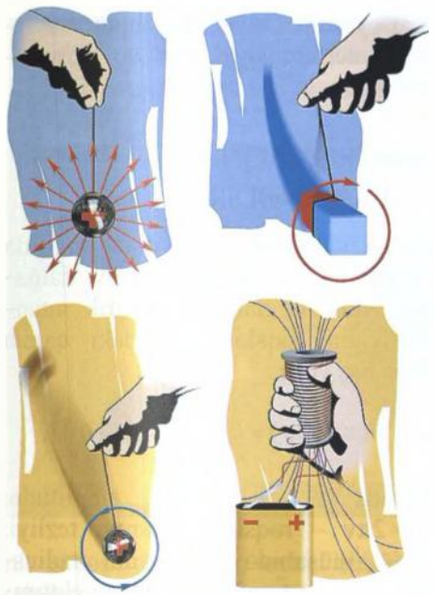
İlk baxışda kiçik görünən bir düzəliş möhtəşəm nəticələrə malik oldu: hələ ki, qoy "peronun ucunda" olsun, tamamilə yeni bir fiziki obyekt – elektromaqnit dalğası meydana çıxdı! Doğrudur, onun mövcudluğu hələ Faradeyə mümkün görünürdü, lakin o, bunu nəzəri isbat edə bilmədi. Maksvell isə ali riyaziyyatı dərindən bilirdi, ali riyaziyyatın mahir bilicisi idi. O, vektor analizindən istifadə edərək, $\vec{E}(x,y,z,t)$ elektrik sahəsi üçün aşağıdakı şəkildə tənlik çıxardı

$$\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial z^2}=\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad (1)$$

(maqnit sahəsi üçün, elektrik intensivliyi vektorunu maqnit induksiya vektoru ilə əvəz etməklə, analoji tən-



Vinsent Van Qoq. Ulduzlu gecə. 1889-cu il.



lik alındı). Burada μ_0 və ε_0 – maqnit və elektrik sabitləri, x, y və z – fəza koordinatları, t – zamandır, hər bir toplanan isə intensivliyin koordinata və ya zamana görə ikinci törəməsidir.

Müasir məlumatlara görə:

$\varepsilon_0 = 8{,}85418782 \cdot 10^{-12}\ \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$;
$\mu_0 = 1{,}2566370614 \cdot 10^{-6}\ \text{Qn} \cdot \text{m}^{-1}$;
$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{san}^{-1}$.

Hələ 1740-cı illərdə D.Bernulli, J.Dalamber və L.Eyler simin rəqslərini təsvir edən bu cür

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}=\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \qquad (2)$$

tənliyinin (doğrudur, birölçülü hal üçün) fəzada hərəkət edən ixtiyari formalı iki dalğa şəklində həllini almışdı: $f(x,t)=f_1(x+vt)+f_2(x-vt)$; bu dalğalar v sürətilə əks-istiqamətlərdə hərəkət edir.

Deməli, Maksvell tənliklərindən elektromaqnit təbiətli dalğaların mövcudluğu imkanı ortaya çıxır. Həm də bu dalğalar vakuumda da, (1) və (2) ifadələrinin müqayisəsindən göründüyü kimi, $v=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ sürətlə yayıla bilər.

Maksvell daha qabağa gedərək, elektromaqnit dalğalarının sürətini hesabladı – axı bunun üçün yalnız elektrik və maqnit nüfuzluqlarını bilmək lazımdır. 1868-ci ildə o, $v\approx 2{,}779\cdot 10^8$ m/san aldı ki, bu da 1862-ci ildə fransız Jan Bernar Leon Fuko (1819-1868) tərəfindən ölçülmüş işıq sürətinə yaxındır: $c\approx 2{,}980\times\times 10^8$ m/san. Bundan başqa məlum oldu ki, dalğalar, işıq kimi eninədir. Bu cür üst-üstə düşmələr təsadüfidirmi? Maksvell cavab verdi: işıq – elektromaqnit dalğalarından biridir. İşığın təbiəti başa düşülmüşdürmü?!

BAŞ TUTMAMIŞ TƏKZİB

İstənilən nəzəriyyənin doğruluğunun (və ya doğru olmamağının) qəbul edilməsində eksperiment həlledicidir. 1886-cı ildə Henrix Rudolf Hers (1857-1894) Maksvellin nəzəriyyəsini ya təsdiq, ya da təkzib etməli olacaq eksperimentlərə başladı.

Demək lazımdır ki, Hers, o dövrün əksər fizikləri kimi, Maksvell nəzə-

XÜSUSİ TÖRƏMƏLƏR

Məktəb riyaziyyat kursundan törəmə anlayışı məlumdur. Törəmə üçün daxil edilmiş $\frac{\partial f}{\partial x}$ (və ya funksiyanın arqumenti koordinat yox, zaman olanda, $\frac{\partial f}{\partial t}$) işarəsi dalğa tənliyində istifadə olunan $\frac{\partial f}{\partial x}$ (və ya $\frac{\partial f}{\partial t}$) işarəsindən fərqlənir, çünki burada bir dəyişənin yox, bir neçə dəyişənin $f(x,t)$ funksiyası diferensiallanır. $\frac{\partial f}{\partial x}$ işarəsi göstərir ki, göstərilən dəyişənə nəzərən törəməni hesablayanda qalan dəyişənlər sabit hesab olunur və onlarla, uyğun olaraq, sabit kimi davranırlar. Əgər $f(x,t)=x^2t^3$, onda $\frac{\partial f}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}(x^2t^3)=t^3\frac{\partial}{\partial x}(x^2)=2xt^3$, $\frac{\partial f}{\partial t}=3x^2t^2$.

Çox vaxt $\frac{\partial f}{\partial t}=\dot{f}$, $\frac{\partial f}{\partial x}=f'$ işarələmələrinə rast gəlinir. Onlardan istifadə etməklə, dalğa tənliyini belə yazmaq olar: $f''=\frac{1}{C^2}\ddot{f}$.

riyyəsinə şübhə ilə yanaşırdı: yerdəyişmə cərəyanı yalnız fərziyyə olaraq qalırdı. Lakin artıq 1889-cu ildə Hers "Maksvell nəzəriyyəsinə uyğun olaraq baxılan elektrik rəqslərinin qüvvələri" məqaləsini çap etdirdi. Burada o yazırdı: "Mənim sürətli elektrik rəqsləri ilə apardığım təcrübələrin nəticələri, mənim fikrimcə, elektrodinamikanın digər nəzəriyyələrinə nəzərən Maksvell nəzəriyyəsinin üstünlüklərini təsdiqləyir". Bəs hansı eksperimentlər tədqiqatçının baxışlarını bu qədər tez və bu qədər qəti dəyişdirdi?



Henrix Rudolf Hers.

Hers Rumkorfun induksiya sarğacında (yüksək gərginlik impulsları almağa imkan verən transformatorda) yaranan qığılcımlı boşalmaları öyrənirdi. Bu cür boşalmaların rəqsi xarakter daşıdığını amerikalı Cozef Henri 1842-ci ilə müəyyən etmişdi. Hersə məlum idi ki, sarğacın boşaldıcısında yaranan qığılcım eyni zamanda paralel qoşulmuş rəqs konturunda (rezonatorda) da qığılcım doğurmağa qadirdir. Alim dövrəyə qoşulmamış konturda da qığılcım yaratmağa cəhd etdi və aşkar etdi ki, konturu sarğacdakı cərəyanın rəqslərilə rezonansa köklədikdə, qığılcım maksimal olur. Sonrakı ölçmələr göstərdi ki, boşalma zamanı yaranan elektrik sahəsinin mənzərəsi köhnə nəzəriyyənin qabaqcadan xəbər verdiyinə bənzəmir: elektrik sahəsi müxtəlif istiqamətlərdə müxtəlif cür azalırdı. 1888-ci ildə aparılmış bu eksperimentlər məhz rəsmi olaraq elektromaqnit dalğalarının kəşfi hesab olunur.

Sonrakı tədqiqatlar Hersi iki çox mühüm nəticə çıxarmağa məcbur etdi: birincisi, yerdəyişmə cərəyanları haqqında Maksvellin fərziyyəsi doğrudur; ikincisi, elektromaqnit dalğaları optik dalğaların (işıq dalğalarının) tam eynidir. Onlar əks olunur və sınır, interferensiya edir və polyarizələşir...

ELEKTROMAQNİT DALĞASI NƏDİR

Dalğa tənliyinin həlli olan ən sadə elektromaqnit dalğası müstəvi dalğadır. Müstəvi dalğada elektrik intensivliyinin rəqsləri aşağıdakı qanun üzrə baş verir.

$$\vec{E}(x,y,z,t)=\vec{E}_0\cos\left[\omega t-(\vec{k}\cdot\vec{r})\right],$$

burada $\vec{E}_0$ – dalğanın amplitudu; $\omega=2\pi\nu$ – rəqslərin dairəvi tezliyi; $\vec{r}$ – müşahidə nöqtəsinin radius-vektorudur; $\vec{k}=2\pi/\lambda$ – dalğa vektorudur; λ – dalğa uzunluğudur. $\vec{B}(x, y, z)$ maqnit induksiyası vektorunun rəqsləri eyni cür tənliklə təsvir olunur, lakin onun $\vec{B}_0$ amplitudu $\vec{E}_0$-a perpendikulyardır. Hər iki vektor şüalanmanın yayılma istiqamətinə perpendikulyardır, yəni elektromaqnit dalğası eninə dalğadır.

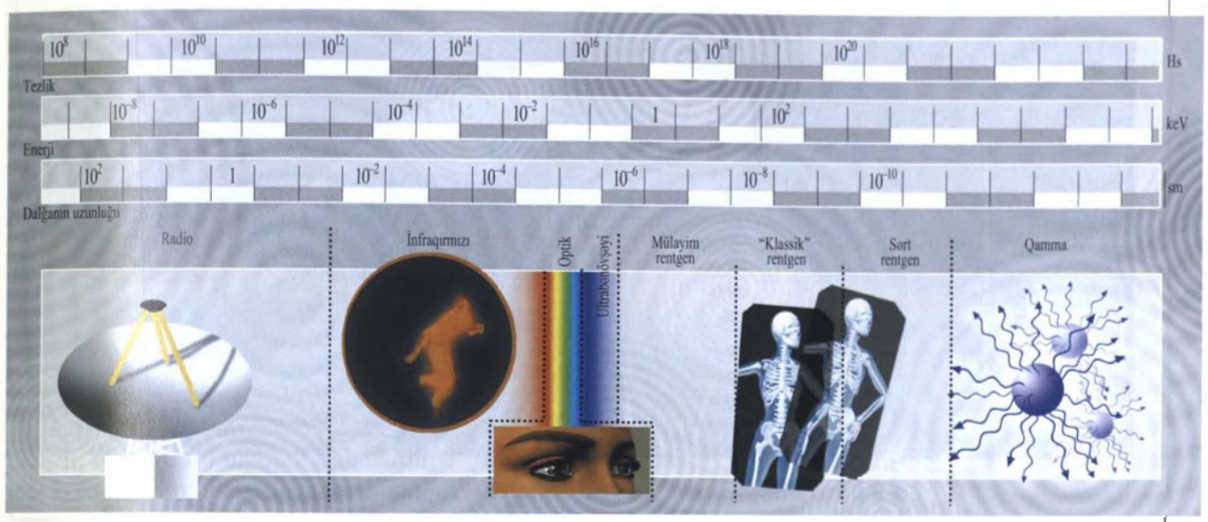
Bu cür dalğa müstəvi dalğa adlanır, çünki elektrik intensivliyinin və maqnit induksiyasının qiymətləri $\vec{k}$ vektoruna perpendikulyar olan istənilən müstəvidə eynidir. Həmin müstəvidə – dalğa cəbhəsində hər iki sahənin rəqs fazaları eyni olan nöqtələri yerləşir. Dalğa cəbhəsi başqa şəkillərdə, məsələn, sferik şəkildə olan (dalğa fəzanın hər hansı bir nöqtəsindən qaçır – dağılır) olan dalğalar da var.

Elektromaqnit dalğaları həm vakuumda, həm də maddədə yayıla bilər. Lakin onlar maddə yox, enerji daşıyır. Maksvell nəzəriyyəsinə görə dalğada elektrik və maqnit enerjilərinin sıxlığı bərabərdir. Elektromaqnit sahəsinin necə yayıldığını elektrodinamikanın qanunlarından anlamaq çətin deyildir. Əgər fəzanın hər hansı oblastında maqnit sahəsi dəyişərsə, onun ətrafında (elektromaqnit induksiyası nəticəsində) dərhal elektrik sahəsi yaranır. Elektrik sahəsinin dəyişməsi (yaranma da dəyişmədir) öz ətrafında maqnit sahəsinin meydana çıxmasına səbəb olur və beləliklə, hər iki sahə birlikdə, zəncir kimi, bir-birini əvəz edərək, fəzada hərəkət edəcəkdir.

Deməli, dalğa almaq üçün bu sahələrdən hər hansı birinin başlanğıc həyəcanlanması lazımdır ki, buna da yükü hərəkət etdirməklə nail olmaq olar. Hətta öz tarazlıq vəziyyəti ətrafında rəqs edən və ya çevrə üzrə hərəkət edən bir yükün olması da kifayətdir: yükün öz ətrafında yaratdığı sahə periodik olaraq dəyişir və elektromaqnit dalğası yaranır.

ƏVƏZEDİCİ DALĞA

Maddəyə düşən dalğa vakuumdakına nisbətən kiçik sürətlə yayılır – bu fakt, xüsusilə də işıq üçün, yaxşı məlumdur və heç də qəribə görünmür. Lakin ona cavab tapmağa çalışaq ki, bu niyə baş verir?



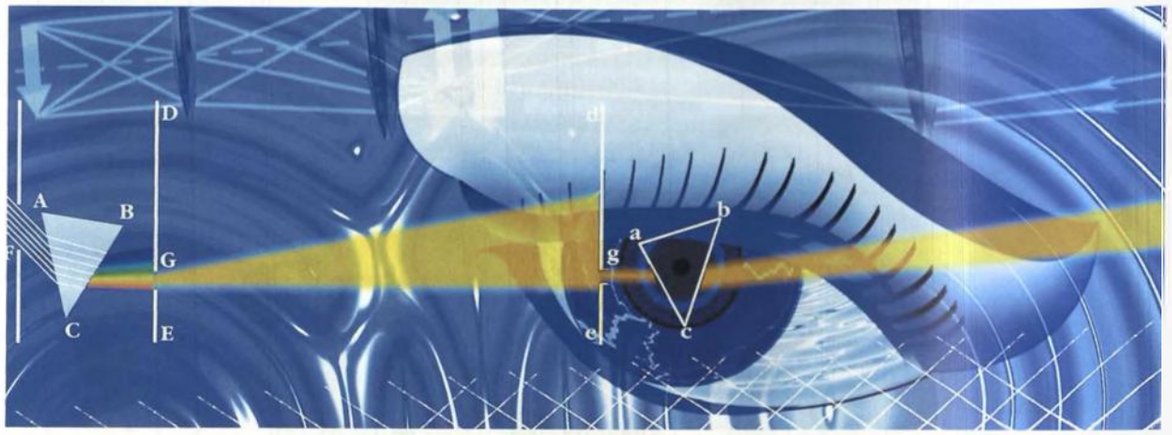
Elektromaqnit dalğalarının spektri.

Burada dalğaların üst-üstə düşməsi və ya superpozisiyası idcyası köməyə gəlir: maddədə yayılan dalğa onun atomlarını "yırğalayır" və atomlar dipollara çevrilir. Maddədə müşahidə olunan sahə düşən dalğanın sahəsi ilə, bu dalğanın həyəcanlandırdığı dipolların sahələri cəmindən ibarətdir; dipollar rəqs edərək, özləri qısa dalğalar buraxır. Maddə sıx olduqca, ikinci dalğalar da bir o qədər çox olur və onların mənbələri bir-birinə bir o qədər çox təsir edir. Maraqlı mənzərə alınır: atomlar – dipollar təkcə düşən dalğa tərəfindən yox, həm də "yoldaşları" tərəfindən yırğalanır (həm də dalğanın gec çatdığı yoldaşları özündən əvvəlkilərin rəqslərini "pozur". Ona görə də rəqslər maddədə ilkin dalğadan, yəni düşən dalğadan yavaş yayılır.

Bu kollektiv prosesin dəqiq təsvirini vermək çətindir: verilmiş yükə təsir edən tam sahə bütün qalan yüklərdən olan sahələrin məcmuyundan başqa bir şey deyildir, qalan yüklərin hərəkəti isə, öz növbəsində, verilmiş yükün hərəkətindən asılıdır.

Dekart, Qaliley və Nyuton mexanikasında bizim zərrəciklərlə işimiz olduğu kimi, işıqda, elektrikdə və maqnetizmdə, kvant fizikasında – hər yerdə dalğalarla işimiz olur.

Leon Kuper, Amerika fiziki



OPTİKANIN ƏSASLARI

DALĞA OPTİKASI

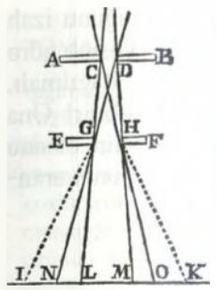


Françesko Qrimaldi.

XVII yüzilliyin ortalarına yaxın işıq şüaları haqqında artıq məlum idi ki, onlar düzxətlidir, kəsişdikdə bir-birinə təsir etmir, qayıtma və sınma qanunlarına tabedir. Başlıca sirr kimi qalırdı ki, işıq nədir, o necə yayılır, nə üçün bəzən müxtəlif rənglərə boyanır?

Bu suallara cavab vermək üçün bir neçə yüzillik və dünyanın yeni mənzərəsinin yaradılması gərək oldu. Məhz, XVII əsrin ortalarında məlum qanunauyğunluqlara zidd olan hadisələr kəşf olundu. Onlardan birini Bolonyada (İtaliya) yezuitlər ordeni (müasir kollecin analoqu) heyətinin professoru Françesko Mariya Qrimaldi (1618-1663) aşkar etdi. Onun işinin nəticəsi 1665-ci ildə, artıq müəllifin ölümündən sonra çıxmış "İşıq, rənglər və göy qurşağı haqqında fiziki elm" traktatı oldu. Kiçik yarıqdan işıqlandırılan müxtəlif əşyaların buraxdığı kölgələri müşahidə edərək, alim aşkar etdi ki, işıq heç də həmişə düz xətt boyunca yayılmır. O, istiqamətini dəyişə və maneələri aşa bilər. Məsələn, işıq dar yarıqdan keçən zaman şüaların bir hissəsi kölgə olmalı oblastda düşür. Bu hadisəni Qrimaldi *difraksiya* (*lat.* diffractus – "paylanmış") adlandırdı.

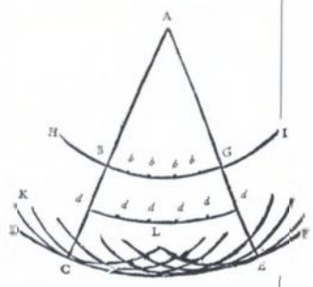
Dünyanın o dövrdə mövcud olan mənzərəsinə aşağıdakı kəşf də "sığışmırdı": eyni bir işıq mənbəyindən olan iki qayıdan şüa bir-birini bəzən gücləndirirdi, bəzən isə söndürürdü. Bu, sağlam fikrə, sanki, zidd idi. Lakin ingilislər Robert Boyl (1627-1691) 1663-cü ildə və Robert Huk (1635-1703) 1665-ci ildə bir-birindən asılı olmadan indi *Nyuton halqaları* adlanan hadisəni aşkar etdilər. Onlar müstəvi şüşə lövhə üzərində zəif toplayıcı linza yerləşdirdikdə yaranırdı: kontakt nöqtəsi ətrafında müxtəlif rənglərə boyanmış işıqlı və qaranlıq halqalar əmələ gəlirdi.



F.Qrimaldinin təcrübəsi. 1665-ci il traktatından şəkil. Sonlu ölçülü mənbədən gələn işıq bir cüt yarıqdan keçərək, ekranda *LM* işıqlı ləkəsini, *NL* və *MO* yarımkölgə oblastlarını, *İN* və *OK* difraksiya zonalarını əmələ gətirir.



Dalğaların qurşayanının qurulması və şam alovu üzərində misal. Şəkillər X.Hüygensin "İşıq haqqında traktat"ından götürülüb. 1690-cı il.





Nyuton halqası – linzanın səthindən və lövhədən qayıdan şüaların interferensiyasının nəticəsidir.

müxtəlif istiqamətlərdə eyni sürətlə yayılır.

Şüalar impulslar əks olunduqdan sonra görüşdükdə nə üçün bir-birini gücləndirir və ya zəiflədir? Robert Hukun bu haqdakı mühakimələri alimləri qane etmədi. Lakin işığın dalğa təbiətli olması haqqındakı ideya səmərəli olmuşdur. Bu ideyanın inkişafı Niderland alimi Xristian Hüygensin (1629-1695) adı ilə bağlıdır. O, Hukun hipotezini mükəmməl bir nəzəriyyəyə çevirdi. 1690-cı ildə çıxmış "İşıq haqqında traktat"da Hüygens bu ideya əsasında işığın yayılması prosesini, qayıtma və sınma hadisələrini izah etdi, işıqsaçan cisimlərin buraxdığı işıq dalğalarının qurulması prinsipini ifadə etdi.

Hüygens prinsipinə görə, əgər fəzanın hər hansı bir nöqtəsində efirin rəqsi baş verirsə, onda həmin nöqtə bütün istiqamətlərə yayılan dalğaların mənbəyi olur. Dalğanın gəlib çatdığı istənilən digər zərrəciyin özü amplitudca kiçik olan yeni sferik efir dalğası doğurur. Son, yekun dalğa bütün "kiçik" dalğaların qurşayanı kimi qurulur.

Hüygens öz prinsipindən işığın qayıtması və sınması hadisələrini təsvir

İnsan ətraf aləm haqqındakı məlumatın 90%-ni görmənin köməyilə alır. Ona görə təəccüblü deyildir ki, hələ antik dövrdə yunan və ərəb alimləri işıq şüalarının davranışının qanunauyğunluqlarını tədqiq etmiş və optik cihazlar düzəltmişlər. Onların əsasını qoyduqları "Optika" elminin adı "görürəm" mənasını verən yunan sözü "opteo"dan törəmişdir.

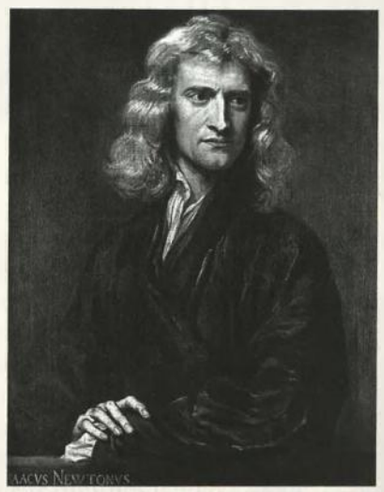
Çox uzun müddət işığın təbiəti haqqında yalnız dolayı əlamətlərə görə fikir söyləmək mümkün olmuşdur. Təsadüfi deyildir ki, Xristian Hüygens "İşıq haqqında traktat"ını aşağıdakı kimi başlamışdır: "Bu traktatda verilmiş isbatlar heç də həndəsi isbatlar qədər etibarlılığa malik deyil... halbuki həndəsəçilər öz təkliflərini səhih və aşkar prinsiplərin köməyilə isbat edirlər, baxılan halda prinsiplər onlardan alınan nəticələrin köməyilə təsdiqlənir. Öyrənilən obyektin təbiəti imkan vermir ki, bu başqa cür baş versin". Onun sözlərinə görə, bu "fərz olunan prinsiplərin köməyilə isbat olunmuş şeylər təcrübədə aşkar olunan hadisələrlə tamamilə uzlaşırsa", onda isbat ağlabatandır.

etmək üçün istifadə etdi. İşığın maneəni aşmasını – difraksiyanı da ikinci dalğaların kölgənin yerləşməyə haqqı olduğu yerlərə "qaçıb girməsinin" nəticəsi kimi asanlıqla təsəvvür etmək olar. Lakin Hüygens dar işıq şüalarının nə üçün mövcud olduğunu izah edə bilmədi: onun nəzəriyyəsinə görə şüanın kənarları hökmən dağılmalı, şüanın özü isə genişlənməlidir! Ona görə də Hüygens öz fikrinin əksinə olaraq hesab edirdi ki, maneənin arxa-

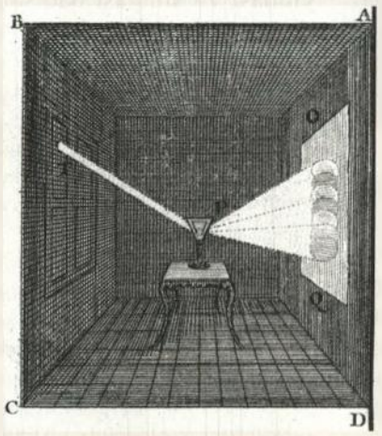
SER İSAAK NYUTON. "OPTİKA VƏ YA İŞIĞIN QAYITMALARI, SINMALARI VƏ RƏNGLƏRİ HAQQINDAKI TRAKTAT"

"Natural fəlsəfənin riyazi əsasları" (1687-ci il) kimi, İsaak Nyutonun "Optika" traktatı müəllifin sağlığında üç dəfə – 1704, 1717 və 1721-ci illərdə nəşr olunmuşdur. Müasirləri bu nisbətən kiçikhəcmli kitabı "Əsaslar"a nisbətən daha yaxşı başa düşürdülər. Akademik Sergey İvanoviç Vavilovun dediyi kimi, "Optika" minimal vasitələrlə (bir neçə prizma və bir neçə linza) aparılmış dəqiq fiziki təcrübənin ən "mükəmməl nümunəsi" olmuşdur. Nyuton məhz burada öz məşhur təcrübəsini – üçüzlü prizmanın köməyilə ağ işığın ayrılışını təsvir etmişdir. Lakin "Optika"nın məzmunu heç də sırf optiki problemlərlə bitmir. Nyuton bu işində maddənin korpuskulyar quruluşu məsələsinə də toxunmuşdur: "...mənə daha ehtimallı görünür ki, Allah başlanğıcda materiyaya bərk, ağır, nüfuzedilməz, mütəhərrik zərrəciklər formasını vermişdir; elə ölçülü və fiqurlu, elə xassəli və fəzaya münasibətdə elə mütənasibli zərrəciklər formasında ki, onlar, Allahın onları yaratdığı həmin məqsədə hər şeydən daha çox yarasınlar. Bu ilkin zərrəciklər bərk olmaqla, onlardan əmələ gəlmiş hər bir məsaməli cisimdən müqayisəedilməz dərəcədə bərk olmaqla, o qədər bərkdir ki, onlar heç vaxt aşınmır, yeyilmir və hissələrinə dağılmır. Heç bir adi qüvvə Allahın ilk xəlq etdiyi zaman yaratdığını bölməyə qadir deyildir". "Optika" bir də onunla maraqlıdır ki, burada onun müəllifinin cavablarını bilmədiyi çoxlu suallar vardır.

İşığın korpuskulyar nəzəriyyəsinin inanmış tərəfdarı olan Nyuton "Optika"nı məhz bu mövqedən yazmışdır və ona görə də öz əsərini işığın Yunq-



İsaak Nyuton.
Knellerin portret işi.



İ.Nyutonun təcrübəsi – günəş işığının spektrə ayrılması.
Traktatdan qravüra.

Frenel dalğa nəzəriyyəsinin qələbəsi dövrlərində haqsız unudulmağa düçar etdi. 1808-ci ildə böyük alman şairi və təbiətşünası İohann Volfqanq Gete yazmışdı: "Biz dünyanın bu səkkizinci möcüzəsini (Nyutonun "Optika"sını) uçub dağılmaq təhlükəsi olan unudulmuş xarabazarlıq kimi görürük və gecikdirmədən damı və yuxarı hissəni sökməyə başlayırıq ki, günəş, nəhayət, heç olmasa bir dəfə siçovulların və bayquşların köhnə yuvasına boylansın..." Yalnız XX əsrdə, S.İ.Vavilovun təbirincə desək, işığın dalğa nəzəriyyəsi "faktların dar dərəsinə" düşən və işığın ikili – korpuskulyar – dalğa – təbiəti aşkar olunan zaman Nyutonun "Optika"sı gözlənilməz yenilik və təravət qazandı.

"Optika"nın yaranma tarixini xeyli ətraflı Nyutonun özü şərh etmişdir. "İşıq haqqında sonrakı mühakimələrin bir hissəsi 1675-ci ildə Kral Cəmiyyətindən olan bəzi centlmenlərin arzusu ilə yazılmış və iclaslarda ucadan oxunmuşdur. Ayrı-ayrı kağızlardan (məktublardan) götürülmüş üçüncü kitab və ikinci kitabın son cümləsi istisna olmaqla, qalanı təxminən 12 il sonra nəzəriyyəni tamamlamaq üçün əlavə olunmuşdur. Bu obyektlər haqqında mübahisədən qaçmaq üçün, mən çapı indiyədək təxirə saldım və əgər dostlarımın inadkarlığı mənə qalib gəlməsəydi, bundan sonra da təxirə salardım. Əgər həmin obyektə dair mən digər memuarlar yazmışamsa, onlar mükəmməl deyil, ola bilsin ki, burada şərh olunmuş bütün təcrübələri mən aparana və sınma qanunları və rənglərin toplanması barəsində tam əmin olana qədər yazılmışdır".

TOMAS YUNQ

İşığın dalğa nəzəriyyəsinin yaradıcısı Tomas Yunq (1773-1829) hərtərəfli istedada malik insan idi. Gənc yaşlarından o, qeyri-adi qabiliyyətləri ilə adamı heyran edirdi: iki yaşında sərbəst oxuyurdu, dörd yaşında ingilis şairlərinin çoxlu şeirlərini əzbərdən bilirdi və həvəslə onları ifadəli oxuyurdu, səkkiz-doqquz yaşlarında – tokar dəzgahında özünün düzəltdiyi fiziki cihazlar üçün detalları yonurdu, on dörd yaşına qədər bir çox dillərə (qədim yunan, latın, ərəb, italyan, fransız dillərinə) yiyələnmiş, ilk oxunuş üçün çətin olan riyazi analizlə İ.Nyutonun əsərləri əsasında tanış olmuşdu. London, Edinburq və Gettingen universitetlərinin tələbəsi olmuş, burada tibbi və fizikanı öyrənmişdir. 1800-cü ildən Yunq Londonda həkimliklə məşğul oldu. 1801-1804-cü illərdə o, tibblə məşğuliyyətini Kral institutunda fizika professoru vəzifəsini yerinə yetirməyi özündə birləşdirdi. 1778-ci ildə Bencamin Tompson – qraf Rumford "Britaniya imperiyasının paytaxtında bilikləri yaymaq, faydalı mexaniki yeniliklərin hər yerdə tətbiqini asanlaşdırmaq, həmçinin gündəlik həyati problemlərin həllinə elmin tətbiqini öyrətmək üçün (mühazirə kurslarının və eksperiment nümayişlərinin köməyilə) abunə üzrə ictimai institut yaratmağı" təklif etdi. 1779-cu ildə açılmış Kral institutu indi də özünün yüksək missiyasını həyata keçirir. Onun professorları arasında böyük eksperimentator Faradey də olmuşdur.

Yunqun oxuduğu mühazirələr 1807-ci ildə iki cilddə "Natural fəlsəfəyə və mexanika sənətinə aid mühazirələr kursu" adı altında işıq üzü gördü. Yunq 1811-ci ildən Londonun Müqəddəs Georgiya xəstəxanasında həkimliklə məşğul oldu və 1818-ci ildən öz vəzifələrini Coğrafi uzunluqlar bürosunun katibi vəzifəsindəki işilə uyğunlaşdırdı (onun redaktorluğu ilə "Dəniz təqvimi" çıxdı).

Hər şeydən əvvəl, Yunq bir fizik kimi işığın dalğa təbiətinin sübutu ilə məşhurdur ki, bu sübut da uzun müddət – Eynşteyn tərəfindən fotoeffektin kvant nəzəriyyəsi yaradılana qədər işığın korpuskulyar təbiətinə dair Nyuton təsəvvürlərini unutmağa məcbur etdi. Görmənin kəskinliyi (gərginliyi) problemilə məşğul olan Yunq 1793-cü ildə akkomodasiyanı (gözün kəskinliyə köklənməsini) bullurun əyriliyinin dəyişməsilə izah etdi. O, rəngli görmənin nəzəriyyəsini işləyib hazırladı, 1803-cü ildə isə müxtəlifrəngli işıq dalğalarının uzunluğunu ölçdü (ultrabənövşəyi rəng üçün 0,42 mkm, qırmızı rəng üçün isə 0,7 mkm aldı).

Yunq özünün fiziki optikaya və akustikaya dair baxışlarını "Səs və işıq üzrə təcrübələr və problemlər" (1800-cü il) işində yekun vurmuşdur. Burada o, işığın dalğa nəzəriyyəsini qəti olaraq müdafiə etmiş, səs dalğalarının interferensiyası zamanı onların gücləndiyini və zəiflədiyini ilk dəfə qeyd etmiş, dalğaların superpozisiya prinsipini ifadə etmişdir ("interferensiya" termini də Yunqa məxsusdur). 1801-ci ildə alim işığın interferensiyasını izah etdi və beləliklə, işığın dalğa təbiətinin qəti sübutunu təklif etmiş oldu. O vaxtdan bəri, interferensiyanı və difraksiyanı doğuran istənilən hadisəni dalğavari hadisə hesab etmək qəbul olunmuşdur. 1802-ci ildə Yunq iki koherent mənbədən işığın interferensiyasına aid ilk nümayiş eksperimentini yerinə yetirdi. 1817-ci ildə o, işıq dalğalarının eninə dalğa olduğunu sübut etdi. Elastiklik nəzəriyyəsində materialın dartılmasının xarakteristikası – Yunq modulu Yunqun adı ilə bağlıdır.



Tomas Yunq. Ç.Ternerin portret işi.

Yunqun təbiətcə hərtərəfli olması onun məşğul olduğu hər şeydə, istər tibdə, istər fizikada, rəssamlıqda, musiqidə və ya filologiyada öz izini qoymuşdur. (Danışırlar ki, özünün bütün digər qabiliyyətlərilə yanaşı Tomas həm də mahir kəndirbaz olmuşdur!) Məhz Yunq fərz etmişdir ki, Misir hərbi əməliyyatı zamanı Napoleonun əsgərləri tərəfindən 1799-cu ildə tapılmış Rozett daşı üzərində oyulmuş (həkk olunmuş) heroqliflər fonetik işarələrdən ibarətdir. Yunqun fərziyyəsi misirşünas Jan Fransua Şampolona imkan verdi ki, Rozett daşı üzərindəki üçdilli yazını öyrənməklə, Misir heroqliflərinin sirrini açа bilsin.

sında dalğaların qurşayanı yoxdur və difraksiya sirr olaraq qalırdı. Dalğa nəzəriyyəsi çətin vəziyyətə düşdü. O, eyni zamanda Nyuton halqalarını, Qrimaldi difraksiyasını və adi işıq şüalarını izah edə bilmədi.

Bu çətinlikləri aradan qaldırmaq üçün Hukun həmyerlisi və müasiri İsaak Nyuton dalğa nəzəriyyəsini yox, zərrəciklər və ya korpuskullar (*lat.* corpusculum – "zərrəcik") nəzəriyyəsini təklif etdi: 1675-ci ildə o,

"Dünya efiri" anlayışı həm dalğa nəzəriyyəsi və həm də korpuskulyar nəzəriyyə üçün lazım oldu. Doğrudur, bu anlayışdan müxtəlif cür istifadə olunmuşdur: Nyutona görə, işığın zərrəcikləri efirdə hərəkət edir və onun rəqslərini doğurur, Hüygensə görə isə rəqs edən efir zərrəciklərinin özləri işıqdır.

"İşığın və rənglərin nəzəriyyəsi..." memuarında sonralar onun adını almış işıqlı və qaranlıq halqalara dair özünün ətraflı tədqiqatlarının nəticələrini çap etdirdi. Halqaların dövrlüyünü alim belə izah edirdi: şəffaf cismə nüfuz edən işıq zərrəcikləri bu cisimdə efirin sıxlaşma və seyrəkləşməsini doğurur.

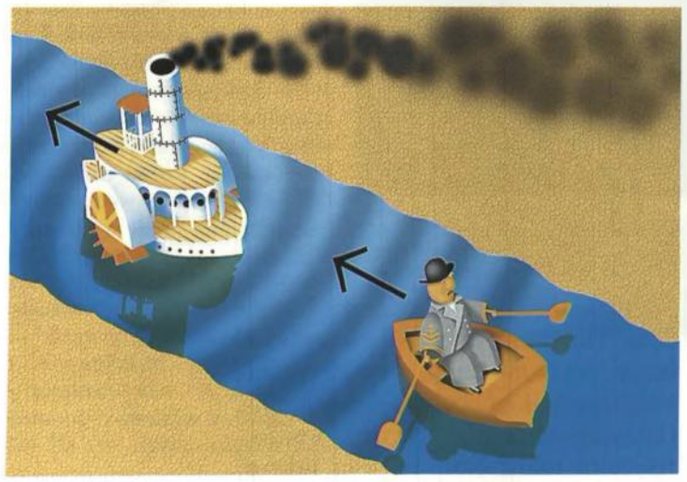
Korpuskullar efirin sıxlaşmış və ya seyrəkləşmiş yerinə düşərək, uyğun olaraq ya "yüngül əksolunma təsirinə", ya da "yüngül sınma təsirinə" məruz qalır. Nəticədə işıqlı və qaranlıq halqalar əmələ gəlir.

Nyutonun elm aləmində nüfuzu o qədər böyük idi ki, işıq dalğalarını uzun müddət unutdular. Lakin 1800-cü ildə Nyutonun həmyerlisi Tomas Yunq onun nəticələrini şübhə altına aldı. Yunq fərz etdi ki, işıq ayrı-ayrı impulslar seli yox, periodik dalğadır. O göstərdi ki, dalğa nəzəriyyəsi korpuskulyar nəzəriyyəyə nisbətən, demək olar ki, bütün optik hadisələri daha sadə və daha təbii izah edir. Axı işıq zərrəcikləri nəzəriyyəsi hələ Huk və Hüygens tərəfindən qoyulmuş suallara cavab verə bilmədi: nə üçün iki kəsişən işıq dəstəsi qarşılıqlı təsirdə olmur? Maddi cisimlər işıq sürəti kimi belə yüksək sürətlərə qədər necə sürətlənə bilər? Nə üçün işıqsaçan cisimlərin kütləsi gözəçarpan dərəcədə azalmır?

Yunq hesab edirdi ki, "Kainat kiçik sıxlıqlı və yüksək dərəcədə elastiki işıqsaçan efirlə doludur", "bu efirdə dalğavari hərəkətlər isə hər dəfə cisim işıqlanan zaman yaranır". Dalğalar gözə çataraq, onda görmə hissi doğurur. Bir neçə maneədən əks olunan işıq bir neçə dalğanın birgə təsirinin nəticəsi kimi – öz xarakteristikaları olan yeni dalğa kimi qavranılır.

Yunq bu nöqteyi-nəzəri izah edərkən sudakı dalğaları misal gətirirdi: "Fərz edək ki, müəyyən sayda eyni dalğalar göldəki durğun suyun səthində sabit sürətlə hərəkət edir və dar kanala daxil olur... daha sonra fərz edək ki, buna bənzər başqa bir səbəb birinci ilə eyni zamanda, eyni sürətlə həmin kanala gələn və ona bərabər olan digər dalğalar sırası yaratmışdır. Dalğaların bu sıralarından heç biri bir-birini məhv etmir, lakin onların fəaliyyəti (təsiri) qarşılıqlı toplanır..." Əgər birinci dalğalar sırasının qabarıqları kanala girərkən, ikincinin qabarıqları ilə üst-üstə düşərsə, onda ikiqat hündürlüyə malik qabarıqları (və ikiqat dərinliyə malik çökükləri) olan dalğalar sırasını müşahidə etmək olar. Bu mənzərə bütün kanal boyu saxlanır, çünki dalğalar eyni sürətlərlə qaçırlar. Əgər əksinə, bir sıranın qabarıqları digərinin çökükləri ilə üst-üstə düşərsə, onda suyun səthi hamar qalacaqdır. Alim yazmışdır: "Mən hesab edirəm ki, işığın iki porsiyasının bu cür qarışdığı hər dəfə oxşar effektlər baş verir; məhz bunu mən işığın interferensiyasının ümumi qanunu adlandırıram".

Yunq kanalı.



Beləliklə, optikada ilk dəfə işığın *interferensiyası* (*lat.* inter – "arasında" və ferens – "daşıyan", "vuran"), yəni



işıq dalğalarının eyni zamanda təsiri nəticəsində onların qarşılıqlı güclənməsi və ya zəifləməsi termini meydana çıxdı. O vaxtdan işıq dalğaları haqqındakı təsəvvürlər xeyli dəyişib, lakin termin qalıb və indiyədək işlədilir.

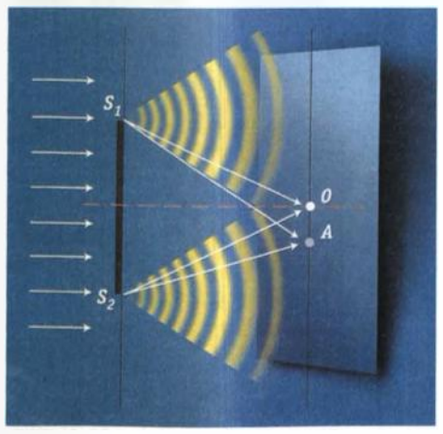
Yunqun izahı dalğa nəzəriyyəsinin mövqeyini möhkəmlətdi, lakin Nyutonun korpuskullar nəzəriyyəsini qəti olaraq yalnız 1818-1827-ci illərdə, işıq dalğalarının ilk miqdarı nəzəriyyəsinin müəllifi olan fransız Oqyusten Jan Frenelin (1788-1827) seriya işlərinin çapından sonra rədd etdilər. O, Yunqun ideyasını dalğaların qurulmasının Hüygens prinsipinə tətbiq etdi. Frenel özünün 1819-cu ildə çap olunmuş "İşığın difraksiyası haqqında memuar" əsərində nümayiş etdirdi ki, yekun dalğa, sadəcə, qurşayan deyil, ikinci dalğaların interferensiyasının nəticəsidir. Bu dəqiqləşdirilmiş ifadə *Hüygens-Frenel prinsipi* adlanır. Bu prinsip işığın yayılmasının doğruluğu diqqətəlayiq tərzdə təsdiq olunmuş riyazi nəzəriyyəsini yaratmağa imkan verdi.

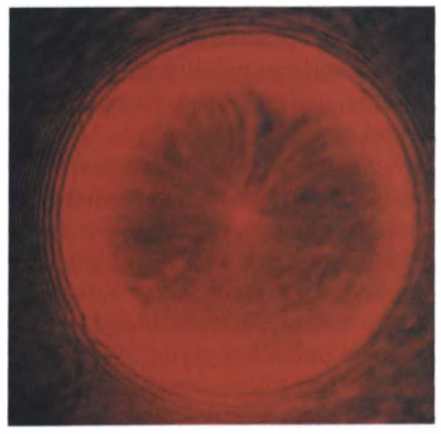
Korpuskulyar nəzəriyyənin qatı tərəfdarı olan fransız akademiki Simeon Deni Puasson (1781-1840), Frenelin işi müzakirə olunan zaman diqqəti, özünün fikrinə görə, bu işin bir səhv nəticəsinə yetirdi: dairəvi maneənin mərkəzində işıqlı ləkə müşahidə olunmalıdır. Frenel və Araqo eksperimental olaraq belə ləkəni aşkar edən zaman bu "səhv" nəzəriyyənin həqiqi qələbəsinə çevrildi!

Bütün əyaniliyi ilə yanaşı Hüygens nəzəriyyəsində dəqiq hesablamalar yox idi. İ.Nyuton, Q.V.Leybnis, L.Eyler, D.Bernulli, P.S.Laplas və bir çox digər alimlər uyğun riyazi aparat işləyib hazırlayan və həllini tələb edən məsələləri söyləyən vaxt optika irəliyə doğru coşqun sıçrayış etdi. Lakin bunun üçün bütöv bir əsr lazım oldu...

Difraksiya tənliyinin ilk dəqiq həllini Arnold Zommerfeld (1868-1951) yalnız 1896-cı ildə nəşr etdirdi.

Dalğaların elastiki mühitdə yayılmasını təsvir edən tənliyi ilk dəfə 1828-ci ildə fransız alimi Lui Mari Anri Navye (1785-1836) çıxarmış, onun həllini isə həmin ildə də Simeon Deni Puasson tapmışdır.





Puasson ləkəsi. Şəklin *O* mərkəzinə ikinci dalğalar diskin S_1 və S_2 kənarlarından həmişə eyni fazada gəlir və bir-birini gücləndirir – parlaq ləkə yaranır. İstənilən başqa *A* nöqtəsinə onlar eyni fazada gəlməyə bilər, onda kölgə əmələ gəlir.



Evklid.

Buna baxmayaraq, Frenel difraksiyanın tam nəzəriyyəsini qura bilmədi: onun tənlikləri olduqca mürəkkəb idi. Lakin hadisənin mahiyyətinin başa düşülməsi sayəsində təqribi həll üsulları işlənib hazırlandı, mühüm xüsusi hallar seçildi. Dalğa nəzəriyyəsi praktikada geniş tətbiq olunmağa başlandı, lakin onun müsibətləri davam edirdi.

Eksperimentlərin nəticəsində Frenel işığın efirdə uzununa dalğa (havada səs kimi) olması haqqındakı təsəvvürlərdən uzaqlaşmalı və işığa eninə dalğa kimi baxmalı oldu ("İşığın ikiqat sınması və polyarizasiyası" məqaləsinə bax). Bu yeni çətinliyə gətirib çıxardı: eninə dalğalar yalnız bərk cisimlərdə yayılır, deməli, işıqsaçan efir bərkdir! Lakin onda planetlər hərəkət zamanı efirin müqavimətinə məruz qalmalıdır. Beləliklə, Frenelin nəzəriyyəsi nəinki bir çox şeyləri izah etdi (məsələn, nə üçün işıq şüaları düzdür; "İşığın difraksiyası" məqaləsinə bax), lakin həm də cavab verə bilmədiyi suallar doğurdu.

Ceyms Klark Maksvell işıq dalğalarının davranışını bütünlüklə başa düşə bildi. 1864-cü ildə o elektriki, maqnetizmi və optikanı vəhdət halında birləşdirdi: "İşıq elektromaqnit həyəcanlanmasıdır və elektromaqnetizmin qanunlarına uyğun olaraq sahə vasitəsilə yayılır". Efir lazım olmadı!

XX əsrdə fizikada daha bir inqilab baş verdi. Albert Eynşteyn fərz etdi ki, işıq dalğaları kəsilməz olaraq yox, porsiyalarla – kvantlarla (*lat.* quantum – "miqdar") şüalanır. Eynşteyn onları fotonlar (*yun.* "fos" – "işıq"; "Yeni kvant nəzəriyyəsi" məqaləsinə bax) adlandırdı.

Beləliklə, fiziklər onu başa düşdülər ki, işıq eyni zamanda həm zərrəcik, həm də dalğadır: bəzi şəraitlərdə onun korpuskulyar xassələri, başqa şəraitlərdə isə dalğa xassələri özünü büruzə verir.

İŞIĞIN YAYILMASI

Əşyaların kölgələrini müşahidə edən insanlar işıq şüalarının düz xətt boyunca yayıldığını çox qədimlərdən bilirdilər. Ola bilsin, düz xətt anlayışının özü bu cür müşahidələr əsasında yaranmışdır. Ona görə də təəccüblü deyildir ki, optikaya aid bizə gəlib çatan ilk əsərlərin müəllifi e.ə. III əsrdə yaşamış qədim yunan riyaziyyatçısı Evklid olmuşdur.

Kölgənin forması maneənin formasını təkrarlayır və işıq mənbəyinin görünən ölçüləri kifayət qədər kiçik olduqda (nöqtəvi mənbə), kölgə kəskin kənarlara malik olur. Yox əgər mənbə sonlu ölçülərə malikdirsə, onda kölgənin sərhədləri yayılır, yarımkölgə – işıqla tam kölgə arasında yerləşən oblast meydana çıxır; ora şüalar bütün mənbədən düşmür və oranı zəif işıqlandırır.



▸ Düşmə bucağı və qayıtma bucağı. Klavdi Ptolemey.

ƏKSETMƏ

İşığın qayıtmasını təsvir edən qanun hələ Evklidə və Arximedə məlum idi, b.e. II əsrində isə Klavdi Ptolemey onu eksperimental olaraq yoxlamışdı. O aşkar etmişdi ki, düşən şüa ilə güzgü səthinə çəkilmiş perpendikulyar arasındakı bucaq (α düşmə bucağı) bu perpendikulyarla qayıdan şüa arasındakı bucağa (β qayıtma bucağına) bərabərdir, yəni α = β. Müasir dərsliklərdə bu ifadəyə yeganə bir dəqiqləşdirmə əlavə edilib: hər iki şüa – düşən və qayıdan şüalar güzgü səthinə çəkilmiş perpendikulyarla eyni bir müstəvi üzərində yerləşir.

Qayıtma qanununun izahını həm korpuskulyar, həm də dalğa nəzəriyyəsində tapmaq olar. Əgər işıq zərrəcikləri selidirsə, onda onlar güzgünün səthindən elastiki topcuqlar kimi geri sıçrayırlar. Əgər dalğadırsa, onda onun müxtəlif hissələri səthə müxtəlif vaxtlarda çatır; deməli, bu səthdə yerləşən ikinci dalğaların mənbələri eyni zamanda "işə düşmür". İlk şüalanmağa güzgünün o nöqtəsi başlayır ki, ora dalğa hamısından əvvəl düşmüşdür. İkinci mənbə verilmiş nöqtədən nə qədər çox uzaqda olarsa, ikinci dalğa bir o qədər gec buraxılacaq və onun macal tapıb getdiyi məsafə də bir o qədər kiçik olacaqdır. Bu dalğalar düşən dalğanın sürətinə bərabər sürətlə hərəkət edir, çünki işıq gəldiyi mühitə də qayıdır.



Qədim yunan alimi İskəndəriyyəli Heron (təxminən I əsrdə) işığın maraqlı bir xassəsini müəyyən etmişdir: işıq şüası güzgüdən elə qayıdır ki, işıq mənbəyindən müşahidəçiyə qədər olan yol minimal olur. Təbiət israfçılığa dözmür: güzgüsüz də işıq ən qısa trayektoriya üzrə – düz xətt boyunca yayılır.

SINMA

İşıq iki şəffaf mühiti ayıran sərhədə düşəndə qismən geriyə, birinci mühitə qayıdır, qalan hissəsi isə sınır və ikinci mühitə nüfuz edir.

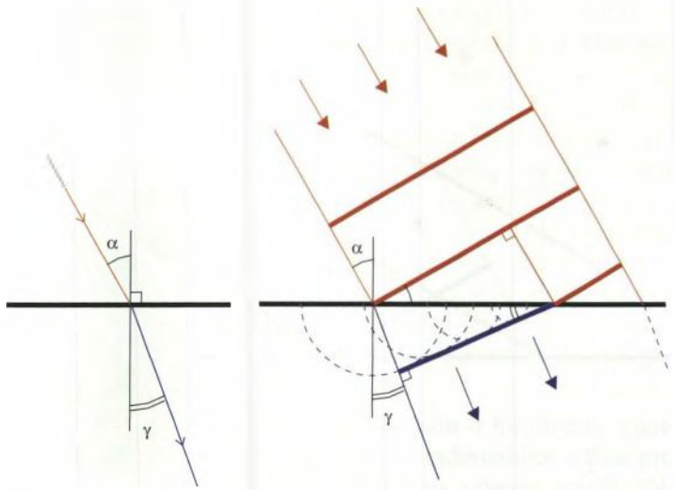
Sınmanın tabe olduğu qanunu əvvəlcə yunan, sonra ərəb alimləri tapmağa çalışmışlar. Mənşəcə polyak olmuş və XIII əsrdə İtaliyada yaşamış Vitelli işıq şüalarının dönərlik xassəsini aşkar etdi: şüalarla səthə çəkilmiş perpendikulyar arasındakı bucaqlar işığın sındırıcı səthi hansı tərəfdən

Hüygens prinsipinə görə qayıdan (əks olunan) dalğanın dalğa cəbhəsi.



Snell öz əsərini çap etdirməmişdi. Bu əsər haqqında məlumat Rene Dekartın əsərlərindən məlumdur. Dekart Snelldən asılı olmadan, 1637-ci ildə həmin qanunu ifadə etmişdir.

◂ Ferma prinsipi.



Düşmə və sınma bucaqları — İşığın sınması

kəsməsindən (səthə hansı tərəfdən düşməsindən) asılı deyildir. Lakin sınma qanununun müəllifi hollandiyalı Villebrord Snell (Snellius; 1580-1626) hesab olunur; o, bu qanunu 1621-ci ildə eksperimental olaraq kəşf etmişdir.

Snell hökm edirdi ki, α düşmə bucağının sinusunun γ sınma bucağının sinusuna olan nisbəti sabitdir. Sonralar aşkar olundu ki, maddə sıx olduqca sin α/sin γ = *n* nisbəti də bir o qədər böyük olur. *n* kəmiyyətini *maddənin sındırma əmsalı* adlandırdılar.

Bu hadisə həm korpuskulyar, həm də dalğa nəzəriyyəsində olduqca ziddiyyətli şərhini aldı. Dekart hesab edirdi ki, işıq zərrəciklərinin sürəti sıx mühitdə havadakına nisbətən böyükdür. Sıx cismin səthinə yaxınlaşaraq, zərrəciklər cismə cəzb olunur və sürətlənir. Onlara təsir edən qüvvə cismin səthinə perpendikulyardır, ona görə də sürətin yalnız sındırıcı səthə köndələn yönələn toplananı dəyişəcəkdir.



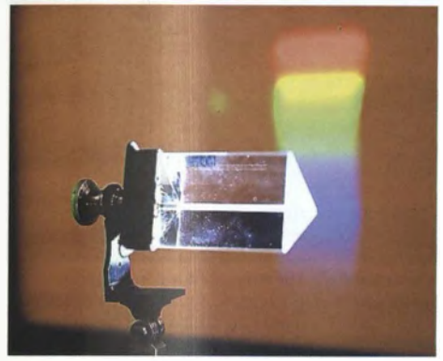
Hüygens əksini hökm edirdi: mühit sıx olduqca, dalğalar onda bir o qədər yavaş hərəkət edir. O, sınmanı da qayıtma kimi izah edirdi: sınan dalğa – ikinci mənbələrin dalğalarının qurşayanıdır; ikinci mənbələrin dalğaları daha sıx mühitin daxilində kiçik sürətlə yayılır. Sındırma əmsalı ikinci mühitdə dalğanın sürətinin birincidəkindən neçə dəfə kiçik olduğunu göstərir.

Dalğa nəzəriyyəsinin xeyrinə gözlənilmədən yeni arqumentlər meydana çıxdı. Təxminən 1660-cı ildə fransız riyaziyyatçısı Pyer Ferma (1601-1665) Heronun ən kiçik yol prinsipini – dalğaların yayılması və ya qayıtması halında çox yaxşı işləyən bu prinsipi sınmaya tətbiq etməyə çalışdı. Lakin ən kiçik yol düz xətt boyunca keçir, şüa isə nə üçünsə sınır... Ferma belə mühakimə aparır: fərz edək, işıq müxtəlif mühitlərdə müxtəlif sürətlərlə hərəkət edir, onda ən qısa yolu yox, ən tez gedilən yolu axtarmaq lazımdır. O, bu məsələni çox gözəl həll etdi, nəzəri olaraq sınma qanununu çıxardı və müəyyən etdi ki, sınan şüa işığın sürətinin kiçik olduğu daha sıx mühit tərəfə meyil edir. Şüaların yolunun belə qurulması üsulunu *Ferma prinsipi* və ya *ən kiçik zaman prinsipi* adlandırdılar. Xeyli mürəkkəb hallarda hesablamalar zamanı da ondan istifadə olunur.

Bəzən maddələrin arasında kəskin ayırıcı səth olmur və sındırma əmsalı səlis (müntəzəm) dəyişir. Məsələn, qənd parçası suda həll olanda, qəndin konsentrasiyası çox olan aşağı qatlar

böyük sındırma əmsalına, yuxarı qatlar isə kiçik sındırma əmsalına malik olur. Belə mühitlərdə işıq şüası sınmır, əyilir. Bu hadisə *refraksiya* (*lat.* refractio – "sınma") adlanır.

Yer atmosferi də sıxlığı tədricən dəyişən mühitdir. Ona görə də Günəş şüaları atmosferə düşəndə, tədricən onun daha sıx qatlarına tərəf əyilir və belə təsəvvür yaranır ki, guya bizim Günəş əslində olduğundan bir qədər



yuxarıda yerləşmişdir. Günəş doğan və ya batan zaman bu sürüşmə 0,5°-yə çatır ki, bu da Günəş diskinin bucaq ölçüsünə uyğundur. Beləliklə, əgər Yerin atmosferi olmasaydı, planetimizdə gündüz bir az qısa olardı.

DİSPERSİYA

Rəng işığın aşkar xassələrindən biridir. Aşkardır, ancaq aydın deyildir. İşığın hansı fiziki xassəsi bu qədər gözəl hisslər yaradır? Nəzəriyyələr çox olmuşdur, yalnız Nyuton sistematik tədqiqatlar aparmış və bu suala cavab almışdır.

İşığın şəffaf cisimlər tərəfindən sınması və bu zaman əlvan zolağın yaranması Nyutondan çox-çox əvvəl məlum idi. Doğrudur, Aristotel dövründən bəri hesab olunurdu ki, ağ işıq sadədir. Nyutonun dövründə isə hesab edirdilər ki, sındırıcı cismin (məsələn,



Günəş batanda refraksiya.

◄ Spektr: ağ işığın prizmanın köməyilə ayrılışı.

prizmanın) özü işığı müxtəlif rənglərə boyayır.

Budur, "prizmatik rənglərdən" məftun olmuş Nyuton öz evində bir neçə sadə təcrübələr apardı. O, pəncərə taxtasındakı kiçik deşikdən Günəş işığını keçirdi, onu şüşə prizma üzərinə göndərdi və ekranda enli rəngli zolaq – spektr aldı. Alim özözünə sual verdi: prizma artıq başqa prizmadan keçmiş işıq dəstəsini necə rəngə boyayır? Nyuton, sonralar həlledici eksperiment adlandırdığı bir eksperiment apardı: prizma vasitəsilə üzərində kiçik deşiyi olan ekranda spektr alaraq, deşikdən keçən rəngli şüanı ikinci prizmaya yönəltdi. Bu



Refraksiya – göydə xəyali görüntülərin və səhrada mirajların meydana çıxmasının səbəbidir.
Günəş şüaları atmosferin yuxarı qatlarında daha az sıxlıqlı havadan və ya Yer səthi yaxınlığında qızmış havadan keçərkən əyilir və göydə süzən yelkənli gəmi, ya da ucsuz-bucaqsız qumlar arasında həyatverici vahə (səhrada yaşıllıq) – həqiqətən üfüq xəttinin arxasında yerləşən obyektlərin illüziyasını yarada bilər.

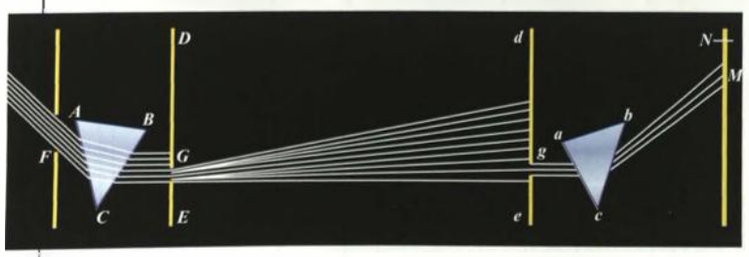
SPEKTR VƏ YA GÖY QURŞAĞININ BÜTÜN RƏNGLƏRİ

Hələ XVI əsrin ikinci yarısında italiyalı Françesko Mavrolik belə hesab etməyi təklif etdi ki, Günəş işığı sındıqdan sonra orada, göy qurşağındakı kimi, yeddi rəng olur: qırmızı, narıncı, sarı, yaşıl, mavi, göy, bənövşəyi (Françeskoya qədər hesab edirdilər ki, "xalis" rəng yalnız üç cürdür). Aşağıdakı ibarəni əzbərləməklə onların ardıcıllığını asanlıqla yadda saxlamaq olar: "Qarı nənə səksən yaşında məxməri gülə bənzər" (bu ibarədə istənilən sözün birinci hərfi rəngin adının birinci hərfi ilə üst-üstə düşür). Bu rənglər dalğaların uzunluğunun qısalması sırası ilə düzülür:

qırmızı	650-780 nm,
narıncı	590-650 nm,
sarı	530-590 nm,
yaşıl	490-530 nm,
mavi	450-490 nm,
göy	420-450 nm,
bənövşəyi	380-420 nm.



İ.Nyuton təcrübəsinin sxemi. Spektral rənglər müxtəlif sınma qabiliyyətlərinə malikdir.





Ədalət naminə demək lazımdır ki, hələ Nyutonun təcrübələrinə qədər çex fiziki Yohannes Markus Marsi (1595-1667) göstərmişdi ki, müxtəlif rəngli şüalar müxtəlif cür sınır və sonra əgər onları ikinci prizmadan keçirsək, rənglərə ayrılmır. Lakin onun bu məlumatı (1648-ci il) diqqətdən kənarda qalmışdı.

Özünün digər fikrini: "Günəş işığı müxtəlif sınma qabiliyyətlərinə malik şüalardan ibarətdir" fikrini alim spektrə ayrılmış işıq dəstəsini linza vasitəsilə toplayaraq, ağ işıq almaqla sübut etdi. Beləliklə, Nyuton rənglərin yeni nəzəriyyəsinə gəlib çıxdı. Bu nəzəriyyə qızğın mübahisələr doğurdu, çünki dövrün baxışlarına, təsəvvürlərinə heç cür sığışmırdı. Nyutonun bir çox müasirləri spektrin alınmasını köhnə nəzəriyyə çərçivəsində izah etməyə çalışırdılar; bu zaman onlar belə bir hipotezə əsaslanırdılar ki, prizmadan çıxan işığın rənglənməsi şüaların prizma səthinə müxtəlif düşmə bucaqları ilə əlaqədardır. Eksperimentlərin nəticələrini 50 ildən çox yoxladılar, lakin nəticədə bütün elm aləmi ingilis alimin nəticələrilə razılaşdı. Nyuton optik tədqiqatların yeni oblastının əsaslarını qoydu. O müəyyən etdi ki, göy şüalar şüşədə qırmızı şüalara prizma şüanı spektrə ayırmadı və ümumiyyətlə onun rəngini dəyişmədi! Deməli, spektrin əmələ gəlməsi prizmanın yox, onun üzərinə düşən işığın xassəsidir: "Rənglərinə görə fərqlənən şüalar sınma dərəcələrinə görə də fərqlənir". İşığın dispersiya hadisəsi bu cür kəşf olundu.



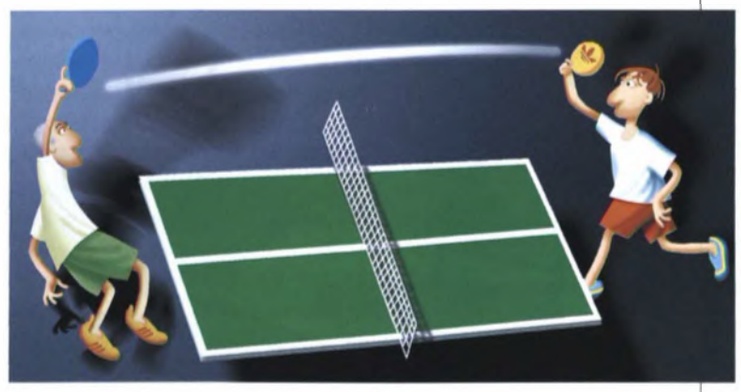
nisbətən daha çox sınır, yəni sındırma əmsalı dalğa uzunluğunun azalması ilə böyüyür. Doğrudur, alim səhvən hesab edirdi ki, qırmızı və göy şüaların sınma qabiliyyətindəki fərq maddədən asılı deyil. Əksər şəffaf mühitlər üçün sındırma əmsalı, doğrudan da, dalğa uzunluğu kiçik olduqca bir o qədər böyük olur (*normal dispersiya*). Lakin bəzi maddələr üçün dalğa uzunluqlarının elə intervalları var (hərəsinin özünün) ki, bu intervallarda sındırma əmsalı dalğa uzunluğunun artması ilə artır (*anomal dispersiya*).

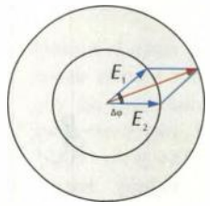
Günəş batan vaxt, yəni Günəş üfüq arxasında tam batmazdan azca əvvəl onun diskinin yuxarı kənarında narıncı rəng yaşılımtıl-sarı ilə və hətta göyümtül-yaşıl rənglə əvəz olunan vaxt nadir hadisə – yaşıl şüa müşahidə etmək olar. Göy və yaşıl şüalar havada qırmızı və sarı şüalara nisbətən daha çox sındığından, refraksiya nəticəsində "yaşıl" Günəş diski "qırmızı" Günəş diskinə nisbətən üfüqün arxasına bir qədər gec daxil olur.

İŞIĞIN İNTERFERENSİYASI

Gündəlik təcrübəmizdən məlumdur ki, iki işıq mənbəyi birlikdə, onların hər birinin təklikdə verdiyi işıqdan daha çox işıq verir. Lakin əksinə də olur. İlk baxışda paradoksal görünən bu hadisənin – Nyuton halqalarının – müşahidə olunduğu ilk eksperiment işıq dalğalarının qarşılıqlı təsirini, yəni onların interferensiyasını nümayiş etdirir.

İnsan gözü işıq dalğasında nəyi hiss edir? Eksperimentlərlə sübut olunmuşdur ki, dalğanın elektrik sahəsinin təsiri altında gözün fotoreseptorlarında həyəcanlanma yaranır. Göz sahənin $\vec{E}$ intensivliyinin qiymətini və ya istiqamətini yox, şüalanmanın E^2 ilə mütənasib olan enerjisini və ya I intensiv-





Rəqslərin superpozisiya prinsipinə görə toplanması.

liyini hiss edir. Əgər enerji rəqsləri saniyədə on dəfədən tez-tez baş verirsə, onda göz bu rəqsləri izləmək halında olmur. (Bu *görmənin ətalətliliyidir* ki, kino və telexəyalların qavranılması buna əsaslanmışdır.) Müşahidəçi üçün rəqslər, yalnız işığın orta enerjisindən asılı olan sabit bir siqnalda birləşir; bu orta enerji isə öz növbəsində yekun elektrik sahəsi intensivliyinin rəqslərinin amplitudunun kvadratı ilə mütənasibdir.

Deməli, dalğaların toplanmasının görünən nəticəsini hesablamaq üçün, alınan dalğanın yekun amplitudunu tapmaq kifayətdir. E_1 və E_2 amplitudlu elektrik sahəsinin eyni tezlikli və sabit $\Delta\varphi$ faza sürüşməsinə malik iki rəqsi üçün superpozisiya prinsipinə görə yekun amplitud aşağıdakına bərabərdir:

$$E^2_{\text{yekun}} = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\Delta\varphi.$$

İşığın müşahidə olunan I intensivliyi sahə intensivliyinin E^2 kvadratı ilə mütənasib olduğundan, interferensiya edən dəstələrin I_{yekun} intensivliyi üçün aşağıdakı ifadəni alırıq:

$$I_{\text{yekun}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi, \quad (1)$$

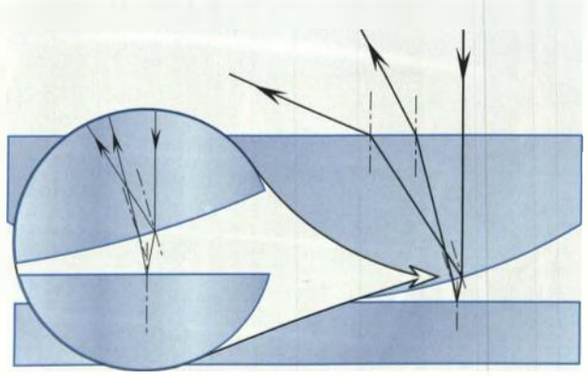
burada I_1 və I_2 – birinci və ikinci işıq dəstələrinin intensivliyidir.

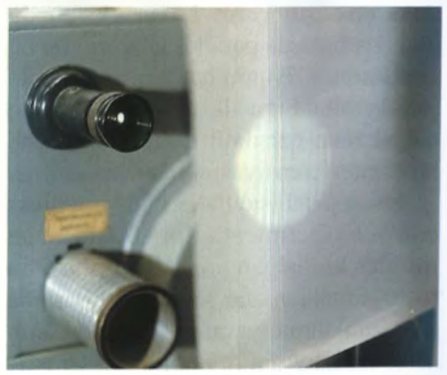
İki dalğanın koherentliyi (*lat.* cohaerens – "əlaqədə olan") sadə halda o deməkdir ki, onlar arasındakı fazalar fərqi sabitdir və ya kifayət qədər yavaş dəyişir. Bu cür dalğaları toplayanda interferensiya mənzərəsi müşahidə olunur.

(1) düsturundan maraqlı nəticələr çıxır. İşıq rəqslərinin fazalar fərqinin müsbət olduğu nöqtələrdə müşahidə olunan intensivlik düşən dəstələrin intensivlikləri cəmindən böyükdür: onlar bir-birini gücləndirir. Kosinusun mənfi olduğu yerlərdə isə nəticə tam əksinədir: müxtəlif mənbələrin dəstələri bir-birini söndürür. Əgər dəstələrin intensivlikləri bərabər olarsa, onda interferensiya nəticəsində intensivliyi sıfırdan dördqata qədər olan işıq alına bilər; $\Delta\varphi$ fazalar fərqi bir nöqtədən digərinə müntəzəm dəyişir, ona görə də qaranlıq oblastla işıqlı oblast qonşu olur: işığın enerjisi onlar arasında yenidən paylanır.

İndi aydın olur ki, Nyuton halqaları nə üçün alınır? İşıq dalğası linza – müstəvi lövhə sisteminin üzərinə düşəndə qismən linzanın aşağı səthindən, qismən də lövhənin səthindən qayıdır. İki qayıdan dalğanın toplanması məhz interferensiya mənzərəsini verir. Əgər birinci və ikinci dalğalar müşahidə nöqtəsinə qədər müxtəlif yollar qət edirsə, həm də bir dalğanın "qabarıqlığı" digərinin "çöküklüyü" üzərinə düşürsə ($\Delta\varphi = 180°$ və ya π rad), onda bu nöqtədə dalğalar interferensiya zamanı bir-birini zəiflədir. Yox, əgər dalğaların "qabarıqları" üst-üstə düşürsə ($\Delta\varphi = 0°$), onda dalğa güclənir. Deməli, işığın güclənməsini

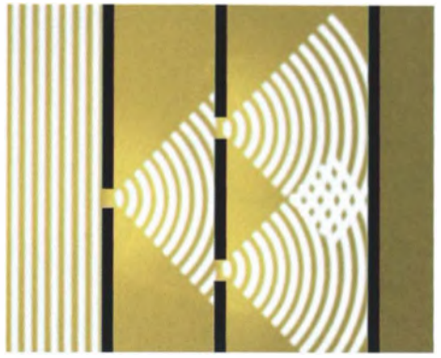
Nyuton halqaları – linzanın və lövhənin səthlərindən qayıdan dalğaların interferensiyasının nəticəsidir.





müşahidə etmək üçün, dalğalardan hər hansı biri digərindən dalğa uzunluğunun tam misliləri qədər böyük olan məsafə qət etməlidir (*maksimum şərti*); dalğanın zəifləməsi üçün dalğa uzunluğunun tam misli plyus yarımdalğa qədər fərq tələb olunur (*minimum şərti*). Nyuton halqalarının təsvirinə baxmaqla, nəzəriyyə ilə eksperiment arasındakı ziddiyyəti aşkar etmək olar: mənzərənin mərkəzində – qayıdan iki dəstənin yollar fərqinin sıfır olduğu, yəni tam sayda dalğa uzunluğuna bərabər olduğu yerdə qabaqcadan xəbər verilən işıqlı ləkə əvəzində qaranlıq ləkə yerləşir! Bu sirrin cavabını Yunq tapmışdır: sıx cisimlərdən əks olunan zaman dalğa düşən dalğaya nəzərən yarımdalğa qədər sürüşür – "qabarıqlıq" "çöküklüklə" və əksinə əvəz olunur.

Müxtəlif səthlərdən əks olunan dalğaları müxtəlif mənbələrdən gələn dalğalar saymaq olar. Bəs nə üçün interferensiya mənzərəsi, məsələn, kağız vərəqi iki müxtəlif lampa ilə işıqlandıranda müşahidə olunmur? Hələ Yunq anlamışdı ki, iki asılı olmayan işıq dəstəsinin interferensiyasını müşahidə etmək olmaz: əgər, xüsusi halda, dalğa uzunluqları (və deməli, həm də onların tezlikləri) bir-birindən heç olmasa bir azca da olsa fərqlənirsə, onda müxtəlif dalğaların "qabarıqları" müşahidə nöqtəsində periodik olaraq gah üst-üstə düşəcək, gah da ayrılacaqdır. Güclənmə zəifləmə ilə və əksinə əvəz olunacaqdır, özü də çox tez-tez (dalğa uzunluqları fərqi cəmisi 1% olduqda maksimumlar və minimumlar saniyədə 10^{13} dəfə bir-birini əvəz edir). Ona görə də nə cihazlar, nə göz, nə də fotolövhə interferensiya mənzərəsini qeyd etmir. Deyirlər ki, baxılan halda dalğa mənbələri *koherent deyildir*. Bax buna görədir ki, bir masaüstü lampa ilə digərini "söndürmək" olmaz.



T.Yunqun təcrübəsi.



T.Yunqun iki yarıqla təcrübəsi. Yarıqlar yaxınlaşanda interferensiya zolaqlarının sayı artır.

Koherent dalğaları müxtəlif üsullarla alırlar. Məsələn, Yunqun təcrübəsində *dalğa cəbhəsinin bölünməsinə* əl atıblar. İnterferensiya edən dalğalar nöqtəvi işıq mənbəyi ilə işıqlandırılan iki yarıqdan əmələ gəlir (işığı üçüncü kiçik yarıqdan keçirirlər). Nyuton halqalarını müşahidə etmək üçün *amplitudun bölünməsindən* istifadə edirlər: qismən qaytaran səthə düşən dalğa iki dalğaya parçalanır.

Ağ işıqla işıqlandırılan zaman halqaların aydınlığı (kontrastlığı) mərkəzdən kənarlara doğru istiqamətdə azalır – "qaçış yollarının" böyük fərqində dalğalar "uzlaşmaya" bilər, onlar yalnız qismən koherent olurlar. Səbəbi sadədir: əgər yollar fərqinin müəyyən bir qiymətində eyni rəngli (eyni dalğa uzunluqlu) dalğanın minimumu müşahidə olunursa, onda başqa rəngli dalğaların həmin nöqtədə maksimumu ola bilər. Ona görə də qaranlıq halqalar yayğınlaşır – əvvəlcə kənarlarından (onlar qırmızı və ya göy rəngə boyanır), sonra isə bütövlükdə yayğınlaşır (mərkəzdən uzaq olan halqalar azkontrastlıdır və tam boyanmışdır).

Şüaların yollar fərqinin bir neçə mikrometri aşdığı yerlərdə göz ümumiyyətlə halqaları fərqləndirə bilmir. Yox, əgər təcrübədə ağ yox, məsələn, qırmızı və ya göy işıqdan istifadə edilərsə, onda görünən halqaların miqdarı artır, çünki müşahidə olunan mən-

İnterferensiya maksimumu şərti:
$\Delta d = m\lambda$, $\Delta\varphi = 2\pi m$.
İnterferensiya minimumu şərti:
$\Delta d = m\lambda + \lambda/2$,
$\Delta\varphi = \pi(2m + 1)$.
Burada Δd – baxılan nöqtədə dalğaların yollar fərqi, m – istənilən tam ədəddir.

Nazik lövhədə interferensiya.



zərənin aydınlığı artır (bu, Nyutona məlum idi). Yeri gəlmişkən, məhz qismən koherentlik səbəbindən lövhənin aşağı səthindən və linzanın yuxarı səthindən qayıdan şüalar interferensiyada iştirak etmir: onların yollar fərqi xeyli böyükdür.

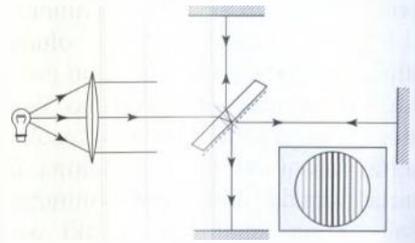
Buna bənzər mənzərəni qalınlığı təxminən 1 mkm olan istənilən nazik təbəqə yaradır: onun iki səthindən qayıdan şüaların interferensiyası yaxşı görünür. İşığın maksimum güclənməsinin (qayıdan dalğaların sıfır fazalar fərqi) müşahidə olunduğu dalğa uzunluğunu asanlıqla hesablamaq olar. Əlvan sabun qabarcıqlarına və ya sudakı benzin ləkələrinə baxdıqda, onların qalınlığındakı mikrometrin yüzdəbir hissələrilə ölçülən qeyri-bircinsliklərini "görmək" olar!

Lazerlərin meydana çıxması ilə eyni bir rəngli şüaların daxil olduğu işıq (ona *monoxromatik işıq* deyilir) almaq çox asan oldu. Bu işıqda yollar fərqi böyük (santimetrlər, hətta metrlər) olan dalğaların interferensiyasını müşahidə etmək olur. Ona görə də hazırda interferensiya hadisəsindən istifadə olunan cihazlar – *interferometrlər* geniş tətbiq olunur. Onların köməyilə, o cümlədən işığın dalğa uzunluğunun hissələrinə qədər, yəni mikrometrin onda bir hissələrinə qədər dəqiqliklə cisimlərin yerdəyişməsini və ya səthin formasını təyin edirlər.

MAYKELSON İNTERFEROMETRİ

Yüksək dəqiqliyə malik olan bu cihazla cisimlərin yerdəyişməsini, lövhələrin qalınlığını, maddənin sındırma əmsalını, işıq dalğalarının uzunluğunu... ölçmək olar. O, Albert Maykelsonun işıq sürətini təyin etdiyi eksperimentin əlavə nəticəsi kimi meydana çıxmışdır ("Optik eksperimentin ustası" əlavə oçerkinə bax).

İnterferometrdə mənbədən gələn işıq bir tərəfində nazik qaytarıcı örtüyü olan şüşə lövhəyə düşür. Örtük düşən işığın hamısını deyil, təxminən yarısını qaytarır; beləliklə, lövhə işıq dəstəsini iki yerə bölür. Dəstələrdən hər biri öz yolu (qolu) ilə gedir, əsil



Maykelson interferometri. Sxem.

güzgüyə düşür, ondan əks olunur və bölücü lövhəyə qayıdır. Lövhə hər şüanı yenidən iki yerə bölür və onların toplanması zamanı yaranan mənzərəni müşahidə etməyə imkan verir.

Əgər güzgülər dəqiq perpendikulyardırsa, mənbədən düşən işıq dəstəsi isə paraleldirsə, onda bütün şüalar bir-birini eyni dərəcədə gücləndirir və ya zəiflədir. Lakin hər hansı güzgünü cüzi əysək, onda onun müxtəlif nöqtələrindən qayıdan şüalar qeyri-bərabər yollar qət edəcək və onların interferensiyası nəticəsində paralel zolaqlar yaranacaqdır.

İşıq dəstəsi boyunca güzgülərdən birinin yerini dəyişdirək. İnterferensiya mənzərəsi dərhal zolaqlara perpendikulyar istiqamətdə yerini dəyiş-

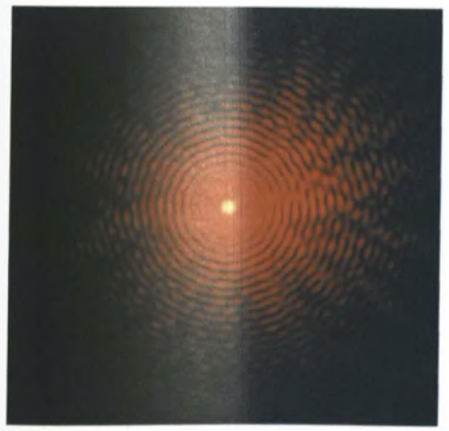
dirəcəkdir. Güzgünü cəmisi dalğa uzunluğunun dörddə biri (≈0,1 mkm) qədər sürüşdürən kimi, işıqlı zolaqlar qaranlıq zolaqların yerini tutur (və əksinə), həmin bu dəqiqliklə təkcə güzgülərin yerdəyişməsini yox, həm də, məsələn, qollardan birində yerləşən şəffaf cismin qalınlığını da ölçmək olar. Zolaqlar bu halda da sürüşəcək, çünki daha sıx maddədə işığın sürəti kiçikdir və gecikmə nəticəsində fazalar fərqi yaranır.

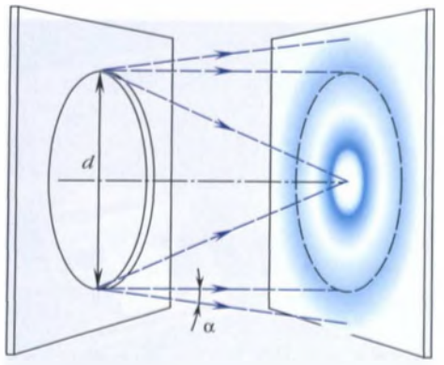
İŞIĞIN DİFRAKSİYASI

Əgər dar deşikdən keçən işığın ləkəsinə diqqətlə baxsaq, görmək olar ki, onun sərhədi növbələşən qaranlıq və işıqlı zolaqcıqlarla əhatə olunmuşdur. Onlar yarığın kənarlarından *difraksiya* nəticəsində yaranır.

İndi d diametrli deşikdən çıxan dairəvi dalğa dəstəsinin kəsiyinə baxaq. Dəstəni çoxlu sayda kiçicik səthciklərə – ikinci mənbələrə bölərək, onlardan istənilən birindən fəzanın müxtəlif nöqtələrinə gələn dalğaların özlərini necə aparacaqlarını izləyək. Əgər müşahidə nöqtəsini dəstənin oxuna yaxın seçsək, onda ikinci dalğalar bu nöqtədə eyni fazada olacaqlar və deməli, toplananda bir-birini gücləndirəcəklər. Oxdan olan məsafə artdıqca ən yaxın və ən uzaq mənbələr arasındakı fazalar fərqi artmağa başlayır və elə bir nöqtə aşkar etmək olar ki, orada dalğalar əks-fazada olur, yəni bir-birini söndürür. Müşahidə nöqtəsi dəstənin oxundan uzaq olduqca, ona bir o qədər çox bu cür uzlaşmamış ikinci dalğalar gəlir və yekun dalğa bir o qədər zəif olur. Dəqiq hesablama göstərir ki, ikinci dalğalar dəstənin oxuna nəzərən $\sin\alpha_0 = 0{,}61\lambda/d$ münasibətindən təyin olunan α bucağı (*difraksiya bucağı*) altında yayılanda bir-birini tam söndürür, burada λ – işıq dalğasının uzunluğudur. Deməli, silindrik dəstə konik dəstəyə çevrilir. Difraksiya özünü belə göstərir. Əgər bucağı böyütməkdə davam etsək, onda interferensiyanın nəticəsi yenidən sıfırdan fərqli olur, lakin işıq enerjisinin çox hissəsi (~90%) məhz α_0 bucağı ilə məhdudlanmış oblastın daxilində toplanmış olur. Diametri 1 mm olan və yaşıl işığı (dalğa uzunluğu 0,55 mkm) buraxan deşik üçün onun qiymətini

Daha sıx mühitdən qayıtma: $\Delta\varphi_{əlavə} = 180°$.
Daha az sıx olan mühitdən qayıtma: $\Delta\varphi_{əlavə} = 0°$.





◄◄ Dairəvi çuxurun kənarlarından difraksiya – Eyri ləkəsi.

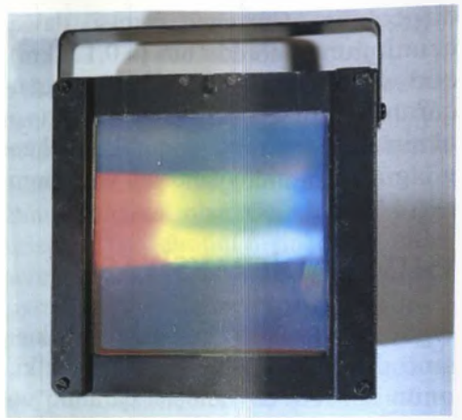
◄ Difraksiya mənzərəsinin əmələ gəlməsi sxemi.

▸
Difraksiya qəfəsində işığın spektrə ayrılması.

hesablasaq, dərəcənin cəmisi 1/52 hissəsini alarıq.

Difraksiya hadisəsinin mahiyyətinin başa düşülməsi optik cihazların hesablanmasının təqribi metodlarını işləyib hazırlamağa, mühüm xüsusi halları ayırmağa imkan verdi. Onlardan biri – maneənin müşahidə nöqtəsinə nəzərən elə yerləşdirilməsidir ki, bu zaman müxtəlif ikinci mənbələrdən gələn dalğalar üçün yollar bir neçə dalğa uzunluğu qədər fərqlənsin. Bu, *Frenel difraksiyası* və ya *yaxın zonada difraksiya* adlanan difraksiyadır ki, bu zaman müşahidə nöqtəsi maneəyə yaxın olur. Böyük uzaqlaşma halı – *Fraunhofer difraksiyası* və ya *uzaq zonada difraksiya* – onunla fərqlənir ki, interferensiya edən şüalar paraleldir.

Fraunhofer difraksiyası üçün mühüm nəticə alınmışdır: difraksiya bucağının sinusu təxminən λ/d-yə bərabər olduqda, difraksiya hadisələri o hallarda əhəmiyyətli rol oynamağa başlayır ki, maneənin və ya deşiyin ölçüləri) bir neçə dalğa uzunluğu təşkil etsin. Deməli, onların ölçüləri böyük olduqda difraksiya nəzərə çarpmır. Bu səbəbdən işığın dalğa xassələri nəzərə alınmır və hesab olunur ki, işıq düz xətt boyunca yayılır və həndəsi optikanın qanunlarından istifadə edilir.



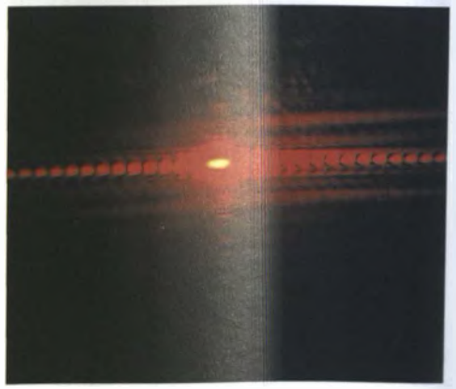
Difraksiya nəzəriyyəsi praktikada geniş tətbiq olunur. Çünki istənilən optik cihazın – mikroskopun, teleskopun, fotokameranın obyektivi var və obyektiv özünün çərçivəsi ilə işıq dəstəsini məhdudlaşdırır.

DİFRAKSİYA QƏFƏSİ

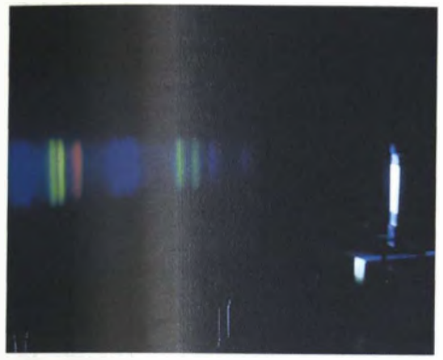
Bu optik cihaz üzərində paralel cizgilər çəkilmiş əksetdirici və ya şəffaf lövhəcikdən ibarətdir. 1786-cı ildə Amerika astronomu Devid Rittenhaus (1732-1796) aşkar etdi ki, belə qəfəsdən ağ işığı buraxdıqda, işığın spektrini almaq olar. Həm də prizmadan fərqli olaraq, qəfəs bir yox, bir neçə spektr verir. Onların əmələ gəlməsini difraksiya nəzəriyyəsi izah etməyə imkan verir.



▸
Əksetdirici difraksiya qəfəsləri.



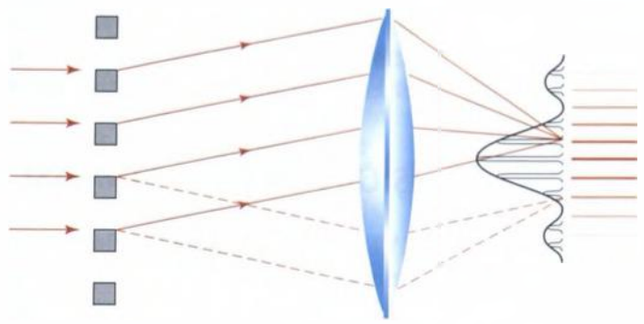
▸▸
Ştangenpərgarın dodaqları arasındakı nazik yarıqdan keçən Lazer şüası difraksiya edir.



İşığın qonşu cizgilər arasındakı yarıqdan necə keçdiyinə baxsaq, asanlıqla görmək olar ki, yarığın böldüyü düzbucaqlı dəstənin kənarları "yayılır" və zolaqlar sistemi əmələ gətirir. Difraksiya bucağı, yəni işığın ilkin istiqamətilə istənilən qaranlıq zolaq arasındakı bucaq, dalğa uzunluğu λ-dan, yarığın a-enindən və zolağın n nömrəsindən asılıdır: $\sin\alpha_n = n\lambda/a$. Əgər lövhəciyin səthinin 1 mm-də 300 xətt yerləşirsə, onda bir yarığın eni təxminən $0{,}5 \cdot 0{,}003$ mm, difraksiya bucağı isə 20°-yə yaxındır. Dairəvi dəstədən fərqli olaraq, düşən şüalanmanın 70%-indən azı bu sərhədlərdə toplanmış olur.

Lakin qəfəsdə yarıqlar çoxdur, ona görə də onlardan çıxan şüalanma toplanır və interferensiya edir. Bəzi istiqamətlərdə yekun dalğa zəifləyir, digər istiqamətlərdə güclənir. Bu cür istiqamətləri hesablamaq olar: məsələn, işığın maksimumları λ-dan, a-dan və qonşu yarıqlar arasındakı b məsafəsindən asılı olan θ_n bucaqları altında müşahidə olunur: $\sin\theta_n = n\lambda/(a+b)$ ($a+b$ cəmi qəfəs addımı adlanır). Yollar fərqi dalğa uzunluğu λ-dan n tam ədədi dəfə böyük olan şüalar məhz bu bucaqlar altında buraxılır.

Şüalanma bucağı dalğa uzunluğundan asılı olduğundan, qəfəs düşən işığı spektrə ayırır. Ona görə bir neçə spektr yaranır ki, düşən işıq müxtəlif n nömrələrinə uyğun olan dəstələrə "parçalanır", həm də şüalanmanın öz ilkin istiqamətindən meyil bucağı böyük olduqca, spektrlər bir o qədər uzun olur.



▲
Difraksiya qəfəsinin işi.

◂◂
Civəli lampanın, difraksiya qəfəsinin köməyilə alınmış xətti spektri.

Difraksiya qəfəsləri artıq XIX əsrin əvvəllərində spektral analiz məqsədləri üçün tətbiq olunmuşdu. Bu məqsəd üçün onlardan ilk dəfə alman optiki Yozef Fraunqofer (1787-1826) istifadə etdi. O, lövhənin 1 mm səthinə 300-ə qədər xətt çəkmişdi. Hazırda isə, ən geniş yayılmış qəfəslər – lazer diskləridir. İnformasiyanın yazıldığı oblastlarda mikroskopik təpəciklər var, yazılış isə konsentrik çevrələr üzrə aparılır. Nəticədə kompakt-diskin səthi böyük bir qəfəs əmələ gətirir.

Müasir difraksiya qəfəslərində 1 mm-də 2400-ə qədər xətt var. Onları mexaniki üsulla hazırlamaq qeyri-



Yozef Fraunhofer.



Kompakt-diskdə difraksiya.

mümkündür, ona görə başqa metoddan istifadə edirlər: müəyyən bucaq altında kəsişən iki işıq dəstəsinin interferensiya mənzərəsinin fotoşəklini çəkirlər. Bu mənzərə aralarındakı məsafə düşən işığın dalğa uzunluğu tərtibində olan paralel zolaqlar şəklində olur.

İŞIĞIN İKİQAT SINMASI VƏ POLYARİZASİYASI



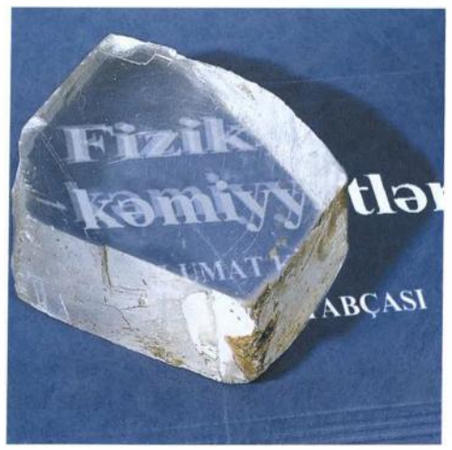
X.Hüygensin "İşıq haqqında traktat" kitabının titul vərəqi.

XVII yüzilliyin ən böyük fiziki kəşflərindən biri... kalsium karbonatla bağlıdır. Baxın, 1670-ci ildə Niderland alimi X.Hüygens nə yazmışdı: "İslandiyadan, Şimal dənizində 66° en dairəsində yerləşən adadan xüsusi növ kristal və ya şəffaf daş gətirirlər; bu daş öz formasına və digər xassələrinə görə, başlıcası isə, özünün işığı qəribə tərzdə sındırması ilə çox əlamətdardır".

1669-cu ildə danimarkalı Erazm Bartolinin "Məşhur İslandiya şpatı kristalları ilə təəccüblü və qəribə sınma aşkar edən təcrübələr" əsəri işıq üzü gördü. Bu, işığın ikiqat şüasınma hadisənin təsviri verilmiş ilk elmi işdir: kristala düşən işıq onun daxilində iki yerə bölünür, haçalanır və əmələ gəlmiş şüalardan hər biri özünəməxsus şəkildə sınır. Bartolin müəyyən etdi ki, kristalda elə bir istiqamət – *optik ox* var ki, həmin istiqamət boyunca şüa iki yerə ayrılmır. O, bu şüalardan biri üçün sındırma əmsalını təyin edə bildi. Digər şüa özünü qeyri-adi aparırdı: müxtəlif düşmə bucaqları üçün müxtəlif sındırma əmsalı alınırdı. İndiyədək birinci şüa *adi şüa*, ikincisi isə *qeyri-adi şüa* adlanır.

İşığın bu qəribə davranışını Hüygens "İşıq haqqında traktat"da (1678-ci ildə yazılıb, 1690-cı ildə çap olunub) izah etməyə çalışmışdır. Onun ifadə etdiyi prinsipə görə, sınan şüanın istiqamətini şəffaf cisimləri dolduran efirdə yaranan ikinci dalğaların qurşayanına çəkilmiş perpendikulyara görə tapmaq olar. Sınan şüalar iki olduğundan, Hüygens fərz etdi ki, dalğaların növü də ikidir. Birinci, adi növ dalğalar "bu daşda müşahidə olunan düzgün sınma ilə xarakterizə olunur, ...adi sferik formaya malikdir və kristalın daxilində, onun xaricindəkinə nisbətən daha yavaş yayılır...". Digər növ dalğalar – sferalar yox, ellipsoidlərdir (Hüygens onları sferoidal dalğalar adlandırmışdı).

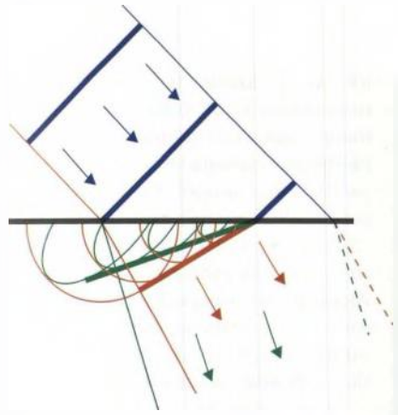
İslandiya şpatı ($CaCO_3$) karbonatlar sinfindən mineraldır və kalsitin şəkildəyişmələrindən biridir.



▸ İslandiya şpatı kristalı.



▸▸ İslandiya şpatı kristalında şüanın ikiləşməsi.



İkiqat şüasınmanın sxemi.
Adi şüada işıq dalğaları sferik formaya, qeyri-adi şüada ellipsoidal formaya malikdir.

Bu növ dalğalar "düzgün olmayan sınma hadisəsini" başa düşməyə kömək edir: alınmış ellipslərin doğuranı çevrələr ailəsinin doğrunanına nisbətən başqa cür yönəlmişdir.

Əgər bu hipotez İslandiya şpatı kristalında nə üçün iki növ dalğa yarandığını izah etsəydi, dalğa nəzəriyyəsinin zəfərinə çevrilə bilərdi. O dövrün optikası mexaniki dalğalarla (məsələn, səs dalğaları ilə) analogiyaya söykənərək, işığı öyrənməyə çalışırdı. Səsdə isə buna bənzər iki yerə bölünmə (haçalanma) müşahidə olunmamışdı...

Hüygensin, işığın dalğa və korpuskulyar nəzəriyyələrinin tərəfdarları arasında mübahisəni "alovlandırmış" başqa bir kəşfi də var idi. O aşkar etmişdi ki, əgər işığı optik oxa müəyyən bucaq altında iki şpat kristalından buraxsaq, onda ikinci kristalı döndərməklə şüanı tam söndürmək olar! Hüygens özünün dalğa nəzəriyyəsində bu hadisənin şərhini verməmişdi. Korpuskulyar nəzəriyyənin müəllifi olan Nyuton da bu hadisəni əsaslandıra bilmədi. O yalnız fərz etdi ki, işıq zərrəciyinin "müxtəlif ilkin xassələri olan dörd müxtəlif tərəfi" var. Dönmə bucağından asılı olaraq kristal üzərinə düşən işıq korpuskulları maddə ilə müxtəlif cür qarşılıqlı təsirdə olur. Nəticədə korpuskulların bir hissəsi üçün adi, qalanları üçün isə qeyri-adi sınma müşahidə olunur.

MÜŞAHİDƏ QABİLİYYƏTİNİN FAYDASI HAQQINDA

1808-ci ildə fransız Etyen Lui Malyus (1775-1812) təsadüfən batmaqda olan Günəşin Lüksemburq sarayının pəncərəsindəki əksinə, həmişə özü ilə gəzdirdiyi İslandiya şpatı lövhəciyindən baxdı. Lövhəciyi döndərəndə işığın parlaqlığı dəyişirdi. O, həmin gecə işığın şüşədəki və suyun səthindəki əkslərilə təcrübələr apararaq əmin oldu ki, qayıdan işıq kristaldan keçərək, doğrudan da, sönür. Malyus fərz etdi ki, işıq korpuskulları, maqnit kimi, qütblərə malikdir, müşahidə olunan hadisəni isə *polyarizasiya olunma* adlandırdı.

Alim həmçinin aşkar etdi ki, İslandiya şpatı kristalından keçən şüalar tam polyarizələnmiş olur və deməli, analizatorun vasitəsilə müşahidənin aparıldığı ikinci İslandiya şpatı lövhəciyinin dönməsi ilə tamamilə sönür. 1810-cu ildə Malyus aşağıdakı qanunu müəyyən etdi: analizatordan keçən şüanın intensivliyi analizatorun işığın maksimal buraxılması vəziyyətinə nəzərən dönmə bucağının kosinusunun kvadratı ilə mütənasibdir (*Malyus qanunu*). Məlum oldu ki, adi şüa qeyri-adi şüaya perpendikulyar polyarizə olunmuşdur.

Bundan başqa, Malyus nümayiş etdirdi ki, şüa cismin səthindən müəyyən bucaq altında qayıdan zaman tam polyarizə olunur və həmin bucağın qiyməti maddənin xassələrindən asılıdır. 1815-ci ildə şotlandiyalı Devid Brüster (1781-1868) müəyyən etdi ki, tam polyarizə olunma bucağının (*Brüster*



Etyen Lui Malyus.

Malyus qanunu:
$I = I_0 \cos^2\alpha$.

Brüster qanunu:
$tg\varphi_{Br} = n$.



Devid Brüster.



Dominik Fransua Araqo.

XRİSTİAN HÜYGENS



Xristian Hüygens Haaqada 1629-cu il aprelin 14-də görkəmli Niderland siyasi xadimi yaxşı təmin olunmuş və öz dövrü üçün gözəl təhsil almış Konstantin Hüygensin ailəsində anadan olmuşdur. Yeddi yaşında ikən oğlan oxumağı, yazmağı bacarırdı, dörd hesab əməlini bilirdi, bir ildən sonra isə latın, fransız dillərini və musiqi savadını öyrəndi. Konstantin oğlunu hüquqşünas görmək istəyirdi və 1638-ci ildə onun üçün ev müəllimi – tələbə Hendrik Brunonu tutdu. Artıq onda məlum oldu ki, balaca Hüygens çox qabiliyyətlidir. Bruno onun atasına yazdığı məktubunda xəbər verir: "Mən etiraf edirəm ki, Hüygensi oğlanlar arasında möcüzə adlandırmaq lazımdır. O, mexanika sahəsində qabiliyyət büruzə verir və qəribə, lakin çətin ki, lazım olan maşınlar düzəldir". Lakin Hüygensin yığdığı mexanizmlər arasında, həqiqi dəzgahdan az fərqlənən, tokar dəzgahı da var idi. On dörd yaşlarında Xristian ingilis, italyan və yunan dillərini öyrəndi, udda və klavesində çalırdı, məntiq, etika və dialektikaya aid kursları dinləmişdi.

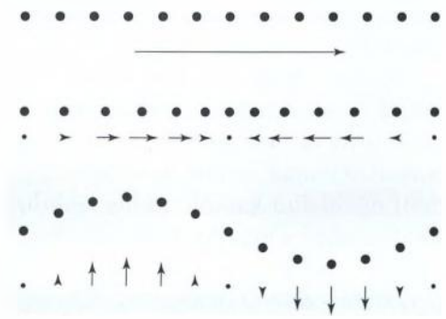
1645-ci ilin yazında Hüygens Leyden universitetinə daxil oldu və burada hüquq elmlərini öyrəndi. Müasirlərinin xatirələrinə görə, o, təvazökar gənc bir oğlan idi: qudurğan tələbələrin içki məclislərində, demək olar ki, iştirak etmirdi, boş vaxtlarını bilyarda və Hollandiyada geniş yayılmış keqlə (ağac çəlikləri şarla vurub yıxma oyunu) həsr edirdi, musiqini çox sevirdi. Xristian tezliklə dərk etdi ki, Dekartın davamçısı olan professor Van Sxoutenin riyaziyyatdan oxuduğu mühazirələr, onu beynəlxalq hüquqdan daha çox maraqlandırır.

Hüygensin atasının dostları arasında görkəmli fransız mütəfəkkiri Rene Dekart və məşhur rahib Maren Mersenn də olmuşdur. Mersenn təbiətşünaslığın qızğın həvəskarı idi və o dövrün bir çox alimlərilə məktublaşırdı. Bir dəfə Konstantin oğlunun cisimlərin düşməsi haqqındakı fikirlərilə maraqlanmış və onu Mersennlə tanış etmişdi. Gəncin iti zəkasına valeh olan rahib Xristiana yazmışdı: "Siz bizim günlərin və ya, daha doğrusu, gələcək əsrin Apolloniyası və ya Arximedi ola bilərdiniz". "Elmlər xadimi Mersennlə" (Xristian onu belə adlandırırdı) yazışması ona Avropa elmindən xəbərdar olmağa imkan verdi.

Baxmayaraq ki, Hüygens 1649-cu ildə Hüygens Niderland vəkillər palatasının üzvü oldu, o qəti qərara gəldi ki, həyatını elmə həsr etsin. Onun ilk əsərləri "Hiperbolanın, ellipsin və dairənin kvadraturası haqqında teorem və onların hissələrinin ağırlıq mərkəzləri" və "Dairənin qiyməti haqqında kəşf" (π ədədinin hesablanmasına dair) traktatları olmuşdur.

Gənc insana Dekartın ideyaları çox güclü təsir etdi. Xristianı şəxsən tanımayan filosofun özü onun riyazi əsərlərindən biri haqqında yazmışdı: "Mən əminəm ki, bu sahədə o, görkəmli alim olacaq". 1650-ci ildə, Dekart vəfat edən vaxt Xristian onun xatirəsinə şeir həsr etdi. Lakin Dekarta olan hörməti fransızın işləyib hazırladığı zərbə nəzəriyyəsinin çatışmazlığını Hüygensin görməsinə və 1653-cü ildə özünün nəzəriyyəsini təklif etməsinə mane olmadı, bu nəzəriyyə doğru çıxdı.

1665-ci ildə özünün düzəltdiyi və o dövrün Avropasında ən yaxşı olan teleskopun köməyilə Xristian Saturnun halqasını və onun peyki olan Titanı kəşf etdi. Bu, Hüygensi beynəlxalq aləmdə məşhurlaşdırdı. (Linzaların və getdikcə daha mükəmməl teleskop modellərinin hazırlanması ilə alim bütün həyatı boyu məşğul olmuşdu.) Həmin vaxtda da o, hələ Qaliley tərəfindən kəşf olunmuş rəqqas rəqslərinin izoxronluğu prinsipini tətbiq edərək,



Əgər dalğada rəqslər, dalğanın yayılma istiqaməti boyunca yönəlmişdirsə, onda dalğa *uzununa dalğa* adlanır; yox, əgər rəqslər dalğanın yayılma istiqamətinə perpendikulyar olan müstəvidə baş verirsə, onda dalğa *eninə dalğa* adlanır.

dəniz xronometri quraşdırmağa cəhd etmişdi. Gəmi yırğalanması şəraitində etibarlı olacaq mexanizmi qurmaq Hüygensə müyəssər olmadı. Lakin iş prosesində o, fiziki rəqqasın qanunlarını müəyyən etdi, onun tapdığı konstruktor həllərinin isə onun ardıcılları istifadə etdilər. 1657-ci ildə Hüygens işə salan mexanizmi olan kəfgirli saatı kəşf etdi.

Səhhətinin zəifliyinə baxmayaraq, Xristian Fransanı, İngiltərəni və Danimarkanı çox gəzmişdir. Atasının əlaqələri və mehriban xarakteri Mersennin ölümündən sonra Fransanın ən görkəmli alimlərilə olan itirdiyi əlaqələri asanlıqla bərpa etməyə imkan verdi. O, Paskalla şəxsən tanış idi və Ferma ilə məktublaşırdı.

1666-cı ildə Hüygens XIV Lüdovikin ən mötəbər, ən nüfuzlu nazirlərindən olan Kolberin Paris Elmlər Akademiyasına üzv olması haqqında ona etdiyi təklifi qəbul etdi. Hüygens burada Saturnu öyrənməkdə davam etdi, məşhur Paris rəsədxanasının layihələşdirilməsinə kömək etdi, Deni Papenlə birlikdə hidravlikə və partlayışın hərəkətetdirici qüvvəsindən istifadəyə dair seriya təcrübələr apardı.

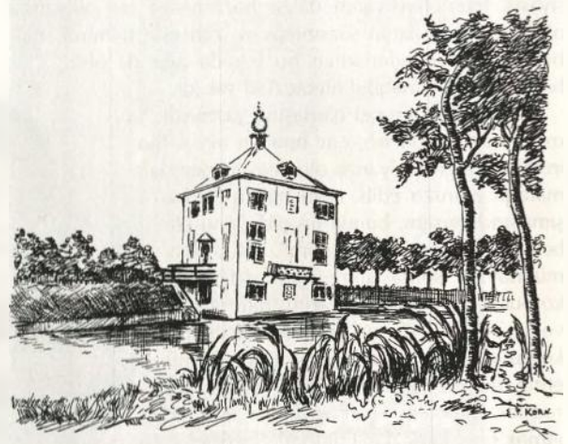
Nyutonun "İşığın və rənglərin yeni nəzəriyyəsi" məqaləsi 1672-ci ilin martında çap olundu, Hüygens isə artıq apreldə öz dostlarından birinə yazmışdı: "Nyutonun nəzəriyyəsi mənə çox fərasətli görünür, amma baxmaq lazımdır, o, bütün təcrübələrlə uzlaşırmı". Nyutonun işinin eksperimental tərəfi alimi çox valeh etdi, lakin, ağ rəngin ayrılışının Nyuton tərəfindən irəli sürülən izahını Hüygens şübhə altına aldı: "...rəngə boyanma hadisəsi ...hər hansı bir fiziki mexanizmin köməyilə rənglərin müxtəlifliyinin izahının çətinliyi ucbatından anlaşılmaz olaraq qalır". Sonrakı altı ili o, işığın təbiətinin öyrənilməsinə və özünün nəzəriyyəsini yaratmağa həsr etdi və 1690-cı ildə "İşıq haqqında traktatı" çap etdirdi. Məhz bu iş Hüygensin fizikaya verdiyi ən mühüm pay hesab olunur, baxmayaraq ki, italiyalı Françesko Qrimaldi və ingilis Robert Huk oxşar hipotezlər təklif etmişlər.

Maraqlıdır ki, Niderland fiziki səhvən hesab edirdi ki, işıq rəqsləri uzununadır, buna baxmayaraq o, işığın qismən qayıtmasını, sınmasını və tam daxili qayıtmasını çox gözəl izah etdi. Bu hadisələri şərh etmək üçün isə Nyuton öz nəzəriyyəsini xeyli mürəkkəbləşdirməli oldu.

Hüygens Kopernikin ideyalarını əyani nümayiş etdirmək üçün Parisdə planetariya üzərində – Günəş sisteminin mexaniki modelinin üzərində işləmişdir. Bu işi Hollandiyada tamamladı: 1681-ci ildə alimin xəstələnməsi onu vətənə dönməyə məcbur etdi. Yenidən Fransaya gəlmək Xristiana qismət olmadı. 1683-cü ildə onun himayədarı Kolber vəfat etdi; Paris Akademiyasının yeni başçısı Niderland aliminə rəğbət bəsləmirdi, ölkədə isə protestantlara qarşı dözümsüzlük artmışdı.

1689-cu ildə Xristian axırıncı dəfə İngiltərəyə baş çəkdi və burada Nyutonla tanış oldu. Hüygens onun çapdan təzəcə çıxmış "Natural fəlsəfənin riyazi əsasları"ndan heyrətə gəldi və dahi ingilis həmkarının Kembricdə Kral kollecinin rəhbəri vəzifəsinə təqdim olunmasına dair xahiş etdi.

Xristian Hüygens 1695-ci il iyulun 8-də vəfat etdi.



Vooburq kəndində X.Hüygens tərəfindən layihələşdirilmiş Hüygenslərin evi.

bucağının) tangensi maddənin sındırma əmsalına bərabərdir (*Brüster qanunu*). İki tərəfdən sıxılmış şüşədə ikiqat şüa sınmasını və iki optik oxlu kristalları da o kəşf etmişdi. 1811-ci ildə fransız Dominik Fransua Araqo maddənin *optik aktivliyini* – kvars kristalının ondan keçən işığın polyarizə olunmasının istiqamətini dəyişdirməsi qabiliyyətini də aşkar etdi.

Yeni hadisələri həm korpuskulyar və həm də dalğa nəzəriyyəsinin çərçivəsində izah etmək getdikcə çətin olurdu. Vəziyyəti 1816-cı ildə Frenelin və Araqonun apardığı eksperimentlər dəyişdirdi. Alimlər əks istiqamətlərdə polyarizə olunmuş iki işıq dəstəsinin interferensiyasını müşahidə etməyə çalışdılar, ancaq faydası olmadı. Lakin işıq dəstələri eyni polyarizasiyaya malik olan kimi dərhal interferensiya mənzərəsi yaranırdı. 1821-ci ildə Frenel qəti nəticəyə gəldi: işıq efirdə yayılan, özü də, səsdən fərqli olaraq, uzununa yox, eninə dalğalardır. Dalğada *uzununa rəqslər* yalnız bir istiqamətdə (irəli-geri), *eninə rəqslər* isə bir-birinə perpendikulyar olan iki istiqamətdə baş verə bilər. Polyarizasiyanın istiqaməti – bu, efir zərrəciklərinin rəqs etdikləri istiqamətdir.

OQYUSTEN JAN FRENEL

Oqyusten Jan Frenel 1788-ci il mayın 10-da Normandiya şəhərciyi Brolidə doğulmuşdur. Oğlan səhhətinin zəifliyilə seçilirdi və səkkiz yaşına qədər oxumağı bacarmamışdır. Buna baxmayaraq, Frenel 16 yaşında dövlət qulluğu üçün mühəndis hazırlayan məşhur Paris Politexnik Məktəbinə daxil oldu, sonra isə təhsilini ixtisaslaşmış körpülər və yollar məktəbində davam etdirmişdir. 1809-cu ildən Frenel Fransanın müxtəlif idarələrində yol işlərinə rəhbərlik etmişdir.

Oqyusten optika ilə 1811-ci ildə maraqlanmağa başladı. Xristian Hüygens tərəfindən hələ 1678-ci ildə təklif olunmuş işığın dalğa nəzəriyyəsi o vaxtlar çətin günlər yaşayırdı. Əksər qocaman alimlər və onların arasında olan Jan Bio, Pyer Laplas, Simeon Puasson – Nyutonun ardınca işığı zərrəciklər və ya korpuskullar seli hesab edirdilər. Korpuskulyar nəzəriyyə çərçivəsində optikada ən mühüm kəşflər edilmişdi (məsələn, işığın qayıtma zamanı Etyen Malyus tərəfindən 1808-ci ildə aşkar olunmuş polyarizasiyası). İnterferensiyanın dalğa nəzəriyyəsi isə polyarizə olunmanın və ikiqat şüasınmasını izah edə bilmirdi, halbuki onun əleyhdarlarının bu barədə ağır da olsa, hər halda, tam məqbul hipotezləri var idi.

1814-cü ildə Frenel qardaşına yazmışdı: "... oxumuşam ki, bir neçə ay bundan əvvəl Bio institutda işığın polyarizə olunması haqqında maraqlı məruzə edib. Mən nahaq öz başımı sındırmışam, bunun nə olduğunu elə beləcə də başa düşmədim". Müəyyən müddətdən sonra alim işığın dalğa və korpuskulyar nəzəriyyələrini tutuşdurdu və işığın düzxətli yayılmasının izahında korpuskulyar nəzəriyyənin üstünlüyünü etiraf edərək qeyd etdi ki, "həmin şeyi rəqslər hipotezi çərçivəsində də əldə etmək olar, əgər daha diqqətlə baxsaq".

1815-ci ilin əvvəlində Frenel monarxistlər ordusuna daxil oldu və Yüz Napoleonlu günlər adlanan dövrdə alim gözdən düşmüşdü. Mühəndis vəzifəsindən azad edilən Oqyusten Matye şəhərinə anasının yanına gəldi. Orada bir neçə ay ərzində öz şəxsi vəsaiti hesabına alınmış ən sadə eksperimental avadanlıqdan istifadə edərək, Frenel özünü optikaya aid ilk təcrübələrini apardı. Nəticədə o, difraksiyaya aid tədqiqatları haqqında iki memuar yazdı və onları 1815-ci il oktyabr 15-də Paris Elmlər Akademiyasına təqdim etdi. Bu memuarlarda alim difraksiyanın bütün hallarını, Nyuton halqasını və digər optik hadisələri izah etdi. Onların işlərinə baxmağı Fransua Araqoya (1786-1853) tapşırdılar. Araqo dərhal gənc tədqiqatçıda qeyri-adi istedad olduğunu hiss etdi və Oqyusteni Parisə dəvət etdi. Sonralar Frenel və Araqo dost oldular.



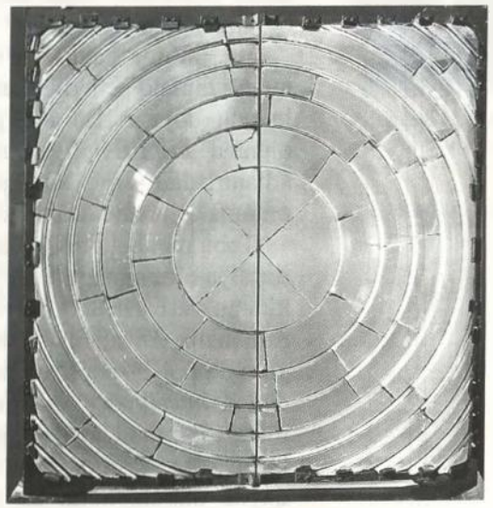
1816-cı ildə Frenel Araqonun qayğısı sayəsində difraksiyaya və interferensiyaya aid təcrübələr aparmaq üçün məzuniyyət aldı; bu təcrübələr dalğa nəzəriyyəsini əsaslandırmaq üçün mühüm əhəmiyyət daşıyırdı. Həmin ildə də Oqyusten optik difraksiya nəzəriyyəsi üzrə ən yaxşı iş üçün akademiyanın rəhbərliyi tərəfindən elan edilmiş müsabiqədə iştirak etdi. Komissiyaya möhkəm əqidəli nyutonçular olan Laplas, Puasson və Bio rəhbərlik edirdilər. Onlar ümid edirdilər ki, müsabiqə işləri işığın korpuskulyar nəzəriyyəsinin doğruluğunun sübutuna xidmət edəcəkdir. Lakin Frenelin memuarı məhz dalğa nəzəriyyəsini tamamilə təsdiq etdi. Bundan başqa, o, Hüygens prinsipini tamamlayaraq, bircins mühitdə işığın düzxətli yayılmasını izah etdi və beləliklə, Nyutonun tərəfdarlarını başlıca dəlildən məhrum etdi. Müəyyən vaxtdan sonra, Araqo ilə birlikdə polyarizasiya hadisəsini tədqiq edən Frenel dərk etdi ki, onları yalnız işıq dalğalarının eninə olması xarakteri ilə izah etmək mümkündür. İdeya lovğayana çox cəsarətli idi və hətta həmişə Oqyusteni müdafiə edən Araqo da onu qəbul etməkdən imtina etdi.

1817-ci ildə Frenel dövlət xidmətini tamamilə buraxdı və elmi fəaliyyətini davam etdirmək üçün Parisə gəldi. Orada o, empirik alınmış Malyus və Brüster qanunlarını nəzəri olaraq əsaslandırdı, müəyyən etdi ki, ikioxlu kristallarda hər iki şüa, deyildiyi kimi, qeyri-adi şüalardır.

XIX əsrin əvvəlində bir neçə Avropa dövlətlərinin hökumətləri mövcud mayak sistemini təkmilləşdirmək qərarına gəldilər. Fransada xüsusi bir komissiya yaradıldı, onun sədrlərindən biri olaraq Araqonu təyin etdilər. Araqo bu işlərə Freneli cəlb etdi. Təəssüf ki, bu işlər tədqiqatçıdan çox güc tələb edirdi və çox vaxtını alırdı, elmlə məşğul olmağa mane olurdu. Dostlarına yazdığı məktubda Frenel danışırdı: "Demək olar ki, bütün iyulu mən Jirondanın mənsəbində Korduan qalasında keçirdim; orada fırlanan işıqları olan linzalı və dioptrik aparat quraşdırdım. Mənim yanımda yalnız təcrübəsiz fəhlələr olduğundan, mən bu qurğunun ən kiçik detallarına müraciət etməyə məcbur olurdum və çox vaxt fəhlənin işini özüm görürdüm. Yeni cihazın verdiyi işığın parlaqlığı dənizçiləri heyrətə salmışdı..." Halqavari prizmalar şəklində mürəkkəb optik sistemlər, deyildiyi kimi, Frenel linzaları (bunlar XX əsrin sonlarında da mayaklarda tətbiq olunur) almaq üçün o nəinki yalnız lazımi hesablamaları aparmalı olurdu, həm də onların yaradılmasının bütün texnoloji zəncirini ölçüb-biçməli və sonra da ona nəzarət etməli olurdu. Lakin səylər hədərə getmədi, görülən işlər gözəl texniki nəticələr verdi: hətta ingilislər etiraf etdilər ki, "Fransa mayakların konstruksiyasında və idarə olunmasında bütün millətləri ötüb keçdi".

Frenelin xidmətləri hələ alimin sağlığında qiymətləndirilmişdi: 1823-cü ildə onu yekdilliklə Paris Elmlər Akademiyasına qəbul etdilər, 1825-ci ildə isə o, London Kral Cəmiyyətinin üzvü oldu. Bununla belə, tədqiqatlar aparmaq üçün daim vəsait çatışmırdı. Vəsait axtarıb tapmaq üçün Frenel Politexnik Məktəbində ştatdankənar imtahançı (imtahan götürən) vəzifəsinə işə düzəldi. 1824-cü ilin payız sessiyası onun üçün faciəli oldu: izafi yorğunluqdan vərəmi kəskinləşdi və alimə ondan sağalmaq qismət olmadı. Görkəmli elmi xidmətlərinə görə Rumford medalı ilə mükafatlandırılması xəbərini Frenel artıq ölüm yatağında aldı, 1827-ci il iyulun 14-də isə o vəfat etdi.

Nisbətən kiçik müddət ərzində (1815-ci ildən 1827-ci ilə qədər) Oqyusten Frenel əslində fizikanın yeni sahəsini – dalğa optikasını yaratdı. Elastiki efir nəzəriyyəsindən onun çıxardığı teoremlər, sonralar Oqyusten Lui Koşi (1789-1841), Corc Qrin (1793-1857), və Simeon Deni Puasson tərəfindən işlənib hazırlanmış ümumi elastiklik nəzəriyyəsinin əsasında durdu. Frenelin adını daşıyan düsturlar – Frenel düsturları bizim günlərə qədər dəyişməz qalmışdır.

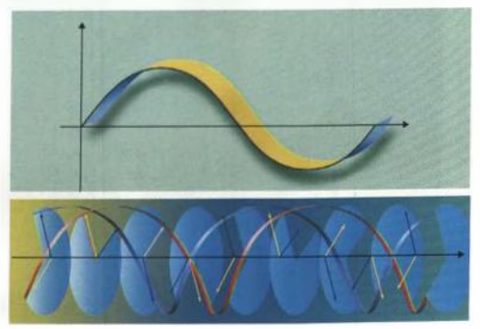


Frenelin mürəkkəb (qurma) linzası.



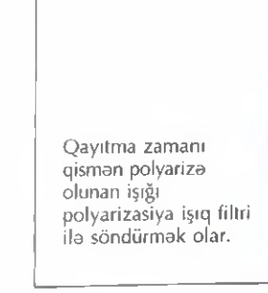
AĞLASIĞMAYAN AŞKAR OLUR

XIX yüzillikdə işıq dalğalarının eninə olması fikri tamamilə mənasız görünürdü ("Dalğa optikası" məqaləsinə bax). Hazırda isə işığa efirin elastiki həyəcanlanması kimi yox, elektromaqnit dalğası kimi, yəni elektrik və maqnit sahələrinin yayılan rəqsləri kimi baxılır. Elektrik sahəsinin rəqsləri o deməkdir ki, elektrik intensivliyi vektoru $\vec{E}$ öz qiymətini və ya istiqamətini (ya da eyni zamanda həm bunu, həm də onu) dəyişir. Dalğa eninə olduğundan bu vektor həmişə dalğanın sürət vektoruna perpendikulyardır. Əgər $\vec{E}$ vektorunun istiqaməti dəyişməzdirsə, onda dalğa *xətti polyarizə olunmuş dalğa* adlanır; $\vec{E}$ vektoru hansı istiqamət üzrə rəqs edirsə, həmin istiqamət *polyarizasiya istiqa-*



İşığın xətti və dairəvi polyarizələnməsi.

▸ Nikol prizması.

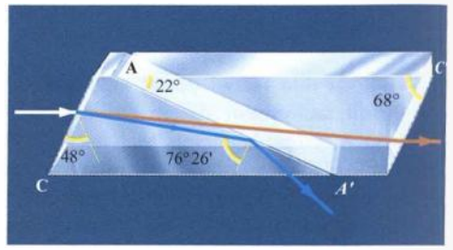


Jan Batist Bio.

məti, $\vec{E}$ vektoru ilə birlikdə dalğanın sürət vektorunun yerləşdiyi müstəvi *polyarizasiya müstəvisi* adlanır. Yox, əgər $\vec{E}$ vektorunun istiqaməti dəyişirsə (o, sürət vektoru ətrafında fırlanırsa), onda polyarizasiya *dairəvidir*. Baxılan halda $\vec{E}$ vektorunun iki qarşılıqlı perpendikulyar oxlar üzrə proyeksiyaları müstəqil harmonik dalğalardır: onlardan biri digərindən 1/4 dalğa uzunluğu qədər geri qalır. Deyə biləriк ki, dairəvi polyarizasiya iki xətti polyarizə olunmuş dalğanın toplanması nəticəsidir. Yox, əgər dairəvi polyarizə olunmuş iki dalğa toplanırsa və onların $\vec{E}$ vektorları əks istiqamətlərdə fırlanırsa, onda xətti polyarizə olunmuş dalğa alınır.

Ən ümimi halda $\vec{E}$ vektoru fırlanma zamanı periodik olaraq öz uzunluğunu dəyişir. Bu cür polyarizasiya olunma *elliptik polyarizasiya olunma* adlanır; dairəvi və xətti polyarizasiya olunmalar onun xüsusi hallarıdır.

Təbii mənbələrin işığı adətən polyarizasiya olunmamışdır: o, bütün mümkün polyarizasiyaolunma istiqamətlərinə malik dalğalardan ibarətdir və ona görə də polyarizatordan, polyarizatorun dönmə bucağından asılı olmayaraq, həmişə təxminən eyni miqdarda şüalar keçir. Bax, lazerin şüalanması isə, bir qayda olaraq, hətta bu kiçicik lazer



göstəricisi olsa belə, xətti polyarizasiya olunmuşdur.

ELM VƏ HƏYAT

İlk vaxtlar polyarizasiyanın öyrənilməsi üzrə eksperimentlərin aparılması böyük çətinliklərlə bağlı idi. Bu növ tədqiqatlar üçün hər şeydən əvvəl analizator, yəni müəyyən polyarizasiyalı işığı seçən qurğu lazım idi. Əvvəllər analizator İslandiya şpatı kristalı idi, lakin o, eyni zamanda iki şüa verirdi. Ona görə də ya nazik dəstələri (müxtəlif cür polyarizə olunmuş şüalar üst-üstə yığılmasın, qalanmasın deyə) öyrənməklə kifayətlənmək, ya da böyük ölçülü, defektlərsiz, əla kristallar axtarmaq lazım gəlirdi.

Sonralar məlum oldu ki, bir istiqamətdə polyarizə olunmuş işığı Brüster bucağı altında qayıtma zamanı almaq olar. Bu enli işıq dəstələrilə işləməyə imkan verdi, lakin onların polyarizasiyasını analizatoru döndərmək yolu ilə tədqiq edərkən, qayıdan şüa yerini dəyişirdi.



Qayıtma zamanı qismən polyarizə olunan işığı polyarizasiya işıq filtri ilə söndürmək olar.

1816-cı ildə fransız fiziki Jan Batist Bio (1774-1862) aşkar etdi ki, turmalin kristalı ikiqat şüasındırma xassəsinə malikdir, lakin kristaldakı adi şüa qeyri-adi şüaya nisbətən daha güclü udulur. Müəyyən polyarizasiyaya malik şüanı seçmək üçün bu gün polyaroidlər – analoji xassələrə malik olan şəffaf nazik lövhələr geniş tətbiq olunur.

Ən məşhur analizatoru 1828-ci ildə şotlandiyalı Uilyam Nikol (təxminən 1768-1851) ixtira etmişdir. Nikol prizması diaqonalları üzrə kəsilib, yenidən yapışdırılan İslandiya şpatı təbii kristalından hazırlanır. O yalnız qeyri-adi şüanı buraxır, adi şüa isə onun daxilindəki kəsik (mişarlanmış) yerdən qayıdır və kənara çıxarılır.

Həndəsi optika işıq şüaları haqqındakı təsəvvürlər əsasında işığın yayılma qanunlarını öyrənir. İşığın qayıtmasını və sınmasını iki müxtəlif elm – katoptrika (*yun.* "katoptrikos" – "güzgülü") və dioptrika (*yun.* "dia" – "içindən" və "opteo" – "görürəm") öyrənirdi.

Əgər işıq dalğasının uzunluğunu sonsuz kiçik hesab etsək, işığın dalğa xassələri nəzərəçarpmaz olur.

HƏNDƏSİ OPTİKA

XIX əsrə qədər işığın təbiətinə dair heç nə məlum olmasa da, bununla belə, artıq XVII yüzilliyə yaxın işıq şüalarının tabe olduğu mühüm qanunlar müəyyən olunmuşdu. Sonralar bu qanunlar dalğa optikası çərçivəsində nəzəri əsaslandırılmışdı.

Həndəsi optikada işığa dalğa kimi yox, şüalar dəstəsi kimi baxılır. Şüa – işıq enerjisinin yayıldığı istiqamətdir. Dalğa optikası baxımından isə şüa – dalğanın işıq yayılan zaman eni dəyişməz qalan dar hissəsidir, yəni difraksiya hadisəsini nəzərə almamaq olar ("İşığın difraksiyası" məqaləsinə bax).

Həndəsi optikanın cəmi dörd əsas qanunu var:

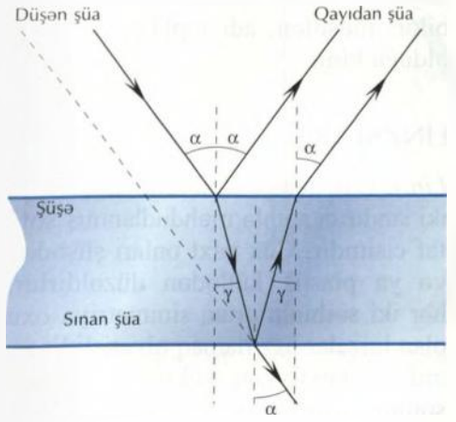
1) *İşıq şüalarının asılı olmaması qanunu* (onlar, hətta kəsişdikdə belə, bir-birinin istiqamətinə və parlaqlığına təsir etmir);

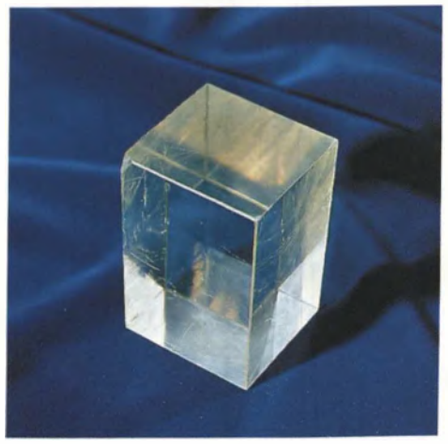
2) Bircins mühitdə *işığın düzxətli yayılması qanunu*;

3) Güzgü səthindən *işığın qayıtması qanunu*;

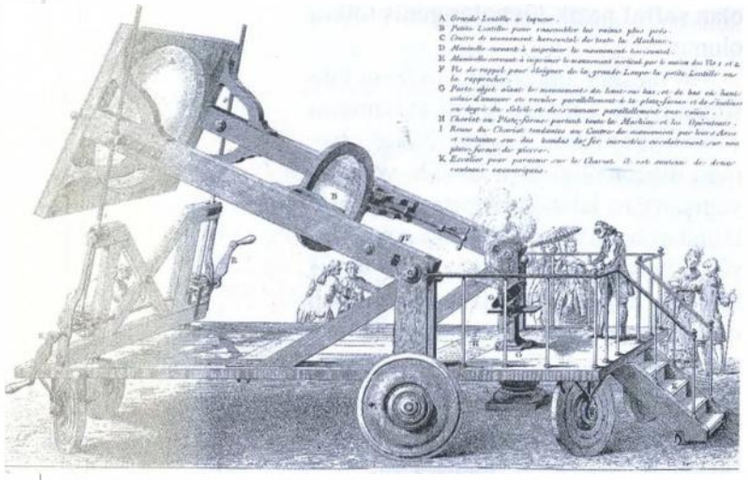
4) İki şəffaf mühitin sərhədində *işığın sınması qanunu*.

Axırıncı üç qanunu ("İşığın yayılması" məqaləsinə bax) Ferma prinsipindən almaq olar; bu prinsipdə deyilir: işıq iki nöqtə arasında optik uzunluğu ən kiçik olan yolla yayılır. *Yolun optik uzunluğu* – bu yolun uzunluğunun mühitin sındırma əmsalına



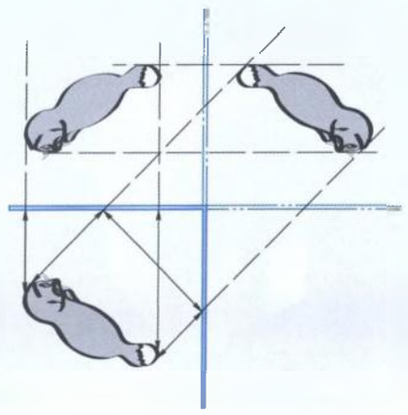


◂◂ İşığın qayıtması və sınması.
◂ Şüşə kubikdə sınma.



Optik qurğular müxtəlif növ xəyallar almağa imkan verir. Məsələn, bəzi linzalardan istifadə edərək, Günəş şüalarını kiçik bir dairəciyə yığmaq olar – elə qızğın dairəciyə ki, aydın gündə kağızı yandırmağa qadirdir. Bax, adi güzgü isə Günəş enerjisini bir yerə toplamaq gücündə deyil. O, yalnız forması güzgünün formasına bənzəyən, lakin mənbəyin forması ilə isə heç bir ümumi cəhəti olmayan (doğrudur, güzgüyə baxsaq, hər halda, Günəşin diski görünəcəkdir) böyük işıqlı ləkə verəcəkdir.

hasilidir. O, işığın seçilmiş yol üzrə yayılma müddəti ilə mütənasibdir və yalnız vakuumda (sındırma əmsalı birə bərabərdir) adi uzunluğa bərabərdir və havada onunla, demək olar ki, üst-üstə düşür. Bu prinsipdən çıxır ki, optik cihazdan çıxan şüanın yolu üzrə ona qarşı gələn şüa buraxsaq, onda bu şüa əks istiqamətdə dəqiq olaraq birinci şüanı təkrar edəcəkdir (*işıq şüalarının dönərliyi*).



Bir-birinə nəzərən 90° bucaq altında qoyulmuş iki güzgü düzünə xəyal verir. Eynilə birləşdirilmiş üç güzgü isə guşəli əksetdirici – üzərinə düşən istənilən şüanı əksinə, mənbəyə qaytaran qurğu əmələ gətirir.

Cisimlərin optik sistemlərdə: linzalarda, prizmalarda, güzgülərdə alınan *xəyallarını* qurmaq üçün şüaların "davranma qanunlarını" bilmək lazımdır.

Xəyallar həmişə şüaların kəsişməsində yerləşir. Toplayıcı linzadan keçən şüalar həqiqətdə kəsişirlər: onların kəsişdiyi yerdə ekran və ya fotolövhə yerləşdirmək və mənbəyin "dublikatını", onun *həqiqi xəyalını* almaq olar. Müstəvi güzgü halında yalnız şüaların uzantıları kəsişir, özü də yalnız güzgü arxasında. İnsan gözü üçün bu kifayətdir ki, güzgüdə cismin surətini görsün. Belə xəyal *mövhumi xəyal* adlanır, çünki bu xəyalda işıq şüaları kəsişmir və fotolövhə orada heç nə qeyd etmir. Onun fotoşəklini çəkmək üçün mövhumi xəyali şüaların həqiqi kəsişməsini verən başqa bir optik sistem – şüaların həqiqi kəsişməsini verən obyektivdən istifadə etmək lazımdır. Verilmiş optik sistemin köməyilə almaq mümkün olan bütün nöqtəvi xəyalların *məcmuu xəyallar fəzası*, xəyallarını almaq mümkün olan bütün nöqtələr çoxluğu isə *cisimlər fəzası* adlanır.

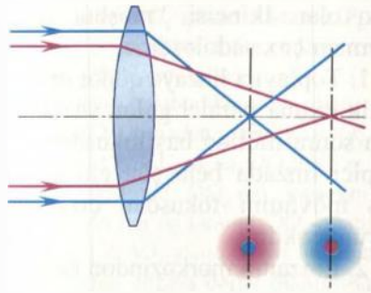
Müstəvi güzgünün cisimlər fəzası şüşənin müşahidəçi yerləşən tərəfində yerləşir, xəyallar fəzası isə şüşənin arxa tərəfində yerləşir və bütün xəyallar mövhumi olur. Lakin xəyallar fəzası cisimlər fəzasını tuta bilər, məsələn, adi toplayıcı linzada olduğu kimi.

LİNZALAR

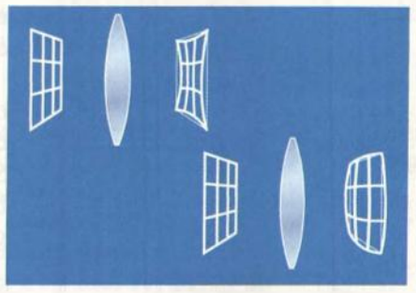
Linza (*lat.* lens – "mərcimək") – bu, iki sındırıcı səthlə məhdudlanmış şəffaf cisimdir. Çox vaxt onları şüşədən və ya plastik kütlədən düzəldirlər; hər iki səthinin ortaq simmetriya oxu olan linzalar hazırlamaq əlverişlidir və onların keyfiyyəti yüksəkdir. Sferik səthləri olan linzaların hazırlanması

LİNZALAR VƏ GÜZGÜLƏR

Real linza aberrasiyalara – xəyalı təhrif edən defektlərə malikdir. Aberrasiyalar ən çox meyilli dəstələrdə meydana çıxır.



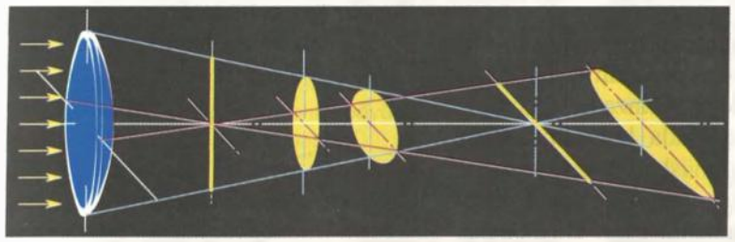
Xromatik aberrasiya. Dispersiya nəticəsində linza müxtəlif rəngli şüaları müxtəlif nöqtələrə toplayır. Xəyalın kənarlarında əlvan haşiyə yaranır.



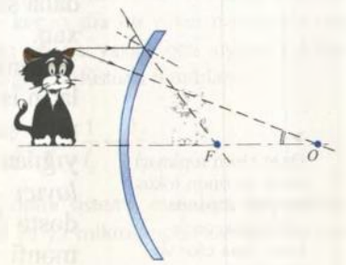
Distorsiya. Düz xətlərin linzada xəyalları ya qabarıq, ya da çökük xətlər olur; kvadrat ya yastığa, ya da çəlləyə bənzəyir.



Koma. Parlaq mənbədən gələn və linzanın kənarına düşən şüalar ləkənin xəyalına mürəkkəb forma – koma (*yun.* "kome" – "saçlar") verir.

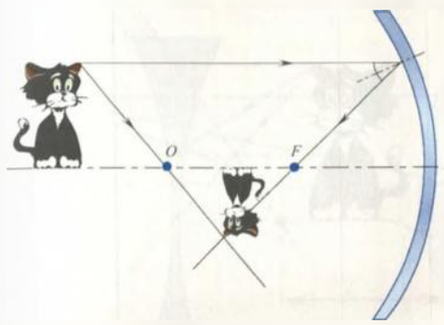


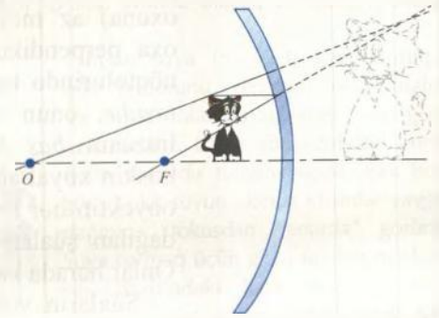
Astiqmatizm. Linza müxtəlif səth əyriliyinə malikdir və ona görə də qarşılıqlı perpendikulyar müstəvilərdən olan şüaları müxtəlif nöqtələrə fokuslayır.



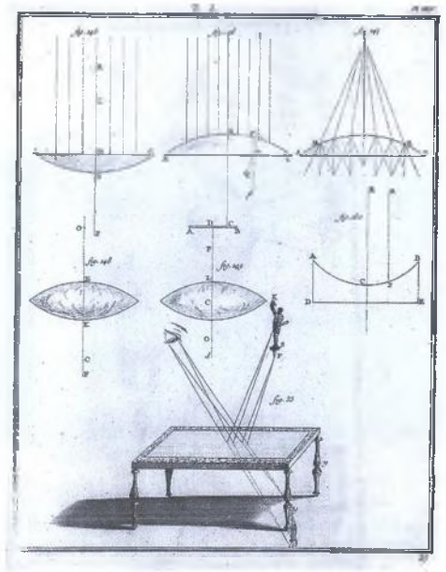
Qabarıq güzgülər. Bu güzgülər həmişə mövhumi kiçildilmiş xəyallar verir.

Sferik güzgü linza kimi şüaların yolunu dəyişir.
Onun fokus məsafəsi əyrilik radiusunun yarısına bərabərdir və baş optik ox üzərində yerləşir.





Çökük güzgülər. Onlar paralel şüaları fokal müstəvidə bir nöqtəyə toplayır; cisim fokus məsafəsindən uzaqda yerləşdikdə, çevrilmiş həqiqi xəyal, yaxın olduqda isə düzünə mövhumi xəyal verir.



Linzalar və müstəvi güzgü. Optikaya aid kitabdan qravüra. Paris. 1753-cü il.

daha sadədir. Onların xassələrinə baxaq.

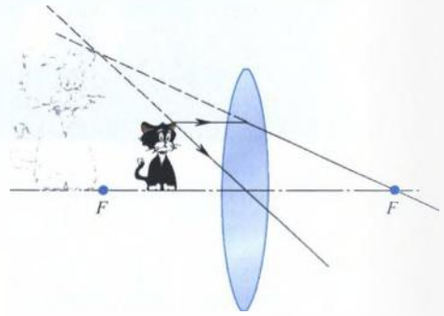
Linzalar onların üzərinə düşən şüaların istiqamətini dəyişdirir. Əgər paralel şüalar dəstəsi linzadan keçərək, yığılan olursa, onda belə linza *toplayıcı* və ya müsbət linzadır; əgər dəstə dağılırsa, onda onu *səpici* və ya mənfi linza adlandırırlar. Birinci növ linza əvvəlcədən paralel olan şüaları bir nöqtədə – *fokusda* (*lat.* focus – "ocaq", "od") toplayır; ikinci növ linzadan keçən bütün şüalar mövhumi fokusdan çıxan kimi görünürlər. Linzanın simmetriya oxuna (baş optik oxuna) az meyilli olan şüalar optik oxa perpendikulyar olan müstəvinin nöqtələrində toplanır. Bu *fokal müstəvidir*, onun oxla kəsişmə nöqtəsi linzanın *baş fokusu* adlanır. Lakin kəskin xəyal almaq üçün paralel yox, obyektin hər bir nöqtəsinin buraxdığı dağılan şüaları fokuslamaq lazımdır. Onlar harada kəsişirlər?

Şüaların yolunu qalınlığı linzanın səthlərinin əyrilik radiuslarından xeyli kiçik olan nazik linzada hesablayaq. Belə linzanın hesablamaları çox sadələşdirən bir neçə xassəsi var. Birincisi, sferik səthləri linzanın mərkəzində onun baş optik oxuna perpendikulyar olan müstəvilə əvəz etmək və sınmaya yalnız həmin müstəvidə baxmaq olar. İkincisi, "məşhur şüalar" qurmanı çox sadələşdirir.

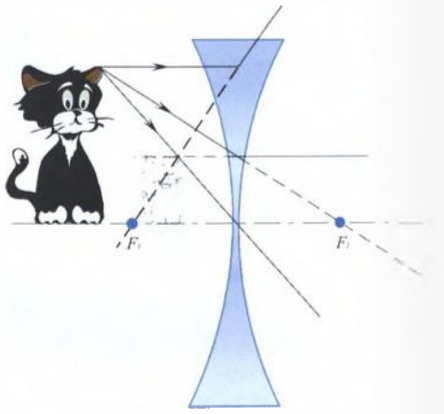
1. Toplayıcı linzaya qədər onun baş optik oxuna paralel gələn şüa sındıqdan sonra mütləq baş fokusdan keçir. Səpici linzada belə şüa elə sınır ki, baş mövhumi fokusdan çıxan kimi görünəcəkdir.

2. Linzanın mərkəzindən keçən şüa (*köməkçi optik ox* boyunca) istiqamətini dəyişmir, çünki mərkəzin özündə linzanın hər iki səthi baş oxa perpendikulyardır və bir-birinə paraleldir.

3. Fokusdan keçərək, toplayıcı linza tərəfə gedən şüa linza müstəvisində sındıqdan sonra baş optik oxa paralel



▸ Əgər cisim toplayıcı linza ilə onun fokus nöqtəsi arasında yerləşirsə, onda linza lupa olur və mövhumi böyüdülmüş xəyal verir.



▸ Səpici linza həmişə mövhumi kiçildilmiş xəyal verir.

NAZİK LİNZALARIN HESABLANMASI

Obyektin ixtiyari A nöqtəsindən üç şüa çəkək: linzanın mərkəzindən keçən AO şüası; linzanın optik oxuna paralel olan AO_1 şüası; linzanın F_1 fokusundan keçən AO_2 şüası; sındıqdan sonra onların xəyalın B nöqtəsində kəsişən uzantılarını quraq.

Aşağıdakı bərabərlikləri yazmaq olar: $OO_1/AO_1 = OO_2/BO_2$ (buradan $OO_2 = (OO_1 \cdot BO_2)/AO_1$), $OO_1/OF_2 = O_1O_2/BO_2$ və ya $OO_1/OF_2 = (OO_1 + OO_2)/BO_2$. Axırıncı düsturda OO_2-nin ifadəsini yerinə yazaq və bərabərliyin hər iki tərəfini OO_1-ə ixtisar edərək, $1/OF_2 = 1/BO_2 + 1/AO_1$ alarıq. Əgər linzanın fokus məsafəsini f ilə, cisimdən linzaya qədər olan məsafəni g ilə, linzadan xəyala qədər olan məsafəni isə h ilə işarə etsək, düstur hamı tərəfindən qəbul edilmiş şəkil alır:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{h}.$$

Mövhumi xəyallar linzadan mənfi məsafədə cisimlər fəzasında yerləşmişdir; səpici linzanın fokus məsafəsi də mənfi qəbul edilir.

Linza düsturunun köməyilə fokuslaşdırılmış xəyalın harada yerləşəcəyini və onun ölçüsünü hesablamaq olar. Linzanın verdiyi həqiqi xəyalın böyüməsi – linzanın *böyütməsi* Γ aşağıdakına bərabərdir.

$$\Gamma = BB_1/AA_1 = OO_2/OO_1 = h/g.$$

Obyektivlərin həmişə f fokus məsafəsini göstərirlər. Eynək linzalarının isə, bir qayda olaraq, Φ optik qüvvəsini – f-in tərsinə bərabər olan bu kəmiyyəti verirlər. Optik qüvvə dioptriyalarla ölçülür: 1 dptr = 1 m^{-1}. Deməli, əgər $\Phi = +2$ isə, onda linza, fokus məsafəsi $f = 50$ sm olan toplayıcı linzadır.

Linza materialının n sındırma əmsalını və linza səthlərinin r_1 və r_2 əyrilik radiuslarını bilərək optik qüvvəni hesablamaq olar:

$$\Phi = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Qabarıq linzanın radiusu müsbət, çökük linzanınkı isə mənfi hesab olunur.

Əgər bir neçə linzanı bir düz xətt üzərində yerləşdirsək, onda onlardan birincisinin verdiyi xəyal sonrakı üçün cisim olur. İki nazik linza birləşdiriləndə sınma onlar arasındakı müstəvidə baş verir, sistemin optik qüvvəsi isə

$$\Phi = \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \Phi_1 + \Phi_2.$$

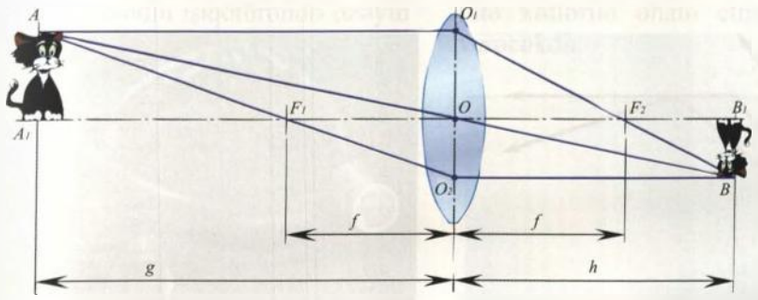
Bir-birindən l məsafədə yerləşdirilmiş linzaları iki sındırıcı səthlə (baş müstəvilərlə) əvəz etmək olar. Xəyal qurmaq üçün iki şüadan istifadə olunanda (biri linzaya qədər baş optik oxa paraleldir, ikincisi linzadan sonra paraleldir), birinci şüa uzaq baş müstəvidə sınır və uzaq fokusdan keçir, yaxın fokusdan keçən şüa isə yaxın müstəvidə sınır. Baş müstəvidən (uzaq və ya yaxın) ona uyğun f fokusa qədər olan məsafə aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l}{f_1 f_2}.$$

Beləliklə, istənilən optik sistemi, məsələn, fotoaparatın mürəkkəb obyektivini və ya mikroskopun okulyarını, sadə şəklə gətirirlər.

İnsan gözü də optik sistemdir: obyektiv rolunu buynuz təbəqəsi və göz bülluru oynayır; büllurun formasını və deməli, onun fokus məsafəsini xüsusi əzələlər dəyişdirir.

Əgər linzanı havadan sındırma əmsalı başqa olan mühitə gətirsək, onun fokus məsafəsi artar (mühitin və linza maddəsinin sındırma əmsalları bərabər olduqda fokus nöqtəsi sonsuz uzaqda olacaq və linza işləməyəcəkdir).



İnsan suya ($n = 1{,}33$) baş vurduqda, göz büllurunu yenidən fokuslamalıdır və onun fokus məsafəsini çox güclü azaltmalıdır. Lakin göz əzələləri bunun üçün nəzərdə tutulmamışdır. Bax buna görədir ki, suyun altında cisimlər yayğın, dağınıq, "fokusdan kənarda" görünür. Suya batmaq üçün gözə taxılan maskalar isə, daxilindəki hava qatı sayəsində, gözün normal görmə qabiliyyətini qaytarır.

şüaya çevrilir. Səpici linza içindən keçməklə onun mövhumi fokusuna doğru uzadılmış şüa, linzadan sonra baş optik oxa paralel olur.

Bu qaydalardan istifadə edərək, hər bir nöqtənin xəyalını qurmaq olar, çünki linza arxasında heç olmazsa iki şüanın (və ya onların uzantılarının) kəsişməsini tapmaq kifayətdir. Əgər nazik linzanın cisimdən və xəyaldan bu linzaya qədər olan məsafələri linzanın fokus məsafəsilə əlaqələndirən düsturu bilsək, şüaların kəsişmə yerini hesablamaq da olar.

MADDƏ TƏRƏFİNDƏN TUTULMUŞ İŞIQ

Nə üçün akvariumdakı suya yuxarıdan baxanda suyun səthi şəffafdır, aşağıdan baxanda isə güzgü kimi parıldayır? Bu sadə sualın cavabı arxasında nə az, nə çox – rabitə vasitələrində həqiqi inqilab gizlənir.

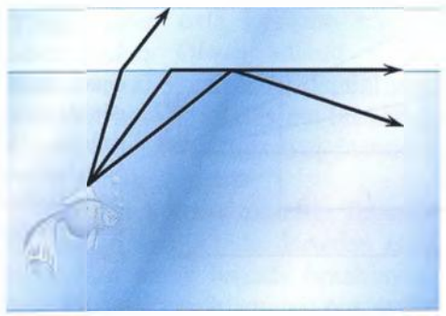
"Hava-su" sərhədindən yuxarıdan aşağıya doğru keçən istənilən işıq şüası qismən bu səthdən qayıdır, qismən isə suda sınır. Aşağıdan yuxarıya doğru keçən şüa isə özünü başqa cür də apara bilər. İşıq dalğasının suda sürəti havadakı sürətinin 3/4-nü təşkil edir. Sınma qanunundan çıxır ki, sınma bucağının (havada) sinusu düşmə bucağının (suda) sinusundan 4/3 dəfə böyükdür. Ona görə də düşmə bucağı 48,5°-yə bərabər olan ($\sin 48{,}5° = 3/4$) şüa 90° bucaq altında sınır ($\sin 90° = 1$) və suyun səthinə paralel gedir (belə şüa sürüşən şüa adlanır). Yox, əgər şüa böyük bucaq altında düşürsə, onda sınma müşahidə olunmur, çünki bucağın sinusu vahiddən böyük ola bilməz. Belə olan halda işıq suyun səthindən, güzgüdən qayıdan kimi tam qayıdır, yəni *tam daxili qayıtma* baş verir.

Baxılan hadisənin bir maraqlı tətbiqi tapıldı. Əgər işığı su ilə doldurulmuş uzun şəffaf boruya (və ya sadəcə, su şırnağının daxilinə), ya da şüşə ipin daxilinə yönəltsək, onda şüaların bir hissəsi divarlardan əks olunaraq, daxildə hərəkət edəcəkdir. Bu zaman işıq, sanki, əyri boru və ya ip tərəfindən "tutulmuş" olacaqdır, belə ki, onu itkisiz ötürmək olar. Bu cür qurğular *işıqötürənlər* adlanır.

Müasir işıqötürənlərdə qoruyucu qatın altında şüşə ip – yüksək sındırma əmsallı (məsələn, $n_0 = 1{,}465$) kvars özək yerləşir; bu özək daha kiçik sındırma əmsalı ($n_1 = 1{,}460$) olan kvars örtüklə əhatə olunur. Bu fərq kifayətdir ki, işıqötürənin daxilində yayılan şüa özəyin divarlarından dəfələrlə tam qayıtmaya məruz qalsın və lif boyunca bir çox kilometr qət etsin. Hətta əgər işıqötürəni əysək, düyünləsək və ya ...udsaq, yenə də işıq kecəkdir. Lampadan və işıqötürəndən ibarət olan tibb endoskopu daxili üzvlərin xəyallarını məhz bu cür ötürməyə qadirdir.



Şüşə işıqötürən.



▶
Tam daxili qayıtma.



▶▶
Düyün şəklində bağlanmış işıqötürəndə informasiya təhrif olunmadan keçir.

1970-ci illərin ortalarında, kompakt yarımkeçirici lazerlərin işlənib hazırlanmasından sonra, işıqötürənlərdən rabitə üçün xüsusilə geniş istifadə edilməyə başlandı. Kvarsdan dartıb uzatmaqla liflər alırlar; kvars lazerlərin şüalandırdığı tezliklərdə işığı zəif udur.

Lakin optik rabitə xətlərinin başlıca üstünlüyü başqa şeydir: optik xətlər üzrə informasiyanı nəhəng sürətlə – 10^{12} bit/san-yə yaxın sürətlə ötürmək mümkündür. İşıqötürən eyni zamanda milyon teleqramı, ya 10 mln telefon danışığını, ya da 1 san ərzində min kompakt-diskin içindəkini ötürməyə imkan verir! Müasir texnika hələlik optiklifli rabitənin imkanlarının yüzdəbir hissəsindən belə istifadə etmir.

Bundan başqa, işıqötürən üçün metal tələb olunmur, o, nazik və yüngüldür. Qoruyucu örtüksüz bir lifin diametri 125 mkm (təxminən insan saçının qalınlığı qədər), kütləsi isə hər 1 km-ə 25-40 q-dır.

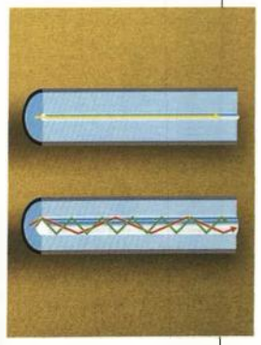
Optik liflər iki şəkildə olur: çoxmodlu (bir neçə tezliyi buraxmaq üçün nəzərdə tutulub) və birmodlu. Çoxmodlu işıqötürəndə özəyin diametri kifayət qədər böyükdür (50-80 mkm), orada çox böyük miqdarda tezliklərə malik siqnallar (modlar) yayılır. Birmodlu işıqötürəndə özəyin diametri (8-10 mkm) şüalanmanın dalğa uzunluğu (10 mkm-yə qədər) müqayisə olunandır, ona görə də difraksiya xeyli güclüdür və yalnız bir tezlik (mod) yayıla bilər. Nəticədə şüalanmanın sönməsi azalır, ancaq xətlərin quraşdırılması və istismarı mürəkkəbləşir.

Optik lifli rabitə ilk addımlarını 1975-ci ildə artmışdır, bu gün isə optik rabitə xətlərinin yeni nəsli – koherent sistemlər radiorabitənin prinsiplərini: tezlik və faza modulyasiyasını tətbiq etməyə imkan verdi. Bu, işıqötürənlər vasitəsilə siqnalların olduqca böyük, minlərlə kilometr məsafələrə yayılmasını təmin edir. Tərkibində erbi olan və fəal optik liflər adlanan liflərdən (onlarda işıq siqnalı udulmur, güclənir) istifadə edilməsi bütün Yer kürəsini yüksəksürətli optik lifli rabitə xətlərilə əhatə etməyə imkan verəcəkdir.

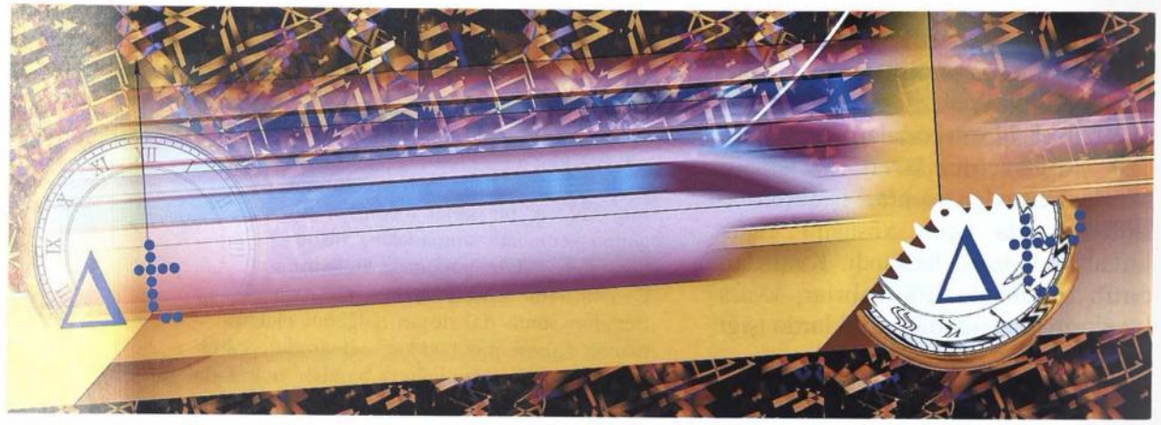
QEYRİ-BİRCİNS DALĞA



Tam daxili qayıtma zamanı çox maraqlı bir hadisəni müşahidə etmək olar. Əgər qaytarıcı səthə şəffaf cismi yaxınlaşdırsaq, onda cismin daxilində işıq şüası yaranır. Həm də bu şüa elə gedir ki, guya hava qatı yoxdur və işıq, sadəcə, bir şəffaf mühitdən digərinə keçir (adi sınmadakına nisbətən onun yalnız parlaqlığı kiçikdir). Deməli, tam qaytarıcı səthin arxasında da (səthdən sonra da) düşən dalğanın elektromaqnit sahəsi mövcuddur – doğrudur, cəmi bir neçə dalğa uzunluğuna bərabər məsafədə. Bu sahə hava ilə sərhəddə dalğanın sınmasını doğurmur, lakin daha sıx maddədə "sınan" şüa doğurmaq olur.



İşıqötürənlər – birmodlu və çoxmodlu.



XÜSUSİ NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİ

FİZİKADA 1905-ci İL İNQİLABI

Maks Plankın müəllimi, fizik Filipp fon Jolli XIX əsrin sonunda tələbəsinə demişdi: "Əlbəttə, bu və ya digər küncdə-bucaqda hələ tozcuq aşkar etmək və ya onu təmizləmək olar, lakin sistem, bir bütöv kimi, möhkəmdir və nəzəri fizika, artıq yüzilliklər ərzində həndəsənin malik olduğu həmin mükəmməllik dərəcəsinə yaxınlaşır. Belə ki, ona vaxt sərf etməyi sizə məsləhət görmürəm".

XIX yüzilliyin sonuna yaxın fizika müəyyən dərəcədə tamamlanmış elm sayılırdı. Belə görünürdü ki, daha bir qədər səy olsa, o, mühəndis işinə bənzər bir şeyə çevriləcəkdir: istənilən praktik işi həll etmək üçün yalnız sorğu kitabını açıb, lazımi düsturları tapmaq və uyğun hesablamaları yerinə yetirmək lazımdır. Doğrudur, bir neçə izah olunmamış eksperimental faktlar qalırdı, lakin əksər alimlər belə bir fikrin tərəfdarı idilər ki, daha tam və dəqiq hesablamalar etmək kifayətdir – cavab tapılacaqdır.

XX əsrin əvvəlində vəziyyət kəskin dəyişdi. Çarpışma ondan ibarət idi ki, fizikanın iki mühüm bölməsi – mexanika və elektrodinamika arasında ciddi ziddiyyət yaranmışdı. Mexanikada *Qalileyin nisbilik prinsipi* – birbirinə nəzərən düzxətli və bərabərsürətli hərəkət edən hesablama sistemlərinin tam bərabərhüquqluğu bərqərar olmuşdu. Elektrodinamikada başlıca yeri efir ideyası tutmuşdu. Dünya fəzasını dolduran və uzaq ulduzlara nəzərən tərpənməz olan müşahidəolunmaz mühiti belə adlandırırdılar. Bütün fiziki proseslər, o cümlədən elektromaqnit rəqsləri bu mühitdə baş verir. Belə olduqda, zərrəciklərin və sahələrin hərəkətini efirlə sərt bağlı olan koordinatlarda – mütləq koordinat sistemində təsvir etmək lazım gəlirdi. Başqa sözlə, Maksvell elektrodinamikası bir hesablama sistemini seçmişdi və onu bütün qalan hesablama sistemlərindən üstün tuturdu.

Yer orbit üzrə 30 km/san-yə yaxın sürətlə hərəkət edərək, uzaq ulduzlar sisteminə və deməli, efirə nəzərən yerini dəyişir. Bu, özünü Yerdə müşahidə olunan elektromaqnit hadisələrində mütləq göstərməlidir. Madam hesab olunur ki, bizim planet efirin içindən keçərək, hərəkət edir, onda ona qarşı "efir küləyi" əmələ gəlməli və Yerdəki mənbə tərəfindən Yerin hərəkətinin əksi istiqamətində buraxılan işığı aparmalıdır. Qalileyin nisbilik prinsipindən çıxarılmış *sürətlərin toplanması qanununa* görə, Yerin hərəkət istiqamətində şüalandırılmış işığın sürəti 30 km/san qədər azalmalı, əks istiqamətdə isə bu qədər artmalıdır. Lakin Maykelson və Morlinin eksperimentləri gedişində buna bənzər heç nə aşkar etmək mümkün olmadı, baxmayaraq ki, ölçmələrin dəqiqliyi artmışdı.

Bir sözlə, işığın sanki təcrübələrlə təsdiqlənmiş efir nəzəriyyəsi klassik mexanika ilə uzlaşmırdı. Bir çox nəzəriyyəçilər bu ziddiyyəti həll etməyə çalışırdılar. Onlardan bəziləri hesab edirdilər ki, Qalileyin nisbilik prinsipindən imtina etmək lazımdır, digərləri isə hesab edirdilər ki, "tərpənməz efir" maddi cisim tərəfindən (məsələn, Yer tərəfindən) tam və ya qismən hərəkətə sövq olunur.





1889-cu ildə təvazökar İrlandiya fiziki Corc Frensis Fitcerald (1851-1901) tamamilə gözlənilməz ideya təklif etdi. Əgər qəbul etsək ki, cismin efirə nəzərən v sürətilə hərəkəti zamanı onun l' – uzununa ölçüsü $l' = l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ qanunu üzrə qısalmaya məruz qalır, onda bu cür effekt Maykelson interferometrində şüaların yollarının axtarılan "efir" fərqini tamamilə kompensasiya edəcəkdir, burada c – işıq sürəti, l – efirə nəzərən tərpənməz olan cismin uzunluğudur. Doğrudur, gündəlik həyatda rast gəldiyimiz sürətlər üçün baxılan effekt praktik olaraq hiss olunmazdır. Hətta Yer orbit üzrə 30 km/san sürətlə hərəkət edərkən hərəkət istiqamətində cəmi 6 sm qısalma, yəni kibrit qutusunun uzunluğundan azca çox olan qısalmaya məruz qalır. Ona görə də Fitceraldın kolleqaları onun ideyasına şübhə ilə yanaşdılar.

Fitceralddan üç il sonra qısalma hipotezinə Maksvell elektrodinamikasında ən nüfuzlu mütəxəssis olan Niderland fiziki Hendrik Anton Lorens (1853-1928) müstəqil surətdə gəlib

Lorensin aldığı çevrilmələrə oxşayan çevrilmələrə alman fiziki Voldemar Foyqt (1850-1919) tərəfindən Dopler prinsipinə həsr olunmuş məqalədə (1887-ci il), həmçinin ingilis fiziki Cozef Larmor (1857-1942) tərəfindən "Efir və materiya" kitabında (1900-cü il) baxılmışdır.

MAYKELSON TƏCRÜBƏSİ VƏ EFİRİN İFLASI

Maykelsonun 1881-ci ildə çap olunmuş "Yerin işıqsaçan efirə nəzərən hərəkəti" adlı işi belə başlayır: "İşığın dalğa nəzəriyyəsi bütün fəzanı dolduran (efir adlanan) müəyyən bir mühitin mövcud olduğunu fərz edir; bu mühitin rəqsləri istilik və işıq hadisələrini şərtləndirir... Əgər hesab etsək ki, Yer tərpənməz efirin içində hərəkət edir, onda işığın Yer səthinin bir nöqtəsindən digərinə yayılması müddəti yayılma istiqamətindən asılı olacaqdır". Bu işdə "efir küləyinin" sürətini eksperimental təyin etməyə ilk cəhd təsvir edilmişdir. Hələ 1879-cu ildə bu hətta Maksvellin özünə də təsəvvür edilən perspektivdə mümkünsüz görünürdü, baxmayaraq ki, eksperimentin ideyasının özünü Maksvell söyləmişdi: işığın sürətini müxtəlif istiqamətlərdə ölçmək və eyni olmayan nəticəni qeyd etmək. Lakin o illərdə bir istiqamətdə işığın sürətini ölçmək üçün eksperimental dəqiqlik çatışmırdı. Əgər "efir küləyi" mövcuddursa, onda, prinsip etibarı ilə, işığın *ABA* yolunu (*A* nöqtəsindən *B* nöqtəsinə və əksinə) və ona bərabər olan başqa istiqamətdəki *ACA* yolunu keçmə müddətləri arasında fərq olmalıdır. Amma bu fərq $(v/c)^2$ tərtibindədir və onu təcrübədə ölçmək mümkünsüz görünürdü.

Maykelson bunun üçün interferensiya hadisəsindən istifadə etməyi təklif etdi. İşıq şüasını iki yerə parçalamaq və onları iki yol üzrə elə yönəltmək lazımdır ki, onlar görüşsün, üst-üstə düşəndə şüalar interferensiya edir. Əgər efir küləyi mövcuddursa, onda interferometri fırladanda interferensiya zolaqları periodik olaraq gah bu, gah da digər tərəfə sürüşəcəkdir. 1887-ci ildə Maykelson və kimyaçı Edvard Morli özlərinin qurduqları yüksək həssaslığa malik olan və civə içərisində üzən platformada yerləşdirilmiş interferometrdə təcrübə apardılar. Nəticə gözlənilməz oldu: onlar Yerin Günəş ətrafında orbit üzrə hərəkətinə (demək olar, 30 km/san) uyğun olan efir küləyini aşkar etmədilər. Maykelson və Morli eksperimentinin nəticələrinə görə, əgər efir küləyi mövcuddursa, onda onun sürəti 7 km/san-ni aşmır.

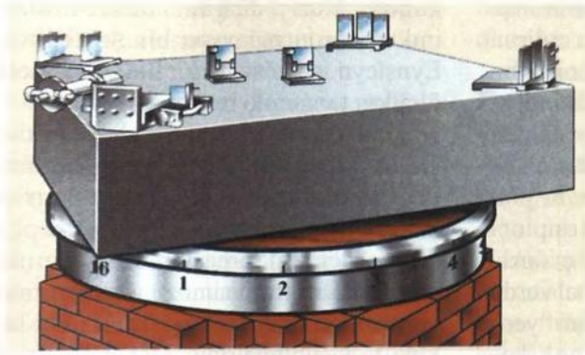
Bu belə bir fikrə gətirdi ki, hərəkətsiz efir nəzəriyyəsi səhvdir. Fərz etmək olar ki, efir cisimlərin hərəkəti zamanı onlar tərəfindən sövq edilir. Bu hipotez rus fiziki Aleksandr Aleksandroviç Eyxenvaldın təcrübələri ilə qəti olaraq rədd edildi. O, elektriklənmiş və sürətlə fırlanan diskin yaratdığı maqnit sahəsini ölçdü. Əgər hipotetik efir disklə birlikdə hərəkətə gəlmişdirsə, onda ölçmənin nəticəsi efirin bu efirdə hərəkət edən cisimlər tərəfindən sövq edilmədiyi fərziyyəsinə uyğun olaraq nəzəri hesablanmış kəmiyyətdən fərqlənməlidir. Lakin nəticə tərpənməz efir halına uyğun kəmiyyətlə üst-üstə düşdü. 1904-cü ildə Eyxenvald yazmışdı: "Bizim hazırda dünya efiri adlandırdığımız və bütün maddi cisimləri deşib keçən şeyi biz hətta hərəkətdə olan materiyanın özünün daxilində də tərpənməz hesab etməliyik" (burada materiya dedikdə maddə başa düşülür). Lakin Maykelson təcrübəsinin mənfi nəticəsini Eyxenvald izah etməmişdi.

Cisimlər tərəfindən sövq olunmayan efirin nəzəriyyəsi Frenelin və Lorensin işləri sayəsində, Maykelson təcrübəsindən başqa, bütün optik hadisələri və eksperimentləri izah etdi. 1895-ci ildə Lorens efirin içindən keçərək hərəkət edən cisimlərin uzununa qısalması hipotezini irəli sürdü. Bu hipotez Maykelson təcrübəsinin "öhdəsindən gəldi", lakin hərəkət edən mühitlərdə işığın sınması ilə bağlı olan qeyri-adi effektlər qabaqcadan xəbər verdi. Lakin həmin effektlər ingilis fizikləri Releyin (1902-ci il) və Breysin (1904-cü il) təcrübələrində aşkar olunmadı. Lorens nəzəriyyəyə, süni görünən əlavə hipotezlər daxil etməyə məcbur oldu.

çıxdı. Lorens Fitceraldın hipotezini t', yerli vaxt ideyası ilə tamamlayaraq, Qaliley çevrilmələrini böyük sürətlər ($v \approx c$) halına ümumiləşdirdi; Lorens "yerli" vaxtı "həqiqi" universal t vaxtilə $t' = t - \frac{xv}{c^2}$ çevirməsi vasitəsilə əlaqələndirdi, burada v – cismin x koordinatlı fəza nöqtəsindən keçərkən malik olduğu sürətdir. Fransız riyaziyyatçısı, fiziki və filosofu Jül Anri Puankarenin (o, Lorensin ideyalarını xeyli inkişaf etdirdi və Maksvell tənliklərinin sahə mənbələrilə birlikdə yeni çevrilmələrə nəzərən invariant



"Fizikanın salnaməsi" jurnalının 1905-1906-cı illər ərzindəki nömrələri, Eynşteynin nisbilik nəzəriyyəsinin əsasları daxil olan məqalələrilə birlikdə.



Maykelson interferometri ölçüsü 1,5×1,5 m olan daş plitə üzərində yığılmışdı. Plitə civədə üzən ağac halqa üzərində dururdu. Bu, cihazı səlis döndərməyə və şüaların hərəkət istiqamətini "efir küləyinə" nəzərən dəyişməyə imkan verirdi.

İngilis fizikləri V.M.Hiks (1902-ci il) və asılı olmadan Abraham (1904-cü il) Maykelson təcrübəsinin mənfi nəticəsini güzgü efirdə hərəkət edərkən düşmə bucağının qayıtma bucağına bərabər olmadığını nəzərə almaq yolu ilə izah etməyin mümkünlüyünü qeyd etdilər. Doğrudur, Hiksin işi elmi mühitdə rezonans doğurmadı, sonra isə efir nəzəriyyəsi üçün ciddi problemlər qoyan digər eksperimentlər (məsələn, Troutonun və Noblanın eksperimentləri) də meydana çıxdı.

Bir qayda olaraq, yeganə bir anlaşılmayan eksperiment uzun müddət işlənib hazırlanmış bir nəzəriyyəni darmadağın edə bilməz. Fiziklər onu daha çox gələcəkdə öz həllini gözləyən bir sirr kimi qəbul edirlər. Lakin efir nəzəriyyəsi qəribə və ziddiyyətli görünməyə başladı. Ona görə də onunla uzlaşmayan bir fakt ciddi diqqət obyektinə çevrildi. Efir özündə, sanki, birləşdirilməsi mümkün olmayan xassələri daşıyırdı. O, planetlərin Günəş ətrafında hərəkətinə mane olmur, deməli, onun özlülüyü çox kiçikdir. Lakin onda aydın deyil ki, bu cür efirdə eninə dalğalar necə yayıla bilər, axı özlü olmayan qazlarda və mayelərdə yalnız uzununa dalğalar mövcuddur. Belə çıxır ki, efir bərk cisim xassələrinə malik olmalıdır və planetlərin hərəkətinə müqavimət göstərməməlidir! Efir nəzəriyyəsi efirin onda hərəkət edən maddəyə təsiri problemini həll edə bilmədi. Bu yoldakı çətinliklər aradan qaldırıla bilməz kimi görünürdü. Eynşteyn efir hipotezindən imtina etməyi təklif edəndə, çox fiziklər rahat nəfəs aldılar. Qeyri-adi, lakin gözəl nəzəriyyə problemin özünü ləğv etdi: efir küləyi yoxdur – onun heç bir təzahürü də yoxdur və ola da bilməz, Maykelson təcrübəsinin mənfi nəticəsi müsbət nəticəyə çevrildi.

Efir hipotezi əvəzində Eynşteyn yeni universal ideya – nisbilik prinsipini təklif etdi. Relyativistik nəzəriyyə o dövrün bütün eksperimentlərinə öz izahını verərək, fizikanı "yeni ölçüyə" çıxardı və müasir elmi paradiqmanın bünövrəsinə çevrildi. Nisbilik ideyası Eynşteyn üçün o qədər qaneedici idi ki, o, hətta özünün "Hərəkət edən cisimlərin elektrodinamikasına dair" əsas işində Maykelson-Morli eksperimentinin nəticələrinə istinad etməmişdi. Həyatının sonunda Eynşteyn xatırlayırdı: "Maykelsonun nəticələri mənim işlərimə o qədər əhəmiyyətli təsir etməmişdir. Mənim hətta yadımda deyil ki, 1905-ci ildə XNN-ə aid öz ilk işimi yazan zaman, onu bilirdim, ya yox. Bu onunla izah olunur ki, ümumi mülahizələr əsasında mən mütləq hərəkətin olmadığına qəti əmin idim... Mənim şəxsi səylərimə Maykelson təcrübəsi heç cür təsir etməmiş və ya, hər halda, həlledici rol oynamamışdır".

> Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin ümumi prinsipi aşağıdakı postulata daxildir: fizika qanunları Lorens çevrilmələrinə (bir inersial hesablama sistemindən istənilən digər inersial hesablama sisteminə keçidi verən) nəzərən invariantdır. Bu, təbiət qanunları üçün məhdudedici prinsipdir, onu termodinamikanın əsasında duran məhdudedici perpetuum mobilenin olmaması prinsipilə müqayisə etmək olar.
>
> *A.Eynşteyn.*
> *"Yaradıcılıq tərcümeyi-halı"*

olduğunu sübut etdi) təklifi ilə inersial hesablama sistemləri arasındakı keçid düsturları *Lorens çevrilmələri* adını aldı. 1905-ci ildə "Annalen der Physik" ("Fizikanın salnaməsi") jurnalında o dövrdə Bern patent bürosunun heç kəsin tanımadığı 3-cü dərəcəli eksperti Albert Eynşteynin imzası ilə çap olunmuş "Hərəkət edən cisimlərin elektrodinamikasına dair" məqaləsi tamamlayıcı akkord oldu.

Məzmunsuz mütləq fəza və mütləq zaman anlayışlarına qarşı ardıcıl çıxış edən Ernst Maxın fəlsəfi ideyaları Eynşteynə yaxın idi. Eynşteyn bu

Annal (salnamə) (*lat.* annus – "il") geniş mənada ən mühüm hadisələrin illər üzrə qeydə alınmasıdır.

anlayışları, heç bir real fiziki məzmunu olmayan anlayışlar kimi, sadəcə atdı. O, iki klassik fiziki nəzəriyyənin mahiyyətini yığcam şəkildə əks etdirən fundamental prinsipləri: mexanikadan – bütün inersial hesablama sistemlərinin bərabərhüquqlu olması prinsipini (nisbilik prinsipini); elektrodinamikadan – *işıq sürətinin sabitliyi prinsipini* əsas götürdü. Eynşteyn bu prinsiplərdən Lorens çevrilmələrini çıxardı, lakin onlara başqa fiziki məna verdi. Məsələn, hərəkət edən cismin "yerli vaxtı" Lorensə görə tərpənməz hesablama sistemindən hərəkət edən hesablama sisteminə keçərkən fiziki kəmiyyətləri düzgün hesablamağa imkan verən müəyyən bir şərtilikdir. Eynşteyn isə göstərdi ki, bu, real saatla ölçülən tamamilə real bir vaxtdır.

Bəs əslində zaman və fəza nədir? Onları ölçmək olarmı? Adətən insanlar həyati təcrübələrinə əsaslanırlar. Məsələn, elektrik qatarında (hərəkət edən sistemdə) sərnişinin saatı həmişə perrondakı (tərpənməz sistemdəki) vaxtla eyni olan vaxtı göstərir. Bu heç kəsi təəccübləndirmir. Üstəlik, hesab

edirlər ki, deyilənlər bütün hərəkət edən, həm də istənilən sürətlərlə hərəkət edən cisimlər üçün də doğrudur. Ulduzlararası gəmi üçün də. Atomdakı elektron üçün də.

Məsafə ilə də vəziyyət eyni cürdür. Elektrik qatarı duran vaxt adi ruletka ilə onun uzunluğunu ölçmək olar. Hərəkət zamanı yerdən onun "burnunun" və "quyruğunun" vəziyyətini eyni bir anda qeyd etmək, sonra isə ruletka ilə bu nöqtələr arasındakı məsafəni ölçmək olar. Aydındır ki, ölçülmüş uzunluqlar eyni olacaqdır. Bəs, əgər elektrik qatarı 100 000 km/san sürətlə hərəkət edərsə? Əlbəttə, bu heç vaxt baş verməyəcək, ancaq nəticənin eyni olacağına az adam şübhə edər.

Lakin Lorensin, Puankarenin və Eynşteynin kəşfləri adi təsəvvürləri unutmağa məcbur edir. Elektrodinamik (o cümlədən optik) hadisələrdən başlayaraq, bütün fiziki hadisələr çoxluğu qəti surətdə sübut edir ki, sükunətdəki müşahidəçi tərəfindən ölçülmüş məsafələr və zaman fasilələri hərəkət edən müşahidəçi tərəfindən ölçülmüş həminki kəmiyyətlərdən fərqlənir.

OPTİK EKSPERİMENTİN USTASI

İşıq sürətini ölçən cihazı Albert Maykelson 25 yaşında hazırlamışdı, bu cihaz ixtiraçıya cəmi 10 dollara başa gəlmişdi. Yenicə işə başlayan fizik dərhal eksperimentatorlar arasında, demək olar ki, əfsanəvi simaya çevrildi. Burada qəribə heç nə yoxdur. İşığın sürətinin təyini həmişə olduqca bahalı bir iş olmuşdur. Maykelsonun nail olduğu ölçmə dəqiqliyinin uzun illər tayı-bərabəri olmamışdır...

Albert Abraham Maykelson (1852-1931) Polşadan gəlmiş mühacir idi. O, ABŞ Hərbi Dəniz Akademiyasını bitirmiş (1873-cü il), donanmada xidmət etmiş və həmin akademiyada da fizikadan dərs demişdir. 1880-ci ildə isə Qərbi Avropaya getmiş və buradakı aparıcı elmi mərkəzlərdə iki il təcrübə keçmişdir.

Helmholtsun laboratoriyasında (Berlin) işləyərək, o, son dərəcə həssas olan interferometr quraşdırdı və bu interferometrin köməyilə Yerin tərpənməz efirə nəzərən hərəkət sürətini təyin etməyə və bununla da efirin mövcudluğunu sübut edəcəyinə ümid edirdi. Bu məsələni hələ Maksvell qoymuşdu. Maksvell hesab etmişdi ki, Yerin efirə nəzərən hərəkəti laboratoriyada işığın sürətinin ölçülməsinə təsir edir. Yerin və işıq şüasının hərəkət istiqamətləri üst-üstə düşən və əks olan hallarda prinsipcə müxtəlif nəticələr alınmalıdır. Lakin belə fərqi tutmaq üçün 10^{-12} san tərtibində olan zaman aralıqlarını qeydə almağı öyrənmək lazımdır. Bu isə çətin ki, mümkün olsun. Bax, Maykelson bu məsələnin öhdəsindən gələcəyinə az da olsa şübhə etmədən, ondan yapışdı.



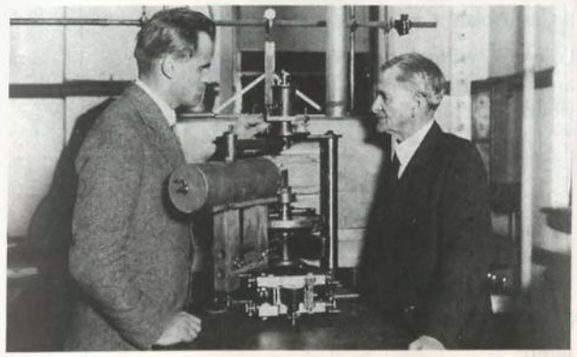
Albert Abraham Maykelson.

Zamanı yox, işığın 10^{-12} san ərzində qət etdiyi məsafəni ölçməyi qərara aldı. 1881-ci ildə o, ilk dəfə ölçmələrdə fərqin olmadığı haqqında məlumat verdi.

1882-ci ildə, Amerikaya qayıdan Maykelson kimyaçı Edvard Morli ilə birlikdə özünün təkmilləşdirilmiş qurğusunda optik təcrübələri davam etdirdi. 1887-ci ildə alimlər eksperimentin nəticələrini çap etdirdilər; bu nəticələr sübut edirdi ki, Yerin hərəkəti interferometrin göstərişinə təsir etmir, "efir küləyinin" sürəti, əgər o varsa, 5-7 km/san-dən çox deyildir. Bu qiymət gözlənilən qiymətdən xeyli kiçik idi.

1926-cı ildə Albert Maykelson bir daha eksperimentlərini təkrar etdi və özünün çoxillik axtarışlarına Maunt-Vilsonda konfransda yekun vurdu; burada o elan etdi: "...efir küləyi" müşahidə olunmur, deməli, mütləq hesablama sistemi də yoxdur".

Beləliklə, Maykelson mütləq tərpənməz efirin mövcudluğunu sübut etməyə çalışaraq, eksperimentə başladı və parlaq nəticə aldı, lakin... mənfi nəticə. Maykelsonun şərəfinə verilən banketdə (onun ölümündən bir neçə ay əvvəl) Eynşteyn demişdi: "Siz, hörmətli doktor Maykelson, mən hələ uşaq olarkən öz tədqiqatlarınıza başlamısınız. Siz fiziklərə yeni yollar açmışsınız və öz gözəl eksperimentlərinizlə nisbilik nəzəriyyəsi üçün yol saldınız. Siz işığın efir nəzəriyyəsinin səhv olduğunu aşkara çıxardınız və Lorens və Fitceraldın ideyalarına təkan verdiniz, o ideyalara ki onlardan

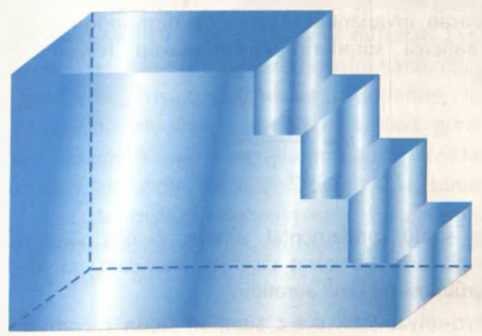


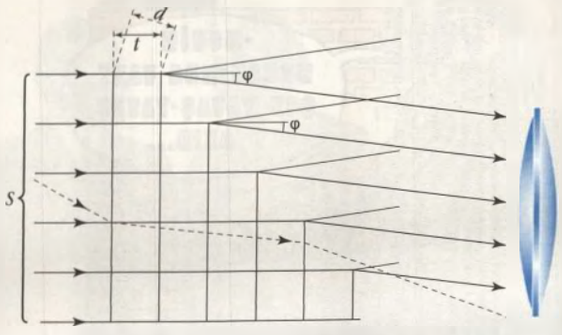
A.Maykelson (sağda) laboratoriyada interferometrin yanında.

xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi inkişaf etdi. Sizin iş olmasaydı, bu nəzəriyyə indi də maraqlı fərziyyə olaraq qalardı; o, sizin təcrübələrdə ilk real təsdiqini aldı".

1887-ci ildən Albert Maykelson işıq dalğalarının uzunluğunun dəqiq ölçülməsi üçün öz interferometrindən istifadə etməklə, paralel olaraq spektroskopik tədqiqatlarla da məşğul olmuşdur. 1890-cı ildə o, mühüm metroloji məsələni həll etdi: metr etalonunu kadmium şüalanmasının dalğa uzunluğu vahidlərində təyin etdi. Yaratdığı metodlardan Maykelson atomların şüalanmasının tezliyinə maqnit sahəsinin təsirini öyrənmək üçün istifadə etdi. İfrat yüksək ayırdetmə qüvvəsi olan cihazın – məşhur "Maykelson eşelonu"nun ixtirası da spektroskopiya ilə bağlıdır; bu cihaz spektrin çox dar hissələrini təhlil etməyə imkan verir. 1907-ci ildə Albert Maykelson "ən dəqiq optik cihazlar düzəltdiyinə və onların köməyilə spektroskopik və metroloji ölçmələr yerinə yetirdiyinə görə" ilk amerikalı Nobel mükafatı laureatı olmuşdur.

Həyatının son illərində Maykelson işıq sürətinin ölçülməsi probleminə qayıtdı. Lakin bu işi başa çatdırmaq ona qismət olmadı...





"Maykelson eşelonu" – çox böyük yollar fərqi olan işıq dəstələrinin interferensiyasını almaq üçün şüşə lövhəciklər yığınıdır. O, bu gün də yüksək ayırdetmə qabiliyyəti olan spektral cihazlarda tətbiq olunur.

QALİLEY VƏ LORENS ÇEVRİLMƏLƏRİ

Klassik fizikanın fəza, zaman və cisimlər arasındakı qarşılıqlı təsirin xarakterinə dair əsas təsəvvürləri yığcam şəkildə Qaliley çevrilmələrində toplanmışdır. Bu çevrilmələr koordinatları (x; y; z), zamanı t olan və tərpənməz hesab sayılan K inersial hesablama sistemindən ona nəzərən bərabərsürətli (V sürəti ilə) və düzxətli (x oxu boyunca) hərəkət edən və koordinatları (x'; y'; z') və zamanı t' olan K' sisteminə keçid (və ya "yenidən hesablama") qaydalarını verir:

$$x' = x - Vt;\ y' = y;\ z' = z;\ t' = t. \qquad (1)$$

Əslində burada Nyuton klassik mexanikasının bütün təsəvvürləri və anlayışları əks olunmuşdur. Zamanın mütləqliyini $t' = t$ qaydası ifadə edir, yəni zamanın axımı hesablama sisteminin seçilməsindən asılı deyil, onda fəzanın mütləqliyi onu göstərir ki, K sistemində ölçülmüş nöqtələr arasındakı məsafə K' sistemində də dəyişməz qalır:

$$x_2' - x_1' = (x_2 - Vt) - (x_1 - Vt) = x_2 - x_1.$$

Qalileyin nisbilik prinsipinə görə istənilən mexaniki hərəkətlər və qarşılıqlı təsirlər istənilən inersial hesablama sistemlərində eyni bir qanunlar üzrə baş verir. Buna uyğun olaraq bütün belə sistemlərdə cisimlər arasındakı qarşılıqlı təsirin ötürülməsi sürəti eyni olmalıdır (bəzən ona fundamental sürət deyirlər). Qaliley çevrilmələrindən sürətlərin toplanmasının klassik qanunu çıxır:

$$v = v' + V,$$

buradan alınır ki, bütün hesablama sistemlərində eyni qiymətə malik olan (Qaliley çevrilmələrinə nəzərən invariant olan) yeganə sürət sonsuz böyük sürətdir: $v' = \infty$. Doğrudan da,

$$v = v' + V = \infty + V = \infty = v'.$$

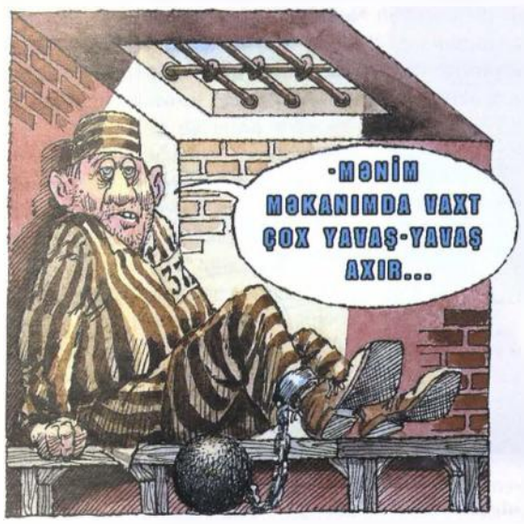
Deməli, klassik mexanikanın nisbilik prinsipi yalnız "ani" təsir qüvvələri halında Qaliley çevrilmələrilə uyuşandır ki, bu da Nyutonun uzağa təsir konsepsiyasında əks olunmuşdur.

Mexaniki hərəkətlərlə yanaşı, elektrodinamik hadisələri də təsvir edən nisbilik nəzəriyyəsində, Qaliley çevrilmələri əvəzində Lorens çevrilmələrindən istifadə olunur. Lorens çevrilmələri bir relyativistik inersial sistemdə hadisənin (x; y; z; t) koordinatlarının digər sistemdə hadisənin (x'; y'; z'; t') koordinatlarına "yenidən hesablanması" qaydalarını (keçid qaydalarını) verir. Klassik mexanikadakı mütləq zaman, yalnız sistemlərin V nisbi hərəkət sürətindən yox, həm də cismin x olduğu yerdən də asılı olan $t' = t - x\frac{V}{c^2}$ "yerli" vaxtla əvəz olunur. İndi Lorens çevrilmələrini (1) düsturlarından, onların şəklini ardıcıl dəyişdirmək yolu ilə almaq üçün (1)-dəki münasibətlərdən birincisini və "yerli vaxtı" aşağıdakı

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

"relyativistik vuruğuna" vurmaq kifayətdir; bu vuruq miqyasların relyativistik qısalmasını və zamanın relyativistik yavaşımasını nəzərə alır. Nəticədə Lorens çevrilmələrini alırıq:

$$x' = \gamma(x - Vt);\ y' = y,\ z' = z;\ t' = \gamma\left(t - x\frac{V}{c^2}\right). \qquad (2)$$



Zamanın ardınca fəza öz mütləq xarakterini itirir, çünki məsafə yox, hadisələr arasındakı interval (2) çevrilmələrinə nəzərən invariantdır. Lorens çevrilmələrinin digər mühüm nəticəsi sürətlərin toplanmasının relyativistik qanunudur:

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}.$$

Bu düstur sonlu fundamental sürətin c işıq sürətinin olduğunu göstərir. Bu sürət cisimlər arsındakı qarşılıqlı təsirin ötürülməsinin limit sürətidir.

Adi, qeyri-relyativistik $v \gg c$ sürətləri üçün relyativistik vuruq $\gamma \to 1$ olur və (2) Lorens çevrilmələri (1) Qaliley çevrilmələrinə keçir.

JÜL ANRİ PUANKARE

Riyazi fikrin az sayda nəhənglərindən biri Jül Anri Puankare (1854-1912) olmuşdur. O, özünün səmərəli fəaliyyətilə ona müasir olan bütün riyaziyyatı əhatə etmişdi. Puankare riyaziyyatın və fizikanın müxtəlif problemləri üzrə 500-dən çox elmi məqalə, 30-dan çox kitab çap etdirmişdir. Fantastik elmi görüş dairəsi, ən yüksək intellektual zəka...

Puankare zehnilə, ağlı ilə çox böyük materialı "görmək" kimi nadir qabiliyyətə malik idi və özünün bir çox işlərini, Eyler kimi, istənilən səs-küylü tədbirlər vaxtı fikrində edirdi. Bir neçə onillik ərzində professor Puankare Sorbonnun tələbələri üçün hər il tamamilə yeni kurs oxumuşdur. Elmi istiqamətlərin – riyazi fizikanın, dinamik sistemlər nəzəriyyəsinin, topologiyanın, bifurkasiya nəzəriyyəsinin təməlləri bu cür qoyulurdu ("Qeyri-xətti rəqslər" məqaləsinə bax).

Müasir fizikanın – fəza-zaman haqqında relyativistik təsəvvürlərin əsaslarının yaradılmasında Puankarenin payı qiymətsizdir. Onun nisbilik prinsipini, relyativistik mexanikanın qanunlarını, Lorens çevrilmələrini dördölçülü fəza-zaman dilində formulə etməsi dahiyanə sadədir.

Məşhur fransız riyaziyyatçısı və siyasətçisi Pol Penleve (1863-1933) Jül Anri Puankareni "idrakı digər insanların idrakı ilə yaradılmış hər şeyi əhatə edə bilən, bu gün insan fikrinin dərk etdiyi hər şeyin mahiyyətinə nüfuz edə bilən və orada nə isə bir yenilik görə bilən yeganə insan" hesab edirdi.



Jül Anri Puankare.



J.A.Puankare Sorbonnada mühazirə oxuyur. K.Popovun çəkdiyi şəkil. 1908-ci il.

NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİNİ KİM BAŞA DÜŞÜR?

Bir çox alimlər uzun illər və hətta onilliklərlə nisbilik ideyalarını anlamamış və ya qəbul etməmişlər. 1921-ci ildə Nobel mükafatı Eynşteynə heç də nisbilik nəzəriyyəsini yaratdığına görə yox, "riyazi fizikadakı xidmətlərinə, ilk növbədə, fotoeffekt qanununun kəşfinə görə" verilmişdir. XX əsrin əvvəllərinin böyük fiziklərindən biri Artur Eddinqton demişdi ki, bütün Avropada nisbilik nəzəriyyəsini başa düşən insanları barmaqla saymaq olar. Lakin indi də onlar bir o qədər çox deyildirlər.



Albert Maykelson, Albert Eynşteyn və Robert Milliken.

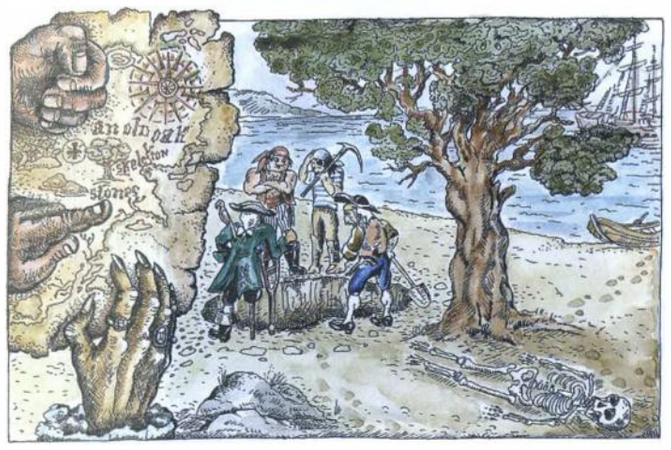
Məlum oldu ki, baxılan xarakteristikalar mütləq deyil, müşahidə nöqtəsindən asılı olan nisbi xarakteristikalardır. Bu zaman Puankarenin fikrincə, cisimlərin fəza və zaman koordinatları formal olaraq bərabərhüquqlu olur, çünki asanlıqla bir-birinə keçə bilər.

Hesablama sistemi hesablama cismindən üstəgəl koordinat sistemindən üstəgəl cismə nəzərən sükunətdə olan saatdan ibarətdir. Dünyada baş verən hadisələrdən hər biri dörd (*t*; *x*; *y*; *z*) ədədlərilə – zaman anı və hadisənin baş verdiyi nöqtənin üç fəza koordinatları ilə qeyd olunur, nişanlanır.

XÜSUSİ NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN POSTULATLARI

Nisbilik nəzəriyyəsi haqqında söhbəti onun müəlliflərinin öz-özlüyündə aydın hesab etdikləri şeydən – *Qalileyin ətalət qanunundan* başlamaq daha yaxşıdır. Əslində Nyutonun birinci qanunu olan bu qanun təsdiq edir ki, ən azı bir inersial hesablama sistemi mövcuddur.

Gəlin hesablama sisteminin nə olduğunu yadımıza salaq. Bu, cisim və ya cisimlər sistemidir, o cisimlər sistemidir ki, daxil edilmiş koordinat sisteminin köməyilə istənilən digər cismin fəzadakı vəziyyəti onlara nəzərən tapılır. Çox vaxt hesablama cismi vəzifəsini Yerin səthi yerinə yetirir: bu səthdə koordinat sistemi qurulur. Məsələn, ən hündür ağacdan 20 addım şimala tərəf, 30 addım qərbə tərəf və üç dirsək dərinlikdə içində oğurluq qızıl olan sandıq basdırılmışdır. Başqa sözlə, başlanğıc əvəzinə palıd ağacı, oxlar əvəzinə şimal-cənub, qərb-şərq və yuxarı-aşağı istiqamətləri, ölçü vahidi əvəzinə insan addımının və dirsəyinin orta uzunluğu qəbul edilmiş koordinat sistemində sandığın koordinatları (20; 30; –3)-ə bərabərdir.



Sonralar digər koordinat sistemlərindən də istifadə etməyə başladılar. Məsələn, Yer kürə olduğundan düzbucaqlı koordinatlara yox, sferik koordinatlara ehtiyac yarandı və insanlar dənizdə gəminin vəziyyətini coğrafi en və uzunluq dairələrinə görə təyin etməyi öyrəndilər. Uzunluq vahidi olaraq daha addımı və ya dirsəyi deyil, mili, kilometri, mikronu, parseki və s. götürdülər. Lakin sandığın dalınca rəqiblər onu qazıb çıxarmamışdan əvvəl də gəlmək olar, çıxarıb apardıqdan sonra da. Deməli, hadisəni tam fiksə etmək üçün dördüncü kəmiyyət – hadisənin baş verdiyi *t* zaman anı da lazımdır. Bu kəmiyyət saatın köməyilə təyin olunur. Qeyd etmək vacibdir ki, fəzanın müxtəlif nöqtələrində olan saatlar tutuşdurulmalıdır (sinxronlaşdırılmalıdır). Lakin ən başlıcası – saatlar seçilmiş hesablama sisteminə nəzərən sükunətdə olmalıdır.

İndi ətalət qanununu daha aydın ifadə edə bilərik. Əgər hər hansı bir cisim başqa cisimlərdən xeyli uzaqlaşmışdırsa (və ya onların təsirindən qorunmuşdursa), onda bu cisim elə bir hesablama sistemində yerləşir ki, həmin sistemdə onun hərəkəti düzxətli və bərabərsürətli olur. Bu cür sistemi məhz *inersial hesablama sistemi* adlandırırlar.

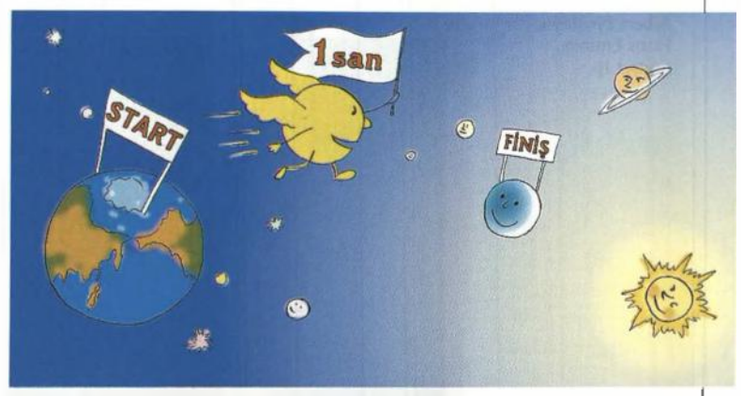
Lakin inersial hesablama sistemi tapmaq çətindir. Bir vaxtlar belə sistem kimi Yerin səthini qəbul edirdilər. Sonra aydınlaşdı ki, Yerin öz oxu ətrafında fırlanması, Yerin Günəş ətrafında hərəkəti və bəzi digər amillər

bizim planetin səthini inersial hesablama sistemi hesab etməyə imkan vermir. Hətta Kainatın quruluşu haqqındakı indiki təsəvvürlər onu göstərir ki, konkret cisimlərlə bağlı olan inersial hesablama sistemi mövcud deyil və ola da bilməz. Lakin maraqlı olan nədir: müasir fizikanın əksər bölmələrində ətalət qanununa əsaslanan hesablamalar eksperimentlə təsdiq olunan fövqəladə dəqiq nəticələr verir.

Ciddi desək, verilmiş hesablama sisteminin inersial sistem hesab edilib-edilməməyi konkret fiziki məsələdən asılıdır. Məsələn, əgər söhbət qatarın və ya teploxodun hərəkətindən gedirsə, onda Yerin səthi inersial sistem kimi tamamilə yarayır, lakin sahillərin çaylar tərəfindən yuyulub aşınması haqqındakı məsələdə Yerə qeyri-inersial (fırlanan) sistem kimi baxılır. Müasir fizika üçün mühüm olan başqa şeydir: istənilən dəqiqliklə inersial hesab edilə biləcək hesablama sisteminin seçilməsi imkanının prinsipial mümkünlüyüdür.

İndi üzərində nisbilik nəzəriyyəsinin qurulduğu iki postulata keçək. Onlardan birincisi nisbilik prinsipidir: bütün inersial hesablama sistemlərində bütün fiziki hadisələr eyni cür, yəni eyni qanunlar üzrə baş verir. Başqa sözlə, Qalileyin nisbilik prinsipi yalnız mexaniki proseslərə yox, istənilən fiziki hadisələrə şamil edilir.

Ətalət qanunundan və nisbilik prinsipindən çıxır ki, inersial hesablama sisteminə nəzərən qiymət və istiqamətcə sabit sürətlə hərəkət edən istənilən hesablama sistemi də inersialdır. Burada cəmi iki variant mümkündür: ya istənilən hərəkət sürəti yol veriləndir (və biz klassik qeyri-relyativistik fizikaya gəlib çıxırıq), ya da istənilən cismin yerdəyişmə sürəti və məlumatın ötürülmə sürəti müəyyən maksimal

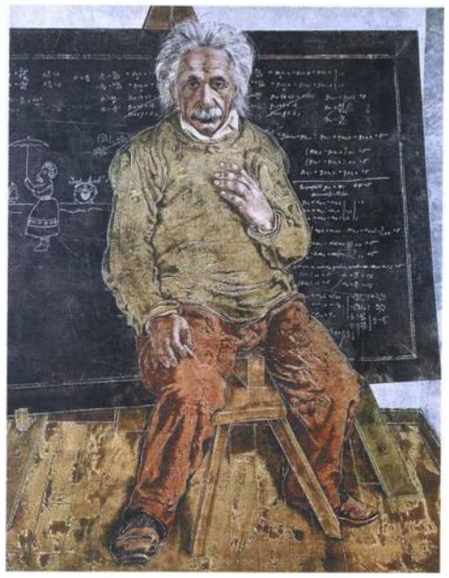


sürəti aşa bilməz (bu ikinci postulatdır). Nisbilik prinsipindən belə çıxır ki, maksimal sürət, əgər o mövcuddursa, bütün inersial hesablama sistemlərində eynidir. Bu cür maksimal sürət məhz işıq sürətidir. Onu latın hərfi *c* ilə işarə edirlər. Bu kəmiyyətin dəqiq qiyməti $c = 299\,792\,458$ m/san-dir.

Nə üçün dəqiq? İş ondadır ki, keçmişdə uzunluq və zaman etalonları olaraq bir-birilə əlaqəsi olmayan fiziki kəmiyyətləri qəbul etmişdilər. Yalnız 1983-cü ildə alimlər işığın vakuumda 1/299 792 458 san-yə bərabər müddətdə qət etdiyi yolun uzunluğunu metr elan etməklə, uzunluq və zaman vahidlərini bir-birilə uzlaşdırdılar. Başqa cür də etmək: uzunluq vahidi olaraq işıq vahidini – işığın 1 san-də qət etdiyi məsafəni də qəbul etmək olardı. Hazırda astronomlar məsafələri işıq illərilə ölçməklə məhz belə edirlər. Bu zaman işıq sürətini vahidə bərabər ($c = 1$) qəbul edirlər.

Qeyd edək ki, klassik mexanikada da həm ətalət qanunu, həm də nisbilik prinsipi ödənir. Ona görə də istənilən sürətlərə yol verən Qalileyin nisbilik prinsipinə əsaslanan fəza və zamanın nəzəriyyəsi haqqında və bünövrəsini Puankare – Eynşteyn nisbilik prinsipinin və limit sürəti haqqında postulatın təşkil etdiyi fəza-zaman nəzəriyyəsi haqqında danışmaq daha

Postulat (*lat.* postulatum – "tələb olunan") – elmi nəzəriyyə çərçivəsində həqiqi müddəa əvəzinə qəbul edilən müddəadır, baxmayaraq ki, bu nəzəriyyənin köməyilə o, sübut oluna bilməz; "aksiom" termininin sinonimidir. Fizikada postulatlar təcrübi faktların ümumiləşdirilməsinin nəticəsidir.



Albert Eynşteyn. Hans Erminin portret işi.

düzgündür. Bu səbəbdən, xüsusi halda, "nisbilik nəzəriyyəsi" adı heç də tam uğurlu ad deyil. Bundan sonra tez-tez "relyativistik nəzəriyyə" termini işlədiləcəkdir, baxmayaraq ki, latıncadan tərcümədə o, yenə də həmin nisbilik nəzəriyyəsini bildirir (*lat.* relativus – "nisbi").

NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN PARADOKSLARI

Relyativistik nəzəriyyə adi klassik qanunlara yeni nə gətirdi ki? Gündəlik təcrübəyə əsaslanaraq relyativistik düsturlardan bəzilərini anlamaq çətindir. Onlara sadəcə alışmaq, vərdiş etmək lazımdır.

Məhz əsas anlayışların yenidən baxılmasına gətirib çıxaran şeydən – sürətlərin, məsələn, hesablama sisteminin V və bu sistemdəki cismin v sürətlərinin toplanması qanunundan başlayaq. Əvvəlki, qeyri-relyativistik qanun $v = v' + V$ Qaliley çevrilmələrinin nəticəsi olduğu kimi, relyativistik qanun da Lorens çevrilmələrinin nəticəsidir:

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{Vv'}{c^2}}. \qquad (1)$$

Sadə hal: $V = 50$ km/saat sürətilə hərəkət edən gəmi hərəkət istiqamətində $v' = 100$ m/san sürətilə çıxan mərmilə atəş açır. Sahildəki müşahidəçinin nöqteyi-nəzərincə, mərminin (1) düsturundan tapılan v sürəti qeyri-relyativistik $v' + V$ sürətindən yalnız təsəvvüredilməz dərəcədə kiçik kəmiyyət qədər fərqlənir. Əgər bu gəmidə projektor işə salınarsa ($v' = c$), onda onun işıq dalğasının cəbhəsinin sürəti (1) düsturuna əsasən,

$$v = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}} = c\frac{c + V}{c + V} = c$$

olur, yəni işıq sürətilə üst-üstə düşür və gəminin sürətindən heç cür asılı deyildir.

Söhbət gəmi haqqında yox, sürətləndiricidə $V = 0{,}9\,c$-yə qədər sürətləndirilmiş mikrozərrəcik haqqında gedəndə və öz növbəsində, bu mikrozərrəciyin özü də sürəti $v' = 0{,}09\,c$ olan, başqa bir mikrozərrəcik buraxanda, onda yeni və köhnə düsturlar v üçün müxtəlif qiymətlərə gətirib çıxarır. Sürətlərin adi toplanması qanununa görə buraxılmış zərrəciyin sürəti $0{,}99\,c$ təşkil edir, Lorens düsturu isə doğru – $0{,}91\,c$-yə yaxın nəticə verəcəkdir ki, bu da təcrübədə aşkar olunacaqdır.

Başqa bir maraqlı düstur. Əgər sükunət halında raketin ölçülmüş uzunluğu (ona məxsusi uzunluq deyilir) l-ə bərabərdirsə və bu raket müşahidəçinin yanından v sürətilə uçub gedirsə, onda həmin müşahidəçinin nöqteyi-nəzərincə raketin uzunluğu

$$l' = l\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (2)$$

olacaqdır.

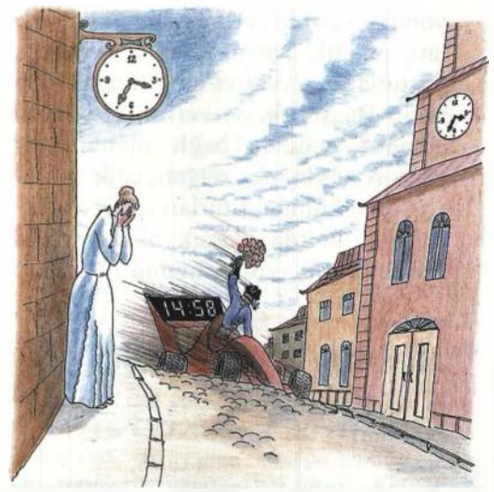
Bu, məhz Fitcerald-Lorens düsturudur. İstənilən şərtlər daxilində l' həmişə l-dən kiçikdir. Lakin nə qədər ki, sürətlər (hətta üçüncü kosmik sürət də), Yerdə rastlaşdığımız sürətlərdən ibarətdir, onda l və l' praktik olaraq fərqlənmir. Yox, əgər raket, məsələn, $0{,}8\,c$-yə bərabər sürətlə uçursa, onda sükunətdəki müşahidəçi onun uzunluğunun üçdə birindən də çox qısaldığını qeydə alır.

Müxtəlif hesablama sistemlərindəki zamanları əlaqələndirən düstur da az maraqlı deyil. Raketin içində saat yavaş gedir. Əgər Yerdəki saata görə raket bir nöqtədən digər nöqtəyə qədər məsafəni t zamanı ərzində qət etmişdirsə, onda həmin bu interval raketdəki saata görə t' olacaqdır, həm də xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinə əsasən,

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (3)$$

Həmişə t' zaman intervalının qiyməti t-dən böyükdür, ona görə də çox vaxt bu effekti hərəkət edən saatların gedişinin yavaşıması adlandırırlar. Böyük və hətta yerdə rastlaşdığımız çox böyük sürətlərdə də t'-in t-dən heç bir gözəçarpan fərqi olmayacaqdır. Tutaq ki, kosmonavt 12/13 işıq sürətinə bərabər sürətlə Yerdən 6 işıq ili qədər uzaqda olan Siriusa uçur. (3) düsturunun köməyilə alacağıq ki, o, Yerdən Siriusa və geriyə səfəri zamanı 13 yaş (onun saatı yavaş işləyir), onun Yerdə qalmış əkiz qardaşı isə 31,2 yaş qocalacaqdır. Bu cür qəribə nəticə ağıla çətin sığışır, lakin eksperimental faktlar onun doğruluğuna şübhə yeri qoymur.

Digər tərəfdən, belə görünə bilərdi ki, raketə sükunətdə olan hesablama sistemi kimi, Yerə isə hərəkət edən sistem kimi baxmaq, t və t'-in yerlərini dəyişmək və belə nəticəyə



gəlmək olar ki, ayrılıq vaxtı kosmonavt əkiz qardaşına nisbətən daha çox qocalacaqdır. Bu ziddiyyət *əkizlər paradoksu* adlanır. Əslində isə raketə inersial hesablama sistemi kimi baxmaq olmaz, çünki sürətlənmə və tormozlanma zamanı o, təcilə məruz qalır. Qeyri-inersial hesablama sistemlərindən istifadə etməklə aparılan daha dəqiq və mürəkkəb hesablama göstərir ki, istənilən halda əkizlərin yaşları arasındakı fərq eynidir.

Bir daha qeyd etmək lazımdır ki, əgər prosesdə iştirak edən cisimlərin sürətləri işıq sürətilə müqayisədə kiçikdirsə, onda relyativistik nəzəriy-



Əkizlərin yaşının hesablanması ulduzlara uçan gəminin istiqamətinin geriyə dəyişdirilməsi üçün tələb olunan təcil nəzərə alınmamaqla aparılmışdır.

yənin yuxarıda verilmiş bütün düsturları, praktik olaraq, klassik mexanika düsturlarının verdiyi həmin nəticələri verir. Bu şərt *qeyri-relyativistik limit* adlanır; bununla bağlı mühüm bir prinsip söyləyək: relyativistik nəzəriyyənin bütün düsturları qeyri-relyativistik limitdə klassik nəzəriyyənin düsturlarının verdiyi həmin nəticələri verməlidir. Bu prinsipi ilk dəfə Nils Bor, kvant mexanikasının qurulması ilə məşğul olarkən, postulat kimi qəbul etmiş və onu *uyğunluq prinsipi* adlandırmışdır. O vaxtdan bəri həmin prinsip, artıq mövcud olan baxışlara görə, adətən, paradoksal görünən yeni fiziki nəzəriyyələr yaradarkən ən başlıca alətə çevrilmişdir.

NİSBİLİYİN FİZİKASI

RELYATİVİSTİK HƏNDƏSƏ

Kölndə təbiətşünasların qurultayında (1908-ci il) "Fəza və zaman" məruzəsilə çıxış edən alman riyaziyyatçısı German Minkovski (1864–1909) elan etdi: "Mərhəmətli cənablar! Sizin qarşınızda mənim fəza və zamana dair inkişaf etdirmək istədiyim baxışlar eksperimental-fiziki təməl üzərində yaranmışdır. Onların gücü bundadır. Onların ideyası radikaldır. Bundan sonra öz-özlüyündə fəza və öz-özlüyündə zaman uydurmaya çevrilməli və yalnız hər ikisinin müəyyən növ birləşməsi hələ öz müstəqilliyini saxlamalıdır". Minkovski dördölçülü psevdoevklid həndəsəsini tətbiq etməklə Puankarenin zamanın və fəza koordinatlarının formal bərabərhüquqlu olması haqqındakı ideyasını çox gözəl inkişaf etdirdi.



German Minkovski.

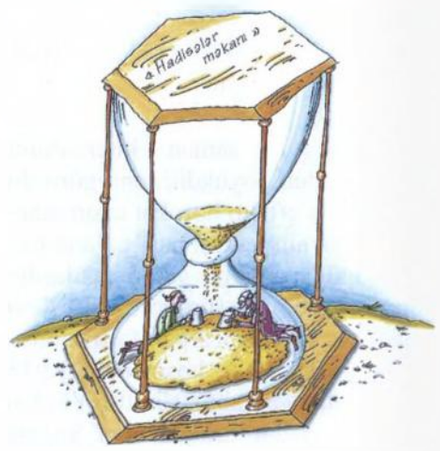
Minkovskiyə görə, interval aşığadakı kimi yazılırdı:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2,$$

burada x_1, x_2, x_3 – həmin x, y, z koordinatlarıdır və $x_4 = ict$ (i – xəyali vahiddir, $i^2 = -1$). Burada mühüm olan odur ki, Minkovski düsturlarında və (2) düsturunda müsbət və mənfi kvadratların sayları arasındakı fərq eynidir. Bununla zahirən fəza koordinatları ilə zaman arasında "bərabərhüquqluluğa" nail olunmuşdur, lakin bu sırf formal xarakter daşıyırdı: psevdoevklid həndəsəsilə dördölçülü Evklid həndəsəsi arasında böyük fərq vardır. Hazırda Minkovskinin işarələmələrindən az istifadə edirlər, baxmayaraq ki, nəzəri fizikada onlar əlverişli olur.

Məlum olduğu kimi, üçölçülü Evklid fəzasında iki yaxın nöqtə arasındakı məsafənin kvadratı aşağıdakı ifadəyə bərabərdir:

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2, \qquad (1)$$



burada dx, dy, dz – iki nöqtənin koordinatları fərqidir. Kökü Pifaqor teoreminə gedib çıxan bu düstur Evklid həndəsəsinin "baş düsturudur". İstənilən dekart koordinat sistemində, istər sürüşdürülmüş, döndərilmiş olsun və ya hərəkət etsin – məsafə bu düsturla ifadə olunur və eyni bir qiymətə malikdir. Lakin Minkovski həndəsəsində "baş düstur" – *iki hadisə arasında interval* adlanan kəmiyyətin kvadratı aşağıdakı şəkildədir:

SÜRƏTLƏRİN RELYATİVİSTİK FƏZASI

1826-cı ildə rus riyaziyyatçısı Nikolay İvanoviç Lobaçevski Kazan universitetinin fizika-riyaziyyat fakültəsindəki məruzəsində Evklid həndəsəsindən fərqli bir həndəsəni şərh etdi və bu "xəyali" həndəsənin real aləmlə əlaqəsinə dair sual qoydu. Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi yaradıldıqdan sonra suala cavab alındı.

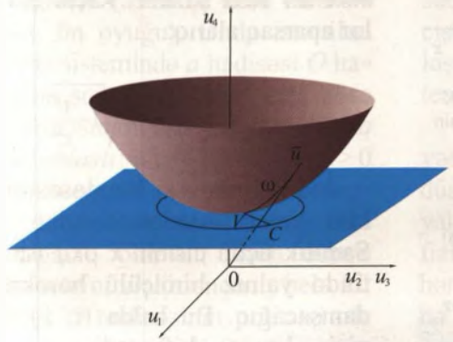
1910-cu ildə xorvat riyaziyyatçısı Vladimir Variçak (1865-1942) relyativistik sürətlərin toplanması ilə Lobaçevski fəzasında parçaların toplanması arasında analogiya olduğunu göstərdi. Lobaçevski həndəsəsinin dilindən istifadə etməklə, o, Lorens çevrilməsini sadələşdirdi və müxtəlif relyativistik effektləri hesabladı. Rus həndəsəçisi və mexaniki Aleksandr Petroviç Kotelnikov (1865-1944) daha dərin tədqiqatları yerinə yetirdi. 1923-cü ildə proyektiv həndəsə metodları əsasında o, relyativistik mexanikada Lobaçevski həndəsəsinin tam dəqiq realizasiyası olan sürətlər fəzası anlayışını daxil etdi.

Sürətlər fəzası aşağıdakı kimi qurulur. Hər hansı bir inersial hesablama sistemini (İHS) fiksə edirlər; sürətlər fəzasında o, koordinat başlanğıcı olaraq qəbul edilmiş nöqtəyə uyğun olacaqdır. Qalan hesablama sistemləri çoxluğundan yalnız verilmiş hesablama sisteminə nəzərən eyni bir üçölçülü $\vec{v}$ sürətilə hərəkət edənləri seçirlər. Seçilmiş İHS-lərini öz aralarında eyniləşdirirlər və sürətlər fəzasında müəyyən bir nöqtəyə uyğun qoyurlar: bu fəzada həmin nöqtənin dekart koordinatları $\vec{v}$ sürətinin $(v_x; v_y; v_z)$ komponentləri olacaqdır.

Real cisimlərin sürəti c işıq sürətini aşmadığına görə bütün belə nöqtələrin $(v_x; v_y; v_z)$ koordinatları

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \leqslant v_z^2 \qquad (1)$$

bərabərsizliyini ödəyəcəkdir, yəni sürətlər fəzası c radiuslu kürənin içərisi, daxili olacaqdır. Bu fəzada bir nöqtənin digərindən uzaqlıq ölçüsü uyğun hesablama sistemlərinin nisbi sürətidir.



Üçölçülü fəzada $\vec{v}$ sürətilə baş verən bərabərsürətli hərəkətə dördölçülü Minkovski fəzasında dünya xətti uyğundur ki, dördölçülü $\vec{u}$ sürəti bu xətt boyunca yönəlmişdir. Bu vektorun u_1, u_2, u_3 və u_4 komponentləri

$$u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 - u_4^2 = (ic)^2, \qquad (2)$$

münasibətini ödəyir, burada i – xəyali vahiddir. Bu tənliklə dördölçülü Minkovski fəzasında ikioyuqlu hiperboloid və ya həndəsəçilərin dediyi kimi, xəyali ic radiuslu sfera təsvir olunur. Hiperboloidin yuxarı oyuğunu ümumi koordinat başlanğıcından çıxan dördölçülü $\vec{u}$ sürət vektorlarının ucları əmələ gətirir.

Hələ Lobaçevski göstərmişdi ki, xəyali radiuslu sfera üzərində qeyri-evklid həndəsəsinin onun tərəfindən kəşf olunmuş növü reallaşır. Ona görə də (2) hiperboloidi üzərində məsafələr (ω) Lobaçevski həndəsəsinin düsturları ilə təyin olunur. Aşağıdakı proyektiv çevrilmələrin

$$\frac{v_x}{c} = \frac{u_1}{u_4}; \frac{v_y}{c} = \frac{u_2}{u_4}; \frac{v_z}{c} = \frac{u_3}{u_4}$$

köməyilə (2) hiperboloidinin yuxarı oyuğunun nöqtələrinə sürətlər fəzasının (1) bərabərsizliyini ödəyən nöqtələri uyğun qoyulur. Beləliklə, sürətlər fəzasında Lobaçevski həndəsəsi reallaşır.

Növbəti addımı rusiyalı fizik Nikolay Aleksandroviç Çernikov (1928-ci il) atdı; o, Lobaçevski həndəsəsini yüksək enerjilər fizikasında tətbiq etdi. O göstərdi ki, Lobaçevski həndəsəsində çevrənin uzunluğunun, dairənin sahəsinin, üçbucağın bucaqlarının defektinin düsturları dəqiq olaraq relyativistik zərrəciyin impulsunun, kinetik enerjisinin ifadələrinə və xüsusi nisbilik nəzəriyyəsində kütlə defektinin $\Delta E = \Delta mc^2$ düsturuna uyğundur.

Sürətlər fəzası zərrəciklərin toqquşmasına aid məsələlərin həlli zamanı xüsusilə effektivdir. Dünyanın nəhəng laboratoriyalarında – Protvinoda və Dubnada (Rusiya), Brukheyvendə (ABŞ) və Cenevrədə (İsveçrə) elementar zərrəciklərin səpilməsinə aid yüz minlərlə eksperimentlərin məlumatları hər gün ən mükəmməl kompüterlərin köməyilə təhlil olunur. Bu cür hesablamaların əsasında Lobaçevski həndəsəsinin metodları ilə həll olunan toqquşmalar kinematikasının məsələləri durur. Fiziklər əmindirlər ki, əgər XIX əsrdə qeyri-evklid həndəsələri yaranmasaydı, onda relyativistik zərrəciklərin kinematikasını öyrənməklə, onları kəşf edərdilər.

Sürətlər fəzası (müstəvisi) $\vec{u}$ – sürət vektorlarının uclarının əmələ gətirdiyi hiperboloidin (xəyali radiuslu Lobaçevski sferasının) yuxarı oyuğuna toxunandır.

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (2)$$

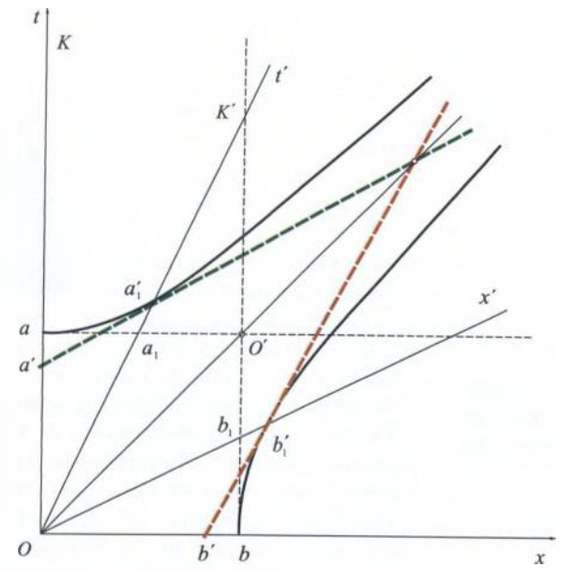
və ya (1) düsturunu nəzərə alsaq, "baş düstur"

$$ds^2 = c^2dt^2 - dl^2 \quad (2a)$$

şəklinə düşər, burada c – işıq sürəti, t isə hadisələr arasında keçən zamandır.

Dekartın fəza koordinatları olan inersial hesablama sistemini götürək və onun köməyilə (2) düsturuna əsasən hadisələr arasındakı intervalı hesablayaq. Məlum olur ki, istənilən başqa inersial hesablama sisteminə keçərkən, həmin hadisələr arasındakı interval dəyişmir.

Bu çox mühüm nəticədir, ona görə də ona ətraflı baxaq. Fəza-zamanın



Başqa hesablama sisteminə keçəndə dünya xətti dəyişir. Əgər K' sistemi K sisteminə nəzərən x oxu boyunca v sürətilə hərəkət edirsə, onda hadisənin K-ya nəzərən $(t; x)$ koordinatları həmin bu hadisənin K'-ə nəzərən $(t'; x')$ koordinatları ilə Lorens çevrilmələri vasitəsilə bağlıdır

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad t = \frac{t' + x'v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4)$$

Əmin olmaq olar ki, K' sisteminin oxları K sisteminə nəzərən dönmüş düz xətlərdən ibarətdir, lakin yeni oxlar arasındankı bucaq düzbucaq deyil. Xüsusi halda, Minkovski həndəsəsi Evklid həndəsəsindən bununla fərqlənir.

həm klassik, həm də yeni nəzəriyyəsində ətalət qanunu əsas hesab olunur. Klassik nəzəriyyədə bu qanuna daha bir postulat əlavə etmək olar: zaman aralıqları və məsafələr bütün inersial hesablama sistemlərində eynidir və bu, *sürətlərin adi vektorial toplanması qanununu* çıxarmağa imkan verir. Relyativistik nəzəriyyədə isə postulat kimi qəbul edilir ki, hadisələr arasındakı interval hesablama sisteminin seçilməsindən asılı deyil (riyaziyyatda buna invariantdır deyirlər); buradan da *sürətlərin yeni toplanması qanunu* alınır ("Fizikada 1905-ci il inqilabı" məqaləsinə bax). Klassik mexanikada (1) düsturundan çıxan üçölçülü Evklid həndəsəsindən və zamanın "birölçülü" həndəsəsindən istifadə olunur, yeni, relyativistik nəzəriyyədə isə (2) düsturuna əsaslanan dördölçülü psevdoevklid həndəsəsindən istifadə olunur. İstənilən hadisəni təyin edən dörd (t, x, y, z) kəmiyyətləri bu hadisənin 4-koordinatları adlanır.

İntervalın invariantlığından maraqlı nəticələr alınır. Sabit v sürətilə hərəkət edən cisim üçün $dl = vdt$, yəni $ds^2 = c^2dt^2 - dl^2 = (c^2 - v^2)\,dt^2$. Əgər həmin cismin sükunətdə olduğu hesablama sisteminə keçsək, onda $ds^2 = c^2dt'^2$. Bu zaman interval dəyişmədiyindən, $c^2dt'^2 = (c^2 - v^2)\,dt^2$. Cisimlə birlikdə hərəkət edən saatla ölçülən vaxt dt' *məxsusi vaxt* adlanır. Kiçik çevirmələr aparsaq alarıq:

$$dt' = \frac{ds}{c} = dt\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3)$$

İndi Minkovski həndəsəsinin Evklid həndəsəsindən fərqinə baxaq. Sadəlik üçün cismin x oxu istiqamətində yalnız birölçülü hərəkətindən danışacağıq. Bu halda (t, x) müstəvisinə baxmaq kifayətdir.

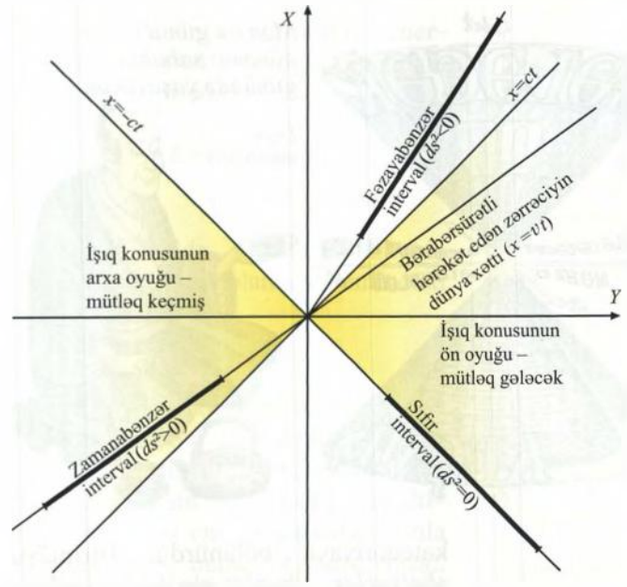
Minkovski müstəvisinin hər bir nöqtəsi fəzanın verilmiş nöqtəsində verilmiş zaman anında baş verən hadisələri birqiymətli təyin edir. Cismin hərəkətinə kəsilməz hadisələr ardıcıllığı kimi baxmaq olar və bu ardıcıllıq Minkovski müstəvisində müəyyən bir xətlə təsvir olunur. Bu xəttə cismin dünya xətti deyilir.

Əgər cisim (0; 0) nöqtəsindən sabit v sürətilə hərəkət edirsə, onda onun dünya xətti $x = vt$ düz xətti şəklindədir və limit sürətinin mövcudluğu prinsipinə görə $x = ct$ düz xəttindən yuxarıda və $x = -ct$ düz xəttindən aşağıda yerləşə bilməz və ya adətən, deyildiyi kimi, işıq konusunun hüdudlarında yerləşir.

Əgər cisim v sürətilə (x, y) müstəvisində hərəkət edirsə, onda $x^2 + y^2 = v^2t^2$ (sürət $v = c$, maksimal olduqda, $x^2 + y^2 = c^2t^2$) olur ki, bu da konik səthin tənliyidir. Ona görə də işıq konusu haqqında danışırlar. Bir az fantaziya olsa, dördölçülü fəzada da konus təsəvvür etmək olar, bu konusun tənliyi $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$.

İndi iki hadisə arasındakı mümkün qarşılıqlı əlaqələri təsnif edək. Minkovski müstəvisində koordinat başlanğıcına uyğun hadisəni O ilə, hər hansı digər hadisəni isə a ilə işarə edək. Hadisələr arasındakı əlaqələrin üç ciddi müxtəlif variantı vardır:

a) a hadisəsi işıq konusu hüdudlarında yerləşib ($ds^2 \geqslant 0$), həm də $t > 0$ (konusun ön oyuğu). Onda istənilən hesablama sistemində a hadisəsi O hadisəsindən sonra baş verir. Ona görə də işıq konusunun ön oyuğunu *mütləq gələcək oblastı* adlandırırlar, $ds^2 > 0$ intervalı haqqında isə *zamanabənzər* interval kimi danışırlar. Həmişə elə cisim tapmaq olar ki, onun dünya xətti O və a-nı əlaqələndirir, belə ki, a hadisəsi O hadisəsinin nəticəsi ola bilər;

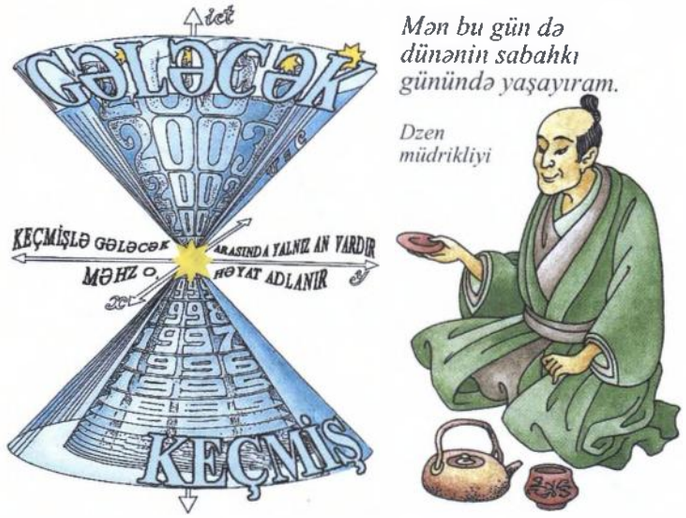


b) a hadisəsi konusun arxa oyuğunda yerləşib, burada da $ds^2 \leqslant 0$ (zamana bənzər interval), lakin $t < 0$. İstənilən hesablama sistemində a hadisəsi O hadisəsindən əvvəl baş verir, yəni arxa oyuq *mütləq keçmiş oblastıdır*. Burada, əksinə, O hadisəsi a hadisəsinin nəticəsi ola bilər;

c) a hadisəsi konusun xaricində yerləşib. Bu halda $ds^2 < 0$, özü də bəzi hesablama sistemlərində a hadisəsi O hadisəsindən sonra, bəzilərində isə əvvəl baş verir. Buna uyğun olaraq, O və a hadisələri səbəb-nəticə əlaqəsinə malik ola bilməz, çünki nə cisim, nə də siqnal işıq sürətindən böyük sürətlə hərəkət edə bilməz. Heç bir cismin dünya xətti bu hadisələri birləşdirə bilməz. Onlar arasındakı interval *fəzayabənzər interval* adlanır.

Minkovski həndəsəsinin əhəmiyyəti heç də psevdoevklid şəkillərlə və düsturlarla bitir. Çox mühümdür ki, yalnız fəza-zaman koordinatları yox, fiziki kəmiyyətlər də dördölçülü həndəsə dilinə "keçirilməlidir". Bu nə deməkdir? Qeyri-relyativistik nəzəriyyədə əsas fiziki kəmiyyətlər iki

Dünya xəttini trayektoriya ilə qarışdırmaq olmaz! Trayektoriya cismin fəzada üzərilə hərəkət etdiyi yoldur, dünya xətti isə fəza koordinatlarının zamandan asılılıq qrafikidir.



Mən bu gün də dünənin sabahkı günündə yaşayıram.

Dzen müdrikliyi

kateqoriyaya bölünürdü. Birincisi, *skalyarlar* – bunlar elə kəmiyyətlərdir ki, qiymətləri bir ədədlə (komponentlə) verilir və istənilən koordinat sistemində eynidir (məsələn, iki nöqtə arasındakı məsafə, qazın təzyiqi, temperaturu), ikincisi, *vektorlar* – bunlar üç komponentlə verilən kəmiyyətlərdir; bir dekart koordinat sistemindən digərinə keçəndə onlar nöqtənin dekart koordinatlarının hesablandığı eyni düsturlarla hesablanır (məsələn, sürət, qüvvə, elektrik sahəsinin intensivliyi). Relyativistik nəzəriyyənin dördölçülü həndəsə ilə əlaqəsi var. Ona görə də, fiziki kəmiyyətlər də başqa cür təsnif edilir. Bütün inersial hesablama sistemlərində qiymətləri eyni olan 4-skalyarlar (interval kimi) və dörd komponentlə verilən kəmiyyətlər – 4-vektorlar; bir hesablama sistemindən digərinə keçəndə onlar, hadisələrin 4-koordinatlarının çevrildiyi eyni düsturlar vasitəsilə çevrilir. Daha mürəkkəb riyazi anlayışlardan – iki ranqlı *tenzorlar* adlanan kəmiyyətlərdən, yəni $4 \times 4 = 16$ komponentdən ibarət kəmiyyətlərdən və daha yüksək ranqlı tenzorlardan ($4 \times 4 \times 4$ – komponentli və s.) da geniş istifadə edirlər.

Relyativistik həndəsəni çox vaxt *Minkovski fəza-zamanı* adlandırırlar. Bu həndəsənin yaradıcısı həyatının son illərini klassik fizikanın başlıca bölmələrində: hərəkət edən cisimlərin elektrodinamikasında və mexanikada "relyativistik qayda" yaratmağa həsr etdi. David Hilbert gənc Maks Borna Minkovskinin kağızlarını araşdırmağı tapşıranda, o, bir dənə də olsun mətn sözünün və istifadə olunan işarələrə aid heç bir izahatın olmadığı, düsturlarla dolu olan yüzlərcə səhifə aşkar etdi... Çox vaxt elmi estafetin ötürülməsi məhz bu cür baş verir. Mənası dərk olunmuş səhifələr German Minkovskinin sonuncu çap işinin əsasını təşkil etdi və eyni zamanda fizika aləminə Getingenin digər yetişdirməsinin – Maks Bornun universal istedadının çox cəhətlərindən birini açıb göstərdi.

RELYATİVİSTİK MEXANİKA

Nyuton dinamikası "kütlə", "qüvvə", "enerji", "impuls" anlayışlarına istinad edir. Başlanğıc üçün kütlənin nə olduğunu dəqiqləşdirək. Yaxşı məlumdur ki, cismin kütləsi böyük olduqca, onu hərəkətə gətirmək bir o qədər çətindir. Qaçan iki adam toqquşanda daha azkütləli olan digərindən daha çox kənara sıçrayır. Kütləni necə ölçək? Nyutonun qanunlarına görə, iki cismin qarşılıqlı təsiri zamanı

$$m_1 a_1 = m_2 a_2, \qquad (1)$$

burada m_1, m_2 – cisimlərin kütlələri, a_1, a_2 – onların qarşılıqlı təsir zamanı məruz qaldıqları təcillərdir. Əslində bu, kütlənin təyini üçün bir açardır: iki cismin kütlələri nisbəti, bu cisimlərin qarşılıqlı təsir zamanı qazandıqları təcillərinin tərs nisbətilə ölçülür. Bütün başqa cisimləri müqayisə edəcəyimiz cismi, yəni kütlə vahidini seçmək qalır. Hazırda kütlə vahidi olaraq 1 kq



– Beynəlxalq ölçü və çəki bürosunda saxlanan platin-iridium çəki daşının kütləsini qəbul edirlər. Relyativistik nəzəriyyə kütlənin həmin tərifindən istifadə edir, lakin aşağıdakı düzəlişlə birlikdə: ölçmələr qarşılıqlı təsirdə olan cisimlərin kiçik sürətlərində yerinə yetirilməlidir. Böyük dəqiqlik üçün relyativistik nəzəriyyədə bu kəmiyyəti *sükunət kütləsi* adlandırırlar. Qeyd etmək vacibdir ki, kütlə cismin daxili xarakteristikasıdır, onun qiyməti, onun ölçülməsi üsulundan (hansı cisimlə qarşılıqlı təsirinə görə) asılı deyil.

Nyuton mexanikasında olduğu kimi, relyativistik mexanikada da enerji və impuls – izolə olunmuş (digərlərilə qarşılıqlı təsirdə olmayan) cisimlər sistemi üçün qiymətləri zamana görə dəyişməyən kəmiyyətlərdir.

Cisimlər sisteminin impulsu – bu sistemi əmələ gətirən ayrı-ayrı cisimlərin impulslarının vektorial cəmidir, hər bir cismin $\vec{p}$ impulsu isə onun $\vec{v}$ sürəti və m sükunət kütləsilə aşağıdakı düstur vasitəsi ilə ifadə olunur.

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (2)$$

burada c – işıq sürətidir.

Relyativistik nəzəriyyədə ən maraqlı şey enerjilə bağlıdır. Klassik nəzəriyyədə olduğu kimi, burada da cisimlər sisteminin enerjisi ayrı-ayrı cisimlərin enerjisindən və onların qarşılıqlı təsirinin enerjisindən ibarət olur.

Ayrıca bir cismin (zərrəciyin) enerjisini relyativistik nəzəriyyə aşağıdakı ifadə ilə təsvir edir:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (3)$$

Xüsusi halda, cismin sükunətdə olduğu ($v = 0$) hesablama sistemindəki enerjisi

$$E = mc^2 \qquad (4)$$

olur. Bu, yəqin ki, nisbilik nəzəriyyəsinin ən məşhur düsturudur. Doğrudan da, bu düsturun əhəmiyyəti çox böyükdür: atom bombasının yaradılması da, nüvə energitikası da onunla bağlıdır. Bax, budur ən sadə misal. Tutaq ki, m kütləli cisim, bir-birinə nəzərən sükunətdə, lakin öz aralarında qarşılıqlı təsirdə olan iki m_1 və m_2 hissələrindən ibarətdir. Bu hissələrin enerjiləri: $E_1 = m_1 c^2$ və $E_2 = m_2 c^2$. Lakin bütün cismin enerjisi $E = E_1 + E_2 + \Delta E$-yə bərabərdir, burada ΔE – qarşılıqlı təsir enerjisidir, yəni bütün cismin kütləsi onun tərkib hissələrinin kütlələri cəmindən

Relyativistik nəzəriyyədə enerji və impuls birlikdə 4-vektor əmələ gətirir: bu vektorun bir komponenti işıq sürətinə bölünmüş enerjidir: qalan üç komponent isə impulsun komponentləridir. Ona görə də 4-enerji-impuls vektoru haqqında və ya sadəcə, $p = (E/c, \vec{p})$ 4-impulsu haqqında danışırlar.



Atom bombasının partlayışı.

$$\Delta m = m - m_1 - m = \frac{\Delta E}{c^2} \qquad (5)$$

qədər böyükdür. Əksinə, zərrəcik iki zərrəciyə parçalananda və bunların yekun kütləsi ilkin kütlədən Δm qədər azdırsa, onda $\Delta E = \Delta m c^2$ qədər enerji ayrılır. ^{235}U və ya ^{235}Pu nüvələrinin neytronların təsiri altında parçalanmasının (bunun nəticəsində qəlpələrin kütlələrinin cəmi ilkin kütlədən kiçik olur) nə üçün nüvə partlayışına səbəb olduğu aydındır. 1 kq uran parçalananda 10^{14} C-a bərabər enerji ayrılır, bu isə 1 kq trotilin partlayışı zamanı əmələ gələn enerjidən onlarca milyon dəfə böyükdür. Bir ton urandan Mingəçevir SES-in tam on iki il ərzində verdiyi enerjidən çox enerji almaq olar. Deyterium tritiumla birləşən zaman son məhsulların ümumi kütləsi ilkin nüvələrin ümumi kütləsindən kiçik olur, ona görə də belə reaksiya termonüvə partlayışı ilə tamamlanır ki, bu da uran partlayışından daha güclüdür (1 kq üçün hesabı ilə).

Bəzən belə deyirlər: "Kütlə enerjiyə çevrilir". Bu, doğru deyil. "Kütlə" və "enerji" müxtəlif anlayışlardır. Belə demək lazımdır ki, enerjinin bir forması (kütləli cismin sükunət enerjisi) başqa formasına (məsələn, şüalanma enerjisinə) çevrilir.



(2) və (3) düsturlarını müqayisə etdikdə çox mühüm ifadə alınır:

$$\vec{p} = \frac{E\vec{v}}{c^2}. \qquad (6)$$

Məsələ ondadır ki, relyativistik impulsun və enerjinin (2) və (3) ifadələri $v = c$ olduqda mənalarını itirir. Bu deməkdir ki, kütləsi sıfırdan fərqli olan cisim işıq sürətilə hərəkət edə bilməz. Yox, əgər $m = 0$ isə (məsələn, fotonlar üçün), onda "0 : 0" tipli qeyri-müəyyənlik yaranır ki, onu da açmaq lazımdır. Lakin (6) düsturu kütləsi sıfır olan zərrəciklərə də tam tətbiq oluna bilər:

$$p = \frac{E}{c}. \qquad (7)$$

Nyutonun ikinci qanununun qüvvənin təyini kimi qəbul etmək olar, lakin onun daha universal şərhi var ki, ondan da, yeri gəlmişkən, Nyutonun özü istifadə etmişdir: cismə təsir edən qüvvə cismin impulsunun dəyişmə sürətinə bərabərdir, yəni

$$\vec{F} = d\vec{p}/dt,$$

burada $d\vec{p}$ – impulsun dt müddəti ərzində dəyişməsidir. Birinci tərifdən fərqli olaraq, ikinci tərif dəyişən kütləli cisimlərə (o cümlədən arasıkəsilmədən yanacaq sərf edən raketlərə) tətbiq oluna bilər. Baxılan tərif relyativistik mexanikada da 3-qüvvə üçün doğrudur.

RELYATİVİSTİK ELEKTRODİNAMİKA

Fizika inkişaf etdikcə alimlər qarşılıqlı təsirlərin yeni-yeni növlərini aşkar etdilər, lakin son nəticədə onların hamısı dörd qarşılıqlı təsirə: qravitasiya,

TAXİONLAR VƏ DİGƏR EKZOTİK ZƏRRƏCİKLƏR

Relyativistik nəzəriyyənin meydana çıxması ilə aydın oldu ki, müsbət kütləli zərrəciklərlə bərabər, digər tipli – sıfır kütləli zərrəciklər də mövcud ola bilər. Bunlar foton, qraviton (bu hələ aşkar olunmayıb), habelə, ola bilsin, neytrinonun üç növüdür. Lakin relyativistik obyektlər bunlarla bitmir.

Bu məsələyə daha ümumi nöqteyi-nəzərdən baxaq. Məlumdur ki, əgər inersial hesablama sistemində koordinat başlanğıcının yerini dəyişdirsək, oxların fəza fırlanmasını və digər inersial hesablama sisteminə keçidi yerinə yetirsək, onda iki hadisə arasındakı intervalın qiyməti dəyişməyəcəkdir. Bütün bu çevrilmələrin məcmuyu Puankare qrupu adlanır.

Riyazi dildə desək, interval Puankare qrupunun invariantıdır. Fəza-zamanın 4-ölçülü həndəsəsi baxımından yalnız 4-skalyarlar (interval, kütlə), 4-vektorlar (sürət, impuls) və s. fiziki mənaya malik ola bilər. Adi qeyri-relyativistik enerji E, 3-impuls $\vec{p}$, 3-sürət $\vec{v}$ anlayışları müstəqil fiziki mənalarını itirir. $(E/c, \vec{p})$ 4-enerji-impuls vektorunun komponentlərindən intervala analoji olan kombinasiya tərtib etmək olar; bu kombinasiya da invariant (4-skalyar) olacaqdır:

$$P = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2.$$

"Nisbilik fizikası" məqaləsində verilmiş (2), (3) düsturlarının köməyilə P-nin qiymətini hesablamaq çətin deyildir:

$$P = m^2 c^2.$$

Adi zərrəciklər üçün $P \geqslant 0$. Lakin elə obyektlər təsəvvür etmək olar ki, onlar üçün P-invariantı $P \leqslant 0$ olsun. Əgər c^2 vuruğunun müsbət olmasına şübhə yaranmasa da, heç bir relyativistik qanun kütləsi $m^2 < 0$ olan zərrəciyin, yəni xəyali kütləli zərrəciyin mövcudluğuna dair fərziyyə irəli sürməyi qadağan etmir. Bu cür hipotetik obyektlər taxionlar (*yun.* "taxis" – "cəld") adlanır və onlar işıq sürətindən böyük sürətlərlə hərəkət edə bilər. Əgər bir inersial hesablama sistemində $v > c$ isə, onda istənilən digər sistemdə də $v' > c$ olacaqdır; elə hesablama sistemləri də mümkündür ki, onlarda taxionun sürəti sonsuzdur. Bununla barışmaq olardı, əgər taxionların fərz olunan mövcudluğu səbəbiyyət prinsipinə zidd olmasaydı. Daha sadə desək, hər hansı bir hesablama sistemində taxion fəzanın müəyyən bir nöqtəsindən buraxılırsa, hər hansı vaxtdan sonra başqa nöqtədə udulursa, onda elə hesablama sistemi



də tapılacaqdır ki, bu sistemdə hələ mövcud olmayan taxion əvvəlcə udulmalı və bax bundan sonra buraxılmalıdır. İnsan zəkası buna qarşı çıxır və fiziki eksperimentlər də sübut edir ki, belə şey olmur.

Başqa bir vəziyyət təsəvvür edək. Kainatda iki paralel dünya mövcuddur: biri adi zərrəciklərdən, digəri isə taxionlardan ibarətdir.

Səbəbiyyət prinsipi sayəsində nə informasiya, xüsusən də, nə maddə bir dünyadan digərinə ötürülmür. Və biz heç vaxt taxion adamlar haqqında, onlar da bizim haqqımızda heç nə bilməyəcəyik.

Digər ekzotik variantlar da var. Məsələn, mənfi kütləli zərrəciklər təsəvvür etmək olar. Əks işarəli kütlələrə malik zərrəciklər qarşılıqlı təsir nəticəsində eyni bir tərəfə uçacaqlar!

Əlbəttə, bunabənzər heç bir şey heç zaman müşahidə olunmayıb, lakin birdən bu, yenə də bəlkə, haradasa var? Ən sadə cavabı termodinamika verir.

Əgər mənfi kütləli heç olmasa bir zərrəcik mövcud olsaydı, onda onun enerjisi istənilən qədər böyük mənfi qiymətə malik ola bilərdi. Belə olduqda, termodinamik proseslər nəticəsində belə zərrəcik Kainatın bütün enerjisini özünə sorub çəkərdi və zərrəciyin özündən başqa heç nə – nə Yer, nə Günəş olmazdı. Bu sualın cavabının daha bir variantı bax budur: "Hələ heç nəyin olmadığı bir vaxtda, nə var idi?" və ya Böyük partlayış anına qədər hadisələrin mümkün ssenarisi necə olmuşdur? ("Universal problem: Kainatın təkamülü" məqaləsinə bax.)



elektromaqnit, güclü və zəif qarşılıqlı təsirlərə gətirildi. Elektromaqnit qarşılıqlı təsir haqqında danışaq, qalan qarşılıqlı təsirlərə uyğun fəsillərdə ətraflı baxılır.

Frenelin, Faradeyin, Maksvellin, Hersin, Lorensin və bir çox başqa alimlərin zəhmətləri sayəsində elektromaqnetizmin, optikanı daxil edən, vahid nəzəriyyəsi yaradıldı. Elektrodinamikanın tənliklər sisteminə iki növ tənlik daxildir. Birinci növ – xüsusi törəməli diferensial tənliklər Maksvell tənlikləridir. Onların sol tərəfində elektrik və maqnit sahələrinin intensivliklərinin fəzada və zamanda dəyişməsi, sağ tərəfində isə yüklərin sıxlıqları və hərəkət sürətləri durur. İkinci növ adi diferensial tənliklərdir, onların sol tərəfində yüklü zərrəciklərin impulslarının dəyişmə sürətləri, sağ tərəfində isə Lorens qüvvəsi, yəni elektrik və maqnit sahələri tərəfindən yüklərə təsir edən qüvvə durur. Elektrodinamikanın tənliklər sistemi yüklərin hərəkətini və sahələrin konfiqurasiyasını onların qarşılıqlı təsiri zamanı tam hesablamağa imkan verir.

Bununla belə, burada heç də hər şey fizikləri qane etmirdi. Nəzəriyyə belə bir fərziyyəyə əsaslanırdı ki, elektromaqnit dalğaları efirin rəqslərindən ibarətdir, lakin eksperimentlər isə onu aşkara çıxarmırdı. Vəziyyətin özünü yeni dildə təsvir etmək olar. Klassik fizikada zərrəciklərin hərəkət tənlikləri Qalileyin nisbilik prinsipi ilə uzlaşır. Bax, Maksvell tənlikləri əzəldən Puankare-Eynşteyn nisbilik prinsipinə uyğun olmuşdur, baxmayaraq ki, bu prinsipin olduğunu Maksvell heç xəyalına da gətirmirdi. Çıxış yolu Lorens, Puankare və Eynşteyn tərəfindən tapıldı.

XIX əsr elektrodimakasının bütün nailiyyətləri toxunulmaz qaldı. Onlardan istifadə edərkən yeganə bir şeyin qayğısına qalmaq lazımdır; o da bir inersial hesablama sistemindən digərinə keçid zamanı fiziki kəmiyyətlərin düzgün hesablanmasıdır.

Fizikada həmişə olduğu kimi, müxtəlif növ ideyaların toqquşması xaosa yox, əksinə, dünyanın mənzərəsinin zənginləşməsinə gətirib çıxardı. Nyuton mexanikası ilə Maksvell elektrodinamikasının toqquşmasının nəticəsi fəza və zaman haqqındakı adi, gündəlik təsəvvürlərə yenidən baxmağa imkan verən son dərəcə gözəl bir nəzəriyyə oldu. Fizikanın sonrakı 100 illik inkişafı göstərdi: təbiət bizə həllolunmaz məsələlər təklif etmir. Hər halda, bizim bildiklərimiz, bildiyimiz və biləcəyimiz təbiət hadisələrini dərk etməyə hələlik insan ağlı çatır.

HENDRİK ANTON LORENS

Kiçik ölkə olan Hollandiya (rəsmi adı Niderland Krallığıdır) bütün dünyada təkcə ən parlaq qərənfillərilə, mənzərəli kanalları ilə və yel dəyirmanları ilə məşhur deyildir. Bu ölkə "hər adambaşına düşən Nobel laureatlarının sayına" görə dünyada ilk yerlərdən birini tutur. Hollandiyalılardan ən nüfuzlu elmi mükafata birinci layiq görülən (1902-ci ildə, mükafatın təsis edilməsindən sonra ikinci ildə) Hendrik Anton Lorens olmuşdur. Onu haqlı olaraq klassik fizikanın sonuncu mogikanı (nümayəndəsi) adlandırırlar.

Məlum deyildir ki, Lorensin əcdadlarını – Reynətrafı Almaniyadan olan əkinçiləri – Hollandiyaya köçməyə nə məcbur etmişdir. Burada, 1853-cü il iyulun 18-də Arnem şəhərində Gerrit Frederik Lorensin ailəsində Hendrik Anton doğuldu. Bu kəndli balasının və məşhur fizikin... öz ölkəsində, həddən çox suyun və həddən az şumluq torpağın olduğu bir ölkədə, əkinçiliyin inkişafına verdiyi pay yaxşı məlumdur.

1918-ci ildə Niderland hökuməti 1282-ci il daşqını nəticəsində əmələ gəlmiş daxili Zeyder-Ze dənizinin qismən qurudulmasına dair məsələni öyrənməyi qərara aldı. Layihə ilkin mürəkkəb hesablamalar tələb edirdi. Bütün fiziki və coğrafi faktorlar məcmuyunu nəzərə almaq, nəhəng su kütləsinin yerdəyişməsinin bütün mümkün nəticələrini nəzərdə tutmaq lazım idi. Ona görə da hökumət bu məsələni həll etmək üçün məhz nüfuzlu və mürəkkəb hesablamalar aparmaq bacarığı ilə məşhur olan alimi dəvət etdi. 65 yaşlı Lorens komitəyə rəhbərlik edirdi, burada onun rəhbərliyi altında 20-dən artıq mühəndis çalışırdı. O, yeni riyazi modellər və metodlar təklif etdi, özü ədədi hesablamalarla məşğul olurdu. Bənd Hollandiyanın şimal hissəsini Viringen adası ilə birləşdirən zaman, suyun səviyyəsi layihədəkindən cəmisi bir neçə faiz





Zeyder-Zeni kəsən (bağlayan) 32 km uzunluqlu damba.

fərqlənmişdi. Hendrik Lorensin riyazi metodları 15 mln quldenə – o illərdə ölkənin illik büdcəsilə müqayisə olunan qədər məbləğə qənaət etməyə imkan verdi. Hollandiyanın su xidməti indiyədək bu metodları tətbiq edir.

XOŞBƏXT TƏSADÜFLƏR

Hollandiyada müasir tipli orta təhsil müəssisələri meydana çıxan vaxt Lorens ibtidai məktəbi təzəcə bitirmişdi və təhsilini davam etdirmək istəyirdi. Onun kimya müəllimi atomistik ideyanın (1860-cı ildə heç də hamı tərəfindən qəbul edilməmiş) tərəfdarı idi. Bəlkə buna görədir ki, Hendrik Lorensin oxuduğu sinifdən iki məzun fizika professoru oldu. Əgər nəzərə alsaq ki, cəmi üç şagird var idi, onda bu pis nəticə deyildi. Lorens 17 yaşında Leyden universitetinə daxil oldu, cəmi yalnız bir il sonra (!) elmlər namizədi diplomunu aldı. O, artıq 22 yaşında dissertasiya müdafiə edərək, fəxri magna cum laude (*lat.* "fərqlənmə ilə") əlavəsi ilə birlikdə elmlər doktoru oldu.

Doktorluq dissertasiyası üçün mövzunu 20 yaşlı Lorensin özü Leyden universitetinin fizika laboratoriyasının kitabxanasında tapmışdı. Kitabxanaya

1990-cı illərin əvvəllərində Yaponiyanın və ABŞ-ın aparıcı texnoloji kompaniyaları rəhbərlər üzərinə qoyulan tələblərdən biri olaraq elmlər doktoru elmi dərəcənin olmasını müəyyən etmişlər. Üstünlük nəzəri və riyazi fizika sahəsindəki mütəxəssislərə verilir. Hesab etmək olar ki, kadrların bu prinsiplə seçilməsi hələ Lorens tərəfindən Zeyder-Zedə damba (torpaq bənd) tikintisi zamanı istifadə olunmuşdur.

◄ Hendrik Anton Lorens.



H.Lorensin, A.Eynşteynin və G.Minkovskinin "Nisbilik prinsipi" adlı işlər toplusunun üz qabığı. Leypsiq-Berlin. 1922-ci il.

Maksvellin çap işləri müntəzəm daxil olurdu. Bu işlərdə tamamilə yeni ideyalar inkişaf etdirildiyindən və fiziklər üçün o qədər də aydın olmayan riyazi aparatdan istifadə olunduğundan, onları çox az adam oxuyurdu və içərisində həmin işlər olan zərflərin bir hissəsi açılmamış qalırdı. Gənc Lorensə hətta onları özü ilə Ameməə aparmağa icazə də verilmişdi; burada o, universitetə son qəbul imtahanlarına hazırlaşırdı. Lorens kitablarla individual işi, tənha düşünməyi və müstəqil hesablamaları kollektiv təlim formalarından – mühazirələrdən, seminarlarından, kollokviumlardan üstün tuturdu. Bu onun həyat stili oldu. Gənc elmlər namizədi eyni zamanda axşam məktəbində dərs deyirdi və Maksvellin elektromaqnit nəzəriyyəsinə uyğun olaraq, işığın qayıtması və sınması haqqında doktorluq dissertasiyası yazırdı.

Lorens öz dissertasiyasında işığın elektromaqnit təbiətinə dair Maksvellin təsəvvürlərini işıq dalğalarının eninə olmasına dair Frenelin təsəvvürlərilə birləşdirdi.

Lorens işığın mexaniki nəzəriyyəsinin çoxdankı probleminin – Maksvell nəzəriyyəsindən istifadə edərək, iki mühiti ayıran sərhəddə sınma və qayıtma qanunlarını almaq probleminin öhdəsindən xeyli asanlıqla gəlməyə müvəffəq oldu. Lakin bundan zamanın ruhuna uyğun nəticə çıxarıldı: Frenel nəzəriyyəsini əsaslandırmaq üçün elektromaqnetizmin mexaniki əsaslandırılmasını tapmaq kifayətdir.

Lorens öz işi ilə fizikləri Maksvell nəzəriyyəsinin üstünlüklərinə inandıra bilmədi (bu nəzəriyyəyə ümumi diqqət sonralar, Henrix Hersin işlərindən sonra cəlb edildi. Hers Maksvell tənliklərinə nəinki müasir riyazi şəkil vermiş, lakin həm də işıq dalğalarının elektromaqnit təbiətini eksperimental olaraq təsdiq etmişdir). Bununla belə, gənc alimi aşkar etdilər: Utrext universiteti ona riyaziyyat kafedrasını, Leyden universiteti isə nəzəri fizika kafedrasını təklif etdi. Lorens Leydenə üstünlük verdi və praktik olaraq bütün qalan həyatını bu kiçik şəhərcikdə keçirdi.

Lorens həmişə sakit, arxayın, dinc həyatın tərəfdarı olmuşdur; belə olduqda onun tənha işləməsi üçün kifayət qədər vaxtı qalırdı. O, ədəbiyyatdan yaxşı məlum olan tipik professor obrazı idi: adi həyatda müdrik, xeyirxah, diqqətcil və eyni zamanda elmi axtarışlarında cəsarətli, yeniliyə can atan. Onun əksər işlərinə fizikanın yeni sahələrində lazımi (kanonik) nizam yaratmaq cəhdi kimi baxmaq olar. Bu işlərin nəticələri çox vaxt fizika cəmiyyəti üçün tam bir kəşf olurdu, daha sonra isə bütün gələcək axtarışlar üçün möhkəm, etibarlı bir bünövrəyə çevrilirdi.

Lorens Niderland fiziki-eksperimentatoru Piter Zeyemanla (1865-1943)

FİTCERALD, YOXSA LORENS?

Hendrik Lorensin müstəsna elmi vicdanlılığını Eynşteynin tələbələrindən biri – Beneş Qoffman tərəfindən söylənilmiş hadisə sübut edir. "Qısalma hipotezinin çapından iki il sonra (1892-ci il) Lorens öyrəndi ki, vaxtı ilə onu Fitcerald təklif edibmiş. Ona haqq qazandırmaq arzusu ilə Lorens soruşmuşdu ki, o, öz ideyasını çap etdiribmi. Cavab məktubunda Fitcefald yazdı ki, bunu etməyib və bununla da birinciliyi Lorensə güzəştə getdi. Lakin Lorens Fitceraldın xidmətini açıq (rəsmi) etiraf etməyə tələsdi və elan etdi ki, Fitcerald ondan asılı olmadan nəinki uzunluğun qısalması hipotezinə gəlib çıxmışdır, həm də, ümumiyyətlə, o, bu hipotezi birinci kəşf edən sayıla bilər".

Bu tarixçənin gözlənilməz sonluğu var. 1967-ci ildə Amerika alimi Stiven Braş müəyyən etdi ki, Fitcerald yanılıbmış! 1889-cu ildə o, məqaləni Science ("Elm") amerikan jurnalına göndərib, jurnal isə həmin anda maliyyə problemlərilə qarşılaşmış və müvəqqəti olaraq öz fəaliyyətini dayandırmışdır. Fitcerald beləcə də hesab etmişdir ki, məqalə çap olunmamış qalmışdır. Lakin yarım ildən sonra jurnal yenidən nəşr olunmağa başlamış və məqalə həmin 1889-cu ildə də, Lorensin nəşr etdirməyindən üç il əvvəl çapdan çıxmışdır. Həmin vaxtdan elmi ədəbiyyatda uzunluğun qısalması hipotezi Fitcerald-Lorens hipotezi adlandırılır.

"...O, ÇEVRİLİŞ ETMİŞDİR..."

O dövrlərdə elektromaqnit nəzəriyyəsinin mahiyyətinə varmağı, nüfuz etməyi aşağıdakı xüsusi vəziyyət çətinləşdirirdi. "Sahənin elektrik və maqnit qüvvələrinə" "yerdəyişmələrlə" eyni səviyyədə ilkin kəmiyyətlər kimi baxılırdı, boş fəza isə dielektrikin xüsusi halı hesab olunurdu. Sahənin daşıyıcısı fəza yox, materiya (maddə) hesab olunurdu. Bu isə o demək idi ki, sahənin daşıyıcısına sürətə malik olmaq xassəsi xasdır ki, onda bu, əlbəttə, "boşluq" (efir) üçün də doğru olmalı idi...

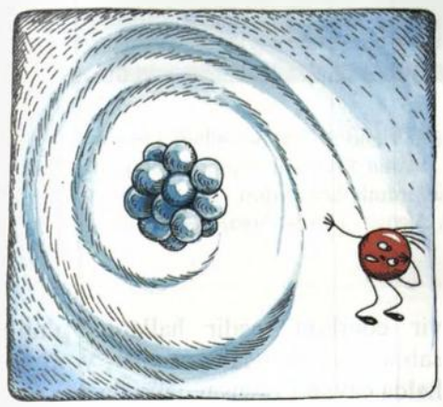
H.A.Lorensin böyük xidməti bu oldu ki, o, çevriliş etdi, həm də ən inandırıcı üsulla. Lorensə görə prinsipial olaraq yalnız boşluqda olan sahə mövcuddur. Atomistik quruluşlu sayılan maddə isə yüklərin yeganə daşıyıcısıdır; maddi zərrəciklər arasında boş fəza – elektromaqnit sahəsi yerləşir və bu sahə zərrəciklərdə oturmuş nöqtəvi yüklərin vəziyyəti və sürətilə yaradılır. Dielektrik xassələri, keçiricilik... müstəsna olaraq, cisimləri təşkil edən zərrəciklər arasındakı mexaniki əlaqələrin xarakterilə şərtlənmişdir...

Əgər bunu Nyutonun sistemilə müqayisə etsək, onda dəyişiklik aşağıdakından ibarətdir: uzağatəsir qüvvələri sahə ilə əvəz olunur, sahə isə həmçinin şüalanmanı da təsvir edir... İndiki nəsildən olan fizik Lorensin əldə etdiyi baxışı yeganə mümkün hesab edir, halbuki, o dövrdə bu fövqəladə cəsarətli addım idi və bunsuz gələcək inkişaf mümkün ola bilməzdi.

(A.Eynşteynin "Yaradıcılıq avtobioqrafiyası" məqaləsindən.)

birlikdə maqnit sahəsində atomların enerji səviyyələrinin və spektral xətlərinin parçalanmasını (sonralar *normal Zeyeman effekti* adlanan effekti) nəzəri olaraq qabaqcadan xəbər verdiklərinə və kəşf etdiklərinə görə aldığı Nobel mükafatı üçün həm özünün elmi fərasətinə, həm də xoş təsadüfə çox borcludur.

Birincisi, Lorens hələ məktəb müəllimi tərəfindən aşılanmış atomistik baxışlara əsaslanaraq, zərrəciklərə dair təsəvvürləri Maksvellin sahə nəzəriyyəsinə qaytarmağı lazım bildi: sahələrin mənbələri kimi, həm də bu sahələrin təsir etdiyi obyektlər kimi o, diskret elektrik yüklərini daxil etdi və onları *elektronlar* adlandırdı. Maksvellin makroskopik nəzəriyyəsini Lorens mikrohadisələrə şamil etdi. Elektromaqnit hadisələri nəzəriyyəsinin Lorens variantına və elektronlar nəzəriyyəsinə uzun ömür qismət oldu. İlk dəfə burada aydın bir surətdə ifadə olunmuşdur ki, sahə və maddə prinsipial olaraq müxtəlif mahiyyətlərdir və sahə maddənin zərrəcikləri arasında boş fəzada mövcud ola bilər. Əslində efir ideyasından "lüzumsuz" olduğuna görə, qəti yaxa qurtarmağa cəmi bir addım qalmışdı ki, onu da Eynşteyn nisbilik nəzəriyyəsini yaradarkən atdı. Məhz Lorens elektrodinamikası, atomlara tətbiq olunduqda, "materiyanın yox olması" kimi məlum böhranı doğurdu və bununla da kvant mexanikasının yaradılmasını aktuallaşdırdı. Pol Dirak Lorensin nəzəriyyəsini inkişaf etdirərək, yalnız atomlarda enerji səviyyələrinin deyil, həm də elektromaqnit sahəsinin özünün kvantlanması zəruriliyinə gəlib çıxdı ki, bu da, həqiqətdə, dünyanın Maksvell-Lorens mənzərəsində prinispial dəyişikliyə səbəb olmadı. Fizika bütün elektromaqnit hadisələrinin müxtəlifliyini bu gündə təsvir edərkən əsasən Lorensin dərin ideyalarına əsaslanır.





Piter Zeyeman.

Triplet yaxın yerləşmiş spektral xətlər üçlüyüdür.

SOLVEY KONQRESLƏRİ

Varlı Belçika sənayeçisi və məşhur kimyaçısı Ernest Solvenin (1838-1922) ağlına aktual məsələləri müzakirə etmək üçün fizika və kimya üzrə müntəzəm olaraq konqreslər çağırmaq ideyası gələndə o, məhz Lorensə, onların hazırlanmasında iştirak etmək və fizika üzrə konqreslərdə sədrlik etmək xahişilə müraciət etdi. Bundan uğurlu seçim etmək çətin idi: Lorens bir neçə Avropa dillərini gözəl bilirdi, əlbəttə, diplomatik qabiliyyətə malik idi, elm qarşısında çox böyük xidmətləri var idi. Lorens 1911, 1913, 1921, 1924 və 1927-ci illərin Solvey konqreslərində sədrlik etmişdir. Bu konqreslərin işində o dövrün ən nüfuzlu fizikləri – Bor, Eynşteyn, Heyzenberq, Plank, Pauli, de Broye, Erenfest və bir çox digərləri iştirak edirdilər. Məhz bu konqreslər fizikanın ildən-ilə "getdikcə daha çox relyativistikləşən və kvantlaşan" ən yeni sahələrinin problemlərinin qoyuluşunda həlledici rol oynamışdır. Diskussiyalara rəhbərlik edən və onları lazımi səmtə yönəldən klassik fizikanın ən qocaman patriarxı – Hendrik Anton Lorens idi. 1911-ci ilin oktyabrında fizika üzrə kvantlar nəzəriyyəsinə həsr olunmuş I Solvey konqresini açarkən o demişdir: "İndiki konqresin nəticəsi necə olacaq? Bizə hansı sürprizlərin hazırlandığını bilmədən, mən onu qabaqcadan xəbər verməyə cürət etməzdim. Lakin bu sürprizlərə güvənməmək daha ağlabatan olduğundan, mən onu deməyə üstünlük verərdim ki, ola bilsin, biz dərhal əhəmiyyətli irəliləyişə nail olmayacağıq. Doğrudan da, elmin irəliləyişi, tərəqqisi konqres və ya müşavirə vaxtkı düşüncələrdən daha çox fərdi səylərin nəticəsidir və hətta tamamilə mümkündür ki, biz burada hər hansı problemi müzakirə edənə qədər, dünyanın o biri başında tənha işləyən kim isə bir alim onun həllini tapacaqdır". Əvvəllər bu tez-tez olduğu kimi, Lorensin dedikləri yerinə yetdi. Bu cür alimlərdən biri 25 yaşlı Nils Bor oldu; o, məhz həmin vaxtda atomun kvaziklassik nəzəriyyəsini işləyib hazırlayırdı, sonralar isə Lorensdən estafeti qəbul etdi və kvant fizikasının həqiqi patriarxı oldu.



V Solvey konqresinin iştirakçıları.
Soldan-sağa, 1-ci sıra: İrvinq Lenqmür, Maks Plank, Mariya Sklodovskaya-Küri, Hendrik Lorens, Albert Eynşteyn, Pol Lanjeven, Şarl Qyui, Çarlz Vilson, Ouen Riçardson; 2-ci sıra: Peter Debay, Martin Knudsen, Lorens Breqq, Hendrik Kramere, Pol Dirak, Artur Kompton, Lui de Broyl, Maks Born, Nils Bor; ayaq üstə duranlar: Avqust Pikar, E.Henrot, Paul Erenfest, E.Gerien, T.Donder, Ervin Şredinger, C.Verşafelt, Volfqanq Pauli, Verner Heyzenberq, Ralf Fauler, Leon Brillyüen. Brüssel, 23-25 oktyabr 1927-ci il.

İkincisi, individual buraxma aktlarını (bunlar, prinsipcə, kvant nəzəriyyəsi tərəfindən izah olunmalıdır) təsvir edərkən, nadir hallarda plank sabiti son cavabdan yox olur, yəni bu halda cavab Lorensin qeyri-kvant nə-

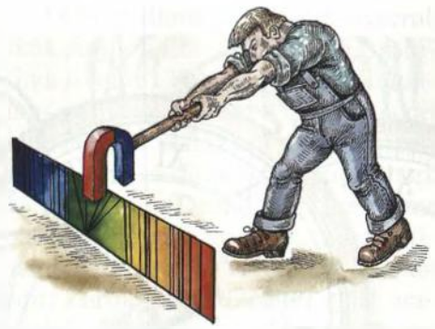
zəriyyəsi əsasında alınmış nəticə ilə tam üst-üstə düşür. Lakin bütün bunların hamısı xeyli sonra aydın oldu. 1895-ci ildə Lorens ona diqqət yetirdi ki, bircins maqnit sahəsində yerləşdirilmiş işıq mənbəyinin spektri dəyişikliyə məruz qalır. O, hesablamalar apararaq, hər bir spektral xəttin tezliklərə görə tripletə parçalanmasını; buna uyğun olaraq orta xəttin tezliyinə nəzərən yan xətlərin tezliyinin, sahənin intensivliyilə mütənasib olan eyni bir kəmiyyət qədər azalmasını, ya da artmasını qabaqcadan xəbər verdi.

Üçüncüsü, Lorensin dostu və silahdaşı olan Zeyeman 1896-cı ildə öz eksperimentlərində Lorensin qabaqcadan xəbər verdiyi məhz normal tripleti dərhal aşkar etdi. Sonralar, məlum olduğu kimi, *normal triplet* müstəsna hallarda yaranır, maqnit sahəsinin təsiri altında spektral xətlərin xeyli mürəkkəb parçalanması, yəni anomal Zeyeman effekti daha çox müşahidə olunur. Bu mürəkkəb effekti də klassik təsəvvürlər əsasında fiziklərin (ilk növbədə Lorensin özünün) başladıqları izah etmək cəhdi o illərdə uğursuzluğa məhkum idi, çünki özünün normal "silahdaşından" fərqli olaraq anomal parçalanmada mühüm rolu elektronun spini oynayır; spin fizikada yalnız 28 ildən sonra meydana çıxdı.

KLASSİK FİZİKANIN PATRİARXI

Ümumdünya nüfuzu Lorensin həyat tərzində öz əksini tapmadı. O, əvvəlki kimi, Leyden universitetində kafedranı tuturdu; hətta 1905-ci ildə Münxendən dəvətnamə alsa da və burada ona daha əlverişli şərait vəd etsələr də o, kafedranı dəyişmədi. Lorens müəllimlik fəaliyyətini çox sevirdi, o təkcə nəzəri fizika kursunu oxumurdu, həm də kriogen laboratoriyası qurmaqla məşğul olan öz həmkarı və dostu Heyke Kamerlinq-Onnesin (1853-1926) yükünü azaltmaq üçün eksperimental fizika üzrə mühazirələrin bir hissəsini öz üzərinə götürmüşdü. Lorens uzun müddət tibb institutu tələbələrinə fizikadan dərs demişdir. Qarşılıqlı əməkdaşlıq o qədər səmərəli olmuşdu ki, 1925-ci ildə, fizikadan doktorluq dərəcəsi aldıqdan yarım əsr sonra ona fəxri tibb doktoru dərəcəsi verildi.

Lorens qoca yaşlarında Xarlem şəhərindəki Teyler Muzeyinin müdiri vəzifəsini qəbul etdi; bu təxminən London Kral Cəmiyyətinin prezidenti vəzifəsinə uyğun idi, lakin Lorens Leyden universitetinin ekstraordinar (ştatdankənar) professoru statusunu saxlamışdı. Lorens mühazirələr oxumağını ölümünə yalnız bir neçə həftə qalmış kəsdi. O, uzun sürməyən xəstəlikdən sonra 1928-ci il fevralın 4-də vəfat etdi.



Maksvell elektrodinamikasına görə elektron atomda mövcud ola bilməz. O, arasıkəsilmədən enerji şüalandıraraq, ani olaraq, nüvənin üzərinə düşməlidir. Materiyanı Nils Borun postulatları "xilas etdi".

1908-ci ildə Leyden kriogen laboratoriyasında H.Kamerlinq-Onnes ilk dəfə olaraq mütləq sıfıra yaxın temperatura çatdı və maye helium aldı. 1911-ci ildə o, ifratkeçiricilik hadisəsini kəşf etdi, 1913-cü ildə isə Nobel laureatı oldu.



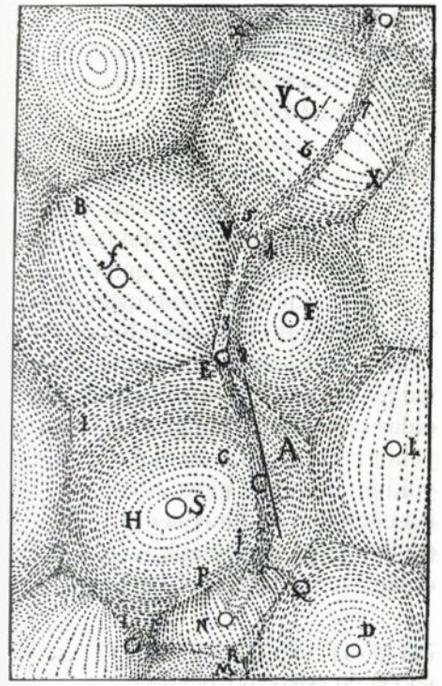
ÜMUMİ NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİ

QRAVİTASİYANIN AÇILMAMIŞ SİRRİ

Nyutonun cazibə qanunu o dövrdə bütün mümkün olan dəqiqliklə ağırlıq qüvvəsinin təsiri altında həm yer, həm də göy cisimlərinin hərəkətini təsvir etməyə və qabaqcadan xəbər verməyə imkan verirdi. Yalnız bir şey təşviş doğururdu: Nyuton öz qanununu çıxararkən fərz etmişdi ki, cisimlər (o cümlədən Günəş və Yer) bir-birini mütləq boşluq vasitəsilə, yəni heç bir kontakt və ya vasitəçi olmadan cəzb edirlər (məsafəyə və ya uzağatəsir prinsipi).

Bundan başqa, Nyuton hesab edirdi ki, cisimlərin qarşılıqlı təsiri ani, başqa sözlə, sonsuz böyük sürətlə baş verir (ani uzağatəsir prinsipi). Bu cəfəngiyat görünürdü; hətta Qotfrid Leybnis və Leonard Eyler kimi böyük alimlər cazibəyə aid Nyuton yanaşmasını qəbul etməkdən imtina etdilər və Dekartın burulğanlar konsepsiyasının tərəfdarı oldular.

Nəhayət, həmçinin tamamilə aydın deyildi ki, cisimlər nə üçün cəzb olunur; bu hadisəni Nyuton sadəcə izah etmək istəmədi. O, cazibə faktının özünü və onun təsir qanununu, bu fenomenin təbiətini aydınlaşdırmağa heç bir cəhd göstərmədən, təsdiq etdi. Bununla belə, fizikləri daha çox bütün ağır cisimlərin bir-birinə qarşılıqlı cəzb olunması kimi universal xassəsinin məhz səbəbi maraqlandırırdı.



◄ Dekartın təsəvvürlərinə görə, zərif materiyanın burulğanları. Dekartın sağlığında çap olunmuş əsərləri toplusundan qravüra.

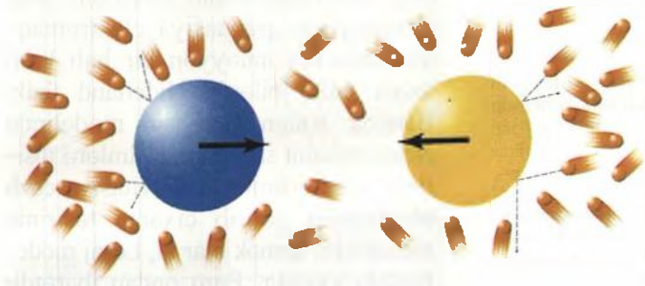
CAZİBƏNİN MEXANİKİ MODELLƏRİ

1675-ci il memuarında Nyuton Yerin başqa cisimləri cəzb etməsini belə izah etmişdi: xüsusi zərif mühit – qravitasiya efiri – özünün özlülüyü sayəsində planet tərəfindən sıxlaşdırılır. Nəticədə yuxarıdan aşağıya, Yerə doğru yönələn efir axını yaranır; bu axın, sanki, bütün cisimləri planetə sıxır. Lakin sonralar Nyuton öz izahından imtina etdi, görünür, ona görə ki, bir müəmma əvəzinə başqasını – hipotetik efiri daxil etmiş olurdu.

Nyuton mexanikasının yaranması ilə istənilən fiziki hadisənin yalnız mexanika əsasında tam təsvir edilməsi proqramı meydana gəldi. Belə çıxırdı ki, cazibə də sırf mexaniki – efir kimi müəmmalı, gözə görünməyən mahiyyətləri cəlb etmədən, yalnız cisimlərin hərəkət qanunlarının köməyilə izah oluna bilər.

1870-ci illərdə cazibənin isveçrəli fizik Jorj Lui Lesaj (1724–1803) tərəfindən hələ 1784-cü ildə təklif olunmuş atomistik modeli ən məşhur model idi. Modelin mahiyyəti ondan ibarətdir ki, dünya fəzası çox kiçik bərk zərrəciklərlə (Demokritin atomlarına bənzər) doludur və onlar bütün istiqamətlərdə böyük sürətlərlə hərəkət edir. Zərrəciklərin ölçüləri onlar arasındakı məsafələrlə müqayisədə çox kiçikdir və ona görə də onların qarşılıqlı toqquşma ehtimalları azdır. Ayrıca bir cisim müxtəlif tərəflərdən zərrəciklərin xaotik bombardmanına məruz qalaraq, tarazlıqda qalmalıdır. Əgər onunla qonşuluqda başqa bir cisim varsa, onda zərrəciklər selinin bir hissəsini ikinci cisim ekranlaşdırır və nəticədə birinci cismi ikinciyə itələyən qüvvə yaranır. Birinci cismin dəqiq bu cür ekranlaşdırıcı təsiri ikinci cismi ona doğru hərəkət etməyə məcbur edən qüvvəyə gətirib çıxarır.

Hesabatlardan belə çıxırdı ki, zərrəciklərin müəyyən sürətlərində Lesajın hipotezi Nyuton qanununa uyğun olaraq, cisimlərin cazibəsini izah edə bilirdi. Lakin Nyuton mexanikasının bir qanununu izah edən bu hipotez, digər qanunu ilə – mexaniki enerjinin saxlanması qanunu ilə ziddiyyət təşkil edirdi. Zərrəciklərin zərbələri, az-az olsa belə, onların sürətlərinin kiçilməsinə və deməli, cazibənin zəifləməsinə gətirib çıxarmalıdır.



Memuar – burada bəzi məcmuələrin köhnəlmiş adıdır.

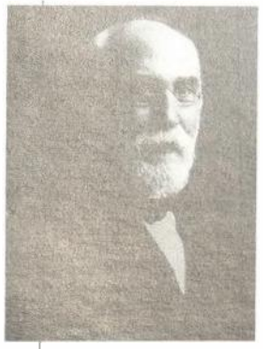
Ona görə də Lesaj modelinin modifikasiyaları meydana çıxmağa başlayırdı, lakin onların başqa nöqsanları vardır: onlara adi maddi mühitlə yanaşı, müşahidə olunmayan mühit – nə isə zərif çəkisiz materiya, yəni efir daxil edilirdi. Bu modellərin müəllifləri eksperimental olaraq əsaslandırılmamış fərziyyələrə söykənirdilər və təcrübi yolla və ya astronomik müşahidələrlə yoxlamaq mümkün olmayan nəticələr alırdılar.

ELEKTRODİNAMİK MODELLƏR

Faradey-Maksvell-Hers-Lorens elektrodinamikası göstərdi ki, boş fəzada elektromaqnit sahəsi adlanan xüsusi substansiyanın dalğaları mövcuddur. Sahənin hər hansı nöqtədə həyəcanlanması qonşu nöqtələrdə sahənin dəyişməsini doğurur, belə ki, həyəcanlanma (dalğa) müəyyən (sonlu) sürətlə yayılır və böyük məsafələrə ötürülür.

Sahə konsepsiyası əvvəlki uzağatəsir (Nyutona görə) prinsipini yaxınatəsir prinsipilə əvəz etməklə, dünyanın Nyutona görə mexaniki mənzərəsini mükəmməlləşdirməyə imkan verdi. Sonra xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi efir anlayışının fizikadan kənar edilməsinə səbəb oldu ("Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi" fəslinə bax).

İndi bir çox alimlər fizikanın bütün hadisələrini artıq elektromaqnit sahəsi əsasında təsvir etməyi, o cümlədən qravitasiyanın yeni nəzəriyyəsini qurmağı mümkün hesab edirdilər; yeni nəzəriyyədə qravitasiya elektromaqnit sahəsinin müəyyən bir halı kimi təsvir edilə bilərdi. Niderland fiziki Hendrik Anton Lorensin modelində elektromaqnit sahəsinin cisimlərə təsirinin – bu cisimlərin qravitasiya cəzb olunmasına gətirib çıxaran təsirinin mexanizmi demək olar ki, Lesaj modelindəki kimidir. Fərq ondan ibarətdir ki, fəzaya korpuskullar yox, cisimlərin içindən öz intensivliyini azaltmadan keçməyə qadir olan elektromaqnit dalğaları nüfuz edir.

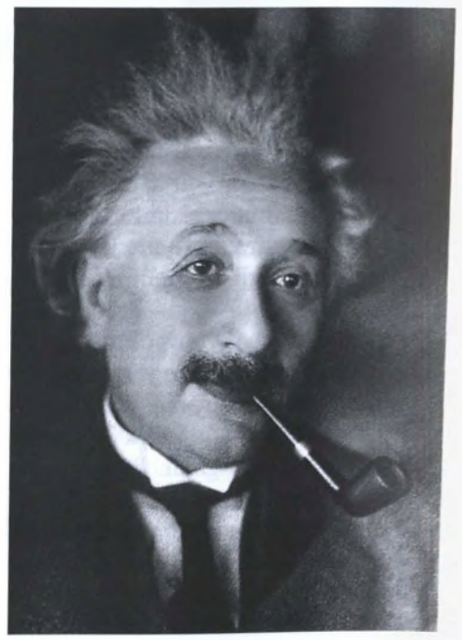


Hendrik Anton Lorens.

Buna baxmayaraq, qravitasiyanı elektromaqnit nəzəriyyəsinə daxil etmək heç də mümkün olmadı. Heç bir elektromaqnit modeli qravitasiyanın hər yerdə mövcudolma qabiliyyətini – elektromaqnit sahəsinin malik olmadığı bu xassəni izah edə bilmədi. Qravitasiya sahəsinə elektromaqnit sahəsinin hallarından biri kimi baxmaq olmaz: onlar çox kəskin fərqlənirlər. Elektrik yükləri iki işarəyə malikdir: eyniadlı yüklər itələnir, müxtəlifadlı yüklər isə cəzb olunur. Qravitasiya "yükləri" (kütlələr) yalnız bir işarəyə malikdir: onlar həmişə bir-birini cəzb edir.

ƏTALƏT VƏ QRAVİTASİYA KÜTLƏLƏRİNİN BƏRABƏRLİYİ

İlk əvvəl Albert Eynşteyn və ondan asılı olmadan Anri Puankare qravitasiyanın nəzəriyyəsini xüsusi nisbilik



▶ Albert Eynşteyn.

nəzəriyyəsi çərçivəsində qurmağa çalışırdılar; burada qravitasiya sahəsi elektromaqnetizmdən çıxarılmırdı, müstəqil reallıq kimi təsvir olunurdu.

Lakin Eynşteyn tezliklə bu yoldan imtina etdi. O dərk etdi ki, qravitasiyanı yalnız xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi çərçivəsindən kənara çıxmaqla təsvir etmək olar, bunun üçün daha ümumi nəzəriyyə tələb olunurdu.

Alim qravitasiya nəzəriyyəsini uzun müddətə – 1906-cı ildən 1916-cı ilə qədər keçən on il müddətinə yaratdı. Görünür, Eynşteyn ilk növbədə ona diqqət etmişdi ki, qravitasiya qüvvəsi bütün başqa qüvvələrdən fərqli olaraq, həmişə təsir etdiyi cismin m kütləsilə mütənasibdir. Bu, Yer səthində ağırlıq qüvvəsi üçün

$$F = G\frac{mM}{R^2}$$

Nyuton qanunundan çıxır, burada M – Yerin kütləsi, R – Yerin radiusu, G – qravitasiya sabitidir. Lakin klassik mexanikada cismə a təcili verən F qüvvəsi də cismin kütləsilə düz mütənasibdir: $F = ma$. Sərbəstdüşmə halında $a = g$. Onda aşağıdakı bərabərlik alınır

$$mg = G\frac{mM}{R^2}. \qquad (1)$$

Bu bərabərliyin hər iki tərəfini m-ə bölsək

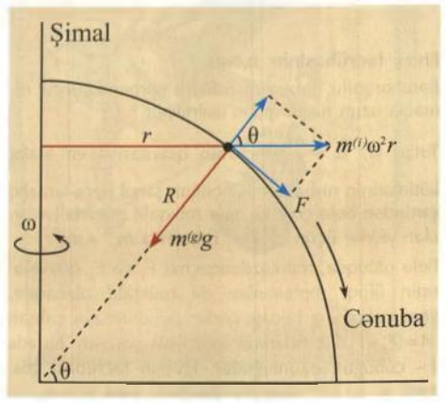
$$g = G\frac{M}{R^2}. \qquad (2)$$

alarıq. Beləliklə, Nyutonun qanunundan Qaliley qanunu çıxarılır: cisimlərin sərbəstdüşmə təcili onların kütləsindən asılı deyil, çünki g-nin (2) ifadəsinə m daxil deyil.

Qaliley qanununun bu çıxarılışı belə bir fərziyyəyə əsaslanır ki, (1) bərabərliyinin sol və sağ tərəfində cismin m kütləsi eyni bir şeydir (ona görə də, bərabərliyin hər iki tərəfini m kəmiyyətinə bölmək olar). Lakin, əgər araşdırsaq görərik ki, tənliyin sol və sağ tərəflərindəki m tamamilə müxtəlif təbiətə malikdir. Sol tərəfdə verilmiş cisim üçün sabit olan bu kəmiyyət, xarici qüvvələrin təsiri altında cismin davranışını xarakterizə edir. Onu *ətalət kütləsi* ($m^{(i)}$) adlandırırlar, çünki o, cismin öz halını saxlamaq qabiliyyətinin ölçüsü, yəni ətalətliyinin ölçüsüdür. Sağ tərəfdəki m cismin başqa cismə (kütləsi M olan) cəzb olunması xassəsini xarakterizə edir və onu *qravitasiya kütləsi* və ya *ağır kütlə* ($m^{(g)}$) adlandırırlar.

Nyuton nəzəriyyəsi $m^{(i)} = m^{(g)}$ bərabərliyinə heç bir izahat vermir. Ümumiyyətlə desək, elə ola bilər ki, əksər cisimlərin ətalət və qravitasiya kütlələri yalnız təqribən bərabərdir və dəqiq ölçmə zamanı onların müxtəlifliyi məlum olardı.

Xoşbəxtlikdən, ətalət və qravitasiya kütlələrinin bərabərliyini eksperimental olaraq çox dəqiq sınaqdan keçirməyə nail olmuşlar. Təcrübənin ideyası sadədir: əgər cismə eyni zamanda həm ətalət qüvvələri, həm də qravitasiya qüvvələri təsir edirsə, onda onların əvəzləyicisinin istiqaməti cismin ətalət kütləsinin qravitasiya kütləsinə olan nisbətindən asılı olacaqdır.



Fırlanan Yerin cazibə sahəsində yükə təsir edən qüvvələr.

θ – məhəllin coğrafi enliyi;
R – Yerin radiusu;
$r = R\cos\theta$.
$m^{(g)}g$ ağırlıq qüvvəsi qismən mərkəzdənqaçma ətalət qüvvəsinin şaquli toplananı $F_{\perp}^{(mg)} = m^{(i)}\omega^2 r\cos\theta$ ilə kompensasiya olunur. Burada g sərbəstdüşmə təcilidir.

10^{-12} dəqiqliyini belə təsəvvür etmək olar: sübasını 10 min ton olan gəmini tərəzidə çəkərkən səhv qramın yüzdə birindən böyük olmamalıdır.

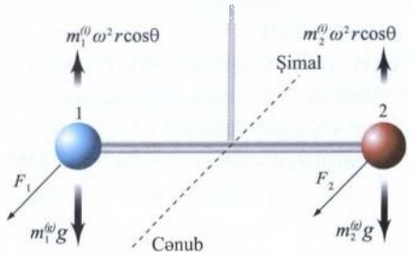


Lorand fon Etveş.

Lazımi eksperimental qurğunu təbiətin özü yaradıb – bu, öz oxu ətrafında sabit ω bucaq sürətilə fırlanan Yerdir. Yerə nəzərən sükunətdə olan cismə iki qüvvə təsir edir: planetin qravitasiya cazibəsi və mərkəzdənqaçma qüvvəsi. Cismin Yerə nəzərən tam təcili qravitasiya və mərkəzdənqaçma təcillərinin vektorial toplanması nəticəsində alınır.

Macar fiziki Lorand fon Etveş (1848–1919) özünün 1890-cı ildən 1906-cı ilə qədər apardığı çoxsaylı və son dərəcə dəqiq təcrübələrində burulma tərəzisinin qollarına müxtəlif materialdan hazırlanmış, lakin eyni bir qravitasiya kütləsinə malik olan iki çəki daşını asmışdır (fərz olunurdu ki, müxtəlif materiallar üçün ətalət və qravitasiya kütlələrinin nisbəti fərqli ola bilər). Əgər onların ətalət kütləsi bərabər deyilsə, onda çəki daşlarına təsir edən əvəzləyici qüvvələr paralel olmayacaq və tərəzinin qolu fırlanmağa başlayacaqdır. Eksperimentlər göstərdi ki, fırlanma heç vaxt olmur, yəni ətalət kütləsinin qravitasiya kütləsinə olan nisbəti müxtəlif materiallar üçün eynidir. Bu cür nəticəni Etveşin özü o dövr üçün çox böyük olan 10^{-9} dəqiqliklə almışdır. Rekord dəqiq ölçməni 1971-ci ildə M.V.Lomonosov adına MDU-nun fizika fakültəsində Vladimir Borisoviç Braqinski və Vladimir İvanoviç Panov aparmış və 10^{-12} almışlar.

Etveşin təcrübələrindən sonra Eynşteyndə heç bir şübhə qalmamalı idi ki, təbiətcə müxtəlif olan $m^{(i)}$ və $m^{(g)}$ kütləsi eynidir. Hələ Nyutonun vaxtlarında bütün fiziklər ətalət və ağır kütlələrin bərabərliyi haqqında bilirdilər, baxmayaraq ki, Nyutonun özü onu yalnız 10^{-3} dəqiqliklə yoxlamışdı. Bu fakta o qədər alışmışdılar ki, heç kim bu faktda maraqlı heç nə görmürdü, yalnız Eynşteyn, onun öz sözlərinə görə, belə bir fenomenə son dərəcə təəccüblənmiş və hesab etmişdi ki, ətalətin və qravitasiyanın daha dərindən başa düşülməsinə məhz bu fenomen açar verəcəkdir.



Etveş təcrübəsinin sxemi.
Bərabərqollu çubuq meridiana perpendikulyar olmaqla uzun nazik ipdən asılmışdır.

Tutaq ki, $\alpha = \frac{m^{(g)}}{m^{(i)}}$ (cismin qravitasiya və ətalət kütlələrinin nisbətidir). Çubuğun şaqul üzrə tarazlıq şərtindən belə çıxır ki, əgər müxtəlif materiallardan olan yüklər üçün $\alpha_1 \neq \alpha_2$ isə, onda $m_1^{(i)} \neq m_2^{(i)}$.

Belə olduqda, mərkəzdənqaçma F_1 və F_2 qüvvələrinin üfüqi toplananları da müxtəlif olacaqdır, yəni çubuğu φ bucağı qədər döndərməyə çalışan $M=(F_1-F_2)l/2$ fırlanma momenti yaranır, burada l – çubuğun uzunluğudur. Etveşin təcrübəsi göstərdi ki, $5\cdot10^{-9}$ dəqiqliyi ilə $\varphi=0$, yəni $\alpha_1=\alpha_2$.

TƏCİLLİ HESABLAMA SİSTEMİ VƏ QRAVİTASİYA SAHƏSİ

Qaliley və Nyuton dövründən bəri mexaniki hərəkətin nisbilik prinsipi məlumdur. Lakin həm Nyuton mexanikasında, həm də xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin mexanikasında bu prinsip ifadə olunarkən hesablama sisteminin yalnız düzxətli sabit sürətli hərəkəti nəzərdə tutulur. Bu cür hərəkət edən hesablama sistemləri *inersial hesablama* sistemləri adlanır. Həm Nyuton mexanikasının, həm də relyativistik mexanikanın qanunları yalnız onlar üçün doğrudur. Təcillə hərəkət edən hesablama sisteminə (*qeyri-inersial hesablama sisteminə*) keçən zaman bu qanunlar fiktiv ətalət qüvvələri meydana çıxdığına görə pozulur. Ona görə

Mən, nəhayət, bu qanunun [cisimlərin düşməsi] tam dərinliyini və əhəmiyyətini anladım, onu ətalət və qravitasiya kütlələrinin bərabərliyi qanunu kimi də söyləmək olar. Bu qanunun olması adamı heyran edir...

A.Eynşteyn



də ətalət sistemləri fiziki seçilmiş ("imtiyazlı") sistemlərdir. Təkcə Nyuton mexanikası yox, həm də relyativistik mexanika ətalət və qravitasiya kütlələrinin bərabərliyi faktını izah edə bilmədi. Bu faktı izah etmək üçün xüsusi nisbilik nəzəriyyəsini ümumiləşdirmək yolu ilə, yəni yol verilən hesablama sistemləri kimi bəzi sinif qeyri-inersial hesablama sistemlərinə də baxmaq yolu ilə, xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi çərçivəsindən kənara çıxmaq lazım gəldi. Məhz hansı sistemlərə?

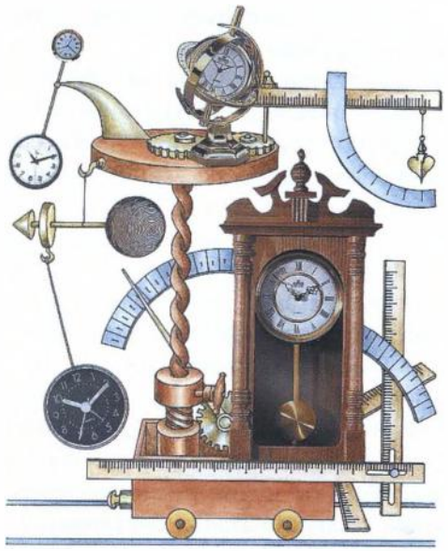
Eynşteyn aşkar etdi ki, bütün cisimlər bircins (bütün nöqtələrdə eyni olan) qravitasiya sahəsində, qravitasiya sahəsinin olmadığı fəzadakı kimi hərəkət edir, bu şərtlə ki, cisimlərə yalnız bərabərtəcilli hesablama sistemində baxılsın. Bu prinsipi – hadisələrin qravitasiya sahəsində və təcilli hesablama sistemində seçilməzliyini o, *ekvivalentlik prinsipi* adlandırdı. Məsələn, tutaq ki, kosmosda raket Yerdəki cisimlərin sərbəstdüşmə təcilinə bərabər təcillə uçur. Raketin içindəki kosmonavt cismin adi çəkisinə bərabər qüvvə hiss edir, yəni özünü Yerin səthindəki kimi hiss edir.

Təcillə hərəkət edən raketdə kosmonavt ətalət qüvvəsini hiss edir, məhz bu qüvvə gəminin startından sonra əlavə yüklənmə yaradır. Bu mənada qravitasiya qüvvəsi ətalət qüvvəsinə – yalnız hesablama sisteminin təcili nəticəsində ortaya çıxan fiktiv qüvvəyə oxşardır. Belə bir sual qanunidir: qravitasiya da zahiri qüvvə deyil ki? Təcilli hesablama sistemini, məsələn, sükunətdə olan hesablama sistemilə əvəz etməklə ətalət qüvvələrini aradan qaldırdıqları kimi, qravitasiya qüvvəsini də uyğun hesablama sisteminə keçməklə aradan qaldırmaq olmazmı?

Hər tərəfdən qapalı olan lift kabinəsi təsəvvür edək. Əgər onu saxlayan tros birdən qırılsa, kabinə və onun daxilində olan hər şey ağırlıq qüvvəsinin təsiri altında sərbəst düşməyə başlayacaqdır. Bu cür "düşən" hesablama sistemində cisimlərin çəkisi olmayacaq, onlar çəkisizlik vəziyyətində olacaqlar.

Cismin çəkisi dayağın reaksiya qüvvəsinə bərabərdir: "qalxan lift" üçün $P = N = m(g + a)$; "düşən lift" üçün $P = N = m(g - a)$.





lama sistemində bütün cisimlər çəkilərini itirir, onların qravitasiya kütlələri özünü heç cür büruzə vermir.

Baxdığınız misaldan görünür ki, sərbəst düşən cisimlə bağlı olan hesablama sistemini seçməklə cismə təsir edən qravitasiya qüvvəsini aradan qaldırmaq olar. Sərbəst düşən liftin kabinəsində qravitasiya qüvvələri olmadığından, kabinə *lokal* (*lat.* localis – "yerli") inersial hesablama sistemidir: bu sistemdə cisimlər ətaləti üzrə hərəkət edir.

Lakin xarici müşahidəçinin nöqteyi-nəzərincə bu hesablama sistemi qeyri-inersialdır: o, Yerə doğru sabit *g* təcili ilə hərəkət edir. Deməli, Eynşteyn yolverilən hesablama sistemləri sinfini, bu sinfə sərbəst düşən hesablama sistemləri əlavə etməklə, genişləndirdi. Bu isə qravitasiyanı təcilli hərəkətin effektlərilə əlaqələndirməyə imkan verir.

Lokal hesablama sistemləri dedikdə fəzanın o qədər kiçik həcmləri nəzərdə tutulur ki, onlarda ağırlıq qüvvəsini sabit hesab etmək mümkün olsun. Əgər kabinə kifayət qədər böyükdürsə, onda kabinədə Yerin cazibə sahəsi daha bircins deyil və ekvivalentlik prinsipi ödənmir. Baxılan prinsip ixtiyari, qeyri-bircins və ya istənilən qədər böyük fəza miqyaslarında zamana görə dəyişən cazibə sahələrini təsvir etmək üçün istifadə oluna bilməz.

Ekvivalentlik prinsipi inersial hesablama sistemlərindən "imtiyazlı" hesablama sistemləri kimi imtina etməyin yalnız ilk addımını atmağa imkan verdi. İkinci addım başqa prinsiplə bağlıdır, bu prinsipi Eynşteyn *Max prinsipi* adlandırdı.

QRAVİTASİYA VƏ ƏTALƏT. MAX PRİNSİPİ

Fəzanın nisbiliyi ideyasını Yeni dövrün iki filosofu – alman Qotfrid Leybnis (1646-1716) və ingilis Corc Berkli (1685-1753) öz əsərlərində söyləmişlər. Leybnisin konsepsiyasına görə nə fəzada, nə də zamanda müstəqil mövcudolma yoxdur: fəza – bu, cisimlərin tutduqları yerlərin bölünməsi, ayrılmasıdır, zaman – hadisələrin ardıcıllığıdır. Berkli qeyd edirdi ki, istənilən cismin hərəkətini, yalnız onun istiqamətini təyin etməklə təsəvvür etmək olar, istiqamət isə, öz növbəsində, yalnız hər hansı başqa cismə nəzərən mənaya malikdir. O yazmışdı: "...iki kürənin olduğunu və bunlardan başqa cismani əlavə heç nəyin olmadığını təsəvvür edək... İki kürənin, onların ümumi mərkəzi ətrafındakı dairəvi hərəkətini xəyalla anlamaq olmaz. İndi fərz edək ki, göy tərpənməz ulduzlarla birlikdə yaradılıb; kürələrin bu göyün müxtəlif hissələrinə yaxınlaşmasını təsəvvür etməklə, hərəkət dərhal dərk edilə bilən olur".

Avstriya fiziki və filosofu Ernst Max bu ideyanı mexanikanın ən müəmmalı hadisəsinin – ətalət qüvvələrinin (məsələn, fırlanan Nyuton vedrəsində suyun səthini əyməyə məcbur edən



Ernst Max.

qüvvələrin) təbiətini izah etmək üçün tətbiq etmişdir.

Nyuton təcilli hərəkəti mütləq hərəkət hesab edirdi: vedrədəki su boş tərpənməz mütləq fəzaya nisbətən fırlanır. Max həmin təcrübəni başqa cür şərh edir: su boş fəzaya nəzərən yox, Kainatın bütün uzaqlaşmış kütləsinə ("tərpənməz ulduzlara") nəzərən fırlanır.

Eynşteyn üçün Maxın ideyası nisbilik prinsipini qeyri-inersial hesablama sistemlərinə, lakin artıq düzxətli hərəkət edən yox, fırlanan qeyri-inersial hesablama sistemlərinə şamil etmək üçün əsaslardan biri oldu.

Maxın fikrincə, ətalət qüvvələri cismin Kainatda böyük məsafələrdə yerləşən maddə ilə qravitasiya qarşılıqlı təsiri nəticəsində yaranır (Max prinsipi). Əgər maddəni uzaqlaşdırsaq, onda ətalət qüvvəsi yox olar. Beləliklə, Max bu müəmmalı qüvvənin təbiətinin izahının bir variantını təklif etmişdir: bu ətalət qravitasiyasıdır və onu, Nyutonun hesab etdiyi kimi, boş mütləq fəza yox, bu fəzada olan kütlələr yaradır. Boş fəza anlayışı məzmunsuzdur: fəza yalnız onda materiyanın olması ilə şərtlənən xassələrə malik ola bilər.

Eynşteyn Maxın ideyasını qəbul etdi və onu fəzanın xassələrinin materiyanın paylanmasından və hərəkətindən asılılığına dair hökmə qədər inkişaf etdirdi. Lakin Eynşteynin qurduğu qravitasiya nəzəriyyəsində Max prinsipi tam həcmdə reallaşmadı. Ola bilsin, bunu nə vaxtsa qravitasiyanın gələcək nəzəriyyəsi edəcəkdir.

NƏZƏRİYYƏYƏ DOĞRU GEDƏN YOLDA

Qravitasiyanın Eynşteynə qədər təklif olunmuş modellərində onu ya mexanikaya, ya da elektromaqnetizmə gətirməyə cəhd etmişlər. Bu cəhdlərin uğursuzluğu onu sübut edirdi ki, qravitasiyanı tamamilə əlahiddə tərzdə təsvir etmək lazımdır.

QRAVİTASİYA ƏTALƏTƏ GƏTİRİLİRMİ?

Ekvivalentlik prinsipinə və Max prinsipinə görə fəzanın məhdud hissələrində qravitasiya və ətalət qüvvələri, yəni qeyri-inersial hesablama sistemlərində yaranan qüvvələr eyni şeydir. Lakin qravitasiya sahəsi (məsələn, Yerin cazibəsi) istənilən, o cümlədən inersial hesablama sistemində mövcud olur, halbuki ətalət qüvvələri yalnız təcillə hərəkət edən sistemlərdə yaranır. İnersial hesablama sisteminə keçəndə bu qüvvələr yox olur.

Bundan başqa, qravitasiya sahəsi onu yaradan cisimlərdən uzaqlaşdıqca azalır: sonsuzluqda qravitasiya qüvvəsi qeyri-məhdud azalır, baxmayaraq ki, heç yerdə yox olmur. Ətalət qüvvələri isə, əksinə, sonsuzluqda ya məsafə ilə mütənasib olaraq artır (məsələn, fırlanan hesablama sistemində mərkədənqaçma qüvvələri kimi), ya da qiymətcə sabit qalır. Bütün bunlar o deməkdir ki, qravitasiyanı nöqtənin yalnız kiçik ətrafında ətalət psevdoqüvvəsinə ekvivalent hesab etmək olar, bütövlükdə isə qravitasiyanı ətalətə gətirmək olmaz.

Nə ekvivalentlik prinsipi, nə də Max prinsipi öz-özlüyündə hələ qravitasiya probleminin həllini verməmişdir. Burada yalnız yeni ən mühüm ideya kömək edə bildi.

1909-cu ildə Eynşteynin dostu Paul Erenfestin (1880-1933) "Cisimlərin bərabərsürətli fırlanma hərəkəti və

Qravitasiya (*lat.* gravitas – "ağırlıq") – ümumdünya cazibəsidir; materiyanın, ağır zərrəciklərin qarşılıqlı cəzb olunması ilə ifadə olunan xassəsidir.



Paul Erenfest.

ERNST MAX

Albert Eynşteynin öz müəllimi adlandırdığı yeganə adam Ernst Maxdır (1838-1916). Qismən onun sayəsində 1911-ci ildə Eynşteyn Praqadakı Alman universitetində ştatda olan professor yeri almışdı. 1879-1880 və 1883-1884-cü illərdə Max bu universitetin rektoru olmuşdu.

Max və Eynşteyn nədəsə bir-birinə oxşayırlar. Onların hər ikisini, hələ dörd-beş yaşlarında ikən, sanki, adi görünən əşyalar heyrətə salırdı. Balaca Eynşteyn kompası gördü və belə bir sual üzərində düşündü ki, cihazın əqrəbini hansı qüvvə lazımi istiqamətdə döndərir. Maxı su dəyirmanı heyrətləndirmişdi. Maxa aid nekroloqda Eynşteyn yazmışdı ki, həyatdan köçmüş alim, sanki, ürəkaçan müşahidələr və dünyanın dərk edilməsi üçün doğulmuşdu və bu qabiliyyət onda o qədər güclü "inkişaf etmişdi ki, o, çox qoca vaxtına qədər dünyaya hər şeylə maraqlanan uşaq gözləri ilə baxmışdır..."

Ernst Max Xrlis kəndində (Çexiyanın cənubu) doğulmuşdur – indi bu kənd Brno şəhərinin ucqarıdır. Valideynləri ibtidai təhsili ona yalnız monastır gimnaziyasında verə bilmişlər, lakin orada oğlanın qabiliyyətini qiymətləndirməmişlər və kənd müəllimi olan atası oğluna klassik dillərdən və riyaziyyatdan dərs demişdir.

Max 22 yaşında Vena universitetində fəlsəfə doktoru, 26 yaşında isə Qraçda universitet professoru oldu, burada həm də fizika laboratoriyasına rəhbərlik etdi. Onun ən uzun elmi fəaliyyəti (1867-1895-ci illər) Praqa ilə bağlıdır. Lakin buna baxmayaraq, alim 1895-ci ildə Vena universitetinə qayıtdı və burada fəlsəfə kafedrasını qəbul etdi.

Onda bəs Max kim olmuşdur – fizik, yoxsa filosof? Çox güman ki, həm fizik, həm də filosof: onun özü fəlsəfəni fizikadan ayırmırdı. Maxdan ötrü fəlsəfi şərhsiz fizika qanunları mövcud deyildi, lakin fəlsəfə də onun üçün fiziki biliklər olmadan mənasını itirirdi. O, səsdəniti hərəkətin nəzəriyyəsini, zərbə dalğaları haqqında təlimi yaratdı, Max konusu və Max ədədi adlanan anlayışlar daxil etdi. Bununla bərabər, onu kəşflərin praktik tətbiqi yox, idrakın imkanları maraqlandırırdı.

Bizim üçün hərəkət hansı mənada mövcuddur? Axı biz yalnız öz hisslərimizə arxalana bilərik. Bu problemə Maxın ilk işləri: "Hərəkətin hiss edilməsi haqqında" (1875-ci il) və "Hisslərin təhlili" (1886-cı il) həsr olunub. Burada o isbat edirdi ki, yalnız hisslər və onlar arasındakı əlaqələr realdır. Onun fikrincə, elmin həqiqi məqsədi dünyanın əslində necə olması haqqında sonsuz mübahisələr yox, hisslərin məntiqi nizamlanmasıdır. Bu ideyalar pozitivizm adlanan fəlsəfi cərəyanın – maxizmin və ya empriokritisizmin ikinci mərhələsinin inkişafının başlanğıcını qoydu.

Atomlar realdırmı? Max cəsarətlə deyirdi ki, bunu bilmir. O, sanki, elmdəki tərəqqiyə qarşı çıxırdı: o dövrə qədər atomun reallığını Rentgenin, Küri ər-arvadların, Boltsmanın, Plankın kəşfləri təsdiq etmişdi. Tozcuqların braun hərəkətini atomların zərbələri ilə izah etmiş Eynşteyn atomların varlığına daha şübhə etmirdi. Nə üçün Max aşkar şeyi inkar edirdi?

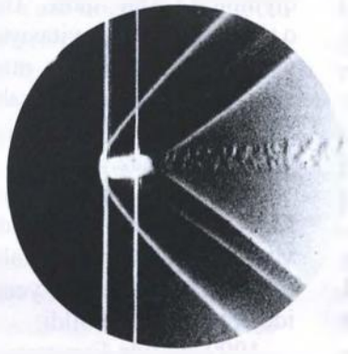
Onu hamıdan yaxşı Eynşteyn başa düşürdü. Eynşteyn Maxı "baxışlarının nadir qeyri-asılılığına malik olan və zəmanəmizin təbiətşünaslarının qnoseoloji (*yun.* "qnosis" – "idrak") oriyentasiyasına olduqca böyük təsir göstərmiş adam" adlandırmışdı. Max hamının aydın və aşkar hesab etdiyi şeyə məhz tənqidi yanaşmağa çağırırdı. Maxın bu cür mövqeyi Nyuton mexanikasının təkzibedilməzliyinə inamı sarsıtdı.

Eynşteyn ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin yaranmasında Max prinsipinin böyük rolunu nəinki etiraf edirdi, lakin o həm də hesab edirdi ki, "Max... ümumi nisbilik nəzəriyyəsinə gəlib çıxmağa yaxın olmuşdur... Onun yaranmasından yarım əsr əvvəl!"

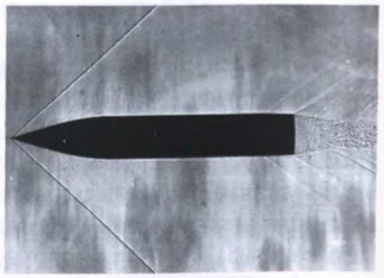
Lakin bəzi alimlər Maxa açıq düşmənçilik münasibəti bəsləyirdilər. O dövrün təbiətşünaslarına Maxın çox böyük



Praqa universitetinin riyaziyyat və fizika fakültəsinin binası. Max burada 28 il ərzində dərs demişdir.



Uçan güllənin Max tərəfindən 1888-ci ildə çəkilmiş fotoşəkli.



Sivriuclu cismin maye və qazda səsdəniti sürətlə hərəkəti. Cismin sürəti səs sürətindən 2,6 dəfə böyükdür (Max ədədi M = 2,6). Burun hissədən zərbə dalğası – "Max konusu" aralanır.

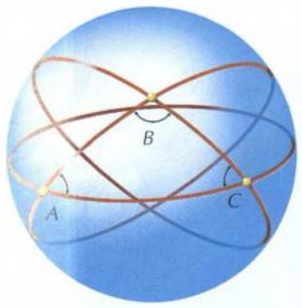
təsirinə dair Eynşteynin sözlərində də bir gərilmə var: şəxsən onun özünə Maxın çox böyük təsiri olmuşdur, halbuki başqa müasirləri böyük mütəfəkkiri ya qiymətləndirmək istəmirdilər, ya da qiymətləndirməyi bacarmırdılar. Doğrudur, Eynşteyn dəqiqləşdirdi: "Mən fikirləşirəm ki, hətta özünü Maxın düşməni hesab edən kəslər də onun söylədiyi ideyalardan nə qədərini, necə deyərlər, ana südü ilə bir yerdə canlarına çəkmişlər".

Maxın baxışlarının müstəqilliyi onun Nyuton tərəfindən irəli sürülmüş uzağatəsir konsepsiyasına münasibətində də özünü büruzə verdi. Uzağa təsirin və yaxına təsirin tərəfdarları arasındakı mübarizəyə nəzər salaraq, Max "İdrak və yanılma" (1905-ci il) kitabında yazırdı: "Məsafəyə təsir edən qüvvələr haqqında Nyutonun fikri çox böyük elmi nailiyyət idi; bu nailiyyət bir yüzillik ərzində mükəmməl riyazi fizikanı yaratmağa imkan verdi".

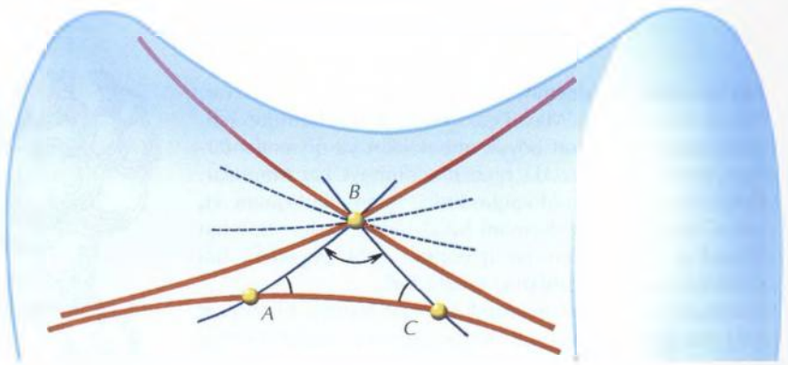
Belə çıxırdı ki, uzağa təsiri Maksvell-Lorens sahə nəzəriyyəsi fizikadan həmişəlik sıxışdırıb çıxarmışdır. Lakin kvantların kəşfilə mühitin qarşılıqlı təsiri necə ötürdüyünü dərk etməkdə çətinliklər yarandı, axı elementar zərrəciklər daimi təmasda ola bilməz.



Max uzağatəsir konsepsiyasının lehinə çıxış edirdi və onu səhv hesab etmirdi. XIX əsrin sonunda, yaxınatəsir konsepsiyasının qələbə çaldığı bir vaxtda belə bir şeyi hökm etmək müstəsna cəsarət büruzə vermək demək idi. Bununla belə, o, kvantlarla mübadiləyə əsaslanan müasir fiziki nəzəriyyələri qabaqcadan duymuşdu. Ernest Max atomlara kor-koranə inamın əleyhinə olsa da, hesab etmək olar ki, onun ideyaları da yalnız ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin yox, həm də kvant fizikasının əsasında durdu.



Ən sadə Riman fəzası ikiölçülü sferadır, yəni sabit müsbət əyrilikli fəzadır. Bu sferada düz xətlərin rolunu sferanın böyük dairələri oynayır. Üç belə "düz xəttin" kəsişməsindən əmələ gələn *ABC* üçbucağının bucaqlarının cəmi həmişə 180°-dən böyükdür.



Lobaçevski həndəsəsində sabit mənfi əyrilikli fəzaya, məsələn, üçölçülü hiperboloidə baxılır. Hiperboloid üzərində düz xətlərin rolunu, bu səth üzərində ən kiçik uzunluqlu xətlər kimi, hiperbolalar oynayır. Üç "düz xəttin" əmələ gətirdiyi *ABC* üçbucağı elədir ki, onun bucaqlarının cəmi 180°-dən kiçikdir.

nisbilik nəzəriyyəsi" adlı kiçik bir məqaləsi çıxdı. Məqalədə paradoksal fikir var idi: mütləq bərk silindri (və ya diski) mərkəzi ox ətrafında cəld fırlandırmaq olmaz, əks halda xüsusi nisbilik nəzəriyyəsilə ziddiyyət yaranır. Doğrudan da, tutaq ki, belə disk fırlanır, onda onun çevrəsinin uzunluğu Lorens qısalması nəticəsində azalır, diskin radiusu isə sabit qalır ("Nisbiliyin fizikası" məqaləsinə bax). Belə olduqda diskin çevrəsinin uzunluğunun diametrə nisbəti daha π ədədinə bərabər olmur. Bu xəyali eksperiment *Erenfest paradoksunun* məzmununu təşkil edir.

Bərabər sürətlə fırlanan disk bərabərtəcilli hesablama sistemidir. Erenfest paradoksunu Eynşteyn belə izah etdi: təcilli hesablama sisteminə keçərkən fəzanın adi, Evklid həndəsəsi dəyişir. Lakin bərabərtəcilli hesablama sistemi bircins qravitasiya sahəsinə ekvivalentdir ki, bu da Eynşteyndə qravitasiyanın fəzanın həndəsəsilə əlaqəsinə dair fikir oyatdı. Fəzanın həndəsəsi qravitasiya sahəsinin təsiri sayəsində daha Evklid həndəsəsi olmur, yəni qravitasiya xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin "müstəvi" fəza-zamanı çərçivəsində təsvir olunmur.

QEYRİ-EVKLİD HƏNDƏSƏLƏRİ

Qravitasiyanın yeni nəzəriyyəsinin yaranmasından xeyli əvvəl, hələ 1826-cı ildə rus riyaziyyatçısı Nikolay İvanoviç Lobaçevski (1792–1856) Evklid həndəsəsindən fərqli, indi onun adını daşıyan, bir həndəsə qurdu. Sonralar alman riyaziyyatçısı Bernhard Riman (1826–1866) daha bir qeyri-evklid həndəsəsini yaratdı. Bu həndəsələrdə fəzanın xassələri tamamilə başqadır; məsələn, üçbucağın daxili bucaqlarının cəmi daha 180°-yə bərabər deyil.



Evklid, Lobaçevski və Riman həndəsələri əhəmiyyətli dərəcədə fərqlidir, çünki onlar əhəmiyyətli dərəcədə fərqli olan fəzaları: Evklid həndəsəsi müstəvi fəzanı, Riman və Lobaçevski həndəsələri əyilmiş fəzaları təsvir edir.

Real fiziki fəzanı hansı həndəsə təsvir edir sualına yalnız ölçmələr cavab verə bilər. Karl Fridrix Qauss (1777–1855) və Lobaçevski birbirindən asılı olmadan, real həndəsəni aşkara çıxarmaq üçün eksperimentlər təklif etmişlər. Qauss dağ təpələrinin əmələ gətirdiyi üçbucağın bucaqları cəmini ölçdü, Lobaçevski isə həmin məqsəd üçün xeyli böyük üçbucaq seçmişdi: onun təpələri astronomik rəsədxana və iki uzaq ulduz idi.

Lakin nə Qaussun ölçmələri, nə Lobaçevskinin müşahidələri bu məsələni həll etməyə imkan vermədi, indi aydın olduğu kimi, həll edə də bilməzdi. Bunun günahı, tez-tez fikirləşdikləri kimi, hətta o illərdə ölçmələrin kiçik dəqiqliyi deyildi. Sadəcə, həndəsənin fizika ilə əlaqəsi hələ kəşf olunmamış ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin qanunauyğunluqları ilə təyin olunurdu. Yalnız bu nəzəriyyənin effektlərini nəzərə almaqla, eksperimentləri düzgün qoymaq olardı.

Erenfest paradoksu onu göstərirdi ki, qeyri-inersial hesablama sistemində fəzanın xassələri dəyişir və fəza Evklid həndəsəsilə təsvir olunmur. Bu hesablama sistemində müxtəlif istiqamətlərdə uzunluğun eyni

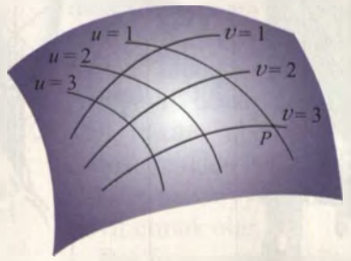
ƏYRİ SƏTHLƏRİN HƏNDƏSƏSİ. QAUSS KOORDİNATLARI

Sferanın səthinə öz-özlüyündə ikiölçülü fəza kimi baxsaq, onda bu fəzanı öyrənmək üçün Evklid fəzasının düzxətli koordinatları əvəzində coğrafi koordinatlardan (Yer səthində enlik və uzunluqlardan) istifadə etmək daha yaxşıdır. Bu cür yanaşmanı da kartoqrafiyanın problemlərini həll edərkən Qauss təklif etmişdi. Səthə kəsilməz nöqtələr çoxluğu kimi baxılırdı və nöqtələrdən hər birinə bir cüt ədəd – u və v *əyrixətli koordinatlar* uyğun qoyulurdu.

Əyri səthin bir hissəsini götürüb, onun üzərində istənilən sayda kəsişməyən əyrilər çəkək, onları $u=1$, $u=2$, $u=3$ kimi qeyd edək. Bu zaman $u=1$ və $u=2$ əyriləri arasında sonsuz sayda digər kəsişməyən əyrilər mövcud olur ki, onlara da 1 və 2 arasındakı bütün həqiqi ədədlər cavab verir, yəni u-əyrilər sistemi səthi sıx örtür.

Həmin səth üzərində bu səthi sıx örtən və $v=1$, $v=2$, $v=3$ kimi işarələnən digər v-əyrilər sistemini çəkək. Onda səthin hər bir nöqtəsinə bir və yalnız bir u və v ədədlər cütü uyğun olacaqdır; bu cütə nöqtənin əyrixətli və ya *Qauss koordinatları* deyilir. Məsələn, P nöqtəsi $u=1$, $v=3$ Qauss koordinatlarına malikdir.





$P(1, 3)$: $u=1$, $v=3$.

Əgər P nöqtəsinin vəziyyəti $(u; v)$ cütü ilə təyin olunursa, onda ona yaxın olan qonşu P' nöqtəsinin vəziyyəti $(u+du; v+dv)$ cütü ilə təyin olunacaqdır, burada du və dv koordinatların kiçik artımlarıdır və diferensiallar (*lat.* differentia – "fərq") adlanır. İstənilən nöqtənin yaxınlığında əyri səth praktik olaraq müstəvidən fərqlənmir, belə ki, P və P' arasındakı məsafəni, adi halda olduğu kimi, xətkeşlə ölçmək olar. Qaussa görə, bu məsafə ds aşağıdakı düsturdan alınır:

$$ds^2 = g_{11}du^2 + 2g_{12}dudv + g_{22}dv^2,$$

burada g_{11}, g_{12} və g_{22} – səth üzərindəki nöqtənin funksiyasıdır. Səthin "daxili" həndəsəsini məhz ds^2 müəyyən edir. "Daxili" həndəsə səthin yerləşdiyi üçölçülü fəzanın "xarici" həndəsəsindən fərqlidir. Bu "xarici" Evklid fəzasında səthin həmin nöqtələri arasındakı məsafə daha sadə düsturla ifadə olunur:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

burada x, y, z – fəzanın Dekart koordinatlarıdır və $g_{11} = g_{12} = g_{22} = 1$.

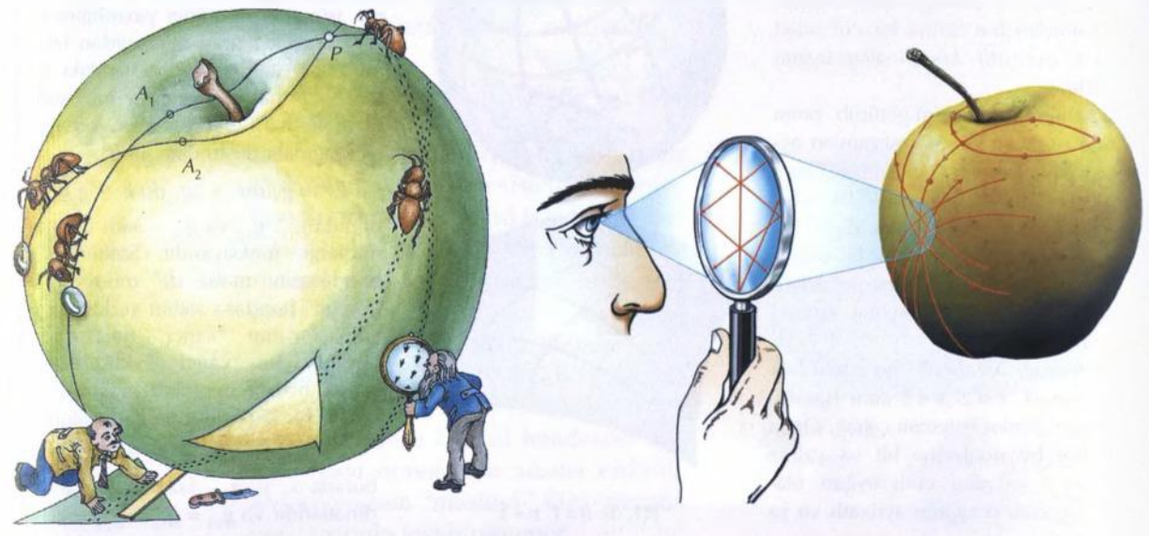
miqyasları yoxdur; diskin radiusu boyunca xətkeşin uzunluğu, diskin çevrəsinə toxunan boyunca xətkeşin uzunluğu ilə eyni olmayacaqdır. Ona görə də, diskin mərkəzinə nəzərən nöqtənin vəziyyətini birqiymətli təyin etmək olmaz. Bundan başqa, saatlarla problemlər yaranır. Əgər bir saatı diskin mərkəzində, digərini onun periferiyasında yerləşdirsək, onda onlar müxtəlif cür işləyəcəkdir. Fırlanmayan hesablama sistemi baxımından periferiyadakı saat gedişini diskin mərkəzindəki saata nəzərən yavaşıdacaqdır. Belə alınır ki, hadisələrin nə vaxtı, nə də koordinatları müəyyən olunmayıb: *t* artıq həqiqi vaxtı bildirmir, koordinatların fərqi isə

QARIŞQALAR – "GEODEZİSTLƏRDİR"

Əyilmiş fəza-zamanı adi alma səthi şəklində təsəvvür etmək olar. Tutaq ki, bağda alma yerə düşüb və onun üzəri ilə qarışqalar qaçır. Almanın səthinə böyüdücü şüşə vasitəsilə baxaq. Həşəratlar öz yolunu necə seçirlər? Almanın üzərində hər hansı qarışqanın hərəkət xəttini çəkək, sonra qabığını soyaq və lövhə üzərinə sərərək, onu düzəldək – lövhə üzərində qarışqanın yolu, lazer şüası kimi düz xətt olacaq. Bu yol məhz geodezik xəttdir. Qarışqalar əyilmiş səth üzrə ən məqsədəuyğun, ən qısa hərəkət yolunu seçir. Lokal olaraq, alma səthinin kiçik hissəsində geodezik xətlər düzxətlə üst-üstə düşür ki, bu da böyüdücü şüşə vasitəsilə yaxşı görünür.

Bəs geodezik xətlər böyük məsafələrdə özlərini necə aparır? Alma səthinin *P* nöqtəsindən müxtəlif istiqamətlərdə yola düşən iki qarışqaya nəzər yetirək. Onların PA_1 və PA_2 yolları təsadüfən almanın yuxarı hissəsində olan çuxurdan, lakin bu çuxurun müxtəlif tərəflərindən keçir. Qarışqalardan hər biri alma qabığının üzəri ilə mümkün qədər düz qaçmağa çalışmışdır, yəni öz geodezik xətti boyunca hərəkət etmişdir. Lakin çuxurun əyriliyi nəticəsində onların yolları əvvəlcə kəsişdi, sonra isə ayrıldı.

Qarışqalar elə hərəkət edir ki, sanki onları nə isə almanın gövdəciyinə cəzb edir – məsafəyə təsir edən Nyuton qüvvəsinə inanmaq istəyirsən. Lakin onların trayektoriyaları yalnız fəza-zamanın bütövlükdə, yəni böyük miqyaslarda əyriliyi səbəbindən kəsişir. Bu əyrilik materiyaya təsir edir, bunun nəticəsində başlanğıcda dağılan geodezik xətlər kəsişir. Öz tərəfindən materiya da fəza-zamanın həndəsəsinə təsir edir ki, bu da kütlənin konsentrasiyası sayəsində fəza-zamanın əyriliyini doğurur; burada kütlə simvolik olaraq almanın gövdəsiylə təmsil olunmuşdur. Bu gövdəcikdə, sanki, kütlə toplanmışdır və bu kütlənin hesabına almanın səthində çuxur əmələ gəlir. Real fiziki aləmin dilində gördüyümüzü belə ifadə etmək olar: kütlənin konsentrasiyası bütövlükdə fəza-zamanın əyilməsinə gətirib çıxarır.



daha nöqtələr arasındakı məsafə deyildir. Eynşteyn bu çətinlikləri yalnız riyaziyyatçıların qeyri-evklid fəzalarının təsviri problemini həll etdiyini biləndən sonra aradan qaldırdı.

ƏYİLMİŞ FƏZA-ZAMAN VƏ QRAVİTASİYA

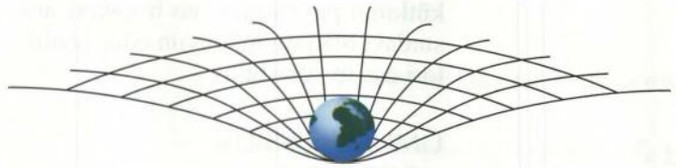
İkiölçülü səthlərin təsvirinin Qauss metodu bilavasitə üçölçülü və ümumiyyətlə, *n*-ölçülü hipersəthlərə tətbiq oluna bilər. Bunu Qaussun tələbəsi, Riman həndəsəsini yaratmış Riman göstərdi, Eynşteyn isə bu həndəsəni fizikaya tətbiq etdi.

Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsində fəza-zaman $x_0 = ct$, $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$ koordinatları ilə verilir, interval aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$ds^2 = dx_0^2 - dx_1^2 - dx_2^2 - ds_3^2, \qquad (1)$$

burada t – zaman, c – işıq sürəti, x, y, z – müstəvi Evklid fəzasının adi dekart koordinatlarıdır. Qravitasiya fəza-zamanı əyərək, onun həndəsəsinin şəklini dəyişdirir, yəni qravitasiyanı təsvir etmək üçün əyilmiş dördölçülü fəza-zaman lazımdır. Bu fəza-zamanda dekart koordinatları daha işləmir, Qauss koordinatlarından istifadə olunur; bir də ki, bu koordinatlar adi fiziki mənasını – nöqtələrin vəziyyətini və zamanın qiymətini təyin etmək vəzifəsini itirirlər. Fəza-zamanın hər bir nöqtəsinə (hadisəyə) dörd x_0, x_1 x_2, x_3 ədədləri aid edilir; bu ədədlərin birbaşa fiziki mənası yoxdur və yalnız nöqtələri nömrələməyə xidmət edirlər. Qonşu P və P' nöqtələrinə qiymətcə yaxın olan Qauss koordinatları uyğundur, P və P' arasındakı interval isə aşağıdakı ifadə ilə verilir:

$$ds^2 = g_{00}dx_0^2 + 2g_{01}dx_0dx_1 + \ldots + g_{33}dx_3^2, \qquad (2)$$



burada g_{00}, g_{01}, ... g_{33} metrik əmsalları nöqtənin seçilməsindən asılıdır. Deməli, bu cür dördölçülü fəza qeyri-bircinsdir: onun xassələri nöqtədən nöqtəyə dəyişir.

Rimana görə, əyilmiş fəzaların həndəsəsi, Evkliddə olduğu kimi, aksiomlarla yox, yaxın nöqtələr arasındakı məsafənin təyini qaydası ilə, başqa sözlə, *ds* xətti elementilə verilir. Metrik əmsallar dəyişirsə *ds*, yəni həndəsə dəyişir; yekunda əyilmiş fəza alırıq. Lakin bu effekti də qravitasiya ilə əlaqələndirmək olar: cisimlər bir-birini cəzb edir, ona görə ki, fəza-zaman əyilmişdir.

Beləliklə, qravitasiya sahəsinin təbiəti ilk dəfə aşkara çıxarılmış və eyni zamanda ümumdünya cazibəsinin hər yerdə mövcud olmasının səbəbi aydınlaşdırılmışdır. Qravitasiya fəza-zamanın əlahiddə xassəsinin, onun əyriliyinin təzahürü kimi hər yerdə iştirak edir.

Məsələn, Yer öz ətrafında *cazibə sahəsi* adlanan əyilmiş fəza-zamanı yaradır. Bu sahə bütün cisimlərə təsir edir və onların düşməsinə səbəb olur. Planetdən uzaqlaşdıqca sahənin cisimə təsiri azalır. Çox böyük məsafədə Yerin cazibə sahəsi o qədər zəifdir ki, cisim artıq Yerə düşmür: orada fəza-zaman olduqca az əyilmişdir, onu "müstəvi" hesab etmək və qravitasiyanı nəzərə almamaq mümkün olduqda, yenidən özünü göstərən xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin (1) düsturu ilə təsvir etmək olar.

Bəs fəza-zamanı əyilməyə nə məcbur edir? Bu suala yalnız qravitasiya sahəsinin fəza-zamanın əyriliyi ilə

Metrika (*yun.* "metron" – "ölçü") Evklid fəzasının nöqtələri arasındakı məsafə anlayışının əyilmiş fəzalar halına ümumiləşməsidir.

ds kəmiyyəti səthin *xətti elementi* və ya *metrikası*, g_{11}, g_{12}, g_{22} əmsalları isə *metrik əmsallar* adlanır.

kütlənin paylanması və hərəkəti arasındakı əlaqəni müəyyən edən tənlikləri cavab verə bildi.

ÜMUMİ NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN ƏSAS İDEYASI

Bu məqalədə qravitasiya sahəsinin tənliyi çıxarılmayacaqdır. İş ondadır ki, fizikanın fundamental tənlikləri (Nyuton, Maksvell, Eynşteyn tənlikləri) çıxarılmamışdır – onları etibarlı müəyyən olunmuş faktlara, prinsiplərə və postulatlara əsaslanaraq kəşf etmişlər. Eynşteyn də məhz belə yolla – məntiqi çıxarılış yolu ilə deyil, hipotez yolu ilə getdi.

Əyrixətli koordinatlar fiziki mənalarını itirdiyinə görə, bu koordinatlardan hansını seçməyin fərqi yoxdur – onlar eyni hüquqludur. İndi fiziki hadisələrə yalnız inersial yox, istənilən hesablama sisteminə nəzərən baxmaq olar. Bu yeni, *ümumi nisbilik prinsipi* qravitasiyanı təsvir etmək üçün, istisnasız olaraq, bütün hesablama sistemlərinin bərabərhüquqluluğunu hökm etdi. Buradan da qravitasiyanın yeni nəzəriyyəsinin adı – ümumi nisbilik nəzəriyyəsi əmələ gəlmişdir.



Fəza-zamanın əyriliyi ona gətirib çıxarır ki, dərhal bütün fəza üçün vahid hesablama sistemi daxil etmək mümkün olmur, bunu yalnız lokal olaraq, müşahidə nöqtəsinin kiçik ətrafında etmək mümkün olur. Hətta ən sadə əyilmiş səth üçün – Yer kürəsi üçün bir xəritə yox, minimum iki xəritə – yarımkürələr xəritəsi tələb olunur. Deməli, hər bir nöqtədə onun özünün lokal hesablama sistemini qurmaq lazımdır. Bu cür hesablama sistemi əyrixətli olduğundan, onda, dəqiq desək, artıq adi xətkeşləri və saatları tətbiq etmək olmaz.

Onlardan yalnız ona görə istifadə olunur ki, qravitasiya qarşılıqlı təsiri bütün məlum olan qarşılıqlı təsirlərdən ən zəifidir. Məsələn, iki protonun qravitasiya cəzb olunması onların elektrostatik itələnməsindən 10^{39} dəfə kiçikdir. Qravitasiyanın hamımıza tanış olan istənilən cismin çəkisi şəklində təzahürü ona görə böyükdür ki, qravitasiyanın təsiri altında cisimlər yalnız cəzb olunur, itələnmir. Ona görə də kütlələrin böyük topalarının, o cümlədən Yerin kütləsinin yekun təsiri hissediləcək qravitasiya effektlərinə gətirib çıxarır.

Ümumi nisbilik nəzəriyyəsi elə qurulmuşdur ki, yeni qanun kiçik hərəkət sürətlərində və kifayət qədər zəif qravitasiya sahələrində Nyutonun ümumdünya cazibə qanununa keçsin. Bu mümkün oldu, çünki Nyuton nəzəriyyəsinin özü sahə nəzəriyyəsi kimi formulə oluna bildi. Doğrudan

EYNŞTEYNİN TENZORİAL TƏNLİKLƏRİ

Qravitasiya sahəsi Nyuton təsvirində skalyarla, yəni bir kəmiyyətlə: Φ potensialı ilə ifadə olunub. Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin fəza-zamanında elektromaqnit sahələrini təsvir etmək üçün artıq $A=(A_0, A_1, A_2, A_3)$ vektoru şəklində olan potensialdan istifadə olunur. Maksvell tənlikləri A vektorunun komponentlərinə nəzərən ikinci tərtib diferensial tənliklərdir. Fəza-zaman dördölçülüdür, ona görə də A 4-vektoru bir yox, dörd komponentlə təsvir olunur.

Qravitasiyanı fəza-zamanın əyriliyi kimi təsvir etmək üçün məlum oldu ki, nəinki yalnız skalyarlar, həm də vektorlar kifayət deyildir. Eynşteynin sahə tənlikləri nə skalyar, nə də vektorial yox, *tenzorial* tənliklərdir.

Tenzor nədir? Ona sadə misal $\vec{a}$ vektorudur (o, bir ranqlı tenzor adlanır). Üçölçülü fəzada vektor koordinat oxları üzrə üç a_x, a_y, a_z proyeksiyaları ilə ifadə olunur. Onları bir a_j simvolu ilə işarə etmək olar, burada j indeksi 1, 2, 3-ə bərabər qiymətlər alır, beləki, $a_1=a_x$, $a_2=a_y$, $a_3=a_z$. Beləliklə, hər bir nöqtədə vektor – bu, verilmiş koordinat sistemində yazılmış üç ədəddir. Başqa koordinat sisteminə keçəndə bu üçlük a_1, a_2, a_3 xətti asılı olan digər üç ədədlə əvəz olunur: $a'_1=a'_x$, $a'_2=a'_y$, $a'_3=a'_z$. a_{ij} tenzoru (indekslərinin sayına görə – iki ranqlı tenzor) daha mürəkkəb kəmiyyətdir. i və j indekslərindən hər biri asılı olmadan 1, 2, 3 qiymətlərini alır, deməli, a_{ij} kəmiyyətlərinin tam sayı doqquzdur. Onları matrisa (cədvəl) şəklində yazmaq əlverişlidir:

$$a_{ij}=\begin{bmatrix} a_{11}, a_{12}, a_{13} \\ a_{21}, a_{22}, a_{23} \\ a_{31}, a_{32}, a_{33} \end{bmatrix},$$

burada birinci indeks (i) matrisanın sətirlərinin nömrəsini, ikinci indeks isə (j) onun sütunlarının nömrəsini işarə edir. a_{11}, a_{12} və s. – bunlar müəyyən ədədlərdir (verilmiş hesablama sistemində); başqa koordinat sisteminə keçəndə onlar da xətti qanunla dəyişir.



Albert Eynşteyn.
İ.Şarlın avanqard portret işi. 1950-ci il.

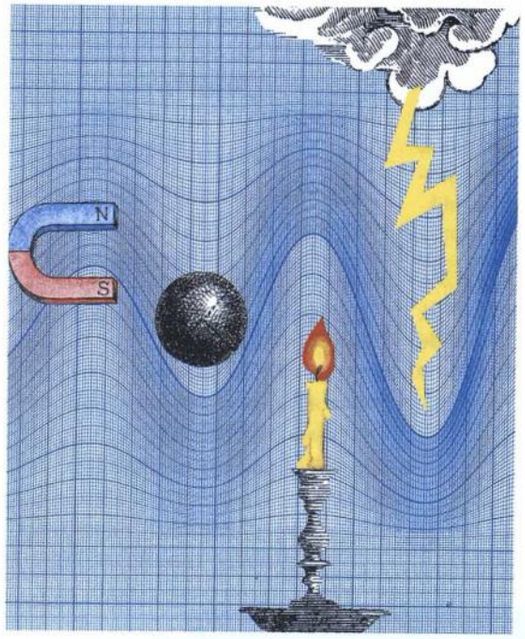
Eynşteynin tenzorial tənlikləri $R_{\alpha\beta}-\frac{1}{2}Rg_{\alpha\beta}=\chi T_{\alpha\beta}$ şəklindədir. Bu tənliklərə daxil olan tenzorları araşdıraq. $g_{\alpha\beta}$ kəmiyyətləri – bizə artıq tanış olan iki ranqlı tenzorun komponentləridir. Bu *metrik tenzordur*, o, fəza-zamanın metrikasını təyin edir. Dördölçülü əyilmiş fəzada onun α və β indeksləri 0, 1, 2, 3 qiymətlərini alır, yəni o, artıq üçölçülü yox, dördölçülü matrisa ilə ifadə olunur və 9 yox, 16 komponentə malikdir. Lakin verilmiş tenzor simmetrikdir: indekslərin yerini dəyişdikdə onun komponentləri dəyişmir, yəni $g_{\alpha\beta}=g_{\beta\alpha}$ və onun 16 komponentindən yalnız 10-u asılı deyildir.

$R_{\alpha\beta}$ (α, β = 0, 1, 2, 3) kəmiyyəti *Riççi tenzoru* adlanan tenzordur (həmçinin simmetrikdir); onun komponentləri $g_{\alpha\beta}$ tenzorunun komponentlərinin birinci və ikinci törəmələrilə ifadə olunur. R skalyarı $R_{\alpha\beta}$ tenzorunun komponentlərini cəmləməklə alınır.

Eynşteyn tənliklərinin sağ tərəfində fəza-zamanın əyriliyini doğuran materiyanın – mənbələrin $T_{\alpha\beta}$ – *enerji-impuls tenzoru* durur. Bu tenzorun T_{00} komponenti materiyanın ρs^2 enerji sıxlığını ifadə edir, qalan T_{oi}, T_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) komponentləri isə sahə mənbələrinin koordinat oxları boyunca enerji və impulsun paylanmasını xarakterizə edir.

Gördüyümüz kimi, Eynşteyn tənliklərinin sol və sağ tərəflərində hər birinin on asılı olmayan komponenti olan iki ranqlı simmetrik tenzorlar durur. Ona görə də Eynşteyn tənlikləri on məchula nəzərən – $g_{\alpha\beta}$ metrik tenzorun komponentlərinə nəzərən ikitərtibli on sayda diferensial tənliklərdən ibarət sistemdir.

da, M kütləli mərkəzi cisim tərəfindən cəzb olunan maddi nöqtə üçün $g=GM/r^2$ təcili Nyuton qravitasiya potensialı $\Phi=-GM/r$ ilə ifadə oluna bilər: $g=\partial\Phi/\partial r$ (G – Nyuton qravitasiya sabiti, r – maddi nöqtənin mərkəzi cisimdən olan məsafəsidir). Eyni səbəbə görə, Nyuton nəzəriyyəsində g sərbəstdüşmə təcilini qravitasiya sahəsinin intensivliyi hesab etmək olar. Nyutonun cazibə qanununu sahə anlayışları ilə də yazmaq olar:



$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}=4\pi G\rho, \qquad (3)$$

burada ρ – kütlələrin həcm sıxlığı, $\partial\Phi/\partial x$, ..., $\partial\Phi/\partial z$ – Φ potensialının xüsusi törəmələridir; potensial üç dəyişəndən asılıdır: $\Phi(x; y; z)$.

(3) tənliyi Φ qravitasiya potensialını (sol tərəf) mənbələrin (kütlələrin; sağ tərəf) ρ paylanma sıxlığından asılılığını ifadə edir, yəni göstərir ki: cazibə sahəsi bilavasitə kütlələrin paylanması ilə bağlıdır.

Puasson tənliyi kimi tanınan (3) tənliyi Lorens çevrilmələrinə nəzərən deyil, Qaliley çevrilmələrinə nəzərən invariantdır. Puankare hesab edirdi ki, cazibənin relyativistik nəzəriyyəsini xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi əsasında yaratmaq olar. Yalnız (3) tənliyinin şəklini dəyişmək: onun Lorens çevrilmələrinə nəzərən invariantlığına nail olmaq tələb olunur. Bunun üçün sol tərəfə $-1/c^2\cdot\partial^2\Phi/dt^2$ toplananını əlavə etmək lazımdır.

Lakin Eynşteyn başqa cür düşünürdü: müstəvi fəza-zaman əvəzinə ixtiyari Qauss koordinatlarına malik əyilmiş fəza-zaman daxil etmək lazımdır. Ona görə də Eynşteyn (3) tənliyini elə ümumiləşdirdi ki, o, ümumi nisbilik prinsipini ödəsin: bütün Qauss koordinat sistemləri eynihüquqlu olduğundan, tənliklər Qauss koordinatlarının ixtiyari çevrilmələri

CON ARÇİBALD UİLER



Əgər Con Arçibald Uilerin (1911-2008) çoxcəhətli elmi yaradıcılığını bir sözlə xarakterizə etməyə cəhd etsək, onda ən uyğun gələn söz "fantaziyalılıq" olardı. Onun ideyaları daim yeniliyi, paradoksallığı ilə seçilmişdir və riyazi gözəlliyin ən yüksək kriteriyasına cavab verir.

1937-ci ildə Uiler Heyzenberqdən asılı olmadan qarşılıqlı təsirləri xarakterizə etmək üçün *səpilmə matrisasını* (*S-matrisanı; ing.* scattering – "səpilmə") daxil etmişdir. 1939-cu ildə Borla birlikdə o göstərmişdi ki, ^{235}U nüvələri istilik neytronlarının təsiri ilə bölünə bilər, həmin ildə də uran nüvələrinin zəncirvari reaksiyasının mümkünlüyünü əsaslandırmış və nüvə reaktorunu idarə etməyin metodlarını təklif etmişdir. Alim mezoatomların mövcudluğunu 1947-ci ildə qabaqcadan xəbər vermişdi və artıq iki ildən sonra uranın μ-mezon zəbt etməklə bölünməsi imkanı haqqında hipotez – nüvə reaksiyasını həyata keçirməyin daha bir üsulunu irəli sürdü.

Uiler fəza-zamanın 10^{-33} sm miqyaslarında quruluşunu öyrənərək, *"kütləsiz"* kütlə modeli (*Uiler geonları*) və *"yüksüz" yüklər* (*Uiler "dəstəkləri"*) təklif edərək, yeni yanaşma işləyib hazırladı. Beləliklə, o, kütləni və yükü fəza-zaman topologiyasının məxsusiyyətlərilə əlaqələndirdi. Alim həmçinin kvant qravitasiyasının, qravitasiya kollapsının, neytron ulduzları nəzəriyyəsinin və böyük sıxlıq və temperaturda materiyanın quruluşunun problemlərilə də məşğul olmuşdur.

Con Uiler – nəzəriyyəçi fiziklərin böyük məktəbinin banisidir. Onun tələbələri öz müəllimindən yeniliyə can atmağı və fikrin gözəlliyini əxz etmişlər. Buna inandırıcı misal onlardan birinin – Nobel mükafatı laureatı Riçard Feynmanın yaradıcılığıdır.

zamanı dəyişməməlidir. Nəticədə Eynşteyn qravitasiyanın tənliklərini aldı; bu tənliklər, (3) tənliyi kimi, sahə ilə – fəza-zamanın əyriliyilə (sol tərəf) sahənin mənbələri – cisimlərin kütlələri və enerjiləri (sağ tərəf) arasındakı sıx qarşılıqlı əlaqəni ifadə edir:

$$R_{\alpha\beta}-\frac{1}{2}Rg_{\alpha\beta}=\chi T_{\alpha\beta}. \qquad (4)$$

Tənliklərin sol tərəfi potensialların ikinci törəmələri ilə ifadə olunur; potensiallar rolunu isə əyilmiş fəza-zamanın $g_{\alpha\beta}$ (burada α və β indeksləri 0, 1, 2, 3-ə bərabərdir) metrik əmsallar oynayır. R və $R_{\alpha\beta}$ kəmiyyətləri əyrilik tenzoru $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$-nın toplananları ilə ifadə olunur. (4) tənliklərinin sağ tərəfi qravitasiya sahəsinin mənbələrinin təsirini əks etdirir. $T_{\alpha\beta}$ kəmiyyətlərinə hərəkət edən kütlələrin kütlə, enerji və impuls sıxlıqları daxildir, yəni fəza-zamanın əyilməsini, təkcə maddənin kütləsi yox, bütün enerji növləri doğurur. $\chi=8\pi G/c^4$ – əmsalı Eynşteyn qravitasiya sabitidir. Burada c – işığın vakuumda sürəti, G – qravitasiya sabitidir.

Həndəsənin fizikaya tətbiqində Eynşteynin də sələfləri olmuşdur. Albert Eynşteyn yazmışdı: "Riman cəsarətli bir fikrə gəldi ki, cisimlərin həndəsi münasibətləri fiziki səbəblərlə, yəni qüvvələrlə şərtlənmişdir. Beləliklə, sırf riyazi mühakimələr yolu ilə o, həndəsənin fizikadan ayrılmazlığı fikrinə gəlib çıxmışdır: bu ideya özünün faktiki reallaşmasını 70 il keçdikdən sonra ümumi nisbilik nəzəriyyəsində tapdı; bu nəzəriyyə həndəsə ilə qravitasiya nəzəriyyəsini bir tam halında birləşdirdi".

Sonralar ingilis riyaziyyatçısı Uilyam Klifford (1845-1879) materiyanın fiziki xassələrilə əyilmiş fəzanın xassələrinin mümkün əlaqələri haqqında daha konkret hipotez irəli sürdü (o, yalnız fəza haqqında danışırdı: o vaxt fəza-zaman haqqında hələ heç kəs düşünmürdü). 1876-cı ildə Klifford öz işini o dövr üçün tamamilə gözlənilməz adla – "Materiyanın fəza nəzəriyyəsi haqqında" adı ilə çap etdirdi. Bu işdə o yazmışdı: "...fəzanın əyriliyinin dəyişməsi – bu, materiyanın (həm ağırlığı olan materiyanın, həm də efirin) hərəkəti adlandırdığımız hadisədə həqiqətdə baş verən bir şeydir... fiziki aləmdə bu dəyişiklikdən başqa heç nə baş vermir..."

1915-ci ildə Eynşteyn (4) tənliklərini alaraq, əvvəlcə ümid etdi ki, bu tənliklər vahid formada istənilən fiziki sahəni təsvir edir, çünki tənliklərin sağ tərəfində duran $T_{\alpha\beta}$ enerji-impuls tenzoru istənilən materiyanın və istənilən sahənin (qravitasiya sahəsindən başqa) enerji və impulsunu əks etdirirdi. Lakin sonralar alim əmin oldu ki, onun tənlikləri yalnız qravitasiya sahəsini təsvir edir. Tənliklərin sol tərəfi sırf həndəsi xarakter daşısa da, sağ tərəfi belə deyil.

Eynşteyn yazmışdı: "Sağ tərəfə hər şey, hələlik vahid sahə nəzəriyyəsində birləşdirilməsi mümkün olmayan hər şey daxildir". Ömrünün sonuna qədər o, öz tənliklərini "vəziyyətdən yalnız müvəqqəti çıxış" hesab etmişdir, çünki onlar qravitasiya sahəsini "quruluşu hələ məlum olmayan vahid sahədən süni olaraq ayırmışdır".

QRAVİTASİYA SAHƏSİNDƏ HƏRƏKƏT

Onda bəs ağırlıq qüvvəsi nədir? Nə üçün cisimlər Yerdə aşağı düşür? Bəs nə üçün planetlər Günəşin üzərinə düşməyib, onun ətrafında hərəkət edirlər?

Eynşteynə görə, cisim başqa cisimlərin təsiri altında yox, fəzanın təsiri



Simeon Deni Puasson.

Simeon Deni Puasson (1781-1840) fransız mexaniki, riyaziyyatçısı və fizikidir.

Fəza materiyaya necə hərəkət etməli olduğunu "göstərərək", ona təsir edir. Materiya da öz növbəsində fəzaya necə əyilməli olduğunu "göstərərək", ona əks-təsir edir.

C.A.Uiler



Kosmonavt ağırlıq qüvvəsini hiss etmir: o, lokal inersial koordinat sistemində yerləşir.

altında hərəkət edir: məhz fəza cismə "göstərir" ki, o necə hərəkət etməlidir. Onda cismin digər cisimlər tərəfindən məruz qaldığı ağırlıq qüvvəsindən danışmağa ehtiyac yoxdur.

İnsan nə qədər ki, yerdə, bərk dayaq üzərində durur, o, öz çəkisini hiss edir. Ona elə gəlir ki, Yer tərəfindən ona qüvvə (ağırlıq qüvvəsi) təsir edir. Lakin bu yanılmadır: kontakt qüvvəsi – Yer səthi tərəfindən dayağın reaksiya qüvvəsi təsir edir ki, bu da çəki kimi qavranılır. Amma fərz edək ki, dayaqlar yox oldu – Yer aralanır, cisim aşağı, uçuruma düşür. Onun çəkisi birdən yox oldu, ona görə ki, cismi tarazlaşdıran daha heç nə yoxdur. Yerin ağırlıq qüvvəsi hara yox oldu? Heç yerə yox olmadı: o heç vaxt olmamışdır.

Tutaq ki, kosmonavt kosmik gəmidədir və ya açıq kosmosa çıxıb. O hər hansı bir cazibə qüvvəsi hiss edirmi? Zərrə qədər də hiss etmir. Bu qüvvə gəminin özünə təsir edirmi? Yenə də yox. Fiziklər deyirlər ki, həm kosmonavt, həm də gəmi lokal inersial hesablama sistemindədir: bu sistemdə ağırlıq qüvvəsi sıfıra çevridi. Lakin sahə – fəza-zamanın əyriliyi heç yerdə sıfıra çevrilmir: o, ümumiyyətlə qüvvə xarakterinə malik deyildir. Qüvvə sahənin potensialının birinci törəmələrilə ifadə olunur, əyrilik isə qravitasiya potensiallarının – metrik əmsalların yalnız birinci yox, həm də ikinci törəmələri ilə ifadə olunur.

Planetlərə gəldikdə isə, onlar Günəşin cazibə sahəsində hər cür dayaqsız hərəkət edir – həmişə öz ulduzuna sərbəst "düşür". Bəs onlar nə üçün Günəşə elə belə də düşmədilər? Planetləri ulduzun ətrafında əyrixətli qapalı orbitlər üzrə hərəkət etməyə nə məcbur edir?

Ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin ilk nəticələrindən biri belə bir faktın isbatı oldu ki, sərbəst sınaq cismi (öz məxsusi qravitasiya sahəsini yaratmayan kifayət qədər kiçik kütləli cisim) ağır cismin sahəsində həmişə geodezik xətlər – ən qısa uzunluqlu xətlər boyunca hərəkət edir. Verilmiş qravitasiya sahəsində bu cür cisimlər onların kütlələrindən və tərkibindən asılı olmayaraq, eyni başlanğıc şərtlər daxilində eyni geodezik xətlər üzrə, yəni tamamilə eyni cür hərəkət edəcəkdir.

Ona görə də verilmiş qravitasiya sahəsində istənilən cisimlərin sürətinin dəyişməsi (onların təcilləri) eynidir. Bu məhz ağır kütlə ilə ətalət kütləsinin eyniliyi deməkdir ki, bu eynilik də nəzəriyyənin qurulmasının əsasında durdu.

Qravitasiya olmadıqda, xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin fəza-zamanında sərbəst zərrəciyin ətalət üzrə hərəkəti düz xətlə təsvir edilir. Düz xətt müstəvi fəzada ən qısa uzunluqlu xətdir, başqa cür desək, geodezik xətdir. Cazibə sahəsində sınaq cisimləri (onların təsirini nəzərə almamaq olar) də geodezik xətlər üzrə, lakin əyilmiş fəzada geodezik xətlər üzrə hərəkət edir və deməli, geodezik xətlər düz yox, əyri xətlərdir. Hesablama göstərir ki, mərkəzi cismin qravitasiya

Geodezik xətt – Evklid həndəsəsinin düz xətt və ya düz xətt parçası anlayışını daha mürəkkəb fəzalar halına ümumiləşdirən həndəsi bir anlayışdır. Əyri səth üzərində geodezik xətlərin kifayət qədər kiçik qövsləri, bu səth üzərində qövslərin ucları arasında ən qısa yollardır.

EYNŞTEYN VƏ HİLBERT

Qravitasiyanın tənliklərini Eynşteyn digər böyük alimlə – alman riyaziyyatçısı David Hilbertlə (1862-1943) rəqabət şəraitində kəşf etmişdir. Hilbert 1915-ci ildə, Eynşteynin inkişaf etdirdiyi proqram çərçivəsində, qravitasiya nəzəriyyəsinin qurulması proqramı ilə maraqlandı. Hilbert o dövrdə öz qarşısında fizikanın bütün qanunlarını bir neçə başlıca aksiomdan çıxarmaq məsələlərini qoymuşdu. Qravitasiya sahəsi tənliklərinin axtarılması Hilbert üçün bu problem üzərindəki işin bir hissəsi idi. Qəribədir ki, o həmin dövr üçün ən yeni olan Riman həndəsəsi metodlarına əsaslanaraq, sırf nəzəri yolla qravitasiyanın tənliklərini almağa müvəffəq olmuşdu. Qravitasiya tənliklərini Hilbert və Eynşteyn praktik olaraq eyni zamanda – on gün fərqilə tapdılar! Baxmayaraq ki, Eynşteyn tənliklərin son şəklini Hilbertdən sonra almışdı, onun tənliklərində sağ tərəfdə ixtiyari materiyanın eneriji-impuls tenzoru dururdu, halbuki Hilbertdə yalnız elektromaqnit sahəsinin enerji-impuls tenzoru dururdu. Böyük sovet nəzəriyyəçi fiziklərindən biri olan Vladimir Aleksandroviç Fok qravitasiya tənliklərinin kəşfini "insan dühasının ən böyük nailiyyəti" adlandırmışdı. Onların yaranması tarixini nəzərə alaraq, $R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta} = \chi T_{\alpha\beta}$ qravitasiya tənliklərini çox vaxt Hilbert-Eynşteyn tənlikləri adlandırırlar.



David Hilbert.

sahəsində bu əyrilər ellipslər şəklində qapanmışdır; praktik olaraq Günəşə təsir etməyən planetlər ellipslər üzrə hərəkət edir.

Cisimləri sınaq cisimləri hesab etmək mümkün olmadıqda, onlar artıq geodezik xətlər üzrə hərəkət etməyəcək, lakin fərqi yoxdur, bu cisimlərin hərəkət tənlikləri qravitasiya tənliklərindən alınır. Bunu da ilk dəfə Eynşteyn polyak alimi Leopold İnfeldlə birlikdə (nöqtəvi kütlələr üçün) və onlardan asılı olmadan (sonlu ölçülü cisimlər üçün) sovet nəzəriyyəçi fiziki Vladimir Aleksandroviç Fok 1938-1939-cu illərdə sübut etmişdir.

ÜMUMİ NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN EFFEKTLƏRİ

Eynşteynin qravitasiya nəzəriyyəsi (ümumi nisbilik nəzəriyyəsi) klassik mexanikada olmayan hadisələrin mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verir.

QRAVİTASİYA DALĞALARI

Sahə yanaşmasında yayılan qarşılıqlı təsiri "dalğa", "impuls", "siqnal" anlayışları ilə xarakterizə edirlər. Məsələn, elektromaqnit qarşılıqlı təsirin yayılması haqqında deyirlər: "İşıq siqnalı gözün torlu qişasına çatmışdır". Bəs qravitasiya qarşılıqlı təsiri hansı "siqnallarla" ötürülür?

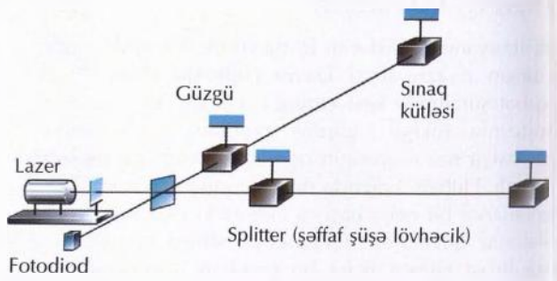
Bu cür siqnallar yoxdur: qravitasiya – fiziki fəzanın həndəsəsinin təzahürüdür. Lakin bu həndəsə zamandan asılıdır: fəza-zamanın əyriliyinin komponentləri dörd koordinatın hamısının, o cümlədən zaman koordinatı $x_0 = ct$-nin funksiyasıdır. Lakin əgər qravitasiya sahəsi zamandan asılıdırsa, onda o, elektromaqnit sahəsinə analoji olaraq, rəqs etməyə qadir deyilmi? Ola bilər, sudakı dalğalara oxşar olaraq, qravitasiya dalğaları – fəza-zamanın rəqsləri mövcuddur?

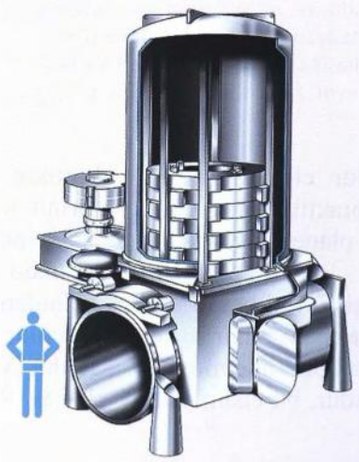
Qravitasiya dalğaları eksperimental yolla hələ ki aşkar olunmayıb, birincisi, onların qəbuledici qurğuya – *detektora* (*lat.* detector – "kəşf edən") və ya qravitasiya antenasına təsirinin zəifliyi üzündən, ikincisi, ona görə ki, sırf qravitasiya effektlərini heç də həmişə ətalət effektlərindən ayırmaq olmur. Bəzi fiktiv qüvvələrin sahəsini asanlıqla qravitasiya dalğalarına oxşatmaq

DÜNYA DALĞALARININ AXTARIŞI

1998-ci ildə lazer interferometrlərinin köməyilə qravitasiya dalğalarının aşkar olunması üzrə bir neçə möhtəşəm eksperimental proyektlərə başlanmışdır. İdeya ondan ibarətdir ki, qravitasiya dalğası interferometrdən keçərkən onun qollarının uzunluğunu dəyişdirir və bununla da interferensiya mənzərəsini dəyişir. Amerika sistemi LİGO-da (*ing.* Laser İnterferometer Gravitation Observatory – "lazer interferometrik qravitasiya rəsədxanası") interferometrin qollarının uzunluğu 4 km-ə bərabərdir və o, qolun uzunluğunun $4 \cdot 10^{-16}$ sm qədər, yəni atom nüvəsi ölçüsünün mində biri qədər dəyişməsini qeydə almağa qadir olacaqdır. Bu proyektlər son dərəcə bahalıdır (məsələn, Amerika proyektinin dəyəri 1 mlrd dolları aşır), lakin bununla belə, onları həyata keçirməkdə davam edirlər və onların köməyilə Kainatın təkamülünə dair nəzəri təsəvvürlərin yoxlanılacağına ümid edirlər.

Qoşa sistemdə ulduzlar qravitasiya dalğaları şəklində nəhəng enerji şüalandıraraq, bir-birinə yaxınlaşırlar ki, bu da onların birləşməsinə səbəb olur. Hesablamalar göstərir ki, bizim Qalaktikaya bənzər qalaktikada qoşa neytron ulduzların birləşməsinin tezliyi 5-10 min ildə bir dəfə baş verir. Deməli, Kainatdakı qalaktikaların çox böyük ümumi sayını nəzərə alsaq, qravitasiya-dalğa interferometrləri hər bir neçə gündən bir qravitasiya dalğalarının impulsunu qeydə alacaqdır. Beləliklə, hazırda eksperimental elmin yeni istiqaməti – qravitasiya-dalğa astronomiyası yaranmaqdadır.





LİGO qravitasiya dalğaları detektorunun sınaq kütləsi vakuum kamerasında.

olar. Tutaq ki, məsələn, hesablama sistemi ağır fırlanan cisimlə bağlıdır. Cisim qravitasiya dalğaları şüalandırmır, lakin belə sistemdə qravitasiyadan fərqlənməyən ətalət qüvvələri meydana çıxacaqdır. Bunlar müstəsna olaraq hesablama sisteminin seçilməsilə şərtlənən fiktiv qüvvələrdir.

Sönmüş vulkanın kraterində radioteleskop. Aresibo. Meksika.



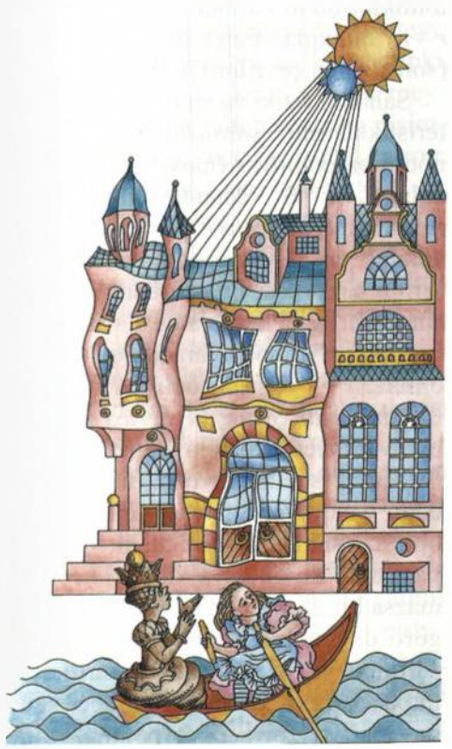
Qravitasiya dalğalarını koordinat effektlərindən ayıraraq, onları təmiz şəkildə almaq olarmı? Məsələni başqa cür ifadə edək: qravitasiya dalğalarının elə təsviri tələb olunur ki, bu təsvir hesablama sisteminin seçilməsindən asılı olmasın. Bu məsələ indiyədək dəqiq həll olunmayıb. Əsaslandırılmış nəzəriyyənin olmamasına baxmayaraq, qravitasiya dalğalarının axtarışı 1960-cı illərdən aparılır, lakin hələlik nəticə verməyib. Qeydə alınması mümkün olan Qravitasiya dalğalarının real mənbələri (qoşa ulduzlar, ifratyenilər, pulsarlar, qara çuxurlar) kosmosda yerləşir. Lakin onlardan alınan effekt çox kiçikdir. Qravitasiya

dalğaları detektora (adətən bir neçə metr ölçüsü olan ağır cisim) düşəndə, detektorda dalğanın amplitudu ilə mütənasib olan kiçik deformasiyalar yaranır. Bu cür deformasiyalar detektorun ölçüsünün 10^{-20} hissəsini təşkil edir, yəni istənilən halda atom nüvələrinin diametrindən çox kiçikdir. Lakin interferometriya texnikasının köməyilə detektorun uzunluğunun 10^{-22} dəqiqliklə nisbi dəyişmələrini qeydə almaq planlaşdırılır.

Hesab olunur ki, qravitasiya dalğaları ÜNN-nin nəzəri olaraq qabaqcadan xəbər verdiyinə tam uyğun olaraq aşkar olunmuşdur. Hələ 1974-cü ildə Aresiboda (Meksika) radioteleskopun köməyilə PSR 1913+16 qoşa pulsarı qeydə alınmışdı. Sistem ikinci ulduzun (o görünmür) ətrafında fırlanan pulsardan (sürətlə fırlanan və periodik radioimpulsar buraxan neytron ulduzdan) ibarətdir. Müasir astronomik texnika yüksək dəqiqliklə bu iki ulduzun onların ümumi kütlə mərkəzi ətrafında fırlanma periodlarını ölçməyə imkan verir. Məlum oldu ki, fırlanma periodu 1 san ərzində $2{,}4 \cdot 10^{-12}$ san qədər azalır – ola bilsin ki, qravitasiya şüalanması hesabına sistemin enerji itkisi nəticəsində azalır. Hesablamalara görə (Eynşteynin çıxardığı düstura əsasən), qravitasiya şüalanması zamanı ulduzun fırlanma periodunun dəyişməsi 1 san ərzində $2{,}38 \cdot 10^{-12}$ san təşkil etməlidir ki, bu da 1 % dəqiqliyi ilə müşahidələrlə üst-üstə düşür.



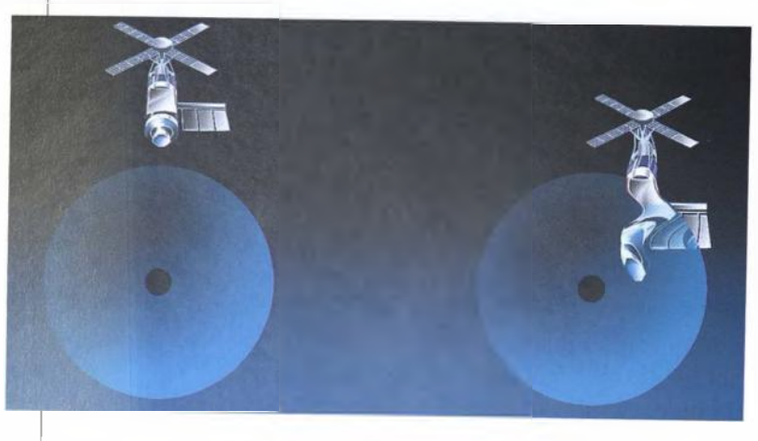
Ulduzun qara çuxura təkamülü.



Bu fərziyyə 1991-ci ildə, xassələrinə görə analoji olan, PSR 1524 + 12 qoşa pulsarının kəşfilə də təsdiqlənir. Beləliklə, qoşa sistemlərin müşahidə olunmasına, dolayı olsa da, qravitasiya dalğalarının mövcudluğunun təkzibolunmaz sübutu kimi baxılır.

QARA ÇUXURLAR

1783-cü ildə ingilis fiziki Con Mitçel, 13 il keçdikdən sonra isə fransız riyaziyyatçısı və astronomu Pyer Simon Laplas müəyyən etdilər ki, əgər işığa zərrəciklər (indi bunlar fotonlar adlanır) seli kimi baxsaq, onda işıq müəyyən şəraitdə şüalanan cismi tərk etməyəcəkdir. Məlum olduğu kimi, istənilən ağır sferik cisim üçün qaçma sürəti və ya ikinci kosmik sürət adlanan sürət göstərmək olar ki, həmin



Şvarsşild sferası.

sürətə malik zərrəcik bu cismi həmişəlik tərk edəcəkdir. Qaçma sürəti aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2GM}{R}},$$

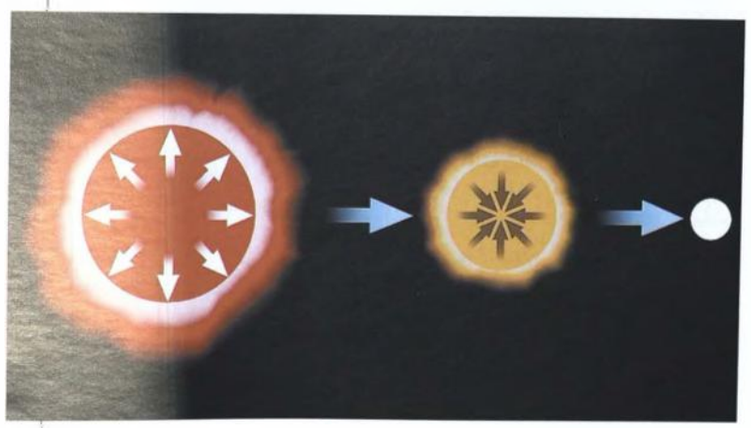
burada M – cismin kütləsi, R – cismin radiusu, G – qravitasiya sabitidir.

Kütləsi M olan cismin ölçüləri necə olmalıdır ki, onun üçün qaçma sürəti işıq sürətinə bərabər olsun? Əgər $v_0 = c$ olsaydı, onda

$$R = \frac{2GM}{c^2}.$$

Beləliklə, səthindən işıq zərrəciyi uçub gedə bilməyən cisim sıxılaraq, $R < 2GM/c^2$ radiuslu sferaya çevrilməlidir. (Bu kəmiyyəti sonralar *qravitasiya radiusu* adlandırdılar və r_g ilə işarə etdilər.)

Qravitasiya kollapsı.



Asanlıqla hesablamaq olar ki, Günəş kütləli ($\approx 2 \cdot 10^{33}$ q) cisim üçün qravitasiya radiusu r_g təxminən 3 km-ə bərabər olmalıdır. Əgər qəfildən Günəş bu radiusa qədər sıxılsa o, görünməz olacaqdır: heç bir foton onun sərhədindən kənara çıxmayacaqdır. Günəş maddəsinin sıxlığı 10^{16} q/sm^3-na çatacaqdır. Hansı qüvvə Günəşi bu cür ölçülərə qədər sıxmağa qadirdir? Bu cür obyektlərin təbiətdə mövcudluğu ağlasığmaz görünürdü. Alimlər də Mitçelin və Laplasın işlərinə lazım diqqət etmədilər.

Bu suala müasir qravitasiya nəzəriyyəsi cavab verə bilər. Artıq 1916-cı ildə alman astronomu Karl Şvarsşild (1873-1916) ağır sferik cismin qravitasiya sahəsində planetlərin hərəkətini, onlar arasındakı r məsafəsindən asılı olaraq təsvir edərkən, Eynşteyn tənliklərindən istifadə etmiş, $r = 0$ və $r = r_g$ olduqda, fiziki mənasını itirən (sonsuzluğa çevrilən) həll almışdır.

Sahənin fiziki və ya həndəsi xarakteristikalarının sonsuzluğa çevrildiyi nöqtələr *sinqulyar* (məxsusi) nöqtələr adlanır. $r = 0$ olduqda sinqulyarlıq (məxsusiyyət) *mərkəzi sinqulyarlıq* adlanır və sahənin nöqtəvi mənbələrinə baxılması ilə əlaqədardır. Belə sinqulyarlığı hesablama sisteminin heç bir çevrilməsilə aradan qaldırmaq olmaz. $r = r_g$ şərtini ödəyən nöqtələr isə *sinqulyar Şvarsşild sferası* adlanan bütöv bir sferanı əmələ gətirir.

Xarici (sükunətdə olan) müşahidəçi üçün sinqulyar sferanın daxilindəki oblast, sanki, mövcud deyil. O hətta xaricdən bu sferaya düşən heç olmazsa bir zərrəciyin sferaya çatacağını görə də bilməz: zərrəciyin sürəti işıq sürətinə yaxın olanda, bu zərrəciyin məxsusi vaxtı xarici müşahidəçi üçün dayanır və zərrəcik tərpənməz kimi

görünəcəkdir. Xarici müşahidəçinin nöqteyi-nəzərincə bu cür əlçatmaz sferalara *hadisələrin üfüqü* deyilir.

Əslində cisim üfüqdən keçib-getməyə – sinqulyar sferanın daxilinə girməyə və hətta sonlu vaxt ərzində $r = 0$ mərkəzinə çatmağa qadirdir. Yolüstü zərrəcik fəza-zamanın çox güclü əyilməsilə bağlı olan deformasiyalara məruz qalır. Şvarsşild sferasının daxilinə keçən cisim xarici müşahidəçi üçün əbədi görünməz qalır: heç bir işıq siqnalı bu sferanın altından çıxa bilməyəcəkdir. Şvarsşild sferasının daxilindəki oblast – görünməz qara çuxurdur.

Deyilənlər Şvarsşild sferasından keçərək düşən istənilən zərrəciklərə də aiddir. İşıq sürətindən kiçik sürətə malik olmaqla, onlar, xüsusilə, geriyə qayıda bilməzlər. Şvarsşild sferası altına girən bütün zərrəciklərin qaçılmaz olaraq mərkəzi sinqulyarlığa düşməsi *qravitasiya kollapsı* (*lat.* collapsus – "düşmüş") adlanır.

Uzaqlaşmış müşahidəçinin nöqteyi-nəzərincə qravitasiya kollapsı, sanki, həmişəlik donub qalmış cismin meydana çıxmasına səbəb olur; bu cisimdən ətraf fəzaya heç bir siqnal çıxmır. O donub qalıb, ona görə yox ki, tarazlıqdadır (çünki tarazlıq yoxdur). Xarici müşahidəçi üçün zaman sadəcə dayanmışdır, dayanmış kadrda cismin düşməsinin donmuş anı göründüyü kimi.

Xarici hesablama sistemindən ulduzun Şvarsşild sferası altına sıxılması prosesini müşahidə etmək olmaz. Kollapsa uğrayan ulduz üçün sonlu zaman ərzində başa çatan bir şey xarici müşahidəçi üçün heç zaman baş verməyəcəkdir. Burada heç bir məntiqi ziddiyyət yoxdur: bu, son həddə çatmış zaman bu zamanın gedişinin nisbiliyidir, son həddə çatmış nisbiliyidir. Kollapsa uğramış, yəni Şvarsşild sferasının daxilinə getmiş obyektin özü isə *kollapsar* və ya *qara çuxur* adlanır.

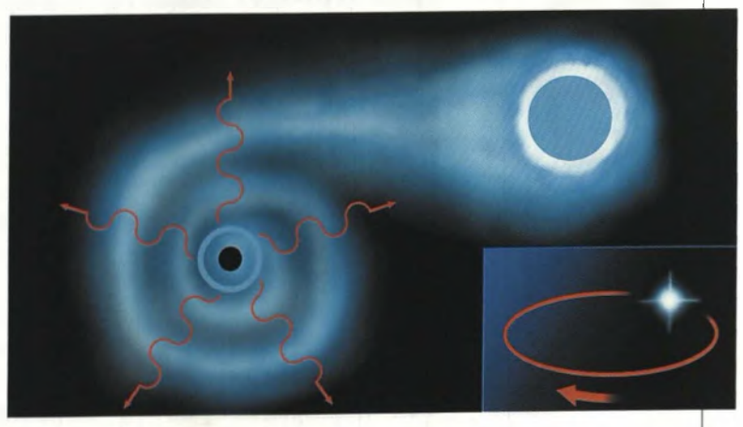
Ağır cisim, məsələn, ulduz, qeyri-məhdud sıxılaraq, tamamilə özünün sinqulyar sferasının altına getməyə və beləliklə, qara çuxura çevrilməyə qadirdirmi? Laplas dövrünün fiziklərinin qeyri-real saydıqları bir şey mümkündürmü?

Bu, termonüvə və yanacağı tükənmiş ağır ulduzların başına gəlir. Şüalanmanın daxili təzyiq qüvvəsi qravitasiya sıxılmasını daha tarazlaşdırmır və ulduz kollaps etməyə başlayır. Kollaps qeyri-məhdudmu olacaqdır?

İki-üç Günəş kütləsindən kiçik kütləyə malik olan ulduz, ömrünün sonuna yaxın, adətən, sıxılaraq ifrat sıx obyektlərə – ağ cırtdanlara və neytron ulduzlara çevrilir. Lakin əksər ulduzların kütləsi üç Günəş kütləsini xeyli aşır və heç nə gələcəkdə onların kollapsının qarşısını ala bilməz. Müasir fizika sinqulyarlıqda maddənin halını təsvir edə bilmir: orada maddə sonsuz güclü qravitasiya qüvvələri tərəfindən sonsuz sıxlığa qədər sıxılmışdır, fəza-zamanın əyriliyi sonsuzdur və təbiətin adi qanunları mənasını itirir.

Bununla belə, qara çuxurun əmələ gəlməsi prosesi heç də maddənin sonsuz sıxlığını tələb etmir və təbiətin məlum qanunlarına tabedir. Məsə-

Qara çuxuru onun qravitasiya sahəsinə və sorduğu qazın şüalanmasına görə aşkar etmək olar.



lən, kütləsi on Günəş kütləsinə bərabər olan ulduz kollaps prosesində, radiusu Şvarsşild radiusuna bərabər olan anda 10^{14} q/sm^3 sıxlığına malik olacaqdır.

Neytron ulduzlarda maddənin orta sıxlığı 10^{15} q/sm^3-ə yaxındır. Neytron ulduzların mövcudluğuna heç bir şübhə olmadığından, aydındır ki, maddə elə sıxlıqlara qədər sıxıla bilər ki, həmin sıxlıqlarda, hətta daha böyük sıxlıqlarda qara çuxurun əmələ gəlməsi realdır.

Astrofizikada ulduz kütləsinin sərhədi müəyyən olunmayıb, halbuki Şvarsşild sferasının radiusu ulduzun kütləsilə düz mütənasibdir. Məsələn, kütləsi 108 Günəş kütləsinə bərabər olan ulduzun kollapsı nəticəsində yaranan qara çuxurun radiusu 300 mln km-ə yaxın, yəni Yer orbitinin radiusundan iki dəfə böyük olardı. Bu zaman maddənin orta sıxlığı təxminən suyun sıxlığına bərabər olardı. Beləliklə, qara çuxurun əmələ gəlməsi üçün maddənin ifrat sıx halı tələb olunmur. Bax, ona görə, Laplas yazanda ki, ola bilsin, "Kainatda işıqsaçan ən böyük cisimlər bizim üçün görünməz olacaqdır", haqlı idi.

Bəs bilavasitə müşahidə edilməsi mümkün olmayan obyektlərin varlığına necə əmin olaq? Kollapsar, fəzaya heç nə şüalandırmadan, ətraf aləmlə özünün xarici qravitasiya sahəsi vasitəsilə qarşılıqlı təsirdə olur: bu sahə heç yerə yox olmur, baxmayaraq ki, onun mənbəyi görünməz olur. Əgər aşkar olunsa ki, hər hansı bir ulduz "boş yerin" ətrafına fırlanır, onda inamla söyləmək olar: orada qara çuxur var.



Qara çuxurların aşkar olunmasının başqa imkanı – rentgen və hətta γ-diapazonlarda qoşa ulduz sistemlərinin müşahidə olunmasıdır. Bu cür obyektlərin kütlələri haqqında şüalanmanın tezliyinə və gücünə əsasən fikir söyləyirlər. Bu cəhətdən ən böyük ümidlər 1987-ci ildə Böyük Magellan Buludunda partlamış obyektlə bağlıdır. Lakin hələ insanın qara çuxurla görüşü təxirə salınır.

KOSMOLOGİYA

Kosmologiya (*yun.* "kosmos" – "dünya" və "loqos" – "söz") – vahid bir tam kimi bütövlükdə Kainat haqqında təlimdir; Kainatın bütün görünən hissəsinin – Metaqalaktikanın nəzəriyyəsi də bura daxildir.

Artıq deyildiyi kimi, qravitasiya qarşılıqlı təsiri məlum qarşılıqlı təsirlərdən ən zəifidir. Lakin qravitasiya sahəsi hər yerdə iştirak edir və kosmik kütlələrin hərəkəti, hər şeydən əvvəl, onların qravitasiya qarşılıqlı təsirilə müəyyən olunur. Təəccüblü deyil ki, müasir kosmologiya məhz ümumi nisbilik nəzəriyyəsinə söykənir və ona görə də *relyativistik kosmologiya* adlanır.

Eynşteyn bunu yaxşı başa düşürdü. O yazmışdı: "Mənim fikrimcə, ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin prinsiplərindən istifadə etmədən kosmologiya sahəsində nəzəri yolla hər hansı etibarlı nəticələrə çatmaq mümkün deyildir". Artıq 1917-ci ildə alim Kainatı bütövlükdə təsvir etmək üçün özünün

yaratdığı qravitasiya nəzəriyyəsini tətbiq etdi və nəticədə Kainatın tarixi olaraq ilk modelini qurdu. Eynşteyn aşağıdakı fərziyyələrə əsaslanmışdı: 1) Kainat stasionardır, yəni zamana görə dəyişmir; 2) Kainat hər yerdə bircinsdir – kifayət qədər böyük kosmik miqyaslarda (10^8 işıq ili tərtibində və daha böyük) nöqtədən nöqtəyə dəyişmir; 3) Kainat hər yerdə *izotopdur* (*yun.* "izos" – "eyni" və "tropos" – "həyat tərzi", "xarakter") – onun xassələri istiqamətin seçilməsinə görə dəyişmir, yəni istənilən görüş şüası boyunca eynidir.

Nyutonun qravitasiya nəzəriyyəsi bu cür Kainatı təsvir etməyə yaramır: labüd olaraq *qravitasiya paradoksu* adlanan paradoks yaranırdı: kütlə bircins Kainatda r^3-na mütənasib artır, qravitasiya qüvvəsi isə r^{-2} kimi azalır və deməli, Nyuton düsturuna görə Kainatın istənilən nöqtəsində sonsuz böyük cazibə qüvvəsi təsir etməlidir ki, bu da gündəlik təcrübə ilə uzlaşmır.

Eynşteyn nəzəriyyəsi bu paradoksdan azaddır, ancaq başqa çətinlik yarandı. Əgər cazibə qüvvələri heç nə ilə tarazlaşmayıbsa, Kainat necə stasionar ola bilər. Axı qravitasiya itələnməsi yoxdur və kütlələr həmişə birbirini cəzb edir, bu isə mütləq Kainatın dönməyən sıxılmasına gətirib çıxaracaq – Kainat kollaps etməlidir. Stasionar Kainat modeli alınmadı.

Bununla belə, alim məsələnin həllini tapdı, lakin o, tənliyə əlavə toplanan – *kosmoloji həddi* əlavə etməyə məcbur oldu; bu həddi *kosmoloji sabit* adlanan Λ sabiti ilə mütənasibdir. Bununla da Yer şəraitində məlum olmayan hər hansı bir itələmə qüvvəsi daxil edildi; bu qüvvə məsafənin artması ilə artır. Onda çox uzaqlarda cazibə ilə kosmik itələmənin birgə təsiri Kainatın tarazlıq halını təmin edə bilərdi.



Eynşteyn tənlikləri Kainatı üçölçülü sfera şəklində təsvir edirdi – Eynşteynin Kainatı qapalı idi, yəni sonlu fəza həcminə malikdir. Belə sfera çərçivəsindən kənara çıxmaq qeyri-mümkündür və fiziki mənaya malik deyil. Kainatın sonlu radiusu ondakı bütün cisimlərin kütləsilə mütənasibdir və bu kütləsiz mövcud deyildir.

Lakin 1917-ci ildə Niderland astronomu Villem de Sitter (1872-1934) Kainatın "boş" modellərini – kütləsiz əyilmiş dünyaları təsvir edən həllər aldı.

De Sitterin kəşfi Eynşteyni təəccübləndirdi, lakin əsas sürpriz onu qabaqda gözləyirdi. 1922-1923-cü illərdə Peterburq riyaziyyatçısı Aleksandr Aleksandroviç Fridman (1888-1925) müəyyən etdi ki, Eynşteyn tənlikləri bircins və izotrop Kainatı, həm də boş olmayan Kainatı təsvir edən digər, qeyri-stasionar həllərə də malikdir. Bu həllərə görə, Kainat ya yalnız genişlənə, ya da ancaq sıxıla bilər.

Eynşteyn Fridmanın nəticəsinə inanmadı: əbədi mövcud olmayan bir nöqtədən genişlənmiş və ya bir nöqtəyə sıxılmış Kainatı xəyalına gətirə bilmirdi. Əvvəlcə kolleqasının he-



Aleksandr Aleksandroviç Fridman.





Arno Penzias.



Robert Uilson.

sablamalarda səhv etdiyini düşünən Eynşteyn tezliklə aydınlaşdırdı ki, Fridmanı təkzib etməyə çalışarkən, özü riyazi səhv buraxmışdır. Belə olduqda Eynşteyn etirazını geri götürdü və mətbuatda bunu elan etdi, bundan sonra elm aləmi Fridmanın nəticələrini qəbul etdi.

1929-cu ildə Amerika astronomu Edvin Pauell Habbl (1889-1953) uzaq qalaktikaların spektral xətlərində Dopler effekti sayəsində yaranan qırmızı tərəfə sürüşməni kəşf etdi. Beləliklə, o, belə bir faktın inandırıcı sübutunu əldə etdi ki, qalaktikalar bir-birindən uşaqlaşır, Kainat isə genişlənir. Eynşteyn nəzəriyyəsi fantastik bir hadisəni, heç kəsin gözləmədiyi Kainatın genişlənməsi hadisəsini təsvir etdi. Qravitasiya sahəsinin Eynşteyn tənlikləri doğru çıxdı, kosmoloji həddi əlavə etməklə onları dəyişdirməyə ehtiyac olmadı. Fridman modeli indiyədək nəzəri kosmologiyanın əsası olaraq qalır. Astronomik müşahidələr, xüsusən də 1965-ci ildə kosmik mikrodalğalı şüalanmanın kəşfi böyük miqyaslarda Kainatın bircinsliyi və izotropluğu haqqındakı fərziyyəni təsdiq etdi. Lakin Fridmanın həlli bizim Kainatın müxtəlif həndəsələrə: sferik, müstəvi və hiperbolik həndəsələrə malik olmasına yol verir. Bəs, bu həndəsə əslində necədir?

Eynşteynin özü həyatının son günlərinə qədər sonlu həcmli qapalı sferik model haqqındakı fikrə meyil göstərmişdi. Bu, *ossilyasiya* (*lat.* oscillo – "yellənirəm") edən Kainatdır. O öz mövcudluğunu nöqtədən başlayır, sonra partlayış nəticəsində genişlənir və maksimal radiusa çatır, bundan sonra sıxılır və nöqtəyə kollaps edir. Lakin onunla yanaşı, digər açıq modellər də mümkündür. Əgər onlar doğrudursa, onda bizim Kainat partlayışdan sonra heç vaxt sıxılma mərhələsinə keçmədən, qeyri-məhdud olaraq, genişlənməkdə davam edir.

Nədən asılıdır, Kainat qeyri-məhdud genişlənəcək, yoxsa genişlənmə, necə olsa da, sıxılma ilə əvəz olunacaq? Qravitasiya sahəsinin intensivliyindən; öz növbəsində bu intensivliyi qravitasiya kütləsi, yəni Kainatda maddənin (daha dəqiq, tam kütlə-enerjinin) orta sıxlığı müəyyən edir.

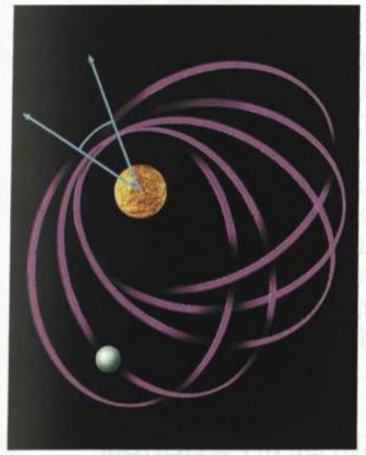
Bəs, Kainatda maddənin orta sıxlığı nə qədərdir? Bizim günlərdə bu suala qəti cavab alınmayıb. İş ondadır ki, heç də bütün kütlə-enerji qalaktikalara daxil deyil: onun bir hissəsi kosmik şüalar şəklində, bir hissəsi qalaktikalararası qaz şəklində, bir hissəsi qalaktik maqnit sahələri şəklində mövcuddur.

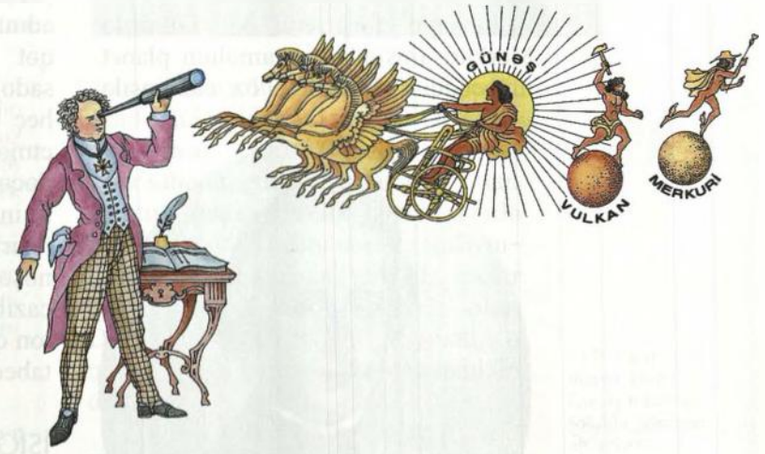
Nəhayət, müşahidə olunmayan, gizli-materiya da var; bu materiyanın təbiəti indiyədək aydınlaşdırılmayıb. Maddənin həqiqi orta qiyməti məlum olmadığına görə, fəzanı "qapamaq" üçün Kainatda maddə (enerji) kifayət qədərdirmi? – sualına da cavab vermək olmaz.

ÜMUMİ NİSBİLİK NƏZƏRİYYƏSİNİN EKSPERİMENTAL SÜBUTLARI

Hətta qravitasiyanın Eynşteyn nəzəriyyəsi elm aləmində nüfuz qazandıqdan sonra da qravitasiya nəzəriyyəsini başqa prinsiplər üzərində qurmaq cəhdləri edilmişdir. Lakin hər dəfə məlum olmuşdur ki, yalnız Eynşteyn nəzəriyyəsi istənilən eksperimental sınaqlara tab gətirir və astronomik müşahidələrlə təsdiqlənir. Nəzəriyyə həm birbaşa, həm də dolayı metodlarla sınaqdan keçirilmişdir. Dolayı metodlara Eynşteyn tərəfindən nəzəriyyənin əsası kimi qəbul edilmiş evristik (*yun.* "evrisko" – "tapıram") prinsipləri təsdiqləyən təcrübələr aiddir. Bu, məsələn, ətalət və qravitasiya kütlələrinin bərabərliyinin (və ya ekvivalentlik prinsipinin) macar fiziki Lorand fon Etveş tərəfindən 1889-1908-ci illərdə və Amerika tədqiqatçısı Robert Dikke tərəfindən 1964-cü ildə yerinə yetirilmiş dəqiqləşdirilməsidir. Eynşteyn nəzəriyyəsinin dolayı sübutları sırasına Amerika astronomu Edvin Habblın kəşf etdiyi Kainatın genişlənməsini və onun həmyerliləri Arno Penziasın və Robert Uilsonun aşkar etdikləri relikt şüalanmanı da aid etmək olar. Relikt şüalanma bütün Kainatı doldurmuşdur.

Necə olsa da bunlar Eynşteyn nəzəriyyəsinin xeyrinə olan yalnız dolayı dəlillərdir. Məsələn, Eynşteyn tənlikləri ekvivalentlik prinsipindən çıxmır, əksinə, bu prinsipin özü tənliklərin nəticəsidir. Birbaşa müşahidələr Eynşteynin sahə tənliklərilə bilavasitə bağlı olan effektləri təsdiqlədi.





MERKURİNİN PERİHELİSİNİN HƏRƏKƏTİ

Əgər Merkuri Günəş sisteminin yeganə planeti olsaydı, onda onun orbiti ideal ellips olardı, Günəş də bu ellipsin fokuslarından birində yerləşərdi. Lakin başqa planetlərin cazibəsi nəticəsində Merkuri hərəkətinin müntəzəmliyi pozulur. Nəticədə o, tərpənməz ulduzlara nəzərən tədricən dönən ellips cızır. Nyutonun cazibə qanunu əsasında aparılmış hesablamalar göstərir ki, bütün məlum planetlərin birgə yekun təsiri Merkuri orbitinin perihelisinin yüz ildə 532″ (bucaq sani-

Periheli (*yun.* "peri" – "yaxınlığında" və "gelios" – "günəş") göy cisminin orbit üzərində Günəşə ən yaxın olduğu nöqtəyə deyilir.

yələri) qədər dönməsinə səbəb olur. Lakin 1859-cu ildə fransız astronomu Urben Jan Jozef Leverye (1811-1877) Merkurinin hərəkətini müşahidə edərək, aşkar etdi ki, bu dönmə faktiki olaraq 575″ təşkil edir, yəni Merkuri orbitinin perihelisi Nyuton nəzəriyyəsinin qabaqcadan xəbər verdiyi kimi yerini dəyişmir.

43″ fərq çox kiçik olsa da bununla belə, o, müşahidələrin mümkün xətalarını xeyli aşır. Bunu astronomlar, o cümlədən Leverye əvvəlcə Uran planetinin hərəkətinin hesablanmış orbitdən meylini doğuran eyni səbəblərlə izah etməyə cəhd etdilər.

Leverye fərz etdi ki, Günəşlə Merkuri arasında da naməlum planet mövcuddur. Məhz o, öz cazibəsilə



Urben Jan Jozef Leverye.

XIX əsrin əvvəllərində astronomlar Uranın hərəkətinin qanunauyğunluqlarını müəyyən etməyə, yəni planetin müəyyən anlardakı vəziyyətlərini hesablamağa çalışarkən, aşkar etdilər ki, bunu etmək qeyri-mümkündür. Nə üçünsə Uran heç vaxt hesablanmış nöqtədə olmurdu: gah qabağa qaçırdı, gah da geri qalırdı. Alimlər fərz etdilər ki, ona naməlum planet təsir edir. Əvvəlcə naməlum planetin orbitini və vəziyyətini ingilis Con Adame və fransız Urben Leverye hesabladılar, bir az sonra isə, həmin 1846-cı ildə də alman astronomu Iohann Halle teleskopun köməyilə onların göstərdikləri yerdə planeti gördü, bu planet Neptun adını aldı.

Eynşteyn nəzəriyyəsinə görə, v sürətilə hərəkət edən planetin orbitinin baş oxu bir dövr ərzində əlavə $\Delta\varphi = 6(v/c)^2\pi$ rad qədər yerini dəyişməlidir. Merkuridə ilin uzunluğunu (88 Yer günü) və ondan Günəşə qədər orta məsafəni ($58 \cdot 10^6$ km) bilərək, Merkurinin sürətini hesablamaq çətin deyil. 1 rad 206 265″-ə bərabər olduğundan, 100 yer ili ərzində əlavə bucağın qiyməti 43,03″, müşahidə məlumatlarına görə isə 42,56″ ±0,94″ təşkil edir. Nəticə öz-özündən məlumdur.

Merkuri orbitinin davranışındakı anomaliyanı doğurur. Planetə Vulkan (Roma mifologiyasında alov allahı) adını verdilər. Məlum oldu ki, həqiqət Leverye fikirləşdiyindən həm sadə, həm də mürəkkəbdir. Heç kim heç bir Vulkan planetini eləcə aşkar etmədi, çünki əslində belə planet sadəcə mövcud deyildir. Merkuri orbitinin perihelisi görünməz Vulkanın təsiri altında yerini dəyişdirmir – Günəşə yaxın olan planetlərin hərəkəti cazibənin daha dəqiq qanununa: Nyuton qanununa yox, Eynşteyn qanununa tabedir.

İŞIQ ŞÜASININ ƏYİLMƏSİ

Hələ Nyuton fərz edirdi ki, işıq qravitasiyanın təsirinə meyillidir. İndi yəqinliklə məlumdur: əşya üzərinə düşən işıq ona təzyiq edir, yəni enerji daşıyır. Bu, belə bir fikirlə eyni güclüdür ki, işığın kütləsi var (hesablanmışdır ki, hər gün Yerə 160 ton günəş işığı düşür). Lakin onda uzaq ulduzdan gələn şüa Günəşin yaxınlığından keçərkən, planetlər və kometalar kimi, əyrixətli trayektoriya üzrə hərəkət etməlidir. Ulduzun özünün göydəki yeri isə sürüşmüş olacaqdır.

Ulduzun sürüşməsini hesablamaq olar, lakin Eynşteyn və Nyuton nəzəriyyələri müxtəlif cavablara gətirib

çıxarır. Birinci halda bu, təxminən 1,75″-dir, ikinci halda isə iki dəfə kiçikdir. Eynşteyn nəzəriyyəsi Günəşin yaxınlığında fəzanın əyilməsilə şərtlənən relyativistik düzəliş verir. Astronomik müşahidələr həqiqəti müəyyən etməyə birbaşa kömək etdi.

Günəşlə bir xətt üzərində olan ulduzu yalnız tam günəş tutulması zamanı görmək olar. Bu cür müşahidələr üçün 1919-cu ildən başlayaraq dəfələrlə ekspedisiyalar təşkil olundu. Yalnız 1969-cu ildən kvazarlardan gələn radiodalğaların meylini ölçməklə, ulduzların sürüşməsini günəş tutulmasından asılı olmadan təyin etmək imkanı yarandı. Birbaşa astro-

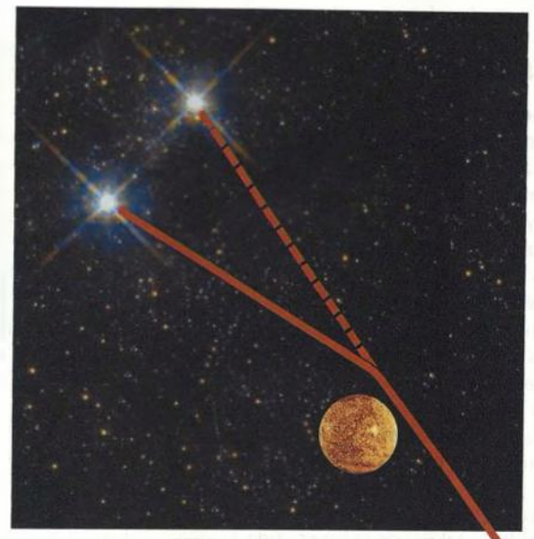
Kvazarlar (*ing.* quasar; quasistellar radio source – "radioşüalanmanın kvazi ulduz mənbəyi" sözlərinin ixtisarı) – Günəş sistemindən bir neçə min meqaparsek məsafəyə qədər uzaqlaşmış kosmik obyektlərdir. Ölçülərinə görə kvazarlar ayrı-ayrı ulduzlara yaxınlaşır, lakin ən güclü qalaktikaların şüalandırdığı enerjidən onlarca dəfə böyük enerji şüalandırır.

nomik müşahidələr sayəsində Eynşteynin qabaqcadan xəbər verdiyi qiymətə yaxın qiymətlər alındı, xəta 10%-i aşmırdı.

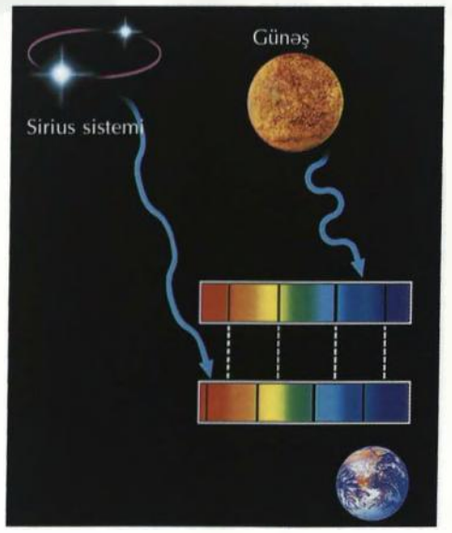
SPEKTRAL XƏTLƏRİN SÜRÜŞMƏSİ

Atomların şüalandırdığı elektromaqnit rəqsləri artıq çoxdandır ki, ideal saatlar kimi istifadə olunur. Əgər eyni şəraitdə iki eyni atomun şüalanmasının tezliyini ölçsək, onda nəticə həmişə eyni alınacaqdır.

İndi təsəvvür edək ki, atomlar müxtəlif şəraitdə yerləşir: biri Günəş səthi yaxınlığında, digəri isə Yerdə laboratoriyada şüalanır. Qravitasiya



sahəsi zamanın gedişinə təsir edir: sahə güclü olduqca, zaman bir o qədər yavaş gedir. Günəş üzərində, yəni sahənin güclü olduğu yerdə olan atomun şüalanmasının tezliyi Yerdə olan atomun şüalanmasının tezliyindən daha kiçik olur, deməli spektr qırmızı oblast tərəfə sürmüş olur. Doğrudur, sürüşmənin qiyməti o qədər kiçikdir ki, ölçülməsi mümkün olmur.



1919-cu il mayın 29-da Günəş tutulması. Şəkildə görünən ulduzların müşahidəsi ÜNN-nin qabaqcadan xəbər verdiyi effektləri ilk dəfə olaraq təsdiq etdi. Braziliyada Qrinviç rəsədxanası ekspedisiyasının çəkdiyi şəkil.



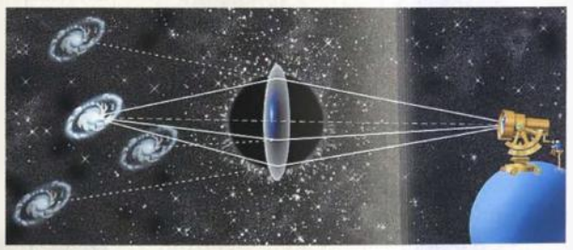
QRAVİTASİYA LİNZALARI

1979-cu ildə astronomlar QSO 0957+561 qoşa kvazarını öyrənərkən aşkar etdilər ki, hər iki komponentin şüalanma spektrləri və uzaqlaşma sürətləri dəqiq olaraq üst-üstə düşür. Fərziyyə yarandı: əslində bu iki müxtəlif obyekt deyil, eyni bir obyektin qoşa xəyalıdır. Əgər kvazarla müşahidəçi arasında nəhəng kütlə yerləşirsə, onda obyektin qoşalaşması baş verə bilər. Onda ÜNN-nin qabaqcadan xəbər verdiyi effekt – işıq şüalarının əyilməsi effekti linzanın təsirinə bənzər hadisəyə səbəb olur və bir obyekt əvəzində ikisi görünəcəkdir. Uzaqdakı qalaktikalardan kənar obyektlərin optik xəyallarını yaradan ağır kütlələr sistemi – qalaktikalar və ya kvazarlar *qravitasiya linzası* adlanır.

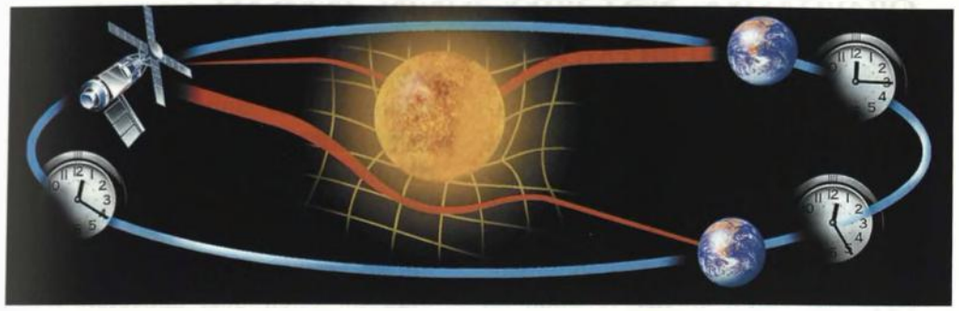
ÜNN-nin tənliklərinə əsaslanan dəqiq hesablamalar göstərdi ki, xəyalların sayı tək olmalıdır. Həqiqətən də üçüncü xəyalı, çox zəif olsa da, QSO 0957+561 kvazarının Nyu-Meksikodakı (ABŞ) böyük radioteleskopda alınmış şəkillərində aşkar etdilər. Hətta QSO 1115+080 kvazarının beşqat xəyalını aşkar etmişlər. Çoxqat xəyalların olması Habbl sabitinin qiymətini dəqiqləşdirməyə imkan verir. Təsvir etdiyimiz effektlərə cavabdeh olan qravitasiya linzasına qalaktikalar topasının nəhəng kütlələri daxildir; linzanın diametri, təqribi qiymətləndirmələrə görə, milyonlarla işıq ilindən böyükdür.

Ayrıca bir ulduzun və ya planetin qravitasiya sahəsi də işığı meyil etdirir, ancaq bu olduqca zəif olur. Xəyalların aralanması çox kiçikdir, 0,001″ tərtibindədir, lakin linzalaşan ulduzun parlaqlığının, onun linzanın və müşahidəçinin hərəkəti sayəsində yaranan dəyişməsi yaxşı müşahidə olunur. Bu hadisə ulduzun *mikrolinzalaşması* adını almışdır.

1984-cü ildə yaxın qalaktikaların ulduzlarının mikrolinzalaşmasından qalaktikalar arasında və ya onların daxilində ola biləcək gizli kütlənin və ya qara materiyanın axtarışı üçün istifadə etmək təklif olundu (bu ideyanı ABŞ-da işləyən polyak astrofiziki Boqdan Paçinski söyləmişdi). 1989-cu ildə P.K.Şternberger adına Dövlət Astronomiya İnstitutundan (MDU-nun nəzdində) bir qrup astronom Mixail Vasilyeviç Sajinin rəhbərliyi altında mikrolinzalaşma effektlərinin axtarışına başladı. İki il keçdikdən sonra Amerika və Avstraliya alimləri Böyük Magellan Buludu ulduzlarının bizim Qalaktikanın gizli kütlələri tərəfindən mikrolinzalaşmasının aşkar edilməsi üzrə MACHO proyektinin həyata keçirilməsinə başladılar. Eyni zamanda ERROS adı altında fransız və Çili alimləri analoji eksperiment aparmağa başladılar. Bu proyektlər çərçivəsində iki il ərzində bir neçə milyon ulduz üzərində müşahidələr aparıldı. 1992-ci ildə Amerika və polyak alimləri qrupu bu effektləri OGLE eksperimentində öyrəndilər. Nəticədə 50-dən çox halda ulduzların mikrolinzalaşması aşkar olundu. Müşahidələrin nəticələrinin təhlili göstərdi ki, Qalaktikada gizli kütlənin hər halda yarısı tünd (şüalandırmayan) obyektlərdən – sönmüş ulduzlardan və ya Yupiter tipli planetlərdən ibarətdir; bu obyektlərin kütləsi Günəşin kütləsindən xeyli kiçikdir.



Lakin uzaq kosmosda elə obyektlər var ki, onların yaxınlığında daha güclü effektlər mümkündür. Məsələn, Sirius qoşa sisteminin ağ cırtdanı suyun sıxlığından 30 min dəfə böyük sıxlığa malikdir. Bu ulduzun ətrafında qravitasiya sahəsinin intensivliyi elə böyükdür ki, şüalanma tezliyinin azalmasını ölçmək artıq mümkündür. Maunt-Vilson Amerika rəsədxanasının əməkdaşı Uolter Sidni Adame (1876–1956) ağ cırtdanda hidrogen spektrinin ayrı-ayrı xətlərinin sürüşməsini təyin etdi və nəticə ÜNN-də aparılmış hesablamalarla üst-üstə düşdü. Harvard universitetinin mütəxəssisləri Aeronavtika və kosmik fəzanın tədqiqi üzrə ABŞ Milli İdarəsi (NASA) ilə birlikdə 1976-cı ilin iyununda bu növ daha maraqlı eksperiment apardılar. İfrat dəqiq atom saatları raket vasitəsilə 10 min km-ə yaxın hündürlüyə qaldırıldı; onların göstərişləri Yerdə qalmış eyni cür saatların göstərişlərilə müqayisə edildi. Planetin səthindəki və raketdəki qravitasiya potensiallarının fərqi orbitdəki saatların gedişinin hissediləcək dərəcədə sürətlənməsinə səbəb oldu. Eynşteyn nəzəriyyəsinin düsturlarına



uyğunluq 0,001% nisbi dəqiqliklə sübut olundu.

RADİOLOKASİYA SİQNALLARININ LƏNGİMƏSİ

Radioastronomiyanın inkişafı ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin daha bir sınağını aparmağa imkan verdi. Bu sınaq Günəşin qravitasiya sahəsindən keçən radiolokasiya siqnalının yayılma vaxtının ləngiməsilə bağlıdır. Bu effekti ilk dəfə Amerika astrofiziki İrvin Şapiro (1918–1998) nəzəri hesablamış və 1962-ci ildə aşkar etmişdir.

Effektin mahiyyəti aşağıdakından ibarətdir. Radioverici aparat Yerdən radiodalğanı Günəş sisteminin başqa yerində yerləşən qaytarıcıya göndərir, qaytarıcı isə dalğanı qaytarır. Yerdəki saat vasitəsilə dalğanın ora və əksinə yayılma vaxtını ölçmək və onu Eynşteyn nəzəriyyəsindən alınan qiymətlə müqayisə etmək olar. Bu nəzəriyyəyə görə siqnalın yayılma vaxtı fəza-zamanın əyriliyindən asılıdır. Deməli, siqnal Günəşə nə qədər yaxın məsafədən keçirsə, geriyə – Yerə qayıdarkən o, bir o qədər çox ləngiyir.

1966-cı ildən başlayaraq elə eksperimentlər aparıldı ki, onlarda qaytarıcı kimi həm planetlərin (Veneranın, Merkurinin) səthi, həm də planetlərarası avtomatik stansiyaların (o cümlədən "Mariner-6") siqnalları qəbul edib, sonra geriyə Yerə ötürən elektron avadanlığından istifadə olunmuşdur.

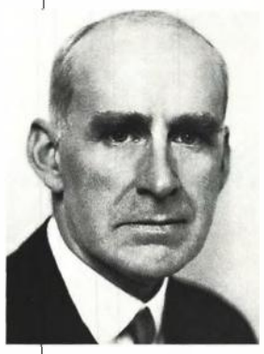
Siqnalların müşahidə olunan ləngiməsi qabaqcadan xəbər verilən qiymətdən bir neçə faiz fərqləndi. Beləliklə, Eynşteyn nəzəriyyəsi növbəti dəfə inandırıcı sübut əldə etmiş oldu.

XX əsrin axırına yaxın ümumi nisbilik nəzəriyyəsi yalnız Günəş sistemində yox, həm də onun sərhədləri xaricindəki müşahidələrin köməyilə etibarlı surətdə yoxlanılmışdır. İldə bir dəfə çıxan astronomik məcmuələri tərtib edərkən, böyük planetlərin, Ayın, kosmik aparatların hərəkətini hesablayarkən ümumi nisbilik nəzəriyyəsindən istifadə olunur. Nyuton nəzəriyyəsinin imkanları bunun üçün daha kifayət deyildir.



Saatlarla aparılan eksperimentdə əks relyativistik effektləri: təcillə hərəkət edən koordinat sistemində – raketdə saatların gedişinin yavaşımasını da nəzərə almaq lazım gəlmişdir.

QRAVİTASİYA NƏZƏRİYYƏSİNİN İNKİŞAFI VƏ YENİ PROBLEMLƏR



Artur Stenli Eddinqton.

Eynşteynin ümumi nisbilik nəzəriyyəsi öz mükəmməlliyi ilə adamı heyrətə salırdı, fiziki nəzəriyyəyə örnək kimi təsəvvür edilirdi. 1930-cu illərdə ingilis nəzəriyyəçisi, nisbilik nəzəriyyəsinin dərin bilicisi və onun ilk təbliğatçısı Artur Stenli Eddinqton (1882-1944) fizikanın həndəsələşdirilməsinə dair Eynşteynin ideyasında dünyanın ritminin dərk olunması üsulunu görürdü. Fizikanın qarşısında onun nəzəri elmə, yəni eksperimentə istinad etməkdən azad bir elmə çevrilməsi perspektivləri yarandı. Müşahidələrdən yalnız mücərrəd nəticələri yoxlamaq üçün istifadə etməklə, Kainatın quruluşunu sırf riyazi yolla başa düşmək mümkün oldu. Eddinqton fizikanın XVII-XX əsrlərdəki təşəkkülü müddətində onun şəklinin dəyişməsinə dair öz fikrini belə bildirmişdi: "Əvvəllər Allahı mühəndis kimi təsəvvür edirdilər, indi isə o riyaziyyatçıdır". Lakin tezliklə aydın oldu ki, heç də bütün hallarda bu nəzəriyyə məqbul həllər vermir. Bundan başqa, aşkar oldu ki, onun bəzi nəticələri fiziki baxımdan mübahisəlidir.



Qəribə də olsa, ÜNN-də istənilən fiziki nəzəriyyənin mərkəzi problemi olan enerji və impulsun saxlanması qanunlarının ödənməsi problemi həll olunmayıb. Hətta qravitasiya sahəsinin enerji-impulsunun fəzada paylanmasını düzgün təsvir edən ifadəni də qurmaq olmur. Bu problemi həll etmək üçün ilk cəhdi 1916-cı ildə Eynşteynin özü göstərmiş, sonra isə 1918-ci ildə qravitasiya dalğalarının enerjisini hesablayarkən onu təkrar etmişdi. Eynşteynin təklif etdiyi həll Şredingerdə və Lorensdə, həmçinin bəzi məşhur riyaziyyatçılarda (Feliks Kleyndə və Tullio Levi-Civitada) ciddi etirazlar doğurmuşdu. İş ondadır ki, qapalı həcmdə qravitasiya sahəsinin enerjisi üçün Eynşteyn tərəfindən koordinat çevrilmələrinin köməyilə tapılmış ifadə həm sıfıra, həm də sonsuzluğa çevrilir.

Sonralar da qravitasiya sahəsinin enerji probleminin çoxsaylı həlləri qənaətbəxş olmadı. Fəza-zamanın Riman həndəsəsi çərçivəsində indiyədək həlli tapılmayıb. Ona görə də danimarkalı nəzəriyyəçi fizik Kristian Müller (1904-1980) yaranmış vəziyyəti *qravitasiya nəzəriyyəsinin böhranı* adlandırdı. Böhrandan fəza-zamanın quruluşunun həndəsəsini dəqiqləşdirmək yolu ilə çıxmaq olar. Məsələn, rusiyalı fizik Boris Nikolayeviç Frolov (1939-cu ildə doğulub) qravitasiya sahəsinin yalnız tam enerjisi üçün ifadə tapmışdır, özü də yalnız burulma qravitasiya nəzəriyyəsi üçün.

Əyrilik kimi, burulma da həndəsi invariantdır. Burulma fəzaları fransız riyaziyyatçısı Eli Jozef Kartan (1869-1951) tərəfindən daxil edilmişdir. Burulma qravitasiya nəzəriyyəsində (Eynşteyn-Kartan-Trautman nəzəriyyəsi) hesab olunur ki, qravitasiya sahəsi zərrəciklərin yalnız enerjisilə yox, həm də onların spinlərilə də qarşılıqlı təsirdə olur.

ÜNN-nin digər "ağrılı nöqtəsi" məşhur ingilis riyaziyyatçısı Rocer Penrouzun (1931-ci ildə doğulub) 1965-ci ildə isbat etdiyi teorem Eynşteynin ÜNN-də *"sinqulyarlıqların labüd olması haqqında" teoremidir*. Teoremin mənası ondan ibarətdir ki, əgər Riman fəzası maddə ilə bircins doludursa, onda gələcəkdə bu maddə mütləq kollaps edir. Nəticədə fəza-zamanda sinqulyar nöqtə meydana çıxır ki, həmin nöqtədə maddənin sıxlığı sonsuzluğa çevrilir. 1969-cu ildə Penrouz ingilis fiziki Stiven Hokinqlə birlikdə sinqulyarlıqlar haqqında daha güclü teorem isbat etdi. Bu teoremdən, o cümlədən çıxır ki, sinqulyarlıq keçmişdə də hökmən mövcud olmuşdur.

Lakin realistik fiziki nəzəriyyə sinqulyarlıqlar doğurmamalıdır: sinqulyar nöqtələrə çox yaxın oblastlarda fizikanın bütün məlum qanunları ödənmir.

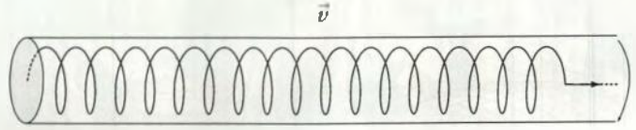
Qravitasiyanın Eynşteyn nəzəriyyəsi qravitasiya sahəsinin kvantlanması probleminin də öhdəsindən gələ bilmədi. Qravitasiyaya kvant yanaşmanın zəruriliyi bir neçə səbəbdən doğur. Ən mühümlərini göstərək. Əgər enerji daşıyan qravitasiya dalğaları varsa, onda bu enerji, bütün dalğalarda olduğu kimi, porsiyalarla (kvantlarla) şüalanmalı və udulmalıdır; bu kvantlar *qravitonlar* adlanır. Sonra, əgər kvant zərrəcikləri sırf klassik qravitasiya sahəsilə qarşılıqlı təsirdə olacaqsa, onda bu zərrəciklərin koordinatlarını və impulslarını dəqiq təyin etmək üçün prinsipial imkan meydana çıxacaqdır ki, bu da Heyzenberqin qeyri-müəyyənlik münasibətinə ziddir. Bir sözlə, materiyanın kvant təsviri qravitasiya sahəsinin də kvantlanmasını doğurur. Nəhayət, materiyanın və qravitasiya sahəsinin sinqulyarlıqlara yaxın oblastlarda, məsələn, qravitasiya kollapsı zamanı və ya Kainatın sinqulyarlıqdan yarandığı anda xassələrini başa düşmək üçün də kvant nəzəriyyəsi gərəkdir.



Rocer Penrouz.

Eynşteyn müasirlərini tez-tez təəccübləndirirdi. Növbəti dəfə bu 1924-cü ildə baş verdi. O dedi ki, onun qravitasiya nəzəriyyəsi köhnə efir anlayışını yeni təməl üzərində bərpa edib, halbuki elə görünürdü ki, xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi bu anlayışı həmişəlik dəfn etmişdir. Aradan qaldırıla bilinməyən və hər yerdə mövcud olan əvvəlki mühitin rolunu ümumi nisbilik nəzəriyyəsində Eynşteynin əyrilik sahəsi oynayır, bu sahəni də aradan qaldırmaq mümkün deyildir.

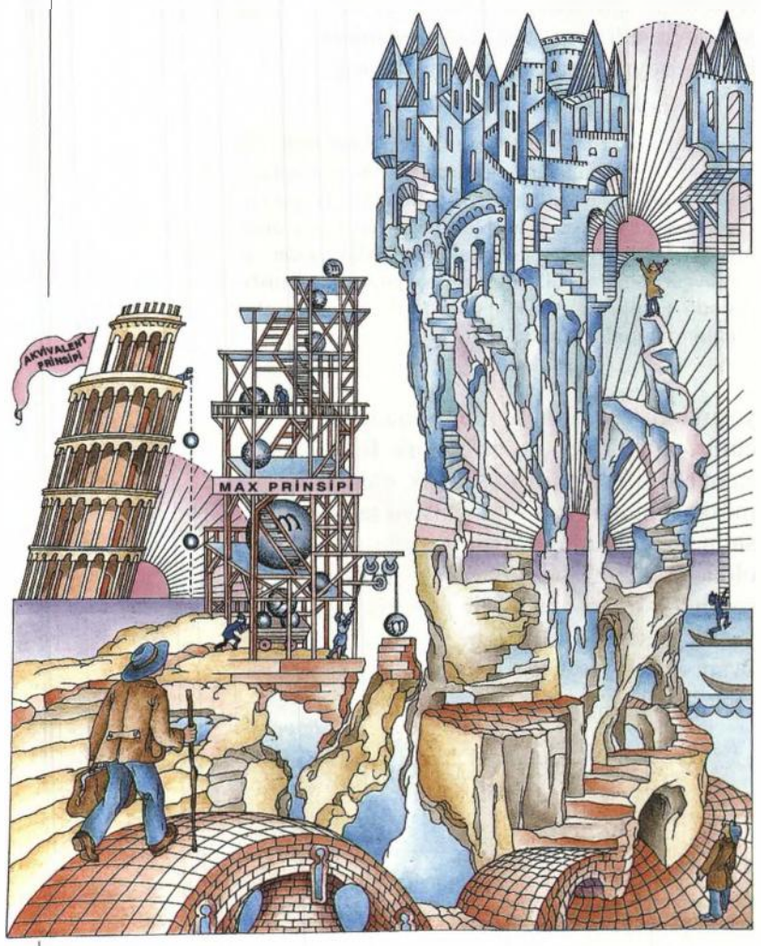
Kainatda proseslərin böyük əksəriyyətində qravitasiyanın kvant effektləri qeyri-adi dərəcədə zəifdir, deməli, heç nə qeyri-kvant Eynşteyn nəzəriyyəsindən istifadə etməyi qadağan etmir. Lakin kvant effektləri fəza-zamanın əyriliyinin ən böyük olduğu məxsusi nöqtələrin – qravitasiya sahəsinin sinqulyarlıqlarının yaxınlığında olduqca əhəmiyyətli ola bilər. Bu cür şəraitdə ümumi nisbilik nəzəriyyəsi yaramır, sinqulyar halları təsvir edən kvant nəzəriyyəsi isə hələ yaradılmayıb.



Burulma fəzasını mexaniki analogiyanın – yaylı borunun köməyilə təsəvvür etmək olar. Borunu apararkən yay fəzanın burulmasını xarakterizə edən müxtəlif bucaqlar qədər burulur.

Sinqulyarlığın özünü büruzə verdiyi miqyaslar mikroaləmin miqyaslarıdır: müxtəlif qiymətləndirmələrə görə onlar 10^{-33} sm təşkil edir ("Plank uzunluğu"). Deməli, vahid nəzəriyyə elementar zərrəciklərin xassələrini Kainatın – ən böyük tədqiqat obyektinin xassələrilə əlaqələndirə bilər. Bu, kosmologiyanı mikroaləmin fizikası ilə birləşdirən elm – *kosmomikrofizika* olardı. Dünyanın vahid fiziki mənzərəsi haqqında Eynşteynin arzuları bu cür yerinə yetmiş olardı.

Eynşteyn 1916-cı ildə qravitasiya dalğaları şüalanmasının intensivliyi üçün düsturu alarkən yazmışdı: "...atomdaxili elektronların hərəkəti nəticəsində atom təkcə elektromaqnit enerjisi yox, həm də cüzi miqdarda olsa da, qravitasiya enerjisi də şüalandırmalıdır. Bir halda ki, əslində təbiətdə buna bənzər heç nə olmamalıdır, onda, görünür, kvant nəzəriyyəsi yalnız Maksvell elektrodinamikasını deyil, həm də qravitasiyanın yeni nəzəriyyəsinin də şəklini dəyişdirməlidir".



Kvant sahə nəzəriyyəsinin metodları yarandıqdan dərhal sonra onun aparatının qravitasiya sahəsinə tətbiq etmək cəhdlərinə başlanıldı. İlk dəfə qravitasiya sahəsinin, doğrudur, kifayət qədər zəif sahənin kvantlanmasını 1935-ci ildə leninqradlı fizik Matvey Petroviç Bronşteyn (1906-1938) həyata keçirdi: Eynşteyn tənliklərinin qeyri-xətti xarakterini nəzərə almaqla, güclü qravitasiya sahəsinin kvant nəzəriyyəsini qurmağa başlayan vaxt məlum oldu ki, qravitasiyanın Eynşteyn nəzəriyyəsi bir sıra, öhdəsindən gəlmək mümkün olmayan çətinliklərlə qarşılaşır. Yalnız renormallıq problemi üzərində dayanaq.

Məlum olduğu kimi ("Standart model və onun çərçivəsindən kənarda" fəslinə bax), kvant zərrəciklərinin kütləsinin, yükünün və bəzi digər parametrlərinin qiymətlərini hesablamaq üçün onların kvant təbiətinə malik olan fiziki vakuumla qarşılıqlı təsirini nəzərə almaq lazımdır. Əgər parametrlərin alınan nəzəri qiymətləri sonludursa, yəni eksperimentdə müşahidə olunan qiymətlərlə üst-üstə düşürsə, onda əsasında uyğun hesablamalar aparılmış fiziki nəzəriyyə (məsələn, kvant elektrodinamikası kimi) *renormallaşan nəzəriyyə* adlanır. Lakin parametrlərin hesablanmış qiymətləri sonsuzluğa bərabərdirsə, onda nəzəriyyə *qeyri-renormallaşan nəzəriyyə* adlanır.

1972-ci ildə Niderland fiziki Gerard t'Hoft (1946-cı ildə doğulub) və onun

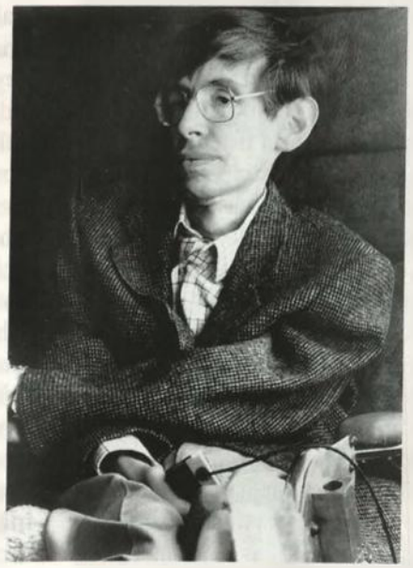
elmi rəhbəri Martinus Veltman (1931-ci ildə doğulub) dəqiq isbat etdilər ki, Eynşteynin qravitasiya nəzəriyyəsi qeyri-renormallaşandır. Bəs qravitasiyanın renormallaşan nəzəriyyəsini qurmaq yolları hansılardır? Onlardan biri – əlavə həndəsi strukturlara malik olan fəza-zamana keçiddir. Bu, məsələn, burulma qravitasiya nəzəriyyəsinin, həmçinin daha mürəkkəb həndəsəyə malik olan qravitasiya nəzəriyyəsinin bəzi variantlarıdır. Lakin

STİVEN UİLYAM HOKİNQ

Müasir fizikanın canlı əfsanəsi olan Stiven Uilyam Hokinq (1942-ci ildə doğulub) qravitasiya nəzəriyyəsini (ümumi nisbilik nəzəriyyəsini), kvant fizikasını və termodinamikanı bir tam şəklində əlaqələndirdi.

Oksford universitetinin məzunu olan Hokinq Kembric universitetində fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi (Qərb universitetləri tərəfindən verilən yüksək elmi dərəcə) almaq üçün dissertasiya müdafiə etdi (1965-ci il). Həmin vaxtdan onun həyatı Kembriclə bağlıdır. 1979-cu ildə Hokinq bu universitetin riyaziyyat üzrə Lukas professoru vəzifəsinə təyin edildi və İsaak Nyutonun və Pol Dirakın varisi oldu.

Hokinq kosmologiyanı təkmilləşdirərək və ətraf aləm haqqında təsəvvürlər sisteminə daxil edərək, onu real fiziki məzmunla zənginləşdirdi. Alimin diqqətini sinqulyarlıqlar cəlb etdi; bunlar fəza-zamanın elə nöqtələridir ki, onlarda fiziki kəmiyyətlər (materiyanın sıxlığı, enerji) sonsuzluğa çevrilir. Hokinq özünün işləyib hazırladığı metodların köməyilə Q.Ellislə birlikdə inandırıcı surətdə göstərdi (1966-1967-ci illər) ki, sinqulyarlar ümumi nisbilik nəzəriyyəsilə uzlaşan istənilən kosmoloji modelə xasdır. Müasir riyazi fizikanın metodlarına yiyələnərək, Hokinq və Rocer Penrouz sinqulyarlıqlar haqqında teorem (*Hokinq-Penrouz teoremi*) isbat etdilər; bu teorem, hamının etiraf etdiyinə görə, bu oblastda edilmiş ən güclü nəticədir.



Hokinqin böyük tsikl fundamental işləri qara çuxurlara və Kainatın təkamülünün ilkin mərhələsinə həsr olunmuşdur. Hokinqin fikrinə görə, qara çuxurlar "buxarlanma" qabiliyyətinə malikdir. 1974-cü ildə "buxarlanma" prosesinin mexanizmini təklif etdi: qara çuxurlar səthi yaxınlığında zərrəcik-antizərrəcik cütü doğulur (bu imkanı Heyzenberqin qeyri-müəyyənlik münasibəti göstərir). Cütü əmələ gətirən zərrəciklərdən biri qara çuxura düşür, digəri isə uçub gedir və özü ilə enerji aparır. Uçub gedən zərrəcikləri bəzən *Hokinq şüalanması* adlandırırlar. Bu cür şüalanmanın olması onu göstərir ki, istənilən qara çuxur müəyyən bir xarakterik temperatura malikdir. Beləliklə, qravitasiya nəzəriyyəsi, kvant fizikası və termodinamika bir tam şəklində bir-birilə bağlıdır.

Hokinqin qara çuxurlar fizikasına aid işləri fəza-zamanın bir sıra strukturlarını (elə strukturlarını ki, onlarda bu cür obyektlər yarana bilməz) atmağa və iki qara çuxurun birləşməsi qanunlarına olan məhdudiyyətləri aşkar etməyə imkan verdi. Elm aləminin çox böyük diqqətini fəza-zamanın strukturu problemlərinə dair müzakirələr cəlb etdi (1994-cü il). Bu müzakirə İsaak Nyutonun riyazi elmlər institutunda Stiven Hokinq və Rocer Penrouz arasında baş verdi.

İştirakçılardan hər biri üç mühazirə ilə çıxış etdi, sonra canlı fikir mübadiləsi başlandı. Bütün bunlar Nils Borla Albert Eynşteyn arasındakı məşhur müzakirəni xatırladırdı; o vaxt Eynşteyn kvant mexanikasını "son" nəzəriyyə kimi qəbul etməkdən imtina edirdi və Borun müdafiə etdiyi Kopenhagen şərhinə qarşı etiraz edirdi. Lakin Penrouz və Hokinq tərəfindən müzakirə olunan suallar daha mürəkkəb idi. Müzakirə geniş fəlsəfi xarakter daşıyırdı. Stiven Hokinqin "Zamanın qısa tarixi" adlı maraqlı kitabı var. Bu kitab dörd il "Sandi taymz" London qəzetinin bestsellərin siyahısına başçılıq etmişdir – bəşər tarixində bütün kitablar üçün mütləq rekorddur.

Elmi gözəl ideyaları və metodları ilə zənginləşdirmiş Stiven Hokinqin həyatı – insani qəhrəmanlıqdır, iradənin gücsüz bədən üzərindəki qələbəsidir. Onun son dərəcə gözəl işlərini oxuyarkən, təsəvvür etmək çətindir ki, onların müəllifi əlil arabasına bənd edilmişdir və xarici aləmlə nitq sintezatorunun köməyilə ünsiyyət saxlayır. Hokinqə xas olan möhkəm iradə, həyat eşqi və elmə sadiqliyi alimə ağır xəstəliyə üstün gəlməyə, müasir elmi yaradanlar dəstəsinin fəal və tamhüquqlu üzvü kimi qalmağa imkan verir.

onların da çatışmazlıqları var. Belə ki, qravitasiyanın kvant nəzəriyyəsinin qurulması problemi indiyədək öz həllini gözləyir.

Nəhayət, Eynşteynin qravitasiya nəzəriyyəsinin daha bir xüsusiyyətini qeyd edək. Müasir təsəvvürlərə görə, materiya quruluşunun əsasında duran üç növ fiziki qarşılıqlı təsirlərdən ikisi – elektrozəif və güclü qarşılıqlı təsirlər – deyildiyi kimi, kalibrləmə təbiətinə malikdir ("Kalibrləşmə sahələri" məqaləsinə bax).

1918-ci ildə alman riyaziyyatçısı German Veylin "Fəza, zaman, materiya" kitabı çıxdı. Burada elektromaqnetizmin *miqyas və ya kalibrləmə invariantlığı* – fizika qanunlarının ölçü miqyaslarının seçilməsindən asılı olmaması əsasında həndəsiləşdirilməsi nəzəriyyəsi şərh olunmuşdu.

Kalibrləmə invariantlığının əsas ideyasını başa düşmək üçün xatırlayaq ki, Nyutonun dövründə ingilis uzunluq vahidi fut və dyüm, Azərbaycanda isə hələ XX əsrin əvvəllərində sajen və arşın idi. Fizika qanunlarının doğruluğuna bu təsir etmirdi. Uzaq qalaktikada hər hansı bir sivilizasiya təsəvvür etmək olar: orada zamanın, uzunluğun və kütlənin öz vahidlər sistemi mövcuddur, lakin fizika qanunları Yerdəki qanunlarla üst-üstə düşür. Fizika qanunları ölçü vahidlərinin seçilməsinə nəzərən invariant olduqda bu mümkündür. Həm də sivilizasiya təsadüfi seçildiyinə görə, vahidlər sistemini də fəza-zamanın hər bir nöqtəsində ixtiyari seçmək olar.

ÜNN-də fizika qanunları hesablama sisteminin seçilməsinə nəzərən invariantdır. Lakin hesablama sisteminin özündə kəmiyyətləri ölçmək üçün labüd olaraq hər hansı bir vahid üsulla dərəcələnmiş və kalibrlənmiş alətlər və cihazlar lazım olacaqdır. Kalibrləmə üsulunun və miqyasların seçilməsindən fizika qanunları asılı olmamalıdır, lakin Eynşteyn nəzəriyyəsində belə deyil, bu nəzəriyyə miqyasa görə qeyri-invariantdır. Vəziyyəti düzəltmək üçün Veyl ÜNN-in həndəsəsinə yenidən baxdı və metrika ilə yanaşı, ondan asılı olmayan daha bir xarakteristika – *rabitəlilik* daxil etdi; baxılan halda rabitəlilik fundamental *Veyl vektoru* ilə təyin olunur.

1929-cu ildə alman riyaziyyatçısı German Veyl (1885-1955) göstərdi ki, Eynşteyn nəzəriyyəsində qravitasiya qarşılıqlı təsiri Rimana görə həndəsiləşdirildikdə kalibrləmə təbiətinə malik olmalıdır. Çox illər keçdikdən sonra bu problemi yenidən qaldırdılar: 1956-cı ildə yapon Reyu Utiyama (1916-cı ildə doğulub), 1961-ci ildə isə rusiyalı D.D.İvanenko. Lakin onu İngiltərədə T.Kibbl (1961-ci il) və Rusiyada B.N.Frolov (1963-cü il) daha ətraflı tədqiq etdilər. Məlum oldu ki, qravitasiya sahəsinin ardıcıl kalibrləmə şərhi yalnız Riman həndəsəsi çərçivəsindən kənara çıxmaq şərtilə həyata keçirilə bilər: fəza-zaman yalnız əyriliyə deyil, həm də burulmaya malikdir.

Veyl vektoru üçün dəqiq olaraq Maksvell tənlikləri ilə üst-üstə düşən dinamik tənliklər alındı ki, bu da Veylə bu vektoru elektromaqnit potensialı kimi şərh etməyə əsas verdi. Beləliklə, həndəsi kəmiyyətlərin – metrikanın və Veyl vektorunun köməyilə o dövrdə məlum olan bütün fiziki sahələr təsvir olundu.

Bununla bərabər, Veylin təklif etdiyi qravitasiya və elektromaqnetizmin vahid nəzəriyyəsi bir sıra müşahidə olunmayan hadisələri qabaqcadan xəbər verdi. Məsələn, Yer ekvatoru boyunca hərəkət edən xətkeş qərb istiqamətində hər dövrdən sonra planetin maqnit sahəsinin intensivliyilə mütənasib olan kəmiyyət qədər uzanır, şərq istiqamətində isə qısalır. Həmin effektə təyyarələr də məruz qal-



German Veyl.

malıdır. Veyl nəzəriyyəsində etalon xətkeşin uzunluğu, həmçinin etalon saatın gediş tempi onların hərəkətinin əvvəlki tarixindən asılıdır. Buna bənzər effektlər həqiqətdə müşahidə olunmur. Buna baxmayaraq, Veyl nəzəriyyəsi fizika qarşısında yeni perspektivlər açdı; bu perspektivlər kalibrləmə sahələrinin müasir nəzəriyyəsində reallaşmışdır.

Ümumi həndəsə əsasında qravitasiya və elektromaqnetizmi təsvir edən vahid nəzəriyyənin başqa bir variantını 1921-ci ildə alman fiziki Teodor Kalusa (1885-1954) təklif etdi. Onun nəzəriyyəsi fiziki reallığı dördölçülü yox, beşölçülü fəzada təsvir edir, həm də elektromaqnit sahəsinin potensialı beşinci koordinata uyğun olan metrik tenzorun komponentlərini təyin edir. Beşölçülü fəzada metrik tenzoru Eynşteyn tənlikləri təyin edir. Metrik tenzorun komponentləri üçün Eynşteyn tənlikləri Maksvell tənliklərilə üst-üstə düşür. Yüklü zərrəciyin hərəkət tənlikləri beşinci koordinat üzrə proyeksiyalarda elektrik yükünün saxlanması qanunu verir. Beləliklə, Kalusa nəzəriyyəsində elektromaqnit sahəsi beşölçülü fəza-zamanın həndəsəsində qurulmuş olur.

Bəs nə üçün adi həyatda biz bu beşinci koordinatı qavramırıq? Özümüzü Şarl Perronun tilsimlənmiş qəsrdə "Yatan gözəl" nağılının personajları təsəvvür edək. Bu qəsrdə qəddar pərinin hökmü ilə hər şey yuxuya qərq olmuşdur. Əşyalar tərpənməzdir, heç bir külək də əsmir. Bu donub qalma içərisində zamanın qaçışı tamamilə hiss olunmur, çünki onu hadisələrin bir-birini əvəz etməsinə görə qeydə alırlar ki, bu da baş vermir. Guya ki, yalnız fəza koordinatları qalıb, zaman koordinatı isə yox olub. Buna analoji olaraq, Kalusa nəzəriyyəsinin beşölçülü fəzasında

QÜVVƏ ADSIZ KƏMİYYƏTDİR

ÜNN-də bilavasitə ölçülə bilən yeganə kəmiyyət cismin $d\tau$ məxsusi zaman intervalıdır ki, onu da cisimlə bağlı saatın köməyilə tapmaq olar. İnterval və məxsusi zaman $ds = cd\tau$ düsturu ilə əlaqədardır. Ona görə işıq sürətinin $c = 1$ olduğu vahidlər sistemində zaman və uzunluq vahidləri arasında fərq yoxdur. Onda bəs zamanı nə üçün metrlərlə ölçməyək? Əgər qəbul etsək ki, qravitasiya sabiti $G = 1$-dir, onda kütlə də, enerji də və bir çox digər fiziki kəmiyyətlər də uzunluğun ölçüsünə malik olar. Maraqlıdır ki, 1927-ci ildə Qamov, Landau və İvanenko tərəfindən təklif edilmiş belə "qravitasiya" vahidlər sistemində qüvvənin özü də adsız olur!

"Qravitasiya" vahidlər sistemində bəzi fiziki kəmiyyətlərin qiymətləri

1 c	$2{,}998 \cdot 10^{8}$ m
1 kq	$7{,}423 \cdot 10^{-28}$ m
Plank sabiti $\hbar$	$1{,}64 \cdot 10^{-69}$ m
Elektronun kütləsi	$6{,}767 \cdot 10^{-58}$ m
Elektronun yükü	$1{,}38 \cdot 10^{-36}$ m
Yerin kütləsi	$4{,}438 \cdot 10^{-3}$ m
Günəşin kütləsi	$1{,}477 \cdot 10^{3}$ m
Bizim Qalaktikanın (Süd Yolunun) kütləsi	$2{,}7 \cdot 10^{14}$ m
Kainatın yaşı	$1{,}3 \cdot 10^{26}$ m
Yerlə Günəşin qarşılıqlı təsir qüvvəsi	$2{,}927 \cdot 10^{-22}$



müşahidəçi beşinci koordinatı, əgər ətraf oblastdakı əşyalar beşinci koordinatdan asılı deyilsə, duymur.

Kalusa yalnız zəif sahələrə və kiçik surətlərə baxmışdı. 1926-cı ildə isveçli fizik Oskar Kleyn bu məhdudiyyətləri aradan götürdü və göstərdi ki, nəzəriyyə istənilən sahələr və istənilən sürətlər üçün yarayır, həmçinin fərz etdi ki, fəza beşinci koordinata görə çox kiçik l radiuslu halqa şəklində bükülmüşdür. Məhz l-in kiçikliyi fiziki dördölçülü fəzada beşinci ölçünün müşahidəolunmazlığını izah edir. Kleynin fikrincə, beşinci koordinata görə hərəkətin tsikliliyilə elektrik yükünün diskretliyi bağlıdır. Yükün qiymətindən isə fəzanın metrikası asılıdır. Ona görə də hər bir yüklü zərrəciklə onun öz məxsusi beşölçülü dünyası bağlıdır.

Kalusa-Kleyn nəzəriyyəsinin əsas nöqsanı Eynşteynin ekvivalentlik prinsipinə oxşar, baza prinsipinin olmamasıdır. Həmçinin tsiklik beşinci koordinatın, sonsuz ölçülü digər koordinatlarla müqayisədə nəzərə alınmayacaq dərəcədə kiçik ölçüləri olan bu koordinatın nə üçün seçildiyi aydın deyil. Güclü və zəif qarşılıqlı təsirlərin kəşfindən sonra aydın oldu ki, qravitasiya və elektromaqnetizm təbiətdəki bütün qüvvələri əhatə etmir. Hazırda Veylin və Kalusa-Kleynin vahid nəzəriyyələrinə maraq yeni təməl üzərində canlanmışdır. Bu zaman Veyl vektorunu artıq elektromaqnit sahəsilə yox, hipotetik *dilaton sahəsilə* əlaqələndirirlər. Müasir fiziki nəzəriyyədə dilaton sahəsi kvant simlər nəzəriyyəsinin xüsusi halı kimi meydana gəlir.

Dilaton sahəsi elektromaqnit sahəsindən əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənir: onun təsir radiusu sonludur və olduqca kiçikdir, yəni bu sahə qısa təsirə malikdir, onun kvantları isə sıfırdan fərqli (və xeyli böyük) sükunət kütləsinə malikdir. Ona görə də dilaton sahəsinin təsiri yalnız elementar zərrəciklərin quruluşu səviyyəsində və ya Kainatın inkişafının ilkin mərhələsində mühüm ola bilər.

Müasir fizikada Kalusa-Kleyn nəzəriyyəsinə bənzər nəzəriyyələrə daha çoxölçülü fəzalarda baxılır. Məsələn, elektrozəif və güclü qarşılıqlı təsirlər ölçülərinin sayı ondan aşağı olmayan fəzalarda birləşdirilə bilər.

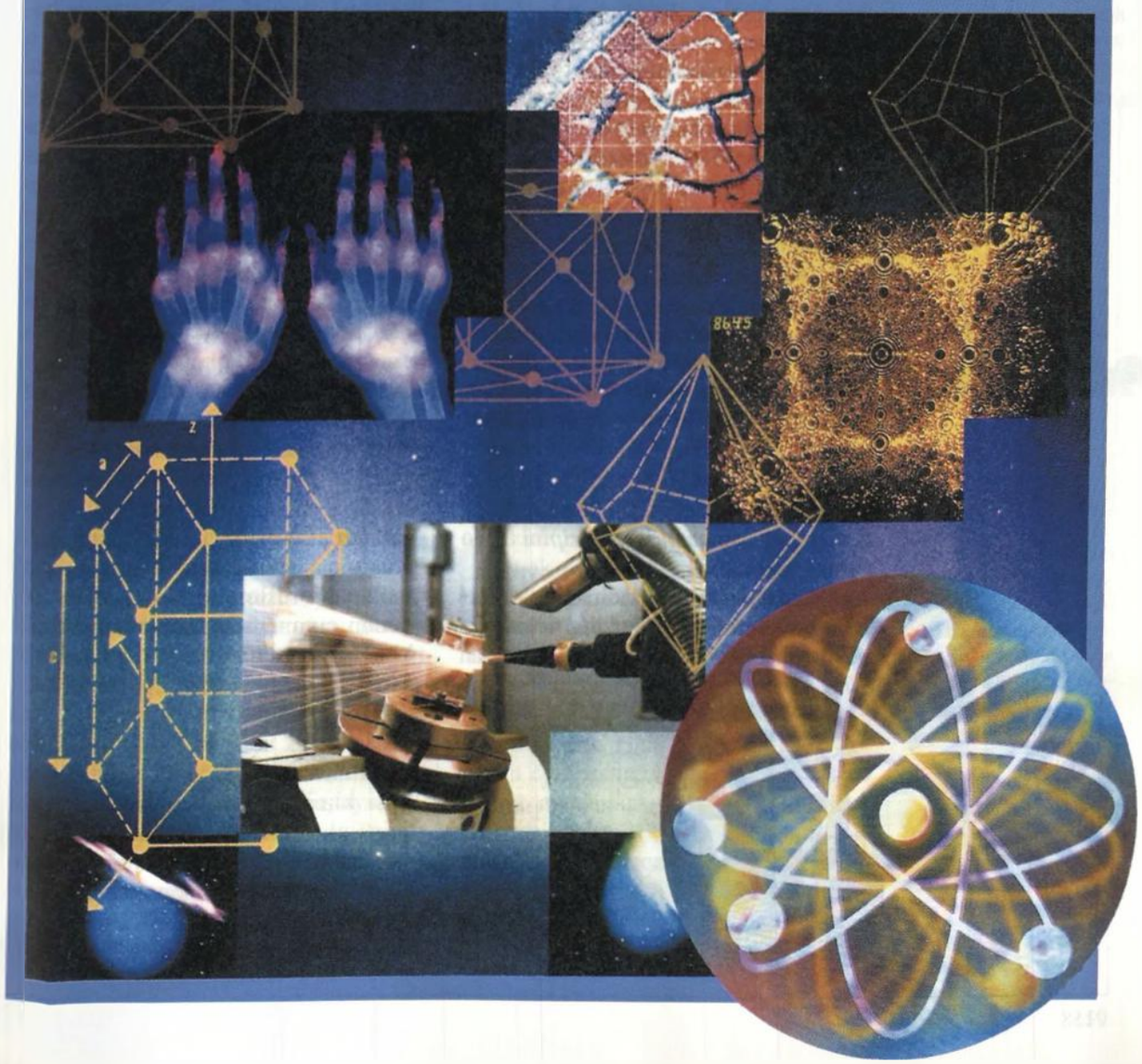
Bütün bunlar yalnız kalibrləmə sahələri nəzəriyyəsi yaradıldıqdan və supersimmetriya ("Supersimmetriya və supersimlər" oçerkinə bax) prinsipi kəşf edildikdən sonra məlum oldu.

"Dilaton" termini "dilatasiya" (*lat.* dilato – "genişləndirirəm") sözündən əmələ gəlib.

6

DÜNYANIN KVANT-STATİSTİK MƏNZƏRƏSİ

Termodinamikanın əsasları. Kvant fizikasının əsasları



BU DÖNMƏYƏN, BİRQİYMƏTLİ OLMAYAN DÜNYA

Nyutona görə dünya aydın və sadə idi. Mexanika qanunlarına görə bu dünyada zərrəciklər hərəkət edirdi. Onlarla və onlardan təşkil olunmuş maddi cisimlərlə baş verənlərin hamısı bu hərəkətin nəticəsidir. Bu hərəkəti yalnız düzgün başa düşməyi və hesablamağı bacarmaq lazımdır və onda şeylərin mahiyyətini dərk etmək olar. XIX əsrin əvvəllərinə qədər belə üsulla, istilik və elektrik istisna olmaqla, praktiki olaraq hər şey təsvir olunmuşdu. İstiliyi və elektriki çox yüzilliklər izah etməyə çalışmışlar. Lakin alimlərin ən çoxu fikirləşib tapa bildikləri – hər bir hadisə üçün çəkisiz, hər şeyə nüfuz edən substansiyanın: elektrik üçün – efir, istilik üçün – termogen daxil edilməsi oldu. Sonralar əmin oldular ki, heç bir termogen yoxdur, amma zərrəciklərin elə hərəkət növü var ki, bu hərəkəti təsvir etmək üçün təkcə Nyuton qanunları kifayət deyil; onlara *biristiqamətlilik prinsipini* əlavə etmək lazımdır.

Biristiqamətlilik nədir? Bu, zamanın keçmişdən gələcəyə doğru bir istiqamətdə axmasıdır. Mexanikada zaman



o qədər də mühüm parametr deyildir: burada bütün hərəkətlər və proseslər dönəndir. Onları zamana görə geriyə döndərmək olar və ... hər şey həmin qanunlara tabe olacaqdır. Əlbəttə, söhbət ideal obyektlərdən, Nyutonun hərəkət tənliklərinə tabe olan obyektlərdən gedir. Həm də yalnız sürtünmə olmadıqda – əks halda enerjinin bir hissəsi itir və əks istiqamətdə hərəkət artıq başlanğıc hala gətirib çıxarmayacaqdır. Mexanikada baş verənlər elektrodinamikada da baş verir. Lakin işimiz istiliklə olanda tamamilə başqa mənzərə müşahidə olunur. Məsələn, biz çaydanı qızdırdıq, ondakı su qaynadı, sonra qaynayıb buxara çevrildi... Bunu əks ardıcıllıqla yerinə yetirməyə çalışın! Alınmayacaq – proses dönməyəndir.

İstilik hadisələrinin dönməzliyini və ya biristiqamətliliyini anlamaq cəhdləri nəticəsində termodinamika yarandı. Termodinamika bütün istilik prosesləri üçün qanunlar məcəlləsidir. İstilik proseslərinin dönməzliyi heç nədən çıxmır, sadəcə olaraq, postulat kimi qəbul edilir, yəni varlıq kimi, müşahidə olunan fakt kimi qəbul edilir.

Həm də istiliyə termogen şəklində və ya istilik adlanan hərəkət şəklində baxılmasının fərqi yoxdur. İstilik mayesi kimi istilik nəzəriyyəsinin əsas prinsiplərini 1824-cü ildə fransız mühəndisi Nikola Sadi Karno söyləmişdir.

Baxmayaraq ki, sonralar termogen haqqındakı hipotezdən imtina etmək lazım gəldi, Karno nəzəriyyənin strukturunu düzgün anlamışdı. İstiliyin ilk mexaniki nəzəriyyəsi – *termodinamika* XIX əsrin ortalarında ingilis Uilyam Tomson (lord Kelvin) və alman fiziki Rudolf Klauzius tərəfindən yaradıldı. Tomsonun təklif etdiyi "termodinamika" adı o vaxt istiliyin məhz dinamik (mexaniki) nəzəriyyəsini bildirirdi. Hər iki alim istiliyə mexaniki hərəkətin formalarından biri kimi baxmış və bunun əsasında istilik hadisələrinin ümumi qanunlarını ifadə etmişdilər. Nəzəriyyənin "mexanikiliyinə" baxmayaraq, *fenomenoloji nəzəriyyə* alındı.

Sonralar dönməzliyin haradan çıxdığını anlamaq cəhdləri sayəsində *mikroskopik nəzəriyyə – statistik mexanika* işlənib hazırlandı. Statistik mexanika klassik mexanika baxımından termodinamikanın nə olduğunu aydınlaşdırdı. Burada "klassik mexanika baxımından" sözlərini daha geniş mənada başa düşmək lazımdır: mexanikanın əsasında, lakin ehtimallar nəzəriyyəsinin elementləri cəlb edilməklə, çünki əlavə ideyalardan istifadə edilmədən "dönən" klassik mexanikadan dönməzliyi almaq qeyri-mümkündür. Materiyanın kinetik nəzəriyyəsində statistik tədqiqatların başlanğıcını ingilis Ceyms Klark Maksvell və avstriyalı Lüdviq Bolsman qoymuşlar. Statistik mexanikanın qurulmasını, bir-birindən asılı olmadan, Amerika nəzəriyyəçi fiziki Cozayya Uillard Gibbs və həmin dövrdə hələ lap gənc olan Albert Eynşteyn başa çatdırdılar, həm də hər biri özünəməxsus tərzdə. Gibbs 1902-ci ildə "Statistik mexanikanın əsas prinsipləri..." kitabını nəşr etdirdi, 1902-1904-cü illərdə Eynşteyn həmin mövzuya aid Annalen der Phisik ("Fizikanın xülasəsi") jurnalında üç məqalə çap etdirdi. Yeni nəzəriyyə bir çox istilik hadisələrinin təkcə izahını deyil, həm də çoxlu sayda zərrəciklərlə bağlı olan istənilən məsələnin (çox cisim probleminin) həllinin qeyri-adi səmərəli metodunu verdi. Zərrəciklərdən hər birinin ayrılıqda davranışını izləmək qeyri-mümkündür, çünki onlara təsir edən bütün qüvvələri nə nəzərə almaq, nə də başlanğıc şərtlərini vermək olmaz. Lakin bunu hətta etmək mümkün olsaydı belə, heç bir hesablayıcı güc bütün hərəkət tənliklərini həll etmək üçün bəs etməzdi.

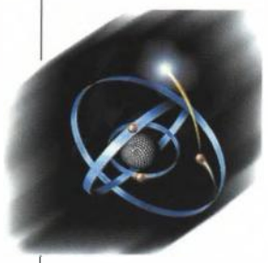
Obyekti bütövlükdə təsvir etmək çox-çox əlverişli və düzgündür. Xüsusən də, bütövlük səviyyəsində obyekt elə xassələrə malikdir ki, həmin xassələr onu təşkil edən ayrı-ayrı zərrəciklər üçün ümumiyyətlə mənaya malik deyildir. Burada dünyaya yeni bir baxış açılır və bu dünyanı təsvir etməyin daha bir üsulu kəşf olunur. Əvvəllər hesab olunurdu ki, istənilən obyekt verilmiş zaman anında hər hansı bir dəqiq müəyyən olunmuş haldadır və istənilən xarici səbəb zərrəciyə və ya sahəyə təsir edərək, yeganə bir nəticə doğurur. Statistik mexanikada hər bir tədqiq olunan obyekt ixtiyari götürülmüş zaman anında halların bütöv bir dəstindən olan hər hansı bir halda, bəzən eyni, amma çox vaxt müxtəlif ehtimalla ola bilər. Obyektə təsirin nəticəsi də birqiymətli deyil. Məlum oldu ki, dünyanı tam öncə görmək mümkün deyil. Dünyanın hər dəfə bu cür və ya başqa cür olmaq ehtimalı şansı meydana çıxır. XIX əsrin sonu – XX əsrin əvvəlinin insanı üçün hadisələrin bu kimi dönüşü ciddi müsibətə çevrildi. Hətta statistik mexanikanın yaradıcılarından biri olan Eynşteyn eyni statistik ideyalara əsaslanan kvant mexanikasını belə də qəbul etmədi.

XIX əsrin sonuna yaxın klassik fizikanın əzəmətli binasının tikintisi başa çatmaq üzrə idi. Elektromaqnetizmin nəzəriyyəsi yaradılmışdı, termo-

Fenomenoloji nəzəriyyə – bu, baxılan hadisə – fenomen üçün xarakterik olan və təcrübədə müşahidə edilən kəmiyyətlər arasındakı əlaqəni təsvir edən prinsiplər və qanunlar toplusudur, həmin kəmiyyətlərin mənşəyini daha dərin səviyyənin qanunları əsasında izah etməyən toplusudur.



Mikroskopik nəzəriyyə – fenomenoloji qanunları təbiətin fundamental prinsiplərindən məntiqi yolla çıxaran nəzəriyyədir; çox vaxt mikroskopik nəzəriyyəni fenomenoloji nəzəriyyənin əsaslandırılması adlandırırlar.



dinamika qurulmuşdu və onun statistik əsaslandırılması demək olar ki, qurtarmışdı. İstiliyin və işığın dinamik nəzəriyyəsində cəmisi iki özünəməxsus məsələ – *mütləq qara cismin* şüalanma spektrinin izah edilməsi və bərk cisimlərin istilik tutumunun davranışı məsələləri qalmışdı. Hər iki məsələnin həlli üçün tamamilə yeni *enerji kvantı* anlayışını daxil etmək lazım gəldi. Bu anlayış bütün qərarlaşmış təsəvvürləri kökündən alt-üst etdi və son nəticədə dünyanın müasir mənzərəsinə gətirib çıxardı.

Bu anlayış 1900-cü ildə statistik yanaşma çərçivəsində yarandı. Alman fiziki Maks Plank onu mütləq qara cismin şüalanma spektrini təhlil edərkən, doğru cavabı almağa imkan verən bir riyazi priyom kimi daxil etmişdi. Şüalanma kvantının reallığına isə o, uzun illər, düz kvant mexanikasının yaranmasına qədər inanmadı.

Eynşteyn bərk cisimlərin istilik tutumunun davranışını izah etmək üçün Plankın enerji kvantından artıq bir fiziki mahiyyət kimi istifadə etdi. Problem bundan ibarət idi ki, hesablanmış xüsusi istilik tutumu bütün bərk cisimlər üçün və bütün temperaturlar üçün eyni idi, ölçülən xüsusi istilik tutumu isə aşağı temperaturlarda sürətlə azalır. Eynşteyn göstərdi ki, temperaturu azaltdıqda sərbəstlik dərəcələrinin sayı azalır və bunun nəticəsində xüsusi istilik tutumu da azalır. Bundan başqa, o, Nyutonun işıq korpuskulları hipotezini yeni təməl üzərində dirçəltdi. Eynşteynə görə, şüalanma nəinki yalnız porsiyalarla buraxılır və udulur, həm də müəyyən porsiyalarla – fotonlarla yayılır. Fotonlar haqqında təsəvvürlərdən istifadə edərək, Eynşteyn fotoeffekt hadisəsini izah edə bildi.

Onda bəs işığın dalğa xassələrini necə başa düşək? Alimlər çaşıb qalmışdılar: "Nə üçün işığa bəzi hallarda dalğa kimi, başqa hallarda isə zərrəcik kimi baxmaq lazımdır? Bəs əslində işıq nədir?" Suallar cavabsız qalırdı. Əvvəlcə onları, ümumiyyətlə, mənasız hesab edirdilər. 1913-cü ildə Eynşteynin Prussiya Elmlər Akademiyasına üzv seçilməsinə dair böyük alman fiziklərinin, o cümlədən Plankın imzaladığı ərizədə Eynşteynin işıq kvantları hipotezi haqqında elə danışılırdı ki, bu hipotezə görə "onu çox da sərt günahlandırmaq lazım deyil". Alimlər öz mövqelərini onunla əsaslandırdılar ki, "riskə getmədən həqiqi yeniliyi, hətta ən dəqiq təbiətşünaslıqda belə həyata keçirmək olmaz".

1911-ci ildə isə yeni problem yarandı – ingilis Ernest Rezerford eksperimental olaraq sübut etdi ki, atomun mərkəzində ağır nüvə yerləşir, onun ətrafında isə, planetlər orbitlər üzrə fırlandıqları kimi, elektronlar fırlanır. Elektrodinamika qanunlarına görə hərəkət edən yük – elektron elektromaqnit dalğaları şüalandırmalı və deməli, öz enerjisini tez bir zamanda itirərək, nüvə üzərinə düşməlidir. Həqiqətdə atom tamamilə dayanıqlı bir törəmədir. Bir də ki, atomun optik spektri xətti quruluşa malikdir, yəni atom istənilən işığı yox, yalnız tamamilə müəyyən tezlikləri buraxır və udur. Yenə də ziddiyyət yarandı; onu danimarkalı fizik Nils Bor həll edə bildi. O, postulat kimi qəbul etdi ki, elektronlar atomlarda yalnız stasionar orbitlər üzrə hərəkət edə bilər. Stasionar orbitlərdə olduqda elektronlar enerji itirmir və yalnız başqa orbitə keçəndə enerji kvantı udur və ya buraxır. Yenidən Plankın kvant ideyası köməyə çatdı ki, bu da, ən azı, qəribə görünürdü...

Bütün bu hadisələr və onların izahları dünyanın mövcud mənzərəsinə sığışmırdı. İki on ildən çox vaxt keçdi. Fransız Lui de Broyl dərk etdi ki,

Mütləq qara cisim – istilik şüalanması nəzəriyyəsinin öz üzərinə düşən istənilən elektromaqnit şüalanmasını tamamilə udan cismi bildirən anlayışıdır. Bu anlayış elmə 1859-cu ildə Q. Kirxhof tərəfindən daxil edilmişdir.

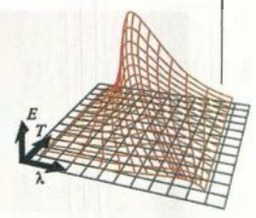
Sərbəstlik dərəcəsi – fiziki sistemin halının (mexanikada yerdəyişmənin) qeyri-asılı mümkün dəyişmələridir. Sərbəstlik dərəcələrinin sayı sistemin halını təsvir etmək üçün kifayət edən asılı olmayan parametrlərin (koordinatların) sayı ilə üst-üstə düşür.

yalnız fotonlar deyil, bütün zərrəciklər dalğa xassələrinə malikdir. Avstriyalı Ervin Şredinger özünün məşhur dalğa tənliyini çıxardı. Alman Verner Heyzenberq kvant mexanikasının matrisa variantını təklif etdi. Alman nəzəriyyəçisi Maks Born (1882-1970) isə kvant-dalğa iki təbiətliliyinin izahını tapdı: mikrozərrəciyin halları ehtimalların dalğa sahəsilə təsvir olunur. Yalnız onda alimlər tədricən anladılar ki, mikroaləmdə dəyişmələr kvantlanmış şəkildə, sıçrayışlarla baş verir. Demək olar ki, bütün fiziki kəmiyyətlər, istər kütlə, yük, impuls momenti və s. olsun, özünün kvantına – ən son minimal qiymətinə malikdir. Bu gün hətta fəza və zamanı kvantlayırlar, ancaq kvantların özlərinin az olduğu çox kiçik miqyaslarda, yəni ən son minimal qiymətin müşahidə edilən qiymətlə eyni tərtibdə olduğu miqyaslarda kvantlayırlar. Dünyanın kvant miqyası Plank sabiti $\hbar$ ilə – *təsir kvantı* ilə təyin olunur. Məhz bu sabit mikroobyektləri makroobyektlərdən fərqləndirməyə imkan verir: əgər təsir kvantı obyektin halını dəyişdirməyə qadirdirsə, onda bu mikroaləmin obyektidir və onu son dərəcə statistik xarakter daşıyan kvant qanunauyğunluqları ilə təsvir etmək lazımdır. Əks halda, obyektimiz klassik makroobyektdir.

Beləliklə, "kənara atılan istənilən addım" – miqyasın azalması və ya zərrəciklər sayının artması – klassik mexanika aləmindən "qaçmağa bərabərdir". Və dərhal statistika özünü göstərir: kiçik məsafələrdə kvant zərrəciyinin xassələri son dərəcə ehtimallı və ya statistik xarakter daşıyır. Zərrəciklərin sayı çox böyük olduqda (sərbəstlik dərəcələrinin sayı çox böyük olan zaman) da mənzərə statistik olur. Ancaq ikinci halda sistemin statistikliyinin kriteriyası onun vahid həcmindəki zərrəciklərin N sayının $N_A \sim 10^{23}$ Avoqadro ədədinə – istənilən qazın 1 mol maddə miqdarındakı molekulların sayına və ya $N_L \sim 10^{19}$ Loşmidt ədədinə – 1 sm^3 qazdakı molekulların sayına nisbətidir.

Əgər statistik mexanikanı klassik mexanika əsasında yox, kvant mexanikası əsasında qursaq, onda özünəməxsus kvant-statistik hibrid alınar ("statistikanın kvadratı" demək olar) ki, bu da bu gün dünyanın əgər relyativistik effektlər nəzərə alınmasa, deyəsən, ən dərin və ən ümumiləşmiş mənzərəsidir. Kvant zərrəciklərini birbirindən fərqləndirmək qeyri-mümkündür. İki zərrəciyin yerini dəyişdikdə bəzən ümumiyyətlə heç nə baş vermir, bəzən isə yalnız halın dalğa funksiyasının işarəsi dəyişir. Statistikanın yalnız "mexaniki" təməli yox, həm də xarakteri başqa olur. Bütün bunları əyani təsəvvür etmək, adi obrazlarla əlaqələndirmək olduqca çətindir. Lakin sovet fiziki Lev Davidoviç Landaunun dediyi kimi, "insan hətta xəyalına gətirə bilmədiyi şeyi də anlaya bilər".

Belə təəssürat yarana bilər ki, dünyanın istənilən yeni mənzərəsi öz sələfini ləğv edir. Bu heç də tamamilə belə deyildir: dünyanın mənzərəsi dünyanı bütövlükdə anlamaq üsullarından biridir. Yeni mənzərənin meydana çıxması ilə insanın imkanları genişlənir: o, dünyaya müxtəlif nöqteyi-nəzərdən baxmağı və əvvəllər hətta mövcudluğunu belə xəyalına gətirmədiyi guşələrə gedib çıxmağı öyrənir. Həm də insanların əvvəl bacardıqları hər şey onun ixtiyarında qalır. Lakin indi aydın olur ki, hansı mənzərə bu və ya digər hadisəni təsvir etmək üçün daha yaxşı yarayır və onun tətbiqolunma sərhədləri haradadır. Məsələn, 300 il əvvəl yaradılmış mexanika bu gün də əla işləyir, lakin heç də həmişə və hər yerdə yox.

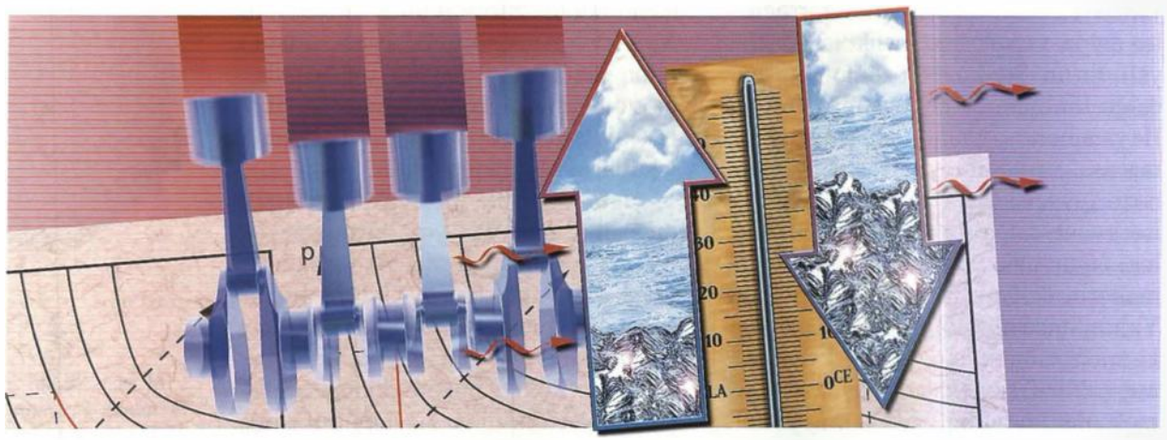


$\hbar$ Plank sabiti ölçüsü (enerji × zaman), qiyməti 6,626176(36) × × 10^{-27} erq-san-yə bərabər olan fundamental fiziki sabitdir.

$N_A = N_A/V_m$, burada V_m normal şəraitdə 1 mol ideal qazın həcmidir.

$N/N_A << 1$ olduqda hələ mexanikadan istifadə etmək olar. Yox, əgər $N/N_A \geq 1$ isə, onda bu artıq yolverilməzdir.





TERMODİNAMİKANIN ƏSASLARI

"TERMODİNAMİKA" VƏ "STATİSTİK FİZİKA" SÖZLƏRİNİN ARXASINDA NƏ DURUR

Mexanikanın yaradıcıları, onu yaradarkən, bütün dünyanı vahid mövqedən təsvir etməyə çalışmışlar. Onların inkişaf etdirdikləri metodlar dünyanın çox yığcam və həm də kifayət qədər doğru sxemini qurmağa imkanı verdi.

Onlar lap yerinə – nöqtəyə düşdülər. Hərfi mənada nöqtəyə, çünki mexanika əslində nöqtənin hərəkəti haqqında elmdir. Bizi əhatə edən aləm isə, deyildiyi kimi, makroskopik obyektlərdən: qazlardan, mayelərdən, bərk cisimlərdən, bioloji obyektlərdən (insan da daxil olmaqla), çox nəhəng törəmələrdən – ulduzlardan, planetlərdən və qalaktikalardan əmələ gəlmişdir.

Məlum oldu ki, makroskopik cisimlər heç də həmişə özlərini maddi nöqtələr kimi aparmırlar. Baxmayaraq ki, müəyyən şəraitdə parovoza da, planetə də və hətta qalaktikaya da nöqtə kimi baxmaq olar. Ancaq müəyyən şəraitdə!

Sual ortaya çıxır: "Elə ümumi qanunauyğunluqlar mövcuddurmu ki, istisnasız bütün makroskopik cisimlər onlara tabe olsun?" Əgər belədirsə, onda həmin qanunauyğunluqları tapmaq yaxşı olardı. Həm də onların cisimləri əmələ gətirən "nöqtələrin" davranışları ilə necə bağlı olduğunu da başa düşmək pis olmazdı. Makrocisimlərin ən ümumi "davranış qaydalarının" axtarılıb tapılması ilə *termodinamika* (*yun.* "terme" – "isti" və "dinamis" – "qüvvə") məşğul olur. Bu "qaydaların" mexanika ilə, yəni cismi əmələ gətirən zərrəciklərin hərəkətilə əlaqəsini aşkara çıxarılmasına isə *statistik fizika* (*statistik mexanika*) nəzarət edir.

İşlərin məhz bu cür olduğunu indi biz bilirik. Lakin XIX əsrdə, nə termodinamikanın, xüsusən də nə statistik fizikanın heç adı da olmadığı bir vaxtda məsələ bu qədər ümumi şəkildə formulə edilməmişdi. Başlanğıc üçün istiliyin nə olduğunu və necə fəaliyyət göstərdiyini anlamaq lazım idi. Buradan da "termodinamika" adı yaranmışdır. Yalnız çox sonralar, statistik mexanikanın yaranmasından sonra aydın oldu ki, termodinamikanın tətbiqolunma sərhədləri istilik pro-

Nöqtə olana qədər uzağa uçaq.





A.Puankare. "Termodinamika". Titul vərəqi. Paris. XX əsrin əvvəli.

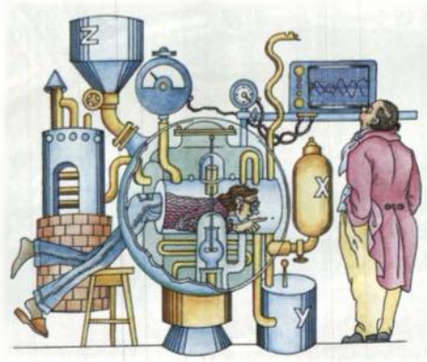
> Nəzəriyyənin ilkin şərtləri sadə, onun əlaqələndirdiyi obyektlər rəngarəng, tətbiq oblastı isə geniş olduqca, nəzəriyyə bir o qədər böyük təəssürat doğurur. Klassik termodinamikanın məndə yaratdığı dərin təəssürat buradandır. Bu, ümumi məzmunlu yeganə fiziki nəzəriyyədir ki, ona münasibətdə mən əminəm: tətbiqi çərçivəsində onun əsas anlayışları heç vaxt təkzib olunmayacaqdır...
>
> *A.Eynşteynin "Avtobioqrafik qeydlər" məqaləsindən.*

seslərinin təsvirindən xeyli genişdir. Məlum oldu ki, termodinamikanın qanunları çox sayda zərrəciklərdən ibarət olan bütün mürəkkəb cisimlər üçün doğrudur. Lakin ən təəccüblüsü odur ki, bu qanunlar elektromaqnit şüalanmasına tətbiq oluna bilər.

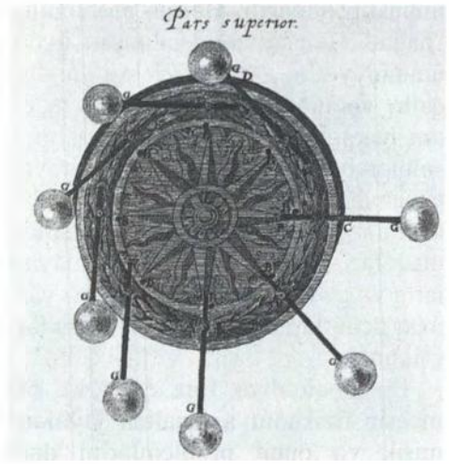
Tam formulə edilmiş və gözəl işləyən nəzəriyyə, bir qayda olaraq, öz yaradıcılarının onu necə gördükləri şəklə çox az bənzəyir. Bundan başqa, nəzəriyyənin gözəl planlaşdırılmış və diqqətlə becərilmiş "bağına" nəzər salarkən, onun yaradılmasına sərf edilmiş səy və vasitələri təsəvvür etmək çətindir. Çoxlu sayda problemlər var ki, onları həll etmədən bu və ya digər məsələni, sadəcə, yerinə yetirmək mümkün olmazdı. Həmin problemlər "bağın" tamaşasına gələnlər üçün, ümumiyyətlə, "mötərizə xaricində" qalır, yaranma tarixi isə onları adətən maraqlandırmır. Sırf tətbiqi məsələlər həll edilərkən bu cür mövqe tamamilə özünü doğruldur. Lakin müxtəlif nəzəriyyələr arasındakı qarşılıqlı əlaqələri təhlil edərək, əsas anlayışların və prinsiplərin mahiyyətinə varmaq üçün tarixi yanaşma daha səmərəlidir.

Bir dəqiqəliyə fərz edək ki, biz müasir fizikanın arsenalına yiyələnmişik və onun problemlərini dərk edirik. Bu halda termodinamikanın və statistik fizikanın fundamental ideyalarını daha sadə necə ifadə etmək olar?

Bu gün hər iki fənn fiziki baxımdan mürəkkəb sistemlərin xassələrinin təhlilindən başqa bir şey deyildir. Lakin termodinamika və statistik fizika, sanki, sistemə hərəsi öz tərəfindən: birincisi – xaricdən, ikincisi isə daxildən "baxır". Başqa sözlə, termodinamika üçün sistem bir "*qara qutudur*"; bu "qutu" haqqında yalnız o məlumdur ki, qutuya nə daxil olur və qutudan nə çıxır, daxilində nə baş verdiyi isə əhəmiyyətsizdir, maraqsızdır və ya anlaşılmazdır. Statistik mexanika isə əksinə, içəri "girir" və daxil olan şeyin çıxan şeyə necə çevrildiyini "görür". Sistem onun üçün şəffafdır.



Daimi mühərrik. Qravüra. XVII əsr.



Həm də təbiidir ki, sistem haqqında statistik mexanika termodinamikaya nəzərən daha çox məlumat verir. Lakin heç də həmişə bu məlumatdan istifadə etmək mümkün olmur, bəzən isə bu məlumat heç lazım da deyil. Məsələn, buluda və ya mığmığa dəstəsinə baxarkən, buludun daxilində ayrı-ayrı yağış damcılarının və ya dəstə daxilində ayrı-ayrı həşəratların özlərini necə aparması tamamilə maraqsızdır. Törəmənin bütövlükdə hərəkəti mühümdür.

Termodinamik və statistik yanaşmaların müəyyən "tamamlığına" baxmayaraq, onlar öz aralarında sıx bağlıdır. Termodinamik kəmiyyətlər – statistikanın ətraflı baxdığı fiziki kəmiyyətlərin bütün obyekt üzrə qiymətlərinin orta qiymətləridir. Bu mənada statistik yanaşma mexanikin gözlərində termodinamikaya, sanki, haqq qazandırır və ona görə də statistik fizika termodinamikanın mexaniki əsaslandırılması adlanır. Lakin həmin termodinamik kəmiyyətlər təcrübədə müşahidə olunarkən, statistika üçün bir növ bələdçidir, C.U.Gibbsin sözlərinə görə, "bir qədər avam bələdçidir".

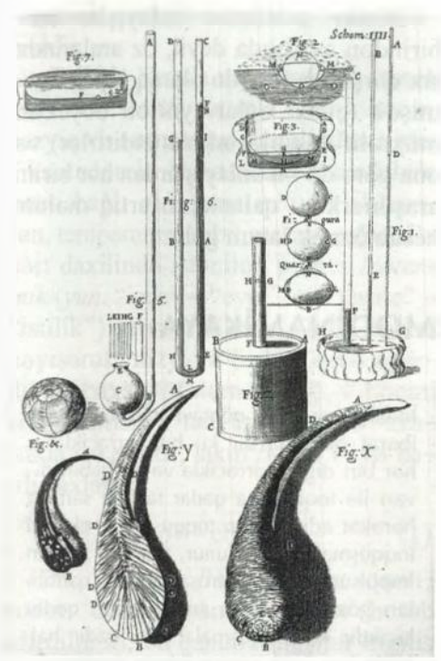
Yox, əgər sistemin quruluşunun təfsilatlarını öyrənmədən, onunla yalnız bütövlükdə maraqlansaq, onda bu kifayət etməyəcəkdir. Əlavə olaraq mikrosəviyyədə baş verən haqqında, onun modeli haqqında hər hansı təsəvvürə malik olmaq lazımdır, ona görə ki, müxtəlif modellər üçün nəticələr də müxtəlif olacaqdır. Belə vəziyyət

Bu gün daimi mühərrik qurmağın mümkünsüzlüyü haqqında danışarkən, onu nəzərdə tuturlar ki, sistemin tam enerjisi saxlanır və ona görə də heç yerdən "müftə" enerji almaq olmaz. Lakin XVIII əsrin sonlarında, Paris akademiyası "daimi mühərrikin heç bir layihəsinə baxmamağa" qərar verəndə və XIX əsrin əvvəllərində, enerjinin saxlanması qanunu hələ məlum olmayanda, bütün hadisələri mexanika mövqeyindən izah edirdilər. O vaxt müəyyən olundu ki, hərəkətverici qüvvə (kinetik enerji) saxlanır və daimi mühərrikin yolverilməzliyini məhz hərəkətverici qüvvənin saxlanması ilə əlaqələndirirdilər.

Florensiya Təcrübələr Akademiyasında termometrin iş prinsipinin nümayişi. Freska. Fizika və Təbii Tarix Muzeyi. Florensiya. İtaliya.



istiliyin təbiətinə dair müxtəlif təsəvvürlərə əsaslanan termodinamika qanunlarında özünü xüsusilə qabarıq büruzə verir. Əgər istiliyə maddi substansiya (termogen) kimi baxsaq, bir cür qanunlar, yox əgər hərəkətin növü kimi baxsaq, tamamilə başqa qanunlar alınır. Lakin, hər iki halda, onlar bir-birinə nə qədər bənzəməsə də, bir cüt: saxlanma qanunu və proseslərin istiqamətliliyi qanunu iştirak edir. An-



caq birinci halda bu termogen miqdarının saxlanması qanunu və I-ci növ daimi mühərrikin mümkünsüzlüyü, ikinci halda isə enerjinin saxlanması qanunu və entropiyanın artması qanunu (və ya 2-ci növ daimi mühərrik yaratmağın – "uyğun kompensasiya olmadan istiliyin az qızmış cisimdən çox qızmış cismə özbaşına verilməsinin" mümkünsüzlüyü) olacaqdır.

Termodinamikanın qanunları çoxlu sayda təcrübələrin və müşahidələrin ümumiləşdirilməsinin nəticəsidir. Bu təcrübələrin və müşahidələrin əsasında məhz *istilik*, *temperatur*, *təzyiq*, *enerji və entropiya* anlayışlarının özü yaranmışdır. Onların bir hissəsi (təzyiq, enerji) mexaniki təbiətə malikdir, digərləri müstəsna olaraq istilik proseslərilə əlaqədardır. Nə üçün makroskopik cisimlərin davranışının ümumi xarakteristikalarını məhz bu anlayışların müəyyən etdiyini anlamaq üçün onlardan hər birinin necə yarandığını, şəklini dəyişdiyini və digərlərilə qarşılıqlı təsirə girdiyini, son nəticədə məntiqi bitmiş nəzəriyyəni – termodinamikanı təşkil edən qapalı münasibətlər sistemini əmələ gətirdiyini izləmək lazımdır.

Lakin göstərilən siyahıya artıq səthi baxdıqda dərhal belə sual yaranır: təzyiqin bura nə dəxli var? İstilik, enerji, temperatur, hətta hələlik bilmədiyimiz entropiya – bunlar, yəqin, bütün istilik sistemlərilə əlaqədar olan ümumi anlayışlardır. Lakin, bax, təzyiq! Məgər o, hər hansı bir şəkildə, məsələn, məftillərlə cərəyan axarkən, meydana çıxırmı? Hərçənd yaxşı məlumdur ki, onlarda istilik ayrılır və bu effektdən elektrik qızdırıcı cihazlarında istifadə olunur. Təəccüb tamamilə qanunidir və izahat tələb edir.

İş ondadır ki, istənilən problemi təhlil etmək üçün bu problemin bütün xarakterik əlamətlərini özünə daxil edən və mümkün qədər ən sadə sistem və ya model seçməyə çalışırlar. Termodinamika üçün belə ən sadə sistem qazdır. Qaz isə içərisində olduğu qabın divarlarına təzyiq edir və təzyiq qazın başlıca xarakteristikalarından biridir.

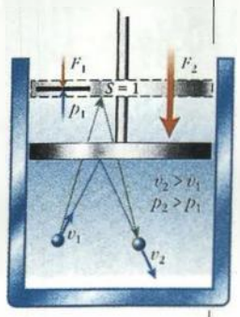
Bundan başqa, hadisələr elə gətirmişdir ki, qaz qanunlarının tədqiqi istiliyin öyrənilməsilə sıx surətdə çulğaşmışdır, çünki istidən genişlənmə effekti hamısından çox məhz qazlarda daha çox gözəçarpandır. Elektrik proseslərinə gəldikdə isə, orada da bu effekt baş verir, lakin miqyasına görə o, qazlarla ölçüyəgəlməzdir.

İndi, əksinə, səhv təəssürat yarana bilər ki, təzyiq temperatur kimi və ya enerji kimi istənilən makroskopik cismin ayrılmaz xarakteristikasıdır. Əlbəttə, termodinamikanın yarandığı vaxtlarda bu belə də olmuşdu, ona görə ki, bütün öyrənilən obyektlər üçün təzyiq əsas kəmiyyətlərdən biri olmuşdur; bunlar o kəmiyyətlərdir ki,

◄ Barometrik cihazlar. R.Hukun "Mikroqrafiya" kitabından illüstrasiyalar. 1665-ci il.



Civəli barometr və termometr. XVIII əsr. M.V.Lomonosov muzeyi. Sankt-Peterburq.



onların köməyilə həmin obyektləri, ümumiyyətlə, təsvir etmək mümkün idi. Nəzəriyyəni qurduqdan sonra isə məlum oldu ki, elə sistemlər də var ki, onlarda başlıca rol "digər" "qüvvələrə" məxsusdur. Məsələn, maqnetik üçün bu kimi xarakteristika maqnitlənmədir.

Bütün sadalanan anlayışlar birbirindən ayrılıqda deyil, öz aralarında sıx qarşılıqlı təsirdə olaraq inkişaf etmişdir (çünki onlar eyni bir obyektin müxtəlif xassələrini əks etdirirlər) və ona görə də bu anlayışlardan hər birini araşdırarkən, qalanlarını artıq məlum hesab etmək lazım gəlir.

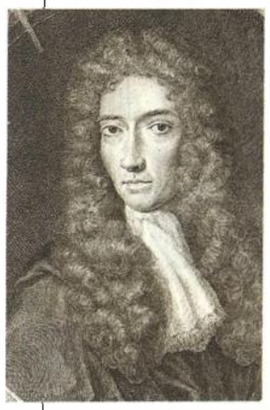
QAZ QANUNLARINDAN TERMODİNAMİKAYA

"TƏZYİQ" ANLAYIŞINA NECƏ GƏLİB ÇIXMIŞLAR

Sadəlik və tam aydınlıq üçün termodinamik sistem kimi *ideal qaz* adlanan qaza baxaq. Qaz həcmi dəyişə bilən qabda yerləşir. Məsələn, daxilində sərbəst (sürtünməsiz) hərəkət edən porşenə malik silindrdə. Qaz zərrəciyi divara zərbə vuraraq, öz impulsunu ona verir, lakin divar sükunətdə qalır. Ancaq bax, əgər zərrəcik porşenə zərbə vurursa, onda porşen impuls alaraq, hərəkət etməyə başlayır və ona daha çox zərrəcik zərbə vurduqca, bir o qədər böyük sürətlə hərəkət edir. Porşenin tərpənməz olması üçün ona müəyyən F qüvvəsi tətbiq etmək lazımdır. Bu qüvvə qazın porşenə və qabın divarına göstərdiyi təzyiq qüvvəsinə bərabərdir. Təzyiq qüvvəsi zərbə vuran zərrəciklərin sayından asılıdır, lakin porşenin sahəsi S istənilən qədər ola bilər. Ona görə də qazın bütün porşenə yox, onun vahid sahəsinə göstərdiyi təzyiq qüvvəsinə baxmaq daha əlverişlidir. Bu qüvvə məhz təzyiq p adlanır:

$$p=\frac{F}{S}.$$

İdeal qaz – elə nöqtəvi zərrəciklərdən ibarət olan qazdır ki, bu zərrəciklərin hər biri digər zərrəciklə və ya qabın divarı ilə toqquşana qədər fəzada sərbəst hərəkət edir. Bütün toqquşmalar elastiki toqquşma hesab olunur, yəni bu zaman impulsun və enerjinin saxlanması qanunları gözlənir, qazın sıxlığı isə o qədər kiçikdir ki, toqquşmalar çox nadir hallarda baş verir (zərrəciklərin toqquşmalararası hərəkət müddəti toqquşmanın özünün davametmə müddətindən çox böyükdür).



Robert Boyl.



Edm Mariott.



Beləliklə, çöldən müşahidə apararaq, görərik ki, qaz p təzyiqi yaradır. Qabın daxilində baş verənlərlə maraqlanmadan, ideal qaz haqqında daha nə demək olar? Birincisi, qaz müəyyən V həcmini tutur, ikincisi, sıxıldıqda qızır, deməli, müəyyən t temperaturu ilə xarakterizə olunur. Hələlik, deyəsən, vəssalam. Lakin bu da sistemin davranışını müşahidə etməklə, termodinamik qanunları tapmaq üçün kifayətdir.

Əslində burada nə müşahidə etmək olar? Üç kəmiyyətimiz var – həcm, təzyiq və temperatur. Bunlardan birini fiksə edərək, qalan ikisinin bir-birilə necə bağlı olduğunu izləyək. Məsələn, temperaturu sabit saxlayacağıq. Bu şərt daxilində istənilən proses *izotermik* (*yun.* "izos" – "eyni" və "terme" – "istilik") proses adlanır. Onda həcmi dəyişərək, təzyiqin özünü necə apardığına baxaq. Məlum olur ki, V həcmi artan zaman p təzyiqi azalır, V azalanda isə p artır, lakin p-nin V-yə hasili saxlanır:

$$pV=\text{const}. \qquad (1)$$

Bu, məşhur *Boyl-Mariott* qanunudur. Son zamanlara qədər hesab edirdilər ki, bu qanunu məşhur ingilis fiziki Robert Boyl 1662-ci ildə kəşf etmişdir, əslində isə o, 1653-cü ildə digər iki ingilis – Riçard Taunli və Henri Pauer tərəfindən müəyyən olunmuşdur. Bu qanunun kəşfini həmçinin Robert Huka da aid edirlər. Lakin gələcək nəsillər adətən tarixi ədaləti bərpa etmək üçün qəbul edilmiş nomenklaturanı dəyişmək iqtidarında olmurlar.

14 il keçdikdən sonra, Boyldan tamamilə asılı olmadan, bu qanunun ən dolğun və ən inandırıcı sübutunu fransız fiziki Edm Mariott (1620-1684) vermişdir. Hazırda ingilis dilli ölkələrdə bu qanun təkcə Boylun adını daşıyır; Fransada isə, əlbəttə, həmişə Mariott xatırlanır.

Qeyd edək ki, bizim sadə mühakimələrimiz "nəhənglərin çiyinləri üzərində durur", XVII əsrin ortalarında hələ nə mexanika var idi (Nyuton "Başlanğıclar" əsərini yalnız 1687-ci ildə yazdı), nə də bizim baxdığımız qaz modelləri, hətta atmosfer təzyiqinin mövcudluğunu təzəcə müəyyən etmişdilər. Ömrünün axırında da olsa (1638-ci il) ilk dəfə Qaliley anlamışdı ki, bizi əhatə edən hava, ümumiyyətlə, təzyiq edə bilər. Onun şagirdi Evancelista Torriçelli (1608-1647) isə bir neçə ildən sonra (1643-cü il) sübut etdi ki, bu həqiqətən belədir.



◂◂ Evancelista Torriçelli.



▲ Torriçelli borusu ilə təcrübələr.

O, bir ucu lehimlənmiş və civə ilə doldurulmuş uzun (təxminən 1 m) borunu içərisində civə olan açıq geniş qaba çevirdi. Civə tökülmədi, yalnız borunun uzunluğunun cəmisi 1/4-i qədər aşağı endi. Borunun içində əmələ gələn boş fəzaya *Torriçelli boşluğu* deməyə başladılar. Alim bu hadisəni onunla izah etdi ki, borudakı civə sütununu atmosfer havasının qabdakı civənin səthinə etdiyi təzyiq tarazlaşdırılır. Sonralar ona diqqət yetirdilər



Nomenklatura – elmin, texnikanın və s. hər hansı bir sahəsində işlənən adların siyahısı, terminlər və "adlı" nəticələr sistemidir.



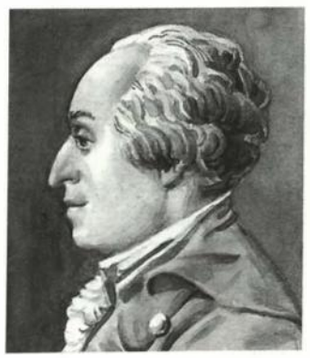
Jozef Lui Key-Lüssak.

ki, atmosfer havası, həm də istənilən qaz, yalnız "təzyiq etmir", həm də sıxılarkən müqavimət göstərir. Qazın bu baxılan xassəsini *elastiklik* adlandırdılar. Boyl əslində öz təcrübəsini aparanda, havanın elastikliyinin mövcud olduğunu sübut etmişdi. O, yalnız faktı qeydə almışdı: təzyiqin dəyişməsilə həcm dəyişir. Həcmin və təzyiqin qiymətləri arasında tərs mütənasib asılılığı Boylun tələbəsi Riçard Taunli göstərmişdi.

Təzyiqin özünü isə o dövrdə müxtəlif cür, əsasən qaz zərrəcikləri arasında itələmə qüvvələrinin olması ilə izah edirdilər. Bu model Nyutona məxsus idi. Boyl hesab edirdi ki, qaz "çox kiçik spirallardan ibarətdir", bu spirallar sıxıla və dartıla bilər. XVIII əsrin əvvəllərində İsveçrə alimi Daniil Bernulli müasir izaha bənzər izah təklif etdi. Lakin Nyutonun nüfuzu demək olar ki, yüz il yeni modeli qəbul etməyə imkan vermədi.

ÇƏTİN OLAN HEÇ DƏ TƏKCƏ İLK ADDIM DEYİL

Əgər təzyiqi fiksə etsək (belə proses *izobar* proses adlanır; *yun.* "izos" və "baros" – "ağırlıq"), onda həcm və temperatur dəyişəcəkdir. Məlum olur ki, qızdırılan zaman qazın həcmi temperaturla mütənasib artır:



Jak Şarl.



Benua Pol Emil Klapeyron.

$$V = V_0(1 + \alpha_p t), \qquad (2)$$

burada V_0 və V – başlanğıc və son həcm, α_p isə sabit təzyiqdə qazın istilikdən genişlənmə (termik genişlənmə) əmsalıdır və bütün qazlar üçün eyni olub, Selsi şkalası üzrə təxminən 1/273,15 dərəcə$^{-1}$-ə bərabərdir, t – qazın temperaturudur. Bu asılılıq göstərir ki, qazı 1°C qızdıranda onun həcmi 0°C-dəki qiymətinin 1/273 hissəsi qədər artır, –273°C-yə yaxın temperaturda isə sıfıra çevrilir. Beləliklə,

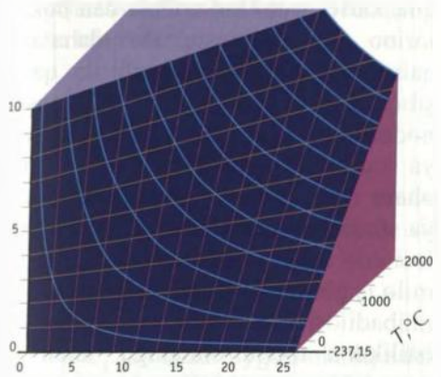
XVIII əsrin lap əvvəlində fransız fiziki Giyom Amonton (1663-1705) həm sabit təzyiqdə, həm də sabit həcmdə ümumi qaz qanunu təklif etdi. O hesab edirdi ki, verilmiş təzyiqdə müəyyən miqdarda havanın həcmi (və ya verilmiş həcmdə təzyiqi) havada olan istilik miqdarı ilə düz mütənasibdir. Amonton hətta *temperaturun mütləq sıfırı* haqqında da danışırdı. Həmin temperaturda həcm və ya təzyiq tamamilə yox olur. Onun məlumatlarından belə çıxır ki, temperaturun mütləq sıfırı –240°C ilə –239,5°C arasındakı intervalda yerləşməlidir. Müasirləri Amontonun çıxardığı nəticələrə xeyli skeptik (şübhə ilə) yanaşdılar və əsrin sonuna qədər demək olar ki, heç kim onları yoxlamağa cəhd etmədi.

müəyyən bir limit temperaturu var ki, qazı ondan aşağı temperatura qədər soyutmaq qeyri-mümkündür, bu şərtlə ki, qaz həmin temperatura çatmazdan əvvəl mayeyə çevrilməsin, əks halda daha (2) qanununa tabe olmayacaqdır. Qanunun özünü, hərçənd ən sadə

$$V = V_0(t + c)$$

şəklində, fransız fiziki Lui Key-Lüssak (1778-1850) 1802-ci ildə kəşf etmişdir (qanun onun adını da daşıyır).

Bəs nə üçün birinci asılılığı (Boyl-Mariott qanununu) müxtəlif ölkələrdə



İdeal qaz prosesləri.

dərhal bir neçə adam, praktiki olaraq, eyni vaxtda tapır, ikinci asılılığın (Key-Lüssak qanununun) axtarışına yüz il gedir? İş ondadır ki, birinci təcrübədə ölçmələrin hansı temperaturda aparılmasının əhəmiyyəti yoxdur. Yalnız o lazımdır ki, temperatur dəyişməsin. Bunun üçün qurğunu termostatda, yəni xeyli böyük qabda və ya otaqda yerləşdirirlər və nə vaxt tarazlığın qərarlaşacağını gözləyirlər. Tarazlığı qeydə almaq çətin deyil, çünki tarazlıq zamanı iki cisim – qurğu və termostat – eyni temperatura malikdir və istənilən, hətta ən kobud termometr də onlar üçün eyni şeyi göstərəcəkdir. Bir sözlə, Boylun təcrübəsində temperaturla heç kim maraqlanmırdı – sadəcə olaraq, təzyiqin dəyişməsilə həcmin dəyişməsini izləyirdilər. Lakin həcmin temperaturdan asılılığını tədqiq etmək üçün temperaturu ölçməyi bacarmaq lazımdır. Bunun üçün nəinki yaxşı termometr lazımdır, həm də onun, əslində, necə işlədiyini, onun dəqiqliyinin nə ilə təyin olunduğunu, temperaturun və istiliyin ümumiyyətlə nə olduğunu başa düşmək lazımdır. Həqiqətən də, XVII əsrin sonunda və demək olar ki, bütün XVIII əsrdə temperaturun ölçülməsi problemi başlıca problemlərdən biri olmuşdur. Buna baxmayaraq, məsələ o qədər çətin idi ki, hətta ən görkəmli fiziklər yavaş-yavaş, əl ilə yoxlaya-yoxlaya irəliləyirdilər.

XVIII əsrin sonuna yaxın, termo- və kalorimetriyanın artıq nailiyyətlər qazanmış olduğu bir vaxt, məhz temperaturun dəyişməsilə həcmin və təzyiqin özlərini necə apardığına nəzarət etmək imkanı meydana çıxdı. Onda yalnız Key-Lüssak yox, ondan bir neçə ay əvvəl ingilis fiziki və kimyaçısı Con Dalton (1766-1844) da bu qanunu daha az konkret şəkildə ifadə etmişdi: o aşkar etmişdi ki, sabit təzyiqdə temperaturun eyni qədər artması zamanı bütün qazlar eyni qədər genişlənir.



D.İ.Mendeleyev.

Daltonun və Key-Lüssakın kəşfindən sonra elmə ən həssas və ən dəqiq termometr – qaz termometri daxil oldu.

Üçüncü imkan: sabit həcmdə qazın temperaturunu dəyişməkdən – *izoxor* (*yun.* "izos" və "xora" – "tutulmuş yer") prosesi həyata keçirməkdən ibarətdir. Burada da izobar prosesdəki kimi, həmin xətti asılılıq aşkar olunur:

$$p = p_0(1 + \alpha_t t), \qquad (3)$$

burada p və p_0 – son və başlanğıc təzyiq, t – temperatur, α_t isə 1/273,15 dərəcə$^{-1}$-ə bərabər olan təzyiqin temperatur əmsalıdır. Bu, Şarl qanunudur və onu kəşf edən fransız fiziki və hava üzgüçüsü Jak Şarlın (1746-1823) adı ilə adlandırılmışdır.

Bütün üç qanun asanlıqla ümumi bir qaz qanununda birləşdirilir:

$$pV = Bt, \qquad (4)$$

burada B – qazın növündən və miqdarından asılı olan sabitdir.

Bu asılılığı fransız dağ mühəndisi Benua Pol Emil Klapeyron (1799-1864) 1834-cü ildə kəşf etmişdir. Lakin *Klapeyron qanunu* heç də tam universal deyil: bu qanun ideal qazların, müəyyən dərəcədə onların daxili quruluşu ilə bağlı olan, əlavə bir gözəl xassəsini nəzərə almır. 1811-ci ildə

Mol – maddənin ədədi qiymətcə atom vahidləri ilə ifadə olunmuş molekulyar kütləsinə bərabər olan qramlarla kütləsidir. 1 molda olan molekulların (atomların, ionların) sayı 12 q karbonda ^{12}C olan atomların sayı qədərdir.

Adiabat proses zamanı qazdakı bütün dəyişikliklər onun daxili enerjisi hesabına baş verir, çünki qaz xaricdən nə istilik ala bilməz, nə də istilik verə bilməz.

italyan alimi Amedeo Avoqadro (1776-1856) müəyyən etdi ki, eyni bir temperaturda və təzyiqdə qazların bərabər həcmlərində bərabər sayda molekul var (*Avoqadro qanunu*). 1874-cü ildə, artıq termodinamika yaranmış olduğu zaman D.İ.Mendeleyev 1 mol ideal qaz üçün hal tənliyini – universal qaz qanunu çıxardı:

$$pV=RT, \qquad (5)$$

n mol qaz üçün

$$pV=nRT.$$

Bu tənlikdə Avoqadro qanunu nəzərə alınır. Burada R – sabitdir və artıq bütün qazlar üçün eynidir. O, *universal qaz sabiti* adlanır və öz fiziki mənasına görə 1 mol qazı sabit təzyiqdə mütləq temperaturun bir dərəcəsi qədər qızdıranda, bu qazın genişlənməsi zamanı gördüyü işdir ("Temperatur" məqaləsinə bax).

Beləliklə, ideal qazın davranışının üç variantında – izotermik, izobar və izoxor proseslərdə – parametrlərdən biri sabit saxlanılırdı. Lakin prinsipcə hər üç kəmiyyətin – temperaturun, təzyiqin və həcmin – eyni zamanda dəyişməsinə heç nə mane olmur axı. Belə görünə bilərdi ki, bu növ proseslərin sayı çox böyükdür. Ancaq bu heç də belə deyil. Onlar mahiyyətcə bir-birindən nə ilə fərqlənə bilər ki? Yəqin, xarici şəraitlərlə. Onlardan bəzilərinə artıq baxmışıq. Bəs daha nə qalmışdır? Qazın öz ətrafı ilə qarşılıqlı təsiri qalıb. Bu qarşılıqlı təsir nədən ibarətdir? Qaz iş görə bilər və ya xarici işi sərf edə bilər və onu əhatə edən mühitlə istilikkeçirmə və ya şüalanma vasitəsilə istilik mübadiləsi edə bilər. Qazın, məsələn, tamamilə iş görmədiyi, lakin mühitlə istilik mübadiləsi edə bildiyi və ya əksinə, istilikdən təcrid olunduğu, lakin iş görə bildiyi kənar hallara baxaq.

Termostat (*yun.* "terme" – "istilik" və "statos" – "duran", "tərpənməz") – temperaturu sabit saxlamaq üçün işlənən qurğudur.



Birinci halda qaz sadəcə öz əhatəsilə istilik kontaktında olur və qazda temperaturların bərabərləşməsi prosesi baş verir. İkinci hal isə çox maraqlıdır və istiliyin əsas xassələrini başa düşmək üçün olduqca mühümdür. İkinci hal *adiabat* (*yun.* "adiabatos" – "keçməyən") *proses* adlanır. Biz hələ dəfələrlə ona müraciət edəcəyik. Belə proses üçün şərt istilikdən izoləedici örtüyün olmasıdır. İstilikdən izoləedici örtüyə misal adi termos, adiabat prosesə misal isə – səsin qazda yayılması ola bilər. Termosla bağlı məsələ aydındır: onun gümüşlənmiş divarları aşağı istilikkeçirməyə malikdir və onların üzərinə istər xaricdən, istərsə də daxildən düşən istənilən şüaları qaytarır. Bəs səs yayılarkən istilik izolyasiyası necə yerinə yetirilir. İstilik izolyasiyası zamanı istilik alınmır və verilmir. Bəs səs nədir? Səs sıxılma və seyrəkləşmə dalğalarının yayılmasıdır. Səs yayılarkən qazın sıxıldığı yerlərdə temperatur yüksəlir, seyrəkləşdiyi yerlərdə isə aşağı düşür. Lakin səs rəqslərinin periodu o qədər kiçikdir ki, həmin müddət ərzində qazın sıxılmış və seyrəlmiş təbəqələri arasında faktiki olaraq heç bir istilik mübadiləsi baş vermir. Ona görə də bütün prosesi adiabat proses hesab etmək olar.

Adiabat prosesdə üç kəmiyyətin hər üçü – temperatur, təzyiq, həcm

dəyişir və onların hər bir cütü öz qanununa tabe olur:

$$pV^{\gamma}=\text{const},$$
$$TV^{\gamma-1}=\text{const}, \qquad (6)$$
$$T^{\gamma}p^{1-\gamma}=\text{const},$$

birlikdə isə onların hamısı öz aralarında (5) universial qaz qanunu ilə bağlıdır. Burada

$$\gamma=\frac{C_p}{C_v},$$

C_p və C_V isə qazın uyğun olaraq sabit təzyiqdə və sabit həcmdə istilik tutumlarıdır (əksər qazlar üçün orta temperaturlar diapazonunda $\frac{C_p}{C_v}=1{,}4$).

Bu münasibətlər alınmazdan əvvəl, səsin yayılması prosesini həm eksrperimental, həm də nəzəri olaraq tədqiq etmək lazım gəlmişdir. Bu tədqiqatlarsız adiabat prosesin nə olduğunu çətin ki, anlamaq mümkün olardı, adiabat prosesi anlamadan isə entropiyanın nə olduğunu dərk etmək, yəni termodinamikanı qurmaq mümkün olmazdı. Bir sözlə, əvvəlcədən heç vaxt bilinmir ki, haradan gözlənilməz kömək gələcəkdir.

İlk baxışda adiabat prosesin münasibətləri heç də mürəkkəb deyil, ancaq onları almaq xeyli çətindir. Əvvəlcə, əlbəttə, adiabat proseslərin mövcud olduğunu heç kim güman etmirdi. Sadəcə olaraq, müxtəlif şəraitlərdə qazların özlərini necə apardığını müşahidə edirdilər. Lakin iş Boyl-Mariott tənliyindən irəli getmirdi. Səsin müxtəlif mühitlərdə yayılmasını isə, ümumiyyətlə, fizikanın başqa bölməsinə aid edirdilər. Bu bölmədə hələ Nyuton dövründən qazlarda səs sürətinin hesablanmış və ölçülmüş qiymətləri arasında kəskin uyğunsuzluğun olması problemi dururdu.

Laqranjın sırf intuitiv olaraq anladığı yeganə şey o idi ki, səs rəqslərinin baş verdiyi mühitdə Boyl-Mariott qanunu pozulur. O fərz etdi (1760-cı il) ki, səs dalğasında təzyiq p, qazın ρ sıxlığının müəyyən bir m qüvvətlə mütənasibdir:

$$p\sim\rho^m.$$

burada m 1-ə bərabər olmayan ədəddir. Həm də göstərdi ki, əgər $m=4/3$ hesab etsək, onda səs sürəti üçün hesablamalar eksperimentlə üst-üstə düşür. Qazlarda sıxılma və genişlənmə zamanı istilik effektlərinin kəşfindən sonra fransız fiziklərinə əsil mətləb aydın oldu. Səsin yayılmasını bu effektlərlə ilk əlaqələndirənlər arasında (1802-ci il) fransız fiziki, riyaziyyatçısı və astronomu Pyer Simon Laplas (1749-1827) var idi, tam şəkildə isə məsələni artıq 1823-cü ildə başqa bir fransız – Simeon Deni Puasson (1781-1840) həll etdi – o, (6) münasibətlərindən birincisini nəzəri olaraq çıxardı. Puasson özünün aldığı tənliyin təkcə səs nəzəriyyəsinin inkişafı üçün deyil, həm də bütövlükdə bütün istilik haqqında təlim üçün əhəmiyyətini yaxşı başa düşürdü. Yeri gəlmişkən, Puasson ilk dəfə olaraq diferensial hesabının metodlarını istilik məsələlərini həll etmək üçün tətbiq etmişdir.

Boyl-Mariott qanununda $p\sim\rho$, çünki sıxlıq həcmlə tərs mütənasibdir.



İSTİLİK NƏDİR

İnsanlar istiliyin nə olduğu haqqında ciddi düşünməyə başladıqları zaman, onlar öz hisslərinə istinad edirdilər. Gündəlik təcrübəmizdən istiliyin nə isə bir mühitə, bir "mayeyə" bənzər surəti doğur. Bu "maye" ona toxunduqda bir cisimdən başqasına axır – istilik və soyuqluq dalğası bizi bürüyür. Bəzən, əgər cisim çox isti və ya çox soyuqdursa, o hətta "tikanlı" olur.

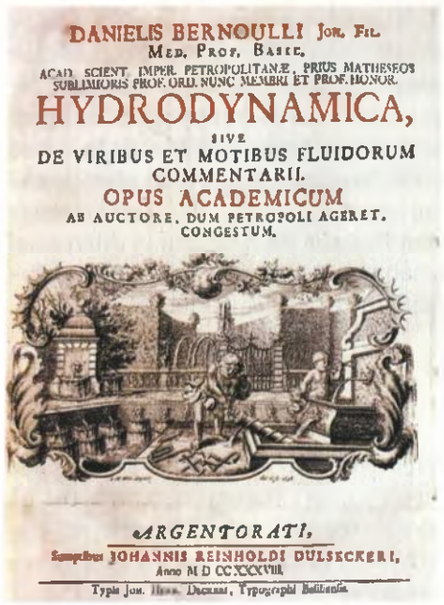
Müasir tərifdə deyilir: "İstilik cismi əmələ gətirən zərrəciklərin nizamsız hərəkət formasıdır; istiliyin ölçüsü istilik mübadiləsi zamanı sisteminin aldığı və ya verdiyi istilik miqdarıdır və ya enerji miqdarıdır".

Hisslərdən mühakimələrə keçəndə, bir qayda olaraq, fərz edirlər ki, bütün cisimlər çox kiçicik zərrəciklərdən əmələ gəlmişdir. Bəs, bu nə "mayedir" ki, qızma və soyuma zamanı bir cisimdən digərinə axır? Axı onun özü də, ümumiyyətlə desək, zərrəciklərdən əmələ gəlməlidir, ancaq görünməyən və çəkisiz zərrəciklərdən, çünki heç bir vasitə ilə onları aşkar etmək olmaz. Bəlkə, hesab etmək daha sadədir ki, istilik cismi əmələ gətirən zərrəciklərin mütəhərrikliyinə necə təsir etmək mümkün olur. Bundan başqa, istilik boşluqda şüalanma şəklində yayılır – axı Yeri Günəş şüaları qızdırır. Bu halda, söhbət hansı zərrəciklərin hərəkətindən gedir?

Bu konsepsiyaların hər ikisi uzun müddət – Lukretsinin və Heraklitin dövründən birgə mövcud olmuşdur və bir-birinə o qədər də maneçilik törətməyiblər. Yəqin ona görə ki, işdə lazım olmurdular.



Daniil Bernulli.


DANIELIS BERNOULLI Joh. Fil.
Med. Prof. Basil.
ACAD. SCIENT. IMPER. PETROPOLITANÆ, PRIUS MATHESEOS SUBLIMIORIS PROF. ORD. NUNC MEMBRI ET PROF. HONOR.
HYDRODYNAMICA,
SIVE
DE VIRIBUS ET MOTIBUS FLUIDORUM
COMMENTARII.
OPUS ACADEMICUM
AB AUCTORE, DUM PETROPOLI AGERET, CONGESTUM.
ARGENTORATI,
Sumptibus JOHANNIS REINHOLDI DULSECKERI,
Anno M D CC XXXVIII.

XVII əsrdə, müasir elmin təməli qoyulan vaxtlar istiliyə hərəkət kimi baxılması təsəvvürü daha geniş yayılmışdı. XVIII əsrin ortalarına qədər də ona olan baxışlar praktiki olaraq dəyişmədi. O vaxt hətta bir neçə "kinetik" (*yun.* "kinetikos" – "hərəkətə gətirən") nəzəriyyə mövcud idi. Onlardan ən məşhuru İsveçrə mexaniki, riyaziyyatçısı və fizioloqu Daniil Bernullinin (1700-1882) nəzəriyyəsi hesab olunur. O, bu nəzəriyyəni özünün latınca yazılmış və Strasburqda 1738-ci ildə çap olunmuş məşhur "Hidrodinamika" əsərinin onuncu bölməsində şərh etmişdir. Onun nəzəriyyəsinə görə qaz (*yun.* "xaos" – "görünən uçurum", "qaranlıq") zərrəcikləri bir-birilə və ya yerləşdiyi qabın divarları ilə toqquşana qədər düzxətli bərabərsürətli hərəkət edir, sonra isə elastiki zərbənin qanunu üzrə hər tərəfə uçurlar və hər şey yenidən başlayır, yəni xaotik hərəkət başlayır. Qazın qabın divarlarına göstərdiyi və qaz zərrəciklərinin sürətlərinin kvadratı ilə düz mütənasib olan təzyiq belə izah olunurdu. Bu nəzəriyyə praktiki olaraq istilik haqqındakı müasir təsəvvürlərlə üstüstə düşür.

Digər hipotezlər də irəli sürülmüşdü. Məsələn, hesab edirdilər ki, istilik efirin lokallaşmış rəqsləridir və ya efirdəki burulğanlı hərəkətlərdir, yəni dəxi hərəkətdir, ancaq zərrəciklərin özlərinin yox, onların batırıldığı mühitin hərəkətidir. Başqa bir nəzəriyyəyə görə maddənin hər bir zərrəciyi "istilik buludları" ilə birbirindən itələnir ki, məhz bu da təzyiqin olmasını izah edir.

Lakin istiliyin təbiətinə dair vahid fikrin olmaması az imiş kimi, alimlər istilik miqdarı ilə cisimlərin qızma dərəcəsi, yəni temperatur arasındakı fərqi başa düşmürdülər. Hesab edirdilər ki, temperatur cisimdəki istiliyin

TERMOMETRİN TARİXİ

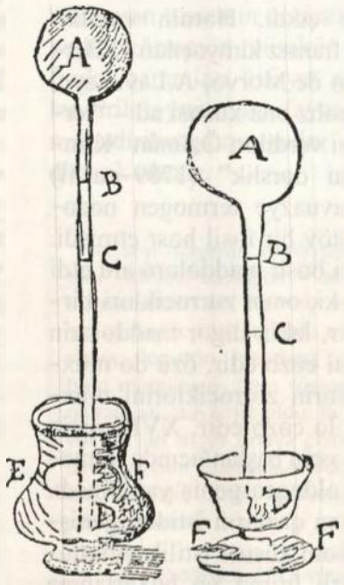
Qalileyin düzəltdiyi termometrlər (daha doğrusu, termoskoplar) hava ilə doldurulmuş *A* şüşə kürəsindən ibarətdir; kürənin aşağı hissəsindən qismən su ilə doldurulmuş boru çıxır; borunun ucu həmçinin su ilə doldurulmuş *D* qabında qurtarır. Kürədəki hava genişlənəndə, məsələn, əlimizin istiliyi hesabına, onda şüşə boruda suyun səviyyəsi qalxırdı. Lakin su sütununun hündürlüyü həm temperaturdan, həm də atmosfer təzyiqindən asılı idi. Ona görə də Qalileyin termometri faktiki olaraq nə isə qeyri-müəyyən bir şeyi ölçürdü və yalnız müxtəlif cisimlərin eyni bir vaxtda və eyni bir yerdə temperaturlarını müqayisə etməyə imkan verirdi.

1636-cı ildə Kaspar Ens "Riyazi ecazkar" kitabını çap etdirdi. Burada səkkiz dərəcəli temperatur şkalası təsvir edilmiş və ilk dəfə "termometr" sözü meydana çıxmışdı.

Nisbətən yaxşı termometri Otto fon Qerike də qurmuşdu. Bu cihaz hava ilə doldurulmuş bürünc kürədən və *U* hərfi şəklində əyilmiş, içərisində spirt olan borucuqdan ibarətdir. Temperaturu ağacdan düzəldilmiş adamcığaz göstərirdi. Adamcığaz termometrin açıq ucunda üzən lehimlənmiş bürünc qutuya qaytan və blok vasitəsilə bağlanmışdı. Şkalanın ortasında nöqtə dururdu, ilk şaxtalar zamanı göstərici bu nöqtənin yaxınlığında dayanırdı. Qerike həmin nöqtəni şkalanın başlanğıcı olaraq seçmişdi.

Dayaq nöqtəsi kimi suyun qaynamasını seçməyin mümkünlüyünü 1655-ci ildə Hüygens qeyd etmişdi. O birbaşa yazmışdı ki, bu cür seçim etdikdə termometri bir yerdən başqa yerə aparmadan temperaturu (onun dediyi kimi, "istiliyin müşahidə dərəcəsini") müxtəlif yerlərdə müqayisə etmək mümkün olacaqdır.

İlk müasir termometr 1724-cü ildə hollandiyalı şüşəçi Daniel Farengeyt tərəfindən təsvir edilmişdir. Müasirləri təəccüblənirdilər ki, Farengeytin hazırladığı spirtli termometrlər öz aralarında uzlaşır. Farengeytin sirri sadə idi: usta çox diqqətlə bölgüləri şkalaya köçürdü, bunun üçün bir neçə dayaq nöqtəsindən istifadə etdi. 1709-cu ilin sərt qışının ən aşağı temperaturunu o, buz, xörək duzu və naşatırın qarışığı ilə təqlid etdi. Tədqiqatçı termometri buzla suyun qarışığına batıraraq, ikinci nöqtəni aldı. Bu iki nöqtə arasındakı məsafəni Farengeyt 32 hissəyə böldü. O, insan bədəninin temperaturunu ölçməklə öz şkalasını yoxladı. Yeni nöqtə 98°-yə düşdü. Sonralar o, suyun qaynama temperaturunu (212°) da daxil etdi.



Qalileyin termoskopik təcrübəsinin sxemi.

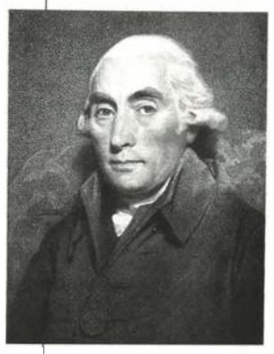
Fransada suyun donma (0°) və qaynama (80°) temperaturları əsasında qurulmuş Reomür şkalası tətbiq olunmağa başlandı (təxminən 1740-cı il). Reomür öz ölçmələrindən çıxardı ki, bu iki nöqtə arasında su həcminin 80 mində bir hissəsi qədər genişlənir. 1917-ci il inqilabına qədər Rusiyada və Azərbaycanda Reomür termometrləri küçələrdə və evlərdə asılırdı. Yalnız 1930-cu illərdə onları Selsi termometrləri sıxışdırıb çıxardı.

Müasir Selsi şkalası 1742-ci ildə təklif olunmuşdur. Mənfi temperaturlar İsveç fizikinin xoşuna gəlmədi, onda o, köhnə şkalanı çevirməyi və sıfırı suyun qaynama temperaturunda, 100°-ni isə suyun donma temperaturunda yerləşdirməyi lazım bildi. Lakin "çevrilmiş şkala" yaşamadı və tez bir zamanda əksinə "çevrildi".

İngiltərədə və ABŞ-da indiyədək Farengeyt termometri yayılmışdır, ingilis kitablarını oxuyarkən təəccüblənmək lazım deyildir ki, əti 300-400° temperaturda bişirmək lazımdır və uşağın 98° temperaturu anasında təşviş doğurmur.

(Y.A.Smorodinskinin "Temperatur" kitabından.)

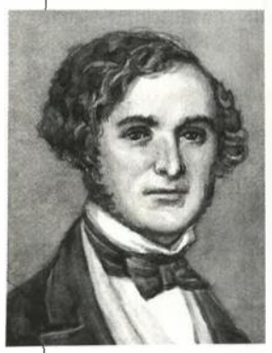
miqdarı ilə təyin olunur: istilik çox olduqca temperatur da çox olur. Lakin 1757-ci ildə Şotlandiya kimyaçısı və fiziki Cozef Blek (1728-1799) müəyyən etdi ki, qazların kondensasiyası və mayelərin bərkiməsi zamanı hansısa bir istilik ayrılır. O bunu "gizli" istilik adlandırmışdı. Buxarlanma və ərimə zamanı, əksinə, həmin istiliyi sərf etmək lazımdır. Baxmayaraq ki, Blekin özü istiliyin təbiətinə dair hansısa müəyyən bir konsepsiyanın tərəfdarı deyildi, o belə mühakimə edirdi: əgər istilik molekulyar hərəkətlə bağlıdırsa, onda daha sıx maddələr çox gizli istiliyə malik olmalıdır. Lakin təcrübə bu ümidləri təsdiq etmədi. Bundan başqa, Blek başa düşdü ki, istilik və temperatur müxtəlif şeylərdir. O, cisimdə olan istilik miqdarını



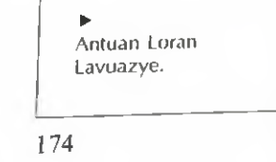
Cozef Blek.



Hamfri Devi.



Maçedonio Melloni.



Antuan Loran Lavuazye.

və temperaturu – termometrlə ölçülən qızma intensivliyini fərqləndirməyə başladı. Onları əlaqələndirmək üçün Blek *istilik tutumu* anlayışı – cismi bir dərəcə qızdırmaq üçün lazım olan istilik miqdarı anlayışı daxil etdi:

$$Q = C\Delta t,$$

burada Q – istilik miqdarı, C – istilik tutumu, Δt – temperaturlar fərqidir. Müxtəlif cisimlərin istilik tutumu müxtəlif idi. Məlum oldu ki, o, istiliyin yox, maddənin xarakteristikasıdır.

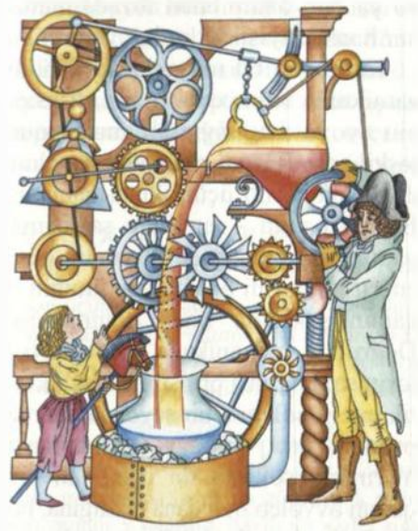
Blekin kəşfi elmi Avropanı həyəcana gətirdi və istiliyin maddi təbiəti ön səhnəyə çıxdı. Həmin vaxtlar, 1787-ci ildə fransız kimyaçıları K.Bertolle, L.Giton de Morvo, A.Lavuazye, A.Furkrua məhz ona xüsusi ad – "termogen" adını verdilər. Özünün "Kimyadan ibtidai dərslik" (1789-cu il) kitabında Lavuazye termogen nəzəriyyəsinə bütöv bir fəsil həsr etmişdi. O, termogeni bəsit maddələrə aid etdi və fərz etdi ki, onun zərrəcikləri birbirini itələyir, lakin digər maddələrin zərrəciklərini cəzb edir, özü də müxtəlif maddələrin zərrəciklərini müxtəlif qüvvə ilə cəzb edir. XVIII əsrin sonu – XIX əsrin başlanğıcında termogen ideyası olduqca geniş yayılmışdı. Hər şeyi: həm qazların istidən genişlənməsini, həm xüsusi istilik tutumunu, həm gizli ərimə və buxarlanma istiliklərini, həm kimyəvi reaksiyaların istiliyini termogenin mövcudluğu ilə izah edirdilər və hətta Daltonun atomistikası da xeyli dərəcədə müşahidə olunmayan termogen hipotezinə əsaslanırdı.

Eyni zamanda, artıq XVIII əsrin lap sonunda termogen nəzəriyyəsinə qarşı xeyli güclü müxalifət yarandı. İngilislər qraf Rumford və ser Hamfri Devi istiliyin hərəkətdən ibarət olması konsepsiyasını müdafiə edən bir sıra eksperimentlər apardılar. Rumford top lülələrini burğu ilə deşmiş və burğunu soyudan suyu qaynamaq dərəcəsinə çatdırmışdı, Devi isə sürtünmənin köməyilə buzu əritmişdi.

Lakin, hər halda, bu dəlillər boşluqda istilik şüalanmasının yayılmasını izah etmək üçün kifayət deyildi. Məhz həmin vaxtda istiliyin kinetik nəzəriyyəsi optika tərəfdən gözlənilməz yardım aldı – işığın korpuskulyar nəzəriyyəsini əvvəlcə Yunq-Frenelin dalğa nəzəriyyəsi əvəz etdi, 1841-ci ildə isə italyan fiziki Maçedonio Melloni (1798-1854) istilik şüaları ilə işıq şüalarının eyniliyini sübut etdi. İşığın dalğa nəzəriyyəsinin tərəfdarları hesab edirdilər ki, işıq – efir rəqsləridir. İstilik üçün belə hipotezin qəbul edilməsi dərhal iki üstünlüyə səbəb oldu – bütün istilik effektlərini izah etdi və eyni zamanda termogen konsepsiyasını aradan qaldırdı. İstiliyin dalğa nəzəriyyəsi ilk vaxtlar xeyli geniş yayılsa da, o, tamamilə az vaxt davam gətirdi və XIX yüzilliyin ortalarına yaxın onu daha yada salan olmadı. Lakin onun təməli üzərində termogen – istilikdən hərəkət-istiliyə keçid çox təbii baş verdi.

Tamamilə aydındır ki, istiliyin təbiətinə dair çoxlu konsepsiyalar heç də





yalnız "dilxoşluq üzündən" yaranmamışdı. Kimyada müxtəlif maddələrin fiziki xassələrinin tədqiqi zamanı istilik hadisələrilə bağlı olan çoxlu material toplanmışdı. İlk buxar maşınları yaradılmışdı... Bütün bunları hər hansı ümumi prinsiplər əsasında təcili anlamaq tələb olunurdu. Məhz bu çoxlu ayrı-ayrı səpələnmiş faktlardan həmin prinsiplər çıxarıldı, bunun üçün çox "az şey" – açıq baş və mücərrəd düşünmək bacarığı tələb olundu.

1824-cü ildə gənc fransız artileriya mühəndisi Nikola Leonar Sadi Karnonun (1796-1832) kiçik bir kitabı çapdan çıxdı. O, "Odun hərəkətverici qüvvəsi və bu qüvvəni artırmağa qadir olan maşınlar haqqında düşüncələr" adlanırdı. Bunlar doğrudan düşüncələr idi, çünki Karnonu bir mexanizm kimi maşının quruluşu yox, "...kifayət qədər ümumi nöqteyi-nəzərdən... hər hansı mexanizmdən, hər hansı bir müəyyən amildən asılı olmadan ... istilikdən hərəkətin alınması hadisəsi" maraqlandırırdı. Bütün məsələ ondan ibarət idi ki, onun qarşısında mexaniki maşınlar oblastında oxşar fəaliyyətin parlaq nümanəsi var idi.

Onun atası riyaziyyatçı və mexanik, həm də Böyük fransız inqilabı zamanında hərbi nazir vəzifəsini tutmuş məşhur Lazar Nikola Karno (1753-1823) mexaniki maşınların bütün hərəkətlərini mexanikanın, hətta, imkan daxilində, həndəsənin vahid prinsiplərinə gətirməyə çalışmışdı. O, bu mövzuda "Ümumiyyətlə maşınlar haqqında təcrübə" adlı böyük əsər yazmışdı (1783-cü il). Ona görə də kiçik Karno üçün oxşar problemə qlobal yanaşma tamamilə təbii görünmüşdü. O başa düşürdü ki, istilik maşınları nəzəriyyəsini "istiliyin istənilən cismə müəyyən təsirinin nəticələrini əvvəlcədən görməyin mümkün olması üçün fizika qanunları kifayət qədər genişləndirilməyənə və kifayət qədər ümumiləşdirilməyənə qədər" inkişaf etdirmək olmaz.



"Yüz gün" dövründə Karnonun şərəfinə buraxılmış medal. 1815-ci il.

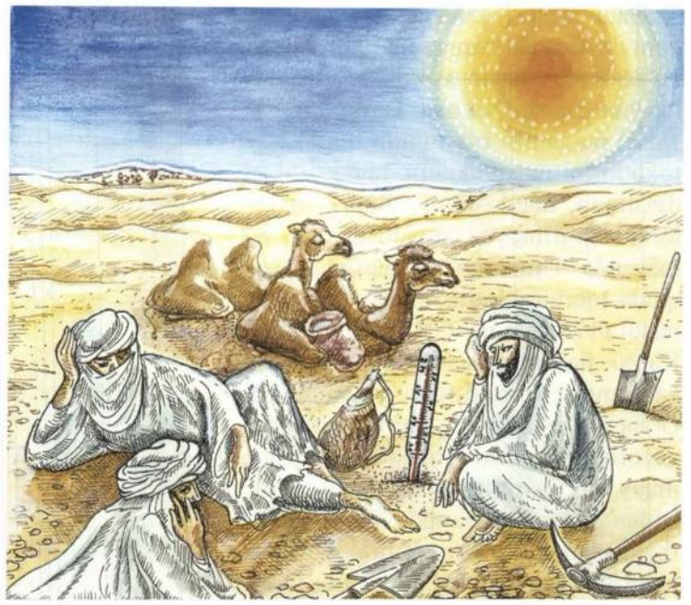
> "Hər şeyi mayenin köməyilə izah etmək olar" ideyası bayağıdır – bir növ kəndli təsəvvürüdür ki, hər bir mexanizmdə yay gizlənib. Qədimlərdə efir olmuşdur; sonra flogiston meydana çıxdı; bizim həm maqnitvari, həm şüşəvari, həm də qatranvari mayemiz oldu; bir neçə il əvvəl səsvari maye ortaya çıxdı; bu yaxınlarda mənim Fransadan aldığım kitabda isə... təbiətin bütün hadisələri qravitasiyavari mayenin köməyilə izah olunur.
>
> *Professor H.Devinin mühazirə qeydlərindən.*

Başlanğıc üçün Sadi Karno istiliyin müşahidələrdən alınmış o dövrə qədər məlum olan bütün xassələrini topladı və onları iki müddəa şəklində ayırdı:

1) istilik maddidir və onun miqdarı saxlanır;

2) termogen tarazlığı bərpa etməyə çalışır, yəni istilik özbaşına olaraq yalnız qızmış cisimdən soyuq cismə keçir. Bu zaman "hərəkətverici qüvvənin





yaranması həqiqətən termogenin sərf edilməsinə yox, onun isti cisimdən soyuq cismə keçməsinə ... borcludur", həm də "temperaturlar fərqinin olduğu hər yerdə hərəkətverici qüvvənin yaranması baş verə bilər" (hərəkətverici qüvvə almaq üçün qızmış cismin olması kifayət deyil, soyuq cismin də olması lazımdır). Yalnız temperaturlar fərqinin də olması kifayət deyildir, çünki cisimlərin bilavasitə kontaktı zamanı hərəkətverici qüvvə yaranmır, sadəcə olaraq, onların temperaturları bərabərləşir. Hərəkətverici qüvvə yalnız o zaman yaranır ki, temperaturun dəyişməsi həcmin dəyişməsi ilə müşayiət olunsun.

Başqa sözlə, Karno dərk etdi ki, əgər dünya hər yerdə eyni temperatura malik olsaydı, onda istilik enerjisini işə çevirmək olmazdı. İşin istiliyə çevrilməsilə müşayiət olunan proseslər sabit temperaturda gedə bilsə də (məsələn, sürtünmənin hesabına), onları əks istiqamətdə döndərmək və sərf edilən işi geri almaq olmaz. Əgər bunu etməyə müvəffəq olsaq, onda sistemdə və ya onu əhatə edən fəzada mütləq hər hansı dəyişikliklər baş verməlidir.

Karnonun bu müşahidəsi termodinamikanın *ikinci* qanununun, prinsipinin və ya *başlanğıcının* məzmununu təşkil edir. Birinci qanunun hələ olmadığı vaxtda, nə üçün ikinci qanunun? Birinci qanun – enerjinin saxlanması qanunu o vaxta qədər, təbiətin bütün enerji növlərini əhatə edən ümumi bir qanun şəklində ifadə olunmamışdı. Doğrudur, mexanikada "canlı qüvvələrin saxlanması prinsipi" – indi kinetik enerji adlanan bir şeyin saxlanması prinsipi artıq müəyyən olunmuşdu. Yarımçıq şəkildə də olsa, universal qanun əvvəlcə meydana çıxdığına, həm də, ümumiyyətlə, bütün proseslərə aid olduğuna görə onu birinci qanun adlandırırlar.

Karno ona diqqət yetirdi ki, faydalı işi yalnız istiliyin daha çox qızmış cisimdən daha az qızmış cismə keçidi zamanı əldə etmək olar, lakin bununla belə, istiliyi soyuq cisimdən isti cismə də vermək olar, ancaq müəyyən qədər iş sərf etməklə. O özünün ixtira etdiyi və indi *Karno tsikli* adlanan dairəvi prosesi öyrənərkən bu nəticəyə gəlmişdi. Baxmayaraq ki, bu qapalı proses, xüsusi olaraq, istilik maşınının işini təhlil etmək üçün icad edilmişdi, tsikliklik ideyasının özü yeni deyildi. Bu ideya mexanikada (o cümlədən ata Karno tərəfindən) geniş istifadə olunurdu, xüsusən də müxtəlif itkilərin, məsələn, sürtünmənin təsirindən xilas olmaq tələb olunduğu hallarda.

Bütün termodinamikanın məğzi Karno tsiklində toplanmışdır. Karno tsiklinə müraciət etməzdən əvvəl istiliyin Karno tərəfindən aşkara çıxarılmış bir xüsusiyyətinə baxaq. Axı o, istiliyi substansiya, maddə hesab edirdi, ona görə də istilik haqqında mühakimə apararkən mexanikadan götürülmüş bir analogiyadan istifadə etmişdi: ağır

cisim müəyyən hündürlükdən düşərək iş görür, bu iş cismin çəkisi ilə hündürlüyün hasilinə bərabərdir. İstilik də daha yüksək temperaturdan daha aşağı temperatura "düşərək", hərəkətverici qüvvə yarada bilər, bu hərəkətverici qüvvə termogenin miqdarından və temperaturlar fərqindən asılıdır. Ancaq kütlədən fərqli olaraq, burada iki incə fərq var: 1) istilik hərəkətverici qüvvə doğurmaya da bilər (kütlə həmişə iş görür!) və 2) mexaniki iş cismin düş-

EV VƏ OCAQ, PALTAR VƏ QİDA TERMODİNAMİKANIN NÖQTEYİ-NƏZƏRİNCƏ

İnsan üçün rahat şərait (xüsusən ilin soyuq dövründə) yalnız havanın temperaturunu otaq temperaturunda (adətən 18-20°C) saxlamaq hesabına təmin ediləcəkdir. Şübhəsiz, bunu yalnız xarici divarları, döşəmə və tavanı kifayət qədər kiçik istilikkeçirməyə malik olan qapalı binada etmək mümkündür. İnsanın dərisi kimi, pəncərə də istiliyi yaxşı keçirir və evdə istilik itkisinin əsas mənbəyidir. Nyutonun istilik mübadiləsi tənliyinə görə istilik selinin dQ/dt sürəti pəncərənin S sahəsilə, daxili və xarici şüşələrin temperaturları arasındakı ΔT fərqilə düz mütənasib və pəncərənin d qalınlığı ilə tərs mütənasibdir:

$$\frac{dQ}{dt} = A\frac{S}{d}\Delta T.$$

Burada A – istilikvermə əmsalıdır. Ona görə də istiliyi saxlamaq üçün qalın şüşələr qoymaq əvəzinə hava qatının qalınlığını artırmaq faydalıdır (məsələn, ikiqat pəncərə çərçivələri quraşdırmaqla).

Bəs soba və ya buxarı ilə qızdırılan kənd evlərində necə etməli? Prinsipcə burada da hər şey eyni vəziyyətdədir, yalnız istiliyin verilməsi kəsilməz yox, "impuls" rejimində baş verir. Termodinamikanın nöqteyi-nəzərincə maraqlıdır ki, yanacağın (odunun, kömürün və s.) yanma istiliyi məhz nəyə sərf olunur? Məlum olur ki, bu enerjinin 25-30%-ə qədəri... küçənin qızdırılmasına gedir.

İş ondadır ki, hermetik olmayan binada hava $V=\text{const}$ sabit həcmdə və $p=\text{const}$ sabit atmosfer təzyiqində qızır. Əgər havanı ideal qaz hesab etsək, onda qızma prosesi hal tənliyinə tabe olur

$$pV=\frac{2}{3}\bar{E}=\frac{2}{3}c_V NT=\text{const},$$

burada c_V - sabit həcmdə havanın xüsusi istilik tutumu, $\bar{E}$ – onun orta və ya daxili enerjisi, N və T – hava molekullarının tam sayı və havanın temperaturudur.

Soyuq otaqda temperatur qızdırılan otağın temperaturuna nisbətən aşağı olduğundan ($T_1<T_2$) $N_1>N_2$ olacaqdır. Bu o deməkdir ki, otağın qızdırılması prosesində otaqdakı havanın bir hissəsi genişlənərək, yarıqlardan və sobanın borusundan çölə çıxır və özü ilə istiliyin bir hissəsini aparır. Bu zaman otaqda qalan molekulların istilik hərəkətinin orta enerjisi dəyişmir, beləliklə, həqiqi mənada, biz küçəni qızdırırıq (əgər biz otağı hermetikləşdirməklə otaqda təzyiqi kəskin qaldırmaq istəmiriksə, bu qaçılmazdır).

Mənzillərin qızdırılması ilə insanın özünün qidalanması proseslərinin oxşarlığı artıq çoxdan aşkar olunmuşdur (hər kəs bilir ki, uzun müddət yeməsən, hətta yayda da üşüməyə başlayarsan). Lakin axı insanlara təkcə öz bədənlərinin temperaturunu saxlamaq deyil, həm də faydalı iş – mexaniki və ya zehni iş də görmək lazımdır. Həm bu, həm də o biri enerji sərf olunmasını tələb edir, belə ki, bu mənada insan xaricdən qidalandırmaq lazım gələn istilik maşınının analoqudur.

Adi yanacaq kimi, istənilən qida maddəsinə, enerjidaşıyıcısı kimi, karbonun müxtəlif birləşmələri (piylər və karbohidratlar) daxildir. Canlı orqanizmlərdə onlar oksigenlə birləşərək oksidləşir. Həm qidaların, həm də yanacaqların energetik dəyəri kalorilərlə ifadə olunur. Orqanizmdə yavaş, çoxpilləli "daxili" yanma baş verir; yekunda ilkin karbon CO_2 karbon qazına çevrilir.

Termodinamikanın Birinci qanununun bu hala tətbiq edilə bilməsi uzun müddət şübhəli qalmışdı. Canlı orqanizm bu qanunu pozan hər hansı bir əlahiddə "həyati qüvvəyə" malikdirmi? Hələ 1780-ci ildə fransız alimləri Antuan Lavuazye və Pyer Laplas bu suala mənfi cavab vermişdilər. Onlar sübut etdilər ki, xarici və "daxili" yanmanın istilik effektləri mütləq olaraq eynidir.



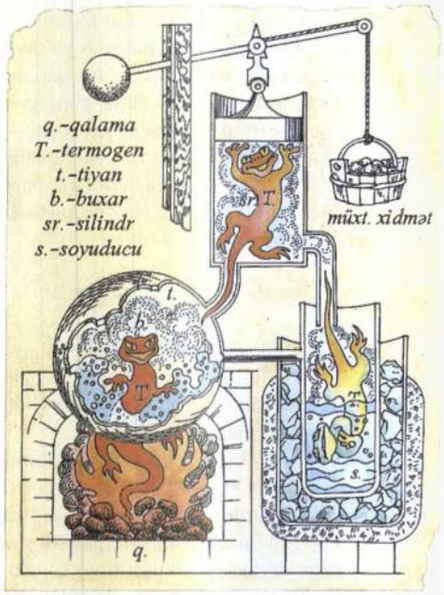
düyü hündürlüyün mütləq vəziyyətindən yox (1 m qədər düşəndə, cismin stoldan və ya evin damından düşməsinin fərqi yoxdur), yalnız cismin qət etdiyi hündürlüklər fərqindən asılıdır. İstilik isə müxtəlif temperaturlarda müxtəlif "keyfiyyətlərə" malikdir, yəni istilik maşınında istiliyin 11°C-dən 10°C-yə və ya 99°C-dən 98°C-yə "düşməsi" heç də eyni deyildir. Hərəkətverici qüvvənin miqdarı hər iki halda müxtəlif alınır. Deməli, analogiyadan analogiyaya fərq var! Bu nəticə də Karno tsiklindən çıxır.

KARNO TSİKLİ

Məşhur Karno tsikli nə olan şeydir? Onu nə üçün böyük adlandırırlar, əksəriyyətə isə o, ümumiyyətlə, nə iləsə müəmmalı görünür. Əslində isə, əgər hər şeyi düzgün vurğulasaq, onda bu ixtiranın həm sadəliyi, həm də gözəlliyi aşkar olar və aydın olar ki, burada müəmmalı heç nə yoxdur.

Karnonun həll etmiş olduğu əsas məsələ belə ifadə olunur: istilikdən hərəkətverici qüvvənin alınması prosesinin universal olub-olmadığını aydınlaşdırmaq. Bunun üçün alim aşağıdakı suallara cavab verməli idi: 1) istilik maşınında hərəkətverici qüvvənin mənbəyi nədir; 2) bu qüvvə işçi cisimdən asılıdırmı; 3) hərəkətverici qüvvənin maksimuma çatdığını necə bilməli.

Texniki olaraq istilik maşınında istilikdən hərəkəti, adətən, genişlənən su buxarının soyuması hesabına və ya hər hansı başqa analoji bir prosesin hesabına alırlar. Belə maşın aşağıdakı kimi işləyir. Buxarı qızdırırlar, sonra



isə ona genişlənmək imkanı verirlər. Genişlənərkən, buxar iş görür, məsələn, porşeni itələyir və eyni zamanda soyuyur. Vəssalam, istilik işə çevrildi. Lakin maşının bundan sonra işləməsi üçün aşağıdakı iki şeydən birini etmək lazımdır: 1) işlənmiş soyuq buxarı xaric etmək, onun yeni porsiyasını götürmək, qızdırmaq və genişlənməsinə imkan vermək və yenidən xaric etmək; 2) buxarın işlənmiş porsiyasını sıxmaq, bu zaman alınan istiliyin bir hissəsini soyuducuya vermək, onu ilkin halına qaytarmaq, qızdırmaq, genişlənməsinə imkan vermək və s. Ümumiyyətlə desək, hər iki üsul yaradır. Fərq ondadır ki, birinci hal qeyri-məhdud buxar ehtiyatı və onu uzaqlaşdırmaq imkanlarını, ikinci hal isə soyuducunun olmasını tələb edir. İstənilən qədər təkrarlana bilən qapalı (tsiklik) proses alınır. Lakin onlardan yalnız ikincisi tam tsiklikdir, birincisi isə yalnız təsirinin nəticəsinə görə tsiklikdir, onda olan işçi cisim daim dəyişir. Lakin əslində bunlar eyni bir şeydir.

Doğrudan da hərəkətdə olan buxar maşınında nə baş verir? Odluqda yanma sayəsində alınan termogen qazanın divarlarından keçir, buxarın yaranmasına səbəb olur və sanki, onunla birləşir. Buxar onu özünə sövq edir, silindrə aparır, burada termogen müəyyən xidməti yerinə yetirir, oradan da soyuducuya gəlir, burada buxar soyuq su ilə təmasda olaraq, mayeyə çevrilir. Soyuducudakı soyuq su son nəticədə yanmadan alınan termogeni udur. Bu suyu buxar qızdırır, sanki, su bilavasitə odluğun üzərinə qoyulmuşdur. Burada buxar yalnız termogeni daşıyan vasitədir...

S.Karnonun "Odun hərəkətverici qüvvəsi və bu qüvvəni artırmağa qadir olan maşınlar haqqında düşüncələr" memuarından.

UNİVERSAL KARNO FUNKSİYASI NECƏ GÖRÜNƏRDİ

İdeal tsiklde görülən W işini hesablamaqla, mövcudluğunu Karnonun öz qeyd kitabçasında qabaqcadan xəbər verdiyi universal funksiyanı tapaq. İş alınan və verilən istiliklərin fərqilə mütənasibdir. Ona görə də bu istilik miqdarlarını tapmaq və onların mütləq temperaturla əlaqəsini təyin etmək kifayətdir. Qoyulan məsələni həll etmək üçün işçi maddəsi ideal qaz olan Karno tsiklinə baxaq.

T_1 temperaturunda a nöqtəsindən (təzyiq P_a, həcm V_a) b nöqtəsinə (təzyiq P_b, həcm V_b) qədər izotermik genişlənmə prosesində qaz istilik rezervuarının enerjisi hesabına

$$W = \int_a^b PdV \qquad (1)$$

işi görür. Bu zaman qazın daxili enerjisi dəyişməz qalır, yəni qızdırıcıdan alınan istiliyin hamısı işə çevrilir: $Q_1 = W$. İdeal qazın təzyiqi, həcmi və temperaturu hal tənliyi vasitəsilə bağlıdır:

$$PV = RT \text{ və ya } P = \frac{RT_1}{V}. \qquad (2)$$

(2) asılılığını Karno belə təsvir etmişdir: "Əgər dəyişməz temperaturda qaz həcmcə dəyişirsə, onda bu qazın aldığı və ya verdiyi istilik miqdarı, əgər həcmin artması və ya azalması həndəsi silsilə əmələ gətirirsə, ədədi silsilə əmələ gətircək".

Lakin Q_1 və Q_2 istilik miqdarlarının öz aralarında hansı münasibətdə olduğunu aydınlaşdırmaq üçün həcmlərin V_b/V_a və V_c/V_d nisbətlərini müqayisə etmək kifayətdir; bu nisbətlər də, öz növbəsində, Karno tsiklinin digər iki adiabat fazaları ilə təyin olunurlar. 2 əyrisi boyunca adiabat genişlənmə zamanı aşağıdakı adiabat tənliyi

$$TV^{\gamma-1} = \text{const və ya } T_1V_b^{\gamma-1} = T_2V_c^{\gamma-1},$$

4 adiabatı boyunca sıxılma zamanı isə aşağıdakı tənlik

$$T_1V_a^{\gamma-1} = T_2V_d^{\gamma-1}$$

ödənməlidir.

Əgər bu bərabərlikləri hədbəhəd bir-birinə bölsək, onda alınacaq ki, həcmlərin V_b/V_a və V_c/V_d nisbətləri bərabərdir və ona görə də

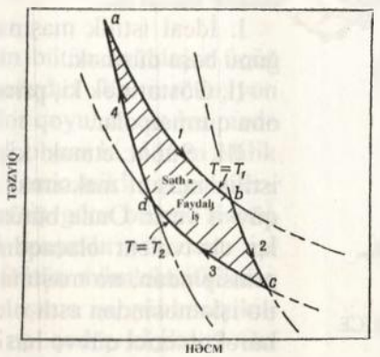
$$Q_1 = W_1 = RT_1\int_a^b \frac{dV}{V} = RT_1 \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right),$$

$$Q_2 = -W_2 = RT_2\int_d^c \frac{dV}{V} = RT_2 \ln\left(\frac{V_c}{V_d}\right)$$

münasibətlərindən

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2$$

bərabərliyi çıxır. Bu nisbət axtarılan universal funksiyanın şəklini təyin edir. Bu universal funksiya Karnonun adını daşıya bilərdi.

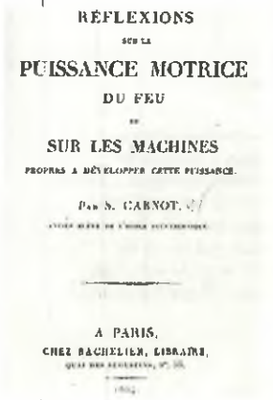


Yuxarıdakı izoterm və sağ adiabat üzrə hərəkət edərkən, görülən iş *ab* və *bc* əyriləri altındakı sahəyə bərabərdir. Aşağıdakı izoterm və sol adiabat üzrə sonrakı hərəkət zamanı, əksinə, buxarın sıxılmasına iş sərf olunur və bu iş *cd* və *da* əyriləri altındakı sahəyə bərabərdir. Lakin birinci sahə plyus işarəsilə (iş görülür), ikinci sahə isə minus işarəsi ilə (iş xərclənir) götürüldüyündən, bir tam tsikl ərzində işdə son qazanc bütün dörd əyri ilə məhdudlanan sahəyə bərabərdir (şəkildə bu sahə ştrixlənib).

Karno belə bir hipotezə əsaslanmışdı ki, istilik həqiqidir və onun miqdarı saxlanır. İstilik maşını işləyən vaxt buxar haradasa termogen udur, başqa bir yerdə isə verir. Tsiklin sonunda, buxar ilkin halına qayıdan vaxt, mexaniki iş bütün istiliyin qızdırıcıdan soyuducuya verilməsi hesabına, başqa sözlə, termogenin qızdırıcının temperaturundan soyuducunun temperaturuna "düşməsi" hesabına görülür.



Nikola Leonar Sadi Karno.


RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.
Par S. CARNOT.
A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,

S.Karno. "Odun hərəkətverici qüvvəsi və bu qüvvəni artırmağa qadir olan maşınlar haqqında düşüncələr". Titul vərəqi. Fransa. 1824-cü il.

İş yalnız bu temperaturlar fərqindən asılıdır. Müasir təsəvvürlərə görə, qızdırıcıdan soyuducuya yalnız istiliyin bir hissəsi verilir. Lakin enerjinin saxlanması qanunu Karnoya məlum deyildi, buna baxmayaraq, o aşkar etmişdi ki, termogen konsepsiyası müəyyən uc-uca qovuşmazlığa gətirib çıxarır.

Nəzərdə tutulmuş proqramı yerinə yetirmək üçün Karnoya "istilik" və "iş" anlayışlarından sırf mücərrəd istifadə etməyə imkan verə bilən nə isə bir sxem, nə isə bir ideal obyekt lazım oldu.

Bununla əlaqədar üç məsələni həll etmək lazım idi:

I. İdeal istilik maşınının nə olduğunu başa düşmək.

II. Göstərmək ki, prinsipcə də olsa, onu qurmaq olar.

III. Sübut etmək ki, yalnız ideal istilik maşını maksimal hərəkətverici qüvvə verir. Onda bütün belə maşınlar ekvivalent olacaqdır, yəni nə iş prinsipindən, nə maşının hansı maddə ilə işləməsindən asılı olmayaraq, eyni hərəkətverici qüvvə hasil edəcəklər.

Karno öz proqramını axıra qədər yerinə yetirdi, Karno tsikli isə, onun proqram çərçivəsində icad etməyə nail olduğu ideal istilik mühərrikinin sadəcə iş sxemidir. Lakin "böyük Karno tsikli" deyəndə, əlbəttə, bütün şərh olunmuş proqramı nəzərdə tuturlar. Məhz bu proqram çox diqqətəlayiqdir. Karno tsikli isə onun bir hissəsidir, lakin çox vacib hissəsidir. Karno proqramını bəndlər üzrə araşdıraq.

I. Mexanikada ideal maşın real maşından itkilərin, məsələn, sürtünmənin hesabına yaranan itkilərin, olmaması ilə fərqlənir. Karno mexanika ilə analogiya əsasında istilik maşınında sürtünməyə nəyin uyğun olduğunu aydınlaşdırdı. Mexaniki maşında faydalı işin bir hissəsi sürtünməyə sərf olunur. İstilik maşınında müxtəlif temperaturlu iki cisim toxundurulduqda və istilik sadəcə olaraq, daha isti cisimdən daha soyuq cismə heç bir iş görülmədən axanda "termogen faydasız yerə sərf olunur". Əgər buna bənzər vəziyyətdən xilas olsaq, onda istiliyi hərəkətə və ya mexaniki işə (əslində, hər ikisi də eyni şeydir) çevirməklə, alınan hərəkətdən istifadə etmək və onu yenidən istiliyə çevirmək və bunu ağlımıza gəldiyi qədər təkrarlamaq olar. Bu proses dönən proses adlanır. Əgər ona nail ola bilsək ki, tam tsiklin istənilən ən kiçik hissəsində proses dönən olsun, onda *ideal istilik maşını*, yəni itkisiz maşın yaradılmış olacaqdır.

II. Heç olmazsa, fikrimizdə ideal istilik maşınını qurmaq lazımdır. Həqiqətdə o, həyata keçirilə bilər ya yox, bunun əhəmiyyəti yoxdur – başlıcası odur ki, prinsipcə işləsin.

Belə bir maşını Karno icad etdi. Müasir elmi dildə onun ideal maşınının işçi tsikli aşağıdakı kimi təsvir olunur:

1. Əvvəlcə odluğun T_1 temperaturunda su buxarını qızdırırlar, yəni ona sabit T_1 temperaturunda genişlənmək və odluqdan müəyyən Q_1 istilik miqdarı almaq imkanı verirlər. Prosesin bu hissəsi 1 izotermilə təsvir olunur (səh. 179-dakı şəklə bax). Bütün əməliyyatlar çox yavaş baş verməlidir ki, tarazlıq halının şərtləri ödənsin, çünki başqa hallara baxmağı bacarmırıq.

2. Sonra $T_2<T_1$ temperaturuna qədər "düşərək", Q_1 istiliyini işləməyə vadar edirlər. Bu zaman istiliyin özü sərf olunmur, onun miqdarı sabit qalır ki, bu da həyata keçirilə biləndir, əgər, məsələn, maşını termosda yerləşdirsək; burada maşın istiliyi nə ala, nə də verə bilməz. Buxar genişlənir, onun təzyiqi və temperaturu isə azalır (T_1-dən T_2-yə qədər). Tsiklin bu hissəsi 2 adiabatı ilə təsvir olunur. Nəticədə buxar T_2 temperaturunda Q_1 istiliyinə malik olur.

3. Sonra buxarın başlanğıc temperaturlu, həcmli və təzyiqli ilkin halına qayıtması lazımdır. Artıq indi xarici qüvvət tətbiq edərək, onu sabit T_2 temperaturunda tam müəyyən bir həcmə qədər sıxırlar. Sıxılma zamanı buxar qızır və onun temperaturunun sabit saxlanması üçün o özünün istiliyinin Q_2 hissəsini soyuducuya verməlidir. Bu proses 3 izotermi ilə təsvir olunur.

4. Daha sonra, lakin indi artıq adiabatik sıxmaq yolu ilə buxarı başlanğıc T_1 temperaturuna qədər qızdırırlar. Tsiklin bu hissəsi 4 adiabatı ilə təsvir olunur. Yuxarıda deyilən "tam müəyyən həcmi" T_2 izotermi üzərində elə seçirlər ki, adiabatik sıxılmadan sonra buxar tsiklin ilkin nöqtəsində olsun.

Təsvir olunan işçi tsiklində bütün göstərilən əməliyyatları əks ardıcıllıqla aparmağa heç nə mane olmur. Başqa sözlə, tsikl dönəndir. Onda 3 izotermi boyunca əks istiqamətdə hərəkət edərkən buxar genişlənəcək və soyuducudan Q_2 istiliyini alacaqdır, 1 izotermi üzərində isə, əksinə, sıxılacaq və qızdırıcıya Q_1 istiliyi verəcəkdir. Soyuducu maşın alınacaq ki, onun da fəaliyyəti dördbucaqlı daxilindəki işlə ödənilmişdir.

III. İsbat etmək olar ki, digər bərabər şərtlər daxilində məhz dönən tsikl maksimum hərəkətverici qüvvə istehsal edir, xüsusi halda buradan çıxır ki, bütün ağla gələn və ağlagəlməz dönən istilik maşınları (o maşınlarda ki, T_1 temperaturunda Q_1 istiliyi udulur, $T_2<T_1$ temperaturunda isə Q_2 istiliyi verilir) eyni bir iş görür. Həm də bu iş nə maşının quruluşundan, nə işçi maddədən, istər buxar, su və ya spirt olsun, asılı deyildir. Əgər, heç olmazsa, bir dönən maşın üçün (qoy tamamilə mücərrəd olsun) onun işini hesablamağa imkan verən qanunu tapsaq,



onda bu qanun bütün maddələr üçün universal olacaqdır! Yəni müəyyən məhdudiyyətlər qoyulur: elə bir maddə ixtira etmək olmaz ki, dönən istilik maşınında o, Karno tsiklinin yol verdiyi işdən çox iş görə bilsin. Karno tsikli – ideal maşındır və onun işi maksimaldır. Bütün mümkün itkilərlə bərabər real maşının işi, şübhəsiz kiçikdir. Lakin nə qədər kiçikdir? Ən maraqlısı odur ki, hələ heç kəs Karno tsiklinin yol verdiyi işin 30%-indən çox iş almağa müvəffəq olmayıb. Həm də bu cür məhdudiyyətin səbəbini heç kəs bilmir. Karno tsiklinin effektivliyi aşağıdakı düsturla təyin olunur

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

İstiliyin yalnız bu hissəsini işə çevirmək olar, bundan qətiyyən çox ola bilməz! η kəmiyyəti tsiklin *effektivliyi* və ya *faydalı iş əmsalı* adlanır və yalnız qızdırıcının və soyuducunun temperaturundan asılıdır.

Sonralar şərh olunmuş mühakimələr əsasında Uilyam Tomson və Rudolf Klauzius elmin arsenalına "mütləq temperatur" və "entropiya"

Karnonun ölümündən sonra onun qeyd kitabçaları tapılmışdır. Bunlarda o, istiliyə mexaniki hərəkətin forması kimi baxmış, enerjinin saxlanması qanunu haqqında mühakimə yürütmüş, təcrübələri ətraflı təsvir etmişdir.

Klassik fizikada hər hansı bir oblastın məntiqi təkmilləşdirilməsi yalnız o zaman bitmiş sayılır ki, həmin oblast "normal" riyaziyyatın fəsillərindən birinə gətirilsin.

Lakin bir fövqəladə istisna var: *klassik termodinamika*. Bu fəndə əsas müddəaları çıxarmaq üçün, adətən tətbiq olunan metodlar başqa oblastlarda qəbul edilmiş metodlardan kəskin fərqlənir. Bu aşağıdakından görünür: fizikanın elə bir oblastı yoxdur ki, orada Karno tsikli ilə və onun kimi şeylərlə oxşarlığa malik olan mülahizələr və nəticələr tətbiq olunsun... Bu nəticələri riyazi olaraq xarakterizə etmək çətindir: onlar fizika fənni üçün o qədər özünəməxsusdur və xüsusiyyət təşkil edir ki, sanki, fiziki məzmunu kənar etsək, onlardan heç nə qalmaz...

M.Born

anlayışları daxil etdilər və klassik termodinamikanı yaratdılar. Ola bilsin, Karno belə tez vəfat etməsəydi, bütün işi axıra qədər özü görərdi. Onu da qeyd etmək maraqlıdır ki, Karnonun baxdığımız mühakimələri nə hesablamalarla, nə də qrafiklərlə müşayiət olunmamışdır. Onun memuarı 1824-cü ildə çap olunmuş, lakin rezonansa səbəb olmamışdır. Yalnız on il sonra, 1834-cü ildə, başqa fransız, Emil Klapeyron Karno termodinamikasına kanonik şəkil verdi: bütün lazımi işarələmələri daxil etdi, sözlərlə təsvir olunmuş hesablamaları apardı və diaqramı qurdu. Üç ildən sonra Klapeyronun məqaləsini ingilis dilinə tərcümə etdilər və İngiltərədə Scientific Memoirs ("Elmi əsərlər") toplusunda nəşr etdirdilər. Daha on ildən sonra alman fiziki və nəşriyyatçısı İohann Xristian Poqqendorf (1796-1877) bu məqaləyə diqqət yetirdi, valeh oldu, özünün Annalen der Physik and Chemie ("Fizika və kimya salnamələri") jurnalında çap etdi və yalnız onda Karno nəzəriyyəsi həqiqətən işıq üzü gördü.

TEMPERATUR

Gündəlik həyatda daim istifadə etdiyimiz və bizim üçün bu qədər adi olan "temperatur" anlayışı heç də elə sadə deyil. Məsələn, "temperaturu ölçmək" nə deməkdir? Termometr adlanan bir cihazı cisimlə kontakta gətirirlər və gözləyirlər ki, termometrin göstəricilərinin dəyişməsi nə zaman dayanacaqdır. Bax bu göstərişləri məhz *cismin temperaturu* adlandırırlar. Nə üçün biz əminik ki, bizim əməllərin hər hansı bir mənası var? İki cismin bilavasitə kontaktı zamanı istilik özbaşına isti cisimdən soyuq cismə keçir, bu proses cisimlər "eyni dərəcədə isti" olana qədər, yəni onlar arasında *istilik tarazlığı* qərarlaşana qədər davam edir. Əgər üçüncü cisimlə (sınaq cismilə) ayrı-ayrılıqda istilik tarazlığında olan iki cismi öz aralarında kontakta gətirsək, onda onlar da istilik tarazlığında olar. Əslində termometrin iş prinsipi buna əsaslanmışdır. Beləliklə, temperatur sistemin xüsusi bir halını – onun istilik tarazlığı halını xarakterizə edir.



Termometr ixtira edilən vaxtdan bəri, fikirləşmədən, bu hadisədən istifadə etmişlər. Lakin yalnız XX əsrin ortalarına yaxın, termodinamika artıq

tam qüvvəsilə işləyən və statistik fizika termodinamikanın mahiyyətini izah edən zaman dərk olundu ki, istilik tarazlığının mövcudluğu faktı və deməli, onun xarakteristikaları – temperaturlar – əsla trivial deyildir.

TERMODİNAMİKANIN SIFIRINCI BAŞLANĞICI

1909-cu ildə yunan riyaziyyatçısı Konstantin Karateodori (1873-1950) termodinamikanı sırf aksiomatik nəzəriyyə şəklində: təcrübədən alınmış müddəaların və həndəsi metodların köməyilə qurmağa cəhd etmişdir. Termodinamik anlayışlara qarşı həndəsi obyektləri uyğun qoyaraq, Karateodori istilik haqqındakı elmi Karno tsikli kimi "süni" priyomlardan təmizləmək istəmişdir. O, buna müvəffəq oldu.

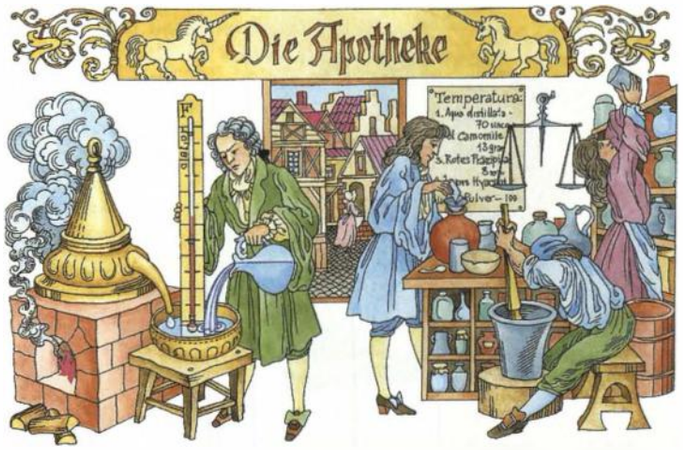
Bütövlükdə fizika cəmiyyəti termodinamikanın Karateodori tərəfindən təklif edilmiş aksiomatikasını qəbul etmədisə də, bununla belə, bu aksiomatikanın ayrı-ayrı hökmləri alimlərin şüuruna və işlərinə nüfuz etdi. Məsələn, aksiomatikanın inanılmış əleyhdarı olan Maks Plank özünün "İstiliyin nəzəriyyəsi" əsərində (1930-cu il) tarazlığa doğru meyildən termodinamik sistemin mexaniki sistemdən fərqinin kriteriyası kimi istifadə etmişdir. Bəzi alimlər bu xassəni termodinamikanın ümumi başlanğıcı adlandırdılar. 1931-ci ildə isə fiziklər tarazlıqda olmayan sistemlərin tədqiqinə başlayanda və onlar üçün də temperatur anlayışını korrekt təyin etmək lazım gəldikdə, termodinamikanın əsaslarına dair diskussiyalar geniş vüsət aldı. Nəticədə, hamı onunla razılaşdı ki, qapalı və özbaşına buraxılmış sistemin tarazlığa doğru meyli termodinamikanın postulatlarından biri, prinsiplərindən biri, başlanğıclarından biridir.



Buna qədər üç başlanğıc vardı: 1) enerjinin saxlanması qanunu; 2) entropiyanın artması qanunu və 3) temperaturun sıfırında entropiyanın sıfıra bərabər olması. Qapalı sistemin tarazlığa doğru meyli isə – artıq Dördüncü başlanğıcdır. Hətta klassik mexanika yaranmazdan çox-çox əvvəl bundan istifadə edilməyə başlandığından, ingilis nəzəriyyəçi fiziki Ralf Hovard Fauler (1889-1944) ona birincinin nömrəsindən kiçik nömrə – sıfırıncı nömrəni verməyi təklif etdi. Bir sözlə, termodinamikanın qanunlarının kəşf edilməsi ardıcıllığı belədir: İkinci başlanğıc (S.Karno, U.Tomson, R.Klauzius), Birinci başlanğıc (Y.R.Mayer, C.Coul, G.Helmholts), Üçüncü başlanğıc (V.Nernst) və nəhayət, Sıfırıncı başlanğıc (ümumi razılıq əsasında).

Qeyd etmək vacibdir ki, söhbət hələlik ideal obyektlərdən – qapalı sistemlərdən gedir: onlar qalan dünyadan izolə olunmuşlar. İçərisindən kütlə, enerji, istilik selləri hərəkət edən açıq sistemlərdə başqa qanunlar təsir edir. Burada, məsələn, istilik tarazlığından danışmaq ümumiyyətlə mənasızdır. Doğrudur, əgər xarici mühitlə mübadilə stasionar olarsa, zamandan asılı olmazsa, onda açıq sistemdə dinamik tarazlıq qərarlaşa bilər. Lakin bu tamamilə başqa vəziyyətdir.

Postulat, prinsip, aksioma, başlanğıc – bütün bunlar, istər daimi mühərrik yaratmağın mümkünsüzlüyü prinsipi və ya istər materiyanın saxlanması qanununu olsun, dəlilsiz-sübutsuz inanılan, isbatsız qəbul edilən hökmün ekvivalentləridir. Lakin "postulat" və "aksiom" terminləri ən çox riyazi nəzəriyyələr, "prinsip" və "başlanğıc" isə fiziki nəzəriyyələr qurarkən istifadə olunur.



Calor ("hərarət", "bürkü") latınca kökü istiliklə bağlı olan bir çox müasir anlayışların əsasında durur. Məsələn, istilik miqdarının vahidi kalori, otaq qızdırıcı cihazı – kalorifer adlanır.

Məhz ona görə də açıq sistem üçün temperaturun nə olduğunu təyin etmək olduqca çətindir. Müxtəlif ümumiləşmiş anlayışlardan istifadə etməyə çalışırlar, ancaq indiyədək açıq sistemlər üçün temperatur "şey özündədir" – nə isə birqiymətli olmayan və yəqin ki, formal bir şeydir. Tarazlıqda olmayan halların və açıq sistemlərin müasir termodinamikasının əsas çətinlikləri hər şeydən əvvəl temperaturun aydın tərifinin olmaması ilə bağlıdır.

TERMİNİN YARANMASI

Temperatur sözü latıncadan 1) lazımi yerdəyişmə, düzgün münasibət, mütənasiblik və ya 2) düzgün qurğu, normal hal kimi tərcümə olunur. Bu sözün ilkin (tibbi) mənası məhz belə olmuşdur: orqanizmi normal hala qaytarmaq üçün müxtəlif dərman elementlərinin lazımi yerdəyişməsi. Ona görə də "temperatur" termini yalnız tibbdə işlənirdi və müstəsna olaraq dərmanların tərkibinə aid idi. İstilik hadisələrində onu yalnız XVIII əsrin ortalarında istifadə etməyə başladılar. O vaxta qədər latın termini olan calor işlənirdi; bu termin həm istiliyi, həm də temperaturu bildirirdi, xüsusən də ki, onlar arasında fərqi görmürdülər.



Georq Vilhelm Rixman.

Doğrudur, bəzən termometrin göstəricilərini temperies termini ilə işarə edirdilər. Hesab olunurdu ki, bu cihaz cisimdəki istilik miqdarını ölçür. Alman fiziki, öz dövründə ən dəqiq termometr düzəltmiş Qabriel Daniel Farengeyt (1686–1736) qızğın və soyuq su qarışığının istiliyini öyrənirdi. O müəyyən etdi ki, suları eyni həcmdə qarışdırsaq, onda qarışığın istiliyi qızğın və soyuq suların istiliklərinin hesabi ortasına bərabərdir. Burada "temperatur" terminini işlətmək lap yerinə düşərdi. Lakin Farengeytə görə, istilik elə həminki calor olaraq qalırdı.

1740-cı illərin sonunda – 1750-ci illərin əvvəlində "temperatur" sözünü rusiyalı fizik Georq Vilhelm Rixman (1711–1753) istifadə etdi, həm də təkcə termometrin göstərişlərilə əlaqədar yox. O güman edirdi ki, istiliyin iki ölçüsü – "istiliyin qradusunu – dərəcəsini" xarakterizə edən (temperatur) və cismin qızma dərəcəsini göstərən ölçü və verilmiş qızma dərəcəsində cisimdə olan istiliyin miqdari ölçüsü. Eksperimentlər nəticəsində Rixman bircins mayelər qarışığında istiliyin paylanması üçün düstur çıxardı:

$$Q_{qar} = \frac{am + bn + co + dp + \ldots}{a + b + c + d + \ldots},$$

burada a, b, c, d, ... kütlələr, m, n, o, p, ... bu kütlələrin istilikləridir. Deyilənlərdən istilik və temperatur anlayışlarını ayıran-birləşdirən istilik tutumu anlayışının elmə daxil edilməsinə cəmi bircə addım qalmışdı. Rixmanın əsərləri "istilik tutumu" terminini icad etmiş şotland fiziki və kimyaçısı Cozef Blekdə haqlı olaraq böyük təəssürat yaratmışdı.

Temperaturun ölçülməsinə qayıdaq. Hələlik biz yalnız müəyyən etdik ki: 1) "sistemin halının müəyyən göstəricisini" bilmək üçün hansı əməliyyatları aparmaq lazımdır və 2) buna təbiətin hansı qanunu cavabdehdir. Ancaq termometr nədir və o, doğrudanmı temperaturu ölçür, bu tamam başqa sualdır. Ümumiyyətlə, temperaturu bilavasitə, məsələn, uzunluq kimi ölçmək olarmı? Sən demə, olmazmış. Çox vaxt temperaturun dəyişməsi haqqında qızma zamanı müxtəlif maddələrin genişlənməsinə əsasən fikir yürüdürlər və dayaq nöqtələrini və onlar arasında bölgüləri cızaraq ixtiyari tərzdə dərəcəni seçirlər ("Termometrin tarixi" əlavə oçerkinə bax). Ona görə də ölçmələrin nəticələrini də nə cürsə uzlaşdırmaq lazımdır.

Əlbəttə, müəyyən etalondan istifadə etməyi şərtləşmək olar. Deyək ki, Selsi şkalası olan qaz termometrindən (adətən belə edirlər). Lakin onda da fəaliyyəti məhdud olan qazın hələlik öz ideal qaz xassələrini saxladığı yalnız temperaturlar diapazonunda (təxminən 0°C-dən 100°C-yə qədər) işləyən cihazla əlaqəmiz olur. Çox aşağı temperaturlarda (–270°C tərtibində), qaz mayeyə kondensasiya edən zaman və ya çox yüksək temperaturlarda (1000°C və böyük), qaz tam ionlaşan zaman, artıq qaz termometri yaramır. Sual yaranır: "Bütün hallara yarayan termometr düzəltmək olar?"

Bu problemlər problemidir. XIX əsrin əvvəllərindən (o vaxt artıq heç kəsdə şübhə qalmamışdı ki, istilik və temperatur müxtəlif anlayışlardır, həm də artıq qaz termometrləri var idi) başlayaraq vahid temperatur şkalası yaratmaq üçün çoxlu cəhdlər edildi.

UNİVERSAL TEMPERATUR ŞKALASI

Nə qədər ki, temperaturu istilik miqdarı ilə əlaqələndirirdilər, onun fiziki mənasına dair sual yaranmırdı. Artıq başa düşəndə ki, istilik və temperatur heç də eyni şey deyildir, onda temperaturun fiziki mənası, sanki buxarlandı. Doğrudan da belə deməyə başladılar ki, temperatur qızma dərəcəsindən başqa bir şey deyil. Qızma dərəcəsi nədir? Əvvəllər bu sözü deyəndə istilik miqdarını başa düşürdülər: istilik çox olduqca, temperatur da yüksək olur. Ancaq eyni bir temperaturda stəkan-

KOSMOSUN TEMPERATURU VARMI?

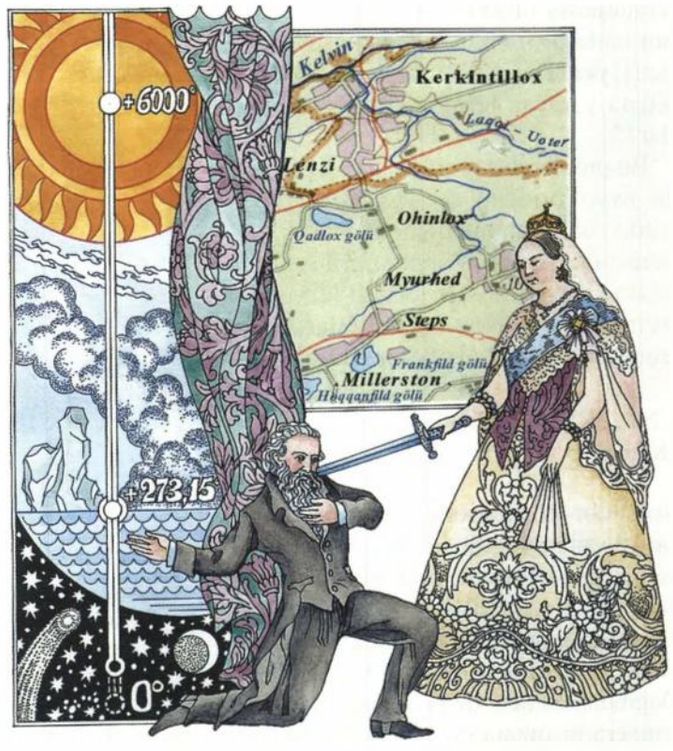
Kainatın bütün müşahidə oluna bilən həcmi *relikt şüalanma* ilə – tarazlıqda olan kosmik fotonların ideal qazı ilə, həmçinin neytrino qazı ilə doldurulmuşdur. Bu şüalanmanı 2,7 K temperaturunda olan mütləq qara cismin şüalanması kimi təsvir etmək olar; bu temperaturu kosmosun temperaturu olaraq götürürlər. Foton qazının ideallığı fotonlar arasında qarşılıqlı təsirin olmaması ilə izah olunur.

Kainatın təkamülünün ilk mərhələsində yaranan relikt şüalanmanın tarazlığı ətraf maddə ilə intensiv qarşılıqlı təsir prosesləri sayəsində təmin olunmuşdur. "Qaynar Kainat" şəraitində udulma və buraxılma proseslərinin rolunu zərrəcik və antizərrəcik cütlərinin doğulması və annihilyasiyası prosesləri oynamışdı.

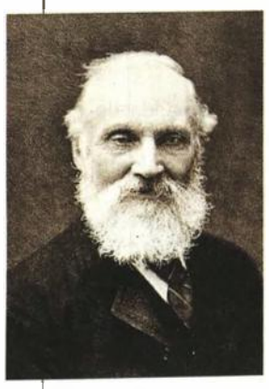
Kainat genişləndikcə, yəni onun R radiusu artdıqca, relikt fotonların dalğa uzunluqları artırdı ($\lambda \sim R$); v tezliyi və $\varepsilon = h\nu$ enerjisi azalırdı ($\varepsilon \sim \nu \sim 1/R$). Vin qanununa görə, şüalanmanın T temperaturu da azalırdı ($T \sim 1/R$). Kainatın temperaturu $5 \cdot 10^9$ K-ə (bu, fotonların 0,5 MeV enerjisinə uyğundur) qədər azalanda, şüalanmanın maddə ilə qarşılıqlı təsir prosesləri praktiki olaraq kəsildi, çünki belə enerji artıq hətta ən yüngül zərrəciklərin – elektron-pozitron cütünün doğulması üçün kifayət etmir.

Bu andan sonra relikt şüalanma termodinamika baxımından, demək olar ki, izoləolunmuş obyektə çevrilmişdir: axı Kainatda nə divarlar var, nə də kifayət qədər maddə miqdarı (ossilyatorlar) ki, fotonlara özlərinin temperaturunu ətraf mühitin (termostatın) temperaturu ilə bərabərləşdirməyə "kömək etsin". Əksinə, aslında, relikt şüalanmanın özü termostata çevrilmişdir. Bu termostata Kainatdakı dönməyən proseslərdən gələn şüalanmalar şəklində istilik tullantıları atılır.

Kainatın təkamülü prosesində relikt şüalanma adiabatik baş verən genişlənməyə və soyumağa məruz qalır. Doğrudan da $T \sim 1/R$, $V \sim R^3$ olduğundan, onda $T^3V = S = \text{const}$, burada S – istilik şüalanmasının entropiyasıdır.



dakı suda və nəhəng qazanda müxtəlif istilik miqdarları var axı. Bəs istilik daha hansı xassələrə malikdir? Onun müxtəlif hallarda olmaq qabiliyyətini yalnız Karno anlamışdı və bunu istiliyin müxtəlif temperaturlarda müxtəlif keyfiyyəti adlandırdı. Sonralar Klauzius, artıq kinetik təsəvvürlərə əsaslanaraq, istiliyin keyfiyyətini zərrəciklərin hərəkətinin nizamlılıq dərəcəsilə əlaqələndirdi: bax bu keyfiyyəti müəyyən mənada temperatur hesab etmək olardı.



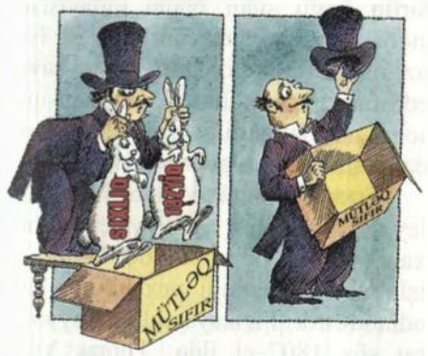
Uilyam Tomson (lord Kelvin).

Məhz istiliyin müxtəlif temperaturlarda müxtəlif keyfiyyətliliyi ideal istilik mühərrikinin faydalı iş əmsalının onun iş xarakterindən və onda istifadə olunan işçi cismin xassələrindən, Karno tərəfindən kəşf olunduğu kimi, asılı olmamasının əsasında durur ("Karno tsikli" məqaləsinə bax). Belə fundamental nəticənin olması Uilyam Tomsona sübut etməyə imkan verdi ki, universal və ya mütləq temperaturlar şkalası – *termodinamik* temperaturlar şkalası daxil etmək olar.

O belə mühakimə etmişdir. Karno tsiklində sərf olunan istilik, alınan iş və temperatur, istənilən dönən maşınlar üçün, eyni bir universal funksiya ilə bağlıdır. İstiliyi və temperaturu birbirindən asılı olmadan ölçürlər. Deməli, temperaturu istiliklə və işlə universal tərzdə ifadə etmək olar.

İndi belə deyərdilər ki, temperaturu enerji vahidlərində ölçürlər, çünki istilik və iş enerjinin müxtəlif formalarıdır. Lakin onda Tomson özünün temperatur şkalasını daxil etdi (1848-ci il), o yenə hesab edirdi ki, istilik termogendir və öz şkalasında dərəcəni aşağıdakı kimi təyin etdi: "...bütün dərəcələr eyni bir qiymətə malikdir; yəni bu şkala üzrə istilik vahidi T temperaturundakı A cismindən $(T-1)$ temperaturundakı B cisminə "düşərkən" T-nin qiyməti nə olur olsun, eyni bir mexaniki iş görür. Məhz bu şkalanı mütləq və universal hesab etmək olar, çünki o hansı maddə olur olsun, həmin maddənin fiziki xassələrindən qətiyyən asılı deyil". Başqa sözlə, Kelvin universal termometr olaraq Karno tsiklindən istifadə etməyi təklif etdi.

Əlbəttə, bu o demək deyildi ki, indi temperaturu istilik maşını ilə ölçmək lazım gələcəkdir. Sadəcə olaraq, temperaturun termometrin konkret quruluşu ilə heç cür əlaqəsi olmayan həqiqi təbiəti özünü belə büruzə verdi. Lakin burada da temperaturun təyini ixtiyari idi: 1) iddia edilirdi ki, bütün dərəcələr öz aralarında bərabərdir, dərəcənin öz ölçüsü isə müəyyən olunmurdu; 2) temperaturun hesablama nöqtəsinin sərbəst seçilməsinə yol verilirdi. Ona görə də yeni şkalanı elə qurmaq istərdik ki, o, hər hansı bir köhnə, məsələn, qaz şkalasına bənzə-



sin. Bir neçə variantı seçən Tomson sonda temperaturların nisbətini Karno tsiklindəki istilik miqdarlarının nisbətilə təyin etdi:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}, \qquad (1)$$

burada T_1 və T_2 – uyğun olaraq qızdırıcının və soyuducunun temperaturlarıdır, Q_1 – qızdırıcıdan alınan istilik, Q_2 – soyuducuya verilən istilikdir.

Hesablama nöqtəsi kimi, Uilyam Tomson buzun ərimə nöqtəsilə normal atmosfer təzyiqində suyun qaynama nöqtəsinin temperaturlar fərqini qəbul etdi və onu 100° götürdü. Nəticədə, miqyasına görə, t°C qaz şkalası ilə üst-üstə düşən, lakin mütləq sıfırın qiyməti sürüşmüş olan TK termodinamik şkala alındı:

$$T\text{K} = t°\text{C} + 273{,}15.$$

Bu şkala onu yaradan Uilyam Tomsonun (lord Kelvinin) şərəfinə *mütləq Kelvin şkalası* adlanır. Temperaturun mütləq sıfırı və ya Kelvin şkalasında sıfır Selsi şkalasında –273,15°-yə bərabərdir. İndi hesablama nöqtəsi olaraq *suyun üçlük nöqtəsi* adlanan nöqtəni T=273,16 K (və ya t=0,01°C), yəni suyun üç fazasının: buzun, suyun və buxarın tarazlıqda olduğu temperaturu seçirlər, çünki bu temperatur laboratoriya şəraitində asanlıqla əldə edilir. Termodinamikanın əsil mahiyyətini ifadə edən (1) münasibəti asanlıqla başa düşməyə imkan verir ki, temperaturun mütləq sıfırına çatmaq qeyri-mümkündür: bunun üçün sonsuz böyük iş görmək lazım gələrdi. Doğrudan da, hər Karno tsiklində bir cisimdən istiliyi alaraq və onu başqa cismə verərək, temperaturu müəyyən qiymət qədər yox, yalnız müəyyən dəfə azaldırlar. Ona görə də sıfıra yalnız sonsuz sayda addımdan sonra və hər addımda sonlu iş görərək, gedib çatmaq olar.

(1) münasibəti universal Karno funksiyasının başqa cür yazılmış ifadəsidir. Bu ifadəni

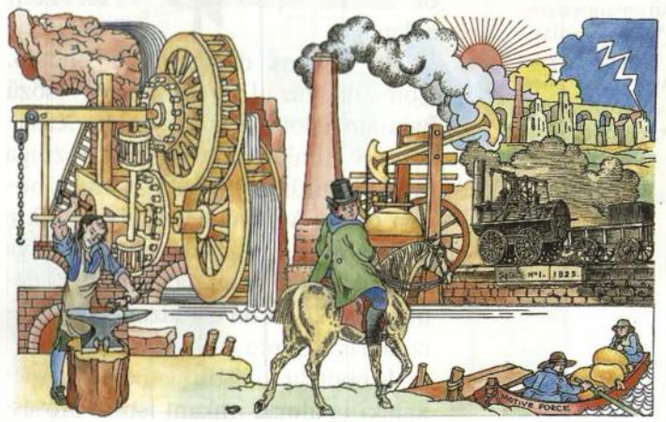
$$S = \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

aşkar şəkildə 1850-ci ildə Klauzius almağa nail olmuşdur.

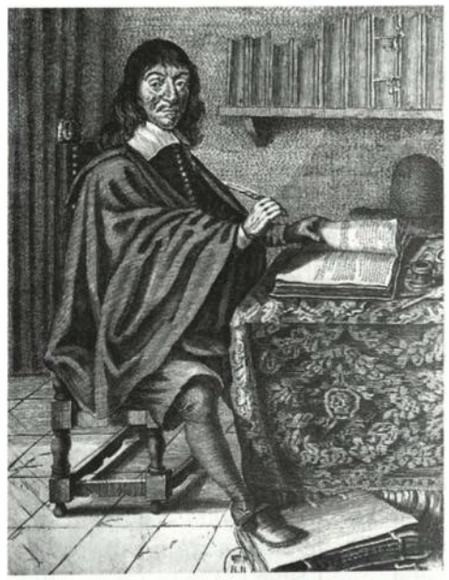
Yalnız 1851-ci ildə, Uilyam Tomsonun "İstiliyin dinamik nəzəriyyəsinə dair" işində ilk dəfə cisimdə olan mexaniki enerjinin ümumi mənada, indi tətbiq olunan mənada, tərifinə rast gəlinir.

ENERJİ

Bu gün "enerji" anlayışı "su" və ya "hava" kimi adidir və əvəzolunmazdır. Enerji hər yerdə lazımdır. Enerji qurtararsa, həyat qurtarar. İnsanlar bu sözdən istifadə edirlər və onu tam aydın hesab edirlər. Adama elə gəlir ki, guya eyni bir şey haqqında danışırlar, ancaq dərindən fikirləşsək aydın olar ki, "enerji" anlayışı olduqca fərqli şeyləri birləşdirir: yanacaq, işıq, ərzaq və hətta qəraın qəbul edilməsi enerjisi. Başqa sözlə, insan fəaliyyətinin əsasında duran hər şeyi birləşdirir.



Aristotelin əsərlərini tapdalayan Dekart.





Qotfrid Vilhelm Leybnis.

Əslində "qüvvə" anlayışı ancaq mexanikada tətbiq edilə bilər. İstilik və elektrik hadisələrini təsvir etmək üçün bu anlayış çox dardır, buna baxmayaraq, təfəkkürün ətaləti sayəsində ora da nüfuz etmişdir: elektrik hərəkət qüvvəsi heç ölçüsünə görə də mexaniki qüvvə ilə üst-üstə düşmür. Termodinamikada və elektromaqnetizmdə "qüvvə" anlayışını daha universal anlayış olan "enerji" anlayışı sıxışdırıb çıxarmışdır.

ANLAYIŞLARI DƏQİQ TƏYİN ETMƏK VƏ TERMİNLƏRDƏN DÜZGÜN İSTİFADƏ ETMƏK NECƏ DƏ VACİBDİR

Qədim yunanlarda "energeyya" sözü "fəaliyyət" bildirirdi. Müasir fizikada isə onun mənası başqadır: həqiqi mənada fəaliyyət yox, yalnız onu həyata keçirmək qabiliyyətidir; yəni iş görmək qabiliyyətidir. Deyə bilərik ki, materiyanın müxtəlif hərəkət formalarının (mexaniki, istilik, kimyəvi və s.) bir ümumi ölçüsü var ki, bu da enerji adlanır.

Bu anlayış dəqiq təyin olunub. Cəmi iki yüz il əvvəl "enerji" sözü hamının işlətdiyi söz deyildi. Xüsusən də alimlər öz aralarında razılığa gələ bilmirdilər ki, söhbət məhz nədən gedir. Anlayış haqqında bir fikrə gəlməyə, onun işıq üzü görməsinə və vətəndaşlıq hüququ qazanmasına, demək olar ki, yarım əsr lazım gəldi. Burada başlıca rolu istilik oynadı.

İş ondadır ki, istiliyin hesabına mexaniki iş almaq imkanı istilik prosesləri ilə bağlı olan bütün anlayışlara ciddi yanaşmağa məcbur etdi. Bu isə, öz növbəsində, onların dəqiq təyin edilməsinə və gələcək istifadəsinə, sonra isə tamamilə yeni anlayışların daxil edilməsinə gətirib çıxardı.

"Enerji" terminini Aristotel də, Qaliley də və məşhur riyaziyyatçı və mexanik İohann Bernulli (1667–1748) də işlətmişdir; Bernulli mexaniki işi belə adlandırırdı. Fizikaya aid ədəbiyyatda bu söz 1807-ci ildə, Tomas Yunq onunla hərəkət edən cismin "canlı qüvvəsini" (bu gün kinetik enerji adlanır) işarə edərkən, meydana çıxdı. Lakin daha qırx il həmin məqsəd üçün adi "hərəkətverici qüvvə" termini işlədildi.

Əgər "hərəkətverici qüvvənin saxlanması" sözləri altında müxtəlif alimlər təbiətin müxtəlif qanunlarını nəzərdə tutarkən mexanikada dolaşıqlıq yaranmasaydı, ola bilsin ki, terminoloji inqilab xeyli əvvəl baş verə bilərdi. Leybnis hesab edirdi ki, "canlı qüvvə" – kütlə ilə sürətin kvadratının hasili mv^2 saxlanır və məhz onu 1695-ci ildə "canlı qüvvə" adlandırdı. Dekart isə düşünürdü ki, qüvvənin həqiqi ölçüsü, kütlə ilə sürətin hasili mv, yəni hərəkət miqdarıdır. (İndi hər kəs bilir ki, həm enerji, həm də hərəkət miqdarı saxlanır və həm də bunlar tamamilə fərqli saxlanma qanunlarıdır.) Hamının razılaşdığı yeganə şey – daimi mühərrik yaratmağın mümkünsüzlüyü idi. Axı, bir tərəfdən, hərəkətverici qüvvə özbaşına heçdən yaranmır, digər tərəfdən isə heçə çevrilərək, sadəcə, yox ola bilər. Mexanikada beləcə də deyirdilər: sürtünmə "canlı qüvvəni", əvəzində heç nə vermədən məhv edir.

Bununla bərabər, qüvvə anlayışının müxtəlif şərhləri: Nyuton tərəfindən daxil edilən qüvvə ili Leybnisin hərəkətverici qüvvəsi arasındakı fərq böyük anlaşılmazlıq doğururdu. Hazırda məhz birincini qüvvə, ikincini isə enerji (kinetik enerji) adlandırırlar.

Əgər iki maddə birləşirsə, onda əmələ gələn istilik miqdarı sabitdir və bu birləşmənin bilavasitəmi, yoxsa kimyəvi reaksiyalar zənciri nəticəsindəmi baş verməsindən asılı deyil. Məsələn, natrium hidroksiddən və kükürd turşusundan natrium sulfatı iki üsulla almaq olar:

1) bilavasitə: $2NaOH + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + 2H_2O + 131{,}4$ kC;

2) natrium hidro sulfatın əmələ gəldiyi aralıq mərhələ vasitəsilə:

a) $NaOH + H_2SO_4 = NaHSO_4 + N_2O + 61{,}7$ kC,

b) $NaHSO_4 + NaOH = Na_2SO_4 + N_2O + 69{,}7$ kC.

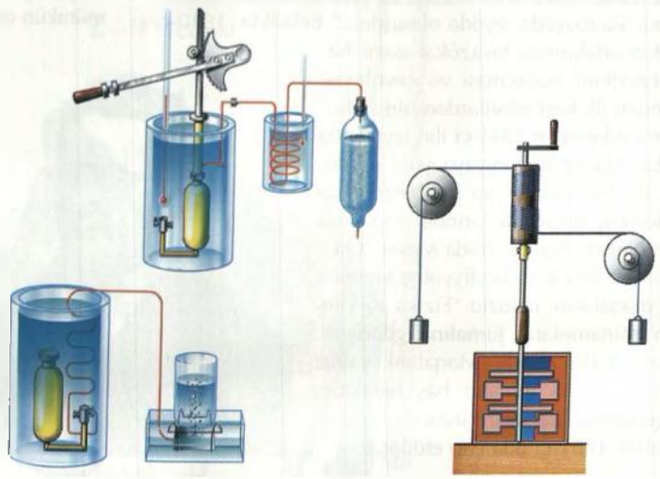
Enerjinin saxlanması qanununu nümayiş etdirən bu reaksiyaları 1840-cı ildə rus kimyaçısı German İvanoviç Gess öyrənmişdir.

Hələ enerji anlayışı elmə daxil edilməzdən əvvəl, onun ayrı-ayrı xassələri təcrübi yolla aşkar olunmuşdu, bəziləri isə ağlabatan mühakimələrdən alınırdı. İlk və başlıca müşahidəni – qapalı sistemdə enerjinin saxlanmasını – özünəməxsus prinsip şəklində ifadə etdilər: daimi mühərrik qurmaq mümkün deyil. Müxtəlif konkret hallarda bu fikrin nə demək olduğunu aydınlaşdırmaq hələ qarşıda dururdu. Məsələn, mexanikada o, canlı qüvvənin saxlanması qanununa gətirilir. Lakin Karnoya qədər heç kəsin ağlına gəlməmişdi ki, istilik proseslərini nəzərə aldıqda, onun mənasının necə dəyişdiyinə baxsın.

Digər müşahidə kimyaçılara aiddir. Müəyyən olunmuşdu ki, kimyəvi reaksiyalar zəncirində ayrılan istilik miqdarı, əgər baxılan sistemin başlanğıc və son halları üst-üstə düşürsə, ayrı-ayrı reaksiyaların hansı yolla getməsindən asılı deyil. Əvvəlcə bunu termogenin məhvedilməzliyinin nəticəsi kimi şərh etdilər. Yalnız çox illər keçəndən sonra başa düşdülər ki, burada hər hansı hal funksiyasının, yəni qiyməti sistemin halının yalnız parametrlərindən (təzyiqdən, həcmdən, temperaturdan və s.) asılı olan və bu hala keçid üsulu ilə heç cür bağlı olmayan funksiyanın varlığı gizlənmişdir. Onu *daxili enerji* adlandırdılar.

TERMODİNAMİKANIN BİRİNCİ BAŞLANĞICI

Enerjinin saxlanması qanununun kəşfi bir qrup alimlər onluğunun əməyinin nəticəsi deyil. Lakin üç nəfər: alman həkimi Yulius Robert Mayer, ingilis pivəçəkəni və fiziki Ceyms Preskott Coul və geniş profilli alman təbiətşünası German Lüdviq Ferdinand fon Helmholts onun əsas yaradıcıları hesab olunurlar. İlk dəfə Mayer (1842-ci il) qüvvələrin qarşılıqlı çevrilməsi prinsipini söyləmiş və istiliyin mexaniki ekvivalentini hesablamışdır. O, təbiətdə baş verənlərin bütün səbəblərini materiyaya və qüvvəyə ayırdı və hesab etdi ki, hər iki növ səbəb məhvedilməzdir və onların arasında qarşılıqlı keçid yoxdur. Lakin eyni növ səbəblərin daxilində ən müxtəlif yollarla



İstiliyin mexaniki ekvivalentinin təyininə dair C.P.Coul təcrübələri.

YULİUS ROBERT MAYER

1840-cı ilin iyununda Hollandiya yelkən gəmisi "Yava" Rotterdamdan Yava adası sahillərinə gəlib çıxdı. Gəmi həkimi Yulius Robert Mayerin (1814-1878) gündəliyində yazdı: "Bizim dənizdə yüzgünlük səfərimiz müddətində 28 nəfərdən ibarət olan komandamızda heç bir ağır xəstəlik baş verməmişdir. Lakin bir neçə gündən sonra Bataviya (Cakartanın keçmiş adıdır) reydinə çatan kimi, sətəlcəm (ağciyərin iltihabı) epidemiyası başlandı. Mən qan aldığım zaman məlum oldu ki, əlin venasından çıxan qan açıq-qırmızı rəngdədir; bu qanın rənginə görə fikir söyləsək, hətta belə düşünmək olardı ki, bu qan venadan yox, arteriyadan götürülmüşdür".

Hələ Lavuazye müəyyən etmişdi ki, insan orqanizminin daxili istiliyi qanda gedən oksidləşmə proseslərinin hesabına əmələ gəlir. Daxili üzvlərin temperaturu sabitdir. Deməli, istiliyin ayrılması ilə onun itkisi arasında müəyyən mütənasiblik saxlanmalıdır. Cənubdakına və ya isti vaxta nisbətən şimalda və ya ilin soyuq vaxtında qanda yeməkdən alınmış daha çox qida maddələri yanır (yəni oksidləşir). Bunu götür-qoy edən Mayer istiliyin və işin qarşılıqlı dönərliyi ideyasına gəlib çıxdı (əgər orqanizm iş görərkən istilik sərf etməsəydi və "boş" haldakı qədər qanda qidalı maddələri oksidləşdirsəydi, onda o, bir növ daim mühərrik olardı).

Bu fikir Mayeri olduqca maraqlandırdı. Sonralar dostuna yazdığı məktubunda etiraf etmişdi: "Mən işdən elə həvəslə yapışdım ki, dünyanın o uzaq hissəsi məni az maraqlandırdı – başqası buna gülə bilərdi; çox həvəslə gəmidə qaldım, burada mən maneəsiz öz işimə qapıla bildim, burada mən bir neçə saat özümü, sanki, ruhlanmış vəziyyətdə hiss etdim, nə əvvəl, nə sonra, nə qədər yadımdadır, buna bənzər bir şey yaşamamışam. İldırım kimi, bədənimə işləmiş bəzi fikirlər dərhal zorla məni bürüdü və yeni mövzulara yönəltdi – bu, Surabayedə reyddə olmuşdu..." Beləliklə, 1840-cı il iyulun ortalarında təvazökar gəmi həkimi enerjinin saxlanması və çevrilməsi qanununu ilk kəşf edənlərdən biri oldu.

Gəmi səfərindən 1841-ci ilin fevralında qayıdan Mayer Almaniyaya yola düşdü, lakin nə Heylbronn, nə Tyübingen, nə Heydelberq universitetlərində onu başa düşən olmadı. İyunun 16-da Mayer "Qüvvələrin kəmiyyət və keyfiyyətcə təyininə dair" məqaləsini nüfuzlu "Fizika və kimyanın salnamələri" jurnalına göndərdi. Məqalə rədd edildi. Məqaləni yalnız 36 ildən sonra jurnalın baş redaktoru Poqqendorfun kağızları arasında tapdılar və yalnız 1881-ci ildə çap etdilər.

Mayerin "Cansız təbiətin qüvvələrinə aid iradlar" məqaləsini xoşbəxt tale gözləyirdi: bu məqalə 1841-ci ildə tamamlanmış və 1842-ci ildə çap olunmuşdur. Mayer özünün kəşf etdiyi enerjinin saxlanması qanununu "Maddələr mübadiləsilə bağlı olan üzvü hərəkət" məqaləsində ətraflı şərh etmişdir. Bu məqaləni o, 1845-ci il yanvarın 3-də "Kimyanın və farmasiyanın salnamələri" jurnalına göndərdi. "Salnamələrin" redaksiyasına məşhur kimyaçı Yustus Libix başçılıq edirdi. Redaksiya portfelinin qədərindən artıq dolduğunu və məqalənin jurnalın profilinə uyğun gəlmədiyini əsas tutaraq Mayerin işini çapa qəbul etmədilər. Onda Mayer işini Heylbronnda ayrıca kitabça şəklində öz vəsaiti hesabına nəşr etdirdi (1845-ci il), dörd il keçəndən sonra isə bir il əvvəl yazdığı "İstiliyin mexaniki ekvivalentinə dair iradlar" işini yenə orada və yenə öz hesabına çap etdirdi.

Mayerin az tirajlarla buraxılmış işləri uzun müddət elm aləminə naməlum qaldı. Hesab edirdilər ki, enerjinin saxlanması qanununu ilk kəşf edənlər C.Coul və G.Helmholtsdur. Özünün birincilik hüququnu müdafiə etmək cəhdləri anlaşılmazlıq səddilə, qabaqcadan hasil olmuş yanlış fikrə əsaslanan rəylərlə və yersiz kəskin tənqidlərlə rastlaşdı. Mayer ruh düşkünlüyünə qapıldı və sonrakı elmi axtarışlar onun üçün mümkünsüz görünürdü.

Ədalət yalnız 1860-cı illərdə bərpa olundu. Dinməzlik divarını ingilis fiziki və elmin populyarizatoru Con Tindal (1820-1893) yardı. Rudolf Klauzius, Mayerin işlərini Tindala göndərməzdən əvvəl, onları ilk dəfə oxuyub etiraf etməyə məcbur oldu: "...bu kitab çalarda (onun ilk çap olunmuş məqaləsindən fərqli olaraq) Mayer nəinki özünün mexaniki təsəvvürlərindəki əvvəlki nöqsanlarını düzəltmiş ... hətta öz baxışlarının aydın və dəqiq şərhi ilə yanaşı, heyrətləməyə layiq, ideyalar zənginliyi büruzə vermişdir, baxmayaraq ki, orada şərh olunanla heç də tam razılaşmaq mümkün deyildi".



Mayerin fəaliyyətinə German Helmholts yüksək qiymət vermişdi:

"...Coulun Mayerdən xeyli çox iş gördüyünü və Mayerin ilk işlərində bir çox təfərrüatların aydın olmadığını heç kəs durub inkar etməsə də, mən hər halda hesab edirəm ki, Mayerə təbiət elmlərinin müasir çox böyük tərəqqisinə səbəb olmuş bu fikrə asılı olmadan və müstəqil olaraq gəlib çıxmış insan kimi baxmaq lazımdır. Onunla eyni vaxtda, başqa bir alim, başqa bir ölkədə və başqa bir sahədə həmin kəşfi etdiyinə görə və sonralar bunu ondan daha yaxşı inkişaf etdirdiyinə görə, onun xidmətləri azalmır".

çevrilmələr baş verə bilər. Belə çıxırdı ki, qüvvə (Leybnisə görə qüvvə – indi bu qüvvə enerji adlanır) birdir, onun formaları isə ən azı üçdür: istilik, düşmə qüvvəsi və hərəkət. Onların hamısı bir-birinə çevrilməyə qadirdir və ona görə də ümumi bir ölçü ilə ölçülə bilər. Düşmə qüvvəsi və hərəkət, mexaniki kəmiyyətlər kimi, artıq ümumi bir ölçüyə malik idi və yalnız bu ölçünü istiliyin ölçüsü ilə müqayisə etmək qalırdı. Mayer havanın sıxılmasına dair təcrübələrdən müəyyən etdi ki, "bir kalori (böyük kalori) ağırlıq qüvvəsi təcilinin orta qiymətlərində 1 kq yükün 365 m hündürlüyə qaldırılmasına ekvivalentdir" və beləliklə, ilk dəfə istiliyin mexaniki ekvivalentini təyin etmiş oldu. Lakin Mayerin bütün mühakimələri empirik mühakimələr kimi yox, fəlsəfi ümumiləşmələr kimi göründüyündən, tədqiqatçılardan heç kim onlara diqqət yetirməmişdi.

Əksinə, Coul müstəsna olaraq, təcrübəyə və təbiətin əsas qüvvələri məhv edilməzdir və qüvvənin sərf olunduğu hər yerdə ona uyğun istilik miqdarı yaranır kimi ümumi ideyaya söykəndi. O, suyu basıb dar borulardan keçirdi, düşən yüklərin fırlatdığı pərləri bu suyun köməyilə qızdırdı və bir çox digər incə təcrübələr apardı. Məsələn, həmin düşən yüklərin köməyilə içərisində su olan vannada yerləşdirilmiş induksiya spiralını iki güclü maqnit arasında şaquli ox ətrafında fırlanmağa məcbur etdi və induksiya cərəyanının spiralda ayırdığı istiliklə düşən yüklərin gördüyü mexaniki işi müqayisə etdi. Qalvanik cərəyanın termik və kimyəvi təsirləri arasındakı əlaqəni tədqiq etdi və sübut etdi ki, kimyəvi istilik elektrik mənşəyinə malikdir, sonra isə yuxarıda göstərilən üsulla bu istiliyi mexaniki işlə əlaqələndirdi.

Coul bütün təcrübələrində istiliyin təxminən eyni bir mexaniki ekvivalentini alırdı: "...ixtiyari miqdarda suyun 1°F (Farengeytə görə dərəcə) qızdırılması bu suyun 838 mislini 1 ingilis futu qədər qaldırmağa və ya birqat su miqdarını 838 fut qaldırmağa uyğundur". Başqa sözlə, 1 kkal istilik 1 kq yükü 460 m hündürlüyə qaldırmağa uyğundur.

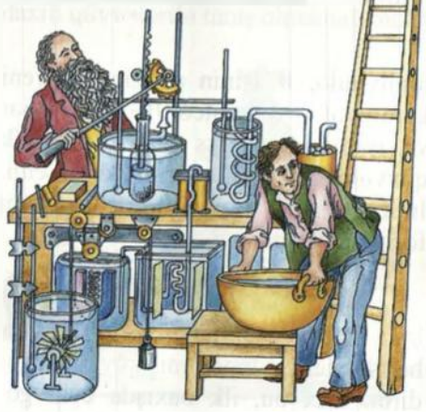
İstiliyin və işin Coula görə ekvivalentliyi prinsipi (1843-cü il) hamı tərəfindən qəbul edildi. Lakin onu da qüvvənin saxlanması prinsipi kimi (Leybnisə görə) başa düşdülər.

German Helmholts (1847-ci il) ilk dəfə olaraq ekvivalentlik prinsipinə "canlı qüvvənin mexaniki saxlanması qanununun bilavasitə ümumiləşməsi" kimi baxdı. O, öz qarşısına fundamental bir məsələ: təbiətin bütün hadisələrini ayrı-ayrı maddi nöqtələrin hərəkətinə gətirmək məsələsini qoydu; bu maddi nöqtələr bir-birinə aralarındakı məsafələrdən müəyyən qaydada asılı olan cazibə və ya itələmə qüvvələrilə (Nyutona görə) təsir edir.

Üstəlik o, bunu riyazi ifadə etməyə müvəffəq oldu. L canlı qüvvə və təsir edən qüvvələrin gördüyü W işi üçün

$$L - W = \text{const}$$





Kalori (kiçik kalori) – bu, 1 q saf suyu 1°C qızdırmaq üçün, böyük kalori və ya kilokalori isə 1 kq suyu həmin qədər qızdırmaq üçün lazım olan istilik miqdarıdır.

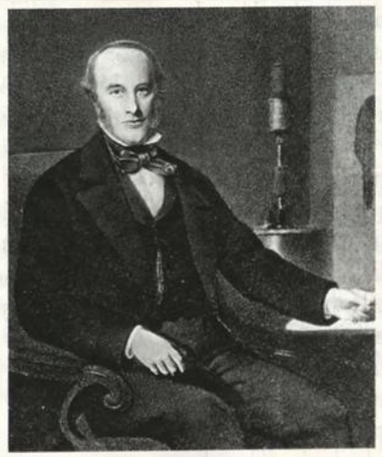
CEYMS PRESKOTT COUL

Enerjinin saxlanması qanununu eksperimental olaraq etibarlı surətdə əsaslandırmağı bacarmış insanlardan biri Ceyms Preskott Coul (1818-1889) olmuşdur.

Sanfordlu varlı piväçəkənin oğlu C.P.Coul yaxşı ev təhsili almışdı. Riyaziyyatın, kimya və fizikanın əsaslarını Con Dalton (1766-1844) ona öyrətmişdi.

1841-ci ildə Coul "Metal elektrik naqillərində və elektroliz zamanı batareya elementlərində ayrılan istiliyə dair" adlı məqalə çap etdirdi. O aşkar etdi ki, həmişə qalvanik elementdən gələn cərəyan naqildən axan zaman istilik miqdarı ayrılır və bu hadisəni elementdə gedən kimyəvi reaksiyalarla izah etməyə çalışdı. Lakin belə bir məsələ, istilik naqil ilə ötürülür, yoxsa elektrik cərəyanı keçəndə naqilin özündə ayrılır məsələsi əvvəlki kimi həll olunmamış qaldı; tədqiqatın məntiqi Coulu induksiya cərəyanları ilə eksperimentlərə gətirib çıxardı. Coul altı seriya təcrübələr apararaq, 1841-ci ildə sübut etdi ki, naqildə ayrılan istilik cərəyan şiddətinin kvadratı və naqilin müqaviməti ilə mütənasibdir. Coul öz nəticələrini "Maqnitoelektrik effektlərinin kalorifiliyinə və istiliyin mexaniki qiymətinə dair" adlı işində şərh etdi (1843-cü il).

Bundan başqa, Coul istiliyin mexaniki ekvivalentinin qiymətini verdi: 460 qkq·m/kkal (qkq – qüvvə kiloqramı). Coulun təcrübələri (ilk təcrübələr hələ mükəmməl deyildi) haqqında G.Helmholts böyük təriflə rəy söyləmişdi: "... həmin tədqiqatçının işə aid dərin biliklərlə və dəmir qətiyyətlə apardığı sonrakı təcrübələri çox böyük heyrətə layiqdir; bu təcrübələr 425 verdi". (İstiliyin mexaniki ekvivalentinin müasir qiyməti 426,9 qkq·m/kkal olardı, lakin BS sisteminin daxil edilməsilə bu anlayışa ehtiyac qalmadı, çünki həm iş, həm də istilik miqdarı eyni bir vahidlərlə – coullarla ölçülür. 1C=0,239 kal=0,102 qkq·m.)



1845-ci ildə "Havanın seyrəldilməsinin və sıxlaşdırılmasının doğurduğu temperatur dəyişmələri haqqında" adlı işində Coul, indi onun adını daşıyan bir qanun ifadə etdi. Coul qanunu iddia edir ki, verilmiş kütləli ideal qazın daxili enerjisi onun yalnız temperaturundan asılıdır, həcmindən isə asılı deyil.

Coulun yanaşması Mayerin yanaşmasından prinsipial fərqlənirdi. Elm tarixçisi F.Rozenberqin sözlərinə görə "Coul Mayerin birbaşa əksidir. Axırıncı, hər şeydən əvvəl qanunun prinsipial imkanları məsələsinə diqqət yetirdiyi və onun bütün təbiət hadisələrinə tətbiqedilənliyini deduktiv olaraq əsaslandırdığı, mövcud müşahidə materialının imkan verdiyi empirik qaydalardan yalnız illüstrasiya üçün istifadə etdiyi halda, Coul bu qanunu təbiətdə ən geniş yayılmış iki qüvvə üçün – istilik və mexaniki iş üçün ən dəqiq, ən mükəmməl təcrübi ölçmələr yolu ilə sübut etməyə çalışır və özünün burada tapdığı qanunu digər təbiət hadisələrinə yalnız ötəri, öz-özünə aydın olan bir şey kimi şamil edir".

1852-1854-cü illərdə Coul və Tomson (gələcək lord Kelvin) birlikdə *Coul-Tomson effekti* adlanan effekti – qazı drosselləşdirən zaman, yəni qaz təzyiq altında məsaməli arakəsmənin içindən keçərkən, qazın temperaturunun dəyişməsini aşkar etdilər.

Coulun həyati məsələsi enerjinin saxlanması qanununun eksperimental əsaslandırılması olsa da, fizikanın başqa sahələrində də alimin nailiyyətləri böyükdür: o maqnit doyma (1840-cı il), maqnitostriksiya (1842-ci il) hadisələrini kəşf etmiş, qaz molekullarının sürətini hesablamış və onun temperaturdan asılılığını aşkar etmişdir, təzyiqi isə qaz zərrəciklərinin qabın divarlarına vurduğu zərbələrin nəticəsi kimi izah etmişdir (1848-ci il).

Müasir elmdə *L* canlı qüvvəyə kinetik enerji, *G* "gərginlik qüvvələri miqdarına" isə potensial enerji uyğundur.

tənliyində, *W* işinin əvəzinə o, yeni kəmiyyət – qiymətcə *W*-yə bərabər və işarəcə ona əks olan "gərginlik qüvvələrinin *G* miqdarını" daxil etdi. İndi saxlanma prinsipi aşağıdakı kimi formulə edildi:

$$L+G=\text{const},$$

burada, solda duran hər şeyi Helmholts sistemdə toplanmış qüvvə adlandırdı. Bax bu, ilk baxışda cüzi görünən, lakin anlayışlar sahəsində çox böyük sıçrayışa səbəb olmuş çevirməyə misaldır. (Hazırda bu çox adi səslənir: qapalı sistemdə kinetik və potensial enerjilərin cəmi dəyişmir.)

Beləliklə, Helmholts mexanika prizmasından baxaraq, bütün qüvvələri iki anlayışda – "canlı qüvvə" və "gərginlik qüvvəsi" anlayışlarında birləşdirdi. Ona görə də əgər sistemə xas olan bütün canlı qüvvələri və gərgin-



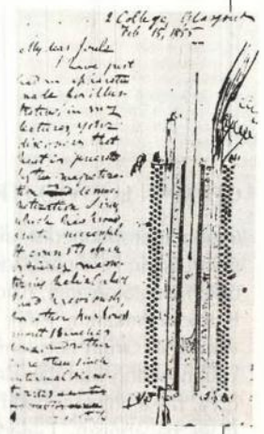
lik qüvvələrini tapsaq, onda onların cəmi dəyişməz olacaqdır; onlar eyni bir ölçü ilə ölçülməlidir. Deməli, gərginlik qüvvələrinin ölçülərini canlı qüvvələrin ölçüsünə gətirmək, yəni onun mexaniki ekvivalentini axtarıb tapmaq lazımdır. Mexanikada canlı qüvvə saxlanır. Deməli, əgər birdən o itərsə, onda hansı isə başqa bir qüvvə (istilik, işıq, kimyəvi təsir) yaranır və molekulyar quruluşun dəyişməsi, elektrik və termik təsirlərin sayəsində daxili gərginlik qüvvələrinin artması baş verir.

Kimyəvi və elektrik hadisələrilə müşayiət olunmayan bütün hallarda, itirilmiş mexaniki qüvvənin əvəzində, sərf olunan işə ekvivalent olan istilik miqdarı yaranmalıdır. "Cisimdə olan istilik miqdarına istilik hərəkətinin canlı qüvvəsi (sərbəst istilik) ilə atomlardakı gərginlik qüvvəsinin cəmi kimi baxmaq olar; atomların vəziyyəti dəyişdikdə bu gərginlik qüvvəsi istilik hərəkəti (gizli istilik, daxili iş) doğura bilər".

Helmholtsun aldığı nəticələr fiziklər tərəfindən heç də dərhal başa düşülmədi, çünki bu nəticələr bütün fiziki baxışlara yenidən köklü nəzər salmağı tələb edirdi. Bu məsələyə demək olar ki, eyni zamanda və bir-birindən asılı olmadan Rudolf Klauzius və Uilyam Tomson nöqtə qoydular: XIX əsrin ortalarında onlardan hər biri (Klauzius – 1850-ci ildə, Tomson isə 1852-ci ildə) özlərinin istiliyin mexaniki variantını təklif etdilər. Karnonun əsərini qiymətləndirərək və diqqətlə öyrənərək, alimlər nəzəriyyənin əsas postulatlarını başqa cür ifadə etdilər. Birinci prinsipi – termogenin saxlanmasını – onlar enerjinin saxlanması prinsipilə əvəz etdilər.

İkinci prinsipi – verilmiş sistemdə və ya ətraf fəzada digər dəyişikliklər etmədən istiliyi onun mənbəyindən götürməyin və işə çevirməyin mümkünsüzlüyünü – müxtəlif, lakin ekvivalent formalarda təqdim etdilər.

Klauziusun səyləri sayəsində istiliklə işin ekvivalentliyi haqqındakı əsas müddəalar, nəhayət, fizikanın arsenalına daxil oldu. Klauzius nümayiş etdirdi ki, "cismin verilmiş halında tam istiliyi" anlayışı qəbuledilməzdir, çünki bir haldan başqa hala keçmək üçün cisim kənardan istilik almalıdır; bu istiliyin miqdarı cismin özünün gördüyü xarici işdən çox asılıdır. İş bir haldan digərinə keçid üsulu ilə təyin olunur. Deməli, nə istilik, nə iş halın funksiyaları deyil. Lakin Helmholtsun "tam istilik" adlandırdığı – canlı qüvvə ilə gərginlik qüvvəsinin cəmi ani haldan asılıdır, çünki məhz bu cəm cisimdə olan qüvvələr ehtiyatını təşkil edir. Klauzius göstərdi ki, "cisimlərin daxili qüvvələrilə tanış olmamağımızın



U.Tomsonun C.Coula ünvanladığı məktubdan bir səhifə. 15 fevral 1855-ci il.





Uilyam Con Makuorn Rankin.

nəticəsində bizə adətən, bu iki kəmiyyətin (cisimdə toplanmış H istiliyinin və daxili J işinin) ayrı-ayrılıqda qiymətləri yox, yalnız onların cəmi məlumdur". Məhz bu cəmi $U=N+J$ *daxili enerji* adlandırmağa başladılar. "Daxili enerji" adını şotlandiyalı mühəndis və fizik Uilyam Con Makuorn Rankin (1820-1872) təklif etmişdir.

Digər tərəfdən, U daxili enerji cismin aldığı Q istilik miqdarı ilə onun özünün gördüyü W işinin fərqilə:

$$U=Q-W$$

və ya alınan Q istilik miqdarı ilə cisim üzərində görülmüş W' işinin cəmi ilə təyin olunur:

$$U=Q+W'.$$

Məhz bu *enerjinin saxlanması qanunu* və ya termodinamikanın Birinci başlanğıcıdır.

1905-ci ildən sonra enerjinin saxlanması və çevrilməsi qanununun şərhi xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin meydana çıxması ilə əlaqədar, dəyişikliyə uğradı. Bu nəzəriyyə çərçivəsində materiyanı və enerjini bir-birindən asılı olmayan hesab etmək olmaz (Eynşteynin $E=mc^2$ düsturuna uyğun olaraq). Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsində impulsun və enerjinin saxlanması qanunları ayrılıqda ödənmir, zira onlar dördölçülü enerji-impuls vektorunun

GERMAN LÜDVİQ FERDİNAND FON HELMHOLTS

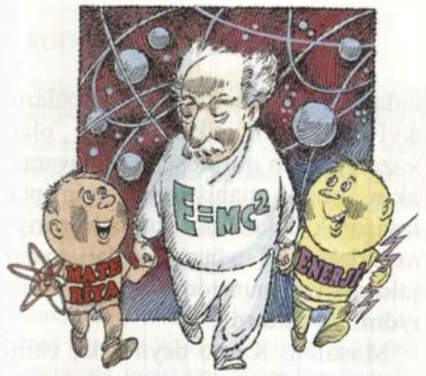
Sonuncu ensiklopedist, alim-universallardan biri olan German Lüdviq Ferdinand fon Helmholts (1821-1894) praktiki tibbin, anatomiyanın, fiziologiyanın, optikanın, akustikanın, hidrodinamikanın, istilik fizikasının inkişafına böyük pay vermişdir. Onun Potsdam gimnaziyasında alman və qədim yunan ədəbiyyatından dərs deyən atası uşaqlarında musiqiyə, rəssamlığa və bədii ədəbiyyata qarşı məhəbbət oyatmağı bacarmışdı. Gələcək təbiətşünas məktəb illərində fəza obrazlarını dərk etməyə qarşı müstəsna qabiliyyətilə və pərakəndə, daxili əlaqələrdən məhrum faktlara qarşı isə zəif yaddaşı ilə müəllimləri valeh edirdi. Gimnaziyanın yuxarı siniflərində Helmholts əsas diqqətini dillərə və poeziyaya ayırırdı. Sonralar alim xatırlayırdı: "Mən böyük sənətkarların şeirlərini çox asanlıqla yaddaşımda saxlayırdım, ikinci dərəcəli sənətkarların bəzi süni şeirlərini isə elə də yaxşı yox. Mən fikirləşirəm ki, bu, yaxşı şeirlərdə fikrin təbii axınından asılı idi və bunda estetik gözəlliyin mühüm kökünü görməyə meyilliyəm... İnsana nə asan başa gəlirsə, onunla da daha həvəslə məşğul olur; ona görə də başlanğıcda mən poeziyanın bu cür böyük pərəstişkarı idim". Lakin artıq gimnaziyanı qurtararkən, Helmholtsda elmi-təbii maraqlar formalaşmışdı.

1838-ci ildə o, Berlində Fridrix Vilhelm Hərbi-Tibb İnstitutuna daxil oldu. Təhsil haqqı alınmırdı, ancaq məzunlar zabit rütbəsi alırdılar və orduda tam bir müddət – 25 il xidmət etməyə borclu idilər. Helmholtsda tədqiqatçı-alim istedadı xidmətin ilk illərindəcə elə parlaqlıqla özünü büruzə verdi ki, ona – nadir hal idi! – istisna edildi: ordudan vaxtından əvvəl azad olmaq hüququ verdilər.

Hələ institutda oxuyarkən 1841-ci ilin qışında Helmholts Berlin universitetinin professoru İohann Müllerin rəhbərliyi altında onurğasızların əsəb sisteminin öyrənilməsinə başladı və anatomik kəşf etmiş oldu: müəyyən etdi ki, əsəb telləri öz başlanğıcını əsəb düyünlərindən – qanqlilərdən götürür. 1842-ci ilin noyabrında Helmholts "Onurğasızların əsəb sisteminin quruluşuna dair" doktorluq dissertasiyası müdafiə etdi. Kral qvardiyasında cərrah vəzifəsini alan və Potsdamda yerbəyer olan Helmholts alayın tövləsində elmi-tədqiqat laboratoriyası qurdu. Burada o, qıcqırma və çürümə proseslərini öyrənirdi. Xüsusilə iki sual onu daha çox maraqlandırırdı: bu zaman enerji çevrilməsi və mikroorqanizmlərin öz-özünü törətməsi necə baş verir. 1846-cı ilin fevralında Helmholts özünəməxsus ciddiliklə əzələlərin fəaliyyətinin energetikasını sistematik öyrənməyə başladı. 1846-cı ilin aprelində özünün "1845-ci il üçün fizioloji istilik hadisələri nəzəriyyəsinin xülasəsi" referatını "Fizikanın nailiyyətləri" Berlin jurnalına göndərdi.

Mayerin və Coulun işləri haqqında heç nə bilməyən Helmholts son dərəcə gözəl intuisiya ilə o dövrün ən mühüm elmi problemini – enerjinin saxlanması qanununu qabaqcadan duymuşdu.

Əzələlərin fəaliyyətinin energetikasının tədqiqini dayandıraraq, 1847-ci ilin fevralında o, "Qüvvənin saxlanmasına dair" klassik işinin ilk variantını başa çatdırdı. Tədqiqatın ilkin xarakterinə baxmayaraq, professor Müllerin tələbəsi Dyuba-Reymon bu memuarı "böyük tarixi əhəmiyyətə malik sənəd" kimi xarakterizə etdi. Xeyirxah rəydən ruhlanan Helmholts 1847-ci il iyulun 23-də Berlin fizika cəmiyyətinin iclasında "Qüvvənin saxlanmasına dair" məruzə



Porşenli silindrdə yerləşən ən sadə termodinamik model – ideal qaz üzərində görmək mümkün olan iş, onun həcminin dəyişməsinə gətirilir: $dW=-pdV$. (Mənfi işarəsi ona görə əmələ gəlir ki, qaz sıxılanda, yəni onun həcmi azalanda və dV kəmiyyəti mənfi olanda, müsbət xarici iş görülür. Yox əgər qazın özü iş görürsə, onda dV kəmiyyəti müsbət olur, lakin W işinin işarəsi dəyişir). Beləliklə, bu halda enerjinin saxlanması qanunu $dU=dQ-pdV$ şəklini alır.

komponentləridir. Buradan belə nəticə ortaya çıxır ki, bizim ətraf aləm haqqındakı biliklərimizin dairəsi və həcmi genişləndikcə, saxlanma qanunlarına, o cümlədən enerjinin saxlanması qanununa, təcrübələrdən çıxarılmış prinsiplər olmaqla, vaxtaşırı yenidən baxmaq lazım gəlir.

etdi, burada enerjinin saxlanması qanununun mövcudluğunu sübut etdi və potensial enerji anlayışını elmə daxil etdi. Çox sonralar o xatırlayırdı: "...mən fizioloqların xeyrinə olaraq yalnız faktlara tənqidi qiymət vermək və onları sistemləşdirmək niyyətində idim... Əgər məlumatlı insanlar nəhayət mənə "Axı bu bizə əla məlumdur! Bu şeylər haqqında bu cür ətraflı danışmaqla gənc həkim nə istəyir?" deyəydilər, mənim üçün gözlənilməz olmazdı. Fizika sahəsində mənim təmasda olduğum avtoritetlərin məsələyə tamamilə başqa cür baxmaqları məni təəccübləndirirdi. Onlar qanunun doğruluğunu rədd etməyə meyilli idilər; Hegelin natural fəlsəfəsilə onların apardıqları qısqanc mübarizə şəraitində mənim işim də fantastik mücərrəd mühakimə hesab edildi. Yalnız riyaziyyatçı Yakobi mənim mühakimələrimlə keçən əsrin riyaziyyatçılarının fikirləri arasında əlaqəni etiraf etdi, mənim təcrübəmlə maraqlandı və məni anlaşılmazlıqdan qorudu. Digər tərəfdən, mənə öz gənc dostlarımın, xüsusən də Dyubua-Reymonun qızğın tərifini və praktiki köməyini hiss etdim. Onlar təzəcə yaranmış Berlin Fizika Cəmiyyətinin üzvlərini tezliklə mənim tərəfimə cəlb etdilər".



Anatomiyadan dərs dediyi Berlin Rəssamlıq Akademiyasında bir il olduqdan sonra, Helmholts Königsberq universitetinin fiziologiya və ümumi patalogiya professoru oldu (1849-1855-ci illər). Burada o, əsəb impulsunun yayılma sürətini öyrənməklə məşğul idi. 1847-ci ildə Leyden bankası boşalmasının rəqsi xarakterini aşkar etdi, 1869-cu ildə isə induktivlikdən və tutumdan ibarət ilk rəqs konturu qurdu. 1855-ci ildən 1858-ci ilə qədər Helmholts Bonn universitetinin anatomiya və fiziologiya professoru oldu. 1852-ci ildə o, akustika sahəsində tədqiqatlara başladı və eksperimental olaraq kombinasion tonların mövcudluğunu aşkar etdi. 1858-ci ildə alim musiqi harmoniyasının fiziki əsasları haqqında fundamental əsər nəşr etdirdi. Həmin ildə də Helmholts Heydelberq universitetinin fiziologiya kafedrasının professoru oldu, burada o vaxtlar artıq Robert fon Bunzen və Qustav Kirxhof işləyirdilər. 1859-cu ildə Helmholts iki iş çap etdirdi: səslilərin tembri və ya keyfiyyəti haqqında və orqan borularında havanın rəqsləri haqqında. Üç il keçdikdən sonra o, "Səsin qavranılması" kapital əsərini nəşr etdirdi. Burada o, eşitmənin fiziologiyasına aid öz tədqiqatlarına yekun vurdu. Alimi idrak nəzəriyyəsi, həndəsə aksiomlarının mənşəyi, hidrodinamika (Helmholts burulğanları) və elektrodinamika maraqlandırırdı, həm də bu problemlərin hər birinə aid o, tutarlı söz deməyə müvəffəq oldu.

1871-ci ildə Helmholts Berlin universitetinin fizika professoru, 1877-ci ildə isə onun rektoru oldu. 1887-ci ildə alimi Berlinin yaxınlığında Şarlottenburqda yenicə təşkil olunmuş Fizika-Texnika İnstitutunun prezidenti təyin edilər.

German Lüdviq Ferdinand fon Helmholtsun çoxsaylı fəxri vəzifələrini və mükafatlarını çoxdan unutmuş nəsillər, onun adını – Vahid Biliyin sonuncu qoruyucularından və çoxaldıcılarından birinin adını çəkirlər.

ENTROPİYA

İSTİLİYİN KEYFİYYƏTİ NƏDİR

İndiyədək haqqında danışdığımız anlayışlar, hər necə olursa olsun, hamıya tanışdır. Hər halda, hər kəs deyə bilər ki, o, istilik, temperatur, təzyiq, enerji haqqında bilir və ya fikirləşir. Ancaq, əgər "hər yetəndən" entropiyanın nə olduğunu izah etməyi xahiş etsək, onda o, söhbətin nədən getdiyini sadəcə başa düşə bilməz. "Entropiya" anlayışı nə bildirir? Ümumiyyətlə, nə vaxt və hansı məqsədlə onu elmə daxil etmişlər?

Bu söz "trope" – "çevrilmə" yunan sözündən törəmişdir. Onu 1865-ci ildə Klauzius, özünün 1850-ci ildə "istilik özbaşına soyuq cisimdən isti cismə keçə bilməz" hökmünü riyazi ifadə etməyə çalışarkən, daxil etdiyi S funksiyasının fiziki mənasını anlayan vaxt daxil etmişdir. O, özünün istilik nəzəriyyəsində ikinci prinsipini yuxarıdakı kimi ifadə etmişdi, birinci prinsip isə onun üçün enerjinin saxlanması və çevrilməsi prinsipi idi.

Lakin Klauzius nəzəriyyəni boş yerdən yox, Karnonun gözəl əsərini yenidən mənalandırmaqla qururdu. Karnonun istilik nəzəriyyəsi iki müddəaya əsaslanırdı: 1) istilik maddidir və onun miqdarı saxlanır (saxlanma prinsipi); 2) sabit temperaturda istilikdən iş almaq olmaz: istiliyi daha aşağı temperatura qədər "düşməyə" məcbur etmək lazımdır (istiqamətlilik prinsipi). Klauziusda da iki prinsip – saxlanma və istiqamətlilik prinsipləri var idi. İndi istilik yox, ancaq tam enerji saxlanırdı, çünki enerjinin saxlanması qanununa görə, istiliyin özü işə çevrilə bilərdi. O ki qaldı istiqamətlilik prinsipinə, ilk baxışda o, Karnoda olduğu kimi deyil. Lakin onların ekvivalentliyini sübut etmək olar. Nəzəriyyənin quruluşunu saxlayaraq, lakin onun mahiyyətini prinsipial dəyişərək Klauzius Karno nəzəriyyəsindəki bəzi uyğunsuzluqları aradan qaldırdı və onun ideyasını tam fiziki aydınlığa çatdırdı.

Məsələn, Karno deyirdi ki, istilik maşınında T_1 temperaturunda buxar Q_1 istiliyini udur, T_2 temperaturunda isə həmin istiliyi verir. Bu zaman o fərz edirdi ki, istilik nə cürsə dəyişir, çünki müxtəlif temperaturlarda müxtəlif keyfiyyətə malikdir. Karno hesab edirdi ki, termogenin miqdarı saxlanır, iş isə yalnız onun müxtəlif temperaturlar arasında "düşməsi" hesabına görülür. Lakin bax, "düşəndən" sonra termogen əvvəlki olaraq qalır, ya yox? İndi məlumdur ki, termogen yoxdur və istilik miqdarı saxlanmır, çünki onun bir hissəsi işə çevrilir. Lakin Karnonun dövründə enerjinin saxlanması qanununu hələ bilmirdilər. Bununla belə, alim mühakimələrin məhz bu yerində müəyyən uzlaşmazlıq hiss etmişdi: əgər ki, Q_1 heç nə ilə Q_2-dən fərqlənmirsə, onda nəyin hesabına iş görülür?

Nə maşının iş prinsipindən, nə də onun işçi maddəsindən asılı olmayan universal funksiya həmişə, T_1 temperaturunda Q_1 istiliyinin udulduğu, T_2 temperaturunda isə Q_2 istiliyinin verildiyi hər yerdə meydana çıxır, həm də bütün proseslər dönən olaraq baş verir. Hər hansı bir maşın və ya sistem (model) üçün tapılmış bu funksiya, eyni istilik parametrlərinə malik olan digər sistemlər üçün də eyni cür olacaqdır. İdeal qaz modeli götürmək daha sadədir. Klauzius belə də etdi. Məlum oldu ki, universal funksiya Q/T şəklinə malikdir.

RUDOLF KLAUZİUS

Hətta təbiətşünaslığın tarixinə yaxşı bələd olan insan da, yəqin ki, Rudolf Yulius Emanuel Qottlib kimdir və fizika elminin inkişafına onun verdiyi pay nədir sualına cavab verə bilməz. Bununla belə, söhbət termodinamikanın və qazların kinetik nəzəriyyəsinin yaradıcılarından biri olan və hansısa səbəbdən özünə latınlaşdırılmış təxəllüs seçmiş Rudolf Yulius Emanuel Klauzius (1822-1888) haqqında gedir. 1848-ci ildə Berlin universitetini bitirən Klauzius sonra Sürix Politexnik İnstitutunun (1855-ci ildən), Vyursburq (1867-ci ildən) və Bonn (1869-1888-ci illər) universitetlərinin professoru olmuşdur. Bonnda fizika kafedrası üzrə onun davamçısı Henrix Hers oldu.

Bizim dövrdə buxar maşınlarını (çox vaxt onların ancaq maketlərini) yalnız muzeylərdə görmək olar, lakin XIX əsrdə onlar əsas enerji mənbələri olmuşlar. Bu mexanizmlərin təkmilləşdirilməsi üzərində ixtiraçıların, mühəndislərin və alimlərin – praktiklərin və nəzəriyyəçilərin bütöv bir ordusu çalışırdı. Onların arasında fəxri yeri Rudolf Klauzius tutur, onun payı mühüm, lakin buxar maşınının FİƏ artırmaq kimi dar bir texniki məsələnin həllindən xeyli böyükdür. O, yeni elmin – termodinamikanın yaradıcılarından biri oldu.

1850-ci ildə Klauzius istiliklə görülən iş arasındakı münasibəti (istiliyin mexaniki ekvivalentini) müəyyən edərək, enerjinin saxlanması qanununu – termodinamikanın Birinci başlanğıcını dəqiq ifadə etdi.

Həmin 1850-ci ildə o, texniki termodinamikanın yaradıcısı Uilyam Rankindən asılı olmadan, buxar maşınının ideal termodinamik tsiklini (*Rankin-Klauzius tsikli*) çıxardı, birinci olaraq, su buxarının termodinamik xassələrini tədqiq etdi (1851-ci il). Sonralar (1856-cı il) Klauzius işçi cismin temperaturunu artırmaq hesabına buxar maşınının FİƏ-ni yüksəltməyin üsulunu təklif etdi.



Termodinamik hadisələrin tədqiqilə məşğul olan alim belə nəticəyə gəldi ki, onları təsvir etmək üçün termodinamikanın Birinci başlanğıcı kifayət deyil: termodinamik proseslərin hansı istiqamətdə inkişaf etdiyini təyin etməyə imkan verən daha bir qanun da lazımdır. 1854-cü ildə o, aksiom qəbul etdi: istilik özbaşına daha soyuq cisimdən daha isti cismə keçə bilməz. Başqa (ekvivalent) ifadəsi Tomsona məxsusdur: ikinci növ daimi mühərrik, yəni fəaliyyəti enerjinin saxlanması qanununu pozmayan, lakin bütün istiliyi tamamilə mexaniki işə çevirməyə imkan verən mühərrik qurmaq olmaz. Bu iddiaya əsaslanaraq və yeni fiziki kəmiyyət – entropiya daxil edərək, Klauzius termodinamikanın İkinci başlanğıcını bərabərsizlik şəklində ifadə etdi. Klauziusun bərabərsizliyi (1862-ci il) belədir: qapalı sistemin (ətraf mühitlə nə maddə, nə də enerji mübadiləsi etməyən) entropiyası azalmır. Əgər proses dönəndirsə, onda entropiya sabit qalır, əgər proses dönməyəndirsə, onda entropiya artır. Beləliklə, entropiyanın dəyişməsi prosesin hansı istiqamətdə gedəcəyini göstərir.

Klauzius qazların kinetik nəzəriyyəsinin işlənib hazırlanmasına xeyli böyük töhfə vermişdir. "Fizikanın salnamələri" jurnalında çap olunmuş (1857-ci il) "Bizim istilik adlandırdığımız hərəkətin növü haqqında" işində o, qazın hal tənliyini çıxardı

$$pV = \frac{Nmu^2}{3},$$

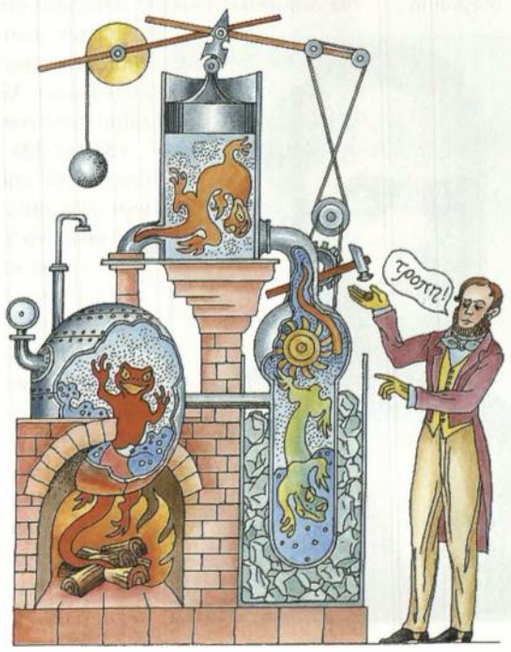
burada u – qaz zərrəciklərinin sürətlərinin orta qiyməti, p – təzyiq, V – həcm, N – zərrəciklərin sayı, m – zərrəciklərin kütləsidir. Klauzius müəyyən etdi ki, qazın təzyiqi onun molekullarının yalnız irəliləmə hərəkətindən asılıdır və irəliləmə hərəkətinin kinetik enerjisinin zərrəciyin tam kinetik enerjisinin hansı hissəsini təşkil etdiyini tapdı. O, sərbəst qaçış yolunun orta uzunluğu (iki ardıcıl toqquşma arasındakı məsafə) anlayışını elmə daxil etdi və molekulların qeyri-adi böyük sürətlərilə (hidrogen üçün 1800 m/san-yə yaxın) diffuziyanın kiçik sürəti arasındakı zahiri ziddiyyəti həll etdi.

1870-ci ildə Klauzius zərrəciklərin orta kinetik enerjisilə, onlar arasında təsir edən qüvvələrin əlaqəsini müəyyən edən və *virial teoremi* adlanan teorem isbat etdi.

Klauziusun işləri məsələnin qoyuluşunun aydınlığı, fiziki ideyaların dərinliyi və onların şərhinin riyazi dəqiqliyilə fərqlənir. O, nəzəri olaraq, Coul-Lens qanununu əsaslandırdı (1853-cü il), elektrolitik dissosiyasiya nəzəriyyəsinin əsaslarını işləyib hazırladı (1857-ci il) və O.Mossotidən asılı olmadan, dielektrik nüfuzluğu ilə dielektrikin polyariziyası arasındakı asılılığı aşkara çıxardı (Klauzius-Mossoti düsturu, 1879-cu il).

Aydın oldu ki, bu funksiya nəinki yalnız universaldır, həm də halın funksiyasıdır və dönən tsikldə istilik yox, məhz o saxlanır. Başqa sözlə, Karno tsiklində qızdırıcıdan alınmış Q_1/T_1 kəmiyyəti soyuducuya verilmiş Q_2/T_2 kəmiyyətinə bərabərdir, yəni $Q_1=Q_2$ münasibəti yox, $Q_1/T_1=Q_2/T_2$ münasibəti ödənir. Bu bərabərliyin fiziki mənasını aydınlaşdırmaq üçün Klauzius əvvəlcə müxtəlif temperaturlu bir neçə Karno tsiklindən ibarət olan prosesləri tədqiq etdi; sonra temperaturun dəyişməsi və istiliyin udulması eyni zamanda baş verən daha mürəkkəb proseslərə baxdı. O, bu prosesləri elementar sonsuz kiçik tsikllərə böldü, onların işinin nəticələrini topladı və nəhayət sübut etdi ki, istənilən, nə qədər mürəkkəb olur olsun, tsiklik dönən proses üçün Q/T kəmiyyətlərinin cəmi, istiliyin işarəsi nəzərə alınmaqla (alınan – müsbət işarə ilə, verilən – mənfi işarə ilə), sıfıra bərabər olur:

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$$



və ya inteqral formada

$$\int \frac{\delta Q}{T} = 0. \qquad (1)$$

Burada δQ istiliyin diferensialı yox, kiçik dəyişməsidir, çünki Q hal funksiyası deyil, hal funksiyasını diferensiallamaq olardı.

Riyaziyyatda məlumdur ki, əgər qapalı yol üzrə inteqral sıfıra bərabərdisə, onda inteqral işarəsi altındakı ifadə hər hansı bir funksiyanın tam diferensialıdır. Yox əgər yol qapalı deyilsə, onda inteqral yolun formasından asılı deyil, yalnız başlanğıc və son nöqtələrdən asılı olur. Deməli, tam diferensial işarəsi altındakı funksiya hal funksiyasıdır. (1) inteqralı və bu inteqral işarəsi altında olan $\delta Q/T$ kəmiyyəti verilən şərtləri ödəyir. Ona görə də $\delta Q/T$ müəyyən bir funksiyanın tam diferensialı olmalıdır (Klauzius onu S ilə işarə etdi):

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \qquad (2)$$

Beləliklə, İkinci başlanğıcın daha bir riyazi ifadəsi alındı:

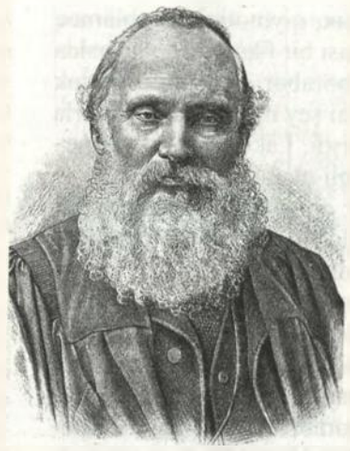
$$\delta Q = TdS, \qquad (3)$$

lakin artıq diferensial ifadə, yəni prosesi kiçik miqyasda təsvir edən ifadə. (2) tənliyinin mənası ondan ibarətdir ki, sistemə kiçik δQ istilik miqdarı verildikdə, S funksiyasının qiyməti $\delta Q/T$ qədər artır. Lakin bu funksiyanın fiziki mənası, əvvəlki kimi, aydın deyildir. Doğrudur, S funksiyasının xassələri haqqında dərhal nəsə demək olar.

ENTROPİYANIN XASSƏLƏRİ VƏ ÜÇÜNCÜ BAŞLANĞIC

Birincisi, (2)-ni tsiklin ixtiyari verilmiş iki nöqtəsi arasında inteqrallamaqla S-in dəyişməsini, yəni ΔS-i tapa bilərik; a halında b halına keçid zamanı:

UİLYAM TOMSON, LORD KELVİN



Yüzilliklərin ərəfəsində yekun vurmaq qəbul olunmuşdur. Riyaziyyatçılar bunu Parisdə II Beynəlxalq riyazi konqresdə (1900-cü il) yerinə yetirdilər, burada ilə David Hilbert məruzə çıxış etdi. Böyük alim 23 problem söylədi və onun hesab etdiyi kimi, XIX əsr bu problemləri XX əsrə vəsiyyət etdi.

Fiziklərdə buna bənzər heç nə baş vermədi: əksəriyyətin fikrinə görə, Nyuton mexanikasına əsaslanan klassik mexanika ətraf aləmi, demək olar, tam izah etməyə imkan verirdi. Şəxsi təcrübə və görkəmli alim-müasirlərin nüfuzu bunu sübut edirdi. Onlardan biri, ingilis fiziki Uilyam Tomson (1824-1907) iddia edirdi: "Mənə nə qədər ki, tədqiq olunan hadisənin mexaniki modelini qurmaq müyəssər olmur, mən heç vaxt məmnunluq hissi duymuram. Əgər belə model qurmaq mənə nəsib olarsa, onda mən öyrənilən mövzunu başa düşürəm, əks halda, başa düşmürəm. Məhz buna görə, mən işığın elektromaqnit nəzəriyyəsini heç cür başa düşə bilmirəm. Mən işığı nə qədər mümkündürsə, bir o qədər tam başa düşmək istərdim, özü də mənim daha az başa düşdüyüm bir şey daxil etmədən. Məhz ona görə, mən sadə dinamikanın tərəfdarıyam, çünki münasib modeli elektromaqnit nəzəriyyəsində yox, onda tapa bilərəm".

Uilyam Tomson ibtidai təhsilini riyaziyyat professoru Ceyms Tomsonun rəhbərliyi altında almışdır. 1834-cü ildə Uilyam Qlazqo universitetinə daxil oldu, oradan da Kembric universitetinin Müqəddəs Petr (Piterhaus) kollecinə keçdi. Universiteti qurtaran kimi (1845-ci il) gənc bir neçə ay Parisdə Anri Viktor Renonun laboratoriyasında elmi təcrübə keçdi. Artıq 22 yaşında Tomson Qlazqo universitetinin natural fəlsəfə, yəni fizika doktoru idi. O, istefaya gedənə qədər (1899-cı il) bu vəzifəni tutdu. Tomson Qlazqoda Böyük Britaniyada ilk fiziki laboratoriyanı təşkil etmişdi (1846-cı il).

Tomson öz dövrünün aparıcı fiziklərindən biri idi. Onun apardığı təcrübələr istiliyin dinamik nəzəriyyəsini qurmağa imkan verdi. Bu nəzəriyyə, o vaxtlar bir-birinə zidd kimi görünən Sadi Karnonun yanaşması ilə Ceyms Coulun yanaşmasını barışdırdı. Termodinamikanın təməl prinsipləri Tomsonun (Kelvinin; 1848-ci il), mütləq temperaturlar şkalasına və onun tapdığı enerjinin dissipasiyası (səpilməsi) prinsipinə əsaslanır. 1851-ci ildə P.Klauziusdan asılı olmadan, termodinamikanın İkinci başlanğıcını ifadə edən Tomson ("yeganə nəticəsi istilik rezervuarının soyuması hesabına görülən mexaniki iş ola biləcək proses təbiətdə mümkün deyil") istifadə etmək üçün əlverişli olan enerji nəzəriyyəsini işləyib hazırladı.

1853-1854-cü illərdə Tomson Coulla birlikdə müəyyən etdi ki, qazı drosselləşdirəndə onun temperaturu ya yüksəlir (*müsbət Coul-Tomson effekti*), ya da enir (*mənfi effekt*). 1856-cı ildə o, aşkar etdi ki, naqildən cərəyan keçəndə istilik ya ayrılır, ya da udulur (Coul istiliyilə yanaşı). Bu hadisəni *Tomson effekti* adlandırırlar. 1870-ci ildə alim göstərdi ki, doymuş buxarın elastikliyi maye səthinin formasından asılıdır.

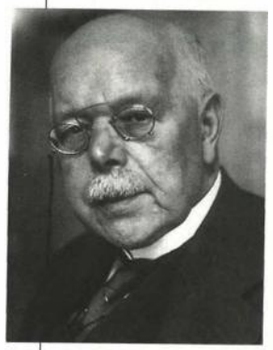
Tomson elektrik rəqslərinin ilkin şərtlərini yaradaraq (1853-cü il), məftilsiz teleqrafiyanın təməlini qoydu. 1854-cü ildən başlayaraq alim transatlantik teleqraf kabelinin çəkilişinə aid işlərə çox diqqət yetirdi. Teleqraf rabitəsinin praktiki həyata keçirilməsində Tomsonun yalnız nəzəri tədqiqatları yox, həm də onun texniki ixtiraları mühüm rol oynadı (siqnalların retranslyatoru, yüksək keçiriciliyə malik mis məftildən istifadə, güzgü qalvanometri, kvadrat və mütləq elektrometrlər, teleqraf siqnallarının qəbulu üçün registrator və s.). 1856-cı ildə o, "Atlantik teleqraf K°"-ya başçılıq etdi, 1858-ci ildə isə "Aqamemnon" gəmisinin mühəndis-elektriki kimi okeanın dibi ilə ilk (uğursuz) kabel çəkiliş cəhdində iştirak etdi. Alim səkkiz il ərzində transatlantik teleqrafiya ilə bağlı yaranan müxtəlif elmi-texniki problemləri inadla aradan qaldırmışdır. Nəhayət, 1866-cı ildə tamamilə metaldan düzəldilmiş ilk nəhəng "Qreyt İstern" paroxodunda tarixi transatlantik kabel çəkilişini müşahidə etmişdir. Həmin ildə də, Amerikadan qayıdan kimi, Tomson zadəgan rütbəsinə yüksəldildi – ser Uilyam oldu. (1892-ci ildə Tomsona per rütbəsini hədiyyə etdilər – bundan sonra ona lord Kelvin Larqski adı verildi).

Tomsonu təkcə tətbiqi problemlər yox, həm də fundamental problemlər maraqlandırırdı. Ona maqnetizmin riyazi nəzəriyyəsinə, elastiklik nəzəriyyəsinə, efirin təbiətinə, atomların ölçüsünə aid və s. işlər məxsusdur. Alim elektrik ölçmələri üçün ümumi vahidlər sisteminin daxil edilməsinin möhkəm əqidəli tərəfdarı olmuşdur.

Lord Kelvinin məruzələri, məqalələri, tədqiqatları, praktiki və mühəndis fəaliyyəti (o, bir çox patentin müəllifi olmuşdur) fiziklər nəsli üçün ilham mənbəyinə çevrilmişdir. Məşhur Baltimor mühazirələrində alim uzaqgörənliklə klassik fizikanın açıq üfüqündə olan iki buludcuq haqqında danışırdı; onların birindən sonralar nisbilik nəzəriyyəsi, digərindən isə kvant mexanikası doğdu.

$$\Delta S = S_b - S_a = \int_a^b \frac{\delta Q}{T}. \qquad (4)$$

S-in mütləq qiymətini hesablamaq üçün, hər hansı bir fiksə olunmuş halda onun nəyə bərabər olduğunu bilmək lazımdır. Eyni şey mütləq temperaturla da baş vermişdi. Lakin mütləq temperaturdan fərqli olaraq, *S* funksiyası ölçüyə gəlmir: onu ancaq hesablayırlar.



V.F.Nernst.

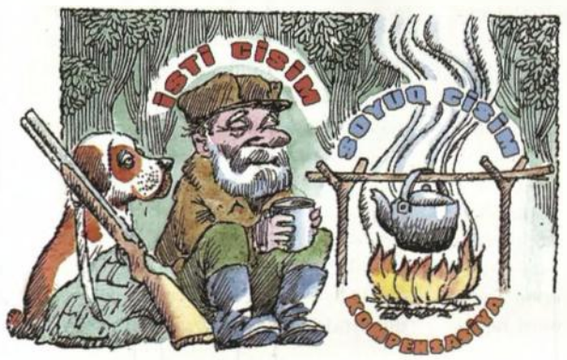
1906-cı ildə (*S* funksiyasının mənasını artıq aydınlaşdırmış və onu *entropiya* adlandırmışdılar) alman fiziki Valter Fridrix German Nernst (1864-1941) fərziyyə irəli sürdü ki, temperaturun mütləq sıfırında *S* funksiyasının da qiyməti sıfıra bərabərdir. İstənilən temperaturda *S*-i hesablamaq imkanı yarandı. O vaxtdan bu müddəa Nernst teoremi və ya termodinamikanın Üçüncü başlanğıcı adlanır. Üçüncü başlanğıc öz təbii izahını sonralar – kvant mexanikası çərçivəsində aldı: temperaturun mütləq sıfırında cisim yalnız bir halda olmağa qadirdir və buna görə də entropiya (hallar sayının və ya cismin "xaotiklik" dərəcəsinin loqarifmi kimi) sıfıra bərabər olur. İkincisi, dönməyən tsikllər üçün (4) bərabərliyi bərabərsizliyə çevrilir:

$$\Delta S = S_b - S_a > \int_a^b \frac{\delta Q}{T}.$$

Qapalı tsikl halında bu inteqral sıfıra çevrilir, ona görə də qapalı dönməyən proses üçün həmişə ΔS sıfırdan böyükdür. Nəticədə istənilən tsiklik proseslər üçün termodinamikanın İkinci başlanğıcı daha ümumi forma alır:

$$\Delta S \geqslant 0,$$

həm də bərabərlik yalnız dönən proseslər üçün ödənir.



Yuxarıda verilən bütün xassələr *S* funksiyasının fiziki yox, riyazi xarakteristikalarıdır.

Hər hansı kəmiyyətin fiziki mənasını başa düşmək ümumiyyətlə nə deməkdir? Yəqin onu hər hansı bir fiziki proseslə və ya maddi obyektlə əlaqələndirmək lazımdır. Klauzius bu cür əlaqəni axtarmağa başladı. Karnodan fərqli olaraq, o başa düşürdü ki, tsiklik prosesdə, sanki, iki çevrilmə var: 1) istiliyin işə (və əksinə) və 2) bir temperaturdakı istiliyin başqa temperaturdakı istiliyə çevrilməsi. Alim belə nəticəyə gəldi: "İkinci başlanğıc bu iki çevrilmə arasındakı münasibəti ifadə etməlidir".

İkinci başlanğıcın sözlə üç müxtəlif ekvivalent deyilişi var; bunlar istiliyin üç müxtəlif nəzəriyyəsinin müəlliflərinə – S.Karnoya, R.Klauziusa və U.Tomsona məxsusdur. İkinci başlanğıcın riyazi ifadəsi isə yeganədir və bu, onların istənilən birindən nəticə kimi alınır.

"Hərəkətverici qüvvə doğurmaq üçün istilik yaratmaq kifayət deyil: onu həm də hasil etmək lazımdır" (S.Karno).

"Cansız maddi fəaliyyətçinin köməyilə hər hansı maddə kütləsindən, onu ətrafdakı cisimlərdən ən soyuğunun temperaturundan aşağı temperatura qədər soyutmaq yolu ilə mexaniki iş almaq mümkün deyil" (U.Tomson).

"İstilik özbaşına daha soyuq cisimdən daha isti cismə keçə bilməz" və ya "İstiliyin daha soyuq cisimdən daha isti cismə keçidi kompensasiyasız mümkün ola bilməz" (R.Klauzius).

"DÜNYANIN ŞAHI" KİMDİR, "KÖLGƏSİ" KİM

İkinci başlanğıcın mühüm nəticələrindən biri ondan ibarətdir ki, iş və istilik, onların tsiklik proseslərdə qarşılıqlı çevrilməsi zamanı bərabərhüquqlu deyil. Nəticə olduqca gözlənilməzdir, çünki termodinamikanın Birinci başlanğıcı baxımından enerji mübadiləsinin hər iki üsulu ekvivalentdir. İkinci başlanğıca görə isə, işin istiliyə tam keçidi mümkündür, bax əks keçid isə yalnız qismən mümkündür, labüd kompensasiya ilə. Obrazlı desək, *W* işi sərbəst konversiya olunan və dəqiq müəyyən olunmuş kurs üzrə istənilən başqa valyutaya dəyişdirilən dünya valyutasına, *Q* istilik miqdarı isə məhdud oblastda işlənən və *W* ilə məcburi vergi ödəməklə mübadilə edilən yerli valyutaya bənzəyir.

Hər iki növ hərəkətin: nizamlı və nizamsız hərəkət növlərinin müxtəlif xarakterini nəzərə alsaq, işlə enerjinin bərabərhüquqlu olmamaları aydın olacaqdır. Birinci qalıqsız ikinciyə keçə bilər, bax ikinci isə birinciyə yalnız qismən keçə bilər. Başqa sözlə, enerji mübadiləsinin müxtəlif formaları arasında bir növ iyerarxiya mövcuddur: hər bir mübadilə formasına müəyyən bir keyfiyyət uyğundur. İkinci başlanğıcın bütün ifadələri bu keyfiyyətin, hətta ideallaşdırılmış dönən proseslərdə də, azaldığının qaçılmaz olduğunu deyir.

Beləliklə, bəşəriyyətin ən başlıca problemlərindən biri olan enerji böhranı faktiki olaraq entropiya böhranına gəlib çıxır. İş onda deyil ki, enerji azdır (Birinci başlanğıc enerjinin saxlanmasına ciddi nəzarət edir), ondadır ki, enerjinin keyfiyyəti İkinci başlanğıca görə, durmadan azalır, ondan faydalı enerji almaq getdikcə çətin olur. Bundan başqa, İkinci başlanğıcın haqqı ətraf mühitin labüd istilik çirklənməsidir; bir qayda olaraq ətraf mühit təbii soyuducu vəzifəsini yerinə yetirir (buradan parnik effekti və digər qlobal ekoloji problemlər ortaya çıxır).

Alman fiziki Arnold Zommerfeld maraqlı bir müqayisə göstərmişdi: "Mən tələbə olarkən, F.Valdanın "Dünyanın şahı və onun kölgəsi" kiçik kitabını fayda almaq üçün oxudum. Burada enerji və entropiya nəzərdə tutulurdu. Daha dərindən dərk edərək, mən belə nəticəyə gəldim ki, onların yerini dəyişmək lazımdır. Təbii proseslərin nəhəng fabrikində entropiya prinsipi direktor yerini tutur, bu direktor bütün sazişlərin növünə və gedişinə dair sərəncam verir. Enerjinin saxlanması qanunu yalnız mühasib rolunu oynayır, debeti krediti tarazlığa gətirir".

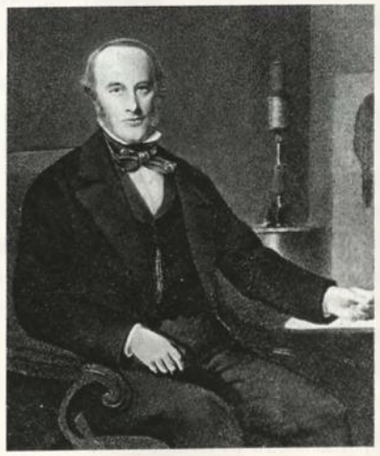
Daha sonra Klauzius bütün çevrilmələri vahid baxımdan, bir funksiyanın – universal Q/T funksiyasının köməyilə təsvir etməyi təklif etdi. Bu funksiyanı o, *çevrilmələrin ekvivalenti* adlandırdı, İkinci başlanğıcı isə *çevrilmələrin ekvivalentliyi prinsipi* kimi ifadə etdi. Bu zaman Q temperaturunda T istiliyinin işə çevrilməsi (birinci növ çevrilmə) Q/T ekvivalentinə malikdir. T_1 temperaturunda Q istiliyinin T_2 temperaturunda istiliyə çevrilməsi (ikinci növ çevrilmə) $Q(1/T_2 - 1/T_1)$ ekvivalentilə təsvir olunur, yəni iki hissədən ibarətdir: T_1 temperaturunda Q istiliyinin işə çevrilməsi ninekvivalenti $(-Q/T_1)$, işin T_2 temperaturunda Q istiliyinə çevrilməsinin ekvivalenti Q/T_2-dir. Başqa sözlə, istiliyin və işin ikiqat çevrilməsi baş verir: əvvəlcə istilik işə, sonra isə, əksinə iş istiliyə çevrilir. (Bax gör, istiliyin keyfiyyəti necə dəyişirmiş!) Həm də hər şeyi birinci növ çevrilməyə – işin istiliyə və ya istiliyin işə çevrilməsinə gətirmək olur. (Xatırlayaq ki, Karnoda iş yalnız termogenin "düşməsi" hesabına, yəni ikinci növ çevrilmə yolu ilə görülürdü.) Həm də mexaniki enerji istiliyə tam keçə bilər, istilik enerjisi isə mexaniki enerjiyə yalnız qismən keçə bilər. Bu isə məhz İkinci başlanğıcdır.

CEYMS PRESKOTT COUL

Enerjinin saxlanması qanununu eksperimental olaraq etibarlı surətdə əsaslandırmağı bacarmış insanlardan biri Ceyms Preskott Coul (1818-1889) olmuşdur.

Sanfordlu varlı piveçəkənin oğlu C.P.Coul yaxşı ev təhsili almışdı. Riyaziyyatın, kimya və fizikanın əsaslarını Con Dalton (1766-1844) ona öyrətmişdi.

1841-ci ildə Coul "Metal elektrik naqillərində və elektroliz zamanı batareya elementlərində ayrılan istiliyə dair" adlı məqalə çap etdirdi. O aşkar etdi ki, həmişə qalvanik elementdən gələn cərəyan naqildən axan zaman istilik miqdarı ayrılır və bu hadisəni elementdə gedən kimyəvi reaksiyalarla izah etməyə çalışdı. Lakin belə bir məsələ, istilik naqil ilə ötürülür, yoxsa elektrik cərəyanı keçəndə naqilin özündə ayrılır məsələsi əvvəlki kimi həll olunmamış qaldı; tədqiqatın məntiqi Coulu induksiya cərəyanları ilə eksperimentlərə gətirib çıxardı. Coul altı seriya təcrübələr apararaq, 1841-ci ildə sübut etdi ki, naqildə ayrılan istilik cərəyan şiddətinin kvadratı və naqilin müqaviməti ilə mütənasibdir. Coul öz nəticələrini "Maqnitoelektrik effektlərinin kalorifiliyinə və istiliyin mexaniki qiymətinə dair" adlı işində şərh etdi (1843-cü il).



Bundan başqa, Coul istiliyin mexaniki ekvivalentinin qiymətini verdi: 460 qkq·m/kkal (qkq – qüvvə kiloqramı). Coulun təcrübələri (ilk təcrübələr hələ mükəmməl deyildi) haqqında G.Helmholts böyük tərifləyərək söyləmişdi: "... həmin tədqiqatçının işə aid dərin biliklərlə və dəmir qətiyyətlə apardığı sonrakı təcrübələri çox böyük heyrətə layiqdir; bu təcrübələr 425 verdi". (İstiliyin mexaniki ekvivalentinin müasir qiyməti 426,9 qkq·m/kkal olardı, lakin BS sisteminin daxil edilməsilə bu anlayışa ehtiyac qalmadı, çünki həm iş, həm də istilik miqdarı eyni bir vahidlərlə – coullarla ölçülür. 1C=0,239 kal=0,102 qkq·m.)

1845-ci ildə "Havanın seyrəldilməsinin və sıxlaşdırılmasının doğurduğu temperatur dəyişmələri haqqında" adlı işində Coul, indi onun adını daşıyan bir qanun ifadə etdi. Coul qanunu iddia edir ki, verilmiş kütləli ideal qazın daxili enerjisi onun yalnız temperaturundan asılıdır, həcmindən isə asılı deyil.

Coulun yanaşması Mayerin yanaşmasından prinsipial fərqlənirdi. Elm tarixçisi F.Rozenberqin sözlərinə görə "Coul Mayerin birbaşa əksidir. Axırıncı, hər şeydən əvvəl qanunun prinsipial imkanları məsələsinə diqqət yetirdiyi və onun bütün təbiət hadisələrinə tətbiqedilənliyini deduktiv olaraq əsaslandırdığı, mövcud müşahidə materialının imkan verdiyi empirik qaydalardan yalnız illüstrasiya üçün istifadə etdiyi halda, Coul bu qanunu təbiətdə ən geniş yayılmış iki qüvvə üçün – istilik və mexaniki iş üçün ən dəqiq, ən mükəmməl təcrübi ölçmələr yolu ilə sübut etməyə çalışır və özünün burada tapdığı qanunu digər təbiət hadisələrinə yalnız ötəri, öz-özünə aydın olan bir şey kimi şamil edir".

1852-1854-cü illərdə Coul və Tomson (gələcək lord Kelvin) birlikdə *Coul-Tomson effekti* adlanan effekti – qazı drosselləşdirən zaman, yəni qaz təzyiq altında məsaməli arakəsmənin içindən keçərkən, qazın temperaturunun dəyişməsini aşkar etdilər.

Coulun həyati məsələsi enerjinin saxlanması qanununun eksperimental əsaslandırılması olsa da, fizikanın başqa sahələrində də alimin nailiyyətləri böyükdür: o maqnit doyma (1840-cı il), maqnitostriksiya (1842-ci il) hadisələrini kəşf etmiş, qaz molekullarının sürətini hesablamış və onun temperaturdan asılılığını aşkar etmişdir, təzyiqi isə qaz zərrəciklərinin qabın divarlarına vurduğu zərbələrin nəticəsi kimi izah etmişdir (1848-ci il).

Müasir elmdə *L* canlı qüvvəyə kinetik enerji, *G* "gərginlik qüvvələri miqdarına" isə potensial enerji uyğundur.

tənliyində, *W* işinin əvəzinə o, yeni kəmiyyət – qiymətcə *W*-yə bərabər və işarəcə ona əks olan "gərginlik qüvvələrinin *G* miqdarını" daxil etdi. İndi saxlanma prinsipi aşağıdakı kimi formulə edildi:

$$L+G=\text{const},$$

burada, solda duran hər şeyi Helmholts sistemdə toplanmış qüvvə adlandırdı. Bax bu, ilk baxışda cüzi görünən, lakin anlayışlar sahəsində çox böyük sıçrayışa səbəb olmuş çevirməyə misaldır. (Hazırda bu çox adi səslənir: qapalı sistemdə kinetik və potensial enerjilərin cəmi dəyişmir.)

Beləliklə, Helmholts mexanika prizmasından baxaraq, bütün qüvvələri iki anlayışda – "canlı qüvvə" və "gərginlik qüvvəsi" anlayışlarında birləşdirdi. Ona görə də əgər sistemə xas olan bütün canlı qüvvələri və gərginlik qüvvələrini tapsaq, onda onların cəmi dəyişməz olacaqdır; onlar eyni bir ölçü ilə ölçülməlidir. Deməli, gərginlik qüvvələrinin ölçülərini canlı qüvvələrin ölçüsünə gətirmək, yəni onun mexaniki ekvivalentini axtarıb tapmaq lazımdır. Mexanikada canlı qüvvə saxlanır. Deməli, əgər birdən o itərsə, onda hansı isə başqa bir qüvvə (istilik, işıq, kimyəvi təsir) yaranır və molekulyar quruluşun dəyişməsi, elektrik və termik təsirlərin sayəsində daxili gərginlik qüvvələrinin artması baş verir.



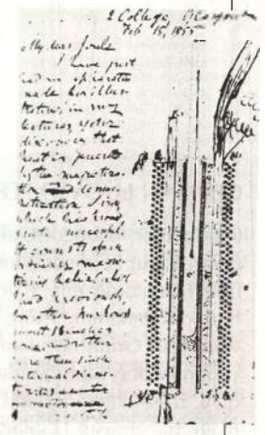
Kimyəvi və elektrik hadisələrilə müşayiət olunmayan bütün hallarda, itirilmiş mexaniki qüvvənin əvəzində, sərf olunan işə ekvivalent olan istilik miqdarı yaranmalıdır. "Cisimdə olan istilik miqdarına istilik hərəkətinin canlı qüvvəsi (sərbəst istilik) ilə atomlardakı gərginlik qüvvəsinin cəmi kimi baxmaq olar; atomların vəziyyəti dəyişdikdə bu gərginlik qüvvəsi istilik hərəkəti (gizli istilik, daxili iş) doğura bilər".

Helmholtsun aldığı nəticələr fiziklər tərəfindən heç də dərhal başa düşülmədi, çünki bu nəticələr bütün fiziki baxışlara yenidən köklü nəzər salmağı tələb edirdi. Bu məsələyə demək olar ki, eyni zamanda və bir-birindən asılı olmadan Rudolf Klauzius və Uilyam Tomson nöqtə qoydular: XIX əsrin ortalarında onlardan hər biri (Klauzius – 1850-ci ildə, Tomson isə 1852-ci ildə) özlərinin istiliyin mexaniki variantını təklif etdilər. Karnonun əsərini qiymətləndirərək və diqqətlə öyrənərək, alimlər nəzəriyyənin əsas postulatlarını başqa cür ifadə etdilər. Birinci prinsipi – termogenin saxlanmasını – onlar enerjinin saxlanması prinsipilə əvəz etdilər.

İkinci prinsipi – verilmiş sistemdə və ya ətraf fəzada digər dəyişikliklər etmədən istiliyi onun mənbəyindən götürməyin və işə çevirməyin mümkünsüzlüyünü – müxtəlif, lakin ekvivalent formalarda təqdim etdilər.

Klauziusun səyləri sayəsində istiliklə işin ekvivalentliyi haqqındakı əsas müddəalar, nəhayət, fizikanın arsenalına daxil oldu. Klauzius nümayiş etdirdi ki, "cismin verilmiş halında tam istiliyi" anlayışı qəbuledilməzdir, çünki bir haldan başqa hala keçmək üçün cisim kənardan istilik almalıdır; bu istiliyin miqdarı cismin özünün gördüyü xarici işdən çox asılıdır. İş bir haldan digərinə keçid üsulu ilə təyin olunur. Deməli, nə istilik, nə iş halın funksiyaları deyil. Lakin Helmholtsun "tam istilik" adlandırdığı – canlı qüvvə ilə gərginlik qüvvəsinin cəmi ani haldan asılıdır, çünki məhz bu cəm cisimdə olan qüvvələr ehtiyatını təşkil edir. Klauzius göstərdi ki, "cisimlərin daxili qüvvələrilə tanış olmamağımızın





U.Tomsonun C.Coula ünvanladığı məktubdan bir səhifə. 15 fevral 1855-ci il.



Uilyam Con Makuorn Rankin.

nəticəsində bizə adətən, bu iki kəmiyyətin (cisimdə toplanmış H istiliyinin və daxili J işinin) ayrı-ayrılıqda qiymətləri yox, yalnız onların cəmi məlumdur". Məhz bu cəmi $U=N+J$ *daxili enerji* adlandırmağa başladılar. "Daxili enerji" adını şotlandiyalı mühəndis və fizik Uilyam Con Makuorn Rankin (1820-1872) təklif etmişdir.

Digər tərəfdən, U daxili enerji cismin aldığı Q istilik miqdarı ilə onun özünün gördüyü W işinin fərqilə:

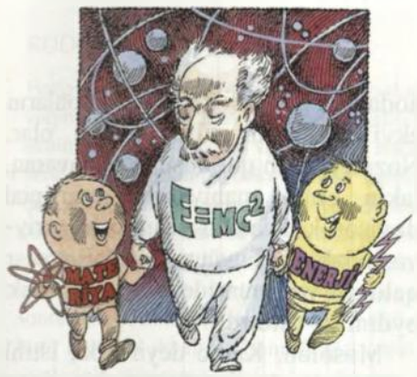
$$U=Q-W$$

və ya alınan Q istilik miqdarı ilə cisim üzərində görülmüş W' işinin cəmi ilə təyin olunur:

$$U=Q+W'.$$

Məhz bu *enerjinin saxlanması qanunu* və ya termodinamikanın Birinci başlanğıcıdır.

1905-ci ildən sonra enerjinin saxlanması və çevrilməsi qanununun şərhi xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin meydana çıxması ilə əlaqədar, dəyişikliyə uğradı. Bu nəzəriyyə çərçivəsində materiyanı və enerjini bir-birindən asılı olmayan hesab etmək olmaz (Eynşteynin $E=mc^2$ düsturuna uyğun olaraq). Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsində impulsun və enerjinin saxlanması qanunları ayrılıqda ödənmir, zira onlar dördölçülü enerji-impuls vektorunun



Porşenli silindrdə yerləşən ən sadə termodinamik model – ideal qaz üzərində görmək mümkün olan iş, onun həcminin dəyişməsinə gətirilir: $dW=-pdV$. (Mənfi işarəsi ona görə əmələ gəlir ki, qaz sıxılanda, yəni onun həcmi azalanda və dV kəmiyyəti mənfi olanda, müsbət xarici iş görülür. Yox əgər qazın özü iş görürsə, onda dV kəmiyyəti müsbət olur, lakin W işinin işarəsi dəyişir). Beləliklə, bu halda enerjinin saxlanması qanunu $dU=dQ-pdV$ şəklini alır.

komponentləridir. Buradan belə nəticə ortaya çıxır ki, bizim ətraf aləm haqqındakı biliklərimizin dairəsi və həcmi genişləndikcə, saxlanma qanunlarına, o cümlədən enerjinin saxlanması qanununa, təcrübələrdən çıxarılmış prinsiplər olmaqla, vaxtaşırı yenidən baxmaq lazım gəlir.

GERMAN LÜDVİQ FERDİNAND FON HELMHOLTS

Sonuncu ensiklopedist, alim-universallardan biri olan German Lüdviq Ferdinand fon Helmholts (1821-1894) praktiki tibbin, anatomiyanın, fiziologiyanın, optikanın, akustikanın, hidrodinamikanın, istilik fizikasının inkişafına böyük pay vermişdir. Onun Potsdam gimnaziyasında alman və qədim yunan ədəbiyyatından dərs deyən atası uşaqlarında musiqiyə, rəssamlığa və bədii ədəbiyyata qarşı məhəbbət oyatmağı bacarmışdı. Gələcək təbiətşünas məktəb illərində fəza obrazlarını dərk etməyə qarşı müstəsna qabiliyyətilə və pərakəndə, daxili əlaqələrdən məhrum faktlara qarşı isə zəif yaddaşı ilə müəllimləri valeh edirdi. Gimnaziyanın yuxarı siniflərində Helmholts əsas diqqətini dillərə və poeziyaya ayırırdı. Sonralar alim xatırlayırdı: "Mən böyük sənətkarların şeirlərini çox asanlıqla yaddaşımda saxlayırdım, ikinci dərəcəli sənətkarların bəzi süni şeirlərini isə elə də yaxşı yox. Mən fikirləşirəm ki, bu, yaxşı şeirlərdə fikrin təbii axınından asılı idi və bunda estetik gözəlliyin mühüm kökünü görməyə meyilliyəm... İnsana nə asan başa gəlirsə, onunla da daha həvəslə məşğul olur; ona görə də başlanğıcda mən poeziyanın bu cür böyük pərəstişkarı idim". Lakin artıq gimnaziyanı qurtararkən, Helmholtsda elmi-təbii maraqlar formalaşmışdı.

1838-ci ildə o, Berlində Fridrix Vilhelm Hərbi-Tibb İnstitutuna daxil oldu. Təhsil haqqı alınmırdı, ancaq məzunlar zabit rütbəsi alırdılar və orduda tam bir müddət – 25 il xidmət etməyə borclu idilər. Helmholtsda tədqiqatçı-alim istedadı xidmətin ilk illərindəcə elə parlaqlıqla özünü büruzə verdi ki, ona – nadir hal idi! – istisna edildi: ordudan vaxtından əvvəl azad olmaq hüququ verdilər.

Hələ institutda oxuyarkən 1841-ci ilin qışında Helmholts Berlin universitetinin professoru İohann Müllerin rəhbərliyi altında onurğasızların əsəb sisteminin öyrənilməsinə başladı və anatomik kəşf etmiş oldu: müəyyən etdi ki, əsəb telləri öz başlanğıcını əsəb düyünlərindən – qanqliləndən götürür. 1842-ci ilin noyabrında Helmholts "Onurğasızların əsəb sisteminin quruluşuna dair" doktorluq dissertasiyası müdafiə etdi. Kral qvardiyasında cərrah vəzifəsini alan və Potsdamda yerbəyer olan Helmholts alayın tövləsində elmi-tədqiqat laboratoriyası qurdu. Burada o, qıcqırma və çürümə proseslərini öyrənirdi. Xüsusilə iki sual onu daha çox maraqlandırırdı: bu zaman enerji çevrilməsi və mikroorqanizmlərin öz-özünü törətməsi necə baş verir. 1846-cı ilin fevralında Helmholts özünəməxsus ciddiliklə əzələlərin fəaliyyətinin energetikasını sistematik öyrənməyə başladı. 1846-cı ilin aprelində özünün "1845-ci il üçün fizioloji istilik hadisələri nəzəriyyəsinin xülasəsi" referatını "Fizikanın nailiyyətləri" Berlin jurnalına göndərdi.

Mayerin və Coulun işləri haqqında heç nə bilməyən Helmholts son dərəcə gözəl intuisiya ilə o dövrün ən mühüm elmi problemini – enerjinin saxlanması qanununu qabaqcadan duymuşdu.

Əzələlərin fəaliyyətinin energetikasının tədqiqini dayandıraraq, 1847-ci ilin fevralında o, "Qüvvənin saxlanmasına dair" klassik işinin ilk variantını başa çatdırdı. Tədqiqatın ilkin xarakterinə baxmayaraq, professor Müllerin tələbəsi Dyuba-Reymon bu memuarı "böyük tarixi əhəmiyyətə malik sənəd" kimi xarakterizə etdi. Xeyirxah rəydən ruhlanan Helmholts 1847-ci il iyulun 23-də Berlin fizika cəmiyyətinin iclasında "Qüvvənin saxlanmasına dair" məruzə etdi, burada enerjinin saxlanması qanununun mövcudluğunu sübut etdi və potensial enerji anlayışını elmə daxil etdi. Çox sonralar o xatırlayırdı: "...mən fizioloqların xeyrinə olaraq yalnız faktlara tənqidi qiymət vermək və onları sistemləşdirmək niyyətində idim... Əgər məlumatlı insanlar nəhayət mənə "Axı bu bizə əla məlumdur! Bu şeylər haqqında bu cür ətraflı danışmaqla gənc həkim nə istəyir?" deyəydilər, mənim üçün gözlənilməz olmazdı. Fizika sahəsində mənim təmasda olduğum avtoritetlərin məsələyə tamamilə başqa cür baxmaqları məni təəccübləndirirdi. Onlar qanunun doğruluğunu rədd etməyə meyilli idilər; Hegelin natural fəlsəfəsilə onların apardıqları qısqanc mübarizə şəraitində mənim işim də fantastik mücərrəd mühakimə hesab edildi. Yalnız riyaziyyatçı Yakobi mənim mühakimələrimlə keçən əsrin riyaziyyatçılarının fikirləri arasında əlaqəni etiraf etdi, mənim təcrübəmlə maraqlandı və məni anlaşılmazlıqdan qorudu. Digər tərəfdən, mənə öz gənc dostlarımın, xüsusən də Dyubua-Reymonun qızğın tərifini və praktiki köməyini hiss etdim. Onlar təzəcə yaranmış Berlin Fizika Cəmiyyətinin üzvlərini tezliklə mənim tərəfimə cəlb etdilər".



Anatomiyadan dərs dediyi Berlin Rəssamlıq Akademiyasında bir il olduqdan sonra, Helmholts Königsberq universitetinin fiziologiya və ümumi patalogiya professoru oldu (1849-1855-ci illər). Burada o, əsəb impulsunun yayılma sürətini öyrənməklə məşğul idi. 1847-ci ildə Leyden bankası boşalmasının rəqsi xarakterini aşkar etdi, 1869-cu ildə isə induktivlikdən və tutumdan ibarət ilk rəqs konturu qurdu. 1855-ci ildən 1858-ci ilə qədər Helmholts Bonn universitetinin anatomiya və fiziologiya professoru oldu. 1852-ci ildə o, akustika sahəsində tədqiqatlara başladı və eksperimental olaraq kombinasion tonların mövcudluğunu aşkar etdi. 1858-ci ildə alim musiqi harmoniyasının fiziki əsasları haqqında fundamental əsər nəşr etdirdi. Həmin ildə də Helmholts Heydelberq universitetinin fiziologiya kafedrasının professoru oldu, burada o vaxtlar artıq Robert fon Bunzen və Qustav Kirxhof işləyirdilər. 1859-cu ildə Helmholts iki iş çap etdirdi: səslilərin tembri və ya keyfiyyəti haqqında və orqan borularında havanın rəqsləri haqqında. Üç il keçdikdən sonra o, "Səsin qavranılması" kapital əsərini nəşr etdirdi. Burada o, eşitmənin fiziologiyasına aid öz tədqiqatlarına yekun vurdu. Alimi idrak nəzəriyyəsi, həndəsə aksiomlarının mənşəyi, hidrodinamika (Helmholts burulğanları) və elektrodinamika maraqlandırırdı, həm də bu problemlərin hər birinə aid o, tutarlı söz deməyə müvəffəq oldu.

1871-ci ildə Helmholts Berlin universitetinin fizika professoru, 1877-ci ildə isə onun rektoru oldu. 1887-ci ildə alimi Berlinin yaxınlığında Şarlottenburqda yenicə təşkil olunmuş Fizika-Texnika İnstitutunun prezidenti təyin edilər.

German Lüdviq Ferdinand fon Helmholtsun çoxsaylı fəxri vəzifələrini və mükafatlarını çoxdan unutmuş nəsillər, onun adını – Vahid Biliyin sonuncu qoruyucularından və çoxaldıcılarından birinin adını çəkirlər.

ENTROPİYA

İSTİLİYİN KEYFİYYƏTİ NƏDİR

İndiyədək haqqında danışdığımız anlayışlar, hər necə olursa olsun, hamıya tanışdır. Hər halda, hər kəs deyə bilər ki, o, istilik, temperatur, təzyiq, enerji haqqında bilir və ya fikirləşir. Ancaq, əgər "hər yetəndən" entropiyanın nə olduğunu izah etməyi xahiş etsək, onda o, söhbətin nədən getdiyini sadəcə başa düşə bilməz. "Entropiya" anlayışı nə bildirir? Ümumiyyətlə, nə vaxt və hansı məqsədlə onu elmə daxil etmişlər?

Bu söz "trope" – "çevrilmə" yunan sözündən törəmişdir. Onu 1865-ci ildə Klauzius, özünün 1850-ci ildə "istilik özbaşına soyuq cisimdən isti cismə keçə bilməz" hökmünü riyazi ifadə etməyə çalışarkən, daxil etdiyi S funksiyasının fiziki mənasını anlayan vaxt daxil etmişdir. O, özünün istilik nəzəriyyəsində ikinci prinsipini yuxarıdakı kimi ifadə etmişdi, birinci prinsip isə onun üçün enerjinin saxlanması və çevrilməsi prinsipi idi.

Lakin Klauzius nəzəriyyəni boş yerdən yox, Karnonun gözəl əsərini yenidən mənalandırmaqla qurardu. Karnonun istilik nəzəriyyəsi iki müddəaya əsaslanırdı: 1) istilik maddidir və onun miqdarı saxlanır (saxlanma prinsipi); 2) sabit temperaturda istilikdən iş almaq olmaz: istiliyi daha aşağı temperatura qədər "düşməyə" məcbur etmək lazımdır (istiqamətlilik prinsipi). Klauziusda da iki prinsip – saxlanma və istiqamətlilik prinsipləri var idi. İndi istilik yox, ancaq tam enerji saxlanırdı, çünki enerjinin saxlanması qanununa görə, istiliyin özü işə çevrilə bilərdi. O ki qaldı istiqamətlilik prinsipinə, ilk baxışda o, Karnoda olduğu kimi deyil. Lakin onların ekvivalentliyini sübut etmək olar. Nəzəriyyəni quruluşunu saxlayaraq, lakin onun mahiyyətini prinsipial dəyişərək Klauzius Karno nəzəriyyəsindəki bəzi uyğunsuzluqları aradan qaldırdı və onun ideyasını tam fiziki aydınlığa çatdırdı.

Məsələn, Karno deyirdi ki, istilik maşınında T_1 temperaturunda buxar Q_1 istiliyini udur, T_2 temperaturunda isə həmin istiliyi verir. Bu zaman o fərz edirdi ki, istilik nə cürsə dəyişir, çünki müxtəlif temperaturlarda müxtəlif keyfiyyətə malikdir. Karno hesab edirdi ki, termogenin miqdarı saxlanır, iş isə yalnız onun müxtəlif temperaturlar arasında "düşməsi" hesabına görülür. Lakin bax, "düşəndən" sonra termogen əvvəlki olaraq qalır, ya yox? İndi məlumdur ki, termogen yoxdur və istilik miqdarı saxlanmır, çünki onun bir hissəsi işə çevrilir. Lakin Karnonun dövründə enerjinin saxlanması qanununu hələ bilmirdilər. Bununla belə, alim mühakimələrin məhz bu yerində müəyyən uzlaşmazlıq hiss etmişdi: əgər ki, Q_1 heç nə ilə Q_2-dən fərqlənmirsə, onda nəyin hesabına iş görülür?

Nə maşının iş prinsipindən, nə də onun işçi maddəsindən asılı olmayan universal funksiya həmişə, T_1 temperaturunda Q_1 istiliyinin udulduğu, T_2 temperaturunda isə Q_2 istiliyinin verildiyi hər yerdə meydana çıxır, həm də bütün proseslər dönən olaraq baş verir. Hər hansı bir maşın və ya sistem (model) üçün tapılmış bu funksiya, eyni istilik parametrlərinə malik olan digər sistemlər üçün də eyni cür olacaqdır. İdeal qaz modeli götürmək daha sadədir. Klauzius belə də etdi. Məlum oldu ki, universal funksiya Q/T şəklinə malikdir.

RUDOLF KLAUZİUS

Hətta təbiətşünaslığın tarixinə yaxşı bələd olan insan da, yəqin ki, Rudolf Yulius Emanuel Qottlib kimdir və fizika elminin inkişafına onun verdiyi pay nədir sualına cavab verə bilməz. Bununla belə, söhbət termodinamikanın və qazların kinetik nəzəriyyəsinin yaradıcılarından biri olan və hansısa səbəbdən özünə latınlaşdırılmış təxəllüs seçmiş Rudolf Yulius Emanuel Klauzius (1822-1888) haqqında gedir. 1848-ci ildə Berlin universitetini bitirən Klauzius sonra Sürix Politexnik İnstitutunun (1855-ci ildən), Vyursburq (1867-ci ildən) və Bonn (1869-1888-ci illər) universitetlərinin professoru olmuşdur. Bonnda fizika kafedrası üzrə onun davamçısı Henrix Hers oldu.

Bizim dövrdə buxar maşınlarını (çox vaxt onların ancaq maketlərini) yalnız muzeylərdə görmək olar, lakin XIX əsrdə onlar əsas enerji mənbələri olmuşlar. Bu mexanizmlərin təkmilləşdirilməsi üzərində ixtiraçıların, mühəndislərin və alimlərin – praktiklərin və nəzəriyyəçilərin bütöv bir ordusu çalışırdı. Onların arasında fəxri yeri Rudolf Klauzius tutur, onun payı mühüm, lakin buxar maşınının FİƏ artırmaq kimi dar bir texniki məsələnin həllindən xeyli böyükdür. O, yeni elmin – termodinamikanın yaradıcılarından biri oldu.

1850-ci ildə Klauzius istiliklə görülən iş arasındakı münasibəti (istiliyin mexaniki ekvivalentini) müəyyən edərək, enerjinin saxlanması qanununu – termodinamikanın Birinci başlanğıcını dəqiq ifadə etdi.

Həmin 1850-ci ildə o, texniki termodinamikanın yaradıcısı Uilyam Rankindən asılı olmadan, buxar maşınının ideal termodinamik tsiklini (*Rankin-Klauzius tsikli*) çıxardı, birinci olaraq, su buxarının termodinamik xassələrini tədqiq etdi (1851-ci il). Sonralar (1856-cı il) Klauzius işçi cismin temperaturunu artırmaq hesabına buxar maşınının FİƏ-ni yüksəltməyin üsulunu təklif etdi.



Termodinamik hadisələrin tədqiqilə məşğul olan alim belə nəticəyə gəldi ki, onları təsvir etmək üçün termodinamikanın Birinci başlanğıcı kifayət deyil: termodinamik proseslərin hansı istiqamətdə inkişaf etdiyini təyin etməyə imkan verən daha bir qanun da lazımdır. 1854-cü ildə o, aksiom qəbul etdi: istilik özbaşına daha soyuq cisimdən daha isti cismə keçə bilməz. Başqa (ekvivalent) ifadəsi Tomsona məxsusdur: ikinci növ daimi mühərrik, yəni fəaliyyəti enerjinin saxlanması qanununu pozmayan, lakin bütün istiliyi tamamilə mexaniki işə çevirməyə imkan verən mühərrik qurmaq olmaz. Bu iddiaya əsaslanaraq və yeni fiziki kəmiyyət – entropiya daxil edərək, Klauzius termodinamikanın İkinci başlanğıcını bərabərsizlik şəklində ifadə etdi. Klauziusun bərabərsizliyi (1862-ci il) belədir: qapalı sistemin (ətraf mühitlə nə maddə, nə də enerji mübadiləsi etməyən) entropiyası azalmır. Əgər proses dönəndirsə, onda entropiya sabit qalır, əgər proses dönməyəndirsə, onda entropiya artır. Beləliklə, entropiyanın dəyişməsi prosesin hansı istiqamətdə gedəcəyini göstərir.

Klauzius qazların kinetik nəzəriyyəsinin işlənib hazırlanmasına xeyli böyük töhfə vermişdir. "Fizikanın salnamələri" jurnalında çap olunmuş (1857-ci il) "Bizim istilik adlandırdığımız hərəkətin növü haqqında" işində o, qazın hal tənliyini çıxardı

$$pV = \frac{Nmu^2}{3},$$

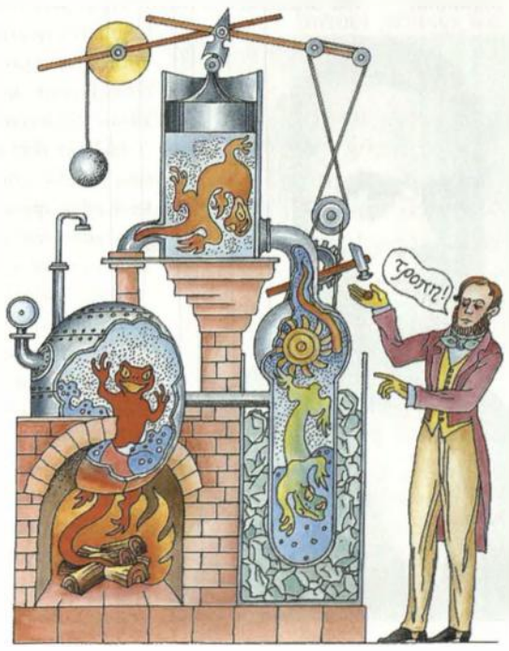
burada u – qaz zərrəciklərinin sürətlərinin orta qiyməti, p – təzyiq, V – həcm, N – zərrəciklərin sayı, m – zərrəciklərin kütləsidir. Klauzius müəyyən etdi ki, qazın təzyiqi onun molekullarının yalnız irəliləmə hərəkətindən asılıdır və irəliləmə hərəkətinin kinetik enerjisinin zərrəciyin tam kinetik enerjisinin hansı hissəsini təşkil etdiyini tapdı. O, sərbəst qaçış yolunun orta uzunluğu (iki ardıcıl toqquşma arasındakı məsafə) anlayışını elmə daxil etdi və molekulların qeyri-adi böyük sürətlərilə (hidrogen üçün 1800 m/san-yə yaxın) difuziyanın kiçik sürəti arasındakı zahiri ziddiyyəti həll etdi.

1870-ci ildə Klauzius zərrəciklərin orta kinetik enerjisilə, onlar arasında təsir edən qüvvələrin əlaqəsini müəyyən edən və *virial teoremi* adlanan teorem isbat etdi.

Klauziusun işləri məsələnin qoyuluşunun aydınlığı, fiziki ideyaların dərinliyi və onların şərhinin riyazi dəqiqliyilə fərqlənir. O, nəzəri olaraq, Coul-Lens qanununu əsaslandırdı (1853-cü il), elektrolitik dissosiyasiya nəzəriyyəsinin əsaslarını işləyib hazırladı (1857-ci il) və O.Mossotidən asılı olmadan, dielektrik nüfuzluğu ilə dielektrikin polyariziyası arasındakı asılılığı aşkara çıxardı (Klauzius-Mossoti düsturu, 1879-cu il).

Aydın oldu ki, bu funksiya nəinki yalnız universaldır, həm də halın funksiyasıdır və dönən tsikldə istilik yox, məhz o saxlanır. Başqa sözlə, Karno tsiklində qızdırıcıdan alınmış Q_1/T_1 kəmiyyəti soyuducuya verilmiş Q_2/T_2 kəmiyyətinə bərabərdir, yəni $Q_1=Q_2$ münasibəti yox, $Q_1/T_1=Q_2/T_2$ münasibəti ödənir. Bu bərabərliyin fiziki mənasını aydınlaşdırmaq üçün Klauzius əvvəlcə müxtəlif temperaturlu bir neçə Karno tsiklindən ibarət olan prosesləri tədqiq etdi; sonra temperaturun dəyişməsi və istiliyin udulması eyni zamanda baş verən daha mürəkkəb proseslərə baxdı. O, bu prosesləri elementar sonsuz kiçik tsikllərə böldü, onların işinin nəticələrini topladı və nəhayət sübut etdi ki, istənilən, nə qədər mürəkkəb olur olsun, tsiklik dönən proses üçün Q/T kəmiyyətlərinin cəmi, istiliyin işarəsi nəzərə alınmaqla (alınan – müsbət işarə ilə, verilən – mənfi işarə ilə), sıfıra bərabər olur:

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$$



və ya inteqral formada

$$\int \frac{\delta Q}{T} = 0. \qquad (1)$$

Burada δQ istiliyin diferensialı yox, kiçik dəyişməsidir, çünki Q hal funksiyası deyil, hal funksiyasını diferensiallamaq olardı.

Riyaziyyatda məlumdur ki, əgər qapalı yol üzrə inteqral sıfıra bərabərdisə, onda inteqral işarəsi altındakı ifadə hər hansı bir funksiyanın tam diferensialıdır. Yox əgər yol qapalı deyilsə, onda inteqral yolun formasından asılı deyil, yalnız başlanğıc və son nöqtələrdən asılı olur. Deməli, tam diferensial işarəsi altındakı funksiya hal funksiyasıdır. (1) inteqralı və bu inteqral işarəsi altında olan $\delta Q/T$ kəmiyyəti verilən şərtləri ödəyir. Ona görə də $\delta Q/T$ müəyyən bir funksiyanın tam diferensialı olmalıdır (Klauzius onu S ilə işarə etdi):

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \qquad (2)$$

Beləliklə, İkinci başlanğıcın daha bir riyazi ifadəsi alındı:

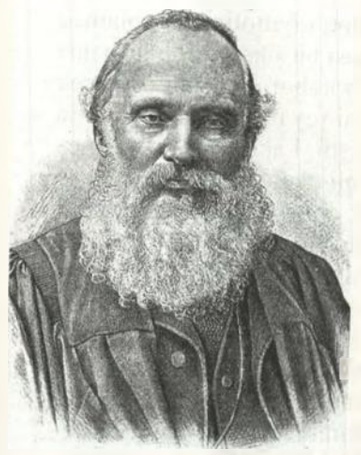
$$\delta Q = TdS, \qquad (3)$$

lakin artıq diferensial ifadə, yəni prosesi kiçik miqyasda təsvir edən ifadə. (2) tənliyinin mənası ondan ibarətdir ki, sistemə kiçik δQ istilik miqdarı verildikdə, S funksiyasının qiyməti $\delta Q/T$ qədər artır. Lakin bu funksiyanın fiziki mənası, əvvəlki kimi, aydın deyildir. Doğrudur, S funksiyasının xassələri haqqında dərhal nəsə demək olar.

ENTROPİYANIN XASSƏLƏRİ VƏ ÜÇÜNCÜ BAŞLANĞIC

Birincisi, (2)-ni tsiklin ixtiyari verilmiş iki nöqtəsi arasında inteqrallamaqla S-in dəyişməsini, yəni ΔS-i tapa bilərik; a halında b halına keçid zamanı:

UİLYAM TOMSON, LORD KELVİN



Yüzilliklərin ərəfəsində yekun vurmaq qəbul olunmuşdur. Riyaziyyatçılar bunu Parisdə II Beynəlxalq riyazi konqresdə (1900-cü il) yerinə yetirdilər, burada ilə David Hilbert məruzə çıxış etdi. Böyük alim 23 problem söylədi və onun hesab etdiyi kimi, XIX əsr bu problemləri XX əsrə vəsiyyət etdi.

Fiziklərdə buna bənzər heç nə baş vermədi: əksəriyyətin fikrinə görə, Nyuton mexanikasına əsaslanan klassik mexanika ətraf aləmi, demək olar, tam izah etməyə imkan verirdi. Şəxsi təcrübə və görkəmli alim-müasirlərin nüfuzu bunu sübut edirdi. Onlardan biri, ingilis fiziki Uilyam Tomson (1824-1907) iddia edirdi: "Mənə nə qədər ki, tədqiq olunan hadisənin mexaniki modelini qurmaq müyəssər olmur, mən heç vaxt məmnunluq hissi duymuram. Əgər belə model qurmaq mənə nəsib olarsa, onda mən öyrənilən mövzunu başa düşürəm, əks halda, başa düşmürəm. Məhz buna görə, mən işığın elektromaqnit nəzəriyyəsini heç cür başa düşə bilmirəm. Mən işığı nə qədər mümkündürsə, bir o qədər tam başa düşmək istərdim, özü də mənim daha az başa düşdüyüm bir şey daxil etmədən. Məhz ona görə, mən sadə dinamikanın tərəfdarıyam, çünki münasib modeli elektromaqnit nəzəriyyəsində yox, onda tapa bilərəm".

Uilyam Tomson ibtidai təhsilini riyaziyyat professoru Ceyms Tomsonun rəhbərliyi altında almışdır. 1834-cü ildə Uilyam Qlazqo universitetinə daxil oldu, oradan da Kembric universitetinin Müqəddəs Petr (Piterhaus) kollecinə keçdi. Universiteti qurtaran kimi (1845-ci il) gənc bir neçə ay Parisdə Anri Viktor Renonun laboratoriyasında elmi təcrübə keçdi. Artıq 22 yaşında Tomson Qlazqo universitetinin natural fəlsəfə, yəni fizika doktoru idi. O, istefaya gedənə qədər (1899-cu il) bu vəzifəni tutdu. Tomson Qlazqoda Böyük Britaniyada ilk fiziki laboratoriyanı təşkil etmişdi (1846-cı il).

Tomson öz dövrünün aparıcı fiziklərindən biri idi. Onun apardığı təcrübələr istiliyin dinamik nəzəriyyəsini qurmağa imkan verdi. Bu nəzəriyyə, o vaxtlar bir-birinə zidd kimi görünən Sadi Karnonun yanaşması ilə Ceyms Coulun yanaşmasını barışdırdı. Termodinamikanın təməl prinsipləri Tomsonun (Kelvinin; 1848-ci il), mütləq temperaturlar şkalasına və onun tapdığı enerjinin dissipasiyası (səpilməsi) prinsipinə əsaslanır. 1851-ci ildə P.Klauziusdan asılı olmadan, termodinamikanın ikinci başlanğıcını ifadə edən Tomson ("yeganə nəticəsi istilik rezervuarının soyuması hesabına görülən mexaniki iş ola biləcək proses təbiətdə mümkün deyil") istifadə etmək üçün əlverişli olan enerji nəzəriyyəsini işləyib hazırladı.

1853-1854-cü illərdə Tomson Coulla birlikdə müəyyən etdi ki, qazı drosselləşdirəndə onun temperaturu ya yüksəlir (*müsbət Coul-Tomson effekti*), ya da enir (*mənfi effekt*). 1856-cı ildə o, aşkar etdi ki, naqildən cərəyan keçəndə istilik ya ayrılır, ya da udulur (Coul istiliyilə yanaşı). Bu hadisəni *Tomson effekti* adlandırırlar. 1870-ci ildə alim göstərdi ki, doymuş buxarın elastikliyi maye səthinin formasından asılıdır.

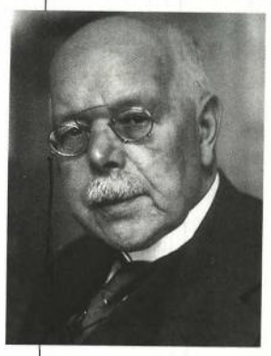
Tomson elektrik rəqslərinin ilkin şərtlərini yaradaraq (1853-cü il), məftilsiz teleqrafiyanın təməlini qoydu. 1854-cü ildən başlayaraq alim transatlantik teleqraf kabelinin çəkilişinə aid işlərə çox diqqət yetirdi. Teleqraf rabitəsinin praktiki həyata keçirilməsində Tomsonun yalnız nəzəri tədqiqatları yox, həm də onun texniki ixtiraları mühüm rol oynadı (siqnalların retranslyatoru, yüksək keçiriciliyə malik mis məftildən istifadə, güzgü qalvanometri, kvadrat və mütləq elektrometrlər, teleqraf siqnallarının qəbulu üçün registrator və s.). 1856-cı ildə o, "Atlantik teleqraf K°"-ya başçılıq etdi, 1858-ci ildə isə "Aqamemnon" gəmisinin mühəndis-elektriki kimi okeanın dibi ilə ilk (uğursuz) kabel çəkiliş cəhdində iştirak etdi. Alim səkkiz il ərzində transatlantik teleqrafiya ilə bağlı yaranan müxtəlif elmi-texniki problemləri inadla aradan qaldırmışdır. Nəhayət, 1866-cı ildə tamamilə metaldan düzəldilmiş ilk nəhəng "Qreyt İstern" paroxodunda tarixi transatlantik kabel çəkilişini müşahidə etmişdir. Həmin ildə də, Amerikadan qayıdan kimi, Tomson zadəgan rütbəsinə yüksəldildi – ser Uilyam oldu. (1892-ci ildə Tomsona per rütbəsini hədiyyə etdilər – bundan sonra ona lord Kelvin Larqski adı verildi).

Tomsonu təkcə tətbiqi problemlər yox, həm də fundamental problemlər maraqlandırırdı. Ona maqnetizmin riyazi nəzəriyyəsinə, elastiklik nəzəriyyəsinə, efirin təbiətinə, atomların ölçüsünə aid və s. işlər məxsusdur. Alim elektrik ölçmələri üçün ümumi vahidlər sisteminin daxil edilməsinin möhkəm əqidəli tərəfdarı olmuşdur.

Lord Kelvinin məruzələri, məqalələri, tədqiqatları, praktiki və mühəndis fəaliyyəti (o, bir çox patentin müəllifi olmuşdur) fiziklər nəsli üçün ilham mənbəyinə çevrilmişdir. Məşhur Baltimor mühazirələrində alim uzaqgörənliklə klassik fizikanın açıq üfüqündə olan iki buludcuq haqqında danışırdı; onların birindən sonralar nisbilik nəzəriyyəsi, digərindən isə kvant mexanikası doğdu.

$$\Delta S = S_b - S_a = \int_a^b \frac{\delta Q}{T}. \qquad (4)$$

S-in mütləq qiymətini hesablamaq üçün, hər hansı bir fiksə olunmuş halda onun nəyə bərabər olduğunu bilmək lazımdır. Eyni şey mütləq temperaturla da baş vermişdi. Lakin mütləq temperaturdan fərqli olaraq, S funksiyası ölçüyə gəlmir: onu ancaq hesablayırlar.

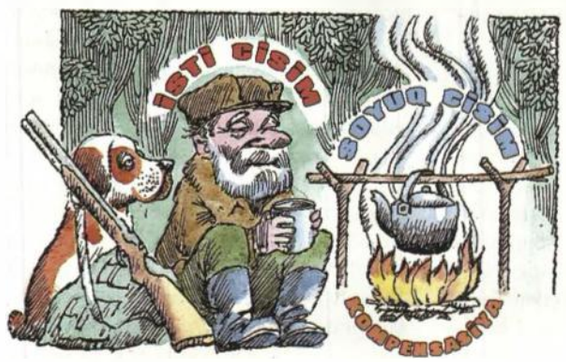


V.F.Nernst.

1906-cı ildə (S funksiyasının mənasını artıq aydınlaşdırmış və onu *entropiya* adlandırmışdılar) alman fiziki Valter Fridrix German Nernst (1864-1941) fərziyyə irəli sürdü ki, temperaturun mütləq sıfırında S funksiyasının da qiyməti sıfıra bərabərdir. İstənilən temperaturda S-i hesablamaq imkanı yarandı. O vaxtdan bu müddəa Nernst teoremi və ya termodinamikanın Üçüncü başlanğıcı adlanır. Üçüncü başlanğıc öz təbii izahını sonralar – kvant mexanikası çərçivəsində aldı: temperaturun mütləq sıfırında cisim yalnız bir halda olmağa qadirdir və buna görə də entropiya (hallar sayının və ya cismin "xaotiklik" dərəcəsinin loqarifmi kimi) sıfıra bərabər olur. İkincisi, dönməyən tsikllər üçün (4) bərabərliyi bərabərsizliyə çevrilir:

$$\Delta S = S_b - S_a > \int_a^b \frac{\delta Q}{T}.$$

Qapalı tsikl halında bu inteqral sıfıra çevrilir, ona görə də qapalı dönməyən



proses üçün həmişə ΔS sıfırdan böyükdür. Nəticədə istənilən tsiklik proseslər üçün termodinamikanın İkinci başlanğıcı daha ümumi forma alır:

$$\Delta S \geqslant 0,$$

həm də bərabərlik yalnız dönən proseslər üçün ödənir.

Yuxarıda verilən bütün xassələr S funksiyasının fiziki yox, riyazi xarakteristikalarıdır.

Hər hansı kəmiyyətin fiziki mənasını başa düşmək ümumiyyətlə nə deməkdir? Yəqin onu hər hansı bir fiziki proseslə və ya maddi obyektlə əlaqələndirmək lazımdır. Klauzius bu cür əlaqəni axtarmağa başladı. Karnodan fərqli olaraq, o başa düşürdü ki, tsiklik prosesdə, sanki, iki çevrilmə var: 1) istiliyin işə (və əksinə) və 2) bir temperaturdakı istiliyin başqa temperaturdakı istiliyə çevrilməsi. Alim belə nəticəyə gəldi: "İkinci başlanğıc bu iki çevrilmə arasındakı münasibəti ifadə etməlidir".

İkinci başlanğıcın sözlə üç müxtəlif ekvivalent deyilişi var; bunlar istiliyin üç müxtəlif nəzəriyyəsinin müəlliflərinə – S.Karnoya, R.Klauziusa və U.Tomsona məxsusdur. İkinci başlanğıcın riyazi ifadəsi isə yeganədir və bu, onların istənilən birindən nəticə kimi alınır.

"Hərəkətverici qüvvə doğurmaq üçün istilik yaratmaq kifayət deyil: onu həm də hasil etmək lazımdır" (S.Karno).

"Cansız maddi fəaliyyətçinin köməyilə hər hansı maddə kütləsindən, onu ətrafdakı cisimlərdən ən soyuğunun temperaturundan aşağı temperatura qədər soyutmaq yolu ilə mexaniki iş almaq mümkün deyil" (U.Tomson).

"İstilik özbaşına daha soyuq cisimdən daha isti cismə keçə bilməz" və ya "İstiliyin daha soyuq cisimdən daha isti cismə keçidi kompensasiyasız mümkün ola bilməz" (R.Klauzius).

"DÜNYANIN ŞAHI" KİMDİR, "KÖLGƏSİ" KİM

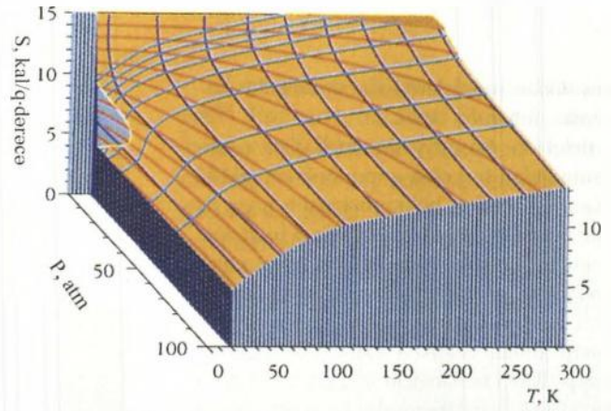
İkinci başlanğıcın mühüm nəticələrindən biri ondan ibarətdir ki, iş və istilik, onların tsiklik proseslərdə qarşılıqlı çevrilməsi zamanı bərabərhüquqlu deyil. Nəticə olduqca gözlənilməzdir, çünki termodinamikanın Birinci başlanğıcı baxımından enerji mübadiləsinin hər iki üsulu ekvivalentdir. İkinci başlanğıca görə isə, işin istiliyə tam keçidi mümkündür, bax əks keçid isə yalnız qismən mümkündür, labüd kompensasiya ilə. Obrazlı desək, W işi sərbəst konversiya olunan və dəqiq müəyyən olunmuş kurs üzrə istənilən başqa valyutaya dəyişdirilən dünya valyutasına, Q istilik miqdarı isə məhdud oblastda işlənən və W ilə məcburi vergi ödəməklə mübadilə edilən yerli valyutaya bənzəyir.

Hər iki növ hərəkətin: nizamlı və nizamsız hərəkət növlərinin müxtəlif xarakterini nəzərə alsaq, işlə enerjinin bərabərhüquqlu olmamaları aydın olacaqdır. Birinci qalıqsız ikinciyə keçə bilər, bax ikinci isə birinciyə yalnız qismən keçə bilər. Başqa sözlə, enerji mübadiləsinin müxtəlif formaları arasında bir növ iyerarxiya mövcuddur: hər bir mübadilə formasına müəyyən bir keyfiyyət uyğundur. İkinci başlanğıcın bütün ifadələri bu keyfiyyətin, hətta ideallaşdırılmış dönən proseslərdə də, azaldığının qaçılmaz olduğunu deyir.

Beləliklə, bəşəriyyətin ən başlıca problemlərindən biri olan enerji böhranı faktiki olaraq entropiya böhranına gəlib çıxır. İş onda deyil ki, enerji azdır (Birinci başlanğıc enerjinin saxlanmasına ciddi nəzarət edir), ondadır ki, enerjinin keyfiyyəti İkinci başlanğıca görə, durmadan azalır, ondan faydalı enerji almaq getdikcə çətin olur. Bundan başqa, İkinci başlanğıcın haqqı ətraf mühitin labüd istilik çirklənməsidir; bir qayda olaraq ətraf mühit təbii soyuducu vəzifəsini yerinə yetirir (buradan parnik effekti və digər qlobal ekoloji problemlər ortaya çıxır).

Alman fiziki Arnold Zommerfeld maraqlı bir müqayisə göstərmişdi: "Mən tələbə olarkən, F.Valdanın "Dünyanın şahı və onun kölgəsi" kiçik kitabını fayda almaq üçün oxudum. Burada enerji və entropiya nəzərdə tutulurdu. Daha dərindən dərk edərək, mən belə nəticəyə gəldim ki, onların yerini dəyişmək lazımdır. Təbii proseslərin nəhəng fabrikində entropiya prinsipi direktor yerini tutur, bu direktor bütün sazişlərin növünə və gedişinə dair sərəncam verir. Enerjinin saxlanması qanunu yalnız mühasib rolunu oynayır, debeti krediti tarazlığa gətirir".

Daha sonra Klauzius bütün çevrilmələri vahid baxımdan, bir funksiyanın – universal Q/T funksiyasının köməyilə təsvir etməyi təklif etdi. Bu funksiyanı o, *çevrilmələrin ekvivalenti* adlandırdı, İkinci başlanğıcı isə *çevrilmələrin ekvivalentliyi prinsipi* kimi ifadə etdi. Bu zaman Q temperaturunda T istiliyinin işə çevrilməsi (birinci növ çevrilmə) Q/T ekvivalentinə malikdir. T_1 temperaturunda Q istiliyinin T_2 temperaturunda istiliyə çevrilməsi (ikinci növ çevrilmə) $Q(1/T_2 - 1/T_1)$ ekvivalentilə təsvir olunur, yəni iki hissədən ibarətdir: T_1 temperaturunda Q istiliyinin işə çevrilməsi ninekvivalenti $(-Q/T_1)$, işin T_2 temperaturunda Q istiliyinə çevrilməsinin ekvivalenti Q/T_2-dir. Başqa sözlə, istiliyin və işin ikiqat çevrilməsi baş verir: əvvəlcə istilik işə, sonra isə, əksinə iş istiliyə çevrilir. (Bax gör, istiliyin keyfiyyəti necə dəyişirmiş!) Həm də hər şeyi birinci növ çevrilməyə – işin istiliyə və ya istiliyin işə çevrilməsinə gətirmək olur. (Xatırlayaq ki, Karnoda iş yalnız termogenin "düşməsi" hesabına, yəni ikinci növ çevrilmə yolu ilə görülürdü.) Həm də mexaniki enerji istiliyə tam keçə bilər, istilik enerjisi isə mexaniki enerjiyə yalnız qismən keçə bilər. Bu isə məhz İkinci başlanğıcdır.



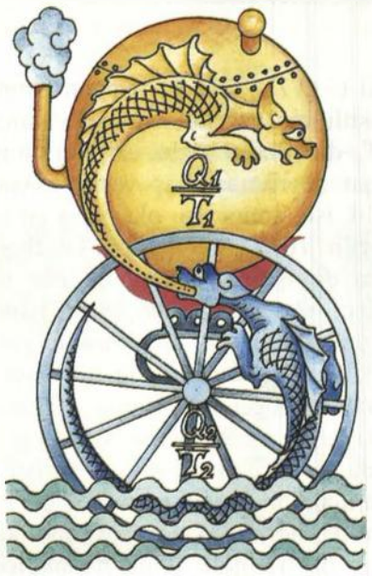
Hidrogen üçün Gibbsin termodinamik səthi.

Beləliklə, Klauzius müəyyən etdi ki, S kəmiyyətini işin, T temperaturunda istiliyə və əksinə T temperaturunda istiliyin mexaniki işə çevrilməsinin ekvivalenti kimi (S kəmiyyətinin öz işarəsindən asılı olaraq) başa düşmək olar. Ona görə də Klauzius onu entropiya – istiliyin və mexaniki işin qarşılıqlı çevrilməsini təsvir edən kəmiyyət adlandırdı. Termodinamika çərçivəsində qalmaqla, yəni sistemə kənardan baxmaqla, iki müxtəlif enerji növünün – istilik və mexaniki enerji növlərinin qarşılıqlı münasibətlərinə dair bundan artıq demək mümkün deyildir. Yox əgər sistemin daxili quruluşuna keçsək və istiliyə sistemi əmələ gətirən zərrəciklərin hərəkət növü (nizamsız hərəkət) kimi baxsaq, ondan istiliyin işə çevrilməsi molekulların xaotik hərəkətinin enerjisinin bütövlükdə sistemin işinə çevrilməsi olacaqdır və əksinə. Onda entropiyanı bu cür hərəkətin xaotiklik (və ya nizamsızlıq) dərəcəsi kimi başa düşmək lazımdır.

Termodinamikanın entropiya ilə bağlı olan qanunlarını nəhayət belə söyləmək olar:

İstənilən dönməyən prosesdə entropiya həmişə artır; dönən prosesdə isə sabit qalır: $\Delta S \geqslant 0$ (İkinci başlanğıc); mütləq temperaturu sıfıra yaxınlaşdıranda entropiya da sıfıra yaxınlaşır: $T \to 0$ olduqda, $S \to 0$ olur (Üçüncü başlanğıc).

Mütləq temperaturu universal Karno funksiyanın köməyilə bilavasitə ölçülə bilən istilik və işlə ifadə edərək, dolayı "ölçmək" olar. S funksiyasını hətta bu mənada da ölçmək olmaz, çünki o, istilik miqdarı (ölçülən kəmiyyətlə) və temperaturla (birbaşa ölçülə bilməyən kəmiyyətlə) ifadə olunur.





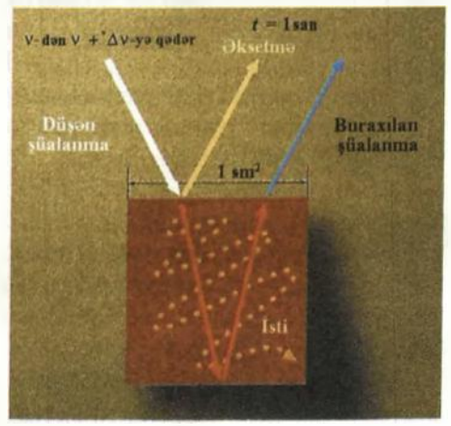
İSTİLİK ŞÜALANMASININ QANUNLARI

Hər kəs bilir ki, istənilən qızdırılmış cisim, məsələn, evdəki istilik batareyası kimi, istilik mənbəyidir. Yox əgər cisim həm də közərmişdirsə, onda o, elektrik lampasının teli kimi, işıq şüalandıra bilər. Dalğa təsəvvürləri əsasında desək, tədricən qızdırıldıqda cisim əvvəlcə istilik dalğaları – görünməyən infraqırmızı şüalar, sonra işıq dalğaları: qırmızı, narıncı rəngli şüalar, daha sonra spektr üzrə gələn digər şüaları buraxır. Məlum olduğu kimi, şəraitlər eyni olduqda şüalanmanın spektri cismi təşkil edən maddədən asılıdır. Eyni, lakin kifayət qədər yüksək temperatura qədər qızdırılmış iki, məsələn, daş və polad kürələrdən birincisi ikincisinə nisbətən daha parlaq işıq saçacaqdır. Bununla yanaşı, Qustav Kirxhofun müəyyən etdiyi kimi, qızdırılmış cisimlərin şüalanması onların təbiətindən, forma və ölçülərindən asılı olmayan ümumi qanunlara da tabedir.

Tutaq ki, hər hansı cismin üzərinə şüalanma düşür. Şüaların hansısa bir hissəsi istər-istəməz cismin səthindən əks olunur, qalan hissəsi isə onun daxilinə nüfuz edir: qismən udularaq istiliyə çevrilir, qismən də bir sıra əks olunmalardan sonra yenidən xaricə çıxır. Cismin üzərinə düşən bütün şüalanmanın ν-dan $\nu + \Delta\nu$-yə qədər tezliklər intervalına uyğun gələn və cismin daxilində qalaraq, istiliyə çevrilən hissəsi, həmin cismin verilmiş tezlik üçün *şüaudma qabiliyyəti* adlanır. Cismin 1 sm^2 səthindən 1 san-də buraxılan şüalanmaya *şüaburaxma* (və ya *şüalanma*) *qabiliyyəti* deyilir.

1859-cu ildə Kirxhof müəyyən etdi ki, istilik tarazlığı halında, cismin şüaburaxma və şüaudma qabiliyyətlərinin nisbəti şüalanmanın ancaq ν tezliyindən və mütləq T temperaturundan asılı olan universal $K(\nu,T)$ funksiyasıdır və bu, istənilən maddə və istənilən quruluşlu cisim üçün doğrudur (*Kirxhof qanunu*). Bu qanun termodinamikanın prinsiplərindən, o cümlədən ikinci növ daimi mühərrik qurmağın mümkünsüzlüyündən alınır (istiliyin soyuq cisimdən isti cismə keçməsi hesabına enerji almaq olmaz). Termodinamikanın qanunları kimi, Kirxhof qanunu da ümumi xarakter daşıyır. Beləliklə, $K(\nu,T)$ funksiyasının və ya onunla bağlı olan $u_\nu(T)=(8\pi/c)\cdot K(\nu,T)$ kəmiyyətinin aşkar şəklini tapmaq lazım idi: burada c – işığın vakuumdakı sürəti, u_ν – şüalanma enerjisinin vahid tezlik intervalına düşən sıxlığıdır (u_ν – verilmiş temperaturda şüalanma enerjisinin tezliklərə görə paylanmasını ifadə edir və *şüalanmanın spektral sıxlığı* adlanır). Bütün tezliklər üzrə u_ν-lərin cəmi enerji sıxlığını, yəni vahid həcmdəki şüalanmanın tam enerjisini verir.

Cismin udma qabiliyyəti o zaman maksimal olur ki, o öz üzərinə düşən enerjinin hamısını udsun. Kirxhofa görə, bu, məhz mütləq qara cisimdir. Bu anlayışı o, 1860-cı ildə elmə daxil etmişdi. Qara cismi divarları heç nə keçirməyən və bərabər qızdırılan içi



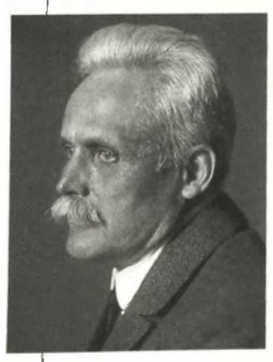


boş örtük şəklində hazırlamaq olar. Onun daxilində verilmiş temperaturda şüalanmanın dəfələrlə udulması və buraxılması nəticəsində istilik tarazlığı yaranır, yəni qara cisim şüalanması bərqərar olur. Bu örtüyün divarında kiçik deşik açsaq, onda oradan şüalanan enerji, verilmiş temperaturda məhz qara cismin şüalanması olacaqdır.

Məlum oldu ki, şüalanmanın spektral sıxlığını ölçmək xeyli çətindir. Bu məsələni ilk həll edənlərdən biri Amerika fiziki və astronomu Semuel Lenqli (1834-1906) olmuşdur. O, balometr adlanan xüsusi bir cihaz ixtira etdi



B.B.Qolitsın.



V.Vin.

və 1886-cı ildə hislə qaraldılmış mənbələrin istilik şüalanmasının spektrində uzaq infraqırmızı oblastda ($\lambda = 5{,}3$ mkm) enerjinin paylanmasına dair məlumatlar aldı. Həmin vaxtlarda da, Otto Riçard Lyümerin (1860-1925) rəhbərliyi altında alman fizik-eksperimentatorları mütləq qara cismin müxtəlif modellərini və şüalanmanın yüksək həssaslığa malik qəbuledicilərini işləyib hazırladılar ki, bu da ölçmələrin dəqiqliyini xeyli artırdı. 1896-cı ildə alman Vilhelm Vin (1864-1928), rusiyalı fiziklər V.A.Mixelsonun (1860-1927) və B.B.Qolitsının (1862-1916) aldığı nəticələr əsasında *yerdəyişmə qanununu* çıxardı. Vin göstərdi ki, qara cismin şüalanmasının spektral sıxlığı maksimuma malik olmalıdır və bu maksimuma uyğun gələn dalğa uzunluğu cismin mütləq temperaturu ilə tərs mütənasibdir. Yerdəyişmə qanunundan istifadə edərək, şüalanma enerjisinin tezliklərə (və ya dalğa uzunluqlarına) görə paylanma əyrisini ölçməklə cismin temperaturunu təyin etmək olar. Məsələn, Günəşin temperaturu bu cür müəyyən olunmuşdur, təcrübəli poladəridənlər isə ərimiş metalın rənginə görə onun temperaturunu bilirlər.

Vinin yerdəyişmə qanunu

$$\lambda_m T = b,$$

burada $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ m·K – Vin sabiti, λ_m – şüalanma spektrində maksimuma uyğun gələn dalğa uzunluğudur. Əlamətdardır ki, b-ni üç fundamental sabitlə ifadə etmək olar: $b = hc/k$, burada c – işıq sürəti, k – Bolsman sabiti, $\hbar$ fizikada Vin qanununun kəşfindən yeddi il sonra daxil edilmiş Plank sabitidir.

"ULTRABƏNÖVŞƏYİ FƏLAKƏT"

Şüalanmanın spektral sıxlığı üçün Vin aşağıdakı empirik düsturu təklif etmişdir

$$u_\nu(T) = a\nu^3 e^{-b\nu/T}, \qquad (1)$$

burada a və b – təcrübi təyin olunan sabitlərdir. 1899-1900-cü illərdə Otto Lyumer, Ferdinand Kurlbaum (1857-1927), Ernst Prinqsqeym (1859-1917) və Henrix Rubens (1865-1922) nümayiş etdirdilər ki, yerdəyişmə qanunu



nun qabaqcadan xəbər verdiyi kimi, spektral sıxlıq əyrisi həmişə maksimuma malikdir və bu maksimum temperaturun artması ilə sürüşür. Bununla bərabər, bu eksperimentlərdən çıxırdı ki, (1) düsturu yalnız qısa dalğalar (və ya aşağı temperaturlar) oblastında doğrudur.

1900-cü ildə Lord Reley (Con Uilyam Strett; 1842-1919) enerjinin sərbəstlik dərəcələri üzrə bərabər paylanmasına dair statistik qanun əsasında, mütləq qara cismin spektrində enerjinin paylanması üçün başqa qanun çıxardı:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT, \qquad (2)$$

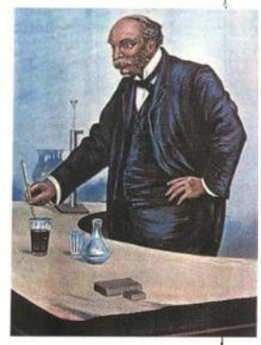
burada k – Bolsman sabitidir. Tamamilə klassik təsəvvürlərə söykənən (2) düsturu sonra Ceyms Hopvud Cins (1877-1946) tərəfindən dəqiqləşdirildi.



Məhz buna görə, ona *Reley-Cins qanunu* deyirlər. Eksperimentlər göstərdi ki, uzun dalğalı oblastda (və ya yüksək temperaturlarda) şüalanmanın spektral sıxlığı, Reley-Cins qanununa uyğun olaraq, temperaturla düz mütənasibdir. (2) asılılığını bütün tezliklər oblastına tətbiq etmək cəhdləri mənasız nəticəyə gətirdi: sıfırdan sonsuzluğa qədər bütün tezliklər üzrə $u_\nu(T)$-nin cəmlənməsi şüalanmanın enerji sıxlığı üçün sonsuz böyük qiymət verdi: fizika baxımından bunun mənası yoxdur. Reley-Cins qanununa görə, istilik şüalanmasının spektrində enerjinin xeyli hissəsi spektrin qısadalğalı (ultrabənövşəyi) oblastına uyğun gəlir ki, bu da eksperimentə ziddir. Nəzəri və təcrübi məlumatların bu cür üst-üstə düşməməsini Paul Erenfest "*ultrabənövşəyi fəlakət*" və ya "*Reley-Cins paradoksu*" adlandırdı. Məşhur fizik Lorens deyirdi: "...məlum oldu ki, klassik fizikanın tənlikləri sönən sobanın nə üçün böyük dalğa uzunluqlu şüalarla yanaşı sarı şüalar buraxmadığını izah etməyə qadir deyil".

XIX əsrin sonunda eksperimental məlumatlara uyğun gələn u_λ (və ya u_ν) funksiyasını tapmağa çalışan fiziklər arasında alman nəzəriyyəçisi Maks Plank da var idi. Ona qara cismin tarazlıq şüalanmasının bütün xassələrini izah edən və Reley-Cins paradoksunu aradan qaldıran düsturu almaq nəsib oldu. Həqiqət naminə deməliyik ki, Plankın özü nə Reley qanununun, nə də "ultrabənövşəyi fəlakət"in heç adını da çəkməmişdir. O, cidd-cəhdlə Vin düsturunu yaxşılaşdırmağa çalışırdı. Çox sonralar Plank özünün məşhur kəşfini necə etdiyi barədə söyləmişdi: 1900-cü il oktyabrın 7-də, bazar günü onun həmkarı, fizik-eksperimentator Henrix Rubens ona baş çəkməyə gəldi. Qonaq son təcrübələr haqqında danışdı və dedi ki, bu təcrübələrə görə şüalanmanın intensivliyi kiçik dalğa uzunluqları üçün Vin qanunu ilə kifayət qədər yaxşı təsvir olunur, lakin böyük dalğa uzunluqları üçün isə, dalğa uzunluğundan asılı olmayıb temperaturla mütənasibdir. Axşam Plank u_λ funksiyası üçün interpolyasiya düsturu aldı: kiçik dalğa uzunluqlarında bu düstur Vin qanununa, böyük dalğa uzunluqlarında isə Reley-Cins qanununa keçirdi. Plankın düsturu bax budur:

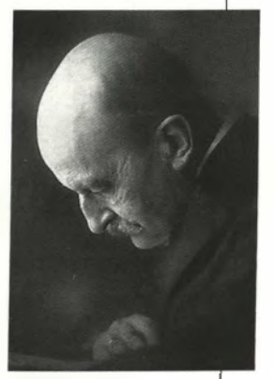
$$u_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \qquad (3)$$



Lord Reley mühazirə oxuyur. Şarjlaşdırılmış portret. 1899-cu il.



C.H.Cins.



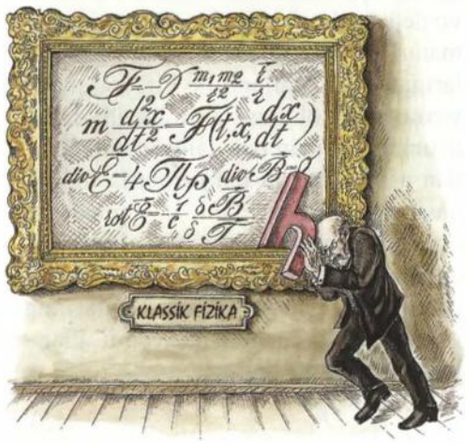
M.Plank.

burada c_1 və c_2 – empirik təyin olunan sabitlərdir. Həmin vaxtda da alman fiziki Fridrix Paşen (1865–1947) qızdırılmış cisimlərin spektrlərində enerjinin paylanması üçün nəzəri alınmış ifadələri dəqiq yoxlamağa, o cümlədən temperaturun dəyişməsilə düsturlara daxil olan sabitləri təyin etməyə imkan verən qrafiki metod işləyib hazırladı.

"REAL DÜNYANIN MÜƏMMALI SƏFİRİ"

Fizikada təsir, ölçüsü "enerji × zaman" (və ya "impuls × uzunluq") olan kəmiyyətə deyilir.

Plank (3) düsturunu 1900-cü il oktyabrın 19-da Alman Fizika Cəmiyyətinin iclasında təqdim etdi. Sonralar o xatırlayırdı: "Növbəti gün, səhər tezdən mənim həmkarım Rubens məni axtarıb tapdı və mənə danışdı ki, iclas bağlandıqdan sonra, elə həmin gecə mənim düsturumu öz ölçmələrinin nəticələrilə diqqətlə tutuşdurmuş və hər yerdə qənaətbəxş uyğunluq aşkar etmişdir... Bundan sonrakı ölçmələr də, şüalanma düsturunu dönə-dönə, özü də daha incə ölçmə metodlarından istifadə etdikcə, bir o qədər dəqiq təsdiq edirdi. Sonra Plank bu düsturu "Vinin spektral tənliyinə düzəliş haqqında" adlı məqaləsində verdi. Beləliklə, o, qara cismin spektrində enerjinin paylanması üçün olduqca dəqiq ifadə tapdı. Lakin alim başa düşürdü ki, onun aldığı münasibət "yalnız xoşbəxtcəsinə tapılmış interpolyasiya düsturudur". Plank yazmışdı: "...onu tapdığım gündən qarşımda bir məsələ – onun həqiqi fiziki mənasını axtarıb tapmaq məsələsi durdu... Ömrümdə ən gərgin işlədiyim bir neçə gündən sonra qaranlıq aydınlaşdı və mənim qarşımda geniş işıqlı üfüqlər açıldı".



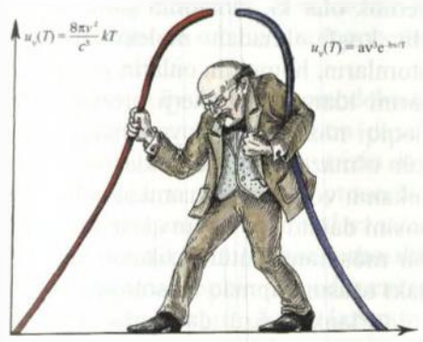
1900-cü il dekabrın 14-də Alman Fizika Cəmiyyətinin iclasında Plank ilk dəfə enerji elementləri haqqında (indi onlara enerji kvantları deyirlər) və aşağıdakı yeni düstur haqqında məlumat verdi:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1}. \qquad (4)$$

Alim bu düstura yeni h fiziki sabitini – *elementar təsir* kvantını daxil etmişdir. Eksperimental məlumatlar əsasında o, indi *Plank sabiti* adlanan bu sabit üçün $6{,}548\cdot10^{-27}$ erq·san qiymətini almışdı ($\hbar$-ın müasir qiyməti $6{,}626\cdot10^{-27}$ erq·san-dir).

Plank özünün daxil etdiyi sabit haqqında belə yazmışdı: "...bu ya saxta kəmiyyətdir, onda şüalanma qanununun bütün çıxarılışı prinsip etibarilə doğru deyil və mənası olmayan, boş-boşuna düstur oyunudur, ya da şüalanma qanununun çıxarılışı müəyyən fiziki reallığa söykənir, onda *təsir kvantı* – fizikada fundamental əhəmiyyət kəsb etməlidir və nə isə tamamilə yeni və görünməmiş bir şeydir ki, bizim diferensial hesabını kəşf etmiş Leybnisin və Nyutonun dövründən bəri bütün səbəbiyyət münasibətlərinin kəsilməzliyi hipotezinə əsaslanan fiziki təfəkkürümüzdə çevriliş etməlidir".

Mən dərhal, necə olur olsun, təsir kvantını klassik nəzəriyyə çərçivəsində daxil etməyə çalışdım. Ancaq bu kəmiyyət inadla və israrla bütün bu cür



cəhdlərə müqavimət göstərdi. Nə qədər ki, bizim ona sonsuz kiçik kimi baxmağa haqqımız var, yəni nisbətən böyük enerjilərdə və böyük zaman müddətlərində, hər şey tam qaydasındadır. Lakin, ümumi halda gah burada, gah orada çatlar əmələ gəlirdi, daha sürətli rəqslərə baxdıqca daha aşkar görünən çatlar". Plank yeni fundamental fiziki sabiti "real dünyanın müəmmalı səfiri" adlandırmışdı.

Kirxhof qanunu universal xarakter daşıdığı üçün, $K(\nu,T)$ funksiyasının (və deməli, u_ν kəmiyyətinin) çıxarılışı konkret fiziki modelin seçilməsindən asılı olmamalıdır. Plank şərti olaraq qara cisimdəki boşluğun qızmış divarlarını şüalandırıcılar çoxluğu ilə – bütün mümkün tezlikli ossilyatorlar çoxluğu ilə əvəz etdi. T temperaturunda ossilyatorlar termodinamik tarazlıq halında olurlar. Əgər şüalanma kvantının $h\nu$ enerjisi ossilyatorun istilik hərəkətinin kT enerjisinə nisbətən çox kiçikdirsə, onda $h\nu$ tezliyi kiçik sayılır. Yox əgər şüalanma kvantının enerjisi istilik hərəkətinin enerjisini aşırsa, onda ν tezliyi böyük adlanır. Kiçik tezliklərdə kvantların enerjisini nəzərdən atmaq olar və ossilyatorların enerjisi yalnız onların istilik hərəkətinin kT enerjisi ilə təyin olunar. Lord Reley hesablamışdı ki, vahid tezlik intervalına düşən ossilyatorların vahid həcmdəki sayı $N_\nu = 8\pi\nu^2/c^3$-na bərabərdir. Bu halda hər bir ossilyator kT qədər enerji daşıdığı üçün, şüalanmanın intensivliyi $u_\nu \approx N_\nu kT$-yə bərabərdir. Beləliklə, kiçik tezliklərdə (böyük dalğa uzunluqlarında) Reley-Cins düsturu doğrudur. Əksinə, böyük tezliklərdə ossilyatorun istilik hərəkətinin enerjisi çox kiçik olur və ona görə də onun enerjisi $h\nu$-yə bərabərdir. Lakin böyük enerjilərə malik olan ossilyatorların termodinamik tarazlıq halında sayı N_ν ilə müqayisədə çox azdır və təxminən $N_\nu e^{-h\nu/kT}$-yə bərabərdir. Bu halda $u_\nu \approx N_\nu e^{-h\nu/kT}$. Deməli, böyük tezliklərdə (kiçik dalğa uzunluqlarında) Vin düsturu doğrudur. Bununla da, "ultrabənövşəyi fəlakət" aradan qaldırılır. Beləliklə, Plank düsturunda paradoks yoxdur.

(4) düsturunun çıxarılışı yeni fundamental sabitin kəşfinə və belə bir hipotezin yaranmasına səbəb oldu ki, enerji kvantlarla, yəni diskret $h\nu$ porsiyaları ilə daşınır. Bu, fizikanın inkişafında inqilabi bir addım idi. 1912-ci ildə Puankarenin yazdığı kimi, Plank nəzəriyyəsinə görə "fiziki hadisələr diferensial tənliklərlə ifadə olunan qanunlara tabe olmaqdan imtina edirlər" və bu nəzəriyyə "şübhəsiz, natural fəlsəfənin Nyuton dövründən bəri uğradığı ən böyük və ən dərin inqilabdır".

Enerji elementlərinin (kvantlarının) yayılma mexanizmini izah etmək üçün iki imkan, iki variant var idi: ya şüalanmadan sonra, mənbədən uzaqlaşdıqca hər bir enerji elementi öz fərdiliyini saxlayır, ya da fəzada dağılır. Birinci variant elektromaqnit şüalanmasının dalğa xarakterinə əsaslanan klassik optika ilə bir araya sığmırdı. Plank köhnə, xeyirxah klassik fizika ruhunda tərbiyə olunmuşdu və onun qısqanc qoruyucusu kimi qalmışdı. Öz kəşfinin inqilabiliyinə baxmayaraq, o, təcrübədə yaxşı yoxlanılmış dalğa nəzəriyyəsini ata bilmədi. Ona görə də



Maks Plank. Qrafiki portret. Poçt kartoçkası.

alim əvvəlcə hesab etdi ki, enerjinin buraxılması və udulması diskret porsiyalarla baş verir, şüalanmanın özü isə kəsilməzdir. A.Eynşteyn kvant ideyasının inqilabi xarakterini birinci dərk etdi və onu inkişaf etdirdi. Lakin o, Plankın kvant təsəvvürlərinin nəticələrindən çox, "şüalanma düsturunun şüalanmanın quruluşuna və ümumiyyətlə, fizikanın elektromaqnit əsaslarına aid hansı ümumi nəticələri çıxarmağa imkan verməsilə" maraqlanırdı. Plankın kəşfinin əhəmiyyətini qiymətləndirərək Eynşteyn yazmışdı: "... Plankın şüalanma qanunu başqa fərziyyələrdən asılı olmadan, atomları xarakterizə edən mütləq kəmiyyətlərin ilk dəqiq təyinini verdi. Üstəlik, bu qanun göstərdi ki, materiyanın atomar quruluşu ilə yanaşı, enerjinin də, Plankın daxil etdiyi universal sabitlə idarə olunan, özünəməxsus atomar quruluşu mövcuddur. Bu kəşf XX əsrdə bütün fiziki tədqiqatlar üçün bünövrə oldu və həmin vaxtdan fizikanın inkişafını, demək olar ki, tamamilə şərtləndirdi. Bu kəşf olmadan molekulların və atomların, həmçinin onların çevrilmələrini idarə edən enerji proseslərinin həqiqi nəzəriyyəsini yaratmaq mümkün olmazdı. O, üstəlik klassik mexanikanın və elektrodinamikanın bünövrəsini dağıtdı və elmin qarşısında belə bir məsələni, bütün fizikanın yeni idrakı əsasını tapmaq məsələsini qoydu.

Plankın özü dəfələrlə müxtəlif hipotezlərin köməyi ilə şüalanmanın yayılmasını dalğa təsəvvürləri əsasında izah etməyə təşəbbüs göstərmiş və yalnız eksperimental faktların təzyiqi altında sonrakı təşəbbüslərindən əl çəkmişdi. Bununla belə, 1911-ci ildə işlərinin birində o, paradoksal bir nəticə aldı. Bu nəticə müasir fizikada olduqca mühüm əhəmiyyət kəsb edir: mütləq sıfır temperaturunda ossilyatorların orta enerjisi sıfıra bərabər deyil, lakin $h\nu/2$-yə bərabərdir. Sonralar bu kəmiyyət *ossilyatorun sıfırıncı enerjisi* adını aldı.

A.Eynşteyn müəyyən etmişdir ki, obyektin öz məxsusi hesablama sistemində, ümumiyyətlə, malik ola biləcəyi daxili enerjisinin limit qiyməti, bu obyektin sükunət enerjisinə bərabərdir.

STATİSTİK FİZİKANIN ƏSASLARI

Termodinamik yanaşma universaldır, lakin onun da özünün məhdudiyyətləri var. Başlıcası odur ki, o, makroobyekti təşkil edən mikrozərrəciklərin davranışı haqqında məlumat verə bilmir. Bu məsələyə yalnız mikroskopik və ya statistik yanaşmanın gücü çatır.

Buna uyğun olaraq təsvir "alətlərini" də fərqləndirirlər. Termodinamik parametrləri, yəni təzyiqi, həcmi və temperaturu əvəz edən, zərrəciklərin $\vec{r}=(x,\ y,\ z)$ – koordinatlarının və $\vec{p}=(p_x, p_y, p_z)$ – impulslarının $f(\vec{r}, \vec{p}, t)$ paylanma funksiyasıdır. Hər iki yanaşmanın "uzlaşdığı nöqtə" isə fiziki kəmiyyətlərin $\bar{A}(\vec{r}, \vec{p})$ orta qiymətləridir. Lakin belə uzlaşmaya nail olmaq o qədər də asan deyil: bunun üçün makroskopik obyektin *mikroskopik modeli* gərəkdir. Hər bir konkret halda bu model obyektin quruluşundan, ona daxil olan zərrəciklərin və onların qarşılıqlı təsirindən asılıdır. Fiziki obyektin quruluşuna məhz nə daxildir, onun daxili enerjisini nə təyin edir kimi məsələlər haqqında təsəvvürlər, fizika inkişaf etdikcə dəfələrlə dəyişmiş və tamamlanmışdır. Daxili enerjiyə obyekti təşkil edən zərrəciklərin hərəkətinin orta enerjisi kimi baxmaq ideyasına Leybnisin və D.Bernullinin əsərlərində rast gəlinir. XIX əsrin ortalarında Helmholts atom və molekulların elektromaqnit qarşılıqlı təsir enerjisini daxili enerjiyə aid etdi. Sonralar, artıq XX əsrdə,

A fiziki kəmiyyətinin orta qiymətini $\bar{A}$ kimi işarə etmək qəbul olunmuşdur, yəni kəmiyyətin simvolunun üstündə xətt qoyulur.

onlara daxili enerjinin əvvəlcə nüvə, sonra isə həm də subnüvə komponentləri əlavə edildi.

Beləliklə, obyektin mikromodelində vacib olan, bizim bu obyektin daxili strukturu haqqındakı biliklərimizin dərinliyidir. Enerji mübadiləsi proseslərinə neçə və hansı *sərbəstlik dərəcələrinin* cəlb olunduğunu və hər sərbəstlik dərəcəsinə orta hesabla nə qədər enerji düşdüyünü nəzərə almaq lazımdır. Bu və ya digər sərbəstlik dərəcələrini (məsələn, atomlarda elektron sərbəstlik dərəcələrini) həyəcanlandıranda, onlara uyğun struktur səviyyələri dağılırsa, onda daxili enerjiyə həmin səviyyələrin *rabitə enerjisi* pay verir. Materiyanın səviyyələri dərin olduqca, xarici təsir vasitəsilə onları "aktivləşdirmək" üçün tələb olunan enerji də bir o qədər yüksək olur.

Aktivləşdirmə enerjisi aşağıdakı fərq kimi təyin olunur

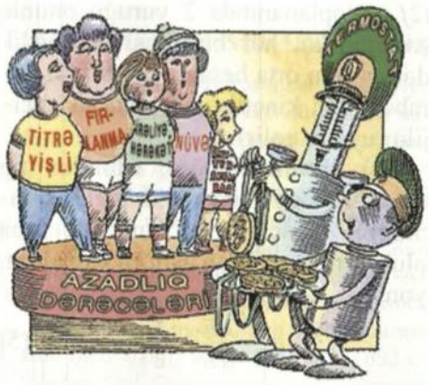
$$\Delta E_{min}=E_1-E_0, \qquad (1)$$

burada E_0 – əsas (ən aşağı) səviyyənin, E_1 – birinci həyəcanlanmış səviyyənin enerjisidir. İstilik həyəcanlanması zamanı obyektin temperaturu

$$\theta=\Delta E_{min}/k \qquad (2)$$

xarakteristik temperaturunu aşmalıdır, burada k – Bolsman sabitidir.





Daha aşağı enerjilərdə, baxılan sərbəstlik dərəcələri, ümumiyyətlə, həyəcanlanmır, yəni, sanki "donmuşdur" və özlərini heç nə ilə büruzə vermir. Məhz bu vəziyyəti intuitiv olaraq Nernst və Plank qabaqcadan görmüş və onu termodinamikanın Üçüncü qanununun əsası kimi götürmüşlər.

DAXİLİ ENERJİNİN SƏRBƏSTLİK DƏRƏCƏLƏRİNƏ GÖRƏ PAYLANMASI

Biratomlu ideal qazın orta enerjisinin ilk baxışda sadə görünən düsturu

$$\bar{E}=\frac{3}{2}kT \qquad (3)$$

statistik fizikanın çox mühüm bir teoreminin əsasını təşkil etdi: biratomlu molekulun yalnız üç sərbəstlik dərəcəsi olduğundan, onların hər birinə düşən orta enerji $(1/2)kT$-yə bərabərdir.

Əgər daha mürəkkəb obyektin sərbəstlik dərəcələrinin sayı f-ə bərabərdirsə, onda belə obyektin daxili enerjisi

$$\bar{E}=f\frac{1}{2}kT \qquad (4)$$

olacaqdır, burada $f=f_{irəl}+f_{fır}+2f_{rəqs}$. Bu ifadədə irəliləmə sərbəstlik dərəcəsindən $(1\leqslant f_{irəl}\leqslant 3)$ başqa, fırlanma $(0\leqslant f_{fır}\leqslant 3)$ və rəqsi $(0\leqslant f_{rəqs}\leqslant 3)$ sərbəstlik dərəcələri nəzərə alınmışdır

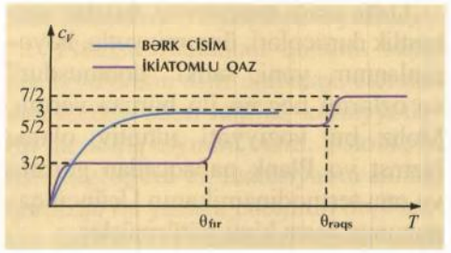
Bütövlükdə ikiatomlu molekulun altı sərbəstlik dərəcəsi aşağıdakılardan ibarətdir: molekulun kütlə mərkəzinin yerdəyişməsinə uyğun üç sərbəstlik dərəcəsi, molekul daxilində atomları birləşdirən xəttə perpendikulyar olan iki qarşılıqlı perpendikulyar ox ətrafında fırlanmaya uyğun olan iki fırlanma sərbəstlik dərəcəsi, habelə atomların onları birləşdirən xətt boyunca rəqslərinə uyğun bir rəqsi sərbəstlik dərəcəsi.

Aleksi Terez Pti (1791-1820) – fransız fiziki.

($2f_{rəqs}$ toplananında 2 vuruğu onunla şərtlənir ki, hər bir rəqsi sərbəstlik dərəcəsinə orta hesabla bir-birinə bərabər olan kinetik və potensial enerjilər uyğun gəlir).

(4) düsturuna görə, istənilən tip obyektin sabit həcmdəki istilik tutumu (bir zərrəciyə hesablanmaqla) sabit olub, temperaturdan asılı olmamalıdır, yəni

$$c_V = \frac{d\bar{E}}{dT} = \frac{f}{2}k. \qquad (5)$$



Bərk cisim və ikiatomlu qaz molekulu üçün xüsusi istilik tutumunun temperaturdan asılılığı. θ_{fir}, $\theta_{rəqs}$ – fırlanma və rəqsi xarakteristik temperaturlarıdır.

Lakin eksperimentlər bu nəticəni təsdiq etmir. Çoxatomlu qazlar üçün $c_V(T)$ asılılığının qrafikində üfüqi düz xətlər əvəzinə "pilləciklər" müşahidə olunur. Bərk cisim üçün $T \to 0$ olanda $c_V(T) \to 0$ olur ki, bu da bərk cismin üçölçülü ossilyatorlar çoxluğundan ibarət olması haqqındakı modeli ilə uzlaşmır; ossilyatorlar üçün $f_{irəl}=f_{fir}=0$, $f_{rəqs}=3$, yəni $c_V=3k$.

Pyer Lui Dülonq (1785-1838) fransız fiziki və kimyaçısıdır, Paris Elmlər Akademiyasının prezidenti olmuşdur (1828-ci il).

Bu, bərk cismin xüsusi istilik tutumu üçün məhz *Dülonq-Pti qanunudur* (1819-cu il). O, yalnız yüksək temperaturlarda ödənir.



P.Debay.

Bərk cisimlərin istilik tutumu problemi ilə Albert Eynşteyn (1907-ci il) və Peter Debay (1884-1966) məşğul olmuşlar. Eynşteyn bu məsələni həll etmək üçün kvantlar hipotezini tətbiq etmiş, Debay isə 1912-ci ildə göstərmişdir ki, alçaq temperaturlarda bərk cismin istilik tutumu aşağıdakı kimi sıfıra yaxınlaşır: $c_V \sim T^3$. *Debay istilik tutumu qanunu* eksperimental məlumatlarla yaxşı uzlaşır.

KLASSİK İDEAL QAZ

Fizikanın hər bir bölməsinin öz "standart modeli", yəni elə bir sadə obyekti var ki, bölmənin əsas metod və yanaşmaları onun üzərində məşq etdirilir. Mexanikada belə obyekt maddi nöqtədir, dalğa nəzəriyyələrində müstəvi dalğa, termodinamikada isə nüfuzedilməz divarlarla məhdud olan həcmdə ("qapalı qabda") yerləşən zərrəciklərin *ideal qazıdır*.

Amma ideal qaz modeli ancaq o vaxt tətbiq oluna bilər ki, sistemdə termodinamik tarazlıq halı artıq yaranmış olsun. Buna qədər, yəni qeyri-tarazlıq mərhələsində *termalizasiya* mexanizmi (zərrəciklərin ölçülərinin və itələmə qüvvələrinin vacib olduğu qarşılıqlı toqquşmaları hesabına, nizamlı hərəkətin nizamsız hərəkətə keçməsi) tələb olunur.

İdeal qazın termodinamik xassələrini üç düsturla ifadə etmək olar: hal tənliyi ilə

$$PV = \frac{2}{3}\bar{E}, \qquad (6)$$

burada ideal qazın daxili enerjisi U onu təşkil edən zərrəciklərin $\bar{E}$ orta kinetik enerjisinə bərabərdir:

$$\bar{E} = N\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}NkT. \qquad (7)$$

Buradan Klapeyron-Mendeleyev tənliyi alınır:

$$PV = NkT = \frac{m}{\mu}RT;\ R = N_A k. \qquad (8)$$

(7) düsturu əslində ideal qazın termodinamik təsvirindən statistik təsvirinə keçid yolunda ilk addımdır.

MAKSVELL PAYLANMASI

Maksvell öz adı ilə adlanan ilk nəticəsini ("adlı" nəticəsini) – ideal qaz molekullarının sürətlərə görə paylanması düsturunu aspiranturaya daxil olarkən, məşhur fizik Corc Qabriel Stoksa (1819-1903) qəbul imtahanı verərkən çıxarmışdır. Kembric tarixinin bilicisi P.L.Kapitsa danışırdı ki, "bu, Kembricdə, keçən əsrin ikinci yarısında baş vermişdir. O vaxt nəzəri fizikanı Stoks tədris edirdi. Gənc bir oğlan onun yanına gəlib, aspiranturaya imtahan vermək istədiyini bildirdi. Həmin vaxtlarda aspirant imtahanı xeyli çətin idi, çünki aspiranturaya yerlər az – cəmi iki-üç dənə idi, aspiranturaya düşmək üçün müsabiqə isə çox çətin idi. Stoks məsələni verdi, həm də sistem belə idi: onlarla məsələ verilirdi, onlardan tələbə özü həll etmək istədiyini seçirdi. Tələbəyə müəyyən miqdarda saat ayrılırdı. Stoks isə sıxıntı keçirmədən sırf həllolunmaz məsələlər qoyurdu ki, görsün, tələbə bu məsələnin həll olunmaz məsələ olduğunu bilirmi. O, misal üçün belə məsələ də qoymuşdu: qaz molekullarının sürətlərə görə paylanmasını tapmaq. Həmin vaxt bu məsələ hələ məlum deyildi. Bernullinin dövründən hamı elə hesab edirdi ki, bütün molekulların sürətləri təxminən eynidir. Bir cavan oğlan (o vaxt onun heç 30 yaşı yox idi), Stoksun təəccübünə baxmayaraq, bu məsələni həll etdi, həm də düz həll etdi. Yəqin başa düşürsünüz ki, bu cavan oğlan Maksvell idi."

Maksvell təxminən belə fikirləşirdi: əgər içərisində qaz olan qabın divarları tərpənməzdirsə (V=const) və zərrəciklər üçün nüfuzedilməzdirsə (N=const), lakin qaz və onu əhatə edən



AVTORİTETLƏRƏ İSTİNADIN ƏHƏMİYYƏTİ HAQQINDA

İdeal qazın molekulyar-kinetik nəzəriyyəsinin əsas tənliyinin, yəni $\bar{E} = N(m\bar{v}^2/2) = (3/2)NkT$ düsturunun tarixi olduqca ibrətamizdir. Ortalaşdırılmış bu ifadəyə hamıdan çox (Klauziusdan və Maksvelldən xeyli əvvəl) ingilis fiziki C.C.Uoterston yaxınlaşmışdı. 1845-ci ildə o, məruzə etmək üçün öz işini London Kral Cəmiyyətinə təqdim etmişdi. Lakin rəyçi bu işi "boş, mənasız və hətta Cəmiyyət qarşısında oxunması layiq görülməyən" iş kimi xarakterizə etmişdi. Bundan xeyli sonra, 1859-cu ildə Maksvell Uoterstondan asılı olmadan, eynilə həmin düsturu, indi elmi dairələrdə qəbul edilmiş düsturu çıxarmışdı.

Uoterstonun memuarının taleyi Karnonun qeyd dəftərçəsinin taleyi kimi oldu: yalnız yarım əsr sonra (1892-ci ildə) çap olundu. Lord Releyin London Kral Cəmiyyətinin arxivindən unudulmuş və artıq aktuallığını itirmiş işi axtarıb tapmış və ona çox kəskin bir rəy yazmışdı: əgər müəllif özünün böyük sələfi olan Daniil Bernullinin adını çəksəydi, onda rəyçidə bu işi bu qədər məsuliyyətsizcəsinə rədd etməyə cəsarət çatmazdı və qazların molekulyar-kinetik enerjisinin əsaslandırılması 15 il əvvəl baş verərdi.

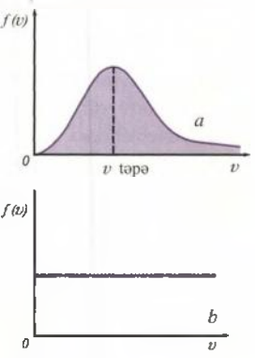
mühit arasında *istilik mübadiləsinə* yol verirsə, onda müəyyən vaxt keçəndən sonra qabda istilik tarazlığı yaranar.

Tutaq ki, N – qaz zərrəciklərinin ümumi sayı, v_x, v_y, v_z isə bir zərrəciyin $\vec{v}$ sürətinin qarşılıqlı perpendikulyar üç istiqamət üzrə toplananlarıdır. Daha sonra fərz edək ki, v_x-ləri v_x və v_x+dv_x intervalında olan zərrəciklərin sayı $Nf(v_x)dv_x$-ə bərabərdir, burada f – təyin olunacaq funksiyadır. Eyni cür mühakimə v_y və v_z komponentləri üçün də doğrudur, həm də eyni hüquqlu olduqlarına görə, $f(v_y)$ və $f(v_z)$ funksiyaları $f(v_x)$ ilə üst-üstə düşməlidir. v_x, v_y və v_z bir-birindən asılı olmadıqlarına və təsadüfi olduqlarına görə, tarazlıq halında seçilmiş (üstün) istiqamət mövcud deyil. Deməli, $\vec{v}$-dən $\vec{v}+d\vec{v}$-yə qədər sürət intervalında olan molekulların tam sayı

$$Nf(v_x)f(v_y)f(v_z)dv_x dv_y dv_z\text{-ə}$$

bərabər olub, yalnız sürətin $v=(v_x^2+v_y^2+v_z^2)^{1/2}$ modulundan asılıdır, yəni

$$f(v_x)f(v_y)f(v_z) = \varphi(v_x^2+v_y^2+v_z^2). \qquad (9)$$



Qazla onun ətrafı arasındakı sərhəddə kontaktın forması dəyişəndə, paylanma funksiyası da dəyişir. Məsələn, əgər izotermik şərait (*a*) əvəzinə adiabatik şərait (*b*), yəni istənilən formada enerji mübadiləsini istisna edən şərait olarsa, onda tam daxili enerji E_{tam} artıq orta hesabla yox, dəqiq saxlanacaqdır. Bu halda paylanma funksiyası çox sadə (formal olaraq, $T\to\infty$ limitinə uyğun gələn) şəkil alır: $f(v)=\text{const}$. Sürətlərin bütün qiymətləri v eyni ehtimallıdır.

(9) funksional tənliyinin həlli aşağıdakı şəklə malikdir:

$$f(x)=B\exp(Ax^2),\ \varphi(y)=B^3\exp(Ay^2).$$

Əgər A müsbətdirsə, onda zərrəciklərin sayı sürətin artması ilə qeyri-məhdud artır, yəni sonsuz böyükdür. Ona görə A-nı mənfi seçib, $(-1/\alpha^2)$-na bərabər götürürlər. B və α sabitlərini iki şərtdən: $\int f(v)\,dv=1$ normalaşma şərtindən və $\overline{v^2}=(3/2)\alpha^2$ şərtindən tə-yin edirlər. (7) münasibətini nəzərə al-saq, molekulların sürətlərə görə Maks-vell paylanma funksiyasına gəlib çıxarıq

$$f_m=\frac{4}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2}v^2\exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right). \quad (10)$$

Burada T parametri zərrəciklər kol-lektivini bütövlükdə xarakterizə edir, yəni, şəkildən də göründüyü kimi, paylanma funksiyası qrafikinin enini xarakterizə edir.

Fizikada ilk dəfə idi ki, düsturun çıxarılışı tamamilə statistik və ya eh-timal metodlarına əsaslanırdı. Maks-vell o dövrün fizikası üçün adi olan dinamik mülahizələrdən istifadə etmədi. Onun qeyd etdiyi kimi, molekullar ara-sındakı toqquşmaların dinamikası ta-mamilə ixtiyari ola bilsə də, ancaq "hazırlıq" rolunu oynayırdı. Ayrıca bir molekulun taleyini izləmək məsələsi ümumiyyətlə qoyulmamışdı – Maks-vell bütün qaz zərrəciklərinə bir-birinin tam eyni olan zərrəciklər kimi baxırdı. Fərz olunurdu ki, molekulların öz ara-larında sürətlə qarşılıqlı mübadilə et-məsi onların "daxili işidir". Mühüm olanı odur ki, toqquşmaların sayı, mo-lekulların sayı kimi, mümkün qədər çox olsun və bundan başqa, bütövlük-də qazın orta enerjisi və molekulların sürətlərə görə paylanmasının şəkli saxlanılsın.

Maksvell belə bir ümumi nəticəyə gəldi ki, "sürətlərin zərrəciklər arasın-da paylanması, eynilə müşahidə səhv-lərinin paylandığı qanun üzrə paylan-mışdır (bu, *normal* və ya *Qauss* paylanması adlanır). Sürətlər 0-dan ∞-a qədər intervalda qiymət alır, lakin böyük və ya kiçik sürətlərə malik olan molekulların sayı nisbətən azdır".

Əslində, məhz 1859-cu il sentyabrın 21-də, Britaniya Elmin İnkişafına Yar-dım Assosiasiyasının iclasında Ceyms Klark Maksvellin öz nəticələri haq-qında məruzə etdiyi vaxtdan, *dünyanın statistik mənzərəsi* yarandı.

BOLSMAN PAYLANMASI

Əgər xatırlasaq ki, $mv^2/2=\varepsilon$ – bir molekulun kinetik enerjisidir, onda (10) Maksvell paylanmasını aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$f(\varepsilon)=A\varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right), \quad (11)$$

burada k – Bolsman sabitidir. Çox gü-man ki, paylanmanın bu formada yazı-lışı Bolsmana müəyyən bir yol göstərdi və o, bu yolla gedərək, 1868-ci ildə Maksvell funksiyasını xarici sahədə yerləşən və potensial enerjisi $U(\vec{r})$ olan qaz molekulları üçün ümumiləşdirdi. Tam mexaniki enerji $E=mv^2/2+U(\vec{r})$ kinetik və potensial enerjilərin cəmi olduğundan, onda ümumiləşmiş pay-lanma funksiyası $f(\vec{r},\vec{p})$ iki vuruğun hasilinə bərabər olacaqdır:

$$f(\vec{r},\vec{p})=n(\vec{r})f(\vec{p}), \quad (12)$$

burada $f(\vec{p})$ – impulslara görə Maks-vell paylanması, $n(\vec{r})$ isə molekul-ların qeyri-bircins konsentrasiyasıdır. Bolsmana görə, $n(\vec{r})$ konsentrasiyası $U(\vec{r})$ potensial enerjisi ilə aşağıdakı kimi əlaqədardır:

$$n(\vec{r})=n_0\exp\left[-U(\vec{r})/kT\right]. \quad (13)$$

Əgər xarici sahə yoxdursa, yəni $[U(\vec{r})=0]$, onda konsentrasiya bir-cinsdir: $n(\vec{r})=n=\text{const}$.

Beləliklə, ideal qaz molekullarının $\vec{r}$ koordinatlarına və $\vec{p}$ impulslarına görə ümumiləşmiş tarazlıq paylan-ması (12) belə olacaqdır:

$$f(\vec{r},\vec{p})=f(E_{mex})=$$
$$=A\exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right)\exp\left(-\frac{U(\vec{r})}{kT}\right)=$$
$$=A\exp(-E_{mex}/kt), \quad (14)$$

burada $E_{mex}=\varepsilon+U(\vec{r})$ – tam mexaniki enerji, A – yeni normallaşma əmsalıdır. (14) düsturuna hazırda klassik ideal qaz üçün *Maksvell-Bolsman paylan-ması* deyilir.

TERMOSTATDA ENERJİLƏRƏ GÖRƏ GİBBS PAYLANMASI

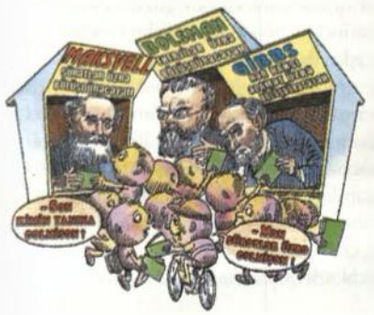
Statistik mexanikanın qurulmasını 1901-ci ildə Amerika fiziki Uillard Gibbs başa çatdırdı. Onun dərin və dəqiq təhlilinə görə, T temperaturlu termostatda yerləşən istənilən fiziki sistemin termodinamik tarazlıq halın-dakı paylanma funksiyası, bu sistemin yalnız E tam enerjisindən asılıdır:

$$f(E)=\frac{1}{Z}\exp(-E/kT), \quad (15)$$

burada normallaşma şərtinə görə,

$$Z=\int dEg(E)\exp(-E/kT). \quad (16)$$

Z kəmiyyəti *klassik hallar cəmi* və ya *statistik inteqral*, $g(E)$ isə *statistik çəki* və ya *halların sıxlığı* adlanır; $g(E)$ enerjinin verilmiş E qiymətində müx-təlif halların sayını xarakterizə edir. Belə ki, klassik, ideal olmayan qaz üçün E enerjisinə ε və $U(\vec{r})$-dən başqa, molekulların bir-birilə qarşılıqlı təsi-rinin potensial enerjisi də daxildir.

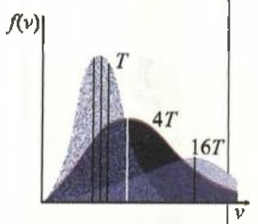


FİZİKİ KİNETİKANIN MƏSƏLƏLƏRİ

Qeyri-tarazlıq statistik fizikasının və ya *fiziki kinetikanın* əsas məsələləri verilmiş obyektin $t=0$ başlanğıc zaman anında məlum olan paylanma funksi-yasına görə istənilən t zaman anı üçün $f(\vec{r},\vec{p},t)$ paylanma funksiyasını tapmaqdan ibarətdir. $f(\vec{r},\vec{p},t)$ funksi-yasının tabe olduğu tənliklərə *kinetik tənliklər* deyilir. Aydındır ki, $t\to\infty$ li-mitində onların həlləri tarazlıq statis-tik fizikasının paylanmaları ilə üst-üstə düşməlidir.

Buradan aydın olur ki, fiziki kine-tikada t zamanın rolunu dərk etmək lazımdır, çünki mexaniki və statistik yanaşmalarda onun mahiyyəti bir-bi-rindən tamamilə fərqlidir. Mexanikada zaman dönəndir, yəni mexanikanın bütün tənlikləri zamanın $t\to(-t)$ əvəz edilməsinə yol verir. Termodinamika-nın ikinci qanununa görə, bütövlükdə obyekt üçün zamanın t və $(-t)$ istiqa-mətləri eyni hüquqlu deyildir. Başlan-ğıc $f(\vec{r},\vec{p},0)$ paylanması necə olur-olsun, zaman keçdikcə obyekt mütləq $f(\vec{r},\vec{p})$ paylanma funksiyası ilə (mə-sələn, Maksvell-Bolsman və ya Gibbs paylanma funksiyası ilə) təsvir olunan yeganə termodinamik tarazlıq halına "yuvarlanır". Termodinamikanın Sıfı-rıncı qanunu bundan ibarətdir.

Lakin termodinamik tarazlığa çatan-dan sonra (və hətta əvvəl də), obyek-tin təkamülə hansı haldan başladığını daha bilmək olmaz. Həmçinin siste-min bu hala qayıdışı da eyni dərəcədə mümkün deyil.



Molekulların sürətlərə görə Maksvell paylanması. Temperaturun artması ilə iti hərəkət edən molekulların sayı artır, ancaq əyrilər altındakı sahələr eyni qalır.

Maraqlıdır ki, Maks-vell paylanmasını birbaşa təcrübədə 1920-ci ildə alman fiziki Otto Ştern yoxlamışdır.

Dinamik dönərliklə statistik dönməzliyin uzlaşdırılması fiziki kinetikanın mərkəzi, həm də sona qədər həll olunmamış problemidir.

BOLSMANIN KİNETİK TƏNLİYİ VƏ *H*-TEOREMİ

Qeyri-tarazlıq statistik fizikası öz başlanğıcını Bolsmanın işlərindən götürür. 1872-ci ildə Bolsman $f(\vec{r},\vec{p},t)$ paylanma funksiyası üçün özünün məşhur *kinetik tənliyini* çıxardı.

Bolsman tənliyinin tam həlli bəzi çətinliklərlə bağlıdır. Yeganə tarazlıq həlli $f_0(\vec{r},\vec{p})$ – Maksvell-Bolsman paylanmasıdır ki, o da I_{toq} kəmiyyətini sıfıra çevirir.

Seyrəldilmiş ideal qaz üçün Bolsman *H-teoremi* adlanan bir teorem isbat etmişdir. Bu teoremə görə

$$H(t) = \int f(\vec{r},\vec{p},t)\ln f(\vec{r},\vec{p},t)d\vec{r}d\vec{p}$$

kəmiyyəti zaman keçdikcə monoton azalır: $dH/dt \leqslant 0$.

H kəmiyyəti işarə dəqiqliyilə entropiya ilə üst-üstə düşdüyünə görə, Bolsmanın *H*-teoreminə termodinamikanın İkinci qanununun əsaslandırılması kimi baxırlar. Bu qanun kinetik proseslərin dönməzliyini xarakterizə edir.

Bolsman tənliyinin və *H*-teoreminin ətrafında uzun sürən kəskin mübahisə yarandı. Mübahisənin mahiyyəti aşağıdakı suala gətirilir: nə üçün qaz molekullarının sırf mexaniki (yəni tam dönən) sistemində dönməzlik meydana çıxır? Lakin Lüdviq Bolsman düzgün cavabı dahiliklə duysa da, özünün haqlı olduğunu inandırıcı dəlillərlə sübut edə bilməmiş və elmi izolyasiyaya düçar olmuşdur.

Yalnız 1910-cu ildə alman riyaziyyatçısı David Hilbert Bolsman tənliyinin dəqiq təhlilini apararaq, riyaziyyatçıların və fiziklərin diqqətini ona cəlb etdi. Bundan təxminən 40 il sonra isə rusiyalı riyaziyyatçı və fizik Nikolay Nikolayeviç Boqolyubov bu məsələyə qəti aydınlıq gətirdi. O, nəinki Bolsmanın haqlı olduğunu sübut etdi, həm də zərrəciklər arasında cüt-cüt korrelyasiyalardan başqa, üçqat və digər korrelyasiyaları nəzərə alan daha dəqiq kinetik tənliklər – *Boqolyubovun tənlikləri zəncirini* (*BBQKİ zəncirini*) almaq proqramını təklif etdi.

KVANT İDEAL QAZ

Kvant qazı haqqında anlayış 1920-ci illərdə, maddənin və şüalanmanın kvant nəzəriyyəsinin müəyyən edilməsindən sonra yaranmışdır. Klassik ideal qazdan fərqli olaraq, kvant qazında kinematik və ya mübadilə qarşılıqlı təsirindən tam yaxa qurtarmaq olmaz. Bunun səbəbi mikrozərrəciklərin kvant eynilik prinsipidir.

Dəqiq desək, adi qazın atom və molekulları sırf kvant obyektləridir, ona görə də belə sualın yaranması qanunauyğundur: mikrozərrəciklərdən ibarət qazı hansı hallarda kvant qazı, hansı hallarda klassik qaz hesab etmək olar? Ağlabatan kriteriya ona əsaslanır ki, fərdi zərrəciklərin *dalğa funksiyaları bir-birini örtən* zaman qazın kvant

Korrelyasiya (*lat.* correlatio – "münasibət") – obyektlərin və ya anlayışların qarşılıqlı əlaqəsi, qarşılıqlı asılılığı, münasibətləridir.

BBQKİ tənliklər zəncirini, onu müxtəlif vaxtlarda və bir-birindən asılı olmadan yaratmış müəlliflərin soyadlarının (Boqolyubov, Born, Qrin, Kirkvud, İvon) baş hərflərinə görə belə adlandırırlar.

COZAYYA UİLLARD GİBBS

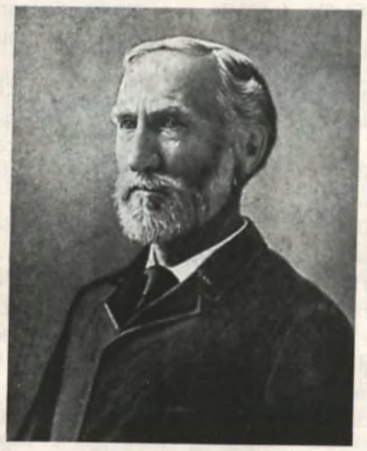
Mark Tvenin "Kral Arturun sarayında Konnektikutlu yanki" adlı romanının qəhrəmanı kimi, nəzəriyyəçi fizik, kimyəvi termodinamikanın və statistik fizikanın banilərindən biri olan Cozayya Uillard Gibbs (1839-1903) Konnektikut ştatında Nyu-Heyvendən gəlmiş əsil yanki olmuşdur. ABŞ-ın cənubunda, bir qayda olaraq, şimallıları bu cür adlandırırlar, onlar da öz növbəsində Konnektikut ştatının əhalisini belə adlandırırlar.

Nyu-Heyvendə ən yaxşı özəl Hopkins məktəbini bitirərək (1854-cü il), Gibbs əvvəlcə Yel kollecində, sonra 1858-ci ildən isə Yel universitetinin təbiət elmləri və dəqiq elmlər bölməsində oxumuş və burada riyaziyyatı və fizikanı öyrənmişdir. Atasının ölümündən (1861-ci il) sonra, evin böyük kişisi kimi, üç bacısının: Culiyanın, Annanın və Emilinin qayğıları onun çiyinlərinə düşmüşdü. 1863-cü ildə o, "Silindrik dişli ötürmənin dişlərinin forması haqqında" adlı doktorluq dissertasiyası müdafiə etdi və Yel kollecinə üç il müddətinə müəllim təyin olundu. Bunun iki ilini Gibbs tələbələrə latın dilini, üçüncü ilini isə ümumi fizikanı öyrətdi. 1866-cı ildə Gibbs Annanın və Emilinin müşayiəti ilə təhsil almaq üçün Avropaya yola düşdü. Parisdə o, məşhur riyaziyyatçılardan Darbunun, Dyuamelin, Liuvilin və Puassonun əsərlərilə tanış oldu. 1867-ci ildə Berlində Hamiltonun, Qaussun, Klebşanın və Yakobinin mexanikaya aid, Frenelin və Hamiltonun optikaya aid, K.Neymanın və U.Tomsonun (gələcək lord Kelvinin) elektrodinamikaya aid əsərlərini öyrəndi, 1868/69-cu dərs ilini Heydelberqdə keçirdi. Həmin dövrdə burada Bunzen, Kirxhof və Helmholts işləyirdilər.

Avropadan qayıdan kimi, Gibbs Yel universitetinin haqqı ödənilməyən riyazi fizika fəxri doktoru vəzifəsini aldı. Anna və Emili ilə birlikdə o, ərdə olan bacısı Culiyanın geniş evində yerləşdi. Maaşın olmaması həm də universitet müəlliminin vəzifələrindən azad olmaq demək idi – sərbəst elmi iş üçün vaxtı qalırdı. Nyu-Heyvenin mənzərəli ətrafları, sanki, uzaq gəzintilər üçün yaranmışdı və bu gəzintilər vaxtı çox yaxşı fikirləşmək olurdu. Gibbsin ixtiyarında həm gözəl universitet kitabxanası, həm də ev kitabxanası var idi. Həmkarları və tələbələr ona hörmət edirdilər, o, yaxınlarının sevgisi ilə əhatə olunmuşdu. İstedadlı alimə məhsuldar elmi tədqiqatlar aparmaq üçün daha nə lazımdır? Daxili keyfiyyətlə xarici şəraitin bu qədər nadir uzlaşması tezliklə öz bəhrəsini verdi.

Termodinamikada qrafik metodların gözəlliyini, gücünü və universallığını dərindən hiss edən Gibbs məşhur entropiya diaqramlarını işləyib hazırladı ki, burada koordinatlardan biri olaraq entropiya götürülür. 1872-ci ildə o, Konnektikut akademiyasına özünün "Qazların və mayelərin termodinamikasında qrafik metodlar" adlı ilk elmi işini təqdim etdi və inandırıcı surətdə nümayiş etdirdi ki, ikiölçülü termodinamik diaqramları qurarkən, həcm-təzyiq koordinatlarına nəzərən, entropiya-həcm və entropiya-temperatur koordinatları daha çox üstünlüyə malikdir. 1873-cü ildə Gibbs "Konnektikut akademiyasının xəbərləri"ndə "Maddənin termodinamik xassələrinin səthlərin köməyilə həndəsi təsvir metodu" adlı yeni işini çap etdirdi. Bu məqalədə alim tədqiq olunan maddənin hal tənlikləri ilə verilən səthlərini entropiya-həcm-enerji koordinatlarında qurmağı və səthin həndəsi xassələrinə görə maddənin bu və ya digər xarakteristikaları haqqında fikir söyləməyi təklif etmişdi.

Gibbsin işləri termodinamikada həndəsi yanaşmanın əsasında dayandı. Maksvell özünün "İstilik nəzəriyyəsi" əsərinin dördüncü nəşrində (1875-ci il) termodinamikada həndəsi yanaşmaya yüksək qiymət verdi. O demişdi: "Biz müstəvidə termodinamik münasibətlərin müxtəlif təsvir üsullarını dəqiq öyrəndiyinə görə Amerika professoru C.Uillard Gibbsə borcluyuq. Gibbs maddələrin xassələrini səthlərin köməyilə öyrənməyin çox əlverişli bir metodunu təklif etmişdir". Bu zaman, Maksvell yalnız tərifləməklə kifayətlənməmişdi: öz əlləri ilə suyun termodinamik səthinin bir neçə modelini hazırlamış və onlardan birini Gibbsə göndərmişdi. Gibbs həmin modeli iş kabinetində saxlayırdı. "Bu modeli kim düzəldib?" – sualına o qısaca cavab verirdi: "Bir dostum...".



Gibbs yalnız Avropada yox, həm də ABŞ-da yavaş-yavaş məşhurlaşmağa başladı, ancaq nüfuza və şöhrətə çatsa da, o yenə əvvəlki kimi, təvazökar elm adamı kimi sadə və xoşrəftar olaraq qaldı. Hər cür sünilikdən azad olan Gibbs istənilən iclasdan və təntənədən qaçardı. Onun iti ağlına aforizmlər xas idi. Onun aforizmləri nəsildən-nəslə keçir: "Tam hissədən sadədir", "Riyaziyyat – bu dildir", "Riyaziyyatçı istədiyi hər şeyi deyə bilər, ancaq fizikin, heç olmazsa, hər hansı ölçüdə də olsa, sağlam ağlı başında olmalıdır". Gibbs 1881-1884-cü illərdə "Vektor analizinin elementləri", 1889-cu ildə isə üç müşahidəyə əsasən planetar orbitlərin təyin edilməsinə həsr olunmuş iş çap etdirdi. Ancaq Gibbsin əsərlərinin şahı haqlı olaraq ömrünün son illərində yazdığı və 1902-ci ildə çap etdirdiyi "Termodinamikanın rasional şəkildə əsaslandırılmasına xüsusi tətbiq edilməklə şərh olunan statistik mexanikanın əsas prinsipləri" adlı əsəri sayılır.

Bu əsər dərhal hamı tərəfindən qəbul edildi. Gibbsin işləri zamanın sərt sınaqlarından çıxdı və bu keçən illərdə onlarda heç bir səhv aşkar olunmayıb. Gibbsin ideyaları riyazi dəqiqliklə, yığcam və maksimum ümumi formada müasir nəzəri fizikanın özülünə daxil olmuşdur və dönməyən proseslərin kvant statistikasında və termodinamikasında müvəffəqiyyətlə işləyir.

xassələri əhəmiyyət kəsb edir. Belə qaza cırlaşmış qaz, adi qaza isə *cırlaşmamış qaz* deyilir.

Qazın *cırlaşmama kriteriyasının* keyfiyyətcə qiymətləndirilməsini $nV_{kv} \ll 1$ şərtindən alırlar, yəni zərrəciklərin $n = N/V$ konsentrasiyası $1/V_{kv}$-dən çox-çox kiçik olmalıdır, burada $V_{kv} \sim \lambda_T^3$ – *kvant həcmi*, $\lambda_T = h/\bar{p}$ isə "istilik" de Broyl dalğasının uzunluğu, $\bar{p}$ isə zərrəciyin impulsunun orta (istilik) qiymətidir. Zərrəciyin orta kinetik enerjisi

$$\bar{E} = \frac{\bar{p}^2}{2m} \sim kT, \text{ onda}$$

$$\bar{p} = \sqrt{\bar{p}^2 - (mkT)^{1/2}},$$

burada m – zərrəciyin kütləsi, k – Bolsman sabitidir. Buradan

$$\lambda_T \sim \frac{h}{(mkT)^{1/2}}, \quad V_{kv} \sim \frac{h^3}{(mkT)^{3/2}}$$

alırıq.

Nəticədə qazın cırlaşmama kriteriyası aşağıdakı şəklə düşür:

$$n\left(\frac{h^2}{mkT}\right)^{3/2} \ll 1 \text{ və ya } T \gg T_0.$$

burada T_0 – *cırlaşma temperaturu* zərrəciklərin kütləsi və konsentrasiyası ilə təyin olunur:

$$T_0 = (2\pi)^3 h^2 \frac{n^{2/3}}{m}.$$



LÜDVİQ BOLSMAN

Avstriyalı nəzəriyyəçi fizik Lüdviq Bolsman (1844-1906) həyatda və elmdə romantik olmuşdur. Onun sevimli bəstəkarı Bethoven idi. O, boş vaxtlarında Bethovenin F.List tərəfindən fortepiano üçün yazılmış simfoniyalarını çalırdı. Onun sevimli şairi Şiller olmuşdu. Bolsman ona özünün "Populyar məqalələri"ni (1905-ci il) həsr etmişdi: "...Şillerə, hadisələrin gerçək təsvirini verən misilsiz sənətkara səmimiyyətlə, ürəyimin dərinliklərindən gələn heyranlıqla onun ölməzliyə qovuşmasının yüzilliyinə".

Bolsman Şiller haqqında yazırdı: "Mənim kimi burnu və saqqalı olan adam, əlbəttə, Şillersiz ola bilərdi, ancaq o, mən olmazdım". Gözəlliyin mahir qiymətləndiricisi olan alim ömrünün yeddinci onilliyində də gözəlliyi vəcdlə seyr etmək qabiliyyətini saxlamışdı. Bir dəfə Atlantikadan keçərək ABŞ-a gedərkən o, aşağıdakı qeydləri etmişdi: "Mən nə vaxtsa oxuyanda ki, hansısa bir rəssam özünə lazım olan yeganə bir rəngi gecə və gündüz, fasiləsiz olaraq axtarmışdır, gülmüşdüm, indi mən buna daha gülmürəm. Mən dənizin rənginə baxaraq, ağladım, rəng necə ola bilər ki, bizi ağlamağa məcbur etsin? Ya da gecənin qatran kimi qara qaranlığında Ayın parıltısı və dənizin işıq saçması...".

Elm tarixinə Bolsman, hər şeydən əvvəl, qazların molekulyar-kinetik nəzəriyyəsinin banisi kimi daxil olmuşdur, lakin o, nəsillərə "Elektrik və işığın Maksvell nəzəriyyəsinə aid mühazirələr" (1891-1893-cü illər), "Mexanikanın prinsiplərinə aid mühazirələr" (1897-1920-ci illərdə nəşr edilmişdir) adlı dəyərli kitablar yazıb qoymaqla yanaşı, mexanika və elektromaqnit sahəsinə aid nəzəri və eksperimental işlər də yerinə yetirmişdir.

E.Max Bolsmanı "Tayı-bərabəri olmayan eksperimentator" adlandırmışdır. Özünün ilk eksperimental işində maddənin sındırma əmsalı və dielektrik nüfuzluğu arasındakı Maksvell tərəfindən çıxarılmış münasibəti tədqiq edərək, Bolsman kükürdün, parafinin, havanın, oksigenin, hidrogenin, karbon qazının dielektrik nüfuzluğunu ölçmüşdü. Maksvell nəzəriyyəsindən dielektrik nüfuzluğunun seçilmiş istiqamətdən asılı olması nəticəsini çıxararaq (mühit anizotrop olduqda), bu nəticəni rombik kükürd kristalından kəsilmiş kürə üzərində yoxlamışdı. 1874-cü ildə "Elastiki nəticənin nəzəriyyəsinə dair" (bu gün özlüelastiklik adlanır) adlı işində alim özünün kəşf etdiyi effekti təsvir etmək üçün riyazi aparat işləyib hazırlamışdır. Bolsman "hesabını" təkmilləşdirərək, italyan alimi Vito Volter elastiklik nəzəriyyəsinin inteqrodiferensial və inteqral tənliklərini çıxardı.

"İstilik şüalanmasının temperaturdan asılılığı haqqında Stefan qanununun işığın elektromaqnit nəzəriyyəsi əsasında çıxarılışı" adlı məqaləsində (1884-cü il) Bolsman Kirxhof şüalanma qanununa, termodinamika qanunlarına və Maksvellin işıq təzyiqi nəzəriyyəsinə əsaslanaraq, mütləq qara cismin şüalanma qanununu çıxarmışdır.

"Nəzəri fizikanın ağsaqqalı" X.A.Lorens Bolsmanın bu işini "nəzəri fizikanın mirvari dənəsi" adlandırmışdır. 1897-ci ildə Stefan-Bolsman qanununu O.Lümmer və E.Prinqsqeym tərəfindən təcrübədə təsdiq edildi.

Lorens 1907-ci ildə Bolsman haqqında çıxış edərkən, onun şəxsiyyətinin təkrarolunmaz xüsusiyyətlərini və elmi yaradıcılığını belə qiymətləndirmişdi: "Çətin ki, mən bu hərtərəfli istedada malik, parlaq və zəkalı adamı, istədiyim kimi, əyani təsvir edə bilim... Onunla şəxsi kontaktda olmaq xoşbəxtliyi mənə cəmi bir neçə dəfə nəsib olmuşdur. Mənə bəslənən hüsnü-rəğbətə, həmçinin onunla söhbət zamanı valeh olmağıma baxmayaraq, mən Bolsmanla, əsasən, onun əsərləri vasitəsilə tanış olmuşam. Doğrudur, bu əsərlərin çoxunda o bizimlə elə danışır ki, deyəsən, heç bir fizik belə danışmamışdır. O öz düşüncə və davranma tərzini bizə, onu bizim qəlbimizə daha yaxın edən sözlərlə açır".

Təxminən 1890-cı illərin ortalarında tamamlanan otuz illik dövr, Bolsmanın elmi yaradıcılığında ən parlaq dövrdür. Bu dövrə tam mənası ilə aşağıdakı sözlər tətbiq oluna bilər: "Fizikanı lərzəyə salan otuz il". Bolsman tərəfindən qazların molekulyar-kinetik nəzəriyyəsinin qurulması və statistik mexanikanın əsaslarının işlənib-hazırlanması vaxtını daha dəqiq göstərmək olar: 1866-cı ilə təsadüf edən birinci işində 22 yaşlı Bolsman termodinamikanın İkinci qanununun mexaniki şərhini verməyə cəhd etmişdir, "Riyazi elmlər ensiklopediyası" üçün "Materiyanın kinetik nəzəriyyəsi" adlı məqalə isə İ.Nabl ilə birlikdə, onun ölümündən bir qədər əvvəl yazılmışdı.

Bolsmanın əsərləri geniş problemlər dairəsini – mexanikanın ümumi teoremlərindən və onun ehtimal nəzəriyyəsi ilə əlaqəsindən tutmuş, qazların özlülük əmsallarının dəqiqliklə hesablanmasına qədər bütün problemləri əhatə edir. Alimin fizikaya verdiyi ən əhəmiyyətli pay: termodinamik proseslərin dönməzliyinin əsaslandırılması və statistik mexanikanın əsaslarının yaradılması da həmin problemlər dairəsilə bağlıdır. Məşhur "Molekullar arasındakı termik tarazlığın sonrakı tədqiqləri" adlı işində (1872-ci il) Bolsman sübut etmək niyyətində idi ki, "qazın başlanğıc halı necə olursa olsun, o həmişə Maksvellin tapdığı limit paylanma halına yaxınlaşmalıdır", ancaq o, məsələnin öhdəsindən qismən gəldi: özünün məşhur tənliyini çıxardı və (Plankdan 28 il əvvəl) "enerjinin sonlu porsiyaları" haqqında anlayış verdi (həmin porsiyalarla qaz molekulları toqquşma zamanı bir-birilə mübadilə edə bilər), həmçinin H-teoremi isbat etdi (müəyyən şərtlər daxilində H funksiyası zərrəciklər arasındakı toqquşmalar nəticəsində, Maksvell paylanmasına çevrilənə qədər ancaq azalmalıdır). Bolsman statistik mexanikanın əsaslarını "Qazların nəzəriyyəsinə dair mühazirələr" (1897-1898-ci illər) adlı kitabında sistematik şərh etmişdir.

Bolsmanın çıxardığı və S entropiyasını halın W ehtimalı ilə əlaqələndiran

$$S = k \ln W$$

düsturu Plankda xüsusi heyranlıq doğurmuşdu (k əmsalı indi Bolsman sabiti adlanır).

Bu düstur alimin qəbri üstündə, heykəltəraş Ambrozi tərəfindən ağ mərmərdən yonulub hazırlanmış heykəli üzərində həkk olunmuşdur. Bolsmanın doğma şəhəri Vyanadakı Nəzəri Fizika İnstitutunun direktoru Valter Tirring heykəlin açılışında aşağıdakı məşhur frazanı söyləmişdir: "Hətta bütün heykəllər minilliklərin zibilləri altında qalsa belə, bu düstur öz əhəmiyyətini saxlayacaqdır".

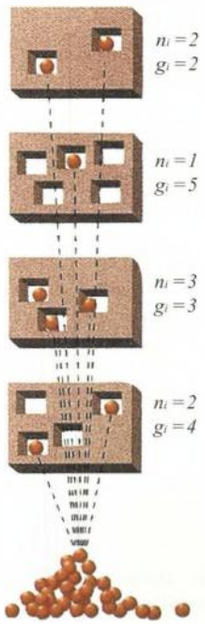
Qazların molekulyar-kinetik nəzəriyyəsi amansız tənqidlə qarşılandı. Bolsman anladı ki, onun əsərləri, demək olar ki, heç kim tərəfindən başa düşülməyib. Alimin sözlərinə görə, o, bəzi işləri barədə yalnız Helmholtsla danışa bilərdi ki, o da Vyanadan çox uzaqda – Berlində idi. Ümidsizlikdən ürəkkeçməsi zamanı Bolsman özünə sui-qəsd etdi.

^{4}He helium izotopunun kifayət qədər ağır atomları üçün $T_0 \approx 3$K. Foton qazı ($m = 0$) istənilən temperaturda cırlaşıb (sırf kvant qazıdır). Kütləsi $m \approx 10^{-30}$kq olan yüngül elektronlar üçün cırlaşma temperaturları n konsentrasiyasından asılı olaraq kəskin fərqlənir. Məsələn, metallarda ($n \sim 10^{28}$m^{-3}) $T_0 \sim 10^4$K, yarımkeçiricilərdə ($n \sim 10^{25}$m^{-3}) $T_0 \sim 10^2$K; otaq temperaturunda ($T \sim 300$K) metallarda elektron qazı həmişə kvant qazıdır, yarımkeçiricilərdə isə onu tam klassik qaz hesab etmək olar.

Kvant və klassik qazların təsviri nə ilə fərqlənir? Burada əsas fərq bir zərrəciyin halının təsvirindədir: koordinatorların və impulsların $(\vec{r}, \vec{p})$ toplusu əvəzində kvant halının (qısa olmaq üçün – orbitalın) kvant ədədləri toplusundan və ε enerjisindən istifadə olunur.

Klassik $f(\vec{r}, \vec{p})$ paylanma funksiyasını orbitalın $\bar{n}(\varepsilon)$ *məskunluğunun* (15) Gibbs paylanmasına uyğun gələn kvant funksiyaları ilə əvəz edirlər. Bu andan sonra fermionlarla bozonlar arasındakı fərq əhəmiyyət kəsb edir.

Fermionlar halında $\bar{n}(\varepsilon)$ orta məskunluğun ifadəsi:



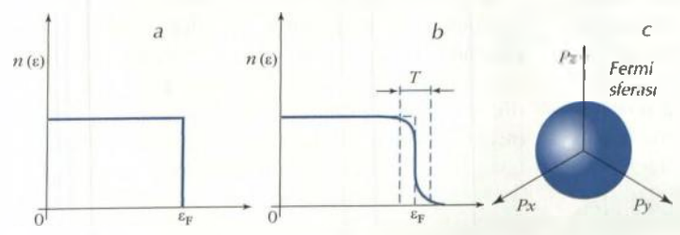
Zərəciklərin kvant halları üzrə paylanmasının modeli. Böyük qutular enerji səviyyələridir, i saylı böyük qutuda olan kiçik qutuların sayı g_i-ya bərabərdir. Kiçik qutularda kürəciklər – zərrəciklər (böyük qutuda bu kürəciklərin sayı n_i-dir) Boze-Eynşteynə görə, istənilən sayda, Fermi-Diraka görə, isə tək-tək yerləşə bilər.

$$\bar{n}(\varepsilon)=\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon-\chi}{kT}\right)+1},$$

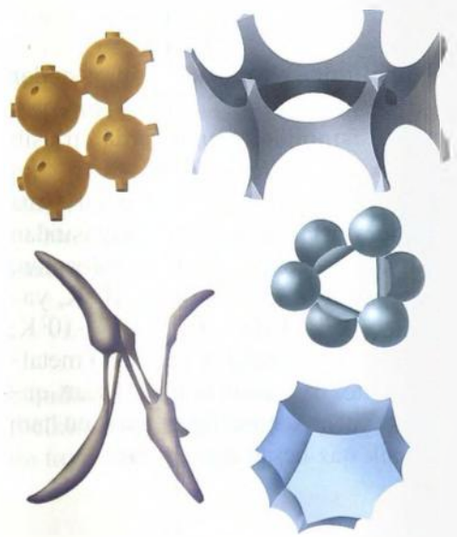
kimidir, burada χ – kimyəvi potensialdır. Bu ifadə, onu 1926-cı ildə tədqiq etmiş Enriko Ferminin və Pol Dirakın şərəfinə *Fermi-Dirak paylanması* adlanır.

Fermi-Dirak paylanması klassik paylanmadan kəskin fərqlənir (Pauli prinsipi olmasaydı, $T=0$ olanda bütün zərrəciklər sadəcə olaraq enerjisi $\varepsilon_0=0$ olan səviyyəyə yığışardı). Məsələn, fermionların ideal qazı üçün $\varepsilon=p^2/2m$ olanda, tutulmuş orbitallar *Fermi sferası* adlanan sferanı doldurur (impuls fəzasında). Bu sferanın radiusu $p_F=\sqrt{2m\varepsilon_F}$ *Fermi impulsuna* bərabərdir. Bu o deməkdir ki, hətta $T=0$ olanda da metallarda elektronlar sükunətdə olmur, əksinə $v_F=p_F/m$ tərtibində olan sürətlərlə hərəkət edir.

İdeal kvant fermi-qazın ən sadə həyəcanlanmış halları *zərrəcik-deşik cütləridir*. Fermi sferası daxilində bütün orbitallar artıq tutulduğuna görə, $T>0$ olduqda hər hansı bir zərrəcik öz halını dəyişmək üçün yeganə bir imkana malikdir – dolmuş fermi sferasından ($|\bar{p}|<p_F$) xaricə ($|\bar{p}'|>p_F$) çıxmaq imkanına. Nəticədə fermi sferası üzərində zərrəcik əmələ gəlir, sferanın daxilində isə eyni zamanda "vakant" orbital (onu *deşik* adlandırırlar) yaranır,



Çox aşağı temperaturlarda ($T\to 0$) Fermi-Dirak paylanması, pillə şəklində olur (*a*): enerjisi $\varepsilon<\varepsilon_f$ olan bütün orbitallar doludur ($\bar{n}(\varepsilon)=1$), halbuki enerjisi $\varepsilon>\varepsilon_f$ olan orbitallar boşdur ($\bar{n}(\varepsilon)=0$). ε_f – sərhəd qiyməti *Fermi enerjisi* adlanır (*c*); $T>0$ olanda Fermi pilləsi yayılmağa başlayır (*b*), lakin əyri altındakı sahə dəyişməz qalır.



Metallarda elektronlar tərəfindən tutulmuş orbitallar, tutulmamış orbitallardan olduqca əcaib formaya malik olan Fermi səviyyələri ilə ayrılır.

yəni cüt yaranır: impulsu $p'>p_F$ olan zərrəcik və impulsu $p'<p_F$ olan deşik.

Maraqlıdır ki, fermionların və bozonların paylanma funksiyaları birbirindən yalnız məxrəcdəki vahidin qarşısındakı işarə ilə fərqlənir. Aşağıdakı ifadə

$$\bar{n}(\varepsilon)=\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon-\chi}{kT}\right)-1}$$

Boze-Eynşteyn paylanma funksiyası adlanır. O, 1924-cü ildə Şatendranat Boze və Albert Eynşteyn tərəfindən alınmışdır.

Boze-Eynşteyn paylanmasının maraqlı xassəsi *boze-kondensasiyadır*: $T\to 0$ olanda bütün zərrəciklər istisnasız olaraq enerjisi $\varepsilon=0$ olan bir halda "yığışır". $T>0$ olanda boze-kondensat həyəcanlanmağa başlayır, paylanma funksiyası isə yayılır (genəlir); ancaq paylanma əyrisi altındakı sahə dəyişməz qalır. Kondensatdan $\varepsilon=p^2/2m$ enerjisi sıfırdan fərqli olan ayrı-ayrı zərrəciklərin çıxmasına baxmayaraq, orada impulsu sıfır olan və istilik hərəkətində iştirak etməyən nəhəng sayda zərrəcik qalır. Yalnız *boze-kondensasiya temperaturuna*, yəni $T_s\sim T_0$ temperaturuna çatandan sonra tərpənməz zərrəciklərin bu ehtiyatı tam tükənir və onların hamısı istilik hərəkətinə cəlb olunur.

Təbiətdə real mövcud olan boze- və fermi-sistemlər, bir qayda olaraq, ideal sistemlər deyil, onların təsviri isə daha mürəkkəbdir və sona çatdırılmamışdır. Buna baxmayaraq, ideal kvant sistemlərinin xassələri maye heliumun *ifrataxıcılığı* və bir sıra maddələrin *ifratkeçiriciliyi* ("Makroskopik kvant hadisələri" adlı əlavə oçerkə bax) kimi makroskopik kvant effektlərinin öyrənilməsində təyinedici rol oynayır.

FİZİKADA PARADOKSLARIN ƏHƏMİYYƏTİ HAQQINDA

Nüfuzlu tənqidçilərin (o cümlədən Anri Puankarenin) Bolsmana etirazları bu gün də maraqlıdır. Onlar, adətən, paradokslar şəklində formulə edilir. Bu paradoksların arasında ən çox məşhur olanı *Puankare-Sermelo qayıdış paradoksudur*.

1892-ci ildə Puankare, 1896-cı ildə isə onun tələbəsi, alman riyaziyyatçısı Ernst Sermelo (1871-1953) Bolsmanı *Puankarenin qayıdış teoremini* pozmaqda günahlandırdılar. Bu teoremə görə dinamik sistemin istənilən mikroskopik halı kvaziperiodikdir, yəni çox böyük *T qayıdış müddətindən* sonra əvvəlcədən verilmiş istənilən dəqiqliklə bərpa olunur. Deməli, *f* və *H* funksiyaları da ilkin qiymətinə qayıtmalıdır və sistemdə heç bir dönməzlik meydana çıxmır.

Puankare-Sermelo paradoksu, riyaziyyatçının və fizikin hər hansı bir problemin həllinə necə müxtəlif cür yanaşdıqlarını göstərir: birinciyə *T*-nin sonlu olduğunu bilmək kifayətdir; ikinci üçün *T*-nin qiymətinin özü də lazımdır. Ədədi qiymətləndirmələr göstərir ki, $T\sim T_1^N$, burada T_1 – bir molekulun qayıdış müddəti, *N* isə molekulların tam sayıdır. Əgər, hətta fərz etsək də ki, $T_1\sim 10^{-6}$ san (bu isə real deyil), onda $N\sim 10^{23}$ üçün $T\approx 10^{17}$ san qiymətini alarıq ki, bu da Kainatın yaşı ilə müqayisə olunandır. Deməli, eyni bir hal praktiki olaraq heç vaxt təkrarlanmır. Çox güman ki, Bolsman öz opponentlərinə cavab verərkən, bunu nəzərdə tutmuşdu: "Sizə axı çox gözləmək lazım gələcəkdir".

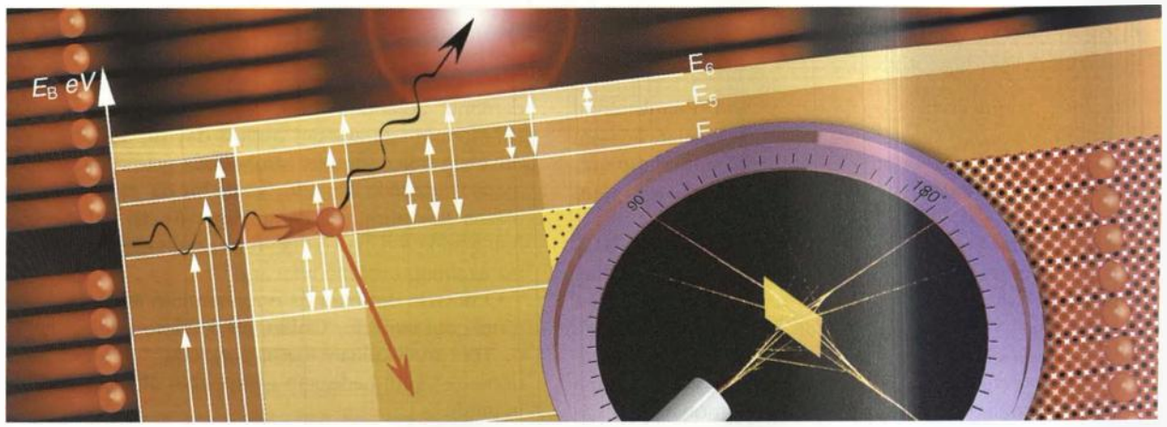
Puankaredən xeyli əvvəl (hələ 1876-cı ildə) avstriyalı Yozef Loşmidt (1821-1895) Bolsmanın kinetik yanaşmasına qarşı ilk ciddi etiraz irəli sürmüşdü. Loşmidt ilk baxışda Bolsmanın çıxardığı nəticələri, o cümlədən onun *H*-teoremini təkzib edən fikri eksperiment irəli sürmüşdü. Tutaq ki, tamamilə ixtiyari zaman anında, sonralar "Loşmidt demonu" adlandırılan bir kimsə bütün qaz zərrəciklərinin sürətlərinin istiqamətini əksinə dəyişir: $\vec{v}_i\to(-\vec{v}_i)$. Onda obyektin təkamülü əks istiqamətdə getməlidir ki, (axırdan əvvələ fırladılan kinofilm kimi) bu da zamanın işarəsinin əksinə dəyişdirilməsi deməkdir: $t\to(-t)$, özü də obyektin halı getdikcə daha çox qeyri-tarazlıqlı olacaq, *H* kəmiyyəti isə azalmaq əvəzinə artacaqdır.

O dövrdə Bolsman öz opponentinin etirazını ancaq qışqırıqla dəf etmişdi: "Onları, ay döndərə bildiniz ha", çünki o, 10^{23} molekuldan ibarət sistemdə "qəflətən hər şeyin dönməsi" kimi hadisənin ehtimalının olduqca az olduğuna inanırdı.

Aydındır ki, heç kim heç vaxt buna bənzər heç nə müşahidə etməyib, lakin Loşmidti təkzib etmək üçün daha ciddi arqumentlər tələb olunurdu.

Müasir fizika baxımından söhbət mexanika tənliklərin bütün mümkün (zamana görə simmetrik) həllərindən yalnız kinetik halları seçməkdən, antikinetik halları isə atmaqdan gedir. N.N.Boqolyubovun göstərdiyi kimi, bu seçim ixtiyari deyil, sırf fiziki *prinsip olan korrelyasiyanın zəifləməsi* prinsipinin nəticəsidir: əgər bir cüt zərrəciyi bir-birindən kifayət qədər uzaq məsafəyə aralasaq, onda onlar daha bir-birinə təsir etməz.

Molekulyar dinamika proseslərinin 1960-cı illərdə EHM-lərin inkişafı sayəsində yerinə yetirilmiş ədədi modelləşdirilməsinin köməyilə Loşmidt hipotezi yoxlanıldı ("demon" rolunda EHM-in operatoru çıxış edirdi; o, istənilən anda prosesi dayandırmaq və ilkin şərtləri dəyişmək imkanına malik idi). Məlum oldu ki, başlanğıc halın bərpa olunma dərəcəsi artıq baş vermiş toqquşmaların sayından çox güclü asılıdır.



KVANT FİZİKASININ ƏSASLARI

KVANT TƏSƏVVÜRLƏRİNİN YARANMASI

Maks Plank. İlk dəfə "kvant" sözünü söyləyən odur.



Fizikada nisbilik nəzəriyyəsinin yaranması ilə, demək olar ki, eyni vaxtda elə bir hadisə baş verdi ki, o, təbiətşünaslıqda daha bir inqilabın başlanğıcını qoydu. Alman Fizika Cəmiyyətinin iclasında Maks Plankın çıxışı zamanı "kvant" sözünün ilk dəfə səsləndiyi gün – 1900-cü il dekabrın 14-ü kvantlar haqqında təlimin yarandığı gün sayılır. Bu təlimin bir çox yaradıcıları – Maks Plankın özü, Albert Eynşteyn, Lui de Broyl, Ervin Şredinger və digər fiziklər, öz yetişdirmələrinin nəyə çevrildiyi ilə barışa bilmirdilər. Məsələn, 1925-ci ildə Eynşteyn Mişel Bessoya göndərdiyi məktubunda kvant mexanikasını "əsil cadugərlik hesabı" adlandırmışdı. 1926-cı ildə Nils Borla söhbət edən Şredinger isə həyəcanla demişdi: "Əgər biz bu lənətəgəlmiş kvant sıçrayışlarını saxlamağa hazırlaşırıqsa, onda mən ümumiyyətlə, təəssüf edirəm ki, atom nəzəriyyəsilə məşğul olmuşam!" Əgər böyük fiziklər belə fikirləşirdilərsə, onda sıravi fiziklərin beyinlərində nə baş verdiyini təsəvvür etmək xüsusilə çətindir. Hətta XX-XXI əsrlərin kəsişməsində də bir çox məşhur tədqiqatçılar (Stiven Vaynberq, Jorj Loşak və b.) kvant nəzəriyyəsinin dərin əsaslarını başa düşmək və onun fundamental prinsiplərinin mahiyyətini izah etmək cəhdlərini dayandırmırlar.

Fizikləri kvant nəzəriyyəsinin yaradılması üzərində işləməyə nə vadar etdi? Hər şeydən əvvəl, klassik elmin mövqeyindən izah oluna bilməyən

hadisələrin təbiətini başa düşmək arzusu. Korpuskulyar-atomistik ideyalar maddəni klassik fizika metodları ilə təsvir etməyə imkan verirdi. Başa düşüldükdən sonra ki sahə materiyanın maddəyə gətirilməyən xüsusi bir formasıdır, Lorens tərəfindən modifikasiya edilmiş Maksvell elektrodinamikası elektromaqnit dalğalarının şüalanması proseslərini çox yaxşı təsvir etdi. Şüalanmanın maddə ilə qarşılıqlı təsirinə dair məsələlərin həlli zamanı həllolunmaz problemlər yarandı. İlk növbədə bu, qara cismin şüalanmasına, fotoeffektə və atomların optik spektrlərinə aid idi.

QARA CİSMİN ŞÜALANMASI VƏ KVANT HİPOTEZİ

Mütləq qara cisim elə obyektə deyilir ki, o, üzərinə düşən istənilən tezlikli elektromaqnit şüalanmasını, heç nə əks etdirmədən, tamamilə udur. Divarları heç nə keçirməyən və çox dar deşiyi olan qapalı boşluq mütləq qara cismin, demək olar ki, ideal modelidir.



Mütləq qara cisim enerjini udaraq qızır və özü şüalanmağa başlayır. Məhz burada nəzəri problem yaranır. Klassik termodinamika iddia edir ki, mütləq qara cismin spektral xarakteristikaları (şüalanma intensivliyinin onun tezliyindən asılılığı) yalnız temperaturla təyin olunur və onun divarlarının maddəsindən qətiyyən asılı deyil. Bu, eksperimental olaraq sübut olunmuşdur. Lakin fiziklərin bütün tezliklər diapazonunda spektral funksiya adlanan funksiya üçün universal düstur tapmaq cəhdləri uğursuzluqla nəticələndi ("İstilik şüalanmasının qanunları" məqaləsinə bax). Enerjinin sərbəstlik dərəcələrinə görə bərabər paylanması prinsipinə əsaslanan hesablamalar ("Statistik fizikanın əsasları" məqaləsinə bax) Reley-Cins düsturuna gətirib çıxarır. Kiçik tezliklərdə bu düstur məqbul nəticələr verir; böyük tezliklərdə isə, Paul Erenfestin sərrast ifadəsilə desək, "ultrabənövşəyi fəlakət" yaranır: şüalanma enerjisi sonsuzluğa bərabər olur. Alman fiziki Vilhelm Vin (1864-1928) enerjinin tezliklərə görə qeyri-bərabər paylanmasına əsaslanaraq, bu problemi həll etməyə çalışdı, ancaq onun çıxardığı düstur yalnız yüksək tezliklərdə yaxşı yarayırdı, aşağı tezliklər üçün isə yararsız idi.

Nəhayət, 1900-cü ildə Maks Plank əvvəlki iki düsturu elə interpolyasiya edə bildi ki, mütləq qara cismin, bütün tezliklər diapazonunda çox gözəl işləyən şüalanma qanununu aldı. Bunun üçün o, klassik fizika baxımından mümkün olmayan hipotez irəli sürdü: elektromaqnit şüalanması yalnız porsiyalarla – kvantlarla buraxılır və udulur. Şüalanmanın bu kvantları tezliklə düz mütənasibdir, yəni

$$E = h\nu, \qquad (1)$$

burada E – şüalanan kvantın enerjisi, ν – şüalanmanın tezliyi, h – ekspe-



Bir kiçik pəncərəli otaq mücərrəd anlayış olan mütləq qara cismin heç də pis modeli deyil.

Belə bir rəvayət var ki, Nobel laureatlı Pavel Alekseyeviç Çerenkov ayrı-ayrı işıq kvantlarını görə bilirmiş (əlbəttə ki, qaranlıqda), bunun sayəsində də γ-şüaların təsiri altında mayelərin xüsusi işıq saçmasını aşkar etmişdi. Sonralar bu şüalanmaya Çerenkov-Vavilov effekti adı verildi.



Kvant nəzəriyyəsinin yaradılması şərəfinə buraxılmış marka. Almaniya. 1994-cü il.

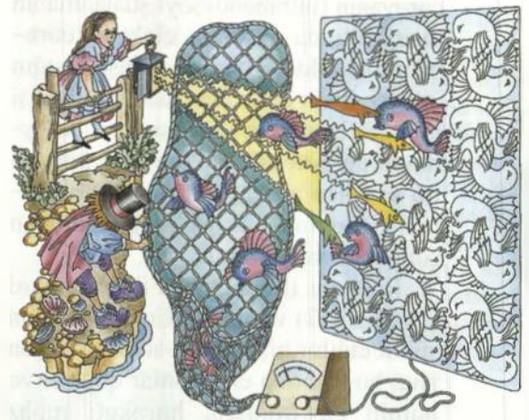
rimentdən təyin olunan Plank sabitidir, onun qiyməti ölçmələr təkmilləşdikcə dəqiqləşdirilir. XX əsrin sonu üçün ən dəqiq qiyməti

$$h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\,\text{C} \cdot \text{san}.$$

FOTOELEKTRİK EFFEKTİ VƏ FOTONLAR

1887-ci ildə alman fiziki Henrix Hers elektromaqnit dalğalarını şüalandırmaq üçün elektrik boşaldıcısı ilə – bir cüt metal kürə ilə təcrübə aparırdı. Kürələrə potensiallar fərqi tətbiq edəndə, onların arasında qığılcım yaranırdı. O, kürələrdən birini ultrabənövşəyi şüalarla işıqlandıran zaman boşalma güclənirdi. Bununla da *xarici fotoeffekt* hadisəsi aşkar olundu.

1888-ci ildə başqa bir alman – Vilhelm Qalvaks (1859-1922) müəyyən etdi ki, ultrabənövşəyi işıqla şüalandırılan metal lövhə müsbət yüklənir. Fotoeffektin ikinci dəfə kəşfi belə baş verdi. Üçüncü dəfə onu həmin ildə. Hersin və Qalvaksın təcrübələrindən xəbərsiz italyan Auqusto Riqi (1850-1921) müşahidə etmişdir. Riqi aydınlaşdırdı ki, fotoeffekt həm metallarda və həm də dielektriklərdə mümkündür. Riqi fotoelement, yəni işığı elektrik enerjisinə çevirən cihaz düzəltdi. Lakin bu hələ tarixin hamısı deyil: rusiyalı fizik Aleksandr Qriqoryeviç Stoletov (1839-1896) başqalarından asılı olmadan, fotoeffekti kəşf etmiş (1888-ci il) dördüncü alim idi. Stoletov iki il ərzində yeni hadisəni hərtərəfli öyrəndi və onun əsas qanunauyğunluqlarını çıxardı. Məlum oldu ki, foto-



MAKS PLANK

Fizikanın sonrakı inkişafı naminə, xoşbəxtlikdən, Maks Karl Ernst Lüdviq Plank (1858-1947) professor Filipp fon Jollinin öyüd-nəsihətlərinə qulaq asmadı. Professor hər şeylə maraqlanan tələbəsinə təkidlə məsləhət görürdü ki, nəzəri fizika ilə məşğul olmasın. Plank nəzəriyyəçi-fizik olmaqla, elm tarixinə klassik eranın, kvantaqədərki fizikanın əvəzinə gələn yeni, kvant erasını kəşf etmiş bir alim kimi daxil olmuşdur.

Maks Plank alman şəhəri Kildə, Kil universitetinin vətəndaş hüququ üzrə professorunun ailəsində doğulmuşdur. Plankın doqquz yaşı olanda, onun ailəsi Münxenə köçür. Burada oğlan Maksimillian gimnaziyasında oxumuş və linqvistçi və ya musiqiçi olmaq istəmişdir. (Gözəl pianoçu olan Plank çox sonralar skripkada çalan Albert Eynşteynlə duetdə çıxış etmişdir.) Fizika Plankın diqqətini, bu sahədə nə isə orijinal bir iş görmək mümkün olan bir elm sahəsi kimi cəlb etmişdi. 1874-cü ildə o, Münxen universitetinə daxil oldu, bir ili Berlində keçirdi və burada fizikanı Qustav Kirxhofdan və German Helmholtsdan öyrəndi. Münxen universitetini bitirdikdən bir il sonra (1878-ci il) Plank termodinamikanın ikinci qanunu ilə bağlı olan problemlər dairəsinə aid doktorluq dissertasiyası müdafiə etdi və doğma universitetdə privat-dosent vəzifəsində saxlanıldı. 1888-ci ildə o, Berlinə köçdü və burada yeni yaradılmış Nəzəri Fizika İnstitutunun birinci direktoru vəzifəsinə keçdi, 1892-ci ildən 1926-cı ilə qədər isə Berlin universitetinin tam professoru vəzifəsini tutdu və kafedra üzrə Kirxhofun varisi oldu. Özünün zəngin pedaqoji və elmi təcrübəsini Plank beşcildli "Nəzəri fizikaya giriş" (1916-1932-ci illər) kitabında əks etdirdi. Bu kitab üzrə nəinki Almaniyada, həm də başqa ölkələrdə tələbələr dərs almışlar.



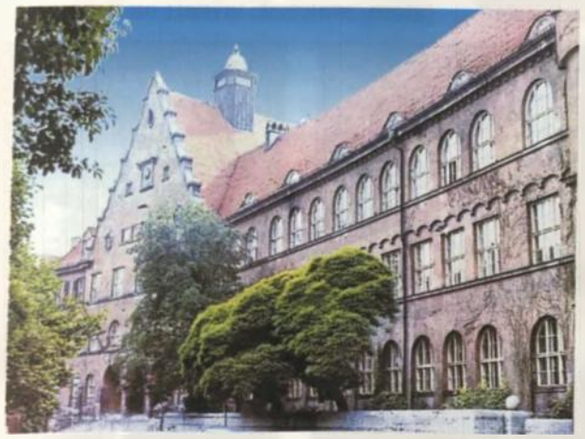
A.Eynşteyn, M.Plank, R.Milliken və M. fon Laue.

1930-cu ildə, Plankın 72 yaşı tamam olanda, o, kayzer Vilhelmin Fizika institutuna rəhbərlik etməyə başladı. (Almaniyada universitetlərlə yanaşı, 1911-ci ildən başlayaraq, nəhəng sənaye sahiblərinin vəsaiti hesabına kayzer Vilhelm elmi-tədqiqat institutları mövcud olmuşdur ki, onlar kayzer II Vilhelmin təklifi ilə yaradılmışdır. İkinci dünya müharibəsindən sonra onların hamısının adını dəyişib, Maks Plank institutları adlandırdılar.) 1937-ci ildə Plank institutdan yəhudilərin qovulmasına etiraz əlaməti olaraq nümayişkaranə şəkildə institutun prezidenti vəzifəsindən istefaya çıxdı. 1945-ci ildə Plank yenidən Fizika İnstitutunun (indi Maks Plank institutunun) prezidenti oldu və həyatının sonuna qədər bu vəzifədə qaldı.

Maks Plank alman elmi məktəbinin ən yaxşı ənənələrinin – zəhmətsevərliyin, çalışqanlığın və konservatizmin mücəssəməsi idi. Termodinamikaya olan dərin marağı, onu bu elmin vasitələrilə elektrodinamikanın kəskin problemlərindən birini – "ultrabənövşəyi fəlakəti" həll etmək cəhdinə yönəltdi. İş onda idi ki, Vin, Reley və Cins kimi nəzəriyyəçilərin inadkar səylərinə baxmayaraq, mütləq qara cismin istilik şüalanması spektrində enerjinin tam paylanmasının vahid təsvirini almaq mümkün olmurdu. Plank termodinamika ilə elektrodinamika arasındakı əlaqənin müəyyən edilməsinə həsr olunmuş bir neçə məqalə çap etdirdi, lakin problem həll edilməmiş qaldı. Elə bu vaxt ümidsiz bir halda enerjinin sonsuz bölündüyünü hesab edən klassik fizikaya yad olan bir hipotez qəbul etdi. Planka görə, enerji istənilən qədər kiçik yox, yalnız sonlu porsiyalarla (kvantlarla), şüalanmanın tezliyi ilə mütənasib olan porsiyalarla buraxılır və udulur. Mütənasiblik əmsalı h ilə işarə olunur və Plank sabiti adlanır.

Plankın Alman Fizika Cəmiyyətinin iclasında məruzə ilə çıxışı kvant fizikasının yaranma tarixinin başlanğıcı sayılır. 1918-ci ildə kvantlar hipotezinə görə alim Nobel mükafatına layiq görüldü.

Plankın özü (o dövrün əksər fizikləri kimi), öz hipotezinə real fiziki mənası olmayan, ancaq doğru cavabı almağa imkan verən sırf bir riyazi üsul kimi baxırdı. Kvantların varlığına "əmin olanlardan" birincisi Albert Eynşteyn olmuşdur. O, 1905-ci ildə fərz etdi ki, enerji nəinki kvantlar şəklində şüalanır və udulur, həm də kvantlar şəklində yayılır. Bununla da o, işığın korpuskulyar təbiətinə dair təsəvvürləri əslində dirçəltdi. Hipotetik kvant (Planka görə) indi real işıq zərrəciyi statusunu, foton statusunu qazandı. Bunun sayəsində Eynşteyn fotoeffektin xüsusiyyətlərini izah etdi.



Münxendə Maks Plank İnstitutu.

Öz sərtliyinə görə heyrət doğuran bir hipotez irəli sürmüş Plank, kvant mexanikasının yaranmasını uzun illər kənardan şübhə ilə izləmişdir. Klassik fizika ənənələrilə tərbiyələnmiş Planka yeni fizika, kvant fizikası yad idi. O, (həmçinin Eynşteyn) ümid edirdi ki, köhnə fizikadan uzaqlaşma müvəqqətidir və gələcək nəzəriyyə, son nəzəriyyə həll olunmamış qalmış bir çox suallara cavab verməyə imkan verəcəkdir. Ancaq o, Eynşteynin xüsusi nisbilik nəzəriyyəsini böyük ruh yüksəkliyilə qarşıladı. 1906-cı ildə Plank relyativistik dinamikanın tənliyini çıxardı, elektronun enerji və impulsu üçün ifadə aldı. "Nisbilik nəzəriyyəsi" termini də ona məxsusdur. 1907-ci ildə alimə relyativistik termodinamikanı inkişaf etdirmək nəsib oldu.

Plankın şəxsi həyatındakı bir çox faciəli hadisələr onun ovqatını təlx etmişdi; birinci arvadı vəfat etdi, böyük oğlu Birinci dünya müharibəsində döyüş meydanında həlak oldu, bir-birinin ardınca iki qızı vəfat etdi, kiçik oğlu Hitlerə qarşı sui-qəsddə iştirakına görə güllələndi (1944-cü il). Bütün bu bədbəxtliklərə, sonra isə xəstəliyinə baxmayaraq Plank, elmə xidmətdə yüksək örnək olmaqla, mərdimərdanə işləməkdə davam etdi.

Fəlsəfəyə və fizika tarixinə aid özünün çoxsaylı işlərindən birində Maks Plank kədərlə qeyd etmişdi: "Yeni elmi həqiqət adətən hamı tərəfindən qəbul edilir, ona görə yox ki, bu həqiqətin əleyhdarları onun doğruluğuna inanır və yeni etiqadı qəbul edirlər, əksinə, ona görə ki, onlar tədricən yox olub aradan çıxırlar, yəni nəsil isə onun doğruluğuna şübhə etmir".



A.Q.Stoletov.

cərəyanın (ultrabənövşəyi şüalanmanın təsiri altında yaranan elektrik cərəyanının) şiddəti, birincisi, düşən işığın intensivliyilə düz mütənasibdir, ikincisi isə, şüalanmanın intensivliyi dəyişmədikdə potensiallar fərqinin artması ilə əvvəlcə artır, lakin müəyyən qiymətə (doyma cərəyanına) çatdıqdan sonra isə daha artmır.

1899-cu ildə alman Filipp Lenard (1862-1947) və ingilis Cozef Tomson sübut etdilər ki, metalın səthinə düşən işıq, bu səthdən elektronlar qoparır və həmin elektronların hərəkəti məhz fotocərəyanın yaranmasına səbəb olur. Lakin fotoeffektin təbiətini klassik elektrodinamikanın köməyilə başa düşmək heç cür mümkün olmadı. O da izahedilməz qaldı ki, nə üçün fotocərəyan, yalnız düşən işığın tezliyi hər bir metal üçün, onun özünəməxsus müəyyən bir dəqiq qiymətdən böyük olanda yaranır.

Yalnız 1905-ci ildə Eynşteyn bu müəmmanı bütün detalları ilə tam aydın və anlaşıqlı olan mənzərəyə çevirdi. Eynşteyn Plankın kvant hipotezini inkişaf etdirərək fərz etdi ki, elektromaqnit şüalanması, sadəcə, porsiyalarla buraxılmır, o həm də fəzada porsiyalar şəklində yayılır və maddə tərəfindən də porsiyalar şəklində udulur. Bu porsiyalar işıq kvantları və ya fotonlar adlanır. Ona görə də fotocərəyanın yaranması üçün heç də düşən işıq dəstəsinin intensivliyi vacib deyil. Başlıcası odur ki, ayrı-ayrı işıq kvantının enerjisi maddədən elektronu vurub çıxarmağa kifayət etsin. Bunun üçün lazım olan minimal enerji *çıxış işi* adlanır və W ilə işarə olunur. Nəticədə, Eynşteyn fotoeffekt üçün aşağıdakı tənliyi çıxardı:

$$h\nu = W + E_k. \qquad (2)$$

Bu tənliyin sol tərəfində (1) düsturu ilə təyin olunan və fotonun maddədəki elektrona verdiyi enerji durur, sağ tərəfində isə elektronun maddədən çıxış işi ilə, artıq azad olmuş elektronun E_k kinetik enerjisinin cəmi durur. Aydındır ki, fotoeffekti yalnız kifayət qədər yüksəktezlikli işıq dalğası doğura bilər, fotocərəyanın şiddəti isə udulan işığın intensivliyilə, yəni maddədən elektronları vurub çıxarmağa qadir olan fotonların sayı ilə mütənasibdir. Eynşteyn nəzəriyyəsi bütün eksperimental məlumatları izah etdi.

1907-ci ildə Eynşteyn bərk cisimlərin istilik tutumu nəzəriyyəsi üzərində işləyərkən, kvant hipotezinə aid daha bir dəqiqləşmə apardı. Cisim (atom, molekul, kristal) nə üçün işığı,

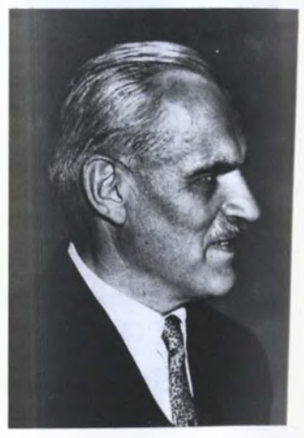
Fotoeffekt elektronların bərk cisimlərdən vurulub çıxarılması ilə başa çatmır. Qazlarda atomlar (və ya molekullar) praktik olaraq sərbəst halda olur. Bu halda söhbət çıxış işindən yox, *ionlaşma enerjisindən*, yəni elektronu atomdan qoparmaq üçün elektrona verilən enerjidən gedir. (2) düsturu baxılan halda da, yəni W ionlaşma enerjisi kimi başa düşüldükdə də doğrudur.



F.Lenard.



C.Tomson.



A.Kompton.

Plankın iddia etdiyi kimi, yalnız porsiyalarla şüalandırır? Eynşteyn bu suala belə cavab vermişdi: ona görə ki, atomların enerjisinin mümkün qiymətləri yalnız diskret çoxluq əmələ gətirir. Beləliklə, şüalanmanın və udulmanın nəzəriyyəsi bitmiş şəkil aldı.

1922-ci ildə amerikalı Artur Kompton (1892-1862) işıq kvantları hipotezinin mühüm təsdiqini əldə etdi. O aşkar etdi ki, rentgen şüalanmasının dalğa uzunluğu, bu dalğa maddənin elektronlarından səpilərkən dəyişir. Amma klassik elektrodinamikaya görə səpilmə zamanı işıq dalğasının uzunluğu dəyişə bilməz! Bu zaman elektronlardan dalğaların yox, zərrəciklərin (fotonların) səpildiyini fərz edən Kompton hesablama apardı. Nəticə eksperimental nəticə ilə üst-üstə düşdü. Bu fakt fotonların real mövcudluğunun birbaşa sübutu oldu.

ATOM SPEKTRLƏRİ VƏ KVANT NƏZƏRİYYƏSİ

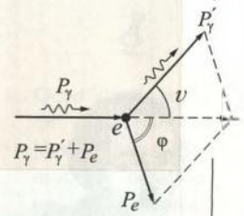
Kvant nəzəriyyəsi üçün üçüncü mənbə atomların optik spektrləri olmuşdur. Hələ XIX əsrin əvvəlində fiziklər müşahidə etmişdilər ki, qızdırılan zaman istənilən maddə, dəqiq müəyyən dalğa uzunluqlarından ibarət işıq şüalandırır. Spektroskopun köməyilə belə işığı tərkib hissələrinə ayırsaq, bir sıra spektral xətlər – bu maddəyə daxil olan hər bir element üçün fərdi olan xətti spektrlər alarıq.

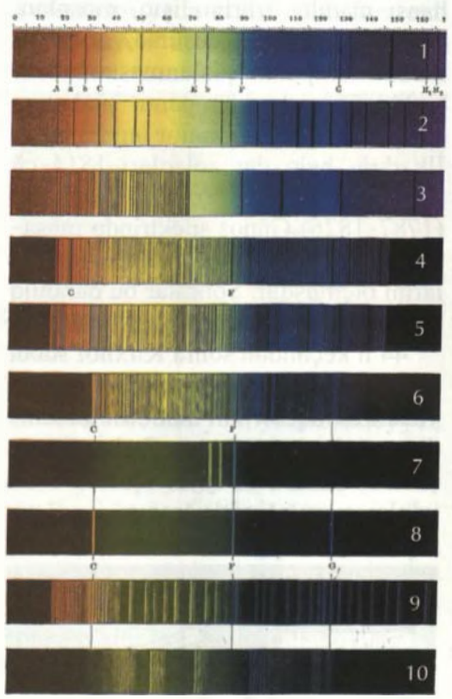
1859-cu ildə alman alimləri Qustav Robert Kirxhof (1824-1887) və Robert Bunzen (1811-1899) spektral analiz metodunu işləyib hazırladıqdan sonra, optik spektrlərin sistematik öyrənilməsinə başlanıldı. Belə bir fundamental fakt müəyyən olundu: qızdırılan zaman atomlar, hansı maddənin tərkibində olmasından asılı olmayaraq,

KOMPTON EFFEKTİ

Artur Kompton rentgen şüalarının parafində səpilməsini tədqiq etmişdi. Klassik nəzəriyyəyə görə işığın səpilməsi zamanı onun dalğa uzunluğu dəyişməməlidir. İşığın elektromaqnit sahəsində elektronlar sahənin tezliyi ilə rəqs edir və bu zaman həmin tezlikli ikinci dalğaları şüalandırır.

Kvant nəzəriyyəsində səpilmə, düşən fotonun tərpənməz elektrondan elastiki səpilməsi kimi özünü büruzə verir. Elektron fotondan enerji və impuls alaraq hərəkətə gəlir – təpməyə məruz qalır və ona görə də "təpmə elektronu" adlanır. Səpilmədən sonra zərrəciklərin hərəkət istiqamətləri saxlanma qanunları ilə təyin olunur. Belə olduqda, öz enerjisinin bir hissəsini itirmiş fotonun dalğa uzunluğu artır. Təcrübə təpmə elektronlarının olduğunu və fotonun dalğa uzunluğunun zərrəciklərin səpilmə bucağından nəzəri asılılığını təsdiq etdi. Beləliklə, işıq haqqında kvant təsəvvürlərinin doğruluğu sübut olundu.





Kompton effekti – fotonun sükunətdəki elektronla elastiki toqquşmasıdır. Foton toqquşmaya qədər p_γ impulsuna, toqquşmadan sonra isə p_γ' impulsuna malik olmuşdur. Başlanğıcda tərpənməz olan elektron p_e impulsu qazanır. Toqquşmadan sonra foton düşən fotonun hərəkət istiqamətinə nəzərən θ bucağı altında, elektron isə φ bucağı altında uçur.

Sabit ulduzların və dumanlıqların spektrlərinin Günəşin və bəzi metalloidlərin spektrlərilə müqayisəsi.

1 – Günəş;
2 – sarı-qırmızı ulduz;
3 – mavi ulduz;
4 – Sirius;
5 – Herkulesin α-sı;
6 – Vensin T-si;
7 – Əjdaha dumanlığı;
8 – hidrogen;
9 – azot;
10 – işıq qazı.



Q.R.Kirxhof.



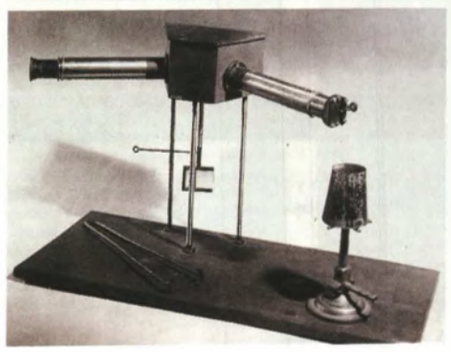
Y.Fraunhofer.

Fizikaya atomun stasionar halları haqqında anlayışı 1913-cü ildə Nils Bor daxil etmişdir. Termlərin qiymətləri atomun stasionar hallarının enerjilərilə mütənasibdir.

xarakterik uzunluqlu işıq dalğaları buraxır. Hər bir adamın əl izləri təkrarolunmaz olduğu kimi, spektral xətlər də hər bir element üçün fərdidir. Məsələn, əgər maddənin spektrində dalğa uzunluğu 590 nm-ə yaxın olan parlaq sarı xətt görünürsə, bu o deməkdir ki, həmin maddədə natrium iştirak edir. Əgər məlum olan maddələrdən heç birinə uyğun gəlməyən xəttə rast gəlinirsə, onda o, yəqin ki, əvvəlcədən məlum olmayan hər hansı elementə məxsusdur. Kirxhof və Bunzen məhz seziumu və rubidiumu bu cür kəşf etdilər. Spektral analizin sayəsində 1860-1925-ci illər ərzində dövri sistem 25 elementlə zənginləşdi.

Atom yalnız şüalandırmır. Hər hansı maddə üzərinə işıq, məsələn, güclü lampa işığı düşürsə, onda bu maddə lampanın şüalanmasının bəzi tezliklərini udur: lampanın şüalanma spektrində qaranlıq xətlər əmələ gəlir. İlk dəfə belə dar zolaqları 1814-cü ildə alman fiziki Yozef Fraunhofer (1787-1826) Günəş spektrində müşahidə etmiş və uyğun dalğa uzunluqlarını ölçmüşdür. Sonralar bu qaranlıq xətlərə *Fraunhofer xətləri* adı verildi.

44 il keçəndən sonra Kirxhof sübut etdi ki, Fraunhofer xətləri Günəşin yuxarı təbəqələrinin maddəsi tərəfindən, yəni xromosfer tərəfindən Günəş şüalanmasının müəyyən tezliklərinin udulması sayəsində yaranır.



R.Bunzenin və Q.Kirxhofun spektroskopu. Münxen. Alman muzeyi.

XIX əsrin ikinci yarısında bir çox fiziklər spektrləri tədqiq edirdilər. Zaman keçdikcə aydın oldu ki, spektral xətlər çox vaxt seriyalarda qruplaşır ki, onlardan bəziləri spektrin görünən oblastında, digərləri ultrabənövşəyi. üçüncüləri isə infraqırmızı oblastda yerləşir. İlk dəfə buna diqqət yetirən isveçrəli fizika müəllimi İohan Balmer (1825-1898) olmuşdur. 1885-ci ildə o, sadə bir düsturun köməyi ilə hidrogen atomunun spektrinin görünən hissəsindəki bütün spektral xətlərin dalğa uzunluğunu təsvir edə bildi. Həmin spektral xətlər birlikdə *Balmer seriyası* adlanır. Balmerin işlərindən ruhlanan Teodor Layman (1874-1954), Fridrix Paşen (1865-1947) və Avqust Pfund (1879-1949) hidrogen spektrinin başqa oblastlarındakı seriyaları aşkar edib öyrəndilər. İsveçli Yuxannes Ridberq (1854-1919) 1890-cı ildə müxtəlif seriyalar arasında qarşılıqlı əlaqəni müəyyən etdi. 1908-ci ildə onun ideyalarını inkişaf etdirən isveçrəli Valter Rits (1878-1909), indi *Ridberq-Rits kombinasiya prinsipi* adlanan prinsipə gəlib çıxdı. Bu prinsipə görə spektral xətlərin dalğa ədədlərini verilmiş element atomları üçün xarakterik olan və *termlər* adlanan kəmiyyətlərin fərqi şəklində yazmaq olar.

Lakin hər şey bu cür sadə deyildi. Ridberq-Rits kombinasiya prinsipi universal əhəmiyyət kəsb etsə də, spektri seriyalara bölmək yalnız qələvi və qələvi-torpaq metalları üçün yaxşı alınırdı. Məsələn, dəmirin spektri heç bir sadə təsvirə tabe olmurdu.

XX əsrin əvvəlinə yaxın külli miqdarda spektroskopik material toplanmışdı. Lakin onu necə izah etməli? Çünki elektrodinamikaya görə yüklərin dəyişənsürətli hərəkəti zamanı şüalanma baş verir. Atomda yüklərin hansı hərəkəti şüalanma doğurur? Atomun quruluşu necə olmalıdır ki, onun

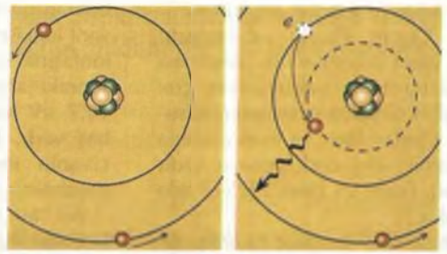
şüalanması müşahidə olunan spektrdən ibarət olsun? Cozef Tomson 1897-ci ildə, elektronu kəşf edəndən sonra, atomun quruluşu haqqında müxtəlif hipotezlər irəli sürməyə başladılar. Ən çox populyarlıq qazanan atomun Tomson modeli oldu. Bu modelə "kişmişli keks" adı verdilər: müsbət yüklənmiş maye kürəcik daxilində elektronlar üzür. Tomson modeli atomun ölçülərini düzgün qiymətləndirməyə imkan verdi, lakin atomun xətti spektrini heç cür izah edə bilmədi. Başqa ideyalar da irəli sürdülər. Məsələn, Uilyam Tomson (lord Kelvin) və Piter Teyt (1831-1901) atomun "burulğanlı" modelini, yapon Xantaro Naqaoka (1865-1950) "saturnabənzər" modelini təklif etdilər: müsbət yüklü nüvə ətrafında elektronlardan ibarət halqa fırlanır. Lakin onlar da eksperimentlərin nəticələrini izah edə bilmədi.

1911-ci ildə Ernest Rezerford α-zərrəciklərin qızıl folqasından səpilməsini tədqiq edərkən aşkar etdi ki, onlar ilkin istiqamətdən müxtəlif bucaqlar altında meyil edir ("Ernest Rezerford" məqaləsinə bax). Meyil bucağı α-zərrəciyin atomdan hansı məsafədə uçub getməsindən asılıdır. Bu asılılığı *səpilmənin effektiv kəsiyi* ilə ifadə edirlər. Rezerford fərz etdi ki, atom planetar sistemə bənzəyir: müsbət yük mərkəzdə toplanmışdır. Onun ətrafında isə elektronlar fırlanır. Bu model əsasında o, α-zərrəciklərin müxtəlif element atomlarından səpilmə qanununu – Rezerfordun məşhur düsturunu çıxardı. Həmin düstur eksperimental məlumatlarla tam üst-üstə düşdü.

İki il sonra, 1913-cü ildə, Nils Bor atomun planetar Rezerford modeli əsasında atom spektrlərini izah etməyə çalışdı. Başlıca çətinlik onda idi ki, klassik elektrodinamika qanunlarına

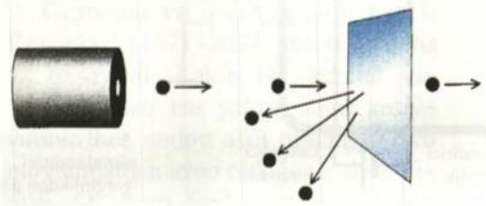


görə elektron müsbət nüvə ətrafında fırlanaraq, saniyənin trilyonda bir hissələri ərzində fırlanma enerjisini itirməli və nüvə üzərinə düşməlidir. Bununla da hər şey bitərdi. Bu çətin vəziyyətdən çıxmaq üçün Bor şüalanma kvantlarını yada saldı. Alim fərz etdi ki, elektron atomda, klassik mexa-



nikanın icazə verdiyi kimi, heç də istənilən orbitdə yox, yalnız müəyyən – *stasionar səviyyələrdə* və ya *örtüklərdə* yerləşə bilər ki, burada şüalanma baş vermir. Lakin elektron enerjisi çox olan orbitdən başqa, daha kiçik enerjili orbitə keçərkən foton şüalanır. Bu fotonun ν tezliyini (1) Plank düsturunun köməyilə hesablamaq olar:

E.Rezerford təcrübəsinin sxemi.



Qeyd etmək lazımdır ki, səpilmənin klassik nəzəriyyə əsasında hesablanmış (Rezerfordun etdiyi kimi) effektiv kəsiyinin doğru olduğunu o zaman qəbul etmək olar ki (kvant nəzəriyyəsində hesablandığı kimi), zərrəciklərin qarşılıqlı təsiri Kulon qanunu üzrə baş versin. Bu dərəcədə xoşbəxt üst-üstə düşmə olmasaydı, eksperimental məlumatlar izahedilməz qalardı, əlbəttə ki, uzun müddətə yox.



C.Frank.

$$h\nu = E_i - E_f, \qquad (3)$$

burada E_i və E_f – elektronun uyğun olaraq başlanğıc və son orbitdəki enerjisidir. Stasionar orbitləri təyin etmək üçün Nils Bor bir tərəfdən, atom spektroskopiyasının məlum düsturlarından, digər tərəfdən isə, özünün irəli sürdüyü uyğunluq prinsipindən istifadə etdi. Baxdığımız halda uyğunluq prinsipi belə səslənir: şüalanmanın tezlikləri çox kiçik, dalğa uzunluqları isə çox böyük olduqda kvant fizikasının düsturları klassik fizikanın düsturlarına çox yaxındır.

Beləliklə, Bor hidrogenin bütün şüalanma spektrini izah edə bildi. Hidrogen atomunda stasionar orbitlərdə elektronun enerjisi aşağıdakı düsturla təyin olunur:

$$E_n = -hcR\frac{1}{n^2}, \qquad (4)$$

burada R – spektroskopik Ridberq sabiti, n isə baş kvant ədədidir və yalnız tam qiymətlər alır. Elektronun minimal enerjisinə $n=1$ uyğundur. Əgər bu enerji ilə stasionar orbitin radiusunu hesablasaq, onun $0{,}5 \cdot 10^{-8}$ sm-ə bərabər olduğunu görərik ki, bu da eksperimental məlumatlarla uzlaşır. Bor eyni dərəcədə müvəffəqiyyətlə birqat ionlaşmış helium atomunun spektrini də izah etdi. Atomun planetar modelini *Rezerford-Bor modeli* adlandırmağa başladılar.

Həmin 1913-cü ildə də alman fizikləri Ceyms Frank və Qustav Lüdviq Hers atom elektronlarının enerji səviyyələrinin diskret olduğunu birqiymətli təsdiq edən eksperiment qoydular.

Sonrakı onillikdə Borun özü, Arnold Zommerfeld, Paul Erenfest və başqa fiziklər, həm prinsipial, həm də sırf riyazi ciddi çətinliklərə baxmayaraq, çoxelektronlu atomların optik spektrlərinin öyrənilməsində böyük nailiyyətlər qazandılar. Məsələn, 1922-ci ilə yaxın Bor, atom örtükləri anlayışına əsaslanaraq, elementlərin periodik sisteminin bəzi xüsusiyyətlərini izah edə bildi.

Sonralar "köhnə" və ya "*yarıklassik kvant nəzəriyyəsi*" adlandırılan bir nəzəriyyənin yaradılması bu cür ümumi şəkildə başa çatdırıldı. Klassik fizikanın dayaqları dağıldı: atom sistemlərinə klassik nəzəriyyəyə görə mümkün olan halların heç də hamısına yox, yalnız bəzilərinə – stasionar hallara malik olmağa izin verildi; işığı isə onlara, enerjisi bir stasionar haldan digərinə keçid enerjisinə bərabər olan, ayrı-ayrı kvantlar (fotonlar) şəklində şüalandırmağa icazə verildi. Lakin bu cür keçidlərin intensivliyini hesablamaq üçün "köhnə" nəzəriyyənin yalnız bir aləti var idi – uyğunluq prinsipi. Uyğunluq prinsipinin istifadəsi ciddi elmdən çox məharət tələb edən bir sənət idi və heç də həmişə doğru nəticələrə gətirmirdi. Təzə ideyalar və birbaşa hesablamaların köməyilə etibarlı nəticələr almağa imkan verən ciddi nəzəriyyə tələb olunurdu.

FRANK VƏ HERS TƏCRÜBƏSİ

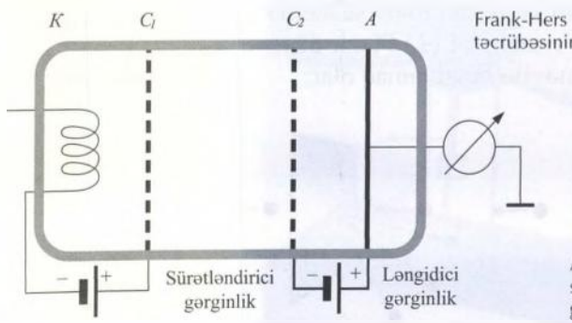
1913-cü ildə Ceyms Frank (1882-1964) və Qustav Hers (1887-1975) civə atomlarının ionlaşma potensialını ölçmək üçün eksperiment qoydular, nəticədə isə Bor postulatlarının ilk təcrübi təsdiqini vermiş oldular. Həmin dövrdə onlar Bor postulatları haqqında heç bir təsəvvürə malik deyildilər.

50 il keçəndən sonra Ceyms Frank xatırlamışdı: "O dövrdə fiziklər arasında atom modellərinin qurulması cəhdlərinə açıq-aşkar inamsızlıq hökm sürdüyündən, çox adam atoma həsr olunmuş işləri diqqətlə oxumurdu. Xüsusilə qeyd etmək lazımdır ki, Qustav Hers və mən əvvəlcə Borun işinin çox böyük əhəmiyyətini dərk etməyə qadir deyildik..." Buna baxmayaraq, Frank və Hers 1925-ci ildə Nobel mükafatı laureatı oldular.

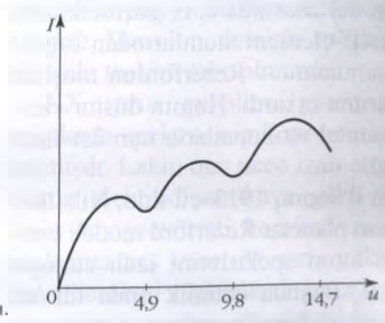
Onların istifadə etdikləri cihaz, civə buxarları ilə doldurulmuş dörd elektrodlu (katod K, anod A və iki S_1 və S_2 torları) elektron lampasından ibarət idi. Katodun buraxdığı elektronlar K və C_1 arasındakı V potensiallar fərqi ilə sürətləndirilirdi və C_1 və C_2 arasındakı fəzada civə atomlarını bombardman edirdi. C_2 və A-ya tətbiq olunmuş bağlayıcı gərginlik (≈ 0,5 V) anoda yalnız enerjisi 0,5 eV-dan çox olan elektronların gəlib çatmasına imkan verirdi. I anod cərəyanının V gərginliyindən asılılığı ölçülürdü.

Məlum oldu ki, sürətləndirici gərginliyin 4,9 V (və onun misliləri) qiymətində cərəyanın qiyməti kəskin azalırdı. Frank və Hersin özləri aldıqları nəticələri səhv şərh etmişdilər. Onlar hesabladılar ki, elektronların enerjisi 4,9 eV böhran qiymətindən kiçik olanda, toqquşma elastiki olur, yəni ionlaşma baş vermir. Enerji böhran səviyyəsini aşanda ionlaşma baş verir və nə üçünsə elektronun enerjisinin sonrakı artması ilə ionlaşma yox olur, ancaq 9,8 eV, 14,7 eV və s. qiymətlərinə çatanda yenidən ionlaşma baş verir. Eksperimentatorlar belə nəticəyə gəldilər ki, civənin ionlaşma enerjisi 4,9 eV-un tam misliləri bərabərdir. Ancaq boruda heç bir ion aşkar olunmadı.

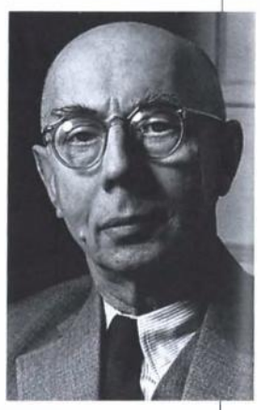
Bor bu nəticələri başqa cür şərh etdi: elektronlarla bombardman edərkən, civə atomları əsas enerji halından daha yüksək enerjiyə malik olan həyəcanlaşmış hala keçir, bundan sonra yüksəktezlikli işıq şüalandıraraq, başlanğıc hala qayıdır. Bor, beləliklə, fərz etdi ki, 4,9 eV enerji – bu ən aşağı enerji halında olan civə atomunun uda biləcəyi ən yüksək enerji porsiyasıdır. Eksperimentin gedişində tezliklə, Bor nəzəriyyəsi əsasında hesablanmış $\lambda = 2520$ nm dalğa uzunluğuna malik olan ultrabənövşəyi şüalanma aşkar olundu.



Frank-Hers təcrübəsinin sxemi.



Anod cərəyanının sürətləndirici gərginlikdən asılılığı.



Q.Hers.

ERNEST REZERFORD



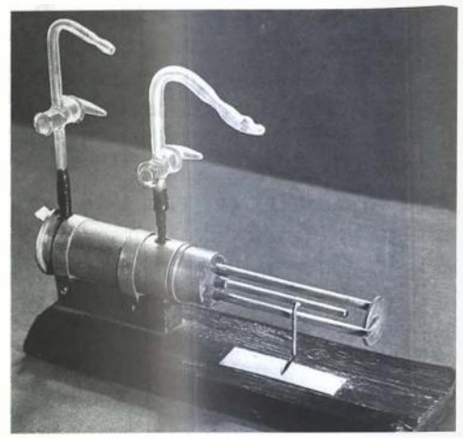
E.Rezerford (sağda) və C.Tomson Kembric universitetinin laboratoriyasında. 1930-cu illər.

Britaniyalıların Antipodlar adlandırdıqları Yeni Zelandiyadan gəlmiş bu adam haqqında rəvayətlər gəzirdi. Yeni Zelandiya universitetindən olan 24 yaşlı elmlər bakalavrı imperiya təqaüdünə layiq görüldükdən və Kavendiş laboratoriyasında şöhrət qazanmış Cozef Tomsonun ilk doktorantı olduqdan dərhal sonra, 1895-ci ildə qədim Kembricdə belə şayiə gəzməyə başladı: "Biz Antipodlardan vəhşi dovşan almışıq, o isə çox dərin qazır!"

Ucaboylu və qədd-qamətli Ernest Rezerford (1871-1937) dovşana daha az oxşayırdı. Lakin bu, zarafat idi, "vəhşi" sözü isə yalnız onun xasiyyətinin heç nədən asılı olmadığını və mövhumatdan azad olduğunu əks etdirirdi. O, atom fizikasındakı kəşflərə



Ernest Rezerford. C.Qannanın portret işi.



E.Rezerfordun α-zərrəciklərin səpilməsinə aid təcrübələrini apardığı aparat.

etibar etməyən konservatorları "Kembric daşürəkliləri" adlandırırdı. Gənc alim dərhal eksperimentlərə başladı. Bu eksperimentlər 1897-ci ildə Cozef Tomsonun böyük nailiyyət qazanmasına – elektronu kəşf etməsinə səbəb oldu. Stol arxasında mübahisə zamanı bir hörmətli professor elektronları "abstrakt fiksiya" adlandırmağı özünə rəva biləndə, Rezerford hiddətlə cavab vermişdi: "Bəs belə?! Elektronlar mövcud deyil?! Bəs nəyə görə mən onları belə aydın görürəm?"

Həqiqətən o, sanki, mikroaləmi görürdü! İonları şəfqətlə "şən uşaqlar" adlandırırdı. Ona görə təsadüfi deyildir ki, məhz Rezerford radioaktivlikdə iki tip yüklü şüaları ayırdı: müsbət yüklü α-şüalar və mənfi yüklü β-şüalar. Bu kəşfi o, 1899-cu ildə Kavendişdə etdi. Üç ildən sonra isə Kanadanın Monreal şəhərində radiokimyaçı Frederik Soddinin köməyilə radioaktiv parçalanmanın nəzəriyyəsini işləyib hazırlamağa nail oldu və radioaktiv çevrilmələr qanununu müəyyən etdi. Buna görə 1908-ci ildə ona Nobel mükafatı təqdim olundu.

Rezerford Stokholmda təntənəli mərasimdə, Nobel mükafatı üzrə komitəni çaşdıran bir zarafat etdi. İş ondadır ki, o, fizika üzrə yox, kimya üzrə mükafatın laureatı olmuşdu. Özünün Nobel mühazirəsində Rezerford dedi: "Mən zamana görə müxtəlif transmutasiyalarla rastlaşmışam, ancaq



E.Rezerford (sağda) və H.Heyger laboratoriyada.

mənim rast gəldiklərimdən ən sürətlisi mənim özümün fizikdən kimyaçıya çevrilməyimdir – bu bircə anda baş verdi".

Lakin qəribə hadisə üçün səbəblər var idi. Yeni zelandiyalı həqiqətən atomun təkinə nüfuz edərək "dərin qazırdı". Orada isə fiziklərin və kimyaçıların hüquqları eyniləşirdi. "Atom" anlayışının özü həm onların, həm də bunların lüğətinə daxil idi, baxmayaraq ki, heç kim hələ onun nə olduğunu izah edə bilmirdi. Yenə də alimlərdən Rezerford ilk olaraq bir gün ucadan elan etdi: "İndi mən bilirəm atom necə görünür!"

Rezerford bu tarixi frazanı 1910-cu ilin sonunda, Mançesterdə, Monrealdan sonra burada artıq üç il professor vəzifəsini tutandan sonra söyləmişdi. Həmin dövr alimin aravermədən α-şüaları öyrəndiyi dövr idi. Rezerfordun radioaktivlik qanunlarının kəşfinin ardınca başladığı təcrübələr hələ Kanadada α-şüaların təbiətini müəyyən etməyə imkan verdi. Məlum oldu ki, bunlar radioaktiv parçalanma zamanı çox böyük – 10000 km/san sürətilə çıxan ikiqat ionlaşmış helium atomlarıdır (elektron örtüksüz, çılpaq nüvələrdir). α-zərrəciklərin nisbi atom kütləsi 4-ə, yük ədədi isə +2-yə bərabər olduğundan, onlar, ağır mərmi kimi, maddənin dərinliklərinə nüfuz edir və materiyanın quruluşu haqqında nə isə "xəbər verə" bilər.

Təəccüblü idi ki, hədəfə (adətən metal folqadan ibarət vərəqlər) nüfuz edən α-zərrəciklər çox müxtəlif bucaqlar altında meyil edirdi. Aydındır ki, maddə daxilində güclü elektrik sahələri təsir göstərir: çünki yalnız onlar ağır zərrəciklərin trayektoriyalarını əyə bilər.

Bunu qeydə almaq sadə və etibarlı idi: hədəfin arxasında xüsusi tərkibli maddə ilə örtülmüş ekran var idi, hədəfin içindən keçib gələn α-zərrəciklər ekrana zərbələr vuraraq, parıltı – *ssintilyasiya* doğururdu. Ssintilyasiyanı dəqiq saymaq üçün eksperimentlər qaranlıqda aparılırdı. Rezerford üçün bu təcrübələr üzücü sınaq oldu. O, özünün gənc əməkdaşları olan Hans Heygeri (1882-1945) və Ernest Marsdeni (1889-1970) minnətdarlıqla "ssintilyasiyaları sayan şeytanlar" adlandırırdı, özü isə işə başlayarkən, "dünyada hər şeyə lənət yağdırar və iki dəqiqədən sonra geri çəkilərdi". Rezerford yalnız qabiliyyətsiz işlərə nifrətindən şikayətlənərdi. Doğrudur, bütün eksperimentlərin startı zamanı onun həm gözləri, həm əlləri, həm də əsəbləri sözünə baxırdı. Başlıcası o idi ki, onun intuisiyası və məntiqi ona xilaf çıxmırdı.

Nyutondan soruşanda ki, o, ümumdünya cazibə qanununu necə tapmışdır, onun cavabı çox qısa olmuşdur: "Mən aravermədən onun haqqında düşünürdüm!" Rezerfordun da "atomun quruluşunu necə oldu ki, kəşf edə bildin?" sualına eyni cür cavab verməyə hüququ var idi. O, dəqiqləşdirə bilərdi: "Bu barədə mən üç il düşünmüşəm!" və əlavə edə bilərdi: "Fasiləsiz olaraq!"

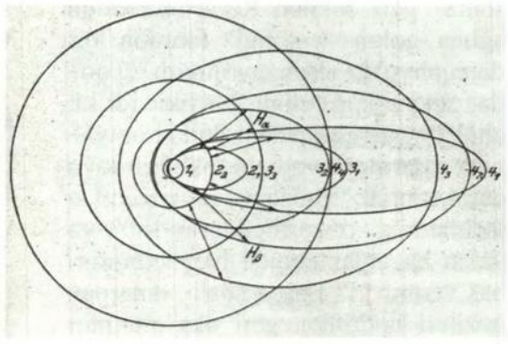
Bəli, qaranlıqda parıltıları saymaq kimi yorucu işdən "iki dəqiqədən sonra" geri çəkilən Rezerford, onun ağlına gələn "cəfəng" fikirdən bir dəqiqəliyə də olsun, ayrılmırdı. O qədər açıq-aşkar cəfəng bir fikir idi ki, alim 19 yaşlı Marsdeni dərhal öz yanına çağırmağa və belə təklif etməyə cürət etmədi: "Qulaq as, Erni, baxmaq lazımdır ki, α-zərrəciklərin 180°-yə yaxın bucaqlar altında meyiletmələri baş vermir ki? Başqa sözlə, onlardan bəziləri hədəfdən geri əks olunmur ki?" Marsden qocalığında xatırlamışdı: "Rezerford həmişə gözlənilməz şeyə qarşı getməyə və onu öz məqsədləri üçün istifadə etməyə hazır idi, bununla belə, o, bu cür ekskursiyalar zamanı nə vaxt dayanmaq lazım olduğunu da bilirdi..."

Lakin bu dəfə Rezerford, sanki, hər şeyi unutmuşdu. Nəhəng sürətlə uçan α-zərrəciklərin nazik folqadan əks olunması ona tamamilə qeyri-adi görünürdü. Bu, topdan hədəfə atılmış mərminin papiros kağızına dəyib necə geriyə, topa tərəf qayıtdığını görmək ümidinə bənzəyirdi!.. Bununla belə, o, gənc assistentinə "mümkün olmayanı" müşahidə etməyi "sifariş" verdi. Artıq 1909-cu ilin qış günlərinin birində Marsden universitetin pilləkənlərində Rezerfordu saxlayıb, tam adi qaydada dedi: "Professor, siz haqlı imişsiniz, onlar qayıdır..."

"Onlar" çox nadir hallarda qayıdırdı: orta hesabla səkkiz min α-zərrəciklərdən biri. Hədəfdən əks olunmaq o demək idi ki, α-zərrəcik öz yolunda layiqli maneəyə – ağır və müsbət yüklənmiş maneəyə rast gəlmişdir: yalnız belə hədəf öz qüvvəsi hesabına gələn qonağı özündən kənara itələyə bilər. Hadisənin çox nadir olması maneənin ölçülərinin həddən ziyadə çox kiçik olmasından xəbər verirdi. Ona görə də hədəf atomlarından keçərkən yalnız bəzi α-zərrəciklər atomun ağır özəyinə







N.Bor. 1913-cü il.

▶
Atomun Bor-Zommerfeld modeli. N.Borun Nobel mühazirəsindən illüstrasiya. 1922-ci il.

düşür. Əksəriyyəti isə ondan aralı uçub gedir və kiçik bucaqlar altında səpilir.

Rezerford "dayanmağı unudaraq", özünün qabaqcadan duyduğu atom nüvəsini "gördü"! Öz xəyalında o, atomun planetar modelini təsəvvür etdi: planetlər Günəş ətrafında fırlanan kimi, mənfi elektronlar da müsbət yüklü nüvə ətrafında fırlanır.

Lakin tarixi çox sadələşdirməsək, onda hələ bir çox atom modelləri ölçmələrin, məntiqin, mümkün hesablamaların sınağından keçməli idi ki, alim qəti olaraq məhz planetar modelin seçimi üzərində dayansın. Başqalarının hesablamalarına əsaslanmamaq üçün o, tamamilə gözlənilməz hərəkət etdi: saçları ağarmağa başlamış qırx yaşlı Nobel mükafatı laureatı, böyük bir laboratoriyanın direktoru olan Rezerford riyaziyyat professoru Qorasio Lembin yanına gəlib, ondan tələbələrlə birlikdə ehtimal nəzəriyyəsi kursunu dinləmək üçün icazə istədi. O, özü üçün yalnız bir şey xahiş etdi: imtahan verməsin... Planetar model formulə edilərkən deyilmiş tarixi fraza: "İndi mən atomun necə göründüyünü bilirəm!" – bu epopeyada Rezerfordun daha bir, üçüncü qeyri-adi hərəkəti oldu.



Soldan sağa: P. Blekket, P.Kapitsa, P.Lanjeven, E.Rezerford və Ç.Vilson. Kembric. 1929-cu il.

O vaxt Rezerford ehtiyatlıqla atomun necə qurulduğunu yox, necə göründüyünü bildiyini demişdir. Klassik fizika qanunlarına görə atom buna oxşar quruluşa malik ola bilməz: elektronlar nüvə ətrafında fırlanaraq şüalandırır və deməli, enerjisini itirərək, labüd olaraq, nüvə üzərinə düşməlidir. Qısaca desək, Rezerford atomun məhvinin labüdlüyünü görürdü! Ancaq planetar modeli inamla elan etdi! Ağılsızlıqdır? Yox, əksinə, elmin ağlabatan inkişafına, onun sabahına olan qırılmaz inamdır. O, həmkarlarından xahiş etmişdi ki, planetar modelin dayanıqlığı məsələsini hələ müzakirə etməsinlər. Zaman gələcək ki, fizikada yeni daha nə isə kəşf olunacaqdır. Onda "ölümə məhkum atom" xilas olacaqdır!

1913-cü ildə atom xilas oldu. Mançesterdə sakit təbiətli nəzəriyyəçi və ötkəm mütəfəkkir – 28 yaşlı danimarkalı Nils Bor zühur oldu. O, özü ilə çatışmayan yeniliyi – kvantlar nəzəriyyəsi ideyasını gətirmişdi. Ağılsız eksperimentin və qüdrətli intuisiyanın övladı olan planetar atom – həmişəlik kvant halında qərarlaşdı. Bundan sonra mikroaləmin kvant fizikasında Nils Borun hamı tərəfindən qəbul edilmiş liderliyi başlandı və o, müasir təbiətşünaslığın filosofuna çevrildi.

Gənc danimarkalı Rezerfordu bütün ömrü boyu sevdi və onu özünün ikinci atası adlandırdı. Rezerford da ona ata qayğısı ilə yanaşdı... Bu qayğının tamamilə gözlənilmədən özünü büruzə verdiyi bir hadisəyə baxaq.

1930-cu illərin ortasında Bor Kembricdə Rezerfordun yanında qonaq

qalırdı. Bütün İngiltərəni motosikletdə səyahətə çıxan kvant fizikasının gənc rus dahisi Georgi Qamov da ora gəldi. Artıq əlliyə yaxın yaşı olan Bor uşaqsayağı 30 yaşlı Qamovdan soruşdu: "Siz bizə göstərə bilərsinizmi ki, sizin maşınınız necə işləyir?" Motosikletin son dərəcə taraq-turuqundan və vahiməli insan qışqırıqlarından bir neçə dəqiqə sonra Rezerford küçəyə atıldı. O, Borun mindiyi maşının yoldan keçənləri qorxudaraq, ora-bura necə şütüdüyünü gördü. Danimarkalı bilmirdi ki, maşını necə saxlasın. Xoşbəxtlikdən, mühərrikin özü söndü. Yaranmış sakitlikdə gülməyə başlayan Qamov, gurultulu yoğun bir kişi səsi eşitdi: "Əgər siz bir də öz kalyaskanızı mənim Nilsimə verməyə cürət etsəniz, onda, Corc, and içirəm, sizin şeytan boynunuzu sındıracağam!"

Həmin dövrdə, 13 il Rezerfordun yanında işləmiş Pyotr Kapitsa artıq Kembrici tərk etmişdi. Bor kimi, Kapitsa da Rezerfordun sevimli tələbəsi olmuşdu. Bor kimi, o da Ernesti ikinci atası adlandırırdı. Lakin Kapitsa üçün bu, xüsusi məna kəsb edirdi... Rusiyadan olan bu gənc tədqiqatçı bütün ailəsini itirərək, bədbəxtliyə düçar





olanda Rezerford Kapitsaya sığınacaq vermişdi...

Tanışlıqlarının elə ilk dəqiqələrindən Rezerford Kapitsanın hazırcavablığını sınağa çəkdi. Metr dedi ki, Kavendişdə cəmi 30 iş yeri var və 31-ci əməkdaş üçün pul yoxdur. Lakin Kapitsa dərhal etiraz etdi: "Ser Ernest, siz axı öz işlərinizdə üç faizə qədər dəqiqliklə kifayətlənirsiniz, odur ki, 30 və 31 sizin üçün eynidir, belə deyilmi?" Rezerford güldü, Pyotr Kapitsa isə işə qəbul edildi.

Kapitsanın axtarışlarının son dərəcə geniş vüsəti Rezerfordu sevindirirdi, baxmayaraq ki, ifrat-güclü maqnit sahələrinin alınması laboratoriyanı dağılma təhlükəsi qarşısında qoyurdu.

Lakin ser Ernest Kapitsanın dahiliyinə inanırdı və hətta onun üçün supermüasir laboratoriya yaratdı. Bu laboratoriyanı biznesmen Lüdviq Mondun London Kral Cəmiyyəti üçün vəsiyyət etdiyi vəsait hesabına qurdular və sponsorun şərəfinə Mond laboratoriyası adlandırdılar. 1933-cü ilin fevralında laboratoriyanın təntənəli açılışı zamanı vicdanlı kembriclilər ah çəkdilər və incidilər: zövqlə çəkilmiş timsah, beton divara dırmaşırdı. Hamı bilirdi ki, ser Ernest üçün belə ləqəbi "bu pis tərbiyə olunmuş" rus fikirləşib

◀
E.Rezerfordun zadəganlıq gerbi.

tapıb. Rezerford isə ürəkdən gülərək şənləndi. Timsahı öz pulu hesabına məşhur heykəltəraşa qorxmaz Kapitsa sifariş etmişdi. O deyirdi: "Bu varlıq bizə dəhşət və heyranlıq təlqin edir. O heç vaxt, elm kimi, Rezerford kimi geri dönmür!"

1934-cü ilin payızında Kapitsaya məzuniyyətdən sonra İngiltərəyə qayıtmağa icazə verilmədi. Üç ildən sonra, 1937-ci ilin oktyabrında, Kapitsa hətta özünün böyük müəlliminin və dostunun dəfninə də gedə bilmədi.

Kavendiş laboratoriyasının direktoru, London Kral Cəmiyyətinin eksprezidenti, Oksford və Dublin, Paris və Kopenhagen, Edinburq və Qlazqo, Bristol və Liverpul, Birmingem və Monreal, Toronto və Keyptaun universitetlərinin fəxri doktoru, SSRİ və Fransa, İsveçrə, Norveç, İtaliya, İrlandiya, Amerika və Polşa Elmlər Akademiyasının fəxri üzvü, Franklin, Faradey, Rumford, Bernar, Matteuççi, Kopley və Albert medallarının laureatı, Nobel mükafatı laureatı lord Nelson, ser Ernest Rezerfordu, Vestminster abbatlığında Nyutonla, Darvinlə və Faradeylə yanaşı dəfn etdilər. Mərhumun xidmətləri haqqında heç bir söz deyilmədi, çünki hamı onları yaxşı bilirdi. Yalnız abbatlığın subdekanı "bizim qardaşımız Ernestin əməyinə və günlərinə görə" Göyə və Yerə təşəkkürünü bildirdi!

"YENİ" KVANT NƏZƏRİYYƏSİ



L. de Broyl.



Üzərində de Broyl düsturu olan yubiley markası. Fransa. 1994-cü il.

1924-cü ildə fransız fiziki Lui de Broyl (1892-1987) zərrəciklər və dalğalar haqqında qərarlaşmış təsəvvürlərə hücum etməyə başladı. O təxminən belə mühakimə aparırdı: əgər işıq özünü bəzi hallarda dalğa kimi (difraksiya, interferensiya və s. bunu sübut edir), digər hallarda isə (ilk növbədə, fotoeffekt hadisəsində) zərrəcik kimi, şüalanma kvantı kimi (foton) aparırsa, onda nə üçün əksinə olmasın, yəni hamının maddi zərrəciklər kimi qəbul etdiyi obyektlər, məsələn, elektronlar əslində eyni zamanda dalğa xassələri də büruzə verməsin? İşıq kvantları ilə analogiya de Broyla imkan verdi ki, hər bir zərrəciklə bağlı olan λ, dalğa uzunluğunun (belə dalğa de Broyl dalğası adlanır) düsturunu yazsın:

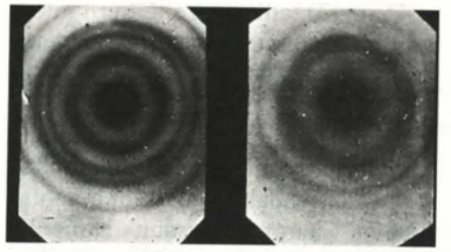
$$\lambda = \frac{h}{p}, \qquad (1)$$

burada p – zərrəciyin impulsu, h – Plank sabitidir. De Broylun cəsarətinə heyran qalmamaq mümkün deyil: çünki əgər Plank mütləq qara cismin şüalanmasını izah etmək üçün kvantlar hipotezini vermişdirsə də, de Broylun hipotezi sırf mücərrəd mühakimə idi. Ancaq bu hipotez uzaqlara gedən nəticələr çıxarmağa imkan verir. Məsələn, enerjisi 1 eV-dan 10000 eV-a qədər olan elektronlar üçün de Broyl dalğasının uzunluğu rentgen şüalarının dalğa uzunluğu ilə eynidir! Onda kristal qəfəsi elektronlar dəstəsi ilə şüalandıranda da fotolövhədə, rentgenoqramda müşahidə olunan difraksiya mənzərəsinə oxşar difraksiya mənzərəsi alınmalıdır. Məhz 1927-ci ildə amerikalılar Klinton Cozef Devisson (1881-1958), Lester Cermer (1896-1971) və onlardan asılı olmadan məşhur Con Tomsonun oğlu Con Pacet Tomson (1892-1975) de Broyl hipotezini tamamilə təsdiq edən eksperiment qoydular.

1926-cı ildə Avstriya fiziki Ervin Şredinger de Broyl dalğaları üçün tənlik çıxardı. Ayrıca bir zərrəciklə bağlı olan dalğa zamandan və fəza koordinatlarından asılı olan $\psi(t, x, y, z)$, *dalğa funksiyası* ilə təsvir olunur. Makroskopik cisimlər üçün Nyuton qanunlarının oynadığı rolu mikrozərrəciklər üçün oynayan *Şredinger tənliyi* ən ümumi şəkildə çox gözəl görünür, ancaq başadüşülməzdir:

$$ih\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi. \qquad (2)$$

Tənliyin sol tərəfində i ($i^2 = -1$) xəyali vahidə və $\hbar = h/2\pi$ gətirilmiş Plank sabitinə vurulmuş dalğa funksiyasının dəyişmə sürəti, sağ tərəfində isə dalğa funksiyasına təsir edən $\hat{H}$, Hamilton operatoru durur.



Katod şüaları elektronlarının lövhədə əmələ gətirdiyi difraksiya mənzərəsi. Böyük halqalar kiçik enerjiyə uyğundur. De Broylun haqlı olduğunu sübut edən C.P.Tomson təcrübələrinin ilk fotoşəkli.

Hamilton operatoru zərrəciyin enerjisinin ifadəsindən alınır. Məsələn, ən sadə halda, kütləsi m olan və potensiallı sahədə hərəkət edən zərrəciyin enerjisi (potensial enerji U zərrəciyin koordinatlarından asılıdır) aşağıdakı düsturla ifadə olunur:

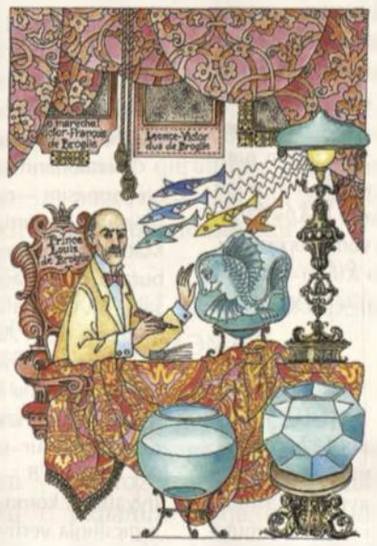
$$E = \frac{p^2}{2m} + U. \qquad (3)$$

LUİ DE BROYL

1929-cu ilin Nobel mükafatı laureatı, fransız fiziki Lui-Viktor Pyer Raymon Markiz de Broyl (1892-1987) ailə ənənələrini davam etdirərək, diplomat olmaq fikrindəydi və Sorbonnada əvvəlcə tarixi öyrənməyə başladı, lakin rentgen spektroskopiyası oblastında ilk mütəxəssislərdən biri olan qardaşı Moris de Broylun (1875-1960) təsiri altında tarixlə yanaşı, fizikanı da öyrənməyə başladı. 1913-cü ildə hərbi xidmətə çağırıldığı üçün universitet təhsili yarımçıq qaldı, ancaq Birinci dünya müharibəsi ilə əlaqədar hərbi xidməti uzandı: Lui radiotexniki qoşunlarda xidmət etdi və hətta Eyfel qülləsindən radioveriliş də apardı. "Kvantlar nəzəriyyəsinə dair tədqiqatlar" adlı doktorluq dissertasiyasını Sorbonnaya 1924-cü ildə, 30 yaşına təzəcə keçərkən təqdim etmişdi. Həmin dövrə qədər elektronların, atomların və rentgen şüalanmasının və hətta işıq kvantlarının xassələrinə dair bir neçə mühüm məqalə çap etdirə bilmişdi (1922-ci il).

Eynşteynin işığın ikili, korpuskulyar-dalğa təbiətinə malik ola bilməsi (yəni özünü zərrəcik – korpuskullar – fotonlar seli kimi və ya işıq kvantları və ya dalğa kimi aparması) haqqındakı ideyası de Broylu cəlb etdi və o, bu ideyanı başqa zərrəciklərə şamil etdi. De Broyla görə, bu zərrəciklərdən hər biri dalğa ("materiya dalğaları") xassələrinə malik olmalıdır.

De Broylun elmi rəhbəri Pol Lanjeven öz tələbəsinin işinə fərəhsiz və inamsız yanaşaraq, rəy üçün onu Eynşteynə göndərdi. Eynşteyn isə Lanjeveni inandırdı ki, de Broylun nəticələri doğrudur. Eynşteyn yazmışdı: "...Bu, sadəcə, analogiya deyil". Boze-qaza dair məqaləsində Eynşteyn de Broylun işinə istinad etdi. Həmin istinad Ervin Şredingerin diqqətini cəlb etdi və o, de Broylun ideyasının təsiri altında öz dalğa mexanikası haqqında düşünməyə başladı.



Dissertasiyasını müdafiə etdikdən sonra, de Broyl Sorbonnada, 1928-ci ildən isə yenidən təşkil olunmuş Anri Puankare İnstitutunda mühazirələr oxumuşdur. Həmin dövrdə də o, Sorbonnada nəzəri fizika professoru oldu.

De Broyl 1960-cı ildə, böyük qardaşı Morisin ölümündən sonra Lui markiz tituluna varis olmuşdur. Bundan başqa, nəslin bütün kişiləri kimi, de Broyl Avstriya şahzadəsi idi. (Bu irsi titul əcdadlarından birinə onun Avstriya qarşısında Yeddiillik müharibə dövründəki xidmətlərinə görə bağışlanılmışdır.)

Lui de Broylun irsinə fizikanın müxtəlif məsələlərinə və elmin fəlsəfəsinə aid 30-dan çox kitab daxildir (o cümlədən kvant mexanikasının qeyri-ənənəvi şərhi). Onun ideyaları hələ öz tədqiqatçılarını gözləyir.



M.Born.

Əgər (3) tənliyinin sağ tərəfində p impulsunu impuls operatoru adlanan $\hat{p}$ operatoru ilə əvəz etsək, $\hat{H}$ Hamilton operatorunu alarıq.

Şredingerin öz tənliyinin köməyilə həll etdiyi ilk məsələ elektronun hidrogen atomundakı hərəkətini hesablamaqdan ibarət olmuşdur. Nəticələr təsiredici olmuşdur: enerji səviyyələri üçün nəinki yalnız Bor düsturu təsdiqləndi, həm də "köhnə" kvant nəzəriyyəsinin digər nəticələri təsdiqləndi, başlıcası isə, spektral xətlərin intensivliyini hesablamaq imkanı yarandı. Lakin yeni sual ortaya çıxdı: dalğa funksiyasının fiziki mənası nədir? Bu suala 1926-cı ildə alman alimi Maks Bornun (1882-1970) cavab verməsinə baxmayaraq, fiziklər bu günə qədər bu barədə mübahisə edirlər.

Heyrət doğuran odur ki, hələ 1925-ci ildə Bornun həmyerlisi Verner Heyzenberq xarici görünüşcə tamamilə fərqli olan bir nəzəriyyəyə gəlib çıxmışdı. Həmin nəzəriyyə, Şredinger nəzəriyyəsi kimi, atom şüalanmalarının intensivliyini hesablamağa imkan verirdi. Həmin ildə Bornun özü Paskal Yordanla (1902-1980) birlikdə və onlardan asılı olmadan ingilis fiziki Pol Dirak (1902-1984) Heyzenberq nəzəriyyəsinə tamamlanmış şəkil verdilər. Bu nəzəriyyədə zərrəciklərin koordinatları, impulsları, enerjiləri və atom sisteminin bir haldan digərinə keçidlərini təyin edən başqa fiziki

OPERATORLAR VƏ MATRİSALAR

"Operator" sözü kvant nəzəriyyəsində aparıcı sözlərdən biridir. Operatorun müəyyən növ funksiyaya təsirinin nəticəsi başqa bir, lakin həmin növ funksiya olacaqdır. Ən sadə operator, təsiri funksiyanın ədədə vurulmasından ibarət olan operatordur. Bu cür operatoru $\hat{A}$ ilə işarə etsək, yaza bilərik ki, $\hat{A}\psi = a\psi$ və ya sadəcə $\hat{A} = a$. Diferensiallama operatoru $\hat{D}$ bir az mürəkkəbdir. Onun, məsələn, $\psi(x)$ funksiyasına təsiri $\hat{D}\psi = d\psi/dx$ düsturu ilə təyin olunur, yəni $\hat{D}$-nin təsirinin nəticəsi ψ funksiyasının, x arqumenti dəyişən zaman, dəyişmə sürətini verir. Riyaziyyatçılar sadəcə olaraq $\hat{D} = d/dx$ yazılar, yəni nəzərdə tutulan ψ funksiyasını atırlar. Operatorların ən mühüm xassəsi – onların *kommutativ olmamasıdır:* əgər funksiyaya əvvəlcə $\hat{A}$ operatoru, sonra isə $\hat{B}$ operatoru təsir edirsə, onda təsirin nəticəsi, digər halın, yəni əvvəlcə $\hat{B}$ sonra isə $\hat{A}$ təsir edən halın nəticəsilə üst-üstə düşməyə bilər: $\hat{B}(\hat{A}f) \neq \hat{A}(\hat{B}f)$. Məsələn, əgər $\hat{x}$ operatoru x arqumentinə vurma operatoru, $\hat{D}$ isə diferensiallama operatorudursa, onda $\hat{x}(\hat{D}\psi) = x d\psi/dx$, lakin $\hat{D}(\hat{x}\psi) = \psi + x d\psi/dx$ olur, çünki $\hat{D}(\hat{x}\psi) - \hat{x}(\hat{D}\psi) = \psi$ və ya ψ-ni atsaq,

$$\hat{D}\hat{x} - \hat{x}\hat{D} = 1.$$

Bu növ düsturlar *yerdəyişmə* və ya *kommutasiya münasibətləri* adlanır. Kvant nəzəriyyəsinin formulə edilməsində və şərhində onlar çox aparıcı rol oynayırlar. Məsələn, məhz koordinat və impuls operatorlarının qeyri-kommutativliyi Heyzenberqin məşhur qeyri-müəyyənliklər münasibətlərinə gətirir.

Kvant nəzəriyyəsində istisnasız olaraq *xətti operatorlardan* istifadə olunur. Onlar da xətti funksiyalar kimi sadədir. Əgər operatorun funksiyalar cəminə təsiri hər bir toplanana təsirinin cəminə bərabərdirsə, onda ona *xətti operator* deyilir:

$$\hat{A}(f+g) = \hat{A}f + \hat{A}g.$$

Xəttilik xassəsi birbaşa kvant nəzəriyyəsinin fundamental prinsipi olan superpozisiya prinsipi ilə bağlıdır: əgər iki dalğa funksiyasından hər biri verilmiş kvant sisteminin mümkün halını təsvir edirsə, onda onların cəmi də mümkün hal olacaqdır.

Operatorların kvant nəzəriyyəsində tez-tez işlənən xüsusi bir formasını – matrisaları, yəni sonlu və ya sonsuz sayda sətir və sütunlardan ibarət ədədi cədvəlləri yada salaq. Matrisaların xüsusi vurulma qaydaları var, onlar haqqında burada danışmağa ehtiyac yoxdur. Başlıcası odur ki, matrisalar da çox hallarda kommutasiya etmir, yəni iki A və B matrisası üçün $AB \neq BA$ olur.

Tanınmış rusiyalı yazıçı Daniil Danin (1914-2000) Nils Bor haqqındakı kitabında dəyişənlərin qeyri-kommutativliyini izah etmək üçün aşağıdakı misaldan istifadə etmişdir: "Təsəvvür edin ki, dəyişənlər olaraq iki əməliyyat: A – narkoz, B – dişin çıxarılması götürülmüşdür. Bu əməliyyatların kommutativliyi o demək olardı ki, onların hansı ardıcıllıqla yerinə yetirilməsinin əhəmiyyəti yoxdur".

ERVİN ŞREDİNGER

Kvant mexanikasının yaradıcıları arasında ən yaşlısı olan Ervin Şredinger (1887-1961) köhnə məktəbin yetişdirdiyi fizik idi və kvant sıçrayışlarından və müşahidəçinin rolundan imtina etmək imkanına qəti inanaraq, kvant mexanikasına "sağlam fikri" qaytarmağa ümid edirdi.

Onun həyat kanvası (planı) belədir. Şredinger ilk təhsilini özəl müəllimlərdən almışdır. Sonra Vyana gimnaziyası və Vyana universiteti gəlir, burada o, 1910-cu ildə fizika üzrə doktorluq dissertasiyası müdafiə etdi, 1911-ci ildə isə assistent vəzifəsini tutdu. Birinci dünya müharibəsində Şredinger artilleriya zabiti kimi xidmət etmişdi. Müharibədən sonra qısa müddət Almaniyada yaşamış və Yendə (1920-ci il), Ştutqartda (1920-1921-ci illər), Breslauda (1921-ci il, Polşanın indiki Breslavl şəhəri) işləməyə imkan tapmışdı, sonra isə İsveçrənin Sürix şəhərinə yollanmışdı. Artıq fizika professoru olmuş (1921-ci ildən) Şredinger orada Lui de Broylun ideyalarına və Uilyam Hamiltonun optiko-mexaniki analogiyasına əsaslanaraq, dalğa mexanikasını yaratdı (1926-cı il). Dalğa mexanikası dalğa tənliyinə (Şredinger tənliyinə) əsaslanır. Bu işin çap olunması 40 yaşlı professora, onun Berlin universitetində nəzəri fizika kafedrasında Maks Plankın varisi olmasına imkan verdi (1927-ci il).



1933-cü ildə nasistlərin hakimiyyətə gəlişindən sonra Şredinger İngiltərəyə emiqrasiya etdi və burada məşhur Oksfordun Müqəddəs Maqdalina kollecində işə başladı. Lakin Oksford kollektivində münasibətlər alınmadı və 1936-cı ildə o, Avstriyaya – Qrasa şəhəri universitetinə qayıtdı. 1938-ci ildə Hitler Almaniyası tərəfindən Avstriyanın baş vermiş anşlyusu (*alm.* Anschluß – "birləşdirmə") onu təkrarən emiqrasiya etməyə məcbur etdi. 1941-ci ildən 1955-ci ilə qədər Şredinger Dublin Yüksək Tədqiqatlar İnstitutuna rəhbərlik etmişdi. O, məhz orada "Həyat nədir?" kitabını yazdı. Bu kitab fizikləri molekulyar biologiya ilə məşğul olmağa məcbur etdi (ilk biokimyaçıların və biofiziklərin arasında DNT-nin quruluşunu kəşf edənlərdən biri olan Frensis Krik də var idi).

Fizika üzrə Nobel mükafatı laureatı (1933-cü il) Şredinger müxtəlif növ şəxsiyyətləri tam nəzərə almamaqla öz həmkarlarını pərt edirdi. Pol Dirakın sözlərinə görə, Şredinger hər hansı bir konfransa gələndə "o, içərisində ev şeyləri olan kürək çantası çiyinlərində, vağzaldan iştirakçıların qaldığı mehmanxanaya yollanırdı və hansı isə bir avaraya bənzəyirdi, ona görə də növbətçinin yanında görünəndə, yalnız uzun mübahisələrdən sonra yer ala bilirdi".

Tələbələr onu çox sevirdilər və müəllim kimi onu yüksək qiymətləndirirdilər. Geniş maraq dairəsi olan adam kimi, Ervin Şredinger özündən sonra bir çox əla yazılmış kitablar, məqalələr və xatirələr qoyub getmişdi. Fizikada dalğa mexanikası ilə yanaşı, Şredingerə termodinamikaya, statistik mexanikaya, nüvə qüvvələrinin mezon nəzəriyyəsinə, ümumi nisbilik nəzəriyyəsinə, vahid sahə nəzəriyyəsinə aid gözəl işlər də məxsusdur.

kəmiyyətlər matrisalar vasitəsilə – kvadrat cədvəllər (sonlu və sonsuz) vasitəsilə təsvir olunur ki, bu cədvəllərin hər bir elementinin iki indeksi var. Məsələn, x koordinatına x_{nm} çoxluğu uyğundur, burada n və m – uyğun olaraq başlanğıc və son halların indeksləridir. Zərrəciyin hərəkət tənliyi adi ədədlər və funksiyalar üçün deyil, məhz, matrisalar üçün yazılır.

Beləliklə, 1926-cı ildə iki kvant nəzəriyyəsi mövcud idi: Heyzenberq nəzəriyyəsi və Şredinger nəzəriyyəsi. Şredinger onların ekvivalentliyini, yəni hər iki nəzəriyyə əsasında alınan bütün nəticələrin tam eyni olduğunu sübut etdi. Eyni zamanda Dirak və Yordan *çevirmələr nəzəriyyəsini* işləyib hazırladılar və göstərdilər ki, kvant nəzəriyyəsinin tənliklərini müxtəlif formalarda təsvir etmək olar. Əslində, bununla da, "yeni" kvant nəzəriyyəsinin (daha dəqiq, kvant mexanikasının) qurulması başa çatdırıldı. Bu nəzəriyyə bu gün də elmə etibarlı surətdə xidmət edir.

KVANT NƏZƏRİYYƏSİNİN FİZİKİ MƏNASI

Nils Bor hələ 1913-cü ildə belə nəticəyə gəlmişdi ki, "yeni" fizika mikrozərrəciklərin davranışı haqqında tamamilə başqa, klassik təsəvvürlərlə bir araya sığmayan yeni təsəvvürlər



N.Bor.

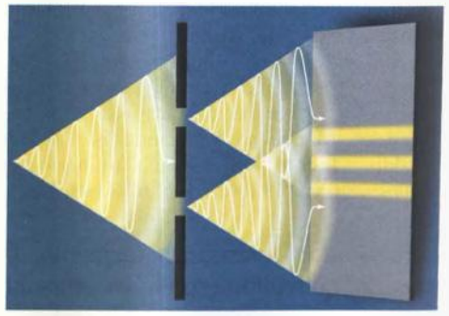
Heyzenberq həqiqətən hesab edirdi ki, yeni riyazi aparat icad etmişdir, çünki matrisalar nəzəriyyəsindən tam xəbərsiz idi. Onun elmi rəhbəri Maks Born Heyzenberqin işindən fərəhlənərək qeyd etmişdi: "Nə qədər istedadlı cahil olasan ki, mövcud riyazi aparatdan xəbərin olmaya və madam o sənə lazımdır, onu özün icad edəsən".

tələb edir. O, həmin vaxtdan anlayışlar yaratmağa, izahatlar aparmağa və onları təbliğ etməyə başladı, bəzən səhv buraxdı, lakin həmişə bu yolla getdi. "Yeni" kvant nəzəriyyəsinin yaranmasından sonra Bor və onun həmfikirləri olan və o vaxt Nəzəri Fizika İnstitutunda (Kopenhagen) işləyən Heyzenberq və Pauli bir neçə il ərzində bütöv bir dünyagörüşü yaratdılar. Bu dünyagörüşü *kvant mexanikasının Kopenhagen şərhi* adlanır. Hələlik bu dünyagörüşünə hər hansı dərəcədə rəqabətə qadir olan heç bir alternativ mövcud deyildir.

Kvant mexanikasının yaradıcıları öz yetişdirmələrinə diametral əks baxışa sahib idilər. Əgər Heyzenberq elektronların bir orbitdən digərinə qabaqcadan xəbər vermək mümkün olmayan kvant sıçrayışlarını (foton şüalandırmaqla) əsas hesab edirdisə, Şredinger isə hesab edirdi ki, özünün daxil etdiyi dalğa funksiyası hadisələrin kəsilməz axını haqqındakı təsəvvürləri saxlamağa imkan verir. Lakin Born Şredingerin ψ dalğa funksiyasının ehtimal xarakterini göstərə bildi (adətən onu ehtimal amplitudu adlandırırlar), yəni $|\psi|^2 dV$ – baxılan zərrəciyin dV fəza həcmində olma ehtimalıdır. Deməli, dalğa funksiyası, səs dalğaları kimi, hər hansı maddi dalğanı yox, zərrəciyin yalnız bu və ya digər yerdə olma ehtimalını təsvir edir. Halbuki, bu, klassik baxımdan müdhiş, görünməz bir şeydir!

Eyni bir nöqtədən çıxan, lakin hərəkət istiqamətlərində təbii dağınıqlığa malik olan eyni zərrəciklər dəstəsinin fotolövhədə əmələ gətirəcəyi ləkənin son nəticədə nə vaxt bütöv olacağı aydındır. Bəs mənbədən müəyyən bir istiqamətdə buraxılmış tək bir zərrəciyin fotolövhənin istənilən nöqtəsində aşkar olunmaq qabiliyyətini necə izah etmək olar? Həm də zərrəciyin verilmiş nöqtəyə yalnız düşmə ehtimalını qabaqcadan xəbər vermək olar.

Bəzi hallarda klassik təsəvvürlər baxımından məsələ daha pisdir. Tutaq ki, hər hansı mənbə iki yarığı olan ekrana tərəf zərrəciklər (fotonlar, elektronlar vacib deyil) buraxır. Ekranın arxasında zərrəciklərin keçdiyini qeydə alan fotolövhə yerləşmişdir. Belə düşünmək olardı ki, bir yarıqdan keçən zərrəciklər öz difraksiya mənzərəsini, digərindən keçənlər isə öz difraksiya mənzərəsini yaratmalıdır (çünki onlar dalğa xassəsinə malikdir). Əslində isə bu belə deyil! Kvant nəzəriyyəsi qabaqcadan xəbər verir, eksperiment isə nümayiş etdirir ki, ümumi mənzərə interferensiya mənzərəsi olacaqdır, hər bir zərrəcik sanki eyni zamanda hər iki yarıqdan keçmişdir.



1927-ci ildə Heyzenberq kvant nəzəriyyəsinin klassik nəzəriyyədən ən mühüm fərqini əyani illüstrasiya edən qeyri-müəyyənliklər münasibətini çıxardı. Heyzenberq sübut etdi ki, kvant mexanikasına uyğun olaraq mikrozərrəciklərin koordinatlarını və impulslarını eyni dəqiqliklə ölçmək olmaz: koordinatın qiyməti nə qədər dəqiqdirsə, impulsun qiymətini bir o qədər az dəqiq ölçmək olar və əksinə. Məlum oldu ki, sadə halda, bir ölçülü hərəkət halında bu kəmiyyətlərin qeyri-müəyyənliklərinin (xətalarının) hasili aşağıdakı kimidir:

QARA PİŞİYİN TALEYİ VƏ YA SUPERPOZİSİYA PRİNSİPİ HAQQINDA

Superpozisiya prinsipi kvant mexanikasının fundamental prinsiplərindəndir. Bu prinsipə görə, əgər sistem ψ_1 və ψ_2, kvant hallarının hər birində ola bilərsə, onda o, bu halların ixtiyari əmsallı xətti kombinasiyası olan

$$\psi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2$$

halında da ola bilər.

Kvant mexanikasının qanunları düzgün qoyulmuş fiziki suala həmişə birqiymətli cavab verir. 1920-ci illərin axırında – 1930-cu illərin əvvəlində kvant mexanikasının şərhi ətrafında gedən bütün mübahisələr əslində bir şeyə gətirilirdi: hansı sualları düzgün hesab etmək olar? Bu nəzəriyyə hansı suallara birqiymətli cavab verir, hansılara isə, ümumiyyətlə, cavab verməkdən imtina edir?

Kvant mexanikasının Kopenhagen şərhi iddia edir ki, lazımi eksperiment aparılana qədər fiziki sistemin ψ_1 və ya ψ_2 hallarından hansında olduğunu soruşmaq mənasızdır. Uyğun ölçmə yerinə yetirilən anda sistem sanki, müəyyən ehtimalla ψ_1 və ya ψ_2 kimi iki imkandan birini təqdim edir. Əgər ölçməyə qədər sistemin halı iki mümkün halın aşkarolunmaz superpozisiyası idisə, onda ölçmə aktı sistemi sıçrayışla ya ψ_1, ya da ψ_2 halına keçirir.

Bu necə ola bilər ki? Sistemin ölçmədən əvvəl bu və ya digər müəyyən bir halda olmadığını necə başa düşmək lazımdır?

Hər hansı bir problemi aşkar qabartmaq üçün tez-tez fiziklər bəzən məsələnin mahiyyətinə kölgə salan mübaliğəli formada fikri eksperimentlərə əl atırlar. Şredingerə məxsus olan *qara pişik* paradoksu bu fikri (nəzəri) eksperimentdir.



Qapalı qutu olduğunu fərz edək. Onun divarında biri yuxarıda, digəri aşağıda yerləşən iki dar yarıq açılmışdır ki, bunlardan da işıq keçə bilər. Qutunun daxilində yuxarıdakı şüanın yolunda heç bir maneə yoxdur, aşağıdakı şüanın yolunda isə elə bir qurğu yerləşir ki, bu qurğuya heç olmazsa bir foton düşəndə o, zəhərli qaz porsiyası buraxır. Qutuda qara pişik oturmuşdur. Əgər foton yuxarı yarıqdan keçirsə, pişik sağ və salamatdır, əgər aşağı yarıqdan keçirsə, pişik məhv olur. Sual: pişik qutuda hansı haldadır? Başqa sözlə, kvant mexanikası iddia edirmi ki, qutu açılmayana qədər (ölçmə aktı), pişik qutu daxilində iki halın superpozisiyasında olur, yəni nə sağdır, nə də ölü? Demək lazımdır ki, Şredinger pişiyin halının bu cür qeyri-müəyyən olduğuna inanmırdı.

Buna oxşar paradoksların şərhlərindən biri dünyaların çoxluğu və ya Kainatların çoxluğu ideyasıdır. Bu ideyaya görə fərz olunur ki, kvant obyekti eyni zamanda paralel dünyalarda mövcud olur və hər birində obyektin mümkün hallarından biri reallaşır. Beləliklə, dünyaların hansısa birində pişik sağ və salamatdır, hansında isə ölüdür. Ölçmə yerinə yetirilən anda müxtəlif dünyaların interferensiyası baş verir ki, bunun nəticəsində müşahidəçi müəyyən ehtimallı cavab alır. Dünyaların çoxluğu ideyasının inkişafı son illərdə, paralel dünyaların hamısında eyni zamanda işləyən kompüterlər yaratmaq imkanına dair maraqlı fərziyyələrə gətirib çıxarmışdır ki, bu da hesablama sürətini qeyri-adi dərəcədə artırar.

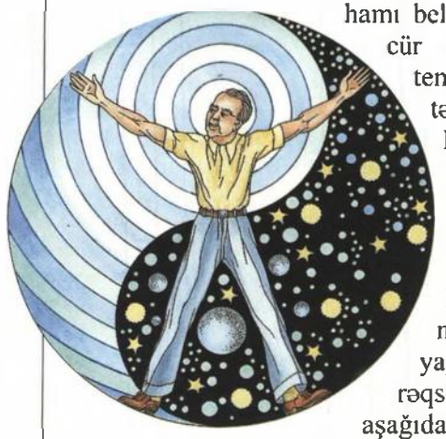
$$\Delta x \Delta p \geqslant \frac{h}{2}, \qquad (4)$$

burada Δx – mikrozərrəciyin koordinatının ölçülməsindəki xəta, Δp – isə onun impulsunun ölçülməsindəki xətadır.

Heyzenberqin bu işi, çoxdan dünyanın klassik təsvirinin tamlığı haqqında düşünən Boru ruhlandırdı. Bor 1927-ci ildə özünün fizikada təməl prinsiplərindən biri olan tamamlama prinsipini söylədi. Borun ideyası ondan ibarətdir ki, həm adamlar, həm əşyalar, o cümlədən ölçü cihazları çoxlu sayda mikrozərrəciklərdən – elektronlardan, protonlardan, fotonlardan və s. ibarətdir, başqa sözlə, makroskopik sistemlərdir. Ətraf aləmi təsvir etmək üçün klassik nəzəriyyə yaradılmış və çoxlu sayda əlverişli anlayışlar: koordinatlar, impulslar, impuls momentləri və cisimlərin digər xarakteristikaları daxil edilmişdir. Nə üçün

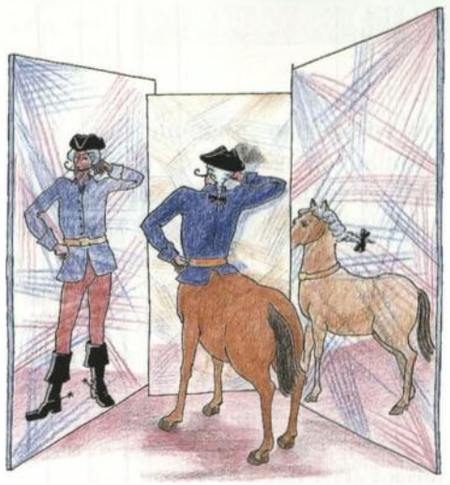
$$i\hbar\frac{\partial \chi}{\partial x^\mu} + \sigma^\mu_{\dot{\alpha}\alpha}\bar{\chi}^{\dot{\alpha}}(\chi^\alpha\sigma_\chi) = 0$$

V.Heyzenberq tərəfindən yazılmış tənlik.



hamı belə nəticə çıxarmışdı ki, bu cür xarakteristikalar mikrosistemləri, deyək ki, elektronları təsvir etmək üçün yarayır? Məsələn, elektron zərrəcik sayılır, baxmayaraq ki, əzəldən, hər halda, toz dənəciyini zərrəcik adlandırmışlar. Fotonu dalğa kimi təsvir edirlər, baxmayaraq ki, bu anlayış suda yayılan dalğalara və ya simin rəqslərinə aiddir. Borun cavabı aşağıdakından ibarətdir: Əlbəttə, adam özünü elektron hesab etmək iqtidarında deyil. Bunun əvəzində o, elektrona adi anlayışları tətbiq edə bilər, yəni ona ya zərrəcik kimi baxa və uyğun informasiyanı ala bilər, ya da dalğa kimi baxa və daha bir porsiya informasiya ala bilər. Həm bu, həm də digər informasiya birlikdə elektronun, elmin tələbatı üçün kifayət edən tam təsvirini (bizim nöqteyi-nəzərimizcə) ifadə edir; həm də bu, bizim elektron haqqında öyrənə biləcəklərimiz informasiyanın hamısıdır. Dar mənada tamamlama prinsipi bundan ibarətdir.

Bor tamamlama prinsipinə kvant mexanikası ilə məhdudlaşmayan ümumi bir fəlsəfi anlayış kimi baxırdı. Onun mahiyyəti ondan ibarətdir ki, elmdə işlənib hazırlanmış anlayışlar insan təfəkküründə xüsusiyyətlərilə təyin olunur. Əşya haqqında bildiyimiz məlumatlardan hər biri həqiqətin yalnız bir hissəni əks etdirir. Lakin Borun gəldiyi nəticə optimistikdir: bir-birinə guya zidd olan anlayışlardan istifadə edərək, bir-birini tamamlayan məlumatlar almaq olar – son nəticədə tam mənzərə onlardan toplanır. Ancaq təbiətə, cavabı mövcud olmayan suallar vermək lazım deyil. Belə suala bir misal göstərək: "Elektron dalğadır, yoxsa zərrəcik?" Nə dalğadır, nə də zərrəcik! Elektron elektrondur, ancaq müxtəlif hallarda o, özünü ya zərrəcik kimi, ya da dalğa kimi aparır.



Klassik mexanikada zərrəciyin halı altı kəmiyyətlə – hər hansı zaman anında onun üç koordinatının qiymətləri və sürət (və ya impuls) vektorunun üç komponenti ilə təyin olunur. İstənilən digər zaman anında zərrəciyin bütün parametrlərinin qiymətlərini hərəkət tənliklərinin (Nyuton qanunlarının) köməyilə təyin etmək olar. Ancaq kvant mexanikasında bu altı kəmiyyəti, qeyri-müəyyənliklər münasibətinə görə, eyni anda dəqiq ölçmək mümkün deyildir! Maksimum nə edə biləriksə, o da üç kəmiyyəti, məsələn, üç koordinatı və ya impulsun üç komponentini ölçməkdən ibarətdir. Sonra isə Şredinger tənliyinə görə istənilən sonrakı zaman anında zərrəciyin ψ dalğa funksiyasını hesablamaq olar. Lakin artıq bilirik ki, ψ – zərrəciyin ehtimal xarakteristikasıdır və daha sonra onu da dəqiq ölçmək mümkün deyil. Beləliklə, məntiqi dairə qapanır.

Vacib sual: ölçmə prosesi necə baş verir? Bor dəqiq olaraq, "kvant sistemi" və "ölçü cihazı" anlayışlarını

bir-birindən ayırdı. Cihaz nəhəng sayda mikrozərrəciklərdən ibarətdir və ona görə klassik nəzəriyyə ilə kifayət qədər yaxşı təsvir olunur (uyğunluq prinsipi). Cihaz kvant sistemilə qarşılıqlı təsir nəticəsində başqa hala keçir və bunun sayəsində tədqiqatçı sistem haqqında informasiya alır. Məsələn, foton (kvant sistemi) fotolövhənin (ölçü cihazı) üzərinə düşərkən həssas təbəqənin dənəciklərindən biri işıqlanır ki, buradan da belə nəticə çıxarılır: ölçmə anında fotonun koordinatı bu dənəciyin koordinatı ilə

VERNER HEYZENBERQ



Kvant mexanikasının yaradıcılarından biri olan Verner Karl Heyzenberq (1901-1976) Münxen universitetinin vizantologiya professoru Avqust Heyzenberqin ailəsində doğulmuşdur. Balaca Heyzenberq həmin universitetdə Volfqanq Pauli ilə eyni vaxtda oxumuşdur. Pauli kimi, o da, fizikanı professor Arnold Zommerfeldin rəhbərliyi altında öyrənmişdir. Heyzenberq 1924-cü ildə Gettingen universitetində privat-dosent və Maks Bornun assistenti, sonra Kopenhagendə Nils Borun yanında stajkeçən, 1941-ci ildən isə Münxendə nəzəri fizika kafedrası üzrə öz müəllimi, professor Zommerfeldin varisi olmuşdur. Həmin 1941-ci ildə kayzer Vilhelm Fizika İnstitutunun direktoru və eyni zamanda Berlin universitetinin fizika professoru oldu.

Heyzenberq 1925-ci ildə, ot qızdırmasının tutmasından (yaz çiçəklənməsinin doğurduğu allergiyadan) qurtulmaq üçün Gelqoland adasına gəldi və burada *matrisa mexanikası* adlanan nəzəriyyə qurdu. Bu kvant fizikasının daxili ziddiyyətsiz ilk nəzəriyyəsi idi.

Heyzenberq Gettingenə qayıtdıqdan sonra Maks Bornun və Paskaul Yordanın köməyilə öz ideyalarına bitmiş bir forma verdi və onları fizika jurnalında çap etdirdi. "Üçlüyün məqaləsi"nin bir nüsxəsini çapdan əvvəl müəlliflər Kembricə, məşhur nəzəriyyəçi Ralf Faulerə göndərdilər. Məqalə Pol Dirakın gözlərinə sataşdı və onu çevirmələr nəzəriyyəsini işləyib hazırlamağa təhrik etdi. Bütün bunlar dalğa mexanikasının Şredinger tərəfindən yaradılmasından bir il əvvəl baş vermişdi. Heyzenberq öz nəzəriyyəsinə əsaslanaraq, molekulda nüvələrin spinlərinin necə yönəlməsindən asılı olaraq, hidrogen molekulunun iki formada mövcud olduğunu (*orto-* və *para*-hidrogen) qabaqcadan xəbər verdi (spinlər *orto*-hidrogendə eyni istiqamətdə, *para*-hidrogendə isə əks istiqamətlərdə yönəlmişdir). Bu işinə görə o, 1932-ci ildə Nobel mükafatına layiq görüldü.

1927-ci ildə Heyzenberq, indi onun adını daşıyan məşhur qeyri-müəyyənlik prinsipini formulə etdi, 1937-ci ildə ferromaqnetizmin, 1940-cı ildə isə atom reaktorunun nəzəriyyəsini qurdu. 1943-cü ildən alim kosmik şüaların – kosmik fəzadan Yerə gələn yüksək enerjili zərrəciklər selinin tədqiqi ilə aktiv məşğul oldu. 1956-cı ildə o, vahid sahə nəzəriyyəsi qurmağa cəhdlər etdi, lakin uğur qazanmadı.

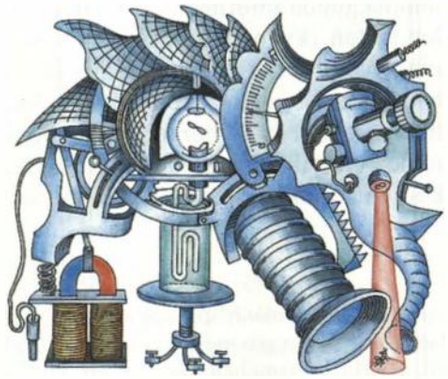
"Hissə və tam" (1937-1940-cı illər) adlı kitabında Heyzenberq özünün, bir çox kolleqalarından fərqli olaraq, Birləşmiş Ştatlara nə üçün mühacirət etmədiyini belə izah etmişdir: "Avropanın darısqallığından Amerikanın genişliyinə çıxmağın perspektivləri hələ on il bundan əvvəl bura etdiyim səfərdən bəri məni şirnikləndirirdi.

Bəlkə də, emiqrasiya etməyim daha yaxşı olardı... Lakin, nəhayət, mən qərara aldım ki, orada, Avropada öz ətrafımda elmdəki yeniliklər üzərində işləmək istəyən gənclərdən ibarət dərnək yaradım, sonra isə, müharibədən sonra başqaları ilə birlikdə Almaniyada yeni elmin dirçəlməsinə təkan verim. Əgər mən indi bu gənc insanları dar vəziyyətdə qoymuş olsaydım, özümü satqın hesab edərdim. Axı bizə nisbətən, gənclərə mühacirətdə olmaq çətindir. Burada onların yer tapması elə də asan deyildir və bu imkandan özüm üçün istifadə etsəydim, mən tərəfdən bu, alçaqlıq olardı".



V.Heyzenberqə Nobel mükafatının təqdim edilməsi. 1932-ci il.

"Hissə və tam" Heyzenberqin elmin, insanın və cəmiyyətin problemlərinə həsr olunmuş heç də yeganə kitabı deyildir. Onun irsinə sırf fiziki işlərlə yanaşı, fəlsəfi və tarixi-elmi mövzulara aid çoxsaylı məqalələri və çıxışları, həmçinin məşhur "Fizika və fəlsəfə" kitabı daxildir.



eyni olmuşdur. Lakin prinsipcə ölçmə prosesi nəzarətolunmazdır və ona görə də fotonun koordinatı istənilən qiymətlər ala bilər; dalğa funksiyası yalnız hər bir dənəciyin işıqlanma ehtimalını qabaqcadan xəbər verir.

Bor özünün bütövlük konsepsiyası haqqında 1927 və 1930-cu illərdə Solveyev konqresində ("Solveyev konqresləri" adlı əlavə oçerkə bax) məruzə etdi və Eynşteynin amansız müqavimətinə rast gəldi. Eynşteyn hesab edirdi ki, onun irəli sürdüyü arqumentlər Kopenhagen şərhini təkzib edir. Bor Eynşteynin etirazlarını yaxşı dəf edirdi. Buna baxmayaraq o, Eynşteyni heç inandıra bilmədi ki, mikroaləmin fizikası ehtimal xarakterinə malikdir.

Klassik baxışların tərəfdarları ümid edirdilər ki, kvant nəzəriyyəsi statistik fizikaya bənzərdir. Onlar belə mühakimə edirdilər: makroskopik mühitlərin (qazların, mayelərin və s.) davranışı yalnız ilk baxışda ehtimallı xarakter daşıyır; əslində isə onları əmələ gətirən atomların və molekulların hərəkəti tamamilə qabaqcadan xəbər verilə bilər, sadəcə olaraq, milyardlarla zərrəcikləri izləmək mümkün deyildir. Bir çoxları mikrozərrəciklərə qabaqcadan xəbər verilə biləcək tərzdə dəyişən "gizli parametrlər" aid edirdilər, zərrəciklərin ehtimallı davranışını isə bu parametrlər haqqında informasiyanın tam olmaması ilə izah edirdilər. Lakin 1932-ci ildə Amerika riyaziyyatçısı və fiziki Con fon Neyman (1903-1957) müəyyən etdi ki, "gizli parametrlər"ə əsaslanan nəzəriyyə kvant mexanikasından çıxan nəticələrə gətirmir. Əgər kvant mexanikası tənliklərinin dəqiq olmadığını qəbul etsək və onları daha dəqiq, lakin klassik nəzəriyyənin əvvəlcədən təyin edilmiş, determinist prinsipləri altında qurulmuş tənliklərlə əvəz etsək, onda yalnız bu zaman *fon Neyman teoremindən* yan keçmək mümkündür. Lakin bu vaxta qədər Kopenhagen şərhinə heç bir ciddi alternativ yaradılmamışdır, lakin gələcəkdə yaradılması istisna edilmir.

Kopenhagen şərhi sonralar da bir çox fiziklərdə qane olunmama hissi doğurmuşdur. Bir qəribə faktı qeyd edək: Maks Born 1926-cı ildə dalğa funksiyasına ehtimal mənası verməyi təklif etmişdir. Buna görə Nobel mükafatını o, yalnız 1954-cü ildə almışdır.



Con fon Neyman.

BİR DAHA ATOM SPEKTRLƏRİ HAQQINDA

Artıq deyildiyi kimi, atom spektrlərinin problemi atomun Rezerford–Bor planetar modelində öz prinsipial həllini tapdı ("Kvant təsəvvürlərinin yaranması" məqaləsinə bax). Bor belə postulat irəli sürdü ki, elektronlar bir orbitdən digərinə keçəndə işıq şüalandırır. Bu işığın tezliyi

$$\nu = \frac{1}{h}\left(E_i - E_f\right)$$

düsturu ilə təyin olunur.

Lakin enerjinin qiyməti heç də orbiti tam təyin etmir. Eyni bir enerjidə elektronun impuls momenti (hərəkət miqdarı momenti) müxtəlif qiymətlər ala bilər ki, bu da orbitin formasının (dairəvi və ya elliptik) dəyişməsi kimi özünü göstərir. Əvvəlcədən Bor fərz etmişdi ki, impuls momenti də yalnız diskret qiymətlər alır.

Arnold Zommerfeld impuls momentinin *fəza kvantlanması* ideyasını irəli sürdü: moment vektoruna yalnız

KVANT MEXANİKASININ RİYAZİ APARATI

Fizikanın inkişaf tarixi göstərdi ki, müəyyən kateqoriya hadisələri izah edən qanunları kəşf etmək kifayət deyildir. Bu qanunları dəqiq və istifadə üçün əlverişli bir riyazi dildə ifadə etmək çox vacibdir. Nyutondan yüz il sonra fransız riyaziyyatçısı Jozef Laqranj klassik mexanikaya elə bir forma verdi ki, bu forma məsələlər çoxluğunu vahid bir alqoritm üzrə həll etməyə imkan verdi. Daha 50 il sonra irlandiyalı Uilyam Hamilton və alman Karl Yakobi, Nyuton mexanikasının riyazi dilini tam mükəmməlliyə çatdırdılar.

Eyni şey kvant mexanikası ilə də baş verdi, ancaq olduqca qısa vaxtda. Verner Heyzenberqin ilk işi çıxandan artıq beş il sonra Pol Dirakın "Kvant mexanikasının prinsipləri" kitabı çap olundu (1930-cu il). Dirak kvant mexanikasını riyazi baxımdan olduqca gözəl şəkildə formulə etdi. Şredingerin dalğa funksiyası əvəzinə o, $|\psi\rangle$ – hal vektorlarından, yəni çoxölçülü, hətta çox vaxt sonsuz ölçülü fəzada təyin olunmuş vektorlardan istifadə etdi. Hal vektoru, kvant sistemi haqqında əldə etmək mümkün olan bütün informasiyanı özündə saxlayır. Verilmiş sistem üçün ölçülə bilən hər bir A fiziki kəmiyyətinə (kvant nəzəriyyəsində belə kəmiyyət *müşahidə olunan kəmiyyət* adlanır), hal vektoruna təsir edən $\hat{A}$ operatoru uyğundur. Adətən, ölçmələr müxtəlif ehtimallarla müxtəlif nəticələr verir. $\hat{A}$ operatorunun *məxsusi vektorları* istisna təşkil edir. $\hat{A}$ vektorunun məxsusi vektorları elə vektorlara deyilir ki, $\hat{A}$ operatorunun onlara təsiri vektorun ədədə vurulmasına gətirilir, yəni

$$\hat{A}|\psi\rangle = a|\psi\rangle.$$

Bu halda A kəmiyyətinin ölçülməsi həmişə a nəticəsini verir. Əgər $|\psi\rangle$ vektoru $\hat{A}$-nın məxsusi vektoru deyilsə, onda onu həmişə məxsusi vektorların xətti kombinasiyası şəklində yazmaq olar, yəni

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + \ldots,$$

belə ki, $\hat{A}|\psi_i\rangle = a_i|\psi_i\rangle$.

Onda A kəmiyyətini ölçərkən a_i nəticəsinin alınması ehtimalı $|c_i|^2$-na bərabərdir.

Qeyd etmək lazımdır ki, bu müddəa kvant nəzəriyyəsində çox mühüm olan superpozisiya prinsipinin nəticəsidir: əgər $|\psi_1\rangle$ və $|\psi_2\rangle$ verilmiş kvant sisteminin mümkün hallarıdırsa, onda onların istənilən xətti kombinasiyası $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$-də onun mümkün halıdır.

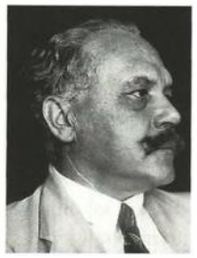


Aydındır ki, iki A və B kəmiyyətləri $|\psi\rangle$ halında o zaman tamamilə müəyyən qiymətlərə malik olur ki, $|\psi\rangle$ vektoru $\hat{A}$ və $\hat{B}$ operatorlarının hər birinin məxsusi vektoru olsun. Bu isə $\hat{A}$ və $\hat{B}$ kommutasiya etdikdə, yəni $\hat{A}\hat{B} = \hat{B}\hat{A}$ olduqda mümkündür. Bununla əlaqədar *müşahidə olunanların tam dəsti* anlayışı mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Burada eyni zamanda ölçülə bilən fiziki kəmiyyətlər (və uyğun operatorlar) dəsti nəzərdə tutulur ki, bunun nəticəsində hal vektorunu birqiymətli təyin edən kvant ədədləri alınacaqdır. Digər tərəfdən, əgər kvant ədədləri verilibsə, onda kvant sisteminin halı (hal vektoru) birqiymətli təyin olunmuşdur.

Dirak-Yordan çevirmələr nəzəriyyəsi müşahidə olunanların tam dəsti ilə bağlıdır. Tam dəstlər istənilən sayda ola bildiyindən və onların hər biri isə kvant sisteminin halını təsvir etdiyindən, onda istənilən belə təsvirlər ekvivalent olmalıdır ki, bu da Dirak-Yordan nəzəriyyəsini təsdiqləyir.

Bu, hələ hamısı deyil. Şredinger nəzəriyyəsində yalnız hal vektorları, Heyzenberq nəzəriyyəsində isə yalnız operatorlar zamandan asılıdır. Çevirmələr nəzəriyyəsi bir kvant mənzərəsindən digərinə keçməyə, yəni bir sıra kəmiyyətlərin zamandan asılılığını başqa kəmiyyətlərə atmağa imkan verir. Hətta aralıq variantlar da mümkündür, yəni zamandan asılılığı qismən hal vektorları, qismən də operatorlar öz üzərinə götürür. Əlbəttə, bütün hallarda eyni nəticələr alınır, lakin hansı variantdan istifadə etməyin əlverişli olması konkret məsələdən asılıdır.

1932-ci ildə Con fon Neymanın "Kvant mexanikasının riyazi əsasları" adlı kitabı çap olundu. Bu riyaziyyatçı kvant fizikasını mücərrəd Hilbert fəzasının uyğun riyazi dilində şərh etmişdi. Nyuton qanunları Evklid fəzalarında təbii formulə edildiyi kimi, bütün kvant qanunları da Hilbert fəzasında eyni dərəcədə təbii formulə edilir. Bununla yanaşı, fon Neyman öz kitabında kvant nəzəriyyəsində ölçmə prosesini təhlil etmişdi. İş ondadır ki, bir tərəfdən, ölçmə prosesinə kvant (zərrəcik) və klassik (ölçü cihazı) sistemləri arasında baş verən qarşılıqlı təsir kimi, digər tərəfdən isə, hər iki sistemi, parametrləri başqa bir ölçü cihazının köməyilə təyin olunan, vahid bir kvant sistemi hesab etmək olar. Fon Neyman göstərdi ki, bu yanaşmalar bir-birinə zidd deyil və bununla da bir daha kvant nəzəriyyəsinin Kopenhagen şərhini təsdiqlədi.



Arnold Zommerfeld.

bəzi qiymətlər almağa və fəzada müəyyən istiqamətlərə malik olmağa icazə verilir. Dəqiq desək, impuls momentinin kvadratı yalnız $\hbar l(l+1)$-ə bərabər ola bilər, burada l -tam ədəddir (və 0 ilə $n-1$ arasında dəyişir), moment vektorunun hər hansı ox üzrə proyeksiyası isə yalnız $\hbar m$ qiymətlərini ala bilər, burada m – tam ədəddir (və $-l$ ilə $+l$ arasında dəyişir). Nəticədə atomda elektronların orbitləri üç n, l və m tam ədədlərinin (kvant ədədlərinin) köməyilə təsnifata bölünür, burada *n – baş kvant ədədi*, *l – orbital kvant ədədi*, *m isə maqnit kvant ədədidir*.



Hidrogen atomunun n, l və m kvant ədədləri ilə xarakterizə olunan müxtəlif həyəcanlanmış hallarında elektron buludunun forması. Həyəcanlanmamış atom düzgün sfera şəklinə malikdir.

"Maqnit" sözü m kvant ədədinin tərifinə ona görə daxildir ki, bu ədəd nüvə ətrafında fırlanan elektronun yaratdığı maqnit sahəsini xarakterizə edir.

Neçə elektronun eyni zamanda eyni bir orbitdə olmağa ixtiyarı var? Bu suala 1925-ci ildə Volfqanq Pauli cavab verdi. O, məşhur *qadağan prinsipini* formulə etdi: atomun hər bir orbitində ikidən çox elektron yerləşə bilməz. Deməli, atomda elektronların yol verilən hallarını tam təsnifatlaşdırmaq üçün n, l və m-dən başqa, iki mümkün qiymətdən birini ala bilən əlavə kvant ədədi tələb olunur. Belə bir ədəd kimi qiymətləri $-1/2$ və $+1/2$ olan m_s kvant ədədi götürülür. Həmin 1925-ci ildə də hollandiyalı Ralf Kroniq (1904-1995) və ondan asılı olmadan Amerika fizikləri Corc Ulenbek (1900-1988) və Semyuel Qaudsmit (1902-1979) fərz etdilər ki, elektron həm də öz oxu ətrafında fırlanır. Bu fırlanma ilə bağlı olan daxili impuls momentini *spin* (*ing.* spin – "fırlanma"), onun nüvə ətrafında fırlanması ilə bağlı olan momentinə isə *orbital moment* adı verdilər. Elektronun spininin qiyməti $\hbar/2$-yə, onun seçilmiş ox üzrə mümkün proyeksiyası isə $\hbar m_s$-ə, yəni $-\hbar/2$ və ya $+\hbar/2$ -yə bərabərdir.

ARNOLD ZOMMERFELD.
"ATOMUN QURULUŞU VƏ SPEKTRLƏR"

Fizikanın qızıl fonduna daxil olan bütün kitablar kimi, 1917-ci ildə alman fiziki və riyaziyyatçısı Arnold İohan Vilhelm Zommerfeld (1868-1951) tərəfindən yazılmış ikicildlik "Atomun quruluşu və spektrlər" monoqrafiyası təkrarolunmaz özünəməxsusluğa malik olub, müəllifin qeyri-ordinar şəxsiyyətinin nişanələrini özündə daşıyır.

Zommerfeld böyük ustalıqla riyazi aparata yiyələnmişdi və hər bir fiziki problemi öyrənməyə başlayanda, onu əvvəlcə riyazi məsələyə gətirirdi, sonra isə bu riyazi məsələnin həllini fiziki dildə şərh edirdi.

"Atomun quruluşu və spektrlər" monoqrafiyası xüsusi bir monoqrafiya idi. Burada kvant mexanikasının tarixinə aid nadir məlumatlar var (xüsusən ona görə qiymətlidir ki, oxucu kvant mexanikasının yaradılmasına mühüm töhfə – pay vermiş, hadisələrin birbaşa iştirakçısından "bunun necə olduğunu" bilmək kimi nadir imkan qazanır).

Monoqrafiya mürəkkəb məsələlərin həlli metodikasını mənimsəməyə imkan verir, ən başlıcası isə, müasir nəzəriyyəçi-fizikin necə fikirləşməli olduğunu öyrədir.

Zommerfeldin kitabı 1920-ci illərdə atomun quruluşuna və spektrlərinə dair ən yeni problemlər üzrə ilk işlərdən biri olmaq etibarilə, elmdə çox əhəmiyyətli rol oynamışdır. Müəllif diqqətini əsasən, həllində özünün bilavasitə iştirak etdiyi məsələlərə yönəltmişdir. Zommerfeld öz kitabında Bor nəzəriyyəsi, klassik və kvant mexanikası çərçivəsində atomun quruluşunun və spektrlərinin əsas qanunauyğunluqlarının ətraflı çıxarılışlarını verir, spektrlərin incə quruluşuna, rentgen spektrlərinin relyativistik nəzəriyyəsinə, fotoeffektin nəzəriyyəsinə və bir çox başqa məsələlərə toxunur. Müəllif oxucuya mühakimələrdəki bütün çətin yerlər, hesablamaların gedişində yaranan və həll olunan paradokslar haqqında xəbərdarlıq edir; məsələnin qoyuluşuna gətirən və nəzəri fərziyyələrin doğruluğunu təsdiq edən eksperimentlər haqqında danışır.

Zommerfeldin çoxdan klassikaya çevrilmiş monoqrafiyası indi də öz əhəmiyyətini itirməmişdir. Kvant mexanikasının əlifbası ilə tanış olan hər kəs orada özü üçün bir çox faydalı və qiymətli məlumatlar tapacaqdır.

VOLFQANQ PAULİ



1960-cı ildə onun 60 yaşı olardı. Fiziklər yubileyə əvvəlcədən hazırlaşmağa başlamışdılar. Xeyirxah ənənəyə görə, onlar fizikanın vicdanı olmuş, acı tənqidçi və itisözlü, tanınmış metri hörmətlə anmaq üçün hazırlanmış məqalələr məcmuəsini "XX əsrin nəzəri fizikası" adlandırmağı nəzərdə tutmuşdular, çünki onun elmi tədqiqat diapazonu çox geniş idi. Heyhat, məcmuə, özünün 60 illiyinə qədər yaşamamış Paulinin ölümündən sonra çıxdı.

Kiçik Volfqanq Pauli (1900-1958) Vyanada doğulmuşdur. Onun atası Volfqanq İozef Paulu Vyana universitetində fizika-kimya professoru olmuşdur. Anası, Berta Pauli (qızlıq familiyası Şyüts) yazıçı idi. Onun xaç atası məşhur fizik və filosof Ernst Max idi. Evdə hökm sürən humanist atmosfer, ailənin yaşlı üzvlərinin təbii-elmi, bədii və fəlsəfi maraqlarının bir-birinə çulğalaşması kiçik Paulinin şəxsiyyətinin formalaşmasına səmərəli təsir göstərmişdi.

Gimnaziyada Volfqanq xüsusi həvəslə oxumamışdır. Ancaq onun fiziki və riyazi qabiliyyəti özünü çox erkən və olduqca qeyri-adi formada büruzə vermişdi. O, riyazi analizi müstəqil olaraq L.Eylerin "Sonsuz kiçilənlərin analizinə giriş" kitabından və E.Çezaronun "Cəbri analizə dair elementar dərslik və sonsuz kiçilənlər hesabı" kitabından öyrənmişdi. Eylerin kitabı ilk başlayanlar üçün çətin kitab idi. Hər şeydən göründüyü kimi, onun müstəqil məşğələləri tam uğurla keçmişdir. Hər halda, gimnaziya divarlarından xaricdə onun əldə etdiyi biliklər bəs etdi ki, 15 yaşlı yeniyetmə ümumi nisbilik nəzəriyyəsinə dair A.Eynşteynin işini oxuya və onu araşdıra bilsin. Tərəddüd etmədən Pauli öz həyat yolunu seçdi və artıq 1918-1921-ci illərdə fizikanı Münxen universitetində professor A.Zommerfeldin rəhbərliyi altında öyrəndi. Tanınmış fizik-nəzəriyyəçi olan A.Zommerfeld Münxendə məşhur nəzəri fizika məktəbi yaratmışdır (onun tələbələri arasında H.Bete, Q.Vantsel, V.Qaytler, V.Heyzenberq, P.Debay, V.Kossel, O.Laport, H.Frelix, P.Evald və b. kimi bir çox şöhrət tapmış adlar da var). Universiteti bitirməzdən bir il əvvəl Pauli doktorluq dissertasiyası hazırladı.

XIX əsrin sonunda Feliks Kleyn (1849-1925) Almaniyanın ən görkəmli alimlərinin iştirakı ilə "Riyaziyyat elmlərinin ensiklopediyası"nı (1898-1934-cü illər) yaratmağa başladı. (Yeganə istisna gəmiqayırma sahəsində tanınmış mütəxəssis olan, rusiyalı akademik A.N.Krılov üçün edilmişdir.) Eynşteyn nisbilik nəzəriyyəsi haqqında yazmağı vəd etmişdi, lakin nə ilə isə məşğul olduğuna görə, kömək üçün Zommerfeldə müraciət etdi. Nəticədə gənc Pauli, geniş erudisiyaya malik olduğunu və predmeti əla mənimsədiyini nümayiş etdirərək, 200 səhifəlik bir əsər təqdim etdi. Bu əsər tezliklə ayrıca bir kitab şəklində çap olundu. Bu gözəl əsər Eynşteynin yüksək dərəcədə müsbət rəyinə və tərifinə səbəb oldu, habelə fizika məsələlərində Paulinin sarsılmaz nüfuzunun söykəndiyi fundamentə çevrildi.

Dissertasiyanı müdafiə etdikdən sonra Pauli bir müddət Gettingendə Maks Bornla işlədi və sonra Kopenhagendə Nils Borun yanında Nəzəri Fizika İnstitutunda assistent oldu. 1928-ci ildə o, Sürix Federal Politexnik İnstitutunun (vaxtilə Eynşteyn oranı bitirmişdi) fizika professoru oldu. 1935/36 tədris ilini Pauli Prinston Perspektiv Tədqiqatlar İnstitutunda (ABŞ) keçirmişdir.

İkinci dünya müharibəsi dövründə alim, formal olaraq Sürixdəki Federal institutun professoru kimi qalaraq, Amerika Birləşmiş Ştatlarında yaşamışdır. 1946-cı ildən ömrünün sonuna qədər, arabir ABŞ-a gəlsə də, o, bu şəhərdə işləmişdir.

1925-ci ildə qadağan prinsipini formulə etdi və çap etdirdi. 1920-ci illərdə fiziklər orbitlər dilində düşünürdülər, ona görə də qadağan prinsipinin ilk ifadəsi belə səslənirdi: heç bir orbitdə iki eyni elektron yerləşə bilməz.

Onu dinləyənlərin rəyinə görə, Pauli pis mühaziraçi olmuşdur. Buna baxmayaraq, şəxsi söhbətlərində və məktublarında öz ideyalarını qeyri-adi dərəcədə aydın və inandırıcı surətdə söyləyirdi. Məhz "radioaktiv xanımlara və cənablara" məktubunda 1930-cu ildə Pauli fərz etdi ki, "β-parçalanma zamanı çatışmayan enerjini" hər hansı əlaqeçməz, naməlum bir zərrəcik apara bilər. Bu ideyanı Enriko Fermi tez tutdu və həmin zərrəciyi "kiçicik neytron" və ya "neytroncuq" (*ital.* "neytrino") adlandırdı.

Pauliyə elementar zərrəciklər fizikasını zənginləşdirmiş bir sıra aydın və məhsuldar ideyalar aiddir. 1940-cı ildə o, spin və statistika arasında əlaqə haqqında teorem isbat etdi; 1941-ci ildə elektrik yükünün saxlanması və lokal kalibr çevrilmələrinə nəzərən invariantlıq arasında əlaqəni müəyyən etdi; 1955-ci ildə elementar zərrəciklərin yük qoşmasına C, fəza inversiyasına P və zaman inversiyasına T nəzərən simmetriya xassələrini əks etdirən mühüm teorem – CPT teoremini formulə etdi.

Gözəl nəzəriyyəçi olan Pauli eksperimentlə bağlı hər bir şeydə tamamilə gücsüz idi. Fiziklər zarafatla "Pauli effekti" haqqında danışırdılar: onun laboratoriyaya gəlməsi kifayət idi ki, nə isə sıradan çıxsın, sınsın və ya partlasın.

ELEKTRON TƏBƏQƏLƏRİ

Eyni enerjiyə malik olan, yəni bütün hallarda eyni n-ə malik olan elektronlar *atomun elektron təbəqəsini* əmələ gətirir. l, m və m_s, kvant ədədlərinin mümkün qiymətlərini nəzərə alaraq, hesablamaq olar ki, hər bir təbəqədə $2n^2$ sayda hal var. Enerjisi minimal olan ən aşağı təbəqədə ($n=1$) cəmi 2 hal, sonrakı təbəqədə ($n=2$) 8 hal, sonra 18, 32 və s. hallar var. Təbəqələr *örtüklərə* bölünür. Eyni bir örtükdə olan elektronların orbital momentlərinin qiyməti eynidir; müəyyən n və l malik olan örtükdəki elektron hallarının sayı $2(2l+1)$-dir. Məsələn, 2 elektronlu təbəqədə yalnız 1 örtük,

SPİN VƏ ZƏRRƏCİKLƏRİN EYNİLİYİ

Spin haqqındakı hekayəni inkar bildirən "yox" sözü ilə başlayaq. Elektron öz oxu ətrafında fırlanmır; elektronun oxu yoxdur və ola da bilməz; elektron faktik olaraq maddi nöqtədir; onu ölçüsü olan hər hansı bir struktur şəklində (kürəcik şəklində) təsəvvür etmək cəhdi mütləq ziddiyyətə gətirib çıxarır. Onda bəs spin nədir?

Hər şeydən əvvəl, *orbital momentin* nə olduğunu dəqiqləşdirək. Artıq deyilib ki, kvant nəzəriyyəsində klassik kəmiyyətlərin əvəzində operatorlardan istifadə edilir. Deməli, impuls momentinin üç komponentinə üç operator uyğundur. Lakin bu operatorlar bir-birilə kommutasiya etmir və deməli, onları eyni zamanda ölçmək olmaz (baxmayaraq ki, onların hər biri momentin kvadratı ilə eyni zamanda ölçülə bilər). Momentin komponentlərinin kommutasiya münasibətləri konkret şəklə malikdir, bu münasibətlər isə burada o qədər də vacib deyil. Vacib olan başqa şeydir: elektron adi koordinat və impulsla yanaşı, spin vektoru ilə, yəni üçkomponentli $\vec{S}$ operatoru ilə xarakterizə olunur; onun kompenentləri orbital momentin komponentlərinin ödədiyi kommutasiya münasibətlərinə tabedir. Yalnız bu mənada spin daxili impuls momenti adlana bilər, ancaq elektron heç bir məxsusi fırlanmaya məruz qalmır. Spin, yükə oxşar olaraq, elektronun daxili xarakteristikasıdır. Bununla belə, klassik limitdə orbital moment anlayışı qalır, spin isə itir! Klassik nəzəriyyədə analoji anlayış yoxdur və ola da bilməz!

Bu heç də spinin ortaya atdığı yeganə sürpriz deyil. 1925-ci ildə Paulinin formulə etdiyi qadağan prinsipi əvvəlcə müəyyən bir süni postulat, nəzəriyyəni eksperimentə uyğunlaşdırmaqla özünü doğruldan bir postulat təsiri bağışladı.

Lakin aydınlaşdırıldı ki, bu prinsip zərrəciklərin eyniyyət prinsipinin təzahürlərindən biridir. Elektronlara tətbiq edildikdə eyniyyət prinsipi belə səslənir: Kainatdakı bütün elektronlar bir-birindən heç cür fərqlənmir, seçilmir. Elektronları nömrələmək və sonra elektronu hər hansı nöqtədə aşkar edib, demək olmaz ki, bu, məsələn, 8 nömrəli elektrondur. Hətta, bu cür sualın qoyuluşunun özünün kvant nəzəriyyəsində heç bir mənası yoxdur. Kainatın elektronlarını fərdi yox, yalnız toplu şəklində öyrənmək mümkün olur. Əlbəttə ki, əgər bir atom Bakıda Qız qalası daşında, digəri isə London Biq-Ben zəngində yerləşibsə, onda bu atomların elektron örtüklərinə ayrı-ayrılıqda baxa bilərik, çünki "Londonlu" elektronu Bakıda aşkaretmə ehtimalı yox dərəcəsindədir (bununla belə, bu ehtimal mövcuddur!)

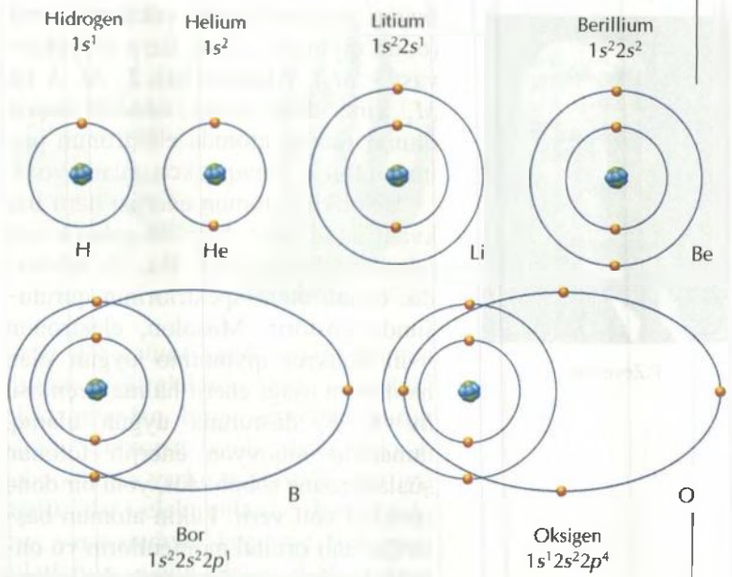
Məlumdur ki, orbital momentin kvadratı $\hbar l(l+1)$ qiymətlərini alır, burada $l=0, 1, 2, \ldots$ Elektronun, kvarkın, müonun, neytrinonun və bir çox digər elementar və bağlı zərrəciklərin spininin kvadratı isə $\hbar s(s+1)$-ə bərabərdir, burada $s=1/2$. Ümumiyyətlə götürdükdə isə, zərrəcik üçün s, ya tam, ya da yarımtam qiymətlər alır, yəni ya 0, 1, 2, ..., ya da 1/2, 3/2, 5/2,... qiymətlər alır. Məsələn, pionlar üçün $s=0$, fotonlar və qlionlar üçün $s=1$-dir və s. Eyniyyət prinsipi hər tip zərrəcik üçün ödənir (ayrılıqda), lakin ondan çıxan konkret nəticələr s-in qiymətindən əsaslı surətdə asılıdır. Bu asılılığı ümumi halda həmin Pauli 1940-cı ilə formulə etmişdir. Sadə formada *Pauli teoremi*



belədir: spini yarım tam olan zərrəcik üçün qadağan prinsipi ödənir (bir orbitdə $2s+1$-dən çox zərrəcik yerləşə bilməz), spini tam olan zərrəcik üçün isə ödənmir (bir orbitdə istənilən sayda zərrəcik yerləşir).

8 elektronlu təbəqədə 2 örtük (biri 2, digəri 6 haldan ibarətdir), 18 elektronlu təbəqədə 3 örtük (2, 6 və 10 haldan ibarət) və s. vardır.

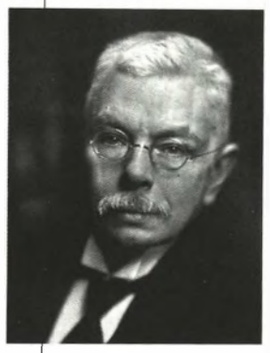
Bu sxem çoxelektronlu atomların quruluşunu və elementlərin dövri sistemini qismən başa düşməyə imkan verdi. Sxemin necə işlədiyinə baxaq. Atomun bütün elektronlarını əlindən alaq, ancaq çılpaq nüvəni saxlayaq. Elektron təbəqələrinin necə dolduğunu bilmək üçün, bütün elektronları atoma qaytarana qədər, onları bir-bir birləşdirək. İlk iki elektron $n=1$ olan ən aşağı (enerji səviyyəsinə görə) təbəqəni, yəni Mendeleyev cədvəlinin iki elementdən ibarət olan I dövrünü dolduracaqdır. Sonra elektronlar növbəti, ikinci təbəqəyə ($n=2$) gedəcək. Bu zaman elektronlar əvvəlcə $l=0$ örtüyünü (dairəvi orbitlər), sonra isə $l=1$ örtüyünü (uzunsov orbitlər), yəni səkkiz elementli II dövrü dolduracaqdır. Artıq III dövrdə məsələ mürəkkəbləşir: çoxelektronlu atomda elektron, sadəcə, nüvənin Kulon sahəsində yerləşmir, o həm də digər elektronlarla da qarşılıqlı təsirdə olur. Bundan başqa, elektronun məxsusi maqnit momenti elektronların nüvə ətrafında fırlanması ilə şərtlənən maqnit sahəsilə, həmçinin nüvənin özünün maqnit sahəsilə də qarşılıqlı təsirdə olur. Belə çıxır ki, elektronun halını, əvvəlki kimi, yenə n, l, m və m_s ədədlərilə nömrələmək mümkün olsa da, elektronun enerjisi indi təkcə n-dən yox, həm də qalan kvant ədədlərindən də asılıdır. Nəticədə elə ola bilər ki, böyük n-ə uyğun hal kiçik enerjiyə malik olsun və ona görə də əvvəlcə həmin hal dolur. Məhz $n=3$ təbəqəsindən başlayaraq, belə də olur. Bu təbəqədə əvvəlcə $l=0$ örtüyü, sonra $l=1$ örtüyü dolur ki, bununla da III dövr qurtarır. Dördüncü dövr, $n=4$ təbəqəsində $l=0$ örtüyünün dolması ilə başlayır,



bundan sonra yenidən $n=3$ təbəqəsinin $l=0$ örtüyünün dolması başlayır və s. Bütün təbəqələr dolana qədər bu cür davam edir.

Bu sadələşdirilmiş sxem kifayət qədər şərtidir, ancaq yenə də əsas şeyi başa düşməyə imkan verir: kvant nəzəriyyəsi atomu təsvir etmək üçün prinsipial baza verdi. Əgər fantastik gücə malik olan ifratmürəkkəb kompüter təsəvvür etsək, onda onun köməyilə, kvant nəzəriyyəsinin tənliklərindən istifadə edərək, istənilən elementin bütün xarakteristikalarını arzu edilən dəqiqliklə hesablamaq olar. Həqiqətdə isə belə kəmiyyət hesablamaları yerinə yetirilməzdir və empirik məlumatlarla kifayətlənmək lazım gəlir. Bu məsələdə atomu ayrı-ayrı elektronların və nüvənin toplusu kimi yox, vahid bir sistem kimi təsəvvür etmək bizə çox kömək edir. Burada bir neçə anlayış ön plana çəkilir: atomda elektronların tam orbital momenti, yəni ayrı-ayrı orbital momentlərin vektorial cəmi (onun qiyməti – L, ox üzrə proyeksiyası M-dir) və tam spin, yəni elektronların məxsusi fır-

Bəzi məsələlərdə ayrı-ayrı elektronlara aid, başqa məsələlərdə isə bütövlükdə atoma aid olan kəmiyyətlərdən istifadə etmək əlverişlidir.

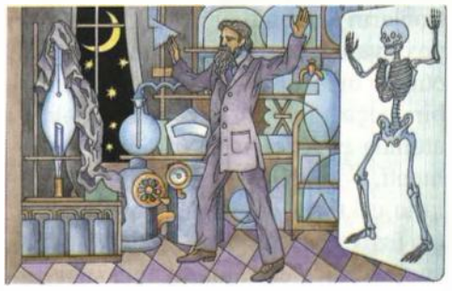


P.Zeyeman.

lanma momentlərinin vektorial cəmi (onun qiyməti – S, ox üzrə proyeksiyası – M_S). Atomun halı L, M, S və M_S kimi dörd kvant ədədilə təsvir olunur (lakin, atomda elektronun halından fərqli olaraq, təkcə onlarla yox).

Beləliklə, atomun enerjisi həm baş kvant ədədindən, həm də qalan kvant ədədlərindən asılıdır. Bu, ilk növbədə, özünü atom spektrlərinin quruluşunda göstərir. Məsələn, elektronun n-in konkret qiymətinə uyğun olan haldan ən aşağı enerji halına keçməsi, $h\nu=E_i-E_f$ düsturuna uyğun olaraq, tamamilə müəyyən enerjili fotonun şüalanmasına səbəb olur, yəni bir dənə spektral xətt verir. Lakin atomun başlanğıc halı orbital momentlərin və onların seçilmiş ox üzrə proyeksiyalarının müxtəlif qiymətlərinə malik ola bilər. Ona görə də güclü böyütmə zamanı biz bir xəttin yerinə xətlər dəstini, yəni *spektrin incə quruluşunu* görərik.

Lakin momentin atom enerji səviyyələrinə təsiri spektrin incə quruluşu ilə bitmir. Hələ 1896-cı ildə Niderland fiziki Piter Zeyeman natrium atomlarını maqnit sahəsində yerləşdirərək, bu metalın spektral xətlərinin üç komponentə parçalandığını müşahidə etmişdir. Zeyemanın həmyerlisi Hendrik Lorens aydınlaşdırdı ki, bu cür parçalanmanın mexanizmi xarici maqnit sahəsi ilə atomun maqnit sahəsinin qarşılıqlı təsirindən ibarətdir ("Hendrik Anton Lorens" məqaləsinə bax).



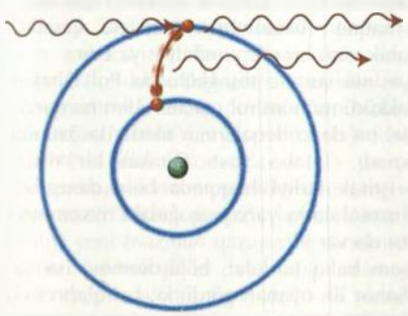
Ancaq yalnız kvant mexanikası Zeyeman parçalanmasını, bütün detalları ilə birlikdə dəqiqləşdirməyə imkan verdi.

Bununla belə, ola bilsin ki, atomda elektronun heç də hər bir sıçrayışı uyğun fotonun şüalanmasına (hər halda, gözəçarpan dərəcədə şüalanmaya) səbəb olmur. Məsələ ondadır ki, elektronların elektromaqnit sahəsi ilə qarşılıqlı təsirinin nəticəsi olan *seçmə qaydaları* mövcuddur (onlar Maksvell-Lorens tənliklərilə təsvir olunur). Bu qaydalar elektronun sıçrayışları zamanı atomun orbital momentinin və spininin (L və S-in) dəyişməsinə məhdudiyyət qoyur: hansı keçidlərə isə icazə verilir, hansılara isə yox. Həm də nəzərə almaq lazımdır ki, həm dəqiq (onlar hökmən ödənir) və həm də təqribi qaydalar vardır. Təqribi qaydalar zamanı şüalanma ilə müşayiət olunan sıçrayışlar mümkündür, ancaq yaranan şüalanmanın intensivliyi, icazəli keçidlərə nisbətən dəfələrlə kiçik olur.

ATOMLARIN RENTGEN SPEKTRLƏRİ

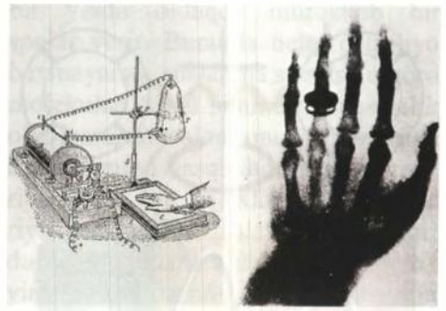
Bir dəfə necə oldusa, alman fiziki Vilhelm Konrad Rentgen (1845-1923) təsadüfən içərisində fotolövhə olan qapalı kaseti öz laboratoriyasındakı cihazlardan birinin yanında qoymuşdu. Müəyyən müddətdən sonra məlum oldu ki, lövhə işıqlanmışdır. Təəccüblənmiş Rentgen seriya eksperimentlər apardı. Həmin eksperimentlər göstərdi ki, bu şüalanma naməlum şüalanmadır. Beləliklə, 1895-ci ildə X-şüaları (alimin işlətdiyi terminə görə) aşkar olundu. Bir sıra ölkələrdə, o cümlədən Azərbaycanda X-şüaları rentgen şüaları adı ilə məlumdur. 1901-ci ildə bu kəşfə görə Rentgen fiziklərdən birinci olaraq Nobel mükafatı ilə təltif olundu.

Rentgen tərəfindən X-şüalarının kəşfi bir çox tədqiqatçılarda maraq doğurdu. İrəliyə doğru mühüm addımı ingilis Çarlz Barkla (1877-1944) atdı. O, eksperimental olaraq göstərdi ki, rentgen şüaları, uzunluğu görünən işığın və ultrabənövşəyi şüaların dalğa uzunluğundan kiçik olan elektromaqnit dalğalarıdır. Rentgen *tormozlanma rentgen şüaları* adlanan şüaları tədqiq etmişdir. Bu şüalar katod borusunda elektronların anodla toqquşması zamanı yaranır və kəsilməz spektrə (dalğa uzunluqlarının geniş diapazonuna) malikdir. Lakin Barkla daha nə isə aşkar etdi: əgər hər hansı element atomuna rentgen şüaları ilə təsir etsək, onda atomların özləri də həmin



cür şüalar, həm də müəyyən uzunluqlu dalğalara malik şüalar buraxmağa başlayar. Həm də bu dalğa uzunluqları müxtəlif elementlər üçün müxtəlifdir. Başqa sözlə, hər bir elementə, optik xətti spektrlərə bənzəyən, lakin dalğa uzunluqlarının başqa diapazonunda yerləşən, özünün fərdi spektri xasdır. Bu spektr *xarakteristik rentgen şüalanması* adlanır.

Barklanın özü, ingilis Henri Mozli (1887-1915), isveçli Karl Manne Georq Siqban (1886-1978) və başqa fiziklər elementlərin xarakteristik spektrini ətraflı öyrəndilər və onların təsnifatını verdilər. Kvant nəzəriyyəsi bu spektr-



◂ "Üzüklə birlikdə əl" – 1895-ci ildə V.K.Rentgen tərəfindən alınmış ilk rentgenoqram.

◂◂ Rentgen aparatı.

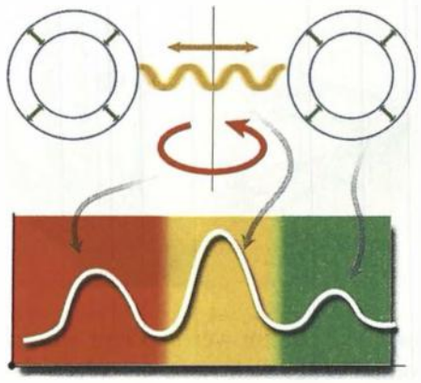
lərin də izahını verdi. Əgər rentgen fotonu aşağı elektron təbəqələrindəki elektronlardan birini atomdan vurub xaricə çıxarırsa, onda daha yüksək təbəqələrdə yerləşən (böyük enerjiyə malik olan) elektronlardan biri boşalmış yerə sıçrayıb keçir və Bor postulatlarına uyğun olaraq dalğa uzunluğu rentgen diapazonunda olan yeni foton buraxır ki, bu da xarakteristik rentgen şüalanmasıdır. Buraxılan fotonun dalğa uzunluğu çıxarılmış elektronun yerinə elektronlardan məhz hansının düşməsindən asılıdır, ona görə də eyni bir elektronun atomdan uzaqlaşdırılması xarakteristik şüalanmanın bütöv bir spektral seriyasının əmələ gəlməsinə səbəb olur. Məsələn, əgər elektron $n=1$ təbəqəsindən çıxarılıbsa, onda K – seriyasının hər hansı xətti; $n=2$ təbəqəsindən çıxarılıbsa, onda L – seriyasının xətti, $n=3$ təbəqəsindən çıxarılıbsa, onda M – seriyasının xətti şüalanır və s.

◂ Xarakteristik rentgen şüalanmasının spektri.

Rentgen şüalanmasının tormozlanma və xarakteristik şüalanmalarla yanaşı, daha bir növü mövcuddur. Əgər çox sürətli elektronlar dəstəsi güclü maqnit sahəsinə düşürsə, onda zərrəciklərin trayektoriyası kəskin burulur. Bu halda, yüklərin istənilən təcilli hərəkəti zamanı olduğu kimi, *sinxrotron elektromaqnit şüalanması* (ilk dəfə onu yüklü zərrəciklərin sürətləndiricilərindən biri olan sinxrotronda müşahidə etmişlər) əmələ gəlir. Maqnit



M.Siqban.



sahəsinin intensivliyindən asılı olaraq sinxrotron şüalanmasının dalğa uzunluğu müxtəlif ola bilər. Çox vaxt onlar rentgen diapazonunda yerləşir, ancaq ultrabənövşəyi diapazona yaxın olur. Bu cür şüalanma *yumşaq rentgen* şüalanması adlanır.

MOLEKULYAR SPEKTRLƏR

Hətta ayrı-ayrı atomların şüalanma spektrlərinin izahı da xeyli çətinliklərlə müşayiət olunur (prinsipial

yox, hesablama çətinlikləri). Molekulların şüalanma spektrlərini tədqiq etmək daha mürəkkəbdir.

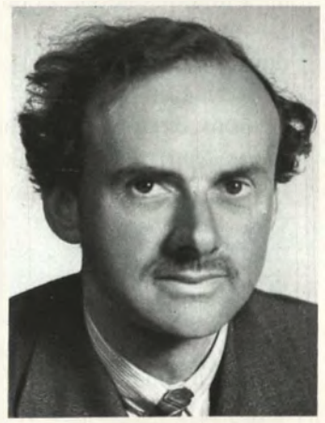
Elektronlar molekulda *elektron səviyyələri sistemini* əmələ gətirərək, müxtəlif enerji səviyyələrində yerləşir. Molekulu əmələ gətirən atomlar (daha doğrusu, onların nüvələri) çox vaxt öz tarazlıq vəziyyətləri ətrafında rəqs edir (və rəqs səviyyələrini doğurur), molekulun özü isə bütövlükdə fırlanaraq, *fırlanma səviyyələrinin əmələ gəlməsinə* səbəb olur. Bunların hamısı bir yerdə olduqca mürəkkəb bir spektr verir. Bununla belə, çətinliyə baxmayaraq, şüalanma spektrinə görə molekulun hansı simmetriyaya malik olduğunu, məsələn, onun simmetriya mərkəzindən başqa, həm də simmetriya oxuna (və ya oxlarına), simmetriya müstəvisinə (ola bilsin ki, bir dənə deyil) malik olub-olmadığını təyin edirlər. Öz növbəsində, istənilən simmetriya belə molekulun şüalanma (və ya udulma) spektrini müəyyən etməyə imkan verir.

RELYATİVİSTİK KVANT MEXANİKASI

1925-1926-cı illərdə yaradılmış kvant nəzəriyyəsinin mühüm bir nöqsanı var idi: o, qeyri-relyativistik nəzəriyyə idi və orada nisbilik və işıq sürətinin limitliyi prinsipləri gözlənilmirdi. 1928-ci ildə Pol Dirak bu nöqsanı aradan qaldırdı. O, elektronu nisbilik nəzəriyyəsinin tələb etdiyi kimi, zaman və fəza koordinatlarının bərabərhüquqluluğunu nəzərə alan yeni bir tənliklə təsvir etməyi təklif etdi.

Lakin bu halda dalğa funksiyasının dördkomponentli olduğu aşkara çıxdı. Onlardan ikisi spinin mümkün iki proyeksiyasına aiddir. Bəs qalan ikisi necə olsun? Araşdırma göstərdi ki, onlara mənfi enerji uyğun gəlir. Hidrogen atomundakı elektronun enerjisi kimi, sadəcə, mənfi enerji yox, sonsuzluğa qədər davam edən əsil enerji uçurumu ki, Kainat bütövlükdə buraya yuvarlana bilərdi. Dirak tənliyinin o dövrə qədər məlum olan bütün eksperimental məlumatları əla izah etməsinə baxmayaraq, mənfi enerji problemi həllolunmaz qalırdı. Əvvəlcə fərz olundu ki, naməlum iki komponent nə cürsə protonu (hidrogen atomunun nüvəsini) təsvir edir. Lakin aydınlaşdırıldı ki, ikinci cüt komponentə uyğun zərrəciyin kütləsi dəqiq elektronun kütləsinə bərabər olmalıdır. Proton isə 1836 dəfə elektrondan ağırdır.

Sonralar Dirak belə bir hipotez irəli sürdü: mənfi enerjilərə uyğun bütün hallar əvvəlcədən elektronlar tərəfindən tutulubdur ("Dirak dənizi"), yəni enerji uçurumu tam doludur və yıxılmağa yer yoxdur. "Dənizin" özü müşahidəolunmazdır, lakin əgər oradan elektronu vurub çıxarsaq (məsələn, kifayət qədər yüksəktezlikli foton vasitəsilə), onda, birincisi, elektronun özü görünəcəkdir; ikincisi isə, "dənizdə" qalan deşik özünü real zərrəcik – antielektron kimi aparacaq və elektrondan yükünün işarəsinin əksinə olması ilə fərqlənəcəkdir.



P.Dirak.

Bu hadisə *zərrəcik-antizərrəcik* (baxılan halda elektron-antielektron) *cütünün doğulması* adlanır. Elektron deşiklə görüşdükdə isə əks proses baş verir: elektron deşiyi doldurur və müşahidəolunmaz olur (deşiklə elektron birləşir), cütün bütün enerjisi (onların sükunət enerjiləri də daxil olmaqla) elektromaqnit şüalanması enerjisinə çevrilir. Zərrəcik-antizərrəcik cütü bu cür annihilyasiya edir.

Kvant nəzəriyyəsinin sürətlə təşəkkülündə Pol Dirakın qeyri-standart təfəkkürü mühüm rol oynadı. Alim nə qərarlaşmış doqmalarla, nə də kolleqalarının fikirlərilə özünün əl-qolunu bağlamadı. Tələbə vaxtı Dirakın bir riyazi konkursda necə iştirak etdiyi haqqında belə danışırlar. Konkursda digər məsələlərlə yanaşı aşağıdakı məzmunda bir hesab məsələsi də var idi.

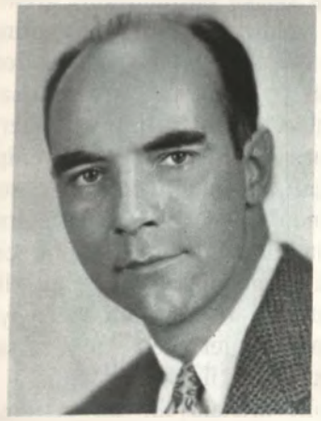
Üç balıqçı axşam balıq tutdular, bölüşdürməyi isə səhərə saxladılar. Səhər ilk oyanan gördü ki, balıqların sayı üçə bölünmür, balığın birini çaya atıb, qalan balıqların üçdə birini götürdü və getdi. İkinci də dəqiq bu cür etdi, sonra üçüncü balıqçı da belə etdi, həm də onlardan hər biri üçdəbirini götürürdü. Məsələdə soruşulurdu ki, balıqçılar hansı ən az sayda balıq tutmuşdular?

Dirak aşağıdakı həlli təklif etmişdi: "Balıqların sayı –2-yə bərabərdir". Doğrudan da, bu halda, birinci balıqçı bir balıq atandan sonra –3 balıq qaldı; o, –1-ni götürdü və –2-ni saxladı. Eyni şeyi qalan iki balıqçı təkrar etdi. Aydındır ki, cavab sağlam fikrə ziddir, ancaq məsələnin şərtinə zidd deyil. Burada Dirakın düşünmə tərzi açıq-aydın özünü göstərmişdir: hətta həllin fiziki mənası aydın olmadıqda da onu atmaq lazım deyildir. On il keçəndən sonra, mənfi enerjili hallar problemini öyrənərkən, Dirak eyni "antibalıq" stilində antielektronların mövcudluğu imkanını elan etdi. Yenə düşüncənin cəsarətliliyi qalib gəldi!

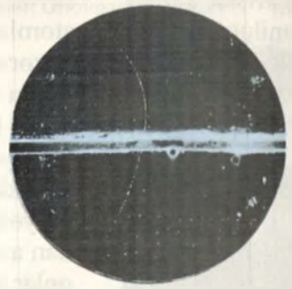
1932-ci ildə amerikalı Karl Anderson (1905-1991) kosmik şüalarda müsbət yükü və kütləsi, dəqiq olaraq, qiymətcə elektronun yükünə və kütləsinə bərabər olan zərrəcik kəşf etdi. Andersonun *pozitron* adlandırdığı həmin zərrəcik Dirakın qabaqcadan xəbər verdiyi məhz antielektrondur. Doğrudur, deşiklər nəzəriyyəsi uzun davam etmədi, ancaq ondan çıxan bütün nəticələr (cütün yaranması, annihilyasiyası və s.) doğrudur.

1940-cı illərin sonunda az və ya çox ardıcıl kvant elektrodinamikasının yaradılmasından sonra müşahidəolunmaz "Dirak dənizi" lazım olmadı, ancaq Dirak tənliyi yeni məzmun qazanaraq sarsılmaz qaldı. Bu tənlik yalnız elektron üçün deyil, spini olan istənilən zərrəcik üçün də, məsələn, proton üçün də yarayır. Antizərrəciyin olması, cütün doğulması və annihilyasiyası protonlar üçün də doğrudur. Lakin bu nəticələrin yoxlanılması çox uzandı. Əgər Ernest Rezerford protonu hələ 1919-cu ildə kəşf etmişdisə də, Emilio Seqre (1905-1989) və Ouen Çemberlen (1920-2006) antiprotonu yalnız 1955-ci ildə aşkar etdilər.

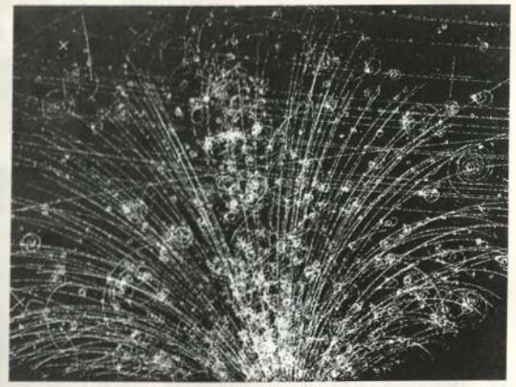
Elektronlardan və protonlardan başqa digər elementar zərrəciklər də var. Onların hər biri üçün öz relyativistik tənlikləri mövcuddur. Hər şeydən əvvəl, bunlar, ilk başlanğıcdan Maksvellin relyativistik tənliklərilə təsvir olunan fotonlardır. Sonra, məxsusi impuls momentinə malik olmayan (spini sıfır olan) zərrəciklər də vardır. İlk növbədə mezonlar bura aiddir. Belə zərrəciklər *Kleyn-Qordon tənliyi* ilə təsvir olunur. Daha bir tip tənliklər – *Veyl tənlikləri* də var, onlar özünəməxsus zərrəciklərə – neytrinoya aiddir. Neytrinonun kütləsi sıfıra, spini isə 1/2-ə bərabərdir. Neytrinonun kütləyə malik olması istisna edilmir. Bu halda onun da hərəkət tənliyi həmin Dirak tənliyi olacaqdır.



K.Anderson.



Vilson kamerasında pozitronun K.Anderson tərəfindən ilk dəfə alınmış izinin fotoşəkli. Kaliforniya Texnologiya Universiteti. 2 avqust 1932-ci il.



Qabarcıqlı kamerada kosmik şüalarının zərrəciklərinin izləri (trekləri).

Bunun üçün riyaziyyatın xüsusi bölməsi olan qrup təsvirləri nəzəriyyəsindən istifadə edilir. Ən sadə molekulların (məsələn, cəmi dörd zərrəcikdən – iki elektron və iki protondan ibarət hidrogen molekulunun) spektrini hətta Şredinger tənliyinin təqribi həll metodlarının köməyilə də təsvir etmək olar.

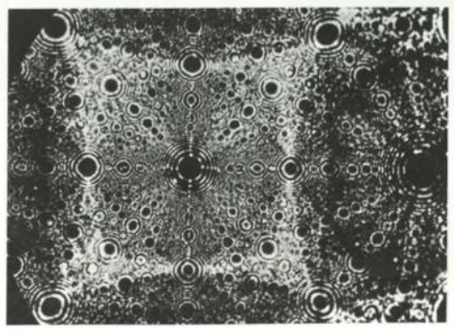
Kvant mexanikasının tənlikləri molekulyar spektrləri kəmiyyət və keyfiyyətcə qiymətləndirməyə imkan verdiyi hallarda, bu cür qiymətləndirmə eksperimental müəyyən olunmuş faktlarla üst-üstə düşür. Bütövlükdə kvant nəzəriyyəsinin nəticələri eksperimental məlumatlara zidd deyildir. Şredinger tənliyinin tətbiqi təcrübəsi göstərir ki, prinsipcə onun köməyilə istənilən molekulun spektri izah oluna bilər.

Bu əsasda yeni elm sahəsi – *kvant kimyası* yarandı. Kvant kimyası müxtəlif potensiallara uyğun Şredinger tənliyinə əsaslanaraq, molekulların xassələrinin hesablanması ilə məşğul olur.

KONDENSƏ OLUNMUŞ MÜHİTLƏRİN KVANT NƏZƏRİYYƏSİNİN ELEMENTLƏRİ

Kvant nəzəriyyəsi nəinki atom sepktrlərini izah etməyə, həm də bərk cisimlərin, hər şeydən əvvəl, kristalların davranışındakı bir çox sirləri açmağa imkan verdi. Belə görünə bilərdi ki, milyonlarla atomdan ibarət kristalı tədqiq etmək ayrıca bir atomu tədqiq etməkdən milyonlarla dəfə çətindir. Lakin məsələyə başqa nöqteyi-nəzərdən yanaşsaq, görərik ki, əslində məsələ bir o qədər də mürəkkəb deyil. Kristalın quruluşu çox nizamlıdır – bu quruluş kristal qəfəsdir. Onun daxilində istənilən düz xətt boyunca, bərabər məsafədən bir eyni atomlar (ya ionlar, ya da molekullar) yerləşir. Kristal istənilən istiqamət üzrə periodikliyə malikdir. Ona görə də kristalları öyrənərkən ayrı-ayrı atomların (molekulların) xassələri yox, ilk növbədə, məhz nizamlılıq kömək edir. Molekulyar spektrlər nəzəriyyəsində olduğu kimi, burada da qrup nəzəriyyəsinin və onun təsvirlərinin metodları tətbiq olunur.

Kristalların, maqnetiklərin, maye kristalların, ifrataxıcı mayelərin və s. – nizamlı mühitlərin, həmçinin amorf cisimlərin, polimerlərin, şüşələrin – qeyri-nizamlı mühitlərin öyrənilməsi kondensə olunmuş mühitlər fizikasına aid edilir.



İridium kristalının ion mikroskopunun köməyilə çəkilmiş səthi. Tünd ləkələr qəfəsin düyünlərinə (ionlara) uyğundur.

Əgər kristalda atomu sürüşdürməyə çalışsaq, onda dərhal onu qonşu atomlardan itələyən və ilkin vəziyyətə qaytaran qüvvə yaranar. Bunun sayəsində kristal dayanıqlıdır: kristal atomları yalnız tarazlıq vəziyyətinə nəzərən rəqslərə məruz qala bilər. Atom elektronları – bu başqa məsələdir. Onların bir hissəsi, aşağı enerji səviyyələrində yerləşən hissəsi həmişə atomda qalır. Ancaq yuxarı enerji səviyyələrindəki valent elektronlar atomdan atoma kifayət qədər sərbəst keçir: onlar indi bütün kristala məxsusdur. Bu cür elektronların hərəkəti ayrı-ayrı atomların xassələrindən çox, kristal qəfəsin xassələri ilə təyin olunur.

Deməli, kristala iki alt sistemin məcmusu kimi baxmaq olar. Onlardan birincisi, kristal qəfəsin özü, valent

elektronlarını itirmiş və ona görə də müsbət yüklənmiş atomlardan (molekullardan) ibarət periodik quruluşdur. İkincisi, müsbət yüklü qəfəsin periodik sahəsində yerləşən elektronlar çoxluğudur.

Kristala edilən istənilən təsir (mexaniki, elektrik, maqnit, istilik) ona səbəb olur ki, altsistemlərdən birində (və ya hər iki sistemdə eyni vaxtda), daşı suya atdıqdan sonra suda yayılan dalğalar kimi, dalğalar yayılır. Periodiklik xassəsi kristalda ayrı-ayrı ionların və ya ayrı-ayrı valent elektronların rəqslərini öyrənmək zərurətindən bizi xilas edir. Dalğanı bütövlükdə öyrənmək kifayətdir: kvant nəzəriyyəsinə görə hər bir belə dalğaya zərrəcik – baxılan dalğanın kvantı uyğundur; bərk cismin nəzəriyyəsində ona *kvazizərrəcik* deyilir. Yenə də kvant nəzəriyyəsinə görə, kvazizərrəciyə enerjinin (həmçinin digər xarakteristikalar kimi) istənilən qiymətini yox, ancaq müəyyən, kristalın konkret quruluşu ilə təyin olunan qiymətlərini almağa icazə verilir. Kvazizərrəciklərin növləri çoxdur. Onlardan biri fononlardır və ya kristal qəfəsin elastiki rəqslərinin, xüsusi halda, kristalda səsin və istiliyin yayılmasına cavabdeh olan rəqslərin kvantlarıdır.

Beləliklə, deyə bilərik ki, kvant nəzəriyyəsi – bu, atomlardan tutmuş səlt mühitlərə qədər istənilən səviyyədə maddəni keyfiyyət və kəmiyyətcə tədqiq etməyə imkan verən universal alətdir.

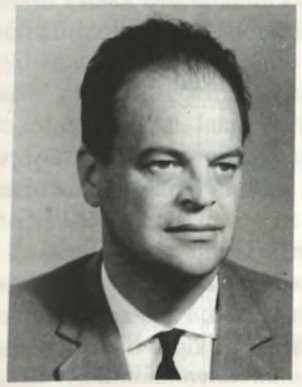
N.G.BASOV, A.M.PROXOROV VƏ Ç.TAUNS

Aleksandr Mixayloviç Proxorov və Nikolay Gennadiyeviç Basov ilk dəfə səviyyələrin inversiya məskunlaşmasına malik mühit yarada bildilər. Bu mühitin molekullarının ən çox hissəsi yuxarı enerji səviyyəsində yerləşmişdi. Tezliyi əsas və həyəcanlanmış səviyyələrin enerjiləri fərqinə bərabər olan şüalanmanın təsirilə molekullar məcburi şüalanma buraxaraq əsas hala qayıdırdı.

Öz tədqiqatlarının nəticələri haqqında A.M.Proxorov və N.G.Basov 1952-ci ildə məruzə etdilər, 1954-cü ildə isə onları çap etdirdilər. Bir ildən sonra onlar generatorun "üçsəviyyəli" sxemini təqdim etdilər: molekullar yuxarı səviyyəyə "qoyulur", sonra onların çoxu aralıq səviyyəyə "yıxılır" ki, burada onlar inversiya məskunlaşmasına malik mühitin yaranması üçün kifayət qədər çox "yaşayırlar". Molekullar aşağı səviyyəyə keçəndə şüa buraxır.

Basovun və Proxorovun məqaləsi çap olunmazdan on ay əvvəl Kolumbiya universitetindən olan Çarlz Tauns da bu cür sxemə gəlib çıxmışdı.

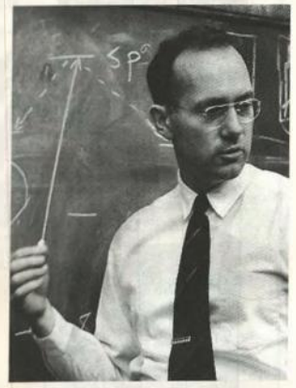
1964-cü ildə fizika üzrə A.M.Proxorova, N.G.Basova və Ç.Taunsa "kvant nəzəriyyəsi sahəsində mazer-lazer prinsipi əsasında generatorların və gücləndiricilərin yaradılmasına gətirib çıxaran fundamental işlərinə görə" Nobel mükafatı təqdim olundu.



N.G.Basov.



A.M.Proxorov.



Ç.Tauns.

▸ Güclü lazerin qurulması. Rusiya Elmlər Akademiyasının Sibir şöbəsinin Fizika İnstitutu. Novosibirsk. 1998-ci il.

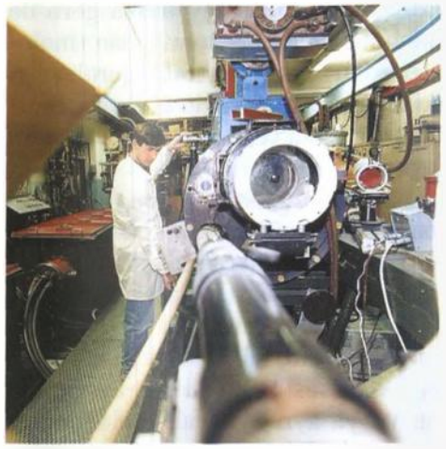
MAZERLƏR, LAZERLƏR VƏ IŞIĞIN DİGƏR MÖCÜZƏLƏRİ

Kvant nəzəriyyəsinin əhəmiyyəti təkcə ondan ibarət deyil dir ki, onun köməyilə klassik nəzəriyyənin izah edə bilmədiyi faktları başa düşmək mümkün olmuşdur. Onun sayəsində alimlərin qarşısında, onların ağıllarına gəlməyən üfüqlər açılmışdır. Sözün tam mənasında fiziklər düsturları, sadəcə, təhlil etməklə, "peronun ucunda" maraqlı və qəribə effektlər tapır, öz ideyalarını texnikada çevriliş yaradan cihazlarda həyata keçirirlər. Onlardan ən böyük təsir bağışlayanı *kvant generatorlarıdır*.

1939-cu ildə Valentin Aleksandroviç Fabrikant (1907-1991) aşkar etdi ki, müəyyən şəraitdə maddə üzərinə düşən elektromaqnit şüalanması güclənir. Hadisənin mahiyyəti aşağıdakından ibarətdir. Məlumdur ki, elektronlar həm ayrı-ayrı atomlarda və ya molekullarda, həm də səlt (bütöv) mühitlərdə müxtəlif enerji səviyyələrində yerləşə bilər. Sadəlik üçün iki E_1 və E_2 səviyyələri haqqında danışacağıq, burada $E_1 > E_2$. Əgər belə sistemin üzərinə tezliyi

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}, \qquad (1)$$

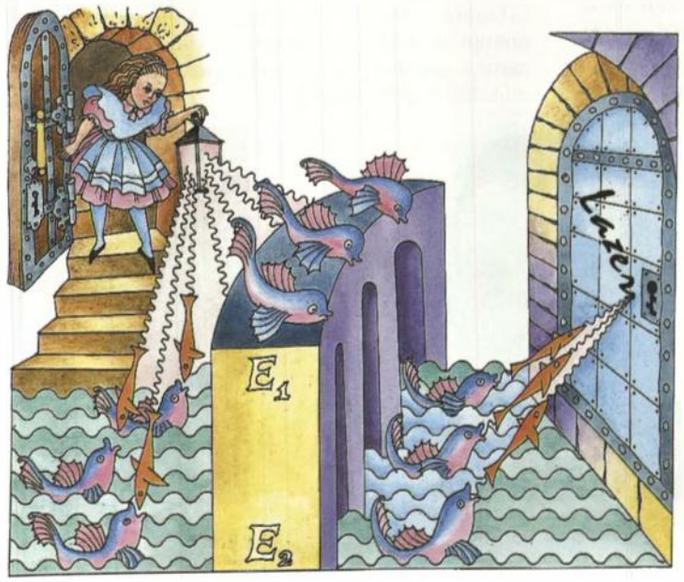
olan elektromaqnit dalğası düşürsə, onda Bor postulatlarına uyğun olaraq foton öz enerjisini elektrona verir və onu E_2 səviyyəsindən daha yüksək E_1 səviyyəsinə atır. Bu, *rezonans udulma* hadisəsidir. Lakin, 1917-ci ildə, Eynşteynin göstərdiyi kimi, birincidən heç nə ilə fərqlənməyən foton E_1 səviyyəsində olan elektronu E_2 səviyyəsinə düşməyə və tezliyi birinci fotonun tezliyinə bərabər olan foton şüalandırmağa məcbur edir. Şüalandırılan foton da həmin istiqamətdə uçur. Nəticədə bir foton əvəzinə iki eyni foton əmələ gəlir, yəni *məcburi şüalanma* baş verir. Adi termodinamik tarazlıq şəraitində yuxarı enerji səviyyəsindəki elektronların sayı, aşağı enerji səviyyəsindəkinə nisbətən azdır. Ona görə də rezonans udulması nəticəsində ν tezlikli fotonların ümumi sayı maddədən keçərkən azalır. Fabrikant qeyd edirdi ki, əgər hər hansı səbəbdən yuxarı səviyyədə elektronların sayı çox olarsa, onda ν tezlikli şüalanma güclənər. O, *elektromaqnit şüalanmasının gücləndirilməsi prinsipini* formulə etmişdir.



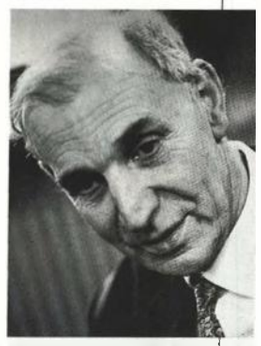
Mazer "məcburi şüalanma nəticəsində mikrodalğaların gücləndirilməsi" mənasını verən (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ingilis sözlərinin qısaldılmış variantıdır.

Lazer "məcburi şüalanma nəticəsində işığın gücləndirilməsi" mənasını verən (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ingilis sözlərinin qısaldılmış variantıdır.

Səviyyələrin inversiya (*lat.* inversio – "yeri dəyişdirilmə") məskunlaşması dedikdə elektronların enerji səviyyələrinə görə normal paylanması ardıcıllığının pozulması başa düşülür.



"Az iş qalmışdı": aşağı səviyyəyə nisbətən yuxarı səviyyədəki elektronların sayının çox olmasına nail olmaq lazım idi. 1954-cü ildə Nikolay Gennadiyeviç Basov (1922-2001) və Aleksandr Mixayloviç Proxorov (1916-2002) və onlardan asılı olmadan amerikalı Çarlz Hard Tauns (1915-ci ildə doğulmuşdur) ammiak molekullarında mikrodalğalar diapazonunda radiodalğalar hasil edən və gücləndirən cihazlar – *mazerlər* hazırladılar. Bu cihazlarda elektronları yuxarı səviyyəyə qaldıran mürəkkəb konfiqurasiyaya malik olan elektrik sahəsidir. Kvant elektronikası belə yarandı.



Alfred Kastler.

Elm və texnikanın bu sahəsi seləbənzər sürətlə inkişaf etməyə başladı. 1952-ci ildə fransız nəzəriyyəçisi Alfred Kastler (1902-1984) *optik doldurma* üsulunu təklif etdi və tezliklə koherent optik şüalanma generatorları və gücləndiriciləri olan *lazerlər* yaradıldı.

Kvant nəzəriyyəsinin daha bir uğuru çox alçaq temperaturlarda maddənin xassələrinin proqnozlaşdırılması və izah edilməsilə bağlıdır. Bu, ilk növbədə, ifratkeçiriciliyə və ifrataxıcılığa aiddir. Çox alçaq temperaturlarda milyonlarla atom özünəməxsus "yumaq" şəklində bir yerə yığılır və bu "yumaq" özünü bir zərrəcik kimi aparır. *Boze-Eynşteyn kondensiyası* adlanan bu hadisə də yeni effektləri qabaqcadan xəbər vermək və izah etmək üçün güclü alət olan kvant mexanikası sayəsində elmə daxil olmuşdur.

LEV DAVİDOVİÇ LANDAU

1929-cu ilin dekabrında Kopenhagendə Nəzəri Fizika İnstitutunun katibi xarici qonaqların qeydiyyat kitabında qısa qeyd apardı: "Doktor Landau – leninqradlı". O vaxt doktorun heç 22 yaşı tamam olmamışdı, lakin buna, mühakimələrində qətilik olan bu arıq oğlana məşhur institutda kim təəccüblənə bilərdi ki?

Kopenhagen o dövrdə kvant fizikasının dünyəvi mərkəzi kimi məşhur idi. Məcazi mənada bu mərkəzin dəyişməz meri böyük Nils Borun özü idi. Lev Landau məhz onun yanına gəlmişdi. Belə zarafat dəbdə idi ki, XX yüzilliyin təbiətşünaslığında kvant inqilabı İngiltərənin, Almaniyanın, Rusiyanın, İsveçrənin uşaq bağçalarında baş verir... Nisbilik nəzəriyyəsi ilə yanaşı, işığın kvant nəzəriyyəsini işləyib hazırlayanda Eynşteynin 26 yaşı, atomun kvant modelini quranda Nils



N.Bor və L.D.Landau. Q.Qamovun çəkdiyi karikatura. Kopenhagen. 1929-cu il.



L.D.Landau.

Borun 28 yaşı, kvant mexanikasının variantını hazırlayarkən Verner Heyzenberqin 24 yaşı var idi... Ona görə də leninqradlı doktorun gənc olması heç kəsi təəccübləndirmədi. Bununla belə, Landaunu, kvant problemlərinə dair onlarca keyfiyyətli işlərin müəllifi kimi artıq tanıyırdılar. Onlardan birincisini o, 18 yaşında ikən, Leninqrad universitetinin fizika-riyaziyyat fakültəsində oxuyarkən yazmışdı.

Mikroaləm haqqındakı elmin inkişafının bu dövrünü "fırtınalar və hücumlar dövrü" adlandırırdılar. XIX-XX əsrlərin keçidində təbiətşünaslıqda klassik təsəvvürlərə qarşı mübarizə gedirdi. Lev Landau elmi fırtına və hücumlar üçün yaradılmışlardan biri idi.

Lev Davidoviç Landau 1908-ci il yanvarın 22-də Bakıda neftçi-mühəndis ailəsində anadan olmuşdur. Onun riyazi qabiliyyəti çox erkən üzə çıxmışdı: o, 12 yaşında diferensiallamanı, 13 yaşında isə inteqrallamanı öyrənmişdi, 1922-ci ildə isə Bakı Dövlət Universitetinə daxil olmuş və burada eyni zamanda iki fakültədə – fizika-riyaziyyat və kimya fakültələrində oxumuşdur. Sonra Landau Leninqrad universitetinə keçdi; oranı bitirərək, 1927-ci ildə Leninqrad Fizika-Texnika İnstitutuna daxil oldu. 1929-cu ilin oktyabrında Xalq Komissarları Maarifinin qərarı ilə Landaunu xaricə elmi təcrübə keçməyə göndərdilər. O, Almaniyaya, Danimarkaya, İngiltərəyə səfər etdi.

İFRATAXICI MAYE

Helium qazdır və 4 K temperaturda, yəni mütləq sıfıra yaxın temperaturda mayeyə çevrilir. Maye heliumun qəribəliyi ondadır ki, o, normal təzyiqdə, temperaturu necə azaltmağımızdan asılı olmayaraq, bərk hala keçmir. Helium bu cür xassəyə malik olan yeganə maddədir.

Heliumun digər qəribə xassəsini 1932-ci ildə niderlandlı fizik Villem Hendrik Keezom (1876-1956) kəşf etmişdir. Maye heliumun temperaturunu qaynama nöqtəsindən sonra azaltmaqla, Keezom ilk dəfə 2,2 K temperaturu yaxınlığında mayenin qaynama prosesinin birdən-birə necə dayandığını, onun səthinin necə hamarlaşdığını müşahidə etdi və bundan sonra buxarlanma heç bir qaynama əlaməti olmadan baş verdi. Məlum oldu ki, 2,17 K temperaturunda helium tamamilə qeyri-adi xassələr qazanaraq, bir fazadan başqasına keçir. Bu an istilik tutumu sıçrayışla artır, lakin gizli enerjinin nə ayrılması, nə də udulması qeyd olunmur. Fiziklər belə hadisəyə *ikinci növ faza keçidi* adını vermişlər. 2,17 K nöqtəsinə qədər heliumu *helium I*, ondan sonra isə *helium II* adlandırırlar.

Keezom müəyyən etdi ki, He II-nin istilikkeçiriciliyi son dərəcədə böyükdür. He II-nin istilikkeçiriciliyi gümüşünkündən 10 milyon dəfə yüksəkdir. Həm də son dərəcə maraqlı xarakter daşıyır: 1,9 K-də maksimuma qədər artır və mütləq sıfıra yaxınlaşdıqca aşağı düşür. Keezom bu hadisəni maye heliumun *ifrat istilikkeçiriciliyi* adlandırırdı.

Maye heliumun təəccüblü xassələri ilə rusiyalı fizik Pyotr Leonidoviç Kapitsa da maraqlandı. O fərz etdi ki, He II-nin ifrat istilikkeçiriciliyi mayedə konvektiv axınların əmələ gəlməsi ilə bağlıdır. Helium II-nin özlülüyü çox kiçik olanda, bu axınlar daha intensiv olmalıdır. Mayenin dar kanal vasitəsilə bir qabdan digərinə axmasını ölçməklə özlülüyü qiymətləndirmək olar. Kapitsa gözəl bir eksperiment qoydu. O, maye heliumu diqqətlə, optik dəqiqliklə cilalanmış iki şüşə lövhənin köməyilə aldığı çox nazik yarıqdan (0,5-1 mkm) buraxdı. Nəticə eksperimentatoru heyrətləndirdi. He II sözün tam mənası ilə yarıqdan yox olurdu. Onun özlülüyü He I-nin özlülüyündən min dəfə kiçik idi. Kapitsa eksperimenti nə qədər təkmilləşdirirdisə, He II bir o qədər az özlülük büruzə verirdi. Beləliklə, alim nəticə çıxardı: He II ifrataxıcı mayedir, yəni onda ümumiyyətlə özlülük yoxdur.

Müqayisə üçün deyək ki, 1 *l* su 0,5 mkm ölçülü yarıqdan 2 min ilə keçib gedər, He II isə bu yarıqdan 1 san ərzində keçir. Kapitsanın apardığı sonrakı təcrübələr (bu təcrübələr indi, demək olar ki, bütün fizika dərsliklərində təsvir edilib) alim haqlı olduğunu inandırıcı surətdə sübut etdi: He II ifrataxıcı mayedir.

Sonda Pyotr Leonidoviçin öz sözlərini verək: "Həyatda mənə maddənin bu cür fundamental xassəsini tapmaq müyəssər oldu. Mən müxtəlif sahələrdə çoxlu təcrübələr aparmışam, lakin bu, artıq bəxti gətirmək, ya da gətirməmək söhbətidir. Belə vəziyyət ələ düşəndə, onu əldən buraxmaq olmazdı. Bu cür maraqlı hadisələr təbiətdə hələ çoxdur. Hadisə nə qədər anlaşılmazdırsa, nə qədər müasir baxışlara ziddirsə, o, bir o qədər əhəmiyyətlidir. Bu hadisələri müasir elm aydınlaşdırmalıdır".

YOX OLMUŞ İTKİLƏR VƏ YA İFRATKEÇİRİCİLİK



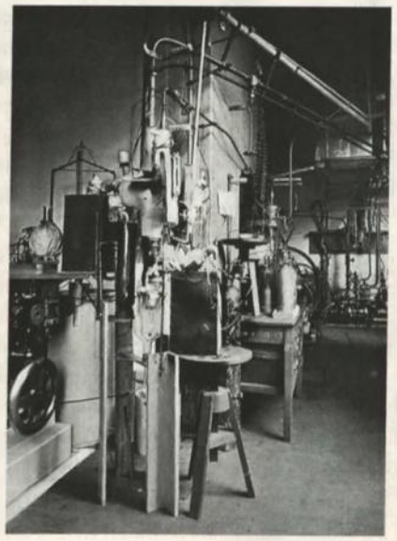
H.Kamerlinq-Onnes.

1908-ci ildə niderlandlı fizik Heyke Kamerlinq-Onnes elə bir şey etdi ki, ona qədər bunu etmək heç kimə müyəssər olmamışdı. Dünyada ilk alçaq temperaturlar laboratoriyasında (Leyden şəhəri) o, maye helium aldı. Sadəcə, alçaq yox, ifrat alçaq temperaturlar almaq mümkün oldu (heliumun qaynama temperaturu 4,44 K-dir).

Mütləq sıfıra yaxın temperaturlarda maddə üzərində aparılan eksperimentlər heyrətləndirici nəticələr verdi. İfrat soyudulmuş halda maddə klassik nəzəriyyələrlə təsvir olunmur: helium ifrataxıcı maye xassəsini qazanır, cisimlərin elektrikkeçiriciliyi isə özünü, ümumiyyətlə, anlaşılmaz tərzdə aparır.

1911-ci ildə Kamerlinq-Onnes maye heliumda yerləşdirilmiş civə ilə eksperimentlər aparmışdı: 4,3 K temperaturda civənin müqaviməti, bərk civənin malik olduğu müqavimətin 0,0021 hissəsini, 3 K temperaturda isə 0,00000010 hissəsini təşkil etmişdi. Kamerlinq-Onnes bu hadisəni *ifratkeçiricilik* adlandırmışdır. İfratkeçiricilik hansı temperaturdan aşağı temperaturlarda müşahidə olunursa, həmin temperatura böhran temperaturu (T_b) deyilir.

Müasir ölçmələrin dəqiqliyi Kamerlinq-Onnesin ölçmələrinin dəqiqliyindən 10^{10} dəfə böyükdür. Buna baxmayaraq, indiyədək civənin xüsusi müqavimətinin sıfırdan fərqli olduğunu qeydə almaq mümkün olmamışdır: onun xüsusi müqaviməti 10^{-23} Om·sm-dən kiçikdir. Əgər belə naqili halqa şəklində qapasaq, oradan axan cərəyan ən azı 100 min il mövcud olacaqdır!



H.Kamerlinq-Onnesin ilk dəfə maye helium almaq üçün istifadə etdiyi aparatura.

Sonralar alim qalayda, qurğuşunda, tallium və başqa metallarda da ifratkeçiricilik aşkar etdi. Onlardan bəziləri üçün T_b – civənin böhran temperaturundan yüksəkdir. İfratkeçiricilik halına yüksək temperaturlarda keçən maddələrin axtarışı başlanmışdır.

Bu estafetin tarixi bir neçə etapdan ibarətdir. Kamerlinq-Onnesin kəşfindən sonra ifratkeçiricilik effektini saf metallarda axtardılar (tapdılar da). Ən böyük böhran temperaturu (30 K) 1930-cu ildə niobiya üçün aşkar olundu. 1945-ci ildən 1972-ci ilə qədər müxtəlif binar birləşmələri (yəni iki kimyəvi elementin birləşmələrini) tədqiq etdilər və maksimal böhran temperaturunu Nb_3Ge üçün 32,2 K-ə çatdırmaq mümkün oldu. 1975-ci ildən oksidləri öyrəndilər. Məsələn, $TlSa_4Ba_3Su_6O_x$-in böhran temperaturu 162 K təşkil edir.

1987-ci ildə alman Yohannes Georq Bednorsa (1950-ci ildə doğulub) və isveçrəli Karl Aleksandr Müllerə (1927-ci ildə doğulub) "keramik metallarda ifratkeçiriciliyin kəşfində böyük nailiyyətlərə görə" Nobel mükafatı verildi. Məlum oldu ki, yeni sinif ifratkeçiricilərin böhran temperaturu maye azotun qaynama temperaturundan (77 K) yüksəkdir! Buna baxmayaraq, nə üçün bu nailiyyəti bu qədər yüksək qiymətləndirirlər?

Kamerlinq-Onnesin dövründən maye heliumsuz ifratkeçirici almağı heç düşünmək belə olmazdı! Lakin helium mayeyə olduqca çətin çevrilir və üstəlik, Yerdə az yayılmış elementdir (atmosferdə heliumun miqdarı təxminən 0,001% təşkil edir), onu özü də Günəşdə kəşf etmişdilər. Yeni, yüksəktemperaturlu ifratkeçiricilər üçün soyuducu maye olaraq maye azot götürürlər ki, bu da yüzlərlə dəfə ucuzdur. Ona görə də indi ifratkeçiricilik hadisəsindən praktiki məqsədlər üçün geniş istifadə edilə bilər, o, əcaiblikdən çıxıb, müasir texnikanın ləvazimatına çevrilir.

İlyarımlıq təcrübə dövründə gənc fizik Nils Borun yanında, ümumiyyətlə götürəndə, 110 gün keçirdi. Bu günlərin necə keçdiyini digər rusiyalı alim – artıq o vaxt nüvələrin α-parçalanmasının nəzəriyyəsinə görə məşhurlaşmış 26 yaşlı Georgi Qamov özünün çəkdiyi karikaturada təcəssüm etdirmişdir.

Landau ağzında tıxac, stola bağlanmış vəziyyətdə təsvir olunmuş, Nils Bor isə şəhadət barmağını uzadaraq, onun başı üzərində durur və nəsihətverici tərzdə deyir: "Dayanın, dayanın,

"Fırtına və hücum" (*alm.* "Sturm und Drang") – Fridrix Klingerin dramının və 1760-1780-ci illərdə Almaniyada incəsənətdə klassizmin donmuş normalarına qarşı ədəbi cərəyanın adı.

Landau, mənə heç olmazsa bir söz deməyə imkan verin!". "Həmişə bax belə mübahisə gedir" deyən Qamov öz karikaturasını izah etdi və əlavə etdi ki, heç kəsə söz deməyə imkan verməyən həqiqətdə məhz çox hörmətli Borun özü idi.

Hər halda, həqiqət gənclərin qızğın inadkarlığından və müəllimin səbirliliyindən ibarət idi. Borun arvadı Marqaret danışardı: "Nils Landaunu ilk gündən qiymətləndirdi və sevdi: onun xasiyyətini başa düşdü... Bilirsinizmi, o dözülməz idi, Nilsə danışmağa imkan vermirdi, böyükləri ələ salırdı, saçları pırtlaşıq oğlancığaza bənzəyirdi... Bələləri haqqında deyirlər: anfan terribl (*fran.* "dözülməz uşaq")... Ancaq o necə də istedadlı və necə də doğrucul idi! Mən də onu çox sevirdim və bilirdim ki, o Nilsi necə sevirdi...".

Landau zarafatla təkrar etməyi xoşlayırdı ki, bir neçə il gec doğulmuşam. 1920-ci illərdə yeni fizika o qədər sürətlə inkişaf edirdi ki, doğrudan da, ondan bir az əvvəl doğulanlar, sanki, bütün "kvant Himalay dağları silsiləsində səkkizminlikləri" fəth etməyə macal tapmışdılar. O gülə-gülə öz dostu Yuri Rumerə deyirdi: "Bütün gözəl qızların hamısını artıq alıb qurtardıqları kimi, bütün yaxşı məsələlər də artıq həll olunmuşdur".

Həmin dövrdə kvant mexanikasının iki ekvivalent variantı – Heyzenberq variantı və Şredinger variantı əsasən tamamlanmışdı. Yeni elmin üç əsas prinsipi kəşf olunmuş və formulə edilmişdi: tamamlama prinsipi, qadağan prinsipi və qeyri-müəyyənliklər münasibəti. Lakin Lev Landaunun bütün sonrakı həyatı göstərdi ki, mikro- və makroaləmdə onun payına dərk olunmamış hələ nə qədər çox şey qalıbmış.

Landau elmi məktəbi 1930-cu illərin ortalarında yaranmağa başladı, onun banisi heç də həmişə öz tələbələrindən yaşca böyük olmurdu. Buna görədir ki, bu məktəbdə çox ciddi intizamla bütün tələbələr öz aralarında bir-birinə, çoxları isə həm də müəlliminə "sən" deyə müraciət edirdilər. Onların arasında Landaunun ən yaxın silahdaşı, gələcək akademik Yevgeni Mixayloviç Lifşits (1915-1985) də var idi. O, Landau ilə birlikdə məşhur

MAKROSKOPİK KVANT EFFEKTLƏRİ

Səlt mühitlər fizikası yeni elmin – kvant mexanikasının bəhrəsindən fəal istifadə edirdi. Naqillərin, izolyatorların, yarımkeçiricilərin və bir çox başqa şeylərin təbiətini başa düşmək mümkün oldu. Lakin ifratkeçiricilik problemi otuz ildən artıq bir müddətdə müəmmalı bir sirr olaraq qaldı.

Yalnız 1957-ci ildə Amerika fizikləri Con Bardin (1908-1991), Leon Kuper (1930-cu ildə doğulub) və Con Şriffer (1931-ci ildə doğulub) *ifratkeçiriciliyin mikroskopik nəzəriyyəsini* qurdular. Bu nəzəriyyəni alimlərin soyadlarındakı baş hərflərə görə, qısaca *BKŞ nəzəriyyəsi* adlandırırlar. Bu nailiyyətə görə onlar Nobel mükafatına layiq görüldülər (1972-ci il).

BKŞ nəzəriyyəsinin ilkin deyilişi heç də tam mükəmməl deyildi. Sovet nəzəriyyəçisi Nikolay Nikolayeviç Boqolyubov ona kanonik şəkil verdi. Boqolyubov Kuperin *elektron cütləşmələri* haqqındakı son dərəcə heyrətləndirici ideyasına əsaslandı.

Aydın oldu ki, ifratkeçiricilik sırf kvant effektidir, ancaq o, özünü makroskopik miqyaslarda büruzə verir. Kvant qanunlarına görə, sönməyən ifratkeçirici cərəyan yalnız o şərt daxilində mümkündür ki, bu cərəyanın böyük çoxluq təşkil edən daşıyıcılarının hamısı vahid bir dalğa funksiyası ilə təsvir olunsun. Belə olduqda, bütün cərəyan daşıyıcılarının hamısının eyni bir kvant halında olması zəruridir. Lakin bu tələb elektronlar üçün ödənilməzdir, çünki onlar spini yarım tam olan zərrəciklərdir (ferimonlardır) və Paulinin qadağan prinsipinə tabedir, yəni heç olmazsa nə ilə isə bir-birindən fərqlənməlidir.

L.Kuperin ideyası vəziyyəti kökündən dəyişdirir. Əks istiqamətli spinə malik elektronlar cüt-cüt birləşir ki, bu cütün yekun spini sıfır olur. Belə cüt-cüt birləşmələr artıq bozon olacaq, yəni qadağan prinsipi onlara aid olmayacaq və eyni bir kvant halında onların sayı istənilən qədər ola biləcəkdir.

Elektronların cütləşməsini çox da hərfi mənada başa düşmək lazım deyil: cütdəki elektronlar arasındakı məsafə cütlərin özləri arasındakı məsafədən xeyli böyükdür və belə demək düzgün olardı ki, elektronların hərəkətində xüsusi bir korrelyasiya yaranır. Temperaturun azalması ilə kristal qəfəsin, elektronların korrelyasiyasını pozan rəqsləri tədricən zəifləyir. Kuper cütləri əmələ gəlir və onlar ən aşağı enerji halına (əsas hala) kondensasiya edir (toplanır). Kuper cütləri kondensatı *kvant mayesini* (termin L.D.Landaunundur) əmələ gətirir ki, bu maye də metaldan sürtünməsiz axır.

Aydınlaşdırıldı ki, Kuper cütlərini dağıtmaq üçün enerji tələb olunur, deməli, cütdəki elektronlar bir-birini cəzb edir. Əgər onlar eyniadlı yüklə yüklənmişdirsə, bu necə mümkün ola bilər? Axı, elektrostatikaya görə, Kulon qanununa uyğun olaraq onlar itələnməlidir. Bütün məsələ ondan ibarətdir ki, metalda mənfi elektronlardan başqa, müsbət yüklü ionlardan ibarət kristal qəfəs mövcuddur. Elektron qəfəsdə hərəkət edərək, müsbət ionları özünə dartır (qəfəsi polyarizə edir). Müəyyən şərtlər olduqda elektronun mənfi yükü ekranlaşır. Hesablamaların göstərdiyi kimi, cazibənin itələmə üzərində cüzi artıqlığı kifayətdir ki, qonşu elektronlar cüt şəklində birləşsin. İfratkeçiricilik hadisəsini belə izah etmək mümkün oldu.

İfrataxıcılıq – ifratkeçiriciliklə dərin qohum olan hadisədir. He II-nin *ifrataxıcılığının fenomenoloji (makroskopik)* nəzəriyyəsi 1938-ci ildə Laslo Tissa tərəfindən təklif edilmiş və sonra 1941-ci ildə Lev Davidoviç Landau tərəfindən təkmilləşdirilmişdir. Helium atomları sıfır spininə malik olmaqla, Boze-Eynşteyn statistikasına tabedir və kifayət qədər alçaq temperaturlarda onların əsas kvant halında toplaşmasına, başqa sözlə desək, kvant mayesi əmələ gətirməsinə heç nə mane olmur. Ümumi dalğa funksiyasının xassələri kollektivin hərəkəti zamanı ayrı-ayrı atomların divarlardan tormozlanmasını qadağan edir; adi mayelərin özlülüyü məhz bu tormozlanma ilə bağlıdır.

Temperaturun artması ilə heliumda rəqslər yaranır. Landau, kristallardakı səs rəqslərinə analoji olaraq, onlara fononlar – özünəməxsus kvazizərrəciklər, yəni səs dalğalarının kvantları kimi baxdı. O fərz etdi ki, fononların enerjisi E onların impulsunun xətti funksiyasıdır: $E=\upsilon p$, burada υ – səsin sürətidir. Fononların sayı azdırsa, ona ideal qaz kimi baxmaq olar. Temperaturun artması ilə fononların sayı artır və T_λ böhran temperaturunda (λ – nöqtəsi adlanan temperatur) maye ifrataxıcılıq xassəsini itirir. Landau nəzəriyyəsinə görə, maye o halda da ifrataxıcılığını itirir ki, onun sürəti müəyyən astana qiymətini aşır, onda daha bir yeni tip kvazizərrəciklər – rotonlar əmələ gəlməyə başlayır. Hesab olundu ki, rotonlar burulğan həyəcanlanmalarının kvantlarıdır və onların əmələ gəlməsi maye axınının tormozlanmasına səbəb olur. *İfrataxıcılığın saxlanması şərti* (*Landau kriteriyası*) məhz bundan ibarət idi.

1947-ci ildə N.N.Boqolyubov ifrataxıcılığın mikroskopik nəzəriyyəsini işləyib hazırladı. Bu nəzəriyyədə heliuma fononların qeyri-ideal Boze-Eynşteyn qazı kimi baxılırdı və hesab olunurdu ki, həmin qazın kvazizərrəcikləri arasında qarşılıqlı təsir zəifdir.

Çox cisim probleminin ciddi kvant-mexaniki həllinə əsasən Landau kriteriyası təsdiqləndi və fenomenoloji nəzəriyyənin bütün dəqiqsizlikləri aradan qaldırıldı. Məsələn, məlum oldu ki, kvazizərrəciklərin fononlara və rotonlara bölünməsini ciddi nəzəriyyə təsdiq etmir.





L.D.Landau və E.M.Lifşits.

"Nəzəri fizika kursu"nun həmmüəllifidir.

Çox istedadlı Vladimir Naumoviç Qribovun (1930-1997) bir dəfə ciddi qeyd etdiyi kimi, bu kurs bütün dünya alimləri üçün cild cildin ardınca özünəməxsus Əhdi-cədidə (müqəddəs dini kitaba) çevrilirdi. Kursun təkrarolunmaz üstünlüyü onun ensiklopedik xarakter daşımasında idi. Ardıcıl nəşr olunan cildləri həm gənclər, həm də ahıl nəzəriyyəçilər müstəqil öyrənərək, özlərini mikro və makroaləmin müasir fiziki mənzərəsinin biliciləri hesab etməyə başlayırdılar. Landau dəfələrlə demişdi: "Enriko Fermidən sonra mən fizikada axırıncı universalçıyam". Bunu hamı da etiraf edirdi.

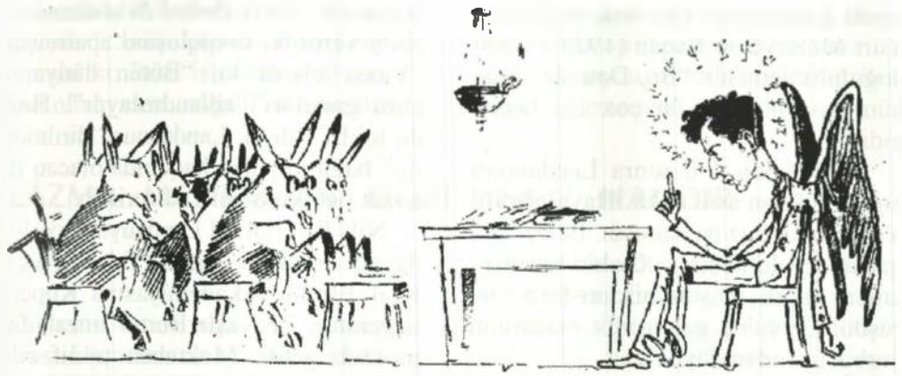
Landau məktəbi, yəqin ki, 1930-1960-cı illərdə Rusiya elmində ən demokratik cəmiyyət olmuşdur. Bu məktəbə elmlər doktorundan məktəbliyə qədər, professordan laboranta qədər istənilən adam daxil ola bilərdi. İddiaçıdan yeganə tələb olunan bu idi ki, müəllimin özünə (və ya onun inandığı əməkdaşına) Landau nəzəri minimumu adlanan imtahan versin. Lakin hamı bilirdi ki, bu "yeganə tələb" – qabiliyyətin, iradənin, əməksevərliyin və elmə sədaqətliliyin çox ciddi sınağı idi. Nəzəri minimum doqquz imtahandan ibarət idi – ikisi riyaziyyatdan, yeddisi fizikadan. Bu minimum nəzəri fizikada müstəqil işləməyə başlamaq üçün hər şeyi əhatə edirdi: nəzəri minimumu üç dəfədən artıq vermək olmazdı. Dördüncü cəhdi Landau heç kimə icazə vermirdi. Burada o ciddi və amansız idi. Kəsilən "abituriyentə" deyə bilərdi: "Sizdən fizik çıxmaz. Hər şeyi öz adı ilə çağırmaq lazımdır. Mən sizi aldatsam, daha pis olardı".

Yevgeni Lifşits danışırdı ki, 1934-cü ildən başlayaraq Landaunun özü bu sınaqdan çıxanların adlarının siyahısını tutmağa başlamışdı. 1962-ci ilin yanvarına qədər bu "qrossmeyster" siyahısında 43 familiya var idi, lakin əvəzində bunlardan 10-u akademik, 26-sı elmlər doktoru olmuşdu.

Nəzəri minimum – nəzəri kurs – nəzəri seminar... Bütün dünyada Landaunun pedaqoji fəaliyyətinin üç cəhəti

Nəzəri minimumu verənlərin Landau tərəfindən tərtib olunmuş siyahısı. Soyadlardan sağda minimumun verildiyi il və elmi dərəcə göstərilmişdir.

1. Капланский	33	д	22. Балашов	54	к
2. Лифшиц	34	д	23. Векуа	55	к
3. Ахиезер	35	(к)	24. Максимов	55	
4. Пещеренков	35	ск	25. Пилипенко	55	к
5. Мисса	35		26. Сайдель	55	к
6. Лейпи	37	ск	27. †Бекаревич	55	к
7. Борисенский	39	д	28. Шапиро	56	к
8. Смородинский	40	д	29. Боголюбов	57	к
9. Халатников	41	д	30. Шаповал	58	
10. Хухлаевский		д	31. Фалковский	59	
11. Тер-Мартиросян	47	д	32. Аверин	59	
12. Абрикосов	47	д	33. Кондратенко	59	
13. Иоффе	49	д	34. Рудик	59	
14. Жаркых	50	к	35. Маринов	60	
15. Лапидус	50	к	36. Берков	60	
16. Судаков	51	к	37. Мелик-Бархударов	60	
17. Карен	51	к	38. Шелепенко	61	
18. Чернобай	52	к	39. Чижов	61	
19. Горбунов	53	д	40. Будько	61	
20. Дорошевский	53	к	41. Макеев	61	
21. Арнольд	54	к	42. Маслов	61	
			43. Коваленков	61	



L.D.Landau seminarlarının iştirakçılarından birinin şarjı.

Dau demişdi .....

məlum idi ki, bunların sayəsində o, onun ağır xasiyyətindəki güzəştsizlik, sərtlik, açıqlıq və digər "antipedaqoji" cizgilərinə baxmayaraq, çoxlarının böyük hərflə yazılan müəllimi olmuşdur.

Landau məktəbi hətta xarici təzahürlərinə görə də sərtliyi ilə seçilirdi. Səhər saat 11-də başlanan nəzəri seminara gecikmək olmazdı. Hansı ifrat vacib hadisə olur olsun, dördüncü günə təyin olunmuş məruzəçinin Vorobyov dağlarındakı instituta vaxtında gəlib çatmasına mane olmamalı idi. Əgər kimsə saat 10:59-da desəydi ki, "Dau, vaxtdır, başlayaq!", Landau cavab verərdi: "Yox, Miqdalın gecikməməsi üçün hələ bir dəqiqəsi var..." Doğrudan da, Arkadi Beynusoviç Miqdal (1911-1991) taybatay açılmış qapıdan sürətlə içəri girərdi. Bu axırıncı dəqiqə "Miqdal dəqiqəsi" adını almışdı. Landau çox ümidlər verən və saatla arası olmayan elmlər doktorunu inandırardı ki, "Sən heç vaxt şah olmayacaqsan! Dəqiqlik şahların mərifətidir, sən isə mərifətli deyilsən". Miqdala şah olmaq qismət olmadı, ancaq o, akademik oldu. Seminarlarda Landau boş-boş nəzəriləşdirməni patologiya adlandıraraq, onu amansızcasına rədd edirdi. Qiymətli ideya eşidən kimi, əksinə, ani olaraq qızışardı.



1958-ci ildə fiziklər Landaunun 50 illiyini təntənəli surətdə qeyd edərək, onun eksperimental qurğularının və ya onun yaratdığı cihazların Fiziki Problemlər İnstitutunda sərgisini keçirə bilmədilər. Bunun əvəzində, akademiklər və tələbələr ixtiraçılıq qabiliyyətlərini nümayiş etdirərək, müəyyən bir fikrə gəldilər və Kurçatov Atom Enerjisi İnstitutunun emalatxanasında işləyən mahir ustalara əvvəlcədən mərmər lövhələr – "Landaunun on ehkamı"nı sifariş verdilər. On Bibliya ehkamını təqlid edərək, iki mərmər lövhədə Landaunun 10 əsas düsturu həkk edilmişdi. Onlar haq-

◄ "Landau lövhələri".

qında Landaunun tələbəsi, akademik Yuri Moiseyeviç Kaqan (1928-ci ildə doğulub) demişdi: "Bu, Daunun mühüm kəşflərindən ən çox işə keçənidir".

Yubileydən 4 il sonra Landaunun həyatı tükdən asılı qaldı. Hava pis idi. Yollar bərk buz bağlamışdı. Balaca qız qaçaraq yolu keçirdi. Kəskin tormozlanan minik maşını birdən-birə sürüşdü. Qarşıdan gələn yük maşınının zərbəsi yandan dəydi.

Bu zərbənin bütün ağırlığını qapının yanında oturmuş sərnişin hiss etdi. "Təcili yardım" maşını Landaunu xəstəxanaya gətirdi. Təcili Moskvaya uçan məşhur çex neyrocərrahı Zdenek Kuns qərar verdi: "Xəstənin həyatı aldığı travmalarla uyuşmur". O isə yaşadı!

Bu möcüzəni həkimlərlə birlikdə fiziklər yaratdılar. Kanadalı neyrocərrah Penfild kimi böyük tibb xadimi və aralarında Nils Borun olduğu fizikanın böyük xadimləri qüvvələrini birləşdirərək, Landaunu xilas etdilər. Onların xahişi ilə Amerikadan, İngiltərədən, Belçikadan, Kanadadan, Fransadan, Çexoslovakiyadan Moskvaya dərmanlar uçurdu. Beynəlxalq aviaxətlərin təyyarəçiləri zəruri preparatların təcili Rusiyaya çatdırılması estafetinə qoşulurdular.

Akademiklər Nikolay Nikolayeviç Semyonov və Vladimir Aleksandroviç Enqelqardt artıq həmin uğursuz 7 yanvar, bazar günü beyin şişinə qarşı maddə sintez etdilər. Onları qabaqlasalar da (İngiltərədən hazır dərman gətirdilər), zərərçəkənin 70 yaşlı iki kolleqası öz fəaliyyətlərində gör necə sıçrayış etdilər!

Həmin payız günü, hamıda ölümlə mübarizədə qabiliyyət hissi yaranan gün, Pyotr Leonidoviç Kapitsa demişdi: "...bu xeyirxah filmdir", onu "Əgər bütün dünya gəncləri!.." adlandırmaq lazım idi – lakin dərhal da sözünə düzəliş verərək, dəqiqləşmə aparmışdı: "Yaxşı olardı ki, "Bütün dünyanın alim gəncləri" adlandırılaydı". Həm də təklif etdi ki, Landaunun "dirilməsi ilə" bağlı möcüzə haqqında olacaq ilk qəzet oçerkinə belə ad verilsin.

Nils Bor dərhal Landauya psixoloji dayaq olmağı qərara aldı. İsveçrə Kral Elmlər Akademiyasına Kopenhagendən 77 yaşlı Borun imzaladığı məktub getdi. Məktubda təklif edilirdi ki, "...fizika sahəsində 1962-ci il üçün Nobel mükafatı Lev Davidoviç Landauya verilməlidir, çünki onun orijinal ideyaları və böyük işləri dövrümüzün atom fizikasına həqiqətən həlledici təsir göstərmişdir".

Ənənənin əksinə olaraq, mükafatı isveçrəlilər Landauya Stokholmda yox, Moskvada, Elmlər Akademiyasının xəstəxanasında təqdim etdilər. O, laureat üçün məcburi olan Nobel mühazirəsini nə hazırlaya, nə də oxuya bildi. Mükafatın təqdimolunma mərasimində, bu işin təşəbbüskarı olmuş Nils Borun iştirak etməməsi Landaunun çox böyük təəssüfünə səbəb oldu: Nils Bor 1962-ci ildə payızın sonunda həyatdan köçdü və özünün böyük tələbəsi üçün etdiyi axırıncı xeyirxah əməlinin həyata keçməsini görmədi.

Lev Davidoviç daha altı il yaşadı və öz 60 illiyini tələbələrinin əhatəsində qarşıladı. Bu onun üçün axırıncı yubiley tarixi oldu: Landau 1968-ci ildə vəfat etdi.

Elm tarixində o, XX əsrin, faciəvi şərəfə layiq görülərək, atom əsri adlanan əsrin ən əfsanəvi fiqurlarından biri olaraq qalacaqdır. Landaunun öz dediyinə görə o, sovet nüvə energetikasının yaradılmasının şübhəsiz qəhrəmanlıq epopeyasında iştirak edərkən, zərrə qədər ruh yüksəkliyi hiss etməmişdir. Onları hərəkətə gətirən yalnız vətəndaşlıq borcu və dəyanətli elmi

vicdan idi. 1950-ci illərin əvvəlində o demişdi: "...bütün qüvvələri sərf etmək lazımdır ki, atom işlərinin mərkəzinə daxil olmayasan... Ağıllı adamın məqsədi istismar üzərində qurulmuş dövlətin, xüsusən də sovet dövlətinin öz qarşısına qoyduğu məsələlərdən özünü kənarlaşdırmaqdır".

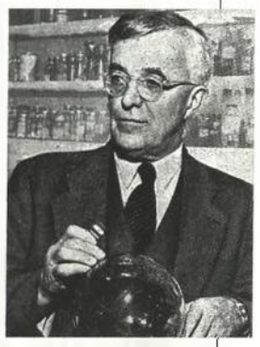
PLAZMA MADDƏNİN DÖRDÜNCÜ HALIDIR

PLAZMA NƏDİR?

XIX əsrin ortalarında qanın rəngsiz hissəsini (qırmızı və ağ cisimciklərsiz) və canlı hüceyrələri dolduran mayeni "plazma" (*yun.* "plazma" – "formalaşdırılmış") adlandırmağa başladılar. 1929-cu ildə Amerika fizikləri İrvinq Lenqmür (1881-1957) və Levi Tonks (1897-1971) qaz boşalması borusundakı ionlaşmış qazı *plazma* adlandırdılar.

İçərisində seyrəldilmiş hava olan borularda elektrik boşalmalarını öyrənən ingilis fiziki Uilyam Kruks (1832-1919) yazmışdı: "Havası sorulmuş borularda baş verən hadisələr fizika elmi üçün yeni aləm açır ki, burada materiya dördüncü halda ola bilər".

Temperaturdan asılı olaraq istənilən maddə öz halını dəyişir. Məsələn, su mənfi temperaturlarda (selsi şkalası üzrə) bərk halda, 0°-dən 100°C-yə qədər intervalda maye halında, 100°C-dən yüksək temperaturlarda isə qaz halında olur. Əgər temperatur artmaqda davam edərsə, onda atom və molekullar öz elektronlarını itirməyə başlayır, yəni ionlaşır və qaz plazmaya çevrilir. 1 000 000°C-dən yüksək temperaturlarda plazma tam (mütləq) ionlaşmışdır, yəni yalnız elektronlardan və müsbət ionlardan ibarətdir. Plazma maddənin təbiətdə ən geniş yayılmış halıdır. Kainatın kütləsinin 99%-ə yaxını plazmanın payına düşür. Günəş, əksər ulduzlar, dumanlıqlar – bunlar tam ionlaşmış

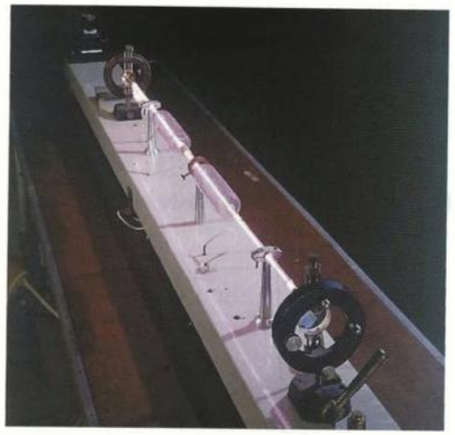


İrvinq Lenqmür.

Fizikada plazma dedikdə elektrik yüklü və neytral zərrəciklərdən ibarət olan qaz başa düşülür. Elə ki, onun qaz yekun elektrik yükü sıfıra bərabərdir, yəni kvazineytrallıq şərti ödənir (ona görə, məsələn, vakuumda hərəkət edən elektronlar dəstəsi plazma deyil: bu dəstə mənfi yük daşıyır).



İldırım – atmosferdə baş verən plazma qaytanıdır. Şəkil P.P.Xorunjevindir.



Qaz lazeri. Moskva Dövlət Universitetinin fizika fakültəsi.

XX əsrin başlanğıcında yaradılmış ilk elektron lampaları, o vaxt hesab edildiyi kimi, vakuum lampaları deyildi, faktik olaraq qaz boşalması lampaları idi, çünki onların içində xeyli hava qalırdı. Bu yalnız sonralar aydın oldu.

plazmadır. Yer atmosferinin xarici hissəsi (ionosfer) də plazmadır.

Bir az yuxarıda tərkibində plazma olan radiasiya qurşaqları yerləşir. Qütb parıltıları, ildırım, o cümlədən kürəvi ildırım – bütün bunlar plazmanın müxtəlif növləridir və onları Yerdə təbii şəraitdə müşahidə etmək olar. Kainatın yalnız çox cüzi hissəsini bərk halda olan maddə – planetlər, asteroidlər və toz dumanlıqları təşkil edir.

PLAZMADAN NECƏ İSTİFADƏ EDİRLƏR

Plazma ən çox işıq texnikasında – küçələri işıqlandıran qazboşalması lampalarında və binalarda istifadə olunan gündüz işığı lampalarında tətbiq olunur. Bundan başqa, cürbəcür qazboşalması cihazlarında: elektrik cərəyanı düzləndiricilərində, gərginlik stabilizatorlarında, plazma gücləndiricilərində və ifrat yüksəktezlikli (İYT) generatorlarda, kosmik zərrəciklərin sayğaclarında da tətbiq olunur.

Bütün qaz lazerləri (helium-neon, kripton, karbon dioksid və s. lazerləri) əslində plazma lazerləridir: çünki onlardakı qaz qarışıqları elektrik boşalması ilə ionlaşmışdır.

Metallarda keçirici elektronlar (kristal qəfəsdə sərt bağlanmış ionlar onların yükünü neytrallaşdırır), yarımkeçiricilərdə sərbəst elektronların və mütəhərrik "deşiklərin" (vakansiyaların) məcmusu plazma üçün xarakterik olan xassələrə malikdir. Ona görə belə sistemlər *bərk cisimlər plazması* adlanır.

Qaz plazmasını alçaqtemperaturlu (100 min dərəcəyə qədər) və yüksəktemperaturlu (100 milyon dərəcəyə qədər) plazmaya bölmək qəbul edilmişdir. Alçaqtemperaturlu plazma generatorları – *plazmatronlar* mövcuddur ki, onlarda elektrik qövsündən istifadə edilir. Plazmatronun köməyi ilə, demək olar ki, istənilən qazı saniyənin yüzdə və mində bir hissələri ərzində 7000-10000 dərəcəyə qədər qızdırmaq mümkündür. Plazmatronun yaradılması ilə bağlı elmin yeni bir sahəsi – plazma kimyası yarandı: bir çox kimyəvi reaksiyalar plazma şırnağında ya sürətlənir, ya da yalnız plazma şırnağında gedir. Plazmatronlar həm dağ-mədən sənayesində, həm də metalları kəsmək üçün tətbiq olunur.

Həmçinin plazma mühərrikləri, maqnitohidrodinamik elektrik stansiyaları yaradılmışdır. Yüklü zərrəciklərin plazma sürətləndiricilərinin müxtəlif sxemləri işlənib hazırlanır. Plazma fizikasının mərkəzi məsələsi idarəolunan termonüvə sintezi problemidir.



▸ Plazmatron. Model zəhərli tullantıları yandırmaq üçün nəzərdə tutulmuşdur. SSRİ EA-nın Teplotexnika İnstitutu. 1984-cü il.

Yüngül elementlərin nüvələrindən (ilk növbədə, hidrogenin izotopları olan *D* deyteriumdan və *T* tritiumdan) daha ağır nüvələrin sintezi reaksiyaları termonüvə reaksiyaları adlanır. Termonüvə reaksiyaları çox yüksək temperaturlarda ($\approx 10^8$ K və ondan böyük) gedir.

İDARƏOLUNAN TERMONÜVƏ REAKSİYALARI

Hesab olunur ki, kimyəvi yanacaq ehtiyatları bəşəriyyətə yalnız bir neçə on il bəs edər. Nüvə yanacağının məlum olan ehtiyatları da məhduddur. Plazmada gedən *idarəolunan termonüvə reaksiyaları* bəşəriyyəti enerji qıtlığından xilas edə və praktik olaraq tükənməz enerji mənbəyi ola bilər.



1 *l* adi suda 0,15 *ml* ağır su (D_2O) var. 0,15 *ml* D_2O-dəki deyterium nüvələrinin birləşməsi zamanı ayrılan enerji 300 *l* benzin yanarkən ayrılan enerjiyə bərabərdir. Təbiətdə tritium praktik olaraq yoxdur, lakin onu litium izotoplarını neytronlarla (n) bombardman etməklə almaq olar:

$$n + {}^7\mathrm{Li} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + \mathrm{T}.$$

Hidrogen atomunun nüvəsi protondan p başqa bir şey deyil. Deyterium nüvəsində, bundan başqa, bir neytron, tritium nüvəsində isə iki neytron var. Deyterium və tritium bir-birilə onlarca müxtəlif üsullarla reaksiyaya girə bilər. Lakin belə reaksiyaların ehtimalları bir-birindən yüz trilyonlarla dəfə, ayrılan enerjinin miqdarı isə 10-15 dəfə fərqlənir. Onlardan yalnız üçü praktik əhəmiyyət kəsb edir:

$$\mathrm{D} + \mathrm{D} \rightarrow \mathrm{T} + p + 4\,\mathrm{MeV};$$
$$\mathrm{D} + \mathrm{D} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + n + 3{,}3\,\mathrm{MeV};$$
$$\mathrm{D} + \mathrm{T} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + n + 17{,}6\,\mathrm{MeV}.$$

Əgər hər hansı həcmdə olan bütün nüvələr eyni zamanda reaksiyaya girərsə, onda enerji ani olaraq ayrılır. Termonüvə partlayışı baş verir. Reaktorda isə sintez reaksiyası yavaş axmalıdır.

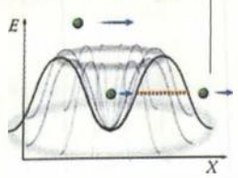


"OQRA-4" termonüvə qurğusunda plazma (qaz) boşalması. İ.V.Kurçatov adına İnstitut. Moskva.

İndiyədək idarəolunan termonüvə sintezini həyata keçirmək mümkün olmayıb, ancaq o çox üstünlüklər vəd edir. Termonüvə reaksiyalarında yanacağın vahid kütləsinə nəzərən ayrılan enerji, kimyəvi yanacağın enerjisindən milyonlarla dəfə çoxdur və deməli, yüzlərlə dəfə ucuzdur. Termonüvə energetikasında atmosferə yanma məhsulları və radioaktiv tullantılar atılmır. Nəhayət, termonüvə elektrik stansiyalarında partlayış mümkün deyildir.

Sintez zamanı enerjinin əsas hissəsi (75%-dən çoxu) neytronların və ya protonların kinetik enerjisi şəklində ayrılır. Əgər neytronları uyğun maddədə yavaşıtsaq, maddə qızar; alınmış istiliyi asanlıqla elektrik enerjisinə çevirmək olar. Yüklü zərrəciklərin – protonların kinetik enerjisi birbaşa elektrik enerjisinə çevrilir.

Termonüvə reaksiyaları təbii şəraitdə Günəşdə gedir: hidrogen nüvələri bir-birilə birləşərək, helium nüvələri əmələ gətirir və bu zaman böyük miqdarda enerji ayrılır. Termonüvə sintezi süni olaraq hidrogen bombasında həyata keçirilmişdir.



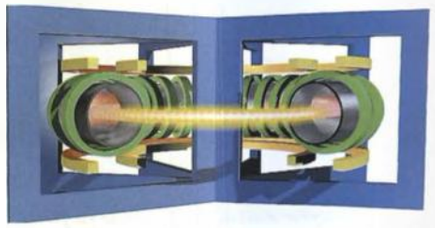


"Tokamak-15". İ.V.Kurçatov adına institut. Moskva. 1997-ci il.

Sintez reaksiyasında nüvələr birləşməlidir, ancaq onlar müsbət yüklüdür və deməli, Kulon qanununa görə birbirindən itələnir. İtələmə qüvvələrini dəf etmək üçün, hətta ən kiçik yükə ($Z=1$) malik olan deyterium və tritium nüvələrinə də 10 keV-ə və ya 100 keV-ə yaxın enerji gərəkdir. Belə enerjiyə 10^8-10^9 K temperatur uyğundur. Bu cür temperaturlarda istənilən maddə yüksək temperaturlu plazma halında olur.

Klassik fizika baxımından sintez reaksiyası mümkün deyil, ancaq burada sırf kvant effekti olan *tunnel effekti* köməyə gəlir. Hesablanmışdır ki, *yanma temperaturu* (bu elə temperaturdur ki, ondan başlayaraq enerji ayrılması, enerji udulmasını üstələyir) deyterium-tritium (DT) reaksiyası üçün $4{,}5 \cdot 10^7$ K-ə, deyterium-deyterium (DD) reaksiyası üçün isə $4 \cdot 10^8$ K-ə yaxındır. Təbii ki, DT reaksiyasına üstünlük verilir. Plazmanı elektrik cərəyanı ilə, lazer şüalanması ilə, elektromaqnit dalğaları ilə və digər üsullarla qızdırırlar. Lakin vacib olan təkcə yüksək temperatur deyil.

Konsentrasiya yüksək olduqca, zərrəciklər bir-birilə bir o qədər çox toqquşur, ona görə də elə görünə bilər ki, termonüvə reaksiyalarını həyata keçirmək üçün yüksək sıxlıqlı plazmadan istifadə etmək əlverişlidir. Lakin, əgər plazmanın 1 sm^3-də 10^{19} zərrəcik olarsa (normal şəraitdə qaz molekullarının konsentrasiyası), onda plazmadakı təzyiq, termonüvə reaksiyalarına uyğun temperaturlarda 10^6 atm tərtibinə çatardı. Belə təzyiqə heç bir konstruksiya davam gətirmir və ona görə də plazma seyrək (1 sm^3-də 10^{15}-ə yaxın zərrəcik) olmalıdır. Bu halda zərrəciklər az-az toqquşur və reaksiyanın davam etməsi üçün, zərrəciklərin reaktorda olma müddətini və ya *tutulub saxlanma müddətini* artırmaq lazımdır. Deməli, termonüvə reaksiyasını həyata keçirmək üçün plazma zərrəciklərinin konsentrasiyası ilə onların tutulub saxlanma müddətinin hasilinə baxmaq lazımdır. DD reaksiyası üçün bu hasil (*Louson kriteriyası* adlanır) 10^{16} san/sm^3-na, DT reaksiyası üçün isə 10^{14} san/sm^3-na bərabərdir. Deməli, DT reaksiyasını reallaşdırmaq, DD-dən asandır.

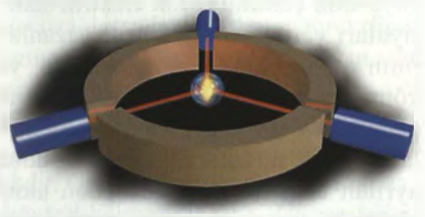


▸ Tokamakın sxemi.

Tunel effekti elə kvantmexaniki hadisədir ki, bu zaman itələmə qüvvələrinin potensial çəpərini keçib-getmək üçün kifayət qədər enerjisi olmayan zərrəcik, yenə də sıfırdan fərqli ehtimalla bu çəpəri keçib-gedir.



Stellaratorun sxemi.



İnersial sintezin sxemi.

Plazmanın tədqiqinə başlanan vaxt, elə düşünürdülər ki, idarəolunan sintezi həyata keçirmək tezliklə mümkün olacaqdır. Lakin zaman keçdikcə aydın oldu ki, yüksəktemperaturlu plazmada mürəkkəb proseslər baş verir və çoxsaylı dayanıqsızlıqlar həlledici rol oynayır. Bu gün bir neçə növ qurğular işlənib hazırlanır ki, onlarda termonüvə sintezini aparmaq nəzərdə tutulmuşdur.

Ən perspektivli sayılan *tokamaklardır* ("ТО роидалнайа КАмера с Магнитными Катушками" *rus* sözlərinin qısaldılmış variantı). Tokamak nəhəng transformatordur. Onun birinci sarğacı içliyə sarınıb, ikinci sarğacının isə yeganə sarğısı – bublik, tor (*lat.* "torus" – "qabarıqlıq") şəklində vakuum kamerası var. Bu kamera daxilində plazma qaytanı yerləşir. Maqnitlər sistemi qaytanı kameranın mərkəzində tutub saxlayır, şiddəti min amperə çatan cərəyan isə onu lazımi temperatura qədər qızdırır. Termonüvə reaksiyasının gedişində əmələ gələn neytronlar blanketdə – kameranı əhatə edən maddə təbəqəsində udulur. Bu zaman ayrılan istilikdən elektrik enerjisi almaq üçün istifadə etmək olar.

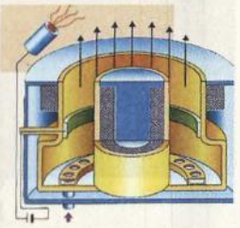
Lakin buna bənzər heç bir qurğu hələlik müsbət enerji çıxışı verməmişdir. Fransada qurulacaq Beynəlxalq eksperimental termonüvə reaktoruna (ITER) böyük ümidlər bəslənir. Digər layihələr arasında ikisini: stellaratorları və plazmanı ətalət sayəsində tutub saxlayan qurğuları qeyd etmək lazımdır.

Plazmanı tokamakın dairəvi kamerasında tutub saxlayan mürəkkəb formalı maqnit sahəsi, plazma qaytanının, plazmadakı yüklü zərrəciklərin trayektoriyasını əyməyə çalışan məxsusi sahəsinə əks təsir edir. *Stellaratorda* (*lat.* stella – "ulduz") plazmaya "istədiyi" formanı almağa imkan verildi və yalnız qaytanı sıxan sahə saxlanıldı. Bu zaman vakuum kamerası olduqca əcaib şəkil, maqnit sarğacları çoxluğu

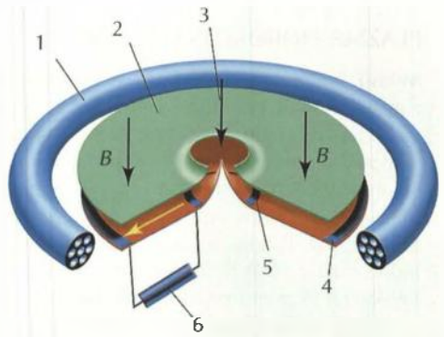
PLAZMA HƏRƏKƏTVERİCİLƏRİ

Müasir reaktiv mühərriklərin əksəriyyəti yanacağın yanma reaksiyası zamanı ayrılan enerjidən istifadə edir. Onlar böyük dartı qüvvəsi yaradır, ancaq çoxlu miqdarda yanacağın yanmasını tələb edir. Qazların soplodan çıxma sürəti 1 km/san tərtibindədir. Əgər plazma şırnağının sürətinin 1000 km/san-dən çox olmasına nail olsaq, onda işçi maddənin sərfi eyni dartı qüvvəsinə malik kimyəvi mühərrikindən yüz dəfələrlə az olar. Plazmanı sürətləndirmək üçün müxtəlif sxemlərdən, o cümlədən çarpaz elektrik və maqnit sahələri tətbiq edilən sxemlərdən istifadə olunur.

Hələlik müasir plazma hərəkətvericilərinin dartı qüvvəsi böyük olmasa da, onlardan artıq kosmik gəmilərin istiqamətləndirilməsi sistemində istifadə olunur. Keçirici mayeləri (məsələn, əridilmiş metalları) sorub vuran maqnitodinamik nasoslar da eyni prinsiplər üzrə işləyir.



1957-ci ildə ingilis fiziki Con Devis Louson (1923-cü ildə doğulub) DT reaksiyası üçün aşağıdakı kriteriyanı müəyyən etmişdir: $nt > 10^{14}$ san/sm^3, burada t – yüksəktemperaturlu plazmanın sistemdə tutulub saxlanması müddəti, n – plazmanın sıxlığıdır. Louson kriteriyası ödəndikdə termonüvə sintezi zamanı ayrılan enerji, reaksiyanı yandırmaq üçün verilən enerjidən çox olur.



Disk kanallı MHD generatorunun sxemi:
1– induktorun dolağı;
2 – kanal;
3 – işçi maddənin seli;
4, 5 – elektrodlar;
6 – yük;
8 – maqnit sahəsi.

isə dedikcə mürəkkəb forma almışdır. Müxtəlif ölkələrdə stellaratorlarda eksperimentlər aparılır, ancaq hələ ki lazımi temperatura çatmaq və plazmanın lazımi saxlanılma müddətinə nail olmaq mümkün olmamışdır.

Plazmanı ətalət sayəsində tutub saxlama metodu reaksiya qarışığının ətalətinə əsaslanır. Həmin qarışıq, ani qızdırılma zamanı (məsələn, lazer impulsunun köməyi ilə) hər tərəfə dərhal dağılmır. İçərisində deyteriumla tritiumun qarışığı olan ampulanı hər tərəfdən 10^{-10} saniyəyə qədər davam edən və ümumi gücü 10^{20} Vt/sm^2 tərtibində olan lazer impulsu ilə şüalandırırlar. Ampulanın örtüyü buxarlanır, genişlənən qazlar və işığın təzyiqi ampulanın içindəkini, demək olar ki, 50 min dəfə sıxır. Qarışığın təzyiqi 1 mln atm-ə qədər, sıxlığı isə 50-100 q/sm^3-ə qədər artır. Belə şəraitdə termonüvə reaksiyası başlayır.

Lakin bu yolda da bir sıra texnoloji çətinliklər var. Bu çətinliklər hələ ki,



Yerin maqnitosferi.

eksperimental lazer qurğularını sənaye reaktorlarına çevirməyə imkan vermir.

TURBİNSİZ ELEKTRİK STANSİYALARI

Bütün dünyada elektrik enerjisinin 70%-dən çoxunu istilik elektrik stansiyaları verir. Onların buxar qazanlarının odluqlarında neft, qaz və ya kömür yandırılır, buxar isə elektrik generatoru ilə bağlı olan turbini fırladır. Ağır nüvələrin bölünməsindən ayrılan enerjidən istifadə edən atom elektrik stansiyaları da eyni sxem üzrə işləyir. İstilik elektrik stansiyasının başlıca nöqsanı FİƏ-nin kiçik (40%-ə yaxın) olmasıdır.

Ancaq elektrik enerjisini bilavasitə plazmanın köməyi ilə də almaq olar. Əgər plazmanı (ionları və elektronları), onun hərəkətinə perpendikulyar yönəlmiş maqnit sahəsindən keçirsək, onda elektromaqnit induksiya qanununa görə, yükləri kənara meyil etdirən və sol əl qaydası ilə təyin olunan qüvvə yaranır. Nəticədə yüklərin bölünməsi baş verəcək: elektronlar, məsələn, sağa, ionlar isə sola hərəkət edəcək. Onlar elektrodların üzərinə düşərək, potensiallar fərqi yaradır. Elektrik cərəyanının plazmalı generatorunun işi bu prinsipə əsaslanmışdır. Onun işləməsi üçün lazım olan plazma, reaktiv mühərriki xatırladan yanma kamerasında əmələ gəlir.

Plazmalı generatorlarda gedən proseslər maqnit hidrodinamika qanunları ilə təsvir olunur və ona görə belə aparatlar *maqnithidrodinamik generatorlar* və ya *MHD generatorlar* adlanır. MHD generatorunun işçi kanalından çıxan plazma hələ kifayət qədər qaynar olur, ona görə də onunla buxar qazanlarını qızdırmaq olur. Bu gün gücü 20 MVt-a qədər, FİƏ isə

50-60%-ə yaxın olan MHD generatorları qurulmuş və praktikada tətbiq olunur.

GÜNƏŞ KÜLƏYİ

1958-ci ilə qədər hesab olunurdu ki, Yerin maqnit sahəsi, bütün fəzada mövcud olan və planetdən yalnız sonsuz uzaqlaşanda yox olan maqnit dipolunun sahəsindən ibarətdir. Lakin süni peyklərin və kosmik gəmilərin köməyilə aparılan tədqiqatlar göstərdi ki, geomaqnit sahəsi başqa formaya malikdir. Günəşin arasıkəsilmədən buraxdığı yüklü zərrəciklər – *Günəş küləyi* onu üfürür. Günəş küləyi – konsentrasiyası 10 zərrəcik/sm^3 və planetlərarası mühitdə 300-500 km/san sürətlə hərəkət edən hidrogen plazmasıdır. Planetlərarası mühitin özü də sıxlığı 100 zərrəcik/sm^3 olan plazma halındadır.

Yerin maqnit sahəsi Günəş küləyilə dövrələnəndə zərbə dalğası yaranır, ona görə də maqnit sahəsinin qüvvə xətlərinin forması təxminən yeddi-səkkiz Yer radiusuna bərabər olan məsafələrdə dipolun sahəsinin formasından xeyli fərqlənir. Geomaqnit sahəsi, deyildiyi kimi, *maqnitosferi* əmələ gətirir. Gündüz tərəfdən Günəş küləyi maqnitosferi "sıxır", gecə tərəfdən isə "dartır". Təxminən on Yer radiusu qədər məsafədən başlanan olduqca uzun "quyruq" əmələ gəlir.

YERİN PLAZMA ÖRTÜYÜ

Artıq Yerin ilk süni peyklərinin köməyi ilə müəyyən edilmişdir ki, planetin maqnitosferində yüksək enerjili elektronların və ionların konsentrasiyasının nisbi böyük olduğu oblastlar vardır. Belə oblastlar *radiasiya qurşaqları* adlanır. Bir qayda olaraq, radiasiya qurşaqlarını iki yerə bölür-



Norveç üzərində göydə şimal parıltıları.

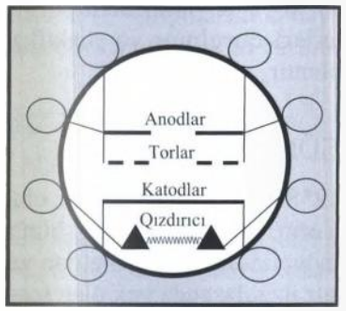
lər. Daxili radiasiya qurşağı, bu qurşaq Yer səthindən təxminən 500 km məsafədən sonra başlayır və bir neçə min kilometrə qədər uzanır. Burada protonlar üstünlük təşkil edir. Xarici radiasiya qurşağı əsasən elektronlardan ibarət olub, planetdən təxminən 22 min kilometr məsafədə zərrəciklərin maksimal sıxlığına malikdir. Radiasiya qurşağına düşən zərrəciklər uzun müddət geomaqnit sahəsi tərəfindən tutulub saxlana bilər.

Qütb parıltıları bu zərrəciklərlə bağlıdır. Günəşdə alışmalar olanda Günəş küləyi güclənir ki, bu da güclü maqnitohidrodinamik dalğaların yaranmasına səbəb olur. Bu dalğaların yayılması yerin maqnitosferində maqnit sahəsinin rəqslərini və deməli, zərrəciklərin radiasiya qurşaqlarında tutulub saxlanılması şəraitinin dəyişməsini doğurur. Yüklü zərrəciklər, hərfi mənada, Yerin qütbləri olan oblastlara "tökülür". Həmin zərrəciklər atmosferin yuxarı qatlarında neytral atomlarla toqquşaraq, onları ya həyəcanlanmış hala keçirir, ya da ionlaşdırır. Həyəcanlanmış atomlar artıq enerjilərindən azad olaraq, fotonlar buraxır. Bu fotonlar seli parıltılar şəklində müşahidə olunur.

Maqnit dipolu (*yun.* "di" – "ikiqat", "qoşa" və "polos" – "qütb") – bir-birindən ayrılmayan və müəyyən məsafədə yerləşən iki maqnit qütbünün (şimal və cənub) cəmindən ibarətdir. Bütün təbii maqnitlər bu cürdür.

Maqnitosfer planetətrafı fəzanın, fiziki xassələri planetin maqnit sahəsilə, habelə bu sahə ilə Günəş küləyi arasındakı qarşılıqlı təsirlə təyin olunan oblastıdır.

Operativ yaddaş blokunun özəyi (RAM, *ing.* Random Access Memory sözlərinin qısaldılmış variantı) 1 bit informasiya saxlayır. 1946-cı ildə hazırlanmış ilk ENIAC kompüterinin (ABŞ) 18 min lampası var idi və bu kompüter təxminən 80 m^3 həcm tuturdu və 140 kVt/saat elektrik enerjisi sərf edirdi. Hesablama gücünə görə, müasir cib kalkulyatorları ilə müqayisə olunur. ENIAC kompüteri üçün lampalar SSRİ-də işlənib hazırlanırdı və istehsal olunurdu. Bir lampanın dəyəri yaddaş həcminə görə lampadan 1 000 000 dəfə, fəaliyyətinə görə isə 125 dəfə üstün olan müasir 80 nanosaniyəli meqabit RAM-ın dəyəri qədər idi.



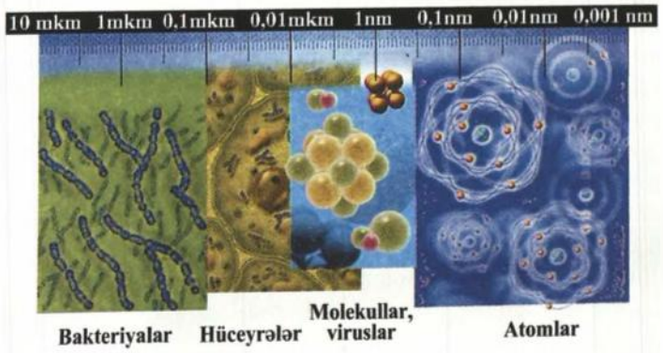
NANOTEXNOLOGİYA



Elektron dəstəsilə qalınlığı 0,33 mkm olan zolaqlara "bölünmüş" silisium monokristalının elektron mikroskopunda görünən fraqmenti.

1974-cü ildə yapon tədqiqatçısı Taniquçi xətti ölçüləri 0,1 nm-dən 100 nm-ə qədər olan ($1\ nm = 10^{-9}\ m$) fəzada baş verən prosesləri təsvir etmək üçün *nanotexnologiya* (*yun.* "nanos" – "cırtdan") terminini təklif etdi.

Tarixi olaraq, texnologiyanı qurmaq üçün onun əsası kimi universal metrik ölçü – insan boyu götürülmüşdür. İnsan boyu, adətən, 1,5 m-dən 2 m-ə qədər intervalda verilir. Dəqiq qiymət o qədər də vacib deyil, başlıcası odur ki, texnologiyada ölçü rolunu oynayan metrdir. Nə məişət əşyalarını, nə də onları hazırlayarkən işlədilən mexanizmləri (çubuqdan və baltadan tutmuş müasir dəzgahlara qədər) çox kiçik ölçüdə düzəltmək ağlabatan olmuşdur. Deyə bilərik ki, çox şeylər və mexanizmlər – metr texnologiyasının məhsullarıdır.



Bununla belə, şeyləri və mexanizmləri miniatürləşdirmək bütün dövrlərin və xalqların bacarıqlı adamlarının arzusu olaraq qalırdı. Lakin əşyaları miniatürləşdirməyə iki cəhət mane olur: materiallar və istehsal vasitələrinin ölçüləri. Texnikanın inkişaf tarixi göstərir ki, bu cür maneələr çox böyük çətinliklərlə və məsrəflərlə, həm də buna ancaq həyati zərurət yarandığı vaxtlarda aradan qaldırılır.

Millimetr texnologiyasına ($1\ mm = 10^{-3}\ m$) keçid elektronikanın yaranması ilə şərtlənmiş və XX əsrin ortalarında baş vermişdir. 1940-cı illərdə yaradılan vakuum lampası həqiqətən möcüzə oldu. Onun əsas ölçü xarakteristikaları (torun məftilcikləri arasındakı, katodla anod arasındakı məsafələr və s.) bir neçə millimetri aşmırdı. Lakin elektronikanın inkişafı ilə bu ölçülərin də kiçildilməsinə tələbat yarandı: kolba miniatür olduqca, lampa bir o qədər tez işə düşür və bir o qədər az enerji sərf edir.

Ölçülərin sonrakı 1000 dəfə kiçildilməsilə bərk cisimli mikrotexnologiyanın erası başlandı. XX əsrin ikinci yarısında hesablama texnikasının heyrət doğuran irəliləyişi bununla bağlıdır. İnsanlar sahəsi 1 sm^2 olan inteqral sxemdə 1 mln bərk cisimli tranzistorlar yerləşdirməyi öyrəndilər. Silisium

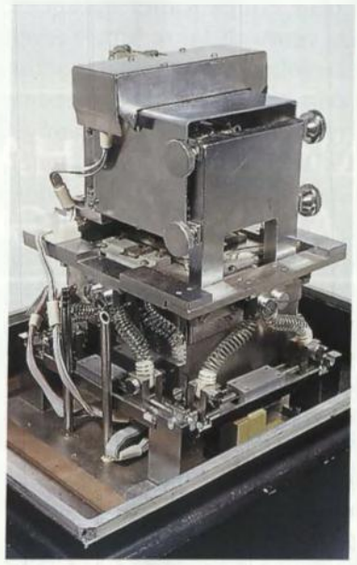
kristalları inteqral mikrosxemlər üçün əsas oldu. İnteqral mikrosxemlərin miniatürləşdirilməsi hesablama maşınlarının effektivliyinin sürətlə artmasına səbəb oldu. Silisium əsasında mikrosxemlərin miniatürləşdirilməsi üzrə rekord nəticələr 1990-cı illərdə *elektron litoqrafiyası*, yəni kristalların elektron dəstəsilə emalı sayəsində əldə edildi.

Mikroməhsulların və onların hazırlanma üsullarının metr və millimetr texnologiyalarının məhsullarından praktik olaraq tamamilə fərqlənməsinə baxmayaraq, onların hamısı eyni klassik qanunlar əsasında işləyir. Məsələn, Om qanunu eyni dərəcədə həm məişət elektrikqızdırıcısı üçün, həm də inteqral mikrosxem üçün doğrudur. Beləliklə, metr texnologiyasından millimetr texnologiyasına qədər bütün texnologiyaları klassik texnologiyalar hesab etmək olar.

Lakin klassik qanunlar obyektlərin ölçüləri 0,5 mkm-dən kiçik olduqda işləmir. Burada kvant qanunlarına tabe olan ərazi başlanır. Nanotexnologiyanı məhz orada həyata keçirmək qarşıda durmuşdur. Mikron tərtibində olan məmulatların ölçülərini daha 1000 dəfə kiçiltsək, bizi nə gözləyər?

Cavab aydındır: biz klassik texnologiyaların bütöv maddələrindən kvant nanotexnologiyasının atom-molekulyar quruluşuna keçəcəyik. Bəşəriyyət artıq indi elə istehsal oblastlarına qədəm qoyur ki, orada canlı təbiətlə cansız təbiət arasında fərq itir. Nanoölçülü törəmələr üçün xarakterik parametrlərin oblastı şkalada göstərilib.

"Aşağıda hələ çoxlu boş yerlər var" – məşhur sözləri nəzəriyyəçi fizik Riçard Fillips Feynman (1918-1988) Amerika Fizika Cəmiyyətinin milad gününə həsr edilmiş iclasında 1959-cu ildə söyləmişdi. O demişdi: "2000-ci ildə geriyə dönərək, hamı təəccüblənəcəkdir ki, nə üçün 1960-cı ilə qədər heç kəs ciddi olaraq bu istiqamətdə hətta düşünməmişdir". 1983-cü ildə nanoölçülü kompüterlərin pionerlərin-





NS 1000-1V nanotexnoloji maşının texnoloji kamerası.
Skaner tunel mikroskopunun bazası əsasında yaradılmış, dünyada ilk nanotexnoloji maşınlardan biri. Kvant kompüterlərinin elementlərini istehsal edir. RF-nin Beynəlxalq Konversiya Fondunun Nanotexnologiya İnstitutu. Rusiya. 1999-cu il.



Hərfləri əmələ gətirən nöqtələr karbon atomlarından yığılıb. Hərflər hidrogen tərkibli karbon plyonka üzərində yerləşdirilib.



a *b*

Karbon-hidrogen plyonkasının səthində xlor üç etilen molekullarının fraqmentlərindən yığılmış sahə tranzistorunun təsviri (*a*), kvant inteqral sxeminin neyronu (*b*).
Skaner tunel mikroskopunun köməyi ilə alınmışdır.

dən biri olan Fillips Karter qabaqcadan xəbər vermişdi ki, mikroelektron inteqral sxemləri nanometr sərhədini 2020-ci ildə keçəcəkdir. Lakin nanotexnologiya praktik olaraq, mahiyyətcə, 1981-ci ildə – skaner tunel mikroskopunun ixtira edilməsi ilə doğuldu.

Skaner tunel mikroskopunun özü və ona çox oxşayan elektron-şüa litoqrafiyasının skaner proyektoru, Feynmanın qabaqcadan gördüyü gələcək nanotexnologiyanın timsalı oldu. Skaner tunel mikroskopunun köməyi ilə ayrı-ayrı atomları və molekulyar fraqmentləri əvvəlcədən təyin edilmiş yerlərə aparmaq olar.

Bu, proqramlaşdırılmış atom məktubunu – ilk nanotexnoloji proses olan, atomların nanoölçülü "kiçicik dəstələr" şəklində yığılması və belə "kiçicik dəstələrin" verilmiş şəklə uyğun düzülməsi prosesini həyata keçirməyə imkan verdi.

Kvant nöqtələr, kvant dipollar, kvant məftillər kimi yeni anlayışlar yaxın gələcəyin nanoölçülü kvant kompüterlərinin kvant inteqral sxemlərinə aiddir. Atomlar qrupunun əmələ gətirdiyi və əsas matrisanın verilmiş yerində lokallaşan tək-tək kvant nöqtələrini məftil şəklində yığırlar. Öz növbəsində kvant məftillərinin elementlərindən sahə tranzistorları və *neyronlar* adlanan ən sadə inteqral sxemlər, yəni kvant kompüterlərinin işləyən elementlərini yaradırlar. Nanotexnologiyaya keçid, şübhəsiz, yeni sənaye inqilabı deməkdir.

Bəşəriyyətin qarşısında indiki sistemlərdən 1000 dəfə kiçik sistemlərin istehsalına keçid durur, həm də ayrı-ayrı atomlarla işləməyi öyrənmək durur.

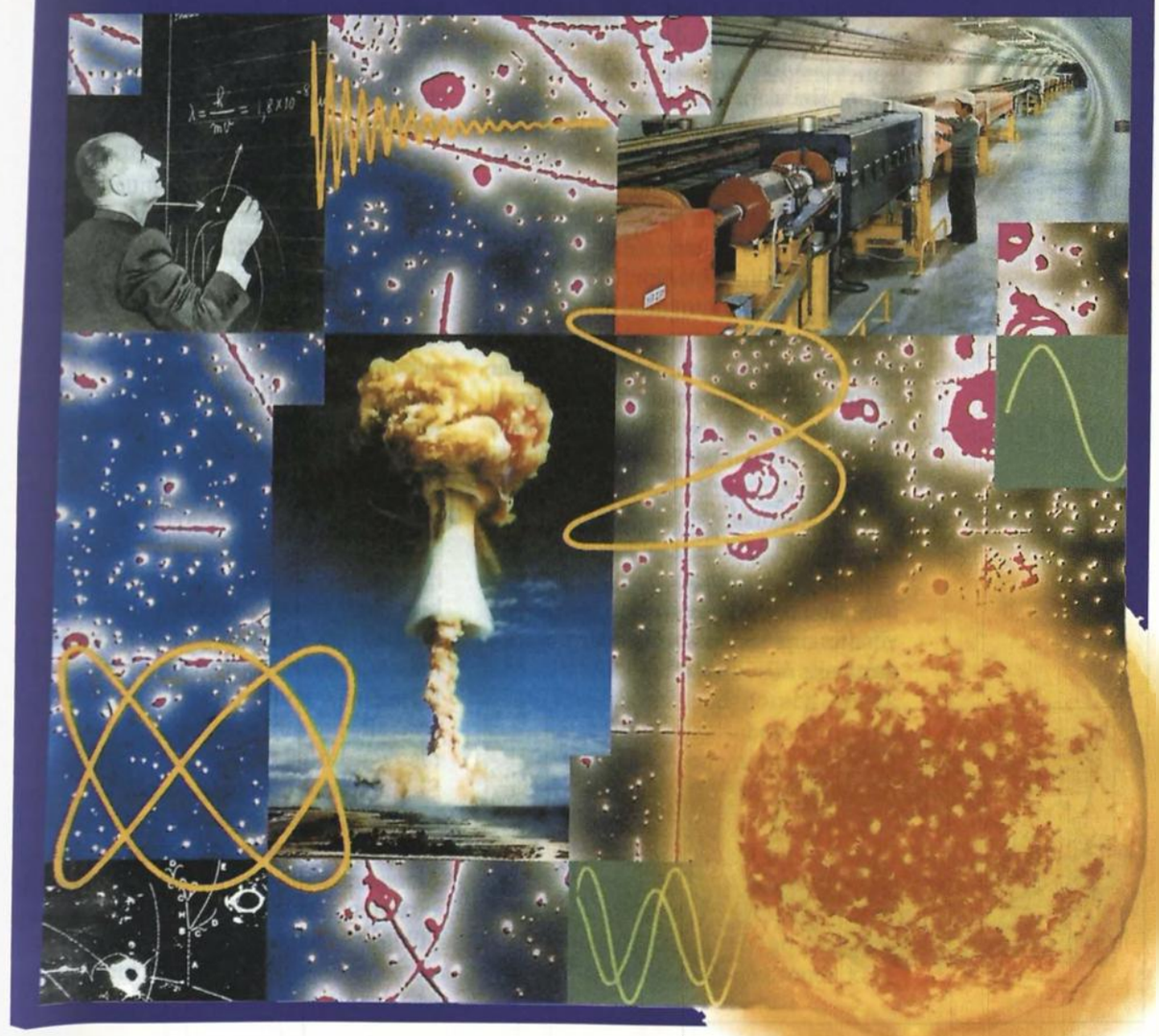
Məhz ona görə də nanotexnologiyanı molekulyar istehsal da adlandırırlar. Müxtəlif canlı orqanizmlərin, əsasında fəaliyyət göstərdiyi *təbii molekulyar texnologiya* və ya *nəm texnologiya* öz sistemlərini kiçikdən böyüyə, aşağıdan yuxarıya prinsipi üzrə yığaraq, bütün canlı sistemlərin – genlərin, membranların və digər hüceyrəli elementlərin müxtəlifliyini yaratmışdır. Onlar üçün təbii mühit sudur. Forması, fəaliyyəti və təkamülü nanoölçülü quruluşların qarşılıqlı təsirilə təyin olunan canlı orqanizmlərin mövcudluğunun özü, bu cür texnoloji prosesin nailiyyətlərinin inandırıcı şahididir. *Süni molekulyar texnologiya* və ya *quru texnologiya* yuxarıdan aşağıya doğru, yəni klassik texnologiya üzrə yaradılmış üçölçülü qurğulardan elektron qurğularının, maqnit qurğularının və optoelektron qurğularının funksiyalarını yerinə yetirən nanoölçülü elementlərin ikiölçülü paylanmalarına doğru işləyir. Molekulyar texnologiyada tələb edilən parametrlərə malik sistemləri qabaqcadan quraşdırmaq, modelləşdirmək lazımdır. Bu gün kompüter modelləşdirilməsi texnoloji vasitəyə çevrilir.

Gözləmək olar ki, nanotexnologiya, praktik olaraq, müharibələri aparma üsulları da daxil olmaqla insan fəaliyyətinin istənilən sahəsini indiyədək görünməmiş imkanlarla təchiz edəcəkdir. Hesablama texnikası, informatika (sancaq başı boyda maddə həcmində trilyonlarla informasiya bitlərini saxlamağa qadir olan yaddaş modulları), kommunikasiya xətləri, sənaye robotlarının istehsalı, biotexnologiya, tibb (zədələnmiş hüceyrələrə dərman preparatlarının ünvanlı çatdırılması, zədələnmiş və xərçəng hüceyrələrinin aşkar edilməsi), kosmik tədqiqatlar kimi sahələrdə nanotexnologiyanın istifadəsi perspektivləri əsil ruh yüksəkliyi doğurur. Lakin nanotexnologiyanın inkişafının dünyanın təhlükəsizliyi üçün törədə biləcəyi mümkün neqativ nəticələrini də qabaqcadan görmək lazımdır.

7

"DÜNYANIN VAHİD MƏNZƏRƏSİNƏ" GEDƏN YOLDA

Nüvə fizikası.
Standart model və onun çərçivələri xaricində

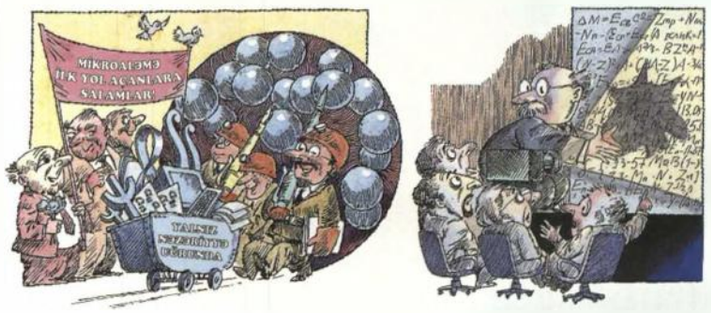


SADƏLİYİN TÜKƏNMƏYƏN MÜRƏKKƏBLİYİ

"Fiziklər inqilabçı olmaqdan daha çox konservatordurlar və yalnız vəziyyət məcbur edəndə onlar yaxşı əsaslandırılmış təsəvvürlərdən əl çəkirlər".

M.Born

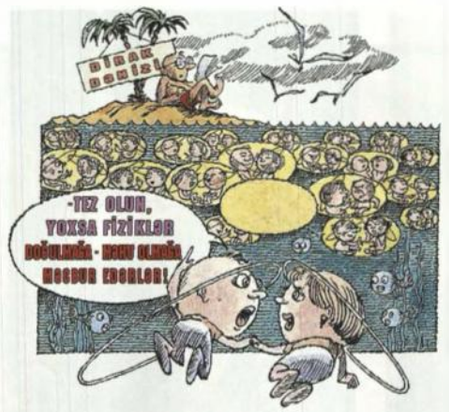
Ən sadə obyektlərin və anlayışların – ilkin əsasların, ilkin kərpicciklərin, ilkin prinsiplərin axtarışları yollarında, fizika getdikcə daha tez-tez mürəkkəb qanunauyğunluqlarla, getdikcə daha da mürəkkəbləşən riyazi aparatla, getdikcə daha çox təkmilləşdirilmiş eksperimental metodikalarla rastlaşır. Akademik laboratoriyaları, təbiəti öyrənməyin sənaye metodları ilə birlikdə, elmi şəhərciklər əvəz etdi, yaradıcı mütəfəkkirlərin yerini çoxminli elmi kollektiv tutdu. Materiyanın dərinliklərinə, ən müqəddəs ilkin əsaslara doğru irəlilədikcə, fizika praktik olaraq adi əyani obrazlarından məhrum oldu, istənilən adi adama özünün hətta ən böyük nailiyyətlərini də "barmağın ucunda" izah etmək imkanını itirdi. Altıncı kvarkın kəşfinə sərf olunan titanik zəhmət və astronomik məbləğlər 1995-ci ildə çoxdan gözlənilən uğurla nəticələndi. Lakin elementar zərrəciklərin standart modelinin əsas müddəalarının doğruluğunu təsdiq edən bütün bu tədqiqatlar cəmiyyətdə heç bir rezonans doğurmadı. Axı bu kəşf, vaxtilə haqqında bütün dünya qəzetlərinin yazdığı ümumi nisbilik nəzəriyyəsi nəticələrinin doğruluğunun 1919-cu ildəki eksperimental sübutundan az əhəmiyyətli deyildi. Lakin bu nailiyyətin mahiyyətinin universitet diplomu olan insanlar tərəfindən başa düşülməsi üçün, onlarca qəzet səhifəsi və ya xüsusi mühazirələr tələb olunardı.



Müasir fizika elmində elə bir sahə qalmayıb ki, ümumi qəbul edilmiş əyani təsəvvürlər çərçivəsindən kənara çıxmadan, "sağlam fikrə" əsaslanaraq, həmin sahədə heç olmazsa minimal maraqlı bir nəticə almaq mümkün olsun.

Təsəvvürlərin, anlayışların mücərrədliyi bizim günlərin fizikasının xarakterik cəhətidir. Bu səbəbdən, klassik fizikadan fərqli olaraq, dəqiq riyazi anlayışlara əl atmadan hadisələri təsvir etmək olmur. Yığcam, dəqiq və son dərəcə zəngin informasiyalı riyazi dil çoxdan fiziklərin professional dili olmuşdur. Hətta müşahidə olunan hadisənin və ya eksperimental faktın elementar izahını verməyə çalışanda da, fiziklər, əslində riyazi anlayışları hamının başa düşəcəyi dilə "tərcümə edirlər" ki, bu da heç də həmişə mümkün olmur, bəzən isə, sadəcə, yolverilməzdir. İstənilən halda, hadisənin izahı fizikin başa düşdüyü mənzərəyə adekvat olmayacaqdır. Hər dəfə nə isə, çox vaxt olduqca vacib olan bir şey kadr arxasında qalır.

Nyuton fizikasında da maddi nöqtə, mütləq bərk cisim, ideal maye və s. kimi mücərrəd obrazlardan istifadə olunmuşdur. Lakin onlar real obyektlərin öyrənilən hadisələr çərçivəsində lüzumsuz, qeyri-prinsipial olan keyfiyyətlərini atmaq yolu ilə gündəlik təsəvvürlərin bazasında yaranmışdı. Subnüvə aləminin və elementar zərrəciklər aləminin hadisələrini təsvir edərkən, fiziklər makroaləmdə analoqu olmayan anlayışlara: spin, kvarklar, bozonlar, fermionlar, qlüonlar, rəng yükləri, lepton ədədləri və barion ədədi, qəribəlik, həqiqətlik və s. kimi anlayışlara söykənirlər. Bu abstraksiyalara mühüm xassələr verilir ki, onlardan heç olmazsa birini nəzərdən atan kimi tamamilə başqa izah alınır. Mikroaləmin mücərrəd anlayışlarının özü nəzəriyyənin riyazi aparatının ayrılmaz hissəsidir, anlayışların xassələri isə xüsusi riyazi tədqiqatların predmetidir. Ona görə istənilən kvant nəzəriyyəsinin adekvat riyazi aparatı qurulana qədər, nəzəriyyənin qabaqcadan xəbərvermə imkanları və nöqsanları haqqında fikir söyləmək olmaz. Bütün qarşılıqlı təsirlərin vahid əsasda izahına bir nömrəli iddiaçı olan və çox vaxt Bütün Mövcudiyyətin Nəzəriyyəsi adlanan supersim nəzəriyyəsi bu gün məhz belə vəziyyətdədir.



Paradoksal görünsə də, məhz materiyanın ən elementar, ilkin əsaslarını təsvir etmək üçün getdikcə daha çox mürəkkəbləşən riyazi aparatdan istifadə etmək lazım gəlir. Nüvə fizikasında və elementar zərrəciklər fizikasında, müasir fizikada anlayışlarının mücərrədliyinə görə birinci yeri tutan, kvant sahə nəzəriyyəsinin aparatı tətbiq olunur. Burada həm qrup nəzəriyyəsi, həm kompleks dəyişənlər funksiyası, həm ümumiləşmiş funksiyalar nəzəriyyəsi, həm təbəqələnmiş fəzalar nəzəriyyəsi, həm cəbri topologiya... var. Son onilliklər ərzində sim nəzəriyyəsinin inkişafı ilə əlaqədar olaraq, fiziklər hətta bu vaxta qədər mücərrəd riyaziyyatın "qoruğu" sayılan ədədlər nəzəriyyəsinin də metodlarını mənimsədilər.

Mikrozərrəciklərin davranışını təsvir edərkən əldə etdiyi bütün nailiyyətlərə baxmayaraq, hətta Dirakın relyativistik kvant mexanikasını da ardıcıl kvant nəzəriyyəsi hesab etmək olmaz. Məsələ ondadır ki, yeni fizikanın yaradıcıları materiya zərrəciklərinin məhvedilməzliyi və yaradılmazlığı haqqında qədim demokrit təsəvvürlərinə sadiq qalmışlar. Bu, onları bəzən çox əcaib konstruksiyalar qurmağa, məsələn, prinsipial olaraq müşahidə olunmayan və tükənməz sayda elektronlar tərəfindən dolmuş mənfi enerjili halların dərin rezervuarından ibarət "Dirak dənizi" kimi konstruksiyalar qurmağa vadar edirdi.

Başqa belə bir təsəvvür, "nüvə elektronları" haqqındakı hipotezdir (1930-cu illərin əvvəli). Bu hipotez nüvələrin β-radioaktivliyini α-parçalanmaya analoji olaraq izah edir. Əgər α-parçalanma zamanı nüvədən, əvvəlcədən nüvə daxilində mövcud olan və iki neytron və iki protondan ibarət bir kompleks çıxırsa, onda nüvədən çıxan β-zərrəciklər (elektronlar) da, qaydaya görə, nüvənin daxilində yerləşməlidir. Heyzenberq tərəfindən qeyri-müəyyənliklər münasibətinin kəşfindən sonra aydın oldu ki, elektronun nüvənin kiçik həcmində lokallaşması onun impulsunun son dərəcə böyük qeyri-müəyyənliyinə səbəb olur.

Bu halda belə sual yarandı ki, elektronlar impulslarının yol verilən bu qədər böyük qiymətlərində nüvə daxilində, ümumiyyətlə, hər hansı müddətə də olsa, necə qalmağa qadirdir? Digər həllolunmaz bir problem "azot fəlakəti" kimi gurultulu ad almışdı, çünki bu problem hələ neytronun kəşf





▲
E.Lourensin və N.Edelfsenin konstruksiyası olan ilk tsiklotronun vakuum kamerası. 1930-cu illər.

▶▶
E.O.Lourens. 1930-cu il.

olunmadığı dövrdə azotun spinini təyin edərkən yaranmışdı. Azot nüvəsinin atom kütləsi 14-ə, yükü 7-yə bərabərdir, yəni belə çıxır ki, nüvə 14 protondan və 7 elektrondan (cəmi 21 zərrəcikdən) ibarətdir. Bir halda ki, elektronların və protonların spini 1/2-ə bərabərdir, onda azot nüvəsinin spini yarım tam olmalıdır, eksperimentlər isə inadla azot nüvələrinin spininin tam olduğunu göstərirdi.

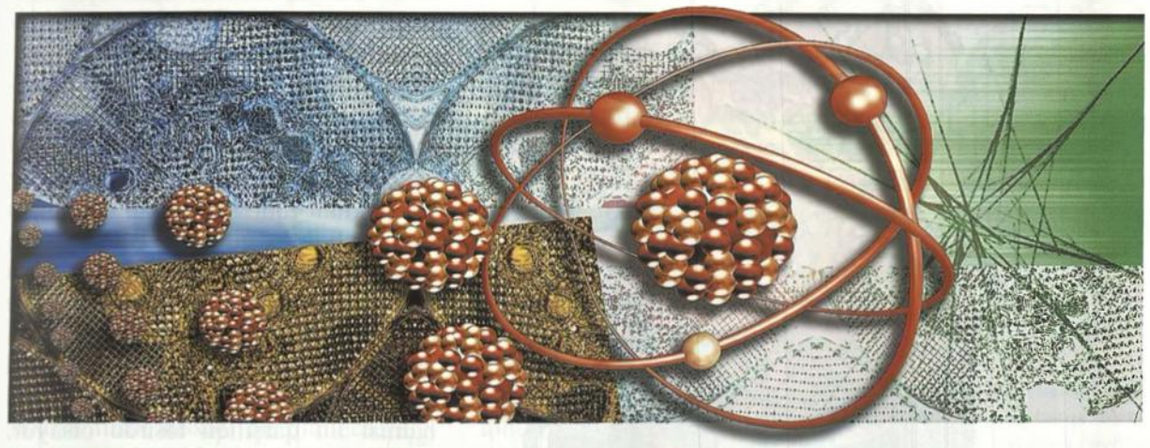
1932-ci ili çox vaxt elementar zərrəciklər fizikasında böyük kəşflər ili adlandırırlar. Rezerfordun tələbəsi Ceyms Çedvik neytronu kəşf etdi və bununla da, "azot fəlakəti" problemini və "nüvə elektronları" məsələsini birdəfəlik həll etmiş oldu. Amerika fiziki Karl Devid Anderson (1905-1991) kosmik şüalarda, Dirakın qabaqcadan xəbər vermiş olduğu "antielektronu" aşkar etdi. Antielektron pozitron adlandırıldı. Lakin fizikanın sonrakı inkişafı üçün ən mühüm kəşf ondan ibarət idi ki, zərrəciklər materiyanın məhvedilməz və yaradılmaz "kərpicikləri" deyil. Məlum oldu ki, zərrəciklər doğula və məhv ola (udula) bilər. 1934-cü ildə Enriko Fermi β-parçalanmanın nəzəriyyəsini təklif etdi. Bu nəzəriyyəyə görə nüvənin proton və neytronları β-parçalanma prosesində də bir-birinə qarşılıqlı çevrilə bilər və bu zaman 1930-cu ildə Paulinin qabaqcadan xəbər verdiyi zərrəciklə – neytrino ilə birlikdə pozitronlar (və ya elektronlar) doğulur.

Beləliklə, elementar zərrəciklər fizikası və nüvə fizikası özü üçün yeni olan dili, subatom qarşılıqlı çevrilmələr dilini öyrəndi. Bu çevrilmələr yalnız elektrik yükünün, izospinin, lepton və barion ədədlərinin və s. saxlanma qanunlarının məcəlləsi ilə tənzimlənir. Rusiyalı fiziklər Yakov Borisoviç Zeldoviç (1914-1987) və Maksim Yuriyeviç Xlopov qeyd etmişdilər: "Əbədi zərrəciklərin" əvəzinə, fizikaya "əbədi yüklər" gəlir... Bu ideyalar mikroaləmin müasir nəzəriyyəsinin əsasında durur".

Subatom aləminə dair yeni təsəvvürlərin nəzəri aparatı kvant sahə nəzəriyyəsi oldu. Bu nəzəriyyədə "Dirak dənizi", zərrəcikləri doğmağa və udmağa qadir olan vakuum haqqındakı təsəvvürlə əvəz olundu. Yeni dildə zərrəciklərin qarşılıqlı təsir prosesləri – qarşılıqlı təsir sahələrinin kvantları ilə mübadilə proseslərindən ibarətdir. Ardıcıl kvant dilinin işlənib hazırlanmasında çoxlu fiziklər iştirak etmişlər, lakin kvant əlifbasının özü – Pol Dirakın və Vladimir Aleksandroviç Fokun xidmətinin məhsuludur. Sahə kvantlarının doğulma və udulma operatorları anlayışını Fok daxil etmişdir; o, kvantlar üçün, bu gün Fok fəzası adlanan, universal və "rahat mənzil" tikdi. Bax, artıq yarım əsrdən çoxdur ki, fizik-nüvəçilərin və "sahəçilərin" cəmiyyəti həmin kvant dilində danışırlar. Lakin hər bir başqa dil kimi, kvant sahə nəzəriyyəsi də təkmilləşməkdə davam edir ki, özünün əsas funksiyasını – materiyanın ilkin əsasları haqqında insanlara informasiya daşımaq funksiyasını şərəflə yerinə yetirsin.



Volfqanq Pauli.



NÜVƏ FİZİKASI

NÜVƏLƏR NƏ İLƏ VƏ NECƏ YAŞAYIR

Ernest Rezerforddan hər dəfə nüvənin quruluşu haqqında soruşanda o, adətən aşağıdakı sözlərlə kifayətlənirdi: "Bordan soruşun". Lakin Nils Bor da uzun müddət ərzində məzmunlu cavab verə bilməmişdi. Aydınlaşdı ki, nüvələrin quruluşu atomların quruluşundan ölçüyəgəlməz dərəcədə zəngindir. Bununla belə, nüvənin ilk işlək modelini – damcı modelini məhz Bor təklif etmişdir. Sonra isə estafeti atasından Oqe Bor (1922-ci ildə doğulub) qəbul etdi. O, 1975-ci ildə başqa bir danimarkalı Bencamin Mottelsonla (1926-cı ildə doğulub) və Amerika Ceyms Reynuoterlə (1917-1986) birlikdə nüvənin ümumiləşmiş modelinə görə Nobel mükafatı almışdır. Belə ki, nəticədə Rezerfordun məsləhəti özünü doğrultmuş oldu. Bununla belə, bu yalnız tarixdən öncədir, nüvənin həqiqi tarixində isə yalnız ilk səhifələr yazılmışdır.

KÜTLƏ DEFEKTİNİN ÇOXLU EFFEKTİ

Nuklonları nüvədə bir-birinə bağlayan qarşılıqlı təsir xüsusi qüvvələrlə, nüvə qüvvələrilə təyin olunur. Onların kvarklar arasındakı güclü qarşılıqlı təsirlə əlaqəsi, təxminən molekullararası qarşılıqlı təsir qüvvələrinin elektromaqnit qüvvələrilə əlaqəsi kimidir. Ölçmələr göstərmişdir ki, nüvənin yükü ona daxil olan protonların yükləri cəminə bərabər olmasına baxmayaraq, nüvənin kütləsi nuklonların kütlələri cəmindən bir qədər kiçikdir. Çatışmayan kütlə hara yox olmuşdur? Cavab enerji ilə kütləni əlaqələndirən Eynşteynin məşhur $E = mc^2$ düsturundan alınır, burada c işıq sürətidir.

Nuklonları nüvədən azad etmək üçün, onları nüvədə saxlayan E_{rab} rabitə enerjisinə bərabər enerji sərf etmək lazımdır. Və əksinə, sərbəst nuklon-



Oqe Bor.



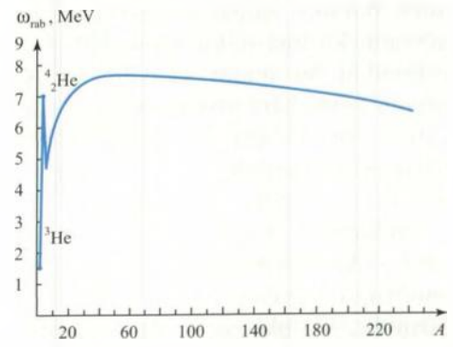
Atom nüvəsini işarə edərkən uyğun kimyəvi elementin işarəsindən solda iki ədədi göstərmək qəbul olunmuşdur: aşağıda (elementin Mendeleyev cədvəlindəki sıra nömrəsinə bərabər olan) elektrik yükünü, yuxarıda (*A* kütlə ədədi ilə üst-üstə düşən) barion yükünü göstərirlər. Məsələn, litium atomunun nüvəsinin işarəsi $^{7}_{3}$Li kimidir, yəni bu nüvə 7 nuklondan ($A=7$) ibarətdir, bunlardan 3-ü proton ($Z=3$) və 4-ü neytrondur ($A-Z=4$).

lardan nüvə əmələ gələrkən, həmin E_{rab} rabitə enerjisi ayrılmalıdır. Lakin enerjinin ayrılması nüvənin kütləsinin azalmasına – kütlə defektinə səbəb olur:

$$\Delta M = E_{rab}/c^2 = Zm_p + Nm_n - M_{nüvə}(Z, N).$$

Burada $M_{nüvə}(Z, N)$ – Z protondan və N neytrondan ibarət nüvənin kütləsi, m_p və m_n isə protonun və neytronun kütləsidir.

ω_{rab} xüsusi rabitə enerjisinin (bir nuklona düşən rabitə enerjisi $\omega_{rab} = E_{rab}/A$) nüvədəki nuklonların A sayından asılılığını əyri şəklində ifadə edirlər. Həmin asılılığın təhlili bir sıra nəticələr çıxarmağa imkan verir:



Nüvənin xüsusi rabitə enerjisinin nüvədəki nuklonların sayından asılılığı.

1. Yüngül nüvələr üçün əyri sərt yuxarı qalxır, ancaq $A=25$-dən başlayaraq 7-9 MeV intervalında qalır. Deməli, $A>25$ nüvələri üçün E_{rab} tam rabitə enerjisi nüvədəki nuklonların A sayı ilə təxminən mütənasibdir. Bu isə öz növbəsində onu göstərir ki, hər bir nuklon yalnız öz yaxın qonşuları ilə qarşılıqlı təsirdə olur. Bu xüsusiyyət nüvə qüvvələrinin təsir radiusunun kiçik olması ilə şərtlənmişdir (nuklonlar arasındakı məsafə təqribən 10^{-13} sm-ə bərabərdir). Doğrudan da, əgər hər bir nuklon qalan nuklonların hamısı ilə qarşılıqlı təsirdə olsaydı, onda rabitə enerjisi A ilə yox, A^2 ilə mütənasib olardı və buna uyğun olaraq, E_{rab}/A kəmiyyəti A-dan xətti asılı olaraq artardı. Deyiləni sadə misal üzərində izah edək: şagirdləri nüvədəki nuklonlara bənzədək; onların sayı N olsun. Bu cür iki "nuklon" arasındakı qarşılıqlı təsiri, onlardan hər birinin əlində olan kəndir parçası kimi təsəvvür edək, neçə həmsinif şagirdi ilə qarşılıqlı təsirdə olmağa icazə verilibsə, onların sayını k ilə işarə edək. Əgər $k=1$ isə, onda $N/2$ parça lazım olacaq (hamı cütlərə ayrılıb), $k=2$ olanda N parça gərəkdir (hamını dairə üzrə yerləşdiriblər və hər kəsin hər əlində bir kəndir var). Belə vəziyyət qısatəsirli qüvvələr üçün xarakterikdir. $k=3$ olanda isə, parçaların sayı $3N/2$ olur (dairədə hər bir iştirakçı əlavə olaraq üçüncü ilə də qarşılıqlı təsirdə olur). Baxılan hallarda $kN/2$ asılılığı həyata keçir və $k \ll N$ olanda, N-ə yaxın kəndir tələb olunur. Yox, əgər şagirdlərdən hər biri qalan $N-1$ şagirdlərin hamısı ilə qarşılıqlı təsirdə olursa, yəni $k=N-1$ isə (uzağa təsir olan hal), onda $(N-1)N/2$ kəndir tələb olunar. Deməli, böyük k-lar üçün və $N \gg 1$ üçün kəndirlərin ("qarşılıqlı təsirlərin") sayı N^2 olacaq, yekun rabitə enerjisi isə həmin ədədlə mütənasib olacaqdır ki, bunu da isbat etmək tələb olunurdu.

2. $A \geq 25$ olduqda bütün nüvələr üçün daxili oblastlarda nuklonların orta sıxlığı təxminən eynidir. Bu çox böyük ədəddir – 10^{38} nuklon/sm^3 və ya 10^{14} q/sm^3. Beləliklə, çoxnuklonlu nüvələr üçün *nüvə qüvvələrinin doyma şərti* ödənir. Doyma prosesi öz əksini məhz yüngül nüvələr üçün ε_{rab} əyrisinin sərt yuxarı qalxmasında tapır. A-nın böyük qiymətlərində səth nuklonlarının ε_{rab}-yə payı, bir qayda olaraq, böyük deyil. Bu səbəbdən nüvədə onların nisbi hissəsi az olduqca, ε_{rab} müəyyən bir sabit qiymətə bir o qədər yaxın olur (əyrinin üfüqi yaylası). Əyri Fe $\left(^{56}_{26}\text{Fe}\right)$ oblastında maksimuma çatır, sonra isə yavaş-yavaş enmə ilə əvəz olunur. 10^{-13} sm məsafədə protonlar arasındakı elektrostatik itələmə qüvvəsi nüvə cazibə qüvvəsindən 100 dəfə zəif olsa da, məhz bu elektrostatik itələmə hesabına ağır nüvələr üçün ε_{rab} azalır. Bu onunla izah olunur ki, qısa təsir nüvə qüvvələri A-nın artması ilə xətti artdığı halda, protonların uzağa təsir elektrostatik itələmə qüvvələri isə onların sayının kvadratı (Z^2) ilə mütənasib artır, nəticədə ε_{rab} getdikcə daha sürətlə azalır.



Səth nuklonları ilə nüvədaxili nuklonlar arasında öz qiymətinə görə müxtəlif qüvvələr təsir edir.

3. Qablaşdırma əmsalları əyrisində yalnız bir kəskin sıçrayış var – $^{4}_{2}$He helium nüvəsi üçün, burada ε_{rab}-nin qiyməti 7 MeV-i aşır. Böyük A-lar oblastında səlis əyridən cüzi meyil etmələr müşahidə olunur. Bu onunla bağlıdır ki, protonlarının və (və ya) neytronlarının sayı magik ədədlərə, yəni 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126-ya bərabər olan nüvələr ən dayanıqlı nüvələrdir (maksimal rabitə enerjisinə malikdir). $^{4}_{2}$He – helium nüvəsi isə ikiqat magikdir, yəni $Z=N=2$.

4. Qablaşdırma əmsalları əyrisinin təhlilindən alınan ən mühüm nəticə budur: elə nüvə reaksiyaları mümkündür ki, bu zaman əmələ gələn nüvələrin kütlə defekti ilkin nüvələrinkindən böyük olur. Belə olduqda, artıq kütlə enerjiyə çevrilməlidir. Doğrudan da, asanlıqla təsəvvür etmək olar ki, nüvədəki nuklonlar dərinliyi E_{rab}-yə bərabər olan çuxura batmışdır.

Bir halda ki, ən böyük kütlə defekti Mendeleyev cədvəlinin ortasına uyğun nüvələrdə müşahidə olunur, onda iki növ ekzotermik nüvə çevrilmələri mümkündür. Birinci – ağır nüvələrin orta nüvələrə bölünməsi. Bu zaman neytronun təsiri altında $^{235}_{92}$U uran izotopunun bir nüvəsindən 214 MeV-ə yaxın enerji ayrılır. Bu enerjinin təxminən 12 MeV-ni neytrino aparır, ona görə real ayrılan nüvə enerjisi 0,85 MeV/nuklon və ya $2{,}2 \cdot 10^7$ kVt/kq. təşkil edir. Bu, 1 kq neft yanarkən ayrılan enerjidən 2 mln dəfə böyükdür. XX əsrin sonunda dünyada istehsal olunan bütün elektrik enerjisinin 17%-i atom elektrik stansiyalarının payına düşür. Atom elektrik stansiyalarında birinci növ reaksiyalar həyata keçir.

İkinci növ reaksiya – iki yüngül nüvənin birləşmə reaksiyasıdır (məsələn, iki $^{2}_{1}$D deyterium nüvəsinin birləşib bir $^{4}_{2}$He helium nüvəsi əmələ gətirməsi). Birləşən nüvələrin artıq



Bir element nüvəsinin başqa element nüvəsinə çevrilməsi reaksiyasını çox vaxt iki çuxur arasında tunel çəkilişinə bənzədirlər. Əgər kənardan enerji verməsək (ekzotermik reaksiya), onda nuklonlar dayaz çuxurdan dərin çuxura "töküləcəkdir" və bu zaman kütlə defektinin artıqlığı reaksiya məhsullarının kinetik enerjisinə çevriləcək. Həmin enerjini ya bilavasitə istilik enerjisi kimi istifadə etmək, ya da elektrik enerjisinə çevirmək olar.

kütləsi də enerjiyə çevrilir. Bu reaksiyanı termonüvə reaksiyası adlandırırlar.

Yüngül nüvələrin idarə olunmayan sintez reaksiyası hidrogen bombasında həyata keçirilmişdir və artıq yarıməsrdir ki, fiziklər idarəolunan termonüvə sintezi problemi üzərində çalışırlar ("Plazma maddənin dördüncü halıdır" məqaləsinə bax).

Beləliklə, nüvə fizikası, nə vaxtsa bəşəriyyətin praktik ehtiyaclarından çox uzaq olmuş bu elm, indi kiçik tədqiqat laboratoriyalarından çıxaraq, sənaye inkişafının geniş yoluna qədəm qoymuşdur.

MİKROALƏMİN TOPLARI VƏ BUMERANQLARI

1935-ci ildə gənc yapon fiziki Hidoki Yukava nuklonları nüvədə bir-birinə bağlayan qüvvələri öyrənərkən, kütləsi elektronun kütləsindən böyük, ancaq nuklonun kütləsindən kiçik olan yeni zərrəciyin – *mezonun* (*yun.* "mezos" – "orta", "aralıq") mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verdi. Rusiyalı fizik İ.Y.Tammın hipotezinə görə (1934-cü il), fotonlarla mübadilə elektromaqnit qarşılıqlı təsirini şərtləndirdiyi kimi, bu zərrəcik də nüvə qarşılıqlı təsirinin daşıyıcısı olmalıdır.

Qonşu nuklonlar təsəvvüredilməz dərəcədə qısa vaxt ərzində (yəni virtual olaraq) mezonları buraxır və dərhal da udaraq, bir-birilə onları mübadilə edir ki, bu da nuklonlar arasında qarşılıqlı təsirin, yəni nüvə qüvvələrinin yaranmasına səbəb olur.

Aşağıdakı misallar üzərində mübadilə qarşılıqlı təsirlərinə baxaq. İki dost iki qayıqda üz-üzə oturaraq (və ya diyircəkli konki üzərində duraraq), topu bir-birinə atıb tutmağa başlayırlar. İmpulsun saxlanması qanununa görə, bu vəziyyətdə topun hər bir atılmasında təpmə, topu tutan anda isə itələmə yaranır. Bunun nəticəsində oynayanlar arasındakı məsafə artır. Topun köməyilə itələmə qüvvəsi belə həyata keçir. Cazibə mübadilə qüvvəsinin analoqunu fikirləşib tapmaq daha çətindir. Oyunçular bir-birinə arxalarını çevirməli və top əvəzinə bumeranqdan istifadə etməlidirlər. Birinci portnyor tərəfindən irəli atılmış bumeranq geriyə dönəcək və ikinci tərəfindən tutulacaqdır. Bumeranqı atmaqda davam etməklə, dostlar mütləq yaxınlaşacaqlar.



Nüvə qüvvələrinin təsir radiusunu bilərək, Yukava hesabladı ki, qarşılıqlı təsir daşıyıcısı olan zərrəciyin kütləsi təxminən 200-300 dəfə elektronun kütləsindən böyük olmalıdır. 1936-1937-ci illərdə Amerika fiziki Karl Anderson və Set Neddermayer, kosmik şüaları öyrənərkən kütləsi 207 elektron kütləsinə yaxın olan *müonu* kəşf etdilər. Əvvəlcə bunu Yukava nəzəriyyəsinin təsdiq olunması kimi başa düşdülər. Ancaq sonrakı tədqiqatlar göstərdi ki, müon nuklonların qarşılıqlı təsirinin daşıyıcısı ola bilməz. Ümumiyyətlə, müon alimləri çaşdırdı: məlum oldu ki, öz xassələrinə görə bu zərrəcik ən çox elektrona yaxındır. Lakin 1947-ci ildə ingilis fiziki Sesil Frank Pauell (1903-1969) öz əməkdaşlarıyla birlikdə kosmik şüalarda yeni zərrəcik aşkar etdi. Onu π-*mezon* və ya pion adlandırdılar; π-mezon 273 dəfə elektrondan ağırdır. Məhz bu zərrəcik nüvə qarşılıqlı təsirinin daşıyıcısıdır. Daşıyıcı rolunda pion o qədər qısa vaxtda (10^{-23} san tərtibində) çıxış edir ki, parçalanmağa macal tapmır. Sərbəst halda isə o, müondan 100 dəfə tez – orta hesabla $2 \cdot 10^{-8}$ san ərzində parçalanır. Həm

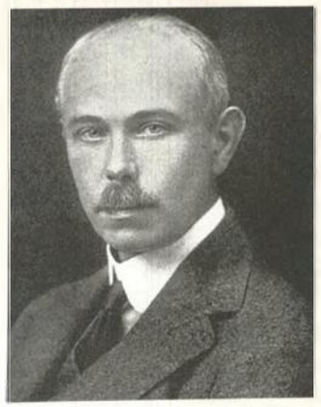


Hidoki Yukava (1907-1981) Yaponiyanın qədim paytaxtında – universitet şəhəri olan Kiotoda coğrafiya professorunun ailəsində doğulmuş, yeddi uşaqdan beşincisi olmuşdur. Evlənənə qədər onun adı Hidoki Oqava olmuşdur, lakin ailə quranda, yapon adətinə görə, arvadının familiyasını – Yukavanı götürmüşdür. 22 yaşlı fizik kvant mexanikası ilə özünün mezon qüvvələri nəzəriyyəsini qurmazdan altı il əvvəl Avropadan gəlmiş bir professorun mühazirələrində tanış olmuşdur. Mezonların mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verdiyinə görə, Yukava 1949-cu ildə Nobel mükafatı laureatı oldu.

KÜTLƏ DEFEKTİ NECƏ AŞKAR OLUNMUŞDUR

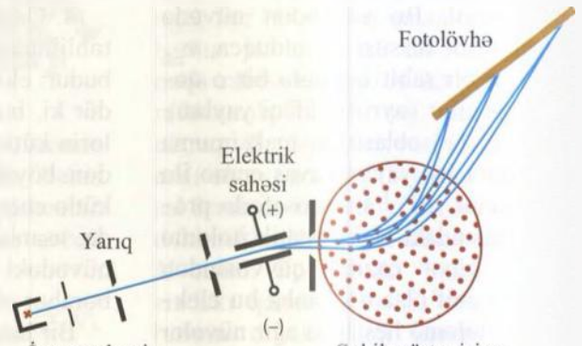
Atom nüvələrinin kütləsinin birbaşa ölçülməsi xüsusi cihazın – kütlə spektrometrinin köməyilə həyata keçirilir. Belə cihazın iş prinsipini 1907-ci ildə Cozef Tomson təklif etmiş və ilk kütlə-spektrlərini almışdır (1910-cu il). Lakin kütlə-spektroskopiyasının başlıca nailiyyətləri onun tələbəsinin – Frensis Uilyam Astonun (1877-1945) adı ilə bağlıdır.

1919-cu ildə özünün ilk kütlə-spektrometrini quraraq, Aston xlorun və civənin izotoplarını, sonrakı illərdə isə müxtəlif kimyəvi elementlərin daha 212 stabil izotopunu aşkar etdi. Tədqiqatçı sübut etdi ki, əksər elementlər bir neçə izotopun qarışığından ibarətdir. 1927 və 1937-ci illərdə o, əvvəlki modeli təkmilləşdirərək və daha yüksək ölçmə dəqiqliyinə nail olaraq, başqa iki kütlə-spektrometri yaratdı. Aston müəyyən etdi ki, nüvənin kütləsi, ona daxil olan zərrəciklərin kütlələri cəmindən bir neçə onda bir faiz kiçikdir. Alim bu hadisəni *qablaşdırma effekti* adlandırdı. İndi o, *kütlə defekti* adlanır (*lat.* defectus – "çatışmazlıq"). Bir sıra izotopların kütlə defektini təyin edərək, Aston atom nüvələrinin enerjisini xarakterizə edən ilk qrafiki – qablaşdırma əmsalları əyrisini qurdu.



F.U.Aston

Astonun metodikası maraq kəsb edir, yalnız ona görə yox ki, onun sayəsində izotoplar və kütlə defektləri haqqında məlumatlar alınmışdır. Bu metodika onu başa düşməyə kömək edir ki, transuran elementlərini qeydə alan cihazlar Aston kütlə-spektrometrləri ilə müqayisədə nə qədər də mürəkkəbdir. Bu elementlərin atomları dənə-dənə sintez olunur və deməli, onların ionlarının, kütlə-spektrometrinin işləməsi üçün zəruri olan selini yaratmaq qeyri-mümkündür. Digər tərəfdən, "transuran" ağır olduqca, o, bir o qədər tez parçalanır və onun bütöv bir dəstə parametrlərini təyin etməyə bir o qədər az vaxt qalır. Yeni elementləri tapmaq getdikcə çətinləşir, çünki onların izləri böyük ehtimalla yaranan elementlərin parçalanma məhsulları arasında "gizlənir".



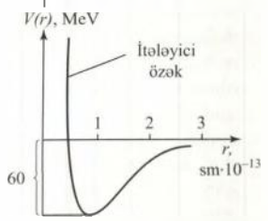
F.Astonun kütlə-spektrometrinin quruluşunun sxemi. İon mənbəyində atomlar ionlaşır, sonra 20-50 kV gərginlik tətbiq olunmuş elektrod üzərindəki dəlikdən keçərək sürətlənir. Sürətləndirilmiş ionlar onları paralel dəstələrə çevirən yarıqlar sistemindən (kollimatorlardan), sonra isə ardıcıl olaraq elektrik və maqnit sahələrindən buraxılır. Bu sahələr elə hesablanmışdır ki, müxtəlif sürətlərlə hərəkət edən, lakin yükünün kütləsinə nisbəti Q/m eyni olan ionlar fotolövhə üzərində eyni bir nöqtəyə fokuslansın. Müxtəlif ionların fotolövhə üzərindəki vəziyyətlərinə görə yüksək dəqiqliklə onların nisbi kütlələrini təyin etmək olar.

Elementlərin digər identifikasiya üsulları da tədricən yayılmağa başladı. Bunlar kimyəvi xassələrinə, parçalanma növlərinə və bu parçalanmaların periodlarına, parçalanma məhsullarına və s. görə elementlərin identifikasiyası üsullarıdır.



də nəzərə almaq lazımdır ki, pionlar triplet əmələ gətirir: ikisi yüklü mezon – π^+, π^- və biri neytral π^0-mezon.

Kvant nəzəriyyəsinə uyğun olaraq, nuklonların qarşılıqlı təsir radiusu daşıyıcı zərrəciyin kütləsilə tərs mütənasibdir. Qarşılıqlı təsir pionlar vasitəsilə həyata keçəndə, bu radius maksimal qiymətə, yəni $1{,}41 \cdot 10^{-13}$ sm-ə çatır. $r > 3 \cdot 10^{-13}$ sm olduqda nüvə qüvvələri praktik olaraq yox olur. $0{,}5 \cdot 10^{-13}$ sm-dən kiçik məsafələrdə isə nuklonlar arasında nəhəng itələmə qüvvələri yaranır ki, bunun da daşıyıcıları daha ağır olan ρ- və ω-mezonlardır.



Nuklonların qarşılıqlı təsir qüvvəsinin, onlar arasındakı r məsafəsindən asılılığı.

NUKLON DAMCISI MODELLƏRİN NÜMAYİŞİNİ AÇIR

Ümumi halda, nüvə bir-birilə güclü qarşılıqlı təsirdə olan çox cisim (nuklonların) kvant məsələsidir. Belə sistemin dinamikasını müasir analitik metodlarla təsvir etmək praktik olaraq qeyri-mümkündür.

Nüvədə nuklonların sayı o qədər çox deyil ki, kondensə olunmuş mühitlər (mayelər və bərk cisimlər) fizikasında uğurla işləyən statistik fizika metodlarını qeyd-şərtsiz istifadə edəsən.

Üç-dörd cisim məsələsi üçün kvant dinamikasının rusiyalı fizik-nəzəriyyəçi Lüdviq Dmitriyeviç Faddeyev (1934-cü ildə doğulub) tərəfindən işlənib hazırlanmış müasir metodları yalnız ən yüngül ${}^3_1\mathrm{H}$, ${}^3_2\mathrm{He}$, ${}^4_2\mathrm{He}$ nüvələri üçün ciddi miqdari nəticələr almağa imkan verir. Nəhayət, nuklonların tərkibə malik olması A nuklondan ibarət sistemi, ən azı, $3A$ kvarkdan ibarət sistemə çevirir ki, bu da nüvənin quruluşunun və xassələrinin təsvirini çox mürəkkəbləşdirir.



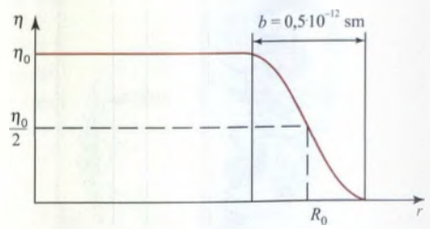
K.F. fon Vayzekker.

Ona görə də müəyyən fərziyyələr əsasında yaradılmış modellərə müraciət etmək lazım gəlir. Bunların sayəsində real prosesləri sadələşdirmək və nüvəni yaxşı öyrənilmiş hər hansı daha sadə bir fiziki sistemə bənzətmək mümkün olur.

Nüvə modelləri çoxdur. Onlardan hər biri nüvələrin müəyyən xassələri və xarakteristikaları çoxluğunu təsvir etməyə imkan verir. Nils Bor və alman nəzəriyyəçisi Karl Fridrix fon Vayzekker (1912-ci ildə doğulub) tərəfindən təklif olunmuş nüvənin damcı modeli, sonra Amerika alimi Con Arçibald Uiller və rusiyalı fizik Yakov İliç Frenkel tərəfindən inkişaf etdirildi. Bu modelə *hidrodinamik model* də deyirlər, çünki nüvələrin bəzi xarakteristikaları (sıxlığın, xüsusi rabitə enerjisinin və s. sabitliyi) mayelərin xassələrinə oxşardır.

Hidrodinamik modeldə nüvəyə neytron və proton "mayelərinin" qarışığından ibarət nuklon damcısı kimi baxılır, lakin nuklonlar bir-biri ilə güclü qarşılıqlı təsirdə olur. Buna əsaslanaraq, Vayzekker 1935-ci ildə nüvənin rabitə enerjisi üçün yarımemprik düstur vermişdir:

$$E_{rab} = \varepsilon A - \alpha A^{2/3} - \beta Z^2 A^{-1/3} - \gamma (N-Z)^2/A + \delta(A, Z) A^{-3/4}. \quad (1)$$



Nüvədəki nuklonların sayı sıxlığının məsafədən asılılığı; $R_0 = 1{,}08 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3}$ sm – nüvənin mərkəzindən olan elə məsafədir ki, bu zaman $\rho = 1/2\rho_0$.

Vayzekker düsturundakı ən böyük həddolan birinci həddgöstərir ki, rabitə enerjisi nüvədəki nuklonların A sayı ilə düz mütənasibdir. A sonsuzluğa yaxınlaşanda (nüvə o qədər böyüyür ki, ondakı səth nuklonlarının nisbi hissəsi getdikcə kiçilir) E_{rab}-nin azalması dayanır və ε – əmsalına – *nüvə materiyasının xüsusi rabitə enerjisinə* bərabər olur. Uyğun olaraq, bütöv nüvənin E_{rab} rabitə enerjisinə həcmi pay $E_{həcm}$ belə olur:

$$E_{həcm} = \varepsilon A. \quad (2)$$

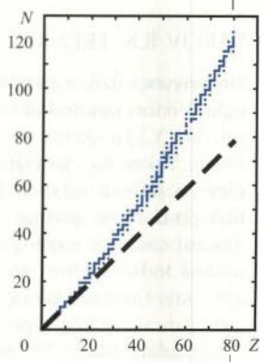
Nüvənin səthində yerləşmiş nuklonlar daxili nuklonlarla müqayisədə daha az sayda rabitəyə malikdir. Nəticədə sonlu ölçülü istənilən real nüvə üçün rabitə enerjisi $E_{səth}$ qədər az olacaqdır (ikinci hədd). Bu hədd nüvənin səthi ilə, yəni $A^{2/3}$:

$$E_{səth} = -\alpha A^{2/3}. \quad (3)$$

Bununla da maye damcısı ilə analogiya qurtarır. Bundan sonra spesifik nüvə effektlərilə hesablaşmaq lazım gəlir. İndi ondan başlayaq ki, əgər $E_{səth}$ və $E_{həcm}$ həddlərilə kifayətlənsək, məlum olar ki, *izobar* (*yun.* "izos" – "bərabər", "baros" – "ağırlıq") nüvələrdə, yəni eyni A-ya, lakin müxtəlif Z və N-ə malik olan nüvələrdə rabitə enerjisi eynidir və onların hamısı stabil olacaqdır. Həqiqətdə isə NZ diaqramında dar stabillik zolağına düşən nüvələr stabildir. Lakin yüngül nüvələrdən $N=Z$ olan izobarlar, ağır nüvələrdən isə $N>Z$ olan izobarlar stabildir. Bu qanunauyğunluğu əlavə iki hədd, yəni Kulon enerjisini və asimmetrik enerjini daxil etməklə nəzərə almaq olar. (1) düsturunda protonların Kulon itələmə enerjisini ifadə edən üçüncü hədd onu əks etdirir ki, neytron artıqlığı olan dayanıqlı izobar-nüvələr əmələ gəlir. Radiusu $A^{1/3}$ ilə mütənasib olan və protonları daxilində bərabər paylanan nüvə damcısı üçün Kulon enerjisi

$$E_{kul} = -\beta Z^2 A^{-1/3}. \quad (4)$$

Neytron artıqlığı bütöv bir qrup izobar nüvələrin stabilliyini yox, NZ diaqramında yalnız dar bir zolaqda yerləşən nüvələrin stabilliyini təmin etdiyinə görə (bu, eksperimental sübut olunmuşdur), asimmetriya enerjisini nəzərə almaq lazımdır. Bütün izobar nüvələr üçün onun rolunu ΔM kütlə defektlərinin Z-dən asılılıq əyriləri yaxşı nümayiş etdirir.



NZ – diaqramında nüvələrin stabillik zolağı (N – neytronların sayı, Z – protonların sayıdır).

Asimmetriya enerjisi E_{asimm} (dördüncü hədd) mikroaləmin fundamental qanunlarından birinin – Paulinin qadağan prinsipinin nəticəsidir: proton və neytronlarının sayı eyni olmayan nüvələrin rabitə enerjisi, proton və neytronlarının sayı eyni olan nüvələrin rabitə enerjisindən xeyli kiçikdir:

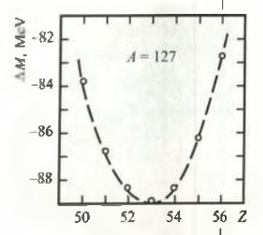
$$E_{asimm} = -\gamma (N-Z)^2/A. \quad (5)$$

(5) düsturundan görünür ki, onun tam enerjiyə verdiyi mənfi pay N ədədi Z-yə yaxın olduqca kiçik olur, yəni əgər Kulon itələməsi olmasaydı, ən simmetrik nüvələr, yəni $N=Z$ və ya $A=2Z$ olan nüvələr ən dayanıqlı olardı. Həqiqətdə isə, stabil ağır nüvələrdə neytronlar protonlardan çoxdur, yəni $A>2Z$. (1) düsturunda axırıncı, beşinci hədd cütləşmə enerjisi adlanır:

$$E_{cütl} = \delta(A, Z) A^{-3/4}.$$

Eksperimental sübut olunmuşdur ki, cüt-cüt nüvələr (Z və N cüt ədədlərdir) qonşu cüt-tək nüvələrə nisbətən, sonuncular da, öz növbəsində, tək-tək

> $A>10$ olduqda nüvədə nuklonların sayının orta sıxlığı təxminən eynidir. Ona görə də nüvə damcısının həcmi A ilə, onun xətti ölçüləri (radiusu) $A^{1/3}$ ilə, səthinin sahəsi isə $A^{2/3}$ ilə mütənasibdir.



Kütlə ədədi $A=127$ olan izobar nüvələr üçün ΔM kütlə defektinin protonların Z sayından asılılığı.

YAKOV İLİÇ FRENKEL

Nəzəriyyəçi fizik Yakov İliç Frenkelin (1894-1952), onun oğlu Viktor tərəfindən yazılmış tərcümeyi-halını köhnə stil ilə "Y.İ.Frenkelin həyatı və məktubları" adlandırmaq olardı. Yakov İliçi tanıyanların məktublarından, xatirələrindən və müəllif tekstlərindən hərtərəfli, istedadlı, müasir fizikada dərin iz qoymuş bir insanın obrazı yaranır. Frenkel fizikanı cəsarətli nəzəriyyələrlə zənginləşdirmiş, tələbələr dəstəsi tərbiyə etmiş, şərhin yeniliyinə və anlaşılanlığına görə tayı-bərabəri olmayan dərsliklər və monoqrafiyalar yazmışdır: "Dalğa mexanikası" (1933-1934-cü illər), "Elektrodinamika" (1934-1935-ci illər), "Statistik fizika" (1933-cü il), "Vektor və tenzor analizi əsasında nəzəri mexanika kursu" (1940-cı il), "Mayelərin kinetik nəzəriyyəsi" (1945-ci il). Elmin kütləviləşdirilməsi sahəsində də alimin çıxışları az uğurlu olmamışdır. "Müdiriyyətin" – istedadlı nəzəriyyəçinin öz qüvvəsini hər tərəfə səpələməsindən narazı qalan akademik A.F.İoffenin məzəmmətinə baxmayaraq, Frenkel bu işi inadla davam etdirirdi.



Dəqiq elmlərə marağının necə yarandığını sonralar Frenkel belə xatırlayırdı: riyaziyyata və fizikaya həvəsim olduğunu ilk dəfə 14 yaşımda hiss etmişəm. 5-ci sinfi qurtaranda mən bütün gimnaziya riyaziyyat kursunu, gimnaziyanı qurtaranda isə universitet riyaziyyat, mexanika və fizika kurslarının çox hissəsini mənimsəmişdim. Təəssüf ki, bütün vaxtlarda mənim rəhbərim olmayıb və mən müstəqil məşğul olmaq məcburiyyətində qalmışam".

1910-cu ildə, yay tətili dövründə, gənc Frenkel H.A.Lorensin ikicildlik "Ali riyaziyyatın elementləri" kitabını və K.A.Possenin ali riyaziyyat kursunu əsaslı surətdə dərindən öyrənmişdir. Gərgin müstəqil çalışmalar 1910/11-ci tədris ilində arzuolunmaz kəşfə səbəb oldu. Həkimlər gəncin ürəyində xəstəlik aşkar etdilər. Frenkelin atasının dediyinə görə, bu xəstəlik gərgin məşğuliyyətin nəticəsi idi. Yalnız böyük çətinliklə Frenkel sevdiyi fənləri öyrənməyi davam etdirmək hüququnu qoruyub saxlaya bildi.

Elə həmin vaxtda, onun ilk müstəqil tədqiqatlarını qeyd etdiyi müşəmbəli dəftərləri peyda oldu. Yüz səhifəlik "Silsilə hesabı" işini (1911-ci il) Frenkel ədədi və həndəsi silsilələrin ümumiləşməsinə həsr etmişdi. Riyaziyyatçı V.Y.Uspenskiyə təqdim olunmuş iş həm tərifə, həm də amansız tənqidə məruz qaldı. 1912-ci ilin oktyabrında Yer maqnetizminin və elektrikinin nəzəriyyəsini qurmaq cəhdi haqqında A.F.İoffe kəskin fikir söylədi. Bu cür gərgin elmi fəaliyyətin müqabilində Frenkelin məzunu olduğu Peterburq gimnaziyasının pedaqoji şurasının protokollarında onun haqqındakı rəylər daha təəccüblü görünür: "Ən zəif şagirdlər... Frenkel. Qabiliyyətləri zəif olduğundan çətdırmırlar" (oktyabr, 1909-cu il); "Frenkel – ortaqabiliyyətli şagirddir, kifayət qədər çalışmır" (dekabr, 1909-cu il). Doğrudur, 1912-ci ilin martında rəylərin fərq incəliyi dəyişmişdi: "Frenkel çox qabiliyyətlidir, gələcəkdə alim ola bilər". 1913-cü ildə Frenkel gimnaziyanı qızıl medalla bitirib, Peterburq universitetinin fizika-riyaziyyat fakültəsinə daxil olmuşdur.

Universitet kursunu bitirdikdən sonra (1916-cı il), Frenkel Krım universitetində fizikanı tədris etməyə başladı (1918-1921-ci illər), Peterburqa qayıtdıqdan sonra, 1921-ci ildən isə eyni zamanda Fizika-Texnika İnstitutunda və Politexnik İnstitutunda işləmiş və burada 30 ildən artıq müddətdə nəzəri fizika kafedrasına rəhbərlik etmişdir.

Elmdən başqa, Frenkel uşaq yaşlarından başlayaraq, bütün ömrü boyu iki şeyə: rəssamlığa və skripkada çalmağa aludə olmuşdur. Onun Rembrandt stilində çəkdiyi dilənçinin portreti 40 ildən sonra Leninqradda Alimlər evində sərgidə nümayiş etdirilmişdir.

İdeyalarının dərinliyinə görə klassik olan Frenkel dünyanı iti rəssam baxışları ilə müşahidə edərək, elmi işlərində sadə və əyani obrazlardan istifadə edirdi. Onun nəşr etdirdiyi işlərə bilicilər tərəfindən yüksək qiymətləndirilən və yalnız böyük ustadlara məxsus bir "fikrin musiqiliyi" xasdır. Onun özü də böyük ustadlardan biri idi.

O dövr üçün yeni olan kvant mexanikasını metalların elektron nəzəriyyəsinə tətbiq edərək, Frenkel elektrikkeçiriciliyinin kvant nəzəriyyəsinin əsaslarını qoydu. O göstərdi ki, metallarda keçiricilik elektronlarının kinetik enerjisi kvant şərtləri ilə təyin olunur və praktik olaraq temperaturdan asılı deyil. 1926-cı ildə o, kristal qəfəsin defektləri ("Frenkelə görə defektlər") anlayışını və dəlik keçiriciliyi (kristal boyunca deşiyin – kristal qəfəsin boş düyününün hərəkəti) haqqında təsəvvürü daxil etmişdi. İfadəli və ona görə tez kök salmış "çuxur" termini Y.İ.Frenkelə məxsusdur.

V.Heyzenberqdən asılı olmadan Frenkel, ferromaqnetizmin kvant-mexaniki nəzəriyyəsini, Y.Q.Dorfmanla birlikdə isə ferromaqnetiklərin domen quruluşunun nəzəriyyəsini qurdu (1930-cu il). Frenkel işığın bərk dielektriklər tərəfindən udulmasının nəzəriyyəsini işləyib hazırladı və həyəcanlanmaların kvantları – eksitonlar ideyasını irəli sürdü (1931-ci il). O, tunel kvant effektinə (zərrəciklərin, klassik baxımdan zərrəciklər üçün keçilməz olan çəpərdən, "divardan" keçməsi) dair təsəvvürləri metal-yarımkeçirici kontaktında cərəyanın düzlənməsi nəzəriyyəsinə tətbiq etdi (1932-ci il).

1936-cı ildə Frenkel həyəcanlanmış atom nüvəsinin temperaturu anlayışını daxil etdi və onun parçalanmasını "qızmış" nüvədən zərrəciklərin buxarlanması kimi şərh edirdi. Həmin dövrdə də o, N.Bordan asılı olmadan nüvənin damcı modelini qurdu, 1939-cu ildə isə N.Bordan və C.Uilerdən asılı olmadan ağır nüvələrin bölünməsi nəzəriyyəsinin əsaslarını qoydu və onların spontan (özbaşına) bölünmə prosesini qabaqcadan xəbər verdi.

Frenkelin diqqət mərkəzində olan təkcə kvant fizikası deyildi. 1940-cı illərin axırı, 1950-ci illərin əvvəlində onun T.A.Kontorova ilə birlikdə yaratdığı kristalların plastikliyinin mikroskopik nəzəriyyəsi indiyədək bu növ yeganə nəzəriyyə olaraq qalır. Son illər müxtəlif ölkələrdə yerinə yetirilən çoxsaylı tədqiqatlar Frenkel-Kontorovanın sırf klassik modelinin işlənib hazırlanmasına həsr olunmuşdur. Geofizika, astrofizika və biofizika elmləri də Frenkelin diqqətindən kənarda qalmamışdır.

Onun modelləri zamanın sınağından çıxdı və kvant mexanikasının yaranması ilə əyani modellər erasının axırının çatdığını və aşkar fiziki məna daşımayan kəmiyyətlər üzərində mücərrəd əməliyyatlar erasının başladığını zənn edənlərin qərəzli tənqidlərini rədd etdi.

Alimin elmi maraqlarının genişliyi öz əksini yalnız məqalə və monoqrafiyalarında yox, həm də Frenkelin həlli üzərində onun özünün və tələbələrinin işlədiyi çoxlu sayda problemlərin və sualların siyahısı olan qeyd kitabçalarında da tapmışdır.

Gərgin elmi tədqiqatları Frenkelə təsviri sənətlə, bədii ədəbiyyatla və musiqi ilə maraqlanmasına mane olmurdu. "Elmdənkənar" maraqları onun dünyaya "simfonik" baxışlarını onsuz da zənginləşdirirdi.

nüvələrə nisbətən daha dayanıqlı edir. Bu üç hal δ parametri ilə təsvir olunur:

$$\delta = \begin{cases} 33{,}57 \text{ MeV}, & N \text{ və } Z \text{ cütdür}, \\ 0, & A \text{ təkdir} \\ -33{,}57 \text{ MeV}, & N \text{ və } Z \text{ təkdir}. \end{cases}$$

Vayzekker düsturuna daxil olan sabitlərin qiymətlərini eksperimental məlumatlara əsasən hesablayırlar. Təcrübə ilə optimal uzlaşma sabitlərin aşağıdakı qiymətlərində alınır:

$$\varepsilon = 14{,}03 \text{ MeV}; \quad \alpha = 0{,}5835 \text{ MeV};$$
$$\beta = 13{,}03 \text{ MeV}; \quad \gamma = 77{,}25 \text{ MeV}.$$

Vayzekker düsturunun empirik düstur olmasına baxmayaraq, o, nüvə fizikasının bir çox problemlərini həll edərkən çox faydalıdır. Onun köməyilə, məsələn, uranın və plutoniumun tək izotoplarının yavaş neytronların təsirilə bölündüyünü qabaqcadan xəbər verdilər.

Nüvə yanacağının axtarış istiqaməti bu cür müəyyən olundu ki, bu da 1940-cı illərdə hərbi atom proyektlərinin inkişafına və 1950-ci illərdə atom energetikasının yaranmasına həlledici təsir göstərdi.

Vayzekker düsturunun bütün parametrləri təcrübə ilə müqayisədən təyin edilmişdir. Burada amerikan fiziki, məşhur hazırcavab Harri Lipkinin sözlərini xatırlamaq yerinə düşərdi: "Mənə üç parametr verin, mən fil düzəldim. Əgər mənə dördüncü parametri də versəniz, mən onu vadar edərəm ki, xortumlarını yelləsin". Bu elə bir dövrdə yazılmışdı ki, əksər fiziklər özlərinin hər bir ideyasını, həddən çox sərbəst parametr daxil etmək hesabına, mövcud təcrübi məlumatlara "kökləməyə" çalışırdılar. Bunlara baxmayaraq, Vayzekker düsturunun evristik və qabaqcadan xəbərvermə dəyəri şübhəsizdir.

Başqa bir cəhət də vacibdir: bu düsturdakı parametrlərin bir hissəsini alimlər nüvə qüvvələri haqqındakı məlumatlar əsasında hesablamağa çalışırlar. Bu, birinci növbədə, nüvə materiyasının rabitə sabiti ε-dur. ε-hipotetik sonsuz ağır nüvəni əmələ gətirən maddənin xassələrini bilavasitə təyin edir. Hesab edirlər ki, ən böyük ölçüdə bu cür nüvənin xassələri neytron ulduzlarında reallaşır.



TRANSURAN EPOPEYASI



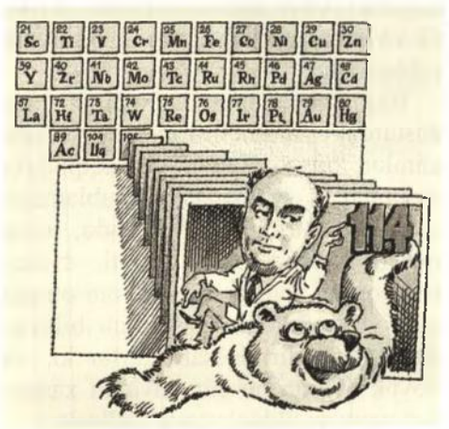
Dubna elmi cəmiyyətinə daxil olan ölkələrin bayraqları ilə birlikdə Dubnanın emblemi.

Bəzi mənbələrdə 105-ci element, əvvəlki kimi, nilsborium (Nils Borun şərəfinə) və ya hanium (alman radiokimyaçısı Otto Hanın adı ilə) adlanır.

1869-cu ildə, Mendeleyev kimyəvi elementlərin dövri qanununu kəşf edən zaman, cəmi 63 element məlum idi. Bu gün Mendeleyev cədvəlində 100-dən çox kimyəvi element vardır. Onların arasında Moskva vilayətinin Dubna şəhərinin şərəfinə adlandırılmış 105-ci element də var. Dubna şəhərində beynəlxalq elmi mərkəz – Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu yerləşir.

Məhz burada, Nüvə reaksiyaları laboratoriyasında 1960 və 1970-ci illərdə nəinki təkcə 105-ci element, həm də cədvəldə ona qonşu olan bir neçə element süni olaraq sintez edilmişdir. Bu laboratoriyaya, 1957-ci ildən, onun əsası qoyulandan Georgi Nikolayeviç Flerov (1913-1990) başçılıq etmişdir. İndi bu laboratoriya Flerovun adını daşıyır.

1999-cu ildə isə bütün dünya alimləri sensasiyalı xəbər eşitdilər. Dubnada məlum elementlərdən ən ağırı və lap çoxdan gözlənilən 114-cü element alınmışdır. Nə dərəcədə çoxdan gözlənilən olduğunu, beynəlxalq konfranslar üçün olduqca qeyri-adi olan aşağıdakı epizoddan başa düşmək olar. 1960-cı illərin axırında Dubnada keçirilən konfransların birində ifratağır elementlərin sintezi problemi müzakirə olunurdu. G.N.Flerov öz çıxışını onunla başladı ki, o, kafedranı ağ ayı dərisi ilə örtüb dedi: – Kim 114-cü elementi əldə etsə, bu ona priz olacaqdır. Baxılan elementin kəşfinin əhəmiyyətini tam mənası ilə aydınlaşdırmaq üçün atom nüvəsinin quruluşuna baxaq. Bizə həm də Mendeleyev cədvəlinin süni alınmış elementlərlə tədricən doldurulmasının tarixi də lazım olacaqdır.



QEYRİ-STABİLLİK DƏNİZİNDƏKİ ARXİPELAQIN MƏSKUN EDİLMƏSİ

İstənilən kimyəvi element özünün atom nömrəsi Z ilə, yəni nüvədəki protonların sayı ilə birqiymətli təyin olunur. Lakin neytronların sayı N bundan az və ya çox ola bilər. Yalnız nüvəsinin kütləsilə (yəni neytronların sayı ilə) fərqlənən element atomları (və nüvələri) *izotoplar* adlanır. İzotoplar, onların atom kütləsini təyin edən uyğun A ədədi ilə, yəni nuklonların $A = Z + N$ sayı ilə işarə olunur. Elementin bütün izotopları eyni kimyəvi xassələrə və təxminən eyni fiziki xassələrə malikdir, çünki atomun elektron örtüklərinin quruluşu nüvənin Z yükündən asılıdır. Lakin Z-in qeyd olunmuş qiymətində, müxtəlif N-ə və deməli, müxtəlif A-ya malik nüvələrin xassələri bir-birindən kəskin fərqlənə bilər. Söhbət, ilk növbədə, onların dayanıqlığından gedir.

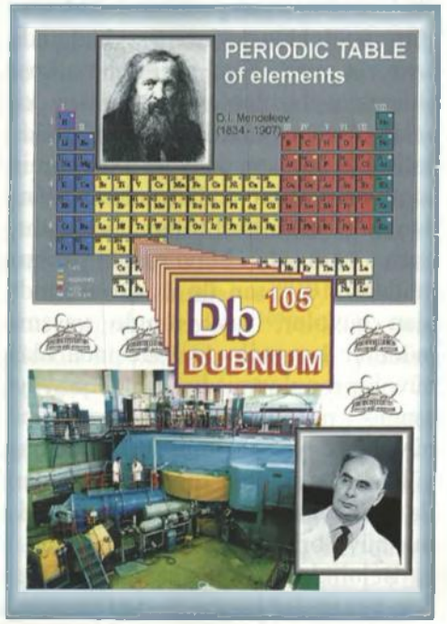
Stabil və *qeyri-stabil* (*radioaktiv*) izotoplar mövcuddur. Hər bir qeyri-stabil izotop özünün *yarımparçalanma periodu* ilə – həmin izotop nüvələrinin başlanğıc sayının yarısının parçalanmasına sərf olunan zaman müddətilə xarakterizə edilir. Yarımparçalanma perioduna yaxın olan kəmiyyət – *izotopun orta yaşama müddəti* də tətbiq olunur.

Nüvələrin qeyri-stabilliyinin səbəblərini bir az sonra aydınlaşdırarıq. Hələlik isə, XX əsrin əvvəlində kəşf olunmuş üç növ radioaktivliyin nüvələrin hansı metamorfozlarına səbəb olduğuna baxaq.

α-parçalanma zamanı (iki protondan və iki neytrondan ibarət olan helium nüvəsini buraxarkən) başlanğıc parametrləri Z və A olan nüvədən parametrləri $Z-2$ və $A-4$ olan nüvə alınır. β-parçalanma zamanı (elektron buraxarkən) neytronlardan biri protona, parametrləri Z və A olan nüvə isə parametrləri $Z+1$ və həmin A olan nüvəyə çevrilir. Nəhayət, γ-kvant, yəni böyük enerjili foton buraxarkən, nüvə enerjisinin bir hissəsini itirir, əvvəlki Z və A parametrlərini isə dəyişməz saxlayır. Beləliklə, α-parçalanma zamanı Mendeleyev cədvəlində başlanğıc elementə nəzərən iki xana solda yerləşən element, β-parçalanma zamanı isə bir xana sağda yerləşən element əmələ gəlir.

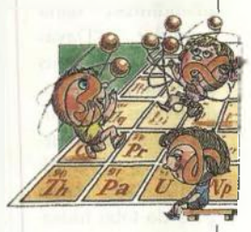
Hər bir elementə bütöv bir izotoplar dəstəsi uyğundur. Bu gün onların tam cəmi 2 mindən çoxdur. Yəni real Mendeleyev cədvəli üçölçülüdür. Ancaq, elementlərin periodiklik xassəsindən əl çəksək, üçölçülü cədvəli ikiölçülü cədvələ çevirmək, yəni izotopların xəritəsini tərtib etmək olar. Bunun üçün üfüqi ox üzrə neytronların N sayını, şaquli ox üzrə isə protonların Z sayını götürmək lazımdır. Onda hər bir Z-in qarşısında getdikcə sağa doğru daha çox uzaqlaşan xanalar – izotoplar xətti uzanır. Məlum nüvələr dəstəsi üçün, izotopların xəritələri mövcuddur. Bu xəritələrdə izotopların əsas xarakteristikaları (yarımparçalanma periodu, parçalanmanın növləri və s.) verilmişdir. Onlardan biri şəkildə göstərilmişdir.

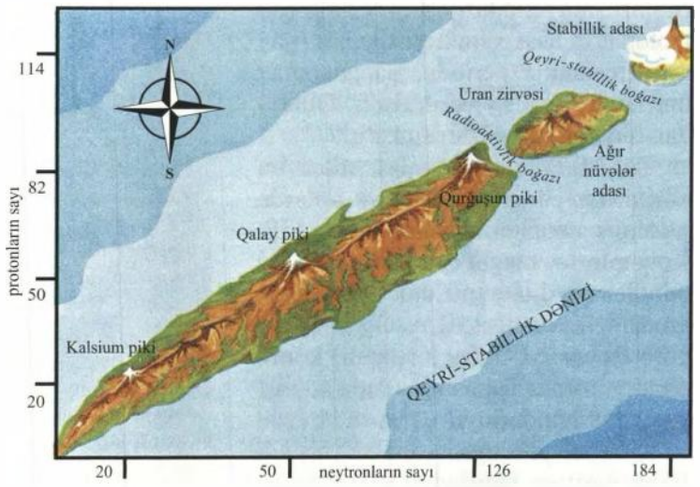
Coğrafi xəritəni təqlid edən bu xəritə hər cür xanalardan və onlarda yazılmış xarakteristikalardan azaddır. Rəqəmlərlə magik ədədlər adlanan ədədlər qeyd olunmuşdur. Onlar haqqında sonra danışacağıq. Görünüşünə görə bu xəritə, üçüncü (şaquli) koordinatı – torpaq sahəsinin dəniz səviyyəsindən hündürlüyü və ya su hövzəsinin dərinliyi rənglə işarə edilmiş adi fiziki xəritəni xatırladır. Bizim halda koordinatları N və Z olan hər bir izotopun görünməyən xanası rənglə qeyd olunmuşdur ki, bu da izotop nüvəsinin orta yaşama müddətinə uyğun gələn intervalı işarə edir. Fiziki xəritə



Kompozisiyada D.İ.Mendeleyevin portreti, dövri cədvəl (ilk variantda yox, 1970-ci illərin ortasına uyğun gələn şəkildə), G.N.Flerovun portreti və ağır ionların sürətləndiricisi verilmişdir. Bu sürətləndiricinin köməyi ilə yeni elementlər alınmışdır.

Daha bir β^+-parçalanma da mövcuddur. Bu zaman e^+ pozitron buraxılır və nüvənin protonlarından biri neytrona, parametrləri Z və A olan nüvə isə parametrləri $Z-1$ və həmin A olan nüvəyə çevrilir. β-parçalanma zamanı element bir xana sola sürüşür.





yer qabığının hündürlüyə görə paylanması haqqında təsəvvür verdiyi halda, izotoplar xəritəsi bütün məlum olan və hətta kəşf olunmamış izotoplar dəstəsinin, onların bir mühüm xarakteristikaları olan orta yaşama müddətinə görə üçölçülü paylanması haqqında təsəvvür verir. Yaşıl rənglə hələ kəşf olunmamış izotoplar (ola bilsin ki, onlar olduqca kiçik yaşama müddətlərinə görə, ya da N və Z-in həmin kombinasiyasının reallaşmaması üzündən heç vaxt kəşf olunmayacaqdır) işarə olunmuşdur. Mavi rənglə yaşama müddəti 10^{-10} san ilə 1 san arasında olan nüvələr, yaşıl rənglə yaşama müddəti 1 san ilə 1 il arasında olan nüvələr rənglənmişdir. Tünd-qəhvəyi rənglə 1 mlrd ildən çox yaşayan stabil nüvələr qeyd olunmuşdur. Ağ rəng yüksək dayanıqlığı olan və qonşuları ilə müqayisədə təbiətdə geniş yayılmış nüvələri göstərir.

"Stabillik adasını" "Dayanıqlıq adası" adlandırmaq daha doğrudur. "Dayanıqlıq" daha geniş anlayışdır; məsələn, deyterium stabildir, ancaq xarici təsirlərə qarşı dayanıqlı deyil, bax buna görə də təbii hidrogendə onun payı 0,015% təşkil edir.

Beləliklə, xəritədə aşağı sol küncdən yuxarı sağ küncə doğru ("cənub – qərbdən" "şimali-şərqə" doğru) dar "Stabillik arxipelaqı" uzanmışdır. Stabillik arxipelaqının tam düz xətt olmayan oxu boyunca bir neçə "qarlı zirvəsi" olan "dağ silsiləsi" uzanır. Silsilənin qolları yaşıl "dərələrə" enir, bu "dərə" "Qeyri-stabillik dənizinin" dayaz yerlərilə qovuşur. "Arxipelaq" "Radioaktivlik körfəzini" kəsir. Bu körfəzdə Mariya və Pyer Kürilərin kəşf etdikləri radium, polonium və onların Mendeleyev cədvəlindəki yaxın qonşuları olan astat, radon, fransium və aktinium yerləşir. Yük ədədləri $Z = 84$-dən $Z = 89$-a qədər olan bu altı elementin bütün izotopları qeyri-stabildir: izotoplardan uzunömürlülərinin yaşama müddəti 22 dəq-dən (fransiumun izotopu) 102 ilə qədər (poloniumun izotopu) intervalda yerləşir. "Şimal-şərqdə" olan sonuncu yüksək "zirvələr", Yerdə təbii şəraitdə rast gələn elementlərdən ən ağırı olan urana məxsusdur. Onun sıra nömrəsi 92, ən stabil izotopu olan ^{238}U-in yarımparçalanma periodu 4,5 mlrd ildir ki, bu da Yerin qiymətləndirilmiş yaşına – 4,7 mlrd ilə yaxındır.

XX əsrin sonunda sıra nömrəsi böyük olan elementlərdən artıq 21-i məlum idi. Bunlar *transuran elementlər* (urandan sonrakı) adlanan elementlərdir. Onlar qeyri-stabildir və onların orta yaşama müddəti Yerin yaşından xeyli kiçikdir. Təəccüblü deyildir ki, urandan fərqli olaraq, onlar təbiətdə tapılmaq üçün kifayət edən miqdarda qalmamış və yalnız nüvə reaksiyaları yolu ilə alınmışdır. Yalnız ilk iki transuran element – neptun Np ($Z = 93$) və plutonium Pu ($Z = 94$) – onların artıq süni yolla alınmasından sonra, təbiətdə cüzi miqdarda urana qarışmış şəkildə tapılmışdır.

Transuran elementlər ağır olduqca, onlar bir o qədər tez parçalanır. Onların ən dayanıqlı izotoplarının da yaşama müddəti, yəni xəritədə "hündürlüyü", milyon ildən (neptunun izotopu) saniyənin mində birinə qədər (107-ci elementin izotopu) azalır. Başqa sözlə, "arxipelaq" çox sürətlə "Qeyri-stabillik dənizi"nə qərq olur. Bəs uzaq "şimal-şərqdə", "dənizdən" qalxan o nə "Stabillik adası"dır? Bu ada Z və N-nin qiymətlərinin elə oblastındadır ki, orada sanki dayanıqlı nüvələr haqqında heç düşünmək də olmaz. Onun zirvəsini bürümüş buludlar altında hansı sirlər yatır? Əgər bu "xəyal" yox, həqiqətdirsə, onda gələcəkdə bu "terra incognita"nın əldə olunub mənimsənilməsi nüvə energetikası üçün hansı perspektivləri vəd edir?

ƏDƏDLƏRİN MAGİYASI VƏ ONUN DOĞURDUQLARI

Son illərdə transuran elementlərin problemi̇nə maraq kəskin artmışdır. Bunu, məsələn, o fakt sübut edir ki, 1999-cu ildə aparıcı rusiyalı fiziklərdən biri Vitali Lazareviç Ginzburq (1916-cı ildə doğulub) ifratağır elementlərin və ekzotik nüvələrin tədqiqini XXI əsrdə fizikanın ilk 30 "xüsusilə vacib və maraqlı problemlərinə" aid etmişdir. İş ondadır ki, hələ 1960-cı illərin sonunda Z ədədi 110 ilə 114 arasında yerləşən ifratağır elementlərin, ola bilsin, bundan da ağır elementlərin ($Z = 126$ bölgəsində) "Stabillik adasının" mövcud olduğu qabaqcadan xəbər verilmişdi. Ona görədir ki, XX əsrin sonunda kütlə ədədi 289 olan 114-cü elementin bütöv 30 saniyə yaşayan izotopunun sintez edilməsi sensasiya oldu.

Nüvələr ağırlaşdıqca onların stabillik sərhədi yaranır, bu çəpərin arxasında, ondan uzaqda isə ifratağır element nüvələrinin dayanıqlılığı kəskin artır. İlk baxışda bu qədər qəribə görünən belə asılılığın səbəbi nədədir?

Məlumdur ki, nüvədə nuklonları nüvə qüvvələri tutub saxlayır, halbuki protonların itələnməsinə səbəb olan elektrik qüvvələri nüvəni dağıtmağa çalışır. Nüvələrin dayanıqlığı bir növ məhz bu iki qüvvənin münasibətindən asılıdır: elektrostatik itələnmə enerjisinin sementləyici nüvə qüvvələri enerjisindən üstün olması nüvənin daha yüngül nüvələrə parçalanmasını doğurmaya bilməz. Hesablara görə, belə yanaşma zamanı Z-in artması ilə nüvənin dayanıqlılığı və deməli, həm də stabil elementlərin sayı azalmalıdır. Həqiqətdə isə, müşahidə olunan dayanıqlı elementlərin sayı, hesablamadan alınan saydan iki dəfə çoxdur.

Müəyyən edilmişdir ki, nüvənin stabilliyi daha çox *örtük effektləri* ilə təyin olunur. Hələ 1930-cu illərin əvvəlində fiziklər qəribə qanunauyğunluqlar aşkar etmişdilər: neytronların N və ya protonların Z sayı 2, 8, 20, 28, 50, 82 və 126 olan nüvələr yüksək dayanıqlılığı ilə seçilir. O vaxt müşahidə olunan bu effekt tamamilə anlaşılmaz olduğundan, həmin sirli ədədləri, həm də nüvələri magik ədədlər və magik nüvələr adlandırmağa başladılar. Həm protonlarının, həm də neytronlarının sayı magik ədədlərə bərabər olan nüvələr isə ikiqat magik nüvələr adlandırıldı. Bunlar ən dayanıqlı izotoplardır. Məsələn, yük ədədi $Z = 82$ və neytronlarının sayı $N = 126$ olan qurğuşun izotopu ^{208}Pb kimi. Ona görədir ki, xəritədə onlar ən "yüksək zirvələr" kimi təsvir olunmuşdur.

Göstərilən qanunauyğunluq nəinki müxtəlif izotopların yaşama müddətinin təyin edilməsilə, həm də onların təbiətdə yayılması ilə təsdiqləndi (element dayanıqlı olduqca, o, Yer qabığında bir o qədər çox qalmalıdır). Yük ədədi $Z = 50$ olan qalay, neytronların sayı $N = 82$ olan barium və ya artıq adı çəkilmiş ^{208}Pb izotopu kimi elementlər, Mendeleyev cədvəlində onlara yaxın yerləşmiş elementlərə nisbətən Yerdə xeyli çoxdur.

Sonralar magik ədədlərin mənasını aydınlaşdırmaq mümkün oldu, ancaq adı indiyədək saxlanılmışdır. Atomlardakı elektronlar kimi, nüvələrdəki nuklonlar da neytron və proton örtükləri əmələ gətirir. Magik nüvələr ən dayanıqlıdır: belə nüvələrdə örtüklər, təsirsiz qaz atomlarındakı kimi dolub.

ANTUAN ANRİ BEKKEREL

Tarixdə çoxlu misallar göstərmək olar ki, eyni bir ailənin nümayəndələri bir-birini əvəz edərək, insan fəaliyyətinin bu və ya digər sahəsində parlamışlar. Bernulli riyaziyyatçıları, mexanik və fizikləri, Kassini astronomları, Küri fizikləri...

Paris Təbii Tarix Muzeyinin fizika kafedrasının və eyni zamanda İncəsənət və Peşə Konservatoriyasının ("saxlanılan yer") başçıları 1838-ci ildən 1948-ci ilə qədər, 110 il ərzində Bekkerellər ailəsinin nümayəndələri olmuşlar. Əslində kafedra Anri Bekkerelin babası, Paris Elmlər Akademiyasının üzvü (1829-cu ildən) və onun prezidenti (1838-ci ildən) Antuan Sezar Bekkerel (1788-1878) üçün təsis edilmişdi.

Antuanın üçüncü oğlu Aleksandr Edmon Bekkerel (1820-1891) 1852-ci ildə irsən kafedraya "varis olmuşdur". O, eksperimentlər aparmaqda atasına kömək edərək, kristalların fosforessensiyası ilə maraqlanmış və hələ 1858-ci ildə öz işlərinin birində qeyd etmişdi ki, "uran birləşmələri ən parlaq işıqlanma verir". 1878-ci ildə atasının ölümündən sonra, Aleksandr Edmon Təbii Tarix Muzeyinin direktoru oldu. Onun oğlu, Antuan Anri Bekkerel (1852-1908) Parisdə Politexnik Məktəbini bitirmiş (1874-cü il), Paris universitetinin təbiət elmləri fakültəsində doktorluq dissertasiyası müdafiə etmiş (1888-ci il) və 1889-cu ildə Paris Elmlər Akademiyasına üzv seçilmişdir. Aleksandr Bekkerelin ölümündən sonra, o, "ailənin" fizika kafedrasına başçılıq etmişdir (1891-ci il). Ənənə 1948-ci ildə, Anrinin oğlu Jan Bekkerel istefaya çıxandan sonra qırılmışdır.

Bütün Bekkerellərdən yalnız Antuan Anri öz adını əbədiləşdirdi. 1896-cı il yanvarın 20-də o, Paris Elmlər Akademiyasının iclasında ilk dəfə öyrəndi ki, V.K.Rentgenin bu yaxınlarda aşkar etdiyi *X*-şüalar, katod şüalarının vakuum borusunun divarına dəydiyi və divarı fluoressensiya etməyə məcbur etdiyi yerdə əmələ gələn parlaq ləkədən çıxır. "Fosforessensiya edən maddələr də bu cür şüalanma buraxmır ki?" – Bekkerel fikirləşdi. Hələ 15 il əvvəl, atası ilə işlədiyi vaxtdan topladığı fosforessensiya edən maddələrdən (o cümlədən uran duzlarından) müxtəlif nümunələr götürərək, o, öz mülahizəsini laboratoriyada yoxladı.

Fosforessensiya edən preparatları Günəş işığında ekspozisiyaya vermək tələb olunurdu, onlar bu cür "yüklənirdi". Preparatları qaranlığa gətirdikdən sonra işıqlanma sönürdü – maddə "boşalırdı". Eksperiment sadə idi: Bekkerel fotolövhəni işıqkeçirməyən ikiqat qara kağıza büküb, onun üzərinə içərisində fosforessensiya edən kristallar olan kiçik nəlbəki qoymuşdu. Aydınlaşdırdıqdan sonra fotolövhədə kristalların konturları aşkar görünürdü. Katod şüalarının təsiri altında yaranan fluoressensiyanın vakuum borusu şüşəsini *X*-şüalar buraxmağa məcbur etdiyi kimi, belə təsəvvür yarandı ki, guya günəş işığının təsiri altında baş verən məcburi fosforessensiya, həmin preparatları *X*-şüalar buraxmağa vadar edir.



Antuan Anri Bekkerel.

1896-cı il fevralın axırında Bekkerel daha bir eksperiment nəzərdə tutmuşdu: işıqkeçirməyən kağıza bükülmüş fotolövhə üzərinə qoyulmuş və içərisində uran duzları olan nəlbəkinin altında mis xaç yerləşdirdi. Lakin duzları ekspozisiyaya verməyi təxirə salmaq lazım gəldi: Parisdə bir neçə gün hava tutqun oldu. Bekkerel də günəşli günləri gözləyərək, bütün konstruksiyanı bufetin gözünə qoymuşdu. 1896-cı il martın 1-də, bazar günü, havanın açılmasını gözləməyən Bekkerel, hər ehtimala qarşı, fotolövhəni aydınlaşdırmağı qərara aldı və fotolövhədə xaçın konturlarını görəndə təəccübləndi. Bekkerelin 1896-cı ildə 18 yaşı tamam olan oğlu Jan xatırlayırdı ki, kəşf atamı çaşdırmışdı: uran duzları işıqkeçirməyən kağız təbəqəsindən keçən və işığın təsirilə "yüklənmədən" fotolövhə üzərində aydın iz qoyan şüalanma buraxırdı.

Anri Bekkerel təbii radioaktivlik hadisəsini diqqətlə öyrənməyə başladı və bu hadisənin, maddənin quruluşuna dair təsəvvürlərdə hansı dönüşə səbəb olacağını, ondan sonra hansı kəşflərin olacağını və həmin kəşflərin bütün bəşəriyyətin taleyinə necə təsir edəcəyini heç ağlına da gətirmirdi. 1903-cü ildə radioaktivliyi kəşf etdiyinə görə Anri Bekkerel fizika üzrə Nobel mükafatına layiq görüldü.

PYER VƏ MARİYA KÜRİLƏR

Kürilər Anri Bekkerellə birlikdə Nobel mükafatını bölüşdürdülər. "Radioaktivlik" termini məhz Mariya Küriyə məxsusdur. Bütün dünyada hamının hörmətlə madam Küri adlandırdıqları Mariya Küri 1911-ci ildə ikinci dəfə Nobel mükafatına layiq görüldü, ancaq bu dəfə kimya üzrə, yeni kimyəvi elementlərin – poloniumun və radiumun kəşfinə görə. Mariya Kürinin özünəməxsus bu rekordunu yalnız kimya üzrə Nobel mükafatı (1954-cü il) və Sülh üzrə Nobel mükafatı (1962-ci il) almış Laynus Polinq, həmçinin elmi nəticələri fizika üzrə iki: 1956-cı ildə (U.Bratteynlə birlikdə ilk yarımkeçirici tranzistor hazırladığına görə) və 1957-ci ildə (L.Kuper və C.Şrifferlə birlikdə ifratkeçiriciliyin mikroskopik nəzəriyyəsini işləyib hazırladığına görə) Nobel mükafatı ilə qeyd olunmuş Con Bardin təkrarladılar.

Pyer Küri (1859-1906) həkim ailəsində doğulmuşdur. İlk təhsilini evdə almış, 16 yaşında olanda isə Sorbonna universitetinin tələbəsi olmuşdur. 1877-ci ildə ona magistr dərəcəsi verildikdən sonra, o, 22 yaşında məktəbdə fizika və kimyanı tədris etməyə başladı. Pyer Küri fizikanın müxtəlif sahələrinə çox mühüm pay vermişdir. Qardaşı Jakla birlikdə Pyer Küri *düzünə pyezoelektrik effektini* kəşf etmişdir: müəyyən istiqamətlərdə kvars kristalını sıxanda və ya dartanda onun üzlərində elektrik yükü yaranır (1880-ci il). Düzünə pyezoelektrik effektinin nəticəsi həmin vaxtda da Küri qardaşlarının aşkar etdiyi tərs pyezoelektrik effektidir: *tərs pyezoelektrik effekti* ondan ibarətdir ki, kvars kristalının üzlərini elektrikləndirdikdə, o, mexaniki deformasiyaya uğrayır. Bu gün pyezoelektrik xassələrinə malik olan min beş yüzdən çox kristal məlumdur. Jak və Pyer Kürilər kiçik elektrik yüklərini və zəif cərəyanları ölçmək üçün ilk pyezoelektrik qurğu (datçik) düzəltdilər. Pyer Küri kristalların göyərmə nəzəriyyəsini işləyib hazırladı, onların böyüməsinin ümumi prinsipini formulə etdi və kristal üzlərinin səth enerjisi anlayışını daxil etdi (1884-1885-ci illər). Kristalların simmetriyasını öyrənərək, o, indi onun adı ilə adlanan prinsip irəli sürdü. Bu prinsip xarici təsir altında olan kristalın simmetriyasını müəyyən etməyə imkan verir (1894-cü il).



Pyer və Mariya Küri. 26 iyul 1895-ci il.

P.Küri cisimlərin maqnit xassələrinə temperaturun təsirini tədqiq etdi. 1895-ci ildə o, müəyyən etdi ki, diamaqnetiklərin maqnit qavrayıcılığı temperaturdan asılı deyil, paramaqnetiklərdə isə temperaturla tərs mütənasibdir (*Küri qanunu*). 1895-ci il yeni kəşflə nəticələndi: elə temperatur var ki, ondan yuxarı temperaturlarda dəmirin ferromaqnit xassələri yox olur, başqa xassələri isə sıçrayışla dəyişir (*Küri nöqtəsi*).

Mariya Sklodovskaya (1867-1934) Varşavada müəllim ailəsində dünyaya gəlmişdir (o dövrdə Polşa krallığı Rusiya imperiyasına daxil idi). Mariya məktəbdə əla oxuyurdu, lakin qadınlar üçün Rusiyada ali təhsil almaq yerinə yetirilməz arzu idi.

Mariya səkkiz il mürəbbiyə işləmiş və demək olar ki, bütün maaşını Parisdə tibbi öyrənən bacısı Bronislavaya göndərmişdi. 1891-ci ildə bacısı diplom aldı və ərə getdi. Həmin ildə də Mariya Parisə bacısının yanına getdi və Sorbonna daxil oldu. 1893-cü ildə o, fizika üzrə yekun imtahanlarda birinci yeri, 1894-cü ildə isə riyaziyyat imtahanlarında ikinci yeri tutdu.

Pyer Küri ilə Mariya Sklodovskayanın əlamətdar görüşü 1894-cü ildə baş verdi; 1895-ci il iyulun 25-də onlar evləndilər.

Bekkerel tərəfindən radioaktivliyin kəşfindən dərhal sonra (1896-cı il) ər-arvad Kürilər, radioaktiv materialları planlı surətdə tədqiq etməyə başladılar. Onlar eksperimentləri hərfi mənada anbarda aparırdılar. Bir neçə il işləməsinə baxmayaraq, Mariya Küriyə əməkhaqqı vermədilər, yalnız 1904-cü ildə Pyer Küri Sorbonnada fizika profesoru olanda, Mariyanı assistent vəzifəsinə götürdülər. Həqqiqətdə isə ər-arvadın birgə işi bərabər səviyyəli adamların əməkdaşlığı idi. Tonlarla uran filizini yuyaraq, onlar oradan yeni element – poloniumu (Mariyanın vətəni Poloniyanın şərəfinə adlandırılmışdır; Poloniya – Polşanın latınlaşdırılmış adıdır), uran qatranından isə radiumu (*lat.* "radio" – "şüa buraxıram") ayırmağa nail oldular. 1903-cü ildə Mariya Sklodovskaya-Küri Fransada doktor elmi dərəcəsinə layiq görülmüş ilk qadın olmuşdur.

Ər-arvad Kürilər Nobel mükafatı aldıqdan sonra, Sorbonnada Pyer üçün fizika kafedrası və laboratoriyası təşkil olundu (1904-cü il).

Bu laboratoriya sonralar Radium institutuna çevrildi. Küri tez-tez xəstələnirdi. Yəqin ki, radioaktiv materiallarla işləmək özünü göstərirdi. (Ər-arvad Kürilərin laboratoriya jurnallarının saralmış vərəqlərindən indi də, həyat üçün təhlükəli olan radioaktiv şüalanma çıxır.) Pyer Küri bədbəxt hadisə nəticəsində həlak oldu: 1906-cı il aprelin 19-da o, küçəni keçərkən sürüşdü və qarşıdan gələn maşının altına düşdü. Mariyanın iki qızı qaldı: İren və Yeva. İren (1897-1956) valideynlərinin yoluyla getdi – fizik-alim həyat yolunu seçdi. 1935-ci ildə o, əri Frederik Jolio-Küri (Pyer və Mariyanın başladığı tədqiqatların davam etdirilməsi şərəfinə arvadının familiyasını öz familiyasına birləşdirdi) kimya üzrə Nobel mükafatına layiq görüldü. Sorbonnda Pyer üçün açılmış kafedra Mariyaya keçdi. 1910-cu ildə madam Küri radioaktivlik haqqında fundamental kitab çap etdirdi, dörd ildən sonra isə yenicə açılmış Radium institutunda (Paris) radioaktivlik laboratoriyasına rəhbərlik etməyə başladı. Birinci Dünya müharibəsi dövründə Mariya Küri İrenlə birlikdə şəxsi ianə hesabına rentgen qurğuları ilə təchiz olunmuş səyyar hospitallar düzəltdi və Qırmızı Xaç Cəmiyyətinin radioloji xidmətinə rəhbərlik etdi.

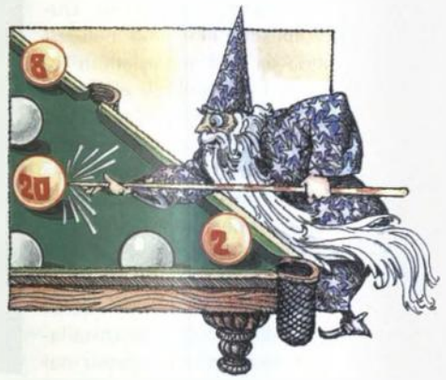
Müharibədən sonra Mariya müxtəlif ölkələrdə elmin problemlərinə dair mühazirələrlə çıxış etdi. Onun təşəbbüsü sayəsində Radium institutunda tədqiqat məqsədilə xeyli radioaktiv materiallar ehtiyatı toplamaq mümkün oldu (ilk sürətləndiricilər qurulana qədər). Məhz bu materiallar yüksək dərəcədə İren və Frederik Jolio-Kürilər tərəfindən süni radioaktivliyin kəşf edilməsinə kömək etdi.

Ər-arvad Kürilərin şərəfinə izotopların aktivlik vahidi küri (Ki) və atom nömrəsi 96 olan kimyəvi element Cm (kürium), Mariyanın vətəni Polşanın şərəfinə isə 84-cü element Po (polonium) adlandırılmışdır.

İQOR YEVGENYEVİÇ TAMM

Böyük universitet auditoriyasında sakitlik idi. Bu sakitlikdə ingiliscə astaca danışıq eşidildi. Kafedrada saçları ağarmış Nils Borun boyu görünürdü. Böyük danimarkalının yaşı əlliyə yaxınlaşırdı.

Atom fizikası tarixinə ilk nüvə modellərinin yaradıldığı il kimi daxil olmuş 1934-cü il idi. Kvant yeniliklərilə maraqlanan universitet gəncləri və onların müəllimləri bu modellər haqqında "Borun özündən" eşitmək arzusunda idilər...



ÇERENKOV-VAVİLOV EFFEKTİ

1934-cü ildə γ-şüalanmanın təsiri altında mayelərin lüminessensiyasını tədqiq edərkən, P.A.Çerenkov aşkar etdi ki, onlar zəif mavi şüalanma buraxır. Bu şüalanmanı nə mayeni qızdırmaqla, nə də lüminessensiyanı söndürən maddələr qatmaqla kəsmək mümkün deyildi. Çerenkov, elmi rəhbəri S.İ.Vavilovun təklifi ilə, bir sıra eksperimentlər qoydu. O sübut etdi ki, işıqlanma bütün təmiz şəffaf mayelərdə, onların kimyəvi tərkibindən asılı olmadan, müşahidə olunur və lüminessensiyadan fərqli olaraq, elə polyarizə olunmuşdur ki, onun elektrik sahəsinin intensivlik vektoru əsasən γ-şüalar dəstəsi boyunca yönəlmiş olur. Bu təcrübələrin nəticəsini təhlil edərək, S.İ.Vavilov çox mühüm bir qərara gəldi: mavi işıqlanma lüminessensiyadan fərqli təbiətə malikdir. O, γ-şüalanmanın maye atomlarından vurub çıxardığı və mayedə hərəkət edən sürətli elektronlarla şərtlənmişdir. Bu şüalanmanı əvvəllər də müşahidə etmişdilər, hətta 1926-1929-cu illərdə onun spektri də alınmışdı. Lakin P.A.Çerenkovun eksperimentlərinə və S.İ.Vavilovun təhlilinə qədər heç kəs bunun yeni hadisə olduğunu başa düşməmişdi. Onun P.A.Çerenkov tərəfindən 1936-cı ildə müəyyən olunmuş qəribə xassəsi də heç kim tərəfindən kəşf olunmamışdı: şüalanma elektronun sürətinə itibucaq altında yönəlmişdir.

Çerenkov-Vavilov effekti (və ya şüalanması) adını almış bu şüalanmanın mexanizmi 1937-ci ildə İqor Yevgenyeviç Tamm və İlya Mixayloviç Frank tərəfindən müəyyən olundu. Onlar klassik elektrodinamika tənliklərinə əsaslanaraq, yeni hadisənin xüsusiyyətlərini izah edən nəzəriyyə təklif etdilər. V.L.Ginzburq Çerenkov-Vavilov effektinə kvant nəzəriyyəsi mövqeyindən baxaraq, 1940-cı ildə həmin nəticəyə gəldi. Yeni şüalanmanın kəşfinə görə S.İ.Vavilov 1946-cı ildə Dövlət mükafatına layiq görüldü.

Sonralar aşkar edildi ki, Çerenkov-Vavilov effekti bərk cisimlərdə və dalğalarda da müşahidə olunur. İ.Y.Tammın və İ.M.Frankın göstərdikləri kimi, bu şüalanma o vaxt yaranır ki, mühitin atomlarından qoparılan elektronlar bu mühitdə işıq dalğalarından böyük sürətlə hərəkət etsin.

Yüksək enerjili zərrəcikləri qeydə alan, onların sürətini ölçən və kütləsini hesablayan cihazlar Çerenkov-Vavilov effekti əsasında işləyir ("Çerenkov sayğacları").

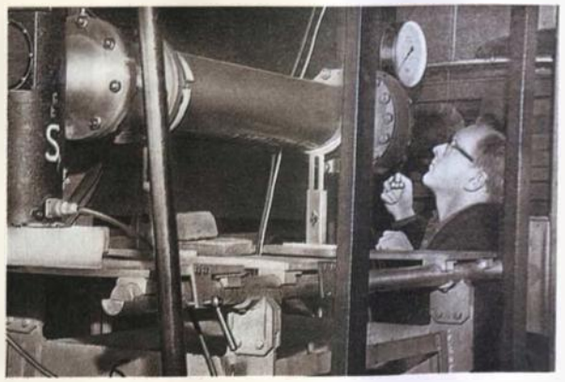
Çerenkov-Vavilov effektini kəşf və şərh etdiklərinə görə 1958-ci ildə P.A.Çerenkov, İ.Y.Tamm və İ.M.Frank fizika üzrə Nobel mükafatına layiq görüldülər. Eksperimentlərin təşəbbüskarı olan S.İ.Vavilov 1951-ci ildə vəfat etdi və Nobel mükafatının təqdim edilməsi qaydalarına görə laureatlar siyahısına daxil edilməmişdir.



P.A.Çerenkov.



S.İ.Vavilov.

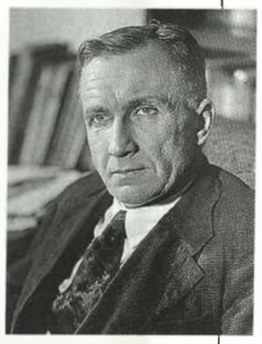


Vavilov-Çerenkov şüalanması sayğacı. BNTİ. Dubna.

Bor yavaş-yavaş danışırdı, lakin nitqi çox da aydın deyildi. Auditoriya səbirsizliklə tərcüməni gözləyirdi. Tərcüməçi professor İqor Yevgenyeviç Tamm (1895-1971) idi. O, danışığında və hərəkətlərində iti idi və kafedranın xarici qonağına heç bənzəmirdi.

Universitetdə hamı bilirdi ki, professor Tamm çox gözəl dilmancdır. Dinləyicilərin xüsusi marağı bir də onunla izah olunurdu ki, məruzəçi və tərcüməçi öz işlərində nüvə qüvvələrinin təbiəti haqqında bir-birindən xeyli fərqli təsəvvürləri inkişaf etdirirdilər.

Cavan olan professor Tamma (heç qırx yaşı tamam olmamışdı) coşqun inkişaf edən kvant fizikası sahəsində artıq "adlı" nəticələr məxsus idi: işığın kristallardan səpilməsinin Tamm nəzəriyyəsi, Tamm səviyyələri, Kleyn-Nişina-Tamm düsturu, Tammın mübadilə qarşılıqlı təsiri. Axırıncı nəticəni İqor Yevgenyeviç özünün əsas nailiyyəti hesab edirdi. Baxmayaraq ki, 20 ildən də çox vaxt keçəndən sonra, 1958-ci ildə Nobel mükafatını 1930-cu illərə aid olan tamam başqa bir işinə görə – qəribə effekt sayılan Çerenkov-Vavilov effektinin nəzəriyyəsinə görə almışdır.



İ.Y.Tamm. 1930-cu illərin əvvəli.

MÜƏLLİM VƏ TƏLƏBƏ

Sergey İvanoviç Vavilov (1891-1951) Moskvada tacir ailəsində doğulmuşdur. Bu ailə Rusiyaya və bütün dünyaya yalnız gözəl fizik yox, həm də Sergey İvanoviçin böyük qardaşı olan görkəmli bioloq Nikolay İvanoviç Vavilovu da bəxş etmişdir.

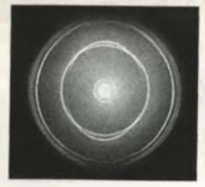
Moskva universitetini qurtaran kimi S.İ.Vavilovu orduya çağırdılar (1914-1918-ci illər), 1918-ci ildən başlayaraq o, öz həyatını elmə həsr etdi.

S.İ.Vavilovun elmi maraq sferası fiziki optika olmuşdu. Onun işləri işığın təbiətinin və lüminessensiyanın enerji asılılığının başa düşülməsinə əhəmiyyətli pay vermişdir. 1923-cü ildə o, V.L.Levşinlə birlikdə işığın kvant təbiətini sübut edən geniş tsikl tədqiqatlar yerinə yetirmişdir: 1927-ci ildə, indi *Vavilov qanunu* adlanan qanun, yəni kvant çıxışının həyəcanlaşdırıcı şüalanmanın dalğa uzunluğundan asılılığını müəyyən etdi, Çerenkov-Vavilov effektinə gətirib çıxaran eksperimentlər təklif etmişdir.

Həmin ildə də S.İ.Vavilov "Elmin klassikləri" seriyasının bünövrəsini qoydu. Bu seriyada böyük alimlərin əsərləri rus dilində nəşr olunurdu. Nyutonun "Optika" əsərinin, İ.Nyutonun və M.V.Lomonosovun bioqrafiyaları, "Göz və Günəş", "İsti və soyuq işıq haqqında" kimi elmi-kütləvi kitablar S.İ.Vavilovun qələminə məxsusdur.

1945-ci ildən S.İ.Vavilov SSRİ Elmlər Akademiyasının prezidenti, elmi məktəbin rəhbəri olmuşdur. Fiziki Problemlər İnstitutuna və Dövlət Optika İnstitutuna S.İ.Vavilovun adı verilmişdir.

Pavel Alekseyeviç Çerenkov (1904-1990) Voronej yaxınlığındakı Yeni Çiqla kəndində anadan olmuşdur. Voronej universitetini 1928-ci ildə bitirdikdən sonra iki il müəllimlik etmişdir. Bir tədqiqatçı kimi P.A.Çerenkov S.İ.Vavilovun təsiri ilə formalaşmış və eksperimentlər aparmışdır. Bu eksperimentlər sayəsində yeni şüalanma kəşf edildi.



İslandiya şpatı kristalında protonlar dəstəsi vasitəsilə həyəcanlandırılan Vavilov-Çerenkov şüalanması.



İ.M.Frank.

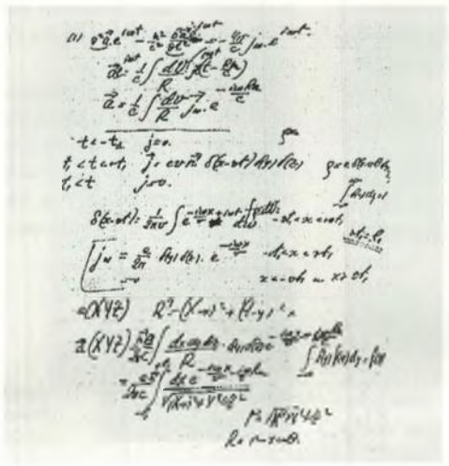
Türingiya – Almaniyada torpaq (federativ vahid).

Alma-mater (*lat.* alma mater – "süd verən ana") "mənəvi qida" verən mənasında universitetin qədimi tələbəlik adı.

Effektin qəribəliyi onda idi ki, ilk baxışdan bu effekt, sadəcə, qeyri-mümkün görünürdü. Maddənin içərisində işıqdan tez hərəkət edən elektronlar şüalanma verirdi, lakin belə sürət, guya ki, nisbilik nəzəriyyəsi ilə qadağan olunmuşdur. Kiçik dəqiqləşdirmə hər şeyi xilas etdi: işığın vakuumdakı sürətindən böyük sürət qadağandır, maddənin (maye və ya qazın) içərisində işığın özü yavaş hərəkət edir. Bu sürəti aşmağa elektronların "hüququ var idi"! Tammın Nobel işində (İ.M.Frankla birgə) dəqiq riyaziyyat və incə fizika qələbə çaldı.

Laureatların kolleqaları tədqiqatların müəllif özünüqiymətləndirilməsinə görə mübahisə edə bilərlər, elm tarixçiləri özünüqiymətləndirilmə ilə razılaşmaya bilərlər. Ən axırı, burada müxtəlif fikirlər o qədər də vacib deyil. Ancaq bununla belə dərin istedad və özünə tənqidi yanaşma bir-birilə çulğalaşanda müəllifin öz yaradıcılığına verdiyi qiymət daha vacib olur. Bəlkə bu, məhz dahinin tərifidir? Əgər belədirsə, onda İqor Yevgenyeviç Tamm, şübhəsiz, dahi idi.

Sözgəlişi deyək ki, Tammın erkən gəncliyində kiçik bir hadisə baş vermişdi. Bu hadisə, müasir fizikanın tanınmış dahisi Volfqanq Paulinin gəncliyində başına gəlmiş kiçik bir hadisə ilə tam eyni idi.



Tammın, mütəhərrik elektronun enerjisini hesablayarkən apardığı qeydləri göstərən səhifə.

Gənc nəzəriyyəçi olan Pauliyə ensiklopediya üçün nisbilik nəzəriyyəsinə dair bir məqalə yazmağı sifariş edirlər. Bu məqaləni oxuyan Eynşteyn qeyd etmişdi ki, o çox gözəl yazılıb və çap olunmağa layiqdir. Həmin 20-ci illərdə Tamm öz valideynlərinə Moskvadan yazmışdı: "...mənim nisbilik nəzəriyyəsinə dair ilk və çoxdankı işimi, nəhayət, Almaniyaya göndəriblər və "Eynşteynin özünə" veriblər. Eynşteyn məqalə haqqında "zeyer xyubş" (çox gözəl) söyləyib və "Riyazi salnamələrdə..." çap üçün qəbul etmişdir". Necə də bir-birinə uyğun gəlir!

Valideynləri Tammın boya-başa çatdığı Yelizavetqradda (indi bura Ukraynanın ərazisidir) yaşayırdılar. Atası Türingiyadan gəlmiş mühacir nəslindən idi və Yelizavetqradda şəhər mühəndisi işləyirdi. İqorun özü burada 1913-cü ildə gimnaziyanı çox yaxşı başa vurmuşdu. Bir il əvvəl, 17 yaşında ikən o, gündəliyində yazmışdı: "Hər bir adam hələ həyatının başlanğıcında qərara gəlməlidir ki, həyatından o nə yaradacaq..."

1913-cü ilin payızında Tamm Şotlandiyada sakit yer olan Edinburq universitetinin tələbəsi oldu.

Lakin Edinburqdan sonra, 20 yaşlı Tammın həqiqi alma-materi Moskva universiteti olduqda da, dəliqanlı gənc təbiətşünaslıqla düşmənçiliyini davam etdirməkdə idi. 1915-ci ildə o yazmışdı: "Elm cəhənnəm olsun. Başdan-başa riyakarlıqdır... Cənablar, məgər "elm adamı" – gör necə məğrur səslənir – yaşayır ki? Bu, həyatın nə isə surroqatıdır..."

Akademik Tammın əsərlərinin tam küllüsü çap olunanda və onun məxfilik qrifi olan tədqiqatları və kəşfləri

də daxil olmaqla, bütöv uzun yaradıcılıq yolunu araşdırmaq mümkün olduqda, tarixçilər istər-istəməz bu yolun və dünyanın müasir – kvant və relyativistik fiziki mənzərəsinin tədricən aydınlaşdırılması yolunun üstüstə düşdüyünü aşkar edəcəklər.

Onun ən məşhur tələbəsi olan Andrey Dmitriyeviç Saxarov yazmışdı: "Mənim yaşıdlarım İqor Yevgenyeviç Tammın adını ilk dəfə çox gözəl yazılmış elektrik nəzəriyyəsi kursunun müəllifi kimi tanıdılar – bir çoxları onu kəşf etdilər... Bizə eyni zamanda nisbilik nəzəriyyəsi uğrunda, kvant nəzəriyyəsi uğrunda gedən döyüşlərin gurultusu da gəlib çatırdı... Artıq 1930-cu illərin axırında İqor Yevgenyeviçin adı (hətta onu şəxsən tanımayanlar üçün də) məşhur idi – fövqəltəbii mənada yox, adi yüksək insani mənada məşhur idi. Sovet nəzəriyyəçi fizikləri onun simasında Landau ilə yanaşı, özlərinin layiqli və tanınmış başçısını görürdülər, biz hamımız isə prinsipial, xeyirxah və ağıllı insanı, optimist və bəxti çox vaxt gətirən "peyğəmbəri" görürdük..." Saxarov müəllimi ilə birlikdə qapalı Arzamas şəhərində (indiki Sarov şəhəri) yaşadığı və işlədiyi illəri (1950-1953-cü illər) gizli olaraq "problemli illər" adlandırmışdı. O dövr hidrogen bombasının yaradılmasının ifrat məxfi epopeyasında həlledici dövr idi...

Əlbəttə, təsadüfi deyil ki, Tammın məhz gənc tələbələri – gələcəyin akademikləri – Andrey Saxarov və Vitali Ginzburq "problemin" həllində başlıca "ideya generatorları" oldular... O həm görkəmli alim, həm də tanınmış müəllim idi.

Tammın maraq dairəsi fizikanın hüdudlarından çox kənara çıxırdı. Həqiqi təbiətşünas olan Tammı təbiətdəki bütün mövcudiyyatın quruluşu cəlb edirdi. "Problemli illər"də atomçu



Sağdan sola: İ.Y.Tamm, V.A.Fok, V.Qordon, Y.C.Vilyam, İ.Valler, İ.Y.Frenkel, M.S.Plesset, L.D.Landau, V.Krouzer, N.Bor, G.Gelman, Y.B.Rumer, L.Rozenfeld, Q.Tissa, D.D.İvanenko. Ukrayna Fizika-Texnika İnstitutu. 1934-cü il.

fizik Tamm "ölüm üzərində məcburi işləyərkən" həyat haqqında gərgin düşünürdü: məhz həmin dövrdə onun elmi marağı genetikaya yönəldi. Akademik Yuri Borisoviç Xaritonov xatırlayırdı: "O, ilk dəfə "Arzamas-16"-da həmkarlarına... molekulyar biologiyadakı misilsiz kəşflər haqqında danışardı (söhbət genetik kodun şifrinin heyrətamiz açılışından gedir)... İqor Yevgenyeviç dərhal gördü ki, maraqlı perspektivlər açılır".

"Arzamas-16"-dan sonra İqor Yevgenyeviç Atom enerjisi üzrə Kurçatov institutunda molekulyar biologiyadan seminar aparmağa başladı. Qəzəbli Lısenkonun əli bura çatmırdı.

Nəhayət, 1956-cı ilin fevralında əzablı sovet biologiyasının salnaməsində həqiqi mənada tarixi hadisə baş verdi – akademik P.L.Kapitsanın məşhur seminarının 304-cü iclası oldu. Fiziki Problemlər İnstitutunun konfrans zalı və bütün dəhlizləri ağzına qədər dolmuşdu. Sanki, Moskvanın bütün elm adamları genetikanın qələbələri haqqında son məlumatları məşhur fizik Tammın öz ağzından eşitmək üçün yığışmışdılar. Onunla birlikdə çıxış edən və biologiya dahisi Nikolay Timofeyev-Resovski yarım əsrdən sonra bu seminar haqqında yazmışdı ki, böyük nəzəriyyəçi İqor Yevgenyeviç Tammın seminarda iştirakı

N.V.Timofeyev-Resovski (1900-1981) – genetikdir, populyasiya, radiasiya və molekulyar genetikanın banilərindən biridir. 1950-1970-ci illərdə Timofeyev-Resovski SSRİ-də genetikanın bərpa edilməsində çox böyük rol oynamışdır. D.A.Qraninin "Zubr" romanı onun həyatına həsr olunmuşdur.

İ.Y.Tamm, N.N.Semyonov və N.Bor Fizika Problemləri İnstitutunda. Moskva. 1961-ci il.



"elmi genetikanın geniş yola çıxışını mümkün, kəsərli və dönməz" etdi.

Tamm özünü xoşbəxt taleli insan sayırdı. Lakin 1960-cı illərin ortalarında o, tənəffüs əzələlərinin iflicinə aparan müalicəolunmaz xəstəliyə düçar oldu. İqor Yevgenyeviçin yazı masası üstündə nəfəs almaq üçün maşın yerləşdirildi. O, işləyən vaxt maşına qoşulurdu. O, materiyanın ilkin əsasının, fəza və zamanın hər şeyi əhatə edən, fizikanı bütün toplanmış çətinliklərdən və anlaşılmazlıqlardan azad edəcək yeni nəzəriyyə üzərində işini davam etdirirdi. Tamma baş çəkməyə gələn tələbələri heyrətləndirdilər: o, əlyazma vərəqlərini dördqiymətli ədədlərlə nömrələyirdi!

Mübahisə doğuran nəzəriyyənin riyazi əngəllərinin öhdəsindən gəlmək həyatdan gedən Tamma müyəssər olmadı. O, 1971-ci il aprelin 12-də vəfat etdi.

T.D.Lısenko (1898-1976) aqronomdur, biologiyada "Miçurin təlimi" psevdoelminin yaradıcısıdır. Klassik genetikanı rədd edərək, iddia edirdi ki, orqanizm tərəfindən qazanılmış əlamətlər nəsildənnəslə verilə bilər, bir bioloji növ yaşayış şəraitinin təsiri altında başqa növə çevrilə bilər və s. 1964-cü ilə qədər Lısenkonun fəaliyyəti SSRİ rəhbərləri tərəfindən himayə edilirdi, onun təlimi və praktik məsləhətləri inzibati qaydada tətbiq olunurdu. Nəticədə genetika üzrə elmi məktəblər darmadağın edildi, biologiyaya və kənd təsərrüfatına isə külli miqdarda ziyan dəydi.

YENİ "TRANSURAN" ELEMENTLƏRİN FABRİKİ

İlk transuran element 1940-cı ildə ABŞ-da Edvin Mattison Makmillan (1907-1991) və Filipp Hayqe Eyblson (1913-2004) tərəfindən kəşf olunmuşdur. Uranı neytronlarla bombardman edərkən, onlar 93-cü elementi aşkar etdilər və neptunium adlandırdılar. Nə üçün nüvə neytron udaraq, protonlarının sayı bir vahid çox olan nüvəyə çevrilir?



E.M.Makmillan.

Neytron udan nüvə qeyri-stabil olur və β-parçalanmaya məruz qalır, yəni onun neytronlarından biri elektron buraxaraq protona çevrilir. Həmin ildə də məlum oldu ki, neptunium nüvəsi β-parçalanmaya məruz qalır və bunun sayəsində 94-cü element olan plutonium əmələ gəlir, başqa sözlə, aşağıdakı reaksiyalar ardıcıllığı reallaşır:

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu\,.$$

1951-ci ildə Makmillanla birlikdə ^{239}Pu, elementinin kəşfinə görə kimya üzrə Nobel mükafatı almış Qlenn Teodor Siborq (1912-1999) transuran element atomlarının xassələrini, hərfi mənada, "dənə-dənə" öyrənməyin incə metodlarını işləyib hazırlamışdır. Siborq metodlarından istifadə edilməsi 1944-1955-ci illərdə ABŞ-da amersium ($Z=95$), kürium ($Z=96$), berklium ($Z=97$), kalifornium ($Z=98$) elementlərini sintez etməyə imkan verdi. Nüvə reaktorlarından çıxan neytronlarla uran hədəfini uzun müddət şüalandırmaq yolu ilə bu dörd elementi almaq mümkün olmuşdur. Növbəti iki ağır elementi: eynşteyniumu ($Z=99$) və fermiumu ($Z=100$) sintez etmək üçün daha güclü şüalanma tələb olunmuşdur.



Q.Siborq (sağda) və G.N.Flerov (mərkəzdə).

1952-ci ildə amerikan hidrogen bombası partladıldı. Radio ilə idarə olunan pilotsuz təyyarələr diametri 100 km-dən böyük olan nəhəng radioaktiv buluddan partlayış məhsullarının nümunələrini götürdülər. Ekspress-təhlil ümidverici nəticələr verdi. Onda partlayışın keçirildiyi yerdən, Bikini mərcan adasından təcili olaraq fiziklərə 1 tona yaxın mərcan gətirib çatdırdılar. Onun kimyəvi təhlili ifratağır ^{255}U izotopunun olduğunu göstərdi. Aydın oldu ki, termonüvə qurğusunun tərkibinə daxil olan hər bir $^{238}_{92}U$ nüvəsi 17-yə qədər neytron uda bilər. Bir sıra β-çevrilmələr ona gətirib çıxardı ki, $^{255}_{92}U$-dən son nəticədə sıra nömrəsi $Z=99$ və 100 olan nüvələr yaranmışdır.

DÖYÜŞƏ "NÜVƏ ARTİLLERİYASI" BAŞLAYIR

Eynşteyniumda və fermiumda iş dayandı. Hətta nüvə partlayışları zamanı yaranan neytronlar selinin köməyilə də Mendeleyev cədvəlini daha doldurmaq mümkün olmadı. Parçalanmanın başqa növlərinin, məsələn, spontan bölünmənin "işə qarışması" mane olurdu. Aydın oldu ki, "nüvə artilleriyasının" vaxtı gəlib çatmışdır. Əgər ionları, onların nüvələri kimi, elə sürətlərə qədər sürətləndirsək, ağır elementin hədəf nüvəsilə toqquşarkən elektrik itələmə qüvvəsinə üstün gəlsin, onda Z sıra nömrəsi mərmi nüvənin Z_m sıra nömrəsi ilə hədəf nüvənin Z_h sıra nömrəsinin cəminə bərabər olan yeni, daha ağır nüvələr yarana bilər (*tam birləşmə nüvə reaksiyaları*).

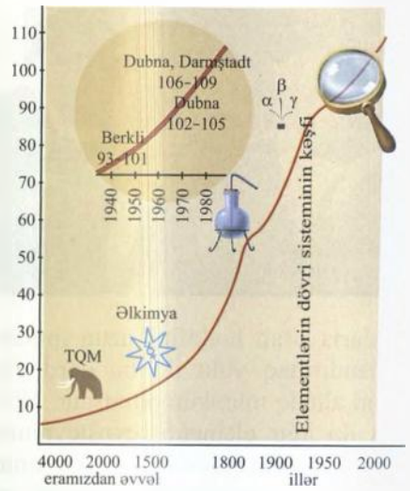
Bir halda ki, mərmi ağır olduqca, nəticə də bir o qədər "sanballı" olur, ağır ionlar üçün sürətləndiricilər tikməyə başladılar. 1960-cı illərin əvvəllərində transfermium elementlərinin ($Z>100$) sintezi üzərində üç laboratoriya işləyirdi: 101-ci elementin – mendeleyeviumun kəşf olunduğu Berklidə (ABŞ); Dubnada (SSRİ) və Darmştadtda (AFR). Dubnada tikilmiş siklotron (1961-ci il) öz xarakteristikalarına görə rekord mövqe tutmuşdu – onun köməyilə sürətləndirilmiş ən intensiv ağır ionlar dəstəsi aldılar.

Uzun sürən, əzablı "transfermium qaç-qovu" başladı. Mərmi nüvələr getdikcə daha ağır, onların hədəf nüvələrlə birləşmə prosesləri isə daha az ehtimallı olurdu. Bundan əlavə, elementin sıra nömrəsinin artması ilə, onun yaşama müddəti kəskin azalırdı. Bu isə, yeni nüvələrin xassələrini müəyyən etmək və tədqiq etmək metodlarını



Radioaktiv kimyəvi elementlər olan uran, neptunium və plutonium Günəş sisteminin uzaq planetlərinin – Uranın, Neptunun və Plutonun adları ilə adlandırılmışdır.

İonlar – bir və ya bir neçə elektronunu itirmiş və ona görə də müsbət yüklənmiş atomlardır. Onlar elektrik sahəsində sürətlənir.



Məlum elementlərin sayının xronoloji ardıcıllıqla artımı. Mendeleyev cədvəlinin genişlənməsinə onların verdiyi pay haqqında G.N.Flerovun "transfermium yarışı"nın nəticələrinə həsr olunmuş məruzəsində gətirdiyi məzəli şəkil əsasında fikir söyləmək olar. *x* oxunda mamontlar dövründən (TQM – Tarixdən Qabaqkı Mamontlar) həlledici eksperimentlərə (o cümlədən α-, β- və γ-şüalanmaların kəşfi) qədərki zaman, *y* oxunda isə həmin vaxtadək məlum olan elementlərin sayı göstərilmişdir. Lakin "transfermium yarışı" çox da rahat keçmədi: bəzən bir neçə laboratoriyada eyni zamanda yeni elementin müxtəlif izotopları müxtəlif etibarlılıq dərəcəsi ilə sintez olunurdu.

olduqca çətinləşdirirdi. Buna baxmayaraq, 1976-cı ilə qədər adları çəkilən laboratoriyalarda Z sıra nömrəsi 101-dən 112-yə qədər olan transfermium elementlərini sintezləşdirmək mümkün oldu.

"STABİLLİK ADASINA" İLK KÖÇÜRÜLMƏ

1966-cı ildə rusiyalı fizik-nəzəriyyəçi V.M.Strutinski qabaqcadan xəbər verdi ki, qurğuşunun ikiqat magik ^{208}Pb izotopunun ardınca, oxşar xassə Z-i 110-dan 114-ə qədər, N-i isə 184 olan nüvələrdə də yaranacaqdır. Bu "koordinatların" yaxınlığında ifratağır elementlərin geniş "stabillik adası" mövcud ola bilər. O da istisna edilmir ki, bu "adanın" ətrafında, sferik formalarının deformasiyası sayəsində yüksək dayanıqlığa malik olan nüvələr də tapılacaqdır. İzotoplar xəritəsində "stabillik arxipelaqının" "şimal-şərq" qurtaracağı və Strutinskinin qabaqcadan xəbər verdiyi "stabillik adasının" yerləşdiyi yer görünür.

Yüksək enerjili yüngül mərmi-ionların tətbiqi ilə gedən reaksiyalar *qızğın birləşmə* adlanır. Bu cür reaksiyaların ehtimalı, sintez edilmiş nüvənin dayanıqlığı kimi, kifayət qədər azdır. Qızğın birləşmə üsulu ilə yalnız sıra nömrəsi $Z=106$-ya qədər transfermium elementləri almaq mümkün olmuşdur. Daha az enerjili, lakin ağır mərmi-nüvələrdən istifadə etmək daha perspektivli bir yol oldu. Yeni nüvələrin sintezinin ehtimalı bir neçə tərtib artdı. Belə reaksiyalar *soyuq birləşmə* adlanır. Onun köməyilə ən ağır elementlər – sıra nömrəsi düz 112-yə qədər olan elementlər sintezləşdirilmişdir. Bununla belə, "stabillik adasına" nüfuz etmək üçün 1976-cı ildə başlanmış cəhdlər 1998-ci ilə qədər heç bir nəticə vermədi.

İfratağır elementlərin sintezi üzrə eksperimentlər aparmaq üçün 1980-ci illərdə Dubnada yeni daha güclü U-400 tsiklotronu tikildi. Qeydə alan aparatlar fon təşkil edən külli miqdarda parçalanmalar selinin, tədqiqat predmeti olan nadir, lakin ehtimallı parçalanmaları itirib-batıran bu selin öhdəsindən gəlmək üçün xüsusi texnika işlənib hazırlandı. Bu texnika sayəsində 1981-ci ildə Darmştadtda $Z=107$ olan element sintez olundu. Sonra $Z=108$ və $Z=109$ olan elementlər alındı. Onlar da Darmştadtda sintez olundu.

"TRANSFERMİUM YARIŞI" VƏ ONUN "LAUREATLARI"

Dövri sistemdə fermiumdan sonra gələn elementləri, transuran elementlərə analoji olaraq, transfermium elementləri adlandırmağa başladılar. Onların kəşfində Dubnadakı Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun Nüvə problemləri laboratoriyası ilə yanaşı, daha iki aparıcı elmi mərkəz – Darmştadtdakı (AFR) və Berklidəki (ABŞ) elmi mərkəzlər də iştirak etmişdir. Təəccüblü deyildir ki, növbəti dəfə kəşf olunacaq kimyəvi elementi kim və necə adlandıracaq məsələsi qarşıda olduqca kəskin dururdu, çünki çox da sadə olmayan birincilik probleminə toxunulurdu. Ona görə də 1986-cı ildə beynəlxalq elmi təşkilatlar xüsusi bir transfermium işçi qrupu yaratdılar. Həmin qrup bir neçə il ərzində vəziyyəti öyrəndi. Elə kriteriyalar işlənib hazırlandı ki, onların əsasında növbəti element həqiqətən kəşf olunmuş sayılsın. Yeni kəşf edilmiş elementlərə ad vermək hüququ xüsusi komissiyaya verildi. Bu komissiyanın tərkibinə 12 ölkədən 20 nəfər ekspert daxil edildi.

1994-cü ildə, uzun sürən müzakirələrdən sonra, komissiya belə bir qərar qəbul etdi ki, elementlər nüvə fizikasına və kimyaya, ən böyük pay vermiş alimlərin şərəfinə adlandırılsın. Lakin transfermium elementlərinin adlarındakı həmin dövrə qədər yığılıb qalmış uyğunsuzluqları aradan qaldırmaq mümkün olmadı.

Yalnız 1997-ci ildə yeni doqquz elementə ad verildi və onların kimyəvi işarəsi qəbul edildi: 101-ci element – mendeleyevium (Md), 102-ci element – nobelium (No; Nobel mükafatının təsisçisi olan Alfred Bernhard Nobelin şərəfinə), 103-cü element – lourensium (Lr; Amerika fiziki Ernest Orlando Lourensin şərəfinə), 104-cü element – rezerfordium (Rf), 105-ci element – dubnium (Db), 106-cı element – siborqium (Sg; Amerika fiziki və kimyaçısı Qlenn Teodor Siborqun şərəfinə), 107-ci element – borium (Bh; Nils Borun şərəfinə), 108-ci element – hassium (Hs; Darmştadt elementar zərrəciklər sürətləndiricisi DESY-nin qurulduğu alman torpağı Hessenin şərəfinə), 109-cu element – meytnerium (Mt; avstraliyalı fizik Liza Maytnerin şərəfinə), 110-cu element – darmştadtium (Ds; DESY sürətləndiricisinin qurulduğu Darmştadt şəhərinin şərəfinə), 111-ci element – rentgenium (Rg; V.Rentgenin şərəfinə) adlandırıldı. Nömrələri 109-dan böyük olan elementlərə hələlik şərti adlar verilmişdir.

TƏBİƏTDƏ İFRATAĞIR ELEMENTLƏRİN AXTARIŞI

Professor Flerov təbiətin etdiyi hər şeyi və ondan da çox şeyi edə bilər. Ancaq mən əmin deyiləm ki, təbiət Flerovun etdiyi hər şeyi edə bilsin.

V.F.Vayskopf. Dubnada keçirilmiş simpoziumdakı çıxışından. 1968-ci il.

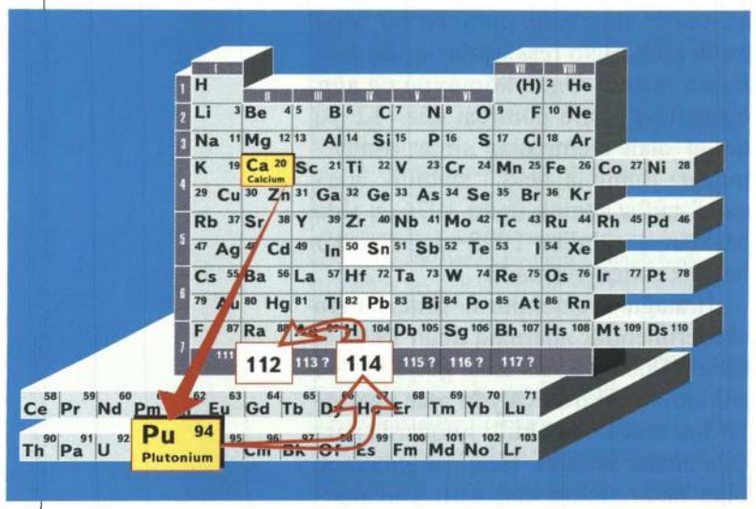
Amerika nəzəriyyəçi fiziki Viktor Frederik Vayskopfun (1908-2002) epiqraf kimi götürülmüş replikası təbiətdə ifratağır elementlərin (İAE) axtarıldığı dövrün qızğın çağları üçün çox xarakterikdir. Vayskopf G.N.Flerovun dediklərini belə şərh etmişdir: "Əgər əvvəllər transuran elementlərin sintezi və öyrənilməsi sahəsində müxtəlif ölkə fizikləri yarışırdısa, indi, göründüyü kimi, kosmos aləmi ilə yarışmaq lazım gəlir. Biz buna hazırıq".


V.F.Vayskopf.

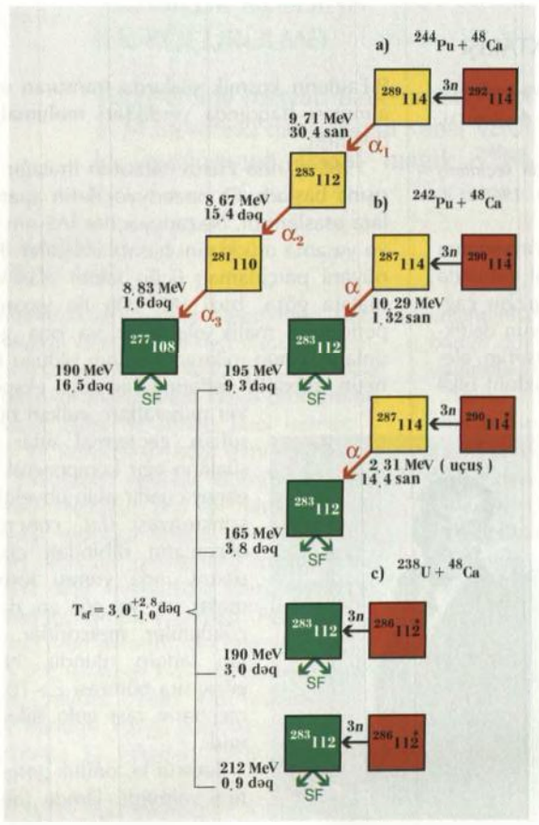
Flerovun belə optimistik fikir söyləməyə əsası var idi. Q.Siborq və E.Velens 1958-ci ildə çapdan çıxmış "Kainatın elementləri" kitabında yazmışdılar: "İnsanın Yerdə apardığı eksperimentlərlə və uzaq ulduzlarda baş verən hadisələr arasında maraqlı paralellər müşahidə olunur. Məsələn, indi hesab edildiyi kimi, 55 günlük periodla spontan bölünmə yolu ilə parçalanan və ağır transuran elementlərdən biri olan kalifornium-254, bəzi növ, yəni şüalanma intensivliyi 55 gün ərzində iki dəfə azalan ifratyeni ulduzlarda külli miqdarda enerji ayrılmasına səbəb olur". Bundan başqa, 1968-ci ildə Dubnada keçirilən simpoziumda ingilis fizikləri S.Pauellin və P.Faulerin kosmik şüalarda transuran elementlərin qeydə alınması haqqında verdikləri məlumat qızğın mübahisə doğurdu.

1968-ci ildə Flerov təbiətdə ifratağır elementlərin axtarışına başladı. O, nəzəriyyəçilərin apardıqları hesablamalara əsaslanırdı. Nəzəriyyəçilər İAE-nin bölünmə baryerini və yaşama müddətini hesablamışdılar. *Bölünmə baryeri* – nüvəni parçalamaq üçün lazım olan enerjidir. Hesablamalara görə, bəzi İAE 108 ilə yaxın yarımparçalanma perioduna malik ola bilər və ona görə də indiyədək onların Yerdə mikromiqdarının olduğu istisna edilmir. Planetin müxtəlif yerlərinə bir neçə ekspedisiya göndərildi. Yer mineralları, vulkan püskürməsinin məhsulları, geotermal sular, həmçinin kosmik şüaların ağır komponentlərini akkumulyasiya etməyə qadir olan obyektlər: dəmir-marqans konkresiyası (*lat.* concretio – "bitişmək") okeanların dibindən çıxarılmış qalıq dağ süxurlarında yumru formalı mineral törəmələr və ya göl və dənizlərin dibindəki çöküntülər, meteoritlər, Ay quruntu süxurları tədqiq olundu. Nəzəri təsəvvürlərə görə, sıra nömrəsi $Z>108$ olan kimyəvi elementlərin rast gələ biləcəyi hər şey öyrənildi.

Təəssüf ki, onillik gərgin iş ümidverici nəticə vermədi. Elmdə təbiətə verilən sualın mənfi cavabı da, az həyəcanlandırıcı olmasına baxmayaraq, nailiyyət sayılır. Lakin baxılan halda bu cavab son cavab deyil.



Mendeleyev cədvəlinin müasir görünüşü və 114-cü elementin kəşfinə səbəb olmuş sintez reaksiyası.



114-cü elementin α-parçalanmalarının qeydə alınmış və son nüvənin spontan parçalanması ilə yekunlaşan zənciri, həmçinin uyğun zaman intervalları.

sindən daha gələ bilmədi. Bu vaxt əvvəlki aparaturanın həssaslığından 500 dəfə böyük olan yeni aparatlar yaradıldı. Eksperiment (bu eksperimentə on ildən çox idi ki, hazırlaşırdılar) çox gözəl uğurla nəticələndi: 1998-ci ilin lap sonunda plutonium hədəfinin ($Z=94$) milyardlarla milyard kalsium ($Z=20$) ionları ilə ilk 40 günlük şüalandırılması seansı qurtarhaqurtarda bir dənə (!) 114-cü element nüvəsi qeydə alındı. 1999-cu ilin aprelində başa çatdırılmış növbəti iki seansda 114-cü elementin daha iki izotopunun nüvəsi sintez edildi. Cəmisi üçcə nüvə, lakin fiziklər onların hər birinin yaşama müddətini ölçə bildilər. Onlardan ən böyüyü 30 san təşkil edirdi.

Dubna fiziklərinin yeni nailiyyətləri 1999-cu il 25 iyun və 28 oktyabr tarixlərinə təsadüf edir. Həmin günlərdə 114-cü elementin neytronlarının sayı $N=174$ olan daha bir izotop qeydə alınmışdır. Onun nüvəsi, α-zərrəcik buraxmaqla ardıcıl parçalanaraq, əvvəlcə 112-ci elementin qız nüvəsinə, sonra neytronlarının sayı $N=170$ olan 110-cu elementin nəvə nüvəsinə parçalanır. Nəvə nüvə isə iki qəlpəyə parçalanır. 110 və 112-ci elementlərin izotopları ilə müqayisədə 114-cü element nüvəsinin yaşama müddəti təxminən milyon dəfə artmışdır. "Bu, ifratağır elementlərin "stabillik adasının" mövcudluğuna dair daha bir, yəqin ki, əsil birbaşa eksperimental sübutdur". Beləliklə, bu sirli "adanın" sahilinə çoxdan gözlənilən köçürmə baş tutdu.

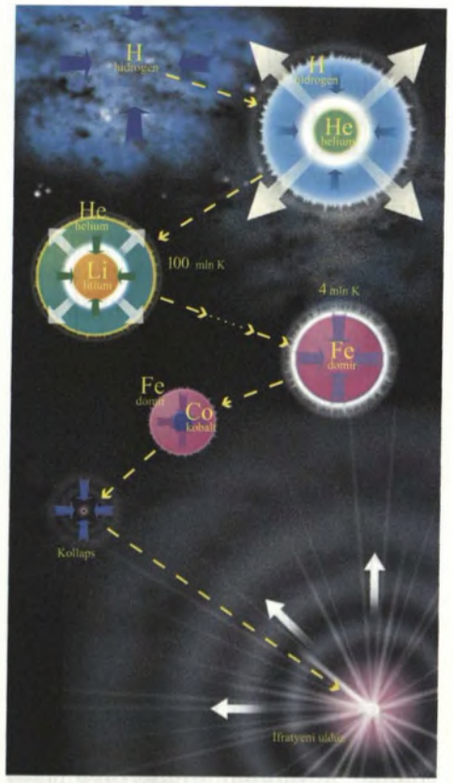
Mendeleyev cədvəlinin "ifratağır kənarının" canlı, bizim gözlərimiz önündə baş verən dolması tarixi haqqındakı hekayənin tam olması üçün lap əvvələ qayıdaq. *Nukleosintez* prosesləri üzərində, yəni Kainatın təbii mexanizmləri üzərində dayanaq. Onda təbiətdə ifratağır elementlərə dair "əsas sual" daha aydın olacaqdır.

KAİNAT MENDELEYEV CƏDVƏLİNİ NECƏ DOLDURMUŞDUR

XVII əsrdə Keplerin və Nyutonun əsərləri sayəsində planetlərin və ulduzların hərəkət mexanikası aydınlaşdırıldı. Bu sahə arxada qaldıqdan sonra, Günəşin və ulduzların enerjisinin mənşəyinə dair mifoloji konsepsiyalar daha ciddi qəbul edilə bilməzdi. Astronomların, sanki, yaxşı öyrəndikləri səma birdən-birə sual işarələri ilə doldu. Lakin ulduzların təkinə nüfuz etmək üçün alimlərin ixtiyarında yeganə silah – ingilis astrofiziki Artur Stenli Eddinqtonun (1882-1944) ifadəsi ilə desək, öz beyinlərinin "analitik qazma maşını" var idi.

Eddinqton birinci olaraq ulduz kütləsinin helium və hidrogenin termonüvə sintez reaksiyası vasitəsilə enerjiyə "çevrilməsi" ideyasını irəli sürdü (1920-ci il). O yazırdı: "Ulduzların daxili oblastı atomlardan, elektronlardan və efir dalğalarından (alim elektromaqnit dalğalarını belə adlandırır) təşkil olunmuş qarışıqdan ibarətdir. Bu xaosun qanunlarını başa düşmək üçün biz atom fizikasının yeni nailiyyətlərini köməyə çağırmalıyıq. Biz ulduzların daxili quruluşunu tədqiq etməyə başlamışıq və tezliklə başa düşdük ki, atomun daxili quruluşunu tədqiq edirik". Daha sonra "...lazım olan enerji atom nüvələrində protonların və elektronların yenidən qruplaşması zamanı (elementlərin çevrilməsi) və xeyli böyük miqdarda enerji isə onların annihilyasiyası zamanı ayrıla bilər... Bu və ya digər proses Günəş istiliyini almaq üçün istifadə oluna bilər...".

Müasir elm ulduzların tərcümeyihalının hansı dövrləri haqqında danışa bilər? Dərhal şərt kəsək: əksəriyyət tərəfindən qəbul edilməsinə baxmayaraq, ulduzların mənşəyi və inkişafı



Ulduz materiyası təkamülünün sxemi.



H.A.Bete.

haqqında mövcud olan baxışlar hələ ki, sarsılmaz nəzəriyyə hüququnu almayıb. Hələ bir çox mürəkkəb suallar öz cavabını gözləyir. Lakin bu baxış-

ULDUZLARIN ENERJİSİ

Artur Eddinqtonun kolleqası olan Ceyms Hopvud Cins (1877-1946) deyəndə ki, nüvə çevrilmələri üçün Günəşdə temperatur xeyli aşağıdır, eşitdiyi məşhur cavab belə oldu: "Daha qızğın yer axtarın".

1930-cu illərdə aydın oldu ki, ulduzların təki termonüvə reaksiyaları üçün çox "qızğın yerdir". Bəs hansı reaksiyalar və ya onların zəncirləri ulduzların enerjisini təmin edir? Bu məsələni fizik-nəzəriyyəçi Hans Albrext Bete (1906-cı ildə doğulub) həll etdi. Ulduzların və Günəşin kimyəvi tərkibi, onların parlaqlığının və radiusunun kütlədən asılılığı və s. haqqındakı dəqiqləşdirilmiş məlumatlara əsaslanaraq, 1938-ci ildə o, proton-proton tsikli, sonra isə karbon-azot tsikli reaksiyalarını kəşf etdi. Bu reaksiyalarda karbon atomları ulduzlardakı ilkin və əsas termonüvə reaksiyası üçün – protonlardan helium nüvəsinin sintezi reaksiyası üçün katalizator rolunu oynayır.

Nobel mühazirəsinin sonunda Hans Bete demişdi: "Əgər mənim danışdıqlarımın hamısı doğrudursa, onda ulduzlar da, heyvanlar kimi, tsiklə malikdir. Ulduzlar doğulur, böyüyür, tam müəyyən daxili inkişafa məruz qalır və nəhayət, ölür. Onlar öləndə, onlardakı material yeni ulduzların yaranmasına və yaşamasına sərf olunur".

lar, deyəsən, ulduz təkamülünün konturlarını düzgün cızır.

Ulduzların varlığı əsasən hidrogendən ibarət olan nəhəng və soyuq qaz buludundan başlayır. Ümumdünya cazibə qüvvələrinin təsiri altında o tədricən sıxılır. Qaz zərrəciklərinin qravitasiya potensial enerjisi kinetik enerjiyə, yəni istilik enerjisinə çevrilir. Bu enerjinin təqribən yarısı şüalanmaya, qalan hissəsi isə mərkəzdə yaranan bərk sıxlaşmanın – nüvənin qızmasına sərf olunur.

Ulduz nüvəsində temperatur və təzyiq termonüvə reaksiyalarının getməsi üçün kifayət edənə qədər artanda, ulduz təkamülünün ən uzun dövrü – termonüvə dövrü başlanır. Ulduzun nüvəsində hidrogendən helium sintez olarkən ayrılan enerjinin bir hissəsi hər şeyə nüfuz edən neytrino vasitəsilə dünya fəzasına daşınır, əsas hissəsi isə γ-kvantlar və güclü ionlaşmış qaz zərrəcikləri vasitəsilə ulduzun səthinə köçürülür. Mərkəzdən axan bu enerji seli xarici təbəqələrin təzyiqinə qarşı dayanır və ulduzun sonrakı sıxılmasına mane olur. Kütləsi Günəşin kütləsindən iki dəfə çox olan ulduz üçün bu cür tarazlıq halı, demək olar ki, 10 mlrd il davam edir.

Nüvədəki hidrogenin çox hissəsi yanıb qurtarandan sonra, tarazlığı saxlamaq üçün enerji artıq kifayət etmir. Ulduzun "termonüvə reaktoru" tədricən yeni rejimə keçir, ulduz sıxılır, onun mərkəzində təzyiq və temperatur artır və təxminən 100 mln dərəcədə oyuna protonlarla yanaşı, helium nüvələri də qoşulur. Daha ağır elementlər – karbon, azot, oksigen sintez olunur.

Hidrogenin yanmaqda davam etdiyi təbəqə isə ulduzun mərkəzindən səthinə doğru, suya atılmış daşdan hər tərəfə qaçan dairələrdən biri kimi hərəkət edir. Zaman keçdikcə heliumun da ehtiyatları tükənir. Ulduz daha güclü sıxılır, onun mərkəzində temperatur 600 mln dərəcəyə qədər yüksəlir. İndi reaksiyalarda sıra nömrəsi $Z > 2$ olan nüvələr iştirak edir. Periferiyaya isə yanmış helium təbəqəsi hərəkət edir.

Ulduzun nüvəsində maddə addım-addım Mendeleyev cədvəlindəki yeni-yeni xanaları tutur və 4 mlrd dərəcədə nəhayət dəmirə və nüvəsinin kütləsinə görə ona yaxın olan elementlərə "gəlib çatır". Bu elementlərdə kütlə defekti maksimal qiymətə çatır, yəni nüvənin rabitə enerjisi ən böyükdür və onlar "ulduz termonüvə reaktorlarının" "şlaklarıdır": daha heç bir nüvə reaksiyası onlardan enerji ayırmağa qadir deyildir. Əgər beləsə, onda bundan sonra sintez reaksiyaları hesabına enerji ayrılması mümkün deyildir. Bu o deməkdir ki, ulduzun termonüvə periodu başa çatmışdır. Təkamülün sonrakı gedişi yenidən ulduzu sıxan qravitasiya qüvvələri ilə təyin olunur. Ulduzun ölümü başlanır.

Ulduzun məhz necə öləcəyi onun kütləsindən asılıdır. Məsələn, kütləsi iki Günəş kütləsindən çox olan ulduzları ən dramatik sonluq gözləyir. Cazibə qüvvələri o qədər güclü olur ki, sıxılıb əzilmiş atomların qəlpələri elektronlar və nüvələr, sanki, bir-birində həll olunmuş iki qaz – elektron qazı və nüvə qazı əmələ gətirir. Bu cür ulduzların təkamülünün gedişi, yüngül nüvələr yanıb qurtardıqdan sonrakı mərhələlərdə dəqiq müəyyən olunmamış hesab edilsə də, mövcud nəzəriyyə əksər astrofiziklər tərəfindən qəbul edilir. Bu nəzəriyyə öz nailiyyətlərinə görə, hər şeydən əvvəl, ona borcludur ki, kimyəvi elementlərin bu nəzəriyyə tərəfindən təklif edilən əmələgəlmə mexanizmi və Kainatda elementlərin qabaqcadan xəbər verilən yayılma dərəcəsi müşahidə məlumatları ilə yaxşı uzlaşır.

Neytrinolar – zəif qarşılıqlı təsirdə iştirak edən, hər şeyə nüfuz edən zərrəciklərdir. Onların doğulması ulduz nüvəsində maddənin neytronlaşması ilə, yəni neytronlar əmələ gəlməklə protonlar tərəfindən elektronların zəbt edilməsi prosesləri ilə müşayiət olunur.

Beləliklə, ağır ulduz özünün bütün nüvə yanacağı ehtiyatlarını tükəndirmişdir. Tədricən bir neçə milyard dərəcəyə qədər qızaraq, ulduz öz maddəsinin əsas hissəsini nüvə külünə – atom kütlələri 50-dən 65-ə qədər (vanadiumdan sinkə qədər) dəmir qrupu elementlərinə çevirmişdir. Ulduzun sonrakı sıxılması əmələ gəlmiş nüvələrin stabilliyinin pozulmasına səbəb olur və onlar dağılmağa başlayır. Onların qəlpələri olan α-zərrəciklər, protonlar və neytronlar dəmir qrupu elementlərilə reaksiyaya girir və onlarla birləşir. Daha ağır elementlər əmələ gəlir. Onlar da reaksiyaya girir və dövri cədvəlin növbəti xanaları dolur. Temperaturun olduqca böyük olması sayəsində həmin proseslər çox tez – bir neçə min ilə ərzində baş verir.

Dəmir qrupu nüvələri bölünəndə, həmçinin nuklonlar və yüngül nüvələr onlarla birləşəndə (Mendeleyev cədvəlinin "ağır" sahəsinin dolmasına səbəb olan sintez reaksiyalarında) enerji ayrılmır, əksinə, udulur. (Kobud desək, bu cür reaksiyalar nüvə reaktorlarında gedən reaksiyaların tərsidir). Ulduzun sıxılması nəticəsində hər şey sürətlənir. Elektron qazı nüvə qazının təzyiqinə qarşı durmağa daha qadir olmur. Kollaps başlayır – bir neçə saniyə ərzində ulduzun nüvəsi katastrofik sıxılmaya məruz qalır: ulduzun örtüyü çökür, "daxilə dağılır". Maddənin sıxlığı o qədər artır ki, hətta neytrino da ulduzu tərk edə bilmir. Lakin ulduzun kollaps etmiş nüvəsinin enerjisinin çox hissəsini özü ilə aparan güclü neytrino selinin "əsirliyi" uzun sürmür. Gec və ya tez "kilidlənmiş" neytrinoların impulsu örtüyə verilir və örtük ulduzun parlaqlığını milyardlarla dəfə artıraraq, kənara atılır.

Astrofiziklər hesab edir ki, *ifratyeni ulduzlar* məhz bu cür alışır. Bu hadisələri müşayiət edən nəhəng partlayışlar, ulduzun kütləsinin çox hissəsini – 90%-ə qədərini ulduzlararası fəzaya atır. Məsələn, Yengəcəbənzər dumanlıq ən parlaq ifratyeni ulduzlardan birinin partlayıb, genişlənən örtüyündən ibarətdir. Çin və yapon astronomlarının ulduz salnamələrində göstərildiyi kimi, onun alışması 1054-cü ildə baş vermiş və qeyri-adi parlaq olmuşdur: ulduzu 23 gün ərzində hətta gündüzlər də görmüşlər. Yengəcəbənzər dumanlığın genişlənmə sürətinə dair ölçmələr göstərdi ki, on əsr ərzində o, indiki ölçülərinə ancaq çata bilərdi, yəni bu ölçmələr onun doğulma tarixini təsdiqlədi. Lakin şərh edilən modelin və bu model əsasında neytrino seli gücünün nəzəri hesablanmış qiymətlərinin doğruluğunun daha sanballı isbatı 1987-ci il fevralın 23-də alındı. Həmin vaxt astrofiziklər Böyük Magellan Buludunda ifratyeni ulduzun doğulmasını müşayiət edən neytrino impulsunu qeyd etmişdilər.

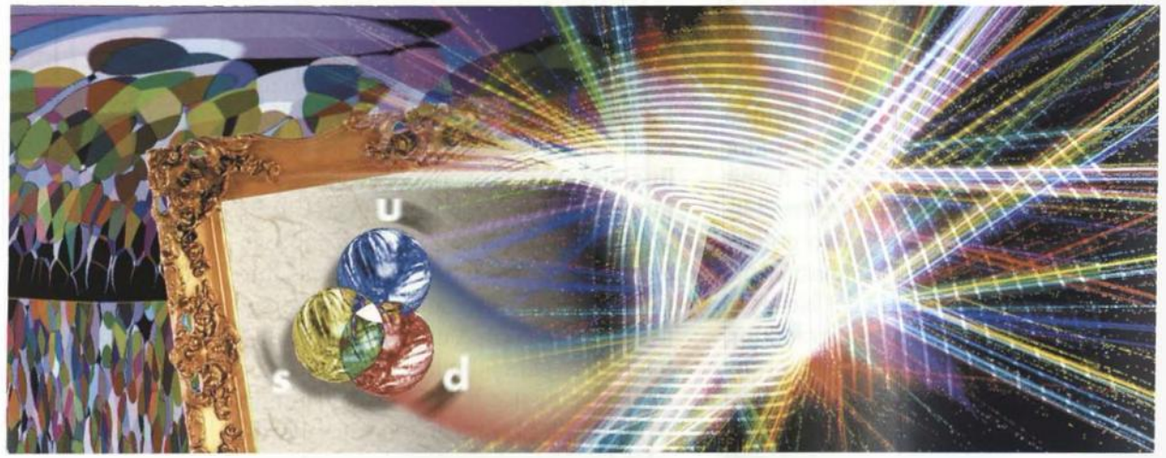
Ulduz spektrlərində ağır elementlərin xətlərini aşkar etdilər və bunun əsasında alman astronomu Valter Baade (1893-1960) belə nəticəyə gəldi ki, Günəş və əksər ulduzlar, hər halda, ulduz əhlinin ikinci nəslindən ibarətdir. Bu ikinci nəsil üçün material, daha əvvəlki nəsil ifratyenilərin partlayışı zamanı fəzaya səpələnmiş maddənin çevrilməsindən alınan ulduzlararası qaz və kosmik tozdur.

Ulduzların partlayışı zamanı ifrat-ağır elementlərin nüvələri yarana bilməzmi? Bəzi nəzəriyyəçilər belə imkanın mümkünlüyünü qəbul edirlər. Onda, əgər "stabillik adası" mövcuddursa və bu adada məskunlaşmış nüvələr arasında yaşama müddəti yüz milyonlarla il olan uzunömürlülərə rast gəlinirsə, onları Yerdə və ya kosmik şüalanmada tapmağa cəhd etmək olar.



Yengəcəbənzər dumanlıq.

Son minillik ərzində bizim Qalaktikada ifratyeni ulduzların yalnız dörd partlayışı qeydə alınmışdır: 1006, 1054, 1572 (Tixo Brahe ulduzu) və 1604-cü illərdə (Kepler ulduzu). Lakin Kainatın mövcud olduğu məhz ilk dövrlərdə (ilk milyard il) bu cür partlayışlar onun müasir halını müəyyən etmişdir.



STANDART MODEL VƏ ONUN ÇƏRÇİVƏSİNDƏN KƏNARDA

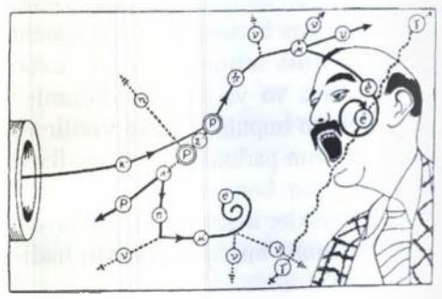
MATERİYANIN İLKİN ƏSASLARI. İYİRMİNCİ ƏSR

Hazırda məlum olan yüzlərlə elementar zərrəcikdən hər biri yeganə və təkrarolunmaz xarakteristikalar toplusuna (kütlə yaşama müddəti, elektrik yükü, spin və s.) malikdir. Zərrəciklərin bir yerdə yaşama qaydaları onların dörd növ qarşılıqlı təsirlərilə – güclü, elektromaqnit, zəif və qravitasiya qarşılıqlı təsirilə təyin olunur. Zərrəciklərin qurulduğu "kərpicciklər" və mikroaləmin obyektlərinin "yapışdırıcıları" olan qarşılıqlı təsir kvantları fundamental (quruluşsuz) zərrəciklərin nisbətən kiçik bir qrupunu əmələ gətirir: bunlar kvarklar, leptonlar və aralıq bozonlardır.

ELEMENTAR ZƏRRƏCİKLƏRİN "PASPORT MƏLUMATLARI"

Kütlə, yaşama müddəti, elektrik yükü, spin kimi xarakteristikaları istinasız olaraq, bütün zərrəciklərə xas olan xassələri əks etdirir. Rəng, lepton və barion ədədləri, ətir və s. kimi digər keyfiyyətlərə zərrəciklərin yalnız ayrı-ayrı növləri malikdir; qalan zərrəciklər üçün onlar sıfıra bərabərdir.

Kütlə *m*. Elementar zərrəciklərin kütləsi olduqca kiçik olduğundan (elektronun kütləsi $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ q), $\hbar = c = 1$ vahidlər sistemindən istifadə edirlər. Bu sistemdə kütlə və enerji eyni ölçüyə malikdir və elektronvoltlarla (eV) və törəmə vahidlərlə (MeV, QeV və s.) ifadə olunur. Məlum fundamental zərrəciklərin kütləsi sıfırdan başlamış (foton üçün) 176 QeV-ə qədər (*t*-kvark üçün) dəyişir; müqayisə üçün qeyd edək ki, elektronun kütləsi $m_e = 0{,}511$ MeV, protonun kütləsi isə $m_p = 938{,}2$ MeV-dir.



▸ "Zərrəciklər evdovşanları kimi artırdı". Şəkil Georgi Qamovun "Mister Tompkinsin sərgüzəştləri" kitabındandır.

$\hbar = c = 1$ sistemində sürət, impuls momenti və təsir adsızdır, impuls, enerji və kütlə isə eyni ölçüyə malikdir.
$1\,eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Kl ×
$\times 1\,V = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C;
$1\,MeV = 10^6\,eV$,
$1\,QeV = 10^9\,eV$,
$1\,TeV = 10^{12}\,eV$.

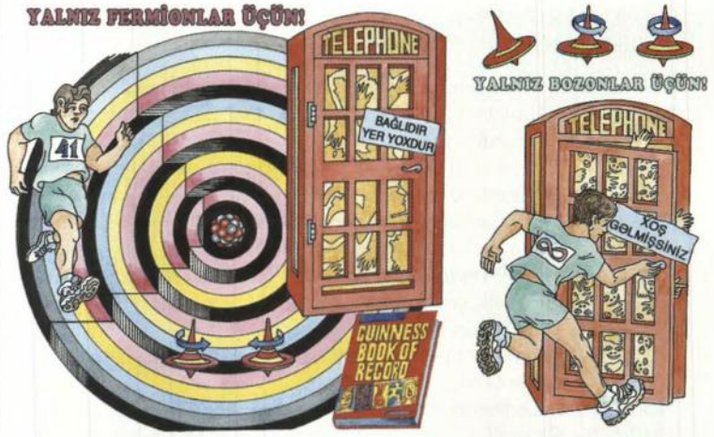
Spin *S*. Hər bir zərrəcik *spin* (*ing.* to spin – "fırlanmaq") adlanan *S* məxsusi impuls momentinə malikdir, ancaq yadda saxlamaq lazımdır ki, mikroaləmdə zərrəcik heç cür fırlana bilməz. Spin – elementar zərrəciyin makroaləmdə analoqu olmayan sırf kvant xarakteristikasıdır. Spin $\hbar = h/2\pi$ Plank sabiti vahidlərində ölçülür və yalnız tam və yarımtam qiymətlər alır. Bu fundamental nəticə relyativistik kvant sahə nəzəriyyəsindən çıxır. Bu nəzəriyyə qabaqcadan xəbər verir, təcrübə isə təsdiq edir ki, $S = 0;\ 1/2;\ 1;\ 3/2;\ 2...$ (Plank sabitini yazmamaq qəbul olunmuşdur). Spini *S* olan zərrəcik $(2S+1)$ sayda spin hallarında ola bilər. Məsələn, elektronun ancaq iki spin halı ola bilər – $2 \cdot (1/2) + 1$, yəni 1/2 və –1/2.

Elektrik yükü *Q*. Mikroaləmdə *elektrik yükünün saxlanması qanunu* doğrudur. Bu qanuna görə, qarşılıqlı təsirdən əvvəl və sonra zərrəciklərin yüklərinin cəmi bərabərdir. Zərrəciklərin yükünü elektronun yükünün mütləq qiyməti vahidlərində ölçmək qəbul olunmuşdur. Beləliklə, elektrik yükü $Q = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ Lakin adronları əmələ gətirən kvarkların elektrik yükləri elektronun yükünün 2/3-nə və ya 1/3-nə bərabər olan kəsr qiymətlər alır.

Yaşama müddəti τ. Yalnız elektron, proton, neytrino və foton stabildir. Başqa zərrəciklər özbaşına parçalanma qabiliyyətinə malikdir. Zərrəciklərin yaşama müddəti 10^{-23} san-dən (bəzi rezonanslar üçün) 900 san-yə qədər (neytron üçün) təşkil edir.

ELEMENTAR ZƏRRƏCİKLƏR ALƏMİNİN ÖYRƏNİLMƏSİNİN XRONOLOGİYASI

1897-ci il – C.C.Tomson ilk elementar zərrəciyi – *elektronu* (e^-) kəşf etdi.
1905-ci il – A.Eynşteyn işıq kvantları – *fotonlar* (γ) haqqında hipotez irəli sürdü.
1913-cü il – E.Rezerford *protonun* (*p*) varlığını qabaqcadan irəli sürdü.
1919-cu il – E.Rezerford protonu kəşf etdi.
1928-ci il – P.Dirak antizərrəcikləri, məsələn, *pozitronun* (e^+) (elektronun antizərrəciyinin) varlığı haqqında hipotez irəli sürdü.
1930-cu il – V.Pauli *neytrinonun* (ν) varlığı haqqında hipotez irəli sürdü.
1932-ci il – C.Çedvik *neytronu* (*n*) kəşf etdi.
1932-ci il – K.Anderson *pozitronu* kəşf etdi.
1935-ci il – H.Yukava pionların (*π-mezonların*) varlığını qabaqcadan xəbər verdi.
1938-ci il – K.Anderson və S.Neddermayer *müonu* ($\mu^\pm$) kəşf etdilər.
1947-ci il – S.Pauell, C.Okkialini, Ç.Aattes və H.Müirhed yüklü pionları ($\pi^\pm$) kəşf etdilər.
1949-cu il – S.Pauell və başqaları *kaonları* $K^\pm$ kəşf etdilər.
1951-ci il – İlk Λ^0–*hiperon* kəşf olundu.
1955-ci il – O.Çemperlen, E.Seqre və başqaları Berklidə (ABŞ) yerləşən ilk böyük sürətləndiricidə *antiprotonu* $\bar{p}$ kəşf etdilər.
1956-cı il – F.Reynes və K.Kouen *antineytrinonun* $\bar{\nu}$ doğurduğu reaksiyanı qeydə aldılar.
1956-cı il – Li və Yanq zəif qarşılıqlı təsirlərdə cütlüyün saxlanmadığını qabaqcadan xəbər verdilər.
1957-ci il – Vu eksperimental olaraq *zəif qarşılıqlı təsirlərdə* cütlüyün saxlanmadığını sübut etdi.
1960-cı il – Dubnada yerləşən Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunda (SSRİ) $\Sigma^\pm$ *antihiperonlar* kəşf olundu.
1961-ci il – ρ, ω *vektor mezonlar* kəşf olundu.
1962-ci il – L.Lederman, C.Steynberger və başqaları eksperimental olaraq iki növ neytrinonun (ν_e və ν_μ) varlığını sübut etdilər.
1964-cü il – M.Gell-Mann və C.Sveyq bir-birindən asılı olmadan adronların kvark modelini təklif etdilər.
1964-cü il – 1962-ci ildə M.Gell-Mannın qabaqcadan xəbər verdiyi Ω-hiperon kəşf olundu.
1964-cü il – C.Kronin və V.Fits eksperimental olaraq neytral kaonların parçalanma proseslərində *CP invariantlığın* saxlanmadığını müəyyən etdilər.
1973-cü il – İsveçrədə yerləşən Avropa Nüvə Tədqiqatları Mərkəzindəki (SERN) sürətləndiricidə "Qarqamell" qabarcıqlı kamerasında neytral cərəyanlar kəşf olundu.
1974-cü il – S.Tinq öz kolleqalarından ibarət qrupla birlikdə və onlardan asılı olmadan B.Rixter *məftun kvark* və *antikvarkdan* ibarət olan *j/ψ-zərrəciyi* kəşf etdilər ("noyabr inqilabı").
1975-ci il – M.Perl və başqaları *ağır* $\tau^\pm$ *leptonu* kəşf etdilər.
1976-cı il – M.Qoldhaber və digər tədqiqatçılar ilk *məftun barionları* və mezonları kəşf etdilər.
1981-ci il – *Gözəl b*-kvarkdan təşkil olunmuş zərrəciklər kəşf olundu.
1983-cü il – K.Rubbia və başqaları SERN-də nəzəriyyənin qabaqcadan xəbər verdiyi (kütləsi ilə birlikdə) $W^\pm$ və Z^0-bozonları kəşf etdilər.
1995-ci il – Altıncı *t*-kvark kəşf olundu.



BOZONLAR VƏ FERMİONLAR

Fermionlarla bozonlar arasındakı fərqi aşağıdakı məzəli misalın köməyilə daha sadə şəkildə başa düşmək olar. Telefon budkasında eyni zamanda yerləşən adamların sayı çox olsa da (Ginnesin Kitabına düşən rekordda – 40-a yaxın adam), sonsuz deyil, çünki yer yoxdursa, içəri girə bilməzsən. Fermionlar da özlərini belə aparır. Əgər adamlar bozonların xassələrinə malik olsaydı, onda telefon budkasında, nə qədər paradoksal görünsə də, istənilən sayda adam yerləşə bilərdi

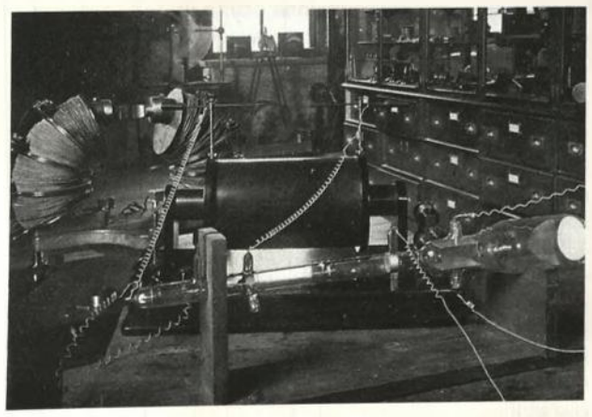
ZƏRRƏCİKLƏRİ NECƏ KƏŞF EDİRLƏR

Elektron Cozef Tomsonun katod borusunun köməyilə kəşf olunmuşdur. Bu boru laboratoriya masasının üstündə sərbəst yerləşirdi. Sonralar da, 1940-cı illərə qədər, elementar zərrəcikləri tənha tədqiqatçılar və ya iki-üç alimdən ibarət qruplar kəşf edirdi. Zaman keçdikcə həm eksperimentlər, həm də qurğular mürəkkəbləşirdi. Konkret təcrübənin iştirakçılarının sayı, həmçinin bu təcrübəyə həsr olunmuş məqalənin ortaq müəlliflərinin soyadlarının sayı tədricən artırdı: yüzlərlə müəllifi olan məqalələrə daha tez-tez rast gəlinməyə başlandı. Elementar zərrəciklər eksperimental fizikası müxtəlif peşə sahiblərinin işlədiyi sənaye istehsalına çevrilmişdir. Onların arasında fizik-eksperimentatorlar azlıq təşkil edir. Onlar tədqiqatları, lazım olan sürətləndirici işə düşməzdən xeyli əvvəl planlaşdırırlar. Çünki sürətləndiriciləri konkret məsələyə uyğun olaraq proyektləşdirirlər.

Müxtəlif növ sürətləndiricilərin quruluşunun texniki detallarının təfsilatına varmadan, başa düşməyə çalışaq ki, getdikcə daha çox nəhəngləşən qurğular və sürətləndirilən zərrəciklərin getdikcə artan enerjisi nə üçün lazımdır.

Qozun özəyini çıxarmaq üçün fərasətli meymun daşla onun qabığını sındırır. Atomun, nüvənin və elementar zərrəciyin nədən təşkil olunduğunu aydınlaşdırmaq istəyən fizik də, əslində, həmin şeyi etməlidir: "daş" seçib, onun vasitəsilə öyrənilən obyektə "zərbə endirməli" və sonra baxmalıdır ki, bundan nə çıxır. Lakin mikroobyektlərin tabe olduğu kvant fizikasının qanunları "daşı" məcbur edir ki, daş həm də "məşəl" rolunu oynasın.

Mikroobyektin xarakteristikalarının istənilən ölçülməsi və xassələrinin təyin edilməsi prosesi üç mərhələdən: öyrənilən obyekti "işıqlandıracaq" şüalanma mənbəyinin seçilməsindən; şüalanmanın obyektə qarşılıqlı təsir prosesindən; obyektdən səpilmiş şüalanmanın təhlilindən ibarətdir. Bu



C.C.Tomsonun Katod borusu.

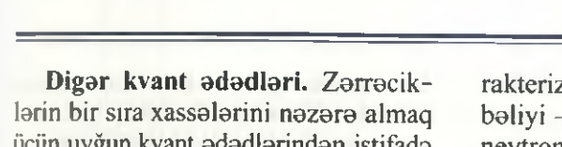


Berklidə (ABŞ) Kaliforniya universitetində bevatron – 6,2 QeV enerjili sürətləndirici.

Digər kvant ədədləri. Zərrəciklərin bir sıra xassələrini nəzərə almaq üçün uyğun kvant ədədlərindən istifadə edirlər. Həmin kvant ədədlərinə bəzən yüklər də deyirlər. Məsələn, kvarklara sarı, göy, qırmızı kimi üç qiymətdən birini qəbul edən rəng kvant ədədi (və ya sadəcə, rəng) xasdır. Kvarklardan qurulmuş adronlar tam və yarımtam qiymətlər alan I_3 *izotopik spinə* malikdir. Xüsusi halda, neytron üçün I_3-ün qiyməti $-1/2$-ə, proton üçün isə $+1/2$-ə bərabərdir. Adronlar həmçinin *qəribəliklə* də xarakterizə olunur. Λ-hiperonun qəribəliyi -1-ə, nuklonların (protonun və neytronun) qəribəliyi 0-a, K-mezonların qəribəliyi 1-ə bərabərdir. Digər kvant ədədləri də var: barion ədədi, lepton ədədi və s.

Antizərrəciklər. Hər bir zərrəciyin antizərrəciyi mövcuddur. Zərrəciklə antizərrəciyin kütləsi, spini və yaşama müddəti eynidir, lakin elektrik yükləri və onların malik olduqları digər yüklər bir-birindən işarə ilə fərqlənir. Bəzi hallarda zərrəciklə antizərrəcik üst-üstə düşə bilər (məsələn, foton).

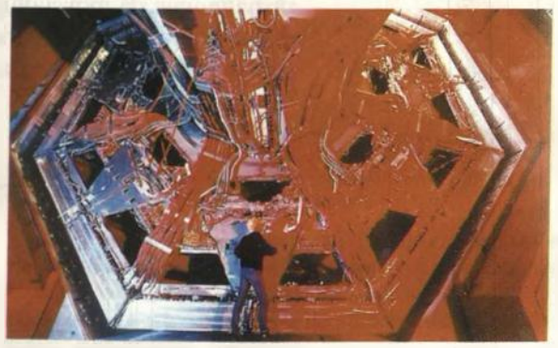
proses şüalanmanın parametrlərinin ölçülməsi əsasında obyektin xassələri haqqında fikir yürütməyə imkan verir. Başqa sözlə, nəyi isə görmək üçün, həmin "nəyi isəni" ən azı işıqlandırmaq lazımdır, həm də ondan əks olunan işıq müşahidəçinin gözünə düşməlidir. Düzdür, burada bir amma var: obyekti o zaman fərqləndirmək mümkün olur ki, onun ölçüləri istifadə edilən işığın dalğa uzunluğundan böyük olsun. Ona görədir ki, heç bir optik mikroskop vasitəsilə atomları, xüsusən də, elementar zərrəcikləri görmək mümkün deyildir. Görünən işığın dalğa uzunluğu 10^{-7} m, atomun ölçüsü isə bundan on dəfə kiçikdir, yəni 10^{-8} m-dir.



Kvant mexanikasına görə, kütləsi sıfırdan fərqli olan istənilən elementar zərrəcik (məsələn, elektron və ya proton) müəyyən şəraitdə yalnız koruskulyar xassələr yox, həm də dalğa xassələrini büruzə verir. Zərrəciyin λ dalğa uzunluğu, onun p impulsu ilə $\lambda = h/p$ – de-Broyl münasibəti vasitəsilə əlaqədardır, burada h – Plank sabitidir. Bu düstur elektron mikroskoplarını və sürətləndiriciləri hesablamaq üçün baza rolunu oynayır. Elektron mikroskoplarında və sürətləndiricilərdə işığın rolunu sürətləndirilmiş zərrəciklər, məsələn, elektronlar yerinə yetirir. Dəstədəki elektronların dalğa uzunluğu 10^{-8} m-dən, yəni atomun ölçülərindən kiçik olmalıdır. Deməli, de-Broyl münasibətinə görə, elektronun impulsu h/λ-dan kiçik ola bilməz. İmpuls böyük olduqca (elektronun enerjisi yüksək olduqca), görünən obyekt də bir o qədər kiçik olur. Məhz ona görə də getdikcə daha güclü sürətləndiricilər qururlar ki, materiyanın daha dərinliklərinə nüfuz etmək, əvvəllər bölünməz hesab edilən zərrəciklərin quruluşunu aydınlaşdırmaq mümkün olsun. Müasir sürətləndiricilər materiyanın quruluşunu və fəza-zamanın xassələrini 10^{-19} m tərtibli miqyaslarda tədqiq etməyə imkan verir.

Nəhəng enerjilərə qədər sürətləndirilmiş "işıqlandırıcı" zərrəciklər hədəfi dağıdır. Hədəflə toqquşarkən xüsusi qurğular – detektorlar vasitəsilə qeydə alınan digər zərrəciklər yaranır. Artıq hər tərəfə uçub dağılan qəlpələrin trayektoriyalarına görə, hədəf-zərrəciklərin xassələri haqqında fikir yürütmək olar.

Bu məsələ nə qədər çətindir? t-kvark axtarılan vaxt, bir il ərzində iki detektorda "işıqlandırıcı" protonların antiproton hədəflərlə 6 trln toqquşması qeydə alınmışdır (alınmış məlumatlar dərhal ifratgüclü kompüterlər vasitəsilə fiksə olunur və onların yaddaşında saxlanılır). Bir neçə ay ərzində müxtəlif kriteriyalardan istifadə edərək, hadisələrin seçimini aparmışlar. Nəticədə namizəd-hadisələrin sayı 40 mln-a qədər azaldı. Onları artıq xüsusi diqqətlə təhlil etdilər. Yekun nəticə belədir: detektorların birində 43 dənə, o birində isə 17 dənə t-kvarkın doğulması hadisəsi aşkar edildi.



Yüklü zərrəciklər detektoru "Qarqamell". Avropa nüvə tədqiqatları mərkəzi (SERN).

sələn, antifoton fotonla tam eynidir). Antizərrəciyin mövcud olması relyativistik kvant sahə nəzəriyyəsinin əsas tənliklərinin nəticəsidir və təcrübədə tam təsdiq olunmuşdur.

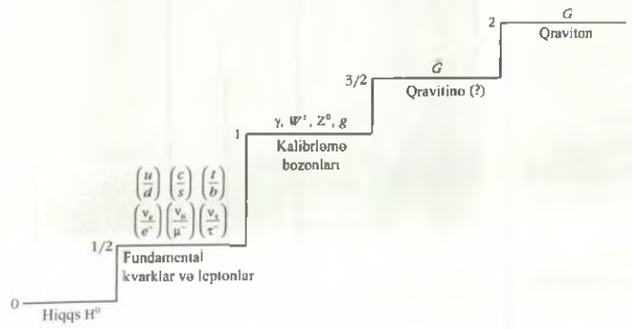
FUNDAMENTAL ZƏRRƏCİKLƏR

Bütün fundamental (başqa sözlə, fizikanın baxılan inkişaf səviyyəsində quruluşsuz, bölünməz hesab olunan) zərrəcikləri, spinlər pilləkəni adlanan pilləkəndə göstərildiyi kimi, bir neçə qrupa bölürlər.

Spini $S=1/2$ qrupa materiyanın fundamental toplananları – *leptonlar* və *kvarklar* daxildir; spini $S=1$ olan qrupa qarşılıqlı təsirlərin daşıyıcıları – γ *foton*, W və Z *aralıq bozonlar* və g *qlüonlar* daxildir.

Spini $S=0$ olan zərrəcik – *hiqqs bozonu* H^0 və ya *hiqqs* təklikdə qalıb. Hiqqsin mövcudluğunu Standart model qabaqcadan xəbər verir, lakin bu zərrəcik hələ qeydə alınmayıb (kütləsinin çox böyük, təxminən bir neçə qiqa-elektronvolta bərabər olmasına görə).

Nəzəriyyə həm də qravitasiya qarşılıqlı təsir kvantının – spini $S=2$ olan G *qravitonun*, habelə onun, supersimmetrik nəzəriyyələr tərəfindən qabaqcadan xəbər verilən *superpartnyorunun* da, yəni spini $S=3/2$-yə bərabər olan *qravitinonun* da mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verir. Kvarklar və leptonlar kütləsi getdikcə artan *dublet-*



Spinlər pilləkəni.

lər əmələ gətirir (hər bir dublet sxemdə mötərizə daxilində yazılır). u-kvarkın kütləsi – 4,2 MeV, d-kvarkın kütləsi – 7,5 MeV, s-kvarkın kütləsi – 150 MeV, c-kvarkın kütləsi – 1,4 QeV, b-kvarkın kütləsi – 4,8 QeV, t-kvarkın kütləsi ≈ 176 QeV-dir. Kvarkların və leptonların göstərilən dubletləri birləşib *nəsillər* əmələ gətirir: elektron nəsli; müon nəsli və tau nəsli (sxemdə nəsil – dubleti ifadə edən bir cüt şaquli mötərizədir). Hər bir nəsildə kvarkların dubleti 2/3 və –1/3 yükünə malikdir.

Lakin spinlər pilləkənində, ilk baxışda görünəndən daha çox zərrəcik yerləşir. Məsələn, (u, d, c, s, t, b) altı kvarkdan hər birinin üç müxtəlif növü vardır – hər biri üç müxtəlif rəngdə mövcuddur, yəni müxtəlif kvarkların tam sayı 18-ə bərabərdir. Güclü qarşılıqlı təsirin daşıyıcıları olan səkkiz qlüon g vardır. Onlar *oktet* adlanan qrup əmələ gətirir... Artıq deyildiyi kimi, fotondan başqa, hər bir zərrəciyin öz antizərrəciyi var.

FUNDAMENTAL QARŞILIQLI TƏSİRLƏR

Güclü qarşılıqlı təsir (GQT) kvarkları adronlarda birləşdirir, onun qalıq "nüvə qüvvələri" neytronları və protonları atom nüvələrinin daxilində saxlayır. Güclü qarşılıqlı təsirdə iştirak edən adronlar barionlara və mezonlara bölünür. *Barionların* spini yarım tamdır və onlar üç kvarkdan əmələ gəlib ($B\sim qqq$), *mezonların* isə spini tamdır və onlar kvark və antikvarkdan ibarətdir ($M\sim q\bar{q}$). *Elektromaqnit qarşılıqlı təsiri* (EMQT) fotonların iştirak etdiyi bütün proseslərə (işığın atomlar tərəfindən şüalanması və udulması) və maddənin xassələrinə (elastikliyə və sürtünmə qüvvəsinə qədər) cavabdehdir. *Zəif qarşılıqlı təsir* (ZQT) özünü

ELEMENTAR ZƏRRƏCİKLƏRİN QARŞILIQLI TƏSİRİNİ NECƏ "GÖRMƏLİ"

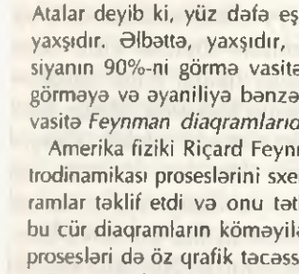
Atalar deyib ki, yüz dəfə eşitməkdənsə, bir dəfə görmək yaxşıdır. Əlbəttə, yaxşıdır, çünki insan şüurlu informasiyanın 90%-ni görmə vasitəsilə alır. Mikroaləmdə gözlə görməyə və ayaniliyə bənzər bir şeyi təmin edən yeganə vasitə *Feynman diaqramlarıdır*.

Amerika fiziki Riçard Feynman 1949-cu ildə kvant elektrodinamikası proseslərini sxematik təsvir etmək üçün diaqramlar təklif etdi və onu tətbiq etməyə başladı. Sonralar bu cür diaqramların köməyilə güclü və zəif qarşılıqlı təsir prosesləri də öz qrafik təcəssümünü tapdı.

Feynman diaqramlarının dəyəri yalnız ondan ibarət deyil ki, o, bizə zərrəciklərin konkret qarşılıqlı təsir prosesi haqqında keyfiyyətcə təsəvvür verir. Hər bir diaqram hesablamalar üçün, yəni əks etdirdiyi prosesin xarakteristikalarının kəmiyyətcə qiymətləndirilməsi üçün əlverişli bir sxemdir. Əbəs yerə demirlər ki, Feynman diaqramları "kvant sahə nəzəriyyəsi tənliklərinin həllini təsvir etməyin qrafiki metodudur". "Leqo" oyununda mürəkkəb konstruksiyalar ayrı-ayrı elementar bloklardan təşkil olunduğu kimi, real qarşılıqlı təsir diaqramı da az sayda sadə diaqramlar toplusundan əmələ gəlir.

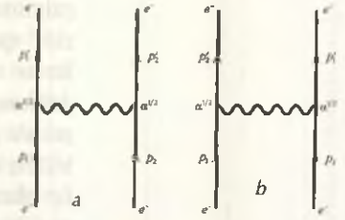
Hər bir diaqrama müəyyən bir riyazi ifadə – prosesin amplitudu uyğun gəlir. Bu amplitudun modulunun kvadratı kvant mexanikasının qaydalarına görə prosesin müşahidə olunan ehtimalı ilə mütənasibdir.

Zərrəciklərin elementar qarşılıqlı təsir aktı diaqramlarda elementar təpə ilə – bu aktda iştirak edən zərrəcikləri göstərən oxların kəsişmə nöqtəsi ilə təsvir edilir. Məsələn, elektromaqnit qarşılıqlı təsirlərdə fotonları dalğalı oxlarla, elektronları isə bütöv oxlarla təsvir etmək qəbul edilmişdir. Çox vaxt oxun yanında zərrəciyi işarə edən hərfi də yazırlar, təpələri isə rəqəmlərlə nişanlayırlar. Diaqramdakı təpələrin sayı, diaqramın tərtibini təyin edir.



Kvant elektrodinamikasında sadə qarşılıqlı təsir təpəsi.

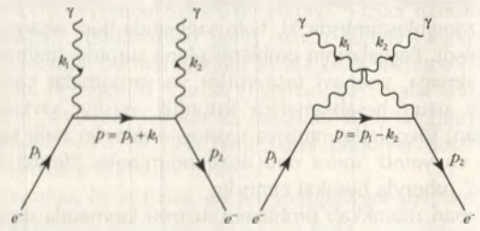
Hər təpədə enerji–impulsun saxlanması qanunu ödənir. Hər təpəyə qarşılıqlı təsir sabiti – elektronun yükü və ya (adsız vahidlərdə) incə quruluş sabiti α-nın 1/2 qüvvəti daxildir. Bu o deməkdir ki, hər hansı diaqramla təsvir



$e^- + e^- \to e^- + e^-$ səpilmə prosesinin diaqramları.

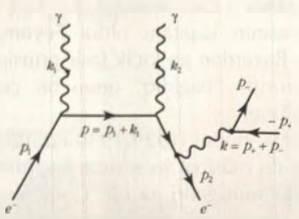
olunan prosesin amplitudunu yazarkən, hər təpə amplituda $\alpha^{1/2}$ ilə mütənasib olan pay verəcəkdir.

Diaqramlar sondakı elektron xətlərinin yerdəyişməsi ilə fərqlənir. Kvant mexanikası baxımından *a* prosesini *b* prosesindən fərqləndirmək qeyri-mümkündür. Bu, zərrəciklərin fundamental xassəsi olan eyniyyətliklə (seçilməzliklə) bağlıdır: bir elektronu digərindən fərqləndirmək üçün, elektronlardan üzərində nömrə olan birkalar asmaq olmaz.



$\gamma + e^- \to \gamma + e^-$ prosesinin diaqramları (Kompton effekti).

Sağdakı diaqram soldakı diaqramdan başlanğıc və son fotonların xətlərinin yerdəyişməsilə fərqlənir.



Böyük enerjili fotonun elektrondan səpilməsi zamanı e^+e^- cütünün doğulması prosesinin diaqramlarından biri.

Cütün doğulduğu təpədə enerji-impulsun saxlanması qanunu ödənir, bu şərtlə ki, antizərrəciyin 4-impulsunun işarəsinin əks olduğunu nəzərə almaq lazımdır: $k-p_+=p_-$, buradan $k=p_-+r_+$ olur ki, bu da virtual foton tərəfindən cütün doğulmasına uyğundur. Diaqramda bütün daxili xətlərin impulsları prosesin başlanğıcında və sonunda olan zərrəciklərin xarici impulsları ilə birqiymətli təyin olunur.

neytrinonun iştirakı ilə gedən proseslərdə və adronların yavaş parçalanmalarında (məsələn, neytronun β-parçalanmasında) büruzə verir. Belə ki, zəif qarşılıqlı təsirlər ulduzun daxilində termonüvə proseslərinin energetikasını təmin edir. *Qravitasiya qarşılıqlı təsiri* (QQT) istisnasız olaraq, bütün zərrəciklərə (hətta, kütləsi sıfır olan zərrəciklərə də) və sahələrə, o cümlədən elektromaqnit sahəsinə xasdır (çünki sahələr maddidir və enerjiyə malikdir). Ümumi nisbilik nəzəriyyəsi göstərir ki, ümumdünya cazibəsinin mənbəyi yalnız kütlə yox, istənilən enerji forması ola bilər.

Müasir təsəvvürlərə görə, cisimlər arasındakı qarşılıqlı təsir, bu cisimləri əhatə edən *sahə* vasitəsilə ötürülür. Kvant nəzəriyyəsində sahənin özü, bu sahənin kvantları toplusu kimi başa düşülür. Xüsusi halda, foton elektromaqnit sahəsinin kvantıdır. Bütün qarşılıqlı təsirlərin sxemi eynidir. Qarşılıqlı təsirlərin hər bir növünün öz daşıyıcısı (və ya daşıyıcıları) var və qarşılıqlı təsirlərin hər bir növü zərrəciklər tərəfindən uyğun sahə kvantlarının buraxılıb-udulmasına gətirilir. Qarşılıqlı təsirin radiusu daşıyıcının kütləsi ilə təyin olunur: kütlə böyük olduqca radius kiçik olur.

Kvant elektrodinamikasında yüklü zərrəciklərin qarşılıqlı təsiri kütləsi sıfır olan fotonların – uzağa təsir edən elektromaqnit sahəsinin daşıyıcılarının mübadiləsi ilə şərtlənir. Kvarklar nəzəriyyəsində fotonların yerini qlüonlar tutur. Qlüonlarla mübadilə sayəsində kvarklar bir-birini cəzb edir. Elektrozəif qarşılıqlı təsirlərdə $W^{\pm}$ və Z^0 aralıq bozonlarının mübadiləsi baş verir.

Müxtəlif qarşılıqlı təsirlərin intensivliyini müqayisə etməkdən ötrü onların hər biri üçün adsız (ölçüsüz) *qarşılıqlı təsir sabiti* daxil edilir. Qarşılıqlı təsir sabiti təcrübi məlumatlar əsasında dünyəvi sabitlərlə ifadə olunur. Belə ki, elektromaqnit qarşılıqlı təsir üçün bu, hələ A.Zommerfeld tərəfindən 1919-cu ildə daxil edilmiş $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137 = 7{,}299 \cdot 10^{-3}$ incə quruluş sabitidir. Güclü və zəif qarşılıqlı təsirlərin adsız qarşılıqlı təsir sabiti uyğun olaraq $\alpha_{GQT} \approx 0{,}2$ və $\alpha_{ZQT} \approx 10^{-5}$ qiymətlərinə malikdir. Qravitasiya qarşılıqlı təsirinin analoji adsız qarşılıqlı təsir sabiti $\alpha_{QQT} \approx 6 \cdot 10^{-39}$-a bərabərdir. Bu, zəif qarşılıqlı təsir sabitindən 33 tərtib (!) kiçikdir. Yer şəraitində zərrəciklərin qarşılıqlı təsirini təhlil edərkən, qravitasiya qüvvələrini nəzərə almırlar, astrofizika və kosmologiyada isə onlar üstünlük təşkil edir.

RİÇARD FEYNMAN

Riçard Fillips Feynman (1918-1988) müasir fizikanı çoxlu sayda qeyri-adi və səmərəli ideyalar və nəzəriyyələrlə o qədər zənginləşdirmişdir ki, hələ sağlığında ikən əfsanəyə çevrilmişdi. Başqalarının problemi planlı surətdə "mühasirəyə" almağa, ənənəvi təsəvvürlər və yanaşmalar çərçivəsində uzun hesablamalara üstünlük verdiyi yerlərdə Feynman, fövqəladə intuisiya vasitəsilə düzgün həlli tapmaqla və yalnız sonra onu əsaslandırmaqla, "fırtına və hücum" ruhunda hərəkət etmişdir.

Feynman mürəkkəb problemin açarını tapmaqda qeyri-adi qabiliyyətə malik idi. Başqa yanaşmada qaçılmaz olan çətinliklərin yanından ötüb keçməyə imkan verən bu qabiliyyət Feynmanda hələ məktəb illərində, o, ən mürəkkəb bağlamaları asanlıqla "açanda" üzə çıxmışdı. Tezliklə o, ilk nüfuzu qazandı – cəbr məsələlərini həll etmək üzrə məktəb komandasının kapitanı oldu. Feynman məktəb müəllimi Abram Bazerdən ən kiçik təsir prinsipi haqqında eşitmişdi. Bu prinsipə "bağlılıq" onun bir çox işlərində açıq-aşkar hiss olunur.

Böyük depressiya illərini (1929-1930-cu illər) Feynmanlar ailəsi o qədər də müsibət və sarsıntı keçirmədən yaşadı, baxmayaraq ki, ailənin gəliri az idi. Gələcək fizikin atası Melvill Artur Feynman tikiş fabrikində məişət şöbəsində müdir işləyirdi. Qızlıq familiyası Lyusil Fillips olan anası uşaqlara baxırdı (Riçardın özündən kiçik bacısı var idi) və ev işlərini görürdü. Məktəb illərində Riçard radioqəbuledici təmir etməklə pul qazanırdı.

1935-ci ildə Feynman Massaçusets Texnologiya İnstitutuna (MTİ) daxil olmuşdur. Məhz orada gənc, fizika ilə maraqlanmağa başlamışdı. Feynman 1939-cu ildə oranı bitirib, öz təhsilini Prinston universitetinin aspiranturasında Con Uilerin yanında davam etdirmişdir. Doktorluq dissertasiyası üzərində iş müvəffəqiyyətlə davam edirdi, lakin onu bitirməyə Feynman macal tapmadı: Amerika İkinci dünya müharibəsinə qoşuldu. Feynmanı Manxetten proyektinə (atom bombasının yaradılmasına) cəlb etdilər. O, necə isə möcüzə göstərərək, vaxt tapıb doktorluq dissertasiyasını başa çatdırdı və müdafiə etdi (1942-ci il), 1943-cü ilin əvvəlində isə Los-Alamosa köçdü. Orada, tam məxfi şəraitdə nüvə silahı üzərində iş aparırdı. Nəzəri şöbənin başçısı Hans Bete istedadlı əməkdaşa diqqət yetirdi və tezliklə Feynman qrupun ən gənc rəhbəri oldu.

Müharibə qurtaran il, Feynman Kornell universitetində professor vəzifəsini tutdu, 1950-ci ildən ömrünün axırına qədər isə Kaliforniya Texnologiya İnstitutun (Kaltex) professoru oldu. Kornellda o, Culius Şvingerdən və Sinitiro Tomonaqidən asılı olmadan kvant elektrodinamikasının öz variantını təklif etdi. Bunun işlənib-hazırlanmasına görə hər üçü Nobel mükafatına layiq görüldü (1965-ci il).

Obrazlı təfəkkür və mənasız hesablamalara nifrət, onun Feynman diaqramları adlanan metodu yaratmasına səbəb oldu. Feynman diaqramları uzun və yorucu hesablamalara əl atmadan, yalnız (müəyyən qaydalar üzrə) "şəkillər" çəkməklə, elementar zərrəciklərin qarşılıqlı təsirlərini təsvir etməyə imkan verir. Kvant mexanikasında Feynmanın təklif etdiyi *trayektoriyalar üzrə inteqrallar metodu* da, demək olar ki, əyani və "qrafik" mənaya malikdir. Bu metoda görə başlanğıc nöqtədən son nöqtəyə zərrəciyin yerdəyişməsi trayektoriyalar çoxluğu üzrə baş verə bilər. Bu trayektoriyaların hər birini uyğun "çəki" ilə – ehtimalla götürmək lazımdır. Feynman Lars Onsagerdən asılı olmadan ifratkeçirici heliumda *kvant burulğanları* və ya *rotonlar* (tüstü halqalarının müəyyən oxşarı) nəzəriyyəsini işləyib hazırlamış, *partonlar* (partonlar – protonların və neytronların təbəsi xarici diferensial formaları ondan əvvəl öyrənib, tələbəsinin həmin aparata dair silsilə mühazirələrini dinləməyi öz ləyaqətinə sığışdırmışdı.

Riçard Feynman Bi-bi-Sidə verdiyi "Fizika qanunlarının xarakteri" mühazirələri geniş oxucu auditoriyasına tanışdır. Sonralar bu mühazirələr ayrıca kitab şəklində buraxılmışdır. Feynmanın "Cənab Feynman, siz zarafat edirsiniz", "Sizin nəyinizə lazımdır ki, başqaları sizin haqqınızda nə düşünür" və "Altı qısa pyes" kimi populyar nəşrləri də geniş oxucu kütləsinə tanışdır.

Feynman üçün fizika yorucu məşğuliyyət yox, əyləncəli bir oyun idi. O, özünü bu oyuna uşaq sevincilə həsr etmişdi. Feynmanın digər maraqları ("bonqo" barabanlarında çalmaq, rəssamlıq, yapon dilini öyrənmək və s.) onun həyatına rəngarənglik versə də, fizika onun başlıca işi olaraq qalmışdı. Dünyanın necə qurulduğunu dərk etməkdən maraqlı nə ola bilər?!



R.Feynman.



D.Şvinger.



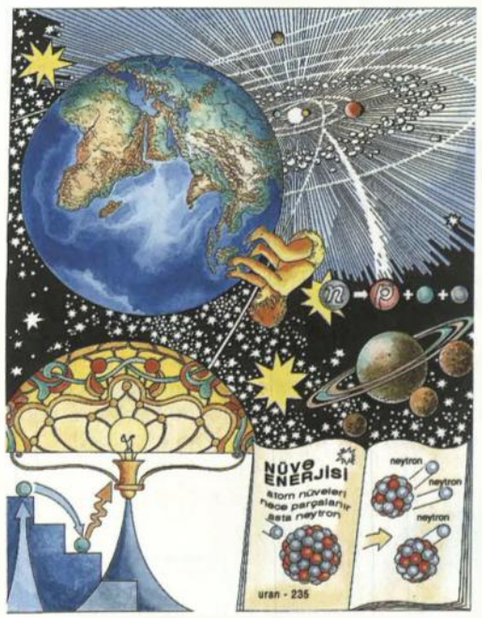
S.Tomonaqanın Nikaraqua markasında portreti.



H.Yukava.

Atom nüvələrinin kəşfindən və onun protonlardan əmələ gəldiyi müəyyən olunduqdan sonra güclü qarşılıqlı təsirin mövcudluğu aydın oldu. Məlum oldu ki, nüvəni tərkib hissələrinə bölmək asan deyil – onun daxilində protonları və neytronları hansısa qüvvələr bir yerdə saxlayır. Bu qüvvələr protonlar arasındakı elektrostatik itələmə qüvvələrindən xeyli böyükdür. Bununla bərabər, nüvə qüvvələri çox kiçik təsir radiusuna – nüvənin ölçüsü tərtibində ($R \sim 10^{-15}$ m) təsir radiusuna malikdir.

Nüvə qüvvələrinin ilk kvant nəzəriyyəsini yapon fiziki Hidoki Yukava (1907-1981) təklif etmişdir. Yukava



həmin dövrdə məlum olan belə bir ideyaya əsaslandı ki, təbiətdəki bütün fundamental qüvvələr müəyyən zərrəciklərlə – qarşılıqlı təsir daşıyıcıları ilə mübadilə nəticəsində yaranır. Yukava nüvənin ölçüləri haqqındakı eksperimental məlumatlara əsaslanaraq, nüvə qarşılıqlı təsirinin daşıyıcıları olan zərrəciklərin kütləsini qiymətləndirə bildi. Doğrudan da, əgər nüvənin ölçüsü R-ə bərabərdirsə, deməli, nüvə daxilində nuklonlar arasındakı məsafədə həmin tərtibdədir. İstənilən nuklon cütü arasında təsir edən qüvvə ona görə yaranır ki, onlar arasıkəsilmədən qarşılıqlı təsir daşıyıcıları olan zərrəcikləri buraxır və udur. Bir halda ki, daşıyıcı-zərrəcik nuklonlar arasındakı məsafə tərtibində olan oblastda yerləşir, onda belə zərrəciyin impulsu $p \sim \hbar/R$. Tutaq ki, $p = mc$, onda $mc^2 \sim \hbar/R_c$. Ədədi qiymətləri yerinə yazıb, daşıyıcı zərrəciyin sükunət enerjisini qiymətləndirə bilərik: $mc^2 \sim 200$ MeV. Bu zərrəciklər *pionlar* (π-*mezonlar*) adlandırıldı.

Zəif qarşılıqlı təsirə aid yeganə məlum misal uzun müddət neytronların və nüvələrin β-parçalanması olmuşdur. Hələ 1934-cü ildə italyan fiziki Enriko Fermi (1901-1954) β-parçalanmanın nəzəriyyəsini qurmuş və zəif qarşılıqlı təsirin G_F sabitini daxil etmişdi. G_F sabiti Fermi sabiti adlanır və ölçüsü olan sabitdir. Uyğun adsız (ölçüsüz) α_{ZQT} sabiti aşağı temperaturlarda α incə quruluş sabitindən çox-çox kiçikdir, ona görə də bu qarşılıqlı təsir zəif qarşılıqlı təsir adını almışdır. Zəif qarşılıqlı təsirin əsas tədqiqatları 1950-1960-cı illərdə başlanmış və fundamental kəşflərə səbəb olmuşdur. Bu kəşflər o dərəcədə radikal olmuşdur ki, fiziklər nəinki adi təsəvvürlərdən əl çəkmişlər, həm də tamamilə yeni dilə – dinamik simmetriyalar dilinə keçmişlər.

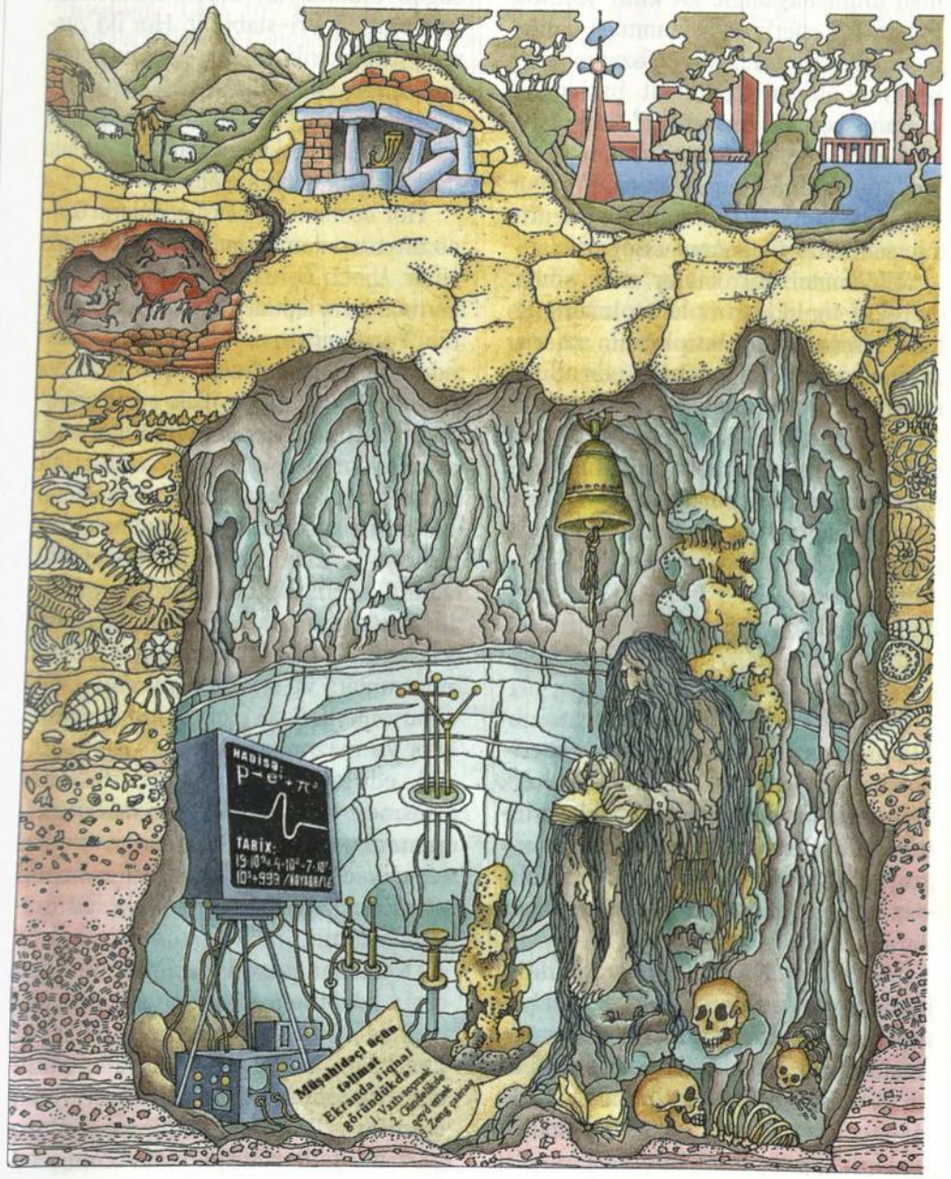
"İnvariantlıq prinsipləri olmadan təbiət qanunları mövcud ola bilməz... Əgər hadisələr arasındakı korrelyasiyalar gündən-günə dəyişsə idi və fəzanın müxtəlif nöqtələri üçün müxtəlif olsaydı, onda təbiət qanunlarını kəşf etmək mümkün olmazdı...

Məhz bir pillədən digərinə, daha yüksək pilləyə keçid – hadisələrdən təbiət qanunlarına, təbiət qanunlarından simmetriyaya və ya invariantlıq prinsiplərinə keçid – mənim ətraf aləm haqqında bizim biliyimizin iyerarxiyası adlandırdığım bir şeydir".

Y.Viqner

SİMMETRİYALAR VƏ SAXLANMA QANUNLARI

Nyuton-Maksvell klassik fizikasında saxlanma qanunları və simmetriya prinsipləri əsasən ikinci dərəcəli rol oynamışdır. Onların köməyilə məlum tənliklərin alınmış həllərinin doğruluğunu yoxlayırdılar, artıq mövcud olan nəzəriyyələrə riyazi bəzək verirdilər. Hərəkət qanunlarına nəzərən simmetriya prinsiplərinin və saxlanma qanunlarının daha ümumi xarakter daşıdığını termodinamikanın qanunlarını, mexanikada variasiya prinsiplərini formulə

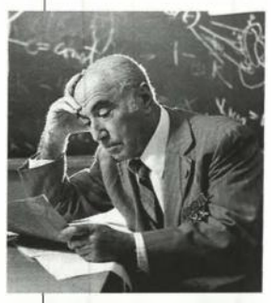




E.Nöter.

Barionlar və leptonlar yüklərlə yox, B və L ədədləri ilə xarakterizə olunur, çünki Q elektrik yükündən fərqli olaraq, B və L ədədləri uyğun sahələrin qarşılıqlı təsir sabitinə daxil deyildir.

Lepton ədədinin saxlanması qanunu 1953-cü ildə eyni zamanda sovet fiziki Yakov Borisoviç Zeldoviç, amerikalı Emil Konopinski və macar fiziki Dörde Marks tərəfindən daxil edilmişdir.



Y.B.Zeldoviç.

edərkən, xüsusən də kvant nəzəriyyəsinin riyazi aparatının inkişafı ilə əlaqədar dərk etməyə başladılar.

1918-ci ildə alman riyaziyyatçısı Emmi Nöter (1882–1935) fəza-zamanın simmetriyası ilə müəyyən kəmiyyətlərin saxlanması qanunları arasında olan əlaqəni aşkar etdi. Qapalı sistem üçün zamanın bircinsliyi (istənilən zaman anını başlanğıc an kimi seçmək imkanı) E enerjinin saxlanması qanununu, fəzanın bircinsliyi (fəzanın istənilən nöqtəsini koordinat başlanğıcı olaraq seçmək imkanı) $\vec{p}$ impulsun saxlanması qanununu, fəzanın izotropluğu (bütün istiqamətlərin bərabər hüquqlu olması) $\vec{L}$ impuls momentinin saxlanması qanununu doğurur.

Elementar zərrəciklər fizikasında, hərəkət tənlikləri məlum olmadığından, simmetriya prinsiplərinin axtarışı birinci dərəcəli məna kəsb edir. Simmetriya prinsipini və ya riyaziyyatçıların dediyi kimi, simmetriya qrupunu bilmək, əsas kəmiyyətlərinin təbii topluşunu dərhal tapmağa imkan verir. Zərrəciklərin halını onların köməyilə təsvir edirlər.

LEPTON VƏ BARİON ƏDƏDLƏRİNİN SAXLANMASI QANUNLARI

Bir çox saxlanma qanunları eksperimental faktların nəticəsidir və hələlik hər hansı bir nəzəriyyənin "ilkin prinsipləri" əsasında öz izahlarını tapmamışdır. Lepton və barion ədədlərinin saxlanması qanunları bu cür qanunlara aiddir.

Spinlər pilləkəninin təsvir edildiyi şəkildə göstərildiyi kimi ("Materiyanın ilkin əsasları. İyirminci əsr" məqaləsinə bax), leptonların üç nəsli: elektron, müon və tau nəsilləri mövcuddur. Leptonların iştirakı ilə gedən reaksiyalar haqqında tədricən toplanan eksperimental məlumatlar alimləri belə bir nəticəyə gətirdi ki, leptonların hər bir növü, onu başqa növlərdən fərqləndirən müəyyən bir xarakteristikaya malikdir. Bu özünü ən parlaq surətdə μ^- müonun e^- elektrona və γ fotona parçalanma reaksiyasının olmamasında büruzə verir, yəni $\mu^- \to e^- + \gamma$. Belə çıxırdı ki, bu reaksiya heç nə ilə qadağan olunmayıb: müon elektrondan ağır olub, qeyri-stabildir. Hər iki zərrəciyin elektrik yükləri eynidir. Onda bəs müon göstərilən sxem üzrə niyə parçalanmasın? Deməli, əlavə qadağa var ki, onu saxlanma qanunu dilində ifadə etmək daha sadədir.

Hər nəslin leptonlarına, onların özünə məxsus olan *lepton ədədi* (*yükü*) aid edək; $L_e = 1$, $L_\mu = 1$, $L_\tau = 1$. Bütün qalan zərrəciklərin lepton yükü sıfıra bərabərdir. Tərifə görə, antileptonların lepton ədədləri –1-dir. İndi *lepton ədədinin saxlanması qanununu* ifadə edək: zərrəciklər arasında baş verən istənilən reaksiyada hər nəslin lepton ədədlərinin cəbri cəmi reaksiyadan əvvəl və sonra bir-birinə bərabərdir. Bu qanunun icazə verdiyi reaksiyalar müşahidə olunur, qanunla qadağan olunanlar isə yox.

Eyni qayda ilə B barion ədədi daxil edilir. Bütün barionlara (protonlara, neytronlara və s.) $B = 1$ qiymətini, antibarionlara $B = -1$ qiymətini, leptonlara və mezonlara isə $B = 0$ qiymətini aid edirlər. Eksperimental faktların əsasında *barion ədədinin saxlanması qanununu* formulə etdilər: istənilən reaksiyada barion ədədlərinin cəbri cəmi reaksiyanın əvvəlində və sonunda eynidir.

Kvarklar nəzəriyyəsi barion ədədinin saxlanması qanunu ilə uzlaşdırılmışdır. Tərifə görə, barionlar üç kvarkdan, antibarionlar üç antikvarkdan, mezonlar kvark və antikvarkdan ibarətdir. Barionların və mezonların barion ədədlərinin əvvəlki kimi saxlanması qanununa tabe olması üçün, kvarklara $B_q = 1/3$, barion ədədi, antikvarklara isə $B_q = -1/3$ barion ədədi aid edirlər. Bu günə qədər lepton və barion ədədlərinin saxlanması qanunlarının heç bir pozulması qeydə alınmamışdır. Bununla bərabər artıq iyirmi ildir ki, hələlik barion ədədinin saxlanması qanunu ilə qadağan olunmuş protonun parçalanmasını qabaqcadan xəbər verən nəzəri modellər inkişaf etdirilir. Belə prosesin mövcud olması Kainatın barion asimmetriyasını izah etmək üçün son dərəcə zəruridir.

Lepton ədədlərinin saxlanması qanunlarının icazə verdiyi reaksiyalar:
$\mu^- \to e^- + \nu_e + \nu_\mu$
(L_e: 0 = 1 + (–1);
L_μ: 1 = 1);
$\nu_\mu + e^- \to \nu_e + \mu^-$
(L_e: 1 = 1;
L_μ: 1 = 1).

Qadağan olunmuş reaksiyalar:
$\nu_e + \varepsilon^- \to \nu_\mu + \mu^-$
(L_e: 1 + 1 ≠ 0,
L_μ: 0 ≠ 1 + 1);
$\mu^- \to e^- + \gamma$
(L_e: 0 ≠ 1,
L_μ: 1 ≠ 0).

Barion ədədinin saxlanması qanunu 1938-ci ildə İsveçrə fiziki Ernst Ştükelberq tərəfindən postulat kimi qəbul edilmişdir.

PROTONUN PARÇALANMASINI BİZ GÖRƏ BİLƏCƏYİKMİ?

Protonun nəzəri olaraq qabaqcadan xəbər verilən yaşı həddən ziyadə böyükdür və 10^{32} ildən çoxdur. Bu ədədin nəhəngliyini anlamaq üçün Kainatın yaşını yada salmaq lazımdır – Kainatın "cəmisi" 10^{10} ilə yaxın yaşı var! Belə parçalanmanın qeydə alınmağına necə ümid etmək olar?

Prosesin özünün ehtimallı xarakteri köməyimizə çatır, çünki ətrafımızda protonlar çoxdur. Əgər bizim ixtiyarımızda yalnız bir proton olsaydı, onun parçalanma ehtimalı ildə 10^{-32}-yə bərabər olardı ki, bu da praktik olaraq sıfıra bərabərdir. Lakin 10^{32} protondan ildə heç olmazsa biri parçalanmalıdır. Axtarışın strategiyası bundan ibarətdir. Böyük qab götürüb, ona su tökmək, ətrafda qeydə alan cihazlar yerləşdirmək lazımdır. Bu cihazlar, protonun

$$p \to \pi^0 + e^+$$

parçalanması zamanı, məsələn, pozitronu qeydə ala bilər.

Müşahidəçiyə yalnız belə bir anı gözləmək qalır. Bununla belə, kosmik şüalanmanın "yad" zərrəciklərindən də güclü müdafiə olunmaq lazımdır, çünki həmin "yad" zərrəciklər cihazlara düşərək, yerdəki protonun parçalanmasını imitasiya (təqlid) edə bilər. Ona görə də protonun parçalanmasının axtarışı ilə məşğul olan laboratoriyalar yerin altında çox böyük dərinliklərdə yerləşir və ya dağlarla müdafiə olunur, yəni Cənubi Afrikanın və ABŞ-ın qızılçıxarma şaxtalarında, İtaliya ilə Fransa arasındakı sərhəddə Alp dağlarındakı tuneldə, Qafqazdakı Baksan dərəsində, Yaponiya şaxtalarının birində yerləşir.

Ən nəhəng qurğu Yaponiyada qurulmuşdur ("Superkamiokande" detektoru). O, hündürlüyü 41 m, diametri 39 m olan və su ilə doldurulmuş silindrdir. Suyun kütləsi 50 min tondur. 1996-cı ildən başlayaraq, protonun parçalanma məhsullarını qeydə almaq üçün eksperimentlər aparılır.

ADRONLARIN DAXİLİ SİMMETRİYALARI

Zərrəciklər aləmində fəza-zaman simmetriyaları ilə yanaşı, daxili və ya dinamik simmetriyalar adlanan başqa təbiətli simmetriyalar da qüvvədədir. Onlar, məsələn, bütün adronlar çoxluğunu təsnifatlaşdırmağa imkan verir. Adronlar kvarklardan təşkil olunmuş və güclü qarşılıqlı təsirdə iştirak edən zərrəciklərdir.

1960-cı illərdə bu tədqiqat istiqaməti zərrəcik fizikasında aparıcı olmuşdur. Protonları bir neçə on qiqaelektronvolta qədər sürətləndirməyə qadir olan güclü sürətləndiricilər – sinxrofazotronlar həmin dövrdə işə salındı. Elementar zərrəciklərin kəşf edilməsində həqiqi canlanma yarandı. Onlarca və yüzlərlə adron hallarını nizamlamaq tələb olunurdu. 1960-1970-ci illərdə nəzəriyyəçi-fiziklər əsas diqqəti adronlar aləmində daxili simmetriyaların axtarışına yetirdilər.

Daxili simmetriyanın nə olduğunu konkret misal üzərində izah etmək hamısından yaxşıdır. İki ən yüngül bariona – proton və neytrona baxaq. Bu zərrəciklərin kütlələri çox yaxındır: $m_p = 938{,}2$ MeV, $m_n = 939{,}5$ MeV. Protonun yükü $Q = +1$, neytronun yükü $Q = 0$. Təcrübələr göstərir ki, hər iki zərrəcik güclü qarşılıqlı təsir reaksiyalarında özlərini eyni cür aparır. Əgər elektromaqnit yükünü nəzərə almasaq, onda qalan hər şeydə onlar bir-birindən seçilməzdir. Nüvə aləmində proton və neytron vahid bir zərrəcik – nuklon kimi çıxış edir. Nuklon iki müxtəlif halda – proton və neytron hallarında ola bilər.

Proton və neytronun bir-birilə "qarşılıqlı əvəz oluna bilməsini" riyazi olaraq, *izotopik fəza* adlanan müəy-

Barion ədədinin saxlanması qanununun icazə verdiyi reaksiyalar:
antiprotonun doğulması
$p + p \to p + p + p + \bar{p}$
(B: 1 + 1 = 1 + + 1 + 1 – 1);
yenidən yüklənmə reaksiyası
$\pi^- + p \to \pi^0 + n$
(B: 0 + 1 = 0 + 1);
neytronun β-parçalanması
$n \to p + e^- + \nu_e$
(B: 1 = 1 + 0 + 0).
Barion ədədinin saxlanması qanunu ilə qadağan edilmiş reaksiyalar:
$p + p \to p + \pi^+$
(B: 1 + 1 ≠ 1 + 0);
Protonun parçalanması
$p \to e^+ + \pi^0$
(B: 1 ≠ 0 + 0).



Avropa Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi (SERN). Ağ ştrixli xətlə 400 QeV-lik sürətləndiricinin tuneli işarə edilmişdir.

yən bir hipotetik üçölçülü fəzadakı fırlanmaya nəzərən simmetriya kimi təsvir etmək olar. Elektronun spini 1/2-ə, bu spinin seçilmiş istiqamət (kvantlanma oxu) üzrə proyeksiyası isə ya 1/2-ə-yə, ya da –1/2-ə bərabərdir. Bundan asılı olaraq, elektron, bir-birindən spinin proyeksiyası ilə fərqlənən iki halda ola bilər. Bunun kimi, proton və neytrona yeni kvant ədədi ilə, yəni $I=1/2$ *izotopik spinlə* təchiz edilmiş eyni bir zərrəciyin (nuklonun, N) halları kimi baxıla bilər. Bu hallara izotopik spinin müxtəlif proyeksiyaları: $I_3=1/2$ və $I_3=-1/2$ uyğundur (izotopik spin anlayışını 1940-cı ildə V.Heyzenberq daxil etmişdir). Proton və neytronun seçilməzliyi indi güclü qarşılıqlı təsir tənliklərinin izotopik fəzada "fırlanmaya" nəzərən invariantlığı kimi ifadə olunur. Riyazi dildə bu fırlanmalar $SU(2)$ qrupu ilə təsvir olunur.

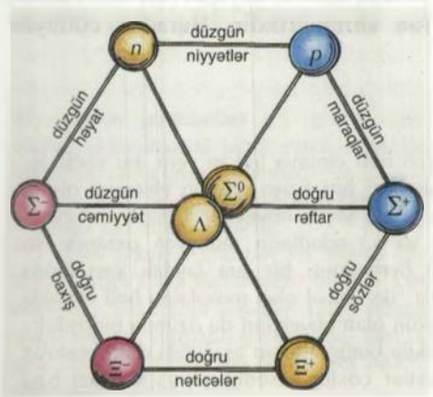
MULTİPLETLƏR

Hər bir simmetriyaya saxlanma qanunauyğundur. Belə ki, güclü qarşılıqlı təsirlər üçün izotopik spinin saxlanması qanununu formulə etmək olar. Bu qanun bəzi reaksiyaları qadağan edir, icazəli reaksiyaların parametrlərini isə tapmağa imkan verir. Bir halda ki, izotopik spin adi spindən heç nə ilə fərqlənmir, onda onun mümkün qiymətləri 0; 1/2; 1...-ə bərabər olacaqdır. İzotopik spinin hər bir qiymətinə bütöv bir adronlar ailəsi – multiplet uyğundur. Multipletə daxil olan zərrəciklər güclü qarşılıqlı təsirlərdə bir-birindən seçilmir. İzotopik spini I olan multipletdə $(2I+1)$ sayda zərrəcik vardır. $I=1/2$ olduqda multipletdə iki zərrəcik, $I=1$ olduqda, üç zərrəcik olur və s. İzotopik multipletlərə misal olaraq, proton və neytron (p, n) *dubletini,* pionlar *tripletini* (π^+, π^0, π^-), Λ-hiperon *sinqletini* göstərmək olar.

Elektromaqnit qarşılıqlı təsir "söndürüldükdə" *izotopik simmetriya* güclü qarşılıqlı təsirlərin dəqiq simmetriyası olur. Elektromaqnit qarşılıqlı təsir olmasaydı, zərrəciklərin kütləleri hər bir izotopik multiplet daxilində birbirinə dəqiq bərabər olardı (protonun və neytronun kütləleri eyni olardı, bütün π^+, π^-, π^0 – pionların kütləleri də eyni olardı və s.). Əslində isə elektromaqnit qarşılıqlı təsiri "söndürmək" olmaz, ona görə də o, dəqiq izotopik simmetriyanı pozur və nəticədə multiplet daxilində zərrəciklərin kütləleri xeyli fərqlənir. Bir halda ki, elektromaqnit qarşılıqlı təsirin sabiti, $\alpha=1/137$ incə quruluş sabitidir, onda ölçü mülahizələri əsasında mültiplet daxilində kütlə fərqini (sürüşməsini) qiymətləndirmək olar: $\Delta m \sim \alpha m$. Bu cür qiymətləndirmə eksperimentlə pis uzlaşmır. Məsələn, protonla neytronun kütləsi 0,13% fərqlənir, halbuki $\Delta m/m \sim 0{,}0014$-dür.

QƏRİBƏLİYİN SAXLANMASI QANUNU

1940-cı illərin axırında yeni növ adronların nümayəndələri – Λ-hiperonlar və K-mezonlar kəşf olunmuşdur. Qəribə idi ki, Λ və K həmişə birgə doğulurdu və heç vaxt ayrı-ayrılıqda doğulmurdu. Məsələn, pionun protonla reaksiyası $\pi^- + p \to K^0 + \Lambda^0$ baş verir, ancaq, sanki, heç nə ilə qadağan olunmamış və energetik daha əlverişli olan $\pi^- + p \to \pi^0 + \Lambda^0$ reaksiyası isə baş vermir. Bu dərəcədə qəribə olan belə faktı təsvir etmək üçün amerikan fizikləri M.Gell-Mann və A.Pays *qəribəlik* adlandırılan yeni s kvant ədədini elmə daxil etdilər. O vaxta qədər məlum olan bütün adronlara (nuklonlar və pionlar) $s=0$ qiyməti, K-mezonlara $s=1$ qiyməti, Λ-hiperonlara $s=-1$ (antizərrəciklərin qəribəliyi əks işarəyə





malikdir) qiyməti verildi. Bunun nəticəsində güclü qarşılıqlı təsirlər üçün *qəribəliyin saxlanması qanununu* daxil etmək mümkün olmuşdur (1953-cü il): toqquşan zərrəciklərin qəribəliklərinin cəmi doğulan zərrəciklərin qəribəliklərinin cəminə bərabərdir. Məsələn, yuxarıda baxdığımız birinci reaksiya üçün $0+0=1+(-1)$, ikinci reaksiya üçün isə $0+0 \neq 0+(-1)$.

Güclü qarşılıqlı təsirlərdə saxlanan yeni kvant ədədinin daxil edilməsi onu göstərdi ki, böyük daxili simmetriya mövcuddur. $SU(2)$ izotopik simmetriyasının düzgün ümumiləşməsini 1961-ci ildə Gell-Mann tapdı. O, adronların daxili simmetriya qrupunu $SU(3)$-ə qədər genişləndirdi. Bu qrupun multipletlərinin ölçüsü 3, 8, 10 və sairəyə bərabərdir. Təcrübə bu cür təsnifatlaşdırmanı təsdiq etdi. Qeyd edək ki, Gell-Mann öz işini "Səkkizlik yol" kimi çox qəribə ad altında çap etdirəndə, adronların heç də hamısı kəşf olunmamışdı. Gell-Mannın aldığı nəticələrdən çıxırdı ki, kütləsi təqribən 1680 MeV olan Ω – zərrəcik mövcud olmalıdır. Tam mənası ilə məqalənin çapından bir ay sonra bu zərrəciyi aşkar etdilər və məlum oldu ki, onun kütləsi 1672 MeV-ə bərabərdir. Bu, təklif olunan sxemin lehinə tutarlı arqument oldu.



Verner Heyzenberq.



Mürrey Gell-Mann.

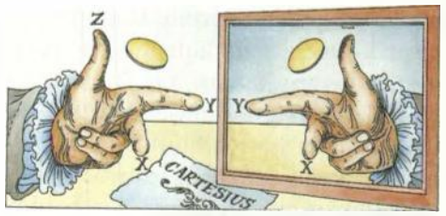
CÜTLÜYÜN VERDİYİ ƏZAB

Uşaqlıqda adamlar öz bədəninin simmetriyası sayəsində sağ və sol anlayışlarını mənimsəyirlər. Ürəyə yaxın

Rəvayətə görə, şahzadə Siddxartha Qautama (gələcək Budda) həqiqəti axtarmaq məqsədilə bütün Hindistanı səfərdən gəzərək, öz məzhəbinin əsas ideyalarını formulə etmişdir. Onlardan başlıcası insan həyatıdır, yəni əzablar zənciridir. Əzablardan qurtarmaq üçün səkkiz ehkama əməl etməklə, pak həyat sürmək lazımdır. Bu ehkamlar nəcib "səkkizlik yol" adlanır (düzgün baxışlar, düzgün nitqlər, düzgün niyyətlər və s.). Bu yolu tutan hər kəs, sonrakı mücəssəmədə nirvanəyə – bütün əzabların sonuna yaxınlaşır.

"Adron" (*yun.* "adros" – "ağır") və "lepton" (*yun.* "leptos" – "yüngül") terminləri işlədilmək üçün o vaxt daxil edilmişdir ki, həmin vaxtda həqiqətən adronların həmişə leptonlardan ağır olduğu hesab olunurdu. Bu gün isə artıq kütləsi protonun kütləsindən iki dəfə böyük olan ağır τ lepton məlumdur.

Sinqlet, dublet, triplet (həmçinin oktet, dekuplet və s.) terminləri uyğun olaraq "təklik" (single), "cüt" (double), "üçlük" (triple), "səkkizlik" (octet), "onluq" (decuplet) bildirən ingilis sözlərinin kalkalarıdır.



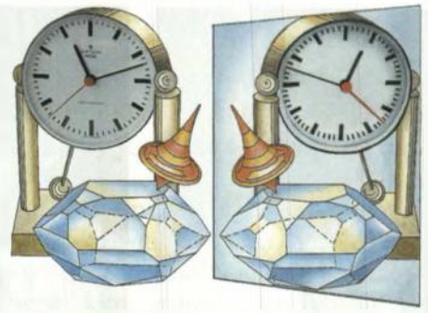
əl – sol, digəri – sağ əldir. Bu çox sadədir. "Solda" və "sağda" nə deməkdir? Bu da sanki aydındır: solda – bu sol əl tərəfdə, sağda – bu sağ əl tərəfdədir. Əgər iki adam üzbəüz dayanıbsa, onda həqiqətdə "solda" və "sağda" harada olacaqdır? Heç yerdə. "Sağ" və "sol" hər kəsin özünə məxsusdur, bizim ətrafımızdakı aləm də isə onlar yoxdur.

Tarixi olaraq elə alınmışdır ki, insanlar sağ Dekart koordinat sistemindən istifadə edirlər və adətən soldan sağa yazırlar. Lakin sol koordinat sistemi ondan heç nə ilə geri qalmır və sağdan sola da yazmaq olar (məsələn, Leonardo da Vinçinin etdiyi kimi). Çox qəribəsi o olardı ki, sağdan sola yazılmış mətn başqa mənaya malik olsun, sol koordinat sistemində baxılan fiziki proses isə sağ koordinat sistemində müşahidə olunan prosesdən fərqlənsin.

Elmi dildə desək, fəza, inversiya çevirməsinə (bütün koordinatların işarəsinin əksinə dəyişdirilməsinə) nəzərən simmetrikdir. Buradan cütlüyün

saxlanması qanunu alınır. Bu qanun XX əsrin ortalarına qədər çoxlu sayda mexaniki və elektromaqnit hadisələrini öyrənərkən yoxlanılmışdı. Cütlüyün saxlanması qanununa görə qapalı sistemlərdə nəinki yalnız enerji, impuls və s. dəyişməz qalır, həm də sistemi xarakterizə edən funksiyaların cütlüyü dəyişməz qalır (əgər arqumentin işarəsini əksinə dəyişəndə funksiya öz işarəsini saxlayarsa, ona cüt funksiya deyilir), kobud desək, inversiya – güzgüdə əksolmadır.

Lakin 1950-ci illərin əvvəllərində gələcək Nobel mükafatı laureatları, Amerika nəzəriyyəçi-fizikləri Li və



Yanqda zəif qarşılıqlı təsirlərdə cütlüyün saxlanmasına qarşı şübhə yarandı. Amerikada Vunun rəhbərliyi altında bir qrup tədqiqatçının tezliklə apardığı təcrübələr Li və Yanqın hipotezini tam təsdiq etdi.

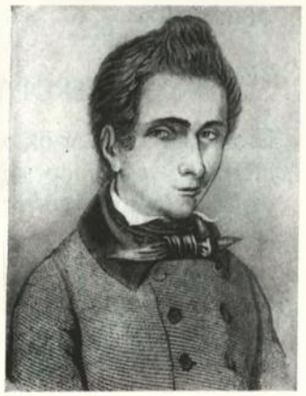
QRUP NƏDİR

Qrup nəzəriyyəsinin ideya və metodları fizikada adət halını almışdır, elementar zərrəciklər fizikası isə bu abstrakt riyazi fənn olmadan şərh oluna bilməz.

Qrup nəzəriyyəsinin yaranmasını 20 yaşında ikən dueldə həlak olmuş fransız riyaziyyatçısı Evarist Qaluanın (1811-1832) adı ilə bağlayırlar. O, duel ərəfəsində yazdığı "Tənliklərin radikallarda həll olunması şərtlərinə dair memuarda" (1846-cı ildə çap olunmuşdur) yeni riyazi anlayış – qrup anlayışı daxil etmişdir. Riyazi qrup nəzəriyyəsi XIX əsrdə və XX əsrin əvvəllərində coşqun inkişaf etmişdir. Nils Henrik Abel, German Veyl, Eli Kartan, Sofus Li kimi riyaziyyatçılar böyük pay vermişlər.

Min illər ərzində insanlar tam ədədləri və onlar üzərində əməlləri öyrənmişlər. Platon və Pifaqor hətta hesab etmişlər ki, məhz ədədlər ilkindir, bu ədədlərin köməyilə insanların təsvir etməyə çalışdığı ətraf aləm yox. Sonra rasional kəsrlər, cəbri və irrasional ədədlər kəşf olundu. İstənilən cəbri tənliyin həlli olması üçün, həqiqi ədəd oxunu kompleks ədədlərlə doldurulmuş müstəvidə yerləşdirdilər. Ədədlər cütündən, sonra isə ədədlər üçlüyündən istifadə edərək, Dekart analitik həndəsəni yaratdı. Sonralar onu ümumiləşdirərək, *n*-ölçülü və sonsuzölçülü fəzalar nəzəriyyəsini qurdular.

Lakin Evarist Qaluanın əsasını qoyduğu qrup nəzəriyyəsi tamamən başqa bir istiqamətdə atılmış addımdır. Qrup nəzəriyyəsi "iks" daxil olan istənilən məsələni (məsələn, $a \cdot x = b$) yalnız ədədlər üçün deyil, istənilən şey üçün həll etməyə imkan verir, bu şərtlə ki, həmin "istənilən şey" hər hansı qrupun elementi olsun. Məlum oldu ki, çoxlu sayda obyektlər (əşyalar, fırlanmalar, funksiyalar və s.) ədədlərin müəyyən oxşarıdır və ədədlərin yaxşı öyrənilmiş, bir sıra faydalı xassələrinə malikdir. Qruplar "iks" daxil olan məsələləri həll etməklə öyrənmək mümkün olan obyektləri də özündə birləşdirir.



Evarist Qaluanın, onun qardaşı tərəfindən çəkilmiş portreti.

G qrupu dedikdə bütün hədləri aşağıdakı dörd postulatı ödəyən g obyektlər çoxluğu (sonlu və ya sonsuz) başa düşülür.

1. İki obyektin kompozisiyası əməli mövcuddur. Bu əməlin köməyilə iki obyektə həmin çoxluqdan olan üçüncü element uyğundur: istənilən $g_1,\ g_2 \in G$ elementləri üçün $g_3 = g_1 \cdot g_2 \in G$ elementi (*qapalılıq postulatı*); çox vaxt kompozisiya əməlini vurma (hətta elementlər toplanan zaman da), onun nəticəsini isə hasil adlandırırlar.

2. Vurma assosiativ olmalıdır, yəni
$g_3 \cdot (g_2 \cdot g_1) = (g_3 \cdot g_2) \cdot g_1$.

3. Çoxluğun elementləri arasında elə yeganə vahid element $e \in G$ var ki, bütün $g \in G$-lər üçün $e \cdot g = g$. Belə e elementi qrupun *vahidi* adlanır.

4. Qrupun hər bir elementinə birqiymətli olaraq, elə bir yeganə g^{-1} tərs elementi uyğundur ki, $g^{-1} \cdot g = e$.

Bu dörd postulatın ödənilməsi, əlbəttə, yalnız $a \cdot x = b$ tənliyinin $x = a^{-1} \cdot b$ bərabərliyinə çevrilməsini təmin etmir, həmçinin qrup elementlərini ədədlərin bir çox başqa xassələri ilə təchiz edir. Qeyd edək ki, qrupun postulatları $g^1 \cdot g^2 = g^2 \cdot g^1$. bərabərliyinin mütləq ödənilməsini tələb etmir. Əgər bu cür bərabərlik ödənirsə, onda qrup *kommutativ* və ya *abel qrupu* adlanır (Norveç riyaziyyatçısı N.X.Abelin şərəfinə).

Qrupa aid misal göstərək.

1. Tam ədədlər (müsbət və mənfi) qrupu Z. Kompozisiya əməli – adi toplamadır; qrupun vahidi – 0-dır; tərs element – əks işarəli ədəddir. Qeyd edək ki, kompozisiya əməli olaraq vurmanı götürdükdə, tam ədədlər çoxluğu qrup əmələ gətirmir (bu halda tam ədədlər arasında tərs elementlər olmayacaqdır).

2. Düz xətt boyunca α məsafəsinə translyasiyalar (köçürmələr) qrupu $T(\alpha)$. Bu, çevrilmələr (operatorlar) qrupuna misaldır. $T(\alpha)(x) = x + \alpha$ əməlinə translyasiya deyilir. Qrupun postulatlarının ödənildiyini yoxlayaq:

1) $T(\beta)T(\alpha)(x) = T(\beta)(T(\alpha)(x)) = T(\beta)(x + \alpha) = x + \alpha + \beta = T(\alpha + \beta)(x)$;

2) $T(\alpha)(T(\beta)T(\gamma)) = T(\alpha)T(\beta + \gamma) = T(\alpha + \beta + \gamma) = T(\alpha+\beta)T(\gamma) = (T(\alpha)T(\beta))T(\gamma)$;

3) $e = T(0)$: $T(0)(x) = x + 0 = x$;

4) $T(-\alpha)T(\alpha) = T(-\alpha + \alpha) = T(0) = e$.

Postulatların dördü də ödənildi.

3. Üçölçülü fəzada koordinat başlanğıcından keçən ixtiyari ox ətrafında fırlanmalar qrupu $SO(3)$. Asanlıqla görmək olar ki, bu qrup abel qrupu deyil, çünki əvvəlcə x oxu ətrafında, sonra isə y oxu ətrafında fırlanmanın nəticəsi əvvəlcə y oxu ətrafında, sonra isə x oxu ətrafında fırlanmanın nəticəsindən fərqlənəcəkdir.

Riyazi dildə simmetriya onu bildirir ki, simmetriya qrupunun çevrilməsinə nəzərən fizika qanunu və ya fiziki hadisə dəyişməz qalır. Zərrəciklər fizikasına tətbiq edildikdə, müəyyən qarşılıqlı təsirin simmetriya qrupu yaxın xassəli zərrəcikləri ailələr üzrə təsnifatlaşdırmağa və verilmiş simmetriya qrupuna nəzərən invariantlıq şərtini ödəyən qarşılıqlı təsir enerjisinin şəklini müəyyən etməyə imkan verir. Bu çox sərt tələb nəzəriyyələrin mümkün variantlar çoxluğundan bir neçə nəzəriyyəni seçməyə imkan verir.

Fizikada mühüm simmetriya qrupu Lorens qrupudur, yəni Minkovski fəzasında bir inersial hesablama sisteminden digərinə keçid çevrilmələri toplusudur.



Li (Li Tzundao).

▶
Yanq
(Yanq Çjennin).

▶▶
Tsinsyan Vu.

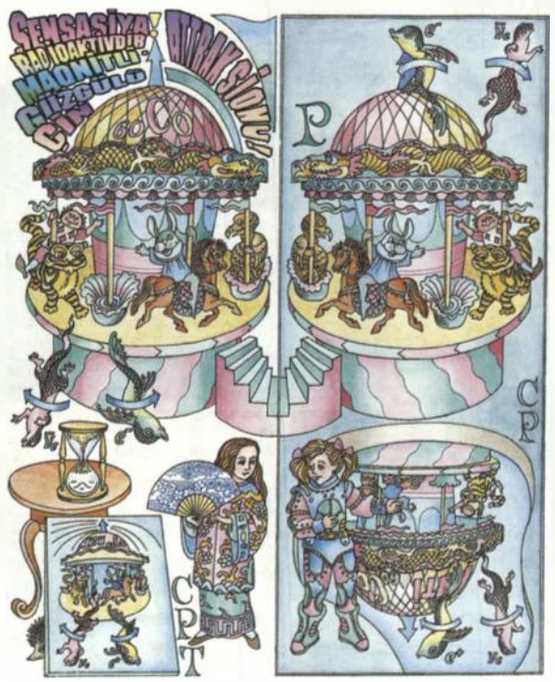




Onlar kobalt izotopunun ^{60}Co nüvələrinin β-parçalanmasını öyrənirdilər: bu nüvə nikel izotopunun ^{60}Ni nüvəsinə, e^- elektrona və ν_e elektron neytrinosuna çevrilir: $^{60}Co \rightarrow {}^{60}Ni + e^- + \nu_e$. Cütlüyün mümkün pozulmasını müşahidə etmək üçün ^{60}Co nüvəsini xarici maqnit sahəsində istiqamətləndirdilər: bu nüvələrin spini xeyli böyükdür ($S = 5$) və onlar özlərini sahə istiqamətində düzülən kiçicik maqnitlər kimi aparır. İstiqamətlənmə atomların istilik hərəkəti tərəfindən pozulmasın deyə, kobalt nümunəsini çox alçaq temperaturlara qədər soyutdular.

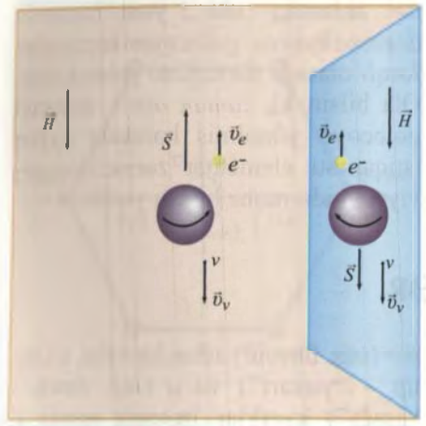
Vu müəyyən etdi ki, S spini istiqamətində çıxan elektronların sayı əks istiqamətdə çıxan elektronların sayından azdır. Baş verənləri fikrən güzgüdə əks etdirən zaman, yəni koordinatların inversiyası zamanı spin vektoru öz istiqamətini dəyişir, sürət vektoru isə yox. Qəribə mənzərə alındı: artıq indi daha çox elektron S spini istiqamətində çıxdı! "Güzgüarxası" proses "güzgü qarşısında" müşahidə etdiyimiz proseslə üst-üstə düşmədi. Zəif qarşılıqlı təsirlərdə cütlüyün saxlanmaması haqqında Li və Yanqın hipotezi belə təsdiq olundu.

Cütlüyün saxlanmadığı kəşf olunandan sonra, ilk anlarda fiziklər, sadəcə, çaşbaş qaldılar. Çünki nəyi sağ, nəyi sol adlandırmağı seçmək məsələsini fizika qanunlarının köməyilə həll etmək olmaz. Bu, sanki, sarsılmaz və aydın idi. Təsəvvür edin ki, güzgü qarşısında duran adam əlini qaldırır, onun xəyalı isə ayağını yerə döyür!



KOMBİNƏ EDİLMİŞ *CP* CÜTLÜYÜNÜN SAXLANMASI QANUNU

Buna oxşar möcüzələrin mümkünlüyü, alimləri çox böyük təşvişə saldı: təsəvvür etmək çox çətin idi ki, necə ola bilər ki, fizika qanunları koordinat



◀
T.Vunun eksperimentinin sxemi.

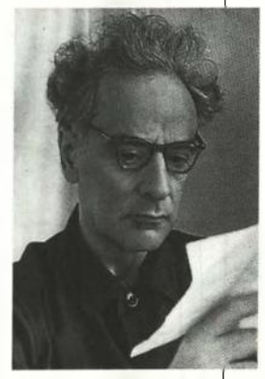
oxlarının istiqamətinin seçilməsindən asılı olsun.

Bu vəziyyətdən çıxış yolunu 1957-ci ildə sovet alimi L.D.Landau və ondan asılı olmadan Pakistan fiziki Ə.Salam tapdılar. Onlar müəyyən etdilər ki, təkcə sağ və sol koordinat sistemləri şərti seçilməyib, həm də müsbət yük və mənfi yük anlayışları da şərti seçilmişdir.

Zərrəcikdən antizərrəciyə keçid (bu zaman yüklərin işarəsi əksinə dəyişir) *C yükqoşma əməliyyatı* adlanır (bu halda e^- elektron e^+ pozitrona çevrilir və s.). Zəif qarşılıqlı təsir tənlikləri ayrılıqda nə P inversiya çevrilməsinə (əksolunmaya) nəzərən, nə də C yük qoşma çevrilməsinə nəzərən öz formasını saxlamır. Lakin bu tənliklər (eyni zamanda) *kombinə edilmiş CP* (termin Landaunundur və "sepe" kimi oxunur) çevrilməsinə nəzərən invariant qalır. *CP* çevrilməsi zamanı sistem "güzgüdə əks olunur", bütün zərrəciklər isə antizərrəciklərlə əvəz olunur və əksinə. Deməli, sistemin həndəsi və fiziki xassələri, əvvəllər təsəvvür edildiyindən daha sıx bağlıdır.

1964-cü ildə çox nadir bir proses, kombinə edilmiş cütlüyü də pozan proses – uzunömürlü K^0-mezonun iki piona parçalanması hərtərəfli öyrənilmişdir. İndi hesab edirlər ki, məhz *CP*-invariantlığın kiçicik pozulması Kainatın mövcudluğunun ifratilkin dövrlərində başlıca rol oynamışdır, yəni zərrəciklərin antizərrəciklərdən bir qədər çox olmasına gətirib çıxarmışdır. Məhz bu, bizim dünyanı formalaşdırmışdır. Burada hələ çox şey aydınlaşdırılmayıb və tədqiqatlar davam edir.

Volfqanq Pauli tərəfindən *CPT teoreminin* isbat edilməsi çox mühüm bir nailiyyət olmuşdur. Bu teoremə görə, zərrəciklərin qarşılıqlı təsirinin istənilən lokal və relyativistlik invariant nəzəriyyəsi həm də *CPT* çevrilmələri toplusuna nəzərən invariantdır, yəni eyni zamanda zərrəciklərin antizərrəciklərlə əvəz edilməsinə (C-çevrilmə), həmçinin bütün oxların əks etdirilməsinə (P-çevrilmə) və zamanın döndərilməsinə (T-çevrilmə) nəzərən invariantdır. Bu sırf nəzəri müddəa eksperimental yoxlanıla bilən nəticəyə malikdir: məsələn, istənilən zərrəcik və ona uyğun antizərrəcik



Lev Davidoviç Landau.



Volfqanq Pauli.

dəqiq eyni kütləyə və yaşama müddətinə malik olmalıdır. Heç bir eksperimental fakt bu nəticəyə zidd deyildir.

Zəif qarşılıqlı təsirlərdə kombinə edilmiş cütlüyün (*CP*-invariantlığın) pozulmasına dair eksperimental məlumatları, *T*-invariantlığın pozulması kimi də anlamaq olar, yəni zamanın dönməzliyi və gələcəyin keçmişdən fərqli olacağı nəticəsinə gəlmək olar. Ola bilsin ki, *zaman oxu* – zamanın gələcəyə yönəlmiş hərəkətə uyğun istiqaməti elementar zərrəciklər səviyyəsində məhz bu cür verilir.

GÜCLÜ QARŞILIQLI TƏSİRLƏR

ADRONLARIN KVARK MODELİ

Müasir təsəvvürlərə görə, bütün adronlar (*B* barionlar və *M* mezonlar) fundamental zərrəciklər olan *q* kvarklardan təşkil olunmuşdur, həm də nəzərə almaq lazımdır ki, barionlar üç kvarkdan $B \sim qqq$, mezonlar isə kvark və antikvarkdan $M \sim q\bar{q}$ ibarətdir, burada $\bar{q}$ – antikvarkdır. Altı kvark, leptonların üç nəslinə uyğun olaraq, cüt-cüt üç nəsildə birləşir. Kvarkların vaxtı ilə fizikləri özünün qeyri-triviallığı ilə heyrətə salan xüsusiyyəti onların elektrik yüklərinin kəsr qiymətlər almasıdır. İstənilən nəslin kvarklarından birinin yükü $Q=2/3$, digərinin yükü isə $Q=-1/3$-dir. Bundan başqa, altı kvarkdan hər birinin özünəməxsus, verilmiş kvarkı o birilərindən fərqləndirən kvant ədədi var. Hazırcavab fiziklər həmin ədədi *iy* və ya *ətir* (*ing.* flavour) adlandırmışlar. *u* (*ing.* up – "yuxarı") və *d* (*ing.* down – "aşağı") kvarklar izotopik spinin I_3 proyeksiyasının qiymətilə fərqlənir (proton və neytron kimi). *s* – kvarka yeni xarakteristika – *qəribəlik S* (*ing.* strangeness), *c* – kvarka – *məftunluq C* (*ing.* sharm), *b* – kvarka – *gözəllik B* (*ing.* beauty), sonuncu *t* kvarka – *həqiqilik T* (*ing.* truth; *t*-kvark başqa cür "top" kvark da adlandırırlar – *ing.* top, yəni "ən yuxarı") kvant ədədləri aid edirlər.

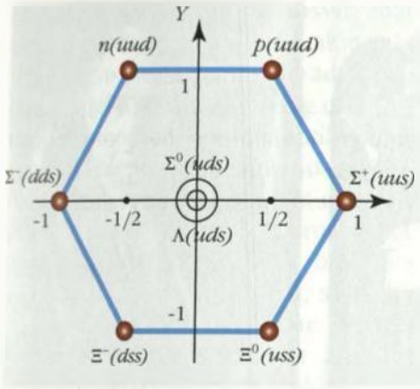
Tərkibinə bu və ya digər ətirli kvark daxil olan adronlar, kvant ədədinin uyğun qiymətinə malik olur (məsələn, $\Omega^- \sim sss$ zərrəciyinin qəribəliyi $S=-3$-dür). Belə xarakteristikaların daxil edilməsi *seçmə qaydasını* ifadə etməyi asanlaşdırır. Bu seçmə qaydalarından biri belədir: güclü qarşılıqlı təsir reaksiyasının başlanğıcındakı və sonundakı zərrəciklərin qəribəliklərinin cəmi eynidir.

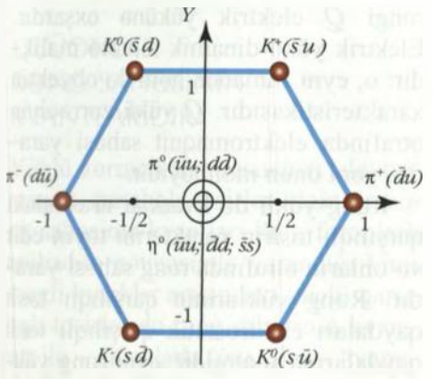
Diaqramda kütləsi ən kiçik və spini $S=1/2$ olan barionlar, spini $S=0$ olan mezonlar və onların kvark quruluşu göstərilmişdir. Zərrəciklərin yerləşməsindəki simmetriya daxili simmetriyanı əks etdirir.

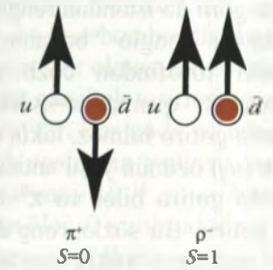
Diaqramdan göründüyü kimi, ən yüngül adronların sayı (onlar *u*, *d*, *s* kvarklardan təşkil olunub və yaxın kütlələrə, eyni spinə malikdir) səkkizə bərabərdir; bu adronlar oktet əmələ gətirir.

KVARKLARIN KOLLEKTİV PORTRETİ

Kvark	Kvark ədədi							
	B	*Q*	*S*	I_3	*s*	*c*	*b*	*t*
u (up – yuxarı)	1/3	2/3	1/2	1/2	0	0	0	0
d (down – aşağı)	1/3	–1/3	1/2	–1/2	0	0	0	0
c (charm – məftun)	1/3	2/3	0	0	0	1	0	0
s (strange – qəribə)	1/3	–1/3	0	0	–1	0	0	0
t (truth – həqiqi)	1/3	2/3	0	0	0	0	0	1
b (beauty – gözəl)	1/3	–1/3	0	0	0	0	–1	0







KVANT XROMODİNAMİKASI

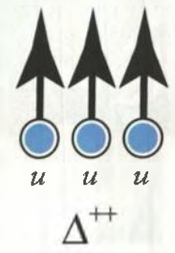
Kvark modelindən istifadə edildiyi ilk gündən alimlər ciddi bir problemlə üzləşdilər. Onun mahiyyətini Δ^{++} barionunun (onu Δ-rezonans adlandırırlar) misalında aydınlaşdıraq. Δ^{++} zərrəciyinin spini 3/2-ə bərabərdir. Deməli, Δ^{++} rezonans yalnız spini 1/2 olan üç eyni (seçilməz) *u*-kvarkdan əmələ gələ bilər (çünki uyğun ox üzrə spinlərin proyeksiyalarının cəmi 1/2 + 1/2 + + 1/2 = 3/2-ə bərabərdir). Kvant mexanikasının qanunlarına görə, zərrəciyin stabil halı ən kiçik enerjili haldır, o isə həmişə fəza simmetriyasına malikdir, yəni Δ^{++}-dakı üç *u*-kvark eyni bir haldadır. Lakin bu, Pauli prinsipi ilə qadağan olunmuşdur. Ziddiyyət, həm də ciddi ziddiyyət göz qabağındadır: kvark modeli Pauli prinsipi ilə qadağan edilmiş halların mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verir.

Vəziyyətdən çıxış yolunu eyni zamanda bir neçə alim – sovet fizikləri N.N.Boqolyubov, B.V.Struminski, A.N.Tavxelidze və yapon fiziki İ.Nambu təklif etdilər. Fərz etsək ki, Δ^{++}-dakı bütün *u*-kvarklar bir-birindən üç (və yalnız üç) müxtəlif qiymətlər ala bilən daha bir kvant ədədinin qiymətilə fərqlənir, onda Pauli prinsipi pozulmaz. Həmin kvant ədədi *rəng* adını aldı, çünki ətraf aləmdəki bütün rənglər çoxluğu məhz üç əsas rəngin birləşməsindən əmələ gəlir.

Beləliklə, hesab olunur ki, hər bir kvark üç rəng halından (şərti olaraq sarı, göy və qırmızı) birində olur. Məsələn, *u*-kvark u_s, u_g, u_q hallarda ola bilər. Antikvarklar tamamlayıcı rəng-



Diaqramdakı oxlardan biri kimi istifadə olunan – kvant ədədi *Y* hiperyük, *Q* elektrik yükü ilə və I_3 izospin ilə ifadə olunur: $Y=2(Q/e - I_3)$, burada *e* – elektronun yükü dür.



N.N.Boqolyubov.

▶
B.V.Struminski (solda) öz müəllimi N.N.Boqolyubovla birlikdə.

▶▶
A.N.Tavxelidze.







$$\Delta^{++}=\Sigma(\text{●}+\text{●}+\text{●}+\text{●}+\text{●}+\text{●}+\text{●})$$

lərə (uyğun olaraq, bənövşəyi, narıncı, yaşıl) malikdir. Tərifə görə, kvarkların rəngləri heç vaxt özünü büruzə vermir, yəni real adronlar həmişə rəngsizdir. Başqa sözlə, adronlar aləmində dəqiq rəng simmetriyası hökm sürür.

Məlum oldu ki, kvarkların bu daxil edilmiş xarakteristikası, bir halı dərindən fərqləndirən adi nişan deyil, çox dərin mənaya malikdir. Kvarkların rəngi Q elektrik yükünə oxşardır. Elektrik yükü dinamik təbiətə malikdir: o, eyni zamanda həm də obyektin xarakteristikasıdır. Q yükü zərrəciyin ətrafında elektromaqnit sahəsi yaradır, yəni onun mənbəyidir.





Rəng yükü də kvarklar arasındakı qarşılıqlı təsirin xarakterini təyin edir və onların ətrafında rəng sahəsi yaradır. Rəng yüklərinin qarşılıqlı təsir qaydaları elektrostatik qarşılıqlı təsir qaydalarına analojidir: eyni rəng yükləri itələnir, əks yüklər isə cəzb olunur. Ona görə də istənilən rəngli kvark tamamlayıcı rənglə "boyanmış" öz antikvarkı tərəfindən cəzb olunur. Məsələn, iki qırmızı u-kvark bağlı hal əmələ gətirə bilməz, lakin qırmızı u-kvark (u_q) özünün yaşıl antizərrəciyi ilə əmələ gətirə bilər və π^0-mezonu əmələ gətirir. Bir sözlə, rəng dinamik təbiətə malikdir. Yüklü zərrəciklərin qarşılıqlı təsirinin və elektromaqnit sahəsinin nəzəriyyəsi olan kvant elektrodinamikası kimi, rəng yüklərinə malik olan zərrəciklərin və bu yüklərin yaratdığı xromodinamik sahənin nəzəriyyəsi *kvant xromodinamikasıdır*.

Kvant xromodinamikası çox yüksək simmetriyaya malikdir. Hər üç rəngə eynihüquqlu rənglər kimi baxılır. Məsələn, əgər qırmızı kvarkları göy kvarklarla və əksinə əvəz etsək, onda

onların qarşılıqlı təsirini təsvir edən ifadələr olduğu kimi qalar. Lakin söhbət sadəcə passiv simmetriyadan getmir. Rənglərlə mübadilə rəng qarşılıqlı təsirlərinin, yəni kvarkın (antikvarkın) rənginin bir nöqtədə dəyişməsinin hər hansı başqa bir nöqtədə əks dəyişmə ilə kompensasiya olunduğu proseslərin, dinamikasını anlamaq üçün bir açardır. Başqa sözlə, rəng, yükü, sanki bir nöqtədən digər nöqtəyə axır. Bu isə, öz növbəsində, o deməkdir ki, rəng yükünün daşıyıcıları mövcuddur.

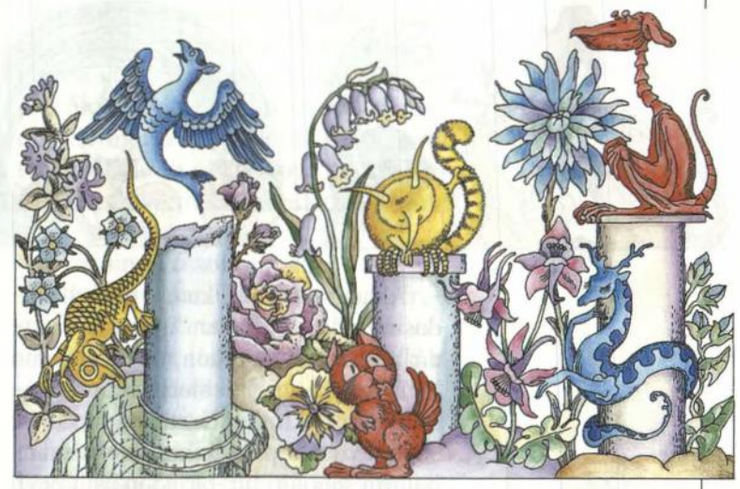
QLÜONLAR RƏNG SAHƏSİNİN KVANTLARIDIR

Yüklü zərrəciklər arasındakı elektromaqnit qarşılıqlı təsirlər elektromaqnit sahəsinin kvantları ilə – fotonlarla mübadilə nəticəsində yarandığı kimi, rəngli kvarklar arasındakı güclü qarşılıqlı təsirlər də rəng sahəsinin kvantları ilə – qlüonlarla (*ing.* glue – "yapışqan") mübadilə nəticəsində yaranır.

Qlüonların, fotonlar kimi, spini 1-ə, kütləsi isə 0-a bərabərdir. Fotonların kütləsinin sıfır olması sayəsində elektromaqnit qarşılıqlı təsirləri sonsuzluğa qədər yayılır. Bəs onda nə üçün güclü qarşılıqlı təsirlərin radiusu bu qədər kiçikdir, yəni 10^{-15} m-ə bərabərdir (nüvənin ölçüsü tərtibindədir)?

Elektrodinamikada yalnız bir növ yük (müsbət və mənfi qiymətlər alan) vardır və ona görə də fotonlar elektroneytraldır, yəni yük daşımır. Kvant kromodinamikasında hər şey mürəkkəbdir. Qlüonlar kvarklar arasında rəng yüklərinin mübadiləsini həyata keçirir.

Kvark üç rəng halından birində yerləşərək, qlüonlar, şüalandırır və başqa rəng halına keçir. Deməli, kvarkın şüalandırdığı qlüonun özü rəng yükünə malik olmalıdır.



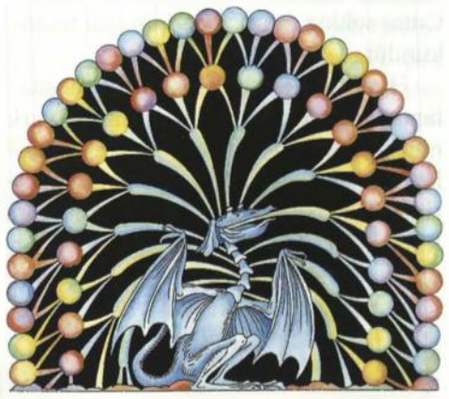
Bir halda ki, bütün rənglər üzrə simmetriya mövcuddur, onda kvark və qlüonların bütün qarşılıqlı təsirlərində yekun yük ədədi mütləq saxlanır. Məsələn, əgər u_q, qlüon buraxaraq, u_g-yə keçirsə, onda bu qlüonqarışıq rəng yükü – başlanğıcdakı qırmızı və anti-göy rəngləri daşıyır (keçid prosesində rənglər balansını pozmamaq üçün). Cəmi səkkiz müxtəlif qlüon halı mümkündür.

Əgər təcillənmiş elektron foton şüalandırırsa, onda təcillənmiş kvark müəyyən rəngə malik – qlüon şüalandırır və başqa rəngli kvarka çevrilir. Bir halda ki, qlüon, fotondan fərqli olaraq, rəng yükünə malikdir, onda onun özü başqa bir qlüon şüalandırmağa qadirdir.

Kvark modelini xilas etmək üçün təklif olundu ki, Pauli prinsipindən ya imtina edilsin, ya da onun şəkli dəyişdirilsin. Vəziyyət β-parçalanmanın tarixini xatırladırdı. O vaxt Nils Bor enerjinin saxlanması qanunundan imtina etməyi təklif etmişdi. Pauli yeni zərrəcik – neytrino daxil etməklə, bu qədər radikal yanaşmanı rədd etdi. İndi də əksər fiziklər belə hesab edirlər ki, Pauli prinsipi olduqca fundamentaldır və onu qurban vermədilər.

Sarı-göy-qırmızı rənglər toplusunu akademik Lev Borisoviç Okun (1929-cu ildə doğulub) təklif etmişdir. Qərbdə kvarklara başqa rənglər: qırmızı, yaşıl, göy rənglər aid edilmişdir.

Akademik L.B.Okunun obrazlı ifadəsinə görə, qlüonlar "işıqsaçan işıqdır". Buradan da qlüon rəng sahəsinin bütün qeyri-adi xassələri yaranır. Məlum olduğu kimi, elektromaqnit sahəsi superpozisiya prinsipini ödəyir: mənbələrin sahələri bir-birindən asılı deyil və vektorlar kimi, yəni xətti qanun üzrə toplanır. Kvant xromodinamikası əhəmiyyətli dərəcədə *qeyri-xətti nəzəriyyədir*. Qlüonların bir-birilə qarşılıqlı təsiri nəticəsində superpozisiya prinsipi daha işləmir ki, bu da rəng və elektrik yüklərinin davranışlarında əsas fərqə səbəb olur.



İlk baxışda belə çıxır ki, doqquz qlüon olmalıdır, çünki onların hər biri iki rəng indeksi daşıyır – biri başlanğıc haldakı kvarkdan, digəri isə son haldakı kvarkdan gəlir, üç S, G, Q rəngdən və üç $\bar{S}$, $\bar{G}$, $\bar{Q}$ antirəngdən doqquz cüt indeks tərtib etmək olar. Lakin tam simmetrik kombinasiya $\bar{S}S + \bar{G}G + \bar{Q}Q$ rəngsizdir – rəngli ailə də "əcaib bir şeydir". Bu səbəbdən o nəzərə alınmır və sıfırdan fərqli rəng yükünə malik səkkiz kombinasiya qalır. Məhz bu kombinasiyalar bütün növ kvarklar arasındakı güclü qarşılıqlı təsirlərin ötürücüləri olan səkkiz qlüona uyğundur.

KVARKLARIN ASİMPTOTİK SƏRBƏSTLİYİ

Elektronun effektiv yükü müşahidəçiyə qədər olan məsafədən asılıdır. Belə yük həmişə vakuumdan özbaşına yaranan və sonra yenidən annihilyasiya edən elektron-pozitron cütlərinin buludu ilə əhatə olunmuşdur. Uzaqlaşmış müşahidəçi üçün elektronun effektiv yükünün qiyməti, bu buluddakı pozitronların yükləri tərəfindən ekranlaşdırıldığına görə azalır. Məsafənin azalması ilə müşahidə olunan yük artır. Qlüon sahəsinin özünə məxsus qeyri-adi xassələri sayəsində kvarklar və qlüonlar arasındakı rəng qarşılıqlı təsir sabiti α_{GQ}-nin davranışı tamamilə fərqlidir. Rəngli kvarkı əhatə edən vakuumda spontan olaraq yalnız kvark-antikvark cütləri yox, həm də qlüonlar cütü də doğula bilər (üç qlüonlu qarşılıqlı təsir hesabına). Hesablamaların göstərdiyi kimi, vakuumdan doğulan qlüon cütləri rəng yükünü ekranlaşdırmaq və uzaq məsafələrdə onun azalmasını təmin etmək əvəzinə, əks-effekt olan rəng yükünün antiekranlaşdırılmasını – məsafəyə görə onun artmasını təmin edir! Bu o deməkdir ki, kvark-qlüon qarşılıqlı təsir sabiti $\alpha_{GQ}(r)$ məsafə ilə düz mütənasibdir. Başqa sözlə, kvarklar bir-birinə yaxın olduqca, onlar arasındakı yük qarşılıqlı təsiri bir o qədər az olur. Kvant xromodinamikasının bu qədər qeyri-adi xassəsi *asimptotik sərbəstlik* adlanır (*r* asimptotik olaraq sıfıra yaxınlaşanda kvarklar sərbəst olur, bir-birini hiss etməməyə başlayır).







NƏ ÜÇÜN KVARKLAR GÖRÜNMÜR?

Asimptotik sərbəstlik xassəsi kəşf olunduqdan sonra kvark modeli və kvant xromodinamikası vətəndaşlıq hüququ qazandı. Məsələ ondadır ki, kvark modeli yarandıqdan dərhal sonra belə bir sual yarandı: nə üçün eksperimentdə kvarklar müşahidə olunmur? Belə görünə bilərdi ki, güclü zərbə vurmaqla protonu, onu əmələ gətirən üç kvarka parçalamaq olar. 1960-cı illərdə və 1970-ci illərin əvvəllərində enerjiləri protonun sükunət kütləsindən dəfələrlə böyük olan protonların toqquşmalarını öyrənməyə imkan verən sürətləndiricilər quruldu. Bununla belə, protonu kvarklara parçalamaq heç kəsə müyəssər olmadı.

Bütün bunlara baxmayaraq, görəsən Kainatın tarixində elə bir an olmuşdurmu ki, həmin vaxt kvarklar sərbəst olmuşlar? Əlbəttə ki, bəli. Bu, bizim Kainatı təxminən 12-15 mlrd il bundan əvvəl doğurmuş Böyük Partlayışdan sonra ilk anlarda baş vermişdir. O vaxt zərrəciklərin enerjisi yüksək ($\sim 10^{15}$ QeV) olmuşdur ki, kvarklar hələ dayanıqlı sistemlər – adronlar əmələ gətirə bilməmişdir. Sonralar, Kainat genişlənərək soyuyanda kvarklar və antikvarklar birləşərək, barionları və mezonları əmələ gətirdilər. Axırıncılar tez parçalandılar. O dövrün yadigarı kimi Kainatdakı maddənin tərkibinə daxil olan barionlar qalmışdır.

Lakin adronların əmələ gəlməsi prosesində, hər halda, kvarkların az bir hissəsi partnyorsuz qalmalı idi. Bax bu cür kvarklar – "səfillər" bizim günlərə qədər yaşamaq üçün bütün şanslara malik olmalı idi. Sərbəst kvarkların adi maddədəki gözlənilən konsentrasiyasını Y.B.Zeldoviç, L.B.Okun və S.L.Pikelner hesabladılar. Nəticə son dərəcə heyrətləndirici oldu: məlum oldu ki, kvarkların konsentrasiyası qızılın konsentrasiyasından çoxdur. Sərbəst kvarkları aşkar etməmək mümkün deyil, çünki ayrıca bir kvark, özünün (elektronun yükünün 2/3-nə və ya –1/3-nə bərabər olan) kəsr elektrik yükü sayəsində çox nəzərə çarpan zərrəcikdir. Lakin sərbəst kvarkların axtarışları nəticəsiz olaraq qalır.

Asimptotik sərbəstlik hadisəsi Amerika nəzəriyyəçiləri D.Qross, F.Vilçek və Q.Politser tərəfindən 1973-cü ildə kəşf olunmuşdur.



Hiperonlar – kütləsi neytronun kütləsindən böyük olan qeyri-stabil barionlardır.

Bəs sərbəst kvarkların olmamasını və adronların qeyri-adi dərəcədə stabil olmasını necə izah etmək olar? Nə üçün hətta çox güclü zərbələr zamanı belə adronlar, onları əmələ gətirən kvarklara dağılmır? Bu suallara məhz asimptotik sərbəstlik xassəsi cavab verir.

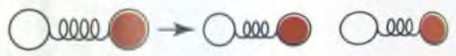
Məsələn, kvarkdan və antikvarkdan əmələ gəlmiş mezonu götürək. Xarici təsir vasitəsilə mezonu öz tərkib hissələrinə parçalamağa cəhd etsək, nə baş verəcəkdir? Kvark və antikvarkı bir-birindən ayırmaq mümkün olmur, çünki onlar arasındakı məsafə çox olduqca, onlar bir o qədər böyük qüvvə ilə bir-birini cəzb edəcəkdir.



Adronların daxilində kvarkları birləşdirən qlüon simləri (telləri) getdikcə daha güclü gərilməyə başlayır. Bu simləri qırmaq cəhdi, adronlar daxilində əbədi əsir olmuş kvarkların azad olmasına yox, yeni mezonların yaranmasına səbəb olur.

Beləliklə, asimptotik sərbəstlik xassəsi Yerdə mümkün olan enerjilərdə kvarkların adronlardan azadolma imkanını istisna edir. Bu hadisə "konfaynment" adını almışdır.

Bəs atom nüvələrində proton və neytronları birləşdirən qüvvələr necə olsun? Axı kvant xromodinamikasına qədər məhz onları güclü qarşılıqlı təsirlə eyniləşdirirdilər. İndi aydın olmuşdur ki, nüvə daxilində rəng yüklərinin asimmetrik paylanması ilə şərtlənən və nüvədə nuklonlar arasında qarşılıqlı təsir edən qüvvələr, onların xeyli böyük qiymətə malik olmasına baxmayaraq, kvarkları adronlar daxilində tutub saxlayan həmin həqiqi güclü qarşılıqlı təsirin yalnız zəif oxşarıdır.



Doğrudan da, 10 MeV tərtibində enerji nüvəni ayrı-ayrı nuklonlara parçalamağa imkan verir. Protonu, onu təşkil edən kvarklara parçalamaq üçün isə milyonlarla milyon meqaelektronvolt enerji də kifayət deyil.

BÜTÜN BUNLARA BAXMAYARAQ, KVARKLAR MÖVCUDDURMU?

Kvarklar nəzəriyyəsi və ona əsaslanan kvant xromodinamikası çox gözəldir. Lakin bu cür mənzərənin eksperimental təsdiqi varmı? Əlbəttə ki var, özü də az deyildir.

Birincisi, kvark modeli eksperimental müşahidə olunan adronların (barionların və mezonların) bütün rəngarəngliyini vahid baxımdan izah edir. Başqa sözlə, hər bir adron üçün yalnız onun kvark quruluşunu göstərmək yox, həm də kvarkların adron daxilində olduğu halları da (adronun xarakteristikalarını bu hallar təyin edir) təsvir etmək mümkündür.

İkincisi, kvark modeli eyni bir multipletə daxil olan ən yüngül adronların kütlələri arasındakı eksperimental müşahidə olunan münasibətləri hesablamağa, həmçinin onların maqnit momentlərini və digər xarakteristikalarını

tapmağa imkan verir. Məsələn, barionların iki multipletinə: spini 1/2 olan zərrəciklərin oktetinə və spini 3/2 olan zərrəciklərin dekupletinə baxaq. Artıq deyildiyi kimi, dekuplet daxilində zərrəciklər kütlələrinə görə fərqlənir, çünki s-kvark u- və d-kvarklardan təxminən 150 MeV ağırdır. Bu da Ω^-*-hiperonun* kütləsini qabaqcadan xəbər verməyə imkan vermişdi.

ALTINCI KVARKIN KƏŞFİ

1995-ci ildə, beşinci kvarkın kəşfindən 18 il sonra, Çikaqoda (ABŞ) yerləşən Enriko Fermi adına Laboratoriyanın (qısaca Fermilab) fiziklərinə altıncı t-kvarkın (*ing.* top – "ən yuxarı") mövcudluğunu sübut etmək və onun kütləsini ölçmək müyəssər oldu. t-kvarkın kütləsi 176±13 QeV-ə bərabərdir (bu, təxminən 180 proton kütləsinə uyğundur).

Eksperiment "Tevatron" sürətləndiricisində aparılmışdır. Burada proton və antiproton 0,9 TeV = 900 QeV enerjiyə qədər sürətləndirilir və sonra isə üzbəüz toqquşdurulur. Sürətləndiricinin işıqlılığı, yəni 1 saniyədə dəstənin 1 sm^2-nə düşən zərrəciklərin sayı $1{,}7 \cdot 10^{31}$ protona (antiprotona) qədər çatdırılmışdı.



E.Fermi adına milli sürətləndiricilər laboratoriyası (Fermilab). ABŞ. 1973-cü il.

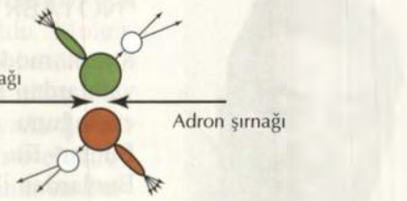
Kvarkların axtarışı olduqca çətin məsələdir, hər şeydən əvvəl ona görə ki, müasir təsəvvürlər baxımından onlar həmişə real müşahidə olunan zərrəciklərin (protonların, neytronların, pionların və digər adronların) daxilində bağlı halda olur. Kvarkların belə xassəsi "konfaynment" (*ing.* confinement – "məhdudiyyət", "əsiretmə") adlanır. Bəs onda onları necə axtarmaq lazımdır? Hesab olunur ki, (bir çox eksperimentlər də bunu təsdiq etmişdir) çox yüksək enerjilərdə adronların istənilən yaranma reaksiyası iki mərhələdə gedir. Əvvəlcə kvarklar və antikvarklar doğulur və praktik olaraq dərhal onların qarşılıqlı təsir prosesləri (adronlaşma) baş verir. Adronlaşmanı məhz olduqca qısa zamanda baş verdiyini qeydə almaq mümkün deyildir. Nəticədə təcrübədə görünən adron sınaqları yaranır.

Proton-antiproton cütünün toqquşması zamanı t-kvarkın yaranma reaksiyasını belə yazmaq olar:

$$p + \bar{p} \to t + \bar{t}.$$

Doğulmuş t-kvarklar qeyri-stabildir və dərhal parçalanır:

$$t \to W^+ + b;\ \bar{t} \to W^+ + \bar{b}.$$



Bu zaman aralıq W-bozonlar və b-kvarklar yaranır. $W^\pm$-bozonlar müona və müon neytrinosuna çevrilir:

$$W^- \to \mu^- + \nu_\mu;\ W^+ \to \mu^+ + \nu_\mu.$$

W-bozonlarla birlikdə yaranan b-kvarklar adron şırnaqları əmələ gətirir. Bu şırnaqlar b-kvarkların impulsları istiqamətində uçur. W-bozonların parçalanması nəticəsində yaranan neytrinolar maddə ilə çox zəif qarşılıqlı təsirdə olduqlarından qeydə alına bilməz.

10^{-12} san ərzində sürətlə baş verən bu proseslər kaskadının sonunda, toqquşma nöqtəsindən $3 \cdot 10^{-4}$ m-dən böyük olmayan məsafədə iki lepton (müon və antimüon və ya elektron və pozitron) yaranır. Çarpaz proseslər də mümkündür, yəni $W^\pm$-bozonlar, məsələn, müon və elektron əmələ gətirməklə parçalana bilər. Bu proseslər dileptonlu proseslər adlanır. Onların qeydə alınması t-kvarkların yaranmasının təkzibedilməz sübutudur, çünki digər kvarkların kütləsi W-bozonun kütləsindən xeyli kiçikdir və bu cür parçalanma, enerjinin saxlanması qanununa görə, onlar üçün qeyri-mümkündür. Yalnız bir t-kvark W və b-yə parçalansa və nəticədə yalnız bir lepton əmələ gəlirsə, onda belə reaksiya da kifayət qədər inandırıcıdır. Bu halda ikinci t-kvarkın parçalanması, uçuş bucağına nəzərən xarakterik paylanması olan adron şırnağı törədir.

Fermilabda bir neçə on belə dileptonlu və birleptonlu hadisələr qeydə alınmışdır. Enerji və impulsun saxlanması qanununa əsaslanan incə təhlil t-kvarkın kütləsini müəyyən etməyə imkan verdi.



B.Rixter.



S.Tinq.

SERN – İsveçrədə Avropa Nüvə Tədqiqatları Mərkəzidir.

Məhz bu mülahizə də oktetə daxil olan barionların kütlələri arasında münasibət (*Gell-Mann–Okubo düsturunu*) almağa imkan verir:

$$\frac{(m_\Xi + m_N)}{2} = \frac{(m_\Sigma + 3m_\Lambda)}{4}.$$

Bu münasibət böyük dəqiqliklə ödənir. Təcrübə ilə yaxşı uzlaşan başqa bir münasibət protonun və neytronun maqnit momentlərini əlaqələndirir:

$$\mu_n = -\frac{2\mu_p}{3}.$$

1974-cü İLİN "NOYABR İNQİLABI"

Kvark modeli eyni kvark və antikvarklardan ibarət bağlı halların mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verir. Bunlar $\bar{u}u$, $\bar{d}d$, $\bar{s}s$, $\bar{c}c$, $\bar{b}b$, $\bar{t}t$-dir. Bunlardan ilk ikisi çoxdan məlumdur. Bu, kütləsi 140 MeV olan π^0-mezondan başqa bir şey deyildir. 1960-cı illərdə kütləsi 1020 MeV, tərkibi isə $\bar{s}s$ olan φ mezon kəşf olundu. 1974-cü ilin noyabrında fizika cəmiyyətini o dərəcədə həyəcanlandıran bir hadisə baş verdi ki, onu "noyabr inqilabı" adlandırdılar. Eyni bir dövrdə iki sürətləndiricidə (Brukheyvendə və Stanfordda) spini 1, kütləsi 3100 MeV olan və qəribə xassələrə, hər şeydən əvvəl, nüvə miqyasında çox böyük yaşama müddətinə malik olan yeni bir elementar zərrəcik aşkar etdilər.

Yeni zərrəciyin davranışını çoxlu nəzəriyyəçilər müfəssəl təhlil etdilər. "Əqli hücum" göstərdi ki, onun xassələrini izah etməyin yeganə yolu odur ki, bu kəşf olunmuş zərrəcik dördüncü kvarkın və uyğun antikvarkın bağlı halıdır, yəni $\bar{c}c$-dir. Eyni zamanda iki müxtəlif fiziklər qrupu tərəfindən kəşf olunduğuna görə, ona J/ψ, ikiqat işarəsi verdilər. Bu kəşfə görə həmin qrupların rəhbərləri olan Semuel Tinq (1936-cı ildə doğulub) və Berton Rixter (1931-ci ildə doğulub) 1976-cı ildə Nobel mükafatı aldılar.

J/ψ zərrəciyin kəşfi ilə bağlı fiziklərin həyəcanı aydındır: dördüncü c-kvarkın mövcud olduğu sübut olundu. Bu, psixoloji olaraq çox vacib idi, çünki kvark modelinə yalnız çox saylı alternativlərdən biri kimi baxılırdı. "Noyabr inqilabı"ndan sonra, o, hamı tərəfindən qəbul edilmiş oldu.

Həmin vaxtlarda, 1970-ci illərdə, ABŞ-da (E.Fermi adına laboratoriya, Çikaqo) və İsveçrədə (SERN, Cenevrə) yeni sürətləndiricilərin işə salınması ilə əlaqədar alimlər yüksək enerjili yüngül zərrəciklərin hədəfdən səpilməsinə dair klassik təcrübələrdə (əslində, Rezerford təcrübəsinin analoqu olan təcrübələrdə), kvarklar olmasa da, onların "kölgələrini görmək" imkanı əldə etdilər.

Artıq deyilmişdir ki, sınaq zərrəciyinin enerjisi böyük olduqca, onun "ayırdetmə qabiliyyəti" də bir o qədər yüksək olur. Tutaq ki, məsələn, protonu elektronla bombardman edirik. Zərrəciklərin qarşılıqlı təsiri və impulsu böyük olduqca, fotonun protona verdiyi impuls da bir o qədər çox olur. Foton protonun daxilində kvarkları axtaran şup rolunu oynayır. Əgər uyğun dalğa uzunluğu kifayət qədər kiçikdirsə (yəni elektronun enerji və impulsu kifayət qədər böyükdürsə), onda bir kvarkdan səpilməni o biri kvarkdan səpilmədən fərqləndirmək olar. Fotonların, protonun ayrı-ayrı tərkib hissələrindən səpildiyini irəli sürən hipotezə əsaslanaraq, səpilmə məlumatlarına görə kvarkların yükünün qiymətini hesabladılar. Bu yük, Gell-Mannın hipotezinə tam uyğun olaraq, ya $2/3e$-yə, ya da $-1/3e$-yə bərabər oldu. Kvarkların mövcudluğuna qarşı şübhələr də tədricən dağılmağa başladı.

ZƏİF QARŞILIQLI TƏSİRLƏR



Fundamental qarşılıqlı təsirlərdən birini zəif qarşılıqlı təsir adlandırmışlar. Bunun səbəbi onun sabitinin güclü qarşılıqlı təsir sabitinə nəzərən çox kiçik olmasıdır. "Zəif" adı "az əhəmiyyətli" demək deyildir. Məsələn, zəif qarşılıqlı təsirin sabiti qravitasiya sabitindən 10^{33} dəfə böyükdür, lakin bununla belə, qravitasiya qarşılıqlı təsiri Kainatın quruluşunu və təkamülünü müəyyən edir. Eynilə zəif qarşılıqlı təsir kosmik miqyaslı bir çox hadisələrdə mühüm rol oynayır. Zəif qarşılıqlı təsir olmasaydı Günəş və bir çox ulduzlar sönərdi, çünki onların enerjisinin başlıca mənbəyi protonun neytrona, pozitrona və neytrinoya çevrilməsi və daha sonra $^4_2$He heliumun yaranması reaksiyasıdır. İfratyenilərin pulsarlar (neytron ulduzları) əmələ gəlməklə baş verən partlayışları zamanı enerji itkisi son dərəcədə zəif qarşılıqlı təsir proseslərilə bağlıdır. Zəif qarşılıqlı təsirlər yüklü leptonları neytrinoya, kvarkların bir növünü (ətrini) digər növünə çevirir.

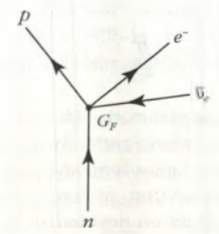
β-PARÇALANMA

Tarixi olaraq, zəif qarşılıqlı təsirə aid ilk misal ağır nüvələrin radioaktiv parçalanması (β-parçalanma) olmuşdur. Bu zaman yükü bir vahid böyük olan nüvə alınmış və elektron buraxılmışdır. 1899-cu ildə Rezerford β-şüaları (radioaktiv mənbələrin buraxdığı elektronları) kəşf etdi.

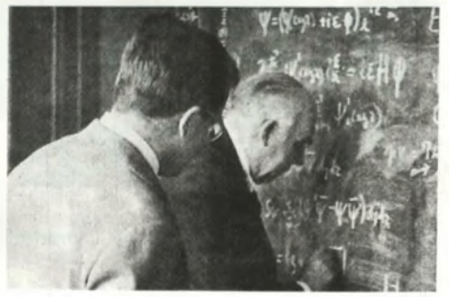
1920-ci illərdə β-parçalanma zamanı çıxan elektronun enerjisini, başlanğıc və son nüvələrin kütləsini xeyli dəqiq ölçmək mümkün oldu. Məlum oldu ki, elektronların enerjisi müəyyən intervalda yerləşməklə istənilən qiymətlər alır. Əgər reaksiyada yalnız başlanğıc və son nüvələr və elektron iştirak etsəydi, onda enerjinin saxlanması qanununa görə son nüvənin və elektronun enerjiləri cəmi başlanğıc nüvənin enerjisinə bərabər olmalı idi.

Ancaq... bu bərabərlik ödənmədi. Hər şey elə görünürdü ki, guya ener-

◂ Ulduzların enerji mənbəyi zəif qarşılıqlı təsir prosesləridir. Göyün bir hissəsinin Kitt-Pik rəsədxanasının 4-metrlik reflektorunun köməyilə çəkilmiş şəkli. ABŞ.



Zəif qarşılıqlı təsirin özünü büruzə verdiyi elementar prosesləri bir neçə qrupa bölmək olar:
1) *lepton prosesləri* – yalnız leptonlar iştirak edir (müonun elektrona, müon neytrinosuna və elektron neytrinosuna parçalanması: $\mu^- \to e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$; neytrinonun və antineytrinonun leptonlardan səpilməsi);
2) *yarımlepton prosesləri* – leptonlar və adronlar iştirak edir (neytronun parçalanması; pionun müona və neytrinoya parçalanması: $\pi^- \to \eta^- + \bar{\nu}_\mu$; neytrinonun protondan səpilməsi və s.);
3) *qeyri-lepton prosesləri* – yalnız adronlar iştirak edir ($\Lambda^0 \to p + \pi^-$; $K^- \to \pi^- + \pi^0$ və s.).



Nils Bor və oğlu Oqe Bor.

β-parçalanma problemi ilk qaranquş olmuşdur. Daha sonra, bir neçə onilliklər ərzində məhz zəif qarşılıqlı təsir fizikası, alimləri dəfələrlə çıxılmaz vəziyyətə salmışdır. Bu vəziyyətdən çıxış təbiətin fundamental qanunlarının dərk edilməsində yeni sıçrayışa səbəb oldu.



Yüksək Enerjilər Fizikası İnstitutunda UNK-1 sürətləndirici-toplayıcı kompleksin neytrino detektoru. Protvino.

jinin bir hissəsi izsiz itir. Vəziyyət o qədər ciddi idi ki, bir müddət hətta Nils Borun β-parçalanmada enerjinin saxlanması qanununun heç də həmişə ödənmədiyi haqqındakı "ağılsız" ideyası müzakirə olunmuşdu.

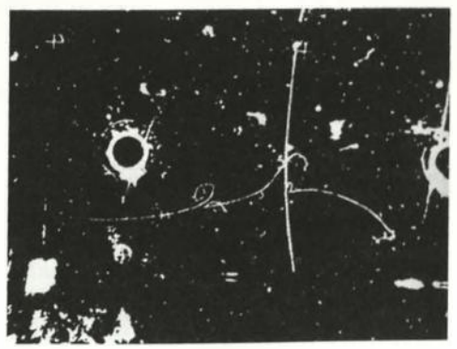
Nəhayət, problemin düzgün həllini 1930-cu ildə isveçrəli Volfqanq Pauli tapdı. O, belə fikir söylədi ki, enerjinin bir hissəsini elektroneytral, maddə ilə zəif qarşılıqlı təsirdə olan və ona görə də qeydiyyata düşməyən bir zərrəcik aparır. Ferminin təklifi ilə bu zərrəciyi neytrino (neytroncuq) adlandırdılar. Lakin bu artıq neytronun kəşfindən sonra baş verdi. Həmin vaxt aydın oldu ki, β-parçalanma nüvədəki neytronlardan birinin parçalanması ilə şərtlənir: $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$. Bunun nəticəsində elektron antineytrinosu yaranır və lepton ədədinin saxlanması qanununun tələb etdiyi kimi, e^- və $\bar{\nu}_e$-nun tam lepton yükü sıfıra bərabərdir $(0 = +1 - 1)$.

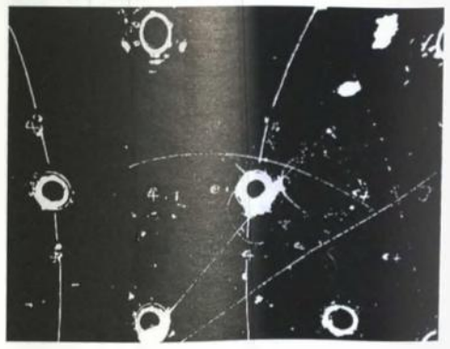
β-parçalanmada iştirak edən zərrəciklərin hamısı fermiondur (neytron, proton, elektron və neytrino) və hamısının spini 1/2-ə bərabərdir. Ona görə də zəif qarşılıqlı təsirin 1930-cu illərin əvvəlində meydana çıxmış ilk modeli *dördfermionlu model* adlandırılmışdır.

ZƏİF NEYTRAL CƏRƏYANLAR

Dördfermionlu modeldə zərrəciklər arasında zəif qarşılıqlı təsirlər kontakt təsir şəklində reallaşır, yəni güclü və elektromaqnit qarşılıqlı təsirlərdəki kimi, sahə kvantlarının mübadiləsi yolu ilə yox, zəif cərəyanlar adlanan cərəyanlar vasitəsilə reallaşır.

Zəif cərəyanlar elektrik cərəyanından əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənir. Birincisi, elektrik cərəyanı vektorial cərəyandır, zəif cərəyanlar isə *V vektorial cərəyanla A aksial vektorial cərəyanın* cəmindən ibarətdir. Güzgü əksolunma (P fəza inversiyası) zamanı və C yük qoşması zamanı V və A cərəyanlar özlərini müxtəlif cür aparır, yəni zəif cərəyan müəyyən bir cütlüyə malik deyil. İkincisi, neytral fotonların mübadiləsi hesabına baş verən elektromaqnit qarşılıqlı təsirindən fərqli olaraq, zəif qarşılıqlı təsir





Zəif neytral cərəyanların kəşf olunduğu proseslər. Solda – antineytrinonun (yük mübadiləsi olmadan) elektrondan elastiki səpilməsi.

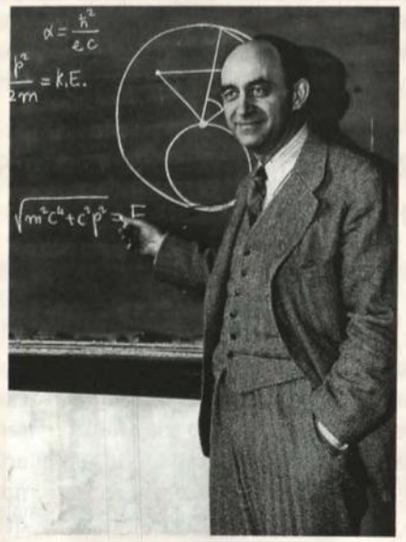
Sağda – neytrinonun neytronla qarşılıqlı təsiri. Bu qarşılıqlı təsir nəticəsində mənfi pion əmələ gəlir. Qabarcıqlı "Qarqamel" kamerasında treklərin fotoşəkli. SERN. 1971-ci il.

ENRİKO FERMİ

Enriko Fermi (1901-1954) Piza universiteti nəzdindəki Ali normal məktəbə daxil olanda klassik fizikanı mükəmməl bilirdi. Bu elmdə o, bu qədər dərin biliyi acgözlüklə yeniliyə yiyələnmək cəhdi sayəsində, riyaziyyat və fizikaya qarşı özünü çox erkən büruzə vermiş çox gözəl qabiliyyəti sayəsində, həmçinin istedadlı uşağa diqqət yetirmiş və onun mütaliələrinə rəhbərlik etmiş qonşu-mühəndisin köməyi sayəsində əldə etmişdir. 1922-ci ildə rentgen şüalanmasının eksperimental tədqiqinə dair doktorluq dissertasiyası müdafiə etmişdir. İtaliya hökumətinin təqaüdü ona eyni zamanda iki universitetdə: Gettingen universitetində Maks Bornun yanında və Leyden universitetində Paul Erenfestin yanında təkmilləşməyə imkan vermişdir.

1924-cü ildən başlayaraq Fermi Florensiya universitetində mexanikadan və riyazi fizikadan mühazirələr oxumuş və həvəslə nisbilik nəzəriyyəsinin, statistik mexanikanın kvant nəzəriyyəsinin, bərk cisim nəzəriyyəsinin problemləri ilə məşğul olmuşdur. Zərrəcikləri Paulinin qadağan prinsipinə tabe olan "elektron" qazının xassələrini tədqiq etmişdir. Bu cür spini yarımtam (1/2, 3/2 və s.) olan zərrəciklərin Fermi və ondan asılı olmadan Dirak tərəfindən yaradılan statistik mexanikası Fermi-Dirak statistikası, zərrəciklərin özləri isə Ferminin şərəfinə fermionlar adlandırılmışdır. 1927-ci ildə, adı dünya şöhrəti qazanmış Fermi Roma universitetinin birinci fizika professoru təyin olundu (Fizika laboratoriyasında özünü çox inamsız hiss edən əksər fizik-nəzəriyyəçilərdən və nəzəri işlərdə tamamilə köməksiz olan əksər eksperimentatorlardan fərqli olaraq, nəzəriyyəçi Fermi eksperimentator Fermidən geri qalmırdı). 1928-ci ildə o, kvant fizikasına aid "Kvant fizikasına giriş" adlı ilk italyan dərsliyini çap etdirdi. 1933-cü ildə yeni zərrəciyin – neytrinonun "xaç atası" oldu. Həmin vaxtda da "Nature" ("Təbiət", İngiltərə) jurnalına β-parçalanmanın, zəif qarşılıqlı təsir adlanan, yeni bir qarşılıqlı təsirlə əlaqəsinə aid məqalə təqdim etdi. Yalnız redaksiya məqaləni rədd etdi ki, müəllifin mülahizələri isbat olunmamışdır. Ferminin bu işi bir az sonra İtaliya jurnallarının birində çapdan çıxdı.

1934-cü ildə İren və Frederik Jolio-Küri süni radioaktivliyi kəşf etdilər. Həmin ildə də Fermi öz əməkdaşı Emilio Seqre ilə birlikdə bir sıra eksperimentlər apardılar. Bu eksperimentlər göstərdi ki, neytronları tərkibində hidrogen atomları olan maddə (məsələn, su və ya parafin) təbəqəsindən buraxmaqla yavaşıtmaq olar. Müxtəlif kimyəvi birləşmələri yavaş neytronlarla şüalandırmaqla Fermi əvvəllər məlum olmayan çoxsaylı yeni radioaktiv izotoplar aldı (lakin ^{238}U nüvələrinin parçalanmasını aşkar etməmişdi). Bu silsilə işlərinə görə Fermi 1938-ci ildə Nobel mükafatına layiq görüldü. Elə həmin dövrdə də o, "transuranları" – dövri sistemdə urandan sonra yerləşmiş elementləri almaq ideyasını irəli sürdü.



Nobel mükafatı alan alim ailəsi ilə birlikdə ABŞ-a mühacirət etdi (yəhudi mənşəli olduğuna görə arvadı Fermi Lauranın faşist İtaliyasında qalması artıq təhlükəsiz deyildi).

ABŞ-da Fermi əvvəlcə Kolumbiya universitetinin, sonra isə Çikaqo universitetinin professoru vəzifəsini tutdu. O, Çikaqo stadionunun tribunaları altında (başqa yer olmadığına görə) nüvə reaktoru qurdu, 1942-ci ildə onu işə saldı və ilk idarə olunan zəncirvari reaksiyanı həyata keçirdi. 1943-cü ildə Fermi ("əcnəbi düşmən" statusu adını almasına baxmayaraq, çünki İtaliya ABŞ-la müharibə vəziyyətində idi) atom bombasının yaradılması üzrə Manhetten proyektində işə başladı.

Müharibə qurtaranda, indi artıq ABŞ-ın tamhüquqlu vətəndaşı kimi, Fermi Çikaqoya qayıtdı. Orada o, kosmik şüalarda zərrəcikləri sürətləndirməyin nəzəriyyəsi və zərrəciklərin külli miqdarda doğulmasının statistik nəzəriyyəsi üzərində işləmişdir. Həmin illərdə alim atom üzrə tədqiqatların məxfiləşdirilməsinə qarşı və antiamerikan fəaliyyətin təhqiq edilməsinə dair komissiya tərəfindən üstü açılmış "əcinnə ovunun" qurbanı olmuş Robert Oppengeymerin müdafiəsi uğrunda çıxış etmişdir.

Alim fizikanı o qədər dərindən və ustalıqla hiss edirdi ki, o qədər yaxşı bilirdi ki, onun istənilən fiziki suala cavab verməyə hazır olması Fermini tanıyanların hamısını heyrətə salırdı.

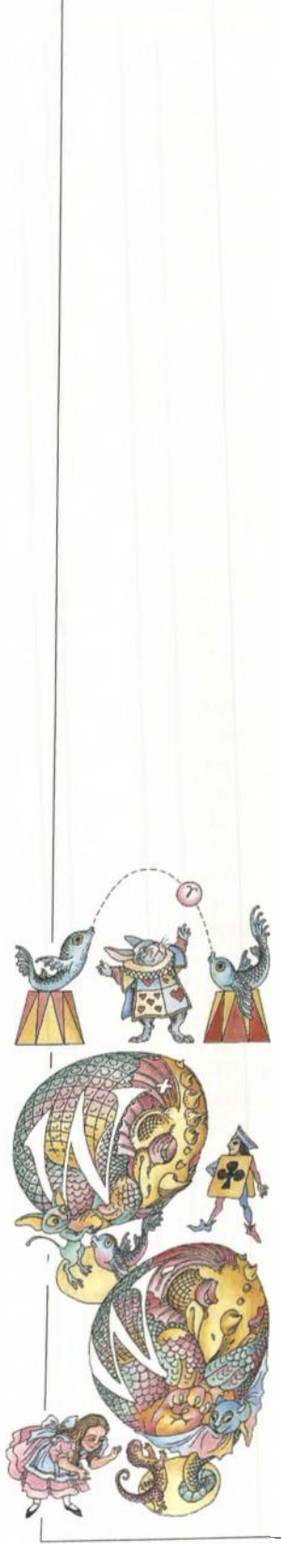
Fermi çox səmimi insan və çox yaxşı müəllim idi. O, çoxsaylı nəzəriyyəçi və eksperimentatorlar yetişdirmişdir. Onun ölümündən bir il sonra yeni (100-cü) kimyəvi element fermium adlandırıldı. ABŞ-da Milli sürətləndiricilər laboratoriyası (Fermilab), Çikaqo Nüvə Tədqiqatları İnstitutu, "nüvə" uzunluq vahidi (1 fermi = 1 femtometr = 10^{-15} m) və zəif qarşılıqlı təsiri xarakterizə edən sabit (Fermi sabiti $G_F = 294\,\text{QeV}^{-2}$) Ferminin adını daşıyır.

çox vaxt yüklü cərəyanlar vasitəsilə həyata keçirilir. *Yüklü cərəyanlar* qarşılıqlı təsirdə olan zərrəciklərin yükünü dəyişir ("Zərrəciklər aləmində simmetriyalar və saxlanma qanunları" məqaləsinə bax).

Kvark (*adron*) yüklü cərəyanları ilə *lepton yüklü cərəyanlarını* bir-birindən fərqləndirirlər. Kvark cərəyanları neytronu protona, bir növ kvarkı başqa növ kvarka çevirir. Lepton cərəyanlarının təsiri ilə, məsələn, yüklü elektrondan yüksüz neytrino alınır. Zərrəciklərin konkret qarşılıqlı təsir prosesinin *tam zəif yüklü cərəyanı* lepton və kvark yüklü cərəyanlarının cəmindən ibarətdir.

Neytral zəif cərəyanlar neytrino və antineytrinonun nuklonlarla qarşılıqlı təsir proseslərində, müon neytrinolarının elektronlarla toqquşmalarında və s. iştirak edir. Neytral zəif cərəyanların mühüm xassəsi ondan ibarətdir ki, onlar, yüklü zərrəciklərdən fərqli olaraq, zərrəcikləri başqa kvarklara və leptonlara yox, özlərinə çevirir. Elektrozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsi ("Elektrozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsi" məqaləsinə bax) tərəfindən qabaqcadan xəbər verilən neytral cərəyanlar eksperimental olaraq 1973-cü ildə aşkar olundu. 1934-cü ildə Ferminin təklif etdiyi zəif qarşılıqlı təsirin dördfermionlu nəzəriyyəsini 1950-ci illərin sonunda M.Gell-Mann, R.Marşak, E.Sudarşan və R.Feynman əhəmiyyətli dərəcədə inkişaf etdirdilər. Bu nəzəriyyə zəif qarşılıqlı təsir proseslərində iştirak edən zərrəciklərin yalnız kiçik enerjilərində riyazi baxımdan korrekt olub, işləmə qabiliyyətinə malikdir (başqa sözlə desək, 1 QeV-dən azca çox enerjilərdə; protonun kütləsi $m_p \approx 938$ MeV-dir). Böyük enerjilərdə düsturlar öz mənasını itirir.

Mücərrəd nəzəriyyə baxımından belə sxem qənaətbəxş hesab edilə bilməz, çünki ardıcıl nəzəriyyə istənilən enerjilərdə işləməlidir. Dördfermionlu modelin qeyri-standartlığı, onun az anlaşıqlı zəif cərəyanları və qarşılıqlı təsirin, mikroaləmin ümumi mənzərəsinə sığmayan kontakt mexanizmi də təşviş doğururdu. Bununla belə, zəif qarşılıqlı təsir proseslərinin hamısı (onlar bir neçə yüzdür) aşağı enerjilərdə məhz dördfermionlu qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsi ilə təsvir olunur. Bu nəzəriyyənin terminologiyası və zəif cərəyanların riyazi aparatı bu gün də elmdə istifadə edilir.



ELEKTROZƏİF QARŞILIQLI TƏSİRİN VAHİD NƏZƏRİYYƏSİ

Zəif qarşılıqlı təsirin, zərrəciklərin istənilən enerjilərində işləyə bilən modelini daha ümumi nəzəriyyə qurmaqla almaq mümkün oldu. Nə qədər qəribə də olsa, çox vaxt, daha ümumi və şübhəsiz, daha mürəkkəb məsələni həll etməklə, çətin məsələnin öhdəsindən gəlmək mümkün olmuşdur. Bunun üçün sahə nəzəriyyəsinin yeni arsenalından – Yanq-Mills kalibrləmə sahələrindən, simmetriyanın spontan pozulması ideyasından istifadə etmək tələb olundu. Zəif qarşılıqlı təsirlər məhz bu cür, 1960-cı illərin əvvəllərində yaradılmış *elektrozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsi* çərçivəsində ardıcıl və dəqiq təsvir olundu. Bu nəzəriyyədə zəif və elektromaqnit qarşılıqlı təsirlərə eyni bir qarşılıqlı təsirin – elektrozəif qarşılıqlı təsirin müxtəlif təzahürləri kimi baxılır. Bu nəzəriyyəni qurduqlarına görə amerikanlılar Şeldon Qleşon, Stiven Vaynberq və pakistanlı Əbdus Salam 1979-cu ildə fizika üzrə Nobel mükafatı aldılar.

ZƏİF QARŞILIQLI TƏSİRİN KVANTLARI

Zəif qarşılıqlı təsir, elektrozəif qarşılıqlı təsirin bir növü olmaqla, zərrəciklərin kontaktı zamanı baş verməməlidir, fotonların mübadiləsi yolu ilə reallaşan elektromaqnit qarşılıqlı təsir kimi, hər hansı kvantların mübadiləsi yolu ilə baş verməlidir.

Zəif qarşılıqlı təsirin bu cür kvantları aralıq W^+, W^- və Z^0 – bozonlardır. W^+ və W^- bozonları uyğun olaraq neytrino-elektron və elektron-neytrino keçidlərini reallaşdırır. Belə keçidlərdə leptonun yükü dəyişir – bunlar yüklü zəif cərəyanlardır. Onlar digər zəif cərəyanlarla birbaşa qarşılıqlı təsirdə olmur, yalnız yüklü kvantlarla – W^+- və W^--bozonlarla bilavasitə mübadilə yolu ilə qarşılıqlı təsirdə olur.

Lakin bundan başqa, neytrino-neytrino və ya elektron-elektron keçidlərilə bağlı olan neytral zəif cərəyanlar da vardır. Bu keçidlərdə də, elektromaqnit proseslərində fotonlarla elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirlər bir-birindən fərqlənmir, çünki W və Z ağır bozonlar, Eynşteynin məşhur düsturuna uyğun olaraq, enerjidən asanlıqla doğulur. Həm də W və Z bozonlarla mübadilə fotonlarla mübadiləyə analoji baş verir. Kiçik enerjilərdə isə W və Z az-az doğulur və elektromaqnit qarşılıqlı təsirə nəzərən kiçik məsafələrdə aşkar olunur, yəni elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirlər arasındakı fərq açıq-aşkar olur.

1983-cü ildə Avropa nüvə tədqiqatları mərkəzində (SERN) W və Z bozonlar Karl Rubbia və onun həmkarları tərəfindən eksperimental olaraq tapıldı. Zəif qarşılıqlı təsirin Vaynberq-Salam-Qleşou nəzəriyyəsi təcrübələrdə öz təsdiqini tapdı.

"Üçüncü dünya" ölkələrindən fizika üzrə ikinci Nobel laureatı (birincisi Çandrasekahara Raman olmuşdur, 1930-cu il) Əbdus Salam Asiyada, Afrikada və Latın Amerikasında həm elmin inkişafına, həm də inkişaf etməkdə olan ölkələrdən gələn gənc alimlərin təcrübə keçə bilməsi üçün Avropada elmi mərkəzlərin yaradılmasına böyük diqqət verirdi. O, yalnız nəzəri fizika beynəlxalq mərkəzini yox, həm də "Üçüncü dünya"nın Elmlər Akademiyasını (Third World Academy of Science) yaratdı və onun ilk prezidenti oldu. Salamın qələminə İslam alimlərinin Qərbdə riyaziyyatın və tibbin inkişafına təsirinə dair tədqiqatlar məxsusdur. O, yalnız fundamental qarşılıqlı təsirlərin vahid baxımdan başa düşülməsinə deyil, həm də bütün dünya alimlərinin səylərini təbiətin dərin sirlərini tapmaq üçün birləşdirməyə çalışırdı. Dünya vətəndaşı Əbdus Salam belə olmuşdur.

ƏBDUS SALAM

Əbdus Salam (1926-1995) Laxorda yerləşən Pəncab universitetinin Hökumət kollecini bitirib (1946-cı il), təhsilini Müqəddəs Iohann Kembric kollecində davam etdirmişdir. 1949-cu ildə Əbdus Salam ən yüksək fərqlənmə ilə fizika və riyaziyyat üzrə magistr dərəcəsi və 1952-ci ildə isə Kembric universitetinin doktorluq dərəcəsini almışdır.

1951-ci ildə Laxorda Hökumət kollecinin fizika professoru vəzifəsini tutdu. Lakin dünya elm mərkəzlərindən ayrılmaqla, nəzəri fizika ilə məşğul olmaq imkanı olmadığı üçün o, Avropaya qayıtdı və 1954-cü ildən başlayaraq, London universitetinin İmperiya kollecində mühazirələr oxumağa başladı (1957-ci ildən nəzəri fizika kafedrasının professoru kimi). 1964-1993-cü illərdə Salam Triestdəki Nəzəri Fizika Beynəlxalq Mərkəzinin direktoru (İtaliya), 1994-1995-ci illərdə isə onun prezidenti olmuşdur.

Salamın müasir fizikaya verdiyi əsas pay dörd fundamental qarşılıqlı təsirdən ikisinin: elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirləri birləşdirən elektrozəif qarşılıqlı təsirin nəzəriyyəsini yaratması olmuşdur (S.Vaynberqdən asılı olmadan). (Fiziklərin ən müqəddəs məqsədi – bütün dörd fundamental qarşılıqlı təsirin birləşdirilməsi bu günə qədər həyata keçməyib.) Elektrozəif qarşılıqlı təsirin daşıyıcıları Salam nəzəriyyəsində ağır W^* və Z^0 bozonlar, həmçinin sükunət kütləsi olmayan fotonlardır. Burada ağır zərrəciklərin kütləsi "verilməmiş", kalibrləmə invariantlığının pozulmasından çıxarılmışdır. Kalibrləmə invariantlığı elektrozəif qarşılıqlı təsir daşıyıcılarının bəzi xassələrini saxlayan çevrilmələrdir. Salam nəzəriyyəsinə görə, enerji çox yüksək olanda



mübadilə zərrəciklərin yükünü dəyişdirmədiyi kimi, elektrik yükü dəyişmir. Ona görə də, zəif qarşılıqlı təsirin bu növünün daşıyıcısı neytral Z^0-bozonlardır.

Aralıq $W^{\pm}$ və Z^0 bozonların mühüm fərqləndirici xüsusiyyəti onların kütləyə malik olmasıdır. Zəif qarşılıqlı təsirin effektiv radiusu çox kiçikdir – 10^{-18} m tərtibindədir, yəni təxminən güclü qarşılıqlı təsirin radiusundan 1000 dəfə kiçikdir. Bir halda ki, konkret qarşılıqlı təsir zamanı zərrəciklərin bir-birilə mübadilə etdiyi kvantın kütləsi, bu qarşılıqlı təsirin radiusu ilə tərs mütənasibdir, onda aralıq bozonun kütləsi 1000 QeV tərtibində olmalıdır (bu, protonun kütləsindən 100 dəfə böyükdür!).

Göstərilən xassələrə malik olan $W^{\pm}$ və Z^0 aralıq bozonları 1983-cü ildə kəşf olundu və onlar həqiqətən də ağır və qısatəsirlidir. Elektrozəif qarşılıqlı təsiri yüksək dəqiqliklə təsdiq edən və SERN-də aparılan eksperimentlərin rəhbəri Karlo Rubbia (1934-cü ildə doğulub) bu kəşfə görə 1984-cü ildə Nobel mükafatına layiq görüldü.

Xatırladaq ki, elektromaqnit qarşılıqlı təsirin daşıyıcıları neytral və kütləsiz zərrəciklər olan fotonlardır. Fotonun kütləsinin sıfıra bərabər olması onu göstərir ki, elektromaqnit qarşılıqlı təsirin effektiv radiusu qeyri-məhduddur, başqa sözlə, bu qarşılıqlı təsir uzağa təsir edir. Beləliklə, aralıq bozonların və fotonun ümumi cəhəti, yalnız onların spininin 1-ə bərabər olmasıdır. Bir-birinə bu qədər oxşamayan zərrəcikləri vahid nəzəriyyədə birləşdirmək olarmı? Bununla bərabər, nəzərə almaq lazımdır ki, bütün elektromaqnit proseslərində cütlük saxlanır, zəif proseslərdə isə yox, saxlanmır. Lakin bütün bunlara baxmayaraq, nəzəriyyə alındı.

Proton və neytron, onların kvark tərkibindən göründüyü kimi, yalnız o şərt daxilində eyni kütləyə malik ola bilər ki, *u*- və *d*-kvarkların kütlələrini nəzərdən atmaq mümkün olsun.

STİVEN VAYNBERQ

Stiven Vaynberq (1933-cü ildə doğulub) 1954-cü ildə Kornell universitetini bitirəndən sonra, bir il ərzində Kopenhagendə Nəzəri fizika institutunda (indiki Nils Bor institutu) elmi təcrübə keçmişdir. 1957-ci ildə vətənə qayıdaraq, Prinston universitetində doktorluq dissertasiyası müdafiə etmişdir. Kolumbiya və Kaliforniya universitetlərində, Massaçusets institutunda işləmişdir. 1973-cü ildə Vaynberq Harvard universitetində Higgins fizika professoru və eyni zamanda Vaşinqtonda Smitson astrofizika rəsədxanasının baş elmi işçisi oldu (o, Kainatın təkamülünün ilkin mərhələləri ilə maraqlanırdı). 1986-cı ildə Vaynberq Ostində Texas universitetinin fizika və astronomiya professoru oldu.



Vaynberq müasir kvant sahə nəzəriyyəsinə özünün əsas payını Kaliforniya universitetində (Berkli) işləyərkən vermişdir. O vaxt o, (Salamdan və Qleşoudan asılı olmadan) elektrozəif qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsinin "özünə aid" hissəsini yaratmışdır. Məsələn, Vaynberq zərrəciklərin çevrilməsi zamanı neytral cərəyanların olduğunu qabaqcadan xəbər vermişdir. 1979-cu ildə Vaynberq-Salam elektrozəif qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsi Nobel mükafatına layiq görüldü. Vaynberqin "İlk üç dəqiqədə" adlı elmi-kütləvi kitabı (1977-ci il) həqiqi bestseller oldu.

Son illər Vaynberq fizika elminin fəlsəfə və dinlə əlaqəsi məsələsinə çox diqqət yetirir. 1999-cu ilin aprelində keçirilmiş "Kosmik suallar" adlı beynəlxalq konfrans səciyyəvidir. Konfrans Allahın varlığı haqqında, Kainatın başlanğıcı haqqında, bizim bu Kainatda tək olub-olmamağımız haqqında əbədi, sirli suallara həsr olunmuşdu. Bu konfransın apofeozu Vaynberqlə keçmiş fizik-nəzəriyyəçi, indi isə ingilis kilsəsinin görkəmli xadimi Con Polkinqhorn arasındakı mübahisə oldu.

Ehtirasların coşması dərəcəsinə görə bu mübahisə, 1860-cı ildə Oksfordda Darvinin ardıcılı olan Tomas Haksli və keşiş Semuel Uilberfors arasında baş verən məşhur mübahisəni xatırladırdı. Vaynberq qəti surətdə belə bir nöqteyi-nəzəri müdafiə edirdi ki, təbiətdə öz izahı üçün Yaradıcının varlığı hipotezini tələb edən hadisələr müşahidə olunmur.

SPİRALLIQ

Bütün fundamental zərrəciklərin (leptonların və kvarkların) spini 1/2-ə bərabərdir (Plank sabiti $\hbar$ vahidlərində). Şərti olaraq fərz edək ki, elektron və digər fermionlar – kiçicik fırfıralardır. Belə zərrəcik hərəkət edərkən, onun spininin istiqaməti impulsun istiqamətilə üst-üstə düşə və ya ona əks ola bilər. Zərrəciyin spininin onun impulsunun istiqamətinə nəzərən oriyentasiyası *zərrəciyin spirallığı* adlanır. Əgər "fırfıra" saat əqrəbi istiqamətində fırlanırsa, onda deyirlər ki, zərrəcik *müsbət spirallığa* (*sağ zərrəciklər*), yox əgər əksinə fırlanırsa, zərrəcik *mənfi spirallığa* (*sol zərrəciklər*) malikdir.

Əgər zərrəcik kütləyə malikdirsə, onda spirallığı əksinə dəyişmək olar. Bunun üçün zərrəciyi dayandırmaq və ona yenidən əks istiqamətdə həmin sürəti vermək lazımdır. Buradan çıxır ki, kütləli zərrəciklər spirallığın hər iki qiymətini ala bilər, yəni sağ və sol zərrəcik ola bilər. Kütləsi olmayan zərrəciklər üçün, məsələn, neytrino üçün məsələ başqadır. Onların sükunətdə ola biləcəyi hesablama sistemi mövcud deyildir: bu zərrəciklər həmişə işıq sürətilə hərəkət edir.

Bir halda ki, kütləsiz zərrəcikləri dayandırmaq olmaz, onda onların spirallığı heç vaxt dəyişmir. Sağ neytrino həmişə sağdır, sol neytrino isə həmişə soldur. Neytrinonun spirallığının necə olduğu məsələsini eksperimental həll etdilər: məlum oldu ki, onlar mənfi spirallığa malikdir. Buna uyğun olaraq, antineytrino müsbət spirallıqla xarakterizə olunur. Bunun nə üçün belə olduğunu hələ aydınlaşdırmaq mümkün olmayıb.

İndi elektromaqnit sahəsinin adronların kütləsinə necə təsir etdiyini xatırlayaq. Elektromaqnit sahəsi olmasaydı, məsələn, neytronun və protonun kütləsi eyni olardı. Onların kütlələrinin bərabər olmamasını, faktiki olaraq izotopik simmetriyanın pozulması hesab edirlər. Buna analoji olaraq, fərz etmək olar ki, hər hansı, hələlik məlum olmayan bir sahə aralıq bozonların və fotonun simmetriyasını pozur (əlbəttə ki, əgər belə simmetriya varsa) və bozonlara kütlə verir.

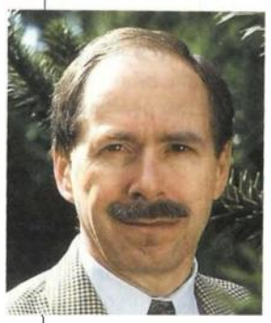
Elektrozəif qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsinin başlıca əsasını eksperimental məlumatlar təşkil edir. Məlum oldu ki, zərrəciklərin enerjisi artdıqca zəif qarşılıqlı təsirin intensivliyi, elektromaqnit qarşılıqlı təsirin intensivliyinə nəzərən daha sürətlə artır. Fərz etmək olardı ki, zərrəciklərin enerjisinin müəyyən (100 QeV-dən xeyli böyük) qiymətində bu iki qarşılıqlı təsirin intensivlikləri bərabərləşəcəkdir. O halda, aralıq bozonların kütlələri sıfıra çevriləcək, bozonların özləri isə fotonlardan fərqlənməyəcək, zəif və elektromaqnit qarşılıqlı təsirlər isə ümumi bir rabitə sabitinə malik olan bir qarşılıqlı təsirdə birləşəcəkdir. Belə bir fərziyyə indiyədək təcrübədə yoxlanmayıb, mövcud sürətləndiricilərin gücü bunun üçün kifayət deyildir.

Tutaq ki, edilən fərziyyələr doğrudur. Onda nəzəriyyəni qurmaq üçün "yalnız" elektrozəif simmetriyaya uyğun gələn çevrilmələr qrupunu tapmaq və bu simmetriyanı pozan sahənin şəklini müəyyən etmək qalır. Simmetriyanın bu pozulması sayəsində bozonlar kütlə qazanır, fotonlar isə yox.

ELEKTROZƏİF QARŞILIQLI TƏSİRİN SİMMETRİYASI

Elementar zərrəciklərin daha bir xassəsini – onların spirallığını nəzərə aldıqdan sonra, zəif qarşılıqlı təsirlərin simmetriyasını müəyyən etmək mümkün oldu. Məlum oldu ki, yüklü zəif cərəyanların doğurduğu zəif qarşılıqlı təsirlərə (e^--elektronun ν_e elektron neytrinosuna çevrilməsi) yalnız sol zərrəciklər daxildir (məsələn, sol elektron və sol neytrino). Sol zərrəciklər cütlük, yəni dublet əmələ gətirir. Bu cütlüklər sağ elektrondan fərqli cür qarşılıqlı təsirdə olur. Zərrəciklər arasında sağ elektronun partnyoru yoxdur (antizərrəcik hesabdan deyil) və ona görə də onu sinqlet adlandırırlar. Belə təsnifata riyaziyyatçıların $SU(2)_L$





Gerard t'Hoft.

adlandırdığı simmetriya qrupu uyğundur (müfəssəlliyə varmadan qeyd edək ki, 2 və L burada sol zərrəciklərin dubletini bildirir). Deməli, zəif qarşılıqlı təsirlərin nəzəriyyəsinin ilkin tənlikləri $SU(2)_L$ simmetriyasına malik olmalıdır. Bunun sayəsində üç növ aralıq bozon mövcuddur ("Qrup nədir" əlavə oçerkinə bax).

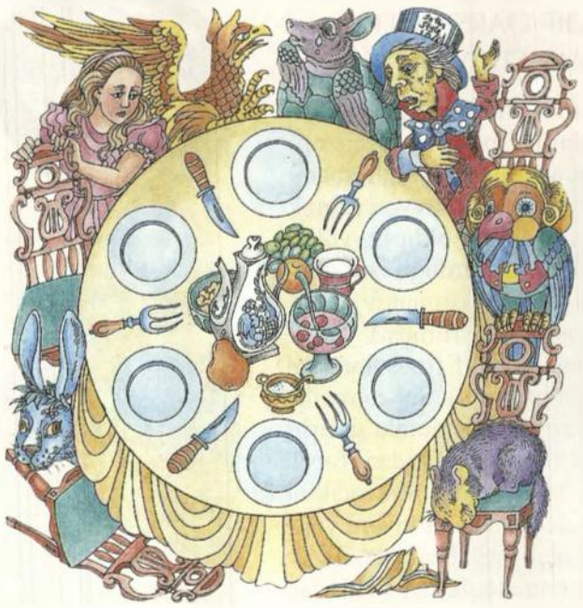
Ancaq $SU(2)_L$ simmetriyasının elektromaqnit qarşılıqlı təsirlərə heç bir dəxli yoxdur. Lakin $W^{\pm}$ bozonları elektrik yüklü olduğundan, nəzəriyyənin başlanğıc tənlikləri elektromaqnit qarşılıqlı təsirləri üçün xarakterik olan simmetriyaya malik olmalıdır. Uyğun simmetriya yaxşı məlumdur və $U(1)$ adlanır. Deməli, həm zəif, həm də elektromaqnit qarşılıqlı təsirlərin xassələrini nəzərə alacaq nəzəriyyə tələb edir ki, öz tənlikləri $SU(2)_L \times U(1)$ hasilinə nəzərən simmetrik olsun. Baxılan halda "×" işarəsi onu göstərir ki, eyni zamanda həm $SU(2)_L$ simmetriyası, həm də $U(1)$ simmetriyası ödənməlidir.

Elektrozəif qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsinin ilkin tənliklərinə daxil edilmiş $SU(2)_L \times U(1)$ simmetriyası yalnız yüksək enerjilərdə mövcuddur. Artıq deyildiyi kimi, kiçik enerjilərdə bu simmetriya yox olur. Onu, spini 0-a bərabər olan çox ağır zərrəciklərin – Higgs bozonların və ya sadəcə H^0-higgslərin izodublet skalyar sahəsi pozur.

Elektrozəif simmetriyanın belə pozulması məhz zərrəciklərə, o cümlədən leptonlara, W və Z bozonlara kütlə qazandırır, fotonu isə kütləsiz saxlayır. Bu halda elektrozəif qarşılıqlı təsir modelinin bütün zəruri xassələrinin saxlandığını 1970-ci illərin əvvəlində Niderland fiziki Gerard t'Hoft dəqiq isbat etmişdir. Yalnız bundan sonra alimlər elektrozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsinə ciddi münasibət göstərməyə başladılar.

SİMMETRİYANIN SPONTAN POZULMASI

Söhbətimizə Nobel mükafatı laureatı Əbdus Salamın söylədiyi və ilk baxışda fizikadan çox uzaq görünən bir misalla başlayaq. Tutaq ki, qonaqları gözləyən ev sahibləri mətbəx ləvazimatlarını dairəvi stolun üstünə tam simmetrik şəkildə düzərək, süfrə açmışlar. Nə qədər ki, qonaqlardan heç kəs stolun arxasına əyləşməyib, çəngəl və bıçaq götürməyib, stolun üstündə tam simmetriya hökm sürür. İndi kifayətdir ki, qonaqlardan biri ilk seçimi etsin, onda dərhal bıçaq və salfetlər hər bir qonağın sağ əli tərəfdə, çəngəllər isə sol əli (və ya əksinə) tərəfdə qalacaqdır. Nəticədə qeyri-simmetrik mənzərə alınır. Bu effekt *simmetriyanın spontan pozulması* adlanır, çünki təsadüfi (determinləşdirilməmiş) seçim nəticəsində baş verir.



Digər yaxşı məlum olan misal – ferromaqnetiklərin spontan maqnitlənməsidir. Ferromaqnetiklərdən hər birinin öz T_C Küri nöqtəsi var. Əgər nümunənin temperaturu bu nöqtədən yuxarıdadırsa, onda onun domen quruluşu (domen dedikdə ferromaqnetikin maqnitlənməsi eyni istiqamətdə olan oblastı başa düşülür) tamamilə dağılır və orta maqnitlənməsi sıfıra bərabər olur, başqa sözlə, bütün istiqamətlər bərabərhüquqlu olur. Soyutduqda T_C-dən aşağıda domen quruluşu özbaşına bərpa olunur, yəni bərabərhüquqluluğun spontan pozulmasına ekvivalent olan maqnitlənmə yaranır.

Eyni bir hadisəni, yəni yekun və ilkin sistemlərin simmetriyalarının üst-üstə düşmədiyini çox müxtəlif şəraitlərdə müşahidə etmək olar. Həm də simmetriya spontan, idarə olunmadan pozulur və sistem buna qədər malik olmadığı xassə qazanır.

1960-cı illərdə bir sıra nəzəriyyəçilərin (məsələn, ingilis P.Higqsin və T.Kibblin) işlərində göstərilmişdir ki, simmetriyanın spontan pozulduğu modelləri kvant sahə nəzəriyyəsində də qurmaq mümkündür. Doğrudur, söhbət bu halda hansı isə bir *skalyar sahənin* vakuum halının simmetriyasının pozulmasından gedir.

Elementar zərrəciklərin qarşılıqlı təsirini təsvir edən relyativistik kvant sahə nəzəriyyəsinin hakim mövqeyini xatırlayaq: zərrəciklərin hər bir növünün özünə uyğun öz dalğa sahəsi vardır. Bu sahənin kvantları (həyəcanlanmaları) – müəyyən kütləyə, spinə, yükə və s. malik olan zərrəciklərdir. Skalyar sahənin kvantları spini sıfır olan, digər kvant ədədləri (yükü, barion və ya lepton ədədi və s.) isə vakuumun kvant ədədləri ilə üst-üstə düşən zərrəciklərdir. Bu cür sahələrin bir çox xassələrini klassik səviyyədə aydınlaşdırmaq olar.

ELEMENTAR ZƏRRƏCİKLƏR FİZİKASININ QƏLƏBƏSİ

Elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirlərin birləşdirilməsi nəzəri fizikanın XX əsrin sonuncu üç onilliyi ərzində qazandığı ən böyük qələbəsidir. Elektrozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsinin yaradılmasında Nobel mükafatına layiq görülmüş üç alimin – Şeldon Qlou, Abdus Salam və Stiven Vaynberqin xidmətləri böyükdür. Onlar bu nəzəriyyənin müəyyən variantını müstəqil olaraq 1967-ci ildə işləmişlər. Bu nəzəriyyə elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirlərin vahid nəzəriyyəsinin ən sadə variantıdır. Onun ən mühüm nəticəsi ondan ibarətdir ki, elektromaqnit qarşılıqlı təsirin daşıyıcısı olan foton kütləsizdir, zəif qarşılıqlı təsirin daşıyıcıları olan $W^{\pm}$ və Z^0 bozonlar isə kütləlidir. Bu nəzəriyyə elektromaqnit qarşılıqlı təsirin kvant nəzəriyyəsi olan kvant elektrodinamikanın bütün müvəffəqiyyətlərini özündə saxlayır. Bundan başqa, o, zəif qarşılıqlı təsirlərin bir çox xassələrini izah etməyə imkan verir. Bu nəzəriyyənin ən mühüm nəticələrindən biri də onun *neytral cərəyanların* mövcudluğunu proqnozlaşdırmasıdır. Bu cərəyanlar ilk dəfə 1973-cü ildə CERN-də kəşf edilmişdir.

Skalyar sahənin U potensial enerjisi sahə funksiyası ilə aşağıdakı düsturun köməyi ilə ifadə olunur:

$$U(\varphi)=\frac{m\varphi^2}{2}. \qquad (1)$$

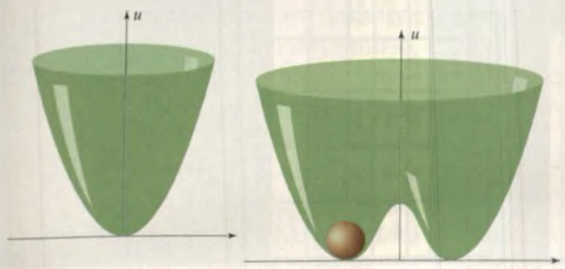
Sahənin tam enerjisi sıfıra bərabər olan halı *vakuum halı* və ya *fiziki vakuum* adlanır. Sahənin vakuum halı bütün fəzada $\varphi = 0$ qiymətinə uyğundur. İndi ona diqqət yetirək ki, (1) ifadəsində φ-nin yerinə $-\varphi$ yazsaq, $U(\varphi)$ dəyişməz. Deməli, sahənin ilkin tənlikləri müəyyən simmetriyaya malikdir. Bu cür simmetriya $\varphi = 0$ vakuum halını da xarakterizə edir. Bu "normal" vəziyyətdir.

"Qeyri-normal" vəziyyətdə

$$U(\varphi)=-\frac{m\varphi^2}{2}+\frac{\lambda\varphi^4}{4}=\frac{\lambda\left(\varphi^2-m/\lambda\right)^2}{4}-\frac{m^2}{4\lambda}=\frac{\lambda\left(\varphi^2-v_0^2\right)^2}{4}+C, \qquad (2)$$

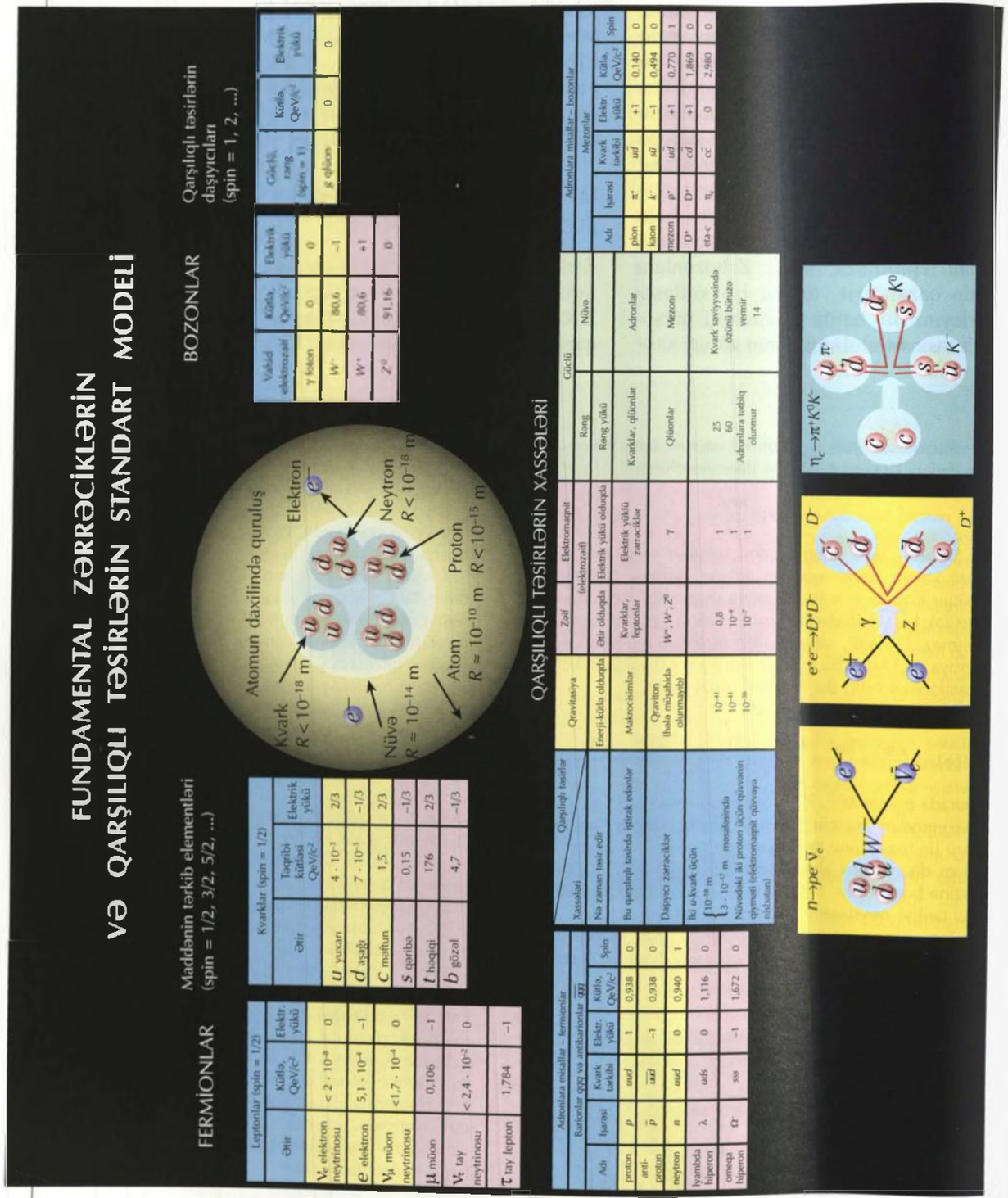
burada $v_0=(m/\lambda)^{1/2}$, λ və C isə müəyyən sabitlərdir. Fizika baxımından bu cür potensial enerji skalyar sahənin özözü ilə (öz-özünə təsir) qarşılıqlı təsiri nəticəsində yaranır, həm də nəzərə almaq lazımdır ki, λ öz-özünə təsir sabitinə bərabərdir. Öz-özünə təsir edən sahəni təsvir edən (2) tənliyi qeyri-xəttidir. Bu nə deməkdir?

Tərpənməz və ya hərəkət edən yük elektrik və ya maqnit sahəsi yaradır. Həm bu sahə, həm də o biri sahə öz-özüylə qarşılıqlı təsirdə olmur, ona görə də xətti tənliklərlə təsvir olunur və xətti superpozisiya prinsipini ödəyir, yəni yüklərin (və ya cərəyanların) yekun sahəsi ayrı-ayrı yüklərin (və ya cərəyanların) yaratdıqları sahələrin cəminə bərabərdir. Qeyri-xətti nəzəriyyələrdə bu cür superpozisiya prinsipi ödənmir.



Məsələn, qravitasiya sahəsi qeyri-xəttidir. Yalnız Nyutonun təqribi cazibə nəzəriyyəsi çərçivəsində bir neçə cismin qravitasiya sahəsi hər bir cismin ayrılıqda yaratdığı qravitasiya sahələrinin cəminə bərabərdir. Burada sahəni yaradan qravitasiya yükü rolunda kütlə çıxış edir. Eynşteynin daha dəqiq ümumi nisbilik nəzəriyyəsində qravitasiya sahəsinin mənbəyi rolunu kütlə yox, enerji oynayır, özü də istənilən növ enerji. Ona görə də, bir neçə kütlənin qravitasiya sahəsinin parametrlərini düzgün hesablamaq üçün, onların cazibə enerjisini də nəzərə almaq lazımdır. Bu enerji isə çox cəhətdən kütlələrin qarşılıqlı vəziyyəti ilə müəyyən olunur və onların hərəkət xarakterindən asılı olaraq dəyişir. Ona görə sahə də bütün kütlələrin koordinat və sürətlərinin mürəkkəb, qeyri-xətti funksiyasıdır və qətiyyən onların sahələri cəminə bərabər deyil.

İndi skalyar sahəyə qayıdaq. "Qeyri-normal" vəziyyət üçün $U(\varphi)$ funksiyasının qrafiki C toplananı nəzərə alınmadan çəkilmişdir, çünki potensial enerji, hesablama səviyyəsini müəyyən edən ixtiyari sabit dəqiqliyilə təyin olunmuşdur. Burada da $U(\varphi)=U(-\varphi)$, lakin potensial enerjinin sıfıra çevrildiyi iki nöqtə: $\varphi=v_0$ və $\varphi=-v_0$ nöqtələri meydana çıxmışdır, yəni iki vakuum halı yaranmışdır. Sahə eyni zamanda hər iki halda ola bilmədiyindən, sistem spontan olaraq bu vakuumlardan birini seçir (şəkildə həmin vakuum sol çuxurda yerləşən kürəciklə göstərilmişdir). Nəticədə sahənin işarəsinin dəyişməsinə nəzərən ilkin simmetriya pozulmuş olur, yəni vakuum halları daha bərabərhüquqlu deyildir.



trozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsi elektronvoltun hissələrindən tutmuş yüzlərlə qiqaelektronvolta qədər enerjilərdə baş verən bütün prosesləri müvəffəqiyyətlə təsvir edir. Elektrozəif qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsi və kvant xromodinamikası birlikdə *Standart model* adını almışdır. Hazırda bütün məlum qarşılıqlı təsirlərin hamısının birləşdirilməsi imkanları və üsullarına dair bir çox yeni ideyalar yaranmışdır (bu ideyalar *Bütün Mövcudiyyətin Nəzəriyyəsi* adlanır). Perspektivli bir istiqamət – simlər nəzəriyyəsi inkişaf edir. Lakin bütün bu gözəl riyazi qurmalar hələ ki, təcrübələrdə öz təsdiqini tapmır. Standart modelin əsas müddəaları isə, əksinə, əksər eksperimentlərin nəticələrilə uzlaşır.

KALİBRLƏMƏ SAHƏLƏRİ

"Gözəllik – həqiqətdir, həqiqət – gözəllikdir. Nəyi bilmək olar və siz nəyi bilməlisiniz – bax hamısı budur". XIX əsrin əvvəllərinin ingilis şairi Con Kitsin bədii fikri bizim dövrdə müasir fundamental fizikanın nailiyyətləri ilə bağlı olaraq tamamilə yeni məna kəsb etmişdir.

XX əsrin nəhəng nəzəriyyəçi-fiziki Pol Dirak deyirdi: "Əgər fizika tənlikləri riyazi nöqteyi-nəzərdən gözəl deyilsə, onda bu o deməkdir ki, onlar mükəmməl deyil və nəzəriyyə nöqsanlıdır, yaxşılaşdırılmağa ehtiyacı var. Elə hallar olur ki, eksperimentlə uzlaşmazdan əvvəl (heç olmazsa, müvəqqəti) riyazi gözəlliyə üstünlük verilməlidir".

Fizika tənliklərinin gözəlliyi nə deməkdir? Riyaziyyatçı və fizik German Veyl iddia edirdi ki, "gözəllik simmetriya ilə sıx bağlıdır".

Fizika qanunlarının (daha dəqiq, riyazi tənliklərin) simmetriyası belə təyin olunur: əgər hər hansı əməliyyatlar zamanı tənliyin şəkli dəyişmirsə, onda deyirlər ki, tənliklər həmin əməliyyatlara nəzərən simmetrikdir. Belə olduqda əməliyyatların özü fizika qanunlarının *simmetriya çevrilmələri* (və ya invariantlıq çevrilmələri), fizika qanunları isə – *simmetriya qrupuna nəzərən invariant* qanunlar adlanır.

Veylin 1918-1919-cu illərdə *miqyas* (və ya *kalibrləmə*) *invariantlığı* əsasında qurduğu qravitasiyanın və elektromaqnetizmin vahid nəzəriyyəsi müşahidələrə uyğun gəlmədi ("Qravitasiya nəzəriyyəsinin inkişafı və yeni problemlər" məqaləsinə bax). 1929-cu ildə Veyl kalibrləmə invariantlığı ideyasına başqa mövqedən yanaşdı. Həmin dövrdə artıq kvant mexanikası yaranmış və onun ehtimal şərhi təklif olunmuşdu. Bu dəfə Veyl belə nəticəyə gəldi ki, elektromaqnit sahəsini, onun əvvəllər hesab etdiyi kimi, qravitasiya sahəsilə yox, elektron sahəsilə əlaqələndirmək lazımdır.

Məlumdur ki, kvant mexanikasında mikrozərrəciyin hərəkətini təsvir etmək üçün istifadə olunan $\psi(x)$ dalğa funksiyası, özünün modulunun $|\psi|^2 = \psi^*\psi$ kvadratından fərqli olaraq (burada ψ^* funksiyası ψ-nin kompleks qoşmasıdır), öz-özlüyündə fiziki mənaya malik deyil; həcm elementinə vurulmuş $|\psi|^2$ zərrəciyin verilmiş həcm elementində tapılma ehtimalını təyin edir. Veyl müəyyən etdi ki, $\psi(x)$ aşağıdakı çevrilməyə məruz qalanda

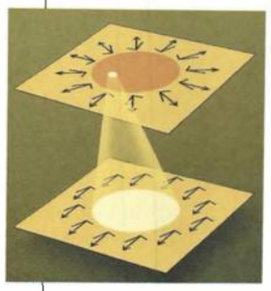
$$\psi(x) \to e^{ie\lambda(x)}\psi(x)$$
$$\psi^*(x) \to e^{-ie\lambda(x)}\psi^*(x), \qquad (1)$$

onun modulunun kvadratı dəyişmir, burada e – sabit kəmiyyətdir və son-



German Veyl.

Standart modelin baş "qəhrəmanlarından" biri – Higgs bozonu H^0 bu günə qədər eksperimental olaraq aşkar olunmamışdır. Onun kütləsinin nəzəri qiymətləndirilmiş qiyməti 0-dan 1000 QeV-ə qədərdir. Axırıncı eksperimental məlumatlara görə (LEP2, SERN) Higgs bozonun kütləsinin aşağı qiyməti $m_{H^0} > 110$ QeV.



Lokal və qlobal kalibrləmə simmetriyaları arasındakı sxematik fərq.

ralar elektrik yükü ilə eyniləşdiriləcəkdir.

Çevrilmə parametri $\lambda(x)$ – sabit ədəd olanda, söhbət *qlobal simmetriya* haqqında gedir. Əgər ki, $\lambda(x)$ fəza-zaman nöqtələrinin funksiyasıdırsa, onda *lokal simmetriyadan* danışılır.

Elektronun dalğa funksiyası $\psi(x)$ (x – Minkovski fəzasının nöqtəsidir) Dirak tənliyinin həllidir:

$$\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\psi = 0. \qquad (2)$$

Burada $\partial_{\mu}\psi \equiv \frac{\partial^{\mu}\psi}{\partial x^{\mu}}$, γ^{μ} – Dirak matrisaları, m – elektronun kütləsi, $\mu = 0, 1, 2, 3$. Veyl ona diqqət yetirdi ki, verilmiş tənliyə Minkovski fəzası nöqtələrinin x_{μ} koordinatlarına nəzərən törəmə daxil olduğundan, həmin tənlik (1) çevrilmələri zamanı öz şəklini dəyişir, yəni $\lambda(x) \neq$ const olduqda (1) çevrilmələrinə nəzərən invariant deyil. Veyl göstərdi ki, Dirak tənliyinin invariantlığını bərpa etmək üçün ∂_{μ} xüsusi törəmələrini uzadılmış törəmələr adlanan D_{μ} törəmələri ilə əvəz etmək lazımdır:

$$D_{\mu}\psi = (\partial\mu - eA_{\mu})\psi. \qquad (3)$$

Burada e – elektronun yükü, A_{μ} – əlavə sahədir. Bu sahə, (1) çevrilməsi zamanı aşağıdakı şəklə malik çevrilməyə məruz qalmalıdır:

$$A_{\mu} \rightarrow A_{\mu} + \partial_{\mu}\lambda(x). \qquad (4)$$

Veylin əvvəlki nəzəriyyəsində interval – həqiqi kəmiyyət müxtəlif nöqtələrdə çevrilməyə məruz qalırdı, 1929-cu ildəki nəzəriyyədə isə elektron sahəsinin kompleks dalğa funksiyası $\psi(x)$ çevrilirdi. Bunlar təcrübədə yoxlanıla bilən, tamamilə müxtəlif nəticələrə gətirir. Veylin köhnə nəzəriyyəsində qapalı kontur üzrə dolandıqda köçürülən vektorun modulu dəyişməli idi ki, bu da eksperimentdə müşahidə olunmadı. Veylin yeni nəzəriyyəsində qapalı yol üzrə dolandıqda xəyali kəmiyyət – dalğavari elektron sahəsinin rəqslərinin fazası dəyişir. İndi aydınlaşmışdır ki, qabaqcadan xəbər verilən effekt eksperimental müşahidə olunandır. Buna diqqəti yalnız 1959-cu ildə Yakir Aaronov və Devid Bom yönəltdilər.

Qlobal simmetriyanın mövcudluğu heç kimi təəccübləndirmir. Xatırlayaq ki, cismi yuxarı qaldırarkən, yolun başlanğıcı və sonu arasındakı məsafə vacibdir, lakin göstərilən nöqtələrin koordinatlarının hansı səviyyədən ölçülməsinin heç bir əhəmiyyəti yoxdur. Bu səbəbdən "dəniz səviyyəsindən hündürlük" anlayışı tam şərtidir. Lokal simmetriya isə Veylin kəşfinin mahiyyətidir. $\lambda(x)$ parametrinin fəza-zaman nöqtələrindən ixtiyari cür asılı olmaq imkanı relyativistik fizikada aydın olur. Relyativistik fizikada istənilən informasiyanın ötürülmə sürəti işıq sürəti c-dən böyük ola bilməz. Bax ona görə də, (1) çevrilmələri fəzayabənzər intervalla ayrılmış nöqtələr üçün ödənən halla $\lambda(x)$ funksiyasının şəklini uzlaşdırmaq prinsipcə mümkün deyil.

Özünün əvvəlki nəzəriyyəsinə analoji olaraq, (1) və (4) çevrilmələrini Veyl *kalibrləmə çevrilmələri* adlandırmağı təklif etmişdir. A_{μ} sahələrini *kalibrləmə sahələri*, (3) şəklində olan "uzadılmış" törəməni isə *kalibrləmə törəməsi* adlandırmağa başladılar.

ELEKTRODİNAMİKA KALİBRLƏMƏ NƏZƏRİYYƏSİ KİMİ

Kalibrləmə sahələrinin meydana çıxmasına necə yanaşmaq lazımdır? Riyazi əyləncə kimi? Yoxsa, bunun arxasında hər hansı "fizika" durur? Bu sualın cavabını, (2) Dirak tənliyində adi törəməni (3) kalibrləmə törəməsi ilə əvəz etdikdən sonra, həmin tənliyin təhlilindən almaq olar:

$$\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - eA_{\mu})\,\psi - m\psi = 0. \qquad (5)$$

Burada daxil edilmiş kalibrləmə sahəsi A_{μ}-nün xassələri elektromaqnit sahəsinin vektor-potensialının xassələri ilə tamamilə üst-üstə düşür, (4) çevrilməsi isə elektrodinamikadakı qradiyent çevrilməsindən başqa bir şey deyildir! (5) tənliyindəki əlavə $eA_{\mu}\psi$ həddi isə elektron sahəsi ψ ilə elektromaqnit sahəsi A_{μ}-nün qarşılıqlı təsirini təsvir edir, həm də qarşılıqlı təsir sabiti elektronun e yükünə bərabərdir.

Məlum oldu ki, Kulon, Amper, Faradey və başqa alimlər tərəfindən eksperimental alınmış faktların və qanunların təhlili əsasında Maksvellin aldığı tənlikləri (Maksvell tənliklərini) sırf nəzəri yolla, "peronun ucunda" çıxarmaq olar.

YANQ-MİLLS SAHƏLƏRİ

Veyl nəzəriyyəsindən məntiqi olaraq kalibrləmə sahəsinin əsas xassələri alınırdı:

1) o, müəyyən bir saxlanma qanunu ilə bağlıdır;

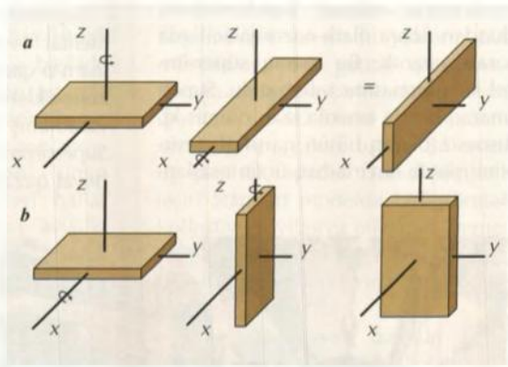
2) onun kvantlarının sükunət kütləsi sıfıra bərabərdir.

Birinci xassə elektrodinamika üçün aydındır, çünki (4) çevrilmələrindən elektrik yükünün saxlanması qanunu çıxır. İkinci xassə də aydındır: əgər fiziki sahənin kvantının m kütləsi sıfırdan fərqlidirsə, onda tənliklərdə mA_{μ} şəklində həddi meydana çıxır. Lakin belə həddi (4) çevrilməsinə nəzərən invariant deyil və ona görə də kalibrləmə invariantlığı şərti ilə qadağan olunur.

Yalnız dörddəbir əsr keçəndən sonra amerikan fizikləri Yanq və Mills (1954-cü il) və onlardan asılı olmadan yaponiyalı Utiyama (1956-cı il) Veylin kalibrləmə ideyasının inkişafında yeni bir addım atdılar. Veyl çevrilməsi (1) *kommutativ çevrilmədir* (*Abel*). Müxtəlif $\lambda(x)$ funksiyalarına uyğun olan və ardıcıl tətbiq olunmuş iki Abel çevrilməsinin nəticəsi onların yerinə yetirilmə ardıcıllığından asılı deyil ("Qrup nədir" əlavə oçerkinə bax).

Yanq, Mills və Utiyama Veylin ideyasını *qeyri-kommutativ* (*qeyri-abel*) *çevrilmələr* halına ümumiləşdirdilər. Aydın oldu ki, kalibrləmə sahələrinin qeyri-kommutativ çevrilmələrə uyğun olan müxtəlif komponentləri bir-birini doğura bilər. Yəni qeyri-abel kalibrləmə sahəsi qeyri-xətti sahədir, məsələn, Eynşteynin qravitasiya sahəsi kimi. Ona görə də təəccüblü deyil ki, Utiyamanın inkişaf etdirdiyi nəzəriyyə Eynşteynin ümumi nisbilik nəzəriyyəsini kalibrləmə sahələr nəzəriyyəsi dilində formulə etməyə imkan verdi.

Əvvəlcə *Yanq-Mills sahələri* adlandırılan qeyri-abel kalibrləmə sahələri



Tirciyin qeyri-kommutativ çevrilmələrinə (dönmələrinə) misal. Şəkil *a* və *b*-də müxtəlif ardıcıllıqla yerinə yetirilmiş eyni bir dönmələr müxtəlif nəticələrə gətirir.

"...Elektromaqnetizm haqqında heç nə bilməyən, lakin təbiətin simmetriyaya əsaslandığına əmin olan fizik-nəzəriyyəçi yalnız ən sadə lokal kalibrləmə simmetriyasına və xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinin Lorens-Puankare simmetriyası adlanan simmetriyasına əsaslanaraq, elektromaqnit hadisələrinin mövcudluğu haqqında nəticə çıxara bilərdi... Riyaziyyatdan istifadə edərək və yalnız bu iki simmetriyaya əsaslanaraq, nəzəriyyəçi elektrik və maqnetizm üzrə heç bir eksperiment aparmadan və hətta onların mövcudluğu haqqında heç nə bilmədən, Maksvell tənliklərin qura bilər. O daha uzağa gedə və elektromaqnetizmin bütün qanunlarını çıxara bilər və s."

(P.Devisin "Superqüvvə" kitabından.)

SUPERSİMMETRİYA VƏ SUPERSİMLƏR

Ən sirli simmetriyalardan biri kvant mexanikasında eyni zərrəciklər arasındakı *yerdəyişmə simmetriyasıdır* və ya zərrəciklərin *eyniyyət prinsipi* adlanan simmetriyadır. Bu simmetriya zərrəciklərin fermionlara və bozonlara bölünməsinə səbəb olur. Fermionlar yarımtam spinə, bozonlar isə tam spinə malikdir. Sahə nəzəriyyəsində fermionların köməyilə maddə təsvir olunur, bozonlar isə fermionlar arasında qarşılıqlı təsirlərin daşıyıcılarıdır, yəni fiziki sahələrin kvantlarıdır. Asimmetriya açıq-aşkar göz qabağındadır.

Bununla yanaşı, kvant fizikası maddəni və sahəni tam simmetrik təsvir edir. Buradan çıxır ki, təbiətdə fermionların və bozonların fiziki bərabərhüquqluluğunu təmin edən bir simmetriya mövcud olmalıdır. Qəribədir ki, belə *supersimmetriya* yalnız 1970-ci illərdə rusiyalı fizik-nəzəriyyəçilərin – Y.A.Qolfandın və Y.P.Lixtmanın (1971-ci il), D.V.Volkovun və V.P.Akulovun (1972-ci il) işlərində kəşf olunmuşdur. Amerikan fizikləri Culius Vess və Bruno Zumino kvant sahə nəzəriyyəsinin supersimmetrik modellərinin maraqlı bir xassəsini aşkar etdilər. Bu, renormallaşmadır (yenidən normallaşma). Lakin 1976-cı ildə, qravitasiya nəzəriyyəsinin, superqravitasiya adlanan supersimmetrik ümumiləşməsi qurulduqdan sonra fizik-nəzəriyyəçilərdə supersimmetriyaya maraq yarandı. Bu maraq supersimmetriyaya aid işlərin sel kimi artmasına səbəb oldu. Supersimmetriyaya gerçək maraq bir də onunla izah olunur ki, bu yanaşma üsulu istisnasız olaraq bütün qarşılıqlı təsirlərin vahid nəzəriyyəsini işləyib hazırlamaq üçün əsaslandırılmış ümid doğurur.

Supersimmetriyanın fiziki aspektləri, elementar zərrəcikləri supermultipletlər üzrə təsnifatlaşdırmaq imkanından ibarətdir. Bu supermultipletlərə supersimmetriya çevrilmələri zamanı bir-birinə keçən həm fermionlar, həm də bozonlar daxildir. Məsələn, qraviton (spini 2) və hipotetik zərrəcik olan qravitino (spini 3/2) eyni bir supermultipletə daxildir. Hesab olunur ki, supersimmetriya dəqiq olduqda hər bir multiplet daxilində zərrəciklər bərabər hüquqlu və eyni kütləli olardı. Lakin reallıqda supersimmetriya pozulmuşdur və bunun nəticəsində eyni bir multipletdə zərrəciklərin kütlələri müxtəlifdir. Qravitinonun kütləsi elə böyük ola bilər ki, müasir eksperimentin imkanları onu aşkar etməyə imkan verməsin.

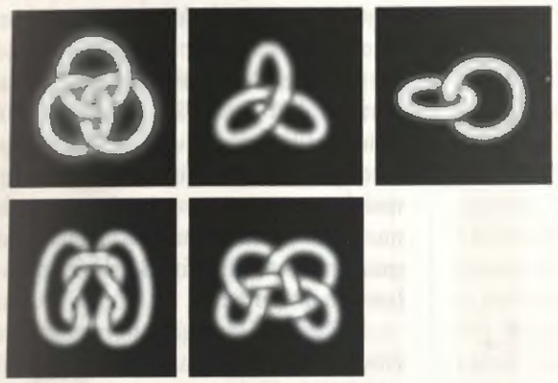
Aydınlaşdırılmışdır ki, renormallaşma zamanı yaranan sonsuzluqlar (və ya, necə deyirlər, dağılmalar) fermionlar və bozonlar üçün əks işarəyə malikdir. Beləliklə, supersimmetriya sonsuzluqların qarşılıqlı kompensasiyasına gətirib çıxarır, yəni kvant sahə nəzəriyyəsi ən xoşagəlməz, yəni kvadratik dağılmalardan azad olur. Supersimmetriyanın ən cazibədar xüsusiyyətlərindən biri bundan ibarətdir.

Supersimmetriya nəzəriyyəsi hələ ki, birbaşa eksperimental təsdiqini tapmamışdır. Lakin supersimmetriyaya inam o qədər böyükdür ki, onun qabaqcadan xəbər verdiyi zərrəciklərin (fotino, qravitino və s.) bu yaxınlarda SERN-də yaradılmış sürətləndiricidə fəal axtarışına başlanmışdır. Supersimmetriya ideyası sayəsində simlər nəzəriyyəsi yeni həyat qazandı.

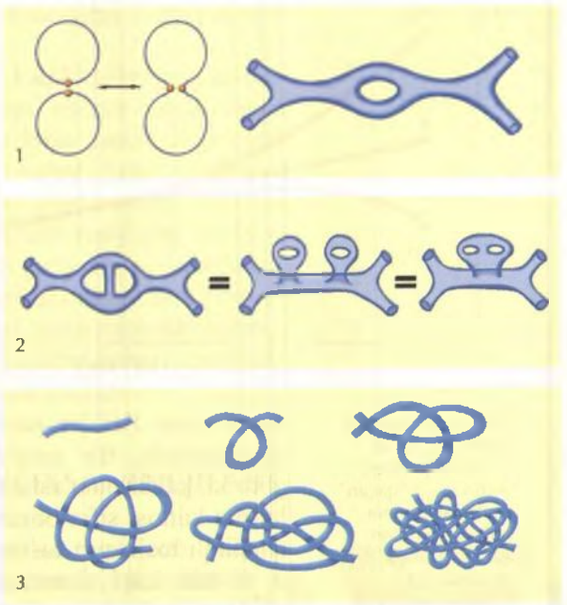


Çevrəsinin uzunluğu 27 km olan elektron-pozitron kollayderinin (LEP) içində SERN.

Simlər nəzəriyyəsində zərrəciklərə və onlar arasındakı qarşılıqlı təsirlərə nöqtəvi və lokal yox, ölçüsü olan kimi (bir ölçülü olsa da) baxılır. XX əsrə qədər zərrəciklərin axtarışları ancaq bir istiqamətdə aparılmışdır ki, onlardan hansını açıq-aşkar nöqtəvi hesab etmək olar (Standart modeldə leptonlar və kvarklar belə zərrəciklərdir). Ancaq artıq yüz ildir ki, alternativ variantlara da baxılır. Məsələn, Cozef Tomson hərəkət edən elektronlar arasındakı qarşılıqlı təsiri onunla izah etdi ki, onların elektrik və maqnit sahələri qaytan şəklində uzanır və bu qaytandan kənarda sahə mövcud deyil. Düzdür, nə Tomsona, nə də onun tələbələrinə Maksvell tənliklərinin uyğun həllərini tapmaq müyəssər olmadı. Lakin mikroaləm obyektlərinin nöqtəvi təsvirindən imtina cəhdləri təkrarlanmışdır. Lord Kelvinin "burulğanlı" atomun erkən modeli onlara aiddir. Həmin model bu gün simlər nəzəriyyəsi üzrə ixtisasçıların böyük marağına səbəb olmuşdur.



▲
Kelvinin burulğanlı atomları.



▶
1 – iki qapalı simin birləşməsinə səbəb olan qarşılıqlı təsir;
2 – simlər üçün Feynman diaqramları;
3 – müxtəlif sayda ilişmələri olan simin konfiqurasiyası ən əcaib formalar ala bilər.

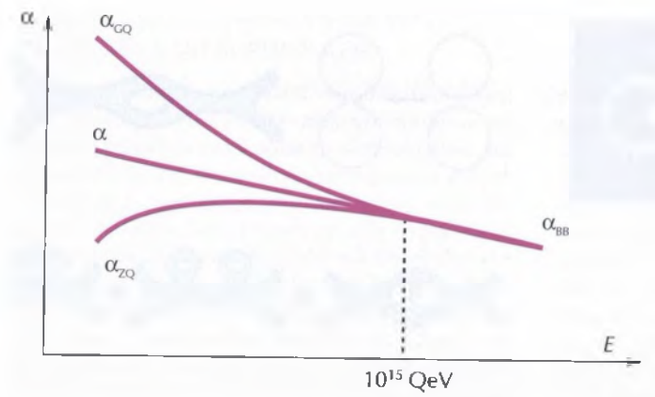
1960-cı illərin axırında güclü qarşılıqlı təsirdə iştirak edən zərrəciklərin sim modelləri inkişaf etməyə başladı. Bu modellərdə mezon bir ucunda kvark, o biri ucunda isə antikvark olan simdən ibarətdir. Simlər nəzəriyyəsinin aşağıdakı ideyası olduqca əyanidir: skripka siminin rəqsləri harmonikalar toplusu olduğu kimi, zərrəciyin – simin həyəcanlanmaları da müşahidə olunan nöqtəvi hallar toplusudur. Hər bir yüksək harmonika, kütləsi əvvəlki zərrəciklərin kütləsindən böyük olan yeni bir zərrəcik kimi çıxış edir. Məlum zərrəciklərin hamısı simlərin alçaq harmonikalarıdır. Hesab olunur ki, yüksək harmonikalar yalnız Kainatın ilkin anlarında, enerji artıqlığı olduğu vaxtlar doğulurdu. Adi şəraitdə simlərin yalnız ən aşağı enerjili halları mühümdür. Bu hallar nöqtəvi olub, standart nəzəriyyənin metodları ilə təsvir oluna bilir.

Elementar zərrəciklərə ənənəvi baxışdan bu cür radikal fərqlənən baxışa maraq, bütün dörd qarşılıqlı təsirin vahid təsvirini vermək, onların iyerarxiyasını izah etmək cəhdi zamanı yaranan çətinliklərlə şərtlənmişdir. Kainatın quruluşu müxtəlif məsafələrdə təsir edən müxtəlif qüvvələrlə müəyyən olunur. Kvarklar güclü qarşılıqlı təsir hesabına 10^{-15} m məsafələrdə protonlar və neytronlar şəklində birləşir. Atom nüvəsində proton və neytronlar nüvə (qalıq) qüvvələri ilə tutulub saxlanılır. Bu qüvvələr öz növbəsində atom miqyaslarında (10^{-10} m) yox olur. Burada elektromaqnit qüvvələri oyuna qoşularaq elektronları və nüvələri neytral atomlarda birləşdirir.

Elektromaqnit qarşılıqlı təsir uzağa təsir etməsinə və qravitasiya ilə müqayisədə çox böyük olmasına baxmayaraq, müsbət və mənfi yüklərin hələlik izah olunmayan mövcudluğu ona gətirib çıxarır ki, böyük maddə topalarında onlar bir-birini dəqiq kompensasiya edir. Lakin qravitasiya yükü (kütlə) heç bir şəraitdə bir-birini kompensasiya etmir, yalnız artırır. Bu mənada qravitasiya qalan üç qarşılıqlı təsirdən radikal fərqlənir. Həmin üç qarşılıqlı təsiri Standart modeldə birləşdirmək mümkün olmuşdur. Kollektiv qravitasiya effektləri elementar (kvant) səviyyədə yalnız kifayət qədər həyəcanlanmış materiyada, zərrəcikləri Plank enerjilərinə qədər sürətləndirdikdə fərqlənə bilər.

Simlər nəzəriyyəsi özünün ilk variantında ziddiyyətli olmuşdur, çünki müşahidəolunmaz taxionların olduğunu mütləq qabaqcadan xəbər verirdi ("Taxionlar və digər ekzotik zərrəciklər" adlı əlavə oçerkə bax). 1984-cü ilin yayında Kaliforniya texnologiya institutundan Con Şvarsa və Londonda Kraliça Mariya Kollecindən Maykl Qrinə *simlərin supersimmetrik nəzəriyyəsini* (və ya qəbul edildiyi kimi, *supersim nəzəriyyəsini*) qurmaq müyəssər olduqdan sonra, nəzəriyyənin əksər çətinlikləri dərhal yox oldu. Maykl Qrin yazır: "Kvant qravitasiyasının problemlərini həll etməyə çalışarkən, biz digər qarşılıqlı təsirlərin xarakterinə dair, demək olar ki, birqiymətli qabaqcadan xəbər vermələrə gəlib çıxdıq".

Gənc moskvalı fizik Vadim Knijnik (1962-1987) özünün qısa həyatında supersim nəzəriyyəsinə əhəmiyyətli dərəcədə pay verməyə nail olmuş və aşağıdakıları qeyd etmişdir: "Qarşılıqlı təsirlərin birləşdirilməsi ideyaların birləşdirilməsi yolu ilə əldə edilir".



Elektrozəif qarşılıqlı təsirin (α_{ZQ} və α) və güclü qarşılıqlı təsirin (α_{GQ}) "qaçan" rabitə sabitlərinin verilən enerjidən asılılığı. Hələlik əlçatmaz olan böyük enerjilərə ekstrapolyasiya edərkən, hər üç sabit 10^{15} QeV enerjilərdə eyni bir nöqtədə birləşir.

nəzəriyyəsi fiziklər tərəfindən ciddi qarşılanmadı. Bir tərəfdən də, ona görə ki, kalibrləmə sahələrinin kvantlarının kütləsi sıfra bərabərdir. Güclü qarşılıqlı təsir qısa təsirə malikdir və o dövrdə kəşf olunmuş bütün mezonların (nüvə qarşılıqlı təsirlərinin daşıyıcılarının) kütləsi sıfırdan fərqlidir, yəni Yanq-Mills sahələrinin güclü qarşılıqlı təsirlərin nəzəriyyəsinə heç bir aidiyyəti yox idi.

1961-ci ildə kalibrləmə sahələrinin kvantlarının kütlə qazanma mexanizminin (Hiqqs mexanizminin) kəşfindən və bu mexanizmin köməyilə Vaynberq, Salam və Qleşou tərəfindən elektrozəif qarşılıqlı təsirlərin vahid nəzəriyyəsinin qurulmasından sonra vəziyyət dəyişdi. Elektrozəif qarşılıqlı təsirlərin vahid nəzəriyyəsi 1967-1968-ci illərdə tam formulə edildi. Bu nəzəriyyədə zəif və elektromaqnit qarşılıqlı təsirlərinə vahid bir kalibrləmə sahəsinin müxtəlif komponentləri kimi baxılır. Hiqqs mexanizmi hesabına elektrozəif qarşılıqlı təsirin zəif komponentinin kvantları – daşıyıcıları kütlə qazanır. Bunlar aralıq bozonlar adlanan və 1983-cü ildə eksperimentdə müşahidə olunan *W* və *Z* bozonlardır.

1973-cü ildə konfaynment hipotezi irəli sürüldükdən sonra, kvarkları bir-birilə bağlayan qlüon sahəsini qeyri-kommutativ Yanq-Mills kalibrləmə sahəsinin bir növü kimi təsvir etməyə başladılar. Bu cür qurulan nəzəriyyə *kvant xromodinamikası* adını aldı. Kalibrləmə invariantlığı prinsiplərinə əsaslanan elektrozəif qarşılıqlı təsir nəzəriyyəsi və kvant xromodinamikası zərrəciklər fizikası haqqında müasir təsəvvürlərin Standart modelini əmələ gətirir.

1974-cü ildə qarşılıqlı təsirlərin Böyük birləşmə nəzəriyyəsi formulə edildi. Böyük birləşmə nəzəriyyəsində fundamental qarşılıqlı təsirlərin üç növünə (qravitasiya qarşılıqlı təsir istisna olmaqla) vahid qeyri-kommutativ kalibrləmə sahəsinin müxtəlif komponentləri kimi baxılır. Belə sahə özünün bütün komponentləri üçün eyni bir qarşılıqlı təsir sabitinə (rabitə sabitinə) malik olmalıdır. Buna baxmayaraq, zəif, elektromaqnit və güclü qarşılıqlı təsirlərin rabitə sabitləri birbirindən bir neçə tərtib fərqlənir. Bəs onda bu qarşılıqlı təsirləri necə birləşdirmək olar? Burada ziddiyyət yoxdur ki? Enerji 10^{15}QeV-ə çatanda bu üç qarşılıqlı təsirin rabitə sabitlərinin üst-üstə düşməsi belə bir fərziyyə irəli sürməyə əsas verdi ki, bu cür nəhəng enerjilərdə ümumi kalibrləmə simmetriya qrupuna malik olan vahid qarşılıqlı təsir mövcud olmalıdır. Enerjinin azalması ilə vahid qarşılıqlı təsirdən əvvəlcə güclü qarşılıqlı təsirlər ayrılır, lakin elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirlər isə hələ elektrozəif qarşılıqlı təsirdə birləşmiş olur. Enerjinin sonrakı azalması ilə elektrozəif qarşılıqlı təsir öz növbəsində zəif və elektromaqnit komponentlərinə parçalanır.

Bütün gözəlliyi ilə bərabər Böyük birləşmə nəzəriyyəsi bir sıra nöqsanlara malikdir: həddən çox zərrəciyin mövcud olduğunu qabaqcadan xəbər verir; yüzlərlə parametri vardır; kvarkların leptonlara keçməsi imkanlarını nəzərdə tutur, buradan isə belə çıxır ki, proton parçalanır və deməli, barion ədədi saxlanmır. Bununla belə protonun parçalanması ehtimalı olduqca kiçikdir, ancaq sıfır deyil ("Biz protonun parçalanmasını biz görə biləcəyikmi?" əlavə oçerkinə bax).

Qarşılıqlı təsirlərin daha nəhəng İfratbirləşmə (və ya Superbirləşmə) nəzəriyyəsi də mövcuddur. Bu nəzəriyyə vahid qarşılıqlı təsirə qravitasiya qüvvələrini də qoşur. Lakin bu nəzəriyyəni başa düşmək üçün supersimmetriya ilə tanış olmaq lazımdır.

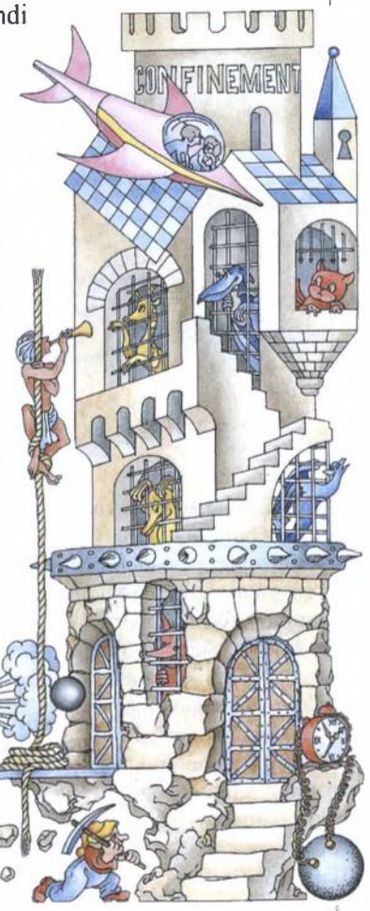
Beləliklə, lokal kalibrləmə invariantlığı prinsipi müasir fundamental qarşılıqlı təsirlərin təməl daşı oldu. Simmetriya ideyası fiziki nəzəriyyə qurmaq üçün güclü alətə çevrildi. Müxtəlif qarşılıqlı təsirlərin təsvirinə aparan ümumi yanaşmanı göstərməklə, o, nəhayət fizikanı düz yola, Eynşteynin arzusunun yerinə yetirilməsinə – vahid sahə nəzəriyyəsinin qurulmasına aparan yola çıxardı.

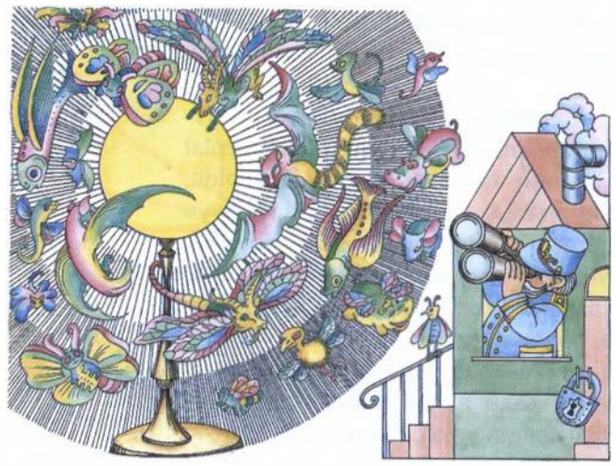
QARŞIDA NƏ VAR: DURĞUNLUQ, YOXSA İNQİLAB?

Demək olar ki, bütün XX əsr ərzində elementar zərrəciklər fizikası – nəzəriyyə, eksperiment, sürətləndirmə texnikası, cihazqayırma – son dərəcə sürətlə inkişaf etmişdir. Onun son illərdəki inkişafı ilkin Kainat kosmologiyasının və mücərrəd riyaziyyatın yeni bölmələrinin öyrənilməsilə sıx bağlıdır.

Nəzəriyyəçi-fiziklərin işini yeni eksperimentlər və yeni məlumatlar qidalandırır. Elementar zərrəciklərin xoşbəxt ekstensiv (*lat.* ekstensivus – "genişləndirici") inkişafı dövründə bu məlumatların və həm də onları izah edən nəzəriyyələrin sayı arasıkəsilmədən artmışdır. Nəzəriyyələri yoxlamaq tələb olunurdu ki, bu da alimləri elementar zərrəciklərin daha güclü sürətləndiricilərini və daha dəqiq qeydə alan qurğularını işləyib hazırlamağa vadar edirdi. Nəzəri fizikanın ən böyük nailiyyəti mikroaləmin uzlaşdırılmış mənzərəsinin, yəni Standart model adlanan modelin qurulması oldu. Bu model kvant xromodinamikasını və elektrozəif nəzəriyyəni birləşdirdi və güclü, elektromaqnit və zəif qarşılıqlı təsirləri ümumi mövqedən təsvir etdi. İndi hökm etmək olar ki, Standart modelə bilavasitə zidd olan heç bir eksperiment yoxdur.

Son illərdə fiziklərin çoxdan qabaqcadan xəbər verdikləri bir şey baş vermişdir: sürətləndirmə texnikasının inkişafı, onun dəyərinin qeyri-adi dərəcədə artması sayəsində kəskin tormozlanmış, yeni eksperimental məlumtların sayı azalmışdır. Nəzəriyyəçilər 1 TeV və daha yüksək enerjilərdə müşahidə olunacaq yeni zərrəciklərin və hadisələrin mövcud olduğunu qabaqcadan xəbər verirlər. Lakin hələlik fiziklər proqnozları





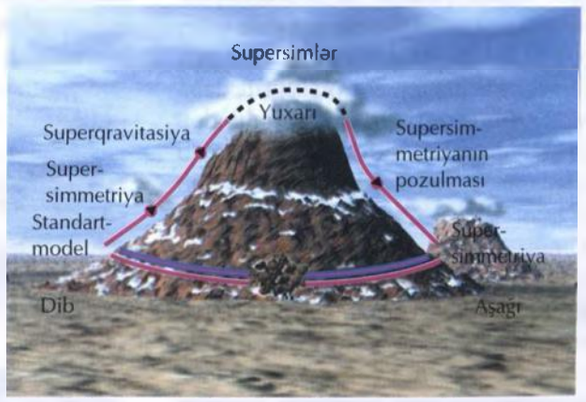
təcrübə ilə müqayisə etmək imkanından məhrumdurlar.

2008-ci ildə SERN-də Böyük Adron Kollayderinin (BAK) – bəlkə də Yerdəki sonuncu böyük sürətləndiricinin sınaq üçün işə salınması həyata keçirildi. BAK protonları 7 TeV enerjiyə qədər sürətləndirməyə və bu cür enerjili protonların qarşılaşan dəstələri toqquşdurmağa qadir olacaqdır.

Öz həllini gözləyən məsələləri qısaca sadalayaq:

1. Yüksək enerjilər oblastında Hiqqs bozonlarının axtarışı birinci yeri tutur. Belə yüksək enerjilər, yəqin ki, BAK-da əldə olunmuşdur. H^0–hiqqsin kəşfi Standart modelin eksperimental təsdiqinə nöqtə qoyacaqdır. İstisna deyil ki, bundan sonra hələ uzun müddət elə bir əhəmiyyətli kəşflər olmayacaqdır (başqa cür desək, müasir nəzəriyyələr doğru çıxacaq və 10^4 QeV-dən başlayaraq fizika asimptotik səhraya daxil olacaq. Bu səhrada (şübhəsiz, bu enerjiyə çatmaq mümkün olmayacaq) 10^{15} QeV enerjiyə qədər maraqlı bir şey baş verməyəcəkdir).

2. Bir sıra nəzəri ideyalar var ki, onları yoxlamaq üçün enerjisi 1 TeV tərtibində olan yeni sürətləndiricilər lazımdır. İlk növbədə bu *supersimmetrik nəzəriyyələrə* aiddir. Bu nəzəriyyələr fermionları bozonlara və əksinə keçirən çevirmələrin kəşf edilməsinə əsaslanmışdır. Əvvəllər hesab edirdilər ki, belə şey olmaz, çünki fermionlar Paulinin qadağan prinsipinə tabedir, bozonlar isə yox. Lakin həm fermionları, həm də bozonları əhatə edən *supersimmetriya* tapıldı. Başqa sözlə, müxtəlif spinli zərrəciklər *superspinin* müəyyən bir qiymətinə malik olmaqla, eyni bir ailəyə daxil olur. Həmişə olduğu kimi, yeni daha geniş simmetriyanın meydana çıxması ilə əvvəllər məlum olmayan zərrəciklərin kəşf olunacağı gözlənilir. Əgər supersimmetriya ideyası doğrudursa, onda hər bir zərrəciyə *superpartnyor*, yəni spini 1/2 qədər fərqlənən zərrəcik uyğun olmalıdır. Məsələn, fotonun superpartnyoru spini 1/2 olan *fotinodur*, qravitonun superpartnyoru qravitinodur (qravitinonun spini 3/2-dür, beləliklə, spinlər pilləkəninin axırıncı pilləsi də dolacaqdır) və s.



SUSY-95 ("Supersimmetriyalar və fundamental qarşılıqlı təsirlərin birləşməsi", may 1995-ci il) konfransında simlər nəzəriyyəsinin pionerlərindən biri olan Qabriyel Venisiano öz çıxışının planını aşağıdakı şəkillə təsvir etmişdi. Konfransın mövzusunu təsvir edən dağın ətəyində, yamaclarından birində Standart model (bizim bildiyimiz) yerləşir. Digər yamacda, yenə aşağıda Supersimmetriya bizi ümidlə gözləyir. Standart modeldən Supersimmetriyaya doğru dağın ətrafında yol göstərilmişdir, lakin bu yol tikinti işlərilə dövrəyə alınmışdır (LEP1,5, LEP2, LEP3, MI-Tevatron nəzərdə tutulur). Cəmiyyətin bir hissəsi itaətkarcasına yolun bərpasını gözləyir, digərləri ortoqonal istiqamətdə cəhdlər edərək, Supersimmetriyanın, Superqravitasiyanın, Supersimlərin "kəşf edildiyini" elan edirlər.

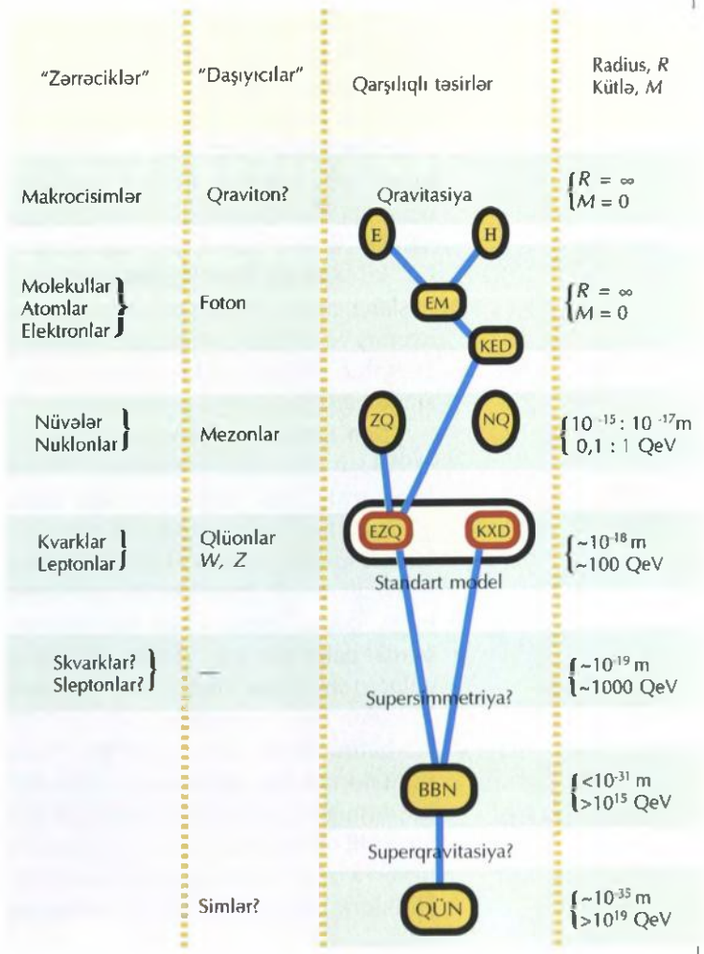
Nəhayət, elə nəzəriyyələr də var ki, həmin nəzəriyyələrə görə kvarklar, leptonlar və digər fundamental zərrəciklərin özləri tərkibə malikdir. Deməli, bu nəzəriyyələrin qabaqcadan xəbər verdiyi daha fundamental zərrəcikləri (onları cürbəcür adlandırırlar: *preonlar*, *rişonlar*, *qaplonlar* və s.) axtarmaq lazımdır.

3. Standart modeli nə cürsə genişləndirmək üçün cəhdlər edilir. Yeni nəzəriyyənin qurulması imkanı enerji dəyişən zaman, qarşılıqlı təsir sabitlərinin davranışı ilə bağlıdır. Kvant xromodinamikasında qarşılıqlı təsir sabiti aşağı enerjilərdə böyükdür və enerjinin artması ilə azalır (asimptotik sərbəstlik hadisəsi). Əksinə, elektrozəif qarşılıqlı təsirin ümumi sabiti bu halda artır. 10^{27} eV (10^{15} QeV) tərtibli enerjilərdə elektrozəif və güclü qarşılıqlı təsirlərin sabitləri eyni olacaqdır, yəni qarşılıqlı təsirlər bir-birindən fərqlənməz olur – *qarşılıqlı təsirlərin Böyük birləşməsi* baş verir.

Yerdəki sürətləndiricilərin köməyilə əldə olunan maksimal enerji elektrozəif və güclü qarşılıqlı təsirlərin birləşdiyi enerjidən 12 tərtib kiçik, bütün qarşılıqlı təsirlərin tam birləşdiyi enerjidən isə 16 tərtib kiçikdir.

Məlum oldu ki, ümumi sxemə qravitasiyanı da daxil etmək olar, lakin bunun üçün ölçüsü dörddən çox olan fəzalara keçmək tələb olunur. Əlavə ölçülər müşahidə olunmur, yəqin, ona görə ki, onlar özlərinə qapanıbdır (bublikdə ölçünün biri kimi). Haqqında söhbət gedən nəzəriyyələrdə əlavə ölçülərin "qapanması" Plank miqyaslarında (10^{-35} m) baş verir və onları yalnız 10^{15} QeV tərtibli enerjilərdə görmək mümkündür.

Yerdə heç vaxt protonları 10^{15} QeV enerjiyə qədər sürətləndirə biləcək sürətləndirici tikilməyəcəkdir. Bu cür sürətləndiricinin radiusu bir neçə işıq ilinə (onlarla trilyon kilometrə) bəra-



Zərrəciklər və qarşılıqlı təsirlər:
E – elektrik, H – maqnit qarşılıqlı təsirlər;
EM – Maksvell elektrodinamikası;
KED – kvant elektrodinamikası;
ZQ – zəif, NQ – nüvə, EZQ – elektrozəif qarşılıqlı təsirlər;
KXD – kvant xromodinamikası;
BBN – Böyük birləşmə nəzəriyyəsi;
QÜN – qarşılıqlı təsirlərin ümumi nəzəriyyəsi və ya Superbirləşmə.

bər olmalıdır! Ona görə də Böyük birləşmə ideyasını yoxlamaq üçün bu birləşmənin ya aşağı enerji fizikasında hər hansı təzahürlərini axtarmaq (məsələn, protonun parçalanmasını öyrənməyə cəhd etmək), ya da "yoxsullar üçün sürətləndiricidən" – bizim Kainatdan istifadə etməliyik. Hesab edirlər ki, Kainat özünün təkamülünün başlanğıcında "qaynar" mərhələni keçmiş və həmin dövrdə zərrəciklərin enerjiləri Böyük birləşmənin enerjisindən çox-çox böyük olmuşdur.

"Son nəzəriyyə haqqında arzular" (1993-cü il) adlı kitabında Stiven Vaynberq, bu nəzəriyyənin necə görünə biləcəyi haqqında bir sıra mülahizələrindən sonra yazır: "Son nəzəriyyənin kəşfi ümidləri boşa çıxara bilər, çünki təbiət daha adi olacaq, orada daha az möcüzələr və sirlər qalacaqdır. Buna bənzər nə isə artıq əvvəllər baş vermişdir. Demək olar ki, bütün bəşər tarixi ərzində Yerin xəritələri tədqiq edilməmiş məkanları göstərmişdir, belə ki, insanların təxəyyülü onları əjdahalara, qızıl şəhərlərlə və adamyeyənlərlə doldura bilər. Biliklərin axtarılması bir çox cəhətdən coğrafi kəşflərin qisməti idi... Ancaq bizim günlərdə Yer səthinin hər hektarı xəritədə göstərilmiş, bütün əjdahalar isə harasa uçub getmişlər. Son qanunların kəşfi ilə bizim arzularımız buxarlanacaqdır. Sonsuz sayda elmi məsələlər qalacaq, alimlərin qarşısında tədqiq üçün bütün Kainat açılacaqdır, ancaq şübhələnirəm ki, gələcəyin alimləri bizim günlərin fiziklərinə bir qədər həsəd aparacaqlar, çünki biz hələ də son qanunların kəşfinə aparan yolla gedirik".

Fizika heç vaxt bitməyəcəkdir, çünki izahat tələb edən təbiət hadisələri tapılacaqdır. Lakin fizikanın çox əyləncəli və sirli hissəsində – mikrofizikada dərinliklərə doğru hərəkət müvəqqəti dayana bilər, çünki zərrəcikləri tədqiq etməyin ənənəvi üsulları özlərini praktik olaraq tükətmişdir. Bununla belə, inanmaq istərdik ki, alimlər ifratkiçik məsafələrdə baş verən hadisələri dərk etmək üsullarını axtarıb tapacaqlar və XXI əsrdə Yer əhalisi qarşısında "bizim müdriklərimizin yuxusuna belə girməyən" bir çox şeyləri öyrənmək vəzifəsi duracaqdır.



8

TƏBİƏTİN VƏ FİZİKANIN UNİVERSALLARI

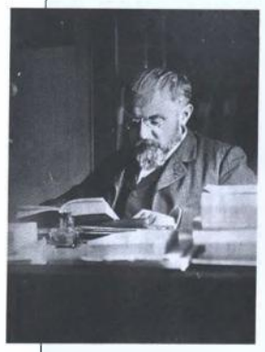
Universal proseslər və hadisələr. Universal problemlər



HƏR YERDƏ MÖVCUD OLAN QEYRİ-XƏTTİLİK

ÜFÜQ ARXASINDAKI ÜÇÜNCÜ "BULUDCUQ"

Fiziklər təbiəti öyrənərək, dünyanın getdikcə daha tamlaşan mənzərəsini addım-addım qurmuşlar. XIX əsrin axırı XX əsrin əvvəlində belə görünməyə başlamışdı ki, bu nəhəng mənzərənin tamamlanmasına az qalıb, yalnız bir neçə ştrix çatışmır. O dövrün ən böyük fizik və mühəndislərindən biri olan Uilyam Tomson, lord Kelvin özünün "Baltimor mühazirələri"ndə fizikanın açıq səmasında iki "buludcuğun" olduğunu demişdi. Onun uzaqgörənliyinə adam heyran olur: həmin buludcuqların birindən Eynşteynin nisbilik nəzəriyyəsi, digərindən isə dünyanın bütün mənzərəsini kökündən dəyişən kvant mexanikası yarandı. Lakin müəyyən vaxta qədər üfüq arxasında gizlənən və ona görə də görünməyən daha bir "buludcuq" var idi. Bu buludcuqdan vaxtı çatanda, fizika elminin istisnasız olaraq bütün bölmələrini əhatə edən qeyri-xətti fizika yarandı.



Jül Anri Puankare.

Üçüncü "buludcuq" özünü ilk dəfə 1930-cu illərdə büruzə verdi. Həmin vaxtlar, hər şeydən əvvəl, akademiklər Leonid İsaakoviç Mandelştamın və Nikolay Dimitriyeviç Papaleksinin səyləri nəticəsində qeyri-xətti radiofizika formalaşmağa başladı. Lakin tam qüvvəsilə qeyri-xətti fizika 1960-cı illərdə, öyrənilən sistemlərin özlərinin özlərinə təsiri ilə bağlı olan müxtəlif növ hadisələr və effektlər diqqət mərkəzində olan vaxtlarda özünü göstərdi.

Tezliklə aydın oldu ki, yeni elmin riyazi aparatı (dəqiq desək, onun əsasları) 1880-ci illərdə hələ Anri Puankare tərəfindən yaradılmışdır.

QEYRİ-XƏTTİLİK NƏDİR

Xətti funksiyalar aləmi dərəcədə eyni cürdür, yeknəsəqdir: onlardan birini ətraflı öyrənən kimi, bütün xətti funksiyalar haqqında ən mühüm xassələr məlum olacaqdır. Çoxlu sayda ölçülərə keçmək də elə bir gözlənilməz xassələr doğurmur. Xətti funksiyanın həndəsi obrazı, onun fiziki mənası nə olur-olsun, arqumentlərin sayından asılı olaraq, düz xəttdir, müstəvi və ya hipermüstəvidir. Arqumentin bərabər artımlarına xətti funksiya bərabər artımlarla cavab verir və bu arqumentin hansı qiyməti ətrafında onun artımının götürülməsindən asılı deyildir.

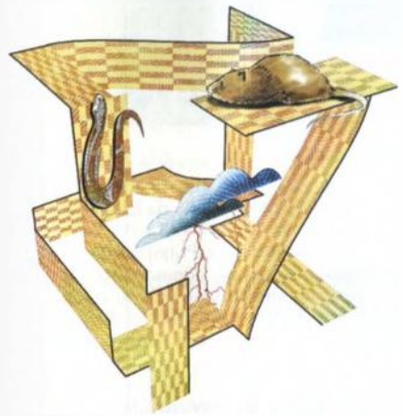
Başqa sözlə, xətti asılılıq durmadan bərabərsürətlə artımdan və ya eyni dərəcədə durmadan bərabərsürətlə azalmadan başqa heç nəyi, nə rezonans sıçrayışlarını, nə doyma effektlərini, nə də sadə rəqsləri təsvir etməyə qadir deyildir.

Üçölçülü fəzada ölçülərdən biri sıfra bərabər götürürlərsə ($z=0$), onda xy müstəvisi alınır. Bunun tam eynilə n ölçülü fəzada $x_n=0$ götürməklə, $(n-1)$ ölçülü hipermüstəvi alırlar.

Qeyri-xətti funksiyalar aləmi, həmçinin onun arxasında duran qeyri-xətti hadisələr aləmi özünün tükənməz rəngarəngliyi ilə adamı dəhşətə salır, zəbt edir və dönmədən tovlayır. Burada səliqəli standartlara yer yoxdur, bütünlüklə dəyişkənlik və formaların özbaşınalığı hökm sürür. Bir konkret qeyri-xətti funksiyalar sinfinin xüsusiyyətlərini əks etdirən riyazi vasitələr, başqa sinfin nümayəndəsinin ən sadə xüsusiyyətləri haqqında belə heç nə demir.



Funksiyanın "reaksiyası" təkcə ondan asılı deyil ki, onun arqumentlərindən hansı artım alır, həm də dəyişənin özünün qiymətindən asılıdır. Bəzi arqumentlərinin dəyişməsinə, demək olar ki, tam etinasızlıq, digərlərinin dəyişməsinə isə yüksək həssaslıq xüsusiyyətləri ilə qeyri-xətti funksiyalar xətti funksiyalarla kəskin ziddiyyət təşkil edir. Xətti funksiyalar aləmilə qeyri-xətti funksiyalar aləmi arasındakı, xətti və qeyri-xətti hadisələr arasındakı sərhəd məhz buradan keçir.



QEYRİ-XƏTTİ NƏZƏRİYYƏ

Xətti və qeyri-xətti nəzəriyyələri birbirindən başqa əlamətə görə ayırırlar. Nəzəriyyənin hansı riyazi aparatdan istifadə etməsindən asılı olaraq, nəzəriyyə xətti və ya qeyri-xətti hesab olunur. Məsələn, harmonik ossilyatorun rəqsləri sinusoidlə – qeyri-xətti funksiya ilə təsvir olunur (yalnız arqumentin kiçik qiymətlərində sinusoidi xətti funksiya ilə əvəz etmək yolverilən-dir), ancaq xətti tənliyi ödəyir və ona görə də harmonik ossilyatorun nəzəriyyəsini xətti nəzəriyyə hesab etmək olar.

Keçmişdə də fizikada qeyri-xətti nəzəriyyələr mövcud olmuşdur. Məsələn, hidrodinamika və göy mexanikası onlara aiddir. (Bu gün qeyri-xətti nəzəriyyələrin sayı müqayisəolunmaz dərəcədə çoxdur.) Bununla belə, əvvəlki fizikanı, hətta çox şərti də olsa, qeyri-

Ətrafdakılara qarşı "xətti" reaksiyaya misal kimi Bernard Şounun "Piqmalion" komediyasının iki personajının davranışını göstərmək olar: professor Hiqqins hersoginya ilə paltaryuyan qadın kimi danışır, polkovnik Pikerinq isə paltaryuyan qadınla hersoginya kimi söhbət edir. Həm bu, həm o "xəttidir", ancaq fərqə bax!

Qeyri-xətti funksiyanın həndəsi obrazı müstəvidə əyri, üçölçülü fəzada əyilmiş səth və ya çoxölçülü fəzada daha mürəkkəb çoxluqdur.

◄ Çölsiçanının səsküyə qarşı reaksiyasının qeyri-xətti olması imkan verir ki, göy gurultusundan onun qulağı tutulmasın, sürünərək yaxınlaşan ilanın güclə eşidilən xışıltısını isə tutsun.

xətti adlandırmaq olmaz. Onda əsas şey çatışmır: qeyri-xəttilik o dövrkü fiziki təfəkkürün söykəndiyi "ilkin prinsiplər"dən birinə hələ çevrilməmişdi. Əksər fiziklər əmin idilər ki, təbiətin böyük kitabında süjetin əsas inkişaf xətti qeyri-xətti fəsillərdən və bölmələrdən yan keçir və həmin fəsil və bölmələri, hər halda, ilk oxunuş zamanı, məsələnin başa düşülməsinə xələl gətirmədən buraxmaq olar.

Xətti nəzəriyyənin uğurlarını, ilk növbədə, onun ən böyük nailiyyəti olan Maksvell elektrodianmikası möhkəmləndirdi. Bir çox riyaziyyatçılar nəslinin səyləri sayəsində olduqca yüksək dərəcədə mükəmməlliyə çatdırılmış xətti riyazi aparat, fiziklər tərəfindən o qədər çoxdan mənimsənilmişdir ki, onların riyazi mədəniyyətinin ayrılmaz elementinə çevrilmiş və cavabı, hesablama çətinliklərini yan keçməklə,

"ZAMAN PARADOKSU"

Zaman paradoksu yalnız XIX əsrin ikinci yarısında, Vyana fiziki Lüdviq Bolsman, Çarlz Darvinin biologiyada etdiyinə oxşar olaraq, təkamül yanaşması qurmağa cəhd göstərdikdən sonra formulə edilmişdir. Uzun müddət hesab etmişlər ki, Nyuton fizikasının qanunları obyektiv biliyin idealını ifadə edir. Bu qanunlardan keçmişlə gələcək arasında ekvivalentlik alındığına görə, zaman oxuna (zamanın istiqamətinə) fundamental məna vermək üçün göstərilən hər bir cəhd, obyektiv biliyin bu idealına təhlükə kimi, şiddətli müqavimətlə qarşılanırdı...

Bolsmanın vaxtından bəri zaman oxunu fenomenologiya sahəsinə aid etmək qəbul olunmuşdur. Biz, öz insani təbiətimiz etibarı ilə mükəmməl olmayan müşahidəçilər, keçmiş və gələcək arasındakı fərq üçün cavabdehik. Bu fərq bizim təbiəti təsvir edərkən yol verdiyimiz təqribiliklərlə şərtlənmişdir. İndi də bu elmi "müdrikliyi" əksər alimlər dəstəkləyir. Biz isə hesab edirik ki, son illərdə xaos ideyasından başlayaraq, qeyri-xətti fizikanın və dayanıqsız sistemlər dinamikasının müşahidə olunan coşqun inkişafı vəziyyəti kökündən dəyişdirdi.

Son bir neçə onillik müddət ərzində yeni bir elm – *tarazlıqda olmayan proseslər fizikası* yaranmış və onun inkişafı özünütəşkil və *dissipativ strukturlar* kimi yeni anlayışlara gətirib çıxarmışdır. Bu anlayışlar indi hər yerdə: kosmologiya, kimya və biologiyadan tutmuş ekologiyaya və ictimai elmlərə qədər fənlərin geniş bir spektrində işlədilir. Tarazlıqda olmayan proseslər fizikası biristiqamətli zaman effektlərini təsvir edir və "dönməzlik" terminini yeni formada şərh etməyə imkan verir.

Keçmişdə zaman oxu fizikaya yalnız elə sadə proseslər vasitəsilə daxil edilirdi ki, həmin prosesləri dərk etmək üçün adi, zamanca dönən dinamika çərçivəsindən kənara çıxmaq tələb olunmurdu. İndi bizim qarşımızda tamam başqa vəziyyət mövcuddur. Biz indi bilirik ki, dönməzlik küllü miqdarda yeni hadisələr çoxluğuna – burulğanların yaranmasına, kimyəvi rəqslərə, lazer şüalanmalarına gətirir ki, bunların da hər biri zaman oxununun *konstruktiv* əməli rolunu nümayiş etdirir. Dönməzliyi biliklərimiz tam olan kimi hökmən yox olan "zahiriliklə" eyniləşdirmək mümkün olmadı... Məcazi mənada desək, maddə tarazlıq halında oxu olmadıqda "kordur", zaman oxu olanda isə "görmək" qabiliyyəti qazanır. Dönməyən qeyri-tarazlıq proseslərilə şərtlənən hadisələr olmasaydı, Yerdə həyat da yarana bilməzdi. Əslində biz hamımız zaman oxunun, təkamülün övladlarıyıq, onun valideynləri deyilik...

Bizim gözümüz önündə daha ideallaşdırılmış və sadələşdirilmiş vəziyyətlə məhdudlaşmayan elm yaranır. Bu elm bizə və bizim fəaliyyətimizə təbiətin bütün səviyyələrində fundamental "trendin" ayrılmaz bir hissəsi kimi baxaraq, real aləmin bütün mürəkkəbliklərini əks etdirir.

(İlya Priqojinin "Müəyyənliyin sonu. Zaman, xaos və təbiətin yeni qanunları" kitabından.)



İlya Romanoviç Priqojin (1917-2003) Moskvada doğulmuşdur, lakin tezliklə onun ailəsi Belçikaya köçdü. O, 1942-ci ildə Brüssel universitetini bitirdi. Belçikada və ABŞ-da işləmişdir, burada Texas universiteti nəzdində Statistik Mexanika və Termodinamika Mərkəzinin əsasını qoydu. Priqojin – bu gün sinergetika və ya özünütəşkil nəzəriyyəsi, dönməz prosesin termodinamikası və ya dissipativ strukturların fizikası adlanan istiqamətlərin yaradıcılarından biridir. Alim 1977-ci ildə dönməz proseslərin termodinamikası və bu proseslərin kimya və biologiyada istifadəsinə aid işinə görə Nobel mükafatına layiq görülmüşdür.

intiutiv tapmağa imkan verən parlaq fiziki məzmunlu ideyalar və obrazlar doğurmuşdur.

QEYRİ-XƏTTİ TƏFƏKKÜR

Xətti nəzəriyyə fərqləndirici xüsusiyyətə – superpozisiya prinsipinə malikdir. Bu prinsip xüsusi həllərin müəyyən toplusundan istənilən başqa həlli qurmağa imkan verir.

Qeyri-xətti aləmə keçəndə superpozisiya prinsipi həmişəlik itirilir. Bu aləmdə hər şey "başqa cürdür", qərarlaşmış təsəvvürlərə və intuisiyalara ziddir. Bu aləmdə ilk addımlarını atan fiziklər ümid edirdilər ki, xətti riyazi aparatı müxtəlif cür fəndlərlə yeni məsələlərin həllinə uyğunlaşdırmaq mümkün olacaqdır. Əfsus, bu aparat qeyri-xətti hadisələrin ona yad olan məğzini inadkarlıqla qəsb edirdi. Qeyri-xətti problemlərin süni olaraq xətti problemlərlə əvəz edilməsi L.İ.Mandelştamın sözlərinə görə, "...əsasən, heç nəyi öyrətmədi, bəzən isə zərərli idi". Hazır riyazi metodlar olmadıqda fizik bəzən "riyazi axtarış" yolunu tutaraq, qeyri-xətti məsələləri onların fərdi xüsusiyyətlərindən istifadə etməklə tək-tək həll etmək qərarına gəlir. Mandelştam yazırdı: "Bu yol, əlbəttə, öz-özlüyündə düzgün yoldur. Bu yolla gedərək, bir sıra tədqiqatçılar öz əhəmiyyətini indi də saxlamış olduqca qiymətli nəticələr almışlar... Mən hələ ayrı-ayrı məsələlərin bu cür həllərinin faktiki olaraq riyazi cəhətdən kifayət qədər əsaslandırılmadığını demirəm. Belə yanaşma, böyük yolun əvəzi kimi, çətin ki, məqsədəuyğun olsun, çünki o, qeyri-xətti rəqslər oblastını, onun artıq bizə məlum olan hissəsini kifayət qədər tam və hərtərəfli əhatə etməsi üçün lazım olan həm riyazi, həm də fiziki bazanın, ümumi baxışların müəyyən edilməsinə, bundan da daha vacibi onun sonrakı



müvəffəqiyyətli inkişafına aparıb çıxarmır". Hərtərəfli dərin biliyə malik alim, "xətti rəqslər aləminin" mahir bilicisi Mandelştam qeyri-xətti fizikanın zahiri baxımdan bir-birindən çox uzaq olan hadisələrin "başlıca ümumi cəhətlərini" müəyyənləşdirməyə imkan verən "internasional dilini", onun yaratdığı riyazi anlayışların, mücərrəd mənimsənilən yox, fiziki hadisələrin bütöv bir kompleksi ilə sıx bağlı olaraq mənimsənilən riyazi anlayışlarının böyük idrak gücünü; bəzi hallarda həlləri qabaqcadan sezmək və digər hallarda "diferensial tənlikləri düzgün sorğu-suala tutmaq" imkanlarını layiqincə qiymətləndirmişdir.

Müasir riyazi modellər məhz qeyri-xətti tənliklərdir. Onların aşkar həllini yalnız müstəsna hallarda tapmaq mümkün olur. Bir qayda olaraq, ədədi və analitik metodları birləşdirməklə müvəffəqiyyət qazanırlar. Dəqiq həll olunmayan tənliklərə hücum edilməsinin taktika və strategiyasını işləyib hazırlamaq üçün xüsusi olaraq, dəqiq həll olunan modellər qururlar. Bu modellərin hər birinin öz taleyi var. Bəziləri gələcək nəzəriyyə daxilində əriyərək, heç bir iz qoymadan yox olur, digərlərinə uzun və şöhrətli həyat qismət olur. Lakin onlar vahid bir tamın canlı əzələsini əmələ gətirir. Bu tamın adı Qeyri-xətti elmdir.

Dissipativ strukturlar – güclü qeyri-tarazlıq şəraitində yaranan dayanıqlı fəza qeyri-bircins strukturlardır. Bu cür strukturlara misal olaraq Benar özəklərini, plazmada stratları, lələkvari buludları və başqa hadisələri göstərmək olar. Elmə 1970-ci ildə belçikalı fiziklər Pol Qlensdorf və İlya Romanoviç Priqojin tərəfindən daxil edilmişdir.

Mandelştam özünün əyani fiziki obrazlar vasitəsilə təfəkkürün hasil edilməsi proqramını "qeyri-xətti fiziki təfəkkür" proqramı adlandırmışdır. Qeyri-xətti düşünən fizikin əsas aləti universal riyazi modellərdir. Onlar hər hansı bir əlamətə görə birləşdirilmiş hadisələrin bütöv siniflərini təsvir edir.



UNİVERSAL PROSESLƏR VƏ HADİSƏLƏR

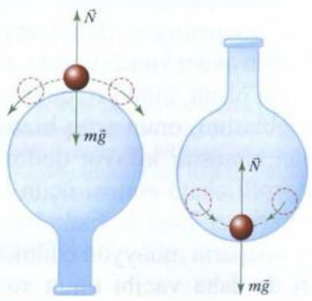
MEXANİKİ RƏQSLƏR

Ağır tarazlıq nöqtəsindən meyil etdirilmiş cisim özbaşına buraxıldıqdan sonra ilkin vəziyyətinə qayıdırsa, bu *dayanıqlı tarazlıqdır*. Əks halda, yəni cisim ilkin vəziyyətini həmişəlik tərk edirsə, onda tarazlıq *dayanıqsız tarazlıqdır*.

Nyutonun ikinci qanununa görə, cisim o zaman tarazlıqda olur ki, ona tətbiq olunmuş qüvvələrin cəmi sıfra bərabər olsun. Tarazlıqdan tarazlığa fərq var! Məsələn, əgər kürəciyi çevrilmiş sferik kolbanın ən yuxarı nöqtəsində yerləşdirsək, onda onun Yer tərəfindən cəzb olunduğu $m\vec{g}$ *qüvvəsi dayağın* $\vec{N}$ reaksiya qüvvəsi ilə tarazlaşar. Lakin kiçicik bir titrəmə nəticəsində kürəcik aşağı diyirlənəcək. Kürəciyi kolbanın içərisinə atsaq, asanlıqla inanmaq olar ki, kolbanı nə qədər silkələsək də, kürəcik hər dəfə ən aşağı nöqtəyə qayıdacaqdır.

Cisimlərin tarazlığının müxtəlif növləri.





Cismin dayanıqlı vəziyyətləri, onun U potensial enerjisinin minimumlarına (A və C nöqtələrinə), dayanıqsız vəziyyətləri isə onun potensial enerjisinin maksimumlarına (B nöqtəsinə) uyğun gəlir. $U(x)$ əyrisinin üfüqi hissəsində olan D nöqtəsindəki tarazlığa bəzən fərqsiz tarazlıq deyilir. Fərqsiz tarazlıq təsadüfi təkanlara nəzərən dayanıqsızdır, çünki təkanlar nəticəsində cisim impuls alaraq, ətaləti üzrə bərabərsürətli hərəkətini davam etdirir və başlanğıc nöqtədən istənilən qədər uzağa gedir. Tarazlıq A nöqtəsində C nöqtəsinə nəzərən daha dayanıqlıdır: əgər cismin C nöqtəsindən yerdəyişməsi $x_C - x_B$, məsafəsindən böyükdürsə, onda cisim geriyə qayıtmır, dayanıqsız B vəziyyətini aşaraq, C-yə nəzərən daha dayanıqlı olan A vəziyyətinə keçir.

cisi cismi geriyə qaytarmağa çalışır. Bu qüvvəyə *qaytarıcı qüvvə* deyilir.

Cisim tarazlıq vəziyyətinə çatanda qaytarıcı qüvvə sıfır, cismin sürəti isə maksimal olur. Ona görə də cisim ətaləti üzrə hərəkət etməkdə davam edir və əks tərəfə meyil edir. Ona yenidən qaytarıcı qüvvə təsir edir, ancaq indi əks istiqamətdə. Cisim hərəkətini yavaşıdır, ən kənar vəziyyətdə bir anlığa dayanır və əks istiqamətdə yeyinləşən hərəkətə başlayır. Bir sözlə, cisim gah bu, gah da digər tərəfə meyil edir və əgər müqavimət qüvvələri olmasaydı, bu proses əbədi davam edərdi. Dövrü olaraq bu cür təkrarlanan hərəkətə *rəqsi hərəkət* deyilir. Həqiqətdə isə hər dəfə tarazlıq nöqtəsindən keçərkən, cismin sürəti sürtünmə və mühitin müqaviməti nəticəsində, rəqslərin amplitudu azaldığı kimi, azalır. Bu halda belə demək qəbul olunmuşdur ki, rəqslər sönür, cismin hərəkəti tədricən kəsilir, enerjisi isə qeyri-mexaniki formaya (istiliyə) keçir.

Deformasiyaya uğramayan yay cismə təsir etmir və cisim tarazlıqda olur. Cismi bu vəziyyətdən x qədər sürüşdürəndə yay dartılır və ya sıxılır və deməli, Huk qanununa görə cismə, onu tarazlıq vəziyyətinə qaytarmağa çalışan $\vec{F} = -k\vec{x}$ elastiki qüvvə təsir edir. Nyutonun ikinci qanununa görə

$$m\ddot{x} = -kx, \qquad (1)$$

burada $\ddot{x} = a_x$ – cismin təcilidir, yəni koordinatın zamana görə ikinci tərtib törəməsidir (simvol üzərindəki nöqtə zamana görə törəməni bildirir). İndi (1) ifadəsinə $k/m = \omega_0^2$ işarələməsi daxil edərək, harmonik rəqslərin tənliyini alarıq:

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x. \qquad (2)$$

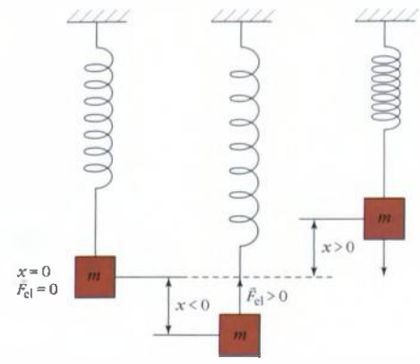
Başqa misal kimi çəkisiz, uzanmayan və uzunluğu l olan ipdən asılmış

Qaytarıcı qüvvənin təsiri altında baş verən rəqslər *sərbəst rəqslər*, sürtünmə və müqavimət qüvvələri olmadıqda isə *məxsusi rəqslər* adlanır.

Rəqsi hərəkət iki səbəbdən: cismin dayanıqlı tarazlıq vəziyyətinə qayıtmaq cəhdi və cismin ani olaraq dayanmasına imkan verməyən ətalətlə şərtlənir.

HARMONİK RƏQSLƏR

Misal kimi *yaylı rəqqasın* rəqslərinə baxaq. Sərtliyi k olan yaya bağlanmış m kütləli cisim belə adlanır. Sadəlik üçün hesab edəcəyik ki, hərəkətə qarşı müqavimət yoxdur (sıfıra bərabərdir).



Yaylı rəqqasın rəqsləri.

Fiziki rəqqasın hərəkəti asılmış cismin yalnız kütləsindən deyil, həm də ölçülərindən və formasından, həmçinin cismin asıldığı ipin uzunluğundan və kütləsindən asılıdır.

maddi nöqtənin qravitasiya sahəsində hərəkətini göstərmək olar. Belə sistem *riyazi rəqqas* adlanır.

İp şaquli vəziyyətdə duranda $m\vec{g}$ ağırlıq qüvvəsi ipin $\vec{T}$ gərilmə qüvvəsi ilə kompensasiya olunur və m kütləli nöqtə (cisim) tarazlıqda olur. Əgər cismi meyil etdirib buraxsaq, rəqslər yaranar. Cisim çevrə qövsü boyunca hərəkət edəcək, onun sürəti isə tarazlıq vəziyyətində maksimal, kənar nöqtələrdə isə sıfır olacaqdır. *Mərkəzəqaçma təcilini* (bu, dəyişən təcildir) ipin gərilmə qüvvəsi doğurur, sürətin dəyişməsi (*tangensial təcil*) isə əvəzləyici $m\vec{g}+\vec{T}$ qüvvəsinin çevrəyə toxunan üzrə proyeksiyası ilə təyin olunur. Qüvvənin bu komponenti $mg\sin\alpha$-ya bərabərdir, çünki ipin gərilmə qüvvəsi $\vec{T}$ toxunana perpendikulyardır.

Cismin tarazlıq vəziyyətindən çevrə qövsü üzrə S yerdəyişməsi radianlarla ölçülən α meyil bucağı ilə düz mütənasibdir: $S=l\alpha$, burada ipin l uzunluğu dairəvi trayektoriyanın radiusunu təyin edir. Ona görə də tangensial təcil

$$a=\frac{d^2S}{dt}=\frac{ld^2\alpha}{dt^2}=l\ddot{\alpha} \qquad (3)$$

şəklini, hərəkət tənliyi (Nyutonun ikinci qanununu) isə

$$ml\ddot{\alpha}=-mg\sin\alpha, \qquad (4)$$

və ya

$$\ddot{\alpha}=-\omega_0^2\sin\alpha, \qquad (5)$$

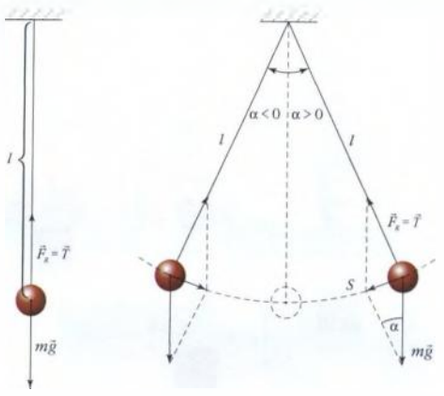
şəklini alır, burada $\omega_0^2=g/l$.

Əgər rəqslər zamanı ipin şaquldan meyli 7°-ni aşmırsa, onda $\sin\alpha$ radianlarla ölçülən α bucağından 0,5 %-dən də az fərqlənəcəkdir. Deməli, rəqqasın kiçik rəqsləri zamanı $\sin\alpha$-nı α ilə əvəz etməklə (5) tənliyini sadələşdirmək olar. Nəticədə alırıq ki,

$$\ddot{\alpha}=-\omega_0^2\alpha \qquad (6)$$

bu isə yaydan asılmış yükün harmonik rəqsləri üçün çıxarılmış (2) tənliyidir, ancaq indi yalnız ω_0^2 əmsalı başqadır. (2) və (6) tənliklərinin həlli elə funksiya olmalıdır ki, onun ikinci tərtib törəməsi əks işarə ilə bu funksiyanın özünə bərabər olsun. Sinus və kosinus funksiyaları bu şərti ödəyir. Arqument $\pi/2$ qədər dəyişdikdə bu funksiyalar bir-birinə keçir.

Radian (*lat.* radius – "şüa", "radius") müstəvi bucaq vahididir, 1 rad – uzunluğu radiusa bərabər olan çevrə qövsünə uyğun mərkəzi bucaqdır; 1 rad = 57°17′44,8″.



Riyazi rəqqas.

HARMONİK RƏQSLƏRİN XARAKTERİSTİKALARI

Cismin yerdəyişməsinin zamandan

$$x(t)=x_{max}\sin(\omega_0 t+\varphi_0) \qquad (7)$$

şəklindəki asılılığı harmonik rəqslərin tənliyinin ümumi həllini əmələ gətirir. (2) tənliyinin (7) həllində sinus x_{max} kəmiyyətinə vurulmuşdur, çünki sinusun özü –1-dən +1-ə qədər intervalda dəyişir, rəqslərin amplitudu isə istənilən qiymət ala bilər. Burada x_{max} kəmiyyəti rəqs edən cismin tarazlıq nöqtəsindən maksimal meylidir və ya *rəqs amplitudur* (*lat.* "amplitudo" – "kəmiyyət"). (7) funksiyasının arqumenti

$$\varphi=\omega_0 t+\varphi_0$$

rəqslərin fazası, onun $t=0$ anındakı qiyməti φ_0 isə *başlanğıc faza* adlanır.

Zaman keçdikcə faza monoton artır. Lakin 2π, 4π, ..., $2\pi n$ ($n=1, 2, ..., N$) bucaqlarında (7) funksiyası eyni bir qiymət alır (sinus periodu 2π olan periodik funksiyadır). Cismin öz hərəkətini təkrarladığı ən kiçik zaman müddəti *T rəqs periodu* adlanır. φ və t arasındakı əlaqəni nəzərə alaraq, tapırıq ki,

$$\Delta\varphi=2\pi=\omega_0 T;\ T=\frac{2\pi}{\omega_0}.$$

T periodu ərzində bir tam rəqs baş verir. Onda 1 san ərzində $1/T$ sayda rəqs baş verər. Periodun tərs qiymətinə bərabər olan *rəqs tezliyi* $\nu=1/T$ BS-də herslərlə (Hs) ölçülür.

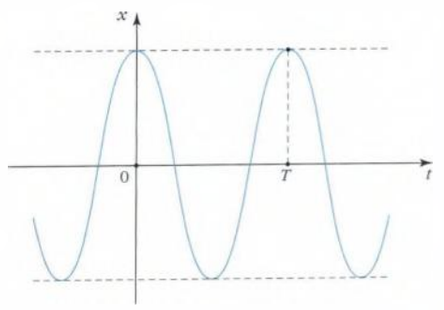
$\omega_0=2\pi/T=2\pi\nu$ kəmiyyəti *tsiklik* və ya *dairəvi tezlik* adlanır və 2π saniyədəki rəqslərin sayına bərabərdir. Ədədi qiymətcə o, periodu T olan fırlanmanın bucaq sürətinə bərabərdir. Bu üst-üstə düşmə təsadüfi deyil: çevrə üzrə bərabərsürətli hərəkət zamanı nöqtənin istənilən diametr üzrə proyeksiyası (nöqtənin "kölgəsi") harmonik rəqslər edir.

Harmonik rəqslərin T periodu (deməli, həm də ν tezliyi) sistemin fiziki xassələrilə təyin olunur. Xüsusi halda, (2) və (6) tənliklərindən görünür ki,

$$T=\frac{2}{\omega_0}=\begin{cases}2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}} & \text{yaydan asılmış yük üçün,}\\ 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}} & \text{riyazi rəqqas üçün.}\end{cases}$$

harmonik rəqslərin ən mühüm xassəsi, onların izoxron (*yun.* "izos" – "bərabər" və "xronos" – "zaman") olmasıdır, yəni periodun amplituddan və başlanğıc fazadan asılı olmamasıdır. Məhz bu xassə imkan verir ki, rəqqaslardan bərabər zaman fasilələrini ölçmək üçün saatlarda istifadə edilsin.

Cisimlər yalnız dayanıqlı hallarda uzun müddət qala bilər, ya sükunətdə, ya da hərəkətdə olmaqla. Lakin labüd



Rəqslərin amplitudu və periodu.

1 Hs – elə tezlikdir ki, bu zaman 1 san-də bir rəqs baş verir; $1\ \text{Hs}=1\ \text{san}^{-1}$.

FURYE AYRILIŞI

Harmonik rəqslər, "maddi nöqtə", "mütləq bərk cisim", "ideal qaz" anlayışları kimi, real rəqslərin ideallaşdırılmasından başqa bir şey deyildir. İstənilən periodik hərəkəti misli tezliklərə malik harmonik rəqslərin cəmi şəklində göstərilməsi məlum olduqdan sonra, harmonik rəqslər xüsusi əhəmiyyət kəsb etməyə başladı. Bu məşhur teoremi 1807-ci ildə fransız riyaziyyatçısı və fiziki Jan Batist Furye (1768-1830) isbat etmişdir.

Periodu T olan $f(t)$ funksiyasının harmonik toplananlara ayrılışı aşağıdakı şəkla malikdir:

$$f(t)=\frac{a_0}{2}+a_1\cos\omega t+a_2\cos 2\omega t+\ldots+\frac{b_0}{2}+b_1\sin\omega t+b_2\sin 2\omega t+\ldots, \qquad (1)$$

burada $\omega=2\pi/T$, (a_0, a_1, a_2, ...) və (b_0, b_1, ...) əmsalları $0\leqslant t\leqslant T$ aralığında inteqrallama aparmaqla, $f(t)$ funksiyasına görə dəqiq təyin olunur; onların tam toplusu ilkin $f(t)$ funksiyasını birqiymətli xarakterizə edir və bu, funksiyasının spektri adlanır. (1) ifadəsində hədlərin sayını artırdıqca, onun sağ tərəfindəki cəm ilkin $f(t)$ funksiyasından getdikcə daha az fərqlənir. 1822-ci ildə çapdan çıxmış məşhur "İstiliyin analitik nəzəriyyəsi" kitabında Furye müxtəlif fiziki məsələlərin həlli üçün öz metodunu – *Furye ayrılışı* metodunu işləyib hazırlamışdır.

Hər bir periodik funksiya özünün məxsusi spektrinə – Furye əmsalları toplusuna malikdir. Məsələn, eynitezlikli danışıq səsləri eyni yüksəklikli tona malikdir, lakin müxtəlif adamlar tərəfindən tələffüz edildikdə bir-birindən tembrlə fərqlənir. Bu ona görə belə baş verir ki, səslərə *yüksək harmonikaların* müxtəlif toplusu (Furye sırasının $n\omega$ tezlikli hədləri $n>1$ olduqda belə adlanır) uyğundur. Xüsusi halda, əgər harmonikalar toplusu kompüterin yaddaşına daxil edilsə, onda kompüter sahibinin səsini tanıyacaq (səsin spektrini təhlil etməklə) və məsələn, sahibinin əmrinə əsasən avtomobilin qapısını bağlayacaq ("Sim, sim, aç qapını!").

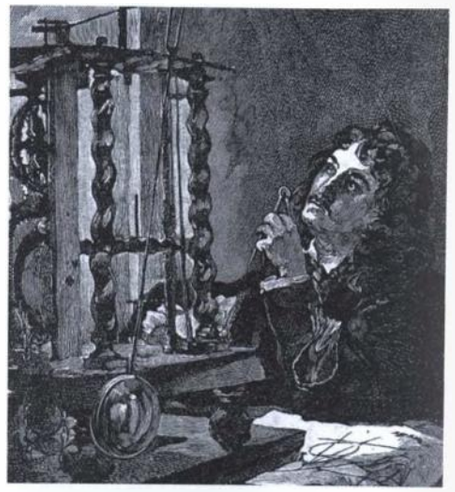
Harmonik rəqslərin tənliyinin ümumi həllini də Furye ayrılışı şəklində göstərmək olar:

$$\sin(\omega_0 t+\varphi_0)=\sin\omega_0\cos\varphi_0 t+\cos\varphi_0\sin\omega_0 t,$$

burada yalnız iki əmsal sıfırdan fərqlidir: $a_1=\sin\varphi_0$ və $b_1=\cos\varphi_0$. Onların qiyməti rəqslərin φ_0 başlanğıc fazası ilə təyin olunur.



Jan Batist Josef Furye.



X.Hüygens ilk rəqqaslı saatı işə salır. Qravüra.

İzoxronluq Qalileo Qaliley tərəfindən müəyyən olunmuşdur; o, bunu Piza kilsəsində çilçırağın yırğalanmasını müşahidə edərkən aşkara çıxarmışdır, o, saat əvəzində öz pulsundan istifadə etmişdir.

Riyazi rəqqasın rəqslərinin periodunu ilk dəfə Xristian Hüygens hesablamışdır. O həm də 1657-ci ildə ilk rəqqaslı saat hazırlamışdır.

təsadüfi təsirlər nəticəsində bu hallardan çıxaraq, rəqs edir. Binanın divarları titrəyir; duran və ya hərəkət edən adamlar tarazlığını saxlayaraq, güclə seziləcək dərəcədə yırğalanırlar; velosipedçilər yıxılmamaq üçün sinusoid üzrə hərəkət etməyə məcburdurlar; səslərlə dolu olan hava rəqs edir; dənizlər və göllər dalğalanır... Rəqslər bizi hər tərəfdən əhatə edir, onlardan gizlənmək və qaçmaq olmaz, onlar təbiətin universal prosesləridir.

RƏQSLƏRİN TOPLANMASI

Rəqslərə hər yerdə rast gəlindiyindən, cisimlər, adətən, eyni zamanda bir neçə rəqs prosesində iştirak edir. Məsələn, əgər qulağa eyni zamanda iki mənbədən səs dalğaları gəlib çatırsa, onda bu dalğalar qulaq pərdəsində toplanır, qulaq pərdəsinin hərəkəti isə eşitmə hissini müəyyən edir.

Ən sadə hal amplitudları və istiqamətləri üst-üstə düşən eynitezlikli harmonik rəqslərin toplanmasıdır. Nəticədə həmin tezlikli harmonik rəqslər alınacaq. Bu rəqslərin amplitudu toplanan rəqslərin başlanğıc fazaları fərqindən asılıdır:

$$x(t)=x_{max}\sin(\omega_0 t+\varphi_{01})+x_{max}\sin(\omega_0 t+\varphi_{02})=$$

$$=2x_{max}\cos\left(\frac{\varphi_{01}-\varphi_{02}}{2}\right)\sin\left(\omega_0 t+\frac{\varphi_{01}+\varphi_{02}}{2}\right). \quad (8)$$

Əgər başlanğıc fazalar eynidirsə, yəni

$$\varphi_{01}=\varphi_{02}=\varphi_0;\ \Delta\varphi_0=\varphi_{01}-\varphi_{02}=0;$$

$$\cos\frac{\Delta\varphi_0}{2}=1,$$

onda amplitud, sadəcə olaraq, iki dəfə artır:

$$x(t)=2x_{max}\sin(\omega_0 t+\varphi_0).$$

Başlanğıc fazalar π qədər fərqləndikdə, əks effekt alınır. Bu halda rəqslər *əks fazalarda* baş verir:

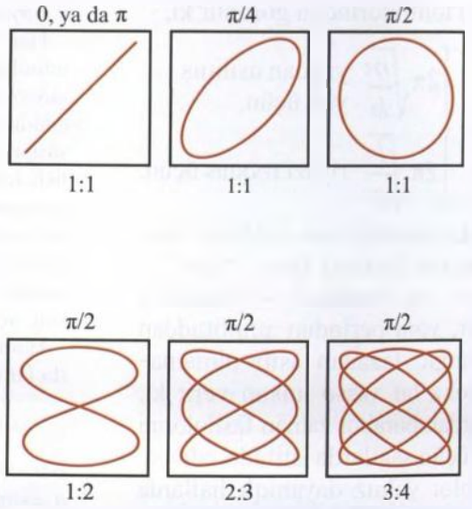
$$\Delta\varphi_0=\pi;\ \cos\frac{\Delta\varphi_0}{2}=\cos\frac{\pi}{2}=0.$$

Deməli, (8) ifadəsində $x(t)$ yekun rəqslərin amplitudu sıfıra bərabər olacaq, yəni əks fazalı rəqslər bir-birini söndürür. Qalan hallarda yekun rəqslərin amplitudu sıfırla $2x_{max}$ arasında qiymət alır. Amplitudların toplanması nəticəsinin fazalar fərqindən asılı olması dalğaların *interferensiyası* (*lat.* inter – "arada" və ferens – "daşıyıcı", "aparıcı") hadisəsinin əsasında durur.

LİSSAJU FİQURLARI

Qarşılıqlı perpendikulyar olan harmonik rəqslərin toplanması xüsusi maraq doğurur. Bu halda cismin yekun trayektoriyası fransız fiziki Jül Antuan Lissajunun (1822-1880) adı ilə *Lissaju fiqurları* adlanır. J.Lissaju 1855-ci ildə rəqslərin optik cəmlənməsi metodunu işləyib hazırlamışdır. Bu metod mürəkkəb formalı fiqurların alınmasına səbəb olur.

Əgər rəqslərin tezliklərilə amplitudları öz aralarında bərabərdirsə, onda onların cəmi çevrə üzrə bərabərsürətli hərəkət olacaqdır. Ona görə də bərabərsürətli fırlanmaya başlanğıc fazalar fərqi $\pi/2$ olan iki qarşılıqlı perpendikulyar rəqslərin cəmi kimi baxmaq olar, yəni $x(t)=\sin\omega t$ və $y(t)=\cos\omega t$. Bu halda rəqslərin tsiklik tezliyi fırlanmanın bucaq sürətinə, amplitudu isə çevrənin radiusuna bərabərdir (əgər toplanan rəqslərin amplitudları müxtəlifdirsə, onda çevrə ellipsə çevrilir). Əgər rəqslərin tezlikləri iki dəfə fərqlənirsə, onda cismin trayektoriyası səkkizvari şəklə malik olur. Tezliklərin başqa nisbətlərində Lissaju fiqurları müxtəlif ilgəklərin mürəkkəb birləşmələrindən ibarət olur.



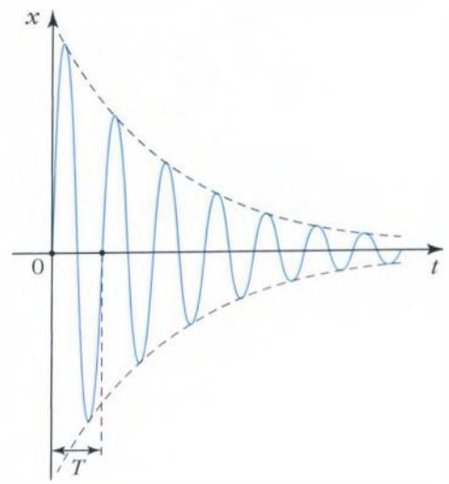
AVTORƏQSLƏR VƏ MƏCBURİ RƏQSLƏR. REZONANS

Müqavimət qüvvələrinin işi enerji itkisinə və sərbəst rəqslərin sönməsinə səbəb olur. Lakin enerji itkisini xarici qüvvənin işi hesabına kompensasiya etməklə, sönməni aradan qaldırmaq olar. Bunun üçün xarici qüvvənin təsiri rəqslərlə fazaca uzlaşmalıdır.

Cisim öz məxsusi tezliyilə rəqs edərək, xarici mənbədən enerji daxil olmasını tənzimləməyə qadirdir. Ancaq bunun üçün əks-əlaqə olmalıdır, yəni mənbənin nə zaman öz enerjisini verməli olduğu barədə məlumat olmalıdır. Əgər bir period ərzində xaricdən enerjinin daxil olmasını həmin müddətdə enerji itkisini tam kompensasiya edirsə, onda hərəkət stabilləşir və rəqslərin amplitudu sabit qalır. Bu cür öz-özünü saxlayan hərəkət *avtorəqslər* (*yun.* "autos" – "özüm") adlanır.

Məsələn, yelləncəyi yelləndirərək, hər dəfə onu yuxarı nöqtədən tarazlıq nöqtəsi istiqamətində itələyirlər. Başlanğıcda xarici qüvvənin işi enerji itkisindən çox olur və rəqslərin amplitudu böyüyür, sonra isə itələyici qüvvə yalnız müqaviməti dəf edir və avtorəqslər rejimi başlanır. Burada əks-əlaqə görmə vasitəsilə reallaşır. Musiqiçi skripkada çalarkən mizrabla simin məxsusi rəqslərini oyadır, əks-əlaqəni isə eşitmə vasitəsilə həyata keçirir. Mexaniki saatlarda yayın və ya yuxarı qaldırılmış daşların enerjisi *anker* (*alm.* anker – "lövbər") adlanan qurğu vasitəsilə rəqqasa verilir. Anker dönmə nöqtəsində rəqqası, rəqqasın məxsusi rəqslərinin tezliyi ilə itələyir; əks-əlaqə və enerjinin verilməsi uzlaşdırılmışdır, yəni ankeri rəqqasın özü lazım olan anda döndərir.





Zaman keçdikcə sönən rəqslərin amplitudunun azalması.

Sönməyən rəqsləri başqa cür də almaq olar. Bunun üçün ossilyatora xarici harmonik təsir göstərmək lazımdır. Əvvəlcə yırğalanma ilə bərabər məxsusi rəqslər də yaranır, ancaq müqavimət qüvvələri hesabına tədricən sönür. Ona görə də qərarlaşmış rəqslər artıq ossilyatorun məxsusi tezliyilə yox,

Çox vaxt rəqs edən cisimləri *ossilyatorlar* (*lat.* oscillo – "yırğalanıram"), fırlanan cisimləri isə *rotatorlar* (*lat.* rotator – "fırladıcı") adlandırırlar. Yaydan asılmış yük və riyazi rəqqas kiçik amplitudlarda *harmonik ossilyatorlardır*, lakin kifayət qədər böyük amplitudlarda (sinα-nın qiyməti α-dan xeyli fərqli olduqda) riyazi rəqqas *anharmonik ossilyator* olur.



Rəqqaslı saat mexanizmi.

məcburedici qüvvənin tezliyi ilə baş verəcəkdir.

Bu cür rəqslərin amplitudu o vaxta qədər artır ki, bir period ərzində xaricdən daxil olan enerji müqaviməti dəf etməyə sərf olunan enerjiyə bərabər olsun. Sönməyən və amplitudu sistemin parametrlərindən, həmçinin məcburedici qüvvənin xarakterindən asılı olan *məcburi rəqslər* belə yaranır.

Müqavimət sürətlə mütənasib olan halda məcburi rəqslərin tənliyi

$$m\ddot{x} = -kx - \alpha\dot{x} + F_0\cos\Omega t$$

şəklinə düşür. Burada F_0 və Ω xarici qüvvənin uyğun olaraq amplitudu və tezliyi, α isə müqavimət əmsalıdır. Bir halda ki, qərarlaşmış məcburi rəqslərin amplitudu dəyişməzdir, tezliyi isə Ω ilə üst-üstə düşür, onda onlar zamana görə aşağıdakı asılılıqla təsvir olunur:

$$x(t) = A\cos(\Omega t + \beta),$$

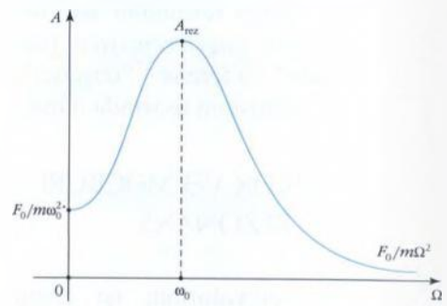
burada A=const, β – başlanğıc fazadır. Məcburi rəqslərin A və xarici qüvvənin F_0 amplitudları öz aralarında aşağıdakı kimi bağlıdır:

$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2(\alpha/2m)^2}}$$

($\alpha/2m$ – sönmə əmsalıdır və tezlik vahidlərilə ölçülür.)

A amplitudu tətbiq olunmuş qüvvənin Ω tezliyi ilə ossilyatorun məxsusi $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ tezliyi arasındakı münasibətdən kəskin asılıdır. Əgər sönmə kiçikdirsə və $\alpha/2m \ll \omega_0$ isə, onda $\Omega \approx \omega_0$ olan zaman məcburi rəqslərin amplitudu kəskin artır. Bu hadisə *rezonans* (*lat.* resono – "hay verirəm") adlanır.

Əgər xarici qüvvə sabitdirsə ($\Omega = 0$), onda, o, tarazlıq vəziyyətinin sadəcə olaraq $A = x_0 = F_0/m\omega_0^2 = -F/k$ kəmiyyəti qədər statistik yerdəyişməsini doğuracaqdır. Rezonans zamanı ($\Omega \approx \omega_0$) rəqslərin A_{rez} amplitudu bu x_0 yerdəyişməsindən xeyli böyük olur:

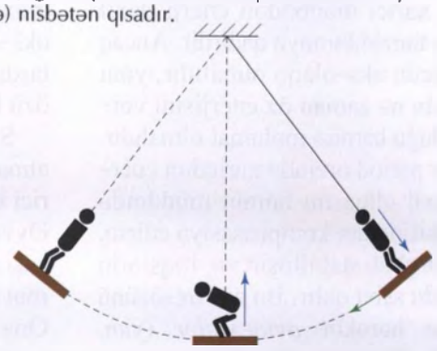


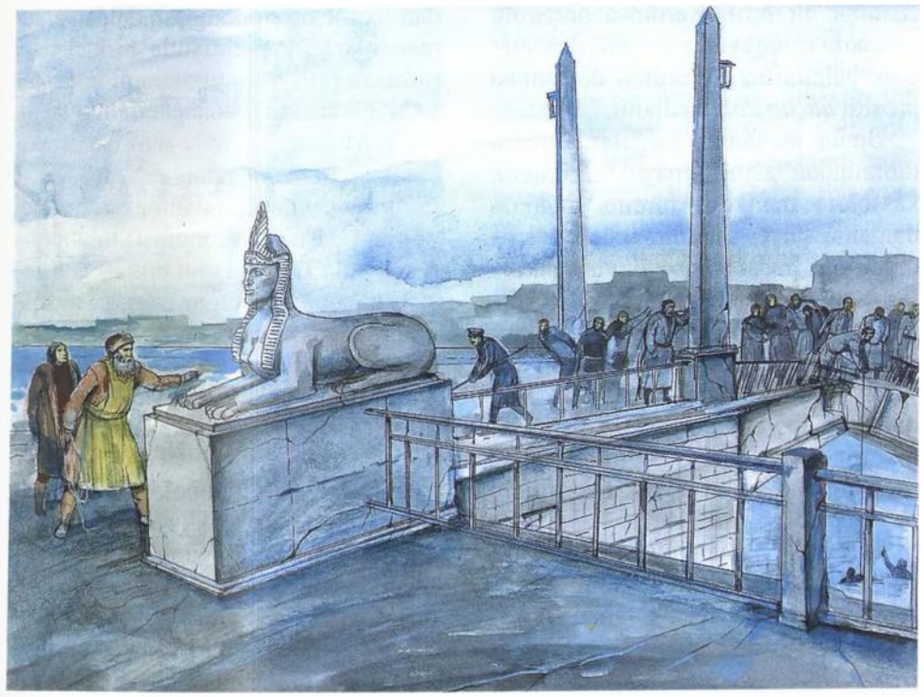
$$A_{rez} \approx \frac{F_0/m}{2\Omega\alpha/2m} \approx \frac{F_0}{\alpha\omega_0} = \frac{m\omega_0}{\alpha}x_0 = Qx_0,$$

▶ Məcburi rəqslərin amplitudunun xarici qüvvənin Ω tezliyindən asılılığı; ω_0 – rəqs sisteminin məxsusi tezliyi, F_0 – xarici qüvvənin amplitududur.

PARAMETRİK REZONANS

Enerji mənbəyi sistemin xaricində yox, daxilində olanda rezonansın maraqlı halı müşahidə olunur. Mənbə sistemin parametrlərindən birini periodik dəyişərək, itkini kompensasiya edir və sönməyən rəqslər yaradır. Məsələn, əgər yelləncəkdə duran adam yuxarı nöqtələrdə çömbəlib, aşağı nöqtələrdə (tarazlıq vəziyyətini keçərkən) qalxarsa, onda sabit qalacaq böyük bir amplitudla yellənə bilər. Onun hərəkəti, periodik olaraq, "rəqqasın" uzunluğunun (asılma nöqtəsindən kütlə mərkəzinə qədər məsafənin) məxsusi rəqslərin tezliyinə bərabər tezliklə dəyişməsinə səbəb olur. Amplitudun bu cür artması *parametrik rezonans* adlanır. Baxılan halda enerjinin yelləncəyə daxil olması onunla şərtlənir ki, yellənən adam aşağı nöqtədə qalxaraq daha çox güc sərf edir (burada o, mərkəzəqaçma ətalət qüvvəsinə üstün gəlməli olur), nəinki yuxarı nöqtələrdə oturaraq. Bunun nəticəsində bir rəqs periodu ərzində görülən iş müsbət olur. Baxılan halda kütlə mərkəzinin trayektoriyası çevrədən fərqlənir, çünki "radius" (rəqqasın effektiv uzunluğu) aşağı nöqtədə, dönmə nöqtələrindəkinə (yuxarı nöqtələrə) nisbətən qısadır.





Bəzən amplitudun artması sistemin dağılmasına səbəb olur, yəni rezonans çox təhlükəlidir. Bir tarixi hadisə məlumdur: XIX əsrdə Peterburqdakı Misir körpüsü uçub dağılmışdı. Körpüdən kavalerqrad dəstəsi keçirdi. Onların nizami addımının ritmi təsadüfən tikintinin məxsusi tezliyilə üst-üstə düşmüşdür. Bu səbəbdən də məcburi rəqslərin amplitudu kəskin artmağa başlamış, yerdəyişmə hesablanmış böhran qiymətini aşmış və körpü davam gətirməmişdir. Ona görə də indi əsgər cərgəsi "şübhəli" körpüdən keçəndə pərakəndə getmək komandası verilir.

burada $Q = m\omega_0/\alpha$ kəmiyyəti *rəqs sisteminin davamlılığı* adlanır. Sönmə kiçik olanda, yəni $\alpha/2m \ll \omega_0$ olanda, davamlılıq 10^2 qiymətinə çata bilər.

Rezonansdan musiqi alətlərində istifadə olunur, musiqi alətlərinin korpusunda rezonatorlar adlanan xüsusi hava boşluqları vardır. Həmin boşluqlarda olan hava simlərin və ya hava şırnağının (nəfəs alətlərində) köməyilə həyəcanlandırılaraq rəqsə gətirilir və bu rəqslər himayə edilir. Həm sim, həm də rezonator bir yox, çoxlu sayda məxsusi tezliklərə malik olduğu üçün, rezonans bu tezliklərin bir neçəsində eyni zamanda yaranır. Bunun sayəsində hər bir musiqi aləti xüsusi səslənmə tembri ilə fərqlənir. Gündəlik həyatda da rezonansa əl atırlar, məsələn, avtomobili çuxurdan itələyib çıxarmaq üçün, onu irəli-geri istiqamətdə yırğalayırlar. Çox güc sərf etmədən rəqslərin amplitudunu o qədər artırmaq olar ki, maşın düz yerə çıxar.

Rezonans zamanı məcburi rəqsləri avtorəqslərdən fərqləndirmək mümkün deyil, çünki hər ikisi sistemin məxsusi tezliyinə bərabər tezliklə baş verir.

MEXANİKİ DALĞALAR

Bütün cisimlər, hər halda, qonşu cisimlər, necə olsa da, bir-birinə təsir edir. Onların qarşılıqlı təsiri cürbəcürdür, lakin, bir qayda olaraq, cisimlər arasındakı məsafədən asılıdır. Cisimlərdən heç olmazsa birinin yerini dəyişməsi qalan cisimlərə təsir edən qüvvələrin dəyişməsinə səbəb olur. Nəticədə cisimlər hərəkət etməyə başlayır, ancaq dərhal yox, "vəziyyətin" dəyişməsi barədə "informasiya aldıqca" hərəkət etməyə başlayır. Qarşılıqlı təsirdə olan



Qaçan dalğanı silindrik spiral formasında əyilmiş məftilin köməyilə modelləşdirmək olar. Onun ekrana yandan proyeksiyası sinusoiddir. Əgər spiralı fırlatmağa başlasaq, sinusoid ekranda spiralın oxu boyunca, qaçan dalğa kimi, yerini dəyişəcəkdir.

cisimlər bir-birinin ardınca hərəkətə gəldikdə (müəyyən gecikmə ilə), onların halının bu cür ardıcıl dəyişməsi prosesi *qaçan dalğa* adlanır.

Bütün mexaniki dalğalar, onların təbiətindən asılı olmayaraq, ümumi xassələrə malikdir: bircins mühitdə dalğanın sürəti sabitdir, mühit zərrəciklərinin hərəkəti isə dəyişənsürətlidir; bu zaman dalğanın sürəti zərrəciklərin sürətindən xeyli böyük olur; dalğa, mühit zərrəciklərinin yerini dəyişdiyi istiqamətdən fərqli olan istiqamətdə də yayılmağa, həm də zərrəciklərin orta vəziyyətlərindən olan meylindən olduqca böyük məsafələrə yayılmağa qadirdir.

Bir sözlə, dalğanın yayılması dalğa prosesinə cəlb olunmuş mühit zərrəciklərinin hərəkətindən tamam fərqlənir.

Düz səthdə dəqiq bir-birinin ardınca dik sıraya düzülmüş domino daşlarından ibarət sistemdə qaçan dalğa yaratmaq olar. Əgər ehtiyatla birinci daşı itələsək, onda o yıxılaraq ikincisini itələyəcək, ikinci üçüncünü itələyəcək və s. Bu cür ardıcıl yıxılma prosesində sıra boyunca dalğa qaçacaqdır.

İmpuls həyəcanlanması (birinci domino daşının itələnməsi) təklənmiş dalğa adlanan dalğanın əmələ gəlməsinə səbəb oldu. Əgər rəqslər elastiki mühitdə baş verirsə, onda yaranan dalğalar *akustik* və ya *səs dalğaları* adlanır. İnsan qulağı tezliyi 16 Hs-dən 20000 Hs-ə qədər olan rəqsləri qavrayır.

Səs dalğaları mənbələrinin (simlərin, səs tellərinin və s.) rəqsləri mühitdə bir-birini əvəz edən sıxlaşma və seyrəkləşmələr yaradır. Təzyiqin periodik dəyişmələri qulaq pərdəsinə çatdıqda, pərdə məcburi rəqslər etməyə başlayır. İlbiz formasında olan və reseptorları müxtəlif səs tezliklərinə köklənmiş daxili qulaq bu rəqsləri amplituda və tezliyə görə təhlil edir. Sonra bu rəqslər qulaq siniri vasitəsilə beyinə ötürülür və eşidilən səs kimi qavranılır.

Səth dalğaları, məsələn, suda yaranan dalğalar xüsusi növ dalğalara aiddir. Bu dalğaları külək, suya düşən və ya suda üzən cisimlər, yeraltı təkanlar, hətta Yerin fırlanması ilə bir yerdə



Hərəkət edən gəminin yaratdığı səth dalğaları.

SƏSİN GURLUĞU VƏ YÜKSƏKLİYİ

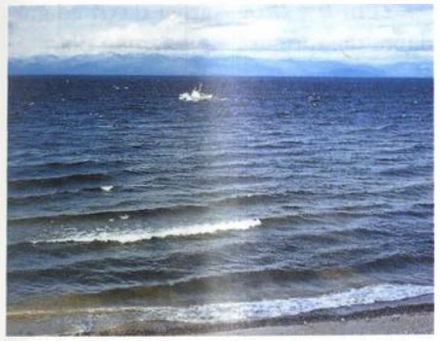
Səsin yayılması təzyiqin Δp dəyişmələrilə müşayiət olunur ki, bunlar da təxminən 10^5 Pa-a bərabər olan atmosfer təzyiqilə toplanır. Δp kəmiyyətinə *səs təzyiqi* deyilir.

Eşitmə hissinin subyektiv keyfiyyəti səs təzyiqinin amplitudundan asılıdır və *səsin gurluğu* adlanır. İnsanın eşidə biləcəyi ən zəif səslər üçün $\Delta p \approx 10^{-5}$ Pa, gur səslərə uyğun səs təzyiqləri isə onlarca paskala bərabərdir. Deməli, insan qulağı səs dalğaları amplitudunun 10^7 dəfə dəyişmələrini qəbul etməyə qadir olan olduqca mükəmməl bir qurğudur.

Sinusoidal səs dalğalarını qulaq müəyyən bir ton kimi eşidir. Hər bir ton yüksəkliklə xarakterizə olunur. Səsin yüksəkliyi, əsasən, dalğaların tezliyindən, lakin qismən onların intensivliyindən də asılıdır. Alçaq tezliklərə keçəndə qulağın həssaslığı kəskin azalır və qulaq ən alçaq tonu (16 Hs-ə yaxın tezlikli) yalnız səs təzyiqi 0,1 Pa-dan böyük olanda fərqləndirməyə başlayır.

İnsan nitqi də daxil olmaqla, sinusoidal olmayan rəqslərə qulaq tanına bilən *tembrə* malik *"mürəkkəb səs"* hissi ilə reaksiya verir. Hər bir musiqi akkorduna tezliklərin və amplitudların müəyyən münasibətlərilə xarakterizə olunan müəyyən bir spektral toplu uyğundur.

Belə olduqda, əsas tezliyin mütləq qiymətinin əhəmiyyəti yoxdur. İki sinusoidal rəqs (enerji sıxlıqları təxminən eyni olan) tezliklərin 1 : 2 nisbətində həmişə eyni bir akkord – oktava verir. 16 Hs-dən 20000 Hs-ə qədər səs diapazonu 10 oktavaya yaxın spektral oblastı əhatə edir ($2^{10} = 1024$ insan qulağının fərqləndirməyə qadir olduğu müxtəlif tonların sayıdır).



Ayın cazibəsi (dəniz qabarmaları və çəkilmələri) yaradır.

Səth dalğalarının ilk nəzəriyyəsini Nyuton özünün məşhur "Başlanğıclar" (1687-ci il) kitabında təsvir etmişdir. Lakin bu nəzəriyyə səhv fərziyyəyə əsaslanmışdı: su zərrəcikləri dalğada, sadəcə, aşağı-yuxarı rəqs edir. Bununla belə, Nyuton öz fərziyyəsinin dəqiqsizliyini anlayırdı: "Hər şey (dalğaların yayılması) fərziyyə daxilində elə baş verir ki, su zərrəcikləri şaquli düz xətt üzrə qalxır və düşür, ancaq onların yuxarı və aşağı hərəkətləri əslində düz xətt boyunca yox, daha doğrusu, dairə üzrə baş verir".

Səth dalğasında su zərrəciklərinin dairəvi hərəkəti haqqında Nyutonun zənni 115 ildən sonra, Praqada riyaziyyat professoru Frantişek Jozef Qerstner (1756–1832) 1802-ci ildə hidromexanika tənliklərinin su səthindəki dalğaları təsvir edən dəqiq və son dərəcə sadə həllini tapandan sonra təsdiq olundu. Qerstner dalğasında zərrəciklər həqiqətən çevrələr üzrə hərəkət edir, suyun səthi isə kəsikdə tsikloid (sürüşməsiz diyirlənən çevrə üzərindəki nöqtənin cızdığı müstəvi əyri) formasına malikdir.

1825-ci ildə "Dalğalar haqqında təcrübələrə əsaslanan təlim" adlı kitab işıq üzü gördü. Bu kitabda onun müəllifləri olan Veber qardaşları suda səth dalğaları üzərində apardıqları müşahidələrinin nəticələrini nəşr etdirmişdilər. Veberlər yan divarı şüşə olan uzun qutudan istifadə etmiş (sonralar bu qutunu Veberlər novu adlandırdılar) və onu Zaale çayının bulanıq suyu ilə doldurmuş və adi gözlə və ya zəif mikroskopla dalğada zərrəciklərin hərəkətini izləmişdilər. Onlar müəyyən etdilər ki, səth yaxınlığında zərrəciklərin trayektoriyaları çevrələrə yaxındır, dərinliyin artması ilə onlar yastılanaraq ellipsə çevrilir, çayın dibində isə zərrəciklər üfüqi istiqamətdə rəqs edirlər.

Rəqslərinin tezliyi $\nu > 20000$ Hs olanda dalğalar *ultrasəs* dalğaları, $\nu < 16$ Hs olduqda isə *infrasəs* dalğaları adlanır. İnsan infra- və ultrasəsləri eşitməsə də, onlar insan orqanizmində gedən proseslərə təsir edir. Bəzi heyvanlar, məsələn, balıqlar infrasəsi, itlər, delfinlər, balinalar, yarasalar isə ultrasəsi qavrayır.

HARMONİK DALĞALAR

Tutaq ki, elastiki cismin hər hansı bir nöqtəsi harmonik rəqslər edir, yəni onun tarazlıq vəziyyətindən ξ yer-



Alman təbiətşünasları: Ernst Henrix (1795-1878), Vilhelm Eduard (1804-1891) Veber qardaşları və Eduard (1806-1871) elmin müxtəlif oblastlarındakı nailiyyətlərilə məşhurdular. Vilhelm Qaussla əməkdaşlıq etmiş (onlar birlikdə qravürada əks olunmuşlar), dünyada ilk fizika laboratoriyasını yaratmış (1831-ci ildə Gettingen universitetində), elektrik və maqnit vahidlərinin mütləq sistemini işləyib hazırlamışdır; maqnit selinin vahidi onun adı ilə adlandırılmışdır. Ernst və Eduard eşitmə və görmə üzvlərinin fiziologiyasını tədqiq etmişlər. 1869-cu ildə Ernst Peterburq Elmlər Akademiyasının xarici müxbir üzvü olmuşdur. Vilhelm 16 il əvvəl bu şərəfə layiq görülmüşdü.

dəyişməsi zamandan asılı olub, $\xi(t)=A\sin\omega t$ funksiyası ilə təyin olunur, burada $\omega=2\pi/T$ – tsiklik (və ya dairəvi) tezlik, T – rəqs periodudur.

Bu yerdəyişmələr nöqtədən-nöqtəyə ötürüləcək, yəni cisimdə elastiki dalğa qaçacaqdır. İlkin nöqtədən x məsafədə yerləşən nöqtə həmin qanun üzrə yerdəyişmə etməyə başlayır, lakin x məsafəsini dəf etmək üçün dalğaya lazım olan zaman müddəti qədər sonra rəqsə başlayır. Əgər dalğa sabit v sürətilə yayılırsa, onda həmin zaman müddəti x/v-yə bərabərdir. Deməli, x məsafəsindəki nöqtənin t anındakı yerdəyişməsi, başlanğıc nöqtənin $t-x/v$ anındakı yerdəyişməsilə eyni olur. Beləliklə, ikinci nöqtənin hərəkəti artıq iki – t və x dəyişənlərindən asılı olacaqdır:

$$\xi\left(t,x\right)=A\sin\omega\left(t-\frac{x}{v}\right).$$

Harmonik dalğanın tənliyi alındı. Bu düsturda sinusun arqumenti *dalğanın tam fazası* Φ adlanır:

$$\Phi=\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)=\omega t-\frac{\omega}{v}x=\omega t-\frac{2\pi x}{vT}.$$

Burada vT hasili dalğanın bir rəqs periodu ərzində qət etdiyi məsafədir. O, *dalğa uzunluğu* adlanır və λ ilə işarə olunur: $\lambda=vT$. Əgər nöqtələr bir-birindən λ məsafəsində yerləşirsə, onda onların tarazlıq vəziyyətlərindən yerdəyişmələri eyni olacaqdır.

Yeni $k=2\pi/\lambda$ işarəsi daxil edərək, dalğa düsturunu belə yazmaq olar:

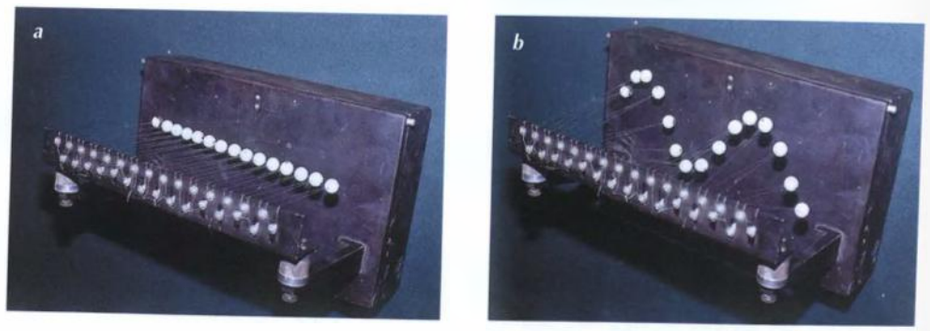
$$\xi(x,t)=A\sin(\omega t-kx).$$

Dalğa sim boyunca yayılanda rəqslərin fazası zamandan başqa bir x dəyişənindən, səlt mühitdə isə iki və ya üç fəza dəyişənlərindən asılıdır. Dalğanın tam fazasının sabit olduğu ($\Phi=\text{const}$) səthlər *dalğa səthləri* adlanır. Sadə halda onlar dalğanın yayılma istiqamətinə perpendikulyar olan və bu istiqamətdə $x/t=\omega/k=v_\Phi$ sürətilə yayılan müstəvilərdir.

Bu sürət *faza sürəti* adlanır. Harmonik dalğaların faza sürəti dalğaların yayılma sürəti ilə üst-üstə düşür.

k kəmiyyəti *dalğa ədədi* adlanır. Dalğalar nəzəriyyəsində o, rəqslər nəzəriyyəsindəki tsiklik dairəvi tezliyə analojidir. Əgər ω tsiklik tezliyi 2π saniyədəki rəqslərin sayıdırsa, *k* dalğa ədədi 2π metr məsafədə yerləşən dalğa uzunluqlarının sayıdır. ωt və kx hasilləri eyni ölçüyə malik olub, harmonik funksiyanın arqumentinə eyni hüquqla daxil olur.

Təbiətdə harmonik dalğalar (harmonik rəqslər kimi) mövcud deyildir. Bundan başqa, belə dalğa öz-özlüyündə heç bir informasiya daşımır. Harmonik dalğalardan informasiyanı ötürmək üçün istifadə etdikdə, onların amplitudunu və ya fazasını (tezliyini) zamana görə dəyişdirirlər; bu dəyişikliklər *modulyasiya* adlanır. Amplitud modulyasiyasına Morze əlifbasının siqnallarını misal göstərmək olar. Bu siqnallar az və çox davam edən (nöqtə və tire) harmonik dalğa parçalarından ibarətdir. Lakin dalğa parçası (çox vaxt alman sözü olan "tsuq" işlədilir) heç də harmonik dalğanın hamısı demək deyildir. Dalğa parçasının spektri bir harmonikadan yox, sonsuz sayda tezliklər toplusundan ibarətdir.



Harmonik dalğaları nümayiş etdirmək üçün Çebotaryov maşını: *a* – ilkin vəziyyət; *b* – harmonik dalğa.



DALĞA CƏBHƏSİ

Verilmiş zaman anında fəzanın artıq dalğavari prosesə cəlb olunmuş hissəsini rəqslərin hələ yaranmadığı oblastından ayıran dalğa səthinə *dalğa cəbhəsi* deyilir.

Dalğa cəbhəsi fəzada hərəkət edərək, adətən, öz formasını dəyişir. Nöqtəvi mənbəyin dalğa cəbhəsi radiusu zamana görə bərabərsürətlə artan sfera şəklindədir. Buna uyğun dalğa *sferik dalğa* adlanır. Zəng qülləsindən böyük məsafələrdə eşidilən zəngin səsi buna xarakterik misaldır.

Xətti mənbə *silindrik dalğalar* şüalandırır, mənbəyin özü isə onların silindrik cəbhəsinin oxudur. Suya düşən cisimdən su səthində dağılan dairələr – silindrik dalğa cəbhəsinin maye səthi ilə kəsikləridir.

Nəhayət, rəqs edən müstəvi lövhənin yaratdığı dalğa cəbhəsi də başlanğıcda mənbəyə paralel olan müstəvi olacaqdır. Onu qeyri-məhdud ölçülü hesab etmək və mücərrəd *müstəvi dalğa* anlayışı daxil etmək olar. Həm silindrik, həm də müstəvi dalğalar – bunlar real dalğaların yalnız təqribi təsviridir. Bir halda ki, istənilən mənbə fəzada məhduddur, onda bu mənbədən xeyli uzaqda dalğa cəbhəsi gec-tez sfera formasını alır. Lakin mənbədən olan məsafə artdıqca sferanın radiusu artır və onun səthi getdikcə daha çox müstəvi dalğanı, lakin, eyni zamanda bütün istiqamətlərdə yayılan müstəvi dalğanı xatırladır.

BİNAURAL EFFEKT

Nə üçün adamın və heyvanların iki qulağı var? Sən demə bu, səsə görə istiqamətlənərək, onun mənbəyinin harada yerləşdiyini təyin etmək üçün lazımdır. Məsələn, siçan pişiyin ona hansı tərəfdən gizlincə yaxınlaşdığını eşitsə, vaxtında özünü pişikdən qoruya bilər, pişik isə gəmiricinin xışıltısının haradan gəldiyini dəqiq bilməlidir, əks halda, o, tullanarkən səhv edə bilər.

Səsi iki qulaq vasitəsilə qəbul etməklə səs mənbəyinin yerini təyin etmək qabiliyyəti *binaural* (*lat.* bini – "iki" və auris – "qulaq") *effekt* adlanır. Onun mexanizmi kifayət qədər tam öyrənilməmişdir. Ancaq məlumdur ki, 1,5 kHs-dən kiçik tezliklərdə səsin sağ və sol qulağa çatma müddətləri arasındakı fərq həlledici rol oynayır. Ölçmələr göstərir ki, eşitmə üzvləri səslənmə müddətləri fərqi $3\cdot10^{-5}$ san olduqda, artıq ona reaksiya verir, yəni 1 sm "yollar fərqini" qeyd edir. Xüsusən bu, kəskin başlanğıca və ya xarakterik xüsusiyyətlərə malik olan səs və ya küylər olduqda. Daha yüksək tezliklərdə səs dalğalarının intensivliklərindəki rəqslər başın gövdəsilə şərtlənən fərqlər də təsir edə bilər.

Radiolokasiya kəşf olunana qədər hərbi işdə səstutanların (səs pelenqatorlarının) köməyilə düşmən təyyarələrini aşkar etmək üçün binaural effektdən istifadə olunmuşdur. 1941-ci ildə alman aviasiyasının Moskvaya hücumu zamanı qaranlıq vaxtı şəhərdə zenitçi qızlar tərəfindən idarə olunan xüsusi açıq avtomobillər hərəkət edirdi. Hər bir maşında zenit pulemyotları ilə yanaşı, dörd böyük rupor quraşdırılmışdı. Bu ruporlar cüt-cüt şaquli və üfüqi xətlər üzrə bir-birindən 3-4 m məsafədə yerləşdirilmişdi. Onlardan nazik uzun borucuqlar çıxırdı. Zenitçilər bu borucuqları qulaqlarına tuturdular. Bu cür üsulla böyük dəqiqliklə mühərrikin uğultusuna əsasən gözlə görünməyən düşmən təyyarələrini tapmaq və onlara vaxtında atəş açmaq mümkün olurdu.

Hər bir nöqtədə dalğa cəbhəsinə perpendikulyar olan xətlərə (əslində rəqslər bu xətlər boyunca yayılır) *şüalar* deyilir. Sferik dalğanın şüaları radial xətlər, müstəvi dalğanın şüaları isə paralel düz xətlər dəstəsidir.

UZUNUNA VƏ ENİNƏ DALĞALAR

Əgər dalğada zərrəciklərin hərəkət istiqaməti dalğanın yayılma istiqamətinə paraleldirsə, onda belə dalğa *uzu-*

Uzununa və eninə dalğaları modelləşdirən cihaz. Moskva Dövlət Universitetinin fizika fakültəsi.

nuna dalğa, perpendikulyardırsa, *eninə dalğa* adlanır.

Qazda və ya mayedə səs dalğaları uzununadır. Bununla belə, bərk elastiki cisimdə səs yalnız uzununa yox, həm də eninə dalğalar şəklində yayılır: bu cür cisimdə həm sıxılma – dartılma deformasiyaları, həm də sürüşmə (əyilmə) deformasiyaları baş verir. Yaxınlaşan qatarın təkərlərinin rels boyunca ötürülən taqqıltıları buna xarakterik misaldır.

Elastiki çubuqda uzununa dalğaların sürəti $v_{\parallel} = \sqrt{E/\rho}$, eninə dalğaların sürəti isə $v_{\perp} = \sqrt{G/\rho}$. Burada E – Yunq modulu (tətbiq olunan təzyiq ilə nisbi sıxılma deformasiyası arasındakı mütənasiblik əmsalı), G – sürüşmə modulu (toxunan gərginlik və radianlarla ölçülən sürüşmə bucağı arasındakı mütənasiblik əmsalı), ρ – çubuq materialının sıxlığıdır.

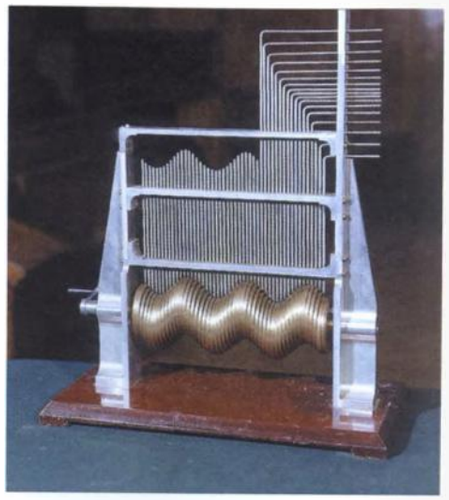
İki mühiti ayıran sərhəddən keçərkən, dalğaların yayılma istiqamətlərinin dəyişməsi *dalğaların sınması* adlanır.

Bəzi bərk mühitlərdə uzununa və eninə dalğaların yayılma sürəti (m/san)

Maddə	$v_{\parallel}$	$v_{\perp}$
Gümüş	3704	1698
Polad	5960	3235
Şüşə	5660	3420
Polistirol	2350	1120

Uzununa sürət eninə sürətdən böyükdür, ona görə də bərk mühitdə dalğa yayılan zaman uzununa və eninə dalğalara ayrıla bilər, həm də müşahidə nöqtəsinə əvvəlcə uzununa dalğa çatacaqdır.

Maye səthindəki dalğalar daha mürəkkəb eninə-uzununa xarakterə malikdir. Dalğalar yayılan zaman mühit zərrəciklərinin etdikləri dairəvi hərəkətlərə, eyni zamanda dalğanın eninə və uzununa baş verən və başlanğıc fazalar fərqi $\pi/2$ olan rəqslərin toplanması nəticəsi kimi baxmaq olar.



DALĞALARIN QAYITMASI VƏ SINMASI

Dalğanın yayılma sürətinin mühitin xassələrindən asılı olması mühitlərin sərhədində dalğaların qayıtması və sınması hadisələrini doğurur. Tutaq ki, elastiki dartılmış qaytan, az və ya çox qalınlığa malik olan və eyni materialdan hörülmüş iki hissədən ibarətdir. Qaytan qalın olduqca, orada eninə dalğalar bir o qədər yavaş qaçır. Ona görə də qaytanın hissələrinin birləşdiyi yerdə dalğanın sürəti öz qiymətini sıçrayışla dəyişir. Əgər belə qaytanda impulsu həyəcanlandırsaq, onda hissələrin uc-uca calandığı yerdə həmin impuls iki impulsa (kiçik amplitudlu) ayrılacaq. Onlardan biri öz hərəkətini əvvəlki istiqamətdə, lakin başqa sürətlə davam etdirir, ikincisi isə əvvəlki sürətlə, lakin əks istiqamətdə qaçır.

Bu xassə bütün mexaniki dalğalar üçün tipikdir, yəni iki mühiti ayıran sərhədə düşəndə iki dalğa əmələ gəlir: keçib gedən və qayıdan dalğalar. Xüsusi halda, əgər müstəvi dalğa iki mühiti ayıran müstəvi sərhədə bucaq altında düşürsə, onda həm qayıdan və həm də keçib gedən dalğalar, düşən

CON UİLYAM STRETT, LORD RELEY VƏ ONUN "SƏS NƏZƏRİYYƏSİ"

Con Uilyam Strett, üçüncü lord Releydən 1842-ci ilin 12 noyabrında atasının Lenq-ford-Qrovdakı (Böyük Britaniyanın Esseks qraflığında) malikanəsində anadan olmuşdur. O, çox yaxşı ev təhsili almış və Kembric universitetinin Trinitikollecinə daxil olmuşdur. Riyaziyyat üzrə buraxılış imtahanlarında birinci yeri tutaraq, oranı 1865-ci ildə bitirmişdir. 1866-cı ildən 1871-ci ilə qədər Strett Triniti-kollecdə işləmiş, 1871-ci ildən isə özünün Terlinq-Pleysdəki malikanəsində fizika laboratoriyası təşkil etmişdir. Burada o, bir çox tədqiqatlar aparmışdı. 1873-cü ildə, atasının ölümündən sonra Con lord Releydən titulunun varisi oldu. Alimi həmin ildə də London Kral Cəmiyyətinin üzvü seçdilər. Bir çox illəri Releydən orada katib işləmiş, 1905-ci ildən isə prezident postunu tutmuşdur. 1879-cu ildə C.Maksvell vəfat etdikdən sonra Releydən Kembric universitetinin ikinci professoru və Kavendiş laboratoriyasının direktoru oldu. O, özünün onillik rəhbərliyi müddətində laboratoriyanı genişləndirə bildi. 1887-1905-ci illərdə Releydən Londonda yerləşən Britaniya Kral İnstitutunun professoru, 1908-ci ildən isə Kembric universitetinin prezidenti oldu. O, ömrünün son saatına qədər elmi işlə fəal məşğul olmuşdur. Lord Releydən 1919-cu ilin 30 iyununda Terlinq-Pleysdə vəfat etmişdir.

Releydən bir çox eksperimental və nəzəri işlərin müəllifidir. Onun nəticələri klassik nəticələrə çevrilmişdir. Onun ən məşhur nailiyyəti 1894-cü ildə havanın sıxlığını və tərkibini dəqiq ölçməsi olmuşdur ki, məhz bunun sayəsində arqon və digər təsirsiz qazlar kəşf olundu. Arqonun kəşfi Releyə və onunla işləyən şotland kimyaçısı Uilyam Ramzaya (1852-1916) Nobel mükafatı qazandırdı (1904-cü il). Releydən həmçinin yeni növ səth dalğalarını (Releydən dalğaları, 1885-ci il) qabaqcadan xəbər vermiş, dalğaların faza və qrup sürətləri anlayışını inkişaf etdirmiş və onlar arasındakı əlaqəni müəyyən edən düstur çıxarmışdır. İşığın səpilmə nəzəriyyəsinin variantını təklif etdiyinə, o cümlədən "Səma nə üçün mavidir?" sualına cavab verdiyinə görə elm Releyə borcludur. Mütləq qara cismin spektrində temperaturdan asılı olaraq şüalanmanın paylanmasını təsvir edən Releydən-Cins qanunu da az məşhur deyil.



Alim maqnit özlüyü hadisəsini aşkar etmiş, refraktometr (Releydən refraktometri) quraşdırmış, prizmalı və difraksiyalı cihazların ayırdetmə qüvvəsini (Releydən kriteriyasını) müəyyən etmiş, diferensial manometr (Releydən manometri) və səsin şiddətini ölçən cihaz (Releydən diski) ixtira etmişdir.

Onun elədiklərinin hamısını saymaq mümkün deyil. Releydən çox aydın və dəqiq zəka sahibi idi. Elmi problemlərin həlli üçün həmişə sadə və orijinal vasitələr tapırdı. Bu mənada Releydən "Səs nəzəriyyəsi" adlı məşhur kitabının ikinci nəşrinə (1894-1896-cı illər) yazdığı ön sözdəki mühakimələri maraqlıdır:

"Mən riyazi tədqiqatlarımda, bir qayda olaraq, fizik üçün ən təbii görünən metodlardan istifadə etmişəm. Mücərrəd riyaziyyatçı isə bundan, bəzən (etiraf etməliyəm ki,) ədalətli olaraq, şərhin kifayət qədər ciddi olmamasından razı qalmayacaq. Lakin bu məsələnin iki tərəfi var. Doğrudan da vacib oldu-olmadı, mücərrəd riyaziyyatda həmişə şərhin yüksək dərəcədə ciddiliyinə riayət edirlər, fizik isə bəzən, onun öz nöqteyi-nəzərinə görə, kafi və inandırıcı olan arqumentlərlə kifayətlənməyə daha çox üstünlük verir. Mücərrəd riyaziyyatın daha ciddi üsulları fizikin başqa tərtib ideyalarla tərbiyələnmiş zəkasına daha çox yox, daha az inandırıcı görünə bilər. Bir çox daha çətin hallarda ən yüksək ciddiliyin tələb edilməsi o demək olardı ki, həmin məsələlərə tələblərin həddən çox olması ucbatından, ümumiyyətlə baxılmasın".

"Səs nəzəriyyəsi" kitabı Releydən yaradıcılığında ayrıca yer tutur. Burada o, təkcə akustikanın əvvəllər yaradılmış bütün nəzəriyyəsinə yenidən baxmamış, həm də kiçik amplitudlu rəqslər və dalğalar haqqında təlimin ilk sistematik şərhini vermişdir. "Səs nəzəriyyəsinin" birinci nəşrinin ön sözündə Releydən yazırdı: "Con Herşelin səs haqqında 1845-ci ildə yazdığı məşhur *Encyclopedia Metropolitana* məqaləsindən sonra, mövzunun riyazi şərhinə həsr edilmiş heç bir tam əsər çap edilməmişdir". Belə bir tədqiqata ehtiyac məhz Releydən bu kitabı yazmağa vadar etdi. Releydən artıq 1871-ci ildə onun planını götür-qoy etməyə başlamışdı. 1877-ci ildə işıq üzü görmüş birinci cild xətti rəqslərə, ikinci cild (1878-ci il) elastiki mühitdə yayılın dalğalara həsr olunmuşdu. Releydən mübaliğəsiz müasir xətti rəqslər və dalğalar nəzəriyyəsinin banisi hesab etmək olar: artıq kitabın girişində o, səsin rəqsvari təbiətini sübut edir. Yəqin ki, indi avtorəqs sistemləri adlanan sistemlərə ilk dəfə "Səs nəzəriyyəsində" baxılmış və mexaniki və elektrik rəqslərinin vəhdətinə dair fikir irəli sürülmüşdür.

Bu kitab Releydən tərəfindən yüz ildən də çox bundan əvvəl yazılmışdır. Lakin şərhin gözəl stili və materialın zənginliyi sayəsində indi də bu kitab rəqslər və akustik dalğalar nəzəriyyəsinə dair ən çox oxunan monoqrafiyalardan biri olaraq qalır.

DOPLER EFFEKTİ

Hər hansı mənbə (fərz edək ki, sim) ν tezlikli dalğalar buraxanda, bu dalğalar qəbuledicisiyə (məsələn, qulağa) çataraq, orada həmin tezlikli məcburi rəqslər həyəcanlandırır. Lakin ya mənbə, ya qəbuledici (ya da hər ikisi eyni zimanda) hərəkət edərsə, onda *Dopler effekti* müşahidə olunar. 1842-ci ildə Avstriya fiziki və astronomu Kristian Dopler (1803-1853) müəyyən etdi ki, mənbə və qəbuledici arasındakı məsafə azalanda qəbul edilən ν′ tezliyi hasil olunan ν tezliyindən böyük, əks halda isə az olacaqdır. Məsələn, yaxınlaşan avtomobilin siqnalının səsi daha yüksək, uzaqlaşan avtomobilin siqnalının səsi isə daha alçaq görsənir.

Dopler effekti kinematik təbiətə malikdir. Mənbə yaxınlaşanda qəbuledici dalğanın qonşu "qabarıqlarını" və "çökük-lərini" daha tez-tez "sıçrayıb keçir" ki, bu da tezliyin artmasına səbəb olur. ν′ və ν arasındakı əlaqəni maksimumların və minimumların sayının dəyişməzliyi şərtindən almaq olar. Bu şərt $\Phi=\omega t-kx=2\pi(\nu t-x/\lambda)$ fazasının hərəkət edən hesablama sisteminə keçdikdə invariant qalması ilə eynigüclüdür.

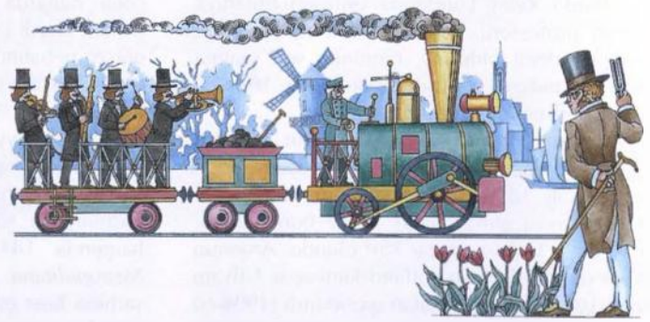
Tutaq ki, mənbə qəbuledicisiyə tərəf mühitə nəzərən u sürətilə hərəkət edir, şüalandırılan dalğaların sürəti isə v-dir. Onda qəbuledicinin x' və t' dəyişənləri ilə mənbəyin x və t dəyişənləri arasındakı əlaqə Qaliley çevrilmələri ilə veriləcəkdir, yəni $x'=x+ut$; $t'=t$. $\Phi'=\Phi$-dən alınır ki,

$$\nu'=\frac{\nu}{1-u/v}.$$

Qeyd edək ki, $u>v$ olduqda, bu ifadədən istifadə etmək olmaz (səs sürətindən böyük sürətlərdə), çünki $u=v$ olduqda, sağ tərəfdəki ifadə "sonsuz böyük" olur. Bu cür dalğalara *zərbə* dalğaları deyilir.

Dopler effektindən sürətölçən cihazlarda istifadə olunur. Hərəkət edən obyektə tərəf dalğa göndərərək və obyektdən əks olunan dalğaları qəbul edərək, onların tezlikləri fərqinə görə baxılan obyektin sürətini təyin edirlər.





Dalğa uzunluğuna nəzərən kiçik l_1, l_2, l_3 məsafələrində (məsələn, orta ölçülü otaqlarda) qayıdan dalğaların gecikməsi cüzidir və ona görə də səsin interferensiyası nəzərə çarpmır, interferensiya yalnız kifayət qədər böyük olan mənzillərdə rol oynayır.

dalğanın yayıldığı istiqamətdən fərqli olan istiqamətlərdə yayılır.

Dalğanı əks etdirməklə, dalğa cəbhəsinin formasını dəyişmək olar. Məsələn, müstəvi səs dalğası çökük yarımsferik rezonatorun üzərinə düşürsə, onda qayıdandan sonra o, yığılan sferik dalğaya çevrilir. Həm də nəzərə almaq lazımdır ki, dalğanın radial şüalarının kəsişmə nöqtəsində – *fokusda* – sferik cəbhə nöqtəvi cəbhəyə cırlaşır və səsin intensivliyi xeyli güclənir. Bu akustik hadisədən qədim teatrlarda istifadə olunmuşdur.

Bərk səthə rast gəldikdə dalğaların qayıtması hadisəsi obyektlərin səs *exolokasiyasında* öz tətbiqini tapmışdır. Müəyyən istiqamətdə qısa dalğalar qrupu göndərərək və qəbuledicinin köməyilə qayıdan dalğaların geriyə, şüalandırıcıya gəlib çatma t müddətini ölçərək, maneəyə qədər olan l məsafəsini $l=vt/2$ düsturunun köməyilə təyin etmək olar, burada v – səsin mühitdəki sürətidir.

Dalğa uzunluğu kiçik olduqca, dalğanın enerjisini bir o qədər asanlıqla verilmiş istiqamətdə cəmləmək olur. Bu səbəbdəndir ki, exolokasiyada ultrasəsdən istifadə olunur. Ultrasəs dalğaları havadakına nisbətən suda xeyli zəif söndüyünə görə, exolokasiyadan *hidroakustikada* xüsusilə geniş istifadə edirlər.

DALĞALARIN İNTERFERENSİYASI VƏ DİFRAKSİYASI

Əgər iki koherent harmonik dalğa (eyni tezlikli və fazalar fərqi sabit qalan) eyni bir nöqtədə görüşürsə, onda rəqslərin toplanması baş verir. Bu hadisə dalğaların *interferensiyası* adlanır. Əgər dalğalar verilmiş nöqtəyə eyni fazada gəlirsə və ya dalğalardan biri digərindən periodun tam mislilərі qədər (cüt sayda π qədər) geri qalırsa, onda onlar bir-birini gücləndirir. Fazalar fərqi π-nin tək sayda mislilərinə bərabər olduqda isə tam döndürür.

İnterferensiya, məsələn, teatrda müşahidə olunur. Səs dinləyiciyə ya birbaşa səhnədə (l_1 qədər yol qət edərək), ya da divarlardan əks olunaraq (yəni l_2+l_3 qədər yol qət edərək), gəlib çatır. Əgər $(l_2+l_3)-l_1=m\lambda+\lambda 2=(2m+1)\pi$ (burada m – tam ədəddir) isə, onda tamaşaçı pis eşidir. Bu, enerjinin saxlanması qanununa heç cür zidd deyil: qonşuluqdakı tamaşaçıya, əksinə, güclənmiş səs gəlib çatacaqdır ($l_2'+l_3'-l_1'=m\lambda$). İnterferensiya nəticəsində enerjinin itməsi yox, fəzada yenidən paylanması baş verir. "Kar" kresloların əmələ gəlməsinin qarşısını almaq üçün, teatr zallarında divarlara səsuducu materiallardan üz çəkirlər, tamaşa zalının yan tərəflərində xüsusi formalı lojalardan istifadə olunur və s.

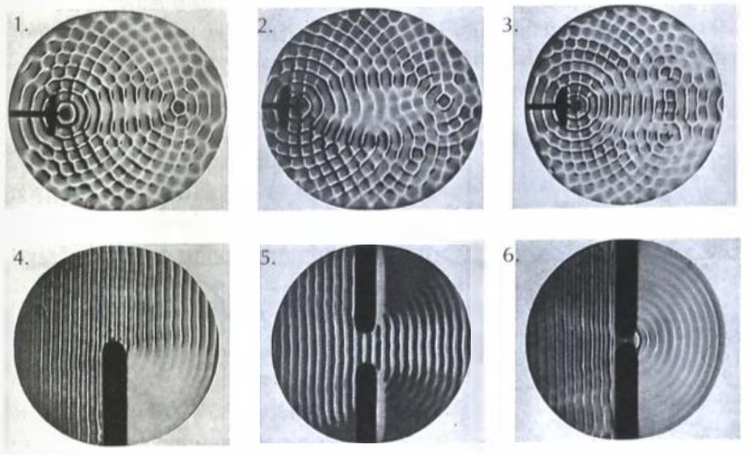
Şüalar səskeçirməyən maneəyə rast gəldikdə, onun kənarından kip keçərək, öz düzxətliliyini saxlamır, qismən səs kölgəsi oblastına düşür. Dalğalar, sanki, öz yollarında rast gəldiyi maneələri aşır.

Əgər dalğa cəbhəsinin yoluna üzərində deşiyi olan müstəvi ekran qoysaq, onda oradan artıq paralel şüalar dəstəsi deyil, dar, dağılan konus çıxacaqdır. Dalğa cəbhəsinin məhdud hissəsinin əyilməsi nəticəsində şüaların bu cür dağılması dalğaların *difraksiyası* adlanır.

Difraksiya sayəsində dalğa, ölçüləri onun uzunluğundan böyük olmayan obyektləri tam aşır. Səsin yolunda, məsələn, ovuc boyda maneə dururs a, onu yalnız qulaq vasitəsilə aşkara çıxarmaq olmaz. Böyük faner lövhə səs selinin qabağını gözəçarpan dərəcədə kəsir və maneənin olduğunu hətta gözləri yumulu halda da müəyyən etmək mümkündür.

Dalğaların səs kölgəsi oblastına dönməsi, yeri gəlmişkən deyək ki, açıq qapının və ya pəncərənin yan tərəfində (üzbəüz yox) dayanmaqla, otaqda danışan adamı eşitməyə imkan verir, həmin adamı görmək isə mümkün deyil, çünki işıq dalğalarının difraksiyası olduqca kiçikdir.

İlk əvvəllər difraksiya dedikdə dalğaların rast gəldikləri maneələri aşması hadisəsi başa düşülürdü. Müasir anlamda dalğaların difraksiyasına, faktiki olaraq, dalğaların istənilən ölçülü obyektlərlə, hətta ölçüləri düşən dalğanın uzunluğuna nəzərən kiçik olan obyektlərlə qarşılıqlı təsiri zamanı yaranan bütün effektlər aiddir.



Suyun səthində dalğaların interferensiya və difraksiyası.

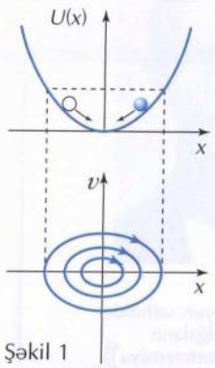
1. İki nöqtəvi vibratordan gələn dalğalar eyni fazada rastlaşaraq bir-birini gücləndirir.
2. Dalğalar əks fazada görüşərək, biri digərini söndürür.
3. Dairəvi divardan əks olunan dalğalar müxtəlif nöqtələrə müxtəlif fazalarda gəlib çatır. Suyun səthində amplitudu böyümüş zonalarla qonşu olan "kölgə" oblastları görünür.
4. İri vibratordan gələn müstəvi dalğa maneənin kənarlarını aşır.
5. Böyük yarıqdan keçən dalğa tədricən genişlənir.
6. Kiçik yarıqdan keçən müstəvi dalğa sferik dalğaya çevrilir.

FAZA FƏZASI

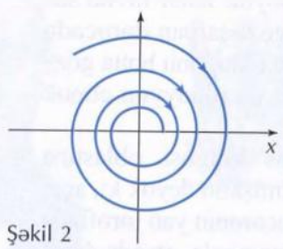
"Əgər kitabda nə şəkillər, nə də dedi-qodu yoxdursa, onda bu kitabın nə xeyri var? – deyə Alisa düşündü".

L.Kerroll. "Alisa möcüzələr ölkəsində"

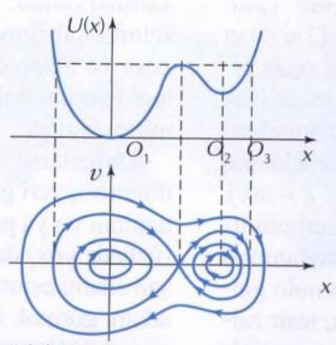
Alisa kimi fiziklər də şəkilləri sevirlər. Onlar öz mühakimələrini şəkillərlə əsaslandırırlar. Xüsusi olaraq icad edilmiş, xəyali *faza fəzasından* istifadə edildikdə olduqca təsirli şəkillər alınır. Faza fəzasının hər bir nöqtəsi sistemin müəyyən halına uyğundur və *təmsilçi, təsviredici* və ya sadəcə (x; *v*) – *faza nöqtəsi* adlanır. Burada x – vəziyyətin koordinatı, v isə sistemin sürətidir. Zaman keçdikcə sistemin halı dəyişə bilər. Bu halda faza fəzasında təsviredici nöqtənin də vəziyyəti başqa olur, bu nöqtə *faza trayektoriyası* cızır. Bütün faza trayektoriyaları (və ya, ən azı, ən xarakterik olanları) sistemin *faza portretini* əmələ gətirir.



Şəkil 1



Şəkil 2



Şəkil 4

Kiçik faza "portret qalereyasına" baş çəkək. Sürtünmə olmadıqda parabola üzrə rəqs edən (şəkil 1) xətti ossilyatorun, məsələn, kürəciyin halının zamana görə necə dəyişdiyinə baxaq. Bu cür xətti ossilyatorun faza portreti həminki şəkildə aşağıda təsvir olunmuşdur. Koordinat başlanğıcı tarazlıq vəziyyətinə uyğundur. Bu, tərpənməz nöqtədir (kürəcik həmin nöqtədə sükunətdədir) və *mərkəz* adlanır. Faza trayektoriyaları ellipslər şəklindədir. Bu ellipslərin ölçüləri kürəciyin enerji ehtiyatından, yəni parabola üzrə hansı hündürlüyə qalxmasından asılıdır.

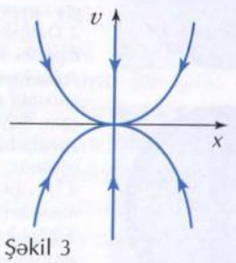
Lakin sürtünməni "daxil edən" kimi xətti ossilyatorun faza diaqramı dəyişəcəkdir: kürəcik enerjinin bir hissəsini sürtünməni dəf etməyə sərf edəcək və rəqslər tədricən sönməyə başlayacaqdır. Kiçik itkilər zamanı xətti ossilyatorun faza portreti 2-ci şəkildə (burada tarazlıq vəziyyəti dayanıqlı fokusdur), böyük itkilər zamanı isə 3-cü şəkildə göstərilmişdir (tarazlıq vəziyyəti *dayanıqlı düyündür*).

Əgər kürəcik sürtünməsiz olaraq 4-cü şəkildə yuxarıda təsvir olunmuş daha mürəkkəb əyri üzrə hərəkət edirsə, onda onun faza diaqramı həminki şəkildə aşağıda göstərildiyi kimi olacaqdır.

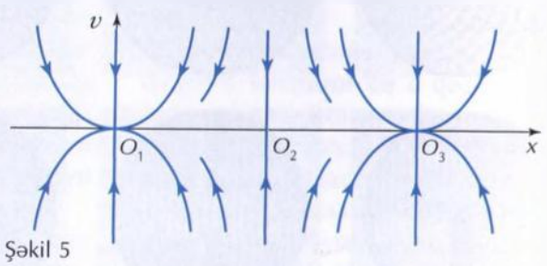
O_1 və O_3 tərpənməz nöqtələri (*dayanma nöqtələri*) *mərkəzlər*, iki "çökəklik" arasındakı aşırıma uyğun gələn O_2 nöqtəsi isə *yəhər* nöqtəsi adlanır. Kiçik enerjilərdə O_1 və O_3 tarazlıq vəziyyətindən çıxarılmış kürəcik, həmin tarazlıq vəziyyəti ətrafında, əvvəlcə olduğu çuxurda qalmaqla, kiçik rəqslər edir. Kürəciyə verilən enerji yəhəri aşmaq üçün kifayət etdikdə isə kürəcik bir cuxurdan digərinə keçməklə rəqslər edir.

Faza portretinin xarakterik xüsusiyyətinin yox olması və ya əmələ gəlməsi *fəlakət* adlanır. Məsələn, müəyyən şərtlər daxilində iki dayanıqlı O_1 və O_3 düyünləri və bir O_2 yəhəri olan faza portreti (şəkil 5) bir dayanıqlı düyünü olan sistemə çevrilə bilər (şəkil 3). Yəhərin yox olması və əvvəlki iki düyünün yerinə bir düyünün əmələ gəlməsi fəlakətdir.

Çoxölçülü sistemlərin faza fəzası və faza diaqramları çoxölçülüdür. Bu halda əyanilik itir, lakin mürəkkəb sistemlərin həndəsi və topoloji tədqiqat metodları əvvəlki kimi qalır.



Şəkil 3



Şəkil 5

QEYRİ-XƏTTİ RƏQSLƏR

Proseslərin, o cümlədən də rəqslərin qeyri-xəttiliyi riyazi olaraq uyğun hərəkət tənliklərinin qeyri-xəttiliyində öz əksini tapır. Fizika baxımından rəqslərin qeyri-xəttiliyi iki tamamilə müxtəlif xassələrlə – anharmoniklik və qeyri-izoxronluq xassələrilə xarakterizə olunur. *Anharmoniklik* dedikdə rəqslərin spektrində əsas tezliyin misillərinə bərabər olan tezliklərin – *Furye harmonikalarının* və ya *obertonların* olması başa düşülür. Tezlikləri (əsas və ya yüksək harmonikaların) rəqs amplitudundan və ya enerjisindən asılı olan rəqslərə *qeyri-izoxron rəqslər* deyilir.

Qeyri-xətti rəqslərə klassik misal planetlərin Günəş ətrafında fırlanması məsələsi ola bilər. Müasir mexanikanın və fizikanın yaranması bu məsələnin həllindən başlamışdır. Keplerin üçüncü qanununa görə, planetlərin Günəş ətrafında ω dövretmə tezliyi onların tam enerjisi ilə təyin olunur: $\omega \approx |E|^{3/2}$.

Qeyri-izoxronluq, ümumiyyətlə desək, anharmonikliklə bağlı deyil. Məsələn, sabit maqnit sahəsində dairəvi orbit üzrə işıq sürətinə yaxın sürətlə hərəkət edən yüklü zərrəcik sırf harmonik rəqslər edir, onun fırlanma tezliyi isə enerji ilə tərs mütənasibdir.

QEYRİ-XƏTTİ OSSİLYATOR

Xətti (sönmə olmadıqda – harmonik) ossilyator – xətti rəqslər nəzəriyyəsinin əsas modelidir. Onun hərəkət tənliyi (Nyutonun ikinci qanununa əsasən)

$$\ddot{x} = ax + b \qquad (1)$$

kimidir. Burada x – o kəmiyyətdir ki, onun rəqsləri baxılan modeli təsvir edir (rəqqasın yerdəyişməsi, amplitudu, rəqs konturunda cərəyan və ya gərginlik, populyasiyanın sayı və s.), $\ddot{x}$ – həmin kəmiyyətinin "təcilidir".

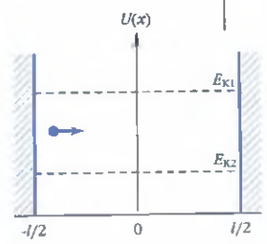
Qeyri-xətti ossilyator qeyri-xətti rəqslər nəzəriyyəsinin əsas modelidir. Onun hərəkət tənliyi

$$\ddot{x} = f(x) \qquad (2)$$

şəklindədir, burada $f(x)$ – qeyri-xətti funksiyadır və onun ən azı bir qeyri-xətti (x-ın birinci dərəcəsi olmayan) həddi var. Sistemin tam enerjisi zamandan asılı deyil, yəni sistem *konservativ sistemdir*.

Məsələn, müstəvi potensial çuxurda – sonsuz yüksək divarları olan qutuda:

$U(x) = 0, -l/2 < x < l/2$ olduqda;
$U(x) = \infty, x \leqslant -l/2, x > l/2$ olduqda



yerləşən zərrəcik qeyri-izoxron rəqslər edir.

Zərrəcik qutu daxilində sabit sürətlə hərəkət edir və sərhədlərdə ani olaraq elastiki əks olunur. Onun kinetik enerjisi $E_K = mv^2/2$, yəni sürəti $v = \sqrt{2E_K/m}$ enerjidən asılıdır. Zərrəciyin rəqslərinin periodu

$$T(E_K) = \frac{2l}{U(E_K)} = \sqrt{\frac{2ml^2}{E_K}} \qquad (3)$$

düsturu ilə ifadə olunur.



(3) düsturundan görünür ki, rəqs periodu enerjinin artması ilə azalır (başqa sistemlər üçün period arta bilər).

Ossilyatorun (konservativ qeyri-xətti sistemin) E enerjisinin saxlanması qanunu aşağıdakı şəklə malikdir:

$$\frac{mv^2}{2} + U(x) = E = \text{const}.$$

Qeyri-xətti ossilyatorun hərəkətinin keyfiyyətcə tam mənzərəsini onun faza portreti verir. Enerjinin saxlanması qanunundan (x, v) faza müstəvisində modelin trayektoriyasının tənliyini çıxara bilərik:

$$v = \pm\sqrt{\frac{2}{m}\left[E - U(x)\right]}. \qquad (4)$$

Doğrudan da, rəqsin enerjisi saxlandığına görə $t = 0$ anında verilmiş E kinetik enerjini və məlum $U(x)$ asılılığını bilərək, (4) tənliyindən v sürətini tapmaq və sonra isə prosesin faza trayektoriyalarını çəkmək çətin deyildir. (4) tənliyindən çıxır ki, enerjisi $E_0 < U(x)$ olan hərəkətlər mövcud deyil, çünki

LEONİD İSAAKOVİÇ MANDELŞTAM

Akademik Leonid İsaakoviç Mandelştamın (1879-1944) kəşflərinin və fundamental işlərinin hətta tam olmayan siyahısı öz müxtəlifliyi ilə adamı heyran edir: işığın kombinasion və fluktasion səpilməsi, mikroskopun nəzəriyyəsi, qeyri-xətti rəqslər və radiotexnika, rezonanslar nəzəriyyəsi, radiogeodeziya, elektromaqnit dalğalarının yeni növ generatorları olan parametrik maşınlar. L.İ.Mandelştamın öz işlərinin nəticələrinə qarşı son dərəcə, xəstəlik dərəcəsində, tələbkarlığı bu siyahıya bir sıra digər əhəmiyyəti az olmayan kəşfləri, məsələn, 1912-ci ildə (Stüart və Tolmenin klassik təcrübələrindən bir neçə il əvvəl) elektronların metallarda ətalətliyinin eksperimental aşkar edilməsini daxil etməyə imkan verməmişdir.

Ancaq Mandelştamın elmi yaradıcılığında əldə etdiyi nailiyyətlərin müxtəlifliyi və maraqlarının genişliyi içərisində açıq-aşkar başlıca mövzu – rəqslər nəzəriyyəsi seçilir. İlk dəfə rəqslər nəzəriyyəsi ilə lord Releyin ikicildlik "Səs nəzəriyyəsi" kitabı üzrə tanış olan Mandelştam onun gözəlliyini dərk etmiş və dəfələrlə, fizikanın müxtəlif bölmələrindən olan nəticələr arasında analogiyalar tapmağa imkan verən "rəqslərin köməyinə" əl atmışdır.

Mandelştamda nəzəriyyəçi və eksperimentator, tədqiqatçı və mühəndis keyfiyyətlərinin çox nadir birləşməsi xoşbəxtcəsinə təcəssüm etmişdi. O deyirdi ki, birinci növ və ikinci növ başadüşmə mövcuddur. Birinci növ başadüşmə zamanı yazılanın hamısını oxuyub başa düşürlər, istənilən düsturu çıxara bilərlər, lakin oxuduqlarına aid istənilən suala hələ müstəqil cavab verməyə qadir deyillər. İkinci növ başadüşmə zamanı bütün mənzərə, bütün ideyaların, hadisələrin əlaqəsi aydın olur. Mandelştam bütün fizikanı ikinci növ başadüşmə səviyyəsində bilirdi və öz biliyini çoxsaylı tələbələrilə (onların arasında A.A.Andronov, A.A.Vitt, Q.S.Qorelik, Q.S.Landsberq, M.A.Leontoviç, V.V.Miqulin, S.M.Rıtov, S.P.Strelkov, İ.Y.Tamm, S.E.Xaykin, S.P.Şubin və b. da var idilər) və ali məktəb tələbələrilə həvəslə bölürdü.

Mandelştam Moqilyovda, dünyaya alimlər, həkimlər, yazıçılar vermiş bir ailədə anadan olmuşdur. Tezliklə onun ailəsi Odessaya köçdü. Oğlan 12 yaşına qədər evdə, sonra gimnaziyada oxudu və oranı qızıl medalla bitirdi. 1897-ci ildə o, Odessada Novorossiya universitetinin fizika-riyaziyyat fakültəsinin riyaziyyat bölməsinə daxil oldu. İki ildən sonra tələbə iğtişaşları ilə bağlı olaraq gənci universitetdən qovdular. Valideynlərinin məsləhəti ilə Mandelştam fiziki tədqiqat mərkəzlərindən biri olan Strasburqa getdi və orada təhsilini davam etdirdi. Strasburq universitetində o vaxt riyaziyyatçı Henrix Veber (Rimanın tələbəsi və "Riyazi fizikanın diferensial tənlikləri" kimi klassik kursun müəllifi), fizik Ferdinand Braun (əvəzçiliklə fizika institunun direktoru) dərs deyirdilər. Nəzəri fizika kafedrasına isə Emil Kon (məşhur "Elektromaqnit sahəsi" əsərinin müəllifi) rəhbərlik edirdi.

Mandelştamın elmi istedadı F.Braunun sayəsində üzə çıxdı. O, istedadlı tələbəsinə tam sərbəstlik vermişdi. 1902-ci ildə Leonid İsaakoviç natural fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün "Kondensatorun rəqsi boşalması periodunun təyini" mövzusunda dissertasiya müdafiə etdi. Universiteti bitirdikdən sonra o, əvvəlcə Braunun şəxsi assistenti oldu. Lakin artıq 1903-cü ildə Fizika institutunun ştatlı ikinci, sonra isə birinci assistenti oldu. Strasburqda gənc alim Q.Brandeslə birlikdə radiorabitə sahəsində özünün ilk kəşfini etdi. Nəzəri təhlil onu, tezliklə eksperimentdə təsdiq olunan bir parodoksal nəticəyə gətirdi: siqnalın qəbulu antena ilə mürəkkəb sxemin aralıq konturu arasındakı əlaqənin gücləndirilməsi zamanı yox (bir çoxlarını düşündüyü kimi), zəiflədilməsi zamanı yaxşılaşır. Rəqslər nəzəriyyəsinə və radiofizikaya aid işlərindən birincisi 1904-cü ilə təsadüf edir. Bu iş onun N.D.Papaleksi ilə məhsuldar əməkdaşlığının başlanğıcını qoydu.

Mandelştamın həyatının Strasburq dövrü həddən artıq məzmunlu olmuşdur. O burada fizikanın klassiklərinin, o cümlədən Bolsmanın, Helmholtsun, Hersin, Lorensin, Releyin əsərlərini öyrənir. Müxtəlif mühitlərdən işığın keçməsinə aid eksperimentlər aparır, mühazirələr oxuyur. Bu mühazirələrdə fiziki hadisələrin gözəlliyini və dərinliyini dinləyicilərə çatdırmaq məharəti dərhal özünü büruzə verdi. Bunlar şəffaf cisimlərin optik xassələrinə, dispersiyaya, elektro- və maqnitooptikaya, rezonans hadisələrinə, simsiz teleqrafın fiziki əsaslarına dair mühazirələr idi.

1908-ci ildə Mandelştam Strasburq Təbiətşünaslar və Həkimlər Cəmiyyətinə, 1912-ci ildə isə Alman Fiziklər və Təbiətşünaslar Cəmiyyətinə üzv seçilmişdir. (Hitlerin hakimiyyətə gəlişindən sonra alim Alman cəmiyyətindən çıxdı.)

1914-cü il iyulun sonunda, Birinci Dünya müharibəsi dövründə Mandelştam Odessaya qayıtdı və tezliklə Petroqrada köçdü. Burada o, 1915-1917-ci illərdə "Simens və Qalsk" radioteleqraf zavodunda məsləhətçi işlədi. Mandelştamın tələbəsi və çoxillik əməkdaşı olmuş E.Y.Şeqolevin sözlərinə görə, Leonid Mandelştamla işləyənlər həmişə heyran olurdular ki, "bəzən çox-çox çətin olan texniki məsələlər Leonid İsaakoviç tərəfindən həm gözəl və hərdənbir dahiyanə, həm də o qədər sadə həll edilirdi ki, istər-istəməz bizim hər birimizdə belə sual yaranırdı ki, niyə bu əvvəl mənim ağlıma gəlməmişdir?"

1917-ci ilin payızında Mandelştamı Tiflis Politexnik İnstitutunun fizika professoru seçdilər, lakin artıq bir ildən sonra, 1918-ci ilin payızında alim Odessaya qayıtdı. Burada Odessa Politexnik İnstitutunun yaradılmasında və fizika laboratoriyasının təşkilində aktiv iştirak etdi. Ancaq cihazların və ədəbiyyatın olmaması ucbatından elmi tədqiqatları genişləndirmək mümkün olmadı. 1922-ci ildə Mandelştam Elektrotexnika trestinin elmi məsləhətçisi kimi Moskvaya, 1924-cü ildə isə Leninqrada köçdü. Orada o, Papaleksi ilə birlikdə Mərkəzi radiolaboratoriyada radioteleqraf və radiotelefon modulyasiyasının, tezliyin stabilləşdirilməsinin yeni üsullarını, həmçinin yüksək selektiv qəbuledicilərin sxemini yaratdı. Mandelştam radiolaboratoriya ilə əməkdaşlığını 1925-ci ildən sonra da, artıq MDU-da nəzəri fizika kafedrasına rəhbərlik etdiyi və universitetin nəzdindəki Elmi Tədqiqat Fizika İnstitutunda işlədiyi vaxt da davam etdirirdi. Həmin vaxtdan da onun elmi və pedaqoji fəaliyyətinin çiçəklənməsi dövrü başlandı. MDU-nun divarları arasında o, fizikanın mühüm problemlərinə dair seminarlar aparır, çoxsaylı dinləyicilərin diqqətini cəlb edən mühazirələr kursu oxuyurdu. Alimin ətrafında fiziklərdən – optika, rəqslər nəzəriyyəsi, molekulyar fizika və s. sahələrin mütəxəssislərindən ibarət gözəl məktəb formalaşdı.

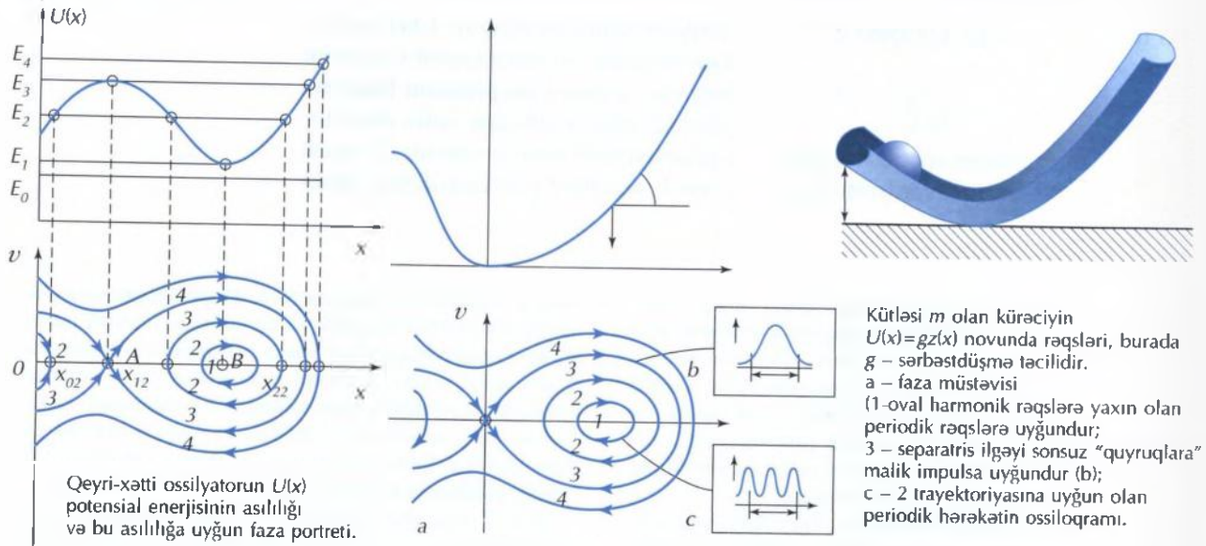


1920-ci illərin axırı – 1930-cu illərin əvvəlində Mandelştam qeyri-xətti rəqslər haqqında təlim yaratdı və fiziklərə "qeyri-xətti təfəkkürü" – xüsusi, qeyri-xətti obrazları xətti obrazlara gətirmədən, onlarla işləməyə imkan verən qeyri-xətti intuisiyanı aşılamaq proqramını formulə etdi. 1928-ci ildə o, Q.S.Landsberqlə birlikdə fundamental kəşf etdi, yəni işığın kombinasion səpilməsini müəyyən etdi. Eksperimentin qoyuluşunda son dərəcə dəqiqlik və özünə qarşı yüksək tələbkarlıq Leonid İsaakoviçə imkan vermədi ki, tədqiqatın nəticələrini, onları dəfələrlə yoxlamadan çap etdirsin. Nəticədə o, birinciliyi itirdi: mətbuatda kombinasion səpilmənin kəşfi barəsində ilk dəfə hind fiziki Çandrasekxar Raman (1988-1970) xəbər verdi. Ç.Raman 1930-cu ildə Nobel mükafatına layiq görüldü.

1928-ci ildə Mandelştam SSRİ Elmlər Akademiyasına müxbir üzv, artıq 1929-cu ildə isə həqiqi üzv seçilmişdir. 1934-cü ildə o, SSRİ EA Fizika İnstitutunun yaradılmasında iştirak etmişdir.

İkinci Dünya müharibəsi həyatın dinc axarını pozdu. Hökumətin qərarı ilə digər akademiklərlə birlikdə Mandelştam Qazaxstana evakuasiya olundu. O burada Borovoe qəsəbəsində yaşadı. Lakin Moskvadan uzaqda da Leonid İsaakoviç Fizika institutu ilə əlaqə saxlayırdı. S.L.Mandelştam (onun oğlu, o da fizikdir), İ.Y.Tamm, N.D.Papaleksi, S.M.Rıtov tez-tez onun yanına gəlirdilər. Alim planlar qurur, gələcək monoqrafiyalar üzərində düşünürdü.

Artıq xəstə vəziyyətində Moskvaya qayıdan Mandelştam təkid etdi ki, tələbələrə mühazirələr kursu oxusun. Həmin mühazirələr sonralar "Optika, nisbilik nəzəriyyəsi və kvant mexanikasına dair mühazirələr" adı altında çap olundu (1972). Papaleksi xatırlayırdı ki, "...bu mühazirələr onun axırıncı açıq çıxışları idi. Onlar ona baha başa gəlmişdi. Çox vaxt mühazirə qabağı o, özünü pis hiss edirdi, lakin auditoriya qarşısında öz zəkasının bütün parlaqlığı ilə çıxış edirdi. Onun 1944-cü ilin yazında oxuduğu dörd mühazirə artıq məlum olan mövzuların təkrarı deyildi. O, bu mühazirələrə ömrünün axırıncı illərində üzərində daha çox düşündüyü bir çox şeyləri, o cümlədən rəqslər nəzəriyyəsinin bütün fizika üçün əhəmiyyətinə dair bir sıra yeni fikirlərini daxil etmişdi. L.İ.Mandelştamın qısa tərcümeyi-halını bu mühazirələri yada salmaqla bitirmək təbiidir. Həmin mühazirələr onun ən coşqun və gözəl əsəridir".



Qeyri-xətti ossilyatorun $U(x)$ potensial enerjisinin asılılığı və bu asılılığa uyğun faza portreti.

Kütləsi m olan kürəciyin $U(x)=gz(x)$ novunda rəqsləri, burada g – sərbəstdüşmə təcilidir.
a – faza müstəvisi (1-oval harmonik rəqslərə yaxın olan periodik rəqslərə uyğundur; 3 – separatris ilgəyi sonsuz "quyruqlara" malik impulsa uyğundur (b); c – 2 trayektoriyasına uyğun olan periodik hərəkətin ossiloqramı.

belə olduqda v kəmiyyəti xəyali olur. Başlanğıc E_2 enerji səviyyəsinə $0<x<x_{02}$ və $x_{12}<x<x_{22}$ hissələrində hərəkət uyğundur, burada x_{02}, x_{12} və x_{22}, $v=0$ şərtindən, yəni $E_2=U(x)$-dən təyin olunur. Bu cür hərəkətin faza trayektoriyaları 2 rəqəmi ilə işarə olunmuşdur. $U(x)$ əyrisində "təpəciklər" və ən aşağı nöqtələr tarazlıq hallarıdır. Qeyri-xətti ossilyatorun hərəkətinin xarakteri başlanğıc enerjidən asılıdır. Kiçik amplitudlu rəqslər harmonik rəqslərdir. Enerjinin artması ilə onlar harmonik rəqslərdən daha çox fərqlənir: hərəkət periodik olanda periodun çox hissəsini yavaş bölmələr tutur. Məsələn, kürəcik novda diyirlənən zaman yavaş bölmələrə yamacın yuxarı hissəsində qalxma və yamacdan enmənin başlanğıcı uyğundur. E_3 enerjisində hərəkət daha periodik olmur. Faza diaqramında bu hərəkət 3 əyrisi ilə təsvir olunur. Bu əyri *separatrisa* (*lat.* separatio – "ayırma") adlanır və periodik hərəkətlərin trayektoriyalarını digər mümkün trayektoriyalardan ayırır.

Daha bir misal – uzununa dalğanın periodik elektrik sahəsində elektronun davranışıdır. Bu sahə $\varphi=\varphi_0\cos(\omega t-kx)$ qanunu ilə dəyişir. Əgər belə sahəyə kifayət qədər böyük sürətli elektronla "atəş açsaq", onda elektron dalğa tərəfindən "zəbt olunmur" və yalnız sürətin rəqslərinə məruz qalaraq, dalğa boyunca hərəkət edir (sistemin faza portretində *1* tipli trayektoriyaya bax). Əgər başlanğıc sürət $m_e v_b^2/2 < e\varphi_0$ münasibətindən təyin edilən böhran sürətindən kiçikdirsə, onda elektron potensial çuxura düşür və orada rəqs etməyə başlayır (2 əyrisi).



a – yüklü zərrəcik uzununa dalğanın periodik elektrik sahəsində (1 – keçib-gedən zərrəcik, 2 – "zəbt olunmuş" zərrəcik, φ – sahənin potensialı, x – uzununa koordinat); b – dalğa sahəsində "zəbt olunmuş" zərrəciklərin (2 trayektoriyası tipli) və keçib-gedən zərrəciklərin (1 trayektoriyası tipli) hərəkətini təsvir edən qeyri-xətti ossilyatorun faza portreti.

QEYRİ-XƏTTİ REZONANS VƏ DİNAMİK STOXASTİKLİK HAQQINDA

Əgər ossilyator xəttidirsə, onda ona xarici periodik qüvvə təsir edən zaman yeganə effekt – xətti rezonans müşahidə olunur: ossilyatorda itki az olduqca, rezonans əyrisi bir o qədər iti və yüksək olur. Tezlik rəqs amplitudundan asılı olduqda nə dəyişir? Tutaq ki, xarici təsirin tezliyi mərkəzin yaxınlığında faza trayektoriyalarının biri üzrə fırlanma tezliyinə bərabərdir. Onda sistem xarici mənbədən enerji alır və başlanğıcda kiçik olan rəqslər böyüyür. Bu o deməkdir ki, təsviredici nöqtə yerini, sanki, ardıcıl olaraq böyük enerjili faza trayektoriyalarına dəyişir; ossilyator qeyri-izoxron olduğu üçün bu faza trayektoriyalarına artıq başqa tezlik uyğun gəlir. Nəticədə sistem rezonansdan çıxır və müəyyən bir amplituddan başlayaraq, xarici qüvvəni hiss etməməyə başlayır. Beləliklə, rezonansdan çıxış tezliyin $\omega'=\omega+\Delta\omega$ sürüşməsi hesabına baş verir.

Xətti ossilyatorda rezonans yalnız məxsusi tezliyə yaxın tezlikdə ($\Omega=\omega_0\pm\varepsilon$, burada ε – kiçik əlavədir), qeyri-xətti ossilyatorda isə harmonikalarda da var. Məsələn, əgər rəqslərin tezliyi $\omega^2\sim\alpha x$ isə, onda rezonanslar xarici qüvvənin tezliyinin mislilərində də: 2Ω, 4Ω və s. mümkündür.

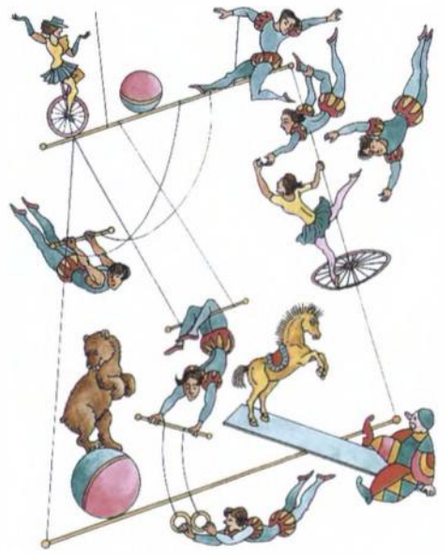
Hətta sinusoidal xarici təsir də qeyri-xətti ossilyatorda qeyri-adi effektlər doğurmağa qadirdir: dinamika bəzən olduqca mürəkkəb, təsadüfiyə bənzər olur. Necə deyərlər, sistemdə *dinamik stoxastiklik* (*yun.* "stoxastikos" – "duymağı bacaran", burada "təsadüfi", "ehtimallı") rejim yaranır. Bu nədir?

Qeyri-xətti sistemlərin dinamikasını kəşf edənlərdən biri, rusiyalı fizik Boris Valeryanoviç Çirikov (1928-ci ildə doğulub) yazmışdır: "Bu yaxınlarda icad edilmiş "dinamik stoxastiklik" termini (az və çox yayılmış sinonimləri "stoxastik və ya xaotik dinamika", "determinləşmiş xaos" və s. kimi) hələ yenə də, yəqin ki, anlaşılmazlıq doğurur. Doğrudan da dinamika dedikdə, adətən, müəyyən fiziki sistemin tam determinləşmiş təkamül prosesi başa düşülür, onun bütün keçmişi və gələcəyi hərəkət tənliklərilə və başlanğıc şərtlərlə birqiymətli təyin olunur, həm də sonuncular istənilən zaman anında verilə bilər... Digər tərəfdən, "stoxastiklik" anlayışı indi açıq-aşkar hər hansı bir təsadüfi elementin, hər hansı bir qeyri-müəyyənliyin iştirakı ilə assosiasiya edilir. Mümkündürmü ki, dəqiq determinləşmiş proses eyni zamanda təsadüfi olsun? Son illərin fiziki və xüsusən də riyazi tədqiqatları göstərir ki, bu nəinki mümkündür, həm də müəyyən şəraitdə labüddür (ən azı klassik, qeyri-kvant mexanikası halında). Daha müəyyən ifadə etsək, iddia etmək olar ki, təsadüfi və ya stoxastik proseslər determinləşmiş klassik hərəkətin ifrat, lakin yenə də xüsusi formasıdır və özlüyündə heç bir statistik hipo-





Helmholts rezonatoru. Moskva Dövlət Universitetinin fizika fakültəsi.





tezləri olmadan izah oluna bilər. İlk baxışda ziddiyyətli görünən "stoxastik dinamika" (və ya "dinamik stoxastiklik") termini məhz bu cür hala aiddir".

Qeyd etmək lazımdır ki, *dissipasiyasız* sistemlərdə dinamik stoxastiklik üçün qeyri-izoxronluq əsasdır. Doğrudan da həyəcanlanma hesabına rəqslərin enerjisinin artması və ya azalması effekti rəqslərin fazaları ilə təyin olunur. Faza tezlikdən asılıdır, tezlik isə qeyri-izoxronluq nəticəsində həyəcanlanmanın təsiri altında dəyişir. Tək rezonanslı halda sistem sadəcə olaraq, bu rezonansdan çıxa bilər. Lakin, əgər rezonanslar çoxdursa (heç olmazsa, iki), onda onların qarşılıqlı təsiri ucbatından hərəkətin çox qarışıq mənzərəsi yaranır. Tutaq ki, sistem dəqiq olaraq, rezonanslardan birindədir. Həyəcanlanmanın təsirilə sistem ondan çıxır və qonşu rezonans oblastına düşür. İndi həyəcanlanmanın fazasından asılı olaraq, sistem ya növbəti rezonans oblastına irəliləməkdə davam edir, ya da geriyə qayıdır. Bu cür "vurnuxma" *rezonansların bir-birini örtməsi* adlanır. Bu zaman hərəkət trayektoriyası mürəkkəb şəklə malik olur (xüsusi halda, təsadüfi şəklə).

Belə sistemin ortalaşdırılmış hərəkəti elektronun yuxarıda baxdığımız potensial çuxurdakı davranışını xatırladır. Bir neçə rezonansa bir neçə potensial çuxur uyğun gəlir. Rezonansların bir-birini örtməsi qonşu çuxurların kifayət qədər yaxınlaşması zamanı mümkündür və onda sistem çuxurdan çuxura sıçramağa qadirdir.

XRİSTİAN HÜYGENS VƏ SAATLAR

Avtorəqs sisteminə ən sadə misal mexaniki saatlardır; bu saatların ixtirasını Xristian Hüygensin adı ilə bağlayırlar. Hərçənd qeyd etmək lazımdır ki, hələ 1636-cı il iyunun 5-də admiral Reala yazdığı məktubunda Qaliley rəqqası rəqslər sayğacı ilə birləşdirdiyi barədə yazmışdı. 1641-ci ildə, ölümündən bir il qabaq, Qaliley öz ideyasını reallaşdırmağa çalışmışdı, ancaq bu qədər ağır mühəndis işi kor olmuş qocanın artıq gücü xaricində idi.

Hüygens saatların konstruksiyasında çox yeniliklər təklif etmişdi, bunlardan ən başlıcası – rəqqasın rəqslərinin periodundan zaman ölçüsü kimi istifadə etmək olmuşdur. 1657-ci il yanvarın 12-də o yazırdı: "Bu günlərdə mən saatların yeni konstruksiyasını tapmışam, bu konstruksiya vasitəsilə vaxt elə dəqiq ölçülür ki, onun köməyi ilə uzunluq dairəsini, hətta onu dənizlə aparmaq lazım gələrsə belə, ölçmək üçün böyük ümid yaranır". 1657-ci il iyunun 16-da Niderland Baş ştatlarının patenti rəqqaslı saatın müəllifliyini Hüygensin adına yazdı. İxtiranın təsvir olunduğu "Rəqqaslı saatlar" kitabçası 1658-ci ildə çapdan çıxdı.

Hüygensin saatlarında enerji çatdırılmasının tələb olunduğu zaman anlarını ilk dəfə olaraq rəqs mənbəyinin özü təyin edirdi, yəni enerji rəqslərin periodu pozulmadan çatdırılırdı. Bu, ankerin – çəpəki kəsilmiş dişləri olan və rəqqasa periodik olaraq təkan verən sadə və ağıllı qurğunun köməyilə əldə olunurdu.

Hələ ilk saatları quraşdırarkən Hüygens bir qədər təəccüblə başa düşdü ki, riyazi rəqqasın rəqslərinin izoxronluğu haqqında Qalileyin dediyi rəqqasın yalnız kiçik meyilləri üçün doğrudur. Hüygens başa düşmürdü ki, nə üçün Qaliley kilsədə çilçırağın yırğalanmasını müşahidə edərkən bu cəhəti qaçırmışdı. Lakin Qalileyin dostu və tələbəsi olmuş Vinçenso Vivianinin şahzadə Leopold Mediçiyə yazdığı kimi, Qaliley izoxronluğu kəşf edərək, "buna daha inandırıcı surətdə əmin olmaq üçün aşağıdakını etməyi qərara aldı". "O, iki qurğuşun küreni tamamilə eyni uzunluğa malik iplərə bağladı ki, onlar sərbəst yırğalana bilsinlər... və onları şaquldan müxtəlif bucaq dərəcələri məsələn, bir küreni 30 dərəcə, digərini 10 dərəcə... qədər meyil etdirərək, onları eyni bir anda buraxdı. O, yoldaşının köməyilə müşahidə etdi ki, bir rəqqas böyük qövslər üzrə hər hansı sayda rəqs edəndə, digəri kiçik qövslər üzrə dəqiq bir o qədər sayda rəqs edirdi". Əgər bu təcrübələrdə Qaliley kürələrin meyillərini heç olmazsa, 60°-yə qədər artırsaydı, rəqslərin izoxronluğunun pozulduğunu görə bilərdi.

Baxmayaraq ki, böyük amplitudlarda rəqqasın rəqs periodunun qiymətləndirmək üçün təqribi

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}\left[1+(1/4)\sin^2(1/2\varphi)+(9/64)\sin^4(1/2\varphi)+\ldots\right]$$

düsturu XVII əsrin ortalarında məlum deyildi, Hüygens periodu heyrət doğuracaq dərəcədə dəqiq qiymətləndirmişdi. İndiyədək onun bu hesablamaları necə apardığını bilmirlər.



AVTORƏQSLƏR – SON DƏRƏCƏ QEYRİ-XƏTTİ HADİSƏDİR

Konservativ sistemlər fizikada idealaşdırılmadır. Bizi əhatə edən sistemlərin əksəriyyəti konservativ deyil, yəni onların istənilən birində enerji itkisi var (sürtünmənin, şüalanmanın, qızmanın və s. hesabına). Müxtəlif xarici qüvvələrin və sahələrin də təsirini nəzərə almaq lazımdır. Rəqslərinin enerjisi yalnız itən yox, həm də doldurulan sistemlərdə hansı prinsipial yeni hadisələr yarana bilər? Ən mühümü – sönməyən rəqslərin əmələ gəlməsidir; sönməyən rəqslərin xassələri sistemin nə vaxt və hansı başlanğıc haldan buraxılmasından asılı deyildir.

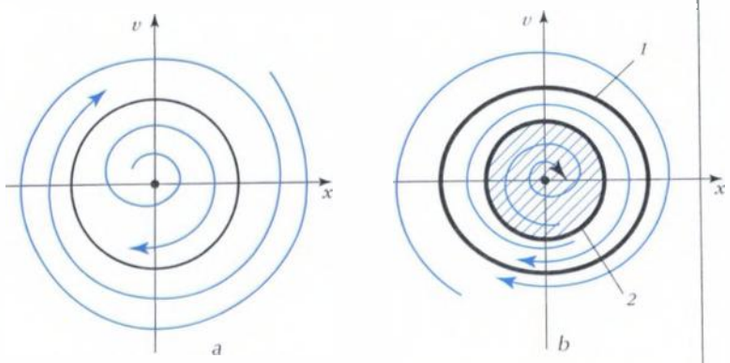
Rusiyalı fizik Aleksandr Aleksandroviç Andronov bu cür rəqsləri doğurmaq xassəsinə malik olan sistemləri *avtorəqs* sistemləri adlandırdı. İlk dəfə o, avtorəqsləri Puankarenin limit tsikləri ilə əlaqələndirdi ("Mexaniki rəqslər" məqaləsinə bax).

Xətti sistemdə avtorəqslər mümkün deyil. Onların yaranması üçün enerji mənbəyilə rəqs elementi arasındakı əlaqə qeyri-xətti olmalıdır. Sadə avtorəqs sistemlərində (avtogeneratorlarda), bir qayda olaraq, sönməyə malik rəqs sistemini, gücləndiricini, əks əlaqəni reallaşdıran qeyri-xətti məhdudlaşdırıcını ayırmaq mümkün olur.

Cəmiyyətdə də avtorəqs proseslərinə rast gəlinir. Qədim əfsanələrdən birinə görə keşikçilər şəhər darvazası yaxınlığında yolçuları saxlayıb soruşmuşlar: "Siz bura nə üçün gəlmisiniz?" Düzünü deyənləri öldürürdülər, yalan deyənləri isə asırdılar. Bir hiyləgəri tapıldı, o dedi: "Mən bura gəlmişəm ki, məni assınlar!" Keşikçilər özlərini itirdilər. Əgər bu adam düzünü deyibsə, onu öldürmək lazımdır, lakin onda belə çıxacaq

> Rəqslər nəzəriyyəsində xətti diferensial tənliklərə gətirən sadələşdirilmiş riyazi şərhdən geniş istifadə olunur, həm də lap bu yaxınlara qədər fikirləşirdilər ki, rəqslər nəzəriyyəsində onunla kifayətlənmək olar. Radiotexnikanın inkişafı ona gətirib çıxardı ki, bir çox mühüm məsələlərdə xətti diferensial tənliklərə əsaslanan nəzəriyyənin kifayət etmədiyi məlum oldu. Bu gün hətta elementar kursda da artıq xətti yanaşma ilə kifayətlənmək olmaz. Ona görə də biz, heç olmazsa qısa şəkildə də olsa, qeyri-xətti məsələlərə toxunmalı olacağıq.
>
> *L.İ.Mandelştam*

Enerjinin dissipasiyası (*lat.* dissipatio – "səpilmə") nizamlı proseslərin (hərəkət edən cismin, elektrik cərəyanının) enerjisinin bir hissəsinin nizamsız proseslərin enerjisinə, lap yekunda isə – istiliyə keçməsidir.

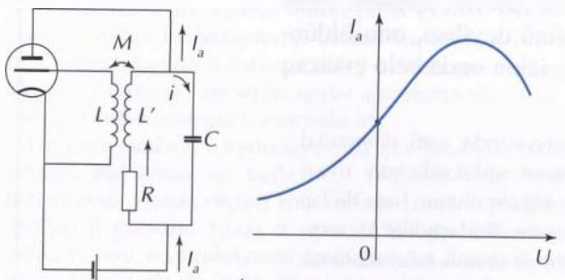


Avtorəqs sistemlərinin faza portretləri:
a – yumşaq həyəcanlanma,
b – sərt həyəcanlanma (başlanğıc nöqtə ştrixlənmiş oblastın xaricində yerləşməlidir);
1 və *2* – dayanıqlı və dayanıqsız limit tsikllərdir.

BALTAZAR VAN DER POL

Van der Pol 1889-cu il yanvarın 27-də Utrext şəhərində (Niderland) doğulmuşdur. Onun geniş təhsilli insan olan atası oğlunun qabiliyyətlərinin inkişafına səmərəli təsir etmişdir. Van der Polu kiçik yaşlarından tibb, fizika, musiqi və şahmat maraqlandırmışdır.

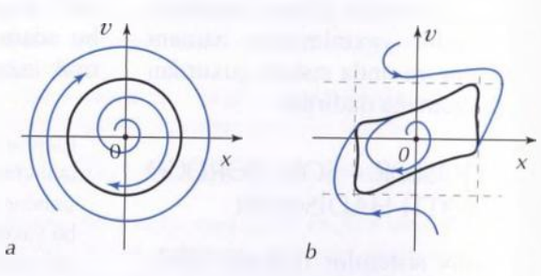
1911-ci ildə Baltazar Utrext universitetinə daxil oldu və 1916-cı ildə onu fizika və riyaziyyat ixtisası üzrə bitirdi. Sonra təhsilini davam etdirmək üçün o, bir neçə illiyə İngiltərəyə getdi və əvvəlcə tanınmış radio mütəxəssisi C.A.Fleminqin yanında, sonra isə Kembricdə Kavendiş laboratoriyasında (o vaxt laboratoriyanın direktoru fizik-eksperimentatorların böyük internasional məktəbini yaratmış məşhur C.C.Tomson idi) işlədi. İngiltərədə olması Van der Polun gələcək elmi maraqlarını müəyyən etdi: elektroradiotexnika və rəqslər nəzəriyyəsi. Gənc alim 1919-cu ildə vətənə qayıtdı və üç il Garlemdə Teylor İnstitutunda klassik elektron nəzəriyyəsinin yaradıcısı olan H.A.Lorensin rəhbərliyi altında işlədi. 1920-ci ildə Van der Pol radiodalğaların ionlaşmış qazlarda yayılmasına dair doktorluq dissertasiyası müdafiə etdi. Bu dissertasiyanın əsasında Kembricdə alınmış eksperimental məlumatlar dururdu. 1922-ci ildən 1949-cu ilə qədər o, Eyndxoven də "Filippe" firmasının elektrik laboratoriyasında aparılan elmi tədqiqatlara rəhbərlik etdi. Van der Pol eyni zamanda müəllimlik fəaliyyətilə məşğul olurdu: 1938-ci ildən başlayaraq, Delft universitetində nəzəri elektrotexnikadan mühazirələr oxumuş, xüsusi kurslar oxumaq üçün ABŞ-ın Kaliforniya və Kornell universitetlərinə gedirdi. O, Niderland "Fizika" jurnalının və Hollandiya Radiomühəndislər Cəmiyyətinin təməlini qoydu. Van der Pol 1956-cı il oktyabrın 6-da vəfat etmişdir.



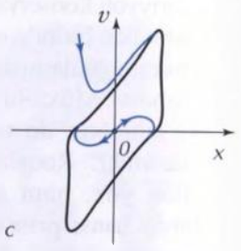
Van der Polun avtoəqslər generatoru.
a – sxemi;
b – I_a anod cərəyanının tordakı U gərginliyindən asılılığı; Van der Pol bu asılılığı kubik çoxhədli ilə approksimasiya etmişdir. Sxemdə yaranan avtoəqslər üçün Van der Pol indi onun adını daşıyan, aşağıdakı tənliyi çıxardı

$$\ddot{x} - \mu(1 - x^2)\dot{x} + x = 0,$$

Burada μ – qeyri-xəttilik parametridir.
Van der Pol tənliyi qeyri-xətti fizikanın ilk universal tənliklərindən biridir.



μ qeyri-xəttilik parametrinin müxtəlif qiymətlərində Van der Pol tənliyinə uyğun faza mənzərələri:
a – kvaziharmonik (μ = 0,1);
b – güclü qeyri-sinusoidal (μ = 1);
c – relaksasiya rəqsləri (μ = 10).





ki, o yalan deyib və onu asmaq lazımdır, onda belə çıxacaq ki, o, düzünü deyib... Beləliklə, onlar iki kənar həll arasında tərəddüd etdilər və heç birini qəbul edə bilmədilər. Baxdığımız paradoksda, bir çox analoji paradokslarda olduğu kimi, hökmdən çıxan nəticə bu hökmün özünə ziddir. Maraqlıdır ki, L.A.Blyumenfeld biokimyada avtoəqs reaksiyalarını izah etmək üçün bu əfsanədən istifadə etmişdir.

QEYRİ-XƏTTİ DALĞALAR VƏ SOLİTONLAR

Fizikanın inkişafını bir çox cəhətdən 1834-cü ilin kəşfləri müəyyən etdi. Onlar indiyədək müasir elmi qidalandırır. Məhz həmin il irlandiyalı riyaziyyatçı Uilyam Royan Hamilton (1805-1865) klassik mexanikanın tənliklərinə kanonik şəkil verdi və optik-mexaniki analogiyanı kəşf etdi, bu analogiya kvant mexanikasının əsaslarını yaradarkən həlledici rol oynadı. Klapeyron Sadi Karnonun "Odun hərəkətverici qüvvəsi haqqında..." memuarını elmi cəmiyyətin mülkünə çevirdi, bu, termodinamikanın yaranmasını sürətləndirdi. Faradey elektroliz qanunlarını kəşf etdi və elementar "elektrik atomunun" mövcudluğunu qabaqcadan xəbər verdi. İngilis riyaziyyatçısı, iqtisadçısı və ixtiraçı-mühəndisi Çarlz Bebbic (1792-1871) özünün "analitik" maşınının əsas prinsiplərinin işlənib hazırlanmasını başa çatdırdı ki, onlar da sonralar müasir kompüterin yaradılmasına səbəb oldu. Nəhayət, Edinburq yaxınlığında insanın solitonla ilk rəsmi qeydə alınmış görüşü baş verdi.



Kanonik (*yun.* "kanon" – "norma", "qayda") – dəqiq müəyyən olunmuş, nümunə əvəzi götürülmüş.

SOLİTONLA GÖRÜŞ

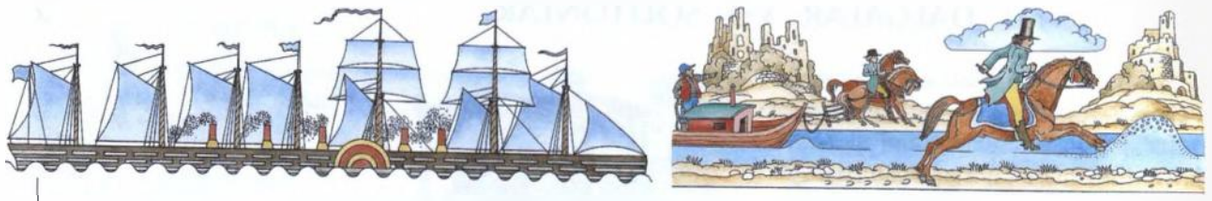
Bu adam şotland alimi və gəmi inşaatı mühəndisi Con Skott Rassel (1808-1882) olmuşdur. Britaniya Elmin Tərəqqisinə Yardım Assosiasiyasına təqdim edilmiş məruzədə o, aşağıdakı fövqəladə təbiət hadisəsinin təsvirini vermişdi: "Mən dar kanal boyunca bir cüt atın sürətlə dartıb apardığı barjın hərəkətini müşahidə edirdim, birdən barj dayandı – kanaldakı bütün su kütləsi hərəkətə gəldi; su şiddətli həyəcanlanmış halda gəminin burnu yaxınlığında toplandı, sonra qəflətən gəmidən qopdu və böyük təklənmiş təpə şəklini alaraq, irəliyə doğru böyük sürətlə diyirləndi; dəyirmi, hamar, dəqiq ifadə olunmuş su təpəsi formasını gözə görünəcək dərəcədə dəyişmədən və ya sürətini azaltmadan kanalda öz hərəkətini davam etdirdi. Mən atın üstündə bu dalğanın ardınca cumdum və o öz əvvəlki formasını saxlayaraq, hələ saatda səkkiz və ya doqquz mil sürətilə hərəkət edərkən və otuz futa yaxın uzunluğa, bir futdan fut yarımа-

Skott Rasselin ölümündən sonra çap olunmuş "Su, hava və efir okeanlarında translyasiya dalğaları" işində (1885-ci il) təklənmiş dalğa nəzəriyyəsindən atmosferin qalınlığını hesablamaq üçün istifadə olunmuş və doğru cavab alınmışdır, lakin Kainatın ölçülərini qiymətləndirmək istədikdə cavab həqiqətdən çox uzaq oldu.

C.S.Rassel 16 yaşında Edinburq universitetinin bakalavr dərəcəsini aldı, natur fəlsəfədən (o vaxt fizikanı belə adlandırırdılar) tələbələr arasında uğur qazanmış mühazirələr oxudu.

Rassel universitetin professoru olmadı – başqa namizədə üstünlük verdilər. Lakin hidrodinamikadakı və fizikanın başqa oblastlarındakı dərin bilikləri Britaniya gəmi inşaatında onun məşhur simaya çevrilməsinə səbəb oldu və Gəmiqayırma institutunun banilərindən biri olmasına səbəb oldu. Rassel sistemi üzrə XIX əsrin ikinci yarısının ən nəhəng paroxodu – Great Easten ("Böyük Şərq") konstruksiya edilib qurulmuşdur. Bu paroxod Atlantikadan keçən beş teleqraf kabeli çəkmişdir.





dək hündürlüyə malik olarkən, ona çatdım.

Onun hündürlüyü tədricən azaldı və təqibdən bir və ya iki mil sonra onu kanalın döngələrində itirdim. Bax, 1834-cü ilin ... avqustunda mənim bu qeyri-adi və gözəl hadisə ilə bu cür ilk təsadüfi görüşüm baş verdi; onu, hadisəni mən Daşınma Dalğası adlandırdım...” Rassel dalğanı great solitary wave adlandırdı ki, bu da tərcümədə “böyük təklənmiş dalğa”, “translyasiya (daşınma) dalğası” deməkdir. Bu gün “soliton” termini istifadə olunur.

Rasselin müşahidəçilik qabiliyyəti və həyəcanı digər qeyri-xətti hadisələri də diqqətdən kənarda qoymadı. Məsələn, o, zərbə dalğalarının adi akustik dalğalardan kəskin fərqləndiyini (çünki top atəşinin səsi (zərbə dalğası) “atəş aç” komandasından daha sürətlə yayılır) ilk aşkar edənlərdən biri idi.

Həmin dövrə yaxın hidrodinamikanın əsas fiziki prinsipləri Leonard Eyler (1755-ci il) və Klod Lui Navye (1823-cü il) tərəfindən artıq formulə edilmiş və riyazi dilə çevrilmişdi. Ona görə də Rassel təklənmiş dalğanı yalnız canlı təsvir etməklə kifayətlənmədi, bir sıra illər ərzində müxtəlif eksperimentlər, o cümlədən Şotlandiyada Fert-of-Fort körfəzində və Çeşirdə Di çayında qabarma dalğalarının (o, bu dalğaları da təklənmiş dalğalara aid etmişdi) sürətinin ölçülməsinə aid eksperimentlər aparmışdı. Nəticədə o, translyasiya dalğalarının aşağıdakı əsas xassələrini müəyyən etdi:

1. Ayrıca təklənmiş dalğanın sürəti və forması dəyişməzdir.

2. Dalğanın v sürəti onun d hündürlüyündən və kanalın h dərinliyindən asılı olub, aşağıdakı düsturla ifadə olunur: $v=\sqrt{g(d+h)}$, burada g – sərbəstdüşmə təcilidir, həm də d hündürlüyü h-dan kiçik olmalıdır.

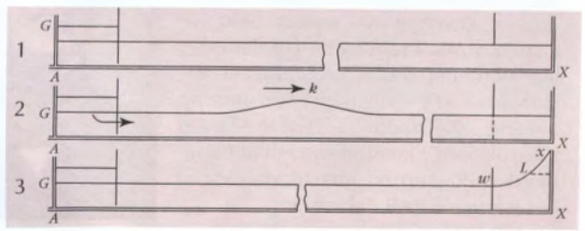
3. Kifayət qədər böyük dalğa iki (və ya daha çox) təklənmiş dalğaya aşağıdakı sxem üzrə parçalanır: “Dalğa ... onunla hərəkət edən əlavə maddədən azad olacaq, onu geridə qoyacaq və bu geridə qalan dalğa onu izləyəcək, ancaq kiçik sürətlə, belə ki, əvvəlcə iki dalğanın bir əsas dalğada birləşməsinə baxmayaraq, onlar sonradan bir-birindən ayrılır və hərəkət etdikcə daha da uzaqlaşırlar”.

4. “Böyük ilkin translyasiya dalğaları, su səthinə düşən daşın yaratdığı kiçik rəqslər kimi, heç bir dəyişiklik olmadan bir-birinin içindən keçirlər”.

Rassel ayrılmış (təklənmiş) və sürü (qrup) şəklində dalğa tiplərini fərqləndirərək, dalğaları təsnifata böldü. Dalğa tiplərini dörd növə ayırdı. “Böyük” və ya “ilkin” translyasiya dalğasını o, ayrılmış dalğaların birinci növünə aid etdi, sürüləşmiş dalğalara isə külək və *kapillyar dalğaları*, həmçinin dalğalar qrupunu (Rasselə görə “dəstəciyini”) – dalğa paketlərini daxil etdi.

Skott Rasselin “Dalğalar haqqında məruzə” kitabından (1844-cü il) götürülmüş şəkillər laboratoriya şəraitində “daşınma dalğalarının” alınmasını nümayiş etdirir:

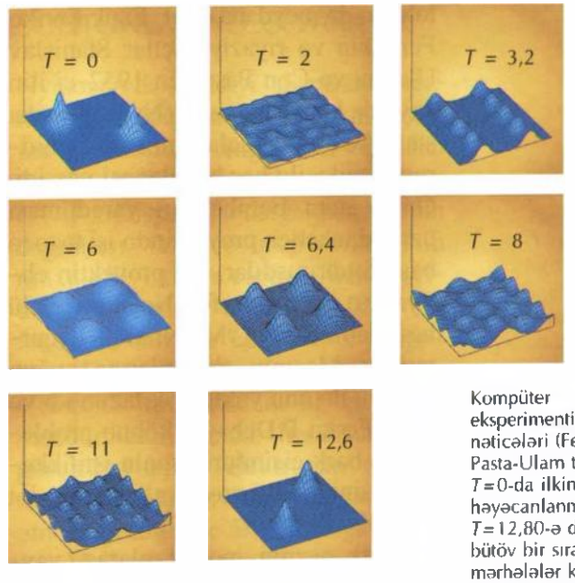
1 – sol arakəsmə ilə ayrılmış hissə, burada suyun səthi azca yuxarı qaldırılıb;
2 – arakəsmə qəflətən hərəkət etdirilərəndə, uzun zınqırova bənzər daşınma dalğası yaranır;
3 – daşınma dalğası kanalın sağ kənarına çatan anda sağ arakəsmə aşağı endirilir. Bu zaman sağ arakəsmənin arxasında suyun səviyyəsi praktiki olaraq 1-ci şəkildə sol arakəsmənin arxasındakı ilkin səviyyə ilə üst-üstə düşür.



Rassel müşahidələrini və eksperimentlərini “Dalğalar haqqında məruzə” memuarında ətraflı təsvir etmişdir (1844-cü il); bu memuar birqiymətli olmayan reaksiya doğurmuşdu. Dalğalar haqqında çox bilən və Rasselə xeyirxah münasibətdə olan Hamiltonun başı öz yeni kəşfinə – kvaternionlara qarışmışdı və onu başqa heç nə maraqlandırmırdı.

Ən nüfuzlu alimlərdən biri və kiçik, lakin sonlu amplitudlu uzun dalğalar nəzəriyyəsinin yaradıcısı kral (saray) astronomu Corc Biddel Eyri (1801-1892) “Qabarmalar və dalğalar” kitabında (1845-ci il) Rasselin təklənmiş dalğa haqqında çıxardığı nəticələri nəinki tənqid etdi, həm də dəyişməz formalı uzun dalğaların mövcudluğu imkanına şübhə etdi, çünki bu onun nəzəriyyəsinə yerləşmirdi. Hələ tam gənc olan, lakin Kembric universitetinin artıq kifayət qədər tanınmış fizika professoru və özlü mayelər hidrodinamikası oblastında mütəxəssis olan Corc Qabriel Stoks “Rəqsi dalğalar haqqında” işində (1847-ci il) o qədər qəti olmasa da, hər halda dalğanın sabit formasını saxlaması haqqında, hətta özlülük nəzərə alınmayacaq dərəcədə kiçik olsa belə, mənfi fikir söyləmişdi. Onun fikrincə, istənilən halda təklənmiş dalğa sürtünmə nəticəsində kiçicik enerji itirən zaman parçalanmalıdır. Bu qədər alçaldıcı tənqiddən sonra Rassel dalğaları demək olar ki, yarım əsr unuduldu.





Kompüter eksperimentinin nəticələri (Fermi-Pasta-Ulam tipi). $T=0$-da ilkin həyəcanlanmalar $T=12,80$-ə doğru bütöv bir sıra ardıcıl mərhələlər keçərək, praktik olaraq, başlanğıc vəziyyətdə bərpa olunur ($\pi/2$ bucağı qədər dönərək).

Lakin xoşbəxtlikdən solitonun tarixi bununla bitmədi. Rasselin təklənmiş dalğaları öz nəzəri təsdiqini gənc fransız alimi Jozef Valanten de Bussineskin (1842-1929) və onun yaşıdı, Stoksun tələbələrindən biri, lord Releyin vəliəhdi, ingilis fiziki Con Uilyam Strettin işlərində tapdı. Onlar sırf riyazi olaraq göstərdilər ki, azsulu kanallarda təklənmiş dalğa mövcud olmaq hüququna malikdir. Lakin bu cür dalğaların tənliyini, artıq Rasselin ölümündən sonra, 1895-ci ildə Amsterdam universitetinin professoru Diterik Yohannes Korteveq (1848-1941) və onun tələbəsi Qustav de Friz çıxardılar. Solitonların böyük elmə ikinci gəlişində (XX əsrin ikinci yarısı) məhz Korteveq-de Friz tənliyi (ixtisarla, KdF tənliyi) həlledici rol oynamışdır.

SOLİTONLARIN İKİNCİ GƏLİŞİ

Universal hadisələr (sözsüz, soliton onlara aiddir) gözəl xassəyə malikdir: onlar yalnız fizikanın müxtəlif sahələrinə aid məsələlərdə yox, həm də tamamilə müxtəlif elmlərə aid məsə-

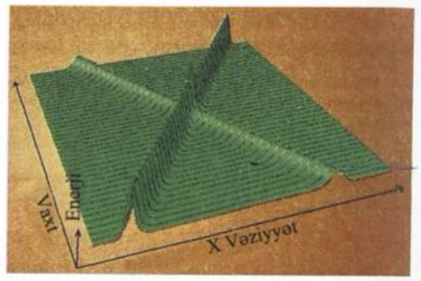
Kvaternion (*lat.* quaterni – “dörd-dörd”) $z=a+ib$ kompleks ədədinin ümumiləşməsidir, burada bir xəyali i vahidi ($i^2=-1$) əvəzində üç: i, j, k vahidlərinə baxılır. Nəticədə $q=a+ib++jc+kd$ şəkilli obyektlər alınır.

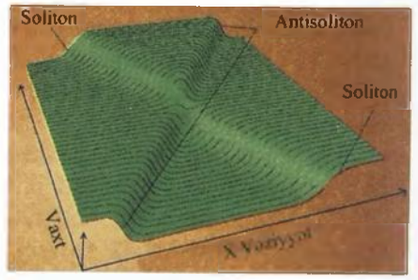
◄ Kapillyar dalğalar suyun səthində xırda ləpələr şəklində yaranır və səthi gərilmə qüvvələri ilə bağlıdır; bu qüvvələrin sayəsində su, o cümlədən tükdən nazik borucuqlarda yuxarı qalxır. Dalğaların adı da məhz “capillaris” – “tük” latın sözündən əmələ gəlib.

lələrdə də meydana çıxır. Fizik Enriko Fermininin və riyaziyyatçılar Stanislav Ulamın və Con Pastanen 1952-ci ilin yayında Los-Alamosda (Nyu-Meksika ştatı, ABŞ) qoyduqları məsələnin hidrodinamika ilə heç bir əlaqəsi yox idi. Onlar atom bombasının yaradılması üzrə Manhetten proyektində işi təzəcə başa çatdırmışdılar. Bu proyektin ehtiyacları üçün Con fon Neyman güclü hesablama maşını "MANİAK – I" qurmuşdu. Maşının ehtiyatlarına uyğun məsələ ilə onu yükləmək lazım idi və onda Fermi P.Debayın köhnə probleminə: bərk cisimlərin sonlu istilikkeçirməsinin izahı probleminə müraciət etməyi təklif etdi.

Bərk cismin modeli olaraq, yaylarla birləşdirilmiş 32 yükdən ibarət anharmonik zənciri seçdilər; burada yükün Δx məsafəsi qədər yerdəyişməsi zamanı $k\Delta x + \alpha(\Delta x)^2$ elastiki qüvvələr yaranırdı, yəni xətti Huk qüvvəsi ilə yanaşı, qeyri-xətti (kvadratik) qüvvə də təsir edirdi (onun qiyməti kiçik hesab olunurdu). Hesab edirdilər ki, sinusoidal rəqsləri həyəcanlandıran zaman zəncirdə başlanğıc həyəcanlanmanın enerjisi zaman keçdikcə sistemin bütün rəqs modları üzrə bərabər paylanmalıdır – termodinamik tarazlıq qərarlaşacaqdır və ya fiziklərin dedikləri kimi, sistemin termalizasiyası baş verəcəkdir ("Statistik fizikanın əsasları" məqaləsinə bax). Maşın hesablamalarının nəticələri Fermini heyrətə gətirdi. O hətta elan etdi ki, bütün həyatı boyu bundan maraqlı problemlə rastlaşmayıb: sistem inadla termalizasiya etmək istəmirdi; birinci (ən aşağı) modun enerjisi qonşu yuxarı modlar arasında paylandıqdan sonra yenidən ən aşağı modda yığılırdı (bir neçə faiz dəqiqliyilə), sonra proses təkrarlanırdı.

Solitonların öz universallığını büruzə verdiyi növbəti sahə plazma fizikasıdır. 1957-ci ildə rusiyalı fizik Roald





Zinnuroviç Saqdeyev (1932-ci ildə doğulub) plazmada toqquşmasız zərbə dalğalarının (məsələn, günəş küləyində Yerin hərəkəti zamanı yaranan) nəzəriyyəsini qurarkən aşkar etdi ki, burada da, su səthindəki Rassel dalğalarına bənzər təklənmiş dalğalar yarana bilər. Plazma fizikası ilə həmçinin Amerika fizikləri Martin Kruskal və Norman Zabuski məşğul olmuşlar. Onlar nəinki təkcə Fermi-Pasta-Ulam hesablamalarının nəticələrini izah etdilər, həm də bu qəribə hadisənin "xaç atası" oldular. Məhz onlar "elektron" və "proton" terminlərilə səsləşən "soliton" terminini elmə daxil etdilər, bununla da zərrəciklə təklənmiş Rassel dalğasının davranışı arasında aşkar etdikləri oxşarlığı vurğulamış oldular.

Kruskal və Zabuski müəyyən etdilər ki, əgər verilmiş uzunluqlu Fermi-Pasta-Ulam zəncirindəki yüklərin sayı qeyri-məhdud artırsa, onda zəncir kəsilməz qeyri-xətti simə keçir və tarazlıq vəziyyətindən kiçik meyillər zamanı onun rəqsləri... Korteveq-de Friz tənliyilə təsvir olunur. Deməli, zəncirdə enerjinin termalizasiyasının olmaması

Korteveq–de Friz tənliyi müasir qeyri-xətti fizikada universal tənliklərdən biridir və aşağıdakı kimi yazılır: $u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0$, burada $u = u(x, t)$ – dalğa funksiyası, u_t, u_x – uyğun olaraq, t-yə və u-ya görə törəmələrdir.

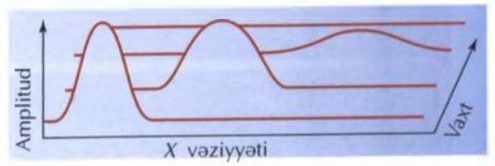
onda yaranan solitonun dayanıqlığı ilə bağlıdır, bu soliton, təklənmiş dalğa kimi, yayılan vaxt öz formasını dəyişmir. Ədədi eksperimentlərin nəticəsində Kruskal və Zabuski müəyyən etdilər ki, toqquşmalar zamanı solitonlar dağılmır, sanki biri digərinin içindən keçərək, yerlərini dəyişir. 120 il əvvəl təbii eksperimentdə Skott Rassel məhz bu xassəni aşkar etmişdi. Başqa bir şey də diqqətəlayiqdir: əgər EHM solitona köməyə gəlməsəydi – Bebbicin arzusu həyata keçməsəydi, solitonun nə qədər uzun müddətdə tələb olunması məlum olmazdı.

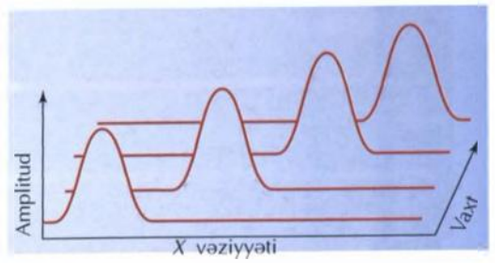
Amerika fizikləri ədədi eksperimentlərlə kifayətlənmədilər. Artıq 1967-ci ildə M.Kruskal, C.Qrinlə, K.Qardner və R.Miura ilə birlikdə KdF tipli qeyri-xətti tənliklərin dəqiq həllərini almaq qaydasını kəşf etdilər, bu metodu *tərs səpilmə məsələsi metodu* adlandırdılar. Öz imkanlarına görə bu metod xətti diferensial tənliklərin həllinin Furye metodu ilə müqayisə oluna bilər. Göstərmək mümkün oldu ki, KdF tənliyi sonsuz dəst saxlanma qanunlarına və müxtəlif v_i sürətlərilə hərəkət edən $u(x-v_i t)$ təklənmiş dalğa tipli çoxsolitonlu bütöv həllər sinfinə malikdir. Bu andan başlayaraq, qeyri-xətti hadisələr nəzəriyyəsində həqiqi "soliton canlanması" başlandı. Rasselin kəşfindən sonra 120 il ərzində təklənmiş dalğalara 20-yə qədər iş həsr olunmuşdur. 1967-ci ildən başlayaraq, solitonlar haqqında yazılmış işlərinin sayı hər il yüzlərlə, minlərlə hesablanır. Bundan başqa, əvvəllər kəşf olunmuş və öz izahını gözləyən bir çox hadisələrin soliton xarakteri aydınlaşdı. Nəhayət, qeyri-xətti fizika sadə və anlaşıqlı ideallaşdırılmış obyekt – soliton qazandı, Nyuton-Maksvell fizikasında belə ideallaşdırılmış obyektlər maddi nöqtə, müstəvi dalğa, ideal mayedir.

SOLİTONLAR NECƏ YARANIR

Nyutonun daxil etdiyi "dispersiya" termini xətti dalğalar üçün onların yayılma sürətlərinin dalğa uzunluğundan (və ya tezlikdən) asılılığını bildirir: $v = v(\lambda)$. Dispersiya dalğa paketlərinin dağılması, faza və qrup sürətlərinin müxtəlifliyi, dalğa cəbhələrinin qeyri-bərabər hərəkəti və s. kimi fiziki effektlərdə təzahür edir. Məhz dalğaların dispersiyası Şredingeri "yayılmış elektron" modelindən əl çəkməyə məcbur etdi, çünki hesablamaların göstərdiyi kimi, elektronun radiusu tərtibində ölçüləri olan dalğa paketi əmələ gətirən de Broyl dalğa qrupu $\Delta t = 10^{-26}$ san ərzində yayılır.

Qeyri-xətti dalğalarla iş başqa cürdür: onların yayılma sürəti təkcə uzunluqdan yox, həm də amplituddan da asılıdır. Zəif qeyri-xəttilik zamanı dalğanı müxtəlif tezlikli və buna uyğun olaraq müxtəlif sürətli harmonikaların dəsti şəklində göstərmək olar, qeyri-xəttilik sayəsində bu harmonikalar birbirilə qarşılıqlı təsirdə olmağa qadirdir. Üstəlik dispersiya da kiçik olanda (harmonikalar hiss olunacaq məsafələrdə tez dağılmamalıdır), enerji dalğanın sürətli toplananlarından daha yavaş toplananlarına keçir. Əgər belə keçmə dalğaların dispersiya sayəsində





Rusiyalı nəzəriyyəçi fizik Aleksandr Tixonoviç Filippov (1936-cı ildə doğulub) yazmışdı ki, əgər gitaranın simlərinə zərbə vursaq, onda bütün modlar eyni zamanda eyni güclə səslənən vaxtda gözlənilən kakofoniya (səslərin qulağa xoş gəlməyən birləşməsi) əvəzində, eyni zamanda primitiv, lakin tamamilə musiqili pyes alınır. Qeyri-xətti sistem özünü tamamilə gözlənilməz aparır. Başlanğıc həyəcanlanmaya o, bütöv bir pyeslə cavab verir".

yaranan deformasiyasını kompensasiya edirsə, onda bu halda dayanıqlı törəmə – soliton əmələ gəlir. Solitonların əmələ gəlməsinin təsvir olunmuş ssenarisini Korteveq–de Friz tənliyinin misalında nümayiş etdirək. Bu tənliyi aşağıdakı şəkildə yazaq:

$$\dot{u} + v_0\left(u + \frac{3}{4h}u^2 + \frac{h^2}{6}u''\right)' = 0,$$

burada nöqtə ilə $u(x, t)$ funksiyasının x-in fiksə olunmuş qiymətində zamana görə törəməsi, ştrixlərlə isə verilmiş t zaman anında x koordinatına nəzərən törəməsi işarə olunmuşdur. Burada $v_0 = \sqrt{gh}$ – dalğaların dayaz suda (h dərinliyi dalğa uzunluğundan xeyli kiçik olanda) sürətidir; g – sərbəstdüşmə təcilidir. Əgər KdF tənliyində dispersiyaya cavabdeh olan axırıncı həddi atsaq, onda dəqiq həlli 1860-cı ildə alman riyaziyyatçısı Georq Fridrix Bernhard Riman (1826-1866) tərəfindən tapılmış tənlik alınar. Riman bu həlli "Sonlu amplitudlu müstəvi hava dalğalarının yayılması haqqında" məqaləsində təqdim etmişdir.

Dispersiyasız KdF tənliyində qeyri-xətti qarşılıqlı təsirin (tənlikdə üçüncü həddi) rolunu asanlıqla görmək olar. Yalnız bir dalğa "donqarı" götürək. "Donqarın" hər bir nöqtəsinin sürəti

$$v(u) = v_0\left(1 + \frac{3u}{2h}\right),$$

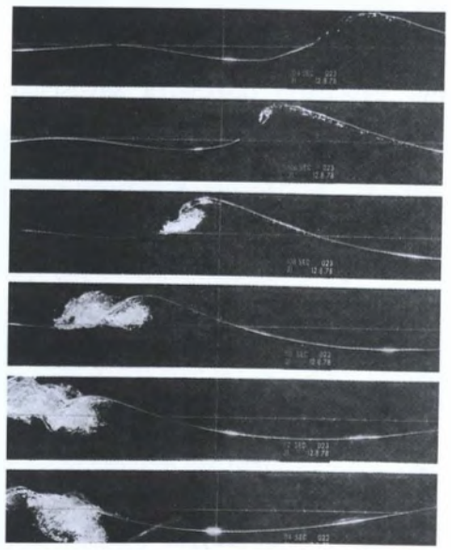
tənliyindən təyin olunur.

Onda "donqarın" təpəsi üçün $u = u_0$ ən böyük sürəti alarıq:

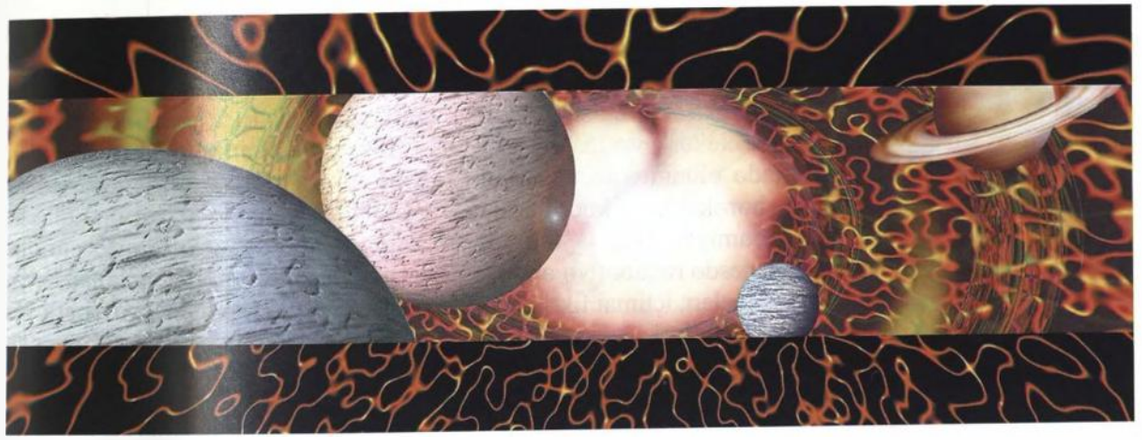
$$v(u_0) = v_0\left(1 + \frac{3u_0}{2h}\right),$$

halbuki dalğanın $u = 0$ ön cəbhəsi v_0 sürətilə hərəkət edir. Sürətlər fərqi hesabına "donqarın" ön hissəsi dalğa yayıldıqca daha dik olur və hər hansı bir anda cəbhənin "devrilməsi" baş verir. Məsələn, dəniz dalğalarının qabarıqlarında ağ köpüklü dalğalar məhz belə yaranır. Riman tapdığı həlli "zərbə dalğası" adlandırmışdı (çünki havada cəbhənin devrildiyi anda təzyiqin və sıxlığın kəskin sıçrayışları yaranır), baxmayaraq ki, bu dalğaları aşkar etməyin mümkünlüyünə şübhə edirdi. Yuxarıda deyildiyi kimi, Rassel daha əvvəl müəyyən etmişdi ki, top atəşinin səsi atəş aç komandasından tez yayılır.

Əgər indi "dispersiyanı" qoşsaq, onda o, "donqarın" təpəsinin hərəkətini yavaşıdacaqdır, çünki yüksək harmonikaların dalğa uzunluqlarının əsas dalğanın uzunluğundan böyükdür; bu yüksək harmonikalar əsas dalğa ilə ("donqarın" iki eninə bərabər dalğa uzunluqlu) toplanması məhz sonlu enə malik "donqar" əmələ gətirir. Deməli, iki effekt rəqabət aparır: qeyri-xəttilik "donqarın" dikliyini artırmağa çalışır, dispersiya isə onun sürünməsinə səbəb olur. Qeyri-xəttilik üstünlük təşkil edən zaman "donqar" bir neçə dalğaya parçalanır, dispersiya üstün olanda isə tədricən yayılır. Qeyri-xəttilik və dispersiya effektlərinin tam kompensasiyası zamanı dayanıqlı təklənmiş dalğa – soliton doğulur.



Dalğaların "devrilməsi effektinin" kinoqramı.



UNİVERSAL PROBLEMLƏR

SİNERGETİKA NƏDİR

Bir çox elmlər (statistik fizika, qazların kinetik nəzəriyyəsi, plazma fizikası, lazerlər fizikası, dissipativ strukturların nəzəriyyəsi, qeyri-xətti dinamika və s.) çoxlu sayda qarşılıqlı təsirdə olan altsistemlərdən, hissələrdən, elementlərdən ibarət olan mürəkkəb sistemləri öyrənməklə məşğul olur. Belə sistemlərin gözəl xüsusiyyətlərindən biri – özbaşına fəza-zaman strukturu yaratmaq qabiliyyətidir. Aşağıdakılar buna bənzər strukturlara misal ola bilər: cansız təbiətdə – spiral qalaktikalar, Yupiterdə Böyük Qırmızı Ləkə, lazerin işçi cismində atomların uzlaşmış (koherent) davranışı, altdan qızdırılan özlü maye təbəqəsində dalğalar və altıbucaqlı özəklər, təyyarənin illüminatoru arxasında bulud yolları (bulud sıraları), çöküntü vermədən və ya qaz ayrılmadan gedən və həcmdə reaksiya qarışığının rənglərinin növbələşməsi ya da məhlulun nazik təbəqəsində spiralların və halqaların əmələ gəlməsilə müşayiət olunan dövrü kimyəvi reaksiyalar, canlı təbiətdə – bitki və



Yupiterdə Böyük Qırmızı Ləkə.



German Haken.

heyvanların formalarının əmələ gəlməsi (morfogenez), mayalanmış hüceyrədən mürəkkəb orqanizmin xüsusi toxumalarının inkişaf etməsi, ürəyin və baş beynin elektrik və maqnit aktivliyində ifadə olunmuş fəza-zaman strukturları, hərəkətlərin koordinasiyası; insan cəmiyyətində – iqtisadi böhranlar, biznesdə rəqabət və əməkdaşlıq, küçə tıxacları, ictimai fikrin formalaşması və digərləri.

Formaca bu qədər rəngarəng, təbiətcə bu qədər müxtəlif sistemlərdə strukturların əmələ gəlməsi zamanı analogiyaların və ümumi qanunauyğunluqların axtarışına dair cəsarətli fikir Ştutqart universitetinin professoru, lazerlər fizikası və qeyri-xətti optika oblastında tanınmış avtoritet olan German Hakenə (1927-ci ildə doğulub) çox cazibədar göründü.

1973-cü ildə özünütəşkil (yəni mürəkkəb sistemlərdə özbaşına strukturların yaranması) problemlərinə aid ilk konfransda məruzə ilə çıxış edən Haken, özünün inkişaf etdirdiyi elmi tədqiqatların istiqamətini *sinergetika* (*yun.* "sin" – "birgə" və "erqos" – "fəaliyyət", "təsir") adlandırdı. Bununla o, xüsusi olaraq qeyd etmək istəmişdir ki, yeni istiqamət mürəkkəb sistemlərdə, bu sistemləri əmələ gətirən hissələrin uzlaşdırılmış qarşılıqlı təsiri və ya əməkdaşlığı nəticəsində yaranan özünütəşkil proseslərini öyrənməklə məşğuldur.

1975-ci ildə məruzənin genişləndirilmiş və düzəldilmiş variantı "Güclü tarazlıqda olmayan və qeyri-fiziki sistemlərdə kooperativ hadisələr" adı altında Review of Modern Physics ("Müasir fizikanın xülasəsi") jurnalında çap olundu.

Sinergetikanın 25 illik yubileyi münasibətilə verdiyi intervüdə professor Haken sinergetikanın öyrəndiyi sistemlərin ümumi əlamətlərini söylədi, halbuki opponentləri qabaqcadan sinergetikanın biabırçı şəkildə ömrünü başa vuracağını xəbər verirdilər. Belə sistemlər:

bir-birilə qarşılıqlı təsirdə olan eyni cür və ya müxtəlif cür hissələrdən ibarətdir;

qeyri-xəttidir;

açıqdır (ətraf mühitlə ya maddə, ya enerji ilə, ya da maddə və enerji ilə mübadilə edir) və istilik tarazlığından uzaq sistemlərdir (bunlar fiziki, kimyəvi və bioloji sistemlər ola bilər);

daxili və xarici rəqslərə məruz qalıb;

təkamül edərək, dayanıqlığını itirməyə və qeyri-stabil olmağa qadirdir.

Sistemlər keyfiyyət dəyişikliklərinə məruz qalır:

təkamül prosesində onlar yeni makroxassələr qazanır;

onlarda özbaşına makroskopik fəza, zaman, fəza-zaman strukturları və funksional strukturlar yarana bilər. Yaranan strukturlar həm düzgün, yəni nizamlanmış, həm də xaotik, yəni nizamlanmamış ola bilər.

İstənilən sinergetik tədqiqat sistemin halının, başqa sözlə, onun hal



Qeyri-xətti riyazi və fiziki məsələlərə sinergetik yanaşmanı, tənliklərin riyazi və fiziki mahiyyətinə nəzərən məntiqli qoyulmuş sualların həllərini almaq üçün, analizin və ədədi maşın riyaziyyatının birgə istifadəsi kimi müəyyən etmək olar.

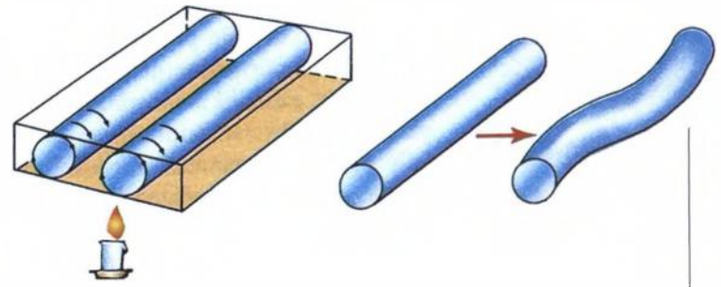
N.Zaburski

parametrlərinin və ya dəyişənlərinin təsvirilə başlayır. Onların tam dəsti sistemin halını birqiymətli təyin edir. Məsələn, altdan qızdırılan nazik özlü maye təbəqəsi onun bütün zərrəciklərinin koordinat və sürətlərinin siyahısı ilə tam təsvir olunur. Lakin belə informasiyanı almaq və təhlil etmək qeyri-mümkün olduğundan, mayeni fikrən kiçik oblastlara bölürlər və hal parametrləri olaraq, məsələn, hər bir həcmin ağırlıq mərkəzinin koordinatlarını və onu əmələ gətirən zərrəciklərin orta sürətlərini daxil edirlər.

Hal parametrlərinin qiymətləri, deməli, həm də sistemin özü *idarəedici parametrlərdən* asılıdır. Baxılan misalda idarəedici parametr təbəqənin dibinin və sərbəst səthinin temperaturlar qradiyenti və ya fərqidir. Əgər temperatur qradiyenti böhran qiymətindən kiçikdirsə, onda mayedə istilik mübadiləsi onun zərrəciklərinin xaotik hərəkəti sayəsində həyata keçir və mayenin özü bircins görünür. Yox, əgər qradiyent böhran qiymətini aşırsa, onda istilik konveksiyası baş verir; mayedə güclü ləpə yaranır. Beləliklə, onun makroskopik hərəkəti idarəedici parametrlə tənzimlənir. (İdarəedici parametrin sonrakı artması zamanı mayedə turbulent rejim yaranır.)

Sistemin halından danışarkən təsadüfi hadisələri xatırlamamaq olmaz. Onlar iki tipə ayrılır: istənilən bilik səviyyəsində təsadüfi qalan hadisələr (məsələn, radioaktiv atomun hansı zaman anında parçalanacağını qabaqcadan xəbər vermək prinsipial qeyri-mümkündür) və təsadüfiliyi biliyin tamlığı ilə, yəni təsvirin səviyyəsilə bağlı olan hadisələr (mayelərdə, qazlarda, bərk cisimlərdə sıxlığın fluktuasiyaları və ya metallarda və yarımkeçiricilərdə elektrik cərəyanının fluktuasiyaları).

Aşağıdan qızdırılan nazik özlü maye təbəqəsi misalına qayıdaq. Tədqiqatın



Aşağıdan qızdırılan özlü mayenin uzlaşmış hərəkətinə bir misal – konvektiv ləpələr (dalğalar).

birinci addımı – dayanıqlılıq astanasından azca yuxarıda sistemin davranışını öyrənməkdir. Məlum olur ki, sistemdə müxtəlif kollektiv (uzlaşmış və ya sinergetik) hərəkətlər yarana bilər: hər hansı fluktuasiya nəticəsində meydana çıxan bəzi konfiqurasiyalar güclənir, digərləri sönür. Yeni konfiqurasiyanın qiyməti və ya amplitudu xüsusi maraq kəsb edir: makroskopik strukturlar, məsələn, konveksiya ləpələrinin şəkli, ondan asılıdır. Artan konfiqurasiyaların amplitudları başlanğıc mərhələdə kiçik olur, bu da hər bir ayrıca amplitudun inkişafını izləməyə imkan verir. Sonra konfiqurasiyalar birbirinə təsir etməyə, rəqabət aparmağa başlayır və istisna edilməmişdir ki, ya onlardan biri gec-tez qalanlarını boğur, ya da bütün konfiqurasiyalar stabilləşir. Artan konfiqurasiyaların amplitudları *nizamlılıq parametrləri* adlanır: məhz onlar sistemdə makroskopik nizamlılığı, onun mikroskopik strukturunu təsvir edir.

Əgər sistem çoxlu sayda hissələrdən ibarətdirsə, onda bu sistemdə konfiqurasiyaların da sayı böyükdür və belə sistemi təsvir etmək üçün çox məlumat tələb olunur. Statistik mexanikada bu çətinliyi, ayrı-ayrı hissələrin təsvirini orta xarakteristikalarla əvəz etməklə aradan qaldırırlar (məsələn, qazın nəhəng sayda olan zərrəciklərinin impulsları əvəzində orta xarakteristikaya – təzyiqə baxırlar). Nəti-



Benar özəkləri. Aşağıdan qızdırılan silikon yağının nazik təbəqəsində konveksiya axınları yaranır. Onlar mayenin səthini düzgün altıbucaqlılara bölür. Qabın dibində olan kiçik çuxur strukturun pozulmasını doğurur.



cədə informasiyanın hər hansı hissəsi labüd olaraq itir. Bu problem sinergetikada başqa cür – sinergetikanın əsas teoreminin, *tabelilik prinsipinin* köməyilə həll edilir: sistemin fəza-zaman halı (bütün hal parametrləri) bütövlükdə və tamamilə nizamlılıq parametrlərilə təyin olunur, onlara tabedir. Nizamlılıq parametrləri hal parametrlərindən xeyli az olduğundan, ikincilərdən birincilərə keçməklə, heç nə itirmədən, *informasiyanın* xeyli *sıxılmasına* nail olurlar. Hakenin sözlərinə görə, "nizamlılıq parametrləri, kuklaoynadanlar kimi təsir edir, yəni marionetləri hərəkət etməyə məcbur edir". "Lakin, – deyə o qeyd edir, – nizamlılıq parametrlərinin kuklaoynadanlar kimi sadəlövh təsəvvür edilməsi ilə həqiqətdə baş verənlər arasında mühüm bir fərq var. Məlum olur ki, individual hissələr və ya "kuklalar", kollektiv hərəkət etməklə, onların özləri nizamlılıq parametrlərinə, yəni "kuklaoynadanlara" təsir edir. Beləliklə, bir tərəfdən kuklaoynadanlar (nizamlılıq parametrləri) sistemin ayrı-ayrı hissələrinin hərəkətini təyin edir, digər tərəfdən isə, sistemin ayrı-ayrı hissələri öz növbəsində nizamlılıq parametrlərinin təsirini (fəaliyyətini) təyin edir. Bu hadisə "*dairəvi səbəbiyyət*" adlanır. Qeyd etmək lazımdır ki, nizamlılıq parametrləri yalnız düzgün yox, həm də xaotik strukturları şərtləndirir.

Sinergetika – professor Hakenin və onun davamçılarının səyləri nəticəsində son 30 ildə yaranmış təzə, çox ümidlər verən fənlərarası istiqamətdir. Sinergetika fundamental oblastlarda elmi təkcə zənginləşdirməmiş, həm də öz hesabına bir sıra praktiki nailiyyətlər yazmışdır. Onun əsasında ənənəvi statik rejimlərdə yox, daha effektivli olan dinamik rejimlərdə məhsullar almağa imkan verən texnologiyalar, obrazları tanımağın əvvəllər məlum olmayan yanaşmaları, dava-dərman müalicəsinin və xəstəliklərin diaqnostikasının strategiyaları, sinergetik kompüter, həmçinin bir çox digərləri yaranmışdır. Lakin onun qarşısında daha çox görülməli olan işlər durur.

XAOSUN RAM EDİLMƏSİ

Biz bəzən elmin gözəlliyinə, müxtəlifliyinə və mürəkkəbliyinə aludə olaraq, unuduruq ki, onun başlıca dəyəri çox sadə ifadə olunur: elm qabaqcadan xəbər verməyə qadirdir. Məhz bu, onun əsas vəzifəsidir: hadisələr xaosundan nizamlanmış, anlaşılan, məqbul olan, faydalı olan nə isə seçmək.

1776-cı ildə Pyer Simon Laplas yazmışdı: "Təbiət sisteminin indiki halı, görünür, onun əvvəlki anda necə olmasının nəticəsidir və əgər biz baxılan anda Kainatın obyektləri arasındakı bütün əlaqələri anlayan bir ağıl təsəvvür etsək, onda o, bütün bu obyektlərin keçmişdə və gələcəkdə uyğun vəziyyətlərini, hərəkətlərini və ümumi təsirlərini müəyyən edə bilər.

Bilik sahəsi olan fiziki astronomiya insan ağlının çox böyük qiymətini daha da artıraraq, belə bir ağlın necə olacağı haqqında bizdə, tam olmasa da, təsəvvür yaradır. Göy cisimlərinin hərəkətlərinin tabe olduğu qanunların sadəliyi, onların kütlələri və məsafələri arasındakı münasibətlər onların hərəkətini müəyyən nöqtəyə qədər təhlil etməyə imkan verir. Bu nəhəng cisimlərin sisteminin keçmiş və ya gələcək əsrlərdəki halını təyin etmək üçün riyaziyyatçıya istənilən zaman anında müşahidələr sayəsində onların vəziyyətini

və sürətini əldə etmək kifayətdir... Lakin bu və ya digər hadisələri doğuran səbəbləri bilməməyimiz, həmçinin analizin qeyri-mükəmməlliyi ilə birlikdə onların mürəkkəbliyi hadisələrin böyük əksəriyyəti barəsində həmin əminliyə çatmaqda bizə mane olur.

Beləliklə, elə şeylər, az və ya çox ehtimallı şeylər var ki, bizim üçün onlar qeyri-müəyyəndir və biz onların gerçəkliyini müxtəlif dərəcədə təyin etməklə, onları anlamağın mümkünsüzlüyünü kompensasiya etməyə çalışırıq. Belə alınır ki, biz ən zərif və sınanmış riyazi nəzəriyyələrdən birinin – təsadüf və ya ehtimal haqqındakı elmin meydana çıxması üçün insan ağlının zəifliyinə borcluyuq".

Təəccüblüdür, verilmiş bu bir parçada nə qədər çox fikir söylənilib! Lap əvvəldən Laplas səbəbiyyət prinsipini ifadə edir, o səbəbiyyət prinsipini ki, fizikanın bütün binası onun üzərində qurulub və XVIII əsrin ikinci yarısında qətiyyən bəlli deyildi. Dərhal da bildirir ki, bu prinsipdən, planetin də hərəkətinin daxil olduğu, ən sadə hallarda istifadə etmək mümkündür.

İndi heç təsəvvür də etmək olmur ki, o vaxt bu nə qədər qeyri-adi səs-



P.S.Laplas

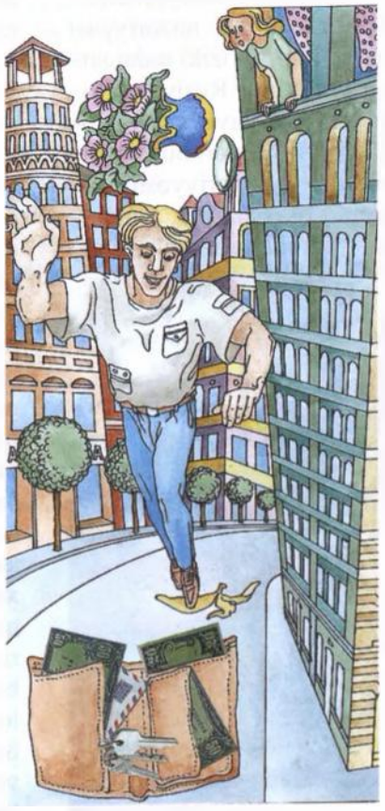
TƏSADÜFİLİK – XAOS VƏ TƏSADÜFİLİK – NİZAM

Adi mənada təsadüfilik xaosun təzahürüdür. Lüğətlər izah edir ki, bu nə isə gözlənilməyən, səbəbsiz, nəzarətsiz, mənasız bir şeydir. Keçmiş zamanlarda elm və fəlsəfə təsadüfini buna bənzər başa düşürdü.

Müasir elmdə başqa cürdür: təsadüfi nizamın bütün elmi standartlara cavab verən, dəqiq və tam təyin olunmuş formasına çevrilmişdir. Yalnız təsadüfiliyə yanaşmanı köklü dəyişdikdən sonra bir çox hadisələrin işlək modellərini qurmaq mümkün oldu.

Həyatda təsadüfi hadisə müstəqil hadisə kimi qavranılır. Elm üçün isə o, başqa bir tamın – mövcudluğunu və ya yoxluğunu riyazi olaraq dəqiq müəyyən etmək, yoxlamaq, hesablamaq və istifadə etmək mümkün olan bir çox xassələrə malik təsadüfi ardıcıllığın vur-tut bir hissəsidir. Bax, bu təsadüfi ardıcıllıqlar, ehtimallar nəzəriyyəsinin və riyazi statistikanın tədqiqat obyektidir.

Bir sözlə, "adi" təsadüfiliyin elmi təsadüfilikdən başlıca fərqlərindən biri ondan ibarətdir ki, obrazlı desək, birinci gerçəkliyin lokal xarakteristikasını, ikinci isə qlobal xarakteristikasını verir. Digər fərq daha mühümdür: "elmi" təsadüfdə təsadüfi ardıcıllıqların və hadisələrin onların toplananlarının yaranma səbəbləri yox, yalnız xassələri öyrənilir. Bir sözlə, vəziyyət bütün modellərlə eyni cürdür – maddi nöqtənin hərəkəti məsələsini həll edərkən soruşmurlar ki, o, haradan və nə üçün meydana çıxıb.

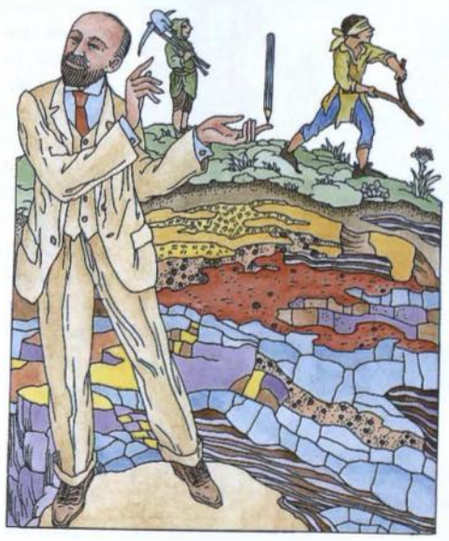


Sonsuz sayda təsadüfi hadisələrdən ibarət olan təsadüfi ardıcıllıqlar son dərəcə mühüm bir özünəbənzərlik xassəsinə malikdir. Bu o deməkdir ki, təsadüfi ardıcıllığın çox da qısa olmayan sonlu parçası (hissəsi) bütün ardıcıllığın bütövlükdə malik olduğu həmin xarakteristikalara malikdir. Belə qanunauyğunluq (böyük ədədlər qanunu kimi məlum olan) "elmi" təsadüfinin məhz praktiki əhəmiyyətini təmin edir, həm də "adi" təsadüflə bağlı olmayan oblastlarda da. Məhz buna görədir ki, bir neçə min adamdan soruşub məlumat toplayaraq, yüksək dəqiqliklə bir çox on milyonlara seçicilərin və ya alıcıların fikrini qabaqcadan xəbər vermək olur. 1950-ci illərin əvvəlində EHM-də təsadüfi ədədlər ardıcıllığını doğuran ilk alqoritmlər təsadüfinin ənənəvi başa düşülməsi dominant olduğu zaman yaradılmışdı. Hətta xüsusi termin də fikirləşmişdilər – "psevdotəsadüfi ədədlər": alınan ədədlər bütün meyarlara görə "elmi" təsadüfi idilər. Lakin onlar alqoritmik olaraq yaradılırdı, deməli, sözün ənənəvi mənasında determinləşdirilmiş idilər! Lakin artıq 1970-ci illərin əvvəlində EHM-də işləməyə başlayan bir çox tələbələr ehtimallar nəzəriyyəsini öyrəndikdən sonra heç cür başa düşə bilmirdilər ki, psevdotəsadüfi ədədlər, əgər onlar bütün meyarlara görə təsadüfidirsə, onda təsadüfi ədədlərdən nə ilə fərqlənir!

Əgər aşağıdakı iki şərt ödənirsə, onda məsələ, Adamara görə, korrekt qoyulmuş məsələ adlanır: 1) ilkin verilənlərin hər cür dəsti üçün həll mövcuddur və bu həll yeganədir; 2) həll dayanıqlıdır, yəni ilkin verilənlərin kiçik dəyişmələrinə həllərdə kiçik dəyişmələr uyğundur. Birinci şərt məsələnin riyazi müəyyənliyini, ikinci isə onun fiziki determinliyini xarakterizə edir.

lənirmiş: elmin həll etməyə qadir olduğu ən sadə məsələlərdən biri – göy cisimlərinin hərəkətinin hesablanmasıdır! Lakin Laplasın fikirlərinin əvvəli, görünür, o qədər güclü təəssürat yaradırmış ki, çoxları davamını eşitmirmiş. Bu günə qədər də hesab edirlər ki, Laplas guya bütün molekulların vəziyyətini və sürətini ölçməyin və qabaqcadan bütün dünya hadisələrini hesablamağın mümkün olduğunu zənn edirmiş.

Lakin Laplas daha sonra qeyd edir ki, "hadisələrin çox böyük əksəriyyəti" az başa düşülən olaraq qalır: "biliklər... səbəblər" (yəni bu hadisələrin fizikası) çatışmır, istifadə olunan riyazi aparat (o dövrün terminologiyası ilə, analiz) mükəmməl deyil. Həm də ehtimal nəzəriyyəsinə işarə edərək, dünyanın dərk edilməsinin dolayı metodlarından danışır; ehtimal nəzəriyyəsi yalnız 1930-cu illərdə fiziki tədqiqatlarda layiqli yer tutdu! Rusiyalı riyaziyyatçı Andrey Nikolayeviç Kolmoqorovun (1903-1987) işləri buna təkan verdi; o, ehtimallar nəzəriyyəsini aksiomatik olaraq əsaslandırdı. Kolmoqorova qədər ehtimal nəzəriyyəsində



və ona söykənən riyazi statistikada nəyin həqiqət, nəyin səhv, nəyin isə sadəcə şarlatanlıq olduğunu müəyyən etmək olduqca çətin idi (hətta zərbi-məsəl də var idi: "Yalan var, həyasız yalan və statistika").

Bu gün aydındır ki, elmin çətinliklərinin Laplas tərəfindən verilmiş siyahısı əsasən sonrakı iki tam dörddəbir əsr üçün tədqiqatların istiqamətini müəyyən etdi. Alimlər "bilikləri ... səbəbləri" genişləndirdilər, riyazi aparatı inkişaf etdirdilər, ölçmələrin və eksperimentlərin texnikasını təkmilləşdirdilər. XIX əsrdə ehtimal edilirdi ki, elmin köməyilə insan fəaliyyətinin bütün sahələrində dəqiq və uzunmüddətli proqnozlar asanlıqla həyata keçirilə bilər. Lakin XX əsrin başlanğıcına yaxın o qədər tam aydın olmayan müvəffəqiyyətsizliklər toplanıb yığılmışdı ki, 1902-ci ildə fransız riyaziyyatçısı Jak Adamar (1865-1963) riyazi fizika *məsələlərinin korrekt qoyuluşu anlayışını* dəqiq formulə etdi.

Adamara görə, qeyri-korrekt məsələni həll etməmək də olar: istənilən alınmış cavab mənasız rəqəmlər dəsti olacaqdır. 1903-cü ildə Anri Puankare qeyri-korrekt məsələlər haqqında görün nə yazırdı: "Diqqətimizdən qaçmış tamamilə cüzi bir səbəb böyük bir effekt doğurur və biz onu görməyə bilmərik, onda biz deyirik ki, bu effekti təsadüf doğurmuşdur. Əgər biz təbiətin qanunlarını və başlanğıc anda Kainatın vəziyyətini dəqiq bilsəydik, elə həmin Kainatın sonrakı andakı vəziyyətini qabaqcadan dəqiq xəbər verə bilərdik. Əgər hətta təbiətin qanunları bizə özlərinin bütün sirlərini açmış olsaydılar belə, biz onda da başlanğıc vəziyyəti yalnız təqribi bilərdik. Əgər bu bizə sonrakı vəziyyəti həmin təqribiliklə qabaqcadan xəbər verməyə imkan verərdisə, bu bizə lazım olan hər şey olardı və biz deyə

XAOS VƏ NİZAM

Qədim yunanlar üçün *xaos* görünən uçurum, geniş açılmış deşik, nə isə görünməyən və duyulmayan, hər cür keyfiyyətsiz bir şey demək idi, o şey ki, onu adlandırmaq da olmaz, çünki istənilən işarəedilmə artıq özündə hansısa xassələr daşıyır. Romalılar da xaosa son dərəcə emosional yanaşmışlar. Onlar üçün xaos cəhənnəmin hansı isə bir növü – qorxunc dərin uçurum idi, orada varlıq toza çevrilmiş, əridilmişdir; orada hər şey yox olur, oradan hər şey zahir olur. Müasir dildə "xaos" sözü yalnız və yalnız hərc-mərcliyi, son dərəcə nizamsızlığı bildirir.

Nizamın nə olduğu isə bir növ hamıya aydındır: bu nə isə düzgün, mütəşəkkil, sazlanmış və ya heç olmazsa bu cür görsənən bir şeydir. Tərifin çox da ciddi olmamasının eybi yoxdur: hər bir adam həm nizamı, həm də onun yoxluğunu duyur. Əfsus ki, insanlar müxtəlif cür duyurlar.

Məsələn, özgə stolunun üstündə kağız və kitabların qalaq-qalaq yığılması, yəqin ki, kimməsə xaotik görünəcəkdir. Onda o, nizam yaratmağı qərara alır: kitab və kağızları ölçülərinə görə çeşidlərə ayırır, onları səliqəli dəstlərə yığır. Ancaq bu stolun arxasında işləyən insan çətin ki, belə kömək üçün təşəkkür etsin. Onun üçün məhz indi kağız və kitabların yerləşməsi xaosa çevrilmişdir – hansı dəstdə nəyin yerləşdiyini o bilmir!

Biliyə, dərk etməyə, əhatə edən hər şeyi nizamlamağa can atmaq cəhdinin insanda instinkt səviyyəsində bünövrəsi qoyulmuşdur ki, bundan da psixoloqlar *Rorşah testində* istifadə edirlər. Sınaq edilən adamlara formasız mürəkkəb ləkəsi, xaotik ləkə göstərirlər. Onlar rəngin təsadüfi izlərində mütləq hansı isə bir şəkil, doğrudur, hər biri özünün gördüyü şəkli, tapırlar.

Nizam və ya nizamın yoxluğu ətraf aləmə deyil, insanın ətraf aləm haqqındakı təsəvvürünə aiddir. Həm də dünyanın bu anlamı tam və dərin olduqca, orada bir o qədər nizam görürlər və əksinə.

Lakin insanların öz dünya mənzərəsinə gətirdikləri nizam yalnız onların dərketmə qabiliyyətindən asılı deyil. Məsələn, klassik musiqi həvəskarları üçün hazırkı "gənclər" musiqisinin hamısı – səs xaosudur, qıcıqlandırıcı səs-küydür. Və ya başqa misal. Eyni bir meşə massivini göbələkçi, ovçu və turist tamamilə müxtəlif cür görür, qiymətləndirir və istifadə edirlər. Başqa sözlə, insanın dəyərləri, məqsədi və əvvəlki təcrübəsi və bir çox digərləri onun qavrayıcılığını ya kütləşdirir, ya da itiləşdirir, bəzi detallara əhəmiyyətlilik və etibarlılıq verir, digərləri isə heç bir dəyəri olmayan boş şeyə çevirir.

Bəs təcrübədə dəfələrlə yoxlanılmış və elmi qanunlarda toplanmış nizam necədir? Ola bilərmi ki, bu cür nizam da dünyanın obyektiv xassələrini əks etdirməsin? Məşhur fransız fiziki və filosofu Leon Brillyüen deyirdi: "Fiziki modellər dünyadan, coğrafi xəritələr Yer səthindən fərqləndiyi kimi fərqlənir".

Elmin tarixi və coğrafi xəritələrin tarixi Brillüenin haqlı olduğunu sübut edir. Həm fiziki nəzəriyyələr, həm də xəritələr öz inkişaf prosesində kəskin dəyişmişdir. Lakin həm nəzəriyyələrin, həm də xəritələrin hər yeni nəslinin yaranması ilə orada getdikcə daha az ləkələr qalırdı, dünya haqqındakı bilik getdikcə daha ətraflı və daha dəqiq olurdu və insanlar nəzəriyyəni və xəritəni öz maraqları üçün getdikcə daha effektli istifadə edirdilər.



bilərdik ki, hadisə qabaqcadan xəbər verilib, deyə bilərdik ki, hadisə qanunlarla idarə olunur. Lakin bu həmişə belə olmur; ola bilər ki, başlanğıc şərtlərdəki kiçik fərqlər son hadisədə çox böyük fərq doğura bilər. Birincilərdəki kiçik səhv, sonuncuda böyük səhv doğuracaqdır. Qabaqcadan xəbər vermək mümkün olmur və biz təsadüfi inkişaf edən hadisə ilə rastlaşırıq".

Fiziki mənası olmayan məsələlər kimi, qeyri-korrekt məsələlərə aid bu kimi nöqteyi-nəzər bir çox onilliklər hökmran olmuşdur. Belə məsələləri nə riyaziyyatçılar, nə də fiziklər öyrənmirdilər. Lakin praktika elm qarşısında yeni problemlər qoydu. Nəhayət, məlum oldu ki: qeyri-korrekt məsələlərlə məşğul olmaq lazımdır. Məlum oldu ki, hətta törəmələrin təqribi hesablanması məsələsi də qeyri-korrektdir! Qeyri-korrekt qoyulmuş məsələlərin geniş sinfi (fizikada, texnikada və digər bilik sahələrində) *tərs məsələlər* adlanan məsələləri əmələ gətirir: hadisələrin kəmiyyət xarakteristikaları onların dolayı ölçmələrinin nəticələrinə görə təyin edilir. Məsələn, qravimetriyanın tərs məsələsində ağırlıq qüvvəsinin faydalı qazıntıların

TURBULENTLİYİN "BİRƏ" MODELİ

Suda pis axımlı formaya malik hər hansı cismi hərəkət etdirsək, suyun xaotik hərəkətinin necə yarandığını daha sadə şəkildə görmək olar. Artıq çox da böyük olmayan sürətlərdə burulğanlar yaranır. Sürət çox böyük olanda, itigedən gəminin arxasında müşahidə olunan iz kimi, *turbulent iz* meydana çıxa bilər. İzin oblastında suyun zərrəcikləri tamamilə nizamsız, xaotik olaraq qarışır. Mayenin belə hərəkətini ilk dəfə Kelvin, Bussinesk, Reynolds və Reley öyrənməyə başlamışlar. "Turbulentlik" terminini elmə Kelvin daxil etmiş və onu turbulentus latın sözündən ("narahat", "nizamsız" deməkdir) düzəltmişdir. Adi su borularında suyun turbulent hərəkətinin öyrənilməsinə dair təcrübələri 1883-cü ildə Reynolds yerinə yetirmişdir.

Turbulentlik çox mürəkkəb hadisədir, daha doğrusu, bütöv hadisələr kompleksidir. Onun çoxlu tipləri məlumdur, onlar müxtəlif cür nizamsızdır. Ən sadə turbulent hərəkətlərin riyazi modelləri yalnız bu yaxınlarında tapılmışdır, onların öyrənilməsində isə əsas rolu maşın eksperimentləri oynayır.

Adi kalkulyatorun köməyilə turbulent hərəkətin ən sadə modelini öyrənmək olar. Primitivliyinə baxmayaraq, bu model hər halda xaosun mürəkkəb və geniş yayılmış əmələ gəlməsi hadisələrinin xarakterik əlamətlərini doğurur. Modeli öyrənmək üçün yalnız üç hesab əməlini bilmək lazımdır!

Bu hesab əməllərini mənimsəmiş və müəyyən qaydaları gözləməklə tullanan alim birə təsəvvür edək. Əgər $t_n = n\Delta t (n = 0, 1, 2, 3...)$ zaman anında birə x oxu üzərindəki x_n nöqtəsində oturursa, onda növbəti $t_{n+1} = (n+1)\Delta t$ anında $x_{n+1} = b - x_n^2$ nöqtəsinə atılır, burada b – hər bir birə üçün özünün müəyyən seçilmiş ədədidir və hər bir birənin öz ədədi var (b-ni, məsələn, "birə sabiti" adlandıraq). Tutaq ki, birə $-2 \le x \le 2$ parçasının hər hansı bir nöqtəsindən hərəkətə başlayır. Kifayət qədər uzun müddətdən sonra onun harada olacağını təyin etmək, yəni n-nin böyük qiymətlərində x_n-nin necə ola biləcəyini təsəvvür etmək lazımdır.

Görünüşünə görə məsələ nə qədər sadə olsa da, kalkulyatorsuz çətin ki, onun həllini tapmaq mümkün olsun. Lakin eksperimentlərə başlamazdan qabaq, onlardan nə gözləmək olar haqqında bir qədər düşünmək yaxşıdır. $x^2 + x = b$ tənliyinə uyğun olan AA_0A_1 əyrisinə baxaq (şəklə bax). Əgər x_n müəyyən bir limitə yaxınlaşırsa, onda həmin limit qiyməti bu əyri üzərində yerləşəcəkdir.

Lakin ədədi eksperimentlər göstərir ki, o birələr ki, onlar üçün koordinatları $(x_0; b)$ olan nöqtələr $A_0B_1B_1'A_0'$ fiquru daxilində yerləşir, həmin birələr A_0A_1 əyrisinə yaxınlaşır ($A_0'A_0$ əyrisi Ob oxuna nəzərən güzgü əksi nəticəsində alınır). Bu zaman atılıb-düşən birələrdən heç biri A_0A budağı üzərinə düşmür, əgər onların b "sabitləri" və x_0 başlanğıc koordinatları elədirsə ki, $(x_0; b)$ nöqtəsi ştrixlənmiş oblastda yerləşir, onda birələr sonsuzluğa qaçıb gedirlər. "Sabiti" $b < 0{,}75$ olan səyyahın taleyi tam müəyyən olunmuşdur: onlar ya sonsuzluqda tələf olur, ya da A_0A_1 əyrisi üzərindəki nöqtələrə cəzb olunur, burada onları tutmaq asandır. $B_1B_2B_2'B_1'$ oblastında koordinatları $(x_0; b)$ olan alim birələrin də taleyi bir o qədər kədərlidir. Onlar gec-tez $A_2A_1A_2'$ əyrisi üzərinə düşürlər və n kifayət qədər böyük olduqda hər addımda A_1A_2'-dən A_1A_2-yə və əksinə sıçrayırlar. Əgər nəzərə alsaq ki, n-nin böyük qiymətlərində iki ardıcıl sıçrayışdan sonra birə həmin budağın yanında olacaqdır, yəni $x_{n+2} \approx x_n$, onda bu əyrinin tənliyini çıxarmaq çətin deyildir. Buradan tapırıq ki, $x_{n+2} = b - (b - x_n^2)^2$ və $x_{n+2} \approx x_n \approx x$ limitində x üçün $(b - x^2)^2 - (b - x) = 0$ tənliyinin sol tərəfi $(x^2 + x - b)$ və $(x^2 - x + 1 - b)$ vuruqlarının hasilinə bərabərdir. Birinci vuruğun sıfıra bərabər olması AA_0A_1 əyrisini, ikinci vuruğun sıfır olması isə $A_2A_1A_2'$ əyrisini verir.

İndiyədək nə baş verəcəyini az və ya çox dəqiqliklə qabaqcadan xəbər vermək mümkün idi. Lakin "birə sabitinin" böyüməsilə məsələ sürətlə mürəkkəbləşir. Birələri cəzb edən əyrilər haçalanmaqda davam edirlər, $b < 1{,}5$ olduqda isə sıçrayışlar demək olar ki, qabaqcadan xəbər verilməz, nizamsız olur. Buna şəkildə qaralmış oblast uyğundur. Məsələn, əgər birə B_1B' parçasında hərəkətə

yataqları tərəfindən yaradılan anomaliyaları ölçürlər. Yatağın formasını və onun yerləşmə dərinliyini hesablamaq tələb olunur. Elementar zərrəciklər fizikasında da tərs məsələlər həll etmək lazım gəlir, burada səpilmə məlumatlarına görə zərrəciklərin kütləsini və yükünü hesablayırlar.

Qeyri-korrekt məsələlərin həlli metodları 1960-cı illərin əvvəlində Andrey Nikolayeviç Tixonov (1906–1993) məktəbinin rusiyalı riyaziyyatçıları tərəfindən təklif olunmuşdur. Bu metodların əsasında duran ideya çox sadədir: axtarılan həllin şəklinə dair əlavə fiziki və riyazi informasiyadan istifadə edərək, qeyri-korrekt məsələni yenidən təyin etmək və onu korrekt etmək lazımdır. XX əsrin ortalarında elmə EHM gəldi. Elm isə tanınmaz

Qravimetriya (*lat.* gravis – "ağır" və *yun.* "metron" – "ölçü"). Yerin qravitasiya sahəsini, bu sahənin fəza dəyişmələrini öyrənir.

başlayırsa, onda birə, onun koordinatlarının limit qiymətlərilə sıx dolmuş C_3C' parçasına dartılacaqdır.

Cəzb edən (dartan) çoxluq elmi ədəbiyyatda *attraktor* adlanır. Məsələn, sürtünmə olduqda rəqqasın attraktoru yeganə bir nöqtədən – aşağı tarazlıq vəziyyətindən ibarətdir. Yellənən yelləncəyin attraktoru – sürtünməyə sərf olunan itkilər yırğalanmağa sərf olunan enerjilə dəqiq kompensasiya olduğu halda dövrü hərəkətdir. "Birə" modelinin attraktoru xeyli mürəkkəb struktura malikdir. $b < 1{,}5$ olduqda birələrin hərəkəti periodikdir – birə müntəzəm olaraq bir budaqdan digərinə yerini dəyişir. A_1A' xətlərində hərəkətin xarakteri sıçrayışla dəyişir, çünki budaqlar haçalanır. *Qeyri-xətti sistemlər* üçün *tipik* olan bu hadisə *bifurkasiya* (*lat.* bifurcus – "haçalanmış") adlanır. b artdıqca model bifurkasiyalar ardıcıllığı vasitəsilə xaotik hərəkət oblastına keçir (birələr üçün xaos azadlığı bildirir; özünün "sabitini" artıraraq, o, zərurət aləmindən azadlıq aləminə keçə bilər).

Maraqlıdır ki, azadlıq aləmində vaxtaşırı (daha dəqiq, b-nin müəyyən qiymətlərində) zərurət adacıqları yaranır – burada hərəkət yenidən periodik olur. Əgər $b < 1{,}5$ olduqda, period 2^n təşkil edirsə, onda adacıqlarda b 3-ə, 5-ə, 7-yə və s. bərabər olur.

Periodik və xaotik hərəkətlərin bu cür münasibəti – periodun ikiqat artması, xaotik hərəkətə keçid, periodiklik adacıqlarının meydana çıxması – bir çox fiziki sistemlər üçün tipikdir. Cəzb edən çoxluqda hərəkət xaotikdirsə, o, *qəribə attraktor* adlanır.

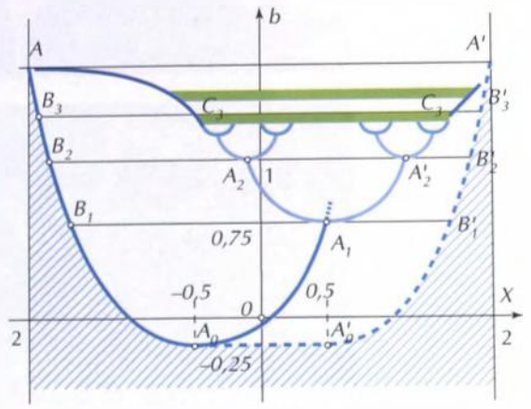
Bifurkasiya nöqtələrində "birələrin sabitlərinin" qiymətlərini b_n ilə işarə edək, belə ki, $b_1 = -0{,}25$, $b_2 = 0{,}75$ və s. Məlum olur ki, n-nin böyük qiymətlərində bu ədədlərin fərqləri həndəsi silsilə əmələ gətirir. Daha dəqiq,

$$(b_{n+1} - b_n)/(b_n - b_{n-1}) \to 1/\delta$$

münasibəti ödənir, burada $\delta = 4{,}6692...$

Bu gözəl qanunauyğunluğu 1975-ci ildə Amerika fiziki Mitçel Feygenbaum kəşf etmişdir. O, kalkulyatorda, burada təsvir etdiyimiz modelə çox oxşayan bir modeli hesabladı. Baxılan qanunauyğunluğu aşkar edən Feygenbaum digər "xaotik ssenariləri" tədqiq etməyə başladı və tezliklə anladı ki, təbiətin yeni qanunu ilə iş görür. Özünün haqlı olduğuna digər alimləri inandırmaq elə də asan olmamışdı: iki-üç il jurnallar onun məqalələrini qəbul etmədilər. Lakin kəşfi hamıya bildirməyin çoxlu başqa üsulları var – məsələn, elmi konfransda tezliklə bifurkasiyaların və xaosun tədqiqi ən dəbdə olan elmi mövzulardan biri oldu. İndi δ ədədinə *Feygenbaum sabiti, bifurkasiyaların* paylanmasında onun tapdığı qanunauyğunluq *Feygenbaum oxşarlıq qanunu* adlanır.

Əlbəttə, turbulentliyin dərk edilməsi yolunda ancaq ilk addım atılmışdır. Lakin bu yolda hərəkət edərək, bu mürəkkəb hadisənin təbiətini tam araşdırmaq mümkün olacaqdır. Qədim Roma filosofu və şairi Tit Lukresi e.ə. I əsrdə yazmışdı: "Beləliklə, böyük şeylər haqqında anlayışlar tərtib etməyə Kiçik şeylər kömək edir, onları dərk etmək üçün yollar göstərməklə".



Turbulentliyin "birə" modelinin bifurkasiya diaqramı.

dərəcədə dəyişdi. Fizikada və kimyada və s. yeni hadisələr kəşf edən ədədi modelləşdirmənin və ədədi eksperimentlərin yaranmasını xatırlamaq kifayətdir. Təsadüf və xaos haqqında da təsəvvürlər xeyli zənginləşdi.

1940-cı illərin axırında ədədi modelləşdirmənin ehtiyacı üçün təsadüfi ədədlər ardıcıllığı tələb olundu. Təsadüfi ədədlərin cədvəlləri və təsadüfi ardıcıllıqların təbii generatorları (məsələn, Heyger sayğacı) o vaxtlar istifadə olunurdu, indi yaramır. Cədvəllər çox qısadır, sayğaclar isə həddən ziyadə ləngdir. Təsadüfi ədədləri alqoritmik, yəni kompüterlərin köməyilə yaratmaq lazım gəldi. Bərabər paylanmış təsadüfi ədədlərdən fərqlənməyən və təkrarlanmayan ədədlərin iki milyarda qədər uzunluqlu ardıcıllıqlarını doğurmağa imkan verən alqoritmi 1951-ci ildə fransız riyaziyyatçısı D.Lemer təklif etdi.

Lemerin alqoritmi o qədər uğurlu oldu ki, bu günə qədər istifadə olunur. O, sadə düsturla verilir:

$$x_{k+1} = (ax_k + c)(\mathrm{mod}\, M),$$

x_0, a, $c < M$ olduqda.

$a(\mathrm{mod}\, b)$ yazısındakı mod M funksiyası a-nın b-yə bölünməsindəki qalıq kimi təyin olunur. Məsələn, $15(\mathrm{mod}4) = 3$; $17(\mathrm{mod}10) = 7$; $8(\mathrm{mod}3) = 2$.

Bu alqoritmi reallaşdıran kompüter proqramlarında a, c və M-i adətən fiksə edirlər, təsadüfi ədədlərin yaradılan ardıcıllığının həcmi onların seçimindən güclü asılıdır (çox vaxt $a = 69069$, $c = 0$, $M = 2^{31}$). x_0-ın qiymətini isə istifadəçi təyin edir. Əvvəlki qiymətini verərək, sonrakı hesablamaları apararkən istifadəçi, yenidən təsadüfi ədədlərin dəqiq həminki ardıcıllığını alacaqdır.

Lemer alqoritmi, praktiki olaraq, qəpiyin atılmasından tutmuş atom reaktorlarının işinin modelləşdirilməsinə qədər, bütün təsadüfi prosesləri müvəffəqiyyətlə modelləşdirməyə imkan verir.

Qəribə görünən və asanlıqla törədilən özünəbənzər obyektlərin yeni sinfini 1960-cı illərdə, o vaxtlar İBM kompüter korporasiyasının əməkdaşı olan Benua Mandelbrot (1924-cü ildə doğulub) aşkar etdi.

Mandelbrot istənilən böyümələr zamanı özünəbənzər qalan həndəsi obyektlər üçün "fraktal" (*lat.* fractio – "sındırma", "qırıq") termini daxil etdi. Broun hərəkəti – bu cür tərifə uyğun gələn təbii hadisəyə ən sadə misaldır. Broun zərrəciyinin trayektoriyasının mikroskopun bir böyütməsi zamanı düzxətli görünən parçası, çox böyüdüldükdə, bütün əvvəlki yol kimi, o qədər sınıq və qeyri-müntəzəm olur.

Əlbəttə, təbiətdə özünəbənzərlik həmişə təqribi reallaşır və yalnız böyütmənin məlum hədlərinə qədər. Lakin fraktal strukturlar heyrət doğuracaq qədər çoxdur. Bunlar – sahil xətləri, çayların məcrası, buludların və ağacların çevrəsi, maye və qazların turbulent axınlarıdır...

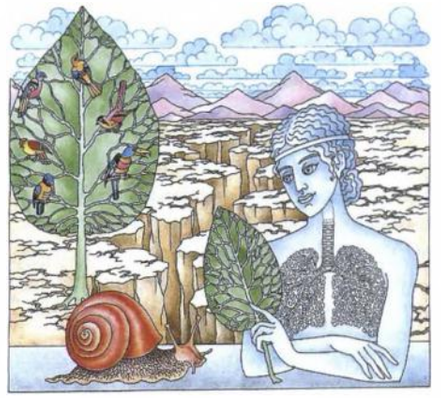
Deyəsən, canlı orqanizmlərdəki fraktallar daha çox təsir bağışlayır. Ağciyər alveollarının strukturu fraktal həndəsənin qanunlarına tabedir. Nazik bağırsağın strukturlarındakı iri və xırda detallar özünəbənzərlik büruzə verir. Ürəyin qan damarları fraktal budaqlanmalara malikdir. Neyrondan (beyin hüceyrələri) çıxıntılar – dendritlər ayrılır, onlar getdikcə daha da incələşən liflərə budaqlanır. Sağlam adamın ürək ritmində də özünəbənzərlik müşahidə olunur: ritmi müxtəlif zaman intervallarında (məsələn, 3, 30 və 300 dəq) qeydə alarkən sürətli dəyişmələr yavaş dəyişmələr kimi görünür. Maraqlıdır ki, ən məşhur fraktalları almaq üçün, demək olar ki, Lemer alqoritmindən çətin ki, sadə olan alqoritmlərdən istifadə edirlər. *Jülia çoxluğunun* və *Mandelbrot çoxluğunun* qurulması $z_{k+1} = z_k^2 + c$ iterasiyasının tətbiqinə əsaslanmışdır, burada $z_k = x_k + iy_k$ və $c = p + iq$ – kompleks ədədlərdir. Bu iterasiyanın həqiqi və xəyali hissələri üçün ekvivalent yazılışı belədir:

$$x_{k+1} = x_k^2 - y_k^2 + p, y_{k+1} = 2x_k y_k + q.$$

Əgər verilmiş düsturda x_k nöqtəsini yerinə yazsaq, onda hər bir sonrakı



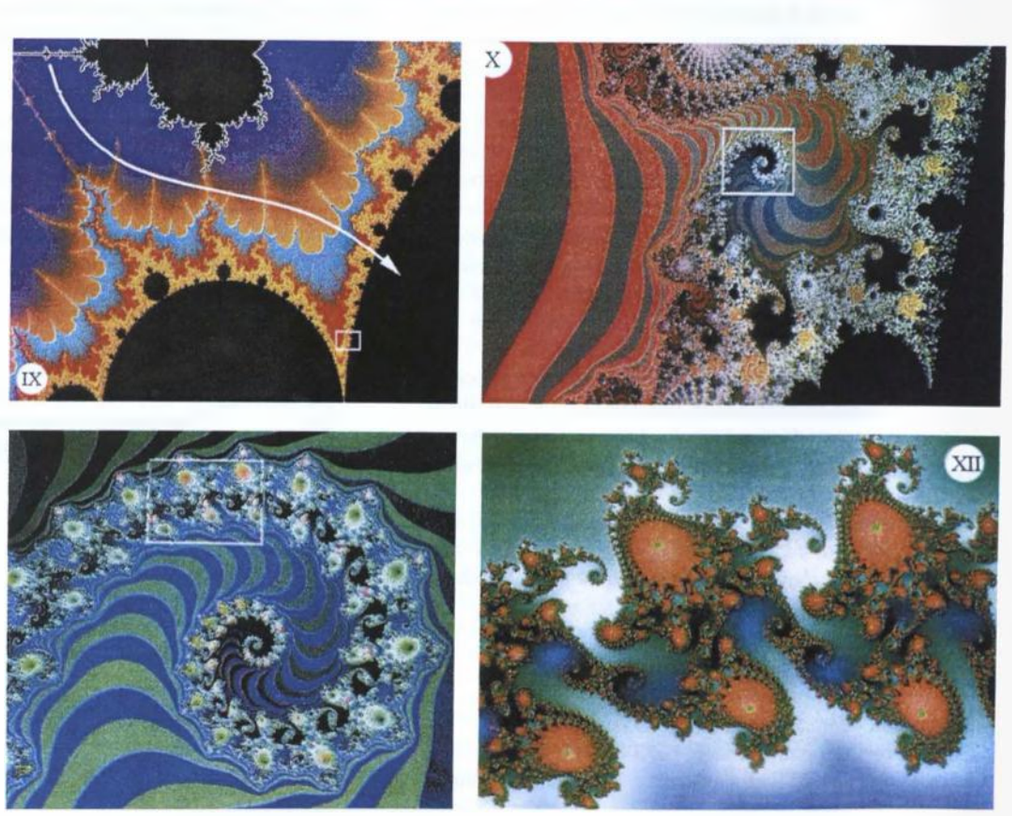
Jülianın fraktal çoxluğu.



Qaston Jülia (1893-1978) Birinci Dünya müharibəsi illərində (EHM yaranana qədər) fraktal çoxluqları kəşf etmiş fransız riyaziyyatçısıdır.

İterasiya (*lat.* iteratio – "təkrarlama") – hər hansı riyazi əməliyyatın təkrar tətbiqidir.

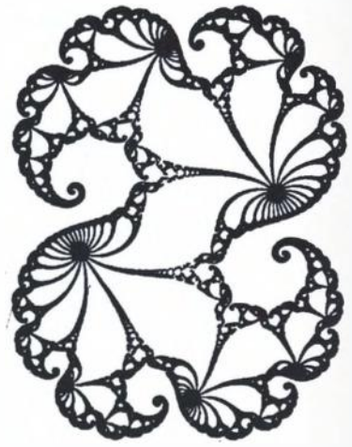
Mandelbrot fraktal çoxluğunun özünəbənzərlik xassələri. Çərçivə ilə ayrılmış fraqmentlər hər növbəti şəkildə böyüdülmüş miqyasda verilmişdir. Onların hamısı eyni strukturu büruzə verir.



FRAKTALLARIN "QAÇQINLARI" VƏ "ƏSİRLƏRİ"

Fraktalların müxtəlifliyinə və qəribəliyinə gəldikdə isə: "Başlanğıc x_0 nöqtəsi çevrilməyə məruz qaldıqda ... alınan ardıcıllıq iki tip davranış nümayiş etdirir. Ardıcıllıq ya sonsuzluğa gedərək müstəvidə sərbəst səyahət edir, ya da kompleks müstəvinin müəyyən oblastında qapalı olur. Onlardan birincilər "qaçqınlar" çoxluğuna, qapalı fəzada qalanlar isə "əsirlər" çoxluğuna daxildir. "Əsirlər" çoxluğundan seçilmiş başlanğıc x_0 nöqtəsi ardıcıllıq doğurur; bu ardıcıllıq onun neçə nəslinin hesablandığından asılı olmayaraq, ədədi əsarətdə qalır. Bu "türmənin" forması seçilmiş c parametrindən asılıdır. Qapalı oblastdan kənarda yerləşən x_0 nöqtəsi üçün x_k ardıcıllığı müstəvinin mərkəzindən uzaqlaşır və sonsuzluğa gedir. "Əsirlər" və "qaçqınlar" çoxluqları bir-birindən sonsuz nazik sərhədlə ayrılmışdır. Bu sərhəd Jülia çoxluğu kimi tanınır".

(X.Yurgensin, X.O.Paytgenin və A.Zaupenin "Fraktalların dili" məqaləsindən.)



Jülia çoxluğu – rabitəli struktur.



"Fatu tozu".

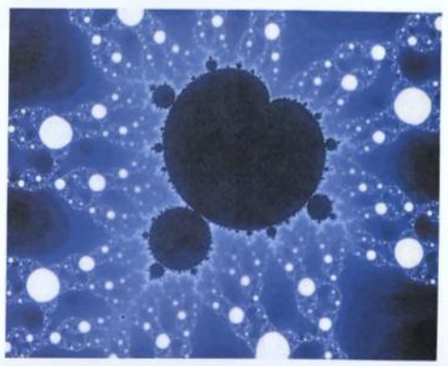
Pyer Fatu (1878-1929) fransız riyaziyyatçısıdır.

x_{k+1} nöqtəsi alınar. Jülia çoxluğunun fraktal sərhədləri yalnız c parametrinin qiymətindən asılı olan rəngarəng və qəribə formalar alır.

Əgər x_k-nı fiksə etsək və c-nin müxtəlif qiymətlərini bir-bir seçsək, onda Mandelbrot çoxluğunu alarıq (aşağıdakı şəkildə qara rəngli oblast). Hər bir c kompleks ədədi ya qara struktura düşür, ya da yox. Birinci halda Jülia çoxluqları rabitəli strukturlar olacaqdır, ikinci halda isə "Fatu tozuna" parçalanacaqdır.

Baxılan halda rabitəli cisim dedikdə aşağıdakını başa düşmək lazımdır: əgər cisim üzərində çəkilmiş ilgəyi dartıb bir nöqtəyə yığmaq mümkündürsə, onda cisim rabitəlidir. Asanlıqla başa düşmək olar ki, "bublik" üzərindəki ilgəyi heç də həmişə bir nöqtəyə dartıb yığmaq olmur, yəni "bublik" rabitəsiz cisimdir.

Mürəkkəb fraktalın alqoritmik düsturu olduqca sadədir. Əks əlaqə barəsində nə məlumdur? İstənilən şəkli fraktal kimi təsvir etmək olarmı? Əgər tərs məsələlərin bu yeni növmüxtəlifliyini həll etməyi öyrənsək, onda nöqtə-nöqtə rəqəmlənmiş xəyalların meqabayt fayllarını bir neçə on ədədə – fraktal düsturların parametrlərinə sıxmaq mümkün olacaqdır.



Mandelbrot çoxluğu (qara oblast).

XX əsrin ortalarında istənilən təsəvvür oluna bilən şəkilli – determinləşdirilmiş, idarə oluna bilən xaosun təsadüfi ədədlərini doğurmağın alqoritmik (və kifayət qədər elementar) üsulunun kəşfi analoji istiqamətlərdə tam mənası ilə ən müxtəlif tədqiqatlar seli yaratdı.

UNİVERSAL PROBLEM: KAİNATIN TƏKAMÜLÜ

Hesab edilir ki, elm inqilabi sıçrayışlar yolu ilə inkişaf edir. Məsələn, fizika iki inqilab (və ya necə deyərlər, *paradiqmanın* iki dəyişməsini) yaşamışdır. Birincisi, XVII əsrdə baş verdi və Qalileyin, Nyutonun və onların müasirlərinin adları ilə bağlıdır. Həmin vaxtlarda elmi metodun köməyilə qüvvələrin təsiri altında cisimlərin hərəkətinin sistematik öyrənilməsinin təməli qoyuldu.

İkinci inqilab XIX-XX əsrlərin dönüşündə baş verdi və kvant nəzəriyyəsinin və nisbilik nəzəriyyəsinin yaranmasına səbəb oldu. Onlar sonrakı



yüz ildə bütün fizikanın inkişafını müəyyən etdilər. Hər iki inqilab onunla seçilir ki, ideyaların partlayışı nisbətən dar sahələrdə aparılan konkret tədqiqatlar nəticəsində yaranmışdı.

Əksər oxucular üçün kvant nəzəriyyəsi və nisbilik nəzəriyyəsi "yeni fizika" sözləri altında başa düşülən bir şeydir. Lakin alimlər arasında ona inam artır ki, dünya növbəti, üçüncü inqilabın astanasındadır. Əvvəlki iki inqilabdan fərqli olaraq, bu inqilab geniş elmi tədqiqatlar cəbhəsində baş verəcəkdir. XXI əsr, həqiqətən, yeni fizikasının ideyalarının əlamətləri, ilk baxışda bir-birindən çox uzaq olan hadisələrin (qara çuxurlar, subatom zərrəcikləri, ifratkeçirici materiallar, özünütəşkil kimyəvi reaksiyaları) öyrənilməsindən görünür.

Fizika bizi əhatə edən hər şeyi izah etməyə hazırdır. Alim hər hansı bir konkret sistem haqqında – qar dənəciyi, tufan buludu, canlı orqanizm haqqında heç nə bilməyə bilər, lakin o heç vaxt razılaşa bilməz ki, həmin sistemin quruluşunu fizika qanunları əsasında izah etmək mümkün olmasın. Tədqiqatçı inanır ki, təbiət qanunlarını, həmçinin müəyyən başlanğıc və sərhəd şərtlərini bilmək Kainatdakı istənilən hadisəni prinsipcə başa düşmək üçün kifayətdir. Ona görə də maddənin çox kiçik zərrəciklərindən tutmuş qalaktika topalarına qədər bütün Kainat təbiət qüvvələrinin sonsuz rəngarəng oyunlarını öyrənmək üçün nadir laboratoriyaya çevrilir.

Son üç-dörd onilliyin mühüm nailiyyətlərindən biri onu dərk etməkdən ibarətdir ki, yerdəki hadisələri müəyyən edən fizika qanunlarının köməyilə bütövlükdə Kainatı da: onun mənşəyini və gələcək taleyini də öyrənmək olar. İndi Böyük partlayışın standart modelinə çevrilmiş modelin qurulması tarixini xatırlayan görkəmli alim, müasir elementar zərrəciklər nəzəriyyəsinin yaradıcılarından biri, Nobel mükafatı laureatı Stiven Vaynberq yazmışdı: "İlk üç dəqiqə (Kainatın mövcudluğunun ilk üç dəqiqəsi) bizdən zaman etibarilə o qədər uzaqlaşmışdır ki, temperaturun və sıxlığın üzərinə qoyulan şərtlər o qədər tanış deyil ki, biz, bizim adi statistik mexanika və nüvə fizikası nəzəriyyələrini tətbiq etməyə utanırıq. Fizikada belə şey tez-tez baş verir – bizim səhvimiz onda deyil ki, biz öz nəzəriyyələrimizi həddən çox ciddi qəbul edirik, ondadır

Paradiqma – baxılan elmin, dövrün elmi dünyagörüşünün söykəndiyi əsas prinsiplər kompleksidir. Məsələn, klassik mexanikanın paradiqması – Qalileyin nisbilik prinsipi, uzağatəsir prinsipi və Nyutonun qanunlarıdır. Göstərilən mənada bu termini ilk dəfə Amerika filosofu Tomas Kun "Elmi inqilabların strukturu" kitabında daxil etmişdir.



ki, biz onlara kifayət qədər ciddi yanaşmırıq. Həmişə onu dərk etmək çox çətindir ki, stolun arxasında bizim əyləndiyimiz ədədlərin və tənliklərin real dünyaya hansısa bir dəxli var".

Görünür, buna bənzər utancaqlıq birdəfəlik yox olmuşdur. Bunun ən yaxşı sübutu təbiətin obyektlərindən ən böyüyünün və ən mürəkkəbinin – hər şeyi əhatə edən Kainatın təkamülünün XX əsrin sonuna yaxın formalaşmış ssenarisidir. Qəribə şey aydınlaşdırıldı: Kainat öz mövcudluğunun başlanğıcında çox sadə qurulmuşdu və yalnız tədricən onda getdikcə daha mürəkəb strukturlar (atomlar, molekullar, kimyəvi birləşmələr, zülallar, bioloji obyektlər və nəhayət, yaranmışların ən yüksək zirvəsi – öz ağlı ilə birlikdə insan) yaranırdı. Sadəlik yüksək temperaturla, yəni ilkin Kainatda materiya zərrəciklərinin yüksək enerjisilə təmin edilirdi. Beləliklə, Kainatın təkamülünün dərk edilməsinin əsası *qaynar Kainat* modelidir.

Fizika qanunlarının və fiziki hadisələrin müasir çoxluğu sırf aşağı temperatur hadisəsidir. Materiyanın temperaturu artanda, burada təsir edən müxtəlif qüvvələr, öz fərdiliyini itirərək birləşməyə başlayır, belə ki, 10^{32}K fantastik temperaturda təbiət qüvvələri bir *superqüvvədə* birləşməlidir (tanınmış ingilis alimi və elm populyarizatoru Pol Devisin ifadəsilə). Bu superqüvvə son dərəcə sadə riyazi formaya malikdir. Hətta ayrı-ayrı subatom zərrəcikləri də öz individuallığını itirir və onları fərqləndirən xarakteristikalar gözqamaşdırıcı alovda yox olur. Bir çox illərin işi nəticəsində fiziklər aşkar etdilər ki, enerjinin (temperaturun) artması ilə mürəkkəb subatom strukturlar daha sadə komponentlərə parçalanır, mürəkkəb qarşılıqlı təsirlər isə daha da sadələşir. Kainatın "yarandığı anda" qeyri-məhdud temperaturda sadə zərrəciklərin azsaylı növləri arasında yalnız superqüvvə təsir edirdi.

İlkin Kainatın təkamülünün əsas mərhələlərini qısaca təsvir edək. Hər şey *sinqulyar* hal adlanan haldan başlamışdır. Məlum fizika qanunlarının köməyilə o, pis təsvir olunur: Kainatın temperaturu, sıxlığı və digər xarakteristikaları sinqulyar halda sonsuzluğa bərabərdir. Bu halın fiziki mənası nədir? – sualının hələ ki, birqiymətli cavabı yoxdur. Lakin, dəqiq desək, fiziklərin məlum tənliklərdən istifadə edərək, həmin hala baxmağa hüquqları yoxdur, çünki lap başlanğıcın yaxınlığında qravitasiyanın kvant xassələri özünü büruzə verməlidir.

Kainatın həyatının birinci mərhələsini elə belə də adlandırırlar – *kvant qravitasiyası erası*. O dövrdə mövcud olan nəhəng temperatur və sıxlıqda bütün dörd məlum qarşılıqlı təsir (güclü, elektromaqnit, zəif və qravitasiya qarşılıqlı təsirləri) tam birləşmişdi və bir-birindən fərqlənmirdi.

O vaxt Kainat neçə olmuşdur, biz bilmirik. Kvant qravitasiyası erası indiyədək terra incognita olaraq qalır. Kosmosda irimiqyaslı qarşılıqlı təsirləri təsvir edən ümumi nisbilik nəzəriyyəsini və çox qısa məsafələrdə tətbiq olunan kvant prinsiplərini birləşdirə biləcək nəzəriyyə – qravitasiyanın kvant nəzəriyyəsi hələ yaradılmayıb. Belə bir nəzəriyyə Böyük partlayışdan sonrakı ilk böhran anında, bütün Kainat bir atomun ölçüsündən kiçik ölçülərə malik olan anda nə baş verdiyini izah edə bilərdi.

Kvant qravitasiyası erasının (bu era ağlasığmaz dərəcədə kiçik zaman müddətində – 10^{-43} san davam etmişdir) sonunda Kainat o qədər soyumuşdur ki, artıq qravitasiya digər qarşılıqlı təsirlərdən ayrıla bilmişdi, qalan üç qarşılıqlı təsir isə hələ seçilməz olaraq qalırdı. *Böyük birləşmə erası* başladı. Qeyd edək ki, bir qarşılıqlı təsirin digərlərindən ayrılması müxtəlif sıxlıqlı mayelər qatışığının tədricən fraksiyalara ayrılmasına və ya üçlük nöqtəsindən aşağı temperatura qədər soyuduqda fazaların ayrılmasına bənzəyir və faza keçidləri tənliklərinə analoji olan tənliklərlə təsvir olunur.

Yerdəki laboratoriyalarda əldə olunan nisbətən kiçik enerjilərdə güclü, zəif və elektromaqnit qarşılıqlı təsirlər arasında ümumi heç nə yoxdur. Bununla belə, nəzəriyyə qabaqcadan xəbər verir ki, onlar eyni bir qarşılıqlı təsirin müxtəlif ifadələridir və bu eyni



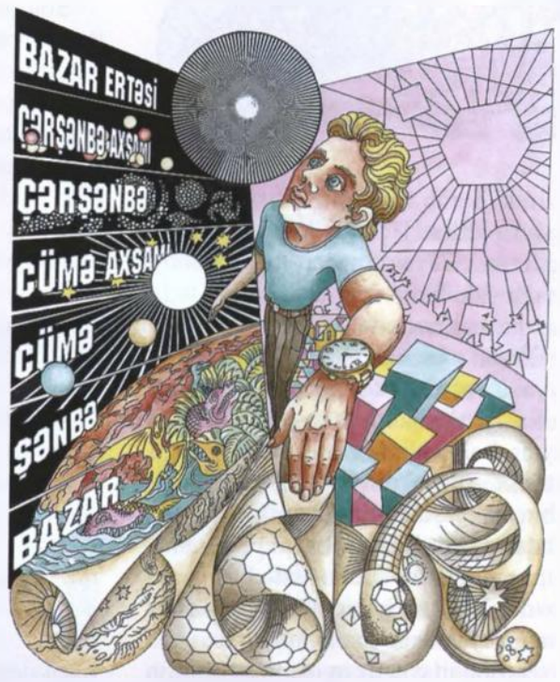
NƏ ÜÇÜN KAİNAT OLDUĞU KİMİDİR

Hələ 1913-cü ildə fizik Paul Erenfest anlamağa çalışmışdı ki, bizim fəzanın üçölçülü olması təsadüfidirmi. Erenfest onu göstərməyə müvəffəq oldu ki, atomların və molekulların və deməli, yer tipli həyatın mövcudluğuna gətirib çıxaran məlum fizika qanunları yalnız üçölçülü fəzada işləyir.

Sonrakı tədqiqatlar göstərdi ki, bu tip həyat xeyli dərəcədə dünya sabitlərinin qiymətindən asılıdır. Əgər Kainat başqa sürətlə (Habbl sabitinin başqa qiymətində) genişlənsəydi, bugünkü struktura malik olmazdı. Əgər Kainatın təkamülünün başlanğıc dövründə sıxlığın daha kiçik fluktuasiyaları yaransaydı, indi nə ulduzlar, nə də qalaktikalar olmazdı. Fəzanın ölçülərinin sayı üçdən çox olsaydı, planetlər özlərinin ulduzətrafı orbitlərində qala bilməzdi. Əgər qravitasiya qüvvələri azca böyük olsaydı, onda ulduzlar kiçik, onların həyatı isə qısa olardı. Əgər nüvə qarşılıqlı təsiri azca zəif olsaydı, onda yalnız hidrogen mövcud olardı, yox əgər azca böyük olsaydı – məhz hidrogen olmazdı.

Yuxarıda verilmiş mülahizələr bəzi alimlərdə heyrət doğurdu, bununla əlaqədar onlar, deyildiyi kimi, *antrop prinsipini* irəli sürdülər. Bu prinsipə görə, sonsuz rəngarəng Kainatın yalnız ayrı-ayrı oblastlarında şüurlu varlıqların həyatı üçün şərait vardır. *Zəif antrop prinsipi* bizim Kainatda, məsələn, Böyük partlayışın nə üçün təxminən 15 mlrd il əvvəl baş verdiyini izah edir. Şüurlu varlıqların inkişafı üçün məhz bu qədər vaxt tələb olunur: ilkin ulduzların sonra ikinci nəsl ulduzların yaranması, ifratyenilərin partlayışları nəticəsində ağır elementlərdən ibarət "supun bişməsi" lazımdır; o ağır elementlərin ki onlarsız həyat yoxdur. Təxminən 5 mlrd il əvvəl Günəş sisteminin planetləri yarandı, 2 mlrd ildən sonra Yer soyudu, sonra isə Yerdə bioloji orqanizmlərin təkamül prosesi baş verdi (buna 3 mlrd il vaxt getdi).

Zəif antrop prinsipinə çətin ki, etiraz etmək olar. *Güclü antrop prinsipi* aşağıdakına gətirilir. Tutaq ki, çoxlu müxtəlif kainatlar var. Onların əksəriyyətində şərait bizim Kainatdakına bənzər həyatın yaranması və şüurlu varlıqların inkişafı üçün yararlı deyil. Yalnız bir Kainatda (və ya bir neçə Kainatda) şüurlu varlıqlar əmələ gəlmiş və onlarda belə sual yaranmışdır: "Nə üçün bizim Kainat başqa cür yox, məhz belədir?" Güclü antrop prinsip cavab verir: "Ona görə ki, Kainat başqa cür olsaydı, onda bu cür sualları vermək üçün heç kim olmazdı!"

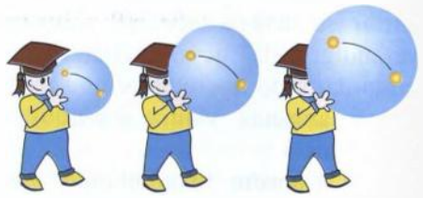


qarşılıqlı təsiri yalnız çox böyük enerjilərdə (uyğun temperaturlarda – 10^{27}K) müşahidə etmək olar. Bu cür enerjilər yalnız müasir Yerdəki laboratoriyalar üçün yox, həm də müasir Kainat üçün əlçatmazdır.

Böyük birləşmə erasında Kainat genişlənməkdə davam etmişdir. Bəs bu genişlənmə necə baş vermişdir? Əksər müasir nəzəriyyələr bir şeydə uzlaşır ki, Böyük birləşmə erası *inflyasiya* ilə: Kainatın eksponensial olaraq şişməsilə müşayiət olunur.

İnflyasiya nəzəriyyəsi kosmologiyanın dərhal bir neçə problemini həll etməyə imkan verir. Problemlərdən biri budur: Yerdən müşahidə olunan bütün Kainat eyni temperatura malikdir (bu temperaturu relikt şüalanmaya əsasən ölçürlər). Axı Kainatın diametral əks istiqamətlərdə yerləşən oblastları bir-birindən ağlasığmaz böyük məsafələrlə ayrılmışdır. Böyük partlayış anından keçən müddət ərzində işıq həmin məsafələri qət etməyə qadir deyil. Deməli, bu oblastlar heç vaxt bir-birilə əlaqədə olmayıb. Bununla bərabər, əgər onların heç vaxt enerji mübadiləsi etməyə imkanları olmayıbsa, onda niyə onların temperaturları eynidir?

Nəzəriyyəyə əsasən inflyasiya dövründə Kainatda ayrı-ayrı "qabarcıqlar" – bir-birilə əlaqəsi olmayan çox kiçik qapalı oblastlar yaranmışdı. Bu cür "qabarcıqlardan" hər biri işıq sürətilə genişlənmişdi, bütövlükdə Kainat isə işıq sürətindən milyonlarla dəfə böyük sürətlə şişmişdi. Bu zaman nisbilik nəzəriyyəsinin fəzada cisimlərin işıqdan sürətlə hərəkət etməsini qadağan edən prinsipləri pozulmamışdır – informasiya mübadiləsi yalnız səbəbiyyət əlaqəsində olan oblastlar arasında mümkün olmuşdur. İnflyasiya prosesində maddi obyektlər fəzada tərpənməz qalmışdı, fəzanın özü isə, hava üfürülən şarın üzərində çəkilmiş şəkillərlə birlikdə genişləndiyi kimi genişlənmişdir.

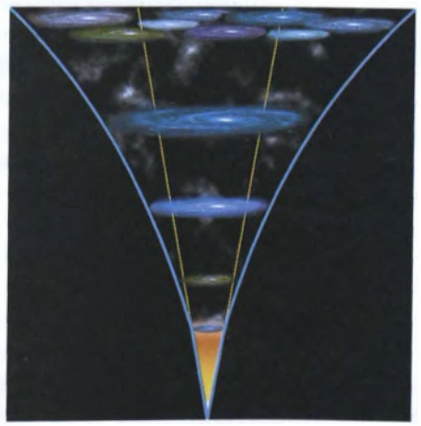


10^{-35} san ərzində Kainat ağlasığmaz dərəcədə böyük ölçülərə qədər şişmişdir, "qabarcıqların" birindən isə bizim Metaqalaktika yaranmışdır. Ona görə də onun bütün oblastlarında temperatur eynidir. Lakin qeyri-müəyyənlik münasibəti nəticəsində "qabarcıqda" qeyri-bircinsliklər mövcud olmalı idi.

Bu gün biz onların Kainat üzrə paylanmasını relikt şüalanmanın ayrı-ayrı istiqamətlərdəki zəif müxtəliflikləri (anizotropiyası) şəklində müşahidə edirik. Sıxlığın kvant rəqsləri gələcək qalaktikaların və onların topalarının rüşeymlərinə çevrilmişdir.

Başqa bir kosmoloji problem ondan ibarətdir ki, müşahidə olunan fəzanın əyriliyi o qədər kiçikdir ki, onu nəzərdən atmaq olar, yəni söhbət, demək olar, evklid fəzasından gedir. Bu da inflyasiyanın təsirinin nəticəsidir.

Lakin eksponensial genişlənmə ümumiyyətlə necə baş verə bilər?



Kainatın inflyasiya modeli.



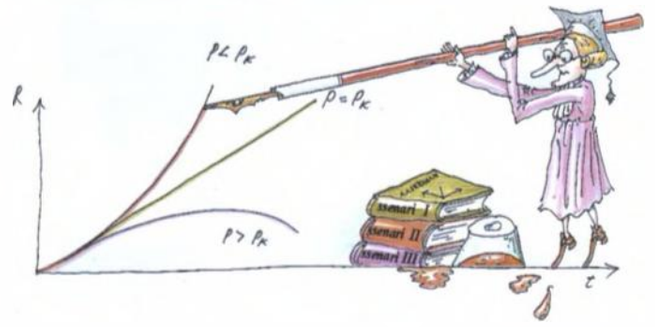
Çünki Böyük partlayışın doğurduğu genişlənmə zaman keçdikcə qravitasiya qüvvələrinin tormozlayıcı təsiri sayəsində yavaşımalıdır, inflyasiya isə əksinə, obyektləri qeyri-adi böyük təcillə hər tərəfə atmışdır.

İnflyasiya kosmologiyasında fiziki vakuum konsepsiyasından istifadə olunur. İlk baxışda belə çıxır ki, vakuum haqqında heç danışmağa dəyməz: boşluq məhz boşluqdur, heç nədir. Lakin kvant mexanikasının əsas prinsipləri iddia edir ki, mütləq boş olan şey yoxdur. Həqiqətdə kvant nəzəriyyəsinin qanunlarına uyğun olaraq, vakuum elementar zərrəciklərlə doludur, bu zərrəciklər arasıkəsilmədən meydana çıxır və yox olur, həm də o qədər tez yox olur ki, onları birbaşa müşahidələrlə aşkar etmək olmaz. Bu cür "virtual" zərrəciklər çoxluğu itələmə qüvvələrinin yaranmasına gətirib çıxara bilər ki, bu da inflyasiya prosesində baş vermişdir.

Böyük birləşmə erası Böyük partlayışdan sonra $t = 10^{-35}$ san anında, Kainatın temperaturu 10^{27}K olan bir vaxtda başa çatdı. Bu andan sonra Kainatın təkamülü ümumi nisbilik nəzəriyyəsi tənliklərinin Fridman həllərindən birilə təsvir olunur. Kainat genişlənməyə başladı, həm də onun genişlənməsi ya əbədi davam edəcək, ya da sonrakı sıxılma ilə əvəz olunacaqdır. Genişləndikcə maddə və şüalanma soyumuşdur. Temperatur zərrəciklərin kinetik enerjisinin ölçüsü olduğundan, soyuma Kainatın halının dəyişməsinə gətirib çıxardı.

Kainat Böyük birləşmə erasının sonunda bütün növ elementar zərrəciklərin və onların antizərrəciklərinin termodinamik tarazlıq halında olan plazması idi. Bu plazmaya kvarklar, elektronlar, müonlar, τ-leptonlar, bütün növ neytrinolar, qlüonlar, W- və Z-bozonlar, fotonlar, həmçinin hələ kəşf olunmamış, ancaq qabaqcadan xəbər verilmiş zərrəciklər – hiqqslər, H^0 – bozonlar, maqnit monopolları və s. daxil idi. Kainatın sıxlığı o qədər böyük idi ki, o, elektromaqnit şüalanması üçün qeyri-şəffaf idi.

Temperatur 10^{27}K-dən aşağı düşəndə növbəti faza keçidi baş verdi və güclü qarşılıqlı təsir ayrıldı. Güclü qarşılıqlı təsirdə iştirak edən zərrəcikləri adronlar adlandırdığına görə, Kainatın təkamülünün bu başlayan dövrü *adron dövrü* adlanır. Adron dövründə çox mühüm bir hadisə baş verdi – Kainatın *barion asimmetriyası* – maddənin antimaddə üzərində artıqlığı yarandı. Barion asimmetriyasının mənşəyi tam sona qədər aydın olmasa da, belə bir nəzəriyyə geniş yayıldı ki, bu nəzəriyyəyə görə ifrat ilkin Kainatda zərrəcik və antizərrəciklərin miqdarı eyni idi, ancaq Kainat genişlənməsinin gələcək mərhələsində antizərrəciklərin sayı zərrəciklərin sayından bir qədər azalmışdır. Bu zaman hər 10^9 antizərrəcik üçün $10^9 + 1$ zərrəcik olmuşdur. Sonra antizərrəciklərin hamısı zərrəciklərlə annigilyasiyaya uğramış, onlardan yalnız bir zərrəcik qalmışdır. Bu bir zərrəcik bizim müşahidə etdiyimiz maddəni təşkil edir.



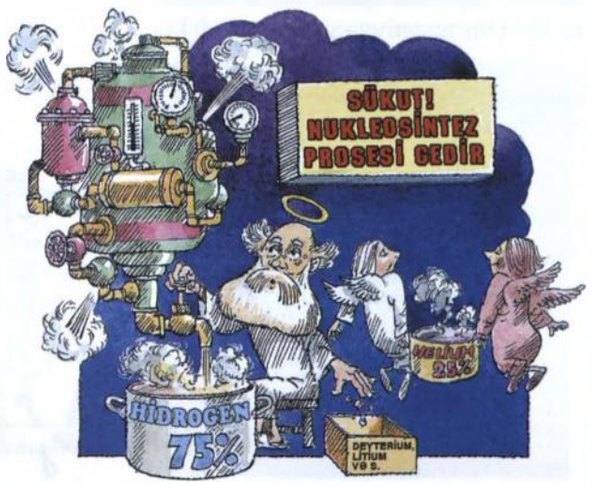
Qalaktikada hər 35 kub işıq ilində təxminən bir ulduz var; onun planet sisteminin ölçüsü 100 mln km tərtibindədir. 50 km/san sürətilə hərəkət edən ulduz özünün planet sistemilə birlikdə 10^{15} il ərzində həcmi 35 kub işıq ili olan silindrdən keçib gedəcəkdir. Bu silindrin daxilində başqa ulduzla rastlaşmaq çox ehtimallıdır. Fərz etsək ki, bu cür 100 rastlaşma planetləri orbitlərindən tam qoparacaqdır, onda 10^{17} il alarıq.

ləndikcə və soyuduqca birincilər üstünlük təşkil etməyə başlamışlar.

$t = 10^{-4}$ san anına yaxın Kainat 10^{12}K temperatura qədər soyudu və *lepton dövrü* başladı. Leptonlara elektron, mənfi yüklənmiş müon, neytrino və onların antizərrəcikləri daxildir. Lepton erasının sonunda maddə neytrinolar üçün, praktiki olaraq, şəffaf oldu və bütün zərrəciklər bizim günlərə qədər yaşadı. Lakin neytrino maddə ilə zəif qarşılıqlı təsirdə olur və onları qeydə almaq çətindir.

Şüalanma dövrünün başlanğıcında elektronların və onların antizərrəciklərinin – pozitronların əksər hissəsi yeni fotonlar əmələ gətirməklə annihilyasiya etdilər. Yalnız o elektronlar qaldı ki, onlara pozitronlar çatmadı. Bununla belə, bizim yaşadığımız dünyanı qurmaq üçün bu elektronlar tamamilə kifayət qədər oldu.

Təxminən 180 san ərzində Kainatın sonrakı taleyi üçün mühüm olan *nukleosintez* prosesi, yəni ilkin elementlərin nüvələrinin əmələ gəlməsi prosesi baş verdi. Bu prosesin sonuna yaxın Kainatın ilkin maddəsində hidrogen nüvələri (protonlar) 75% (kütləcə), helium nüvələri, demək olar ki, 25% təşkil edirdi, faizin yüzdəbir hissələri qədər deyterium, litium və digər yüngül elementlərin nüvələri var idi. İlkin elementlərin yayılmasına aid verilmiş rəqəmlər "qaynar Kainat" modelli əsasında dəqiq hesablamanın nəticəsidir. Verilmiş rəqəmlər ilkin ulduzların kimyəvi tərkibinin müşahidələrilə sübut olunur.



Həmin vaxta yaxın Kainat fotonlar üçün şəffaf oldu, Kainatın inkişafının çox erkən dövrlərində buraxılmış bu fotonlar indiyədək mövcuddur. Bu, temperaturu 3 K-ə qədər düşmüş *relikt şüalanmadır*.

Böyük partlayışdan cəmi bir neçə saat sonra hidrogen və helium nüvələrinin əmələ gəlməsi dayandı, bundan sonra Kainat təxminən milyon il heç bir keyfiyyət dəyişikliyi olmadan genişlənmişdir. Temperatur bir neçə min dərəcəyə qədər düşəndə, elektronların və nüvələrin enerjiləri elektromaqnit cazibə qüvvəsinə üstün gəlmək üçün kifayət etməməyə başladı. Onda onlar birləşərək, neytral atomlar əmələ gətirdilər. Atomların kifayət qədər çoxlu toplaşdıqları yerlərdə, onlar qravitasiya cazibəsinin təsiri altında yaxınlaşmağa başladılar. Gələcək qalaktikaların rüşeymləri beləcə meydana çıxırdı. Bu rüşeymlərin daxilində buludlar yerləşirdi ki, onlar da daha çox sıxılırdılar, onları əmələ gətirən atomlar getdikcə daha çox toqquşurdular, temperatur nüvə reaksiyaları başlayana qədər artdı və artdı – Kainat ulduzlar əldə etdi. Ulduzların təkində hidron və heliumdan ağır olan elementlər sintez olunurdu. İlkin ulduzların partlayışından sonra elementlər səpələndi və yeni ulduzlara, planet sistemlərinə və nəhayət, insan irqinə başlanğıc verdi. Bu məqalənin oxucularında da o ulduzların "zərrəcikləri" var.

Kainat isə bizə adi görünən cizgilərini, xassələrini əldə etdi. Böyük

partlayışdan $3 \cdot 10^9$ il sonra Günəş yandı.

Bəs Kainatın gələcəyi haqqında nə demək olar? Bu ondan asılıdır ki, onun inkişafının hansı Fridman ssenarisi doğru olacaqdır. Təəssüf ki, hələ məlum deyil, Kainat əbədi genişlənəcəkmi və ya genişlənmə nə vaxtsa sıxılma ilə əvəz olunacaqmı. Ona görə Kainatın təkamülünün müxtəlif variantlarına baxaq. Şübhəsiz, bunlar yalnız elmi hipotezlər və modeldən alınan təsəvvürlərdir – hələ qarşıda onların dəqiqləşdirilməsi durur.

Qapalı variant halında (Kainatda maddənin sıxlığı böhran sıxlığından böyük olanda) Kainat müəyyən andan sonra (təxminən 10 mlrd ildən sonra) yenidən sıxılmağa başlayacaqdır.

Kainat *Böyük yumulmaya* – qapalı Kainatın tam qravitasiya kollapsına 20 mlrd il qalmış elə ölçülərə qədər sıxılacaqdır ki, bu zaman enerji sıxlığı indiki kimi olacaqdır. Bundan sonra sıxıldıqca fotonların enerjisi artmağa, Kainat isə qızmağa başlayacaqdır. Böyük yumulmaya 1 mlrd il qalmış fotonlar ulduzlararası hidrogen atomlarını ionlaşdıracaq. Əmələ gələcək elektron-pozitron plazması qızmaqda davam edəcək və tam kollapsa 1 il qalmış ulduzların təkində olan temperaturdan yüksək temperatura çatacaqdır. Ardınca ulduzların partlayışı və ulduz şüalanmasının və digər maddə şüalanmasının ifratböyük kütləli qara çuxurlar tərəfindən sorulması baş verəcəkdir. Böyük yumulmaya üç dəqiqə qalmış ifratböyük kütləli qara çuxurlar birləşməyə başlayacaqdır.

Lakin müasir məlumatlar və ən çox inkişaf etmiş inflyasiya modeli qabaqcadan xəbər verirlər ki, Kainatda maddənin sıxlığı, hər halda, böhran sıxlığından kiçikdir və ya çox ehtimal, praktiki olaraq, böhran sıxlığına bərabərdir. Beləliklə, Kainat əbədi genişlənməlidir. Birinci əsas dəyişiklik Böyük partlayışdan 10^{14} il sonra, ulduzların yanacaqları tükənən vaxt baş verəcəkdir. Əsas ulduz yanacağı hidrogendir, termonüvə reaksiyalarının gedişində ulduzların mərkəzində helium əmələ gəlir. Hidrogenini tükətmiş ulduz partlayaraq və planetlərini udaraq qırmızı nəhəngə çevrilə bilər (ulduzun ölçüləri bir neçə dəfə artacaqdır).



Məsələn, Günəş ölçülərinə görə Yupiterin orbitilə müqayisə olunan zaman Yer yanacaqdır. Partlayışdan sonra ulduzda heliumdan karbon və digər daha ağır elementlər sintez olunmağa başlayır. Nukleosintez dəmirə çatanda kəsiləcəkdir; dəmir nüvəsi vahid kütləyə düşən ən kiçik enerjiyə malikdir.

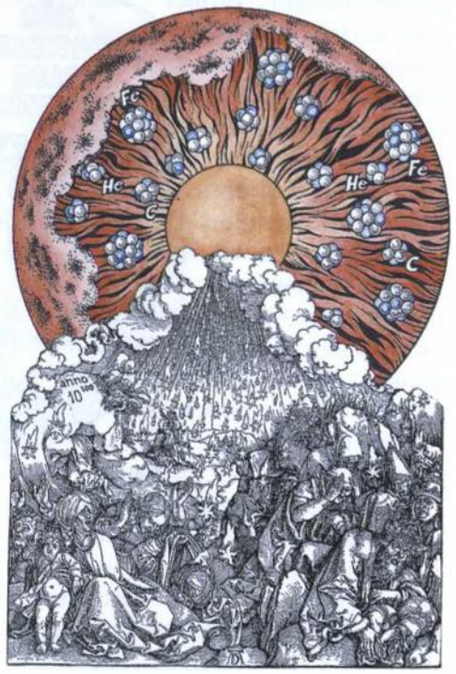
Böyük partlayışdan 10^{17} il sonra (Amerika alimi Frimen Con Dayson hesablamalarına görə) ulduzlar öz planetlərini itirə bilər, o səbəbdən ki, yaxınlıqdan hər hansı başqa bir ulduz "ötüb-keçir" və özünün qravitasiya sahəsinin vasitəsilə planetləri çəkib aparır.

"Görüşən zaman" ulduzlar arasında kinetik enerjinin yenidən paylanması və bunun nəticəsində enerji əldə etmiş ulduzun qalaktikadan çıxıb getməsi istisna deyil. Belə proses *qalaktikaların buxarlanması* adlanır. Buxarlanma hesabına qalaktikalar kütlələrinin 90%-ni itirdikdən sonra, qalan 10% kütlə kollapsa uğraya bilər, yəni birləşə və öz məxsusi qravitasiya sahəsinin təsiri altında sıxılaraq, ifratağır qara çuxur əmələ gətirə bilər. Bu, Böyük partlayışdan təxminən 10^{18} il sonra baş verəcəkdir.

Müasir məlumatlara görə bütün maddənin yalnız 10% müşahidə olunandır, qalan hissəsi görünməyən tünd materiyanın payına düşür ("XXI əsr fizikasının ən mühüm və ən maraqlı problemləri" məqaləsinə bax).



F.C.Dayson



Kainatın yaşı daha 100 dəfə artan zaman Böyük birləşmə nəzəriyyəsinin qabaqcadan xəbər verdiyi protonların parçalanması prosesi başlaya bilər. Protonlar üç kvarkdan – indi güclü qarşılıqlı təsirdə iştirak edən zərrəciklərdən əmələ gəlmişdir. Böyük birləşmə erasında üç qarşılıqlı təsir (güclü, zəif və elektromaqnit) bir idi və kvark asanlıqla elektrona və ya pozitrona çevrilə bilərdi. Soyumuş Kainatda həmin proses ölçüyəgəlməz dərəcədə çox vaxt tələb edir və Kainatın yaşı yalnız $10^{32} - 10^{33}$ il olduqda, onda Kainatda çox seyrək elektron-pozitron qazı, fotonlar və neytrinolar qalacaqdır. Bu halda Kainat 10^{100} il yaşa qədər qala bilər, bu zaman təkamülün son mərhələsi – "qara çuxurların buxarlanması başlayacaqdır ("Stiven Uilyam Hokinq" əlavə oçerkinə bax).

Beləliklə, ikinci variantda (maddənin sıxlığı böhran sıxlığından kiçik olanda) Kainat təkamülünün son mərhələsində tez və ya gec elektronların, pozitronların, neytrinoların və fotonların son dərəcə seyrək soyuq qazından ibarət olacaqdır. Belə Kainatda bizim başa düşdüyümüz adi mənada çətin ki həyat olsun, ona görə də açıq Kainatın gələcəyi – hədsiz soyuqda və hər cür strukturun itməsinə gətirib çıxaran tədrici sönmədir.

XXI ƏSR FİZİKASININ ƏN MÜHÜM VƏ ƏN MARAQLI PROBLEMLƏRİ

Müasir fizikanın əsas məsələlərini bir yerə yığmağa çalışaq. Bunun üçün kifayət qədər uzun müddət mühüm və maraqlı olaraq qalacaq problemləri ayıraq.

İdarəolunan termonüvə sintezi. İdarəolunan termonüvə sintezini həyata keçirmək cəhdləri 1950-ci ildə SSRİ-də Andrey Dmitriyeviç Saxarov və İqor Yevgenyeviç Tamm tərəfindən yaradılmış maqnit termonüvə reaktorunun nəzəriyyəsindən başlanmışdır. O vaxtdan bütün dünyada bu istiqamətdə irimiqyaslı işlər aparılır və real termonüvə reaktorunun yaradılacağına artıq şübhə yoxdur.

Yüksəktemperaturlu və otaqtemperaturlu ifratkeçiricilik (YTİK və OTİK). Kupratlarda (misin birləşmələrində) ifratkeçiriciliyin mexanizmi anlaşılmaz olaraq qalır (təzyiq olmadan ifratkeçiriciliyin ən yüksək temperaturu $T_i = 135\,K$ $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ birləşmələri üçün əldə olunmuşdur; xeyli böyük təzyiq altında $T_i = 164\,K$-dir). Otaq temperaturlarında ifratkeçirici almaq imkanı heç nəyə zidd deyil, lakin uğur qazanılacağına da əmin olmaq olmaz.

Ekzotik maddələr. Molekulyar hidrogenin böyük təzyiq altında tədqiqi onun bir sıra gözlənilməz və maraqlı xüsusiyyətlərini aşkara çıxardı. Zərbə dalğaları ilə 3000 K temperaturda sıxılmış hidrogen, görünür, yaxşı keçirici olan maye fazasına keçir. Yüksək təzyiq altında digər maddələrin də (o cümlədən suyun) özünəməxsus xassələri aşkar olunmuşdur.

Ekzotik maddələr sırasına fullerenlər aiddir. Lap bu yaxınlarda adi fulleren C_{60}-dan başqa, C_{36}-nı tədqiq etməyə başlamışlar. C_{36}-nın kristallik qəfəsində başqa element atomlarını və nanoborucuqlar – milyon tərtibində atomdan ibarət silindrik karbon molekulları ($C_{1000000}$) yerləşdirdikdə o, yüksəktemperaturlu ifratkeçirici ola bilər.

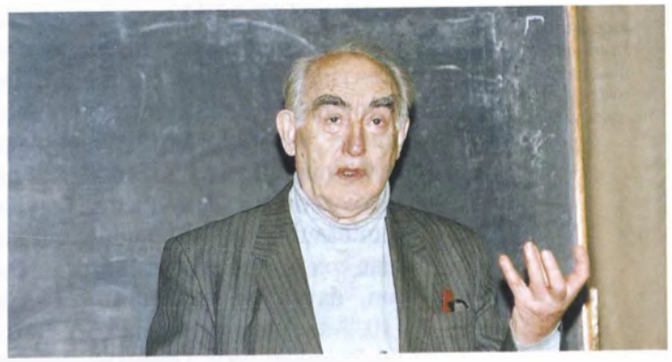
Kondensə olunmuş mühitlərin fizikası. XX əsrin lap sonunda məlum oldu ki, bərk cisimlərdə bir-birindən kəskin seçilən sərhədlərlə ayrılmış və müxtəlif fiziki xassələrə malik olan oblastlar mövcuddur. Ona görə də konkret bir nümunənin bərkliyi və ya elektrik müqaviməti nümunələr dəsti üçün ölçülmüş və ortalaşdırılmış qiymətlərdən kəskin fərqlənir, kristalın səthinin xassələri, onun daxili hissəsinin xassələrindən fərqlidir. Buna bənzər hadisələr yığını mezoskopika adlanır.

Maqnit sahəsində elektrik cərəyanının nazik təbəqədən axmasının xüsusiyyətlərini (*Holl effekti* adlanan effektin) tədqiq edərkən kəsr yüklü, məsələn, $q=(1/3)e$ yüklü, kvazizərəciklər aşkar olundu, burada e – elektronun yüküdür və s.

Bütün bu hadisələrin öyrənilməsi nazik təbəqəli yarımkeçirici maddələr, yüksəktemperaturlu ifratkeçiricilər və s. yaratmaq üçün olduqca vacibdir.

Alçaqtemperaturlu ifrataxıcı ^3He fazasının kəşfi 1996-cı ilin fizika üzrə Nobel mükafatı ilə qeyd olundu. XX yüzilliyin sonunda Boze-Eynşteyn kondensasiyasına xüsusi diqqət yetirildi. Onu H_2-də və Rb, Na, Li buxarlarında qazların ifratalçaq temperaturlara qədər soyudulması metodlarının inkişaf etdirilməsi və qazların tələlərdə tutulub saxlanılması sayəsində həyata keçirdilər (1997-ci ilin fizika üzrə Nobel mükafatı). Boze-Eynşteyn kondensatında atomlar koherent hallarda yerləşir; bu, bir növ "atom lazeri" yaratmağa imkan verdi. Ondan istifadə edilməsi fiziki sabit-

Edvin Herbert Holl (1855-1938) Amerika fizikidir. 1879-cu ildə aşkar etmişdi ki, maqnit sahəsində yerləşdirilmiş cərəyanlı naqildə eninə potensiallar fərqi yaranır. Bu effekt onun adı ilə adlandırıldı.



VİTALİ LAZAREVİÇ GİNZBURQ

Vitali Lazareviç Ginzburq 1916-cı il oktyabrın 4-də anadan olmuşdur. 1938-ci ildə Ginzburq MDU-nun fizika fakültəsini bitirmişdir. E.İ.Tammın tələbəsidir. Yarım əsrdən çox bir müddətdə Rusiya Elmlər Akademiyasının P.İ.Lebedev adına Fizika İnstitutunda (FİAN) işləmiş, nəzəri şöbəyə rəhbərlik etmiş, akademiyanın müşaviri olmuşdur. Onun elmi fəaliyyətinin əsas istiqamətləri – nəzəri fizika və astrofizika idi. Ginzburq L.D.Landau ilə birlikdə 1950-ci ildə ifratkeçiriciliyin nəzəriyyəsini təklif etmişdir; bu nəzəriyyə Ginzburq-Landau nəzəriyyəsi kimi məşhurdur və indiyədək, o cümlədən yüksəktemperaturlu ifratkeçiriciliyi təsvir etmək üçün istifadə olunur. 2003-cü ildə Ginzburqa A.A.Abrikosovla və E.C.Leqqetlə birlikdə ifratkeçiricilər və ifrataxıcı mayelər nəzəriyyəsinə verdiyi paya görə Nobel mükafatı verilmişdir. Lenin və Dövlət mükafatları laureatıdır. 1953-cü ildə SSRİ EA-nın müxbir üzvü, 1966-cı ildə isə həqiqi üzvü seçilmişdir. London Kral Cəmiyyətinin, ABŞ Milli Elmlər Akademiyasının, Danimarka Kral Akademiyasının və s. xarici üzvüdür. V.L.Ginzburq 2009-cu ildə vəfat etmişdir.

Güclü qaz lazeri.



lərin ölçülməsi dəqiqliyini artırmaq üçün, elementar zərrəciklər fizikası sahəsində tədqiqatlar üçün və s. geniş imkanlar açır.

İfratgüclü lazerlər, razerlər və qrazerlər. XX əsrin astanasında lazer şüalanmasının intensivliyi (gücünün sıxlığı) 10^{20}–10^{21} Vt·sm^{-2}-yə çatdı. Bu şüalanmada elektrik sahəsinin intensivliyi 10^{12} V·sm^{-1}-ə (hidrogen atomunun əsas halında protonun sahəsindən 100 dəfə böyükdür), maqnit sahəsinin intensivliyi isə 10^{9}–10^{10} erstedə yaxınlaşır. Davametmə müddəti femtosaniyəyə (10^{-15} san-yə) qədər olan çox qısa impulsların tətbiqi, məsələn, davametmə müddəti attosaniyə (10^{-18} san) olan rentgen impulsları almağa imkan verir. Qrazerlər və razerlər (uyğun olaraq qamma və rentgen diapazonlarında lazerlərin analoqları), görünür, yaxın illərdə yaradılacaqdır.

İfratağır elementlər. 1999-cu ilin əvvəllərində belə bir xəbər yayıldı: Moskvaaltı Dubna şəhərində kütlə ədədi 289 olan və 30 san-yə yaxın yaşayan 114-cü element sintez edilmişdir ("Transfermium yarışı" və onun "laureatları" əlavə oçerkinə bax). Ümid yaranmışdı ki, $^{289}_{114}$A elementi, doğrudan da, olduqca uzunömürlü olacaqdır. Bu ümid özünü doğrultmasa da, uzunömürlü ifratağır elementlərin axtarışı davam etdirilir. Nuklonlardan və antinuklonlardan əmələ gəlmiş yüksək sıxlıqlı hipotetik nüvələr də maraq kəsb edir. Kvark materiyasının və kvark-qlüon plazmasının alınması problemi də bura birləşir.

Elementar zərrəciklər. Elementar zərrəciklər fizikasının ən aktual məsələlərindən biri Higgs bozonu adlanan bozonun aşkar edilməsi cəhdləridir ("Qarşıda nə var: durğunluq, yoxsa inqilab?" məqaləsinə bax).



Başqa bir mühüm məqsəd – supersimmetrik zərrəciklərin axtarışıdır. Onların qarşılıqlı təsirləri fəza invariantlığını yalnız zərrəciyi antizərrəciklə əvəz etdikdə yox (*CP*-qoşma), həm də t zamanını $-t$ ilə əvəz etdikdə də saxlamalıdır. Bu başlıca məsələ fiziki proseslərin dönməzliyini izah etmək üçün çox vacibdir. *CP*-nin pozulması ilə gedən proseslərin təbiəti aydın deyil və onların tədqiqləri davam etdirilir.

Fundamental uzunluq. Nəzəri hesablamalar göstərir ki, 10^{-17}sm (düzdür, çox vaxt 10^{-16}sm haqqında danışırlar) tərtibindəki l_f məsafələrinə və 10^{-27} san-yə yaxın zaman müddətlərinə qədər fəza-zaman təsəvvürlərimiz doğrudur. Bəs kiçik miqyaslarda nə baş verir? Bunu, hansı isə fundamental kəmiyyətlərin – uzunluğun və zamanın mövcudluğu haqqındakı hipotez izah etməlidir; bu cür fəza-zaman miqyaslarında "yeni fizika" və qeyri-adi təsəvvürlər ("dənəvər quruluşlu fəza-zaman" və s.) yaranır.

Brukhevendə (ABŞ) qarşılaşan dəstələrdə sürətləndirici kollayder.

Sürətləndirici tərəfindən, demək olar, işıq sürətinə qədər sürətləndirilmiş ağır ionların toqquşması zamanı kvark-qlüon plazması – materiyanın ilkin əsası yaranmalıdır.

Kvark-qlüon plazmasının kəşfi 2000-ci ilin fevralında SERN-də (İsveçrə) elan edilmişdir.

Fizikada bir fundamental kəmiyyət – Plank uzunluğu və ya qravitasiya uzunluğu $l_g = 10^{-33}$ sm məlumdur. Bu, miqyaslardan başlayaraq artıq, məsələn, ümumi nisbilik nəzəriyyəsindən istifadə etmək olmaz, qravitasiyanın hələ bitmiş formaya malik olmayan kvant nəzəriyyəsini tətbiq etmək lazımdır. Lakin iddia etmək olarmı ki, fəza-zaman haqqındakı klassik təsəvvürlərimiz hətta bir az əvvəl, l_f-dən tam 16 tərtib böyük olan l_g tərtibli miqyaslarda pozulmur?

Hələ bitməmiş Böyük birləşmə (elektrozəif və güclü qarşılıqlı təsirlərin birləşdirilməsi) nəzəriyyəsində fiziklər $E_o = 10^{16}$QeV enerjilərlə işləyirlər. $l_o = hc/E_o = 10^{-30}$sm uzunluğu l_g-dən üç tərtib böyükdür. Ola bilsin, l_o və l_g arasında daha bir fundamental uzunluq gizlənmişdir?

Supersimlər və *M*-nəzəriyyə. Nəzəri fizika üçün bir sıra suallara cavab vermək hələlik çətindir, məsələn: qravitasiyanın kvant nəzəriyyəsini necə qurmalı və onu qalan qarşılıqlı təsirlərin nəzəriyyəsilə necə birləşdirməli; nə üçün yalnız altı növ kvark və altı növ lepton mövcuddur; nə üçün neytrinonun kütləsi çox kiçikdir; incə quruluş sabiti 1/137-ni və bəzi digər sabitləri nəzəriyyə əsasında necə təyin etməli və s. Supersimlər nəzəriyyəsi ("Supersimmetriya və supersimlər" əlavə oçerkinə bax) hələ hissediləcək fiziki nəticələrə gətirib çıxarmayıb, lakin bu vəziyyət fiziklərin həmin nəzəriyyəni "hər şeyin nəzəriyyəsi", *M*-nəzəriyyə, yəni magik və ya mistik nəzəriyyə adlandırmasına mane olmadı. Hiss olunur ki, bu nə isə çox dərin və inkişaf edən bir şeydir, lakin həll olunmamış fundamental problemlər onsuz da həddən çoxdur.

Ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin yoxlanılması. Zəif qravitasiya sahəsində 0,01%-ə qədər xəta ilə aparılmış müşahidələrdə ÜNN-dən heç bir kənara çıxma aşkar olunmamışdır, ekvivalentlik prinsipi 10^{-12} dəqiqliklə sübut olunmuşdur. Sonrakı yoxlamalar çətin ki, nə isə yeni bir şey versin, ancaq belə layihələr var və yəqin, həyata keçiriləcəkdir.

Kosmosdan gələn qravitasiya dalğalarını qəbul etmək üçün nəhəng qurğular – amerikan LİGO qurğusu və analoji Avropa qurğusu tikilmişdir. Onların köməyilə dalğaları aşkar etmək mümkün olmadı, ancaq detektorların həssaslığını xeyli artıracaq təkmilləşdirilmədən sonra qravitasiya dalğalarının axtarışı davam etdiriləcəkdir.

Kosmoloji problemlər. 1981-ci ildə yaradılmış dünyanın inkişaf modeli təsdiq edir ki, ən ilkin dövrlərdə Kainatın genişlənməsi Fridman modellərindəkindən müqayisəedilməz dərəcədə sürətlə baş vermişdir (sinqulyarlığın yaxınlığında yalnız 10^{-35} san zaman intervalında baş verən "şişmə" və ya inflyasiya). Bu modelin mühüm parametri materiyanın ρ sıxlığı və ya $\Omega = \rho/\rho_p$ nisbətidir, burada ρ_p – elə sıxlıqdır ki, bu zaman Kainatın genişlənməsi əbədi davam edir.

Kosmologiyanın əsas məsələlərindən biri (ola bilsin, ən başlıcası) Ω kəmiyyətinin və deməli, Kainatın təkamülünün ssenarisinin təyini məsələsidir. Məlumdur ki, ρ kəmiyyətinə yalnız adi maddə yox, ulduzların və qazların işıqlanmasında özünü büruzə verməyən əlavə nə isə bir şey də pay verir. Bu gizli və ya tünd materiyanın təbiətinin aydınlaşdırılması hələ qarşıdadır.

Belə bir fikir formalaşıb ki, tünd materiya əsasən qeyri-barion təbiətlidir, yəni nuklonlardan yox, yəqin ki, neytrinolardan ibarətdir. Lakin neytrinoların kütləsi, deyəsən, kifayət qədər böyük deyil. Belə bir fərziyyə çox geniş yayılıb. Bu fərziyyəyə görə tünd materiyanın rolunu hipotetik

M81 spiral qalaktikası. İstənilən qalaktikanın kütləsi onun bütün ulduzlarının yekun kütləsindən xeyli böyükdür.



WIMP-lər (*ing.* **W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles) – protondan bir neçə dəfə ağır olan və zəif qarşılıqlı təsirdə iştirak edən zərrəciklər (ağır qeyri-stabil neytrino, fotonolar, neytralinolar və s.), kosmik simlər və digər "topoloji defektlər" oynayır.

Neytrino fizikası və astronomiyası. Hələ 1960-cı illərdə müxtəlif növ neytrinoların qarşılıqlı çevrilməsi – neytrino ossilyasiyası haqqında ideya yaranmışdı. Tədqiqatçılar yalnız



"Super Kamiokande" neytrino detektoru (Yaponiya).

İçərisində su olan nəhəng çənin divarlarındakı 11 mindən yuxarı Çerenkov şüalanması qəbulediciləri, zərrəciklərin – neytrinonun maddə ilə reaksiyasının məhsullarının izlərini qeydə alırlar.

1998-ci ildə ν_μ-nün ν_τ-ya çevrildiyini aşkar etdilər. Bu o zaman mümkündür ki, heç olmazsa bir növ neytrinonun kütləsi sıfırdan fərqli olsun.

Elementar zərrəciklər fizikasında uzun illər ərzindəki bu ən böyük kəşf yapon-amerikan "Super Kamiokande" detektorunda edilmişdir. Hazırda müxtəlif enerjili Günəş neytrinolarını detektə edən artıq çox mükəmməl qurğular fəaliyyət göstərir. Günəş neytrinoları problemi, yəqin, yaxın illərdə əsasən həll olunacaqdır; neytrinonun kütləsi məsələsi də aydınlaşacaqdır.

Neytron ulduzları və pulsarlar, ifratyeni ulduzlar. Bu gün hətta birər neytron ulduzlarını (xarakterik radiusları 10 km olur), hələ qoşa neytron ulduzları demirik, rentgen şüalarında müvəffəqiyyətlə öyrənirlər.

Bu yaxınlarda son dərəcə güclü maqnit sahəsinə malik neytron ulduzları (maqnetarlar) aşkar olunmuşdur. Qiymətləndirmələrə görə onların maqnit sahələri 10^{15}–10^{16} erstedə çatır. Bu qədər güclü maqnit sahələrinin mövcud olması öz-özlüyündə mühüm kəşfdir. Maqnetarlar radioşüalanma buraxmır, onları yumşaq qamma-şüalarda müşahidə edirlər. Neytron ulduzları maraqlı və qeyri-adi fiziki obyektlərdir. Onların sıxlığı səthdəki $3 \cdot 10^{11}$ q·sm^{-3} qiymətindən mərkəzdəki 10^{15} q·sm^{-3} qiymətinə qədər olan aralıqda dəyişir (atom nüvələrinin sıxlığı $3 \cdot 10^{14}$ q·sm^{-3}-ə yaxındır).

Qara çuxurlar, xüsusən də kosmik simlər neytron ulduzlarından daha ekzotik obyektlərdir. Hesab edirlər ki, kosmik simlər – kosmik miqyaslarda iplərdir, onların qalınlığı 10^{-29}–10^{-30} sm tərtibindədir və onlar halqa şəklində qapanmağa qadirdir. Kosmik simlər hələ müşahidə olunmayıb, bu rola hətta "namizədlər" belə hələ məlum deyil.

Qara çuxurlarla məsələ tamam başqa cürdür. Onlar kosmosun həyatında böyük rol oynayan mühüm astronomik və fiziki obyektlər olaraq qalır. Bu gün onların öyrənilməsi ÜNN-də və astrofizikada bütöv bir fəsil təşkil edir. Kainatın təkamülünün ilkin dövrlərində və ya hətta indi yaranan mini-çuxurların da mövcud olduğu istisna edilməmişdir. Onları prinsipcə aşkar etmək olar, ancaq hələlik buna nail olunmamışdır.

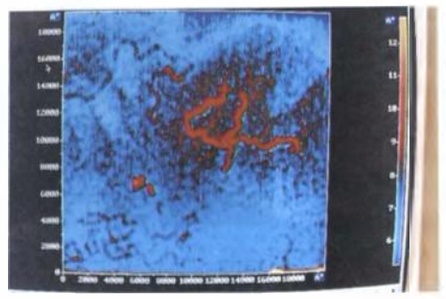
İfratyüksək enerjili kosmik şüalar. Enerjisi 10^{19} eV-dən böyük olan şüaların (müşahidə olunmuş ən böyük enerji $3 \cdot 10^{20}$ eV-ə yaxındır) mənşəyini də xüsusilə mühüm və maraqlı məsələlər sırasına aid etmək olar. Aydın deyil, qalaktika nüvələri belə enerjilərə qədər sürətləndirməni təmin edə bilərmi. Digər tərəfdən ultrayüksək enerjili zərrəciklər relikt şüalanma (onun temperaturu 2,7 K-dir) ilə qarşılıqlı təsirdə olur və çox böyük məsafələrdən Yerə gəlib çatmağa qadir deyil.

Zərrəcikləri kosmik simlər sürətləndirə bilərdi, ancaq onların mövcudluğu hələ sübut olunmamışdır. Ola bilər, qeyri-müəyyən növ ilkin zərrəciklər uzaqdan gəlir, bizim Qalaktikaya yaxın yerdə və ya hətta Yer atmosferində protonlara, fotonlara və b. zərrəciklərə çevrilir. Nəhayət, istisna edilməmişdir ki, Qalaktikada kütləsi 10^{21} eV-dən böyük olan və Kainatdan çox yaşayan (10^{10} il), lakin hər halda qeyri-stabil olan ifratağır zərrəciklər vardır. Onların parçalanma məhsulları atmosferdə müşahidə oluna bilər. Ümumiyyətlə, ekstremal yüksək enerjili kosmik şüaların problemi həqiqətən müəmmalıdır və ona görə də maraqlıdır.

Qamma-parıltı. 1999-cu ildə qamma diapazonda gücü 300 MeV olan və 100 san-yə yaxın davam edən parıltı (impuls) qeydə alınmışdır. Bütün elektromaqnit diapazonlarında $3 \cdot 10^{54}$ erq enerji praktiki olaraq ani ayrıldı ki, bu da ifratyenilərin partlayışı zamanı yaranan optik şüalanmadan xeyli çoxdur. Ona görə də bəzi qamma-parıltı mənbələrini hiperyenilər adlandırdılar. Hiperyenilərə namizədlər bir neçədir: məsələn, iki neytron ulduzun və ya ağır ulduzun neytron ulduzu ilə birləşməsi və s. Bununla belə, onlar yalnız güclə belə enerji verə bilərlər. Əlbəttə, Böyük partlayışın özünü saymasaq, qamma-parıltı Kainatda ən güclü partlayış hadisəsidir. Qamma-parıltının kosmoloji təbiətinin kəşfi XX əsrin sonu astrofizikasının ən görkəmli nailiyyətidir.

Biologiya. Reduksionizm problemi. Bu gün məhz molekulyar biologiya lider elmə çevrilmişdir. Müasir bioloji və tibbi tədqiqatlar fiziki metodların və aparatların ən geniş istifadəsi olmadan qeyri-mümkündür. Ona görə də bioloji və biologiya ətrafı mövzular fizikada getdikcə daha çox yer tutumalıdır və tutacaqdır.

İstənilən maddə atomlardan və molekullardan əmələ gəlmişdir; onların quruluşu və onları idarə edən qanunlar məlumdur. Ona görə də bütün canlıların quruluşunu *reduksionizm* (*lat.* reducere – "geri gətirmək", "qaytarmaq") əsasında izah etmək imkanı, yəni bioloji proseslərin və hadisələrin yaxşı öyrənilmiş fizika qanunlarına gətirilməsi imkanı haqqındakı hipotez təbiidir. Bu çox böyük fiziki və eyni zamanda bioloji problemdir; çox ehtimal ki, bu problem XXI əsr elmində mərkəzi problemlərdən biri olacaqdır. Həyatın mənşəyi və şüurun yaranması məsələləri mühüm olaraq qalır. Alimlər bir neçə milyard il əvvəl Yerdə hökmran olan şəraitə bənzər şəraitdə mürəkkəb üzvi molekulların əmələ gəlməsini modelləşdirmişlər. Belə görünürdü ki, indi bəsit orqanizmlərə, onların təkrar istehsalına keçidi təsəvvür etmək olar. Lakin bu mərhələdə hansı isə bir sıçrayış, hələlik aydın olmayan keyfiyyət dəyişikliyi yaranır. Bu problem, görünür, yalnız "sınaq şüşəsində həyatı" yaratdıqdan sonra həll olunacaqdır. O da mümkündür ki, insanlar hətta fundamental səviyyədə nə isə hələ bilmirlər. Bunun belə olub-olmadığını gələcək göstərəcəkdir; bu barədə həsədlə düşünməmək qeyri-mümkündür – yaxın illər ərzində nə qədər mühüm və maraqlı şeylər kəşf olunacaqdır!



Skaner zond mikroskopunun ekranında DNT molekulu.

ƏLAVƏ

TERMİNLƏR GÖSTƏRİCİSİ

A

α-parçalanma 287
Aberrasiya 87
Adronlar 315-317
Adronların kvark modeli 322-323
Akkomodasiya 63
Aksiom 183
Amplitud
– ehtimal 238
– rəqs 358
Antiproton 251
Antizərrəcik 250-251, 307-308
Aralıq bozonlar 337
Asimptotik sərbəstlik 326-327
Atom spektrləri 225-229, 242, 244
Atomun elektron təbəqəsi 246
Atomun planetar modeli 232
Atomun Rezerford-Bor modeli 227-229
Avtorəqs sistemləri 378

B

β-parçalanma 287, 331-332
Balmer seriyası 226
Barionlar 308
Barlou kürəsi 41
Benar özəkləri 389
Boqolyubov tənlikləri zənciri 215
Boze-Eynşteyn kondensasiyası 219, 255
Bozonlar 14, 306
Bölünmə baryeri 299
Bölünmə
– amplitudun 73
– dalğa cəbhəsinin 75
Böyük Partlayış 327
Bucaq
– Brüster 79
– difraksiya 75
– düşmə 66
– qayıtma 66

C

Cərəyan dövrəsi üçün Kirxhof qanunları 29
– birinci 30
– ikinci 30
Cərəyan
– induksiya 52
– konveksiya 41
– keçiricilik 41, 53
– yerdəyişmə 53, 57-59
Cırlaşmamış qaz 216
Cırlaşmış qaz 216
Cisimlərin elektriklənməsi 8
– bilavasitə kontaktla 19
– sürtünmə ilə 19
– təsir vasitəsilə 18, 19



Daimi mühərrik.
"Kütəvi elm" jurnalının üz qabığı.
ABŞ. 1920-ci il.

Cisimlərin ölçülərinin qısalması 93-94

Ç

Çevirmələr
– Qaliley 98
– kalibrləmə 341
– Lorens 95, 98
– simmetriya 341
Çıxış işi 224

D

Daxili (dinamik) simmetriya 315
Daxili enerji 189
Daimi mühərrik 164-165
Dalğa funksiyası 235
Dalğa
– eninə 66, 80, 368
– uzununa 80, 368
Dalğalar
– materiya 235
– elektromaqnit 12, 56-59
– qravitasiya 137-139
De Broyl dalğası 234
Deyterium 265
Dəlik 218
Diamaqnetik 45
Dielektrik 19, 24, 45
Dielektrikin poyarizasiyası 45
Difraksiya 62-63, 75-77, 373
– Frenelə (yaxın zonada) 76
– Fraunhofer (uzaq zonada) 76
Difraksiya qəfəsi 76-77
Dinamik simmetriya 314
Dioptrika 85
Dioptriya 89
Dipol 24



Qalvanometr. 1890-cı il.

"Dirak dənizi" 250
Dissipasiya 378
Divergensiya 54
Dublet 308, 316
Dünya efiri 9–14, 61, 93
Dünya xətti 106–107
Dünyanın statistik mənzərəsi 212
Düstur
– Vayzekker 283
– Vin 204
– Gell-Mann-Okubo 330
– Plank 227
– Rezerford 227
– Reley-Cins 221
– nazik linza 89

E

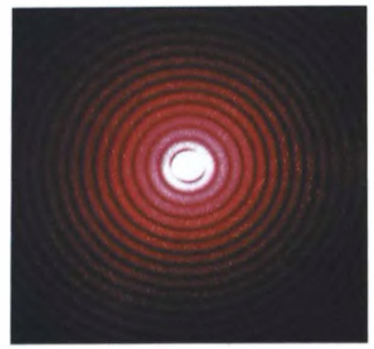
Effekt
– Coul-Tomson 192, 199
– Zeyeman 115, 117
– Kallan-Rubakov 55
– Kompton 225
– Tomson 199
– Faradey 45
– Çerenkov-Vavilov 292-293
– Erenqaft 54
Efir küləyi 12, 93-95
Ehtimal 238
Elastiklik 168
Elektrik cərəyanının istilik təsiri 37
Elektrik dipol momenti 24
Elektrik hərəkət qüvvəsi (EHQ) 28, 50
Elektrik qövsü 37
Elektrik müqaviməti 28
Elektrik potensialı 27
Elektrik sabiti 24
Elektrik tutumu 23
Elektrik yükünün səth sıxlığı 25
Elektrodinamika 38-41
– relyativistik 110
Elektrofor 21
Elektroliz qanunu 44
Elektrometr 21
Elektron 14, 26, 115
Elektron səviyyələri sistemi 251
Elektronların cütləşməsi 258
Elektronun effektiv yükü 326
Elektroskop 17–18
Elektrostatika 41
Elementlərin dövri sistemi 247, 299
Enerji 109, 165, 188
– aktivasiya 209
– daxili 189
– ionlaşma 224
– ossilyasiya 207
– sükunət 109
– rabitə 209, 277
– nüvə materiyasının rabitə 283
– Fermi 218
Enerji səviyyələrinin məskunluğu 217
Enerji-impuls tenzoru 133
Entropiya 165, 196-202, 206, 217
Entropiya diaqramları 214
Etveş təcrübəsi 118
Eynşteynin tenzor tənlikləri 133

Ə

Ədəd
– Avoqadro 161, 169-170
– barion 313-315
– lepton 313-315
– Loşmidt 161
– Faradey 45
Ətir 322

F

Faradey qəfəsi 27
Farengeyt 173
– Selsi 173
Faydalı iş əmsalı 181
Faza keçidi 256
Fenomenoloji nəzəriyyə 258
Fermionlar 218, 308
Feynman diaqramları 309
Fəza və zamanın mütləqliyi 98
Fəza
– xəyallar 86
– cisimlər 86
– sürətlər 105



Dairəvi yarıqdan lazer şüasının difraksiyası.

Fırlanma tərəzisi 22
Fitscerald-Lorens hipotezi 114
Fiziki kinetika 213
Fiziki vakuum 341
Fokal müstəvi 88
Fokus 88, 370

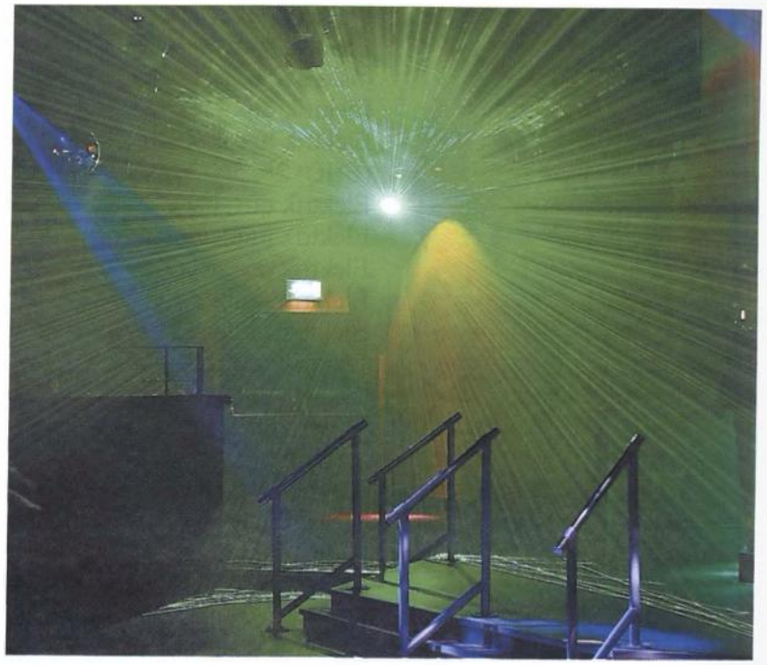
Fokus məsafəsi 88
Fonon 252, 259
Fotoelektrik effekti 223-224
Fotoelement 223
Foton 68, 223
Frank-Hers təcrübəsi 228
Fraunhofer xətləri 226
Fundamental qarşılıqlı təsirlər 98
Fundamental qarşılıqlı təsirlər 308
– qravitasiya 306, 312
– güclü 306, 310, 312
– zəif 306, 312, 332, 336
– elektromaqnit 8, 306, 310
– elektro zəif 336
Fundamental zərrəciklər
– qlüonlar 308
– qravitonlar 308
– kvarklar 304, 308, 322-330
– leptonlar 304, 308
– aralıq bozonlar 304, 308
– fotonlar 308
– hiqqs bozonu 308, 339, 341

G

Geodezik xətlər 136-137
Gərginlik 23



Sabun qovuqcuğunda işığın interferensiyası.



Kvant generatorunun – lazerin şüalanması.

Görmənin ətalətliliyi 72
Günəş küləyi 269
Güzgü 87

H

Hadisələr arasında interval 104, 107
Hal vektoru 243
Helium 256
Hesablama sistemi 100-101
Hərəkət edən saatların gedişinin yavaşıması 103
Hilbert fəzası 243
Hiperon 328
Hokinq şüalanması 153

X

Xətti operatorlar 236
Xüsusi
– keçiricilik 28
– istilik tutumu 210
– rabitə enerjisi 209

İ

İdarəedici parametrlər 391
İdarəolunan termonüvə sintezi 265-266
İdeal istilik maşını 180
İdeal qaz 166, 210, 216
– kvant 216
İfratağır elementlər 301
İfrataxıcılıq 219, 256, 258-259
İfratistilikkeçirmə 256
İfratkeçiricilik 217, 257
İfratkeçiriciliyin mikroskopik nəzəriyyəsi 258
İfratyeni ulduzlar 305
İkiqat şüasındırma 78-80
İldırım 20
İmpuls momentinin fəza kvantlanması 242, 244
İmpuls
– relyativistik 108
– Fermi 218
İnduksiya
– maqnit 40, 52
– elektrostatik 21
İnersial sistem 100
İnformasiyanın sıxılması 392
İntensivlik
– qravitasiya sahəsinin 9, 135
– elektrik sahəsinin 10, 24, 53
İnterferensiya
– işığın 61, 64-65, 71-75
– dalğaların 371
İnversiya çevrilməsi 321-322
İon 297
İstilik 165, 171-178
İstilik miqdarı 174
İstilik mübadiləsi 211
İstilik tutumu 160, 177, 179, 210
İstiliyin mexaniki ekvivalenti 191
İşığın dispersiyası 70
İşığın korpuskulyar dalğa xassələri 66
İşığın polyarizasiyası 79-84
– dairəvi 84
– xətti 83
– elliptik 84
İşıq konusu 107
İşıqötürən 90-91
İşıq sürəti 101
İşıq şüalarının dönərliyi 86
İşıq şüası 85
– qeyri-adi 78
– adi 78



Leyden bankalarının batareyası.

İşıq şüasının əyilməsi 146-147
İzobar nüvələr 283
İzotopik fəza 315
İzotopik simmetriya 316
İzotopik spin 316
İzotoplar 280, 286-287

K

Kainatın barion asimmetriyası 314
Kainatın izotopluğu 143
Kalibrləmə invariantlığı 154
Kalibrləmə törəməsi 342
Kalori 184, 191
Katoptrika 85
Kinetik tənlik 214
Klassik hallar cəmi 213
Koherentlik 73
Koma 87
Kombinə edilmiş cütlük 321
Kondensator 19
Kosmologiya 142-144



Maqnit.

– relyativistik 142
Kosmoloji sabit 143
Kosmomikrofizika 152
Kristal qəfəs 252
Küri (izotopların aktivlik vahidi) 291
Küri nöqtəsi 291, 338
Kütlə 105, 111-122
Kütlə defekti 277-280
Kütlə-spektrometr 280
Kvant burulğanları (rotonlar) 310
Kvant dipolları, məftilləri və nöqtələri 272
Kvant ədədi 244-248
Kvant generatorları 254
Kvant həcmi 216



Şimşək.

Kvant mexanikasının Kopenhagen şərhi 238
Kvant
– mayesi 258-259
– sistemi 240
– kimyası 252
– xromodinamikası 324-326, 346
– elektrodinamikası 152
Kvant
– təsir 206
– enerji 215-223
Kvantlanma şərtləri
– Bor-Zommerfeld 244
– Dirak 243
Kvazarlar 148
Kvazineytrallıq 265
Kvazizərrəcik 253

Q

Qalvanometr 39, 43
Qanun
– Avoqadro 170
– Amper 53
– Bio-Savar-Laplas 40
– Boyl-Mariott 167

– Brüster 80
– Qalileyin cisimlərin sərbəst düşməsi 121
– Key-Lüssak 169
– İstilik tutumu üçün Debay 210
– Coul-Lens 31
– Dülonq-Pti 210
– Qalileyin ətaləti 100
– Tarazlıq şüalanması Kirxhof 205
– Klapeyron 169
– Kontakt gərginliklər 34
– Kulon 9, 21-22, 33
– Küri 291
– Malyus 79
– İşıq şüalarının asılı olmaması 85
– Om 28, 30, 50
– İşığın qayıtma və sınma 67, 85
– işığın düzxətli yayılması 85
– Reley-Cins 205
– Sürətlərin toplanması 102, 104
– Vinin yerdəyişmə 204
– barion ədədinin 314-315
– lepton ədədinin 314-315
– qəribəliyin 316-317
– cütlüyün 317-320
– enerjinin 165, 181, 179, 194
– Şarl 169
– elektromaqnit induksiya 9, 48-50
Qara cismin şüalanması 221
Qara dəliklər 139-142
Qarşılıqlı təsir radiusu 311-312
Qarşılıqlı təsir sabiti 311
Qarşılıqlı təsirlərin böyük birləşməsi 349-350
Qazın cırlaşmama kriteriyası 216
Qeyri-Evklid həndəsələr 128-131
Qeyri-relyativistik limit 104
Qlüonlar 325
"Qara qutu" 163
Qravitasiya modeli
– mexaniki 119
– elektrodinamiki 120
Qravitasiya
– yükü 9
– kollapsı 141
– paradoksu 143
– radiusu 140
Qravitino 308
Qraviton 151, 308
Qrup 318-319
– Lorens 319
Qüvvə xətləri
– maqnit 46-47, 49, 52
– elektrik 24
Qüvvə
– Amper 37
– Lorens 40

L

Lazer 84, 254
Lens qaydası 50
Lepton 308, 314, 316
Lepton ədədi 314
Leptonların maqnit momentləri 328-329
Leyden bankası 20



Plazma.

Linza 87-90
Linzanın böyütməsi 89
Linzanın optik qüvvəsi 89
"Loşmidt demonu" 219
Louson kriteriyası 267

M

Magik ədədlər 289
Maqnit 15-17
Maqnit dipolu 268
Maqnit induksiyası 37



Suyun səthindən tam daxili inikas.

Maqnit sahəsinin sirkulyasiyası 53
Maqnithidrodinamik (MHD) generatorlar 268
Maqnitosfera 269
Matrisa mexanikası 241
"Maykelson eşelonu" 97
Maykelson interferometri 74, 93-95
Maykelson-Morli eksperimenti 95
Mazer 255
Merkurinin perihelisinin hərəkəti 145
Metalların gərginlik sırası 34
Metrik 131
Metrik əmsallar 131
Metrik tenzor 133
Mezon 281
Məcburi şüalanma 255
Məxsusi vaxt 106
Mikrolinzalaşdırma 148
Mikroskopik model 208
Minkovski fəza-zamanı 108
Miraj 69
Molekulyar spektrlər 249-252
Molekulyar-kinetik nəzəriyyənin əsas tənliyi 211
Monoxromatik işıq 74
Monopol 33, 54-55
Multiplet 316
Münasibət
– de Broyl 307
– qeyri-müəyyənlik 236
Müon 246
Müşahidə olunan kəmiyyət 243
Müşahidə olunanların tam dəsti 243
Mütləq qara cisim 203-204, 221

N

Nanotexnologiya 270-272
Neyronlar 272
Neytral zəif cərəyanlar 334-336
Neytrino 8, 303, 319, 334
Neytron 315-316, 331
Neytron ulduzu 285, 331
Neytronlaşma 302
Nəzəriyyə
– Böyük birləşmə 349
– Bütün Mövcudiyyətin 275
– qeyri-renormallaşan 152
– renormallaşan 152
– Dirak-Yordan çevirmələri 237, 243
– ifratkeçiriciliyin mikroskopik (BKŞ) 258
– ifrataxıcılıq 259
– supersim 347
– elektrozəif qarşılıqlı təsir 334
Nisbilik nəzəriyyəsi
– ümumi 114, 132
– xüsusi 12, 95, 100, 102
Nisbilik nəzəriyyəsinin paradoksları 102-104
Nisbilik prinsipi 96, 102
– Qalileyin 92, 101
– Puankare-Eynşteynin 101
Normal (Qauss) paylanması 212
Normal triplet 117
"Noyabr inqilabı" 330
Nukleosintez 300
Nuklon 8, 277
Nüfuzluq
– dielektrik 53, 57
– maqnit 57
Nüvə 277-285
Nüvə qüvvələrinin doyması 279
Nüvə modeli
– hidrodinamik 282
– damcı 277, 282
Nüvə reaksiyası
– bölünmə 279
– sintez 280
– birləşmə 297-299
– ekzotermik 279
Nüvədə örtük effektləri 289
Nüvənin quruluşu 277
Nyuton halqaları 60

O

Operator
– Hamilton 235-238
– xətti 236
Optik aktivlik 80
Optik lif 91

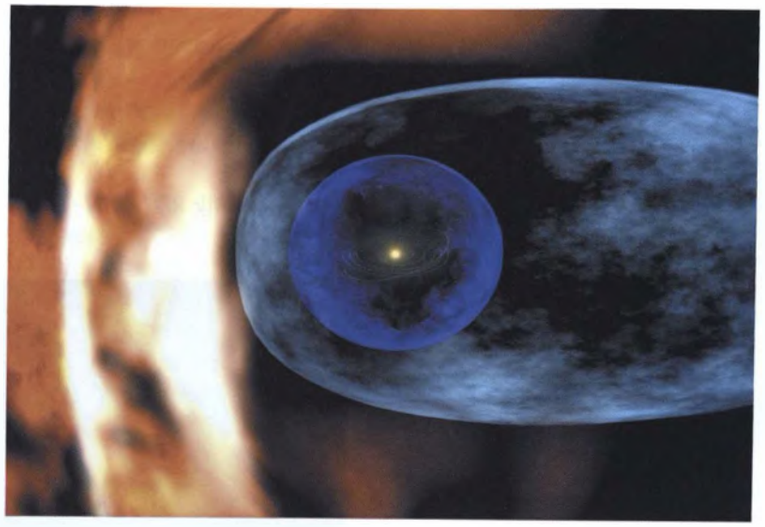


Refraksiya.

Optik ox
– baş 88
– kristalın 78
– köməkçi 90
Optika 60
– dalğa 61
– həndəsi 85
Orbital (impuls) momenti 244, 246
Orto-hidrogen 241
Ossilyasiya edən Kainat 144

Ö

Ölçü cihazı 240
Örtük 227, 246
Öz-özünə induksiya 48



Günəş küləyinin ulduzlararası mühitdə yayılması.

P

Paradoks
– əkizlər 103
– Puankar-Sermelonun qayıdış 219
– Reley-Cins 205
– qara pişik 239
– Erenfest 128
Para-hidrogen 241
Paramaqnetik 45
Parametrlər
– nizamlılıq 389
– hal 389
Partonlar 310
Paylanma
– Boze-Eynşteyn 218-219
– Gibbs 213
– Maksvell 210-212
– Maksvell-Bolsman 213-214
– Fermi-Dirak 218
Pion 281, 312
Plazma 263-269
Plazma hərəkətvericiləri 267
Plazmanı tutulub saxlama müddəti 267
Plazmanın inersial tutulub saxlanılması 268
Plazmatron 264
Polyarizasiya istiqaməti 82-84
Polyarizasiya müstəvisi 84
Postulat 100-101, 183
Pozitron 251
Prinsip 183
– Hüygens-Frenel 65
– tamamlama 239
– Paulinin qadağan 244, 283
– miqyas invariantlığı 35
– Max 124-125
– ən kiçik zaman (Ferma prinsipi) 68
– eyni istiqamətlilik 158
– korrelyasiyanın zəifləməsi 219
– Qalilcyin nisbilik 98, 101
– işıq sürətinin sabitliyi 96
– Borun uyğunluq 104, 228
– superpozisiya 25, 239, 243
– zərrəciklərin eyniyyət 246, 346
– Ferma 68
– ekvivalentlik 123
Proses
– adiabat 170
– izobar 168
– izotermik 167
– izoxor 169
– dönməyən 200, 202
– dönən 201-202
Proton 315-316
Protonun parçalanması 315
Pulsar 331
Pyezoelektrik effekti 291

R

Radiasiya qurşağı 269
Radioaktivlik 290
Refraksiya 69
Relikt şüalanma 404
Relyativistik halda Nyutonun İkinci qanunu 110
Relyativistik kvant mexanikası 250
Relyativistik vuruq 98
Rentgen spektrləri 248
Rentgen şüalanması 248-249
Rezonans udulma 254
Rəqslər 80-82
– məcburi 361-362
– harmonik 358
– sərbəst 357
– məxsusi 357
Ridberq-Ritsin kombinasiya prinsipi 226
Roton 259, 310

S

Sabiti
– Bolsman 205, 209, 212
– Plank 161, 206, 208, 222
– Fermi 312
Sahə 310
– qravitasiya 131
– kalibrləmə 341-342
– skalyar 338
– elektromaqnit 50
Sahə tranzistoru 271
Seçmə qaydaları 248, 322
"Səkkizlik yol" 317
Səpilmə matrisası 134
Səpilmənin effektiv kəsiyi 227
Sərbəstlik dərəcələri 209
Səviyyələr
– fırlanma 251
– rəqsi 250
Sfera
– Fermi 218
– Şvarsşild 140-142
Sferoidal dalğa 78
Sıxlıq
– halların 213
– cərəyanın 28
Simmetriya 313-322, 339
Simmetriyanın spontan pozulması 338
Sındırma əmsalı 68
Sinergetika 388
Sinxron şüalanma 249
Sinqlet 316
Sinqulyarlıq 140
Skalyarlar 109
Skaner tunel mikroskopu 271
Məxsusi vektor 243
Solvey konqresləri 116, 242
Soliton 381-486
Spektr 70-71
Spektral xətlərin qırmızı sürüşməsi 147
Spektrin incə quruluşu 248
Spirallıq 337
Ssintillyasiya 231
Standart model 341
Stasionar səviyyə 227
Statistik fizika 162, 208
Statistik inteqral 213
Statistik çəki 213
Stellarator 267
Superqravitasiya 345
Superpartnyorlar 308, 350
Supersimmetriya 346, 349
Superspin 348
Suyun üçlük nöqtəsi 188

Ş

Şərtlər
– amplitudun maksimum və minimum 73
– ifrataxıcılığın saxlanması (Landau kriteriyası) 259

T

Taxionlar 111
Tam daxili qayıtma 90
Tarazlıq
– fərqsiz 357
– dayanıqsız 356-357
– termodinamik 183
– istilik 182
– dayanıqlı 356-357
Temperatur 165, 170, 182-187
– boze-kondensasiya 219
– cırlaşma 217
– yanma 266
– böhran 257
– xarakteristik 209
Temperaturlar şkalası
– mütləq Kelvin 187



E.Torriçelli. Elm tarixi muzeyi, Florensiya.

– Reomür 173
– termodinamik 187
Temperaturun mütləq sıfırı 168
Tenzorlar 108, 133
Teoremi
– Bolsman (*H*-teorem) 214
– virial 197
– Puankarenin qayıdış 219
– Qauss 25
– Lens-Botto 31
– Nernst 200
– enerjinin bərabər paylanması 209
– sinqulyarlıqlar haqqında Penrouz-Hokinq 153
– Pauli 246
– CPT-teorem 245, 321
– fon Neyman 242
Termlər 226
Termocüt 28
Termodinamika 158, 162
Termodinamikanın başlanğıcları
– Sıfırıncı 183
– Birinci 183, 189-195
– İkinci 176, 183, 200
– Üçüncü 183, 198-202
Termoelektron çıxışı 77
Termogen 164, 174-175
Termonüvə reaksiyası 28, 265, 280
Termostat 28
Tənliklər
– Veyl 251
– Maksvell 51-61
Tənliyi
– Van der Pol 380
– Hilbert-Eynşteyn 140
– Dirak 250, 342
– Klapeyrona-Mendeleyev 210
– Kleyn-Qordon 251
– fotoeffekt 224
– Şredinger 235
Təzyiq 165-171
– işığın 58



Şüşə qabın divarcıqları işığı nazik linzalar kimi sındırır.

Tokamak 266
Torriçelli boşluğu 167
Triplet 117, 316
Tritium 264
Tsikl
– Karno 178-182
– Rankin-Klauzius 197
Tunnel effekti 266

U

Ulduzun kollapsı 305
"Ultrabənövşəyi fəlakət" 221-222
Umov-Poyntinq vektoru 58
Universal qaz sabiti 170
Uzağatəsir 9, 14, 118

V

Vakuum 13
Volta sütunu 33-35

Y

Yaxınatəsir 13
Yanq-Milles 343, 346
Yarımparçalanma periodu 286
"Yaşıl şüa" 71
Yerdəyişmə (kommutasiya) münasibətlər 236
Yerdəyişmə simmetriyası 344
Yolun optik uzunluğu 85
Yunq modulu 63
Yükqoşma əməliyyatı 321
Yük
– maqnit 33, 54-55
– rəng 323
– elektrik 20-26
Yüklü cərəyanlar 332
Yüksək temperaturlu ifratkeçirici 257

Z

Zaman oxu 322
Zəif cərəyanlar 332
Zərrəcik-antizərrəcik cütünün doğulması 250
Zərrəcik-dəlik cütləri 218
Zərrəciklərin xarakteristikaları
– yaşama müddəti 304
– izotopik spin 305
– həqiqilik 322
– gözəllik 322
– kütlə 304-305
– məftun 322
– spin 244, 246, 305
– qəribəlik 307, 317, 322
– elektrik yükü 305
– rəng 307, 323-325

MÜNDƏRİCAT

Oxucuya 5

5. DÜNYANIN SAHƏ MƏNZƏRƏSİ

Boşluq – efir – sahə 8
Fiziki reallıq nədir? 10
Efirin nəsil tarixi 13

Yüklər, cərəyanlar və sahələr
İlkin təsəvvürlər 15
Elektrostatikanın əsasları 23
Sabit elektrik cərəyanı qanunları 28
Elektrik + maqnetizm = elektromaqnetizm . . 32
Maykl Faradeyin həyatı və kəşfləri 42
Faradeyin elektromaqnit induksiya qanunu 48
Maksvell tənlikləri 51
Elektromaqnit dalğaları 56
Uilyam Hilbertin traktatı 17
Elektriklənmə ... lakin sürtünmə ilə yox 19
Kondensator 19
Benjamin Franklin 20
Elektrofor elektrik stansiyasının əcdadıdır 21
Elektrik tutumu 23
Dipollar və dielektriklər 24
Superpozisiya prinsipi nə zaman doğrudur 25
Sonsuz müstəvinin sahəsi 25
Robert Endrus Millikən 26
Qustav Robert Kirxhof 29
Alessandro Volta 34
Hans Kristian Ersted 36
Andre Mari Amper 38
Bio-Savar-Laplas qanunu 40
Lorens qüvvəsi 40
Faradeyin fiziki qüvvə xətləri 46
Maqnit monopolları: ümidlər və reallıqlar 54
Xüsusi törəmələr 57

Optikanın əsasları
Dalğa optikası 60
İşığın yayılması 66
İşığın interferensiyası 71
İşığın difraksiyası 75
İşığın ikiqat sınması və polyarizasiyası 78
Həndəsi optika 85
Maddə tərəfindən tutulmuş işıq 90
Ser İsaak Nyuton. "Optika və ya işığın qayıtmaları, sınmaları və rəngləri haqqındakı traktat" 62
Tomas Yunq 63
Spektr və ya göy qurşağının bütün rəngləri 70
Xristian Hüygens 80
Oqyusten Jan Frenel 82
Linzalar və güzgülər 87
Nazik linzaların hesablanması 89
Qeyri-bircins dalğa 91

Xüsusi nisbilik nəzəriyyəsi
Fizikada 1905-ci il inqilabı 92
Nisbiliyin fizikası 104
Hendrik Anton Lorens 112
Maykelson təcrübəsi və efirin iflası 94
Optik eksperimentin ustası 96
Qaliley və Lorens çevrilmələri 98
Jül Anri Puankare 99
Nisbilik nəzəriyyəsini kim başa düşür? 99
Sürətlərin relyativistik fəzası 105
Taxionlar və digər ekzotik zərrəciklər 111
Fitcerald, yoxsa Lorens? 114
"...O, çevriliş etmişdir..." 115
Solvey konqresləri 116

Ümumi nisbilik nəzəriyyəsi
Qravitasiyanın açılmamış sirri 118
Nəzəriyyəyə doğru gedən yolda 125
Ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin effektləri . . 137

Ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin eksperimental sübutları 145
Qravitasiya nəzəriyyəsinin inkişafı və yeni problemlər 150
Ernst Max 126
Əyri səthlərin həndəsəsi. Qauss koordinatları. . .129
Qarışqalar – "geodezistlərdir" 130
Eynşteynin tenzorial tənlikləri 133
Con Arçibald Uiler 134
Eynşteyn və Hilbert 137
Dünya dalğalarının axtarışı 138
Qravitasiya linzaları 148
Stiven Uilyam Hokinq. 153
Qüvvə adsız kəmiyyətdir 155

6. DÜNYANIN KVANT-STATİSTİK MƏNZƏRƏSİ

Bu dönməyən, birqiymətli olmayan dünya . 158

Termodinamikanın əsasları

"Termodinamika" və "statistik fizika" sözlərinin arxasında nə durur 162
Qaz qanunlarından termodinamikaya 166
İstilik nədir. 171
Karno tsikli 178
Temperatur. 182
Enerji. 187
Entropiya. 196
İstilik şüalanmasının qanunları 203
Statistik fizikanın əsasları 208
Termometrin tarixi 173
Ev və ocaq, paltar və qida termodinamikanın nöqteyi-nəzərincə. 177
Universal Karno funksiyası necə görünərdi. . . 179
Kosmosun temperaturu varmı? 185
Yulius Robert Mayer 190
Ceyms Preskott Coul 192
German Lüdviq Ferdinand fon Helmholts . . . 194
Rudolf Klauzius 197
Uilyam Tomson, lord Kelvin 199
"Dünyanın şahı" kimdir, "kölgəsi" kim 201
Avtoritetlərə istinadın əhəmiyyəti haqqında . . 211
Cozayya Uillard Gibbs 214
Lüdviq Bolsman. 216
Fizikada paradoksların əhəmiyyəti haqqında . . 219

Kvant fizikasının əsasları

Kvant təsəvvürlərinin yaranması 220
Ernest Rezerford 229
"Yeni" kvant nəzəriyyəsi 234
Kondensə olunmuş mühitlərin kvant nəzəriyyəsinin elementləri 252
Lev Davidoviç Landau. 255
Plazma maddənin dördüncü halıdır 263
Nanotexnologiya. 270
Maks Plank 222
Kompton effekti 225
Frank və Hers təcrübəsi. 228
Lui de Broyl 235
Operatorlar və matrisalar 236
Ervin Şredinger 237
Qara pişiyin taleyi və ya superpozisiya prinsipi haqqında 239
Verner Heyzenberq 241
Kvant mexanikasının riyazi aparatı 243
Arnold Zommerfeld. "Atomun quruluşu və spektrləri" 244
Volfqanq Pauli. 245
Spin və zərrəciklərin eyniliyi 246
Relyativistik kvant mexanikası 250
N.G.Basov, A.M.Proxorov və Ç.Tauns 253
İfrataxıcı maye. 256
Yox olmuş itkilər və ya ifratkeçiricilik 257
Makroskopik kvant effektləri 258
Plazma hərəkətvericiləri 267

7. "DÜNYANIN VAHİD MƏNZƏRƏSİNƏ" GEDƏN YOLDA

Sadəliyin tükənməyən mürəkkəbliyi 274

Nüvə fizikası

Nüvələr nə ilə və necə yaşayır 277
Transuran epopeyası 286
İqor Yevgenyeviç Tamm 292
Yeni "transuran" elementlərin fabriki. . . . 296
Kütlə defekti necə aşkar olunmuşdur 280
Yakov İliç Frenkel. 284
Antuan Anri Bekkerel 290
Pyer və Mariya Kürilər 290
Çerenkov-Vavilov effekti. 292
"Trasfermium yarışı" və onun "laureatları" . . 298

Təbiətdə ifratağır elementlərin axtarışı 299
Ulduzların enerjisi. 301

Standart model və onun çərçivəsindən kənarda

Materiyanın ilkin əsasları. İyirminci əsr. . . 304
Simmetriyalar və saxlanma qanunları 313
Güclü qarşılıqlı təsirlər 322
Zəif qarşılıqlı təsirlər 331
Elektrozəif qarşılıqlı təsirin vahid nəzəriyyəsi 334
Kalibrləmə sahələri 341
Qaqşıda nə var: durğunluq, yoxsa inqilab? . 347
Elementar zərrəciklər aləminin öyrənilməsinin xronologiyası 305
Bozonlar və fermionlar 306
Zərrəcikləri necə kəşf edirlər. 306
Elementar zərrəciklərin qarşılıqlı təsirini necə "görməli" 309
Riçard Feynman 310
Protonun parçalanmasını biz görə biləcəyikmi? 315
Qrup nədir 318
Altıncı kvarkın kəşfi. 329
Enriko Fermi 333
Əbdus Salam 335
Stiven Vaynberq. 336
Spirallıq 337
Simmetriyanın spontan pozulması 338
Supersimmetriya və supersimlər 344

8. TƏBİƏTİN VƏ FİZİKANIN UNİVERSALLARI

Hər yerdə mövcud olan qeyri-xəttilik. . . . 352

Universal proseslər və hadisələr

Mexaniki rəqslər. 356
Mexaniki dalğalar 363
Qeyri-xətti rəqslər. 373
Qeyri-xətti dalğalar və solitonlar 381
"Zaman paradoksu" 354
Furye ayrılışı 359
Lissaju fiqurları 360
Parametrik rezonans. 362
Səsin gurluğu və yüksəkliyi. 364
Binaural effekt. 367
Con Uilyam Strett, lord Reley və onun "Səs nəzəriyyəsi" 369
Dopler effekti 370
Faza fəzası. 372
Leonid İsaakoviç Mandelştam 374
Xristian Hüygens və saatlar. 378
Baltazar Van der Pol 380

Universal problemlər

Sinergetika nədir. 387
Xaosun ram edilməsi 390
Universal problem: Kainatın təkamülü . . . 399
XXI əsr fizikasının ən mühüm və ən maraqlı problemləri 406
Təsadüfilik – xaos və təsadüfilik – nizam . . . 391
Xaos və nizam. 393
Turbulentliyin "birə" modeli 394
Fraktalların "qaçqınları" və "əsirləri" 398
Nə üçün Kainat olduğu kimidir 400
Vitali Lazareviç Ginzburq. 407

Terminlər göstəricisi. 412
Mündəricat. 421

UŞAQLAR ÜÇÜN
ENSİKLOPEDİYA

FİZİKA

İkinci hissə

Elektrik və maqnetizm
Termodinamika və kvant mexanikası
Nüvə və elementar zərrəciklər fizikası

Buraxılışa məsul: *Əziz Güləliyev*

Kompüter səhifələyiciləri: *Yeganə Əsgərova*
Aslan Almasov

Korrektor: *Pərinaz Səmədova*

Çapa imzalanmışdır 17.12.2008. Format 84×108 $^{1}/_{16}$.
Ofset kağızı. Ofset çapı. Fiziki çap vərəqi 26,5.
Tirajı 25000 nüsxə. Sifariş №218.

DÜST 5773-90, DÜST 4.482-87

CBS POLYGRAPHIC PRODUCTION
Tel/Fax: 447 75 04, Tel.: 447 75 05

Kitab "CBS-PP" MMC mətbəəsində çap olunmuşdur.
Bakı, Şərifzadə küçəsi, 3.