G.Annamuhammedow, G.Orazow,
A.O.Gylyçmämmedowa

HÄZIRKI ZAMAN FIZIKASYNYŇ SAÝLAMA BÖLÜMLERI

Tűrkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödűrlenen

Aşgabat – 2010

G. Annamuhammedow, G.Orazow,
A.O.Gylyçmämmedowa

Häzirki zaman fizikasynyň saýlama bölümleri

Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin
okuw gollanmasy

Sözbaşy

Hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedowyń yglan eden täze Galkynyş we beýik Özgertmeler zamanasynda, ýurdumyzyń ýokary okuw mekdeplerini ähli tarapdan talaba laýyk derejedäki hünärmentleri taýarlaýan ylym we bilim mekdeplerine öwürmek üçin uly işler alynyp barylýar. Şu ýerde Hormatly Prezidentimiziń ylym-bilim barada aýdanlarynyń birini belläsimiz gelýär: ”Ata Watanymyzyń geljegi bolan bilimli-terbiýeli,edepli, ýokary ahlakly şahsyýetleri kemala getirmek bilim ulgamynyń işgärleriniń, mugallymlarynyń, biziń her birimiziń mukaddes borjumyzdyr”.

Bize ýüklenen şeýle borjuń päk ýürekden ýerine ýetirilmegi şűbhesizdir. Şu ugurda ilkinji ýerine ýetirilmeli işleriń biri, ol hem ýokary okuw mekdepleri üçin zerur bolan okuw gollanmalary talaba doly laýyk ene dilimizde taýýarlanylmalydygyndan ybaratdyr.

“Häzirki zaman fizikasynyń saýlama bölümleri” atly okuw gollanmasy Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersitetiniń matematika fakultetinde köp ýyllaryń dowamynda okadylyp gelinýär. Ońa häzirki zaman fizikasynyń üç esasy bölümleri: ýadro nazarýetiniń käbir soraglary, elementar bölejikler fizikasy we kwant mehanikasy girýär. Olar XX asyryń fizikasynyń bölümleri bolup, biri- biri bilen özara berk baglanşyklydyrlar we XXI asyrda hem özleriniń wajyplygyny saklaýarlar. Olaryń üstünligi her bir döwletiń abraýyna uly goşantdyr.

Okuw gollanmasy ýokary okuw mekdepleriniń ählisi üçin peýdaly bolar diýen umydymyz bar.

HÄZIRKI ZAMAN FIZIKASYNYŇ SAÝLAMA BÖLÜMLERI:

I. Ýadro nazaryýetiniň käbir soraglary.

II. Elementar bölejikler fizikasy.

III. Kwant mehanikasy.

I.ÝADRO NAZARYÝETINIŇ KÄBIR SORAGLARY

§1. Subatom fizikasynyň taryhynyň käbir basgançaklary

Atomizm (atom ylmy, atomistika) materiýanyň üznükli, diskret düzümi baradaky ylymdyr. XIX-asyryň aýagyna çenli atomistikanyň tassyklamagyna görä, materiýa aýratyn, bölünmeýän bölejiklerden atomlardan durýar. Häzirki zaman atomistika nukdaý nazaryna görä, elektronlar elektrigiň “atomlary”, fotonlar-ýagtylygyň “atomlary”, glýuonlar ýadro meýdanynyň “atomlary” we şuňa meňzeşler.

Ylmyň we tehnikanyň taryhynyň dürli döwürlerinde atomistika bolan garaýyşlar hil taýdan tapwutlanýar. Şertli olary gadymy döwriň atomistikasyna, klassiki atomistika we XX-nji asyryň atomistkasyna bölüp bilýäris.

Ilkiler “atomistika” termini klassiki ylymda we XX-nji asyryň ylmynda dürli problemalara degişli düýbünden dürli düşünjelere ulanylypdyr.

Klassiki atomistika – üznüksiz hereketli, üznüksiz üýtgeýän atomlaryň we molekulalaryň diskret strukturalary baradaky ylymdyr.

Tersine, XX-nji asyrdaky atomistika- ilki bilen elementar bölejikler baradaky ylymdyr. Şu asyryň fizikasy atomistikanyň esasy düşünjesini üýtgedip, oňa korpuskula – tolkun dualizmini girizdi.

Bilşimiz ýaly “atom ýadrosy” sözüni ilkinji bolup Rezerford 1911 ýylda ulanypdyr, atom ýadrosy baradaky maglumatlary hemme taraplaýyn bilmeklik bolsa, XX-nji asyryň 40-njy ýyllaryndan başlanýar. Ýöne materiýanyň atomly düzümi baradaky düşünje, ýagny materiýany düzýän kiçijik bölünmeýän bölejikleriň bardyklary antiki filosofiýadan gelip çykýar. Muňa iki ýarym müň ýyldan öň grek akyldarlary synanyşypdyrlar. Diýmek biz ilki atomizmiň taryhyna göz gezdirmelidiris. Onda häzirki zaman fizikasynda ösen pikirleriň köklerini görmek bolýar.

Antiki filosofiýanyň ýüze çykmagynyň öň ýanynda, öňki eranyň VI ýüzýyllygynda Miletde ýaşap geçen Fales hemme zatlaryň birinji sebäbi “suw” hyzmat edýär diýen ajaýyp pikiri aýdypdyr. Geraklitiň filosofiýasynda şeýle element hereket edýän “otdyr”. Ýokarky pikirlerden materiýanyň birinji sebäbiniň barlygy baradaky düşünje gelip çykýar. Takmynan biziň eramyzdan 500 ýyl ozal Anaksagor, tükeniksiz köp esasy jisimleriň barlygyny we olaryň birleşmekleri we biri-birinden aýrylmaklygy netijesinde dünýädäki ähli hadysalar şertlendirýärler diýipdir. Ondan 10 ýyl soň Empedokl ähli zatlaryň “düýbini tutýanlar” diýip dört elemenleri (ýer, suw, howa we ot) girizipdir.

Materiýa barada häzirki zaman düşünjelerine ýakynlaşýan taglymaty filosof Lewkipp we onuň okuwçysy Demokrit aýdypdyrlar. Olaryň tassyklamaklaryna görä “doly göwrüm” bu kiçijik bölünmeýän bölejikler, “atomlar”, olaryň arasynda bolsa boş giňişlik bardyr. Atomlar şol giňişlikde ömürlik hereketdedirler, ýagny atom hereketli materiýadyr.

Şu wagta çenli getirilen üstünlikler köp däl asyrlaryň içinde gazanyldy. Ondan iki müň ýyl geçen soň atomizm barada düşünjelere ýüz urup başlapdyrlar. Diňe 16-njy we 17-nji asyrlarda filosoflar we alymlar, mysal üçin, Galileý, Dekart, Bekon, Boýl, Nýuton we başgalar atom baradaky teoriýany ösdürip başlapdyrlar. Olaryň pikiriçe tebigaty boýunça materiýa üznüksiz dälde, bölünmeýän bölejiklerden- atomlardan durýar. Gadymy ideýalara ýüz uranlaryň hataryna fransiýaly Gassendi hem girýär. Ol Galileýiň we Koperniginiň döwürdeşi bolan soň, şol döwürdäki tebigy bilimleriň üstünlikleri bilen tanyş bolupdyr. Ol ýagtylygyň korpuskulýar nazarýetini esaslandyryjylaryň biridir we onuň pikiriçe, ýagtylyk kiçijik atomlaryň-ýagtylyk bölejikleriniň akymydyr.

Indiki akyldar, ol iňlis alymy R.Boýl (1627-1691). Onuň esasy işleri gazyň teoriýasynyň oblastyna degişlidir. Fizikada onuň açan kanuny: berlen temperaturada gazyň basyşynyň onuň göwrümine köpeltmek hasyly hemişelikdir. Himýada ol häzirki manydaky “himiki element” diýen düşünjäni girizipdir. Gadymy grekler element düşünjäni tebigatyň esasy hadysalary (dynçlyk, hereket, ýer, ot) bilen baglaşdyrypdyrlar. Boýl bolsa ol düşünjäni himiki hadysalar bilen baglaşdyrypdyr.

Umuman fizikanyň, aýratyn atomistikanyň, ösmeginde rus alymy M.Lomonosowyň (1711-1765) ýerine ýetiren işleri örän agramlydyr. Materiýanyň ýok bolmaýanlygy we täzeden döremeýänligi ideýadan ugur alyp, ol ähli fiziki we himiki hadysalarda ýekeje atomda täzeden döremeýär we ýok bolmaýar diýip hasaplapdyr, ol hadysalar elmydama atomlaryň toparlarynyň üýtgemekligine ugruklandyrlandyr. Nýutonyň dikeldişi ýaly, materiýanyň mukdary agrama proporsional we hadysadan öň we soň agram üýgemeýär. Şu netijäni Lomonosow tejribede barlapdyr. Ol metalyň poslamagyny saýlap alypdyr. Şu hadysa öz bolyşly gyzykly, sebäbi şol döwürde köp sanly himikleri (şol sanda Boýl hem) metal poslanda onda, agramsyz suwuklygyň bir görnüşi bolan haýsyda bolsa bir ýangyç başlangyjy – flogiston uçup çykýar we netijede agram kemleýär (ýagny ýitýär) diýip hasap edipdirler. Lomonosow teklip eden teoriýasyna laýykda, metalyň poslamagy onuň kislorod bilen birleşmegidir, agram artýar ýöne metal bilen kislorodyň (howanyň) umumy agramy üýtgemeýär. Ol şu işi hiç ýerde çapdan çykartmandyr, şol sebäpli häzirki zaman mukdar himýany esaslandyryjy diýip ol dälde, fransuz himigi Lawuazýe (1743-1794) hasaplanylýar. Ol metalyň poslamagyna meňzeşlikde ýanmak hadysasyny dogry düşündiripdir.

Şeýlelikde XVIII asyryň aýagynda massanyň saklanmak kanuny dikeldilýär.

Atomizmiň taryhynyň esasy etaplaryny beýan etmekligi dowam etdireliň.

1792-nji ýylda nemes himigi Rihter elementleriň himiki birleşmelerine berk kesgitli agram gatnaşyklarda girýändiklerini açypdyr. Islendik wodorodyň mukdary ýanyp we kislorod bilen birleşip suwy emele getirip bilmeýär. Olaryň mukdarlary belli bir kesgitli gatnaşykda bolmaklary hökmandyr. Oňa kratnyýly gatnaşygyň kanuny diýilýär. Dalton ony himiýada esasy prinsipe ösdüripdir, bu bolsa gysga wagtda himiýany atom teoriýasy bilen baglanyşdyrypdyr.

Himiýada atom teoriýanyň esasyny 1811-nji ýylda Awogadro goýupdyr. Ol tassyklapdyr, ýagny ähli gazlar deň basyşda we deň temperaturada giňişligiň deň böleklerinde deň sandaky molekulalary saklaýarlar ($N_A=6,02\cdot10^{23}$ mol^{-1}).

1815-nji ýylda Prout atomyň bölünmeýändigi baradaky düşünjä garşy ugrukdyrylan tassyklamany aýdypdyr: hemme atomlar wodorodyň atomyndan durýar. Diýmek onuň pikiriçe wodorodyň atomlary materiýanyň "birinji we soňky gurluşyk daşlary" bolup hyzmat edýärler.

Atomlar bardaky täze bölüm Faradeýden başlanýar. Ol 1833-1834-nji ýyllarda atom baradaky taglymaty elektrik bilen baglanyşdyrýar. Atomistika oňa wajyp kanun üçin minnetdardyr: elektrik togynyň kömegi bilen bolup geçýän himiki öwrülmelerde, ýagny elektrik hadysada, öwrülýän jisimiň kesgitli mukdary elmydama elektrigiň kesgitli mukdary bilen baglydyr.

Şu ýerden elektrigiň hem atom struktura eýedigi gelip çykýar, ýagny himiki birleşmäniň her bir atomy ýa-da her bir molekulasy elektrigiň bir ýa-da birnäçe atomlary bilen baglydyr. Şu baglanyşygy 1846-njy ýylda W.Weber anyklaşdyrýar: atomlaryň şol bir sanlary bilen elmydama elektrigiň kesgitli mukdary baglydyr.

Atomlar baradaky indiki üstünlikler, gazyň teoriýasynyň dogry ylym ýaly ösdürilmegi bilen baglydyr. Makswell, Bolsman we ilki bilen Klauzius berk matematiki esasda, gazyň uly tizlik bilen hereket edýän molekulalardan durýandygy baradaky görkezmäni hödürläpdirler. 1865-nji ýylda Loşmidt atomyň ölçegini takyk kesgitleýär.

Soňky wagtda elektrik barada ýene-de uly açylyşlar ýüze çykarýarlar. Faradeýiň barlaglarynyň esasynda elektrigiň erkin atomlarynyň barlygy baradaky ähtimalllyk emele gelýär. Gittorf (1824-1914) magnit meýdanda katod şöhlesiniň gyşarmasyna seredipdir we şu gyşarmanyň ulylygyndan, katod şöhlesinde zarýadyň hereket edýän bölejikleriň massasyna bolan gatnaşygyny hasaplamagy başarypdyr. Öňden aýry atomlaryň massalarynyň takmynan belli bolandygyna esaslanyp, Faradeýiň kanunlaryndan elektrigiň aýry atomlarynyň ulylygy tapylypdyr. Onda $\frac{e}{m}$ ulylykdan elektrigiň şu atomyna mahsus bolan massa gelip çykýar. Ol wodorodyň atomyndan takmynan 1840 esse kiçidir. Stoniniň teklibi boýunça, elektrigiň erkin atomy elektron diýip atlandyrylýar. Şeýlelikde, birinji elementar bölejik - elektron açylýar.

Subatom fizikanyň (ýadro we elementar bölejikler fizikasy) taryhynyň öňi syrasy XIX asyryň ikinji ýarymynda başlanýar. Subatom fizikanyň esasy maksady atomizm baradaky esasy düşünjäni materiýanyň indiki struktura derejelerine ösdürmekdir. Şu babatda ol uly üstünlikler gazandy, we materiýanyň ýeketäk teoriýasyny dikeltmegiň öňi-syrasynda durýandygyny hem bellemelidiris. Seredilýän döwürde umuman fizikanyň, esasan atomizmiň, ösmeklerine uly impuls beren we subatom fizikanyň döremegine getiren beýik açyşlary getireliň.

1. D.I. Mendeleýewiň periodiki sistemasy. XIX asyryň ortasyna köp sanly himiki elementler açyldy. Ol elementler özara baglymy, olaryň häsiýetleri düýpden tötänleýinmi ýa-da biri-birine bagly dälmi diýen tebigy

sorag ýüze çykýar. Dürli hususy kanunalaýyklyklar öňüräk açylýarlar, ýöne diňe 1869-njy ýylda belli 63 elemenleri atom masssanyň artmagy tertipde D.I. Mendeleýew ýerleşdiripdir we häsýetli elementleriň gaýtalaýandyklaryny açypdyr. Şeýlelikde, diňe iki fiziki ulylyklardan (Z we A) ugur alyp, ol “elementleriň tebigy sistemasyny” gurupdyr. Käbir faktlara garamazdan (meselem, atom massany hemişelik diýip hasap edip bolmaýar) Mendeleýewiň döreden elementleriň periodiki sistemasy dogrydyr we ol tebigatyň fundamental kanuny ýaly kabul edilýär. Şu kanun, diňe kwant mehanikasy döredilenden soň , ylmy taýdan esaslandyrylýar. Şu ýerde diňe belläp geçjek zadymyz, ol hem, himiki atom massasy diýen ulylyk atomyň düýpli alamaty däldir, elementiň esasy häsiýetnamasy bolup onuň periodiki sistemada tutýan ornudyr, şu orun bolsa elementiň ýerleşen ýeriniň sany bilen kesgitlenilýär. Atom belgisi diýip, atlandyrylýan şu sanyň wajyplygynyň çuňňur sebäbi, onuň diňe tertip belgisi bolman, atomyň esasy fiziki hemişelikleriniň biridigidir. Häzirki zaman fizikasyna laýyklykda, şol san (ýagny Z) ýadrodaky položitel zarýadly bölejigi we neýtral atomlardaky eletronlary görkezýär.

2.Makswelliň nazaryýeti.Umuman fizika ylmynyň ösmeginde iňlis alymy D.K.Makswelliň (1831-1879) tutýan orny has agramlydyr. Ol klassiki elektrodinamikany döredipdir, statistiki fizikany esaslandyryjylaryň biri, Kewendiş labortoriýany guran we onuň birinji direktory (1871-den başlap), elektrik we magnit hadysalaryň ýeke-täk nazaryýetini hem dikeldipdir. Makswelliň esasy pikiri elektrik we magnit meýdanlarynyň arasyndaky öz ara baglanyşykdyr, ýagny wagta görä üýtgeýän magnit meýdany elektrik meýdanynyň peýda bolmagyna getirýär, wagta görä üýtgeýän elektrik meýdany bolsa magnit meýdanyň peýda bolmagyna getirýär. Birinji tassyklama elektromagnit indukasiýa hadysasy bilen subut edilýär, ikinji ýagdaý, elektrik togunyň elmydama üýtgeýän elektrik meýdany bilen baglylygy we magnit meýdanyň peýda bolmagy bilen esaslandyrylýar. Makswelliň nazaryýeti- fenomenologik (täsin hadysa), makroskopik we ýakyn täsir nazaryýetdir. Biz Makswelliň elektromagnit nazaryýetini doly beýan etmekligi maksat edinmeýäris, ýöne atomizm düşünjesiniň has çuňlaşmagynda we ösmeginde ýerlikli funksiýalary öňe süren, ondan gelip çykýan wajyp düşünjeleri (ýa-da netijeleri) getireliň:

I. elektromagnit meýdanyň barlygy öňünden aýdylýar;

II. soňra Gersiň açan elektromagnit tolkunynyň barlygy öňünden aýdylýar;

III. ýagtylygyň hem gysga tolkun uzynlykly (10^{-7}m) elektromagnit tolkundygy tassyklanýar;

IV. elektrik we magnit meýdanlarynyň bütewiligi gelip çykýar.

2. Rentgen we Bekkerel şöhleleri. 1895-nji ýylda nemes alymy Rentgen täze bir şöhläni, “x”-şöhläni açýar. Rentgen şöhlesi çalt elektronlaryň täsiri astynda ýüze çykýarlar. Özüniň tebigaty boýunça Rentgen şöhlesi ýagtylyk bilen gabat gelýär, ýöne ondan özüniň tolkun uzunlygynyň kiçiligi bilen tapawutlanýar. Edil ýagtylyk ýaly, ol tolkun häsiýete eýedir, şu häsiýet

interferensiýa we ditraksiýa tejribelerinde tapylýar. Rentgen şöhlesi surat plastinkasyna täsir edýär we gazlarda ionizasiýany döredýär. Rentgen şöhlesi atomy öwrenmekde uly rol oýnaýar. Meselem, Rentgen şöhlesiniň spektri ähli elementleriň atom belliklerini takyk bellemeklige mümkinçilik berýär, ýagny olaryň ýadrolarynyň zarýadlary kesgitlenýär. Mundan başga-da, Rentgen spektroskopiýa usuly Awogadro sanynyň, elektronyň "e" zarýadynyň, galyberse-de elektronyň udel "$\frac{e}{m}$" zarýadynyň has takyk bahalaryny almaklyk üçin ulanylypdyr.

Rentgen şöhlesiniň tebigatyny bilmek maksady bilen geçiren tejribeleriniň netijesinde, 1896-njy ýylda fransuz fizigi A.Bekkerel urandan näbelli, jisimden geçijiligi ýokary bolan şöhläniň goýberilmegini açypdyr. Häsiýetleri boýunça A.Bekkereliň şöhlesi Rentgen şöhlesine meňzeşdir, ýöne şu şöhläniň döremegi üçin elektrik napraženiýa zerur däl, ol ýadronyň içki tebigy häsiýetidir. Köp wagt geçmezden Toriniň hem şeýle şöhläni goýberýändigi açylýar. 1898-nji ýylda bolsa fransuz fizikleri Mariýa we Pýer Kýuri iki täze radioaktiw elementleri (poloniý we radiý) açýarlar. Iňlis fizigi E.Rezerfordyň we Kýurileriň işleri bilen radioaktiw şöhläniň üç görnüşiniň (α,β we γ) barlygy anyklanylýar.

XX asyrdaky subatom fizikasynyň üstünlikleri giňişleýin we aýratynlykda beýan ediler.

§2. **Fiziki ululyklaryň masştablary**

Subatom fizikasynda ulanylýan esasy fiziki ululyklaryň ölçeglerine seredip geçilende, ilki bilen belläp geçmeli zat ol hem mikrodünýäde uzynlyk(aralyk) üçin ýokarky araçägi bolup atomyň ölçegi, ýagny $10^{-10}m = 1\text{A}°$ alynýar, energiýanyň aşaky araçägi üçin bolsa elektronyň atomdaky baglanyşyk energiýasy kabul edilýär $(10^{-17} \div 10^{-18})J$.

Häzirki wagtda şu araçäkler üçin belli bir hemişelik netije ýok. Sebäbi ylmyň we tehnikanyň ösmegi bilen ol ululyklar giňelýärler. Mikrobölejikler dünýäsinde $(10^{-17} \div 10^{-18})m$ aralykda bolup geçýän prosesleri öwrenilýär. Bir bölejik üçin maksimum energiýa 10^{-8} J deňdir.

Esasy fiziki ululyklar:

Uzynlyk. Atomyň ölçegi $10^{-10}m = 1A°$

Ýadronyň ölçegi $10^{-15}m = 1F$

Energiýa. Energiýanyň birligi eW.

$$1eW = 4{,}8 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{SGSE}{300} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,J.$$

$$1MeW = 10^{6}\,eW.$$

$$1GeW = 10^{9}\,eW.$$

$$1TeW = 10^{12}\,eW.$$

Tizlik. Hemme hereketleriň tizlikleriniň absolýut çägi bolup ýagtylygyň tizligi hasap edilýär $c = 3 \cdot 10^{8}\,m/s.$ Şu tizlik bilen elektromagnit tolkunlary we praktiki taýdan massasy bolmadyk neýtrino bölejigi ýaýraýarlar.

Ýagtylygyň tizligine ýakyn tizlik bilen hereket edýän bölejikleriň energiýasy, otnositelligiň teoriýasyna laýyklykda şeýle hasaplanýar:

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2$$

Bu ýerde m_0- elektronyň dynçlyk massasy.

Şu gatnaşyga elektronyň kinetik energiýasynyň 10^6eW bahasyny goýsak, onda onuň tizligi ýagtylygyň tizliginiň 94% deň bolýar. Protonyň tizligi, kinetik energiýa $10^9\,eW$ bolanda, ýagtylygyň tizliginiň 85% barabardyr.

Wagt. Eger 10F aralygy ýagtylygyň tizligine bölsek, onda şu aşakdaky ululygy alarys:

$$\frac{10F}{c} = \frac{10 \cdot 10^{-13}}{3 \cdot 10^{-10}} \approx 3 \cdot 10^{-23} s.$$

$\Delta t = 10^{-23} s.$- ýadro wagtydyr. Ol elementar bölejikler dünýäsinde wagt masştaby bolup hyzmat edýär.

Massa. Bu ululyk jisimiň inertlik we grawitasiýa häsiýetlerini aňladýar. Mundan başga-da massa jisimdäki ätiýaçlyk energiýany hem görkezýär. Otnositelligiň nazaryýetine laýyklykda ϑ tizlik bilen hereket edýän jisimiň doly energiýasy:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

ϑ<<c bolan ýagdaýda: $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1 + \frac{\beta^2}{2}$,

onda, $$E \approx \frac{m_0 \vartheta^2}{2} + m_0 c^2$$

Diýmek, doly energiýa kinetik we dynçlyk energiýalaryň jemine deňdir.

Elementar bölejikleriň massalarynyň birligi deregine $9 \cdot 10^{-31} kg$ deň bolan elektronyň dynçlyk massasy hyzmat edýär. Şu massa şeýle hususy energiýa degişlidir:

$$m_0 c^2 = \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1.6 \cdot 10^{-6}} \approx 0.511 MeW.$$

Hereket mukdarynyň momenti. Şu ululygyň kwant birligi bolup "$\hbar$" ululyk hyzmat edýär:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054 \cdot 10^{-27} erg \cdot s = 1.05 \cdot 10^{-34} j \cdot s.$$

Elektronyň atomdaky hereket mukdarynyň momenti bir ýa-da birnäçe "$\hbar$" ululyga barabardyr. Mikrodünýäde fiziki hadysalaryň özboluşlyklary bardyr. Çylşyrymly atom sistemalarynyň ýagdaýlarynyň diskretliligi mikro dünýäniň iň esasy özboluşlulygynyň birini aňladýar. Mundan başgada, özboluşlygyň başga bir esasy ýagdaýyny aňladýan zat, ol hem bölejige bir wagtda diskret we tolkun häsiýetleriň degişlidigidir. Başgaça aýdylanda, bölejiklere dualizm häsiýet degişlidir.

§3. Ýadronyň esasy häsiýetleri

Ýadronyň esasy häsiýetlerini onuň zarýady, massasy, baglanyşyk energiýasy we momentleri kesgitleýärler. Ýadronyň zarýady položitel bolup, elementar $e = 1.6 \cdot 10^{-19} kl$ zarýada kratnyýdyr. Ol şeýle aňladylýar:

$$q = eZ.$$

Bu ýerde Z-ýadrodaky protonlaryň sany, periodiki sistemada elementleriň tertip belgisi we neýtral atomlardaky elektronlaryň sany.

Ýadronyň zarýadyny ilkinji gezek gytaklaýyn Mozli (1913-nji ýylda) ölçäpdir. Ol häsiýetli rentgen şöhlesiniň ν ýygylygynyň we ýadronyň Z zarýadynyň arasynda ýönekeý baglylygy tapypdyr:

$$\sqrt{\nu} = CZ - B \qquad ,$$

$$ya - da$$

$$\sqrt{\nu} \approx \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \approx \mathrm{Z}$$

bu ýerde, C we B hemişelikleriň şöhlelenmäniň berilen seriýasy üçin elemente bagly däldiklerini Mozli dikeldipdir. Mozliniň kanuny, rentgen spektriniň çyzyklarynyň orunlary boýunça, ýadronyň zarýadyny kesgitlemäge ýardam edýär. Ýadronyň esasy häsiýetini suratlandyrýan ululyk bolup onuň massasy hyzmat edýär. 1962-nji ýyla çenli subatom fizikasynda massanyň atom birligi (m.a.b.) hyzmat edipdir.

$$1 m.a.b. = \frac{1}{16} M_{0^{16}} = \frac{1}{16} \cdot \frac{16}{N_A} = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$$

Şu massa degişli energiýa ($931{,}145 \pm$ 0,10)MeW. 1962-nji ýyldan başlap unifisirlenen massanyň atom birligi girizilýär:

$$1u.m.a.b. = \frac{1}{12} M_{C^{12}} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12.0107}{N_A} = (931.478 \pm 0.015) MeW$$

Bu iki ululyklaryň gatnaşygy:

$$1u.m.a.b. = (1.000317917 \pm 0.000000017) m.a.b.$$

Ýadronyň ýazylyşy himiki elementleriň ýazylyşyna meňzeşdir, ýagny $_z X^A$

Bu ýerde, X=H, He, Li,...,;
Z- ýadrodaky protonlaryň sany;
A=Z+N -ýadrodaky protonlaryň we neýtronlaryň umumy sany ýa-da massa sany;
N=A-Z – ýadrodaky neýtronlaryň sany.

Birdeň sanly protonlary bolan ýadrolara izotoplar diýilýär $({}_1H^1, {}_1H^2, {}_1H^3, {}_1H^4\, ya-da\, {}_{92}U^{235}, {}_{92}U^{234})$, birdeň massa sanly ýadrolara izobaralar diýilýär $({}_4Be^{10}, {}_5B^{10}, {}_6C^{10})$, birdeň neýtronly ýadrolara izotonlar diýilýär $({}_7N^{15}, {}_8O^{16}, {}_9F^{17})$. Protonlardan neýtronlaryň artykmaçlygy birdeň bolan ýadrolara izodiaferalar diýilýär.

Ýeňil ýadrolaryň oblastynda “aýnaly jübüt” ýadrolara duş gelinýär. Olarda Z we N orunlaryny çalyşýarlar. Şeýle ýadrolar biri-birinden bir protony neýtronyň ýerine, ýa-da tersine, goýmaklygyň netijesinde alynýarlar.

Mysallar:

$$\begin{cases} {}_1H^3(1p+2n) \\ {}_2He^3(2p+1n) \end{cases}; \begin{cases} {}_3Li^7(3p+4n) \\ {}_4Be^7(4p+3n) \end{cases}; \begin{cases} {}_5B^{11}(5p+6n) \\ {}_6C^{11}(6p+5n) \end{cases}; \begin{cases} {}_6C^{13}(6p+7n) \\ {}_7N^{13}(7p+6n) \end{cases};$$

Protonyň we neýtronyň elektrik zarýatdan başga ähli fiziki ululyklary birdeň diýen ýalydyr. Mundan başga-da, ýadroda $P \leftrightarrow n$ prosesi üznüksizdir. Şol sebäpli, protonyň we neýtronyň toplumyna nuklon diýilýär. Nuklon zarýad boýunça iki ýagdaýda bolup biler: <+1> -proton we <0>- neýtron.

§4. Ýadronyň baglanyşyk energiýasy

Ýadronyň stasionar ýagdaýlary käbir fiziki ululyklaryň toplumy bilen aňladylýar. Bu ululyklar wagta görä ýa-da üýtgemän galýarlar ýa ujypsyz az üýtgeýärler. Birinji halda olara hereketiň integrallary diýilip at berilýär ýa-da “gowy kwant sanlary” görnüşinde kabul edilýär. Ikinji halda bolsa olara takyklanan hereketiň integrallary diýilýär ýa-da “takyk däl kwant sanlary” görnüşinde alynýar. Bellenip geçilişi ýaly, islendik kwant sistemasy (mysal üçin, ýadro) üçin hereketiň integrallary bolup energiýa, impulsyň doly momenti, tolkun funksiýanyň jübütligi we ş.m. hyzmat edýärler.

Atom ýadrosy dürli ýagdaýlarda bolup, umumylykda aýdylanda, dürli doly energiýa eýedir. Energiýanyň iň kiçi bahasyna eýe bolan ýagdaýa esasy ýagdaý diýilýär, galanlary bolsa oýandyrylan ýagdaýlardyrlar. Normal şertlerde ýadro esasy ýagdaýda ýerleşýär. Eger ýadro haýsy hem bolsa bir sebäp bilen oýandyrylan ýagdaýa geçse, onda ol esasy ýagdaýa, bir we birnäçe γ kwantlary ýa-da başga bölejikleri goýbermekligiň netijesinde geçip biler.

Ýadronyň umumy energiýasy E onuň massasy bilen Eýnşteýniň gatnaşygynyň üsti bilen aňladylýar:

$$E = mc^2 \qquad (1)$$

Bu fundamental baglanyşyk bolup, energiýa bilen massanyň arasyndaky ekwiwalent kanundyr. Şu gatnaşygy postulat görnüşinde kabul etmek bolar. Şeýle-de bolsa onuň getirilip çykarylyşyna seredip geçeliň . Şonuň üçin, mehanikanyň esasy deňlemesini wektor görnüşde ýazalyň:

$$\frac{d}{dt}(m_0\vec{\vartheta}) = \vec{F} \quad . \qquad (2)$$

Massanyň $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{\vec{\vartheta}}{c^2}}}$

bolanlygy sebäpli, (2) –nji deňlemäni aşakdaky görnüşde alyp bolar:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\vec{\vartheta}}{\sqrt{1-\dfrac{\vec{\vartheta}}{c^2}}}\right) = \overline{F} \, .$$

Goý, haýsam bolsa bir jisim $\overline{F}$ güýjüň täsiri astynda $\overrightarrow{dr}$ aralyga ornuny üýtgedýär diýeliň, onda edilen iş aşakdaka deňdir:

$$dA = \vec{F}\overrightarrow{dr} \, .$$

$\overline{F}$ güýç tarapyndan şu ýerine ýetirilen iş seredilen jisimiň energiýasynyň üýtgemegini hem aňladýar:

$$dE = dA = \vec{F}d\vec{r} = \frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\vec{\vartheta}}{\sqrt{1-\frac{\vec{\vartheta}}{c^2}}}\right)d\vec{r}$$

Şuny differensirläp alarys:

$$dE = \left[\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\vartheta^2}{c^2}}}\cdot\frac{d\vartheta}{dt} + \left\{-\frac{1}{2}(1-\frac{\vartheta^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}-1}\cdot\left(-\frac{2\vartheta}{c^2}\right)\frac{d\vartheta}{dt}m_0\vartheta\right\}\right]dr =$$

$$= \left[\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\vartheta^2}{c^2}}}\frac{d\vartheta}{dt} + \frac{m_0\vartheta^2}{c^2(1-\frac{\vartheta^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}}\frac{d\vartheta}{dt}\right]dr$$

Kesgitlemä görä:

$$\vartheta = \frac{dr}{dt}$$

Şeýlelikde

$$dE = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\vartheta^2}{c^2}}}\vartheta d\vartheta\left(1+\frac{\vartheta^2}{c^2(1-\frac{\vartheta^2}{c^2})}\right) = \frac{m_0\vartheta d\vartheta}{(1-\frac{\vartheta^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

Indi dm massany tapalyň:

$$dm = \frac{m_0 \vartheta d\vartheta}{c^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}\right)^3}} \qquad (4)$$

(3) we (4) formulalary deňeşdirip alarys:

$$dE = c^2 dm \qquad (4')$$

Integrirläp taparys:

$$E = mc^2 + const \qquad (5)$$

(4′) formuladan görnüşi ýaly, enegiýanyň dE ululyga ýitmegi massanyň hem dm ululyga üýtgemegine alyp barýar. Diýmek ol E we m ulullyklaryň arasynda belli bir gatnaşyk bolup durýar. Şeýle bolanda massanyň m=0 bahasyna energiýanyň hem E=0 bahasy degişlidir. Onda (5) deňlemede hemişelik ululygy const=0 diýip kabul edip (1) deňlemäni alarys.

Käwagtlarda massanyň m, energiýanyň E we impulsyň P arasynda şu aşakdaky ýaly klassiki relýatwistik gatnaşygy ulanylýar:

$$E^2 = m_0^2 c^4 + P^2 c^2 \qquad (6)$$

Bu formula (1) formuladan gelip çykýar. Şonuň üçin (1) formulanyň iki tarapyny hem kwadrata göterýäs:

$$E^2 = m^2 c^4$$

$$ya - da$$

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4}{(1-\beta^2)} = \frac{m_0^2 c^4 - m_0^2 c^4 \beta^2 + m_0^2 c^4 \beta^2}{(1-\beta^2)} =$$

$$= \frac{m_0^2 c^4 (1-\beta^2)}{(1-\beta^2)} + \frac{m_0^2 c^4 \beta^2}{(1-\beta^2)} = m_0^2 c^4 + P^2 c^2$$

Sebäbi,

$$P^2 = m^2\vartheta^2 = \frac{m_0^2 c^2 \beta^2}{(1-\beta^2)}, \beta = \frac{\vartheta}{c}$$

Eksperimental taýdan subut edilişine görä ýadronyň massasy m ony düzýän nuklonlaryň massalarynyň jeminden $(m_p + m_n)$ elmydama kiçidir:

$$m < m_p + m_n$$

Onda massanyň tapawudy:

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m$$

Şu ululyga massanyň defekti diýilýär we oňa degişli energiýa bolsa ýadronyň baglanyşyk energiýasy diýilýär:

$$\Delta E = [(m_p + m_n) - m] \cdot c^2$$

Ýadronyň baglanyşyk energiýasy ýadrony nuklonlara bölmek üçin ýerine ýetirilen işi aňladýar. Islendik ýadro üçin baglanyşyk energiýa şeýle gatnaşygyň üsti bilen hasaplanylýar:

$$\Delta E = [(Zm_p + Nm_n) - m] \cdot c^2$$

Köp ýagdaýlarda, mysal üçin, durnukly ýadrolary deňeşdirmek üçin, udel baglanyşyk energiýasy diýen ε ululyk ulanylýar.Bu ululyk ýadrodaky bir nuklonyň paýyna düşýän orta baglanyşyk energiýasydyr. ε ululygy almak üçin doly baglanyşyk energiýanyň, ýadrodaky nuklonlaryň sanyna bolan gatnaşygyny tapmaly:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta mc^2}{A}$$

Başgaça aýdylanda, bu ululyk ýadrodan bir nuklony çykarmak üçin sarp edilen energiýadyr.

ε bahasy näçe köp bolsa, şonça-da ýadro durnuklydyr. Çylşyrymly sistemanyň massasy we onuň düzümindäki bölejikleriň (nuklonlaryň) massalarynyň jeminiň tapawudyny aňladýan ululyga massanyň defekti diýilýär.

$$\Delta m = \delta = m - A$$

$$ya - da \delta = \frac{\Delta E}{c^2}$$

Massanyň defektiniň massa sana bolan gatnaşygyna upokowik koeffisiýent diýilýär.

$$f = \frac{\delta}{A} = \frac{m - A}{A} = \frac{m}{A} - 1\,.$$

§5. Ýadronyň hususy mehaniki momenti

Ýadronyň spin we magnit momentleri baradaky düşünje spektral çyzyklaryň inçe strukturasyny düşündirmek (esaslandyrmak) üçin girizilýär. Ýokary duýgurly spektrometrleriň üsti bilen spektral çyzyklaryň ýakyn ýerleşen derejelere bölünýändikleriniň üsti açylýar. Bu bölünmä spektral çyzyklaryň multuplet strukturasy diýilýär.Mysal bolup natriýniň (Na) D çyzygynyň tolkun uzynlyklary degişli suratda 5890 A^0 we 5896 A^0 bolan çyzyklara bölünmegi hyzmat edip biler. Optiki çyzyklaryň inçe düzümini düşündirmek üçin Gollandiýaly alymlar S. Gaudsmit we Dt. Ulenbek 1925-nji ýylda elektronyň hereket mukdarynyň hususy momentiniň (spininiň) bardygyny we onuň $s = \frac{1}{2}\hbar$ deňdigini postulat görnüşde kabul edilmegini öňe sürýärler. Kwant mehanikasyna spin hakda düşünje

1927-nji ýylda W.Pauli tarapyndan girizilýär. 1928-nji ýylda bolsa P.Dirak elektronyň spin we magnit momentleriniň bardygyny elektron üçin Diragyň relýatiwistik kwant mehaniki deňlemesinden gelip çykýandyklaryny teoretik esasda anyklaýar.

Ilki bilen spiniň diňe kwant häsiýetlidigini we onuň klassiki mehanikasyna geçilende ($\hbar \to 0$) nola öwrülýändigini aýratyn belläp geçmelidiris. Spin baradaky düşünjäni esaslandyrmak üçin onuň, ýagny bölejigiň öz okunyň töwereginden mehaniki aýlanmasynyň netijesinde ýüze çykýandyr diýip teklip girizdiler. Bu nädogry pikirdir.

Eger olar spiniň proeksiýasy diňe iki baha eýe bolup biler diýip kabul etsek, onda spektral çyzyklaryň inçe strukturasy, elktronlary orbital hereketleriniň netijesinde ýüze çykýan magnit momentleri bilen spiniň üsti bilen döredilýän magnit momentiniň arasyndaky özara täsirleriniň netijesidir diýip düşündirmek bolar.Bu özara täsir spiniň dürli ugurlaryna dürlidir. Şonuň üçin hem spektral termiň iki ýakyn terma dargamasy (bölünmegi) bolup geçýär. Şeýlelikde, san taýdan tejribe bilen sazlaşmak, diňe elektronyň spini $S = \frac{\hbar}{2}$ deň diýip kabul edilse, ýerine ýetirilýär we onuň magnit momenti

$$\mu_\ell = \frac{\ell}{mc} \cdot s = \frac{\ell}{mc} \cdot \frac{\hbar}{2} = \mu_b = 9{,}27 \cdot 10^{-21} \text{ gauss.}$$

Spektral apparatlaryň kämilleşdirilmekleri netijesinde spektral çyzyklaryň aşa kiçi dargmaa duçar bolýandyklarynyň üsti açylýar. Şu ýagdaýy düşündirmek üçin ýadronyň spin we magnit momentleriniň bardygy baradaky gipoteza öňe sürüldi.Ýadronyň magnit momenti bilen elektronlaryň magnit meýdanlarynyň özara täsiri spektral çyzyklaryň goşmaça dargamagyna alyp barýar. Pauliniň girizmegine görä, ýadronyň magnit momenti ýadro magnetonda ölçenilýär.

$$\mu_0 = \frac{\mu_в}{1836} \approx 5{,}05 \cdot 10^{-24} \text{ gauss.}$$

Ýadronyň magnit momentini we spinini kesgitlemek ýadronyň magnit momenti bilen magnit meýdanlaryň özara täsirlerini öwrenmäge esaslanandyr.Bu meseläni kwant mehanikasynyň usullarynyň we atomyň wektor modeliniň üsti bilen çözüp bolar. Şonuň üçin mundan beýläk spin hakda düşünjäni öwrenmek üçin kwant mehanikasynyň käbir ululyklaryny bilmeklik talap edilýär.

Indi ýadronyň spininiň üstünde durup geçeliň. „A“-nuklonlardan düzülen ýadronyň hereket mukdarynyň doly momenti şol nuklonlaryň spin we orbital momentleriniň wektor jemine deňdir. Bu ýagdaý iki ýol bilen alynyp biliner. Birinjiden, hemme nuklonlaryň orbital momentleri umumy orbital görnüşinde, spin momentleri doly spin moment görnüşinde alynýarlar:

$$\vec{L} = \sum_k \vec{l}_k \quad \text{we} \quad \vec{S} = \sum_k \vec{S}_k$$

Ýadronyň doly momenti şu doly momentleriň jemine deňdir:

$$\vec{I} = \vec{L} + \vec{S}.$$

Şunuň ýaly özara baglanşygyň görnüşine „L-S“-baglanyşyk ýa-da rossel-sounder baglanyşyk diýilýär.

Ikinjiden, her nuklon üçin spin we orbital momentleri wektor ýagdaýda jemlenýärler.

$$\vec{j}_k = \vec{l}_k + \vec{S}_k$$

Ýadronyň umumy mehaniki momenti(spini) şu umumy momentiň wektor jemine deňdir.

$$\vec{I} = \sum_k \vec{j}_k$$

Bu baglanyşyga „j-j“-baglanşyk diýilýär. Dürli tejribelerden gelip çykyşy ýaly ýadrolarda „j-j“baglanyşyga köp gabat gelinýär, diňe iň ýeňil ýadrolarda „L-S“ baglanyşyga duş gelmek bolýar. Eger ýadrony düzýän nuklonlaryň doly mehaniki momentlerini bir tarapa ugrukdyrylan bolsadylar, onda ýadronyň spini $\frac{A}{2}$-den az bolmazdy. Mysal üçin, U^{238} ýadro üçin I ululyk takmynan 116 deň bolardy, hakykatda, uran ýadrosynyň spini $\frac{5}{2}$ deň. Diýmek, ýadrony düzýän käbir jübüt nuklonlaryň doly mehaniki momentleri gapma-garşylykly tarapa gönükdirilendirler we şonuň üçin özara kompersirlenýänler (ýok edýärler) .

Aýratyn alynan her bir nuklonyň umumy momenti $\hbar$ birlikde ýarym baha eýedirler. Şol sebäpli nuklonlary jübüt bolan ýadrolaryň ýadro spini $I\ \hbar$ birlikde bitin san bolup, „A“-sany täk ýadrolaryň spinleri şol birlikde ýarym bitin san bilen aňladylýar.

Şu netijeleri eksperiment doly subut edýär.

Ölçegleriň esasynda jübüt-jübüt ýadrolaryň spinleriniň nola deňligi tapyldy.

Durnukly jübüt-täk ýa-da täk-jübüt ýadrolaryň spinleri ýarym bitin baha bolup $\frac{1}{2} - den \frac{9}{2} - a$ çenli baha eýe bolup bilerler. Täk-täk ýadrolaryň spinleri bitin san bolup 1,2,3.... bahalary alýarlar.

§6. Spin we statistika

Iki nuklondan, ýagny protondan we neýtrondan düzülen sistema (deýtron) seredip geçeliň. Bu sistemanyň spini 0 ýa-da 1 deň boljaklygy aýdyňdyr. Belli boluşy ýaly spini *s*-e deň bölejigiň spininiň mümkin boljak proýeksiýalary (2s+1)-e deňdir. Şu ululyga berlen spin ýagdaýynyň multipletniligi diýilýär. $s=0$ bolan ýagdaýynda singilet, $s=\frac{1}{2}$ - düblet we $s=1$-triplet diýilýär. Diýmek, iki nuklonly sistema diňe singlet we triplet ýagdaýlarda bolup biler.

Eger $s=0$ bolsa, onda sistemanyň hereket mukdarynyň momenti nuklonlaryň diňe orbital hereketleriniň netujesidir:

$I = l + S$ eger $s=0$, onda $I = \boldsymbol{l}$

Eger $s=1$ bolsa, onda momentleriň goşulmaklarynyň kanuny esasynda $\boldsymbol{l}$ ululyk üçin şeýle bahalaryň bolmagy mümkin: I *-l*, I , I *+l.* Ýadronyň spini statistika bilen baglydyr. Iki nuklonly sistemanyň tolkun funksiýasy

$$\psi = \psi(\xi_1, \xi_2, t),$$

bu ýerde ξ_1 we ξ_2 -şol bölejikleriň (nuklonlaryň) giňişlikde spin we giňişlik koordinatalaryny öz içine alýar. Şu erkin bölejigiň orunlaryny (ýagdaýlaryny) çalyşdyrmak üçin ýörite operator - çalyşma operatory

$\widehat{P}_{12}$ ulanylýar. Bu operatoryň funksiýasy şu aşakdakydan ybarat:

$$\widehat{P}_{12} \quad \psi(\xi_1,\xi_2,t)=\psi(\xi_2,\xi_1,t)$$

Operatoryň hususy bahalaryny tapmak üçin şu aşkdaky deňlemäni ýazyp bileris:

$$\widehat{P}_{12} \quad \psi=\psi(\xi_1,\xi_2,t)=\lambda\psi(\xi_1,\xi_2,t)$$

Deňlemäniň iki tarapyny ýene bir sapar $\widehat{P}_{12}$operator bilen täsir edeliň:

$$\widehat{P}_{12}\cdot\widehat{P}_{12} \quad \psi(\xi_1,\xi_2,t)=\lambda\psi(\xi_1,\xi_2,t)=\lambda\cdot\lambda\cdot\psi(\xi_1,\xi_2,t)$$

ýa-da

$$\psi(\xi_1,\xi_2,t)=\lambda\psi(\xi_1,\xi_2,t)=\lambda^2\cdot\psi(\xi_1,\xi_2,t); \quad \widehat{P}_{12}{}^2=1.$$

Bu ýerde $\lambda^2=1$. Onda operatoryň hususy bahasy $\lambda=\pm1$.

Diýmek, bölejikleriň orunlary çalşyrylanda bir ýagdaýda takyk funksiýa öz alamatyny ýitirmeýär ($\lambda=\pm1$):

$$\widehat{P}_{12}\psi\ (\xi_1,\xi_2,t)=+\psi\ (\xi_2,\xi_1,t),$$

şeýle funksiýalara simmetrik diýilýär.

Ikinji mümkin boljak ýagdaýda tolkun funksiýasy öz alamatyny üýtgedýär ($\lambda=-1$):

$$\widehat{P}_{12}\ \psi\ (\xi_1,\xi_2,t)=-\psi\ (\xi_2,\xi_1,t)$$

Munuň ýaly funksiýa antisimmetrik funksiýa diýilýär.

Tebigatda şu iki funksiýalara degişli bölejiklere duş gelinýär. Simmetrik funksiýalar bilen beýan edilýän bölejikler Bozeniň-Eýnşteýniň statistikasyna boýun egýärler. Olara bozonlar diýip at berilýär. Fermionlar Feriniň-Diragyň statistikasyna boýun bolup, antisimmetrik funksiýalaryň kömegi bilen aňladylýar.

H operatoryň inwersiýa operasiýasyna görä inwariantlygy sebäpli, P inwersiýa operatory bilen kommutirleşýär, ýagny:

$$\widehat{P}\widehat{H} - \widehat{H}\widehat{P} = 0.$$

Bu ýerden, sistemanyň jübütliginiň hereketiň integralydygy gelip çykýar, ýagny ol wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär.

§7. Ýadronyň magnit momenti

Ýadro mehaniki moment bilen bir hatarda magnit momenti bilen hem kesgitlenilýär. Mysal üçin protonyň we neýtronyň magnit momentleri:

$$\mu_p = +2.79276\mu_0, \qquad \mu_n = -1.913148\mu_0, \qquad \mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_p c}$$ -

ýadro magnetony, ýadrolaryň magnit momentleriniň birligi bolup hyzmat edýär.

Eger spin we orbital momentleri parallel bolsalar, onda magnit moment položitel diýip kabul edilýär. Eger olar biri-birine ters ugra ugrukdyrylan bolsalar, ýagny antiparallelbolsalar, onda magnit momenti otrisatel diýip hasap edilýär. Ýadronyň magnit momenti şu aşakdaky iki usul bilen döreýär:

1.Ýadro girýän protonlaryň we neýtronlaryň spin magnit momentleriniň üsti bilen;

2. Ýadrodaky protonlaryň orbital hereketleri netijesinde.

Elektrik zarýady bolmadyk neýtronyň orbital hereketi netijesinde hiç hili magnit hereketi ýüze çykmaýar.

Zarýadly bölejigiň orbital hereketi aýlanma elektrik toguna ekwiwalentdir, öz gezeginde aýlanma tok bilen bolsa, μ momentli dipolyň meýdanyna ekwiwalent bolup ýüze çykýan magnit meýdanyna baglydyr. Hasaplamalara görä:

$$\mu = \frac{e}{2m_p c} l \qquad \text{ýa-da} \qquad \vec{\mu} = \frac{e}{2m_p c} \vec{l} \ .$$

Şunlukda, ýadronyň mehaniki momenti magnit momentiň döremegine eltiýär.

Nuklonyň spin magnit momenti μ_s bilen onuň spini s arasynda şeýle gatnaşyk bar:

$$\mu_s = g_s s, \qquad (1).$$

bu ýerde g_s - spin giromagnit gatnaşygy.

Edil şonuň ýaly orbital moment üçin:

$$\mu_e = g_e l \qquad (2)$$

ýazyp bileris, bu ýerde g_e- orbital giromagnit köpeldiji. Proton üçin $g_e = 1$, neýtron üçin $g_e = 0$. Protonyň we neýtronyň spinleri $\frac{1}{2}$. Onda (1) –den alarys:

$$g_s^p = +5.5855; \qquad g_s^n = -3.8263 .$$

Özünde Z proton we (A-z) neýtrony saklaýan ýadronyň magnit momentiniň operatory:

$$\widehat{\mu} = g_e^p \sum_{i=1}^{z} \widehat{l_i} + g_s^p \sum_{i=1}^{z} s_i + g_s^n \sum_{i=1}^{a-z} s_i \qquad (3)$$

Şonuň üçin, ýadronyň magnit momenti we hereket mukdarynyň momenti özara çyzykly baglanşyklydyrlar diýip hasap etmek bolýar:

$$\mu_I = g_I I \qquad ,$$

bu ýerde: $$I=\sum_{i=1}^{A} l_i+\sum_{i=1}^{A} s_i$$

we g_I - ýadro giromagnit köpeldiji. Häzirki wagtda ýadro güýçleriniň gutarnykly teoriýasynyň ýoklugy sebäpli, g_I ululygy gös-göni kesgitlemek örän kyn meseleleriň biri bolup durýar. Bellenilip geçilişi ýaly jübüt-jübüt ýadrolaryň magnit momentleri nola deňdir. Bu bolsa meseläni sadalaşdyrmaga ýol açýar. Ýagny täk-jübüt we jübüt –täk ýadrolaryň magnit momentleriniň noldan üýtgeşikligisebäpli, massa sanlary (A) täk bolan ýadrolaryň spinleri we magnit momentleri şol täk protonyň (täk-jübüt ýadro) ýa-da täk neýtronyň (jübüt-täk ýadro) hereketiniň üsti bilen döredilýär diýip esaslandyrylýar. Şeýle ýönekeýleşdirilen „bir nuklonly“ modele Şmidtiň modeli diýilýär (1937ý). Şu modele görä, ýadronyň doly mehaniki we magnit momentleri artykmaç („walentli“) nuklonyň orbital we spin momentleriniň üsti bilen kesgitlenilýändirler diýip kabul edilýär:

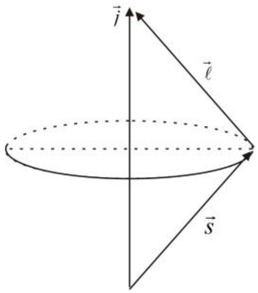
$$\hat{j}=\hat{l}+\vec{s} \qquad \text{we} \qquad \hat{\mu}=g_e\hat{l}+g_s\vec{s}\,.$$

$\vec{l}$ we $\vec{s}$ wektorlaryň umumy $\vec{j}$ wektoryň töwereginde aýlanýandyklary sebäpli (1-nji çyzgy), ýadronyň effektiw magnit momenti:

$$\hat{\vec{\mu}}_{ef}=\hat{\vec{\mu}}_e\cos(\vec{l}\hat{\vec{j}})+\hat{\vec{\mu}}_s\cos(\vec{s}\hat{\vec{j}})$$

Bu formula girýän kosinuslaryň bahalary öň bize belli. Kwant mehanikasyndan belli bolşy ýaly islendik ululygyň orta bahasy:

$$\vec{\mu}=\int_{\tau}\psi*\mu\psi d\tau\,.$$



1-nji çyzgy.

Biziň seredýän meselämiz üçin

$$\bar{\mu} = \int_v \psi^* \hat{\mu}_{ef} \cdot \frac{j}{\sqrt{j(j+1)}} \cdot \psi dv \qquad \text{ýa-da}$$

$$\bar{\mu} = g_l \frac{j(j+1)+l(l+1)-s(s+1)}{2(j+1)} + g_s \frac{j(j+1)+s(s+1)-l(l+1)}{2(j+1)} \qquad (4)$$

Eger walentli nuklon bolup proton hyzmat edýän bolsa, onda $g_l^p = 1$; $g_s^p = +5.585$, onda şeýle hal üçin (4) formula aşakdaky görnüşi alar:

$$\bar{\mu} = \frac{j(j+1)+l(l+1)-s(s+1)+5.585\{j(j+1)+s(s+1)-l(l+1)\}}{2(j+1)}. \qquad (5)$$

Proton üçin $s = \pm\frac{1}{2}$, şol sebäpli orbital kwant san l diňe iki baha eýe bolup biler: $l = j \pm \frac{1}{2}$. Eger $l = j + \frac{1}{2}$ diýip kabul etsek, onda (5) deňlemeden:

$$\bar{\mu} = \frac{j^2 - 1.293j}{j+1}$$

alynýar.

$l = j - \frac{1}{2}$ halda bolsa $\bar{\mu} = j + 2.293$.

Eger walentli nuklon bolup neýtron hasap edilse, onda $g_l^n = 0, \quad g_s^n = -3.826$. Bu hal üçin (5) formuladan magnit momenti:

$$\bar{\mu} = -3{,}826 \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2(j+1)}$$

deň bolar. Mundan:

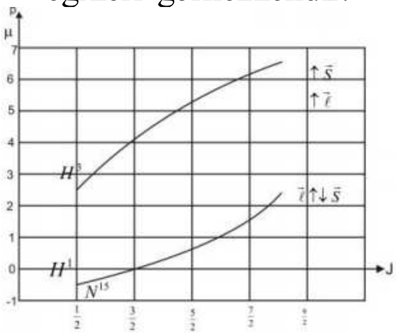
$l = j + \frac{1}{2}$ ýagdaýda $\qquad \bar{\mu} = 1.913 \frac{1}{j+1}$;

we

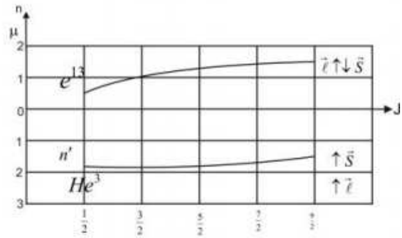
$l = j - \frac{1}{2}$ ýagdaýda bolsa $\bar{\mu} = -1.913$.

Şu alnan özara baglanyşyklar grafik görnüşinde 2-nji we 3-nji çyzgylarda getirilýär.

Grafiklerde ýogyn çyzyklar bilen Şmidtiň egrileri görkezilendir.



2-nji çyzgy

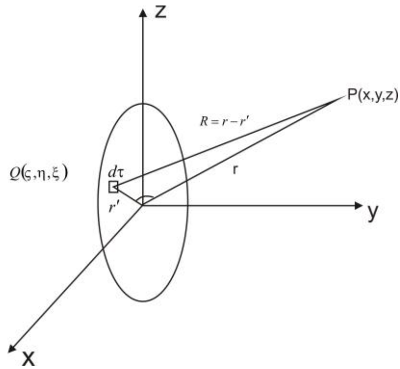


3-nji çyzgy

Eksperimental ýol bilen tapylan magnit momentleriniň aglabasy dogry şol çyzyklaryň üstüne düşmän, olaryň aralygynda ýerleşýärler. Diňe käbir kiçi ýadrolaryň magnit momentleri ol çyzyklaryň ortasyndaky oblastdan daşarda ýerleşýärler.

§8. Ýadronyň elektrik kwadrupol momentti

Magnit momentinden başga-da ýadronyň elektrik momenti hem bardyr. Bu moment ýadrodaky zarýadlaryň asimmetriki ýerleşmeleriniň netijesidir. Ilki bilen klassiki fizikasynyň esasynda şu momente seredip geçeliň. Assimmetrik ýadronyň onuň ölçeginden has uly aralykda döredýän meýdanyna göz aýlalyň. Goý elektrik zarýadyň göwrüm dykyzlygy $\rho(\varsigma,\eta,\xi)$ ς,η,ξ koordinatalara görä üznüksiz funksiýa görnüşinde diýip kabul edilýär (4-nji çyzga seret).



4-nji çyzgy

Koordinatalar sistemasyny şeýle saýlap alalyň, ýagny onuň başlangyjyny ýadronyň inertli merkezinde bolup Z okunyň ugry ýadronyň hereket mukdarynyň momentiniň ugry bilen gabat gelýär diýeliň. Ýadronyň has daşda ýerleşýän P(x,y,z) nokotda döredilýän potensialyny tapalyň „P“ nokadyň radius wektoryny „r“ bilen, a ýadronyň içinde ýerleşen Q nokadyň radius wektoryny „r“ bilen belläliň. Q nokady gurşan, ol τ göwrümde ýygnalan zarýadyň P nokatda döredýän potensialy $d\varphi$ deňdir

$$d\varphi = \frac{\rho(\varsigma,\eta,\xi)}{R}d\tau\,, \quad (1)$$

bu ýerde $$\frac{1}{r} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + r'^2 + 2rr'\cos\alpha}} \quad (2)$$

Şu ululyk Ležandyryň polinomlarynyň döredijili funksiýasyny ýadyňa salýar, ýagny

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r}\left[1 + \left(\frac{r'}{r}\right)^2 - 2\frac{r'}{r}\cos\alpha\right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{r}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{r'}{r}\right)^n P_n(\cos\alpha) \quad (3)$$

Eger mognit momenti ýadronyň ujundäki elktrik togunyň bölüşmesiniň sebäbidigini we ýadronyň başky magnit meýdan bilen özara täsirli kesgitlenýän bolsa, onda elektrik momenti ýadrodaky elktrik zarýadlaryň bölüşmekleriniň (paýlanmaklarynyň) netijesi bolup özara täsirini kesgitleýär. $\frac{r'}{r}$- gatnaşygyň örän kiçiligini göz öňünde tutup, (3) dargamada diňe birinji agzalary hasaba alarys. Onda, P nokatda emele gelýän potensiýal, (1) formulany ähli göwrüm boýunça integirirlemek netijesinde alynar:

$$\varphi = \int\frac{\rho(\xi\eta\zeta)}{r}d\tau + \int\frac{\rho(\xi\eta\zeta)}{r^2}r'P_1(\cos\alpha)d\tau + \int\frac{\rho(\xi\eta\zeta)}{r^3}r'^2P_2(\cos\alpha)d\tau + \ldots.. \quad (4)$$

Eger P nokat Z okuň üstünde ýerleşse, onda (4) aňlatma has-da ýönekeýleşýär. Beýle halda da α burç polýar burça öwrülýär we ony θ edip bellýärler.

Eger $$P_1(\cos\theta) = \cos\theta = \frac{\xi}{r'},$$

$$P_2(\cos\theta) = \frac{1}{2}(3\cos^2\theta - 1) = \frac{1}{2}(3\frac{\xi^2}{r'^2} - 1)$$

diýip göz öňünde tutsak, onda (4) deňlemäni şu aşakdaky görnüşde ýazmak bolar.

$$\varphi = \frac{ze}{r} + \frac{d}{r^2} + \frac{1}{2}\frac{q_0}{r^3} + ...$$

Bu ýerde

$ze = \int \rho d\tau$ - ýadronyň zarýady;

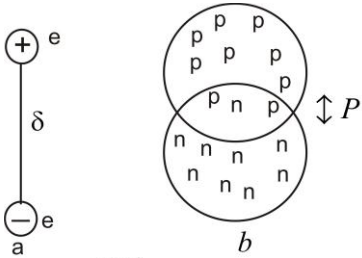
$d = \int \rho\xi d\tau$ -dipol moment;

$q_0 = \int \rho(\xi,\eta,\zeta)(3\zeta^2 - r'^2)d\tau$ -ýadronyň elektrik kwadrupol momenti.

Kwadrupol momenti hakda düşünjni has aýdyň düşindirmek bolar. 5-nji a. çyzgyda şekillendirlen elektrik dipolyň momenti

$$P = e\delta .$$

Eger ýadronyň formasy 5-nji b çyzgyda şekillendirilen görnüşde bolsa, onda ýadronyň dipol momenti $D = \delta ez$ deň bolardy. Hakykatda bolsa $D=0$, bu bolsa ýadronyň dipol momentiniň ýoklygynyň, ýagny zarýadly bölejikleriň – protonlaryň agyrlyk merkezi neýtronlaryň agyrlyk merkezi bilen gabat gelýänliginiň subutnamasydyr. Başgaça aýdanymyzda, ýadronyň içinde protonlar we neýtronlar gutarnykly deňlikde paýlanandyrlar.



çyz 1

5-nji çyzgy

Emma köp ýadrolar elektirik kwadrupol momentleri bilen aňladylýarlar. Bu moment ýadronyň içki zarýadlaryň paýlanmasynyň sferik simmetirýadan ütgemeginiň netijesidir. Eger zarýadlar sferik simmetirýa formada ýerleşen (paýlanan) bolsalar, onda onuň ýaly sistemanyň elektik kwadrupol momenti nola deňdir. Goý ýadronyň formasy elipisoid görnüşde bolsun diýeliň. Onuň Z okunyň ugrundaky ýarymokuny *c* diýip we ol oka perpendikulýar ýarymokuny bolsa *a* diýip alalyň. Elektirik zarýadyň hemişelik dykyzlygyny hasaba alyp, elektirik kwadrupal momentini şu aşakdaky görnüşde alyp bileris:

$$Q_0 = \frac{2}{5} eZ(c^2 - a^2) = \frac{4}{5} \varepsilon \overline{R^2 eZ}\,, \qquad (5)$$

bu ýerde $\varepsilon = \frac{c^2 - a^2}{c^2 - a^2}$, $\overline{R} = \frac{c^2 - a^2}{2}$ - ýadronyň radiusynyň kwadyratynyň orta bahasy.

Eger $c = a + \Delta a$ we $\Delta a << a$ bolsa, onda (5) aňlatma

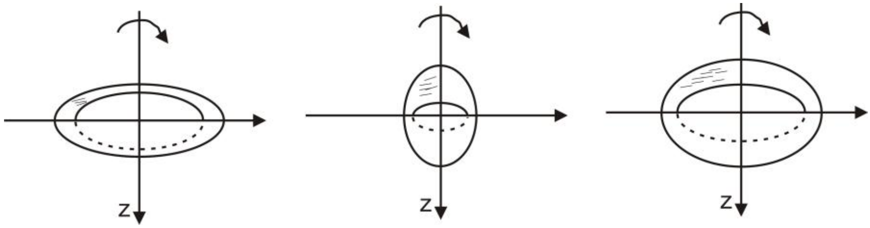
$$Q_0 = \frac{4}{5} eZa^2 \frac{\Delta a}{a}$$

görnüşi alýar.

Eger $c = a$ bolsa, onda $Q_0 = 0$, diýmek, bu ýagdaýda ýadronyň formasy siferik formada bolýar (6-njy ç çyzgy).

Eger $c > a$ bolsa, onda $Q_0 > 0$. Bu ýagdaýda ýadyronyň formasy Z okuň ugruna tarap süýindirilendir(6-njy b çyzgy).

Eger $c < a$ bolsa, onda $Q_0 < 0$. Bu ýagdaýda



6-njy çyzgy

ýadronyň formasy Z oka görä gysylandyr (6-njy a çyzgy). Şeýlelikde, ýadronyň elektirik kwadrupol mommenti onuň formasynyň sferik görnüşden tapawutlylygyny görkezýän ululykdyr. (5) deňlemede Z ululygyň birligi deregine protonyň zarýady kabul edilýär, a meýdanyň birligi deregine $10^{-28}m^2 = 1barn$ birlik alynýar.

§9. Ýadronyň modelleri

Ýadro – örän çylşyrymly kwant sistemadyr. Şonuň üçin onuň hemme häsiýetlerini hiç hili ýönekeý bir modeliň üsti bilen berip bolmaýar. Diýmek, islendik model belli bir çäkde ulanylyp biliner. Häzirki wagytda şu ugurda gutarnykly teoriýa hem ýokdyr, ýagny atom ýadrosynyň hemme häsiýetlerini düşindirýän belli bir teoriýa ýok. Ýadronyň häsiýetlerine we strukturasyna degişli soraglardan ilki bilen şu aşakdaky soraglara jogap gözlenilýär:

1. haýsy ýadrolar durnukly ýa-da durnukly däl;
2. ýadrony häsiýetlendirýän ululyklar (radius, massa, baglanşyk energiýa, sipin, magnit

momenti, jübütlilik, kladrupol elektirik momenti we başgalar) nämä deňdirler?

3. atom ýadrosyndan energetik derejeler nähili paýlanandyrlar?

4. derjeleriň parametrlerine baglylykda oýandyrylan ýagdaýdan aşaky ýagdaýa geçirmekligiň ähtimallygy nämä deňdir?

5. energiýa baglylykda dürli bölejikleriň özara täsirleriniň kese-kesigi nähili ütgeýär?

Şunuň ýaly başga-da käbir soraglar diňe atom ýadrosynyň dürli modelleriniň üsti bilen häzirki wagtda jogap alynylýar we gözlenilýär.Şol modelleriň hataryna ilkinji bolup ýadronyň damja modeli (gidrodinamik modeli) girýär.

Ýadronyň damja modeli. Ilki bilen nähili sebäplere görä ýadrony suwuklygyň damjasy görnüşinde kabul edip bolýandygyny esaslandyralyň. Hemme ýadrolar üçin ýadro jisiminiň dykyzlygy hemişelikdir, bu bolsa onuň gysylmazlygynyň güwäsidir. Edil şonuň ýaly häsiýet suwuklyga-da mahsusdyr. Başgaça aýdylanda suwuklygyň dykyzlygy damjanyň göwrümine bagly däl, edil şonuň ýaly ýadronyň dykyzlygy hem göwrüme bagly däldir. Orta baglanyşyk energiýanyň $\frac{\Delta E}{A}$ hemişelikliginden gelip çykýan ýadro güýjüniň doýan häsiýeti ýokardaky meňzeşligi has hem çuňlaşdyrýar. Sebäbi ýadro güýjüniň şu häsiýetine suwuklygyň molekulalaryny baglaşdyrýan himiki güýçler hem eýedirler.

Üçünji meňzeşlik - ol hem bolsa, damjany özgertmekligiň energiýasy damjadaky malekulalaryň sanyna propersiýonaldyr, ýagny E ~ N. Edil şonuň ýalyda ýadrolar üçin $E \sim A$.

Şu meňzeş häsiýetlerden ugur alyp, Boruň teklibine görä, atom ýadrosyny özboluşly ýadro materiginden duran sferik damja görnüşinde kabul edip boljakdygyna göz ýetirýäris.

Ýadronyň damja modeli islendik ýadro üçin onuň baglanyşyk energiýasy we massasy üçin ýarymempirik formulany almaklykda örän uly peýdaly rol oýnady. Başga-da ol model ,ýadrodan bölejikler goýberilende we onuň bölünmeginde degişli ýadrolaryň durnukly ýagdaýlaryny öňünden aýdyp boljakdykdygyna we şol prosesslerde bölünip çykýan energiýany hasaplamaga ýardam etdi.

Eksperimental netijeler bilen oňat ylalaşykda bolan baglanyşyk energiýa üçin ilkinji aňlatmany Waýnzekker hödürläpdir:

$$-E_{cb} = -a_{\text{об}}A + a_{nob}A^{\frac{2}{3}} + a_{\text{кул}}z^2A^{-\frac{1}{3}} + a_{\text{сим}}\left(\frac{A}{2}-z\right)^2A^{-1} + a_{\text{спар}}A^{-\frac{3}{4}}\delta, \qquad (1)$$

Bu ýerde a—degişli proporsional koeffisiýentleri. Biriji agza massa sana A proporsional bolup, ýadro güçleriniň doýan häsiýeti bilen şertlendirilip ýüze çykýan göwrüm energiýany aňladýar.

Ikinji agza ýadronyň üstüne $4\pi R^2\sigma = a_{nob}A^{\frac{2}{3}}$ proporsional bolan baglanşyk energiýany azaltmaklyga düzediş girizýär.

Üçünji agza protonlaryň elektrostatik itekleşme energiýasyny hasaba alýar. Eger zarýadlar damjada deňölçegli paýlanan bolsalar, onda ol zarýadyň kwadyratyna proporsional bolup durýar:

$$E_{kul} = \frac{3Z^2e^2}{5R} = a_{kul}Z^2A^{-\frac{1}{3}}.$$

Dördünji agza klassiki düşündirişi bolup bilmeýän ýadronyň energiýasy bilen baglydyr. Ol agza ýeňil durnukly ýadrolarda duşýan käbir ýadrolaryň protonlary we neýtronlary deň sana eýe bolmaklyga ymtylýan ýagdaýyny aňladýar.

Bäşinji agza jübit-jübit ýadrolaryň täk-täk ýadrolara garanyňda has durnuklydyklaryny hasaba alýar. Tejirebäniň görkezmegine laýyklykda ol agza $A^{-\frac{3}{4}}$ proporsional bolup, nuklonlaryň jübütlenmek effektini aňladýar. Eksperimental ýol bilen alnan netijeleri hemme taraplaýyn derňäp, amerikaly fizik Grin baglanyşyk energiýasynyň has anyk sazlaşmagy üçin proporsionallyk koeffisiýentleriň şu aşakdaky bahalaryny anyklapdyr:

$$a_{об} = 15{,}75 мэв \qquad \delta = \begin{cases} -1 - jübüt - jübt\_ýadrolar\_üçin \\ 0 - tak\_ýadrolar\_üçin \\ 1 - täk - täkdäl\_yadrolar\_üçin \end{cases}$$

$$a_{nob} = 17{,}8 мэв$$

$$a_{кул} = 0{,}71 мэв$$

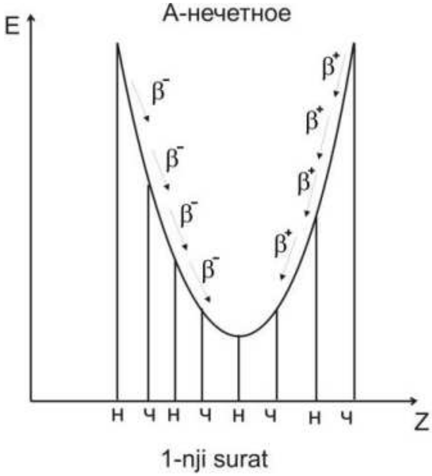
$$a_{сим} = 22 мэв$$

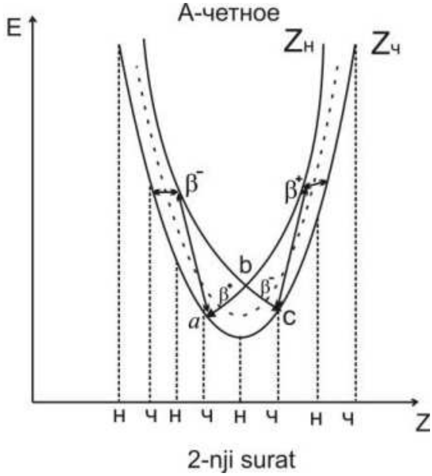
$$a_{спар} = 34 мэв$$

Baglanyşyk energiýa $E_{св}$ belli bolsa, onda islendik ýadronyň massasyny hasaplamaklyk mümkindir.

$$M_{ядро} = ZM_p + (A - Z)M_n - C^{-2}E_{св} \ . \ (2)$$

Eger A massa sany jübit we täk bolan ýadrolaryň energiýasynyň (ýa-da massasynyň) ýadronyň zarýadyna





7-nji çyzgy 8-nji çyzgy

Z baglylykdaky grafigi gurulsa, onda parabola görnüşdäki egriler alynýar.

Täk ýadrolar üçin (1) aňlatmadaky bäşinji agza nola deňdir.Şonuň üçin hemme izobaralar bir parabolanyň üstünde ýerleşýärler. Parabolanyň şahasynda ýerleşýän ýadrolar (7-nji çyzgy) elktron we pozitron dargamanyň netijesinde energiýanyň bahasy az bolan ýagdaýlara geçmeklige ymtylýarlar. Şeýle ýagdaý bolup parabolanyň depesinde ýerleşen b nokat hyzmat edýär. Şu sebäpli massa sanlary täk ýadrolara diňe bir durnukly ýadro degişli bolup durýar. Şeýlelikde şunuň ýaly tebigatda durnukly izobaralara duş gelinmeýär.

Massa sany *A* jübit ýagdaýlar üçin (1) aňlatmanyň soňky agzasy nola deň däldir we *E=E(z)* baglanyşyk iki parabola görnüşde aňladylýar. Punktir bilen görkezilen egri $\delta = 0$ degişlidir.

Jübit-jübit ýadrolaryň durnuklydyklary sebäpli olaryň parabolasy täk-täk ýadrolaryňkydan aşakda geçýär. Täk-täk ýadrolaryň baglanyşyk energiýasy kiçiräk we olar durnuksyzdyrlar. Şonuň üçin olar gysga wagtyň dowamynda β-dargama ýoly bilen jübit-jübit ýadrolara öwrülýärler.

Umuman ýadronyň damja modeli nuklonlaryň kollektiw hereketleri bilen bagly bolan häsiýetlerini düşündirýär. Diýmek, ol model ýadro peaksiýalarynyň teoriýasynda hem giň ulanylyp biliner.

Ýadro bilen damjanyň arasyndaky bir meňzeş häsiýetleri hasaba alyp, olaryň, ýagny ýadro we molekulýar hadysalarynyň biri-birlerinden prinsipial üýtgeşikler bilen tapawutlanýandyklaryny ýatdyň çykarmaly däldir. Ol tapawutlar esasan şulardan ybaratdyr:

birinjiden, mlekulýar özara täsir güýji özüniň fiziki tebigaty boýunça elektromagnit özaratäsir güýçleri ýaly alyp barýar. Şol wagtda ýadro güçleri bolsa ýörite özboluşly güç bolup diňe elektromagnit güýçlerine meňzemeýärler. Başgaça aýdylanda, ýadro güýçlerini diňe elektromagnit güýçleri ýaly özlerini alyp barýarlar diýip esaslandyrmak (düşindirmek) bolmaýar;

ikinjiden, suwuklygyň esasy düzüm bölekleriniň hereketlerini klassiki düşünjeleriň kömegi bilen beýan edip bolýar. Ýadrodaky nuklonlaryň hereketleri bolsa arassa kwant häsiýete eýedirler.

Üçünjiden, „ýadro suwuklygy “ iki „ suwuklygyň“, ýagny „ proton “ we „neýtron“ suwuklyklaryň gyryndylaryndan düzülendir.

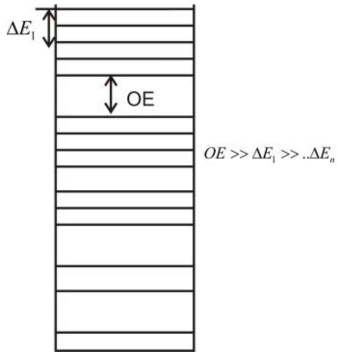
Ýadronyň gabykly modeli. Ýadronyň damja modeli nuklonlaryň kollektiwlilikde bolup geçýän hereketlerine esaslanandyr.

Nukonlaryň ýadrodaky indiwidual (aýrybaşga) hereketlerini we olar bilen baglanyşykly häsiýetlerini ýadronyň gabykly modeliniň üsti bilen esaslandyrýar. Ýadronyň damja modelinden gelip çykyşy we tejribäniň görkezişi ýaly, ýadronyň massasy (we baglanyşyk energiýasy) massa sana A we zarýada Z görä saldymsyz üýtgäp, Z we A ululyklaryň jübütliklerine bagly bolup durýar. Ýokarda bellenilişi ýaly, jübüt-jübüt ýadrolar (z=2i , A-Z=2k) has durnuklydyrlar, täk-täk ýadrolar bolsa (Z=2i+1; A-Z=2k+1) onçakly durnukly däldirler.

Umuman, ýadronyň saklaýan nuklonlarynyň sanlaryna bagly bolan ýadronyň häsiýetleriniň nähili üýtgeýändiklerini aňladýan ýadrolaryň hemme toplumyndan 2,8,20,50,82 we 126/magiki sanlar neýtronlary we protonlary saklaýan ýadrolar aýratyn bölünip alynmalydyrlar. Tejribäniň subut bolmagyna görä, şeýle sanly protonlardan we neýtronlardan düzülen ýadrolar (magiki ýadrolar) has-da durnuklydyrlar. Aşa ýokary durnukly ýadrolara iki sapar magiki ýadrolar diýilýär.Şeýle ýadrolarda $\left({}_{2}^{2}He^{4},{}_{8}^{8}O^{16},{}_{20}^{20}Ca^{40},{}_{82}^{126}Pb^{208}\right)$ protonlaryň we neýtronlaryň sanlary degişli suratda magiki sanlarydyr.

Atom ýadrolarynyň häsiýetleriniň özboluşly periodiki üýtgemekleri atomlaryň häsiýetleriniň periodiki suratda üýtgeýändiklerini ýadyňa salýar. Şonuň üçin atoma meňzedip, atom ýadrolaryň gabykly struktura eýedikleri öňe sürülýär.Atom ýadrolaryň şeýle ýagdaýa degişli modeline gabykly model ýa-da ýadro gabyklarynyň modeli diýip at berilýär.

Ýadronyň gabyk modeliniň talabyna laýyklykda,ýadroda nuklonlar, olaryň özleriniň döredýän öz-özi bilen ylalaşykly meýdanda hereket edýärler. Şeýle meýdanyň potensiýaly çukur formada bolup, nuklonlar onda belli bir energetiki derejä eýe bolýar (9-njy çyzgy). Energiýalary boýunça ýakyn bolan derejeleriň topary ýadro gabygyny emele getirýär. Gabygyň içinde bir derejeden beýleki derejä geçmek üçin gerek bolan energiýadan bir gabykdan beýleki gabyga nuklony geçirmek üçin has uly energiýa zerurdyr.



9-njy çyzgy

Şonuň üçin gabyklary nuklonlardan doly ýadrolar has ýokary durnukly häsiýete eýedirler. Şeýle ýörite durnukly ýadrolara dogrydanam duş gelinýär. Olar magiki ada eýediler. Z we N magiki baha eýe bolan ýadrolaryň stabil izotoplaryna we izotonlaryna, goňşy Z we N ululyklary jübüt bolan ýadrolaryňkydan köp sanda duş gelinýär.

Magiki sanlar N=28 başlap şu aşakdaky görnüşde ýazylyp biliner

$$N_{mag} = \frac{n^3}{3} + n^2 + \frac{8}{3}n + 2 .$$

Nirede n-üçden başlap natural sanlaryň hatary. Magiki ýadrolarda ýapyk gabyklara duş gelinýär. Ýadronyň gabyk modeliniň kömegi bilen ýadronyň esasy ýagdaýlary örän gowy häsiýetlendirilýärler. Umuman ýapyk gabyklaryň bolmaklary üçin :

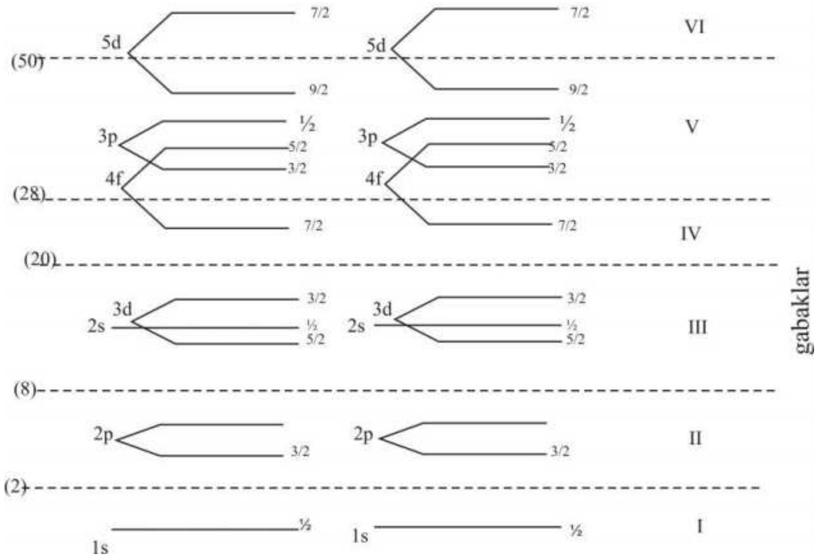
1. nuklonlar Ferminiň – Diragyň statistikasyna boýun egmelidirler;

Eger her bir elektron ýadronyň we galan hemme elektronlaryň meýdanynda ýerleşen bolsa, onda onuň ýaly meýdana öz – özini ylalaşykly meýdan diýilýär.

2. Her bir nuklonyň herketi orbital kwant san „l “ bilen häsiýetlendirilýär.

Şu ikinji şertiň ýerine ýetmekligi üçin, ýadrony nuklonyň erkin ylgamasynyň uzynlygy ýadronyň çägi bilen deňeşdirilen ýagdaýda bolmalydyr. Şol hatarda nuklonyň erkin ylgamasynyň uzynlygy has uly bolmagy-da ähtimaldyr.Şeýle ýagdaýda, nuklonlaryň hereketleriniň ýagdaýlarynyň üýtgemekliklerine getirýän urgulara nuklonlar duçar bolmaýarlar. Sebäbi şeýle urgularyň netijesinde bir nuklon beýlekä öz energiýasynyň bölegini berip energiýasy kiçi ýagdaýa geçmeli bolýar. Bu bolsa mümkin däl. Netijede nuklonyň erkin ylgamasynyň orta uzynlygy örän köp ulalýar. Ýadronyň şeýle modeli birnuklonly diýen ada eýedir. 10-njy çyzgyda dürli potensial çukurlara degişli energetiki derejeleriň orny görkezilendir we olarda protonlaryň we neýtronlaryň ýerleşişiniň shemasynda getirilendir.

M.Geppertiň-Maýeriň görkezmegine laýyklykda L kwant sanyň noldan üýtgeşik derejeleri güýçli spin-orbital baglanşygyň netijesinde iki derejä bölünýärler. Olaryň birine doly hereket mukdarynyň $j = l + \frac{1}{2}$ bahasy degişli bolsa, beýlekisine $j = l - \frac{1}{2}$ degişlidir.



10-njy çyzgy

Birinji gabyk diňe bir derejäni $s_{1/2}$ saklaýar. Şu gabyk 2 proton we 2 neýtron bilen doldurylýar. Şu gabyga girýän 2 protonyň spinleri, Pauliniň prinsipine görä gapmagarşydyrlar. Edil şonuň ýaly 2 neýtronyň spinleri hem antiparalleldirler. Şeýle ýadronyň ($_2He^4$) spini nola deňdir. Dogurdanda $_2He^4$ ýadronyň spini nola deňdir. 2 protondan we 1 neýtrondan duran ýadro $_2He^3$ ýa-da 2 neýtrondan we 1 protondan duran ýadro ($_1He^3$) ½ spine eýe bolmalydyr. Sebäbi jübüti düzýän bölejikleriň spinleri antiparallel bolmalydyrlar. Şu netijeler tejribe arkaly subut edilýärler.

Indiki ýadro, spin-orbital özara täsiriň astynda bölünen 2 P derejäni dolandyrmaklygyň netijesinde emele gelýär. Şu iki derejäniň nuklonlaryndan doldurylmaklarynda täze ýapyk gabyk emele gelýär. $2P_{\frac{1}{2}}$ aşaky dereje astynda bolsa 4 nuklon ýerleşdirilip biliner. Şu gabyklary nuklonlardan doldurylyp litiýniň ýadrosy emele getirilýär. Bu ýadro 3 protony saklaýar. Litiýniň durnukly ýeke-täk izotopy bolup ${}_3Li^7$ hyzmat edýär. Şu ýadrony düzýän 7 nuklanlaryň 4-si (2 proton we 2 neýtron) birinji gabygy doldurýarlar, 2-nji gabyga bolsa 1 proton 2 neýtron düşýär. Bir nuklonly modeli ulanyp, ýadronyň hereket mukdarynyň umumy momentiniň ${}_3Li^7$ ýadronyň düzümine girýän 3-nji protonyň hereket mukdarynyň momentine deň bolmaklygyna göz ýetirýäris. Şu proton, haýsy derejäniň birini bolmaklygyna baglylykda $2P_{1/2}$ ýa-da $2P_{3/2}$ ýagdaýlarda ýerleşip biler. Ilki bilen $1s_{1/2}$ derejä ýakyn dereje doldurylýar. ${}_3Li^7$ ýadronyň spini 3/2; bu bolsa ${}_3Li^7$ ýadro girýän 3-nji protonyň $2P_{3/2}$ ýagdaýda ýerleşýändigini aňladýar. Diýmek, $2P_{3/2}$ dereje $2P_{1/2}$ derejeden aşakda ýerleşýär. Protonly we neýtronly gabyklar biri-birine baglanyşyksyzlykda doldurylýar.

2-nji tablisada derejeleriň we gabyklaryň nuklonlar bilen doldurylyşy görkezilýär.

2-nji tablisa

t/b	Energiýanyň derejesi	Güýçli spin orbital baglanyşyk üçin termler	Derejedäki bölejikleriň sany	Gabykdaky bölejikleriň sany	Ýadrodaky doldurylan gabyklardaky bölekjikleriň sany
1	1s	$1s_{1/2}$	2	2	2
2	1p	$\begin{cases}1p_{3/2}\\1p_{1/2}\end{cases}$	4 2	6	8
3	1d 2s	$\begin{cases}1d_{5/2}\\1d_{3/2}\\2s_{1/2}\end{cases}$	6 4 2	12	20
4	1s 2p 1g	$\begin{cases}1s_{7/2}\\1s_{5/2}\end{cases}$ $\begin{cases}2p_{3/2}\\2p_{1/2}\end{cases}$ $1g_{1/2}$	8 6 4 2 10	8 22	28 50

Aşakdaky sebäplere görä bu modeli fiziki taýdan esaslandyryp bolmaýar:

1. Atomlaryňky ýaly ýadrolaryň stabilizirleşdirýän merkezi ýokdur.
2. Nuklonlaryň arasynda güýçli özara täsir bardyr, şonuň üçin olary özara täsir etmeýän bölejikler hökmünde seredip bolmaýar.

3. Ýadronyň içinde nuklonyň erkin ylgamasynyň uzynlygy orbitanyň uzynlygyndan has kiçidir ($\lambda << 2\pi r$) .

Ýadronyň başgada birnäçe modelleri bardyr:
- jemlenen (umumylaşdyrylan) modeli;
- alfa-bölejik modeli;
- Fermi-gaz modeli;
- Ýadronyň optiki modeli we başgalar.

§10. Deýtronyň elementar nazaryýeti

Deýtron-ýönekeý ýadro sistemasydyr. Ol agyr wodorodyň (${}_1H^2 \equiv {}_1D^2$)ýadrosy bolup, 2 nuklondan: protondan we neýtrondan durýar. Z=1 zarýatdan we A=2 massa sanly bu iki nuklonly sistema ýadro teoriýasynda aýratyn we özbaşdak meseleleriň biri bolup durýar, sebäbi onda ýadro güýçleri agdyklyk ediji derejede ýüze çykýarlar. Şol bir wagtda ony derňemeklik hem örän aňsatdyr. Başgaça aýdylanda, deýtronyň häsiýetini öwrenip, 2 nuklonyň nähili özara täsir edýändiklerini anyklamak mümkin, bu bolsa köp nuklonlardan durýan çylşyrymly ýadrolary seretmeklik üçin wajyp soraglaryň özboluşly esasydyr.

Deýtronyň teoriýasyny beýan etmeklige geçmezden öňürti protonyň we neýtronyň häsiýetleriniň aňladýan esasy ululyklary ýada salalyň we olaryň özara täsirleriniň käbir taraplaryny kesgitleýän faktlaryň üstünde gysgaça durup geçeliň.

Protony, neýtrony, şeýle-de deýtrony häsiýetlendirýän maglumatlar 3-nji tablisada getirilýär.

3-nji tablisa

Nuklon	Massa m.a.b.	Spin	Zar-ýad	Magnit momenti	Elektrik kwadrupol momenti
Proton	1.0079	½	+1	+2,7927 μ_0	-
Neýtron	1,0084	½	0	-1,9131 μ_0	-
Deýtron	2,0147	1	+1	+0,8774 μ_0	2,73· $10^{-27} m^2$

Neýtron bilen wodorodyň $\left({}_1H^1\right)$ massalarynyň tapawudy 0,782 Mew energiýa deňdir, bu bolsa erkin neýtronyň β-dargama görä durnuksyzlygyny aňladýar. Dogurdanam, derňemeleriň görkezmeklerine görä erkin neýtron β-dargama sezewar bolýar. Onuň ýarym dargamasynyň periody (12,8 $\pm$ 2,5) min.

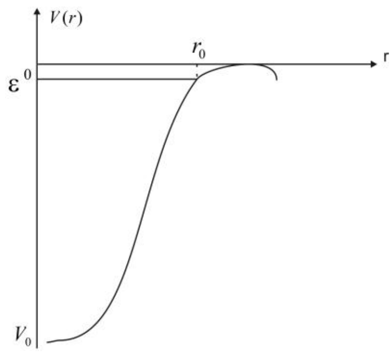
Elektirik kwadrupol momentiniň uly bolmadyk bahasy deýtronyň sferik simmetirýadan tapawutlylygynyň kiçidigini aňladýar. Şonuň üçin birinji ýakynlaşmada deýtronyň esasy ýagdaýy bolup s—ýagdaý hyzmat edýär diýip kabul edip bolar. Onda deýtronyň spininiň bire deňdigini protonyň we neýtronyň spinleriniň goşulmaklarynyň üsti bilen düşündirmek bolar. Dimek, deýtronyň magnit momentine hem protonyň we neýtronyň magnit momentleriniň goşulmaklarynyň netijesi ýaly seretmeklik gelip çykýar. Emma bu çaklama ýerine ýetmeýär, sebäbi hakykatdan-da, protonyň we neýtronyň magnit momentleriniň jemi deýtronyň magnit momentinden (0,857354 μ_0) 0,02z3 μ_0 ululyga barabar uludyr. Şu ululyk ýalňyşlygnyň predelinden has daşdadyr. Soňky ýagdaý we elektirik kwadrupol momentiň barlygy deýtronyň esasy ýagdaýynyň diňe arassa s—ýagdaýdan durmaýandygyna güwä bolup durýar.

Deýtronyň esasy ýagdaýy jübütlikleri birmeňzeş bolan ýagdaýlaryň garyndysyndan düzülip biliner. Mysal üçin, ol s—we d—ýagdaýlaryň superpozisiýasyndan bolup biler.

Elektrik kwadrupol momentiniň barlygy we deýtrondaky protonyň we neýtronyň magnit momentleriniň additiw dälligi ýene-de ýadro güçleriniň merkezi dälliklerini gökezýär, ýagny nuklonlary birleşdirýän çyzyk bilen spiniň arasyndaky burça-da ýadro güýçleriniň baglydyklary gelip çykýar. Olara **tenzor** güýçleri diýilýär.

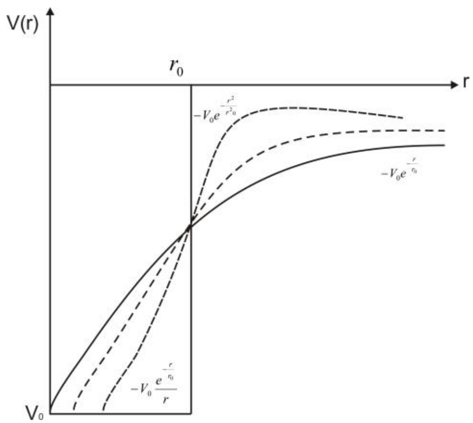
Biz, meseläni sadalşdyrmak üçin ýadro güýçleriniň tenzor ýagdaýlaryny hasaba aljak däldiris we deýtronyň esasy yagdaýy diňe s—ýagdaý diýip hasap etjekdiris. Deýtronyň spininiň bire deňligi diňe protonyň we neýtronyň spinleriniň „parallel“ ýagdaýlarynda proton-neýtron sistemanyň durnukly bolup biljekdiginiň subutnamasydyr. Başgaça aýdylanda, sistema triplet ýagdaýda durnuklydyr. Şol bir wagtda singlet ýagdaýda, ýagny protonyň we neýtronyň spinleriniň „antiparallel“

ýagdaýlarynda durnukly proton-neýtron sistema duş gelinmeýär.Bu bolsa, ýadro güýçleriniň protonyň we neýtronyň spinleriniň oriýentirlenişlerine düýpli baglydyr diýen netijä gelmeklige esas bolup durýar. Gynansak-da häzirki döwürde ýadro güýçleriniň aralyga nähili baglydyklarynyň takyk kanuny ýokdur. Şonuň üçin, nuklonlaryň özara täsirini potensial energiýasy shematik görnüşde 11-nji çyzgyda getirilen potensial çukur formada görkezilip biliner.



11-nji çyzgy.

Görnüşi ýaly, $r = r_0$ bolanda potensial energiýa birden azalýar, bu bolsa r_0 aralykdan başlap proton bilen neýtronyň özara çekişmeleriniň artmagyna alyp barýar. r_0 ululyk ýadro güýçleriniň „täsir radiusyny“ aňladýar. Ýadro güýçleriniň gysga täsir häsiýetine laýyklykda r> r_0 hemme oblastynda deýtronyň tolkun funksiýasy potensial çukuruň formasyna praktiki taýdan bagly däldir. Bu bolsa öz gezeginde, deýtronyň häsiýetleri şol bir meňzeş üstinlik bilen aşakda getirilen potensial funksiýalaryň üsti bilen suratlandyrylyp bilinjekdiklerine alyp barýar (12-nji çyzgy).



12-nji çyzgy

$V(2)=\begin{cases}-V_0, r \le r_0 \\ 0, r > r_0\end{cases}$ - „göniburçly“ görnüşli potensial çukur. Potensiallaryň başga görnüşleri hem bar:

$V(2)=-V_0 e^{\frac{-r}{r_0}}$ - eksponensial potensiýaly,

$V(2)=-V_0 e^{\frac{-r^2}{r_0^2}}$ - Gaussyň potensiýaly,

$V(2)=-V_0 \dfrac{e^{\frac{-r}{r_0}}}{r}$ - Ýukawanyň mezon potensiýaly,

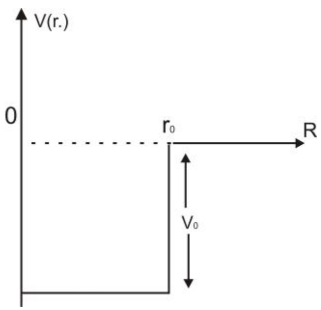
$V(2)=-V_0 \dfrac{e^{\frac{-r}{r_0}}}{1-e^{\frac{-r}{r_0}}}$ - Hýulteniň potensiýaly.

Görnüşi ýaly, r-iň uly bahalarynda Hýulteniň potensiýaly ekspotensiýal bilen gabat gelýär, r-iň kiçi bahalarynda ($\frac{r}{r_0}$<<1) bolsa ol özüni mezon potensialy ýaly alyp barýar.

Indi deýtron baradaky meseläni kwant mehanikasynyň esasynda seretmeklige geçeliň.

Meseläni sadalaşdyrmak maksady bilen protonyň we neýtronyň arasyndaky güýç diňe olaryň arasyndaky uzynlyga bagly diýip hasap edeliň, ýagny $V = V(r)$

Başgaça bellenilende, $V(r)$ ululygyň formulasyny ini r_0 we çuňlugy V_0 potensiýal çukura meňzedip alarys (13-nji çyzgy).



$$V(r) = \begin{cases} -V_0, r > r_0 \\ 0, r > r_0 \end{cases} \qquad (1)$$

13-nji çyzgy.

Şunuň ýaly iki nuklonly sistemanyň, ýagny deýtronyň energetiki ýagdaýlary Şrýodingeriň aşakdaky deňlemesinden alynýar:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + V(r)\psi = E\Psi \qquad (2)$$

Nirede $m = \dfrac{M_p M_n}{M_p + M_n}$ - getirilen massa bolup, praktiki taýdan protonyň massasy neýtronyňkydan tapawutlanmaýar diýip hasap edilende nuklonyň ýarym massasyna deňdir, ýagny:

$$m = \frac{M}{2}, \text{ haçanda } M_p \approx M_n = M.$$

Onda **(2)** deňleme şeýle görnüşe gelýär:

$$\frac{\hbar^2}{M}\Delta\psi + V(r)\psi = E\psi; \quad (3)$$

Şu deňlemäniň çözülişini aşakdaky görnüşde gözleýäris:

$$\psi(r) = \frac{U(r)}{r} \quad (4)$$

(4)-i (3) deňlemä goýup alarys:

$$U'' + \frac{M}{\hbar^2}[E - V(r)]U(r) = 0 \quad (5)$$

(1) potensial üçin aňlatmany hasaba alyp we

$$\left.\begin{aligned} k^2 &= \frac{M}{\hbar^2}(V_0 - W), \\ \zeta^2 &= \frac{M}{\hbar^2}W, \\ k_0^{\ 2} &= k^2 + \zeta^2 = \frac{M}{\hbar^2}\nu_0. \end{aligned}\right\} . \quad (6)$$

belgilemeleri girizip, (5)-i U_1 we U_2 funksiýalar üçin aşakdaky iki deňlemäni alarys.

$$U_1'' + k^2 U_1 = 0,$$

$$U_2'' - \chi^2 U_2 = 0.$$

Bu deňlemeleriň çözüwleri degişlilikde:

$$\begin{aligned} U_1 &= A\sin kr, \\ U_2 &= Be^{-\chi r}. \end{aligned} \qquad (7)$$

Tolkun funksiýanyň üznüksiz bolmak talabyna laýyklykda, (7) çözüwler $r = r_0$ nokatda biri-biri bilen “tikilmelidir”, ýagny olar aşakdaky üznüksiz (gyra) şerte boýun bolmalydyr.

$$\left.\begin{aligned} U_1\big|_{r=r_0} &= U_2\big|_{r=r_0}, \\ U_1'\big|_{r=r_0} &= U_2'\big|_{r=r_0} \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Eger şu iki şertiň gatnaşygyny alsak, ýagny;

$$\left.\frac{U_1'}{U_1}\right|_{r=r_0} = \left.\frac{U_2'}{U_2}\right|_{r=r_0}, \quad (9).$$

onda A we B hemişelikler kesgitlenip bilinerler. (9) şertiň esasynda (7) çözüwlerden alarys:

$$\frac{Ak\cos kr_0}{A\sin kr_0} = \frac{-B\chi e^{-\chi r_0}}{Be^{-\chi r_0}};$$

ýa-da $$kctqkr_0 = -\chi, \qquad (10).$$

(10)-y aşakdaky görnüşde ýazalyň

$$ctgkr_0 = -\frac{\chi}{k} = -\sqrt{\frac{E}{V_0 - E}} \approx -\sqrt{\frac{E}{V_0}}, \quad (11)$$

sebäbi deýtronyň baglanyuşyk energiýasy üçin E energiýa V_0-dan has kiçidir. (11)-den görnüşi ýaly $ctgkr_0$ ululygy kiçi we otrisatel sana deňlemeli. Bu kr_0-yň

π-den azajyk uludygyny aňlarýar. Şeýlelikde $kr_0 \approx \frac{\pi}{2}$, ýagny

$$\sqrt{M(V_0 - E)}r_0 \approx \frac{\pi\hbar}{2}.$$

Ýene-de bir sapar V_0 –yň E-den absolýut bahasy boýunça has uludygyny hasab alyp,

$$V_0 r_0^2 \approx \frac{\pi^2\hbar^2}{4M}$$

Bu ýerden görnüşi ýaly p-n durnukly sistemanyň emele gelmekliginiň mümkinçiligi r_0 we V_0 ululyklara aýratynlykda bagly bolman, hemişelik ululyk bolan, olaryň köpeltmek hasylyna baglydyr. Potensial çukur giň we ýalpak ýa-da çuň we insiz bolup biler.

§11. Radioaktiw hadysanyň käbir soraglary

Belli bolşy ýaly 1895 ýylda nemes fizigi Rentgen „x şöhläni” açýar. Şu şöhläniň tebigatyny öwrenmek maksady bilen amala aşyrylan eksperimental işleriň netijesinde, fransuz alymy A. Bekkerel 1896 ýylda uran garyndysynyň (duzunyň) jisimlerden geçiş ukyby bolan şöhläni üznüksiz ýagdaýda goýberýändigini açýar. Ol şöhle fotoplastinka täsir edýär we howany ionizleýär. Şu häsiýetleri boýunça ol şöhle rentgen şöhlesine meňzeşdir. Emma ol iki şöhläniň arasynda düýpli tapawut bardyr. Ýagny rentgen şöhlesiniň ýüze çykmagy üçin haýsy hem bolsa bir energiýa (elektrik togy) zerurdyr, emma Bekkereliň açan şöhlesi üçin hiç hili energiýa zerur däldir. Soňky geçirilen işleriň netijesinde uranyň şeýle şöhläni goýbermeklik häsiýeti daşky şertlere we wagta bagly däldigi belli boldy. Şeýle effekt uran atomynyň ýadrosynyń içki häsiýetleri bilen düşündirilýär. Ýadrolaryň şöhleleri goýbermeklik ukyplaryna Pýer we Mariýa Kýuri radioaktiw, ol hadysanyň özüne bolsa radioaktiwlilik diýip atlandyrypdyrlar.

Soňra olar toriý elementiniň radioaktiwliligini subut edýärler.

Elektrik we magnit meýdanlarynda geçirilen eksperimental işleriň netijesinde radioaktiw şöhleleriniň α-, β- we γ- komponentlerden durýandyklary aýan boldy.

α-şöhlesi – geliý atomynyň ($_2He^4$) ýadrosy bolup, 10^7m/s tizlik bilen hereket edýär, ol howany ionizirlemek ukybyna we jisimden kiçi geçiş häsiýete eýedir.

β-şöhlesi – otrisatel zarýadly elektronlaryň akymy bolup, ýagtylygyň tizligine ýakyn tizlik bilen hereket edýär, ol uly geçiş ukybyna we kiçi ionizirlemek häsiýete eýedir.

γ-şöhlesi – gysga elektromagnit tolkunlary bolup, has uly geçişe ukyply we has az ionizirlemek häsiýetlere eýedir.

Ýadro dargamalarynyň görnüşleri. Radioaktiw hadysasy diýip, haýsy hem bolsa bir elementiň durnukly däl izotopynyň käbir bölejikleri goýberip başga elementiň durnukly ýa-da durnukly däl izotopyna öwrülmegine aýdylýar.

Ilki bilen ol bölejiklere α-, β- we γ- şöhleleri diýilipdir

4-nji tablisa

Radioaktiw-ligiň görnüşi	Z-iň üýtgemegi	A-nyň üýtgemegi	Prosesler	Prosesleriň häsiýeti
Alfa-dargama	Z-2	A-4	$_ZX^A \rightarrow _{Z-2}Y^{A-4} + _2He^4$	Iki protonyň we iki neýtronyň ulgamynyň - α -bölejigiň goýberilmegi
Beta-dargama	Z±1	A		Ýadroda protonyň ($_1P^1$) we neýtronyň ($_0n^1$) özara öwrülmegi
β- darga ma	Z+1	A	$_0n^1 \rightarrow _1P^1 + _{--1}e^0 + _0\nu^0$	Neýtron elektrony we antineýtrinony wirtual goýberip neýtrona öwrülýär
β^+ - dargama	Z-1	A	$_1P^1 \rightarrow _0n^1 + _{-+1}e^0 + _0\nu^0$	Proton pozitrony we neýtrinony wirtual goýberip protona öwrülýär
Proton-dar-gama	Z-1	A-1	$_ZX^A \rightarrow _{Z-1}Y^{A-1} + _1p^1$	Ýadrodan protonyň uçup çykmagy
Iki proton dargama	Z-2	A-2	$_ZX^A \rightarrow _{Z-2}Y^{A-2} + _12p^1$	Ýadrodan iki protonly ulgamyň goýberilmegi
Neý-tron-dargama	Z	A-1	$_ZX^A \rightarrow _ZY^{A-1} + _0n^1$	Ýadrodan neýtronyň uçup çykmagy

Elektron – eýeleme (e^- ýa-da K – eýeleme)	Z-1	A	${}_{1}P^{1}+{}_{-1}e^{0}\rightarrow {}_{0}n^{1}+{}_{0}\nu^{0}$	Proton elektrony eýeläp neýtrona we antineýtrino öwrülýär
Spontan bölünme				Massasy we zarýady takmynan deň iki bölege ýadronyň bölünmegi

Diýmek, α- dargama - ýadronyň α- bölejigini, β- dargama - β- bölejigini we γ- dargama bolsa γ- bölejigini goýberip dargamasyna aýdylýar.

Soňky wagtda dargamalaryň başga görnüşleri hem açyldylar. Ýokardaky we soňky dargamalar barada käbir maglumatlar aşakdaky 4-nji tablisada getirilýär.

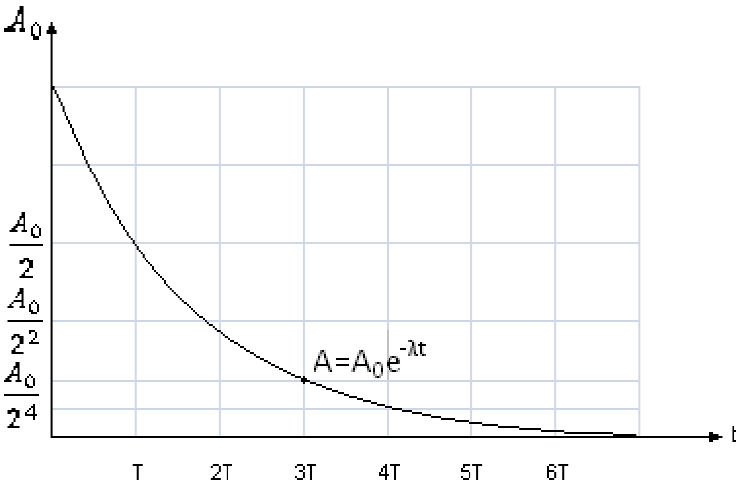
Adaty ýagdaýda radioaktiwliligiň ähli görnüşlerinde gamma – şöhlelenme bolup geçýär.

Ilkinji radioaktiw atomlaryň sanlary (N_0) T wagtyň dowamynda iki esse azalýarlar, şonuň üçin oňa ýarymdargamanyň periody diýilýär.

Şol bir izotop üçin T elmydama belli bir baha eýedir. Häzirki wagtda α – dargama duçar bolýan jisimleriň ýarymdargama periodlarynyň $3\cdot10^{-7}$sekuntdan (${}_{84}Po^{212}$) $5\cdot10^{15}$ýyla (${}_{60}No^{144}$) çenli bolup bilýändikleri bellidir. Umuman dargamany aňladýan egri çyzyk suratdaky ýalydyr.

Çyzgydan görnüşi ýaly, dargamany gidisini aňladýan egriniň eksponensial kanuny boýunça bolup geçýändigi gelip çykýar:

$$N=N_0e^{-\lambda t} \qquad (1)$$



14-nji çyzgy

Şu kanun Rezerford we Soddi tarapyndan hödürlenendir we oňa radioaktiw dargama üçin Kýuriniň kanuny diýilýär. Bu ýerde λ – radioaktiw dargamanyň hemişeligi bolup, radioaktiw jisimleriň dargamak tizligini görkezýär.

Radioaktiw öwrülmeler özbaşdak bolup geçýärler. Radioaktiw dargama – atom ýadrosynyň hususy häsiýetidir we ol diňe onuň içki ýagdaýlaryna baglydyr. Atom ýadrosynyň ýagdaýyny üýtgetmän, radioaktiw dargama prosesiniň geçişine täsir edip bolmaýar. Şonuň üçin belli bir kesgitli energetik ýagdaýda ýerleşen atom ýadrosy üçin birlik wagtdaky radioaktiw dargamanyň ähtimallygy λ hemişelik ululykdyr.

Eger λ ululyk belli bolsa, onda radioaktiw ýadronyň islendik “ýaşamaklygynyň ortaça dowamlylygyny” hasaplap bolýar. N ýadrolaryň t we t+dt aralykdaky goýberýän bölejikleriň sany λNdt deňdir. Şu bölejikleriň ýaşamaklarynyň wagtynyň umumy jemi tλNdt. Onda başlangyç ýagdaýda, ýagny t=0 wagtdaky hemme N_0 ýadrolaryň ýaşamaklarynyň umumy dowamlylygy:

$$\int_0^{\infty} t\lambda ndt.$$

Şonuň üçin radioaktiw ýadronyń ýaşamaklygynyň orta dowamlylygy τ deňdir.

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} t\lambda Ndt \qquad (2)$$

(1) formuladan N bahasyny (2) deňlemä goýup we bölekleýin integrirläp alarys:

$$r = \frac{1}{\lambda} \qquad (3)$$

Onda (1) formula şu görnüşe geçýär.

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Köplenç radioaktiw dargama ýadronyň ýarym dargama periody bilen häsýetlendirilýär, ýagny T wagtda ýadronyň mukdary iki esse azalýar:

$$\frac{1}{2} = \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda T}$$

ýa-da $ln1 - ln2 = -\lambda T lne$,

ýöne $ln1 = 0$ we $lne = 1$,

onda $\lambda = \frac{ln2}{T} = \frac{0.693}{T}$,

şu ýerden $T = \frac{0.693}{\lambda}$.

(1)-nji formulany aşakdaky ýaly ýazyp bolýar.

$$dN = -\lambda Ndt$$

ýa-da $\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N = -\frac{0.693}{T} \cdot N$ (3`)

Şu formula tejribe arkaly T-ni kesgitlemek üçin amatlydyr.

Meselem, 1 g Ra 1 sekuntda ~$3.7 \cdot 10^{10}$ dargama sezewar bolýar. Onuň ýarymdargamasynyň periody (3`)-den tapylýar:

$$T = \frac{0.69}{\frac{dN}{dt}} \cdot \frac{N_A}{A} = \frac{0.69 \cdot 6.023 \cdot 10^{23}}{3.7 \cdot 10^{10} \cdot 226} \approx 5 \cdot 10^{10} sek \approx 1600 ýyl.$$

§12. Yzygyderli öwrülmeleriň nazaryýeti

Biz şu wagta çenli bir ýadronyň (A) ikinji (B) ýadro öwrülmesine seretdik. Hakykatdan-da tebigatda haýsy hem bolsa A jisim (ýadro) radioaktiw dargama netijesinda B jisime (ýadro) öwrülýär. Soňky öz gezeginde C ýardo öwrülýär we ş.m. Ýagny biz dargamanyň bütin bir zynjyryny alýarys:

A→B→C→D→...

Şu jisimleriň ýadrolarynyň sanyny degişlilikde $N_1, N_2, N_3, N_4, \dots$ diýip belleýäris. Olaryň dargamalarynyň hemişeliklerini bolsa $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots$ diýip hasap edýäris.

Başlangyç (ilkinji) A ýadronyň t=0 wagtdaky sanyny $N_1(0)$ diýip belleýäris. Onda A→B öwrülmesi üçin alarys.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \qquad (4)$$

Şu taýdan integrirläp integrirlap taparys:

$$N_1 = N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \qquad (5)$$

Eger zynjyr iki halkadan ybarat bolsa, ýagny A→B→C,

onda ol iki differensial deňlemeleriniň sistemasynyň üsti bilen aňladylýar:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

(5) formulany ulanyp (6) sistemanyň ikinji deňlemesini şu aşakdaky görnüşe getirip bileris:

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \qquad (7)$$

Şu birinji tertipli çyzykly bir jynsly däl deňlemäniň hususy çözüzilişini şu görnüşde gözleýäris:

$$N_2 = N_1(0)\left(c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}\right) \qquad (8)$$

Nirede c_1 we c_2 - hemişelik ululyklary. Şu ululyklaryń bahasyny tapmak üçin N_2 ululygyň bahasyny (8) formuladan (7) formula goýup alarys:

$$c_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Onda (8) formula şeýle görnüşde bolar:

$$N_2 = N_1(0)\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}\right)$$

Şu taýdan, t=0 wagtda $N_2(0) = 0$ deňligi sebäpli tapýarys:

$$c_2 = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Onda (8) çözüliş gutarnykly görnüşe geçýär:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) \qquad (9)$$

Eger zynjyr üç halkadan, ýagny A→B→C→D ybarat bolsa, onda (6) sistema üçünji deňleme, ýagny

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \qquad (10)$$

goşulýar.

(9) formulany (10) goýup alarys:

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) \qquad (11)$$

Şu deňlemäniň çözülişi:

$$N_3 = N_1(0)\left(c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + c_3 e^{-\lambda_3 t}\right)$$

Edil ýokardaky özgertmeleriň netijesinde tapýarys:

$$c_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}; \qquad c_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)};$$

$$c_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)};$$

Eger hatar „n” halkadan düzülen bolsa, onda

$$N_n = N_1(0)\left(c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + \ldots + c_n e^{-\lambda_n t}\right)$$

bu ýerde

$$c_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\ldots(\lambda_n - \lambda_1)}$$

$$c_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_n}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)\ldots(\lambda_n - \lambda_2)}$$

....

Indi, alnan netijeleri derňäliň. Goý hatar diňe iki halkadan düzülipdir diýip hasap edeliň. Onda şu aşakdaky üç ýagdaýyň bolmagy ähtimaldyr.

Birinji hadysa. $T_1 < T_2(\lambda_1 > \lambda_2)$

Onda köp wagtyň geçmegi netijesinde şeýle şert emele gelýär:

$$e^{-\lambda_2 t} \gg e^{-\lambda_1 t},$$

we (9)-njy formula aşakdaky görnüşde ýazylyp bilner

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_2 t}$$

Diýmek, A we B jisimleriň garyndysy B jisimiň ýarym dargama periody bilen azalýar.

Ikinji hadysa. $T_1 > T_2 (\lambda_1 < \lambda_2)$

Onda köp wagtan soň.

$$e^{-\lambda_2 t} \ll e^{-\lambda_1 t}$$

şert emele gelýär we (9) formula aşakdaky görnüşde ýazylyp bilner

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

Bu bolsa B jisimiň aktiwliginiň A jisimiň ýarym dargama periodynyň üsti bilen kiçelýändigini aňladýar. Emma olaryň mukdarlarynyň gatnaşygy

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

hemişelik ululyk bolup saklanýar. Şeýle ýagdaýa geçiş (dinamiki) deňagramlylyk diýilýär.

Üçünji hadysa. $T_1 \gg T_2 (\lambda_1 \ll \lambda_2)$

(9) formulany şeýle göçüreliň.

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_2 t} \left(e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right)$$

ýa-da $$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0) e^{-\lambda_2 t} \left(e^{\lambda_2 t} - 1 \right)$$

ýa-da $$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0) \left(1 - e^{-\lambda_2 t} \right).$$

t wagtyň degişli uly bahasynda $e^{-\lambda_2 t} \ll 1$ şert emele gelýär we ýokardaky aňlatma aşakdaky görnüşe gelýär

$\boxed{\dfrac{N_2}{N_1}=\dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}=\dfrac{T_2}{T_1}}$ - *radioaktiw deňagramlygyň şerti* diýilýär.

Şu deňlige *asyrly* ýa-da *sekulýar deňagramlylyk* diýilýär.

Radioaktiw maşgalalar. Käbir radioaktiw jisim dargap, täze jisimi berýär, bu öz gezeginde radioaktiw häsiýete eýe bolup biler. Mysal üçin, urandan radiý, radiýden bolsa radon we başgalar emele gelýärler. Alymlar şol yzygiderligiň arasyndaky baglanyşygy dikeldipdirler. Şol dargamada emele gelýän elementleriň (ýa-da ýadrolaryň) toplumyna *radioaktiw maşgala* diýilýär. Häzirki döwürde olaryň dördüsi belli we olar baradaky maglumatlar 5-nji tablisada getirilýär.

Tablisada n – gabat gelýän natural san (n≥51 bolmaklygy düşnüklidir).

5-nji tablisa

Massa sanyň strukturasy	Maşgalanyň ady	Jyns başlangyjy ýa-da başky nuklid	Iň soňky stabil ýadro ýa-da soňky nuklid	Öwrülmeleriň sany	T (ýyl)
A=4n	Toriý	${}_{90}Th^{232}$	${}_{82}Pb^{208}$	12	$1.4\cdot10^{10}$
A=4n+1	Neptuniý	${}_{93}Np^{237}$	${}_{83}Bi^{209}$	13	$2.2\cdot10^{6}$
A=4n+3	Uran-radiý	${}_{92}U^{238}$	${}_{82}Pb^{206}$	18	$4.5\cdot10^{9}$
A=4n+4	Uran-aktiniý	${}_{92}U^{235}$	${}_{82}Pl^{209}$	16	$7\cdot10^{8}$

Şu maşgalalary barlamagyň we öwrenmegiň esasynda birnäçe düzgün dikeldildi. Olaryň arasynda iň esasy bolup hasap edilýäni, Faýans we Soddi tarapyndan açylan «süýşme düzgüni» hasaplanylýar we ol şeýle aňladylýar:

α – dargama netijesinde emele gelen täze ýadro başdaka görä Mendeleýewiň ulgamynda iki öýjük çepe , β-dargamanyň netijesinde bolsa täze ýadro 1 öýjük saga ýa-da çepe süýşýär.

Radioaktiw hadysasynyň açylmagy, diňe fizikanyň däl, umuman ylmyň we tehnikanyň ösmeginde ägirt uly rol oýnady. Ol özüniň ähmiýetini saklap gelýär.

Her bir radioaktiw hatary (maşgala), Z zarýady we A massa sany ýokary bahaly agzalary saklaýar, ýöne olaryň ýaşaýyş wagty diýseň kiçidir. Z>92 elementleriň ählisine *transuran elementleri* diýilýär. Soňky döwürde Z>100 elementlere *transfermiý* diýip at berilip başlanyldy. Transuran elementleri emeli usul arkaly sintezirlenilýärler (alynýarlar) we olaryň yzygiderli öwrenilmekleri XX-nji asyryň 40-njy ýyllarynda başlandy. Şu oblastda ilki başda ýeke-täk kanunberiji bolup, Siborg we Giepco alymlaryň ýolbaşçylygyndaky alymlar öňe çykdylar. Şu işe – 50-nji ýyllaryň aýagynda – Flýorowyň ýolbaşçylygyndaky laboratoriýa (ÝBBI, Dubna şäh.) hem girişýär. Z=93-98 transuran elementleri, ýadro reaktoryndan alynan neýtronlaryň akymy bilen täsir edilen urandan alynýar. Bir ýa-da birnäçe neýtronlar ýadro «ýelmeşýärler». Soňra olaryň artygy β - dargama ýoly bilen ýok edilýär. Mysal üçin, amerisiý aşakdaky öwrülme zynjyrynda alynypdyr:

$$n+{}_{94}Pu^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{240} + \gamma, \qquad n+{}_{94}Pu^{240} \rightarrow {}_{94}Pu^{241} + \gamma,$$

$${}_{94}Pu^{241} \rightarrow {}_{25}Am^{241} + {}_{-1}e + \upsilon_e$$

Z=100-e ,enli transuran elementleriň durnuksyzdyklarynyň esasy sebäbi α-dargama bolup durýar. Ýöne transfermiý elementleri üçin ýerlikli bolup spontan bölünme öňe çykýar.

§13. Alfa – dargamanyň nazaryýeti

Mikrobölejigiň potensial päsgelçilikden (barýerden) geçiş ukyby, ýagny tunnel effekt hadysasy, atom ýadrosynyň teoriýasynda hem giňden ulanyldy. Belli bolşy ýaly, radioaktiw ýadrolaryň spontan öwrülmekleriniň esasyny α-dargama düzýär. Onuň dowamynda ýadro α-bölejigini ýitirýär we netijede zarýady iki birlik kiçi bolan ýadro öwrülýär.

Alfa-dargama, bölejigiň potensial päsgelçilikden geçmeklik teoriýasy babatynda, Şrýodingeriň kwant mehanikasynyň klassik meseleleriniň biri bolup durýar.

Bu hadysa eksperimental taýdan barlanylyp, onuň ýadronyň diňe içki häsiýetidigi anyklanyýlar.

Şonuň üçin dt wagtyň dowamynda dargaýan dN ýadrolaryň sany şol wagta we t wagtdaky N ýadrolaryň sanyna proporsional diýip ýazyp bileris:

$$dN = -\lambda N dt \qquad (1)$$

Bu deňlemäni integrirläp radioaktiw dargama üçin Kýuriniň kanunyny alýarys:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (2).$$

Kýuriniň kanuny ilkinji sapar arassa empiriki ýol bilen alyndy.

Alfa-dargamany nazary tarapdan düşündirmeklik diňe kwant mehanikasy döränden soň mümkin boldy.

Alfa-dargama netijesinde dörän täze (ikinji) ýadro bilen alfa-bölejikden düzülen sistema seredip geçeliň.

Alfa-bölejigiň *(zaryady $2e_o$)* we ikinji ýadronyň *(zarýady $(z\text{-}2)e_0$)* özara Kulon itekleýiş güýji esasynda ýüze çykýan potensial energiýa deňdir:

$$V = \frac{2(Z-2)e_0^2}{r}, \qquad (3)$$

Mundan başga-da, ol sistema tertibi *($10^{-15} \div 10^{-14}$)* m bolan örän kiçi aralykda *($r \leq R$)* täsir edýän çekiş ýadro güýjýne degişli potensial energiýany hem saklaýar. Şonuň üçin potensial energiýany takmynan ýakynlaşdyrylan görnüşde alyp bolar, ýagny radioaktiw ýadronyň meýdanyndaky *alfa* bölejigiň potensial energiýasynyň shemasy şeýle şekillendirilýär:

$$V = \frac{2(Z-2)e_0^2}{r}, \quad \text{haçanda } r>R \qquad \textbf{(4)}$$

$$V = 0, \quad \text{haçanda } r<R$$

Kwant mehanikasy nukdaý nazaryndan seredilende, *alfa* dargama bölejikleriň potensial päsgelçilikden geçmeklik hadysasyny aňladýar. Bu hadysanyň teoriýasy 1928-nji ýylda döredildi (Gamow, Kondon, Gerni).

Nazaryýeti gurmak üçin ilki bilen radioaktiw dargamanyň hemişeligini **λ** potensial päsgelçiligiň durulyk koeffisiýenti bilen baglanyşdyrmalydyrys:

$$\mathcal{D} = e^{-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2M}\int_R^{R_1}\sqrt{V-E}dr}, \qquad (5)$$

Bu ýerde **M**-*alfa* bölejigiň massasy, ***R*** we ***R*₁** bolsa potensial päsgelçiligiň başlan we gutaran nokatlary.

Belli bolşy ýaly durulyk koeffisienti bölejigiň birinji urgynyň netijesinde päsgelçilige geçmekligini aňladýar. Şonuň üçin dargama kanunyny şeýle *görnüşde ýazyp bileris:*

$dN = -\lambda Ndt =$ **$dN= -\lambda Ndt=-n\mathcal{D}\, Ndt$,** ***(6)***

Bu ýerde n – 1 sekuntdaky urgylaryň sany.

Şu ululygy aşakdaky ýönekeý pikirlenmäniň netijesinde tapyp bileris.

Goý, *alfa* bölejik radiusy R bolan potensial çukuryň içinde hereket edýär diýeliň. Onda, $n = \frac{V_0}{R}$ – boljagy aýdyňdyr, bu ýerde V_0– ýadronyň içinde (**r** < ***R***) *alfa* bölejigiň tizligi. Soňky iki ululygy özara baglaşdyrmak bolar. Dogrudanam, kesgitsizlik gatnaşygynyň netijesinde bölejigiň impulsy MV_0 we onuň çäklenen (lokalizlenen) oblasty ***R*** biri-biri bilen $MV_0R \approx \hbar$ gatnaşyk bilen baglydyrlar. Şonuň üçin

$$n \cong \frac{\hbar}{MR^2} \qquad (7)$$

Ýokarda getirilen bellikleri göz öňünde tutup, radioaktiw dargamanyň hemişeligi $\boldsymbol{\lambda}$ we päsgelçiligiň durulyk koeffisienti D aşakdaky formulanyň üsti bilen baglanyşyklydyklaryna gelýäris:

$$\lambda = \frac{\hbar}{MR^2} e^{-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2M}\int_R^R \sqrt{V-E}dr} \qquad (8)$$

Şu deňlemäniň iki tarapyny hem logarifmläp, alarys.

$$\ln\lambda = \ln\frac{\hbar}{MR^2} - \frac{2}{\hbar}\sqrt{2M}\,I \qquad (9)$$

bu ýerde integral

$$I = \int_{R}^{R_1}\sqrt{V-E}\,dr \quad , \qquad (10).$$

R (ýadronyň radiusy) we R_1 dolanmak nokatlarynyň aralygynda alynmalydyr. Soňky radius doly energiýanyň potensial energiýa (biziň mysalymyzda Kulonyň energiýasyna) deň bolmaklyk şertinden tapylyp bilner:

$$\frac{2(Z-2)}{R_1}e_0^2 = E \qquad (11)$$

(4) we (11) deňlikleri deňeşdirip, alýarys:

$$\mathbf{V}=\frac{\mathbf{ER_1}}{\mathbf{r}}$$

Şu ululygy (10) integralda goyup, alarys:

$$I = \sqrt{E}\int_{R}^{R_1}\sqrt{\frac{R_1}{r}-1}\,dr \ , \qquad (12)$$

Täze uýtgeýän ululygy girizýäris

$$r=R_1x^2$$

Şeýlelikde **(12)** integralyň ýerine alýarys

$$\boldsymbol{I = 2R_1\sqrt{E}\int_{\sqrt{\frac{R}{R_1}}}^{1}\sqrt{1-x^2}\,dx \ ,(13)}$$

Täze üýtgeýän ululyk girizýäris

$$x=\sin\varphi \ \text{ we } \ \sin\varphi_0=\sqrt{\frac{R}{R_1}}$$

Onda (13) integralyň ýerine alýarys:

$$I = 2R_1\sqrt{E}\int_{\varphi_0}^{\frac{\Pi}{2}} cos^2\varphi\, d\varphi$$

Bu integraly aňsatlyk bilen çözüp bileris:

$$I = \frac{R_1\sqrt{E}}{2}(\Pi - 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0). \quad (14)$$

Mundan beýläk umuman $\frac{R}{R_1} \ll 1$ şert hasaba alynýar. Onda (14) aňlatmada çalyşyp bileris: $\varphi_0 \sim \sin\varphi_0 = \sqrt{\frac{R}{R_1}}$

Şeýlelikde, $I = R_1\sqrt{E}\left\{\frac{\Pi}{2} - 2\sqrt{\frac{R}{R_1}}\right\}$ **, (15).**

(11) gatnaşygyň kömegi bilen $\mathbf{R_1}$ ululygy ýok edip we

$$B = \ln\frac{\hbar}{MR^2} + \frac{8e_0}{\hbar}\sqrt{MR(Z-2)}$$

$$A = \frac{2\Pi(Z-2)e_0^2}{\hbar}\sqrt{2M}$$

bellikleri girizip, α -dargamanyň hemişeligi üçin ahyrky netijede alarys:

$$\ln\lambda = B - \frac{A}{\sqrt{E}} \quad (16)$$

Belli bolușy ýaly

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

onda (16) aşakdaky görnüşe geçýär:

$$\ln T = \frac{a}{\sqrt{E}} - b, \quad (17)$$

bu ýerde

$$b = B\lg e - \lg 0{,}693;$$

$$a = A\lg e.$$

Bu gatnaşyk ýarym dargamanyň periody bilen uçup çykýan *alfa*-bölejikleriň energiýasyny özara baglanyşdyrýar. (17) gatnaşyk kwant mehanikasy döremezden öň arassa ýarymempirik ýol bilen alnan Geýgeriň-Nettolyň kanunynyň häzirki zaman kesgitlemesidir.

Geýgeriň-Nettolyň kanunyndan görnüşi ýaly, ýadrodan uçup çykýan *alfa* bölejigiň energiýasy näçe uly bolsa ýarymdargamanyň periody şonça kiçidir.

§14. Betta-dargamanyň nazaryýeti

Haýsy hem bolsa bir ýadronyň durnukly däl izotopynyň, β-bölejigini goýberip beýleki bir ýadronyň durnukly (ýa-da durnuksyz) izotopyna öwrülmegine $\beta -$ dargama diýilýär.

Şeýle dargamada ýadronyň zarýady $\Delta Z = \pm 1$ ululyga üýtgeýär, massa bolsa üýtgemän galýar. Şu prosesiň ahyrky netijesi ýadroda protonyň neýtrona we tersine, neýyronyň protona öwrülmesidir. Beta-dargama içki ýadro däl-de içki nuklon prosesi diýip bolar. Onda diýmek, $\alpha -$ dargama garanda, $\beta -$ dargamada jisimiň has uludan üýtgemekligi bolup geçýär. Şol sebäpli, onuň nazarýeti has çylşyrymly we $\alpha -$ dargamanyň nazarýetine görä ýeterlikli däl derejede işlenilip dikeldilendir.

β-dargamanyň üç görnüşi bar:

1. Elektronly β^--dargama - ýadro elektrony goýberýär, şonuň üçin zarýad sany bir ululyga köpelýär.

$$\begin{matrix} 2n \\ 1p \end{matrix} \xrightarrow{e^-} \begin{matrix} 1n \\ 2p \end{matrix}, \qquad n \longrightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$$

2. Pozitronly β^+- dargama - ýadro pozitrony goýberýär we şol sebäpli onuň zarýad sany bir ululyga kiçelýär.

$$\begin{matrix} 6p \\ 5n \end{matrix} \xrightarrow{e^+} \begin{matrix} 5p \\ 6n \end{matrix}, \qquad p \longrightarrow n + e^+ + \nu$$

3. Elektron eýeleme (“e” eýeleme) - elektron gabyklaryň birinden ýadro bir elektrony siňdirýär we netijede onuň zarýad sany bir ululyga kiçelýär.

$$\begin{matrix} 4p \\ 3n \end{matrix} \xrightarrow{e^-} \begin{matrix} 3p \\ 4n \end{matrix}, \qquad p + e^- \longrightarrow n + \nu$$

Adaty halda elektron atomyň k-gatlagyndan siňdirilýär, sebäbi şol gatlak ýadro ýakyn ýerleşýär. Şeýle ýagdaýda “e”-eýelemä k-eýeleme hem diýilýär.

Şu ýerde ilki bilen, elektronly we pozitronly dargamalarda seredilýän esasy kanunalaýyklygy getireliň. $\alpha-$dargamada kesgitli energiýaly bölejikler goýberilýär (oňa laýyklykda çyzykly, $\alpha-$spektri ýüze çykýar), β-dargamada bolsa tutuş spektr görünýär, ýagny β-bölejikleriň energiýasy 0-dan başlap E_0 ýokarky araçäge çenli ähli mümkin bolan bahalary alýar.

Beta-dargama hadysada $\gamma-$şöhlesi goýberilýär, oňa çyzykly spektr degişli. Mundan başga, atomyň elektron gabygyndan içki konwersiýanyň elektronlary zyňylýarlar, olar hem energiýanyň çyzykly spektrine eýedirler. Içki konwensiýanyň elektronlarynyň diskret spektrini, ýadrodan çykýan β-bölejigiň spektriniň üstüne goýup, β-dargama hem çyzykly spektr bilen häsiýetlendirilýär diýip hasap edip boljaga meňzeýär. Ýöne aýratyn bellemeli zat, ol hem ýadronyň goýberen elektronlary we pozitronlary elmydama energiýanyň tutuş spektrine eýedirler. Şu tutuş spektri düşündirmekde käbir kynçylyklar ýüze çykypdyr. Olary aradan aýyrmak üçin, 1931-nji ýylda Pauliniň çaklamasyna laýyklykda, β-dargama prosesinde β-bölejigi bilen bir hatarda zarýadsyz, spini $\frac{1}{2}$-e deň bölejik uçup çykýar.

Fermi oňa neýtrino diýip at beripdir. Onda β-şöhlelenmäniň tutuş spektriniň barlygyny, dargamanyň E_0 doly energiýasynyň dürli usul bilen elektronyň we neýtrinonyň arasynda paýlanylmagy bilen esaslandyrylýar.

Beta- dargamanyň teoriýasy 1934-nji ýylda italiýaly fizik E.Fermi tarapyndan kwant elektrodinamikasyna meňzetmekligiň netijesinde döredildi. Belli boluşy ýaly, elektromagnit meýdanyň kwantlary atomyň olary goýberiş pursatynda emele gelýärler. Edil şonuň ýaly, Ferminiň çaklamasyna laýyklykda, β-dargamada goýberilýän elektron we neýtrino ýadrodan uçup çykyş pursatlarynda döreýärler. Şol manyda, β-dargamanyň teoriýasy, ýagny kwantlary elektron we neýtrino bolup hyzmat edýän elektron-neýtrino meýdanynyň teoriýasy, ýadro güýçleriniň mezon teoriýasyna meňzeşdir. β-dargamada ýeňil bölejikleriň çeşmeleri bolup nuklonlar hyzmat edýär.

Kwant mehanikasyndan belli boluşy ýaly, birlik wagtda sistemanyň bir ýagdaýdan başga ýagdaýa geçmekliginiň ähtimallygy:

$$\omega dE = \frac{2\pi}{\hbar}\left|\mathrm{H}_{ki}^{/}\right|^{2}\rho(E) \qquad (1)$$

$$\mathrm{H}_{ki}^{/} = \int \psi_k^{*}\mathrm{H}^{/}\psi_i d\tau \qquad (2)$$

$\mathrm{H}^{/}$- (tolgunma operatory) operatoryň matrisaly elementleri; $\varphi_k we \varphi_i$- sistemanyň başky we ahyrky ýagdaýlaryna degişli funksiýalar;

$\rho(E) = \frac{dn}{dt}$ -ahyrky ýadrolaryň dykyzlygy; *dn* bolsa *E* we *E+dE* aralykda ýerleşýän energiýalara degişli bolan ahyrky ýadrolaryň sany. (1) gatnaşyk β-dargama seredileninde ulanylyp biliner. Beýle ýagdaýda ol ýadronyň 1 sekuntda dargamaklygynyň ähtimallygyny kesgitleýär. Ilki bilen $\rho(E)$ ululygy kesgitläliň. Ýeňil bölejikleriň alyp gidýän E_0 energiýasyny β-bölejigiň E_β energiýasy bilen neýtrino (antineýtrino) bölejigiň E_ν energiýasynyň jemi görnüşinde kabul edilýär:

$$\mathrm{E}_\beta + \mathrm{E}_\nu = \mathrm{E}_0 \qquad (3)$$

Bu ýerde E_0 -hemişelik ululyk, şonuň üçin:

$$d\mathrm{E}_\beta = -d\mathrm{E}_\nu$$

Goý,

$$dE_{\beta} = -dE_{\nu} \equiv dE$$

Eger β-bölejiginiň energiýasy $E_{\beta}, E_{\beta} + dE_{\beta}$ interwala düşýän bolsa, onda onuň impulsy: P_{β} , $P_{\beta} + dP_{\beta}$ aralykda ýerleşendir. Onda β-bölejikleriň impulslarynyň giňişliginde onuň impulsynyň wektorynyň gutaran ýeri, göwrümi $4\pi P_{\beta}^{2} \cdot dP_{\beta}$ bolan şar görnüşli gatlaga düşýär.

Şeýle ýagdaýda gözlenilýän ýagdaýlaryň sany

$$dn_{\beta} = \frac{4\pi P_{\beta}^{2} dP_{\beta}}{(2\pi\hbar)^{3}} V \qquad (4)$$

Şuna meňzeşlikde ýazyp bileris:

$$dn_{\nu} = \frac{4\pi P_{\nu}^{2} dP_{\nu}}{(2\pi\hbar)^{3}} V \qquad (5)$$

dn ululygy tapmak üçin dn_{β} ululygy dn_{ν} ululyga köpeltmek ýeterlikdir:

$$dn = dn_{\beta} \cdot dn_{\nu}$$

ýa-da

$$dn = \frac{16\pi^{2} V^{2} P_{\beta}^{2} dP_{\beta} \cdot P_{\nu}^{2} \cdot dP_{\nu}}{(2\pi\hbar)^{6}} \qquad (6).$$

Diýmek,

$$\rho(E) = \frac{16\pi^{2} \cdot V^{2} \cdot P_{\beta}^{2} \cdot dP_{\beta} \cdot P_{\nu}^{2} \cdot dP_{\nu}}{(2\pi\hbar)^{6} \cdot dE} \qquad (7)$$

Eger E_{β} we E_{ν} ululyklar bölejikleriň dynçlyk massalaryna degişli energiýany özüne girizýän bolsalar, onda:

$$\frac{E_\beta^2}{c^2} - P_\beta^2 = m_o^2 c^2$$

$$\frac{E_\gamma^2}{c^2} - P_\nu^2 = m_\nu c^2 \qquad (8)$$

we
$$E_\beta dE_\beta = c^2 P_\beta dP_\beta ,$$
$$E_\nu dE_\nu = c^2 \cdot P_\nu \cdot dP_\nu$$

Indi,
$$\left|dE_\beta\right| = \left|dE_\nu\right| \equiv dE$$

şerti hasaba alyp $\rho(E)$ ululygy aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\rho(E) = \frac{16\pi^2 \nu^2 P_\beta P_\nu E_\beta E_\nu dE}{(2\pi\hbar)^6 c^4} \qquad (9).$$

Bu aňlatmany (1) formula goýup alarys:

$$\omega dE = \frac{V^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^4} \left|H_{ki}^{/}\right|^2 P_\beta P_\nu E_\beta E_\nu dE \qquad (10).$$

(8) gatnaşyklary hasaba alyp ýazyp bileris:

$$\omega dE = \frac{\nu^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^4} \left|H_{ki}^{/}\right| E_\beta E_\nu \left(\frac{E_\beta^2}{c^2} - m_0^2 c^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_\nu^2}{c^2} - m_\nu^2 c^2\right)^{\frac{1}{2}} dE \qquad (11).$$

Tejribede gös-göni E_ν ululygy ölçäp bolmazlygy sebäpli (11) formuladan iň soňky agzany, ýagny neýtronyň energiýasyny ýok edýärler. (11) formulada $E_\nu = E_0 - E_\beta$ çalyşarys. Ondan başga-da *E*-niň ýanyndaky β indeksi goýberip, (11) formulany şeýle ýazyp bileris:

$$\omega dE = \frac{V^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^4} \left|H_{ki}^{/}\right|^2 E(E_0 - E) \left(\frac{E^2}{c^2} - m_0^2 c^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{(E_0 - E)^2}{c^2} - m_\nu^2 c^2\right)^{\frac{1}{2}} dE$$

(12)

Neýtrinonyň dynçlyk massasy örän kiçi bolany üçin ol nola deň diýip kabul edilýär. Diýmek, neýtrinonyň dynçlyk massasyny saklaýan agzany goýberip bileris. Bu bolsa $\omega d\text{E}$ üçin aşakdaky aňlatma getiriýär:

$$\omega d\text{E} = \frac{V^2}{2\pi^3\hbar^7 c^5}\left|\text{H}_{ki}^{/}\right|^2 \text{E}\left(\frac{\text{E}^2}{c^2} - m_0^2 c^2\right)^{\frac{1}{2}}(\text{E}_0 - \text{E})^2 d\text{E}$$

(13).

$\varepsilon = \dfrac{\text{E}}{m_0 c^2}; \varepsilon_0 = \dfrac{\text{E}_0}{m_0 c^2}$ belgileme girizip, alarys:

$$\omega(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{V^2 m_0^5 c^4}{2\pi^3\hbar^7}\left|\text{H}_{ki}^{/}\right|^2 \varepsilon(\varepsilon^2 - 1)^{\frac{1}{2}}(\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 d\varepsilon$$

(14).

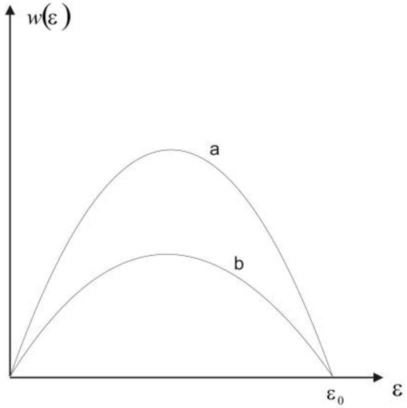
Soňky aňlatma, goýberilýän β-bölejikleriň energiýalary boýunça paýlanma funksiýasydyr. Eger matrisaly element energiýa bagly däl diýip hasap edilse, onda (14) aňlatmany şeýle görnüşde ýazyp bolar:

$$\omega(\varepsilon) = c^2\varepsilon(\varepsilon^2 - 1)^{\frac{1}{2}}(\varepsilon_0 - \varepsilon)^2$$

(15).

Bu ýerde c - hemişelik ululyk bolup, matrisaly elementiň modulynyň kwadratyny we onuň öňünde ýerleşen hemişelik köpeldijileri saklaýar. 15-nji çyzgyda (15)-nji formula boýunça hasaplanan $\omega(\varepsilon)$ ululygyň ε ululyga bagly bolan *a* egrisi görkezilendir. Şeýlede, neýtrinonyň dynçlyk massasy elektronyň massasyna deň diýip hasap edip, *b* egri görkezilendir.

Soňky egri aşakdaky deňleme bilen häsiýetlendirilýär:



15-nji çyzgy

$$\omega(\varepsilon) = c^2\varepsilon(\varepsilon_0 - \varepsilon)(\varepsilon^2 - 1)^{\frac{1}{2}}\left[(\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (16)$$

(16) aňlatma (12) aňlatmadan $m_\nu = m_0$ bolanda alynýar.

Çyzgydan görnüşi ýaly, *a* we *b* egrileriň ε_0 nokadyň ýakynynda özlerini alyp baryşlary üýtgeşik: $\varepsilon = \varepsilon_0$ nokatda *b* egrä geçirilen galtaşma ε oka perpendikulýar, şol bir wagtda *a* egrä geçirilen galtaşýma ε ok bilen gabat gelýär. Bu ýagdaý neýtrinonyň massasyny bahalandyrmak üçin ulanyp biliner.

β-bölejikleriň spektrini barlamakda magnit tok fokusirowkaly spektrografyň ulanylýanlygy üçin tejribe berlenleri nazaryýet bilen deňeşdirmeklige, paýlanma funksiýany ε energiýa baglylykda däl-de, impulsyň funksiýasy ýaly almak amatly. Goý, $m_\nu = 0$, bolsa, onda

(7)-de $d\mathrm{P}_\nu$ ululygy $\frac{d\mathrm{E}}{c}$ çalyşyp bolar. Onda ahyrky ýagdaýyň ρ dykyzlygy aşakdaky görnüşi alýar:

$$\rho = \frac{16\pi V^2 \mathrm{P}_\beta^2 \mathrm{P}_\nu^2 d\mathrm{P}_\beta}{(2\pi\hbar)^6 c} \qquad (17).$$

Elektronyň impulsynyň P_β we $\mathrm{P}_\beta + d\mathrm{P}_\beta$ interwala düşmek şertinde, wagt birliginde ýadronyň dargamasynyň $\mathrm{P}(\mathrm{P}_\beta)d\mathrm{P}_\beta$ ähtimallygy, aşakdaky ýaly berilip biliner:

$$\mathrm{P}(\mathrm{P}_\beta)d\mathrm{P}_\beta = \frac{g^2}{2\pi^3\hbar^7 c}\left|\int U_k^* U_i d\tau\right|^2 \mathrm{P}_\beta^2 \mathrm{P}_\nu^2 d\mathrm{P}_\beta$$

Bu aňlatmadan:

$$\mathrm{P}_\nu c = \mathrm{E}_\nu = \mathrm{E}_0 - \mathrm{E}_\beta = \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 \mathrm{P}_\nu^2} - \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 \mathrm{P}_\beta^2}$$

gatnaşygy ulanyp, P_ν ululygy ýok edeliň. β indeksi goýberip gutarnykly alarys:

$$\mathrm{P}(p)dp = \frac{g^2}{2\pi^3\hbar^7 c^3}\left|\int U_k^* U_i d\tau\right|^2 \cdot \int_0^{\mathrm{P}_0}\left(\sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 \mathrm{P}_0^2} - \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 \mathrm{P}^2}\right)p^2 dp \qquad (18)$$

(18)-iň sag tarapyndaky aňlatmany 0-dan P_0-a çenli çäkde integrirläp, β-dargamanyň hemişeligi tapylýar. Şu ýerde matrisaly elementi integral belgisiniň daşyna çykaryp bolýar diýip çaklanýar. Şeýlelikde,

$$\lambda = \frac{g^2}{2\pi^3\hbar^7 c^3}\left|\int U_k^* U_i d\tau\right|^2 \cdot \int_0^{\mathrm{P}_0}(\sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 \mathrm{P}_0^2} - \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 \mathrm{P}^2})p^2 dp$$

Integrirlemäniň täze η üýtgeýän ululygyny girizeliň, ol P impuls bilen şeýle bagly:

$$m_0 c\eta = \mathrm{P}$$

η ululyk $m_0 c$ birlikde ölçelinen impulsyň manysyny berýär. Şeýle çalyşmadan soň, λ üçin aňlatma aşakdaky görnüşi alar:

$$\lambda = \frac{g^2}{2\pi^3\hbar^7 c^3}\cdot\left|\int U_k^* U_i d\tau\right|^2\cdot m_0^5 c^7 F(\eta_0)$$

Bu ýerde,

$$\eta_0 = \frac{\mathrm{P}_0}{m_0 c}$$

we

$$F(\eta_0) = \int_0^{\eta_0}\left(\sqrt{1+\eta_0^2} - \sqrt{1+\eta^2}\right)\eta^2 d\eta =$$

$$-\frac{1}{4}\eta_0 - \frac{1}{12}\eta_0^3 + \frac{1}{30}\eta_0^5 + \frac{1}{4}\sqrt{1+\eta_0^2}\ln\left(\sqrt{1+\eta_0^2}\right)$$

Eger

$$\ln\left(\eta_0 + \sqrt{1+\eta_0^2}\right) = arsh\eta_0$$

aňlatma hasaba alynsa, onda:

$$F(\eta_0) = -\frac{1}{4}\eta_0 - \frac{1}{12}\eta_0^2 + \frac{1}{30}\eta_0^5 + \frac{1}{4}\sqrt{1+\eta_0^2}\,arsh\eta_0$$

$\eta_0 << 1$ üçin:

$$F(\eta_0) \approx \frac{2}{205}\eta_0^7$$

Uly η_0 üçin esasy roly $\frac{1}{30}\eta_0^5$ agza oýnaýar. Şol sebäpli $\eta_0 > 5$ üçin:

$$\lambda \approx \frac{g^2 m_0^5 c^4}{60\pi^3 \hbar^7} \left| \int U_k^* U_i d\tau \right|^2 \eta_0^5 \qquad (19),$$

$\eta_0 = \sqrt{\varepsilon_0^2 - 1}$ bolany üçin, (19)-y ulanyp dargamanyň hemişeligini ε_0 energiýanyň üsti bilen aňladyp bolar:

$$\lambda \approx \frac{g^2 m_0^5 c^4}{60\pi^3 \hbar^7} \left| \int U_k^* U_i d\tau \right|^2 \cdot \varepsilon_0^5$$

Şu energiýanyň logarifminiň funksiýasy ýaly $\ln \lambda$ ululygyň 5 burç koeffisiýentli göni bilen suratlanýandygyny aňladýar we tejribede berilenlere gabat gelýär.

II. ELEMENTAR BÖLEJIKLER FIZIKASY

Giriş

XX asyryň 70-nji ýyllarynda “Elementar bölejikler fizikasy” “Ýadro fizikasyndan” bölünip, häzirki zaman nazary we tejribe fizikasynyň iň çalt depgin bilen ösýän özbaşdak pudagyna öwrüldi. Şu fizikanyň predmeti, ýagny maksady, häzirki wagtda elementar (has takygy fundamental) bölejik diýip hasap edilýän bölejikleriň (has takygy mikrobölejikleriň) ilkinji häsiýetlerini, giňişlik strukturalaryny, özaratäsirlerini, özaraöwrülişlerini we özarabaglanyşyklaryny aýan etmekden we öwrenmekden durýar. Başgaça aýdylanda, elementar bölejikler fizikasy mikrobölejikleriň fiziki ululyklaryny dikeldýär, olary toparlara bölüşdirýär, fundamental özaratäsirleriň häsiýetlerini öwrenýär we olaryň şertlendirilen hadysalaryny derňeýär. Soňky döwürde elementar bölejikleriň içki düzümleri (strukturalary) uly depginli barlanylýar. Kwant mehanikasynyň esasy prinsipi bolup hyzmat edýän, kesgitsizlik gatnaşygyndan gelip çykyşy ýaly, Δr tertip möçberli düzümiň düzüjilerini aýan etmek üçin $\Delta p \sim \dfrac{h}{\Delta r}$ impulsdan kiçi bolmadyk “p” impulsly zondirleýän bölejikler gerek. Şeýlelikde, örän kiçi düzüjini öwrenmek üçin örän ýokary energiýa zerurdyr. Şol sebäpli häzirki zaman elementar bölejikler fizikasyna “Ýokary energiýanyň fizikasy” hem diýilýär. Häzirki wagtda tejribede alnyp bilinýän energiýa $1000 GeW$ ululyk tertipdedir, bu $R \sim 10^{-19} m$ minimal aralyga degişlidir.

Ilki bilen diňe elementar bölejikler fizikasyna mahsus bolan käbir maglumatlary getireliň. Aýratyn bellemeli zat, ol hem “elementar” sözüniň otnositelligidir. Şu gün elementar diýip atlandyrýan bölejigimiziň gelejekde çylşyrymly ulgam bolup çykmagy-da ähtimaldyr. Mysal üçin, atom (grek. atomos – kesilmeýän, bölünmeýän) XX asyryň başlaryna çenli öz adynyň bölünmeýän manysyna doly gabat gelýär diýip hasaplanyldy. Soňra atomyň elementar däl-de, çylşyrymly ulgamdygy, onuň ýadrodan we elektrondan durýanlygy doly suratda subut edildi. Ýene-de bir zada üns bereliň, ýagny elementar bölejikler dünýäsinde (mikrodünýäde) “bir zat beýleki zatlardan durýar” diýip tassyklap bolmaýar, has takygy “durýar” sözüň fiziki manysy ýokdur. Haýsy hem bolsa bir bölejik başga iki (ýa-da köp) bölejiklere “dargaýan” bolsa, onda başlangyç bölejik soňky bölejiklerden durýar diýip hasap edip bolmaýar. Mysal üçin, proton neýtrona öwrülende pozitron we neýtrino bölejikleri emele gelýärler. Şu ýerden proton neýtron, pozitron we neýtrino bölejiklerden durýar diýip hasap edip bolmaýar, sebäbi bu protonyň elementardygyny inkär etdigiň bolar.

Şeýlelikde, nähili (haýsy) bölejige elementar (ýönekeý) diýip at berilýär: elementar, bölünmeýän bölejik diýip, häzirki döwürde onuň içki strukturasyny başga has ýönekeý bölejiklerden, ýagny düzüjilerden düzülendir diýip kabul edip bolmaýan (belki şeýle mesele häzir başa barýan däldir) bölejige aýdylýar. Elementar bölejik barada ýene-de bir kesgitleme: elementar bölejik diýip, çylşyrymly ulgam diýip hasaplanylmaýan, özaraöwrülişe ukyply, degişli meýdanlaryň tolgunmasyna düşünilýär. Mikrobölejikleriň biri-birine öwrülmegi, olary öwrenmeklikde özboluşly “açar” bolup hyzmat edýär.

Elementar bölejikler fizikasyna mahsus bolan ýene bir maglumaty getireliň. Şu fizikada fundamental kanunlary doly suratda dikeldilmedik hadysalar öwrenilýär we barlanylýar. Şol sebäpli öňünden meýilnamalaşdyrylan netijäni almak üçin niýetlenilen tejribäniň garaşylmadyk ýagdaýa getirmekliginiň ähtimallygy uludyr.

Elementar bölejikler fizikasynyň esasy maksady, jisimiň häsiýetlerini, aşakiçi uzynlykda, aşaaz wagt dowamlygynda we aşaýokary energiýanyň konsentrasiýasynda öwrenmekden ybaratdyr.

Mikrodünýäde mahsus bolan R möçberi we E energiýasy bilen tapawutlanýan üç dereje aýrylýar:

a) molekulýar-atom derejesi, onuň üçin $R \sim \left(10^{-8} \div 10^{-10}\right)m$, $E \sim (1 \div 10)Mew$;

b) ýadro derejesi – $R \sim \left(10^{-14} \div 10^{-15}\right)m$, $E \sim \left(10^{6} \div 10^{8}\right)Mew$;

ç) üçünji derejede molekula, atom ýa-da ýadro bolup bilmeýän kiçijik mikrobölejikler ýerleşýärler. Olara elementar bölejikler diýilýär. Käwagtlar olar subýadro bölejikleri hem diýip atlandyrylýar. Häzirki döwürde elementar bölejikler derejesi iki aşakky derejä bölünýär: adronlar derejesi we fundamental bölejikler derejesi.

XX asyryň ahyrynda belli elementar bölejikleriň (olaryň antibölejikleri bilen) sany 400-e golaý boldy. Olaryň käbiri stabil (durnukly) ýa-da kwazistabil (oýandyrylan durnukly) we tebigatda erkin ýa-da gowşak baglaşykly ýagdaýda bardyrlar. Olar: atomyň düzümine girýän we nuklon umumy at bilen birleşdirilen proton we neýtron; elektromagnit meýdanyň bölejigi (kwanty) bolup hyzmat edýän foton. Bulardan başga olara, beta-dargama hadysasynda we ýyldyzlarda bolup geçýän termoýadro reaksiýasynda emele gelýän elektron neýtrinosy (we antineýtrinosy) hem girýär. Galan bölejikler durnukly däldirler, olar ikinji kosmiki şöhlelenmede ýa-da tejribe arkaly alynýarlar.

1937-nji ýylda kosmiki şöhläniň düzüminde mýuon μ^- – elektronyň agyr meňzeşligi $(m_\mu \approx 200 m_e)$ hasaba alynýar. 40-njy ýyllaryň aýagynda π^+, π^0, π^--pi mezonlar (pionlar) açyldylar. 50-nji ýyllarda kosmiki şöhlesinde we tizlendirijide geň diýip atlandyrylan bölejikler açyldylar. Olar: kaonlar (ka-mezonlar) K^+, K^0, lýambda-giperon λ^0, sigma-giperonlar Σ^+, Σ^0, Σ^-, ksi-giperonlar – Ξ^0, Ξ^-, omega-giperon Ω^- (omega-giperonyň barlygy nazary taýdan 1962-nji ýylda aýdyldy we tejribe arkaly 1964-nji ýylda subut edildi).

60-njy ýyllarda orta ýaşamak wagty $\tau \sim (10^{-24} \div 10^{-23})s$ bolan ýüzden köp gysga wagt dowamlygynda ýaşaýan bölejikler açyldylar. Olara rezonanslar diýilýär.

1974-nji ýylda agyr (protondan üç esse agyr), ýöne otnositel durnukly ($\tau \sim 10^{-19} s$) ji-psi-mezonlar j/ψ açyldylar. Olar geň galdyryjy bölejikler (D^+, D^0, F^+, λ_c^+ we başg.) toparynyň urug başysydyrlar. 1977-nji ýylda adatdan daşary agyr ipsilon-mezonlar ($m \sim|| m_p$) açyldylar. Olar ýene bir bölejikler toparynyň – "gözellikler" toparynyň urug basyşy diýip hasaplanylýar. 1983-nji ýylda ortalyk bozonlar W^+, W^-, Z^0 diýip atlandyrylan bölejikler hasaba alyndylar, olar gowşak özaratäsiriň äkidijisidirler.

Şu sanalyp geçilen we başga käbir bölejikler barada degişli ýerde giňişleýin gürrüň ediler.

Elementar bölejikler fizikasynda öwrenilýän hadysalar we olaryň netijesinde alynan maglumatlar häzirki döwürde tehniki tarapdan belli bir derejede ulanylmaýar, has takygy ulanyp bilinmeýär. Ýöne onuň üstünligi gelejekde adamzada uly hyzmat etjekdigi şübhesizdir.

§1. Ilkinji bölejikler – elektron, proton, neýtron, foton

Ilki bilen aýry elementar bölejigiň häsiýetlerini suratlandyrmak üçin fiziki ululyklaryň (kwant sanlaryň) bitin hatarynyň girizilendigi we girizilýändigini belläliň. Has belli fiziki ululyklar:

massa, ýaşamagyň orta wagty, spin, elektrik zarýad we magnit moment.

Massa "m" - energetiki birlikde (Mew ýa-da Gew) ölçelinýär. Belli elementar bölejikleriň massalarynyň spektri tertipli däldir we "0"-dan (foton) $90Gew$-e (ortalyk bozonlar) çenli ýaýrap gidýär. Ilki başda elementar bölejikleriň sistematikasy, ýagny toparlara bölünişleri olaryň massalarynyň bahalaryna esaslanypdyr, ondan aşakdaky terminler gelip çykypdyr: lepton ("ýeňil"), mezon ("orta"), barion ("agyr") we giperon (grek. giper –ýokarsynda, üstünde).

Ýaşamagyň orta wagty τ**-** bölejigiň durnuklydygynyň ölçegi bolup hyzmat edýär we sekuntlarda ölçelinýär. Kesgitsizlik gatnaşygyna laýyklykda, $E = mc^2$ halda durnukly däl bölejigiň massasy anyk kesgitli baha eýe däldir. Rezonanslaryň durnukly däldikleriniň ölçegi deregine köplenç energetiki birlikde ölçelinýän $r \sim \dfrac{h}{\tau}$ in kabul edilýär. τ-nyň bahasy adatdan daşary giň möçberde özgerýär. Foton, neýtrino, elektron we proton absolýut durnuklydyrlar ($\tau = \infty$), rezonanslar çäkli durnukly däldirler ($\tau \sim 10^{-24} \div 10^{-23} s$). Jedwellerde durnukly däl bölejikler üçin, ýaşamak wagty bilen bir hatarda dargamanyň tipleri hem görkezilýär.

Spin "s" – $\hbar$ birlikde ölçelinýän bölejigiň impulsynyň hususy momenti bolup bitin ýa-da ýarymbitin bahalary alýar. S spinli elementar bölejik,

s_z düzüjisi bilen tapawutlanýan $2s+1$ spin ýagdaýa eýedir. Spiniň bahasy statistikanyň tipini birbahaly kesgitleýär: bitin spinli bölejiklere bozonlar, ýarymbitin spinli bölejiklere bolsa fermionlar diýilýär. Soňkylar üçin Pauliniň prinsipi hakdyr. Belli bölejikler üçin s spiniň bahasy 0-dan (meselem, pionlar) $\frac{9}{2}$-ä (meselem, käbir rezonanslar) çenli aralykda ýerleşýär.

q **elektrik zarýady** -“e” elementar zarýad birliginde ölçenilýär. Erkin ýagdaýda ýerleşen ähli bölejikler üçin ol diňe bitin sana barabar bahalary alýar: adaty ol 0 we ± 1, käbir rezonanslar üçin ± 2, kwarklar üçin bolsa ol drob sana eýedir. **Magnit momenti** - elementar bölejikleriň magnit häsiýetlerini suratlandyrýar we magneton birliginde berilýär.

Başga fiziki ululyklar degişli ýerde serediler.

XIX asyryň ahyrynda, köp sanly çaklamalaryň we tejribeleriň netijesinde birinji elementar bölejigiň-elektronyň barlygy aýan boldy. Ýagtylygyň kwant nazaryýeti fotonyň barlygyna getirdi. 1919-njy ýylda birinji taryhy ýadro reaksiýasy protonyň açylmagyna esas döretdi. 1932-nji ýylda neýtron açyldy. Şeýlelikde, XX asyryň 30-njy ýyllarynyň başyna çenli açylan elektrona $\left({}_{-1}e^{0}\right)$, protona $\left({}_{1}p^{1}\right)$, neýtrona $\left({}_{0}n^{1}\right)$ we fotona $\left({}_{0}\gamma^{0}\right)$ ilkinji bölejikler diýilýär. Bu bölejikler baradaky maglumatlar aýdyňdyr, şonuň üçin ilkinji şu bölejikler bilen bagly bolan käbir soraglara gysgaça seredeliň.

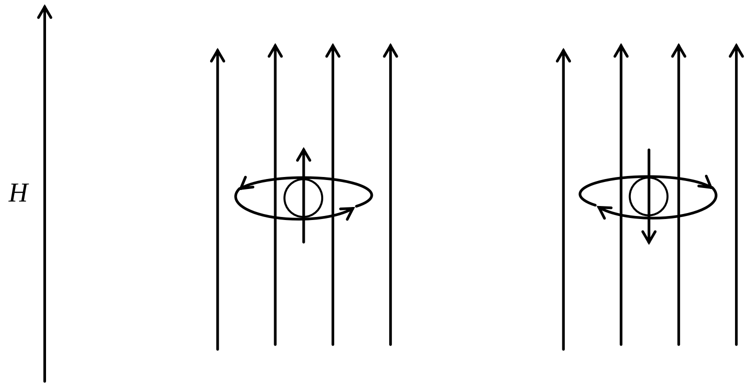
Belli bolşy ýaly elektron, proton we neýtron atomy emele getirýärler diýip hasap edilýär. Olar dynçlyk ýagdaýda bolup bilerler, diýmek olaryň her biriniň dynçlyk m_0 massasy we oňa degişli $E = m_0 c^2$ dynçlyk energiýasy hem bardyr. Hereket netijesinde, tizlige baglylykda, olaryň massasy we energiýasy hem artýar. Şu üç bölejigiň içinde elektron massasy boýunça iň kiçisidir. Belki şonuň üçindir, onuň massasy we elektrik zarýady mikrobölejikleriň massalarynyň we zarýadlarynyň esasy ölçeg birligi hökmünde kabul edilipdir.

Öz gezeginde foton barada aýdylanda, ol elektromagnit meýdanyň iň bolup biljek kiçi bölejigi-kwanty bolup, dynçlyk massa eýe däl, ýagny ol diňe herekede baglylykda "ýaşaýar". Diýmek, onuň energiýäsy we $E = m_0 c^2$ gatnaşyga görä onuň massasy hem bar. 6-njy tablisada bu dört bölejigiň esasy fiziki ululyklary getirilýär.

6-njy tablisa

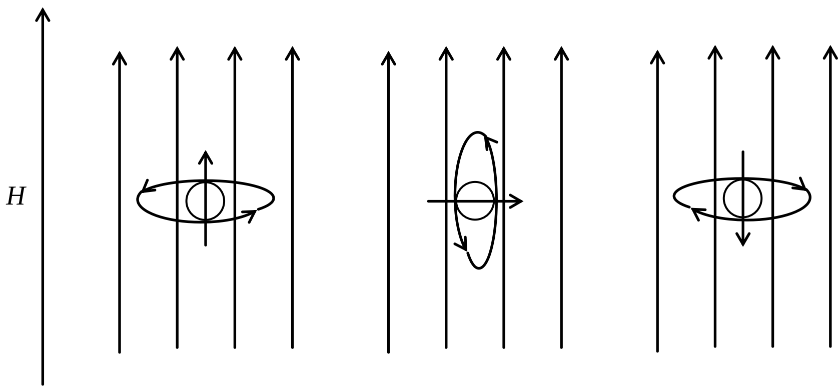
Bölejik	*Zarýad "e"*	*Massa (dynçlyk), kg*	*Energiýa, Mew*	*Spin*	*Ýaşaýan wagtynyň dowamlylygy*	*Magnit momenti*
Elektron	-1	$9{,}1\cdot 10^{-31}$	0,51	$\frac{1}{2}$	durnukly	$1{,}01\mu_B$
Proton	$+1$	$1{,}6724\cdot 10^{-27}$	938,2796	$\frac{1}{2}$	durnukly	$+2{,}7928\mu_0$
Neýtron	0	$1{,}6747\cdot 10^{-27}$	939,5731	$\frac{1}{2}$	$(12 \div 18)$ min.	$-1{,}9131\mu_0$
Foton	0	0	0	1	∞	0

Şu bölejikleriň ählisi magnitli häsiýete eýedir, diýmek olara daşky magnit meýdany täsir edýär. Kwant mehanikasyna laýyklykda, daşky goýulan meýdana görä, her bir bölejigiň aýlanma oky diňe bir näçe kesgitli ugurlary (ýagdaýlary) alyp bilýär. Mysal üçin, spini $\frac{1}{2}$-e deň bölejik şol meýdanda diňe iki ýagdaýa eýe bolup biler: onuň aýlanma oky meýdanyň ugry boýunça ýa-da oňa garşy ugrukdyrylyp biliner (16-njy çyzgy).



16-njy çyzgy

Spini 1-e deň bolan bölejik diňe üç ýagdaýda ýerleşip biler: onuň aýlanma oky meýdanyň ugruna, oňa perpendikulýar we tersine ugrukdyrylyp biliner (17-nji çyzgy).



17-nji çyzgy

Spin bilen bagly bölejigiň başga bir wajyp häsiýeti onuň “statistikasydyr”. Elektron, proton we neýtron (spini $\frac{1}{2}$ bolan bölejikleriň ählisi) belli gadagan prinsipe (Pauliniň prinsipi) boýun egýärler. Oňa görä şol bir bölejikleriň toplumyndan diňe bir bölejik kesgitli kwant “ýagdaýy” eýeläp biler. Başgaça, Pauliniň prinsipi gysga görnüşde şeýle kesgitlenilip biliner: atomda n, ℓ, j, m ýa-da n, ℓ, m_e, m_s kwant sanlaryň her bir dörtlügi üçin birden artyk däl – bir elektron bolup biler. Mysal üçin, kesgitli ugur boýunça aýlanýan we şol bir wagtda berilen orbita boýunça ýadronyň daşynda aýlanýan diňe bir elektron bolup biler. Şol bir kwant ýagdaýda spinleri biri-birine ters ugrukdyrylan iki elektron ýerleşip biler. Pauliniň prinsipini kanagatlandyrýan bölejikler Ferminiň-Diragyň statistikasyna boýun egýärler, ýagny ulgamyň, diýeli iki nuklonly ulgamyň, doly tolkun funksiýasy bölejikleriň ähli koordinatalarynyň çalyşmagyna görä, antisimmetrik bolmalydyr. Olara fermionlar diýilýär.

Diýmek elektron, proton we neýtron bölejikleri fermionlardyr.

Fotona meňzeş bölejikler (bitin sana deň spinli bölejikler) Pauliniň prinsipine boýun egmeýärler, ýagny şol bir kwant ýagdaýda islendik sanly şeýle bölejikler bolup biler. Olar Bozeniň-Eýnşteýniň statistikasyna boýun egýärler, ýagny inwersiýa netijesinde tolkun funksiýa üýtgemeýär, ýagny simmetrikdir. Olara bozonlar diýilýär.

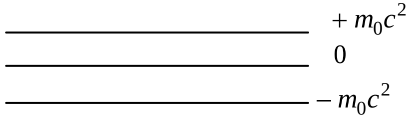
§2. Antibölejikler: Pozitron, antiproton, antineýtron we neýtrino (we antineýtrino)

Kwant nazaryýetine laýyklykda islendik maddy bölejik tolkun häsiýete eýedir. Mundan başga-da ähli bölejikler özara “baglydyrlar”: haçanda olar biri-birine ýakynlaşsalar, onda dürli ýollar bilen özara täsirleşýärler. Bu bir tarapdan, ikinji tarapdan, belli boluşy ýaly umumy E energiýanyň, m_0 massanyň we P impulsyň arasynda aşakdaky klassiki relýatwistik gatnaşyk bar:

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

Eger impuls $p = 0$ bolsa, onda $E = \pm m_0 c^2$, nirede m_0 – elektronyň dynçlyk massasy. Görnüşi ýaly energiýa üçin iki dürli baha alynýar: $+m_0 c^2$ we

$-m_0c^2$. Has takygy energiýanyň bir bahasy $+m_0c^2$ ululykdan başlap $+\infty$-e çenli ýaýylyp gidýär, beýlekisi bolsa $-m_0c^2$ ululykdan başlap $-\infty$-e çenli ýaýylyp gidýär (18-nji çyzgy).



18-nji çyzgy.

Edil şeýle netije relýatwistik tizlik bilen hereket edýän, $\frac{1}{2}$ spinli mikrobölejik üçin 1928-nji ýylda iňlis alymy Diragyň hödürlän deňlemesinden hem gelip çykýar.

Şeýlelikde $2m_0c^2$ aralyk bilen bölünen energiýanyň iki üznüksiz oblasty alynýar. Položitel energiýa bilen bir hatarda otrisatel energiýa hem alynýar.

Energiýanyň položitel bahasyna otrisatel zarýadly elektronyň degişlidigi şübhesizdir. Eger indi, energiýanyň otrisatel oblastyna hem şeýle elektron degişli diýip hasap edilse, onda onuň bolup bilmejek, akyla sygmajak häsiýete eýe bolmaklygy ähtimaldyr. Dogrydanam, “$-m_0c^2$” otrisatel energiýa “$-m_0$” otrisatel massanyň degişli bolup biljekdigini nazara alsak, onda şeýle massaly elektron özüne täsir edýän güýjüň tersine (garşysyna) ugrukdyrylan “$-m_0\vartheta$” tizlenme eýe bolmaly, ýagny elektron täsir edýän güýjüň garşysyna hereket eder. Şeýle elektronyň energiýasyny azaltmak üçin, ondan energiýany aýyrman, tersine oňa käbir položitel energiýanyň mukdaryny bermeli. Bu bolup bilmejek zat. Görnüşi ýaly Diragyň deňlemesi uly kynçylyklara getirýär.

Näme üçin klassiki fizikada energiýanyň otirsatel oblasty inkär edilýär? Klassiki fizikada ähli fiziki üýtgeýän ululyklar diňe üznüksiz baha eýedirler, položitel bahaly energiýadan otrisatele geçmek üçin $2m_0c^2$ böküş talap edilýar, diýmek klassiki fizikada şeýle böküş bolup bilmeýär. Şol sebäpli energiýänyň iki alamatyny hem hasaba almaklygyň geregi ýok. Kwant mehanikasynda fiziki ululyklaryň üznüksiz dälde üznükli üýtgeýändikleri sebäpli, şol diskret derejeleriň arasyndaky geçiş adaty hadysadyr. Diýmek, indi energiýanyň otrisatel bahasyny-da hökmany suratda hasaba almaly.

Şol bir wagtda, eger položitel zarýadly elektronyň barlygy öňe sürülse, onda otrisatel bahaly energiýanyň bolup biljekdigini we ony tebigy suratda düşündirip boljakdygyny Dirak görkezipdir. Şeýle tassyklama, zarýadyň massa bolan gatnaşygyny kanagatlandyrýandygy düşnüklidir, ýagny

$$\frac{-e}{-m} = \frac{+e}{+m}.$$

Otrisatel energiýaly çözgüdiň manysy, 1932-nji ýylda kosmiki şöhlelenmäniň düzüminde položitel elektronyň barlygyny Andersonyň subut etmekligi netijesinde, düşnükli boldy. Şeýle položitel zarýadly elektrona pozitron diýilip atlandyrylypdyr. Elektron bilen pozitronyň, elektrik zarýatdan başga ähli häsiýetleri bir meňzeşdir. Pozitron elektrona görä antibölejik we ol fermion.

Pozitronyň üýtgeşik häsiýeti, onuň erkin ýagdaýda wagtyň ujypsyz kiçi dowamlygynda bolup bilýänligidir, soňra ol “ýok bolýar”. Soňra elektron we pozitrondan duran durnukly däl ulgamyň bolup biljekdigi açylypdyr.

Şeýle neýtral atoma pozitroniý diýip at berilipdir we ol 1957-nji ýylda M. Deýç tarapyndan açylypdyr. Ol elektrik babatda ýeňil atoma-wodoroda meňzeş, ýöne onda protonyň deregine pozitron. Şeýle atom örän gysga wagtdan soň ýok bolýar,ýagny elektron we pozitron özara annigilirlenilýär we netijede iki foton emele gelýär

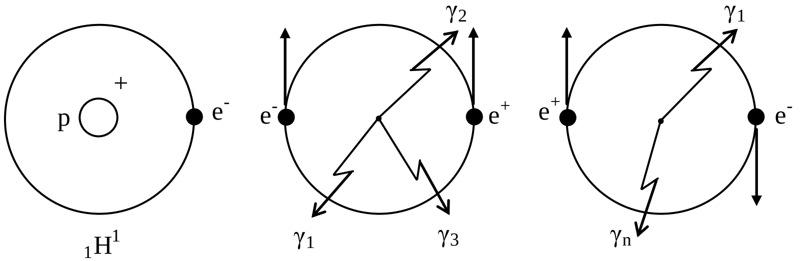
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma .$$

Tersine. $W_\gamma > 2m_e c^2$ energiýaly fotonyň haýsy hem bolsa bir “ X ”bölejik bilen täsir etmegi esasynda elektron-pozitron jübti (<< $e^- + e^+$ >> – jübti) emele gelýär.

$$\gamma + x \rightarrow x + e^- + e^+ .$$

Wodorodyň atomy we pozitroniý 19-njy çyzgy görkezilýär.

Elektron we pozitron mysalynda, bölejige we antibölejige görä tebigatyň kanunlarynyň simmetrikligi görkezilipdir. Bölejige we antibölejige görä tebigatyň kanunlarynyň simmetrikligine, ýagny üýtgemeýänligine, zarýad çatrymlygy prinsipi diýilýär. Şu prinsipe laýykda tebigatyň ähli bölejikleri jübüt halatda bolýar.



S=1, triplet ýa-da orta-pozitroniý

S=0, singlet ýa-da para-pozitroniý

19-njy çyzgy

Şeýlelikde, her bir bölejigiň antibölejigi bar, ol bölejik üstünde “tilda” belligi bilen görkezilýär. Bölejigiň we antibölejigiň massasy, ýaşaýyş wagty we spini bir meňzeş. Galan ululyklary, şol sanda elektrik zarýad we magnit moment, modullary boýunça deň, ýone alamatlary boýunça gapmagarşy.

1955-nji we 1956-njy ýyllarda

$$p + \tilde{p} \rightarrow n + \tilde{n}$$

reaksiýanyň esasynda antiproton we antineýtron açyldylar. Olara antinuklon diýilýär. Antiprotonyň elektrik zarýady we magnit momentiniň alamaty, antineýtronyň bolsa magnit momentiniň alamaty proton we neýtron üçin degişli ululyklara tersdir.

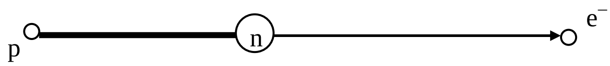
Neýtrino. Antineýtrino. Ýadronyň içinde neýtron kesgitsiz uzak ýaşap biler. Erkin ýagdaýda ol stabil däl. Ortaça $(12 \div 18)$ minutdan soň ol β – bölejigi spontan göýberip protona öwrülýär.

$$n \to e^{-} + p \qquad (1)$$

Proton bilen elektronyň bilelikdäki massasy neýtronyňkydan takmynan 1,5 elektron massasyna barabar kiçi, ýagny **(1)** dargamada şeýle mukdardaky massa ýitýär; şeýle massa $0{,}78\,Mew$ energiýa ekwiwalentdir. Diýmek **(1)**-de massanyň we energiýanyň saklanmak kanunlary bozulýarlar. **(1)**-de spiniň hem saklanmak kanuny ýerine ýetmeýär:

$$\frac{1}{2} \neq \frac{1}{2} + \frac{1}{2}.$$

Eger neýtron diňe protona we elektrona “dargaýan” diýip hasap edilse, onda impulsyň saklanmak kanunyna laýyklykda olar göni gapma garşy ugurlara uçmaly (20-nji çyzgy).

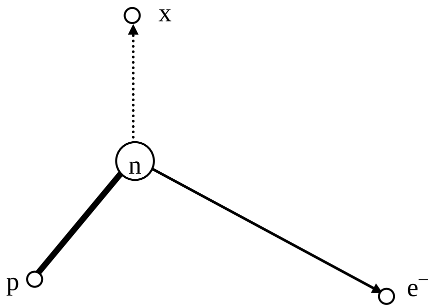


20-nji çyzgy

Hakykatdan olar biri-birine burç asty bilen uçup çykýarlar (21-nji çyzgy), bu bolsa ýetmeýän impulsyň öň belli bolmadyk "x" bölejigiň alyp gidýändigini görkezýär:

(1)-de zarýadyň saklanmak kanuny dogry:

$$0 = (-1) + (+1).$$



21-nji çyzgy

Mikrodünýäde massanyň, energiýanyň, impulsyň we impulsyň momentiniň saklanmak kanunyny dikeltmek maksady bilen Pauli 1931-nji ýylda **(1)**-de üçünji bir "x" bölejigiň üçup çykýänlygy baradaky tassyklamany öňe sürüpdir. Ol bölejigiň spini $1/2$, zarýady 0, massasy örän ujypsyz, ýagny neýtrona meňzeş. Şol sebäpli Fermi oňa neýtrino (kiçijik neýtronjagaz) diýip atlandyrmagy teklip edipdir. Şeýlelikde **(1)** aşakdaky ýagdaýda amala aşýar:

$$n \to e^- + p + \tilde{\nu},$$

bu ýerde $\tilde{\nu}$ – antineýtrino.

Neýtrino bolsa protonyň neýtrona öwrülmegi netijesinde döreýär.

$$p \to n + e^+ + \nu.$$

Neýtrino aýnaly (açyk) bölejik, ýagny islendik galyňlykdaky jisimden geçsede özüniň energiýasyny ýitirmeýär. Diýmek, fiziki enjam bilen özara täsir etmeýär, bu onuň barlygyny subut etmeklikde örän uly kynçylyklary döredýär. Neýtrino – çephyrly bölejik, antineýtrino bolsa saghyrly bölejik.

§3. Ýukawanyň gipotezasy. Mýuonlar. Pionlar

Kwant elektrodinamikasyndan belli bolşy ýaly, her bir özaratäsiriň degişli kwantlary bar. Meselem, elektrik meýdanyň kwanty elektron, elektromagnit meýdanyň kwanty foton we ş.m. Şu ýagdaýy ýadro özaratäsire geçirip boljakdygy baradaky pikiri 1934-nji ýylda I. Tamm aýdypdyr. Şu aýdylany mundan beýläk ösdürmeklik Ýapon fizigi H. Ýukawanyň paýyna düşýär. Ol 1935-nji ýylda ýadro kwantlary wezipesini heniz tejribede açylmadyk zarýadly we neýtral bölejikleriň ýerine ýetirip biljekdikleri baradaky gipotezany öňe sürýär we olaryň massasynyň elektronyňkydan agyr, nuklonyňkydan bolsa ýeňil bolmalydygyny nazary taýdan hasaplapdyr. Diýmek şol heniz näbelli bölejikleriň massasy ortalyk bolmaly, şonuň üçin olara mezonlar (grek mezos – ortalyk) diýip at goýulypdyr. Ýukawanyň oýlanmasy aşakdakydan durýar. Kwant mehanikasyna laýyklykda aşakdaky kesgitsizlik gatnaşygy bar:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar .$$

Şundan görnüşi ýaly, eger Δt wagt az bolsa, onda ΔE energiýa örän uly bolup biler. ΔE energiýanyň hasabyna gysga wagt dowamynda nuklonyň ýakynynda ("a" radiusly oblastda)

$$m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

massaly bölejik emele gelip biler. Şu bölejigiň ululygy aňsat kesgitlenilip biliner.

Goý, Δt wagtda ýadro güýjüniň $a = 2 \cdot 10^{-15} m$ täsir radiusyna deň aralygy $c = 3 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}$ ýagtylyk tizlik bilen hereket edýän bölejigiň geçmekligi üçin energiýa ΔE ululyga üýtgeýär diýeliň, onda

$$\Delta t = \frac{a}{c} = \frac{2 \cdot 10^{-15} m}{3 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}} \approx 0{,}7 \cdot 10^{-23} s$$

we

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{1{,}05 \cdot 10^{-34} j \cdot s}{0{,}7 \cdot 10^{-23} s} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-11} j =$$

$$= 1{,}5 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{Mew}{1{,}6 \cdot 10^{-13}} \approx 100 \;\; Mew.$$

Şeýlelikde

$$m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{100 Mew \cdot m_0}{\left(3 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}\right)^2 \cdot m_0} = \frac{100 Mew \cdot m_0}{0{,}51 Mew} \approx 200 m_0,$$

nirede m_0 – elektronyň dynçlyk massasy.

Ýukawanyň bölejikleri proton we neýtron bilen energiýary özaratäsirde bolmalydyr. Ilkinji mezonlar 1938-nji ýylda Anderson we Neddermaýer (ABŞ) tarapyndan kosmiki şöhlelenmäniň düzüminde tapylýar. Olara μ (mýu) – mezonlar ýa-da mýuonlar diýilýär we zarýady boýunça iki dürlidir (μ^- we μ^+). Olar durnukly däldir we $\tau = 2{,}2 \cdot 10^{-6} s$ orta ýaşamak wagtdan soň elektron ýa-da pozitron, neýtrino we antineýtrino bölejikleri goýberip, dargaýarlar:

$$\mu^{\mp} \rightarrow e^{\mp} + \nu + \tilde{\nu}.$$

Olaryň esasy fiziki ululyklary $m_{\mu} = 207 m_0$, $e_{\mu} = \pm e$, $s = \frac{1}{2}$, fermion.

Mýuonlaryň nuklonlar bilen özaratäsire gatnaşmaýandyklary aýan bolupdyr, onda olar ýadro meýdanynyň bölejikleri – kwantlary bolup bilmeýärler.

Ýadro güýjüniň kwantlary bolup, 1947-nji ýylda Pauell tarapyndan tejribe arkaly açylan π (pi) – mezonlar ýa-da pionlar diýip hasap edilipdir. Pionlar üç görnüşde bolýar: π^{+}, π^{0}, π^{-}. Olar hem stabil däldirler we aşakdaky shema boýunça dargaýarlar:

$$\pi^{\pm} \to \mu^{\pm} + \nu; \ \pi^{0} \to \begin{cases} \gamma + \gamma, \\ e^{-} + e^{+} + \gamma \end{cases}.$$

Olaryň esasy fiziki ululyklary:

$m_{\pi} = 267 m_0$, $e_{\pi} = \pm 1{,}0$, $s = 0$, bozon, $\tau \approx 10^{-15} s$.

Üstesinde, nuklonlaryň arasyndaky özaratäsiri bermek üçin gatnaşýan mezonlar şol nuklonlardan özlerini başgaça alyp barýarlar. Eger iki nuklon çakyşsa, onda energiýanyň ýeterliginde bir näçe mezonlaryň döremekleri mümkin. Meselem,

$$p + n \to p + p + \pi^{-},$$

$$p + n \to p + p + \pi^{-} + \pi^{0},$$

$$p + n \to p + p + \pi^{-} + \pi^{+} + \pi^{-} \text{ we ş.m.}$$

Mezonlaryň ýaşamak wagty barada durup geçeliň. Otnositelligiň ýörite nazaryýetine degişlilikde, çalt hereketli bölejigiň ýaşamak wagty bölejigiň hereketiniň “v” tizligine bagly we tizligiň artmagy bilen aşakdaky kanun boýunça artýar

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Edil şeýle kanun arkaly $m_0 c^2$ dynçlyk energiýa we bölejigiň E doly energiýasy özarabaglanyşykly:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Kosmiki μ – mezonlaryň orta energiýasy ölçelinip onuň $E \approx 10^9 ew$ ululykdygy dikeldilipdir.

μ – mezonyň dynçlyk energiýasy $m_\mu c^2 \approx 100 Mew \approx \approx 10^8 ew$. Onda

$$\sqrt{1-\beta^2} = \frac{m_\mu c^2}{E} = \frac{10^8}{10^9} \approx 0{,}1,$$

we, şeýlelikde, nazary ýol bilen aýdylan dynçlykdaky μ – mezonyň ýaşamak wagtynyň ululygy

$$(\tau_0)_{nazary} = \tau \cdot \sqrt{1-\beta^2} = 10^{-5} \cdot 10^{-1} = 10^{-6} s.$$

$(\tau_0)_{nazary}$ we $(\tau_0)_{tejribe}$ ululyklary deňeşdirilmegi, otnositelligiń ýörite nazaryýetiniň tassyklamasynyň ýönekeý barlanmagydyr.

Häzirki wagtda alty sany ýeňil bölejikleriň topary (elektron, pozitron, $\mu^{\mp}$–mezonlar, neýtrino we antineýtrino) leptonlar toparyny emele getirýärler. Has takygy e^-, μ^-, ν-leptonlar, e^+, μ^+, $\tilde{\nu}$ -antileptonlar.

Şu ýerde proton nämeden durýar? diýen soraga jogap berjek bolup synanyşalyň. Eger proton ýokary energiýaly fotonlaryň toplumy bilen “ýagtylandyrylsa”, onda täze bölejik döräp biler

$$\gamma + p \to \pi^{+} + n\,.$$

Şundan, proton neýtrondan we piondan “durýar” diýip boljaga meňzeýär. Ýöne şol bir çaknyşykda zarýadsyz pion emele gelip biler, proton bolsa protonlygyna galýar

$$\gamma + p \to \pi^{0} + p\,.$$

Şu reaksiýanyň görkezmegine görä proton özi-özünden we π^0 bölejikden durýar. Eger fotonyň energiýasy ýeterlikli derejede ýokary bolsa, onda aşakdaky reaksiýalar amala aşyrylyp bilinerler:

$$\gamma + p \to \pi^{+} + \pi^{-} + p\,,$$

$$\gamma + p \to \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{+} + \pi^{-} + p \quad \text{we ş.m.}$$

we

$$\gamma + n \to n + \pi^{0}\,,$$

$$\gamma + n \to n + \pi^{0} + \pi^{0} \qquad \text{we ş.m.}$$

Görnüşi ýaly protonyň (neýtronyň) düzümi baradaky sorag hasda bulaşýar.

Energiýany ýene-de ýokarlandyryp has geň hadysanyň alynmagy mümkin:

$$\gamma + p \to p + p + \tilde{p}\,.$$

Şeýlelikde, başda goýulan soragyň fiziki manysynyň ýoklygyna göz ýetirýäris.

§4. Özaratäsirleriň görnüşleri

Ýokarda sanalyp geçilen on dört bölejikleriň (e^-, p, n, γ, e^+, $\tilde{p}$, $\tilde{n}$, ν, $\tilde{\nu}$, μ^-, μ^+, π^+, π^-, π^0) ählisi tebigatda oňat kesgitli orny eýeleýärler. Olary biri-birinden aýdyň tapawutlanýan aşakdaky dört topara bölýärler:

I. Agyr bölejikler – nuklonlar (p, n) we antinuklonlar ($\tilde{p}$, $\tilde{n}$).

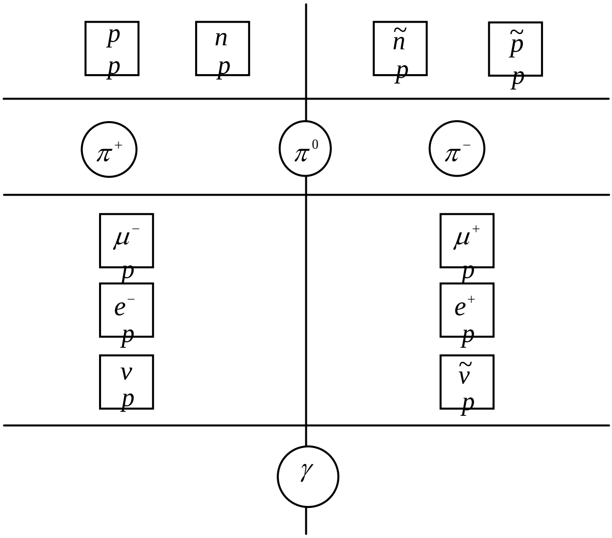
II. Mezonlar ýa-da ortalyk massaly bölejikler – pionlar (π^+, π^0, π^-).

III. Ýeňil bölejikler – leptonlar (e^-, μ^-, ν) we antileptonlar (e^+, μ^+, $\tilde{\nu}$).

IV. Foton, özi aýratyn topary emele getirýär.

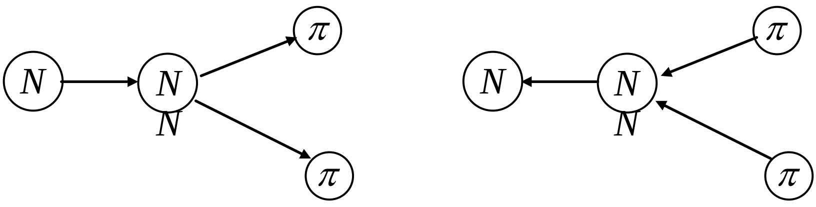
Bu toparlar shema görnüşinde 22-nji çyzgydaky ýaly suratlandyrylýar.

Shemada kese çyzyklar bölejikleri toparlara bölýär, dik çyzyk bolsa dünýäni antidünýäden bölýär. Shemada π^0 we γ bölejikleri dik çyzygyň üstünde ýerleşýärler, sebäbi olar üçin bölejik öz antibölejigi bilen gabat gelýär, şeýle bölejige hakyky neýtral bölejik diýilýär. Bu bölejikler aşakdaky üç reaksiýalar bilen kesgitlenilýän özara içki baglylyga eýedirler.



22-nji çyzgy

Ýukawanyň prosesi – agyr bölejikleri mezonlar bilen baglaşdyrýar: nuklon mezony goýberýär (23-nji a çyzgy), soňra bolsa siňdirýär (23-nji b çyzgy).



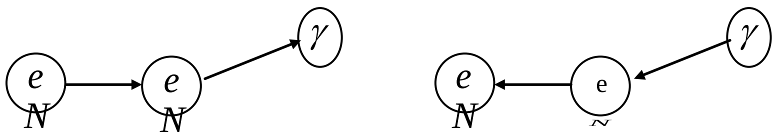
a) b)

23-nji çyzgy

Şu özaratäsiri $\tau = \dfrac{10^{-13}}{3 \cdot 10^{10}} \approx 10^{-23}s$ wagtda bolup geçýär. Şeýle özaratäsire güýçli (ýadro) özaratäsiri diýilýär.

Umumylaşdyryp aýdylanda güýçli özaratäsiri agyr bölejiklere mahsusdyr. Onuň belli ýüze çykyşy, atom ýadrosynyň barlygyny şertlendirýän ýadro güýjidir.

Diragyň prosesi – ýeňil bölejikleri foton bilen baglaşdyrýar: elektron fotony wirtual goýberýär (24-nji a çyzgy) we siňdirýär (24-nji b çyzgy).. Şeýle hadysa $10^{-21}s$ wagt dowamlygynda bolup geçýär we ol elektromagnit özaratäsiriň esasyny emele getirýär.



24-nji çyzgy

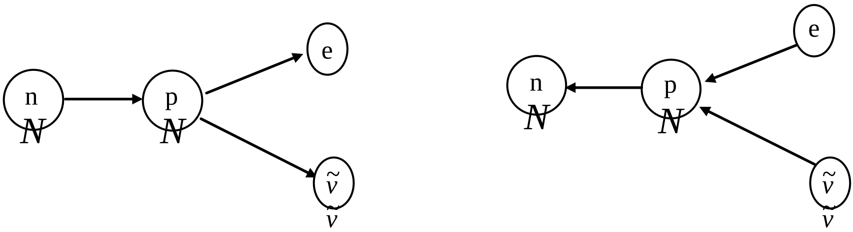
Elektronyň fotony göýberişi we siňdirişi wirtual diýip atlandyrylýan hadysalara mysaldyr. Ýagdaý şeýle, ýagny foton haýsy hem bolsa bir energiýa eýedir, diýmek haçanda foton elektron tarapyndan erkin (daşky güýç täsir etmezden) goýberilse, onda ulgamyň doly energiýasy artaýmaly bolup görünýär, diýmek şeýle hadysada energiýanyň saklanmak kanuny bozulýana meňzeýär. Onda kwant nazaryýetiň tassyklamagyna laýyklykda fotonyň göýberilişi we täzeden siňdirilişi şeýle bir çalt bolup geçýär, şonuň üçin energiýadaky utuşlyk prinsipde seredilip bilinmeýär. Şeýle hadysa wirtual diýilýär. Kwant nazaryýetinde wirtual bölejikleriň hem adaty bölejikleriňki ýaly kwant sanlary (spin, elektrik we barion zarýadlary we başg.) bar, ýöne real bölejiklerden üýtgeşiklikde wirtual bölejigi üçin ε energiýanyň, p impulsyň we m massanyň arasyndaky adaty klassiki relýatiwistik baglanyşyk ýerine ýetmeýär, ýagny

$$\varepsilon^2 \neq p^2c^2 + m^2c^4 .$$

Şeýle bozulmaklyk energiýa we wagt arasyndaky kwant kesgitsizlik gatnaşygyndan gelip çykýar we ol örän kiçi wagtda bolup geçýär we ony hasaba alyp bolmaýar (belki häzir başarýan däldiris), başgaça aýdylanda ony seredip bolmaýar. Kwant mehanikasyna görä fiziki kanunlar diňe seredilýän ululyklara degişlidirler.

Elektromagnit özaratäsirine diňe zarýadly bölejikler we fotonlar gatnaşýarlar. Onuň aýdyň görnüşde ýüze çykyşy, atomyň bolmagyny şertlendirýän kulonly güýçdir.

Ferminiň prosesi – agyr bölejikleri ýeňil bölejikleri bilen baglaşdyrýar: neýtron elektrony we antineýtrony (edil şunuň ýaly proton pozitrony we neýtrinony) wirtual goýberýär (25-nji a çyzgy) we siňdirýär (25-nji b çyzgy). Şeýle hadysa $10^{-9}s$ wagtda bolup geçýär we gowşak özaratäsiriň esasyny düzýär.



a) b)

25-nji çyzgy

Gowşak özaratäsiri fotonlardan başga ähli bölejikler üçin mahsusdyr. Onuň has aýdyň ýüze çykmagy – atom ýadrolarynyň öwrülmegidir. Ýene-de ol köp elementar bölejikleriň durnukly däldiklerini şertlendirýär. Meselem:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu,\ \mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu,\ k^- \to \pi^- + \pi^0$$

dargamalar hut gowşak özaratäsir bilen döredilendirler. Soňky ýyllarda neýtrinonyň we antineýtrinonyň protonlarda we elektronlarda dargamaklarynda gowşak prosessleri güýçli depginlik bilen barlanylýar.

Şeýlelikde, häzirki döwürde fundamental özaratäsirleriň dört görnüşini tapawutlandyrýarlar: güýçli, elektromagnit, gowşak we grawitasiýa. Grawitasiýa özaratäsiri Älemiň ähli jisimlerine mahsusdyr we bütindünýä dartyş güýji görnüşde ýüze çykýar. Şu güýç ýyldyzlaryň, planetaly ulgamlaryň we ş.m. bolmaklaryny şertlendirýär. Grawitasiýa özaratäsiri çäkli gowşak we elementar bölejikler dünýäsinde adaty energiýalarda rol oýnamaýar. Dört özaratäsirleriň esasy fiziki ululyklary 7-nji tablisada getirilýär.

7-nji tablisa

Özaratäsir	Çalyşma mehanizmi	Intensiwlik	Radius, m	Häsiýetli wagt, s
Güýçli	glýuonlar	~ 1	$\sim 10^{-15}$	$\sim 10^{-23}$
Elektromagnit	fotonlar	1/137	∞	$\sim 10^{-20}$
Gowşak	ortalyk bozonlar	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-18}$	$\sim 10^{-13}$
Grawitasiýa	grawitonlar	$\sim 10^{-38}$	∞	?

Berilen özaratäsiriň intensiwligi, fundamental hemişeliklerden we degişli "zarýaddan" düzülen haýsy hem bolsa bir ölçegsiz ululyk (baglylyk hemişeligi) bilen häsiýetlendirilýär. Elektromagnit özaratäsiri üçin şeýle ululyk bolup inçe strukturanyň hemişeligi

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \pi c} \approx \frac{1}{137}$$

hyzmat edýär. Jedwelden görnüşi ýaly elementar bölejikler dünýäsinde ýerlikli özaratäsirleriň arasynda has intensiwlisi-güýçli, kiçi intensiwlisi-gowşak, şu ýerden olaryň atlary. Grawitasiýa özaratäsiri çäkli kiçi intensiwlige eýedir we Älemde uly rol oýnamagy astronomiki jisimleriň massalarynyň ummasyz ululygydyr. Elektromagnit we grawitasiýa güýçleri uzaklyk güýçlere degişlidirler, sebäbi aralygyň ulalmagynda olar haýal kemelýärler. Güýçli özaratäsiri diňe kiçi aralykda $R \sim 10^{-15} m$ ýüze çykýar, gowşak özaratäsiriň täsir radiusy ýenede kiçidir.

§5. K-mezonlar we giperonlar.

1950-nji ýyllaryň başlarynda täze elementar bölejikleri açyldylar. Olar, ýokary energiýaly kosmiki şöhläniň Wilsonyň kamerasynyň içinde ýerleşdirilen gurşun plastinkasynyň üstüne düşmeginde tapyldylar. Şol ýerde hasaba alynan yzlaryň (trekleriň) arasynda üýtgeşik ikişöhleli ýa-da Y-görnüşli yzyň barlygy aýan bolupdyr. Ony hemme taraplaýyn barlamagyň esasynda şeýle hadysa ýokarda seredilip geçilen elementar bölejikleriniň hiç biriniň gatnaşmaýandygy belli bolupdyr. Üstesine-de, onda hiç bolmanda iki sany zarýadsyz bölejigiň gatnaşýandygy ýüze çykarylypdyr. Olaryň biri protona we otrisatel piona dargaýar we oňa λ (lýambda) – bölejik diýilip at berilipdir:

$$\lambda^0 \to p + \pi^- .$$

Onuň esasy fiziki häsiýetnamasy $e_\lambda = 0$, $m = 2181 m_0$, $s = \frac{1}{2}$, fermion.

Beýlekisi položitel π^+ we otrisatel π^- mezonlara dargaýar we oňa K (ka) –bölejik diýilýär

$$K^0 \to \pi^+ + \pi^- .$$

Ony aşakdaky fiziki ululyklary kesgitleýär.

$$e_K = 0,\ m = 965 m_0,\ s = 1, \text{ bozon.}$$

Ferminiň statistikasyna boýun egýän we massasy boýunça nuklonyňkydan agyr bölejige giperon diýilýär, ýagny λ^0 bölejige neýtral lýamba-giperon hem diýilýär.

Öz gezeginde giperonlar we nuklonlar barion toparyny emele getirýärler. Rus alymy Okunuň teklibine görä barionlar we mezonlar adronlar toparyna girýärler. Adron sözi uly, iri manyny berýär.

1952-nji ýylda zarýadly giperon açylýar, oňa kaskadly ksi giperon – Ξ^- – giperon diýilip at berilipdir. Ol aşakdaky kaskadly shema boýunça dargaýar

$$\Xi^- \to \lambda^0 + \pi^+,$$

$$\lambda^0 \to p + \pi^-.$$

1958-nji ýylda kosmiki şöhlelenmäniň düzüminde zarýadly giperon, sigma-giperon açylýar:

$$\sum\nolimits_1^+ \to p + \pi^0,$$

$$\sum\nolimits_2^+ \to \pi^+ + n.$$

$\sum_1^+$ we $\sum_2^+$ – şol bir bölejik, ýöne ol dürli shema boýunça dargaýar.

Şu bölejikler üýtgeşik, adaty däl häsiýete eýedirler, şol sebäpli olara geň bölejikleri diýilýär. Ol häsiýetler:

– geň bölejigi güýçli özaratäsir bilen döreýär, dargamasy gowşak özaratäsiri boýunça gidýär;
– geň bölejikleriň döremek prosesinde güýçli özara täsiri elmydama dälde diňe käbir ýagdaýlarda gatnaşýar, meselem

$$\pi^- + p \to \lambda^0 + K^0 \text{ ýa-da } \pi^+ + p \to \sum\nolimits^+ + K^+.$$

– geň bölejikleri elmydama jübt görnüşde döreýärler.

K-mezonlaryň we diperonlaryň döremeklerine degişli bir näçe düzgün dikeldilipdir:

Birinji düzgün: λ^0, Σ^+, Σ^0 we Σ^- giperonlar K-bölejikler bilen jübtlikde emele gelýärler;

Ikinji düzgün: λ^0, Σ^+, Σ^0 we Σ^- giperonlar diňe K-bölejikleri bilen jübtlikde emele gelýärler we anti-ka- bölejikleri (K^- we $\widetilde{\theta}^0$) bilen jübtlikde emele gelmeýärler;

Üçünji düzgün: $\pi^- + p \to \Sigma^- + K^+$ görnüşli reaksiýalarda bölejigiň zarýadyny degişli üýtgedip, ony reaksiýanyň bir tarapyndan beýlekä “geçirip” bolýar

$$K^- + p \to \Sigma^- + \pi^+;$$

Dördünji düzgün: ähli reaksiýalarda barionlaryň sany (dogrusy, barionlaryň we antibarionlaryn sanynyň tapawudy) saklanýar.

Giperýadro. 1953-nji ýylda polşaly alymlar Daniş we Pnewskiý fotoemulsiýada bir neýtronyň deregini λ^0-giperonyň ýerleşen stabil däl ýadrony tapýarlar. Şeýle ýadro giper-fragment (durnukly däl ýadro bölegi) ýa-da giperýadro diýilýär, meselem

$$\lambda^0 -{}_2He^4 \to {}_2He^3 + p + \pi^- \quad (Q = 44 \ Mew).$$

Tiz wagtdan başa giperýadorlary açylýar. 8-nji tablisada gutarnykly kesgitlenilen giperýadorlar getirilýär.

1963-nji ýylda ${}_{\lambda\lambda}Be^{10}$ we ${}_{\lambda\lambda}Be^{11}$ ikeldilen giperýadolar açylypdyrlar.

8-nji tablisa

Giper-ýadro	${}_{\lambda}H^{3}$	${}_{\lambda}H^{4}$	${}_{\lambda}He^{4}$	${}_{\lambda}He^{5}$	${}_{\lambda}Li^{7}$	${}_{\lambda}Li^{8}$	${}_{\lambda}Li^{9}$	${}_{\lambda}Be^{8}$	${}_{\lambda}Be^{9}$	${}_{\lambda}C^{13}$
Giper-Ýadro-da λ^{0}-yň bagl. energ., Mew	$0{,}2\pm$ $\pm 0{,}5$	$1{,}81\pm$ $\pm 0{,}2$	$1{,}99\pm$ $\pm 0{,}2$	$2{,}82\pm$ $\pm 0{,}2$	$4{,}8\pm$ $\pm 0{,}5$	$5{,}6\pm$ $\pm 0{,}4$	$6{,}7\pm$ $\pm 0{,}7$	$6{,}8\pm$ $\pm 0{,}6$	$6{,}4\pm$ $\pm 0{,}4$	?

Giperýadro durnukly däl, onuň ýaşamaklygynyň dowamlygy λ_0-giperonyň ýaşaýyş wagtyna $\left(10^{-11} < \tau < 10^{-10}\ s\right)$ tertiplidir. Köp giperýadrolar mezonlary goýberip dargaýarlar (mezonly dargama):

$$ {}_{\lambda}He^{3} \rightarrow \begin{cases} He^{3} + \pi^{-}, \\ H^{2} + p + \pi^{-}; \end{cases} $$

$$ {}_{\lambda}He^{4} \rightarrow He^{3} + p + \pi^{-}; $$

$$ {}_{\lambda}He^{5} \rightarrow He^{4} + p + \pi^{-} \text{ we başg.} $$

λ^{0}-giperonyň dagramagynda emele gelýän π^{-}-mezon, soňra giperýadronyň nuklony bilen çaknyşmagy netijesinde siňdirilip biliner. Bu mezonsyz dargama getirýär

$$ {}_{\lambda}He^{4} \rightarrow 2p + 2n. $$

Leptonlar we adronlar. Şu ýerde leptonlar we adronlar barada käbir maglumatlary getireliň.

Ýokarda belinişi ýaly leptonlar diýip güýçli özaratäsire gatnaşmaýan bölejiklere aýdylýar, olaryň spini $\frac{1}{2}$, fermionlar. Olaryň esasy häsiýetnamasy 9-njy tablisada getirilýär.

Elektromagnit we gowşak özaratäsirlere gatnaşýan üç zarýadly lepton bar: elektron e^-, mýuon μ^-, taon τ^-. Olaryň her birine, diňe gowşak özaratäsirde gatnaşýan, neýtral bölejik degişli: elektronly neýtrino ν_e, mýonly neýtrino ν_μ we taonly neýtrino τ_ν. Mundan başga her bir leptonyň antileptony bar.

9-njy tablisa

Lepton-lar maşga-lasy	Bölejik	Lepton zarýady			Spin, ħ	Massa, Mew	Orta ýaşa-ýyş wagty, s.
		L_e	L_μ	L_τ			
Elektronly dublet E	e^- ν_e	+1 +1	0 0	0 0	½ ½	0,51< $46\cdot10^{-6}$	∞ ∞
Mýuonly dublet M	μ^- ν_μ	0 0	+1 +1	0 0	½ ½	105,66< 0,25	$2{,}2\cdot10^{-6}$ ∞
Taonly dublet T	τ^- ν_τ	0 0	0 0	+1 +1	½ ½	17,84<70	$3{,}5\cdot10^{-13}$?

Adronlar diýip güýçli özaratäsire real gatnaşýan we gatnaşyp biljek bölejiklere aýdylýar.

Olaryň ählisi, ýene-de, elektromagnit, gowşak we grawitasiýa özaratäsirlere hem gatnaşýarlar.

Adronlar maşgalasy aşakdakylardan durýar:

– “adaty” maşgala – pionlar, eta-mezon η we nuklonlar $(s = 0)$;

– täsin maşgala – K, D, F mezonlar.

λ-diperon, sigma, ksi we omýega giperonlar $(s \neq 0)$.

Ortaça $\tau >> 10^{-23}$ s. ýaşaýyş wagty stabil (has takygy metastabil) adronlary we $\tau \sim \left(10^{-24} \div 10^{-23}\right)$s. ýaşaýyş wagtly rezonanslary tapawutlandyrylýarlar.

§6. Geňlik. Izotopiki spin

Elementar bölejikleri häsiýetlendirýän käbir täze fiziki ululyklara seredeliň.

Nuklony iki dürli zarýad ýagdaýlarda bolup bilinjek bölejik diýip hasap edilýär: $+1$ (proton) we 0 (neýtron); ol $1/2$ orta zarýadly dubleti emele getirýär. Şu pikiri Geýzenberg, spini hasaba alýan elektron üçin Pauliniň deňlemesini formal taýdan ýada salýan, matematiki deňlemeleriň ulgamyny beýan edýär. Zarýadly ýagdaýy suratlandyrýan matematiki ululyga, spine meňzeşlikde, Geýzenberg izotopiki spin $\vec{T}$ diýip at beripdir. Kwant mehanikasyndan belli bolşy ýaly, şu wektoryň bolup biljek proýeksiýalary $(2T + 1)$, ol berlen T-de bölejikleriň sanyny berýär. Dürli tipli nuklonlaryň sany 2, diýmek $2T + 1 = 2$. Ondan nuklonyň izotopiki spininiň $T = 1/2$-e deňdigi gelip çykýar, ýagny proton we neýtron nuklon dubletini emele getirýärler. Şu izospiniň $+1/2$ proeksiýasyna proton, $-1/2$ proýeksiýasyna bolsa neýtron degişlidir.

Şuňa meňzeşlikde, π^+, π^0, π^--mezonlaryň özara çuňňur meňzeşligini hasaba alyp, olaryň izotopiki spini bire deň diýilip hasaplanylýar. Dogrydanam üç dürli pion üçin $2T + 1 = 3$, şu ýerden $T = 1$: $+1$ proýeksiýa π^+ mezona, -1 proýeksiýa π^- mezona, o bolsa π^0 mezona degişlidir.

Ýeke-täk elektrik zarýad arkaly aňladylan nuklon dubletiň orta zarýady

$$\overline{Z}_N = \frac{Z_p + Z_n}{2} = \frac{+1 + (0)}{2} = \frac{1}{2},$$

π-mezon tripletiň orta zarýady bolsa nola deň:

$$\overline{Z}_\pi = \frac{Z_{\pi^+} + Z_{\pi^0} + Z_{\pi^-}}{3} = \frac{+1 + 0 + (-1)}{3} = 0.$$

Diýmek, her bir zarýad multipleti orta zarýad bilen häsiýetlendirilýär. Adaty p, n, π^+, π^0, π^- bölejikleriň zarýady izotopiki spiniň proýeksiýasy T_ξ we barion (ýadro) zarýad B bilen aşakdaky ýaly baglanşykdadyr:

$$Z = T_\xi + \frac{B}{2}. \qquad (1)$$

Nirede, B - barion sany bolup, ol barionlar üçin $+1$, antibarionlar üçin -1, galan bölejikler üçin bolsa 0-a deň.

(1)-iň dogrydygyna göz ýetireliň:

proton üçin: $+1 = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = +1$;

neýtron üçin: $0 = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 0$;

π^+-mezonlar üçin: $+1 = +1 + \frac{0}{2} = +1$ we ş.m.

Geňlik we onuň saklanmagy. Geň bölejikleriň haýran galdyryjy häsiýetlerini düşündirmek üçin, 1953-54-nji ýyllarda Amerikan fizigi Gell-Mann we Ýapon fizigi Nisidzima izotopiki inwariantlyk prinsipini (ýadro güýçleriniň zarýada bagly däldigi) mundan beýläk ösdürip, ony K-mezonlara we giperonlara ýaýratmagy teklip edýärler. Ýöne, nuklonlardan we pionlardan aýratynlykda, indi zarýad aşakdaky gatnaşyk bilen kesgitlenilýär

$$Z = T_\xi + \frac{B+S}{2}. \qquad (2)$$

Ýokardaky aňlatma Gell-Mannyň-Nisidzimanyň gatnaşygy diýilýär.

Nirede S täze kwant sany, oňa geňlik diýilýär we $0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ \ldots$ bahalary alýar, multipletiň orta bahasy bolsa $\frac{B+S}{2}$ (süýşürilen multiplet) we $B+S$ ululyga "giperzarýad" diýilýär we Y bilen bellenilýär.

1970-nji ýyllarda haýran galdyrýan bölejikler açylandan soň, (2)-njiniň mundan beýläk ösdürilmegi talap edildi

$$Z = T_\xi + \frac{B+S+C}{2}. \qquad (3)$$

Bu ýerde C - haýran galdyran kwant sany. Tejribede “ajaýyp” bölejikler tapyldylar, nazaryýetiň öňünden aýtmagyna bolsa olar “hakyky” bölejikler bolmaly. Olar üçin hem soňky formulanyň ösdüriljekdigi şübhesizdir. “S” ululyk multipletiň ähli agzalary üçin bir, ýöne dürli multipletler üçin dürli bolup biler. Nuklonlar we pionlar üçin ol nola deň, K-mezonlar we giperonlar üçin noldan tapawutly we belli multiplatiň tipi bilen kesgitlenilýär. Diýmek ol adaty bölejikler üçin nola deň, geň bölejikler üçin bolsa nola deň däl, şonuň üçin oňa “geňlik” kwant sany diýilýär.

Kesgitleme: multipletiň geňligi diýip, geň bölejikleriň zarýadynyň orta bahasy bilen nuklonyň (ýa-da pionyň) zarýadynyň orta bahasynyň biri-birine görä süýşmesiniň ikeldilen bahasyna deň bolan fiziki ululyga aýdylýar.

Mysal üçin, izotopiki π-mezon tripletiň orta zarýady – onuň zarýadly merkezi – nola deň, K-mezon dubletiň orta zarýady $+1/2$. Görnüşi ýaly K-mezon dubletiň zarýadly merkezi π-mezon tripletiň zarýadly merkezine görä $+1/2$ ululyga süýşen. Şu ululygy iki sapar ulaldyp, K-bölejigiň geň sanyny alýarys:

$$S_K = +\frac{1}{2}\cdot 2 = +1.$$

Giperonlar barion toparyna degişli, şonuň üçin her bir giperon multipletiň zarýadly merkeziniň süýşmesini, oňa meňzeş – nuklon dubletiniň orta zarýadyna görä süýşmesi bilen deneşdirilýär.

Mysal üçin, λ^0 bölejik neýtral, onuň diňe bir özi multipleti emele getirýär, ýagny izotopiki singuletdir. Onuň orta zarýady nola deň. Şu ululyk nuklonyň orta zarýadyna $(+1/2)$ görä $-1/2$-e süýşendir. Şu ýerden

$$S_{\lambda^0} = \frac{1}{2} \cdot 2 = -1.$$

Izotopiki sigma-giperonlaryň zarýadly merkezi nola deň, diýmek ol bölejikleriň geňligi hem -1.

Ksi-giperon dubletiniň orta zarýady

$$\bar{Z}_{\xi} = \frac{\xi^{-} + \xi^{0}}{2} = \frac{-1+0}{2} = -\frac{1}{2}.$$

Bu ululyk, nuklonyň zarýadly merkezine görä -1 ululyga süýşen, diýmek olaryň geňligi -2. Omega-minus-giperon (Ω^{-}) bölejigiň zarýady -1.

Diýmek ol nuklonyň orta zarýadyna görä $-3/2$ ululyga süýşen, onda onuň üçin geňlik sany -3.

Umuman geňligiň bahasy (2)-nji formuladan ýeňil alynýar, onuň üçin ony şeýle göçüreliň:

$$S = 2\bar{Z} - 2T_{\xi} - B.$$

Şu ýerden

$$S_p = 2(+1) - 2\left(+\frac{1}{2}\right) - 1 = 0,$$

$$S_{\pi} = 2(+1) - 2(+1) - 0 = 0, \text{ we başg.}$$

(2)-nji deňlemeden geňligiň saklanmak kanuny gelip çykýar, ýagny izolirlenen ulgamlarda güýçli we elektromagnit özaratäsirlerde geňlik saklanýar. Bu kanun geň bölejigiň döremekligini, dargamagyny we siňdirilmegini aňladýan prosesleri görkezmek üçin ulanylýar. Dogry ýazylan prosesler üçin jemleýji geňlik deňligiň çepinde we sagynda bir bahaly bolmaly. Reaksiýalarda bölejikler üçin geňligiň bahasyny aşakdaky ýaly almaly;

$$S_{p,n} = 0,\ S_{\pi^+,0,-} = 0,\ S_{K^+} = +1,\ S_{K^-} = -1,$$

$$S_{\lambda^o} = -1,\ S_{\xi^0} = -2,$$

$$S_{K^0} = +1,\ S_{\tilde{K}^0} = -1,\ S_{\Sigma^{+0}_{-}} = -1,\ S_{\Omega^-} = -3.$$

Antibölejigiň geňligi alamaty bilen tapawutlanýar. 10-njy tablisadaky reaksiýalarda geňligiň saklanmak kanuny ýerine ýetýär we olar tebigatda duş gelýärler.

10-njy tablisa

Reaksiýalar	Geňligiň saklanma kununy
$\pi^- + p \to \lambda^0 - K_0$	$0+0=-1+1$
$\pi^- + p \to \Sigma^- + K^+$	$0+0=-1+1$
$p + p \to \lambda^0 + K^+ + p$	$0+0=-1+1+0$
$\pi^+ + n \to \Xi^- + K^+ + K^+$	$0+0=-2+1+1$
$\pi^- + p \to K^+ + K^- + n$	$0+0=+1-1+0$
$K^- + p \to \Omega^- + K^+ + K^0$	$-1+0=-3+1+1$

Şu hadysalaryň ählisinde jemleýji geňlik çepde we sagda meňzeş we $\Delta S = 0$.

11-nji tablisadaky reaksiýalarda $\Delta S \neq 0$, diýmek olar şu kanuna görä gadagandyrlar. Geňligiň saklanmak kanuny ýerine ýetýän ähli reaksiýalar tejribede alynýar.

11-nji tablisa

Reaksiýalar	Geňligiň saklanma kununy
$\pi^{+}+p\nrightarrow\Sigma^{+}+\pi^{+}$	$0+0\neq-1+0$
$\pi^{-}+p\nrightarrow\lambda^{0}+\pi^{0}$	$0+0\neq-1+0$
$p+n\nrightarrow\lambda^{0}+\Sigma^{+}$	$0+0\neq-1-1$
$n+n\nrightarrow\lambda^{0}+\lambda^{0}$	$0+0\neq-1-1$
$\pi^{-}+p\nrightarrow\Omega^{-}+K^{+}+K^{0}$	$0+0\neq-3+1+1$

§7. Lepton we barion zarýadlary, olara degişli saklanmak kanunlary

Lepton zarýady. Tebigatda gowşak özaratäsiriň köp sanly prosesleri duş gelinýär. Oňa β-dargama, $(\pi-\mu)$-dagrama, $(\mu-e)$-dargama, K-mezonlaryň we giperonlaryň dargamasy, μ-eýeleme we başg. degişlidirler. Olaryň ählisi iki topara bölünýär: leptonly we leptonsyz. Leptonlaryň gatnaşmagynda bolup geçýän haýal proseslere leptonly diýilýär. Geň bölejikleriň gatnaşýan proseslerine leptonsyz diýilýär. Iki toparyň köp zatlary meňzeş, meselem, olaryň özaratäsir hemişeligi örän ýakyn we iki toparyň proseslerinde jübtlik saklanmaýar. Ýöne her bir toparyň özboluşlygy bar. Leptonsyz haýal proseslerde geňlik ýerlikli rol oýnaýar. Leptonly tipli gowşak proseslerde bolsa lepton zarýady “L” diýen düşünje uly rol oýnaýar. Leptonlaryň üç maşgalasy belli we olaryň her birine zarýadly bölejik we neýtrino girýär: elektron dubleti $E = (e^-, \nu_e)$, mýuon dubleti $M = (\mu^-, \nu_\mu)$ we taon dubleti $T = (\tau^-, \nu_\tau)$. Ähli leptonlara $L = +1$ lepton zarýady ýazylýar, antileptonlar üçin $L = -1$. Lepton zarýady üç bölege bölünýär. $L = L_e + L_\mu + L_\tau$, nirede L_e-elektron zarýady, L_μ-mýuon zarýady we L_τ-taon zarýady, antileptonlar üçin olaryň alamaty tersdir.

Dürli görnüşli leptonlar özaraöwrüliş häsiýet bilen tapawutlanýarlar. Mysal üçin, reaksiýalar

$$\nu_e + n \to p + e^-, \quad \nu_\mu + n \to p + \mu$$

bolup bilýän, reaksiýalar

$$\nu_e + n \to p + \mu^-, \quad \nu_\mu + n \to p + e^-$$

bolsa bolup bilmeýänleriň hataryna girýärler.

Olara meňzeş prosesleriň barlanmagy esasda, 1962-nji ýylda, π^+-mezonlaryň dargamagynda döreýän mýuon neýtrinonyň ν_μ, ýadronyň β-dargamasyna gatnaşýan elektron neýtrinodan ν_e üýtgeşikdigi tejribede subut edildi.

Hemme özaratäsirlerde lepton zarýady we onuň görnüşleri heniz saklanýar diýip hasap edilýär, ýagny diňe mikrodünýä mahsus bolan lepton zarýadyň saklanmagy diýen kanun girizilýär. Lepton zarýadynyň saklanmak kanuny boýunça rugsat edilen we tebigatda dogrydanam duş gelinýän käbir reaksiýalary 12-nji tablisada getirilen.

Lepton zarýadyň saklanmak kanuny gadagan edilýän prosesler tebigatda duş gelmeýärler, mysal üçin, olara neýtrinosyz goşa β-dargama

$$2n \nrightarrow 2p + 2e^- \quad (0 \neq 0 + 2),$$

neýtronyň antineýtrony eýelemegi

$$n + \tilde{\nu} \nrightarrow p + e^- \quad (0 - 1 \neq 0 + 1)$$

we başgalar girýärler.

12-nji tablisa

Hadysalaryň görnüşleri	Prosesler	Lepton zarýadynyň saklanmagy
β^--dargama	$n \to p + e^- + \tilde{\nu}$	$0 = 0 + 1 - 1$
β^+-dargama	$p \to n + e^+ + \nu$	$0 = 0 - 1 + 1$
e-eýeleme	$p + e^- \to n + \nu$	$0 + 1 = 0 + 1$
$(\pi^+ - \mu^+)$-dargama	$\pi^+ \to \mu^+ + \nu$	$0 = -1 + 1$
$(\pi^- - \mu^-)$-dargama	$\pi^- \to \mu^- + \tilde{\nu}$	$0 = +1 - 1$
$(\mu^+ - e^+)$-dargama	$\mu^+ \to e^+ + \nu + \tilde{\nu}$	$-1 = -1 + 1 - 1$
$(\mu^- - e^-)$-dargama	$\mu^- \to e^- + \nu + \tilde{\nu}$	$1 = 1 + 1 - 1$
$(K^+ - \mu^+)$-dargama	$K^+ \to \mu^+ + \nu$	$0 = -1 + 1$
$(K^- - \mu^-)$-dargama	$K^- \to \mu^- + \tilde{\nu}$	$0 = +1 - 1$
μ-eýeleme	$\mu^- + p \to n + \nu$	$1 + 0 = 0 + 1$

Barion zarýady. Ýadro özaratäsirlerini tejribede barlamaklaryň netijesinde, olaryň hemmesinde bölejikleriň jemlenen elektrik zarýady we nuklonlaryň doly sany (barion zarýady) saklanylýar. Onuň şeýledigi 13-nji tablisada aýdyň görünýär.

13-nji tablisa

Reaksiýalar	Elektrik zarýady	Nuklonlaryň sany
${}_1H^2 +{}_1 H^2 \to{}_2 He^3 + n$	$1+1=2+0$	$2+2=3+1$
$p+{}_3 Li^7 \to{}_4 Be^7 + n$	$1+3=4+0$	$1+7=7+1$
$\gamma +{}_4 Be^9 \to 2{}_2 He^4 + n$	$0+4=4+0$	$0+9=2\cdot 4+1$
$\gamma +{}_1 H^2 \to p+n$	$0+1=1+0$	$0+2=1+1$
$n+{}_{16} S^{32} \to{}_{15} P^{32} + p$	$0+16=15+1$	$1+32=32+1$
$\alpha +{}_7 N^{14} \to{}_8 O^{17} + p$	$2+7=8+1$	$4+14=17+1$
${}_1H^3 \to{}_2 He^3 + e^- + \tilde{\nu}$	$1=2-1+0$	$3=3+0+0$
${}_{88}Ra^{226} \to{}_{86} Rn^{222} +{}_2 He^4$	$88=86+2$	$226=222+4$
${}_4Be^7 + e^- \to{}_3 Li^7 + \nu$	$4-1=3+0$	$7+0=7+0$

Nuklonlaryň sanynyň saklanmak kanuny tebigatda $p+e^- \not\to 2\gamma$ (wodorod atomynyň “annigiliýasyýasy”) tipli prosesiň bolup bilmejekdigini tassyklaýar, ýagny Älem durnuklydyr.

Ýokardaky saklanmak kanunlardan ugur alyp, elementar bölejikleriň arasyndaky reaksiýalaryň algebrasyna seredeliň.

Elementar bölejikleriň arasynda bolup geçýän reaksiýalar, birinjiden, öwrülip bilijilik ukypdadyrlar: eger bir bölejik iki bölejige dargaýan bolsa, onda öz gezeginde, şol iki bölejik birleşip başdaky bölejigi dikeldip bilerler. Ikinjiden, bölejigiň göýberilmegi onuň antibölejiginiň siňdirilmegi bilen baglydyr.

Şu iki düzgün, elementar bölejikler fizikasynda “mesele” çözmek üçin özboluşly algebrany berýär.

Birnäçe mysallary getireliň

I. Ferminiň prosesi. Neýtron p, e^-, $\tilde{\nu}$ bölejiklere bölünýär

$$n \to p + e^- + \tilde{\nu}.$$

Ters reaksiýa: p, e^- we $\tilde{\nu}$ birlişip neýtrony emele getirýärler.

.

Saga elektrony antibölejik ýaly geçireliň. Proton $\tilde{\nu}$ bilen täsir edip, n we e^+ emele getirýär

$$p + \tilde{\nu} \to n + e^+.$$

II. Ýukawanyň prosesi. Proton wirtual halda protona we neýtral piona bölünýär

$$p \to p + \pi^0.$$

Ters reaksiýa. Proton we π^0 birleşip proton alynýar

$$p + \pi^0 \to p.$$

Protony sag tarapa antiproton ýaly geçireliň.

Pion protona we antiprotona bölünýär

$$\pi^0 \to p + \tilde{p}.$$

Belli bolşy ýaly p we $\tilde{p}$ özaratäsir edip fotony berýär

$$p + \tilde{p} \to \gamma + \gamma.$$

Onda ahyrky netije: neýtral pion fotonlara dargaýar:

$$\pi^0 \to \gamma + \gamma.$$

III. Ýukawanyň prosesi. Proton wirtual n we π^+ bölejiklere bölünýär

$$p \to n + \pi^+.$$

Ters reaksiýa. n we π^+ birleşip protony berýär

$$n + \pi^{+} \rightarrow p \, .$$

Neýtrony sag tarapa $\tilde{n}$ ýaly geçireliň. Položitel pion p we $\tilde{n}$ bölejiklere bölünýär.

$$\pi^{+} \rightarrow p + \tilde{n} \, .$$

IV. Ferminin prosesi. Proton $\tilde{\nu}$ bilen özaratäsir edip e^{+} we n bölejikleri berýär

$$p + \tilde{\nu} \rightarrow n + e^{+} \, .$$

Deňligiň dürli taraplaryna $\tilde{\nu}$ we n bölejikleri ν we $\tilde{n}$ görnüşde geçireliň. Proton $\tilde{n}$ bilen täsir edip e^{+} we ν bölejikleri berýär

$$p + \tilde{n} \rightarrow e^{+} + \nu \, .$$

Başga tarapdan $\pi^{+} \rightarrow p + \tilde{n}$, onda gutarnykly netijede π^{+}-mezon e^{+} we ν bölejiklere dargaýar

$$\pi^{+} \not\rightarrow e^{+} + \nu \, .$$

Şeýle pikirlenmelerde bolup bilinmejek zadyň ýüze çykmagy ähtimaldyr. Oňa aýdyň mysal soňky prosesdir. Onda lepton zarýady saklanmaýar.

§8. Elementar bölejikleriň toparlary

Häzirki döwürde elementar bölejikler fizikasynyň çözülmedik meseleleriniň biri bolup olaryň degişli toparlara bölünmegidir. Şu ugurda dikeldilen fundamental kanun we ylmy nazaryýet ýok. Şu meselede esasy maksat, D. Mendeleýewiň himiki elementler üçin periodiki kanunyna meňzeş elementar bölejikleriň periodiki kanunyny açmakdan durýar. Eger şeýle periodiki kanuna boýun egýan elementar bölejikleriň ulgamy açylsa, onda haýsy bölejigiň hakykatda-da elementardygyny (sözüň hakyky manysynda ýönekeýdigini) we ýene-de haýsy bölejigiň nähili ýol bilen açylyp bilinjekdigini deslapky aýdyp bolardy. Şu ugurda ilki bilen gaýra goýmazdan çözülmeli bir näçe meseleler bar.

XIX asyryň 50-nji ýyllarynyň başynda 60-a golaý himiki elementler bellidiler. Olaryň tertip belgisine Z we massasyna A esaslanyp, Mendeleýew 1869-njy ýylda himiki elementleriň ulgamyny düzýär.

Elementar bölejikler dünýäsinde mesele düýp-göter başga we çylşyrymly. Häzirki wagtda olaryň sany barada belli bir kesgitli tassyklama ýok. Bir ýerde olaryň sany 200-den, başga bir ýerde 400-e golaý, ýene bir ýerde 1000-den köp diýilýär. Umuman aýdaňda olar örän köp. Ikinji tarapdan, olary kesgitleýän fiziki ululyklaryň sanawy, elementar bölejikleriň sanynyň artmak bilen köpelip gidip otyr. Şu iki düzgünnamany bir ýönekeý ulgamda hasaba almak düýbünden bolup bilinmejek zat. Diýmek, bir tarapdan fundamental bölejikleriň sanyny we ikinji tarapdan bolsa, fiziki ululyklaryň sanawyny hem mümkin boldugyça minimuma getirmeli.

Ýokarda bellenilişi ýaly, häzir bölejikleriň belli bir klassifikasiýasy ýok, ýone bölejikleriň sistematikasy barada köpsanly gipotezalar bar, olar bölejikleriň bölekleýin käbir häsiýetlerini birleşdirýärler.

Bölejikleriň sany 10-na golaýlanda, käbir alymlar (Iwanenko we Kedrow) olaryň diňe dynçlyk massalaryna esaslanyp olary toparlamagy teklip edipdirler. Olar, bölejikleriň massasynyň artmak tertibi boýunça, ýerleşdiripdirler we has ýönekeý bölejikden çylşyrymla geçmeklik yzygiderligi alypdyrlar: grawiton, neýtrino (we antineýtrino), elektron (we pozitron), mýu-mezonlar, proton we neýtron.

Şeýle toparlanma aýdyň çäkli, sebäbi bölejikleriň başga häsiýetnamalary hasaba alynmaýar.

1956-njy ýylda ýapon alymy S. Sakata mezonlaryň we barionlaryň klassifikasiýasynyň shemasyny hödürleýär. Onuň hödürlän modeline görä, üç fundamental barionlar (proton, neýtron we lýambda-giperon) bolup, olardan (we olaryň antibölejiklerinden) ähli mezonlar we giperonlar gurulýarlar. Meselem, π^+-mezon p we $\tilde{p}$, $\pi^- - n$ we $\tilde{p}$, Σ^+-giperon p, λ we $\tilde{n}$ bölejiklerden durýar we başg.

Belli bolşy ýaly, proton we neýtron örän meňzeşdir. Atom ýadrosyny gurmakda olar biri-birini çalşyp bilýär. H^3 we He^3 häsiýetleri boýunça örän meňzeş. Nuklonlaryň şeýle häsiýetine – ähli ýagdaýlarda diýen ýaly biri-birini çalyşmagy – ýadro güýjüniň simmetrikligi diýilýär. Ýene-de bir simmetriklige – zarýad simmetriýasyna – görä položitel we otrisatel pionlaryň massasy biri-birine deň. Meňzeş bölejikleriň izotopiki multipletlere şeýle toparlanmagy simmetriýanyň ýüze çykmagyny aňladýar.

1961-nji ýylda Gell-Mann we Neýeman unitar simmetriýa diýip at berilen shemanyň nazary esasyny goýdylar. Protonyň izotopik spininiň düzüjisi “$+\frac{1}{2}$”, neýtronyňky “$-\frac{1}{2}$”, ýagny izotopiki spinory emele getirýär. Izospinory özgertmek üçin U kompleks matrisa ulanylýar we onuň ölçegi 2×2 (okalýar “ikini ikä”). Şu matrisa aşakdaky şertleri kanagatlandyrmaly:

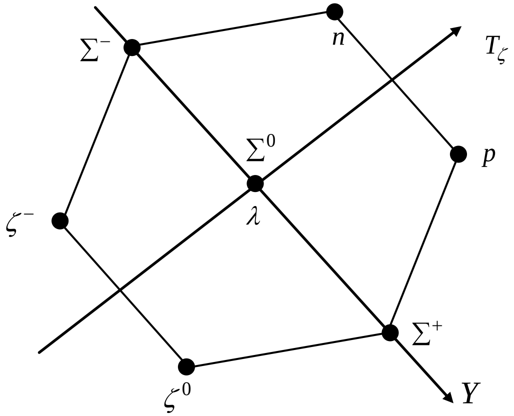
1. unitarlyk şerti$\left(U^{+}U = I\right)$, nirede U^{+}-ermit-çatrymly matrisa, I bolsa 2×2 birlik matrisa;

2. unymodulýarlyk şerti $(\det U = 1)$.

Şeýle matrisalar $SU(2)$ (okalýar “es-u-iki”) toparyň ýönekeý aňladylmasydyr. Şu ýerde S özgertmäniň ýöriteligini (berilen ýagdaýda unimodulýar), U harpy bolsa olaryň unitarlygyny, san 2 bolsa toparyň ýönekeý aňladylmasynyň ikihatarly topardygyny, aňladýar. Aňladylmanyň ýönekeý giňişligi – ikikomponentli spinor.

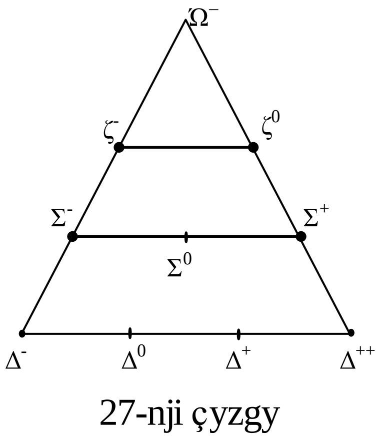
Gell-Manyň we Neýemanyň modelinde mezonlar we barionlar Sakatanyň shemasyna meňzeş shema boýunça emele getirilýärler. Ýöne onda fundamental diýip üç barion alynman, barionlaryň ähli sekizligi kabul edilýär. Olar p, n, λ, Σ^{+}, Σ^{0}, Σ^{-}, ζ^{-} we ζ^{0}. Bu topar oktet ady göterýär we unitar simmetriýa laýyklykda oktetdäki ähli bölejikler düýbünden tapawutlandyrylmasyzdyr, olar toždestwolaýyndyrlar. Massa, izotopiki spin we giperzarýad boýunça tapawutlandyrmak güýçli özaratäsiri arkaly bolýar.

Oktetiň (T_ζ, Y) tekizlikdäki diagrammasy (26-njy çyzgy).



26-njy çyzgy

Nazaryýetiň uly üstünligi, üçburçlyk shemasy boýunça ýerleşýän on bölejiklerden ybarat bolan topara degişli. Olaryň, ýagny dekupletiň diagrammasy 27-nji çyzgyda berilýär.

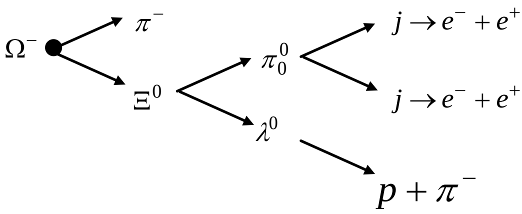


27-nji çyzgy

Multip-letlik	Geňlik	Spin
Singlet	–3	$+\frac{3}{2}$
Dublet	–2	$+\frac{3}{2}$
Triplet	–1	$+\frac{3}{2}$
Kwartet	0	$+\frac{3}{2}$

1961-1962-nji ýyllarda şu toparyň diňe dokuz bölejikleri bellidirler. Delta bölejikleriň massasyndan sigmanyň, soňkydan ksiniň, diýmek, ksiniň massasynyň esasynda onunjy (belli däl) bölejigiň massasy dikeldilýär, ol 1675 Mew bolmaly.
Onuň ýeke-täkligi, geňligiň “-3”-e deň bolmalydygy diagrammadan görünýär. Şeýle häsiýetnamaly bölejik, Gell-Mann tarapyndan öňünden aýdylan omega-minus-giperon $\left(\Omega^-\right)$ bolmaly. Ol tejribe arkaly hem subut edildi.

Ω^-- giperonyň zarýady $Z = -1$, massasy $= (3278 \pm 6) m_0$; $\tau \approx 0{,}7 \cdot 10^{-10} s$ wagtdan soň çylşyrymly shema boýunça dargaýar (28-nji çyzgy).



28-nji çyzgy

§9. Materianyň kwark modeli. Başga gipotezalar.

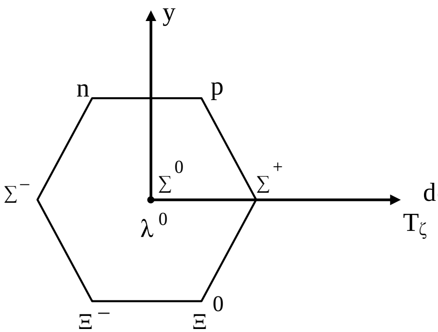
1952-nji ýylda Fermi pionyň protonlarda dargamagyny barlp başlapdyr. Pionyň energiýasy $200\ Mew$ golaýlanda, dargamanyň kese-keseginde ýiti maksimumyň döreýändigini ol tapýar. Şol maksimum ýagdaýa rezonans diýilýär. Rezonansa şeýle düşünmeli, özara täsiriň netijesinde pion we proton bir täze bölejige guýulýarlar, häzir oňa “delta” Δ – bölejik diýilýar. π^{+}, π^{0}, π^{-} pionlary protonda we neýtronda dargadyp, Δ^{-}, Δ^{0}, Δ^{+}, Δ^{++} rezonanslar alynýar. Olaryň dynçlyk massasyna degişli energiýa $1236\ Mew$, spini $\frac{3}{2}$.

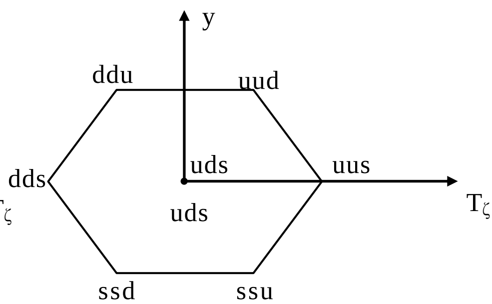
Mikrobölejikleri toparlara bölmek babatynda ähli bölejikleriň “iň fundamental” bölejikleriň üç görnüşinden düzülendir diýen gipoteza görnükli orna eýedir. Olara Gell-Mann “kwarklar” diýip at beripdir. Soňra olaryň sany artdy. Kwarklaryň alty hili, ýada “hoşboý ysy” bar diýip çaklanylýar. Edil leptonlar ýaly, olar üç dubleti, ýa-da nesili: (u,d), (e,s), (t,b) emele getirýärler, ýagny nazary nukdaý nazardan çuň kwark-lepton simmetriýany emele getirýärler. Antleptonlaryň üç dubletine antikwarklaryň üç nesili degişlidir. Kwarklaryň birinji iki nesiliniň esasy kwant sanlarynyň bahasy 14-nji tablisada getirilýär.

14-nji tablisa

Kwark	Şek i-li	S spin	B	T	T_3	Geň -lik S	c	Q
Ýokarky (up)	u	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	$+\frac{2}{3}$
Aşaky (down)	d	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	$-\frac{1}{3}$
Geňlik (strange)	s	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	0	0	–1	0	$-\frac{1}{3}$
Haýran (charm)	c	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	0	0	0	+1	$+\frac{2}{3}$

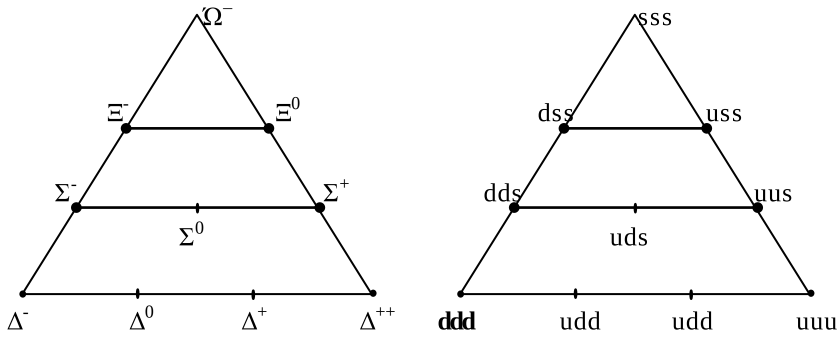
Oktet we dekuplet toparlaryň agzalarynyň her biriniň haýsy we nähili gurulandygy degişlilikde 29-njy we 30-njy çyzgylarda görkezilýär.





29-njy çyzgy

Dekuplet barionlaryň kwark strukturasyny aňladýan shema özboluşly yzygiderli we aýdyň: 10 bölejik bar, olaryň her biri üç düzüjiden durýar we şu üçlükden diňe 10 dürli ýerleşmeleri emele getirip boljakdygy düşnüklidir.



30-njy çyzgy

Eger kwarkyň magnit momenti onuň elektrik zarýadyna proporsional diýsek, onda ýazyp bileris

$$\mu_u = +\frac{2}{3}\mu_1;\ \mu_d = -\frac{1}{3}\mu_1;\ \mu_s = -\frac{1}{2}\mu_1,$$

nirede μ_1 – öňden belli bolmadyk haýsy hem bolsa bir “kwark magnetony”, ol kwarklaryň magnit momentleriniň birligi. Oktetiň we dekupletiň agzalarynyň her biriniň magnit momenti üç kwarklaryň hususy magnit momentleriniň jemine ýönekeý suratda deňdir:

$$\mu_{\Delta^{++}}(u\uparrow u\uparrow u\uparrow)=+\frac{2}{3}\mu_1+\left(+\frac{2}{3}\mu_1\right)+\left(+\frac{2}{3}\mu_1\right)=2\mu_1;$$

$$\mu_{\Delta^{+}}(u\uparrow u\uparrow d\downarrow)=+\frac{2}{3}\mu_1+\left(+\frac{2}{3}\mu_1\right)+\left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)=\mu_1;$$

$$\mu_{\Delta^{0}}(u\uparrow d\uparrow d\uparrow)=+\frac{2}{3}\mu_1+\left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)+\left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)=0;$$

$$\mu_{\Delta^{-}}(d\uparrow d\uparrow d\uparrow)=-\frac{1}{3}\mu_1+\left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)+\left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)=-\mu_1;$$

$$\mu_{\Delta^{+}}(u\uparrow u\uparrow s\uparrow)=+\frac{2}{3}\mu_1+\left(+\frac{2}{3}\mu_1\right)+\left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)=\mu_1$$

we başg.

Spini $\frac{1}{2}$-e deň barionlar üçin ýagdaý bir az üýtgeşik, ýagny haýsy hem bolsa bir kwarkyň spini galan iki kwarklaryň spininiň tersine ugrukdyrylandyr.

Shemadan görnüşi ýaly proton üç kwarkdan durýar. Onuň “struktura” formulasy şeýle: (uud). Şeýle kwarklaryň üçlüginiň zarýady:

$$+\frac{2}{3}+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}=+1.$$

Neýtrona (udd) formula degişli we zarýadlaryň jemi

$$+\frac{2}{3}+\left(-\frac{1}{3}\right)+\left(-\frac{1}{3}\right)=0.$$

Protonyň spini iki usul bilen alynyp biliner: $u\uparrow u\downarrow d\uparrow$ we $u\uparrow u\uparrow d\downarrow$. Kwarklaryň tolkun funksiýasyna esaslanyp birinji kombinasiýanyň $\frac{1}{3}$, ikinjiniň bolsa $\frac{2}{3}$ ähtimallyk bilen ýüze çykýanlygy görkezilipdir, onda protonyň orta magnit momenti üçin tapýarys:

$$\mu_p = \frac{1}{3}\left[\frac{2}{3}\mu_1 - \left(+\frac{2}{3}\mu_1\right) + \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)\right] + \\ + \frac{2}{3}\left[\frac{2}{3}\mu_1 + \left(+\frac{2}{3}\mu_1\right) - \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)\right] = \mu_1 .$$

Meýtron üçin $u\uparrow d\uparrow d\uparrow$ kombinasiýa $\frac{1}{3}$, $u\downarrow d\uparrow d\uparrow$ kombinasiýa bolsa $\frac{2}{3}$ ähtimallyk bilen amala aşyrylýar:

$$\mu_n = \frac{1}{3}\left[\frac{2}{3}\mu_1 + \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right) - \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)\right] + \\ + \frac{2}{3}\left[-\left(+\frac{2}{3}\mu_1\right) + \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right) + \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)\right] = -\frac{2}{3}\mu_1 .$$

Onda neýtronyň we protonyň magnit momentleriniň gatnaşygy bolýar:

$$\frac{\mu_n}{\mu_p} = \frac{-\frac{2}{3}\mu_1}{\mu_1} = -\frac{2}{3} = -0,667 .$$

Şu ululyk, tejribede alynan $(-0{,}685)$ ululykdan 3% hem az tapawutlanýar. Bu ýagdaý kwark düşünjäniň haýrynadyr.

Başga gipotezalar:

1. 1960-njy ýylda S. Sakata özüniň öňki pikirini ösdürip, materiýanyň bütewi ulgamyna leptonlary birikdirmegi teklip edýär. Esas görnüşde, üç lepton (v, e^-, μ^-) we materiýanyň täze bir görnüşi B^+ meýdan hasaplanylýar. Mysal üçin, proton, neýtron we λ - giperon şeýle emele getirilýär

$$p = < B^+ v >;\ n = < B^+ e^- >;\ \lambda = < B^+ \mu^- >;$$

2. Ýagtylygyň neýtrinoly nazaryýetine laýykda foton biri-birine guýulan neýtrino jübti ýaly hem seredilýär: $\gamma \sim (v\tilde{v})$;
3. 1949-njy ýylda Fermi we Ýang π – mezonyň nuklondan we antinuklondan emele getirilen ulgamy görnüşde alynyp bilinjegi baradaky pikiri aýdýarlar;
4. Goldgaberiň modeline laýyklykda, giperonlar nuklonlardan we antika-mezonlardan durýarlar diýip hasap edilýär:

$$\Sigma^- = n + K^-;\ \Sigma^+ = p + \tilde{K}^0;\ \Sigma^0 = p + K^-;$$

$$\lambda^0 = n + \tilde{K}_0;$$

5. Markowyň modeli boýunça giperonlar nuklonlaryň (barionlaryň) oýandyrylan ýagdaýy ýaly seredilýär;
6. 1953-1958-nji ýyllarda, Geýzenberg özüniň işgärleri bilen materiýanyň bütewi çyzyklydäl nazaryýetini ösdürýär. Ähli belli elementar

bölejikleri (we anyk fiziki meýdanlary) bütewi esasy “dünýa” meýdanyna ýanaşdyryp bolýar. Oňa “pramateriýa” ýa-da “prameýdan” diýilýär.

§10. Jübütliligiň saklanmazlygy

1949-njy ýylda, örän ýokary beýiklikde kosmiki şöhleler bilen şöhlelendirilen fotoplastinkalary barlamagyň netijesinde täze elementar bölejikleri açyldylar. Şol fotoplastinkada dört yzdan (trekden) duran ýyldyz tapylýar. Birinji bölejikleriň dargamasynyň shemasy τ – mezon diýip atlandyrylýar:

$$\tau^{\pm} \to \pi^{\pm} + \pi^{+} + \pi^{-}.$$

Oňa K_{π_3} – mezon hem diýilýär.

Ol bölejik bir zarýadly we iki neýtral pionlara hem dargap bilýär

$$\tau^{\pm} \to \pi^{\pm} + \pi^{0} + \pi^{0}.$$

Şu bölejigiň $m_{\tau} = 966 m_0$, $t_{\tau} = 10^{-8} s$.

1951-nji ýylda, magnit meýdanda ýerleşdirilen Wilsonyň kamerasynyň kömegi bilen kosmiki şöhleler barlanylanda Θ^0 – mezon açylýar we ol iki zarýadly piona dargaýar:

$$\Theta^{0} \to \pi^{+} + \pi^{-}.$$

Onuň $m_{\Theta} = 965 m_0$, $t_{\Theta} = 10^{-10} s$

Olaryň ikisiniň hem spini deň. Şeýlelikde olaryň häsiýetleri örän ýakyn, onda olar iki däl-de bir bölejik, ýöne soňky bölejik iki ýol (iki we üç piona) ýol bilen dargaýar. Bu tassyklama fizikanyň käbir esasy düzgünnamasynyň bozulmagyna getirýär. Oňa göz ýetirmek üçin ulgamyň jübtligi düşünjäni girizeliň. Gysgaça aýdylanda, jübtlilik – matematiki düşünje. Goý, fiziki ulgamyň ýagdaýy $\varphi(x, y, z)$ tolkun funksiýasy bilen suratlandyrylýar diýip hasap edeliň.

Eger koordinatalaryň ählisiniň alamaty üýtgedilse, ýagny koordinatyň sag ulgamyndan çepe geçilse (tolkun funksiýanyň şeýle özgerdilmegine inwersiýa diýilýär), onda φ funksiýanyň modulynyň kwadraty üýtgemän galmalydyr, ýagny ýagdaýyň häsiýeti koordinat ulgamynyň saýlanyp alynmagyna bagly bolmaly däldir. Şu taýdan, $\varphi'(-x,-y,-z)$ tolkun funksiýa, $\varphi(x, y, z)$ funksiýa bilen $c = \pm 1$ hemişelige çenli gabat gelmelidir. Şuňa degişlilikde ähli ýagdaýlary iki topara bölüp bolýar: jübüt we jübütsiz.

Inwersiýa özgertmesinde (ýa-da aýnaly serpikdirmede) tolkun funksiýa özüniň bahasyny, has takygy alamatyny üýtgetmese, onda ulgamyň ýagdaýy jübüt diýilýär we deňlik dogrydyr

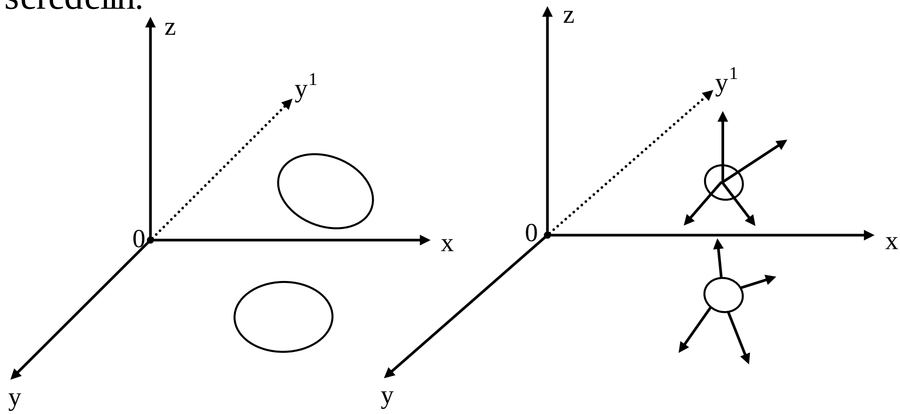
$$\varphi(x, y, z) = +\varphi(-x,-y,-z). \qquad \textbf{(1)}$$

Jübütsize

$$\varphi(x, y, z) = -\varphi(-x,-y,-z), \qquad \textbf{(2)}$$

deňligiň dogry bolan ýagdaýlar degişlidirler. **(1)**-nji gatnaşygy kanagatlandyrýan tolkun funksiýasy bilen suratlandyrylýan bölejige položitel içki giňişlik jübütli diýilýär, **(2)**-nji gatnaşygy kanagatlandyrýan tolkun funksiýasy bilen suratlandyrylýan bölejige bolsa otrisatel içki giňişlik jübütli diýilýär.

Jübtlilik düşünjä düşünmek üçin 31-nji çyzga seredeliň.



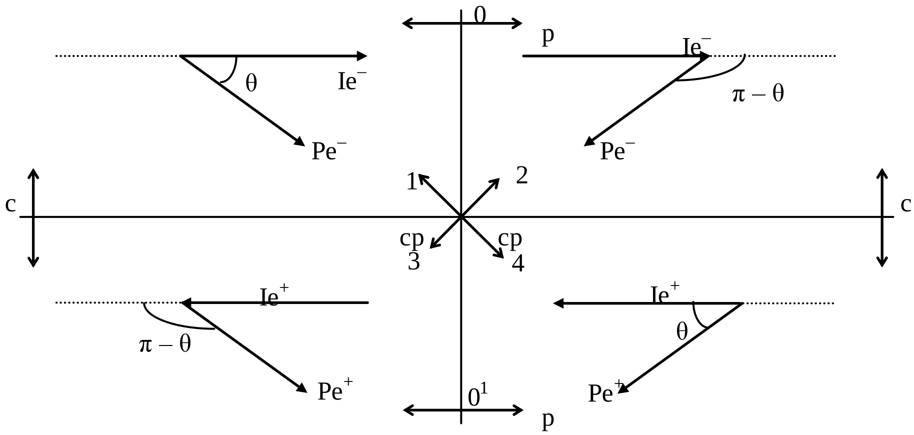
31-nji çyzgy

xoz tekizlige görä aýnaly serpikdirmede täze ulgam koordinaty alynýar we onuň y' okunyň y oka ters boljakdygy şübhesizdir, üstesine-de, täze ulgamy hiç hili aýlanma bilen başdaka gabat getirip bolmaýar. Islendik simmetrik zady *xoz* tekizlikde *oz* oka görä serpikdirseň, onda şol zat bilen hemme taraplaýyn gabat gelýän şekili alarys. Eger zat simmetrik bolmasa, onda onuň şekili aýnaly öwrülendir. Birinji hal jübtli ulgama, ikinjisi bolsa jübütsiz ulgama degişli diýip hasap edilýär.

Ulgamyň jübütliligi, degişli saklanmak kanuna boýun egýär. Şu kanuna laýyklykda wagta görä ulgamyň jübütliligi üýtgemeýär. Ýapyk ulgamda jübütlilik hiç wagt öz bahasyny üýtgetmeýär. Wagta görä jübütliligiň üýtgemegi inwersiýa özgertmede giňişligiň simmetriýasynyň bozulmagyny aňladýar.

Ýokarda getirilişi ýaly, tau-mezon darganda pionlaryň jübüt däl, teta-mezon bolsa – jübüt toparyny berýär. Jübütliligiň saklanmak kanuny boýunça, tau we teta-mezonlar dürli jübütlige eýe bolmaly we, diýmek, dürli bölejikler bolmaly. Şu bölejikler gowşak özaratäsire degişlidirler. Şeýlelikde diňe gowşak özaratäsirde jübütligiň saklanylmaýan şertinde tau we teta-mezonlary şol bir bölejik diýip hasap edip bolýar. Şeýle tassyklamany, 1957-nji ýylda hytaý alymlary Li we Ýang öňe sürüpdirler. Olar şeýle düşündiripdirler:

Suratda: 00′ – aýna, *p* – inwersiýa, *c* – zarýadly çatrymlyk we *cp* – kombinirlenen inwersiýa.



32-nji çyzgy

Ýokary çep tarapynda ýadronyň β – dargamasy görkezilýär, onuň spini I çepden saga gönükdirilen, uçup çykýan elektronyň P_{e^-} impulsyň ugry $2\Theta - \pi$ burça üýtgeýär, spin bolsa üýtgemeýär. Netijede spin bilen impulsyň arasyndaky burç $\Theta - (2\Theta - \pi) = \pi - \Theta$, giňişligiň simmetriýasy bozulýar.

Şu tassyklamany tiz wagtdan soň tejribede Wunuň ýolbaşçylygyndaky fizikler (ABŞ) subut etdiler. Olar Co^{60} polýarizirlenen ýadrolaryň β-dargamasyny öwrenýärler

$$Co^{6} \rightarrow N^{60} + e^{-} + \nu .$$

Netijede, ýadronyň spininiň ugry boýunça uçup çykýan elektronlaryň mukdarynyň, onuň garşysyna uçup çykýanlardan has azlygy aýan bolupdyr, ýagny gowşak özaratäsirde jübütligiň bozulýanlygy subut edilipdir. Landaunyň gipotezasyna görä cp-inwersiýada, ýagny $1 \leftrightarrow 4$ we $2 \leftrightarrow 3$ özgertmede ähli özaratäsirler saklanýarlar.

1984-nji ýylda şeýle kombinirlenen inwersiýanyň hem bozulýanlygy subut edildi.

Ýöne has umumy teorema ("cpt"-teorema ýa-da Pauliniň -Lýudersiň teoremasy) laýykda ähli özaratäsirler simmetrikdirler (inwariantdyrlar).

§11. Feýnmanyň diagrammalary

Kwant elektrodinamikasynda wirtual prosesleri suratlandyrmak üçin oňaýly grafiki usul ulanylýar. Bu usul ilkinji gezek Feýnman (ABŞ) tarapyndan hödürlenipdir. Şol sebäpli giňişlige we wagta görä bolup geçýän mikroprosesleri aňlatmak üçin ulanylýan grafiki shemalar Feýnmanyň diagrammalary diýip atlandyrylýarlar. Şu usulyň manysyna seredeliň. Goý, şu grafikde wagt çepden saga ugrukdyrylan diýeliň, ýagny çepde prosesiň başlangyç ýagdaýy, sagda bolsa ahyrky ýagdaýy görkezilýär. Fiziki proseslere gatnaşýan her bölejik Feýnmanyň diagrammasynda özüne degişli çyzyk bilen görkezilýär. Dürli bölejikleriň dürli çyzyklar bilen aňladylmagy düşnüklidir. Biz aşakdaky bellemelerden ugur alarys:

Barionlar ýogyn göni çyzyk bilen şekillendirilýär

Pionlar we kaonlar byçgameňzeş çyzyk bilen şekillendirilýär.

Elektron inçe göni çyzyk ýaly şekillendirilýär

Foton inçe tolkun görnüşli çyzyk bilen şekillendirilýär

Neýtrino punktir çyzyk bilen şekillendirilýär

Kesgitlilik üçin her bir çyzygyň ýanynda bölejigiň şekili hem goýulýar.

Ýokarda görkezilen bellikler Feýnmanyň ýönekeý triwial diagrammalarydyr.

Şol çyzyklaryň her biri degişli bölejigiň erkin hereketini suratlandyrýar. Onuň erkin çep gutaran ýeri bölejigiň başlangyç ýagdaýdadygyny aňladýar, sag ahyrky ýeri bolsa onuň ahyrky ýagdaýda ýerleşýändigini görkezýär. Çyzyklaryň üstünde hiç hili goşmaça gurmanyň (düwüniň) ýoklygy, bölejigiň elmydama erkin galýandygyny görkezýär. Bölejikleriň özaratäsiri diagrammada düwün bilen şekillendirilýär.

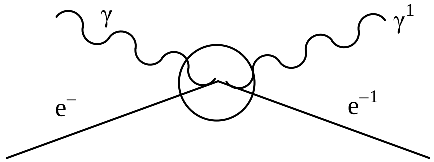
Düwün – bu girýän ýa-da çykýan çyzykly tegelejik (ýa-da nokat). Düwün tutuş prosesi, şonuň ýaly-da onuň aýratyn etaplaryny suratlandyryp biler. Mysal üçin, tutuş kompton effekt 1-nji çyzgyda görkezilen diagramma bilen aňladylýar.

Kompton effektiň mehanizmi baradaky häzirki zaman aňladylmasy aşakdaky shema bilen aňladylýar

$$\gamma + e^- \to \left(e^-\right)_W \to \gamma^1 + e^{-1} \qquad (1)$$

"W" bellikli ýaýa alynan elektronyň wirtual häsiýetlidigini aňladýar.

Ýokardaky diagramma tutuş Kompton effekti doly suratlandyrýar, ýöne ol has umumy we prosesiň mehanizmi barada aňladylmany bermeýär. Eger kompton effektiň esasy mehanizmi diýip fotonyň wirtual siňdirilmegi we goýberilmegi hasap edilse, onda 33-nji çyzgydaky diagrammada düwüni anyklap we ony **(1)**-e degişli formada şekillendirip bolýar.

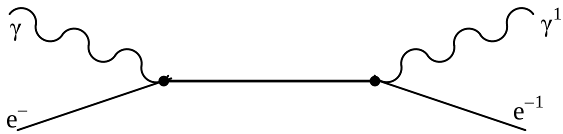


33-nji çyzgy. $\gamma + e^{-} \to \gamma^{1} + e^{-1}$ kompton effektiň umumy diagrammasy.

Köplenç düwüne diagrammanyň depesi diýilýär. Düwüniň 33-nji çyzgyda tegelejik, 34-nji çyzgyda bolsa nokat bilen görkezilmeginiň kesgitli manysy bar.

Gutarnykly wagt aralygynda we uzynlykda bolup geçýän çylşyrymly proses tegelejik bilen bellenilýär. Lokal, ýagny mgnowen we giňişligiň bir nokadynda bolýan elementar prosesi nokat bilen bellenilýär.

34-nji çyzgyda erkin soňy ýok elektron çyzygyň (düwünleri birleşdirýän) bölegi bar. Oňa içki çyzyk diýilýär. Içki çyzyklar elmydama diýen ýaly wirtual bölejige degişli.

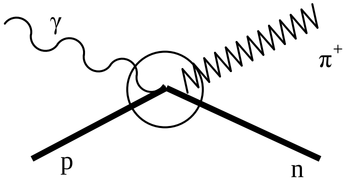


34-nji çyzgy. Kompton effektiň esasy mehanizminiň diagrammasy

Dürli prosesleriň diagrammasyny düzmekligiň usulyny aýdyňlaşdyrmak üçin, mysal edip, protonlarda zarýadly pionlaryň fotodöremekligini getireliň:

$$\gamma + p \to n + \pi^+ .$$

Onuň umumy diagrammasy.

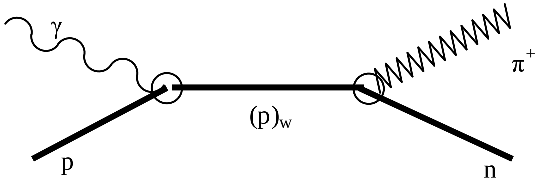


35-nji çyzgy

Şu reaksiýanyň bolup biljek mehanizmleriniň birine, nuklonyň fotony wertual siňdirmesi we soňra wirtual nuklonyň fotony goýbermegi, girýär:

$$\gamma + p \to (p)_W \to n + \pi^+ \qquad (2)$$

we onuň diagrammasy

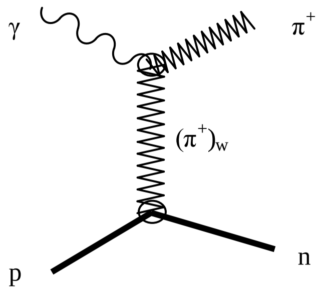


36-njy çyzgy

Fotodöremekligiň başga bir mehaniziminde, ilki nuklon wirtual piony goýberýär, soňra şu wirtual pion fotony siňdirýär.

$$p \to (\pi^+)_W + n,$$
$$\gamma + (\pi^+)_W \to \pi^+ . \qquad \mathbf{(3)}$$

Şeýle mehanizm aşakdaky diagramma bilen şekillenýär.

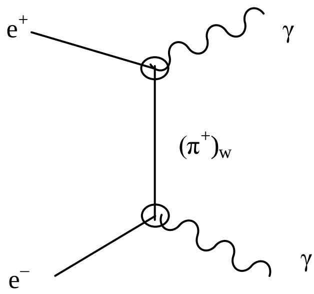


37-nji çyzgy

Şeýlelikde, Feýnmanyň diagrammalarynyň manysy, olaryň kömegi bilen bir reaksiýany başgasy bilen aýdyň baglaşdyryp bolýanlygyndan, durýar.

Feýnmanyň diagrammalarynyň her bir düwüninde äli saklanma kanunlar (zarýad, geňlik, jübütlilik, izospin we başg.) ýerine ýetýärler.

Öň bellenilişi ýaly, elementar bölejikleriň reaksiýalarynda, aýratyn bölejigiň zarýadyny üýtgedip ony deňligiň bir tarapyndan beýlesine geçirip bolýar. Diagrammaly formalizmde şeýle geçirmeklik, aýry çyzygyň soňunyň ugruny üýtgetmeklige alyp barýar. Meselem, kompton effekt diagrammada (35-nji çyzgy) ahyrky ýagdaýda elektron çyzygyň soňuny çepe öwürmeli we elektrony pozitrona çalyşmaly, başdaky ýagdaýda foton çyzygyň soňuny bolsa saga öwürmeli. Netijede aşakdaky diagramma alynýar.



38-nji çyzgy

Şu diagramma, elektronyň we pozitronyň iki fotona öwrülmek prosesiniň esasy mehanizmini şekillendirýär.

III.KWANT MEHANIKASY

Giriş

Kwant nazarýeti – has umumy we köp zady öz içine alýan häzirki zaman fiziki nazarýetdir. Ol fizikada matematiki usulyň giden ulanmagynyň netijesinde döredi. Şeýlelikde, nazary fizikasy özüniň usuly boýunça matematiki, mazmuny boýunça bolsa fiziki ylymdyr. Kwant nazarýeti kwant mehanikasyny, kwant statistikasyny we meýdanyň kwant nazarýetini (şol sanda kwantelektrodinamikasyny) birleşdirýär.

Kwant statistikasy – köp sanly bölejiklerden duran kwant ulgamlarynyň statistiki fizikasydyr. Ol bitin spinli bölejikler üçin Bozeniň-Eýnşteýniň statistikasy, ýarym bitinli spinli bölejikler üçin bolsa Ferminiň-Diragyň statistikasy.

Meýdanyň kwant nazarýeti – kwant prinsiplerine esaslanyp fiziki meýdanlaryň özaratäsirleşmesini we özaraöwrülmeklerini suratlandyrýan we derňeýän fiziki nazarýetiň umumy adydyr. Şu nazarýet ilki bilen ýokary energiýadaky hadysalary suratlandyrmaga niýetlenendir we şonuň üçin ol otnasitelligiň nazarýetiniň talaplary bilen ylalaşmalydyr.

Kwant nazarýetiniň bölümleriniň arasynda kwant mehanikasy has ýerlikli orny eýeleýär.

Kwant mehanikasy (tolkun mehanikasy) – mikrobölejikleri (elementar bölejikleri, atomlary, molekulalary, atom ýadrolary) we olaryň ulgamlaryny (mysal üçin: kristallary) beýan etmek usulyny kadalaşdyrýan, olaryň hereketleriniň kanunlaryny, hem-de bölejikleri we ulgamlary häsiýetlendirýän fiziki ululyklar bilen tejribede gös-göni ölçelinýän fiziki ululyklaryň arasyndaky baglanyşygy suratlandyrýan nazarýetdir.

Kwant mehanikasynyň kanunlary jisimleriň düzümini öwrenmekligiň esasyny düzýärler. Olar, atomlaryň düzümlerini aýdyňlaşdyrmaklyga, himiki baglanyşyklaryň tebigatyny kesgitlemeklige, elementleriň periodiki ulgamyny fiziki taýdan esaslandyrmaklyga, atom ýadrolarynyň düzümlerine düşünmeklige we elementar bölejikleriň häsiýetlerini öwrenmeklige ýol açdylar. Makraskopiki jisimleriň häsiýetleri öz düzümini emele getirýän bölejikleriň hereketleri we özaratäsirleşmeleri bilen kesgitlenýändikleri sebäpli, kwant mehanikasynyň kanunlary makraskopiki hadysalaryň köpüsiniň düşünmekliginiň esasynda hem ýerleşýärler. Şeýlelikde, kwant mehanikasy mikrodünýäde bölejikleriň hereketlerini öwrenýär. Muňa atomda, molekulada, gaty jisimde, elektromagnit meýdanda elektronyň hereketi mysal bolup biler. Şol bir babatda ol şol hereketleri tejribe arkaly we nazary usul bilen öwrenýär.

Özüniň manysy boýunça kwant mehanikasy, klassiki mehanikanyň, elektrodinamikanyň, materiýanyň kinetiki nazarýetiniň we nazary fizikanyň başga-da bölümleriniň, mundan beýläk ösdürilmegidir.

XIX- asyryň ikinji ýarymynda klassiki düşünjeleriň üsti bilen esaslandyryp we düşündirip bolmaýan bir näçe tejribede alnan maglumatlar açyldylar. Meslem, deňagramly şöhlelenmäniň nazarýetini dikeltmeklik, fotoeffekt hadysasyny we Komptonyň effektini düşündirmeklik üçin ýagtylygyň tolkun häsiýeti bilen bir hatarda onuň korpuskula (bölejik) häsiýetiniň hem bardygyny girizmeklik zerurlygy ýüze çykdy. Şu tassyklama ilki bilen Plankyň-Eýnşteýniň kwant nazarýetinde ulanyldy. Ýagtylygyň diskret strukturasy Plankyň „$\hbar$“ hemişeliginiň üsti bilen aňladylýar. Mehaniki hereket üçin absolýut ölçeg bolup hyzmat edýän „$\hbar$“ hemişeligi (kwant täsiri) uly oblastdan kiçi oblasta kanunalaýyklyklaryň mehaniki geçirilip bolmaýanlygy baradaky birinji çynlakaý öňünden duýduryşdyr. Kwant nazarýeti atomyň birinji kwant nazarýetini döretmeklikde N.Bor tarapyndan üstünlikli ulanyldy.

Beýleki tarapdan, köp sanly tejribe maglumatlary (meselem, elektron dessesiniň difraksiýasy we interferensiýasy) elektronyň korpuskula häsiýeti bilen bir hatarda onuň tolkun häsiýetiniň hem bardygy baradaky çaklamanyň ýüze çykmagyna getirdi. Lui-de-Broýl tarapyndan girizilen elektronyň tolkun uzynlygynyň formulasy hem „$\hbar$“ ululygy saklaýar. Belli bolşy ýaly difraksiýa hadysasy traýektoriýa düşünjesi bilen ylalaşmaýar, diýmek, kwant nazarýetinde traýektoriýa diýen düşünje ýok.

Ýagtylygyň kwant tebigatyny we elektronyň tolkun häsiýetini tassyklaýan ähli tejribe maglumatlary

we bir näçe aýry-aýry nazaryýetleri (Plankyň, Eýnşteýniň, Boruň, de Broýlyň) dykgatly barlamagyň birinji jemleýji netijesi Şrýodingeriň deňlemesidir (1926ý.)
Şu deňleme, ýagtylygyň kwant tebigatyny hasaba alyp elektronlaryň we başga atom bölejikleriniň hereketleriniň kanunlaryny açmaklyga we şöhlelenmäniň deňeşdirilen yzygiderli nazaryýetini gurmaklyga mümkinçilik döretdi. Ýöne soňky döwürde belli bolşy ýaly, Şrýodingeriň nazaryýeti atomlaryň ähli häsiýetlerini beýan edip bilmeýär. Mysal üçin, onuň kömegi bilen atomyň we magnit meýdanyň arasyndaky täsiri (meselem, Zeýemanyň anomal effekti) dogry düşündirmeýär; mundan başga-da, çylşyrymly atomlaryň hem nazaryýeti gurulyp bilinmeýär. Bu kynçylyklar, Şrýodingeriň nazaryýetinde elektronyň spin bilen bagly häsiýetiniň hasaba alynylmaýanlygynyň netijesidir. Şrýodingeriň relýatiwistik däl nazaryýetiniň ösdürilmegi. Diragyň relýatiwistik nazaryýetidir. Şu nazaryýetde elektronlaryň relýatiwistik we spin effektleri hasaba alynýar. Elektronyň spin bilen bagly bolan häsiýetleri kabul edilenden soň, atomlarda elektron gabyklarynyň doldurylyş düzgünine düşünmeklik we Mendeleýewiň periodik kanunyna dogry fiziki interpretasiýa bermeklik başartdy.

Häzirki döwürde ylymda köp sanly tejribede alynan maglumatlar toplandy we elementar bölejikleriň umumy nazaryýetini gurmaklykda käbir üstünlikler gazanyldy. Şu nazaryýetiň özboluşly birinji etaby bolup kwant mehanikasynyň mundan beýläk umumylaşdyrylmagydyr. Oňa meýdanyň kwant nazarýeti diýilýär we ol elementar bölejikleriň özara öwrülmeklerini suratlandyrýar. Diragyň nazarýetinden γ-kwantlaryň „$e^{-}-e^{+}$“ jübütine we tersine öwrülip biljekdikleri gelip çykýar:

$$\gamma \Leftrightarrow e^{-} - e^{+} .$$

Şu çaklama soňra tejribe arkaly doly tassyklanyldy. Klassiki nazarýetde ýagtylyk bilen elektronyň arasynda iki tapawut bar: birinjiden ýagtylyk – tolkun, elektron-bölejik; ikinjiden, ýagtylyk goýberilip we siňdirilip bilinýär, elektronlaryň sany bolsa üýtgemeýär. Korpuskula – tolkun dualizmi mahsus bolan kwant mehanikasynda ýagtylyk bilen elektronyň arasyndaky birinji tapawut aýrylýar, ýöne onda, Lorensiň nazarýetindäki ýaly elektronlaryň sany üýtgemän galýar. Diňe meýdanyň kwant nazarýeti dikeldilenden soňra ikinji tapawut hem aýryldy.

Umuman nazary fizikanyň, aýratyn hem kwant nazarýetiniň ösmegi matematika bilen ysnyşykly baglydyr. Bu has aýdyň we giň, kwant mehanikasynyň meselelerini, soraglaryny we düzgünnamalaryny derňelende ýüze çykýar. Şol sebäpli, kwant mehanikasy – atom hadysalarynyň fiziki taýdan ölçelinip bilinjek mümkinçiligi bolan häsiýetlerini hasaplamaga ýol berýän matematiki shemadyr diýip tassyklap bolýar. Has takygy, kwant mehanikasy kwant hadysalarynyň häzirki zaman matematiki nazarýetidir.

Nazary fizikanyň meselesi real dünýäni öwrenmekden ybaratdyr. Mysal üçin, onuň kanunlary mikrodünýä akyl ýetirmek bilen gös-göni baglydyr. Kwant mehanikasy mikrobölejikleriň hereketlerini we ýagdaýlaryny statistiki usul bilen öwrenýär, ýagny onuň nazaryýeti statistiki nazaryýetdir. Şoňa görä onuň esasyny ähtimallyk nazaryýeti, düzýär. Meselem, kwant mehanikasynyň kömegi bilen kristaldan serpikdirilen elektronlaryň fotoplastinkada ortaça nähili paýlanjakdyklaryny öňünden aýdyp bolýan bolsa, olaryň her biriniň ýerleşip biljek ýerleri barada diňe ähtimally pikiri aýdyp bolýar, ýagny „şeýle ähtimallyk bilen haýsy hem bolsa bir ýerde bolup biler“. Jemläp aýdylanda kwant mehanikasy XX-asyrda atom fizikasynyň ösmeginde ägirt uly ädimdir.

§1. Kwant mehanikasynyň tejribe we nazary esaslary

Umumy bellikler. Nýutonyň mehanikasy, maỳyşgaklyk nazaryỳeti, elektrodinamika, termodinamika we aerodinamika <<klassiki fizikasynyň>> mazmunyny düzỳärler. Ol makroskopik ölçegli köp mukdardaky atomlary saklaỳan jisimler bilen bolup geçỳän hadysalary öwrenỳär.

Şu fizika bilen tejribede alnan maglumatlaryň arasyndaky birinji gapma-garşylyklar 1900-nji ỳylda elektromagnit meỳdany bilen bagly bolan deňagramly şöhlelenme üçin M.Plank özüniň belli formulasyny hödürländen soň ỳüze çykyp başlady.

Jisimiň goỳberỳän we içki energiỳanyň hasabyna döreỳän elektromagnit şöhlelenmesine ỳylylyk, ỳa-da temperaturaly şöhlelenme diỳilỳär. Diňe ỳylylyk şöhlelenmesi jisim bilen termodinamiki deňagramlylykda bolup bilỳär. Deňagramlylykda ỳylylyk şöhlelenmesine jisimiň sarp edỳän energiỳasy, oňa düşỳän şöhlelenmäniň edil şonuň ỳaly mukdaryny siňdirilmeginiň netijesinde dolỳar. Deňagramly şöhlelenme adiabatik ỳapyk sistemada alynỳar. Şeỳle sistema bolup absolỳut gara jisim (a.g.j) mysal bolup biler. Absolỳut gara jisim diỳip, käbir hemişelik T temperatura gyzdyrylan we ähli tarapdan kiçijik yşly ỳylylyk syzdyrmaýan diwar bilen gurşalan boşluga aỳdylỳar. Şeỳle jisimi tehniki taỳdan ilkinji gezek Win we Lummer 1895-nji ỳylda amala alypdyrlar. Deňagramly şöhlelenmäni a.g.j-nyň şöhlelenmesi ỳaly seretmeli (oňa gara şöhlelenme hem diỳilỳär).

Kwant nazaryỳetiniň döremeginde deňagramly şöhlelenmäniň derňewi diỳseň wajyp rol oỳnapdyr.

Ỳagtylygyň klassyk nazaryỳeti. Absolỳut gara jisimiň deňagramly şöhlelenmesiniň, klassyk düşünjeleriniň esasynda, tejribä garşy bolmadyk nazaryỳetini döretmek üçin köp sanly synanyşyklar üstünlige getirmediler. Diňe Plankyň kwantynyň täze düşünjesi girizilenden soň gara şöhlelenmäniň yzygiderli nazaryỳeti gurulỳar. Bu atomyň ilkinji kwant nazaryỳetini, soňra bolsa, kwant mehanikasyny döretmeklige getirdi. Ilki bilen deňagramly şöhlelenmäniň nazaryỳetini klassiki fizikanyň esasy prinsipiniň esasynda seredeliň. Şol prinsipe görä ähli hadysalar üznüksiz halda bolup geçỳärler. Şöhlelenmäni ρ_ω spektral dykyzlyk bilen häsiỳetlendireris. Oňa T temperaturada jisim bilen deňagramlykda bolan şöhlelenmäniň dykyzlygy, ỳagny gara şöhlelenmäniň dykyzlygy hem diỳilỳär. Ol ululyk elektromagnit energiỳanyň adaty

$$u = \frac{1}{8\pi}(E^2 + H^2), \qquad (1.1)$$

dykyzlygy bilen

$$\rho_\omega = \frac{du}{d\omega}, \qquad (1.2)$$

gatnaşyk ýaly baglanyşykdadyr. (1.1) we (1.2) gatnaşyklarda E we H -degişlilikde elektrik we magnit meỳdanlaryň güỳjenmeleri, du bolsa – ω-dan $\omega + d\omega$ çenli ỳygylyklar interwalynda şöhlelenmäniň energiỳasynyň dykyzlygy.

(1.2)-den

$$u = \int_0^\infty \rho_\omega d\omega \qquad (1.3)$$

boljakdygy düşnüklidir.

Kirhgof termodinamikanyň ikinji başlangyjynyň (gutarnykly tizlik bilen bolup geçỳän makroskopik prosesleriň tersine özgermeỳänligini kesgitleỳän prinsip) esasynda ρ_ω dykyzlygyň diňe ỳapyk boşlugyň diwarlarynyň temperaturasy bilen kesgitlenilỳändigini we diwarlaryň materialyna düỳbinden bagly däldigini görkezipdir:

$$\rho_\omega = f(\omega \mathrm{T}).$$

Boşlugyň diwarlaryny käbir ossilỳatorlaryň toplumy ỳaly seredip bolar, olaryň ortaça energiỳasy deňagramly şöhlelenmäniň spektral dykyzlygy bilen doly berilip biliner. Kinetik energiỳanyň orta bahasy (ossilỳatoryň orta energiỳasy) şeỳle formula bilen kesgitlenỳär:

$$\overline{E} = \frac{3\pi}{2} \cdot \frac{n_0 c^3}{\omega^3} \left| E_{xn_0} \right|^2 \qquad (1.4)$$

Bu ỳerde $n_0 = \frac{\omega}{\omega_0}$, E_{xn_0} bolsa - ω we $\omega + d\omega$ interwaldaky ỳygylykly meỳdanyň yrgyldysynyň aỳratyn amplitudasy.

Beỳleki tarapdan energiỳanyň "u" dykyzlygy hem $\left| E_{xn_0} \right|^2$ ululyk arkaly aňladylyp bilner. Dogrudanam şöhlelenmäniň uzotropdygyny (ỳagny ol polỳarlanmadyk we onuň ähli ugurlary deňähtimally) göz önünde tutup (1.1)-iň esasynda alỳarys:

$$u = \frac{1}{8\pi} \overline{(E^2 + H^2)} = \frac{1}{4\pi} \overline{(E_x{}^2 + E_y{}^2 + E_z{}^2)} \qquad \mathbf{(1.5)}$$

we gara şöhlelenmäniň elektrik meỳdanynyň x-düzüjisiniň Furỳeniň hatary görnüşinde

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E_{xn} e^{in\omega_0 t}$$

alynỳandygyny hasaba alyp, alỳarys.

$$u = \frac{3}{4\pi}\overline{E}_x^2 = \frac{3}{4\pi}\sum_{n\to-\infty}^{\infty}\left|E_{xn}\right|^2 = \frac{3}{4\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left|E_{xn}\right|^2 dn = \frac{3}{2\pi}\int_0^{\infty}\left|E_{xn}\right|^2 dn \quad (1.6)$$

(1.3)-i we $dn = \frac{d\omega_n}{\omega_0} = n_0\frac{d\omega_n}{\omega}$ gatnaşygy hasaba alyp $\omega_n = \omega(n = n_0)$ bolanda taparys:

$$\int_0^{\infty}\rho_\omega = \frac{3}{2\pi}\int_0^{\infty}\left|E_{xn_0}\right|^2 \cdot n_0\frac{d\omega}{\omega}, \quad \text{ỳa-da}$$

$$\int_0^{\infty}\left\{\rho_\omega - \frac{3n_0}{2\pi}\frac{\left|E_{xn_0}\right|}{\omega}\right\}d\omega = 0,$$

ỳa-da
$$\rho_\omega - \frac{3n_0}{2\pi}\frac{\left|E_{xn_0}\right|^2}{\omega} = 0.$$

Şeỳlelikde

$$\rho_\omega = \frac{3n_0}{2\pi}\frac{\left|E_{xn_0}\right|}{\omega}$$

(1.4) we (1.7) formulalary deňeşdirip tapỳarys:

$$\rho_\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}\overline{E} \qquad (1.8)$$

Şu formula deňagramly şöhlelenmäniň nazaryỳetiniň esasy düzýär.

Klassyk statistiki fizikasynda bölejikleriň energiỳa boỳunça paỳlanmagy aşakdaky funksiỳa bilen berilỳär

$$N(E)=Ae^{-\alpha E}, \qquad (1.9)$$

bu ỳerde $\alpha=\dfrac{1}{kT}$; $k=1.38\cdot10^{-23}J/grad$ - Bolsmanyň hemişeligi, T-sredanyň temperaturasy. Şonuň üçın orta energıỳa

$$\overline{E}=\frac{A\int\limits_0^\infty Ee^{-\alpha E}dE}{A\int\limits_0^\infty e^{-\lambda E}dE}=-\frac{\partial}{\partial\alpha}\ln\int\limits_0^\infty e^{-\alpha E}dE=-\frac{\partial}{\partial\alpha}\ln\left(-\frac{1}{\alpha}e^{-\alpha E}\right)^\infty=$$

$$=-\frac{\partial}{\partial\alpha}\ln\frac{1}{\alpha}=-\frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)'}{\frac{1}{\alpha}}=-\alpha\left(-\frac{1}{\alpha^2}\right)=\frac{1}{\alpha}=kT$$

Şu bahany $(1.8)-$njı gatnaşyga goỳup Releỳıň-Jınsıň formulasyny alỳarys

$$\rho_\omega=\frac{\omega^2}{\pi^2c^3}kt \qquad (1.10)$$

(1.10)-dan görnüşı ỳaly, şöhlelenmänıň dykyzlygy gyzdyrylan jısımıň absolỳut temperaturasyna gönı proporsıonaldyr.

(1.10)-y tolkun uzynlygynyň üstı bılen aňladalyň:

Bellı bolşy ỳaly

$$\omega=\frac{2\pi c}{\lambda},$$

onda

$$\rho_\lambda=\frac{4k}{c}\frac{T}{\lambda^2}.$$

Indı şu ỳerden görnüşı ỳaly gyzdyrylan jısımıň goỳberỳän şöhlelenmesınıň ıntensıwlıgı, ỳagny ỳagtylygyň akymynyň dykyzlygy, onuň absolỳut temperaturasyna gönı proporsıonal we onuň goỳberỳän ỳagtylygynyň tolkun uzynlygynyň kwadratyna bolsa ters proporsıonaldyr. Releỳıň-Jınsıň kanunyndan gelıp çykyşy ỳaly tolkun uzynlygy näçe gysga bolsa, ỳylylyk şöhlelenmesınıň ıntensıwlıgı şonça uly bolmaly. Şeỳle netije tejribede subut edilmeỳär. Has beteri, şöhlelenmäniň şu intensiwligi, has gysga tolkun uzynlygyna geçildigiçe çäksiz artmaly ỳaly netijä gelinỳär. Eger Releỳiň-Jinsiň formulasy şöhlelenmäniň energiỳasynyň „u'' dygyzlygyny hasaplamak üçin ulanylsa, onda degişli integralyň tükeniksizlige ymtylỳandygyna gelỳäris, ỳagny anyk manysyz netije alynỳar:

$$u = \int_0^\infty \rho_\omega d\omega = \frac{kT}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \omega^2 d\omega = \infty \, .$$

Eger haỳsy hem bolsa bir fiziki kanun çäksiz netijä getirỳän bolsa, onda bu onuň manysyzdygyny aňladýar. Şeỳle netijäni Erenfest "ultramelewşe weỳrançylygy" diỳip atlandyrypdyr.

Ỳagtylygyň kwant nazaryỳeti. M.Plank, klassyk fizikasynyň esasy düzgünnamalarynyň hataryny düỳbünden üỳtgedỳän, wajyp gipotezany öňe sürỳär. 1900-nji ỳylyň 14-nji dekabrynda, nemes fiziki jemgyỳetiniň zalynda täze ylym - kwantlar baradaky taglymat döreỳär. Onda M.Plank normal spektrde energiỳanyň paỳlanmak kanunynyň nazaryỳeti barada maglumat beripir. Ol, mikroskopik sistemalaryň (atomlaryň, molekulalaryň we başy.) energiỳasy islendik üznüksiz däl-de, diňe kesgitli diskret (üznükli) bahalary alyp bilỳär diỳip, tassyklapdyr. Meselem, şu çaklama görä ossilỳatoryň energiỳasy haỳsy hem bolsa ε minimal baha kratnyỳ bolmalydyr

$$E = n\varepsilon, \text{ bu ỳerde } n=0,1,2\ldots \tag{1.12}$$

Şunuň bilen baglylykda orta baha hasaplanylanda E üçin integral jem bilen çalşyrylýar.

$$\overline{E} = -\frac{\partial}{\partial\alpha}\ln\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon e^{-\alpha n\varepsilon} = -\frac{\partial}{\partial\alpha}\ln\frac{\varepsilon}{1-e^{-\alpha\varepsilon}} = -\frac{\left(\frac{\varepsilon}{1-e^{-\alpha\varepsilon}}\right)^{|}}{\frac{\varepsilon}{1-e^{-\alpha\varepsilon}}} = \tag{1.13}$$

$$= -\left(1-e^{-\alpha\varepsilon}\right)\cdot\left(\frac{1}{1-e^{-\alpha\varepsilon}}\right)^{|} = \left(1-e^{-\alpha\varepsilon}\right)\cdot\frac{\varepsilon e^{-\alpha\varepsilon}}{\left(1-e^{-\alpha\varepsilon}\right)^{2}} = \frac{\varepsilon}{e^{\alpha\varepsilon}-1}$$

$\overline{E}$ - niň bu bahasyny (8)-e goỳup şeỳle formulany alarys:

$$\rho_{\omega} = \frac{\omega^{2}}{\pi^{2}c^{3}}\cdot\frac{\varepsilon}{e^{\alpha\varepsilon}-1} \tag{1.14}$$

Şu formulany Winiň termodinamiki kanuny (11) bilen sazlaşyklyga getirmek üçin ε -ni ω ỳygylyga proporsional diỳip hasap etmeklik ỳeterlikdir.

$$\varepsilon = \hbar\omega\ , \tag{1.15}$$

bu ỳerde $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05\cdot 10^{-34}\ j\cdot sek -$ Plankyň hemişeligi we ony fizika kwant mehanikasyny dikeldijileriň biri bolan iňlis alymy P. Dirak girizipdir.

(1.15)-i (1.14)-e goỳup Plankyň formulasyny alỳarys.

$$\rho_\omega = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}. \qquad (1.16)$$

Şu formula kwant nazaryỳetiniň ajaỳyp üstünligidir, Plankyň gipotezasy bir gije-gündüziň dowamynda tejribede subut edilipdir.

Şu formulanyň käbir taraplaryna seredeliň.

Uly bolmadyk ỳygylyklar $\left(\frac{\hbar\omega}{kT} << 1\right)$ üçin $e^{\frac{\hbar\omega}{kT}}$ ululygy $\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)$ boỳunça hatara dargadylan görnüşde alyp bolar:

$$e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} \approx 1 + \frac{\hbar\omega}{kT}$$

Plankyň formulasy,şeỳle halda Releỳin-Jinsiň formulasyna geçỳär.

Uly ỳygylyklar $\left(\frac{\hbar\omega}{kT} >> 1\right)$ üçin bolsa şeỳle şert ỳüze çykyp biler

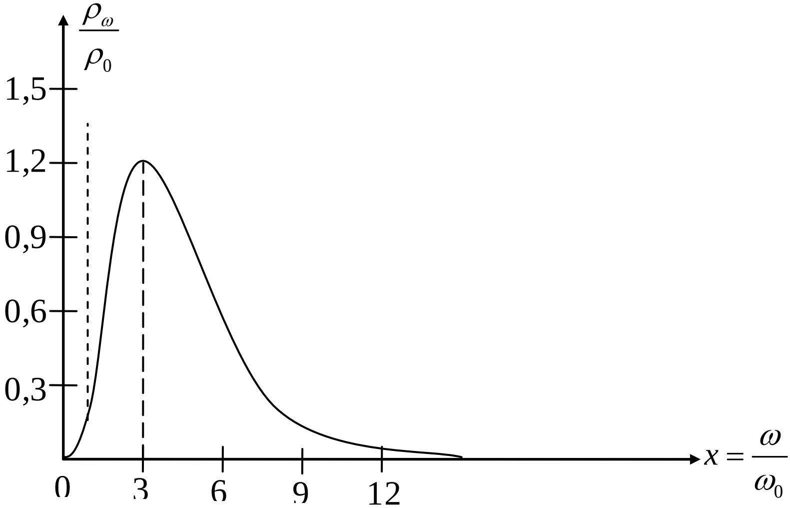
$$e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} >> 1.$$

Onda (1.16)-nyň maỳdalowjysyndaky birligi inkär edip bolỳar. Şeỳle halda ol formula aşakdaky görnüşe geçỳär

$$\rho_\omega = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}}. \qquad (1.17)$$

Görnüşi ỳaly intensiwlik eksponensial kanuny boỳunça üỳtgeỳär. Ỳylylyk şöhlelenmesiniň spektral dykyzlygynyň ω ỳygylyga baglylygyny suratlandyrỳan Plankyň formulasy tejribe bilen doly ylalaşykdadyr.

Absolỳut gara jisimiň şohlelenmesiniň spektri aşakdaky 39-njy çyzgyda aňladylỳar.



39-njy çyzgy

Grafikde ştrihli çyzyk – Releỳiň – Linsiň egrisi: $\rho_\omega = \rho_0 x^2$; tejribe bilen gabat gelỳän tutuşlaỳyn çyzyk- Plankyň egrisi: $\rho_\omega = \dfrac{x^3}{e^x - 1}$.

Bu ỳerde, $\rho_0 = \dfrac{(kT)^3}{\hbar^2 \pi^2 c^3}$, $\omega=\omega_0 x$, $\omega_0 = \dfrac{kT}{\hbar}$.

(1.16)-njy formulanyň we (1.3)-nji gatnaşygyň esasynda şöhlelenmäniň integrally dykyzlygyny tapyp bolỳar:

$$u = \int_0^\infty \rho_\omega d\omega = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3}\int_0^\infty \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \quad . \qquad (1.18)$$

Üỳtgeỳän ululygy $\xi = \dfrac{\hbar\omega}{kT}$ girizeliň.

Şu ỳerden $\omega = \dfrac{kT}{\hbar}\xi$ we dω=$\dfrac{\mathrm{kT}}{\hbar}d\xi$.

Onda (1.18) şeỳle görnüşe geçỳär

$$u = \frac{k^4 T^4}{\hbar^3 \pi^2 c^3}\int_0^\infty \frac{\xi^3}{e^\xi - 1} d\xi \,. \qquad (1.19)$$

Integralyň $\displaystyle\int_0^\infty \frac{\xi^3}{e^\xi - 1} d\xi = \frac{\pi^4}{15}$ ululykdygyny hasaba alyp Stefanyň –Bolsmanyň belli kanununyny alỳarys:

$$u = aT^4 . \qquad (1.20)$$

Bu ỳerde:

$$a = \frac{\hbar^2 k^4}{15 c^3 \hbar^3} = 7{,}56 \cdot 10^{-28} J \cdot m^{-3} \cdot grad^{-4} \qquad (1.21)$$

Plankyň formulasyndan görnüşi ỳaly , ω-nyň käbir bahasynda orny temperatura bagly bolan ρ_ω (Winiň süỳşme kanuny) maksimuma eỳe bolmalydyr. Ýöne indi Winiň süỳşme kanuny adaty tolkun uzynlygy boỳunça ρ_λ spectral paỳlanma üçin ỳazylỳar , ỳagny ρ_λ ululugy kesgitlemek üçin “u”-nyň aňlatmasyny ulanyp, ỳazyp bileris

$$u = \int_0^\infty \rho_\lambda d\lambda$$

Belli bolşy ỳaly, $\omega = \dfrac{2\pi c}{\lambda}$ we bu ỳerden

$$d\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} d\lambda.$$

Onda:

$$\int_0^\infty \rho_\lambda = u = \int_0^\infty \rho_\omega d\omega = -2\pi c \int_\infty^0 \rho_\omega \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 2\pi c \int_0^\infty \rho_\omega \frac{d\lambda}{\lambda^2}.$$

ỳa-da $$\int_0^\infty \left\{ \rho_\lambda - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \rho_\omega \right\} d\lambda = 0,$$

ỳa-da $$\rho_x - \frac{2\pi c}{\lambda^2} \rho_\omega = 0.$$

Bu ỳerden $$\rho_\omega = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \rho_\omega,$$

ỳa-da (16)-nyň esasynda $$\rho_\lambda = \frac{16\pi^2 c\hbar}{\lambda^5 \left(e^{\frac{2\pi c\hbar}{kT\lambda}} - 1 \right)}.$$

ρ_λ ululygyň maksimum bahany alỳan $\lambda_{\max}$-y kesgitlemek üçin ýokarky aňlatmadan $\dfrac{\partial \rho_\lambda}{\partial \lambda}$ önümi nola deňlemeli:

$$\left[-5+\frac{\frac{2\pi c\hbar}{kT\lambda_{\max}}\cdot e^{\frac{2\pi c\hbar}{kT\lambda_{\max}}}}{e^{\frac{2\pi c\hbar}{kT\lambda_{\max}}}-1}\right]=0$$

$\frac{2\pi c\hbar}{kT\lambda_{\max}}=y$ belgileme girizip,

$$y=5(1-e^{-y})$$

deňlemä geleris. bu deňlemäniň çözgüdi uly takyklyk bilen aşakdaky görnüşde alnyp bilner:

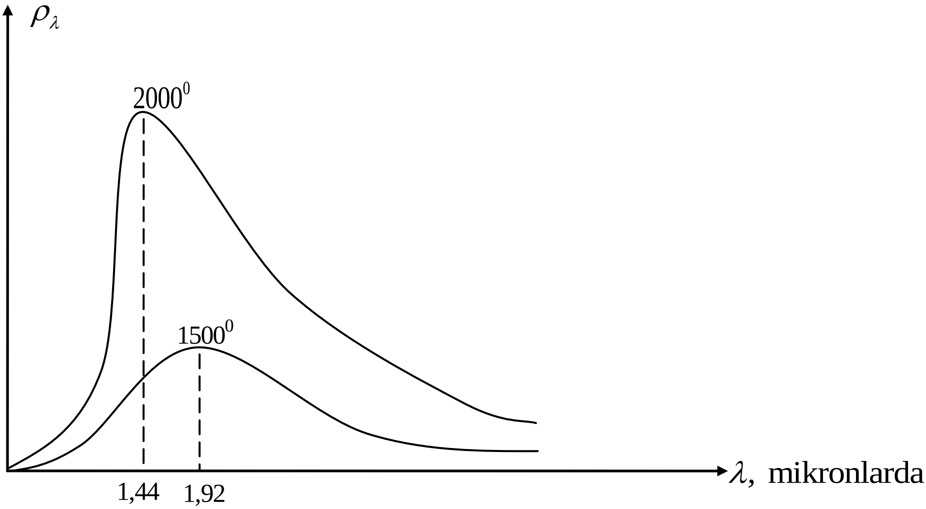
$$y=5(1-e^{-5})=4,965.$$

Şeỳlelikde temperatura bilen $\lambda_{\max}$ aşakdaky gatnaşyk arkaly baglydyr

$\lambda_{\max}\cdot T=b$ (1.22) - Winiň süỳşme kanuny.

Bu ỳerde $b=\frac{2\pi c\hbar}{4,965k}=0,29 sm\cdot grad$ - Winiň hemişeligi

Winiň süỳşme kanunyna laỳyklykda absolỳut gara jisimiň temperaturasynyň artmagynda şöhlelenmäniň intensiwliginiň maksimumy has gysga tolkun uzynlyklara tarap süỳşỳär. Bu aşakdaky 40- njy çyzgyda getirilỳär.



40- njy çyzgy.

Ỳokarda beỳan edilen maglumatlardan aşakdaky wajyp tassyklamalar gelip çykỳar:

1.Plankyň gipotezasyna laỳyklykda şöhlelenme we siňdirilme ỳaly prosesler kwant häsiỳete eỳe bolmalydyrlar , ỳagny şu proseslerde bölejikleriň energiỳasynyň üỳtgemegi saldamly däl-de, böküş görnüşde amala aşyrylmalydyr.

2.(1.21) we (1.22) deňlemeler "$\hbar$" we "k" ululyklary "a" we "b" hemişelikleri bilen baglaşdyrỳar. “a” we ”b” ululyklary bilip "$\hbar$" we "k" ululuklary kesgistläp bolỳar. Şeỳle ýol bilen ilkinji gezek "$\hbar$"-yň san bahasy tapylypdyr we “k”-nyň bahasy bolsa anyklanypdyr.

3.Gerekli ỳerde Plankyň formulasy Winiň we Releỳin-Jinsiň kanunlaryna geçỳär, ol Winiň süỳşme kanuny bilen ylalaşỳar we iň çensiz täsinligi, şu kanunlara girỳän hemişelikleri Plankyň hemişeligi we Bolsmanyň hemişeligi arkaly aňladyp, olaryň san bahalaryny berỳär. Diỳmek, jisimiň atom nazaryỳetiniň we ỳagtylygyň kwant tebigatynyň bütewiligi gelip çykỳar.

4. Ỳagtylygyň bölejiginiň-fotonyň barlygyna esas döredi.

§2. Ỳagtylyk kwantlarynyň tebigaty

M.Plank özüniň formulasyny getirip çykaranda ỳagtylygyň jisim tarapyndan goỳberilmegi we siňdirilmegi üznükli hasiỳete eỳedir diỳip hasap edipdir, ỳagny şeỳle proses ahyrky (diskret) bölekler-ỳagtylyk kwantlary arkaly bolup geçỳär. Şeỳle kwantyň energiỳasy ỳagtylygyň yrgyldysynyň ỳygylygyna proporsional we aşakdaky deňlik bilen aňladylỳar

$$\varepsilon = \hbar\omega, \tag{2.1}$$

<< Kwant >> nazaryỳetiniň ösmeginde A.Eỳnşteỳn ikinji ägirt uly ädim edipdir. Plankyň pikirini ösdürip, A.Eỳnşteỳn ỳagtylygyň ỳaỳramagy hem kwantlar arkaly bolup geçỳär diỳip tassyklapdyr, ỳagny diskretnilik ỳagtylygyň özüne mahsusdyr : ỳagtylyk aỳratyn böleklerden-ỳagtylyk kwantlaryndan durỳar.Olara soňra fotonlar diỳilip at berilipdir.

Mundan başga-da, ol ỳagtylyk kwantyna impulsyň hem ỳazylmagyny görkezipdir:

$$p = \frac{\varepsilon}{c}, \qquad (2.2)$$

üstesine-de, onuň ugry ỳagtylygyň ỳaỳraỳan ugry bilen gabat gelỳär.

(2.2)-ni wektor görnüşde ỳazalyň:

$$\vec{p} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{\hbar}{c} \cdot \frac{2\pi}{T} = 2\pi\hbar \cdot \frac{\upsilon}{c} = \hbar \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar\vec{k}.,$$

şeỳlelikde,

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}, \qquad (2.3)$$

bu ỳerde, $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$ -tolkun wektory. Onuň düzüjileri:

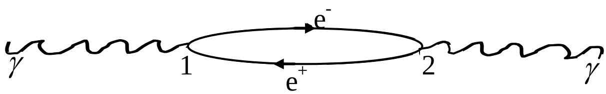
$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda}\cos\alpha, \quad \mathrm{k_y} = \frac{2\pi}{\lambda}\cos\beta, \quad \mathrm{k_z} = \frac{2\pi}{\lambda}\cos\beta -$$

ỳagtylyk tolkunyna normalyň ugrukdyryjy kosinuslary.

Eger $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$ diỳip alynsa, onda oňa tolkun sany diỳilỳär we 2π aralykda tolkunyň näçe sanynyň ỳerleşỳändigini görkezỳär.

(2.1) we (2.3) formulalar ỳagtylygyň kwant nazaryỳetiniň esasy deňlemeleri bolup, ỳagtylyk kwantynyn ε energiỳasyny we $\vec{p}$ impulsyny, ỳaỳramak ugry $\vec{k}$ wektory bilen kesgitlenỳän tekiz monohromatik tolkunyň ω ỳygylygy we λ tolkun uzynlygy bilen baglaşdyrỳar. Başgaça aỳdylanda, ỳagtylyga dualizm häsiỳetiň mahsusdygyny aňladỳar. Bu nazary fizikanyň özboluşly garaşylmadyk wakasydyr. Şol deňlemelere girỳän $\hbar$ ululygy, kwant mehanikasynda iki esasy roly ỳerine ỳetirỳär, ỳagny diskretniligiň ölçegi bolup hyzmat edỳär we materiỳanyň hereketiniň korpuskula we tolkun taraplaryny bir ỳerde baglaşdyrỳar.

(1) we (3) formulalar görnüşi boỳunça örän ỳönekeỳdir, mazmuny boỳunça bolsa, örän baỳdyr, ỳagny olar kwant mehanikasynyň soraglarynyň giň temalar toparyny öz içine alỳar.Ỳagtylygyň kwant nazaryỳetiniň manysy, mikrosistemalaryň we ỳagtylygyň arasyndaky energiỳanyň we impulsyň çalyşmagy, ỳagtylyk kwantlarynyň biriniň döremegi we başgasynyň ỳogalmagy ỳaly bolup geçỳändigini görkezmekden durỳar.Muny 41- nji çyzgydaky ỳaly görkezip bolar:



41- nji çyzgy.

Şeỳle pikiriň özüniň takyk aňladylmasyna göz ỳetirmek maksady bilen, energiỳanyň we impulsyň saklanmak kanunlaryny ỳagtylyk bilen özaratäsirleşỳän haỳsyda hem bolsa bir sistema ulanalyň.

<< Çaknyşykdan >> öňki sistemanyň energiỳasyny we impulsyny degişlilikde E we $\vec{p}$,soňkysyny bolsa, E` we p` bilen belgiläliň. Sistema bilen << çaknyşykdan >> öňki ỳagtylyk kwantynyň energiỳasyny we impulsyny degişlilikde $\hbar\omega$ we $\hbar\vec{k}$, ondan soň bolsa $\hbar\omega'$ we $\hbar\vec{k'}$ arkaly belgiläliň.

Şu ỳerde << çaknyşyk >> sözüniň dogry manysy özaratäsiriň netijesinde ω ỳygylykly we $\vec{k}$ ugurly elektromagnit tolkunyň energiỳasy we impulsy degişlilikde $\hbar\omega$ we $\hbar\vec{k}$ ululyklara kiçelỳärler (ỳagtylyk kwanty ỳok bolỳar), başga ω' ỳygylykly we $\vec{k}'$ ugurly elektromagnit yrgyldynyň energiỳasy we impulsy bolsa $\hbar\omega'$ we $\hbar\vec{k}'$ ululyklara ulalỳar (ỳagtylyk kwanty döreỳär) diỳen tassyklamany berỳär.

Kabul edilen belgilenmeler arkaly energiỳanyň we impulsyň saklanmak kanunlary şeỳle aňladylỳar

$$\hbar\omega + E = \hbar\omega' + E', \qquad (2.4)$$

$$\hbar\vec{k} + \vec{p} = \hbar\vec{k}' + \vec{p}'. \qquad (2.5)$$

Bu deňlemeler ähli üç esasy prosesleri (siňdirmek, goỳbermek we dargamak) gurşaỳarlar. Dogrudanam, eger $\omega' = 0$ (onda $\vec{k}' = 0$) bolan ỳagdaỳda (2.4) we (2.5) ỳagtylyk kwantynyň $\hbar\omega$ siňdirilmegine degişlidir; eger $\omega = 0$ (onda $\vec{k} = 0$) bolan ỳagdaỳda (2.4) we (2.5) $\hbar\omega$`kwantyň goỳberilmegini kesgitleỳär; eger-de ω we ω' noldan tapawutly bolsalar, onda ol deňlemeler ỳagtylygyň dargamasyna degişlidirler, ỳagny $\hbar\omega$ we $\hbar k$ kwanty başga $\hbar\omega'$ energiỳaly we $\hbar\vec{k}'$ impulsly kwanta öwrülỳär.

(2.4) we (2.5) saklanmak kanunlary ỳagtylygyň aỳratynlykda tolkun ỳa-da korpuskula ỳaly seredilmegine garşydyrlar we umuman klassyk fizikanyň düşünjeleriniň ramkasynyň çäklerinde derňelip we düşündirip bolmaỳar. Tolkun nazaryỳetine laỳyklykda tolkunly meỳdanyň energiỳasy tolkunyň

ω ỳygylygy bilen däl-de, şu meỳdanyň emele getirỳän tolkunyň amplitudasy arkaly kesgitlenỳär. Başga tarapdan, tolkunyň amplitudasynyň we yrgyldynyň ỳygylygynyň arasynda hiç hili umumy baglylygyň ỳoklugy sebäpli aỳratyn kwantyň energiỳasyny tolkunyň amplitudasy bilen baglaşdyryp bolmaỳar. Ỳagtylyk kwantyny bölejik diỳip hasap edilmek hem ỳerlikli däl. Ỳagtylyk kwanty özüniň (2.1) we (2.3) kesgitlemesi boỳunça arassa periodiki proses bolup, giňişlikde hem-de wagta görä tükeniksizdir. Şeỳlelikde, (2.4) we (2.5) deňlemeleri kabul edip, atom dünỳäsiniň hadysalaryny aňlatmak üçin klassyk fizikanyň ỳeterlikli däldigi bilen ylalaşmalydyrys.

§3. Fotoeffekt

Kwant mehanikasynyň döremegine getiren tejribelere seretmeklige geçeliň. Başgaça aỳdylanda, (2.4) we (2.5) saklanmak kanunlary barlaỳan tejribeli faktlara geçeliň.

Ỳagtylygyň kwantlary baradaky gipoteza hadysalaryň bitin toparyny düşündirmekde diỳseň önümli boldy. Eỳnşteỳniň hödürlän daşky foteffektiň kwantly düşündirilmegi örän wajypdygy bellenilmäge mynasypdyr. Eger fotoeffekti ỳagtylygyň (elektromagnit meỳdanyň) täsiri bilen metaldan elektronyň goỳberilmegi (goparylmagy) diỳip çaklenilse, onda onuň fiziki tarapy gyrada galỳar. Fotoeffekt diỳip, ỳagtylyk kwantynyň atom bilen bagly elektrona täsiri esasynda oňa kwantyň ähli energiỳasynyň berilmek hadysasyna aỳdylỳar.

Klassyk fizikasyna laỳykda metaldan uçup çykỳan elektronlaryň tizligi düşỳän tolkunyň intensiwligine proporsional bolmalydyr. Tejribäniň (Milliken) görkezişi ỳaly, fotoelektronlaryň tizligi intensiwlige düỳbünden bagly bolman, diňe ỳagtylygyň ỳygylygyna bagly. Intensiwlik metalyň goỳberỳän elektronlaryň sanyny kesgitleỳär. Fotoeffekt gowşak intensiwlikde hem ỳüze çykỳar. Şu netijäniň şübhesizligi (2.4) energiỳanyň saklanmak kanunyny fotoeffekt hadysasyna ulanylanda aỳdyň bolỳar.

Goỳ, metalyň üstüne ω ỳygylykly monohromatik ỳagtylyk düşỳär diỳeliň. Metaldan elektronlary goparmak üçin käbir işi ỳerine ỳetirmeli, ony A (çykyş işi) bilen belgiläliň, onda elektronyň metaldaky başdaky energiỳasyny E=-A diỳip hasap etmeli. Fotoeffektde, kesgitlemeden görnüşi ỳaly, ỳagtylyk kwanty doly siňdirilỳär, ỳagny $\hbar\omega^{|}=0$. Ỳagtylygyň kwantyny siňdiren elektronyň $E^{|}$ energiỳasy bolsa $\frac{m_0 v^2}{2}$ bolỳar.

Diỳmek, seredilỳän ỳagdaỳ üçin (2.4) deňleme şeỳle görnüşi alỳar:

$$\hbar\omega - A = \frac{m_0 v^2}{2},$$

ỳa-da

$$\frac{m_0 v^2}{2} = \hbar\omega - A.$$

Bu fotoeffekt üçin A.Eỳnşteỳniň belli deňlemesi. Ondan görnüşi ỳaly, uçup çykỳan elektronlaryň energiỳasy (tizligi) diňe düşỳän ỳagtylygyň ỳygylygyna bagly.

Eger $\hbar\omega < A$ bolsa (fotoeffektiň gyzyl araçägi) onda elektronlar metaldan çykyp bilmeỳärler we fotoeffekt hadysasy amala aşyrylmaỳar. Diňe düşỳän fotonlaryň energiỳasy A-dan artsa fotoeffekt ỳüze çykỳ

§4. Komptonyň effekti

1922-nji ỳylda amerikan fizigi A. Kompton ỳagtylygyň korpuskula häsiỳetini ynanarly tejribäniň üsti bilen subut edipdir. Ol rentgen şöhlesiniň erkin elektronlar tarapyndan dargadylmasyny barlapdyr we (2.4) we (2.5) gatnaşyklaryň dogrudygy esaslandyrylypdyr. Şeỳlelikde ol ỳagtylygyň erkin elektrolnlarda dargamasy iki bölejigiň – fotonyň we elektronyň maỳyşgak çaknyşma kanuny boỳunça bolup geçỳändigine göz ỳetiripdir.

Ol dargan rentgen şöhlesiniň ỳygylygynyň dargama burçuna baglylygyny öwrenipdir. Elektron erkin diỳilip hasaplanylsa onda onuň başdaky E energiỳasy we $\vec{p}$ impulsy nola deň diỳip alynmalydyr (elektron dynçlyk ỳagdaỳda). Rentgen şöhlesiniň kwanty bilen çaknyşandan soň elektronyň $E^{|}$ energiỳasy örän uly bolup biler, şol sebäpli jisimiň massasynyň tizlige baglylygyny aňladaỳan otnositelligiň nazaryỳetiniň formulasy ulanylmalydyr.

Şu nazaryỳete laỳyklykda $\vec{v}$ tizlik bilen hereket edỳän bölejigiň (elektronyň) kinetik energiỳasy deňdir:

$$E^{|} = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right],$$

we impulsy

$$\vec{p}^{|} = \frac{m_0 c \beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad .$$

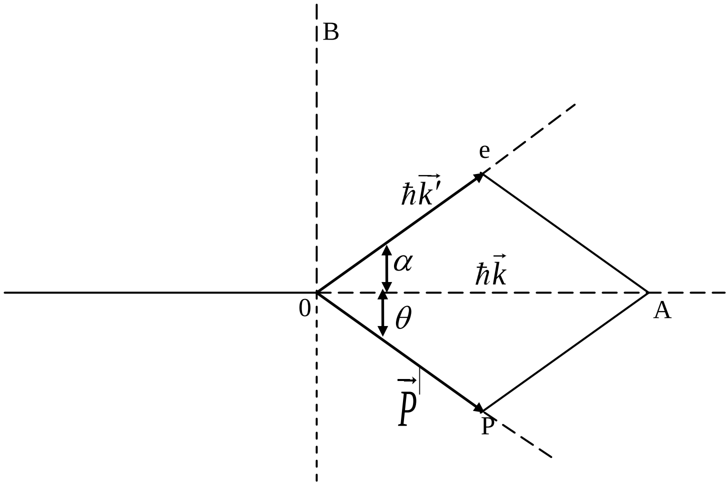
Onda (2.4) we (2.5) deňlemeler şeỳle görnüşe geçỳärler:

$$\hbar\omega = \hbar\omega^{|} + m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right], \tag{4.1}$$

we

$$\hbar\vec{k} = \hbar\vec{k}^{|} + \frac{m_0 c \beta}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{4.2}$$

(4.1)-den görnüşi ỳaly $\omega > \omega^{|}$, ỳagny dargan şöhläniň tolkun uzynlygy düşỳäniňkiden uly bolmaly, muňa Kompton (ỳa-da kwant) dargama diỳilỳär. Klassyk nazaryỳetde ỳagtylygyň erkin elektronlarda dargamasynda ỳygylyk üỳtgemeỳär $(\omega = \omega^{|})$. Kwant nazaryỳeti boỳunça bolsa fotonyň $\varepsilon = \hbar\omega$ energiỳasynyň bölegi elektrona berilỳär (42-nji çyzgy.) we şonuň üçin dargan fotonyň $\varepsilon^{|} = \hbar\omega^{|}$ energiỳasy , şonuň bilen birlikde onuň ỳygylygy umuman aỳdylanda birneme kiçi bolmaly $(\varepsilon^{|} < \varepsilon,\ \omega^{|} < \omega)$. Ỳygylygyň dargama burçuna baglydygyny tapmak üçin (4.2)-nji aňlatmany OA we OB iki özara



42- nji çyzgy.

perpendikulỳar ugurlara proektirläliň.

$$\left|\vec{k}\right| = \frac{p}{\hbar} = \frac{\varepsilon}{\hbar c} = \frac{\hbar\omega}{\hbar c} = \frac{\omega}{c} \quad \text{we} \quad \left|\vec{\mathrm{k}}'\right| = \frac{\omega'}{c}$$

bolỳandyklary üçin alỳarys:

$$\frac{\hbar\omega}{c} = \frac{\hbar\omega'}{c}\cos\theta + \frac{m_0 c\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}\cos\alpha,$$

we
$$0 = \frac{\hbar\omega'}{c}\sin\theta - \frac{m_0 c\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\alpha .$$

Şu iki deňlemelerden , käbir özgertmeleriň netijesinde tapỳarys

$$\beta^2 = \frac{\hbar^2(\omega^2 + \omega'^2 - 2\omega\omega'\cos\theta)}{\hbar^2(\omega^2 + \omega'^2 - 2\omega\omega'\cos\theta) + m_0^2 c^4}.$$

(4.3)

Indi (4.1)-i şeỳle görnüşe geçireliň

$$\hbar(\omega-\omega^{|})+m_0c^2=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

Deňlemäniň iki tarapyny kwadrata götereliň:

$$\hbar^2(\omega-\omega^{|})^2+m_0^2c^4+2\hbar m_0c^2(\omega-\omega^{|})=\frac{m_0^2c^4}{1-\beta^2}. \qquad (4.4)$$

(4.3)-I (4.4)-e goỳup we degişli özgertmelerden soň, alỳarys:

$$\omega-\omega^{|}=\frac{\hbar}{m_0c^2}\ \omega\omega^{|}(1-\cos\theta).$$

Belli boluşy ỳaly,

$$\omega=\frac{2\pi c}{\lambda} \quad \text{we} \quad \omega^{|}=\frac{2\pi c}{\lambda^{|}}$$

Şonuň üçin,

$$\Delta\lambda=\lambda^{|}-\lambda=\frac{4\pi\hbar}{m_0c}\sin^2\frac{\theta}{2},$$

ỳa-da $$\Delta\lambda=2\lambda_0\sin^2\frac{\theta}{2}. \qquad (4.5)$$

Bu ỳerde, $\lambda_0=\frac{2\pi\hbar}{m_0c}=2.4\cdot10^{-10}m$ -elektronyň Kompton tolkun uzynlygy. (4.5)-nji formulany ilkinji bolup Kompton alypdyr.

Dargan şöhläniň seredilỳän burçuny üỳtgedip we tolkun uzynlygynyň $\Delta\lambda$ üỳtgemesini ölçäp, Kompton we Wu özleriniň tejribelerinde alan netijelerini (2.5) formula boỳunça nazaryỳetiň aỳdanlary bilen deňeşdiripdirler we doly sazlaşygy alypdyrlar.

Şeỳlelikde, Komptonyň tejribeleri, ululygy (2.3)-nji formula bilen kesgitlenilỳän, ỳagtylygyň kwantynyň impulsynyň bardygynyň gös-göni tassyklamasydyr.

(4.5)-nji formuladaky λ_0 elektronyň relỳatiwistik nazaryỳetinde fundamental baha eỳedir we mikrodünỳä mahsus bolan masştablaryň biridir.

Plankyň $\hbar$ hemişeligininiň ỳerlikli rol oỳnaỳan hadysalaryna kwantly diỳilỳär.

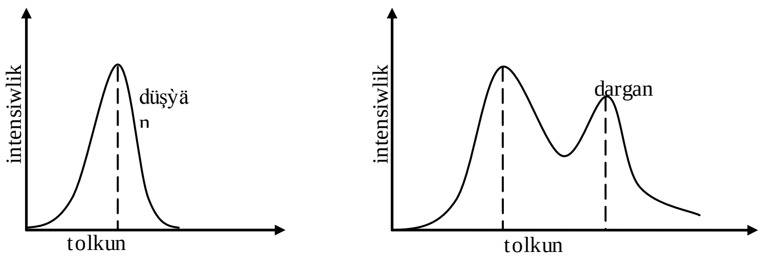
Elektron üçin Komptonyň tolkun uzynlygy λ_0 deňeşdirme kiçi ululyk, diỳmek şu effekti deňeşdirme kiçi tolkun uzynlyklarda seredip bolỳar. Dogrydanam, görünỳän ỳagtylyk üçin $\lambda = 10^{-7} m$, onda

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = 10^{-5} = 10^{-3}\%.$$

Rentgen şöhlesi üçin $\lambda = \left(10^{-10} \div 10^{-11}\right) m,$ onda

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = 10^{-1} = 10\% .$$

Şonuň üçin diňe ikinji ỳagdaỳda komptonly süỳşme tejribede gözegcilik edilỳär. 43- nji a çyzgyda düşỳän we 43- nji b çyzgyda dargaýan tolkunlaryň spektral paỳlanmasy suratlandyrylỳar.



a b

43- nji çyzgy.

Düşỳän tolkunda bir max bar bolsa, dargan tolkunda şu maksimum bilen bir hatarda, uzyn tolkunlara tarap süỳşen goşmaça max döreỳär. Şüỳşen max elektronlardaky dargama degişlidir.

(4.5)-nji formula boỳunça $\Delta\lambda$ ululygy bilip, $\hbar - y$ kesgitläp bolỳar, ỳagny Komptonyň effekti $\hbar - y$ tapmaklygyň ỳene-de bir usulyny berỳär.

§5. Atomyň kwant nazaryýeti

Atomly sistemanyň üznükli häsiýetlerini beýan etmek üçin, hereketiň kanunlaryna Plankyň hemişeligini $\hbar$ girizip, klassyk fizikanyň görnüşini üýtgetmekligi N.Bor teklip edipdir. Şu ugurdaky birinji ädimi onuň özi ýerine ýetiripdir. Ol 1913-nji ýylda üç fiziki pikirler - atom, şöhlelenme we elektron – özara kwant düşünjesi arkaly baglydyrlar diýip, tassyklapdyr. Ol klassyk kanunlary aşakdaky postulatlar bilen doldurypdyr.

Birinji - ***stasionar ýagdaýlaryň postulaty.*** Boruň tassyklamagyna görä, her bir atom diskret stasionar ýagdaýlaryň hataryna eýedir we elektron olarda tizlenmeli hereket edýän hem bolsa, atom energiýany şöhlelendirmeýär.

Boruň nazaryýetine razylykda stasionar ýagdaýlary adiabatiki inwariantlary kwantlandyrma ýoly bilen kesgitläp bolýar:

$$\oint P_i dq_i = n\hbar, \tag{5.1}$$

bu ýerde: n-kwant sany diýip atlandyrýar we diňe bitinsanly bahalary alyp bilýär: $n = 0,1,2,....$

Klassyk mehanikasyna laýykda, adiabatiki inwariantlaryň islendik hemişelik bahalary alyp bilýändiklerini ýada salmak hem ýerliklidir.

Ikinji – ***ýygylyklar postulaty.*** Elektron E_n energiýaly bir başlangyç stasionar ýagdaýdan, E_m energiýaly başga – ahyrky stasionar ýagdaýa geçende (bökende) atom $h\upsilon \equiv \hbar\omega$ energiýaly kwanty şöhlelenmelidir, diýip Bor çaklapdyr.

Şeýle ýagdaýdaky şöhlelenmäniň aýlanma ω ýygylygyny tapmak üçin aşakdaky görnüşde ýazylan energiýanyň saklanmak kanunyna ýüzleneliň:

$$\hbar\omega + E = \hbar\omega' + E'.$$

Göýbermek, ýagny şöhlelenmek hadysasy üçin:

$$\omega = 0, \; E = E_n, \; E' = E_m, \; \omega' = \omega_{nm}.$$

Onda

$$E_n = \hbar\omega_{mn} + E_m, \quad \text{ýa-da} \quad \hbar\omega_{mn} = E_n - E_m.$$

Şu deňlemäniň iki tarapyny Plankyň hemişeligine bölüp, kwant sistemalaryň siňdirýän ýa-da göýberýän ýygylyklaryny, iki ýygylyklaryň tapawudy görnüşde alynyp bilinjekdigine, gelýäris.

$$\omega_{mn} = \omega_n - \omega_m, \; \omega_n = \frac{E_n}{\hbar}, \; \omega_m = \frac{E_m}{\hbar}, \qquad (5.2)$$

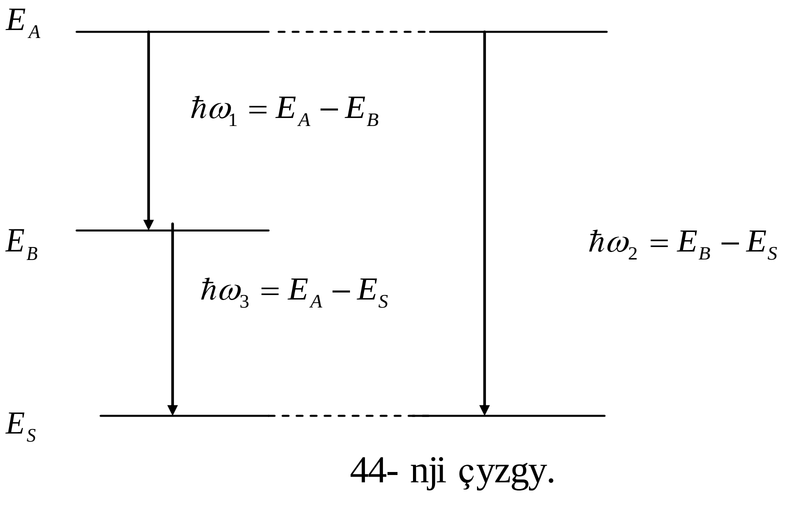
ω_n we ω_m ululyklara spektral termleri diýilýär. (5.2)-ni aşakdaky ýaly göçüreliň:

$$\omega_{mn} = \frac{E_n - E_m}{\hbar} \qquad (5.3)$$

Bu Boruň belli ýygylyklar düzgünini aňladýar.

Boruň nazaryýetinden has öňräk, atomlaryň gözegçilik edilýän ýygylyklary, termleriň tapawudy ýaly şekillendirilip bilinjekdiklerini Rits arassa empiriki ýol bilen dikeldipdir. Oňa Ritsiň **„kombinasion prinsipi“** diýilýär. Şu prinsipe laýykda: eger şol bir seriýa degişli iki dürli ýygylyklar bar bolsa, onda olaryň tapawudy (ýa-da jemi) hem ýygylygy berýär, ýöne soňky başga seriýa degişli bolmaly.

Şeýlelikde, tejribäniň görkezişi ýaly, eger ω_1 we ω_2 ýygylykly iki şöhle bar bolsa, onda $\omega_1 + \omega_2$ ýa-da $\omega_1 - \omega_2$ şöhleleri hem bardyr, ýagny spektral termleri kombinirläp dürli ýygylyklary öňünden aýdyp bolýar (44- nji çyzgy).



44- nji çyzgy.

Şol sebäpli, (5.2)-ni Ritsiň empiriki düzgüniniň matematiki aňladylyşy ýaly seredip bolýar.

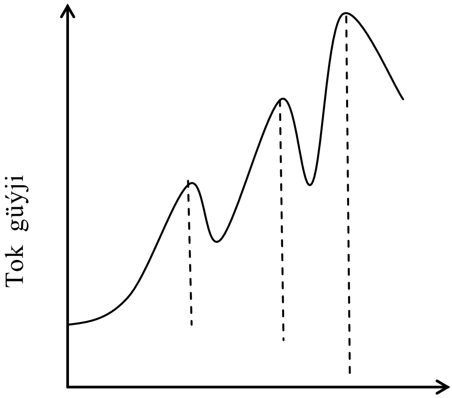
Getirilen üstünliklere garamazdan, Boruň nazaryýetine birnäçe wajyp kemçilikler mahsusdyr, öz gezeginde şular nazaryýetiň mundan beýläk ösmeginde uly päsgelçilikleri döretdiler. Ol kemçilikler:

birinjiden – Boruň nazaryýeti özi boýunça ýarymklassyk häsiýetlidir;

ikinjiden – Boruň nazaryýeti spektral çyzyklaryň intensiwligini däl-de, diňe ýygylyklaryny hasaplamaga mümkinçilik berýär, olaryň intensiwligini tapmak üçin „laýyklyk prinsipiniň“ esasynda klassyk elektrodinamika ýüz urmaly bolýar;

üçünjiden – Boruň postulatlarynyň kömegi bilen köp elektronly atomlaryň nazaryýetini gurmak başa barmady, oňa şol sanda iki elektronly geliýniň atomy hem girýär.

Boruň nazaryýeti klassyk nazaryýetden kwantla geçmekde geçiş etap bolup hyzmat etdi, öz gezeginde soňky atomlaryň intensiwliklerini hem kesgitlemäge ýardam edýär. Bellenilen kemçiliklere garamazdan, Boruň nazaryýeti şu wagta çenli uly usuly bahasyny saklaýar. Mysal üçin: kwantlanma prosesleri bilen bagly bolan köp netijeleri derňemekde Boruň nazaryýeti ugur alynýan punkt bolup hyzmat edýär. Bor tarapyndan postulirlenen atomlaryň durnukly energetiki ýagdaýlarynyň diskretnilikleri, 1913-nji ýylda Frankyň we Gersiň goýan tejribelerinde özüniň tassyklamasyny tapdy.



45- nji çyzgy.

Elektronlaryň dessesini (togy) simabyň bugunyň içinden göýberip,haçan-da elektronlaryň energiýasy 4,9 eW-den kiçi bolan ýagdaýda elektronlaryň simabyň atomlary bilen çaknyşygy toguň ululygyna täsir etmeýändigini olar görkezipdirler.

Haçanda elektronlaryň energiýasy 4,9 eW ýetende, tok birden aşak düşýär. Elektronlaryň energiýasynyň mundan beýläk ösdürilmegi periodiki gaýtalanýan toguň ýiti kemelmegi alynýar.

Şu hadysany Boruň nazaryýetiniň nukdaýnazaryndan örän ýönekeý esaslandyrylýar.

Dogrudanam, „oýandyrylmadyk“ simabyň atomynyň energiýasyny (ýagny atomyň çaknyşyga çenli) E_0 deň diýip alynsa we Boruň birinji postulatyna degişlilikde energiýanyň indiki mümkin bahasy $E_1 = E_0 + 4{,}9$ ew diýip çaklanylsa, onda aňsat görnüşi ýaly, dessedäki $E < 4{,}9$ ew bolsa, onda dessede elektronlar atomlary „oýandyrylan“ ýagdaýa geçirip bilmeýärler; şonuň üçin urgular maýyşgak bolýar, ýagny tok üýtgemeýär. Eger-de $E \geq 4{,}9$ ew bolsa, onda dessede elektronlar energiýanyň bölegini (4,9 ew deň) atomlara berip bilýärler; onuň bilen bilelikde tok hem üýtgeýär. Eger-de $14{,}7ew > E > 9{,}8ew$ interwalda energiýa bahany alsa, onda elektronlar atomlara energiýany iki gezek berip bilýärler: birinji urgynyň netijesinde 4,9ew we ikinji urgynyň netijesinde hem 4,9ew.

Indi Boruň birinji we ikinji postulatlaryny wodorodameňzeş atomyň nazaryýetini dikeltmek üçin ulanalyň.

Orbitanyň radiusy r we energiýa E üçin aňlatmalaryna

$$r = \frac{I^2}{4\pi^2 m_0 z e_0^2}, \qquad \text{we}$$

$$E = -2\pi^2 \frac{m_0 z^2 e_0^4}{I^2}$$

(5.1)-e laýykda adiabatik inwariantyň I kwant bahasyny $I = 2\pi n\hbar$ goýup, alýarys:

$$r_n = \frac{n^2\hbar^2}{m_0 z e_0^2}, \tag{5.4}$$

$$E_n = -\frac{m_0 z^2 e_0^4}{2n^2\hbar^2} \tag{5.5}$$

n=1 bahada atomyň aşaky (esasy) ýagdaýynyň energiýasyny:

$$E_1 = -\frac{m_0 z^2 e_0^4}{2\hbar^2} \qquad (5.6)$$

we degişli radiusyny

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{m_0 z e_0^2} = \frac{1}{z} a_0 , \qquad (5.7)$$

alýarys.

(5.7)-de a_0 - birinji Bor orbitanyň radiusy

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_0 e_0^2} \approx 0{,}529 \cdot 10^{-10} m.$$

Boruň ikinji postulatynyň esasynda, (5.5)-e degişlilikde ω_{mn} ýygylyklar üçin aňlatmany tapýarys:

$$\omega_{mn} = \frac{E_n - E_m}{\hbar} = \frac{m_0 z^2 e_0^4}{2\hbar^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (5.8)$$

ýagny, z=1 –de Balmeriň formulasyny alýarys:

$$\omega = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right),$$

Boruň nazaryýeti, Ridbergiň hemişeligi üçin empiriki dikeldilen bahany Plankyň $\hbar$ hemişeligi bilen baglaşdyrmaga ýardam etdi:

$$R = \frac{m_0 e_0^4}{2\hbar^3},$$

Tejribe bilen gabat gelýän, Ridbergiň hemişeligi üçin bahaly Balmeriň formulasynyň alynmagy, Boruň nazaryýetiniň has uly üstünlikleriniň biridir.

§6. Mikrobölejikleriň korpuskula – tolkun häsiýeti. Lui de Broýlyň çaklamasy. Tolkun funksiýa

1923-nji ýylda fransuz fizigi Lui de Broýl atomda elektronyň hereketiniň haçan durnukly boljakdygyny esaslandyrypdyr. Onuň tassyklamagyna laýyklykda, haçan-da atomyň orbitasynyň uzynlygynyň üstünde «n» bitin sana barabar «elektron tolkunlary» ýerleşse, şonda we diňe şonda, elektronyň hereketi durnuklydyr. Şundan aşakdaky ýönekeý şert gelip çykýar:

$$2\pi r = n\lambda$$

Şu aňlatmany Boruň birinji postulaty $mvr = n\hbar$ bilen birleşdirip, «elektron tolkunynyň uzynlygyny» tapýarys:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv}$$

ýa-da (6.1)

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{P}$$

Görnüşi ýaly, de Broýluň (6.1) formulasy Plankyň $\varepsilon = \hbar\omega$ formulasy ýaly diýseň ýönekeýdir. Şunuň bilen birlikde, de Broýl «stasionar orbita» düşünjesine täze kesgitleme bermegi başarypdyr: ol, üstünde bitin sana barabar $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$

“elektron tolkunlary» ýerleşýän

formulasy ýaly diýseň ýönekeýdir. Şonuň bilen birlikde de Broýl “stasionar orbita” dűşűnjesine täze kesgitleme bermegi başarypdyr: ol űstűnde bitin sana barabar λ “elektron toilkunlary” ýerleşýän orbitadyr.

Häzirki zaman kwant nazaryýetiniň ösmegi, λ tolkun uzynlygy we ω ýygylygy bilen suratlandyrýan ýagtylygyň tolkun häsiýeti bilen bir hatarda onuň korpuskula häsiýetiniň hem açylmagy bilen başlanýar. Ýagtylyk kwantynyň energiýasy we impulsy, degişlilikde aşakdakylar ýalydyr:

$$\varepsilon = \hbar\omega \qquad (6.2)$$

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}$$

Ýagtylygyň kwant nazaryýetiniň (6.2) we (6.3) esasy kanunlaryny derňäp, de Broýl olaryň adaty bölejikleriň hereketine hem utgaşdyryp boljakdygynyň mümkinçiligi baradaky gipotezany öňe sürýär. Başgaça aýdylanda, tolkun – korpuskula dualizmi diňe ýagtylyga däl-de, ähli bölejiklere (ilki bilen elektrona) hem mahsusdyr.

Lui de Broýluň pikirine sazlaşykda,

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

gatnaşyklar arkaly tizlik bilen bagly bolan relýatiwistik E energiýaly we P impulsy erkin elektronlaryň akymy, tolkun häsiýete hem eýedir. Oňa degişli ýygylyk we tolkun sany aşakdaky gatnaşyklaryň üsti bilen kesgitlenilýärler.

$$E = \hbar\omega$$

$$\vec{P} = \hbar\vec{k} \qquad (6.4.)$$

Şeýlelikde, fotonlaryň nazaryýetiniň dikeldilmeginde Eýnşteýnyň alan (6.3.) gatnaşygy, de Broýluň hödürlän gipotezasy netijesinde, uniwersal häsiýete eýe boldy we ýagtylygyň korpuskula häsiýetlerini deňlemek üçin hem-de hereketli elektronlaryň tolkun häsiýetlerini barlamakda, şol bir deň derejede ulanylyp başlandy. Eger Plankyň hemişeligi nola ymtylýar diýip hasap edilse, onda bölejikleriň we ýagtylygyň özlerini alyp barmaklaryndaky iki taraplylyk doly ýok bolýar. Kwant mehanikasynda atom obýektleriň häsiýetleri kömekçi ululygyň – tolkun funksiýanyň (ýagdaýyň wektorynyň) kömegi bilen suratlandyrylýar. Eger bölejigiň ýagdaýyny tolkun funksiýa bilen suratlandyryp bolmasa, onda şeýle halda, ýagdaý dykyzlygyň matrisasynyň üsti bilen berilýär.

Bölejigiň hereketiniň ýagdaýyny suratlandyrýan tolkun funksiýa, umuman aýdylanda, $\vec{r}$ radius-wektoryň we t wagtyň kompleks, birbahaly we üznüksiz funksiýasy bolmalydyr. Lui de Broýlyň teklibine laýykda, erkin bölejikleriň hereketi, ýagtylyga meňzeşlikde, tekiz tolkuny aňladýan tekiz tolkun funksiýa bilen suratlandyrylýar:

$$\psi(\vec{r},t) = Ae^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \qquad (6.5.)$$

bu ýerde A – tolkunyň amplitudasy. (6.4.)-iň esasynda (6.5.)-i şeýle görnüşde göçürilýär.

$$\psi(\vec{r},t) = Ae^{i(\frac{E}{\hbar}t - \frac{\vec{P}}{\hbar}\vec{r})}$$

şeýle funksiýa bilen aňladylýan tolkuna de Broýlyň tolkuny diýilýär.

(6.5.)-iň käbir häsiýetlerine seredeliň. Meseläni sadalaşdyrmak üçin birölçegli (meselem, tolkun OX okuň ugruna ýaýraýar) herekete seredeliň, onda (6.5.)-iň ýerine alarys.

$$\psi(x,t) = Ae^{i(\omega t - kx)}$$

bu ýerde $(\omega t - kx)$ – ululyk tolkunyň fazasyny berýär. Goý, haýsy hem bolsa bir x nokatda faza kesgitli "a" baha eýe bolýar diýeliň. Şu nokadyň koordinaty

$$a = \omega t - kx$$

deňlemeden tapylýar. Ony wagt boýunça differensirläp, alarys:

$$u = \frac{\omega}{k} \qquad (6.7.)$$

(6.7.)-i ululyga faza tizligi diýilýär we görnüşi ýaly, giňişlikde fazanyň "a" bahasy "u" tizlik bilen ýerini üýtgedýär. Şu tizlik "k" ululyga, diýmek, tolkun uzynlyga bagly, bu bolsa, tolkunlaryň dispersiýasynyň bardygyny aňladýar. Elektromagnit tolkunyndan tapawutlylykda, (6.4.)-den gelip çykyşy ýaly, de Broýlyň tolkunlarynyň dispersiýasy boş giňişlikde bolýar. Şeýle ýagdaý de Broýlyň (6.4.) deňlemelerinden gelip çykýar. Dogrydanam, E energiýanyň we p impulsyň arasynda kesgitli gatnaşyk bar, ýagny otnositelligiň nazaryýetine laýykda bölejikleriň υ<<c tizliginde (Nýutonyň mehanikasynyň ulanylýan oblasty), erkin hereket edýän bölejigiň energiýasy deňdir:

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2 c^2} = m_0 c^2 + \frac{P^2}{2m_0} + \ldots$$

Şuny (6.4.)-iň birinjisine goýup we $P^2 = \hbar^2 k^2$ hasaba alyp, alarys:

$$\omega = \frac{E}{\hbar} = \frac{m_0 c^2}{\hbar} + \frac{\hbar k^2}{2m_0} + \ldots \qquad (6.9.)$$

we, diýmek, $u = \frac{\omega}{k}$ tizlik k-nyň funksiýasydyr. Indi, tolkunyň we bölejigiň hereketleriniň arasyndaky baglylygy dikeltmeklige geçeliň. Onuň üçin, bir kemsiz kesgitli ω ýygylygy we λ tolkun uzynlygy bolan (6.6.) berk däl monohromatik tolkuna seredeliň. Oňa tolkun topary hem diýilýär. Tolkun topary (paketi) diýip, tolkun uzynlyklary we ýaýraýan ugurlary boýunça biri-birinden az tapawutlanýan tolkunlaryň superpozisiýasyna aýdylýar. Tolkun topary OX okuň ugruna ýaýraýar diýeliň, onda (6.6.)-ny aşakdaky aňlatma ýaly ýazyp bileris.

$$\psi(x,t) = \int_{k_0 - \Delta k}^{k_0 + \Delta k} A(k) e^{i(\omega t - kx)} dk \ , \qquad (6.10.)$$

bu ýerde $k_0 = \dfrac{2\pi}{\lambda_0}$ – tolkun sany we ol onuň golaýynda topary emele getirýän tolkunlaryň tolkun sany ýerleşýär.

Δk -nyň kiçi diýip hasap edilýändigini göz öňünde tutup, ω ululygy $(k\text{-}k_0)$-yň derejesi boýunça hatara dargadalyň

$$\omega = \omega_0 + \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 (k - k_0) + \ldots$$

we űstesine-de $k=k_0+(k\text{-}k_0)$ diýip ýazyp bileris.

Onda (6.10.) şeýle göçürilýär:

$$\psi(x,t) = A(k_0) \int\limits_{k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} e^{i\left[\omega_0 + \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 (k-k_0)\right]t - i\left[k_0 + (k-k_0)\right]x} dk =$$

$$= A(k_0) e^{i(\omega_0 t - k_0 x)} \int\limits_{k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} e^{i\left[\left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 t - x\right](k-k_0)} dk$$

Täze üýtgeýäni girizeliň, ýagny

$\xi = k - k_0$, bu ýerden $d\xi = dk$, onda

$$\psi(x,t) = A(k_0) e^{i(\omega_0 t - k_0 x)} \int\limits_{-\Delta k}^{+\Delta k} e^{i\left[\left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 t - x\right]\xi} d\xi = B(x,t) e^{i(\omega_0 t - k_0 x)}$$

Tolkun paketiniň $B(x,t)$ amplitudasy deňdir:

$$B(x,t) = A(k_0)\int_{-\Delta k}^{+\Delta k} e^{i\left[(\frac{d\omega}{dk})_0 t - x\right]\xi} d\xi = A(k_0)\frac{e^{i\left[(\frac{d\omega}{dk})_0 t - x\right]\xi}}{i\left[(\frac{d\omega}{dk})_0 t - x\right]}\Bigg|_{-\Delta k}^{+\Delta k} =$$

$$= 2A(k_0)\frac{\sin\left[(\frac{d\omega}{dk})_0 t - x\right]\Delta k}{\left[(\frac{d\omega}{dk})_0 t - x\right]} \quad , \qquad (6.11.)$$

şu tolkun paketi, bölejigiň çäklendirilen giňişligiň uly bolmadyk oblastynda praktiki taýdan noldan tapawutlanýar.

Haçan
$$x = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 t \quad , \qquad (6.12.)$$

diýip hasap edilse, onda (6.11.)-iň droby bire deň we paket maksimum baha eýe bolýar. Oňa tolkun toparynyň merkezi diýilýär.

(6.12.)-ni wagt boýunça differensirläp, taparys

$$\upsilon = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 \quad , \qquad (6.13.)$$

şu ululyga topar tizligi diýilýär, ýagny paketiň merkezi bölejik ýaly hereket edýär.

Eger, seredilýän tolkun dispersiýa eýe bolmadyk bolsa, onda netijä gelinerdi. Dispersiýa zerarly de Broýlyň tolkunynda (6.9.)-y peýdalanyp topar tizligi hasaplalyň.

$$\upsilon = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\hbar k}{m_0} = \frac{P}{m_0} = \frac{m_0 v}{m_0} = v$$

Şu taýdan görnüşi ýaly de Broýlyň tolkunynyň topar tizligi bölejigiň mehaniki tizligine deň.

Iki ýagdaý üçin de Broýlyň tolkun uzynlygyny hasaplalyň.

(6.4.)-iň ikinjisinden gelip çykýar

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi\hbar}{P}. \qquad (6.14.)$$

Kiçi tizlik $\upsilon \ll c$ bilen çäklenip we

$$E = \frac{P^2}{2m_0}$$

deňligi peýdalanyp, alarys:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_0 E}} \qquad (6.15.)$$

Şu formula bölejigiň massasyny we energiýasyny bilip, onuň tolkun uzynlygyny hasaplamaga ýol berýär. Ony elektrona ulanalyň. Beýle ýagdaýda $m_o=9\cdot 10^{-31}kg$. Energiýany *eW* birlikde aňlatmak üçin $E=eV$ diýeliň, bu ýerde, e – elektronyň zarýady, V – woltda ölçenilen elektrony tizlendirýän potensiallaryň tapawudy, tapýarys:

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{V}}\,\mathring{A} \qquad (6.16.)$$

V = 1 eW üçin alýarys: $\lambda=0.122A^o$, $V = 10000\ eW$ üçin bolsa $\lambda = 12{,}2\,\mathring{A}$.

Wodorodyň molekulasy üçin tolkun uzynlygy hasaplalyň. 300º temperaturada wodorodyň molekulasynyň ortaça energiýasy 6 · 10^{-14} eW, molekulanyň massasy 2·1,66 · 10^{-27} kg. Şu bahalary (6.15)-e goýup, tapýarys $\lambda = 1\overset{\circ}{A}$. Görnüşi ýaly de Broýlyň tolkun uzynlygy örän kiçi; energiýa we massa näçe uly bolsa, ol şonça-da kiçidir.

Häzirki zaman tizlendirijilerde örän ýokary energiýaly bölejikler alynýar. Diýmek, olary juda gysga tolkun uzynlygyň çeşmesi ýaly seredip bolýar. Eger bölejigiň energiýasy dynçlyk energiýadan köp uly bolsa
$E >> m_0c^2$, onda (6.8.)-den alýarys. $E \approx P \cdot c$, diýmek şeýle ýagdaýda tolkun uzynlygy, (6.1.)-iň esasynda

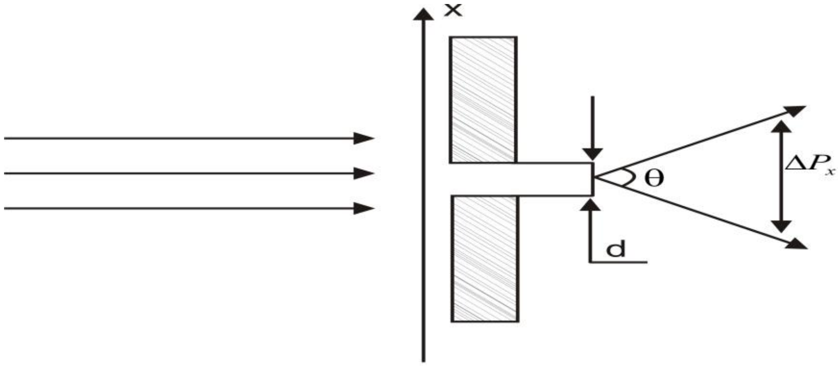
$$\lambda = \frac{2\pi\hbar c}{E}.$$

deňdir. $E = (10 \div 20)\, GeW$ energiýada, protonlar ýa-da mezonlar üçin $\lambda = (1{,}26 \cdot 10^{-17} \div 6{,}3 \cdot 10^{-18})$ m. Şeýle gysga tolkunlaryň kömegi bilen elementar bölejikleriň içki strukturasyny öwrenip bolýar.

§7. Kesgitsizlik gatnaşygy we onuň matematiki aňladylyşy

Kwant mehanikasynyň fundamental aýratynlygyny aňladýan kesgitsizlik gatnaşygyna getiryän iki hyýaly tejribä seredeliň. Kwant nazaryýeti, bir wagtda bölejigiň ornuny we impulsyny takyk bilmeklige mümkinçilik berýän şol bir tejribäni oýlap tapyp bolmaýar diýip tassyklaýar. Ideal mikroskopyň kömegi bilen elektronyň ornuny kesgitlemäge synanşylýar diýeliň. Belli bolşy ýaly, mikroskopda nämedir bir zada seretmek üçin ony ýagtylandyrmaly, üstesine-de , şol seredilýän zat özüni ölçegi boýunça ýagtylygyň tolkun uzynlygyndan kiçi bolmaly däldir. Elektronyň ornuny has takyk kesgitlemek üçin, ýagtylygyň tolkun uzynlygy şonça kiçi bolmaly. Ýagtylygyň tebigaty onuň kwantydyr. Eger elektrona ýagtylygyň kwanty düşse, onda ol oňa nähili-de bolsa bir impuls berýär. Diýmek, elektronyň ornuny takyk kesgitlemekde, ony has kiçi tolkun uzynlykly ýagtylyk bilen ýagtylandyrmaly. Bu öz gezeginde has uly energiýaly kwantyň ulanylýandygyny aňladýar. Netijede, elektronyň başdaky impulsynyň ýerlikli üýtgemegine gelinyär. Eger elektronyň impulsy mikroskoply tejribeden öň belli bolsa, onda tejribeden soň onuň impulsy doly näbellidir.

Elektronyň ornuny yşyň kömegi bilen hem kesgitläp bolýar. Elektronyň uçup geçýän yşyň ini näçe kiçi bolsa, şol wagtyň pursatynda onuň orny şonça takyk bellenilyär. Şu ýerde “ýakymsyzlyk” elektronyň tolkun tebigatyndan gelýär. Özüniň tolkun häsiýetiniň esasynda, elektron yşy geçip ugruny üýtgedýär. Diýmek, impulsyň ugry hem oňa degişlilikde üýtgeýär. Yş näçe insiz bolsa, bölejigiň orny şonça takyk kesgitlenilýär, difraksion gyşarma şonça ulalýar we ilki başdaky impuls şonça-da üýtgeýär (46- njy çyzgy).



(Çyzgy-1)

46- nji çyzgy.

Şeýlelikde, nazaryýetli ya-da pikiriňde getirilen tejribeleri barlap, şeýle netijä gelinýär: bölejigiň koordinaty anyk belli däl, ýöne ol, nähili-de bolsa bir araçäkde ýerleşýär, bölejigiň impulsyny dogry görkezip bolmaýar, ýöne ol “plan” impulsa garanyňda uly däl.

Başgaça aýdylanda, tejribe bölejigiň koordinatyny <<şeýle bir>> ýalňyşlyk, <<şeýle bir>> nätakyklyk bilen berýär; şu nätakyklygy sanly aňladyp bolýar. Eger, impulsdaky ýalňyşlyk hem sanly aňladylsa, onda bölejige bir wagtda seredilende şol iki nätakyklygyň köpeltmek hasyly hiç wagt kwant tasiriň ýaryndan kiçi bolmaýar. Diňe şertiň oňaýly ýagdaýynda şol köpeltmek hasyly kwant täsiriň ýaryna deň bolup biler. Bu kwant nazaryýetiniň belli **<<nätakyklyk gatnaşygydyr>>**. Ol uniwersal hasiýete eýedir we köplenç ony fizikada prinsip derejesine galdyrýarlar.Şu prinsip kwant nazaryýetiniň netijesidir we bir wagtda koordinatyň we impulsyň ölçenilmekleri diňe şeýle bir nätakyklyk bilen mümkindigini düşündirýär.

Kwant mehanikasynda seýle ýagdaýyň ýüze çykýandygy de Broýlyň

$$P = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} \tag{7.1}$$

formulasyndan hem görünýär.Dogrydan hem, λ – ny hut tolkun uzynlygy diýip hasap edilse, onda tolkunyň tebigatyna garamazdan şu ululuk $\boldsymbol{x}$ koordinatyň funksiýasy bolup bilmez, ýagny <<tolkun uzynlygy $\boldsymbol{x}$ nokatda λ deň>> tassyklamanyň fiziki manysy ýok. Onda (7.1)-iň çep tarapy hem $\boldsymbol{x}$ koordinatanyň funksiýasy bolup bilmeýär we <<bölejigiň impulsy $\boldsymbol{x}$ nokatda P deň>> tassyklama hem ýerlikli däl.

Jemläp aýdylanda, kwant oblastda bir wagtda gutarnykly kesgitli bahaly impulsly we koordinataly bölejik ýok. Şu tassyklamanyň matematiki aňladylşyna geçeliň.

Şu bölümiň 1-nji paragrafynda görkezilişi ýaly:

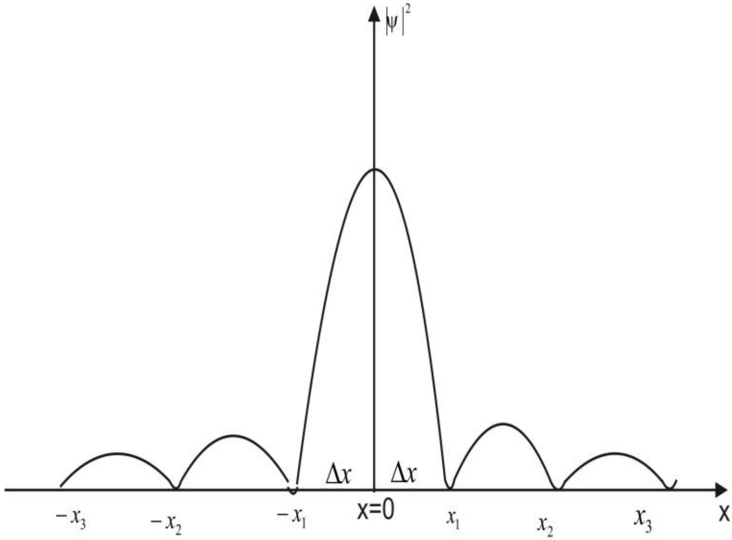
$$\Psi(x,t) = \int_{k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} A(k)\, e^{-i(wt-kx)}\, dk \tag{7.2}$$

tolkunlaryň topary

$$\Psi(x,t) = 2A(k_0)\,\frac{\sin\left[\left(\frac{dw}{dk}t - x\right)\Delta k\right]}{\frac{dw}{dk}t - x}\, e^{-i(w_0 t - k_0 x)} \tag{7.3}$$

görnüşe getirildi.

Tolkunlaryň seýle toparynda $|\Psi|^2$ intensiwlik t wagtyň käbir pursaty üçin, aşakdaky 48- nji çyzgyda getirilýär.



Çyzgy-2

47- nji çyzgy.

Çyzgydan görnüşi ýaly, amplitudanyň maksimum bahasy $x = 0$ baha degişli. $x = x_n = \frac{\pi}{\Delta k} n,$ $n = \pm 1, \pm 2, \ldots\ldots$ ýagdaýlarda amplituda nola öwrülýär. $\Delta x = 2x_1 = \frac{2\pi}{\Delta k}$ bahany tolkun paketiniň giňişlik dowamlygy ýaly hasap edip bolýar. Δk (impulslaryň bahasynyň pytraňlygy) näçe kiçi bolsa, paketiň giňişlik dowamlylygy şonça uly. Şeýlelikde:

$$\Delta x \cdot \Delta k = 2\pi \qquad (7.4)$$

Bu arassa tolkunly gatnaşyk, islendik tolkunlar üçin hakdyr we ol tolkun toparynyň çyzykly Δx ölçegininiň tolkun sanlaryň Δk interwalyna köpeldilmegi hemişelik ululuk we 2π –e deňdigini görkezýär.

Eger k ululuk Δk çäkde üýtgeýän bolsa, onda P impuls hem $\Delta P_x = \hbar \Delta k$ çäkde üýtgeýär we (7.4)-i aşakdaky görnüşde göçürip bileris.

$$\Delta P_x \cdot \Delta x = 2\pi\hbar \qquad (7.5)$$

Bu formuladaky ΔP_x we Δx ululyklaryň manysy aşakdakydan gelip çykýar: eger (7.2) de Broýlyň tolkun topary bilen suratlandyrýan ýagdaýda yerleşen bölejigiň koordinatyny ölçemeklik ýerine ýetirilse, onda t wagt pursatynda koordinaty ölçemekleriň netijeleriniň orta bahasy $\bar{x} = \frac{d\omega}{dk} t$ bolar. Aýratyn ölçemekleriň netijeleri bolsa, $\pm \Delta x$ interwalda esasan $\bar{x}$-yň ýakynynda ýaýradyşdyrylandyr. Δx ululuk x koordinatda kesgitsizlikdir. Eger şol seredilýän ýagdaýda bölejigiň P_x impulsy ölçenilse, onda onuň orta bahasy $\overline{P_x} = P_0 = \hbar k$ bolar we aýratyn bahalary bolsa $\Delta P_x = \pm \hbar \cdot \Delta k_x$ interwalda p_0-yň ýakynynda toplanandyr. ΔP_x ululyk P_x impulsda kesgitsizlikdir. Şol sebäpli (7.5) gatnaşyga P_x impuls we oňa çatrymly x koordinat üçin kesgitsizlik gatnaşygy diýilýär. Ony ilkinji gezek

Geýzenberg dikeldipdir. Ol häzirki zaman kwant mehanikasynyň esasy fundamental netijesidir we topar näçe insiz bolsa, ýagny bölejigiň koordinatynyň bahasy has kesgitlenen bolsa (Δx kiçi), onda bölejigiň impulsynyň bahasy şonça azrak kesgitlenilýär (ΔP_x ulurak) we tersine.

§8. Mikrobölejikleriň ýerleşmekleriniň ähtimallygy

Kwant mehanikasynda atom obýektleri tolkun funksiýa (ýa-da ψ funksiýa) arkaly suratlandyrylýar. Tekiz tolkun diýip hasap edilýän de Broýluň tolkunynyň fiziki manysy tiz wagtda belli bolmandyr. Başgaça aýdylanda, ψ-funksiýa bölejigiň düzümini berýärmi, ýa-da onuň hereketini suratlandyrýarmy diýen meseleler örän çekeleşikli bolupdyr. Bu ugurda dürli garaýyşlar ýüze çykypdyr. Korpuskula bilen tolkunyň arasyndaky baglylygyň birinji interpretasiýasyny Şrýodinger hödürläpdir. Onuň çaklamasyna laýyklykda, bölejik tolkunlardan emele getirilmeli, üstesine-de onuň dykyzlygynyň giňişlik boýunça “çyrşalmasy “ $\psi^*\psi$ deň. Nazary nukdaýnazardan, tolkunlaryň toparynyň kömegi bilen, bölejigiň radiusy tertipdäki möçberli tolkun paketini emele getirip bolýar. Tolkun paketiniň pytramak (ýa-da ýaýramak) wagty

$$\Delta t \approx \frac{m_0}{\hbar}(\Delta x)^2$$

aňlatmadan alynýar. Massasy $m_0 = 10^{-3} kg$ we $\Delta x = 0{,}7 \cdot 10^{-2} m$ möçberli mikrobölejik üçin pytramak wagty $\Delta t \approx 10^{25} s$, ýagny tolkun paketi praktiki taýdan pytramaýar. Elektronlar üçin bolsa $m_0 = 10^{-31} kg$, $\Delta x \approx 10^{-15} m$ we şeýle halatda $\Delta t \approx 10^{-26} s$ wagtdan soň, ýagny mgnowen, tolkun paketi ýaýrap başlaýar. Şeýlelikde, Şrýodingeriň elektronyň çyrşama nazaryýeti boýunça, elektrony durnukly emele gelen diýip bolmaýar.

Häzirki döwürde M.Born tarapyndan hödürlenen tolkun funksiýasynyň başga, ýagny statistik interpretasiýasy kabul edilipdir. Şu interpretasiýa laýyklykda, tolkun funksiýanyň modulynyň kwadraty, ýagny $|\psi|^2 = \psi^* \cdot \psi$, giňişligiň dürli nokatlarynda elektrony tapmaklygyň ähtimallygynyň dykyzlygyny häsiýetlendirýär. Elektron atomda bölejik ýaly däl-de, haýsydyr bir bulut ýaly ýaýraýar we şu buludyň dykyzlygy $\psi(x)$ tolkun funksiýa bilen kesgitlenýär, üstesine-de ýadrodan x uzaklykda elektron buludynyň dykyzlygy şu funksiýanyň kwadratyna deň:

$$\rho(x) = |\psi(x)|^2 = \psi^*(x) \cdot \psi(x),$$

bu ýerde $\psi^*(x)$–kompleks çatrymly funksiýa.

Bornuň statistik interpretasiýasy elektronyň struktursyna degmeýär. Elektron bütewiligini saklap bilýär. Wagta görä ψ tolkun funksiýasynyň üýtgemeginde, giňişligiň dürli nokatlarynda elektrony tapmaklygyň ähtimallygy üýtgeýär.

M.Bornuň beren tolkun funksiýasynyň interpretasiýasynda uly kynçylyk, ony bir elektronyň hereketine ulanylanda ýüze çykdy. Rus alymlary L.Biberman, N.Suşkin we W.Fabrikant, S.Wawilowyň fotonlaryň kwantly fluktuasiýasy baradaky tejribesini ösdürip, elkronlaryň dessesiniň intensiwliginiň peselmeginde difraksion suradyň açyklygynyň gitdigiçe kemräk bolup başlanýandygyny we ahyrsoňy, haçanda desse aýratyn uçýan elktronlardan ybarat bolsa, elektronda difraksion surat däl-de, aýratyn nokatlaryň şekilleriniň ýüze çykýandygyny görkezýär. Emma, wagtyň ýeterlikli dowamlygynda bir elektrondan soň başgalaryny goýberseň, ekranda ýekelikdäki nokatlar kem-kemden goşulyp difraksion suraty döredýärler. Diýmek, elektronyň tolkun häsiýetini elektronlaryň kollektiw effekti ýaly seredip bolmaýar; tolkun häsiýete, her bir aýratyn alynan elektron eýedir.

Indi de Broýlyň tolkununyň statistiki interpretasiýasynyň matematiki aňladylşyna geçeliň. Bölejikleriň koordinatasyny x, y, z arkaly belläliň. Şu ululyklar, giňişlikde bölejigiň lokalizlenen nokadynyň koordinatyny kesgitleýärler. Tolkun funksiýany $\Psi(x, y, z, t)$ diýip alýarys. Tükeniksiz kiçi $x_1 x + dx$; $y_1 y + dy$; $z_1 z + dz$ oblasta seredip we onuň içinde $\Psi-$ni hemişelik diýip hasap edip bolýandygyndan ugur alyp, bölejigi tapmaklygyň ähtimallygy şu oblastyň $dv = dx \cdot dy \cdot dz$ göwrümine proporsionaldygyna gelýäris. Wagtyň t pursatynda

dv göwrüm elementde x, y, z nokadyň golaýynda bölejigi tapmaklygyň ähtimallygy $dw \cdot (x, y, z, t)$ bilen belgiläp, de Broýlyň tolkunynyň statistik interpretasiýasyny aşakdaky deňlik görnüşde ýazyp bileris.

$$dw \cdot (x, y, z, t) = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dv. \qquad (8.1)$$

Şu deňleme, belli tolkun funksiýa boýunça bölejikleriň ýerleşmekleriniň ähtimallygyny hasaplamaga mümkinçilik berýär.

$$w \cdot (x, y, z, t) = \frac{dw}{dv} = = |\Psi(x, y, z, t)|^2 , \qquad (8.2)$$

ululyga ähtimallygyň dykyzkygy diýilýär. (8.1)-i v göwrüm boýunça integrirläp, taparys:

$$W(v, t) \quad = \int_v |\Psi(x, y, z, t)|^2 dv \qquad (8.3)$$

Eger integrirlemek ähli göwrüm boýunça amala aşyrylsa, onda t wagt pursatynda bölejik göwrümiň içiniň haýsy hem bolsa bir ýerinde ýerleşendigini taparys. Bu hakykylyk hadysanyň ähtimallygydyr. Ähtimallyk nazaryýetinde ol 1-e deň. Eger şu ylalaşyk kabul edilse, onda ähli göwrüm boýunça $|\Psi|^2$ alynan integraly 1-e deňlemeli.

$$\int_v |\Psi(x, y, z, t)|^2 dv = 1 \qquad (8.4)$$

(8.4)-şerte normirlemek diýilýär. Şu şerti kanagatlandyrýan funksiýa bolsa, normirlenen diýilýär. (8.4)-iň kömegi bilen Ψ funksiýa girýän köpeldişi tapylýar. (8.6)-dan görnüşi ýaly

$|\Psi|^2 = A^2 = const.$ Bu islendik ýerde bölejigi tapmaklygyň ähtimallygynyň bir meňzeşdigini aňladýar.

§9. Ýagdaýyň superpozisiýa prinsipi

Kwant mehanikasynyň esasyny birnäçe wajyp düzgünnamalar düzýärler. Olaryň birine **superpozisiýa** (üstünden goýma) **prinsip**i diýilýär. Berlen fiziki şertlerde bölejik dürli ýagdaýlarda ýerleşip biler. Ol ýagdaýlaryň her biri özbaşyna amala aşyrylyp biliner. Ýöne has çylşyrymly ýagdaý hem bolup biler. Muňa Dewissonyň we Jermeriň difraksion tejribesi mysal bolup biler. Onda kristala düşen desse difragirlenen desseleriň sistemasyna bölünýär. Kristal bilen özara täsirden soň hereket ýene-de boş giňişlikde bolýar, ýöne indi ýaýramak ugurlary bilen tapawutlanýan de Broýlyň tolkunlarynyň bitin toplumy bilen suratlandyrylýar. Kristalyň üstünde bölejikleriň difraksiýasynda ýüze çykýan ýagdaý, de Broýlyň ýönekeý tolkunlary bilen suratlandyrýan erkin hereketleriň ýagdýlaryň superpozisiýasydyr. Şu prinsip şeýle formulirlenip biliner: eger haýsy hem bolsa bir sistema (bölejik ýa-da olaryň toplumy) Ψ_1 we Ψ_2 tolkun funksiýalary bilen suratlandyrýan ýagdaýlarda ýerleşmeklige ukyply bolsa, onda ol

Ψ funksiýa bilen suratlandyrylýan ýagdaýda hem bolup biler, ýagny,

$$\Psi = C_1\Psi_1 + C_2\Psi_2 ,$$

bu ýerde C_1 we C_2 - Ψ_1 we Ψ_2 hususy ýagdaýlaryň amplitudasyny we fazasyny kesgitleýän hemişelik, umuman aýdylanda, kompleks sanlar.

Şu ýerden gelip çykyşy ýaly, eger biri-birinden haýsy hem bolsa bir ululyklaryň (impulsyň, energiýanyň,impulsyň momentiniň we ş.m) bahasy bilen tapawutlanýan we Ψ_1, Ψ_2..., tolkun funksiýalary arkaly suratlandyrylýan, sistemanyň mümkin bolan ýagdaýlary bar bolsa, onda çylşyrymly ýagdaý hem bardyr.

$$\Psi = C_1\Psi_1 + C_2\Psi_2 + ... + C_n\Psi_n + ..., \qquad (9.1)$$

nirede $C_1, C_2, ..., C_n ... -$erkin, kompleks sanlar.

Eger, superpozisiýa girýän ýagdaýlar biri-birinden tükeniksiz az tapawutlansalar, onda (9.1)-jemiň deregine integral alynýar. Aýdyň halatda (9.1)-e şeýle düşünmeli: eger $t = 0$ wagt pursatynda elektronyň ýagdaýy diňe $\Psi_1, \Psi_2,...,$ ähtimallyklary bilen berilýär, ýagny elektron haýsy-da bolsa olaryň birinde ýerleşýär, şol sebäpli umumy funksiýa olaryň jemine deňdir.

§10. Kwant mehanikasynda dinamiki üýtgeýänler.

Fiziki ululuklaryň orta bahalary Normirlenen Ψ tolkun funksiýa belli bolsa, onda onuň suratlandyrýan ýagdaýynda koordinatyň, impulsyň we başga fiziki ululyklaryň orta bahalaryny hasaplap bolýar. *Meselem:* kesgitlemä laýyklykda $F(x,y,z)$ we $F(P_x,P_y,P_z)$ funksiýalaryň orta bahalary şeýle tapylýar:

$$\overline{F(x,y,z)} = \int F(x,y,z)\cdot|\Psi(x,y,z)|^2 dx\cdot dy\cdot dz =$$
$$= \int \Psi^*(x,y,z)F(x,y,z)\cdot\Psi(x,y,z)dx\cdot dy\cdot dz,$$

bu ýerde $\int|\Psi(x,y,z)|^2 dx\cdot dy\cdot dz = 1$ şert ýerine ýetmeli, we

$$\overline{F(P_x,P_y,P_z)} = \int F(P_x,P_y,P_z)\left|C(P_x,P_y,P_z)\right|^2 dP_x\cdot dp_y\cdot dp_z =$$
$$= \int C^*(P_x,P_y,P_z)\,F(P_x,P_y,P_z)\,C(P_x,P_y,P_z)\,dP_x\cdot dp_y\cdot dp_z,$$ bu ýerde bolsa

$\int\left|C(P_x,P_y,P_z)\right|^2 dP_x\cdot dp_y\cdot dp_z = 1.$ şert ýerine ýetmeli.

Mudan beýläk x,y,z we P_x,P_y,P_z üýtgeýänleriň deregine degişlilikde x we P ýazarys, ýagny

$$F(x) = \int\Psi^*(x)F(x)\cdot\Psi(x)dx,$$

we

$$F(P) = \int C^*(P)\,F(P)\,C(P)\,dP.$$

Mysal üçin : x we P_x ululuklaryň orta bahalary şeýle tapylýar:

$$\overline{x} = \int\Psi^* x\Psi dx, \qquad (10.1)$$

we

$$\overline{P_x} = \int \Psi^* P_x \Psi dx. \qquad (10.2)$$

Eger (10.2)-de P_x-iň deregine $-i\hbar\dfrac{\partial}{\partial x}$ alsak, onda dogry netijä gelinýär. Dogrydanam, eger $\Psi = \ell^{-i(wt-kx)}$ diýip hasap edilse, onda

$$\overline{P_x} = \int \Psi^* P_x \Psi dx = \int \Psi^* \left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial x}\right)\Psi dx = -i\hbar\int \Psi^* \frac{\partial}{\partial x}\ell^{-i(wt-kx)}dx =$$

$$-i\hbar\int \Psi^*(ik)\Psi dx = = \hbar k\int \Psi^*\Psi dx = \hbar k.$$

Edil şunuň ýaly

$$\overline{P^2} = \int \Psi^* P_x{}^2 \Psi dx = \int \Psi^* \left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 \Psi dx = -\hbar^2\int \Psi^* \frac{\partial^2}{\partial x^2}\Psi dx.$$

Şeýlelikde, kwant mehanikasynda impulsyň proýeksiýalary aşakdaky ýaly alynýarlar:

$$P_x = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x} \;; \qquad P_y = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x} \;; \qquad P_z = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x}.$$

Şu ululyklara ***operatorlar*** diýiýär we $\hat{P}_x, \hat{P}_y, \hat{P}_z$ ýaly belgilenilýär.

§11. Operatorlar we olaryň ýstündäki algebraik amallar

1926-njy ýylda M.Born we N.Wigner kwant mehanikanyň esasy düşünjesini-fiziki ululyklaryň operatory diýen düşünjäni girizýärler. Umuman kwant nazaryýetinde ähli fiziki ululyklar operator görnüşde alynýarlar.

Meselem: L mehaniki ululyga $\hat{L}$ operator degişlidir.

<u>Kesgitleme:</u> $\hat{L}$ operator diýip, nähili usul bilen seredilýän $u(x)$ funksiýadan başga $v(x)$ funksiýany almak üçin ulanylýan matematiki şekile aýdylýar. Bu simwoliki $\hat{L}$-iň "u" funksiýa köpeltmek hasyly görnüşinde ýazylýar:

$$v = \hat{L} \cdot u, \qquad (11.1)$$

bu deňlikde $\hat{L}$ diýip, *meselem* : $x(\hat{L} = x)$, x boýuça differensirlemek $\left(\hat{L} = \dfrac{\partial}{\partial x}\right)$, kök $\left(\hat{L} = \sqrt{\ }\right)$, integral $\left(\hat{L} = \int\ \right)$ we başgalar düşünilýär. Eger operator differensirlemäni saklaýan bolsa, onda ***differensial operatory*** diýilýär. Integral, integro-differensial operatorlaryň bolup biljekdikleri düşnüklidir. Integral operatorlaryň aýratyn mümkinçiligi funksionalyň bolmagydyr. Funksionalyň, funksiýalaryň köplüginiň islendik funksiýasyna täsiri netijesinde käbir hemişelik alynýar.

Kwant mehanikasynda operatorlaryň diňe bir görnüşi ulanylýar. Oňa ***çyzykly özüneçatrymly*** (ermitli) ***operator*** diýilýär. Eger $\hat{L}$ operatory $\hat{L}(c_1u_1 + c_2u_2) = c_1\hat{L}u_1 + c_2\hat{L}u_2$ şerti kanagatlandyrsa, onda oňa ***çyzykly*** diýiýär. Şu şerte x, $\dfrac{\partial}{\partial x}$, $\int$ boýun egýärler, ýagny

$$x\,(c_1u_1 + c_2u_2) = c_1xu_1 + c_2xu_2,$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\,(c_1u_1 + c_2u_2) = c_1\frac{\partial u_1}{\partial x} + c_2\frac{\partial u_2}{\partial x},$$

$$\int (c_1u_1 + c_2u_2)dx = c_1\int u_1dx + c_2\int u_2dx\,.$$

Diýmek, olar çyzykly operatorlardyr.

Kök çyzykly däl, sebäbi $\sqrt{c_1u_1 + c_2u_2} \neq \sqrt{c_1u_1} + \sqrt{c_2u_2}$.
Çyzykly $\hat{L}$ operatoryň özüneçatrymly (ermitli) bolmagy üçin aşakdaky deňlik ýerine ýetmeli:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1^* \hat{L} u_2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} c_2 \hat{L}^* u_1^* dx. \tag{11.2}$$

Bu ýerde u_1 we u_2- integrirlenýän funksiýalar we integrirlenýän oblastyň gyrasynda önümleri nola deň bolmaly.
Indi haýsy çyzykly operatoryň özüneçatrymlydygyny ýa-da däldigini anyklalyň. Ilki bilen çyzykly $\frac{\partial}{\partial x}$ operatora seredeliň. (11.2)-niň çep tarapyny emele getireliň:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1^* \frac{\partial}{\partial x} u_2 dx = u_2\, u_1^* \Big|_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{+\infty} u_2 \frac{\partial}{\partial x} u_1^* dx \neq + \int u_2 \frac{\partial}{\partial x} u_1^* dx.$$

Sebäbi, $u_1^*(\pm\infty) = u_2\,(\pm\infty) = 0.$

Görnüşi ýaly, $\frac{\partial}{\partial x}$ çyzykly, ýöne özüneçatrymly däl.

Indi $\hat{P}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ çyzykly operatora garalyň. (11.2)-niň çep tarapyny emele getirýäris.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1^* \hat{P}_x u_2 dx = -i\hbar \int_{-\infty}^{+\infty} u_1^* \frac{\partial}{\partial x} u_2 dx = -i\hbar u_1^* u_2 \Big|_{-\infty}^{+\infty} + i\hbar \int_{-\infty}^{+\infty} u_2 \frac{\partial}{\partial x} u_1^* dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} u_2\, P_x^* u_1^* dx .$$

Şeýlelikde, çyzykly $\hat{P}_x$ operatoryń özüne çatrymlydygyna göz ýetirýäris.

Indi operatorlaryň üstündäki algebraik amallara seredeliň.

Goşmak. Eger käbir operatorlar belli bolsalar, onda olardan has çylşyrymly operatorlary emele getirip bilinerler.Çyzykly özüneçatrymly $\hat{A}$ we $\hat{B}$ operatorlara seredeliň. Şu iki operatorlaryň jemi diýip şeýle $\hat{C}$ operatora düşünilýär,ýagny

$$\hat{C}\psi = \hat{A}\psi + \hat{B}\psi . \qquad (11.3)$$

Şuny simwoliki şeýle görnüşde göçüreliň

$$\hat{C} = \hat{A} + \hat{B} .$$

Meselem: Eger $\hat{A} = i\frac{\partial}{\partial x}$, $\hat{B} = x$, onda (11.3)-den gelip çykýar. $\hat{C} = i\frac{\partial}{\partial x} + x$.

Köpeltmek. Operatorlaryň köpeltmesi biraz çylşyrymlydyr.

Iki $\hat{A}$ we $\hat{B}$ operatorlaryň köpeltmek hasyly diýip şeýle $\hat{C}$ operatora düşünilýär, ýagny

$$\hat{C}\Psi = \hat{A}\left(\hat{B}\Psi\right)$$

(11.4)

Ýagny ilki Ψ funksiýa $\hat{B}$ bilen täsir etmeli, soňra alynan netije $\hat{A}$ bilen täsir etmeli. Eger gutarnykly netije $\hat{C}$ operator bilen alynsa, onda ol $\hat{A}$ we $\hat{B}$ operatorlaryň köpeltmek hasylyny aňladýar. Bu simwoliki şeýle ýazylýar:

$$\hat{C} = \hat{A}\,\hat{B} .$$

Mysal: $\hat{A} = i\frac{\partial}{\partial x}$, $\hat{B} = x$, onda

$$\hat{C}\Psi = i\frac{\partial}{\partial x}\,(x,y) = i\Psi + ix\frac{\partial \Psi}{\partial x},$$

şu ýerden $\quad \hat{C} = i + ix\dfrac{\partial}{\partial x}$.

Operatorlaryň köpeldilmesi köpeldijileriň tertibine ýerlikli baglydyr. Dogrudanam,

$$\hat{C}^{'}\Psi = \hat{B}\left(\hat{A}\Psi\right) = ix\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \text{ ýagny } \hat{C}^{'} = ix\frac{\partial}{\partial x}.$$

Diýmek, eger $\hat{A}$ we $\hat{B}$ operatorlar bar bolsalar, onda olardan $\hat{C}$ başga $\hat{C}^{'}$ köpeltmek hasyly hem emele getirip biliner.

$$\hat{C}^{'} = \hat{B}\ \hat{A}.$$

Dikeldilen düzgün adaty algebradaky ýaly operatorlar bilen goşmak, aýyrmak we köpeltmek hasyllary ýerine ýetirip bolýar, ýöne bir zat düzgüne gabat gelmeýär: Köpeldijileriň orunlaryny çalşyryp bolmaýar.

Meselem: $\hat{C} = \left(\hat{A} - \hat{B}\right)\left(\hat{A} + \hat{B}\right) = \hat{A}^2 + \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} + \hat{B}^2$,

ýöne $\hat{A}^2 - \hat{B}^2$ däl.

Köpeldijileri çalşyryp bolmaýan şeýle algebra ***kommutatiw däl ululyklaryň algebrasy***, ululyklaryň özlerine bolsa ***kommutatiw däl*** (çalşyrylmaýan) ýa-da ***kommutirleşmeýän*** diýilýär.

Eger $\hat{C}$ we $\hat{C}^{'}$ köpeltmek hasyllary deň bolsalar, ýagny

$$\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} = 0\ ,$$

onda $\hat{A}$ we $\hat{B}$ operatorlara ***kommutirleşýän*** (çalşyrylýan) diýilýär.

$\hat{F} = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$ operatora $\hat{A}$ we $\hat{B}$ ***operatorlaryň kommutatory*** diýilýär.

Islendik operator öz-özi bilen kommutirleşýär, ýagny $\hat{A}^n = \hat{A} \cdot \hat{A} ... \hat{A}$, operator hem şol operatoryň jynsyna degişlidir.

§12. Fiziki ululyklar üçin kesgitsizlik gatnaşygy

Kesgitsizlik gatnaşygyny has umumy we takyk görnüşde dikeldeliň. Başgaça aýdylanda erkin Ψ tolkun funksiýa bilen suratlandyrylan bölejigiň islendik ýagdaýy üçin kesgitsizlik gatnaşygyň subutnamasyna geçeliň. Meseläni sadalaşdyrmak üçin bir giňişlik ölçegi bilen çäkleneris. Goý $\Psi(x)$ funksiýa bilen suratlandyrylýan bölejigiň haýsy-da bolsa bir ýagdaýy berlipdir diýeliň. Tolkun funksiýasyny $-\infty$-den $+\infty$-ge çenli bire normirlenen diýip hasap ederis. Öňde goýulan maksada ýetmek üçin, ilki bilen P impulsyň we x koordinatanyň ölçenmekleriniň aýry netijeleriniň,olaryň $\bar{x}$ we $\bar{P}$ orta bahalaryndan gyşarmasy üçin ölçeg saýlanyp alynmalydyr, başgaça aýdylanda ΔP_x we Δx <<kesgitsizler>> diýip nämä düşünilýändigini takyk kesgitlemeli. Şeýle ölçegler hökmünde statistikada ulanylýan $\overline{(\Delta P_x)^2}$ we $\overline{(\Delta x)^2}$ orta kwadratik gyşarmalary saýlap alalyň. Goý $\bar{x}$ ululyk x ululygyň orta bahasy diýeliň, onda $\Delta x = x - \bar{x}$ orta bahadan $\bar{x}$ ölçeýişleriň netijeleriniň gyşarmasy bolar. Şu gyşarmanyň orta bahasynyň nola deňdigi şübhesizdir, ýagny

$$\overline{\Delta x} = \overline{(x - \bar{x})} = \bar{x} - \bar{\bar{x}} = \bar{x} - \bar{x} = 0.$$

Şonuň üçin, orta bahadan özbaşdak ölçeýişleriň gyşarmasynyň ölçegi diýip $\overline{\Delta x}$ däl-de $\overline{(\Delta x)^2}$ - özbaşdak gyşarmanyň kwadratynyň ortaçasy alynýar.

Şeýle düşündirlişe esaslanyp, ýazyp bileris:

$$\overline{(\Delta x)^2} = \overline{\left(x - \overline{x}\right)^2} = \overline{x^2} - \overline{x}^2 \tag{12.1}$$

$$\overline{(\Delta P_x)^2} = \overline{\left(P_x - \overline{P_2}\right)^2} = \overline{P_x^{\,2}} - \overline{P_x}^{\,2} \tag{12.2}$$

Koordinatanyň başlangyjy diýip $\overline{x}$ nokady saýlalyň. Onda $\overline{x}=0$ we $\overline{P_x} = 0$. Şeýle koordinata sistemada (12.1) we (12.2) aňlatmalaryň ýerine, alarys:

$$\overline{(\Delta x)^2} = \overline{x^2}\,, \tag{12.3}$$

$$\overline{(\Delta P_x)^2} = \overline{P_x^{\,2}}\,. \tag{12.4}$$

(12.1)we (12.2) aňlatmalara laýyklykda, ýazyp bileris:

$$\overline{(\Delta x)^2} = \overline{x^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(x) x^2 \Psi(x) dx\,, \tag{12.5}$$

$$\overline{(\Delta P_x)^2} = \overline{P_x^{\,2}} = -\hbar^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(x) \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} dx\,. \tag{12.6}$$

Mesele, $\overline{(\Delta P_x)^2}$ we $\overline{(\Delta x)^2}$ ululyklaryň arasyndaky baglanşygy dikeltmekden durýar.

Şu maksat üçin kömekçi integrala seredeliň.

$$I(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \xi x \Psi + \frac{d\Psi}{dx} \right|^2 dx \ge 0\,. \tag{12.7}$$

Bu ýerde ξ –maddylyk kömekçi ululyk.

Modulyň kwadratyny özgerdeliň:

$$I(\xi)=\int_{-\infty}^{+\infty}\left(\xi x\Psi^{*}+\frac{d\Psi^{*}}{dx}\right)\left(\xi x\Psi+\frac{d\Psi}{dx}\right)dx=$$

$$=\xi^{2}\int_{-\infty}^{+\infty}x^{2}|\Psi|^{2}dx+\xi\int_{-\infty}^{+\infty}x\frac{d}{dx}\left(\Psi^{*}\Psi\right)dx+\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{d\Psi^{*}}{dx}\frac{d\Psi}{dx}dx\,.$$

Integrallary belgilälíň we aýratynlykda seredeliň.

$$A=\int_{-\infty}^{+\infty}x^{2}|\Psi|^{2}dx=\overline{(\Delta x)^{2}}\,,$$

$$B=-\int_{-\infty}^{+\infty}x\frac{d}{dx}\left(\Psi^{*}\Psi\right)dx=\int_{-\infty}^{+\infty}\Psi^{*}\Psi dx=1\,,$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{d\Psi^{*}}{dx}\frac{d\Psi}{dx}dx=-\int_{-\infty}^{+\infty}\Psi^{*}\frac{d^{2}\Psi}{dx^{2}}dx=\frac{\overline{(\Delta P_{x})^{2}}}{\hbar^{2}}\,.$$

Onda:

$$I(\xi)=A\xi^{2}-B\xi^{2}+C\geq 0 \qquad (12.8)$$

Bu şert A,B,C koeffisiýentlere kesgitli çäkliligi ýükleýär. Dogrudanam, eger şu gatnaşyk $I(\xi)$ funksiýanyň minimumyna jogap berýän $\xi=\xi_{0}$ bahada ýerine ýetýän bolsa, onda ol islendik ξ üçin dogrudyr. ξ_{0} ululygyň bahasy $\frac{\partial I(\xi)}{\partial\xi}=0$ şertden tapylýar, ýagny

$$I'(\xi_{0})=2A\xi_{0}-B=0\,.$$

Bu ýerden $\xi_{0}=\frac{B}{2A}$ we ony (3.8) goýup, alarys:

$$I_{\min}=I(\xi_{0})=\frac{B^{2}}{4A}+C\geq 0\,.$$

Bu ýerden gelip çykyşy ýaly, eger

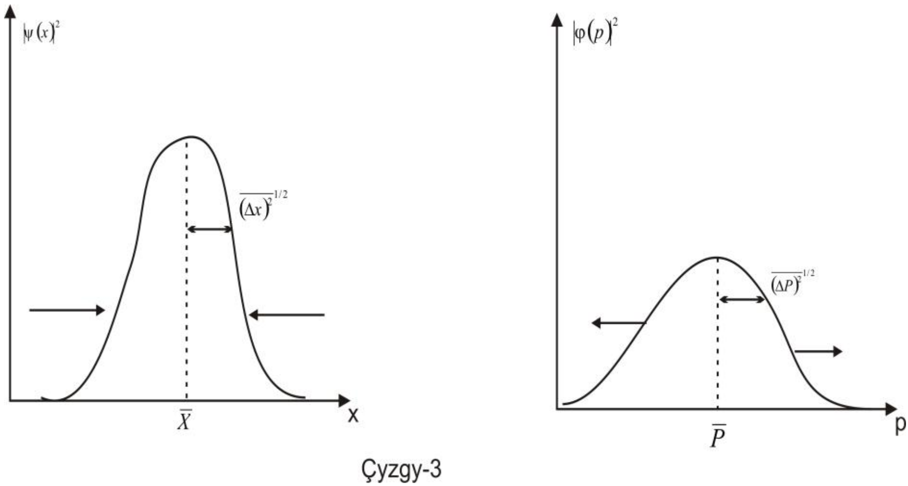
$$B^2 \le 4AC \qquad (12.9)$$

şert ýerine ýetse, onda (12.8) –deňsizlik ξ-niň islendik bahasy üçin ýerine ýetýär. (12.9) –a A, B, C ululyklaryň bahalaryny goýup, alarys:

$$\overline{(\Delta x)^2} \cdot \overline{(\Delta x)^2} \ge \frac{\hbar^2}{4}. \qquad (12.10)$$

(12.10) ***kesgitsizlik gatnaşygyň has umumy we anyk görnüşi*** diýilýär.

Ondan görnüşi ýaly, bir wagtda $\overline{(\Delta x)^2}$ we $\overline{(\Delta P_x)^2}$ ululyklar nola deň bolup bilmeýärler. Kesgitsizlik gatnaşygyň manysy aşakdakydan durýar: eger koordinata giňişliginde paýlanma gysylýan (48- nji a çyzgy) bolsa, onda paýlanma impuls giňişliginde ýaýraýar (48- nji b çyzgy).



a b

48- nji çyzgy.

Çäklilikde, haçan, meselem, x boýunça paýlanma, ýagny $|\Psi(x)|^2$, $\overline{(\Delta x)^2}=0$ görnüşe eýe bolsa, onda P_x impuls boýunça ol, ýagny $|\varphi(P_x)|^2$ hemişelik bolýar, ýagny $\overline{(\Delta P_x)^2}=0$.

§13. Operatorlaryň hususy funksiýalary we hususy bahalary

Ilki bilen islendik L mehaniki ululyk üçin orta kwadratik gyşarmanyň diňe položitel, ýa-da nola deň bolýandygyny subut edeliň. Kwant mehanikasynda operatorlary ulanmagyň esasy meselesi, her bir mehaniki ululyga onuň çyzykly özüneçatrymly operatory deňeşdirmek durýar, ýagny:

$$L \to \hat{L}$$

Bu ululygyň orta bahasy şeýle hasaplanylýar:

$$\overline{L}=\int \psi^* \hat{L}\psi dx \qquad (13.1)$$

Eger L -iň orta bahasyny $\overline{L}$ diýsek, onda orta bahadan gyşarma bolýar:

$$\Delta L = L-\overline{L}$$

Bu gyşarma operator degişli: $\Delta\hat{L}=\hat{L}-\overline{L}$

Kwadratik gyşarma bolsa, $(\Delta L)^2=(L-\overline{L})^2$

operator şeýle ýazylýar: $(\Delta\hat{L})^2=(\hat{L}-\overline{L})^2$

(13.1.)-iň esasynda ýazyp bileris:

$$\overline{(\Delta L)^2} = \int \psi^* (\Delta \hat{L})^2 \psi dx \qquad (13.2.)$$

Şu ululygyň položitel bolmalydygyny subut etmek üçin, operatoryň özüne çatrymly bolmaklygynyň kesgitlemesini ulanýarys:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1^* \hat{L} u_2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} u_2 \hat{L}^* u_1^* dx$$

(13.2.)-de şeýle belgileri amala aşyralyň.

$$\psi^* = u_1^*, \qquad (\Delta \hat{L} \psi) = u_2$$

onda

$$\overline{(\Delta L)^2} = \int \psi^* \Delta \hat{L} \cdot \Delta \hat{L} \psi dx = \int u_1^* \Delta \hat{L} \cdot u_2 dx = \int u_2 \cdot \Delta \hat{L}^* u_1^* dx =$$

$$= \int (\Delta \hat{L} \psi) \cdot (\Delta \hat{L} \cdot u_1)^* dx = \int \left| \Delta \hat{L} \psi \right|^2 dx \geq 0 \qquad (13.3.)$$

Şeýlelikde, $\overline{(\Delta L)^2} \geq 0$

(13.1.)-i aşakdaky ýaly göçüreliň:

$$\overline{(\Delta L)^2} = \overline{(L - \overline{L})^2} = \int \psi^* (\hat{L} - \overline{L})^2 \psi dx$$

Şu formuladan, her bir aýratyn ýagdaýda L - iň bahasynyň nähili boljakdygy gelip çykmaýar. Şonuň üçin, L ululygyň mümkin bolup biljek bahasyny tapmak maksady bilen onuň diňe bir bahasynyň bolup biljek ýagdaýyna seredeliň. Şeýle ýagdaýlarda orta kwadratik gyşarma:

$$\overline{(\Delta L)^2} = 0 .$$

Diýmek, şeýle ýagdaýlar üçin (13.3.)-iň esasynda, (13.4.)-i aşakdaky görnüşde göçürýäris

$$\int \psi_L^* (\hat{L} - \overline{L})^2 \psi_L dx = \int \left| (\hat{L} - \overline{L}) \psi_L \right|^2 dx \geq 0 ,$$

bu ýerden $\left| (\hat{L} - \overline{L}) \psi_L \right|^2 = 0$.

Kompleks sanyň modulunyň nola deň bolmagy üçin şol sanyň özi nola deň bolmaly, diýmek

$$(\hat{L} - \overline{L}) \psi_L = 0$$

Seredilýän ýagdaýda $\overline{L} = L$, onda ahyrky netijä gelýäris

$$\hat{L} \psi = L \psi \qquad (13.5.)$$

(13.5.)-de $\hat{L}$ operator, onda tapylan deňleme, $\hat{L}$ operator bilen berilýän ululygyň L ýekeje bahasynyň bolup biljek ýagdaýynyň tolkun funksiýasyny tapmak üçin, çyzykly deňlemedir. Köplenç halatlarda $\hat{L}$ operator differensial operatory we (13.5.) bolsa çyzykly birjynsly differensial deňleme bolýar.

Umuman bellenip aýdylanda (13.5.)-iň triwial däl (noldan tapawutly) çözgüdi L parametriň ähli bahalarynda däl-de, diňe käbir saýlananlarda alynýar, ýagny

$$L = L_1, L_2, \ldots, L_n, \ldots$$

Şulara degişli çözgütlere

$$\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_n, \ldots$$

hususy funksiýalar diýilýär, şu çözgütleriň alynýan L parametriň bahalaryna bolsa, hususy (häsiýetlendiriji) bahalar diýilýär. Hususy bahalary we hususy funksiýalary kesgitleýän „n” bitin sanlara kwant sanlary diýilýär.

Şeýle mesele mysal edip uçlary berkidilen kirişiň yrgyldysyny getirmek bolar. Onuň üçin hereketiň differensial deňlemesi şeýle ýazylýar:

$$\frac{d^2u}{dx^2} + k^2u = 0$$

(13.5.) we (13.6.) deňlemeleri deňeşdirip, görýäris

$$\hat{L} = \frac{d^2}{dx^2} \qquad \text{we} \qquad L = -k^2$$

Klassyk mehanikada „u” funksiýa käbir gyra şertleri ýüklenilýär, ýagny $x = 0$ we $x = l$-de „u“ nola öwrülmeli. Şeýle şerti kwant mehanikasynda ψ funksiýa talap edip bolmaýar, sebäbi ol argumentleri bolup hyzmat edýän üýtgeýänleri ähli oblastda kesgitleýär:

$$-\infty \prec x \prec +\infty, \ -\infty \prec y \prec +\infty, \ -\infty \prec z \prec +\infty.$$

Ýöne kwant mehanikasynda hem, gyra şertlere ekwiwalent bolan talaplar ψ-ä ýüklenilýär. Olar:

1. gutarnykly;
2. üznüksiz;
3. birbahaly;

Şu şertlere standart şertleri diýilýär.

Haýsy hem bolsa bir ululygyň hususy bahalarynyň toplumyna şol ululygyň spektri diýilýär. Spektr esasan üç görnüşde bolup biler. Birinjiden, eger bölejigiň hereketi giňişlikde çäklendirilen bolsa, onda $L_1, L_2, \ldots, L_n, \ldots$ aýry-aýry bahalar alynýar we olara diskret spektr diýilýär.

Ikinjiden, eger bölejigiň hereketi giňişlikde çäklendirilmedik bolsa, onda L -iň ähli bahalary ýüze çykýar we olara üznüksiz spektr diýilýär. Üçünjiden, L -iň bahalary $L_1 \le L \le L_2$ $L_3, \le L \le L_4$ umuman $L_n \le L \le L_{n+1}$ interwalda ýerleşip biler. Şeýle ýagdaýda spektr aýry-aýry gatlaklardan durýar diýilýär.

Eger mümkin bolan bahalar diskret bolsa, onda ululyk kwantlanan bahalary alýar diýip aýdylýar.

§14. Hususy funksiýalaryň esasy häsiýetleri

Meseläni aýdyňlaşdyrmak maksady bilen, diňe diskret spektre ýüz urarys we ähli üýtgeýänli bir harp „*x*” bilen belgiläris. Goý, nähili-de bolsa iki u_1 we u_2 funksiýalary bar diýeliň.

Eger

$$\int u_1^* u_2 dx = 0 \tag{14.1.}$$

şert ýerine ýetse, onda olara ortogonal diýilýär. Şu ýerde integral, üýtgeýänleriň üýtgemekleriniň ähli oslasty boýunça alynýar.

Teorema. Dürli L_n we L_m hususy bahalara degişli, $\hat{L}$ özüneçatrymly operatoryň ψ_n we ψ_m hususy funksiýalary özara ortogonaldyr.

Subudy. ψ_n we ψ_m ululyklaryň hususy funksiýalar bolýandyklary üçin, ýazyp bileris.

$$\hat{L}\psi_m = L_m\psi_m \tag{14.2.}$$

$$\hat{L}\psi_n = L_n\psi_n \tag{14.3.}$$

(14.2.)-den kompleks çatrymly deňlemäni alalyň

$$\hat{L}^*\psi_m^* = L_m^*\psi_m^* \tag{14.4.}$$

$\hat{L}$ operatoryň özüneçatrymlygyndan gelip çykyşy ýaly, L-iň seredilýän bahalary maddydyr, ýagny

$L_n = L_n^*$ ýa-da $L = L^*$.

Diýmek, (14.4.)-de $L_m = L_m^*$

(14.3.)-i ψ_m^* -e, (14.4.)-i bolsa ψ_n -e köpeldip, ikinjini birinjiden aýryp, alarys:

$$\psi_m^*\hat{L}\psi_n - \psi_n\hat{L}^*\psi_m^* = (L_n - L_m)\psi_m^*\psi_n$$

Bu deňligi integrirleýäris:

$$\int\psi_m^*\hat{L}\psi_n dx - \int\psi_n\hat{L}^*\psi_m^* dx = (L_n - L_m)\int\psi_m^*\psi_n dx$$

Şu aňlatmanyň çep tarapy, $\hat{L}$ operatoryň özüneçatrymlydygy zerarly, nola deň, onda

$$(L_n - L_m)\int \psi_m^* \psi_n dx = 0 \quad .$$

Teoremanyň şerti boýunça $L_n \neq L_m$, diýmek, onda

$$\int \psi_m^* \psi_n dx = 0 \qquad (14.5.)$$

Subut tamam boldy.

Şu ýerde funksiýanyň normirlenmek şertini ýazalyň

$$\int \psi_n^* \psi_n dx = 1 \qquad (14.6.)$$

(14.5.) we (14.6.) aňlatmalary bir deňlikde birleşdireliň

$$\int \psi_m^* \psi_n dx = \delta_{mn} \ , \qquad (14.7.)$$

bu ýerde δ_{mn} şekil şeýle kesgitlenilýär

$\delta_{mn} = 1$, eger $n=m$,

$\delta_{mn} = 0$, eger $n \neq m$.

(14.7.)-ni kanagatlandyrýan funkiýalaryň sistemasyna, ortogonal we normirlenen funksiýalaryň sistemasy diýilýär. Şeýlelikde, $L_1, L_2, \ldots$ hususy bahalara degişli $\psi_1, \psi_2, \ldots$ hususy funksiýalar dogrydanam ortonormirlenen häsiýete eýedirler, bu öz gezeginde hususy funksiýalaryň wajyp häsiýetleriniň biridir.

Kwant mehanikasynda, köp ýagdaýlarda $\hat{L}$ operatoryň L_n hususy bahasyna diňe bir ψ_n funksiýa däl-de, bir näçe çyzykly baglysyz

$$\psi_{n1}, \psi_{n2}, \ldots, \psi_{nk}, \ldots, \psi_{nf}$$

hususy funksiýalaryň degişlidiklerine duş gelinýär. Berilen hususy baha degişli hususy funksiýalaryň şu sanlaryna hususy bahanyň döremekliginiň kratnyýylygy diýilýär. Döremeklik düşünjäni şeýle düşündireliň. Berilen sistemany (atom, molekula we ş.m.) häsiýetlendirýän käbir L fiziki ululyk, sistemanyň dürli ýagdaýlary üçin bir meňzeş bahalary alýar. Şol bir baha degişli şeýle dürli ýagdaýlaryň sanyna seredilýän ululygyň döremekligiň kratnyýylygy diýilýär.

Hususy funksiýalaryň sanyna degişlilikde iki, üç we ş.m. kratnyýyly döremeklik bolup biler.

Matematika-da subut edilişi ýaly, operatoryň hususy funksiýalarynyň örän giň klasynyň sistemasy, diňe ortogonal funksiýalaryň sistemasy däl-de, doly sistema hem bolmalydyr. Şuňa laýyklykda, islendik *ψ(x)* funksiýa hususy funksiýalaryň superpozisiýasy görnüşinde alynyp biliner.

$$\psi(x) = \sum_n c_n \psi_n(x) \quad .$$

c_n amplitudany tapmak üçin, (14.8.)-i ψ_m^* -e köpeldeliň we ähli giňişlik boýunça integrirläliň:

$$\int \psi_m^* \psi^* dx = \sum_n c_n \int \psi_m^* \psi_n dx = \sum c_n \delta_{mn} = c_m$$

Şu aňlatmada m-i n-e çalyşyp, alarys:

$$c_n = \int \psi_n^* \psi dx$$.

Diýmek, eger ψ we ortogonal funksiýalaryň sistemasy belli bolsa, onda (14.8.)-de duş gelýän ähli amplitudalary tapyp bileris.

§15. Dürli mehaniki ululyklary birwagtda ölçemek mümkinçiliginiň şerti

Kwant oblastlarda şol bir bölejik üçin birwagtda koordinat we impuls üçin kesgitli bir baha alyp bolmaýar. Şeýle biri-birini inkär edýän gatnaşykda başga-da köp ululyklar bar. Dogrydanam, birwagtda L we M ululyklaryň bolmaklarynyň ýagdaýyň bolup biljekdigi, ýagny

$$\overline{(\Delta L)^2} = 0 \qquad \overline{(\Delta M)^2} = 0$$

üçin, şeýle ýagdaýyň tolkun funksiýasy $\hat{L}$ we $\hat{M}$ operatorlaryň umumy hususy funksiýasy bolmaly. Ýöne $\hat{L}$ we $\hat{M}$ operatorlaryň hususy funksiýalary üçin

$$\hat{L}\psi_L = L\psi_L \quad \text{we} \quad \hat{M}\psi_M = M\psi_M \quad ,(15.1.)$$

deňlemeleriň umuman aýdylanda, dürli çözgütleri $\psi_L \neq \psi$ bar, şol sebäpli, L kesgitli bahaly ψ_L ýagdaýda, M ululyk kesgitli baha almaýar, we tersine. Diňe ýörite ýagdaýlarda L we M kesgitli bahalara eýe bolup bilerler (onuň üçin $\psi_M = \psi_L$ bolmaly).

Birwagtda L we M ululyklaryň elmydama kesgitli bahany alyp biljekdikleriniň şerti, olaryň $\hat{L}$ we $\hat{M}$ operatorlarynyň kommutatiw bolmalydyklaryny görkezip bolýar. Başgaça aýdylanda, şeýle operator deňlemesi ýerine ýetmeli:

$$\hat{L}\hat{M} = \hat{M}\hat{L} \qquad \text{...(15.2.)}$$

Şunuň şeýledigine göz ýetirmek maksady bilen şeýle ***teorema*** seredeliň: eger $\hat{L}$ we $\hat{M}$ iki operatorlar hususy funksiýalaryň umumy doly sistemasyna eýe bolýan bolsalar, onda olar kommutirleşýärler.

Subudy. Umumy hususy funksiýalary $\psi_n(x)$ arkaly belgiläliň, onda

$$\hat{L}\psi_n = L_n\psi_n$$

ýazyp bileris:

$$\hat{M}\psi_n = M_n\psi_n$$

we

Birinji deňleme $\hat{M}$, ikinjä bolsa $\hat{L}$ operator bilen täsir edip we ikinjini birinjiden aýyryp, alarys:

$$\hat{M}\hat{L}\psi_n - \hat{L}\hat{M}\psi_n = \hat{M}L_n\psi_n - \hat{L}M_n\psi_n = L_nM_n\psi_n - M_nL_n\psi_n = 0$$

ýa-da

$$(\hat{M}\hat{L} - \hat{L}\hat{M})\psi_n = 0$$

Islendik ψ funksiýany ψ_n hususy funksiýalary boýunça hatara dargadyp bolýar,

onda $(\hat{M}\hat{L}-\hat{L}\hat{M})\psi=\sum_n C_n(\hat{M}\hat{L}-\hat{L}\hat{M})\psi_n=0$

ýagny $(\hat{M}\hat{L}-\hat{L}\hat{M})$ operatory islendik funksiýa ulanyp, nol alýarys. Operatorlaryň nazaryýetinde bu olaryň kommutatiwdiklerini aňladýar, ýagny, (15.2.)-ni alýarys.

Tersine, eger

$$\hat{M}\hat{L}\neq\hat{L}\hat{M}$$

bolsa, onda olar birwagtda kesgitli bahalary alyp bilmeýärler.

Şeýlelikde: kommutirleşýän operatorlar bilen suratlandyrylýan iki ululyk, hiç bolmanda prinsipde birwagtda ölçelinip bilinerler; kommutirleşmeýän operatorlar bilen suratlandyrylýan iki ululyk, birwagtda ölçelinip bilinmeýärler.

Indi, şeýle ***teorema*** seredeliň: eger $\hat{L}$ we $\hat{M}$ operatorlar kommutirleşýän bolsalar, onda olar umumy hususy funksiýa eýedirler.

Subudy. $\hat{L}$ operatoryň hususy funksiýasy üçin deňleme şeýledir:

$$\hat{L}\psi=L\psi$$

Şu deňleme $\hat{M}$ operator bilen täsir edeliň:

$$\hat{M}\hat{L}\psi=\hat{M}L\psi$$

Teoremanyň şertine görä

$$\hat{M}\hat{L} = \hat{L}M \quad ,$$

onda

$$\hat{L}(\hat{M}\psi) = L(\hat{M}\psi)$$

Şu ýerden görnüşi ýaly, $\psi^{I} = \hat{M}\psi$ funksiýa

hem $\hat{L}$ operatoryň hususy funksiýasydyr, L-iň bahasyna diňe bir funksiýa degişli (döremeklik ýok), onda ψ' funksiýa ψ - den diňe hemişelik köpeldiji arkaly tapawutlanyp biler, ýagny

$$\psi^{I} = M\psi$$

Onda

$$\hat{M}\psi = M\psi$$

Diýmek, ψ funksiýa $\hat{M}$ operatoryň hem hususy funksiýasydyr.

§16. Kwant mehanikasynyň ýönekeý operatorlary

Kwant mehanikasynyň ýönekeý operatorlaryna koordinat we impuls operatorlary, impulsyň momentiniň operatory we umumy energiýanyň operatory girýär.Olaryň tebigatyna, häsiýetlerine we funksiýalaryna aýratynlykda seredeliň.

Koordinatanyň we impulsyň operatory. Meseläni ýönekeýleşdireliň, ýagny OX okuň ugruna bir ölçegli herekete serederis. Alynan netije üç ölçegli ýagdaýa ýeňil umumylaşdyrylýar.

Özüniň hususy aňladylmasynda (ýagny koordinat aňladylmada) koordinatyň operatory şol koordinatyň özi bilen gabat gelýär.

$$\hat{X}(x) = x.$$

Şu netije islendik koordinat funksiýa ösdürilip bilner.

$$\hat{U}(x) = U(\mathrm{x}).$$

Impulsyň operatorynyň proýeksiýalary.

$$\hat{P}_x = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x,}\ \hat{P}_y = -i\hbar\frac{\partial}{\partial y,}\ \hat{P}_z = -i\hbar\frac{\partial}{\partial z,},$$

ýa-da wektor görnüşde

$$\hat{\vec{P}} = -i\hbar\nabla,$$

bu ýerde ∇ (nablo)-gradiýentiň operatory.

Koordinat we impuls operatorlarynyň proýeksiýalary orun üýtgemeginiň kesgitli düzgünine boýun egýärler, bu bolsa öz gezeginde olar bilen hasaplamany amala aşyrmagy has ýeňilleşdirýär.

Tolkun funksiýany $\psi(x, y, z)$ diýip, aşakdaky köpeltmek hasyllary emele getireliň

$$x(\hat{P}_x\psi) = x\left(-i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial x}\right) = -i\hbar x\frac{\partial\psi}{\partial x},$$

$$\widehat{\mathrm{P}}_x(x\psi) = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x}(x\cdot\psi) = -i\hbar x\frac{\partial\psi}{\partial x} - i\hbar\psi.$$

Ikinji setiri birinjiden aýyryp, taparys

$$\left(x\widehat{\mathrm{P}}_x - \widehat{\mathrm{P}}_x x\right)\psi = i\hbar\psi.$$

Şu ýerden, tolkun funksiýany goýberip, ahyrky netije gelýäris

$$x\widehat{\mathrm{P}}_x - \widehat{\mathrm{P}}_x x = i\hbar, \qquad (16.1)$$

we edil şunuň ýaly

$$y\widehat{\mathrm{P}}_y - \widehat{\mathrm{P}}_y y = i\hbar,$$

$$z\widehat{\mathrm{P}}_z - \widehat{\mathrm{P}}_z z = i\hbar.$$

Şeýle orun üýtgeme düzgünine Geýzenbergin ýerini çalşyrma gatnaşygy diýilýär.

Aşakdaky gatnaşyklaryň ýerine ýetýändikleri aýdyňdyr:

$$x\widehat{\mathrm{P}}_x - \widehat{\mathrm{P}}_x x = 0,$$

$$y\widehat{\mathrm{P}}_y - \widehat{\mathrm{P}}_y y = 0,$$

$$z\widehat{\mathrm{P}}_z - \widehat{\mathrm{P}}_z z = 0,$$ we başgalar.

Edil şu ýol bilen, islendik $F(x, y, z)$ funksiýa we impulsyň operatorlary üçin has umumy çalşyrma gatnaşyklaryny dikeldip bolýar, ýagny

$$FP_x - P_xF = -i\hbar\frac{\partial F}{\partial x}$$

$$FP_y - P_yF = -i\hbar\frac{\partial F}{\partial y} \qquad (16.2)$$

$$FP_z - P_zF = -i\hbar\frac{\partial F}{\partial z}$$

(16.1) we (16.2) gatnaşyklardan, impulsyň we çatrymly koordinatyň birwagtda kesgitli bahany alýan ýagdaýyň ýoklugy gelip çykýar.

§17.Impulsyñ momentiniñ operatory

Klassyk mehanikada bölejigiñ impulsynyñ moment diýip, $\vec{r}$ radius-wektoryñ $\vec{P}$ impulsa wektor köpeltmegine aýdylýar.

$$M = [\vec{r}\ \vec{P}]$$

Kwant mehanikasynda impulsyñ momenti operator bilen suratlandyrylýar.

$$\hat{M} = [\hat{r}\hat{P}]$$

Şu ýerden $\hat{M}$ operatorynyñ proýeksiýalaryny tapýarys:

$$\hat{M}_x = y\,\hat{P}_z - z\hat{P}_y = i\hbar\left(z\frac{\partial}{\partial y,} - y\frac{\partial}{\partial z}\right),$$

$$\hat{M}_y = z\,\hat{P}_x - x\hat{P}_z = i\hbar\left(x\frac{\partial}{\partial z} - z\frac{\partial}{\partial x}\right), \qquad (17.1)$$

$$\hat{M}_z = x\,\hat{P}_y - y\hat{P}_x = i\hbar\left(y\frac{\partial}{\partial x} - x\frac{\partial}{\partial y}\right)$$

Impulsyñ momentiniñ kwadratynyñ operatory üçin şeýle añlatmany alýarys:

$$\hat{M}^2 = \hat{M}_x^2 + \hat{M}_y^2 + \hat{M}_z^2 = -\hbar^2\left\{\left(z\frac{\partial}{\partial y} - y\frac{\partial}{\partial z}\right)^2 + \left(x\frac{\partial}{\partial z} - z\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + \left(y\frac{\partial}{\partial x} - x\frac{\partial}{\partial y}\right)^2\right\}. \qquad (17.2)$$

Impulsyñ momentiniñ operatorynyñ komponentleri üçin orny çalyşma düzgünini tapalyñ. Şol sebäpli $\hat{M}_x$ we $\hat{M}_y$ operatorlaryñ kommutatoryny hasaplalyñ.

$$\begin{aligned}\hat{M}_x\hat{M}_y - \hat{M}_y\hat{M}_x &= (y\hat{P}_z - z\hat{P}_y)(z\hat{P}_x - x\hat{P}_z) - (z\hat{P}_x - x\hat{P}_z)(y\hat{P}_z - z\hat{P}_y)\\ &= y\hat{P}_z z\hat{P}_x - y\,\hat{P}_z x\hat{P}_z - z\hat{P}_y z\hat{P}_x + z\hat{P}_y x\hat{P}_z - z\hat{P}_x y\hat{P}_z + z\hat{P}_x z\hat{P}_y + x\hat{P}_z y\hat{P}_z - x\hat{P}_z z\hat{P}_y\\ &= y\hat{P}_x(\hat{P}_z z - z\hat{P}_z) + x\hat{P}_y(z\hat{P}_z - \hat{P}_z z) = y\hat{P}_x(-i\hbar) + x\hat{P}_y i\hbar = i\hbar(x\hat{P}_y - y\hat{P}_x)\\ &= i\hbar\hat{M}_z\end{aligned}$$

Şeýlelikde

$$\left.\begin{aligned}\hat{M}_x\hat{M}_y - \hat{M}_y\hat{M}_x &= i\hbar\hat{M}_z,\\ \hat{M}_y\hat{M}_z - \hat{M}_z\hat{M}_y &= i\hbar\hat{M}_x,\\ \hat{M}_z\hat{M}_x - \hat{M}_x\hat{M}_z &= i\hbar\hat{M}_y,\end{aligned}\right\} \qquad (17.3)$$

Şu sistemany gysgaça şeýle añladyp bileris.

$$[\hat{M}\hat{M}] = i\hbar\hat{M}$$

(17.3)-den impulsyñ momentiniñ proýeksiýalarynyñ kommutirleşmeýändikleri görünýär. Tersine, impulsyñ momentiniñ her bir komponenti impulsyñ umumy momentiniñ kwadraty bilen kommutirleşýär:

$$\left.\begin{aligned}\hat{M}_x\hat{M}^2 - \hat{M}^2\hat{M}_x &= 0,\\ \hat{M}_y\hat{M}^2 - \hat{M}^2\hat{M}_y &= 0,\\ \hat{M}_z\hat{M}^2 - \hat{M}^2\hat{M}_z &= 0.\end{aligned}\right\} \qquad (17.4)$$

Dogrydanam

$$\widehat{M}_x\widehat{M}^2 - \widehat{M}^2\widehat{M}_x = \widehat{M}_x\left(\widehat{M}_x^{\ 2} + \widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_z^{\ 2}\right) - \left(\widehat{M}_x^{\ 2} + \widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_z^{\ 2}\right)\widehat{M}_x$$
$$= \widehat{M}_x\widehat{M}_x^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_z^{\ 2} - \widehat{M}_x^{\ 2}\widehat{M}_x - \widehat{M}_y^{\ 2}\widehat{M}_x - \widehat{M}_z^{\ 2}\widehat{M}_x$$
$$= \widehat{M}_x\widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_z^{\ 2} - \widehat{M}_y\widehat{M}_y\widehat{M}_x - \widehat{M}_z\widehat{M}_z\widehat{M}_x$$
$$= \widehat{M}_x\widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_z^{\ 2} - \widehat{M}_y(\widehat{M}_x\widehat{M}_y - i\hbar\widehat{M}_z) - \widehat{M}_z(\widehat{M}_x\widehat{M}_z + i\hbar\widehat{M}_y)$$
$$= \widehat{M}_x\widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_z^{\ 2} - \widehat{M}_y\widehat{M}_x\widehat{M}_y + i\hbar\widehat{M}_y\widehat{M}_z - \widehat{M}_z\widehat{M}_x\widehat{M}_z - i\hbar\widehat{M}_z\widehat{M}_y$$
$$= \widehat{M}_x\widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_z^{\ 2} - (\widehat{M}_x\widehat{M}_y - i\hbar\widehat{M}_z)\widehat{M}_y + i\hbar\widehat{M}_y\widehat{M}_z - (\widehat{M}_x\widehat{M}_z + i\hbar\widehat{M}_y)\widehat{M}_z$$
$$- i\hbar\widehat{M}_z\widehat{M}_y$$
$$= \widehat{M}_x\widehat{M}_y^{\ 2} + \widehat{M}_x\widehat{M}_z^{\ 2} - \widehat{M}_x\widehat{M}_y\widehat{M}_y + i\hbar\widehat{M}_z\widehat{M}_y + i\hbar\widehat{M}_y\widehat{M}_z - \widehat{M}_x\widehat{M}_z\widehat{M}_z - i\hbar\widehat{M}_y\widehat{M}_z$$
$$- i\hbar\widehat{M}_z\widehat{M}_y = 0$$

(17.3) we (17.4) düzgünlerden gelip çykyşy ýaly, impulsyñ momentiniñ $\widehat{M}_x, \widehat{M}_y, \widehat{M}_z$ proýeksiýalary birwagtda ölçelinip bilinmeýärler. Haýsy hem bolsa bir ýagdaýda proýeksiýalaryñ biri kesgitli bahany alýan bolsa, $(\overline{(\Delta M_x)^2} = 0)$, galan ikisi şeýle bahany alyp bilmeýärler. $(\overline{(\Delta M_y)^2} > 0 \ we \ \overline{(\Delta M_z)^2} > 0)$. Tersine, proýeksiýalaryñ islendigi we umumy momentiñ kwadraty birwagtda ölçenilip bilinýärler.

Indi, haýsy hem bolsa bir erkin ugra $\widehat{M}_x, \widehat{M}_y, \widehat{M}_z$ we $\widehat{M}^2$ operatorlaryñ mümkin bolan bahalaryny kesgitläliñ. Şu meseläni çözmek üçin koordinatyñ sferiki sistemasyna geçmeklik oñaýlydyr. Şeýle koordinat sistemada

$$x = r\sin\theta\cos\varphi,\ y = r\sin\theta\sin\varphi,\ \ z = r\cos\theta, \qquad (17.5)$$

bu ýerde θ erkin ugur diýip saýlanyp alnan oz oky bilen radius-wektoryñ $\vec{r}$ arasyndaky burç; φ bolsa ox okdan xy tekizlikde hasaplanylýan burç.

(17.1) we (17.2) formulalary dekart koordinat sistemadan sferiki sistema özgerdeliñ. (17.5)-den tapýarys.

$$\tan\varphi = \frac{y}{x},\quad \cos\theta = \frac{z}{r}, \tag{17.6}$$

radius-wektoryñ kwadraty

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2 \tag{17.7}$$

(17.1)-däki önümleri şeýle görnüşde göçüreliñ

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x} &= \frac{\partial r}{\partial x}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \varphi}{\partial x}\frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial \theta}{\partial x}\frac{\partial}{\partial \theta},\\
\frac{\partial}{\partial y} &= \frac{\partial r}{\partial y}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \varphi}{\partial y}\frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial \theta}{\partial y}\frac{\partial}{\partial \theta},\\
\frac{\partial}{\partial z} &= \frac{\partial r}{\partial z}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial \theta}{\partial z}\frac{\partial}{\partial \theta}.
\end{aligned} \tag{17.8}$$

(17.6) we (17.7) añlatmalaryndan (17.8)-daky önümleri hasaplap we olary, hem-de (17.5)-i (17.1)-e goýup, käbir özgertmelerden soñ, alýarys:

$$\begin{aligned}
\widehat{M_x} &= +i\hbar\left(\sin\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} + \cot\theta\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\right),\\
\widehat{M_y} &= -i\hbar\left(\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} - \cot\theta\sin\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\right),\\
\widehat{M_z} &= -i\hbar\frac{\partial}{\partial\varphi}
\end{aligned} \tag{17.9}$$

(17.9)-y (17.2)-ä goýup we uly özgertmelerden soñ, taparys:

$$\widehat{M}^2 = \widehat{M_x}^2 + \widehat{M_y}^2 + \widehat{M_z}^2 = \widehat{M_x}\widehat{M_x} + \widehat{M_y}\widehat{M_y} + \widehat{M_z}\widehat{M_z} = -\hbar^2\nabla_{\theta,\varphi}{}^2 \tag{17.10}$$

bu ýerde $\nabla_{\theta,\varphi}{}^2$ - sfera üçin Laplasyñ operatory.

$$\nabla_{\theta,\varphi}{}^2 = \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} \qquad (17.11)$$

(17.9) we (17.10) operatorlary dine θ, φ burçlara täsir edýärler, şol sebäpli tolkun funksiýany şu burçlara bagly diýip alyp bileris, ýagny

$$\psi = \psi(\theta,\varphi)$$

$\hat{M}^2$ operatoryñ hususy bahasyny kesgitlemek üçin

$$\hat{L}\psi = L\psi$$

deñlemede

$$\hat{L} = \hat{M}^2 \text{ we } L = M^2$$

diýip, şeyle deñlemäni alýarys:

$$\hat{M}^2\psi = M^2\psi$$

ýa-da

$$-\hbar^2\left\{\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\varphi^2}\right\} = M^2\psi,$$

ýa-da

$$\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\varphi^2} + \lambda\psi = 0, \qquad (17.12)$$

bu ýerde $\lambda = \frac{M^2}{\hbar^2}$.

Şu deñlemäni üýtgeýänleriñ θ, φ ähli oblasty $(0 \le \theta \le \pi, 0 \le \varphi \le 2\pi)$ üçin çözmeli, üstesine çözgüt gutarnykly, üznüksiz we birbahaly bolmaly. (17.12)-sferiki funksiýalar üçin deñleme. Goýulan şertleri kanagatlandyrýan çözgüt λ-nyñ ähli bahasynda däl-de, diñe

$$\lambda = l(l+1) \qquad (17.13)$$

bahalarda alynýar, nirede l - bitin položitel san. Onda impulsyñ momentiniñ kwadratynyñ hususy bahalary, deñdir

$$M^2 = \hbar l(l+1), \quad l = 0,1,2,...$$

$\hat{M}_z$ operatoryñ hususy funksiýalary üçin deñlemäni ýazyp bileris,

$$\hat{M}_z \psi = M_z \psi,$$

M_z hususy bahalar bolsa şeýle kesgitlenilýär

$$M_z = \hbar m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

"l" we "m" kwant sanlaryñ bahalaryndan gelip çykyşy ýaly, M^2 hususy baha, "m" sanyñ bahalary bilen tapawutlanýan, $(2l+1)$ hususy funksiýalar degişli, ýagny döremeklik bar.

Erkin oz oka, impulsyñ momentiniñ absolýut ululygynyñ mümkin bahalary we impulsyñ momentiniñ proýeksiýasynyñ mümkin bahalary, kwantly bahalary alýar.

§18. Doly energiýanyñ operatory

Klassyk mehanikada doly energiýa kinetik we potensial energiýalaryñ jemine deñ we oña Gamiltonyñ funksiýasy diýilýär.

$$H = T + U(x, y, z)$$

Kwant mehanikasynda doly energiýa operatorlaryñ üsti bilen berilýär we ol kinetik we potensial energiýalaryñ operatorlaryñ jemine deñ.

$$\hat{H} = \hat{T} + \hat{U}(x, y, z) \tag{18.1}$$

$\hat{H}$ ululyga Gamiltonyñ funksiýasynyñ operatory ýa-da gamiltonian diýilýär.

Impulsyñ operatory arkaly kinetik energiýanyñ operatory şeýle añladylýar:

$$\hat{T} = \frac{\hat{p}^2}{2\mu} = \frac{1}{2\mu}\left(\hat{P}_x{}^2 + \hat{P}_y{}^2 + \hat{P}_z{}^2\right) = \frac{1}{2\mu}\left\{(-i\hbar\frac{\partial}{\partial x})^2 + (-i\hbar\frac{\partial}{\partial y})^2 + (-i\hbar\frac{\partial}{\partial z})^2\right\} = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2$$

bu ýerde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - Laplasyñ operatory.

Kinetik energiýa impulslaryñ funksiýasy, potensial energiýa bolsa koordinatyñ funksiýasy, diýmek, kwant mehanikasynda umumy energiýanyñ operatoryny kinetik we potensial energiýalaryñ operatorlarynyñ jemi ýaly alyp bolmaýar.

Erkin elektromagnit meýdandaky “e” zarýadly we “μ” massaly bölejigiñ gamiltonianyny aýdyñlaşdyralyñ. Ol şeýle görnüşde alynýar:

$$\hat{H} = \frac{1}{2\mu}(\hat{P} - \frac{e}{c}\hat{A})^2 + eV$$

Eger elektromagnit güýçlerden başga, U güýç funksiýa bilen suratlandyrylýan, güýçler bar bolsa, onda

$$\hat{H} = \frac{1}{2\mu}(\hat{P} - \frac{e}{c}\hat{A})^2 + eV + U \tag{18.2}$$

$(\hat{P} - \frac{e}{c}\hat{A})^2$ operatory özgerdeliñ.

$$(\hat{P}-\frac{e}{c}\hat{A})^2=(\hat{P}_x-\frac{e}{c}\hat{A}_x)^2+(\hat{P}_y-\frac{e}{c}\hat{A}_y)^2+(\hat{P}_z-\frac{e}{c}\hat{A}_z)^2$$
(18.3)

Operatorlary köpeltmek düzgüni boýunça

$$(\hat{P}_x-\frac{e}{c}\hat{A}_x)^2=\left(\hat{P}_x-\frac{e}{c}\hat{A}_x\right)\left(\hat{P}_x-\frac{e}{c}\hat{A}_x\right)=\hat{P}_x^{\,2}-\frac{e}{c}\hat{P}_x\hat{A}_x-\frac{e}{c}\hat{A}_x\hat{P}_x+\frac{e^2}{c^2}\hat{A}_x^{\,2}$$

(16.2)-niñ esasynda ýazyp bileris.

$$\hat{P}_x\hat{A}_x-\hat{A}_x\hat{P}_x=-i\hbar\frac{\partial\hat{A}_x}{\partial x},$$

şu ýerden

$$\hat{P}_x\hat{A}_x=\hat{A}_x\hat{P}_x-i\hbar\frac{\partial\hat{A}_x}{\partial x}$$

Onda

$$(\hat{P}-\frac{e}{c}\hat{A})^2=\hat{P}_x^{\,2}-\frac{2e}{c}\hat{A}_x\hat{P}_x-\frac{i\hbar e}{c}\frac{\partial\hat{A}_x}{\partial x}+\frac{e^2}{c^2}\hat{A}_x^{\,2}$$

Diýmek, (18.3) şeýle görnüşe geçýär:

$$(\hat{P}-\frac{e}{c}\hat{A})^2=\hat{P}_x^{\,2}-\frac{2e}{c}\hat{A}_x\hat{P}_x-\frac{i\hbar e}{c}\frac{\partial\hat{A}_x}{\partial x}+\frac{e^2}{c^2}\hat{A}_x^{\,2}+\hat{P}_y^{\,2}-\frac{2e}{c}\hat{A}_y\hat{P}_y-\frac{i\hbar e}{c}\frac{\partial\hat{A}_y}{\partial y}+\frac{e^2}{c^2}\hat{A}_y^{\,2}+\hat{P}_z^{\,2}$$
$$-\frac{2e}{c}\hat{A}_z\hat{P}_z-\frac{i\hbar e}{c}\frac{\partial\hat{A}_z}{\partial z}+\frac{e^2}{c^2}\hat{A}_z^{\,2}=\hat{P}^2-\frac{2e}{c}\left(\hat{A}\hat{P}\right)-\frac{i\hbar e}{c}div\hat{A}+\frac{e^2}{c^2}\hat{A}^2$$

Şu añlatmany (18.2)-ä goýup, soñky netijäni alýarys.

$$\hat{H}=\frac{1}{2\mu}\hat{P}^2-\frac{e}{\mu c}\left(\hat{A}\hat{P}\right)+\frac{i\hbar e}{2\mu c}div\hat{A}+\frac{e^2}{2\mu c^2}\hat{A}^2+eV+U$$

Mehanika üçin şu operator esasydyr we iki ýagdaý bilen kesgitlenýär: bölejikleriñ tebigaty we bölejiklere täsir edýän meýdanyñ tebigaty.

§19. Gamiltonyñ deñlemesi

Gamiltonyñ klassyk deñlemeleri beýan ediler, sebäbi ondaky alynan maglumatlar özleriniñ formasy boýuça gabat gelýän düşünjelere kwant mehanikada hem duş gelinýär.

Umumylaşdyrylan koordinatlary $q_1,q_2,\ldots,q_s,\ldots,q_f$ arkaly belgiläliñ, olara çatyrymly umumylaşdyrylan impulslary bolsa degişlilikde $p_1,p_2,\ldots,p_s,\ldots p_f$ diýip alalyñ. Gamiltonyñ H funksiýasy şu koordinatlaryñ we umuman aýdylanda t wagtyñ funksiýasydyr.

Belli bolşy ýaly, Gamiltonyñ deñlemeleri şeýle ýazylýar:

$$\frac{dp_s}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_s}, \quad \frac{dq_s}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_s} \qquad (19.1)$$

Islendik $F = F(t, q_s, P_s)$ funksiýadan wagta görä önüm deñdir.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \sum_{s=1}^{f} \frac{\partial F}{\partial q_s}\frac{dq_s}{dt} + \sum_{s=1}^{f} \frac{\partial F}{\partial P_s}\frac{dP_s}{dt}$$

ýa-da (19.1)-iñ esasynda:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \sum_{s=1}^{f} \frac{\partial F}{\partial q_s}\frac{\partial H}{\partial P_s} - \sum_{s=1}^{f} \frac{\partial F}{\partial P_s}\frac{\partial H}{\partial q_s} = \frac{\partial F}{\partial t} + \sum_{s=1}^{f} \left\{ \frac{\partial F}{\partial q_s}\frac{\partial H}{\partial P_s} - \frac{\partial F}{\partial P_s}\frac{\partial H}{\partial q_s} \right\}$$

ýa-da $\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + [HF]$, (19.2) bu ýerde

$$[HF]=\sum_{s=1}^{f}\left\{\frac{\partial F}{\partial q_s}\cdot\frac{\partial H}{\partial p_s}-\frac{\partial F}{\partial p_s}\cdot\frac{\partial H}{\partial q_s}\right\}$$ – Puassonyñ skobkalary.

Gamiltonyñ (19.1) deñlemeleri şu skobbkalar arkaly şeýle ýazylýarlar:

$$\frac{dP_s}{dt}=[HP_s],$$
$$\frac{dq_s}{dt}=[Hq_s] \qquad (19.3)$$

Eger Gamiltonyñ funksiýasyny

$$H=\frac{P_x^2+P_y^2+P_z^2}{2\mu}+U(x,y,z) \qquad (19.4)$$

diýip alsak, onda (19.3), (19.1) we (19.4) añlatmalardan alýarys:

$$\frac{dP_x}{dt}=[HP_x]=-\frac{\partial H}{\partial x}=-\frac{\partial U}{\partial x},$$
$$\frac{dx}{dt}=[Hx]=\frac{\partial H}{\partial P_x}=\frac{P_x}{\mu}$$

Şeýlelikde, bölejigiñ hereketini häsiýetlendirýän Gamiltonyñ deñlemeleri ahyrky netijede şeýle ýazylýar:

$$\frac{dx}{dt}=\frac{P_x}{\mu},\qquad \frac{dy}{dt}=\frac{P_y}{\mu},\qquad \frac{dz}{dt}=\frac{P_z}{\mu},$$
$$\frac{dP_x}{dt}=-\frac{\partial U}{\partial x},\qquad \frac{dP_y}{dt}=-\frac{\partial U}{\partial y},\qquad \frac{dP_z}{dt}=-\frac{\partial U}{\partial z} \qquad (19.5)$$

(19.5)-den alyp bolýar,

$$\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{1}{\mu}\frac{dP_x}{dt}=-\frac{1}{\mu}\frac{\partial U}{\partial x},$$

ýa-da

$$\mu \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial x}$$

görnüşi ýaly, soňky Nýutonyñ deňlemesidir.

§20. Şrýodingeriň deňlemesi

M. Plankyň kwantlar nazaryýeti, Boruň postulatlary we de Broýlyň gipotezasy has umumy nazaryýeti dikeltmek üçin diňe ilkinji etap bolup hyzmat etdiler. Mikrobölejikleriň şeýle nazaryýetine kwant ýa-da tolkun mehanikasy diýilýär. Şu ugurda fundamental ädimi Şrýodinger 1926-njy ýylda ýerine ýetiripdir. Ol mikrobölejigiň hereketini tolkun deňlemäniň kömegi bilen suratlandyrmagy teklip edýär. Özüniň manysy boýunça Şrýodingeriň deňlemesi relýatiwstik däl kwant mehanikasynyň postulatydyr. Ýagdaýyň wektorynyň wagta görä üýtgemegini kesgitleýän şu deňlemä giňişleýin seredeliň.

Wagtyň t=0 pursatynda bölejigiň ýagdaýyny suratlandyrýan $\psi(x,0)$ tolkun funksiýa berilipdir diýeliň. Wagtyň indiki pursatynda (t>0) onuň ýagdaýyny kesgitlejek bolalyň. Şeýle wagt dowamynda bölejigiň ýagdaýy üýtgeýär we nähili-de bolsa bir $\psi(x,t)$ tolkun funksiýa bilen suratlandyrar. Şu iki, $\psi(x,0)$ we $\psi(x,t)$ funksiýalaryň özara nähili baglanyşykdadyklaryny dikeldeliň. Matematiki nukdaýnazardan, t=o üçin $\psi(x,0)$ tolkun funksiýadan wagtyň soňky pursatynda ψ(x,t) tolkun funksiýasy birbahaly kesgitlenmelidir.

t=o –a tükeniksiz ýakyn Δt-wagt pursatynda ψ(x, Δt) funksiýa seredeliň. Ony aşakdaky ýaly hatar görnüşde alyp bileris:

$$\psi(\mathrm{x}, \Delta t) = \psi(x,0) + \left(\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}\right)_{t=0} \Delta t + ...$$

Aýdylana laýyklykda $\left(\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}\right)_{t=0}$ funksiýa ψ(x,0) -dan kesgitlenilmeli. Operatoryň kesgitlemesiniň esasynda ýazyp bileris.

$$\left(\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}\right)_{t=0} = \hat{L}(x,0)\Psi(x,0),$$

bu ýerde $\hat{L}(x,0)$ - çyzykly özüneçatyrymly operator we onuň kömegi bilen $\Psi(x,0)$ - dan $\left(\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}\right)_{t=0}$ alynýar.

Wagtyň t=o pursaty düýbünden erkin alyndy, onda wagtyň islendik pursaty üçin ýazyp bileris:

$$\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t} = \hat{L}(x,t)\Psi(x,t). \qquad (20.1)$$

$\hat{L}(x,t)$ operatora wagta görä süýşürme operatory diýilýär. Ol kesgitlenilip bilinmeýär, ýöne postulirlenip biliner. Superpozisiýa prinsipine laýyklykda ol çyzykly bolmaly.

Impulsyň kesgitli bahaly erkin hereketi üçin de Broýlyň tolkun funksiýasy şeýle ýazylýar:

$$\Psi(x,t) = e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - px)}$$

Şu funksiýanyň nähili deňlemäni kanagatlandyrýandygyny bilmek üçin ondan wagta görä bir we koordinata görä iki önümleri hasaplap hem-de olary utgaşdyryp şeýle deňlemäni alarys:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{i\hbar}{2\mu}\nabla^2\psi ,$$

we ol şeýle görnüşde göçürilip biliner

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar}\hat{H}\psi$$

Bu ýerden görnüşi ýaly erkin hereket üçin süýşürme operatorynyň bahasyny alýarys:

$$\hat{L} = \frac{1}{i\hbar}\hat{H} . \qquad (20.2)$$

Şeýle postulate degişlilikde indi tolkun üçin (20.1) – nji deňleme aşakdaky görnüşde ýazylyp biliner

$$i\hbar\frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi . \qquad (20.3)$$

Şu deňleme Şrýodingeriň deňlemesi diýen ady göterýär. Ol kwant mehanikasynyň esaslarynyň birini emele getirýär we özüniň dogrydygyny diňe nazaryýetde däl-de, tejribede hem subut edildi. Eger bölejik daşky potensial meýdanda ýerleşen bolsa, onda (20.3) şeýle ýazylýar

$$i\hbar\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi + U(x,y,z,t).$$

Şu deňlemäniň wajyp özboluşlygy, $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ öňünde “i”-niň bolmagydyr. Klassyk fizikasynda wagta görä bir tertipli differensial deňlemeler tersine özgerdilmeýän prosesleri suratlandyrýar (meselem, diffuziýa, ýylylyk geçirijilik). Şol hyýaly sanyň esasynda, wagt boýunça birinji tertipli Şrýodingeriň deňlemesi periodiki çözgüdi alyp biler we şol sebäpli tolkun funksiýa kompleks ululykdyr.

Şrýodingeriň deňlemesiniň çözgüdi bilen bagly bolan meseleleriň üç görnüşine seredeliň.

Brinji görnüşli mesele. Giňişligiň çäkli oblastynda, başgaça aýdylanda potensial çukurda, bölejigiň hereketi barlanylýar. Muňa mysal bolup elektronyň atomdaky hereketini görkezip bolar, şeýle herekete finitli diýilär we bölejik erkinsiz ýagdaýda ýerleşýär. Seredilýän mesele üçin wagta bagly bolmadyk Şrýodingeriň deňlemesi ulanylýar

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu}\frac{d^2}{dx^2}\psi(x)+[U(x)-E]\psi(x)=0$$

Kesgitli gyra şertlerinde şu deňlemäni çözüp, stasionar ýagdaý üçin energiýanyň bahasynyň spektri we olara degişli tolkun funksiýalar tapylýar.

Ikinji görnüşli mesele. Daşky meýdanda bölejigiň infinitli (giňişlikde çäklendirilmedik) hereketi seredilýär, meselem bölejigiň potensial päsgelçiliklerden geçişi barlanylýar. Hereket infinitli, şol sebäpli bölejigiň energetik spektri üznüksizdir. Şeýle meselede hem Şrýodingeriň wagta bagly däl deňlemesi ulanylýar.

Üçünji görnüşli mesele. Bölejigiň ýagdaýynyň wagta görä üýtgemegine seredilýär we şonuň üçin wagta bagly Şrýodingeriň deňlemesi ulanylýar:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2\mu}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+U(x)\psi$$

bu deňlemäni çözüp, berlen daşky täsiriň netijesinde nähili-de bolsa bir kwantly geçişiň ähtimallygy tapylýar.

§ 21. Üznüksizlik deňlemesi

Şrýodingeriň deňlemesinden bölejikleriň sanynyň saklanma kanunyny alyp bolýar, onuň üçin şol deňlemäni aşakdaky görnüşde alalyň

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi+U\psi. \qquad (21.1)$$

Kompleks çatyrymly funksiýasy üçin deňleme bolsa şeýle ýazylýar

$$-i\hbar\frac{\partial\psi^*}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi^*+U^*\psi^*. \qquad (21.2)$$

(21.1)-i çepden ψ^*, (21.2) –ni bolsa sagdan ψ funksiýa bilen köpeldip we ikinjini birinjiden aýyryp,
taparys

$$i\hbar\left(\psi^*\frac{\partial\psi}{\partial t}+\frac{\partial\psi^*}{\partial t}\psi\right)=-\frac{\hbar^2}{2\mu}\left(\psi^*\nabla^2\psi-\nabla^2\psi^*\psi\right)+\psi^*U\psi-U^*\psi^*\psi.$$

$U=U^*$ şerti hasaba alyp şu aňlatmany özgerdeliň

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\left(\psi^*\psi\right)=-\frac{\hbar^2}{2\mu}\left(\psi^*\nabla\cdot\nabla\psi-\psi\nabla\cdot\nabla\psi^*\right)=-\frac{\hbar^2}{2\mu}\left(\psi^*\,divgrad\psi-\psi\,digrad\psi^*\right)=$$

$$=-\frac{\hbar^2}{2\mu}div\left(\psi^*grad\psi-\psi\,grad\psi^*\right)=-\frac{\hbar^2}{2\mu}div\left(\psi^*\nabla\psi-\psi\nabla\psi^*\right)\quad(21.3)$$

Şu aňlatmanyň çep tarapy giňişligiň haýsy hem bolsa bir nokadynyň ýakynynda bölejigi tapmaklygynyň ähtimallygynyň wagta görä önümi we I wektor arkaly

$$I=\frac{i\hbar}{2\mu}\left(\psi\nabla\psi^*-\psi^*\nabla\psi\right)$$

belgiläp, (21.3) –i şeýle göçürip bileris:

$$\frac{\partial w}{\partial t}+divI=0.\qquad(21.4)$$

Bu ýerden, I wektoryň togyň dykyzlygynyň ähtimallygynyň wektorydygy gelip çykýar.

Eger $W=\psi^*\psi$ ululyk bölejikleriň orta dykyzlygy ýaly hasap edilse, onda (21.4) deňleme has aýdyň düşündirişe eýe bolýar. Onda I-ni 1- sekuntda 1sm^2 meýdan arkaly bölejikleriň akymy ýaly seretmeli. Şuňa degişlilikde (21.4)-nji deňlemä, bölejikleriň sanynyň saklanma kanuny ýaly düşünmeli. Dogrydanam, (21.4) –i nähili-de bolsa br gutarnykly V göwrüm boýunça integrirläp we Gaussyň teoremasyny ulanyp, alarys

$$\frac{d}{dt}\int\limits_V wdv=-\int\limits_v divIdv=-\int\limits_s I_n ds,\qquad(21.5)$$

bu ýerde soňky integral V göwrümi gurşaýan S üst boýunça alynýar. Ähli giňişlik boýunça (V→∞) integrirlemäni ýaýradyp we, tükeniksiz dşlaşmada ψ tolkun funksiýanyň, hem-de şonuň bilen birlikde I toguň dykyzlygynyň 0-a öwrülýänligini hasaba alyp, tapýarys

$$\frac{d}{dt}\int_{\infty} wdv = \frac{d}{dt}\int_{\infty} \psi^{*}\psi dv = 0, \qquad (21.6)$$

Ýgny giňişligiň haýsy-da bir ýerinde bölejigiň umumy ähtimallygy wagta bagly däldir, diýmek bölejikleriň sany üýtgemän galýar.

Indi, I we w ululyklary bölejigiň μ massasyna köpeldeliň:

$$\rho_{\mu} = \mu w = \mu|\psi|^{2}, \ \ I_{\mu} = \frac{i\hbar}{2}\left(\psi\nabla\psi^{*} - \psi^{*}\nabla\psi\right) \quad (21.7)$$

Onda ρ_{μ} jisimiň (massanyň) orat dykyzlygynyň, I_{μ} bolsa jisimiň (massanyň) togunyň orta dykyzlygynyň manysyny aňladýandyklaryna göz ýetirýäris. (21.4) –den gelip çykyşyna görä şu ululyklar üçin aşakdaky üznüksizlik deňleme ýerine ýetýär

$$\frac{\partial\rho_{\mu}}{\partial t} + divI_{\mu} = 0, \qquad (21.8)$$

Ýagny, haýsy hem bolsa bir tükeniksiz kçi oblastda massanyň üýtgemegi, şu oblasty gurşaýan üst arkaly şol massanyň guýulmagy ýa-da akylmagy bilen şertlendirýär. (21.8) –nji deňleme kwant mehanikasynda massanyň saklanmagyny aňladýar.

Edil şunuň ýaly, w we I ululyklary bölejigiň “e” zarýadyna köpeldip, elektrik zarýadynyň orta dykyzlygyny we elektrik toguň orta dykyzlygyny alýarys:

$$\rho_e = ew = e|\psi|^2, \quad I_e = \frac{i\hbar e}{2\mu}\left(\psi, \nabla\psi^* - \psi^*\nabla\psi\right). \quad (21.9)$$

Bu ululyklar üçin hem üznüksizlik deňleme alynýar

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + div I_e = 0, \qquad (21.10)$$

we ol kwant mehanikasynda zarýadyň saklanma kanunyny aňladýar.

§ 22. Magnit meýdanynda toguň dykyzlygy

Magnit meýdanyň barlygynda toguň dykyzlygy I üçin formula üýtgeşik bolmalydyr. Dogrydanam, Şrýodingeriň deňlemesine gamiltoniýanyň

$$\hat{H} = \frac{1}{2\mu}\hat{P}^2 - \frac{e}{\mu c}\hat{A}\hat{P} + \frac{i\hbar e}{2\mu c} div\hat{A} + \frac{e^2}{2\mu c^2}\hat{A}^2 + eV + U$$

bahasyny goýup, degişli özgertmeleri amala aşyralyň:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi + \frac{i\hbar e}{\mu c}\hat{A}\nabla\psi + \frac{i\hbar e}{2\mu c} div\hat{A}\psi + \frac{e^2}{2\mu c^2}\hat{A}^2\psi + (eV + U)\psi, \tag{22.1}$$

we çatyrymly funksiýa üçin

$$-i\hbar\frac{\partial\psi^*}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi^* - \frac{i\hbar e}{\mu c}\hat{A}\nabla\psi^* - \frac{i\hbar e}{2\mu c} div\hat{A}\psi^* + \frac{e^2}{2\mu c^2}\hat{A}^2\psi^* + (eV + U)\psi^*, \tag{22.2}$$

Çepden (22.1)-i ψ^* we (22.2) – ni sagdan ψ funksiýalara köpeldp we ikinjini birinjiden aýyryp alýarys

$$i\hbar\frac{\partial w}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2\mu}div\left(\psi^*\nabla\psi-\psi\nabla\psi^*\right)+\frac{i\hbar e}{\mu c}\hat{A}\psi^*\nabla\psi+\hat{A}\nabla\psi^*\psi+\frac{i\hbar e}{\mu c}\left(div\hat{A}\cdot\psi^*\psi+div\hat{A}\cdot\psi^*\psi\right)=$$

$$=-\frac{\hbar^2}{2\mu}div\left(\psi^*\nabla\psi-\psi\nabla\psi^*\right)+\frac{i\hbar e}{\mu c}\hat{A}div\left(\psi^*\psi\right)+\frac{i\hbar e}{\mu c}div\hat{A}\psi^*\psi.$$

Soňky iki çlene aýratyn seredeliň

$$\frac{i\hbar e}{\mu c}\left\{\hat{A}div\left(\psi^*\psi\right)+div\hat{A}\psi^*\psi\right\}=\frac{i\hbar e}{\mu c}div\left(\hat{A}\psi^*\psi\right)$$

Onda

$$\frac{\partial\left(\psi^*\psi\right)}{\partial t}+div\left\{\frac{i\hbar}{2\mu}\left[\psi\nabla\psi^*-\psi^*\nabla\psi\right]-\frac{e}{\mu c}\hat{A}\psi^*\psi\right\}=0.$$

Bu, wektor potensial $\hat{A}$ bilen suratlandyrylýan, magnit meýdanyň barlygyndaky üznüksizlik deňlemedir.

§23. Stasionar ýagdaýlar

Şrýodingeriň deňlemesini aşakdaky görnüşde alalyň:

$$i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}=\hat{\mathrm{H}}(x)\psi(x,t) \qquad (23.1)$$

(23.1) deňlemede, daşky meýdanyň ýoklugynda gamiltonian wagta bagly däl hal alynypdyr. Şol deňlemede üýtgeýän ululyklary bölüşdireliň, onuň üçin (23.1)-iň çözgüdini şeýle görnüşde alýarys:

$$\psi(x,t)=\psi(x)\varphi(t) \qquad (23.2)$$

(23.2)-ni (23.1)-e goýup we ony $\psi(x)\varphi(t)$ ululyga bölüp,alarys:

$$i\hbar\frac{\varphi'(t)}{\varphi(t)}=\frac{\hat{\mathrm{H}}(x)\psi(x)}{\psi(x)}=E$$

Şu ýerden iki deňlemäni alarys:

$$i\hbar\frac{d\varphi(t)}{\varphi(t)}=Edt \qquad (23.3)$$

we

$$\hat{\mathrm{H}}\psi(x)=E\psi(x) \qquad (23.4)$$

(23.3)-i integrirläp we soňra potensirläp, tapýarys:

$$\varphi(t)=const\, e^{-\frac{i}{\hbar}Et} \qquad (23.5)$$

(23.4)-nji deňleme hususy funksiýalar üçin deňleme bilen gabat gelýär. Belli bolşy ýaly ol deňleme şeýle ýazylýar:

$$\hat{L}\psi=L\psi$$

Eger energiýanyň diskret spektri üçin hususy funksiýalary $\psi_n(x)$, hususy bahalary bolsa E_n arkaly belgilense, onda (23.2) çözgüt ahyrky netijede şeýle görnüşde ýazylar:

$$\psi_n(x,t)=\psi_n(x)e^{-\frac{i}{\hbar}E_n t} \qquad (23.6)$$

Şundan görnüşi ýaly, E_n energiýanyň kesgitli bahaly ýagdaýlary,

$$\omega_n = \frac{E_n}{\hbar}$$

ýygylyk bilen wagta garmoniki baglydyr. Şeýle netije, ilkinji sapar erkin herekete ulanylan

$$E = \hbar\omega$$

de Broýlyň gatnaşygygny islendik sistema ýaýradýar. Energiýanyň kesgitli bahaly (23.6) ýagdaýa stasionar, (23.4)-e bolsa stasionar ýagdaý üçin Şrýodingeriň deňlemesi diýilýär.

(23.1)-iň çyzyklydygyna laýykda onuň umumy çözgüdini aşakdaky görnüşde alyp bileris:

$$\psi(x,t) = \sum_n C_n \psi_n(x,t)$$

ýa-da

$$\psi(x,t) = \sum_n C_n \psi_n(x) e^{-\frac{i}{\hbar}E_n t} \qquad (23.7)$$

bu ýerde C_n - amplituda.

Indi bölejikleriň ýerleşmekleriniň $\omega_n(x,t)$ ähtimallygyny we toguň $I_n(x)$ dykyzlygyny “n” stasionar ýagdaýlarda hasaplalyň.
Belli bolşy ýaly

$$\omega_n(x,t) = |\psi_n(x,t)|^2 =$$
$$= \psi_n^*(x,t) \cdot \psi_n(x,t),$$

we

$$I_n(x,t) = \frac{i\hbar}{2\mu}\left\{\psi_n(x,t)\nabla\psi_n^*(x,t) - \psi_n^*(x,t)\nabla\psi_n(x,t)\right\}$$

Şu aňlatmalara (23.6) –dan $\psi_n(x,t)$ funksiýanyň bahasyny goýup, taparys:

$$\omega_n(x,t) = \omega_n(x,0)$$

we

$$I_n(x,t) = I_n(x,0)$$

Soňky aňlatmalardan görnüşi ýaly, stasionar ýagdaýlarda bölejikleriň ýerleşmekleriniň ähtimallygy we toguň dykyzlygy wagta bagly däldir.

§24. Geýzenberg görnüşli esasy deňleme

Fiziki ululyklaryň orta bahalarynyň wagtyň geçmeginde nähili kanun boýunça häsiýetlendirilýändiklerini aýdyňlaşdyralyň.

Goý, wagtyň t momentinde ýagdaý $\psi_n(x,t)$ tolkun funksiýasy bilen suratlandyrylýar we şu ýagdaýda käbir L ululyk ölçenilýär diýeliň. Netijede aýratyn ölçegleriň netijesi alynar:

$$L', L'', L''', \ldots$$

Köp sanly ölçeglerden orta baha $\bar{L}(t)$ bolar we belli bolşy ýaly ol şeýle formula boýunça hasaplanylýar:

$$\bar{L}(t) = \int \psi^*(x,t) \cdot \hat{L} \cdot \psi(x,y) dx \qquad (24.1)$$

$\bar{L}$ ululyk wagta bagly, onda "t" boýunça $\bar{L}$-iň önümleri hem bolmaly, ýagny
(24.1)-i wagt boýunça differensirläp, alarys:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \int \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \hat{L}\psi\, dx + \int \psi^* \frac{\partial \hat{L}}{\partial t} \psi dx + \int \psi^* \hat{L} \frac{\partial \psi}{\partial t} dx \qquad (24.2)$$

Ikinji çlen $\frac{d\bar{L}}{dt}$ we $\frac{\partial\psi}{\partial t}$ $hem - de$ $\frac{\partial\psi^*}{\partial t}$ ululyklaryň bahalaryny Şrýodingeriň deňlemesini ulanyp, ýazalyň:

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar}\hat{\mathrm{H}}\psi$$

we

$$\frac{\partial\psi^*}{\partial t} = -\frac{1}{i\hbar}\hat{\mathrm{H}}^*\psi^*$$

Onda (24.2) şeýle görnüşi alar:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{\partial\bar{L}}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar}\int \psi^* \left(\hat{L}\hat{\mathrm{H}}\right)\psi\, dx - \frac{1}{i\hbar}\int \hat{\mathrm{H}}^*\psi^*\, \hat{L}\psi\, dx. \qquad (24.3)$$

$\hat{\mathrm{H}}$ operatoryň ermitlidigine esaslanyp, (24.3)-iň ikinji integralyny özgerdeliň.

$u_1^* = \psi^*$, $u_2 = \hat{L}\psi$, belgilemeleri girizip alýarys,

$$\int \hat{\mathrm{H}}^*\psi^*\, \hat{L}\psi dx = \int u_2\hat{\mathrm{H}}^* u_1^*\, dx = \int u_1^*\hat{\mathrm{H}}u_2\, dx = \int \psi^*\, \hat{\mathrm{H}}\hat{L}\psi dx.$$

Onda (24.3) aşakdaky ýaly göçüriler:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{\partial\bar{L}}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar}\int \psi^*\, \hat{L}\hat{\mathrm{H}}\psi\, dx - \frac{1}{i\hbar}\int \psi^*\, \hat{\mathrm{H}}\hat{L}\psi dx = \frac{\partial\bar{L}}{\partial t} + \int \psi^* \frac{1}{i\hbar}\left(\hat{L}\hat{\mathrm{H}} - \hat{\mathrm{H}}\hat{L}\right)\psi dx,$$

ýa-da

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{\partial\bar{L}}{\partial t} + \int \psi^*\, [\hat{\mathrm{H}}\hat{L}]\, \psi dx,$$

ýa-da

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{\partial \bar{L}}{\partial t} + [\overline{HL}]. \qquad (24.4)$$

Bu ýerde $[\hat{H}\hat{L}] = \frac{1}{i\hbar}(\hat{L}\hat{H} - \hat{H}\hat{L})$ - Puassonyň kwant skobkasy.

Indi (24.4)-i özgerdeliň

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{\partial \bar{L}}{\partial t} + [\overline{HL}] = \int \psi^* \left\{ \frac{\partial \hat{L}}{\partial t} + [\hat{H}\hat{L}] \right\} \psi dx,$$

ýa-da

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \int \psi^* \frac{\partial \hat{L}}{\partial t} \psi dx,$$

bu ýerde

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = \frac{\partial \hat{L}}{\partial t} + [\hat{H}\hat{L}] \qquad (24.5)$$

(24.4)-den görnüşi ýaly, $\bar{L}$-iň orta bahasynyň wagt boýunça önümi

$$\frac{\partial \hat{L}}{\partial t} + [\hat{H}\hat{L}]$$

operator bilen berilýän käbir ululygyň orta bahasydyr. (24.5)-nji deňleme wagtyň geçmeginde fiziki ululyklaryň orta bahalarynyň üýtgemeginiň kanuny häsiýetlendirýär we oňa Geýzenberg görnüşdäki hereketiň deňlemesi diýilýär.

Eger L ululyk wagta aýdyň bagly bolmasa, onda (24.4) we (24.5) deňlemeler ýönekeýleşýär:

$$\frac{dL}{dt} = [\overline{HL}],$$

we

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{\mathrm{H}}\hat{L}]$$

Eger $\hat{L} = \hat{A} + \hat{B}$ bolsa, onda

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{\mathrm{H}} \cdot \hat{A} + \hat{B}] = [\hat{\mathrm{H}}\hat{A}] + [\hat{\mathrm{H}}\hat{B}] = \frac{d\hat{A}}{dt} + \frac{d\hat{B}}{dt},$$

we eger $\hat{L} = \hat{A}\hat{B}$ bolsa, onda

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{\mathrm{H}} \cdot \hat{A}\hat{B}] = [\hat{\mathrm{H}}\hat{A}]\hat{B} + \hat{A}[\hat{\mathrm{H}}\hat{B}] = \frac{d\hat{A}}{dt}\hat{B} + \hat{A}\frac{d\hat{B}}{dt},$$

ýagny Puassonyň kwant skobkalaryna adaty önüm ýaly seredip bolýar.

(24.5)-nji deňleme, bölejigiň kinetik we potensial energiýalarynyň arasyndaky has umumy baglylygy tapmaklyga mümkinçilik döredýär. Dogrydanam, giňişligiň çäklendirilen käbir oblastynda, $(\vec{r}\vec{p})$ skalýar köpeltmek hasylynyň orta bahasynyň wagt boýunça önümi nola deň bolmaly, ýagny

$$\frac{d}{dt} < (\vec{r}\vec{p}) >= 0 \qquad (24.6)$$

Goý,

$$\hat{\mathrm{H}} = \frac{\hat{P}^2}{2\mu} + \hat{U}(\vec{r}) = \hat{T}(p) + \hat{U}(\vec{r}),$$

onda (24.5)-e laýyklykda operatorly deňlemä eýe bolarys:

$$\frac{d}{dt}(\hat{r}\hat{p}) = [\hat{\mathrm{H}} \cdot (\hat{r}\hat{p})] = [\hat{\mathrm{H}}\hat{r}]\hat{p} + \hat{r}[\hat{\mathrm{H}}\hat{p}] = \frac{1}{i\hbar}(\hat{r}\hat{\mathrm{H}} - \hat{\mathrm{H}}\hat{r})\hat{p} + \frac{\hat{r}}{i\hbar}(\hat{p}\hat{\mathrm{H}} - \hat{\mathrm{H}}\hat{p}) =$$

$$= \frac{1}{i\hbar \cdot 2\mu}(\hat{r}\hat{p}^2 - \hat{p}^2\hat{r})\hat{p} + \frac{\hat{r}}{i\hbar}\left(\hat{p}\hat{U} - \hat{U}\hat{p}\right) = \frac{1}{2\mu i\hbar} \cdot 2i\hbar\hat{p} \cdot \hat{p} + \frac{\hat{r}}{i\hbar}\left(-i\hbar\frac{\partial\hat{U}}{\partial r}\right) =$$

$$= \frac{\hat{p}^2}{2\mu} - \hat{r}\left(\frac{\partial\hat{U}}{\partial r}\right) = 2\hat{T} - \hat{r}\nabla U = 2\hat{T} - (\hat{r}gradU)$$

alynan operatorly deňleme orta bahanyň deňlemesine degişlidir:

$$\frac{d}{dt} < (\vec{r}\vec{p}) >= 2 < T > - < (\hat{r}gradU) >.$$

(24.6)-ny hasaba alyp:

$$2 < T > = < (\hat{r}gradU) > . \qquad (24.7)$$

Eger potensial energiýa r^n ululyga proporsional diýip hasap edilse, onda

$$< (\hat{r}gradU) > = < rnr^{n-1} > = n < r^n > = n < U >$$

we (24.7)-i ýönekeý görnüşi alýar

$$2 <T> = n \ < U> \qquad (24.8)$$

(24.7) we (24.8) gatnaşyklar, klassyk mehanikasynda sistemanyň kinetik we potensial energiýalarynyň wagta görä orta bahalarynyň arasyndaky gatnaşygy kesgitleýän wirial teoremasy bilen görnüşi boýunça gabat gelýär we şol sebäpli olara kwant wirial teoremasy diýilýär. Şu teoremany atomyň düzümi baradaky birinji işinde N.Bor kesgitläpdir: “Ýadrolaryň dynçlykdaky islendik sistemada, aýlaw orbita arkaly ýagtylygyň tizligi bilen deňeşdirilende kiçi tizlik bilen aýlanýan elektronlaryň kinetik energiýasy alamata çenli dogry potensialyň ýarymyna deňdir.”

§25. Kwant we klassyk nazaryýetiniň gatnaşygy. Erenfestiň teoremasy

Hereketiň Geýzenberg görnüşdäki deňlemäni alalyň:

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{H}\hat{L}] \qquad (25.1)$$

Impulsy we koordinaty wagta bagly däl diýip hasap edip, (25.1)-e meňzeş aňlatmalary koordinatyň we impulsyň operatorlary üçin ýazalyň. Koordinatyň we

impulsyň operatorlaryny degişlilikde $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ we $\hat{P}_x, \hat{P}_y, \hat{P}_z$ arkaly belgiläliň. Wagt

boýunça tizligiň proýeksiýalarynyń operatorlary $\frac{d\hat{x}}{dt}, \frac{d\hat{y}}{dt}, \frac{d\hat{z}}{dt}$ bolar. Impulsyň proýeksiýalarynyň wagt boýunça önümleriniň operatorlaryny bolsa $\frac{d\hat{P}_x}{dt}, \frac{d\hat{P}_y}{dt}, \frac{d\hat{P}_z}{dt}$

arkaly belgiläliň. Onda (25.1)-de $\hat{L}$ operatory yzygiderli $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{P}_x, \hat{P}_y, \hat{P}_z$ operatorlary bilen çalşyryp, alarys:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d\hat{x}}{dt} = [\hat{H}\hat{X}], \quad \frac{d\hat{y}}{dt} = [\hat{H}\hat{Y}], \quad \frac{d\hat{z}}{dt} = [\hat{H}\hat{Z}] \\ &\frac{d\hat{P}_x}{dt} = [\hat{H}\hat{P}_x] \quad \frac{d\hat{P}_{y,}}{dt} = [\hat{H}\hat{P}_{y,}] \quad \frac{d\hat{P}_z}{dt} = [\hat{H}\hat{P}_z] \end{aligned}\right\} \qquad (25.2)$$

Şu operatorly deňlemeler klassyk fizikasyndaky Gamiltonyň deňlemeleri bilen gabat gelýär we olara hereket üçin Gamiltonyň kwant deňlemeleri diýilýär. Klassyk mehanikasynda (25.2)-niň birinji deňlemeleri tizlik bilen impulsyň arasyndaky baglylygy dikeldýär, ikinji deňlemeleri bolsa impulsyň wagta görä üýtgemeginiň kanunyny aňladýar. Kwant mehanikasynda hem olar şeýle bahalara eýedirler. Munuň şeýledigine göz ýetirmek üçin gamiltoniany şeýle görnüşde alalyň:

$$\hat{H} = \frac{1}{2\mu}\left(\hat{P}_x{}^2 + \hat{P}_{y,}{}^2 + \hat{P}_z{}^2\right) + \hat{U}(x, y.z) \qquad (25.3)$$

(25.3)-iň esasynda (25.2)-ni özgerdeliň:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = [\hat{H}\hat{X}] = \frac{1}{i\hbar}(\hat{X}\hat{H} - \hat{H}\hat{X}) = \frac{1}{2i\hbar\mu}\left(\hat{X}\hat{P}_x{}^2 - \hat{P}_x{}^2\hat{X}\right) = \frac{1}{2i\hbar\mu}\cdot 2i\hbar\hat{P}_x = \frac{\hat{P}_x}{\mu}$$

Şeýlelikde,

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \frac{\hat{P}_x}{\mu}, \quad \frac{d\hat{y}}{dt} = \frac{\hat{P}_y}{\mu}, \quad \frac{d\hat{z}}{dt} = \frac{\hat{P}_z}{\mu} \qquad (25.6)$$

Indi $\frac{d\hat{P}_x}{dt}$ ululygy hasaplalyň:

$$\frac{d\hat{P}_x}{dt} = [\hat{H}\hat{P}_x] = \frac{1}{i\hbar}(\hat{P}_x\hat{H} - \hat{H}\hat{P}_x) = \frac{1}{i\hbar}(\hat{P}_x\hat{U} - \hat{U}\hat{P}_x) = \frac{1}{i\hbar}\left(-i\hbar\frac{\partial\hat{U}}{\partial x}\right) = -\frac{\partial\hat{U}}{\partial x}$$

Şeýlelikde,

$$\frac{d\hat{P}_x}{dt} = -\frac{\partial \hat{U}}{\partial x}, \qquad \frac{d\hat{P}_y}{dt} = -\frac{\partial \hat{U}}{\partial y}, \qquad \frac{d\hat{P}_z}{dt} = -\frac{\partial \hat{U}}{\partial z} \qquad (25.5)$$

Şu deňlemeleriň sag tarapy güýjüň proýeksiýalarynyň operatorlary, şonuň üçin

$$\frac{d\hat{P}_x}{dt} = \hat{F}_x, \qquad \frac{d\hat{P}_y}{dt} = \hat{F}_y, \qquad \frac{d\hat{P}_z}{dt} = \hat{F}_z \qquad (25.6)$$

ýa-da wektor görnüşde

$$\frac{d\hat{P}}{dt} = \hat{\vec{F}}_x$$

Diýmek, (25.2)-nji sistemanyň ikinji deňlemelerini operator görnüşde Nýutonyň deňlemeleri ýaly hasap edip bolýar. (25.4) we (25.5) operatorly deňlemeleri orta baha üçin ýazalyň:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}\bar{x} &= \frac{1}{\mu}\bar{P}_x, \\ \frac{d}{dt}\bar{P}_x &= -\frac{\partial \hat{U}}{\partial x} \end{aligned}\right\} \qquad (25.7)$$

ýa-da

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}\cdot\int \psi^* x\,\psi dx &= \frac{1}{\mu}\int \psi^* \hat{P}_x\,\psi dx, \\ \frac{d}{dt}\int \psi^* \hat{P}_x\,\psi dx &= -\int \psi^* \frac{\partial \hat{U}}{\partial x}\psi dx \end{aligned}\right\} \qquad (25.8)$$

(25.8)-nji sistemanyň deňlemeleri Erenfestiň teoremasynyň mazmunyny aňladýar we oňa laýyklykda klassyk mehanikanyň esasy deňlemelerini kwant ýagdaýa ösdürip bolýar.

(25.7)-nji sistemadan tapyp bileris:

$$\frac{d^2}{dt^2}\bar{x} = \frac{1}{\mu}\cdot\frac{d}{dt}\bar{P}_x = -\frac{1}{\mu}\cdot\frac{\partial \hat{U}}{\partial x},$$

ýa-da

$$\mu\frac{d^2}{dt^2}\bar{x} = -\frac{\partial \hat{U}}{\partial x} \qquad (25.9)$$

(25.9)-a Nýutonyň kwant deňlemesi diýilýär.

Şeýlelikde, kwant mehanikanyň sistemasyny klassyk mehanikanyň sistemasyna ýakyn ösdürip bolýar. Başgaça aýdylanda, kwant we klassyk mehanikasynda dinamiki üýtgeýänler şol bir deňlemeleri kanagatlandyrýar. Olaryň arasyndaky esasy tapawut, kwant mehanikasynda ol deňlemeler operatorlar we orta bahalar üçin ýazylýar.

§26. Hereketiň integrallary

Hereketiň kwant deňlemeleriniň integrallary diýip hereketde üýtgemeýän ululyklara aýdylýar, ýagny wagta bagly däldirler.

Eger

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = \frac{\partial \hat{L}}{\partial t} + [\hat{H}\hat{L}] \equiv 0 \qquad (26.1)$$

bolsa, onda $\hat{L}$ ululyga hereketiň integraly diýilýär. $\hat{L}$ aýdyň wagta bagly bolmasa

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{H}\hat{L}] \equiv 0 \qquad (26.2)$$

Şu ýerden gelip çykyşy ýaly hereketiň integrallary üçin Puassonyň skobkasy nola deň. (26.1)-den we (26.2)-den hereketiň integrallarynyň orta bahalarynyň wagta bagly däldiklerine göz ýetirýäris:

$$\frac{d}{dt}(\bar{L}) = 0$$

Şeýle ululyk hereketiň kwant deňlemeleriniň integraly diýen ady göterýär.

Erkin hereket üçin

$$\hat{U}(x, y, z) = 0$$

we

$$\hat{H} = \frac{1}{2\mu}\left(\hat{P}_x{}^2 + \hat{P}_{y,}{}^2 + \hat{P}_z{}^2\right),$$

onda

$$[\hat{H}\hat{P}_x] = 0, \quad [\hat{H}\hat{P}_y] = 0, \quad [\hat{H}\hat{P}_z] = 0,$$

ýa-da

$$\frac{d\hat{P}_x}{dt} = 0, \quad \frac{d\hat{P}_y}{dt} = 0, \quad \frac{d\hat{P}_z}{dt} = 0$$

ýagny klassyk mehanikadaky ýaly impuls hereketiň integrallarydyr.

Merkezi güýç meýdanda impulsyň momentiniň operatorlarynyň kwadraty $\hat{M}^2$ we $\hat{M}_x, \hat{M}_y, \hat{M}_z$ proýeksiýalar $\hat{H}$ operatory bilen kommutirleşýär:

$$[\hat{H}\hat{M}^2] = 0, \quad [\hat{H}\hat{M}_x] = 0, \quad [\hat{H}\hat{M}_y] = 0, \quad [\hat{H}\hat{M}_z] = 0,$$

ýa-da

$$\frac{d\hat{M}^2}{dt} = 0, \qquad \frac{d\hat{M}_x}{dt} = 0, \qquad \frac{d\hat{M}_y}{dt} = 0, \qquad \frac{d\hat{M}_z}{dt} = 0$$

ýagny impulsyň momenti merkezi güýç meýdanda hereketiň integrallarydyr.

Indi

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{H}\hat{L}]$$

deňlemede goý $\hat{L} = \hat{H}$ bolsun, onda

$$\frac{d\hat{H}}{dt} = [\hat{H}\hat{H}] = \frac{1}{i\hbar}(\hat{H}\hat{H} - \hat{H}\hat{H}) = 0$$

şeýlelikde,

$$\frac{d\hat{H}}{dt} = 0 \qquad (26.3)$$

Bu ýerde $\hat{H}$ doly energiýanyň operatory bilen gabat gelýär, şonuň üçin (26.3) doly energiýanyň operatorynyň hereketiň integralydygyny aňladýar. Başgaça aýdylanda, (26.3) kwant mehanikasynda doly energiýanyň saklanmak kanunyny berýär. (26.3)-den gelip çykyşy ýaly, eger wagtyň başlangyç momentinde energiýa kesgitli bahaly bolsa, onda ol şu bahany wagtyň indiki pursatlarynda hem saklaýar, ýagny wagtyň birjynslygy kwant mehanikasynda energiýanyň saklanmak kanunyna getirýär.

Şeýlelikde, hereketiň integrallarynyň we olara degişli saklanmak kanunlary kwantmehaniki sistemalaryň simmetrik häsiýetleri, ýagny koordinatalaryň özgertmelerine görälikde $\hat{H} - y\acute{n}$ inwariantlygy bilen ýakyndan baglydyr.

Wagtyň birjynslygy

$$[\hat{T}_\tau, \hat{\mathrm{H}}] = 0 \qquad (26.4)$$

kommutasiýa şerti bilen matematiki aňladylýar.

(26.4)-de $\hat{T}_\tau$- wagta görä τ ululyga süýşme operatory diýilýär;

τ - $\hat{T}_\tau$ operatoryň parametri bolup hyzmat edýär.

Wagta görä süýşme operatorynyň deregine özgertmeleriň generatory, ýa-da infinitezimal wagta görä süýşme $\hat{I}(t)$ operatoryny ulanmaklyk oňaýlydyr. Şu operator, parametriň nolunjy bahasynda şu parametr boýunça operatoryň önümi ýaly kesgitlenilýär:

$$\hat{I}(t) = \frac{\partial}{\partial t}\hat{T}_\tau\Big|_{\tau=0}$$

Giňişligiň birjynslygy erkin aralyga ýapyk sistemanyň parallel süýşmesinde $\hat{\mathrm{H}}$ operatoryň üýtgemeýänliginde (ýa-da inwariantlygynda) ýüze çykýar.

$$\hat{\mathrm{H}}\hat{P} = \hat{P}\hat{\mathrm{H}},$$

ýa-da

$$\frac{d\hat{P}}{dt} = 0$$

Soňky deňleme, kwant mehanikasynda impulsyň saklanmak kanuny diýilýär.

Ýokarda getirilen maglumatlardan aşakdaky wajyp netijeler gelip çykýar:

–energiýanyň saklanmak kanuny wagtyň birjynslygyň (wagty hasaplamaga alynýan belli bir momentiň saýlanylyp alynmagyna fiziki prosesleriň akyşlarynyň bagly däldikleriniň) netijesidir;

– impulsyň saklanmak kanuny- giňişligiň birjynslygynyň (giňişligiň ähli nokatlarynyň fiziki taýdan deňhukuklydyklarynyň) netijesidir;

– impulsyň momentiniň saklanmak kanuny – giňişligiň izotroplygynyň (giňişlikde ähli ugurlaryň fiziki taýdan deňhukuklydyklarynyň) netijesidir.

Edebiýat

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
3. Блохинце в Д.И. Основы квантовой механики. М.,1976.
4. Давыдов А.С. Квантовая механика. М., 1973.
5. Соколов А.А., Тернов Н.М. Квантовая механика и атомная физика.,М., 1970.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика, М.,1963.
7. Фок В.А. Начала квантовой механики., М.,1960.
8. Левич В.Г. Сборник задач по квантовой механике.,М.,1950.
9. Н. Ф. Нелипа «Физика элементарных частиц», М., 1977 г.
10. Л. Б. Окунь «Физика элементарных частиц», М., 1988 г.
11. М. А. Марков «Гипероны и к-мезоны», М., 1988 г.
12. А. И. Наумов «Физика атомного ядра и элементарных частиц», М., 1984
13. Г. Фрауэнфелдер, Я. Хенли «Субатомная физика», М., 1979 г.

14. Д. Эллиот, П. Добер «Симметрия в физике», том 1, М., 1983 г.
15. Б, Яворский, А. Детлаф «Физика», М., 1998 г.

MAZMUNY

III.Kwant mehanikasy.