

L.B.Okun

Elementar bóleksheler fizikasi

**Qayta islengen hám toliqtırılğan ekinshi basımnan
qaraqalpaq tiline awdargan
B.A.Abdikamalov**

Nókis - 2021

L.B.OKUN

Elementar bóleksheler fizikası

Qayta islengen hám toliqtırılğan ekinshi basılımnan qaraqalpaq tiline awdarıldı

MAZMUNI

I bap. Bóleksheler hám principler.

Eksperiment hám teoriya. Eki tendenciya. Simmetriyalar. Salıstırmalıq teoriyası. Háreket hám lagranjian. Kvantlıq mexanika. Spin. Fermionlar hám bozonlar. Elementar bóleksheler. Tiykargı óz-ara tásirlesiwler. Adronlar hám leptonlar.

II bap. Gravitaciya. Elektrodinamika.

Gravitaciya. Kvantlıq elektrodinamika (KED). Feynman diagrammalarınıń tili. Vakuumnıń polyarizaciyası.

III bap. Kúshli tásirlesiw.

Adronlar hám kvarkler. Izotoplıq spin. $SU(2)$ gruppası. Eksi bóleksheler. $SU(3)$ -simmetriya. Gózzal. b-kvark hám basqalar. Aromatlar hám áwladlar. Reń hám glyuonlar. Kvantlıq xro-modinamika (KXD). Asimptotalıq erkinlik hám konfaynment. Kirallıq simmetriya. KXD jolda.

IV bap. Ázzi tásirlesiw.

Ázzi ıdırawlar. Ázzi reakciyalar. Zaryadlangan toqtır qosılıwshıları. Aynalıq asimmetriya.

V — A toǵı. C-, P-, T-simmetriyalar. Neytral toqlar. Neytrinollıq massalar hám oscillyaciyalar. Qos β -ıdıraw. Eksperimentlerdiń isenimligi haqqında.

V bap. Elektrázzi teoriya.

Ázzi tásirlesiwlerdiń ózgeshelikleri. $SU(2) \times U(1)$ simmetriyası. Foton hám Z-bozon. Zaryadlangan toqlardıń óz-ara tásirlesiw. Neytral toqlardıń óz-ara tásirlesiw. W- hám Z-bozonlardı izlew. Simmetriyanıń buzılıwı. Xiggs bozonları. Modeller, modeller.... Skalyarlar - 1-sanlı mashqala. Teoriyanıń rawajlanıwı haqqında.

VI bap. Birlesiwdiń perspektivaları.

Juwıratuǵın konstantalar. $SU(5)$ gruppasındaǵı fermionlar. $SU(5)$ gruppasındaǵı kalibrovkalıq bozonlar. Protonnıń ıdırawı. Magnitlik monopoller. Modeller, modeller, modeller.... Supersimmetriya. Birlesiwdiń modelleri hám úlken partlanıw. Ekstrapolyaciyalar hám boljawlar haqqında. Eskertiwler (1983-jıldıń gúzi).

Joqarı energiyalar fizikası (ekinshi basılımǵa qosımsha).

1-qosımsha. Fizikalıq birlikler sisteması haqqında.

2-qosımsha. Terminlerdiń sózligi.

3-qosımsha. Ádebiyattı sholıw.

Predmetlik kórsetkish.

EKINSHI BASILIMGA ALGI SÓZ

Bul kitaptıń birinshi basılıwı 80-jıllardıń basında fizikler aralıqlıq bozonlardıń ashılıwın asıǵıslıq penen kútip júrgende tayarlandı. Kitaptaǵı teksttiń barlıǵı usı kútiwdi sáwlelendiredi. Aralıqlıq bozonlardıń ashılǵanı haqqındaǵı xabar kelgende kitap jazılıp bolıp edi hám bul jaǵday kitaptıń aqırındaǵı eskertiwde berilgen.

Ekinshi basılımdı tayarlawda men "waqıttıń ruwxın" qıyratpaw maqsetinde kitaptıń tiykarǵı tekstin qaytadan islew haqqındaǵı sheshimge keldim. Bunday sheshim tábiyiy bolıp kórindi hám tiykarǵı tekst ele gónergen joq edi. Sebebi ótken jılları sensaciyalıq ilimiy ashılıwlar qolǵa kirgizilmedi.

Eksperiment penen teoriyadaǵı orın alǵan progress tolıq bolmasa da kitaptıń aqırında orın alǵan qosımshalarda keltirilgen. Bul qosımshalar 1986-jılı tezletkishler boyınsha "Joqarı energiyalar fizikası - 86" atamasındaǵı xalıq aralıq konferenciya islengen sholıw bayanatında baspadan shıqtı. Sonıń menen birge "Terminler sózligine" bir neshe maqalalar qosılǵan.

Ádebiyattı sholıw jańalangan, oǵan 1982-85 jılları jarıq kórgen kitaplar menen sholıw maqalaları kirgizilgen. Men ádebiyattı keńeytiw jumısın ózine alǵan I. S. Cukermanga minnetdarman. Men kitaptıń recenzenti B. V. Medvedevke bergен paydalı keńesleri ushın raxmet aytaman.

Elementar bóleksheler fizikasında áhmiyetli ashılıwlar pisip tur. Kitaptıń oqıwshıǵa usı ashılıwlardıń dúnyanıń fizikalıq kartinasındaǵı ornın ayqınıraқ kóz aldına eleslete alıwına járdem beredi dep úmit etemen.

Eń aqırında kitaptıń forzacında jaylastırılǵan Álemniń evolyuciyası haqqında bir neshe sóz. Bul forzactı men dúzgenim joq, al familiyasın biliwdiń sáti túspegen avtor dúzgen. Ingliz tilindegi sxemanıń fotokopiyaları fiziklerdiń arasında keń tarqalǵan. Men tek rus tiline awdardım hám úlken bolmaǵan dúzetiwlerdi kirgizdim

Moskva
Sentyabr 1986-j.

BIRINSHI BASILIMGA ALGI SÓZ

Fizikanı tanımalı etetuǵın kitaplardıń eki úlken klassqa bóletuǵınlıǵı tábiyiy. Shártli túrde olardı "lirikler" hám "fizikler" dep atawǵa boladı. Birinshisinde fizikanıń adamzatlıq, tariyxıy, estetikalıq hám filosofiyalıq aspektleri basım keledi. Ekinshi klassqa kiretuǵın kitaplarda ayqın bolǵan qubılıslar menen nızamlıqlarǵa úlken dıqqat awdarıladı. Birinshi klassqa kiretuǵın kitaplardıń avtorları matematikalıq simvollarıdan qashadı hám 10-15 sm dep jazıwdıń ornına "santimetrdiń milliardtan bir bóliminiń millionnan bir bólimi" dep jazadı. Ekinshi klassqa kiretuǵın kitaplardıń avtorları logarifmlerdi, eksponentialardı, tuwındılardı hám integrallardı batıl túrde paydalanadı.

Bul kitap fizikler ushın jazılǵan. Ol ilimiy xızmetkerlerge, oqıtıwshılardıǵa hám fizika-matematikalıq qánigelikleriniń studentleri ushın arnalǵan. Onıń tiykarı elementar bóleksheler fizikasınıń ulıwmalıq kartinasın sáwlelendiriw maqsetinde islengen meniń bayanatlarım bolıp tabıladı. Bul bayanatlarda men joqarı energiyalar fizikasınıń perspektivaları haqqında fizikanıń usı bóliminiń Vavilon minarınıń qurılısınıń hár qıylı ushastkasında isleytuǵın hám qońsılas bolǵan ushastkada qollanılatuǵın tildi bilmeytuǵın adamlar ushın maǵlıwmatlardı berdim. Kitap eki qatlamǵa iye: kópshilikke arnalǵan ilimiy hám professionalıq.

Eger siz arnawlı salıstırmalıq teoriyası menen tanıs, biraq kvantlıq mexanikanı bilmeytuǵın bolsańız, onda kitaptıń shama menen úshтен birine túsinesiz. Eger siz Shredinger teńlemesin jaza alatuǵın bolsańız, onda kitaptıń yarımına túsinesiz. Eger siz Dirak teńlemesin jaza alsańız hám ondaǵı belgilewlerdiń mánisin túsinetuǵın bolsańız, onda kitaptıń úshтен eki bólimin túsinesiz.

Kitaptırn qalğan úshen bir bóliminiń barlıǵı avtordırn ózine de túsiniikli emes.

Kitap sholiwdan hám úsh qosımshadan turadı. Sholiw 6 bapıan ibarat: "Bóleksheler hám principler", "Gravitaciya hám elektrodinamika", "Kúshli óz-ara tásirlesiw", "Ázzi óz-ara tásirlesiw", "Elektrázzi teoriya", "Birlesiwdirn perspektivaları".

1-qosımsha — "Fizikalıq birliklerdirn sistemaları haqqında" - tiykarınan \hbar , $c=1$ sistemasın tallawǵa hám onı basqa sistemalar menen, mısalı CB sisteması menen salıstırıwǵa baǵıshlangan.

Kitaptırn aldında turǵan máselelerdirn biri oqıwshını \hbar , $c=1$ relyativistlik kvantlıq birlikler sisteması menen paydalanıwdı úyretiw bolıp tabıladı. Bul sistema qubılıslardırn mánisin túsiniwdi jeńillestiredi hám yadta ápiwayı bolǵan aqılǵa muwapıq keletuǵın ólshemlik bahalawlardı alıw múmkinshiligin beredi. Olar ushın kóp sanlı mısallardı kitaptırn tekstiniń barlıǵında tabıwǵa boladı.

2-qosımsha — "Terminler sózligi" — júzden aslam terminlerdirn mánisin túsindiriwdi óziniń ishine aladı. Dáslep sózlik azı-kemli tayarlıǵı bar oqıwshı ushın bayanatlarda keltirilgen maǵlıwmatlardı ózlestiriw ushın qısqasha túsiniqler beriw maqsetinde dúzilgen edi. Biraq men waqıttırn ótiwi menen qánigeler ushın da qızıqlı bolatuǵınday qanday da bir eskertiwlerdi, túsiniqlerdi de keltiriwge qaratılǵan táwekel etiwdirn aldında shıdap tura almadım.

Sózlikte kóp sanlı áhmiyetli terminlerdirn ayırım maqalalarınıń joq ekenligin ańsat ańǵarıwǵa boladı. Kópshilik jaǵdaylarda olar sózliktegi basqa maqalalarda yamasa sholiwdırn tekstinde keltirilgen. Eger predmetlik kórsetkishten paydalansa olardı ańsat tawıp alıwǵa boladı.

3-qosımsha — "Ádebiy sholiw" — 1975-jıldan keyin eń aldırnǵı jurnallarda jariq kórgen joqarı energiyalar fizikası menen oǵan baylanıslı bolǵan máselelerge baǵıshlangan maqalalardıń sistemaga túsirilgen dizimi keltirilgen.

Kitapta áhmiyetli orın predmetlik kórsetkishke berilgen. Onı sholiwdırn ayırım paragrafları hám 1- jáne 2-qosımshalardıń arasına kópir saladı hám barlıq kitaptı baylanıstıradı dep esaplaw kerek

Ulıwma, oqıwshıǵa kitaptı birinshi ret tolıǵı menen oqıw hám túsiniqsiz orınlardı túsiniwge tırıspaw hám olardı kitaptı ekinshi ret oqıǵanda qaytıp keliw ushın qálem menen belgilep qoyıw usınıladı. Múmkin, kitaptı oqıwdı 1- hám 2-qosımshalardan jáne predmetlik kórsetkishten baslaǵan hám onnan keyin kitaptı tolıǵı menen oqıw maqsetke muwapıq keletuǵın shıǵar.

Jáne bir neshe sóz fizikanı shıntlap úyreniw niyeti bar oqıwshıǵa arnalǵan.

Kitaptı qaytadan oqıǵanda súwretlerge, ásirese formulalarǵa dıqqat penen qarańız. Formulalar ózlerine dıqqat penen qaraǵandı jaqsı kóredi. Qanday da bir qatnasqa qarasańız olardaǵı hár qıylı aǵzalardıń ólshemlerin, olardıń tenzorlıq indekslerin salıstırıńız. Anaw yamasa mınaw ańlatpadaǵı háriplerdirn (simvollardıń) hár biriniń neni ańǵartatuǵınlıǵın ózińizden sorańız.

Sizden payda bolǵan sorawlardırn barlıǵına bul kitap juwap bermeydi. Ol kvantlıq mexanika, qala berse maydannırn kvantlıq teoriyası boyınsha oqıwlıqtı almastıra almaydı.

Eger sizde sońǵı 10-20 jıl ishinde tabılǵan eksperimentallıq faktler menen jańa teoriyalıq túsiniqlerdirn arasındǵı baylanıstı tabıwǵa járdem bergen hám sizdi basqa da kitaplardı oqıwǵa qızıǵıw payda etken bolsa, onda kitaptırn aldına qoyılǵan wazıypasın orınladı dep esaplaw kerek.

Joqarı energiyalar fizikası boyınsha XX xalıq aralıq konferenciyaǵa kelgen waqıtları (Me-dison, AQSh. iyul, 1980-jıl) usı konferenciya ushın tayarlangan juwmaqlawshı bayanattırn keńeytilgen tekstin ózi shıǵarıp atırǵan kitaplardıń seriyasında baspadan shıǵarıwdı usındı. Aqırında usı kitaptırn payda bolıwına alıp kelgen onıń usınısı ushın men oǵan minnetdarman. Usı usınıstı qabil etip kitaptı jazıwdırn qansha kóp waqıttı talap etiletuǵınlıǵına mende gúman bolǵan joq.

Men kitaptırn qoljazbasınıń ayırım bólimlerin oqıǵan hám kóp sanlı kritikalıq eskertiwler bergen M. B. Voloshinge, I. YU. Kobzarevke, V. I. Koganǵa, A. B. Migdalǵa, N. G. Semashkoǵa, K. A. Ter--Martirosyanǵa hám kóp-kóp sanlı qánigelerge minnetdarshılıq bildiremen. Tilekke qarsı, sol eskertiwlerdirn tek ayırımların ǵana oqıp shıǵıwǵa sáti tústi.

Men ayrıqsha E. G. Gulyaevaǵa hám I. A. Terexovaǵa qoljazbanı baspaǵa tayarlaǵanda bergen járdemleri ushın raxmetler aytaman.

1-bap

BÓLEKShELER HÁM PRINCIPLER

Eksperiment penen teoriya. Eki tendenciya. Simmetriyalar Salıstırmalıq teoriyası. Háreket hám lagranjian. Kvantlıq mexanika. Spin. Fermionlar hám bozonlar. Elementar bóleksheler. Tiykarǵı óz-ara tásirlesiwler. Adronlar hám leptonlar.

Eksperiment penen teoriya

Elementar bóleksheler fizikası eksperiment penen teoriyanıń tań qalarlıq quymasınan turadı.

Eń kishi bólekshelerdiń qásiyetleri quramalı bolıwı menen ilimniń basqa oblastlarında pútkilley joq bolǵan eksperimentlerde tabıladı. Basqa oblastlarda joq bolǵan bul eksperimentlerdiń dálıligi oǵada joqarı. Kópshilik jaǵdaylarda izertlew obǵektleriniń ózleri bolǵan bóleksheler laboratorianıń ózinde tezletkishlerdiń járdeminde payda etiledi hám olar sonday kishi waqıt ǵana jasaydı, hátte biziń bir zamatlıq dep júrgenimiz sheksizliktey bolıp kórinedi. Bólekshelerdiń qanday da bir ıdırawınıń júzege keliwin oǵan uqsas bolǵan milliardlaǵan "qızıq emes" ıdırawlardıń arasınan tabıwǵa tuwrı keledi. Elementar bóleksheler haqqındaǵı barlıq maǵlıwmatlardı oǵada muqıyatlı túrde ótkerilgen ólshewlerde alınadı.

Biraq, bul maǵlıwmatlardı jıynaw tiykarǵı maqset, elementar bóleksheler fizikasınıń aqırǵı maqseti bolıp tabılmaıdı. Onıń eń joqarǵı maqseti tábiyattır tiykarǵı, eń ulıwmalıq bolǵan fizikalıq nızamların ashıw bolıp tabıladı. Tájiriybelerde qolǵa kirgizilgen informaciyalardıń teoriyalıq juwmaqlardı keltirip shıǵarıw ushın qaytadan isleniwı kerek. Júzlegen eksperimentlerdiń nátiyjelerin teoriyalıq tallanıwınıń kvintessenciya teoriyalıq jaqtan kórsetiw hám bir neshe qaǵazda jazıw múmkin bolǵan matematikalıq formulalarǵa aylandırıwdan ibarat. Bunıń idealda tek bir formuladan, barlıq fizikanı óziniń ishine qamtıytuǵın sıyqırılı ǵozadan ibarat bolıwı múmkin. Biraq, bunday ideal ushın bizge ele erte.

Eki tendenciya

Fizikanıń rawajlanıwında bir birine qarama-qarsı bolǵan hám bir birin biykarlaytuǵınday bolıp kórinetuǵın eki tendenciya kózge túsedi. Birinshi tárepten izertlenetuǵın qubılıslardıń sanınıń eksponenciallıq ósiwi, qánigeliklerdiń sanınıń artıwı, hár bir baǵdardıń shaqalarǵa bóliniwı orın alıp atır. Shaqalarǵa bóliniw, differenciaciya processı jańa arnawlı jurnallardıń payda bolıwı, konferenciyalardıń ótkeriliwinde ayqın kórinedi.

Ekinshi tárepten, oǵan qarama-qarsı bolǵan processtıń júriwiniń intensivligi de kishi emes. Bul birigiw, sintez, integraciya processı bolıp tabıladı. Hár jıl sayın fizikanıń iri bolǵan ayırım tarawlarınıń, usı waqıtlarǵa shekem ulıwmalıq hesh nársege iye emes dep esaplanıp kelingен qubılıslardıń arasındaǵı baylanıstır bar ekenligi ayqın bolmaqta.

Nyutonniń mexanikası Jerdegi qozǵalıslar menen aspan denelerdiń qozǵalısların biriktirdi. Maksvelldiń elektrodinamikası elektrlik, magnitlik hám optikalıq qubılıslardı biriktirdi. Eynshteynniń arnawlı salıstırmalıq teoriyası keńislik penen waqıttı biriktirdi. Kvantlıq mexanika conceptuallıq planda bóleksheler menen tolqınlar túsiniqlerin, determenizm menen itimallıqtı hám sonıń tiykarında atomlıq fizika menen ximiyanı, kondensirlengen ortalıqlardıń fizikasın biriktirdi. Maydanniń kvantlıq teoriyası bóleksheler menen kúshlerdi birlestirdi. Biziń kózimizdiń aldında rawajlanǵan maydanniń kvantlıq teoriyası elementar bólekshelerdiń hár qıylı tiplerin hám olardıń arasındaǵı fundamentallıq óz-ara tásirlesiwlerdi birlestiredi. Bul jerde ullı birlesiw teoriyaları menen superbirlesiw teoriyaların názerde tuttim.

Tek ústirtin qaraytuǵın baqlawshı ushın ǵana qánigeliklerge ajıralıw menen birlesiw processleri bir birin biykarlaytuǵınday bolıp kórinedi. Fizika ayqın ilim hám onıń sintez jolındaǵı hár bir qáдеми aqıldıń ótkirigin hám arnawlı qurallardı talap etedi. Bul tek eksperimenttiń metodikasına emes, al teoriyanıń matematikalıq usıllarına da tiyisli. Óziniń gezeginde bul jańa etap sintez jolında tek ilimde ǵana emes, al texnikada da hár qıylı bolǵan uzaq dawam etetuǵın jańa ilimiy baǵdarlardıń payda bolıwına alıp keldi hám usınıń nátiyjesinde barlıq adamzattıń turmısınıń ótiwin túpkilikli túrde ózgertti. Radiotexnika menen yadrolıq texnikanı eske alıw jetkilikli. Birinshisi elektrodinamikalıq sintezdiń tuwındısı, al ekinshisi relyativistlik hám kvantlıq fizikanıń sintezdiń tuwındısı bolıp tabıladı. Ullı birigiw teoriiyası ideyaları haqıyqatlıqqa sáykes keletuǵınday bolıp kórinedi hám superbirigiw áhmiyeti kem bolmaǵan qızıqlı perspektivalardı ashadı.

Qánigelestiriw hám shaqalarǵa ajıralıw processı fizikanıń birden-bir ulıwmalastırılǵan kartinasin dúziw ushın zárúrli bolsa da, ol hár bir ilimiy xızmetker ushın quramalı bolǵan qıyınshılıqlardı payda etedi. Ilimniń frontınıń kem-kemnen jańa baǵdarlarǵa bóliniwi hátte bir institutta isleytuǵın hár qıylı qánigeliklerge iye bolǵan fiziklerdiń ózleri de bir birin qıyınshılıq penen túsinedi.

Berilgen predmetti qanshama tereń túsinsen, onda onı táriyipleytuǵın tildiń dálirek hám bay bolıp shıǵadı. Sebebi ilimiy til - bul biliwdiń quralı. Biraq bul baǵdardıń tili qanshama bay bolsa, onı qońsılarǵa túsiniw sonshama qıyınraq. Fizikada poligot bolıp jetisiw niyeti bar adamǵa óziniń ilimiy jumısı ushın energiya da, impuls ta qalmaydı.

Ilim menen shuǵıllanatuǵın hár bir adam ushın eki frontta gúresti alıp bariwǵa tuwrı keledi: tábiyat penen hám óziniń nadanlıǵı menen. Birinshi frontta jańa ilimiy tastıyqlawlar dóretiledi, al ekinshide basqalar tárepinen dóretilgen nárseler úyreniledi. Usı iskerliktiń eki túri de bir birinen ajıralmas túrde baylanısqan.

Bul kitap elementar bóleksheler fizikasınıń házirgi zamanlardaǵı tiykarǵı ideyaları menen tendenciyları haqqındaǵı kóz-qaraslarǵa iye bolıwǵa járdem beriw ushın jazıldı. Onıń maqseti - til bareri arqalı ótiwde hám sonıń menen birge fizikanıń birligin túsiniwge járdem beriw.

Simmetriyalar

Házirgi zaman fizikasınıń negizgi túsinipleriniń biri simmetriya túsinigi bolıp tabıladı. Simmetriyanı paydalanıw jolı menen fizikalıq qubılıslardıń kaleydoskopında tiykarǵı strukturalardı, fizikalıq dúnyadaǵı hár qıylı bolǵan qubılıslardı onlaǵan fundamentallıq formulalarǵa alıp keliwdiń sáti túsedi.

Simmetriya sózin ele bilmeytuǵın waqıttıń ózinde kishkene bala simmetriyanı kóredi hám sezedi: gúbelek, top, kún menen túnniń almasıwı ... Simmetriyanıń kóp bolmaǵan hár qıylı túrleriniń sheksiz kóp sanlı kóriniwleri adamnıń pútkil ómirin qorshap aladı. Fiziklerdi simmetriyanıń ańshıları dep atawǵa boladı: bazı bir mániste olar basqa adamlardan tábiyattaǵı simmetriyanıń eń kórinbeytuǵın hám fundamentallıraq bolǵan tiplerin izlewı boyınsha ayırıladı. Eń aqırǵı esapta fiziktiń xızmeti, usı jaǵdaydı ol barlıq waqıtta moyınlamaytuǵın bolsa da, simmetriyanı izlewge baǵdarlangan.

Simmetriya túsinigi túrlendiriw hám invariantlıq túsinipleri menen ajıralmas túrde baylanısqan. Top aylanıwlarǵa qarata, gúbelektiń eki qanatı - aynalıq shaǵılıstırıwǵa ... qarata invariant.

Salıstırmalıq teoriyası

Puankare gruppası dep atalatuǵın gruppasını payda etetuǵın túrlendiriwlerdiń jıynaǵı jaqsı belgili: buǵan keńisliktegi hám waqıt boyınsha jılıwlar, keńisliklik aylanıwlar hám turaqlı tezlik penen qozǵalı kiredi. Tábiyattıń nızamlarınıń usı túrlendiriwlerge salıstırǵandaǵı invariantlıǵı Eynshteynniń arnawlı yamasa dara salıstırmalıq teoriyasınıń mazmunın quraydı. Bul invariantlıq keńislik penen waqıttıń bir tekliginiń, ádettegi úsh ólshemli evklid keńisliginiń hám tórt ólshemli evklidlik keńisliktiń izotroplıǵınıń nátiyjesi bolıp tabıladı (tórt ólshemli evklid keńisligi Minkovskiydiń haqıyqıy fizikalıq psevdoevklidlik keńisliginen waqıt t nı $i\tau$ menen almastırıw menen ayrıladı, i arqalı jormal birlik belgilengen).

Tábiyattıń nızamlarınıń Puankare gruppasına salıstırǵandaǵı invariantlıǵı bir qatar saqlanıw nızamlarınıń bar bolıwında kórinedi: E energiyaniń saqlanıw nızamı, \mathbf{p} impulstıń saqlanıw nızamı, \mathbf{M} múyeshlik momenttiń saqlanıw nızamı hám lorenc momenti dep atalatuǵın \mathbf{N} momentiniń saqlanıw nızamı. Koordinataları t, \mathbf{r} bolǵan E energiyaǵa hám \mathbf{p} impulske iye noqatlıq bólekshe ushın

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}, \quad \mathbf{N} = c t \mathbf{p} - \mathbf{r} E / c$$

teńlikleri orınlanadı.

Eger bólekshelerdiń izolyaciyalanǵan, atawda qalǵan sisteması bolatuǵın bolsa, onda $E, \mathbf{p}, \mathbf{M}, \mathbf{N}$ shamalarınń qosındı mánisleri usı sistemaniń ishinde hesh qanday óz-ara tásirlesiw bolmaǵan jaǵdaydaǵıday bolıp saqlanadı.

Arnawlı salıstırmalıq teoriyasınıń teńlemelerine kiretuǵın fundamentallıq turaqlı fizikalıq tásirlesiwlerdiń tarqalıwınıń sheklik tezligi - jaqtılıqtıń tezligi $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ sm/s bolıp tabıladı.

Koordinatalıq túrlendiriwlerde Puankare gruppasını payda etetuǵın ct hám \mathbf{r} shamaları, sonıń menen birge E jáne $\mathbf{p}c$ shamaları tórt ólshemli vektorlardıń qurawshıları x_μ hám p_μ , al \mathbf{M}, \mathbf{N} shamaları bolsa antisimmetriyalı $M_{\mu\nu}$ tenzorınıń qurawshıları sıpatında túrlenedi ($\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$).

Bunday túrlendiriwlerde ózgerissiz qalatuǵın shamalar bar. Olar invariantlar (skalýarlar) bolıp tabıladı:

keńisliklik-waqıtlıq interval¹:

$$s = x^2 = x_\mu x_\mu = t^2 c^2 - \mathbf{r}^2;$$

massanıń kvadrati

$$m^2 c^4 = p^2 = p_\mu p_\mu = E^2 - \mathbf{p}^2 c^2$$

hám eń aqırında

$$M^2 = M_\mu M_\mu.$$

Salıstırmalıq teoriyası haqqında ǵáp etkende fizikalıq maydanlar haqqında bir tómendegilerdi aytpawǵa bolmaydı. Elektromagnit tolqınlarınń óz aldına fizikalıq obýektler haqqındaǵı kóz-qaraslar arnawlı salıstırmalıq teoriyası dóretilmesten ádewir burın Faradeydiń, Maksvelldiń hám basqa da alımlardıń jumıslarında qalıplesti. Tek salıstırmalıq teoriyası dóretilgennen keyin ǵana fizikaǵa sheksiz úlken erkinlik dárejesine iye bolǵan keńislik hám waqıt boyınsha ózgeretuǵın fizikalıq maydan haqqındaǵı kóz-qarastı kirgiziwdiń shárt ekenligi ayqın boldı. Tek bir zamatlıq uzaqtan tásirlesiw bolmaǵan jaǵdayda ǵana bólekshelerdiń orınlarınıń ózgeriwine alıp keletuǵın

¹ Bul jerde de, keyin de, birdey bolǵan indekslerdiń jubı ("únsiz" indeks dep atalatuǵın) summalawdı ańǵartadı. Tórt ólshemli indeksler bolǵan jaǵdayda keńisliklik qurawshılardıń kóbeytiwshileriniń aldına qosımsha minus belgisin qoyıw menen júzege keltiriledi. Sonlıqtan tórt ólshemli a_μ hám b_μ vektorlarınıń kóbeymesi mınaǵan teń:

$$ab = a_\mu b_\mu = a_0 b_0 - a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3.$$

Waqıtlıq hám keńisliklik qosılıwshılardıń belgileriniń hár qıylı bolıwı Minkovskiy keńisliginiń psevdoevklidligi menen baylanıslı.

olardıń aradaǵı qálegen túrdegi kúshlik óz-ara tásirlesiwdiń bir noqattan ekinshi noqatqa shekli tezlik penen alıp beriletuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Maydan energiya menen impulstıń alıp júriwshisi bolıp tabıladı. Relyativistlik invariantlıq hár qıylı maydanlardıń potenciallarınıń tórt ólshemli aylanıwlarında belgili tártipte túrleniwın talap etedi. Mısalı, elektromagnit maydannıń potencialı $A_\mu(x)$ tórt ólshemli vektor bolıp tabıladı. Házirgi waqıtları fizika júdá kóp sanlı maydanlar menen is alıp baradı. Olardıń geyparaları vektorlıq, yaǵnıy elektromagnit maydanǵa usaǵan bolıp, tórt ólshemli vektor bolıp tabılatuǵın potencial menen táriyiplenedi. Sonıń menen birge skalyar, tenzorlıq h.t.b. maydanlar belgili.

Háreket hám lagranjian

Barlıq fizikalıq shamalardıń ishinde fizika iliminde oraylıq orındı iyeleytuǵın bir shama bar. Bul shama háreket S bolıp tabıladı. Kinetikalıq energiyası T_{kin} bolǵan erkin relyativistlik emes bóleksheler ushın háreket

$$S = \int_{t_1}^{t_2} T_{kin} dt$$

shamasına teń. Quramalı bolǵan fizikalıq sistemalar ushın háreket

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt$$

túrinde jazıladı. Bul ańlatpada L arqalı Lagranj funkciyası belgilengen. Mısalı statikalıq potencialdaǵı relyativistlik emes bóleksheler ushın

$$L = T_{kin} - U.$$

U arqalı potenciallıq energiya belgilengen.

Maydan ushın háreket

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(x) dt$$

túrinde jazıladı. Bul ańlatpada $\mathcal{L}(x)$ arqalı lagranjian yamasa Lagranj funkciyasınıń tıǵızlıǵı belgilengen; $x = (ct, \mathbf{r})$ — dúnyalıq noqattıń koordinatası, $d^4x = (c dt, d\mathbf{r})$, al integral barlıq keńislik-waqıt boyınsha alınadı.

Hárekettiń fizikada tutqan oraylıq ornı fizikanıń tiykarǵı nızamı bolǵan eń kishi háreket principiniń bar bolıwınan ibarat. Bul nızam boyınsha tábiyatta júzege keletuǵın barlıq haqıyqıy processler ushın hárekettiń mánisi ekstremallıq, onıń variaciyaları nolge aylanadı:

$$dS = 0.$$

Variaciyalıq princip fizikaǵa Ferma tárepinen kirgizildi ("tábiyat eń jeńil hám qolaylı jollar menen háreket etedi"), al háreket (*actio formalis*) haqqındaǵı kóz-qaras Leybnic tárepinen usınıldı. Bunnan keyin eń kishi háreket principini Mopertyui, Eyler, Lagranj, Gamilton hám basqalar tárepinen rawajlandırıldı. Biraq uzaq waqıtlar dawamında bul princip qozǵalıstıń nyutonlıq nızamlarına qosımsha retinde qaraldı hám Gelmgolctıń, Planktıń hám Néterdiń jumıslarınan keyin ǵana hárekettiń fizikadaǵı universallıq jáne tiykarǵı ornı ayqın boldı.

Puankare gruppasına qarata hárekettiń invariantlıǵınan joqarıda esletilip ótilgen energiyanıń, impulstıń hám múyeshlik momenttiń saqlanıw nızamları kelip shıǵadı. Keyinirek biz hárekettiń basqa túrlendiriwge qarata invariantlıǵınan basqa saqlanıw nızamlarınıń kelip shıǵatuǵınlıǵın kóremiz. Biraq, hárekettiń tiykarǵı ullılıǵı saqlanıw nızamları menen baylanıslı emes, al maydanlar hám bólekshelerdiń óz-ara tásirlesiwleriniń barlıq dinamıkası hárekettiń ishinde jaylasqanlıǵı menen baylanıslı. Eń kishi háreket principiniń tiykarında S penen \mathcal{L} den qozǵalıstı teńlemesi kelip

shıǵadı. Sonlıqtan, elementar bóleksheler teoriyasın dóretiw fizikalıq dúnyanı táriyipleytuǵın fundamentallıq lagranjiandı tabıw hám onnan kelip shıǵatuǵın teńlemelerdi sheshiw dep jiyi aytadı. Biz tómende fundamentallıq lagranjiangá qanday bóleksheler menen maydanlardıń kiretuǵınlıǵın hám olardıń arasında qanday tásirlesiwlerdiń bolatuǵınlıǵın tallaymız. Biz fundamentallıq lagranjiannıń hár qıylı aǵzaların tapqanda jol kórsetetuǵın juldızlardıń simmetriyalar bolıp tabılatuǵınlıǵın kóremiz.

Kvantlıq mexanika

Salıstırmalıq teoriyası házirgi zaman fizikası ústinde turǵan eki tirektiń biri bolıp tabıladı. Ekinshi tirek XX ásirdiń 20-jılları Bordıń, de Broylıń, Geyzenbergtiń, Diraktıń, Shredingerdiń hám basqalardıń jumıslarında dóretilgen kvantlıq mexanika bolıp tabıladı. Kvantlıq mexanikada fundamentallıq orındı universallıq dúnyalıq konstanta Plank turaqlısı $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ erg·s iyeleydi.

Kvantlıq mexanika boyınsha A noqatınan B noqatına orın almasıǵan bóleksheniń traektoriyası múmkin bolǵan traektoriyalardıń pútkil klassınıń tek biri (ádette, eń itimal bolǵan) bolıp tabıladı. Ádettegi klassikalıq mániste bólekshelerdiń ózi bóleksheler bolıp tabılmaıdı: olar tolqınlıq qásiyetlerge iye, sonıń menen birge tolqınlıq qásiyet bóleksheniń massası qanshama kishi bolsa hám usı bóleksheniń sırtqı kúshlerdiń tásirinde qozǵalatuǵın keńisliktiń oblastı qanshama kishi bolsa kúshlirek kórinedi. Kvantlıq mexanikada bólekshelerdiń halı yamasa bóleksheler sistemasınıń halı túsinigi kirgiziledi. Hár bir halǵa gilbert keńisligi dep atalatuǵın bazı bir sıızqlı sheksiz kóp ólshemli keńislikte hal vektorı jazıladı. Dinamikalıq shamalarǵa gilbert vektorlarına tásir etetuǵın operatorlar juwap beredi.

Gilbert vektorları keńisliklik-waqıtlıq koordinatalardıń funkciyaları bolıp tabıladı. Sonıń menen birge olar "ishki koordinatalar" dep atalatuǵın koordinatalardan ǵárezli. Usınday koordinatalar menen baylanıslı bolǵan ishki simmetriyalar elementar bólekshelerdiń óz-ara tásirlesiwini táriyipleytuǵın teoriyalarda áhmiyetli orıńǵa iye.

Kvantlıq-mexanikalıq nızamlıqlar menen eń birinshi ret atomlıq fizikada jumıs alıp barıldı. Bunday nızamlar yadro fizikası menen elementar bóleksheler fizikasında anıqlawshı nızamlar bolıp tabıladı.

Elementar bóleksheler fizikasınıń ózine tán ózgesheligi háreket S tiń shaması \hbar tiń shaması menen, al tezlik v nıń shaması jaqtılıqtıń tezligi c menen barabar bolǵan jaǵdaylar ushın kvantlıq relyativistlik processler menen is alıp barıwınan ibarat². Sonıń menen birge bólekshelerdiń energiyası olardıń massasınan úlken bolǵan jaǵdaylar júdá jiyi ushırasadı. Bunday jaǵdaylarda bólekshelerdiń tuwılıw processleri birinshi dárejeli áhmiyetke iye boladı.

Usınday qubılıslardı táriyiplew ushın teoriyalıq apparatı maydannıń kvantlıq teoriyası beredi.

Maydannıń kvantlıq teoriyasınıń bir neshe ekvivalentlik teoriyası bar. Kóbinese klassikalıq maydanlarǵa sáykes maydanlardıń kvantları bolǵan bólekshelerdiń tuwılıw hám joǵalıw operatorların jazıwdan baslaydı (Elektromagnit maydanı ushın bunday bóleksheler fotonlar bolıp tabıladı). Bunday jaǵdayda lagranjian da, eń kishi tásir principinen kelip shıǵatuǵın qozǵalısh teńlemesi de operatorlıq mániske iye boladı.

Feynman tárepinen usınılǵan basqa formulirovkada, kvantlıq-maydanlıq dinamika barlıq maydanlıq konfiguraciýalar boyınsha funkcionallıq integral menen táriyiplenedi. Bunday jaǵdayda hár bir konfiguraciya $e^{iS/\hbar}$ salmaǵı menen kiredi (S arqalı oǵan juwap beretuǵın háreket belgilengen). Klassikalıq shekte ekstremallıq háreketke iye konfiguraciýalar tiykarǵı úlesti qosadı. Bul formalizmdi paydalanıp, Feynman arnawlı matematikalıq apparatı islep shıqtı (feynman diagrammalarınıń apparatı). Onıń menen biz kelesi bapta tanısamız.

² $\hbar, c = 1$ teńlikleri orınlanatuǵın birlikler sisteması qabıl etilgen jaǵdayda kvantlıq relyativistlik processlerdi tallaw ádewir ápiwayılasadı. Bunnan bılay biz usınday birlikler sistemasınan paydalanamız.

Spin. Fermionlar hám bozonlar

Eń áhmiyetli kvantlıq-mexanikalıq nızamlıqlardıń biri múyeshlik momenttiń kvantlanıwı bolıp tabıladı. Bóleksheniń orbitalıq múyeshlik momenti L tek \hbar eselengen mánisti qabıl ete aladı (dáliregi $L^2 = l(l+1)\hbar^2$, $l = 0, 1, 2, \dots$). Ádette, orbitalıq momenttiń shaması haqqında gáp etkende l shamasın názerde tutadı. Múyeshlik momenttiń koordinatalar kósherleriniń qálegen birine túsirilgen proekciyası da kvantlangan bolıp tabıladı. Proekciya tek $m\hbar$ shamasına teń boladı (m arqalı pútin san belgilengen).

Orbitalıq moment penen bir qatarda bólekshe menshikli moment spinge de iye boladı. Bóleksheniń spini onıń ajıralmas hám ózgermeytuǵın qásiyeti bolıp tabıladı. Spini nolge teń bolǵan bólekshelerdi skalyar bóleksheler, spini $\frac{1}{2}\hbar$ bolǵan bólekshelerdi spinorlar, spini \hbar qa teń bólekshelerdi vektorlıq bóleksheler, spini $(3/2)\hbar$ bolǵan bólekshelerdi spin-vektorlıq bóleksheler, al spini $2\hbar$ qa teń bolǵan bólekshelerdi tenzorlıq bóleksheler dep ataydı. Anaw yamasa mınaw bóleksheniń spini haqqında gáp etkende barlıq waqıtta onıń \hbar birliklerinde ańlatılǵanlıǵın názerde tutıw kerek. Mısalı, elektron haqqında gáp etkende onıń $\frac{1}{2}$ ge teń spinge, al foton haqqında gáp etkende onıń spini 1 ge teń bolǵan bólekshe ekenligin názerde tutadı.

Spininiń mánisi boyınsha bóleksheler eki úlken klassqa bólinedi: yarım pútin spinge iye bóleksheler [$S = (n + \frac{1}{2})\hbar$, n - pútin san] fermionlar, al pútin spinge iye bóleksheler ($S = n\hbar$, n - pútin san) bozonlar dep ataladı³. Berilgen kvantlıq-mexanikalıq halda qálegen sandaǵı bozonniń, biraq, tek fermionniń berilgen tipiniń birewiniń bolıwı múmkin. Usıǵan baylanıslı bozonlar ushın Boze-Eynshteyn statistikası hám fermionlar ushın Fermi-Dirak statistikası haqqında gáp etedi. Berilgen halda tek bir fermion tura aladı dep atalatuǵın principi Pauli principi dep ataydı. Atap aytqanda, Pauli principi atomlardaǵı elektronlıq qabıqlardıń toltırılıwınıń nızamlıǵın anıqlaydı.

Fermionlardıń bar bolıwınıń ózi bóleksheniń spininiń onıń qurawshılarınıń orbitalıq qozǵalıısına alıp kelinbeytuǵanlıǵın ańǵartadı. Spin materiyanıń negizgi hám házirgi kúnlerge shekem túsiniksiz bolǵan qásiyeti bolıp tabıladı. Gruppalar teoriyasınıń matematikalıq apparatınıń tiykarında spindi táriyiplew ishki simmetriya dep atalatuǵın teoriyalardıń prototipi bolıp tabıldı. Olardıń ishindegi eń ápiwayısı - izotoplıq spin teoriyası bolıp tabıladı. Fermionlar menen bozonlardı birlestiretuǵın simmetriyanıń sxemaların dóretiw supersimmetriyalı dep atalatuǵın baǵdardıń maqseti bolıp tabıladı. Bulardıń barlıǵı haqqında tómende gáp etiledi. Al házir bolsa fiziklerdiń elementar bóleksheler dep neni ataytuǵanlıǵın anıqlawdıń waqtı keldi.

Elementar bóleksheler

Ádette elementar bólekshe dep quramlıq bólekshelerge bóliwge bolmaytuǵın bólekshege aytadı. Bul anıqlamaǵa atomlar menen atom yadroları sáykes kelmeydi, biraq elektronlar, protonlar hám neytronlar sáykes keledi. Elektronlar atomlıq qatlamlardı, al protonlar menen neytronlar atomniń yadroların payda etedi. Proton menen neytronlardı ulıwma túrde nuklonlar dep ataydı.

Biz keyinirek nuklonlardıń elektronlarǵa salıstırǵanda elementar dep atawdıń nadanlıq penen koyılǵan kóz-qarasqa kemirek dárejede sáykes keletuǵanlıǵın kóremiz. Nuklonlar sezilerliktey ólshemlerge (shama menen 10^{-13} sm) hám quramalı bolǵan ishki strukturaǵa iye. Basqa kóp sandaǵı fizikalıq terminler sıyaqlı "elementar bóleksheler" terminin de sózbe-sóz qabıllawǵa bolmaydı. Bul termin bizge miyras túrinde qalǵan hám onnan táwir bolǵan termindi usı waqıtlarǵa shekem hesh kim oylap tapqan joq. Sonlıqtan "elementar bóleksheler" terminin biz paydalanıwdı dawam etemiz.

³ Spindi jiyirek S arqalı emes, al J arqalı belgileydi.

Jáne bir elementar keń tarqalğan hám jaqsı belgili bolğan bólekshe sıpatında jaqtılıqtıń bólekshe foton bolıp tabıladı. Oğan salıstırғanda az ғana kemlew tarqalğan, biraq ádewir kem belgili bolğan elektrlik jaqtan neytral bolğan neytrinolar dı atap ótiwge boladı. Olar elektronlar hám nuklonlar menen júdá ázzi tásirlesedi, sonlıqtan olardı baqlaw dım qıyın hám sonlıqtan olar zattıń oǵada qalıń bolğan qatlamları arqalı erkin óte aladı.

Neytrino ν , fotonlar γ , elektronlar e hám protonlar p - stabilli bóleksheler; olar pútkilley ıdıramaydı yamasa oǵada ástelik penen ıdıraydı (mısalı, eksperimentlerde elektronnıń jasaw waqtınıń eń tómengi shegarası 10^{22} jıl, al protonnıń jasaw waqtınıń tómengi shegarası 10^{30} jıl, bul shama Álemnıń ómiriniń uzınlıǵı 10^{10} jıldan ádewir úlken). Erkin neytron shama menen 10^3 sekundtıń ishinde ıdıraydı, biraq yadronıń ishindegi baylanısqa neytronlardıń stabilligi bolsa protonnıń stabilliginen kem emes (neytronnıń ıdırawınıń produktleri bolğan protonnıń, elektronnıń hám neytrinonıń onıń quramlıq bólimleri emes, al neytronnıń ıdıraw momentinde payda bolatuǵın bóleksheler ekenligin atap ótemiz. Tap usınday ǵáp basqa elementar bólekshelerdiń ıdırawı ushın da durıs).

Bul stabilli bólekshelerden basqa ómiriniń uzınlıǵı 10^{-6} dan 10^{-24} s intervalında bolğan bir neshe júzlegen stabilli emes bóleksheler de bar. Olardıń kópshiligi 10^{-20} s tan kem waqt jasaydı; olardı rezonanslar dep ataydı (basqa "uzaq waqt jasaytuǵın" bólekshelerdi rezonanslardan ayırıw ushın sol uzaq jasaytuǵın bólekshelerdi tek stabilli bóleksheler dep jiysi aytadı. Mısalı, elementar bólekshelerdiń "Review of Particle Properties" kestesinde haqıyqıy stabilli bolğan hám uzaq waqt jasaytuǵın kvazistabilli bóleksheler "Stabilli bóleksheler" dep atalatuǵın keste de biriktirilgen).

Elementar bólekshelerdiń hár qıylı bolıwına qaramastan olar ushın ulıwmalıq bolğan qásiyet minadan ibarat: usı elementar bólekshe bar bolğan waqtıń ishinde ol hesh qanday ózgeriske ushıramaydı, ózleriniń jeke basın saqlaydı.

Belgili bolğan mániste bul qásiyet bólekshelerge qalıplesken terminologiyaǵa baylanıslı beriledi. Mısalı, vodorod atomınıń qozǵan halı burınǵıday vodorod atomı bola beredi, al protonnıń qozǵan halı bolsa pútkilley basqa elementar bólekshe bolıp tabıladı.

Jetkilikli dárejede úlken energiyaǵa iye bolğan eki bólekshe soqlıǵısqa kóp sanlı jańa bóleksheler tuwıladı. Júzlegen bóleksheler payda bolatuǵın waqıyalar baqlandı. Biraq, payda bolğan bóleksheler soqlıǵısqa bólekshelerdiń sınıqları emes, al jańa tuwılǵan qaytadan tuwılǵan bóleksheler bolıp tabıladı. Tábiyat bólekshelerdi hár qıylı sharayatlarda "quyıp shıǵaradı", biraq usınday "quyıp shıǵarıwdıń" usılınan ǵárezsiz berilgen tiptegi barlıq bólekshelerdiń barlıǵı birdey boladı hám óziniń "ólimine" - óziniń ıdırawına shekem absolyut qartaymaydı. Elementar bóleksheniń "bir bólegin" sındırıp alıwǵa bolmaydı. Stabilli bolmaǵan bóleksheniń ıdırawınıń saldarınan jeńilirek bolğan elementar bóleksheler payda boladı, biraq ıdırawdıń bul ónimleri ıdıraǵan bóleksheniń quramlıq bólimi bolıp tabılmaydı. Olar ıdıraw momentinde payda boladı.

Tiykargı óz-ara tásirlesiwler

Elementar bóleksheler qatnasatuǵın processlerdiń sanı sheksiz kóp hám hár qıylı. Biraq, usı waqıtlarǵa shekem baqlanǵan usınday barlıq processlerdiń astında fundamentallıq óz-ara tásirlesiwdiń tek tórt tipi jasırınıp jatır: gravitaciyalıq, elektromagnitlik, ázzi hám kúshli.

Gravitaciyalıq tásirlesiw universallıq xarakterge iye: bunday tásirlesiwge barlıq elementar bóleksheler qatnasadı. Gravitaciyalıq maydanniń deregi tórt ólshemli energiya-impuls tenzori bolıp tabıladı. Statikalıq shekte (tınıshlıqtaǵı bóleksheler ushın) bul tenzordıń tek bir qurawshısı nolge teń emes (bárshe qabıl etken normirovka boyınsha bul qurawshı bóleksheniń massasına teń). Elektromagnit maydanniń deregi elektromagnit toqtıń tórt ólshemli vektori bolıp tabıladı. Statikalıq shekte bul vektordıń tek bir qurawshısı bolğan tınıshlıqtaǵı bólekshelerdiń elektr zaryadı nolge teń emes. Elektr zaryadına iye emes bolğan bóleksheler (mısalı neytron yamasa neytrino) elektromagnit maydanı menen tek óziniń quramalı strukturaǵa iye bolǵanlıǵı sebepli

yamasa kvantlıq effektlerdiń bar bolıwınıń saldarınan tásirlesedi. Bunday mániste elektromagnit tásirlesiw gravitaciyalıq tásirlesiw sıyaqlı ulıwmalıq emes. Belgili mániste bul ázzi tásirlesiwge de tiyisli. Al kúshli tásirlesiwge bolsa tek adronlar dep atalatuǵın bóleksheler ǵana qatnasadı. Atap aytqanda adronlar elementar bólekshelerdiń kópshilik bólegin quraydı. Proton menen neytronnan basqa adronlardıń semeystvosına uzaq waqıt jasaytuǵın da, rezonanslar bolıp tabılatuǵın da kóp sanlı mezonlar menen giperonlar kiredi.

Kúshli tásirlesiwge qatnaspaytuǵın altı fermion belgili. Olar leptonlar dep atalatuǵın bóleksheler bolıp tabıladı - elektron e , myuon μ , tau-lepton τ hám olarǵa sáykes keletuǵın neytrinolar ν_e , ν_μ , ν_τ .

Fizik-teoretikler gravitaciyalıq, elektromagnitlik, ázzi hám kúshli tásirlesiwden basqa óz-ara tásirlesiwdiń basqa da tipleriniń bar ekenligin boljaydı. Kóp sanlı eksperimentlerdiń ótkerilgen bolsa da basqa óz-ara tásirlesiwlerdiń kóriniwi usı waqıtlarǵa shekem tabılmadı. Usınday gipotezalıq tásirlesiwlerdiń ayırımları haqqında biz VI bapta gáp etemiz. Al, házirshe belgili bolǵan tásirlesiwler menen shuǵıllanamız.

II bap

GRAVITACIYA. ELEKTRODINAMIKA

Gravitaciya. Kvantliq elektrodinamika (KED). Feynman diagrammalariniñ tili. Vakuumnıñ polyarizaciyası**Gravitaciya**

Nyuton tárepinen bunnan úsh ásir burın dóretilgen gravitaciyalıq óz-ara tásirlesiwdiñ relyativistlik emes teoriiyası házirgi zamanlardagı túsinikler boyınsha eñ ertedegi fizikalıq teoriyalardıñ biri bolıp tabıladı. Massaları m_1 hám m_2 bolğan eki dene arasındagı universallıq alıstan tásirlesiw ondağı $-G_N m_1 m_2 / r$ potencialı menen táriyiplenedi. Bul ańlatpada G_N arqalı san shaması $G_N \approx 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ sm}^3 \text{g}^{-1} \text{c}^{-2}$ shamasına teń.

Gravitaciyanıñ relyativistlik teoriiyası — ulıwmalıq salıstırmalıq teoriiyası (UST) — Eynshteyn tárepinen óz-ara tásirlesiwdiñ lokallıq túrlendiriwler dep atalatuǵın túrlendiriwlerge qarata invariant bolıw talabı ideyasınıñ tiykarında dóretildi. UST jaǵdayında bul hár qıylı dúnyalıq noqatlarda hár qıylı bolatuǵın tórt ólshemli kooordinatalardıñ iqtıyarlı túrdegi túrlendiriwlerine qarata teńlemelerdiñ invariantlıǵına sáykes keledi. Eynshteyn ulıwma koordinatalıq invariantlıq principin bassılıqqa alıp UST daǵı háreketiñ túrin taptı.

UST óziniñ ishine nyutonlıq teoriyanı da qamtıp aldı hám jańa bir qatar áhmiyetli bolğan effektlerdi boljadı hám sanlıq jaqtan táriyipledi: jaqtılıqtıñ hám radiotolqınlardıñ nurınıñ (Quyashtıñ) gravitaciyalıq maydandagı burılıwın, Merkuriydiñ perigeliyiniñ precessiyasın, gravitaciyalıq tolqınlardı hám qara qurdımlardı. Álemniñ fridmanlıq keńeyiwini hám dáslepki Úlken partlanıwdı óz ishine alatuǵın házirgi zaman kosmologiyasındagı UST nıñ tutqan ornı ullı.

Tilekke qarsı, gravitaciyanıñ kvantlıq teoriiyası usı waqıtlarǵa shekem dóretilgen joq. Bul jaǵday tiykarınan eki sebep penen baylanıslı. Birinshi sebep ayırım elementar bóleksheler arasındagı gravitaciyalıq óz-ara tásirlesiwdiñ laboratoriyalıq sharayatlarda júdá kishi bolatuǵınlıǵı hám sonlıqtan házirgi zaman eksperimentallıq izertlewlerde bunday tásirlesiwdiñ sezilmeytuǵınlıǵı menen baylanıslı. Nyuton potencialınıñ 1 sm den kishi qashıqlılarda tekserilip kórmegenligin aytıwdıñ ózi jetkilikli. Gravitaciyalıq óz-ara tásirlesiwdiñ júdá ázzi bolğanlıǵı sebepli usı waqıtlarǵa shekem gravitaciyalıq tolqınlar tabılǵan joq⁴, al gravitaciyalıq maydannıñ ayırım kvantları bolğan gravitonlardıñ tabılıwı aldımızdagı ásirle de sheshilmeytuǵın máseledey bolıp kórinedi.

Gravitaciyanıñ kvantlıq teoriiyasınıñ usı kúnlerge shekem ashılmaǵanlıǵınıñ ekinshi sebebi onıñ belgili bolğan fizikalıq teoriyalardıñ ishindegi eñ quramalı teoriya ekenligi menen baylanıslı. Bul kvantlıq relyativistlik teoriyanıñ quramalılıǵınıñ usı teoriya tárepinen táriyiplenetuǵın bólekshelerdiñ spininiñ úlkeyiwi menen keskin túrde quramalasatuǵınlıǵı menen baylanıslı.

Gravitonniñ spininiñ 2 ge teń bolıwınıñ saldarınan gravitonlar menen almasıwdıñ saldarınan júzege keletuǵın gravitaciyalıq óz-ara tásirlesiw energiyanıñ ósiwi menen úlkeyedi hám $m_P c^2$ shamasındagı energiyalarda kúshli boladı. Bul ańlatpada m_P arqalı Plank massası dep atalatuǵın massa belgilengen:

$$m_P = \sqrt{\hbar c / G_N} \approx 1,22 \cdot 10^{19} \text{ GeV} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Eki yamasa onnan da kóp bolğan graviton almasıwdı esaplawǵa tırısıwlar mániske iye bolmaǵan sheksiz nátiyjelerge alıp keledi (tarqalıwshı integrallarǵa).

Juwmaqlap aytqanda, gravitaciyalıq tásirlesiwdiñ kvantlıq teoriyasın dúziwdiñ sáti túsken joq dep aytıwǵa boladı. Sebebi bul tásirlesiw júdá ázzi (biziñ alıwımız múmkin bolğan energiyalarda)

⁴ Gravitaciyalıq tolqınlar 2015-jılı sentyabr ayında eksperimentlerde ashıldı (Awdarıwshı).

hám júdá kúshli ($m_p c^2$ shaması menen barabar energiyalarda).

Al, Plank massasına keletúgın bolsaq (biz tómende kóremiz), onda onıń barlıq fundamentallıq fizikanıń masshtabın anıqlawı múmkin dep boljaymız.

Kvantlıq elektrodinamika (KED)

Elektr zaryadlarınń elektromagnit maydanı menen tásirlesiwı bolǵan elektromagnit tásirlesiw tábiyattıń basqa fundamentallıq kúshlerine salıstırǵanda ádewir jaqsı úyrenilgen. Sebebi elektromagnitlik tásirlesiw biziń átirapımızda júzege keletúgın derlik barlıq fizikalıq, ximiyalıq hám biologiyalıq processlerdiń tiykarında jatadı.

Elektronlar menen pozitronlardıń elektromagnit tásirlesiwın úyrenetuǵın kvantlıq elektrodinamika barlıq fizikalıq teoriyalardıń ishindegi eń dál teoriya bolıp tabıladı. Bul jaǵdayda elektromagnit tásirlesiw taza túrinde kórinedi. Kvantlıq elektrodinamikadaǵı oǵada joqarı dálilik uyıtqıw teoriyasınıń apparatın kishi bolǵan ólshem birlikke iye bolmaǵan $\alpha = e^2/4\pi\hbar c \approx 1/137$ parametri boyınsha paydalanıwǵa tiykarlanǵan. Bul ańlatpada e arqalı elektronnıń elektr zaryadı belgilengen. Elektronnıń magnit momentiniń mánisin esaplaw ádewir alǵa ilgerilegen, bunday esaplawlarda α , α^2 , α^3 hám α^4 tártiptegi aǵzalar esapqa alınǵan. Bul esaplawlardıń barlıǵınıń nátiyjeleri eksperimentlerde alınǵan nátiyjelerge joqarı dálilikte sáykes keledi. Mosentlerdiń eksperimentallıq hám teoriyalıq mánisleri bir birinen útirden keyingi toǵızınshı sanǵa shekemgi dálilikte sáykes keledi.

Elektronlar menen bir qatarda, kvantlıq elektrodinamika jáne zaryadlanǵan eki lepton bolǵan myuon (μ) menen tau bólekshesiniń (τ) elektromagnitlik qásiyetlerin oǵada jaqsı táriyipleydi. Al óz-ara tásirlesiwı tiykarınan kúshli tásirlesiw menen anıqlanatuǵın adronlardıń elektromagnitlik qásiyetlerin esaplaw ádewir qıyınshılıqtı payda etedi. Elektronlar menen μ myuonlardıń adronlar menen elektromagnit tásirlesiwın úyreniw boyınsha ótkerilgen eksperimentler adronlardıń ishki strukturasın úyreniw ushın paydalanıladı. Elektron-pozitronlıq kollayderlerde júzege keletúgın joqarı energiyalardaǵı hám úlken berilgen impulslerdegi tereń-serpimli emes dep atalatuǵın elektromagnit processler (misalı, e^+ penen e^- tiń adronlarǵa annigilyaciyasındaǵı) yamasa joqarı energiyalarǵa iye elektronlardıń yamasa myuonlardıń nuklonlar menen soqlıǵıswındaǵı adronlardıń kóplep tuwılıwı ayırıqsha qızıq.

Taza teoriyalıq planda kvantlıq elektrodinamikanıń tutqan ornın asıra bahalaw qıyın. Ol maydannıń kvantlıq teoriyasınıń eń ápiwayı hám eń jaqsı úyrenilgen úlgi bolıp tabıladı. Atap aytqanda, kvantlıq elektrodinamikanıń sheklerinde maydannıń kvantlıq teoriyasınıń fundamentallıq túsinipleri menen nızamlıqları qalıplesti hám ashıldı. Onıń úlgisinde hám oǵan uqsas túrde kúshli hám ázzi tásirlesiwlerdiń quramalıraq bolǵan teoriyaları hám ullı birigiw modeli dúziledi.

Kvantlıq elektrodinamikanıń tiykarları XX ásirdiń 20-jıllarınıń aqırında Dirak tárepinen qalandı. Óziniń házirgi zaman formasına 40- hám 50-jılları Feynmannıń, Shvingerdiń, Tomonaganıń, Daysonnıń hám basqalardıń jumıslarında iye boldı.

Kvantlıq elektrodinamika ózi menen birge birinshi antibóleksheni - pozitrondı alıp keldi. Kvantlıq elektrodinamikanıń sheklerinde birinshi ret bóleksheler menen kúshlerdiń quramalıraq bolǵan obǵektler bolǵan operatorlar menen táriyiplenetuǵın kvantlanǵan maydanlardıń kóriniwı bolıp tabılatuǵınlıǵı moyınlandı. Misalı, $A_\mu(x)$ operatori x noqatında elektromagnit maydannıń kvantın payda etedi yamasa joq etedi, al $\psi(x)$ operatori bolsa elektrondı joq etedi yamasa pozitrondı payda etedi. Bul operatorǵa túyinles bolǵan $\bar{\psi}(x)$ operatori pozitrondı joq etedi yamasa elektrondı payda etedi. Kvantlıq elektrodinamikanıń lagranjianı bul operatorlardıń lokallıq kóbeymesi bolıp tabıladı⁵:

⁵ "Lokallıq kóbeyme" terminini usı kóbeymege kiretuǵın operatorlardıń bir dúnyalıq noqatqa tiyisli

$$\mathcal{L}(x) = \bar{\psi}(x) \left[(i\partial_\mu + eA_\mu(x)) \gamma_\mu - m \right] \psi(x) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}(x) F_{\mu\nu}(x).$$

Bul ańlatpada $\partial_\mu = \partial/\partial x_\mu$ - x_μ koordinatası boyınsha dara tuwındı, $F_{\mu\nu}(x) = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ - elektromagnit maydanınıń kernewligi operatori, $-e, \mu$ - elektronnıń zaryadı menen massası, γ_μ - Diraktıń tórt matricası (qaytalanatuǵın indeks boyınsha summalaw júrgiziledi). Lagranjiandaǵı birinshi hám úshinshi qosılıwshı elektronlar menen pozitronlardıń erkin qozǵalıwın, al sońǵısı fotonlardı, $\bar{\psi}A\psi$ aǵza bolsa olardıń óz-ara tásirlesiwın táriyipleydi.

Eger

$$D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$$

túrinde jazılatuǵın kovariantlıq tuwındı (yamasa studentlerdiń gápi boyınsha "uzın tuwındı") dep atalatuǵın tuwındını kirgizetuǵın bolsaq, onda kvantlıq elektrodinamikanıń lagranjianı mınaday túrge iye boladı:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} [iD_\mu \gamma_\mu - m] \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}.$$

Solay etip, "qısqa" tuwındı ∂_μ menen 4-potencial A_μ lagranjianǵa D_μ hám $F_{\mu\nu}$ arqalı kiredi eken.

Kvantlıq elektrodinamikanıń lagranjianınıń tómendegidey kalibrovkalıq túrlendiriwlerge qarata invariant ekenligin ańsat tekserip kóriwge boladı:

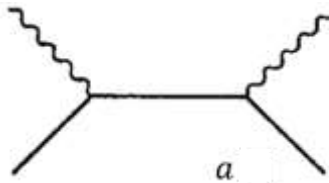
$$\begin{aligned} \psi(x) &= e^{i\alpha(x)} \psi(x), & \bar{\psi}(x) &= e^{i\alpha(x)} \bar{\psi}(x), \\ A_\mu(x) &= A_\mu(x) + (1/e) \partial_\mu \alpha(x). \end{aligned}$$

Kvantlıq elektrodinamikanıń bul kalibrovkalıq simmetriyası fotonnıń massaǵa iye bolmaytuǵınlıǵına juwapker.

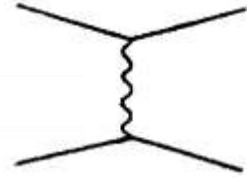
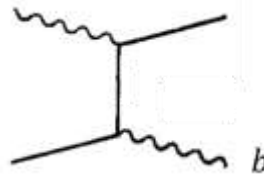
Kvantlıq elektrodinamikanıń kalibrovkalıq simmetriyası abelli dep ataladı. Sebebi bul jaǵdaydaǵı birinen soń biri islenetuǵın túrlendiriw bir biri menen kommutaciyanadı: nátiye onıń tártibinen gárezli emes. Tórende kórsetiletuǵın kúshli hám ázzi tásirlesiwlerde da biz kalibrovkalıq túrlendiriwler menen is alıp baramız. Biraq bul túrlendiriwler abellik bolıp tabılmaıdı hám bir biri menen kommutaciyanabıdı.

Feynman diagrammalarınıń tili

Kvantlıq elektrodinamikadaǵı qubılıslardı esaplaw hám sapalı túrde tallaw ushın Feynmannıń diagrammaları texnikası ayırıqsha qolaylı. Bul diagrammalar uyıtqıw teoriyasında anaw yamasa mınaw ayqın processtıń itimallıǵınıń amplitudasın esaplaw ushın algoritmdi beredi. Diagrammalardaǵı sızıqlar bólekshelerdiń qozǵalıwın, al tóbeler bolsa olardıń óz-ara tásirlesiwın súwretleydi. Mısalı, 1-súwrette keltirilgen diagramma fotonnıń elektrondaǵı shashırawın súwretleydi. Bul diagrammadaǵı tolqın tárizli sızıqlar fotonnıń, al tuwrı sızıq elektronnıń tarqalıwına saykes keledi. Ushlarınń biri erkin bolǵan sızıqlar soqlıǵısatuǵın hám onnan eki baǵıtta ushıp ketetuǵın erkin bólekshege saykes keledi. Eki tóbeni tutastıratuǵın sızıq virtualıq bólekshe dep atalatuǵın bólekshege saykes keledi. Onıń ushın $k^2 \neq m^2$ (bul teńsizlikte k arqalı bólekshelerdiń 4-impulsi, al m arqalı onıń massası belgilengen, Feynman tárepinen berilgen qaǵıydalar boyınsha hár bir tóbedegi tásirlesiw 4-impulstıń saqlanıwı menen júredi).



1-súwret.



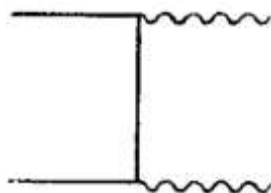
2-súwret.

Esaplawlarda hár bir virtuallıq bólekshege onıń tarqalıwın táriyipleytuǵın bir funkciya jazıladı hám bul funkciyanı propagator dep ataydı. Shın mánisinde diagrammalıq texnikanıń sheklerinde virtuallıq bóleksheleler virtuallıq emes bólekshelelerdiń bir biri menen tásir etisiwin támiyinleytuǵın kvantlıq kúsh maydanların táriyiplew ushın juwapker.

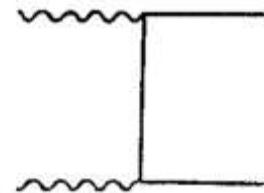
1-a súwrette virtuallıq foton ózi menen waqıtqa megzes bolǵan impulsti alıp júredi ($k^2 > m^2 > 0$). 1-b súwrette fotonnıń elektrondaǵı shashırawına úlesin qosatuǵın virtuallıq elektron keńislikke megzes bolǵan impulsti alıp júriwi múmkin ($k^2 < 0$). Eger komptonlıq shashırawda kúsh maydanı virtuallıq elektron menen táriyiplenetuǵın bolsa, onda elektronnıń elektrondaǵı shashırawı virtuallıq foton menen táriyiplenedi (2-súwret).

Feynman diagrammalarınıń zor qásiyeti mınadan ibarat: onıń sızıqları bir waqıtta hám bólekshelelerdiń (elektronlardıń) hám antibólekshelelerdiń (pozitronlardıń) tarqalıwın táriyipleydi. Bunday jaǵdayda pozitron waqıt boyınsha keri baǵıtta tarqalatuǵın bólekshe sıpatında interpretaciyalanadı (ádette diagrammadaǵı waqıttıń tili shep tárepten oń tárepke qaray baǵıtlanǵan dep túsiniledi).

3-súwrettegi diagramma elektron menen pozitronnıń eki fotonǵa annigilyaciyasın súwretleydi. Al 4-súwret keri processti - bir biri menen soqlıǵısatuǵın eki fotonnan elektronlıq-pozitronlıq juptıń tuwılıwın súwretleydi. 5-súwrettegi diagramma bolsa elektron menen pozitronnıń soqlıǵısıwınıń nátiyjesinde $\mu^+\mu^-$ jubınıń tuwılıwına sáykes keledi.

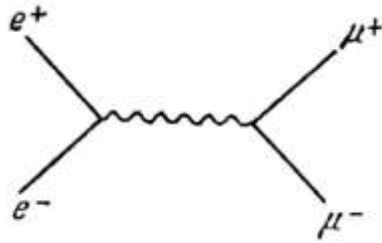


3-súwret.

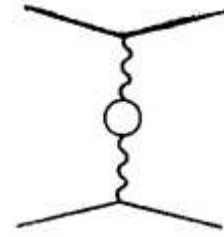


4-súwret.

Usı waqıtqa shekem biz tallaǵan diagrammalar aǵashtan islengen tiptegi dep atalatuǵın diagrammalardı kiredi. Bunday diagrammalarda virtuallıq bólekshelelerdiń 4-impulsiniń mánisleri haqıyqıy bólekshelelerdiń 4-impulsiniń mánisleri boyınsha bir mánisli túrde anıqlanadı. Bul diagrammalar olar tárepinen táriyiplenetuǵın hár bir process ushın virtuallıq bólekshelelerdiń minimallıq sanına juwap beredi. Bul óz gezeginde uytqıw teoriyasınıń elektromagnit tásirlesiw boyınsha tómengi tártibine sáykes keledi dep ayıladı. Elektrodinamikada elektr zaryadınıń shaması kishi parametr dep esplanadı hám onıń dárejeleri boyınsha (α nıń dárejeleri boyınsha) bir qatar uytqıw teoriyaları dóretiledi. Joqarıda esletilip ótilgenindey, aykın túrdegi esaplawlarda α^4 ke shekemgi aǵzalar esapqa alındı. Uytqıw teoriyasınıń joqarı tártiplerinde gúrmek tárizli diagrammalar dep atalatuǵın diagrammalar alınadı (mısal retinde 6-súwretke qarańız). Bunday diagrammalarda gúrmekti payda etetuǵın virtuallıq bólekshelelerdiń impulsleri belgilengen hám olar boyınsha integrallaw alıp barıladı. 6-súwrettegi gúrmek virtuallıq foton tárepinen tuwdırılǵan hám bunnan keyin virtuallıq fotonǵa annigilyaciyalanatuǵın elektron-pozitronlıq jup tárepinen payda etilgen. Fotonnıń tarqalıwındaǵı usınday virtuallıq juplardıń payda bolıwı vakuumnıń polarizaciyası dep ataladı.



5-súwret.



6-súwret.

Vakuumnıń polyarizaciyası

Kvantlıq elektrodinamikada vakuumnıń polyarizaciyası qubılısı vakuumluq pozitronlar tárepinen elektronnıń elektr zaryadınıń ekranlanıwına alıp keledi. Elektron vakuumdı polyarizaciyalap ózine virtuallıq pozitronlardı tartadı hám virtuallıq elektronlardı iyteredi. Eger elektrondı uzaqtan qarasa, onda onıń zaryadınıń bir bólimi ekranlangan bolıp shıǵadı. Virtuallıq juplardıń ishine tereńirek kirgen jaǵdayda ekranlaw kishireydi hám zaryadtıń baqlanatuǵın shaması ósedi. Solay etip, elektronnıń elektr zaryadı e qashıqlıqtıń funkciyası bolıp tabıladı: $e = e(r)$. Tap usınday sózler $\alpha(r)$ shamasına da tiyisli. Sonlıqtan usınday sebeplerge baylanıslı bul $\alpha(r)$ shamasın geyde "juwırıwshı konstanta" dep te ataydı. Kishi r qashıqlıqları beriletuǵın úlken q ($r \sim \hbar/q$) impulslerge juwap beretuǵın bolǵanlıqtan, ádette α shamasın q dıń funkciyası bolıp tabıladı dep aytadı. α nıń $\alpha \approx 1/137$ standart shaması salıstırmalı úlken qashıqlıqlarǵa hám berilgen kishi impulslerge tiyisli: $q \leq m_e c$. $q \gg m_e c$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵdaylarda $\alpha(q)$ shaması q dıń ósiwi menen logarifmlik nızam boyınsha ósedi.

Bizler keyinirek kúshli hám ázzi tásirlesiwlerdiń konstantalarınıń da "juwırıwshı" bolıp tabılatuǵınlıǵın kóremiz. Biraq olar elektromagnit konstantalarday bolıp q dıń ósiwi menen úlkeymeydi, al kishireydi. Bul "juwırıwdı" ekstrapolyaciyalap, bazı bir úlken impulste barlıq úsh tásirlesiwlerdiń zaryadlarınıń birdey bolatuǵınlıǵın kóriwge boladı. Atap aytqanda, tap usı jaǵday elektromagnit, ázzi hám kúshli tásirlesiwdiń ullı birigiw modelleriniń tiykarında jatadı (VI bapqa qarańız).

III bap KUSHLI TÁSIRLESIW

Adronlar hám kvarkler. Izotoplıq spin. $SU(2)$ gruppası. Strannie bóleksheler. $SU(3)$ -simmetriya. Gózzal kvark. b-kvark hám basqalar. Aromatlar hám áwladlar. Reń hám glyuonlar. Kvantlıq xromodinamika (KXD). Asimptotalıq erkinlik hám konfaynment. Kirallıq simmetriya. KXD rawajlanıw jolında.

Adronlar hám kvarkler

Adronlardıń leptonlardan ayırması, sonnan ibarat, olardı tek qosımsha eskertiwler beriwdiń járdeminde elementar bóleksheler dep atawǵa boladı. Kóp sanlı adronlardı quramlıq bóleklerge bóliwge bolmaytuǵın bolsa da, olardıń ishki strukturaǵa iye bolatuǵınlıǵı, olardıń kvarklardan turatuǵınlıǵı isenimli túrde tastıyqlanǵan. Bilimlerdiń házirgi zaman qáddinde leptonlar sıyaqlı kvarklar strukturaǵa iye emes, haqıyqıy elementar bóleksheler bolıp kórinedi. Sonlıqtan, geypara jaǵdaylarda leptonlar menen kvarklardı fundamentallıq bóleksheler dep ataydı.

Fizikanıń paradoksler menen bay bolǵan tariyxında kvarklardıń paradoksıq qásiyetleri hesh bir jaǵdayǵa teń kelmeydi. Eksperimentatorlar elementar bólekshelerdiń dástelerin paydalanıp adonlardıń ishindegi kvarklardı isenimli túrde kórdi, olardıń spinin, massaların hám elektr zaryadların ólshedi. Usınıń menen birge, eger házirgi zaman teoriyalıq kóz-qaraslar durıs bolatuǵın bolsa, onda hesh kimge adronnan kvarktı ayırıp alıwdıń sáti túspeydi. Kvarklardıń adronlardıń ishindegi usınday "tutqında" bolıwın ingliz tilindegi "konfaynment" sózi menen ataydı. Konfaynmenttiń mexanizminiń teoriyalıq kórinisin biz bir qansha waqıttan keyin tallaymız. Al házirshe kvarklardıń hár qıylı sortları menen jaqınnan tanısamız.

Kvarklardıń qásiyetlerin tallawdı relyativistlik emes kvarklik model tiykarında baslaǵan qolaylı. Bul model konstituentlik yamasa blokliq kvarklar dep atalatuǵın kvarklar menen is alıp baradı. Olardan adronlar quralǵan. Konstituentlik kvark quramalı obıekt bolıp tabıladı hám ol lagranjianǵa kiretuǵın "jalańash" kvarktay elektr zaryadına hám spinge iye (usınday lagranjlıq kvarklardı ádette toqlıq kvarklar dep ataydı). Blokliq kvarktıń quramalı strukturası kúshli tásir tárepinen payda etilgen virtuallıq bólekshelerdiń bultınıń esabınan toqlıq kvarktıń bazasında payda boladı. Nátiyjede blokliq kvarktıń massası toqlıq kvarktıń massasınan shama menen 300 MeV ke úlken boladı. Bunnan bılay kvarklardıń massası haqqında gáp etkenimizde toqlıq kvarklerdiń massasın názerde tutamız.

Protonlar menen neytronlar eń jeńil bolǵan u (ingliz tilindegi *up* sózinen) hám *d* (*down* sózinen) kvarkten turadı. Olardıń spini, basqa kvarklardıń spini sıyaqlı $\frac{1}{2}$ ne teń. u-kvarktıń zaryadı $+\frac{2}{3}$ ke, al d-kvarktıń zaryadı $-\frac{1}{3}$ ke teń. u-kvarktıń massası shama menen 5 MeV ke, al d-kvarktıń massası 7 MeV ke teń⁶. Proton eki u-kvarktan hám bir d-kvarktan turadı: $p=uud$. Neytron bolsa eki d-kvarktan hám bir u-kvarktan turadı: $n=ddu$.

Relyativistlik emes kvarklıq teoriyaǵa sáykes kvarklardıń orbitalıq múyeshlik momentleri nolge teń. Eki u-kvarktıń spinleriniń qosındısı 1 ge teń. Bul birlik protondaǵı d kvarktıń spini menen geometriyalıq jaqtan qosılıp proton ushın $\frac{1}{2}$ ge teń bolǵan spindi beredi. Tap usıǵan sáykes $u \leftrightarrow d$ almasıwı menen neytron qurılǵan.

Kublardan alınatuǵınday, tap sol kvarklardan basqa adronlardıń bir pútin seriyası dúzilgen. Misalı, úsh kvarktıń spinleri parallel bolsa, onda spini $\frac{3}{2}$ ge teń bolǵan Δ barionlardıń kvartetin payda etedi:

$$\Delta^{++} = uuu, \Delta^+ = uud, \Delta^0 = udd, \Delta^- = ddd.$$

⁶ Házirgi waqıtları u hám d kvarklardıń massaları ushın mınaday shamalar qabıl etilgen massalar: $m_u = 2,3 \text{ MeV}$, $m_d = 4,8 \text{ MeV}$ (Awdarıwshı).

Relyativistlik emes kvarklıq modelge sáýkes kvaklardıń orbitalıq momenti tek nuklonlarda ǵana nolge teń emes, al Δ -barionlarda da nolge teń. Dıqqatlı oqıwshı bul jaǵdaydıń Pauli principine qayshı keletuǵınlıǵın birden ańǵaradı: haqıyqatında da, birdey tiptegi eki hám hátte úsh kvark birdey kvantlıq halda jaylasqan. Keyinirek biz Pauli principiniń buzılmaytuǵınlıǵın kóremiz. Sebebi birdey tiptegi kvarklar usı kitaptıń betlerinde ele ushıraspaǵan kvant sanlarınıń mánisleri boyınsha ayrıladı. Bul kvant sanı reń bolıp tabıladı.

Δ -barionlar — barionlıq rezonanslardıń ishindegi eń jeńilleri. 10^{-23} s waqıttıń ishinde olar nuklonlarǵa hám π -mezonlarǵa ıdıraydı: $\Delta \rightarrow N\pi$. i - hám d -kvarklerden turatuǵın bir qansha awır bolǵan kóp sanlı rezonanslar belgili. Olarda kvarklar orbitalıq hám (yamasa) radiallıq qozıwlarǵa iye bolǵan hallarda turadı. Bunday ózgeshelikleri boyınsha rezonanslar atomlardıń qozǵan hallarına usaydı.

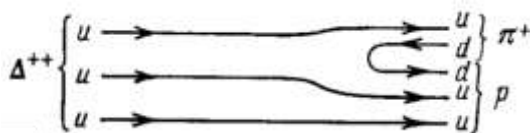
Solay etip, barionlar úsh kvarktan turadı eken. Adronlardıń basqa tipi bolǵan mezonlar kvark penen antikvarktan turadı. Mısalı mezonlardıń ishindegi eń jeńili bolǵan π -mezonlar tómendegidey strukturaǵa iye:

$$\pi^+ = u\bar{d}, \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d}), \pi^- = \bar{d}u.$$

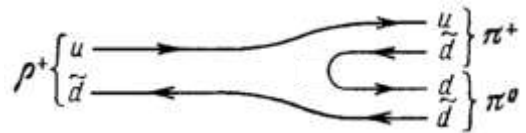
(π^0 mezondı payda etetuǵın hallardıń kvantlıq-mexanikalıq superpoziciyasındaǵı minus belgisiniń mánisi tómende anıqlanadı). π -mezondaǵı kvark penen antikvark nollik orbitalıq moment hám spinlerdiń qarama-qarsı baǵıtına iye halda turadı, sonlıqtan π -mezonnıń qosındı spini nolge teń).

Eger kvark penen antikvarktıń spinleri antiparallel bolsa, onda olar tap sonday nollik orbitalıq momentke iye halda turıp, spini birge teń bolǵan mezonlardı payda etedi: ρ^+, ρ^-, ρ^0 . Bul mezonlar rezonanslar bolıp tabıladı hám 10^{-23} s waqıttıń ishinde eki π -mezonǵa ıdıraydı: $\rho \rightarrow 2\pi$. Mezonlıq rezonanslardıń ishinde ρ -mezonlar eń jeńili bolıp tabıladı. Awır mezonlıq rezonanslardıń kóp sanı belgili. Olarda kvark-antikvark jubı qozǵan halda turadı.

Δ - hám ρ -rezonanslardıń ıdırawın tómendegidey kvarklik diagrammalardıń járdeminde illyustraciyalawǵa boladı. 7- hám 8-súwretlerde waqıtqa qarama-qarsı baǵıtlanǵan strelka antikvarkti súwretleydi.



7-súwret.



8-súwret.

Ádettegi feynmanlıq grafikler menen kvarklik diagrammalardıń ayırmasınıń bar ekenligin názerde tutıw kerek. Sebebi sheksizlikke erkin emes al adrona tutqınǵa alınǵan kvarklar ketedi. Usınıń menen birge, kvarklik diagrammalarda kvarklardıń arasındaǵı kúshli tásirlesiwdi ádette súwretlemeydi. Mısalı, kvarklıq diagrammalarda "shash qıstırǵısh" túrinde súwretlenetuǵın kvark + antikvark jubınıń tuwılıwına alıp keletuǵın tásirlesiwdi kórsetpeydi.

8-súwrette ρ -mezonnıń ıdırawına juwap beretuǵın eki kvarklik diagrammanıń biri bar. Ekinshi diagrammanı dúziwdi oqıwshınıń ózine usınıladı.

Izotoplıq spin. $SU(2)$ gruppası

u - hám d -kvarklarınıń massalarınıń ayırması usı kvarklardan turatuǵın adronlardıń massalarınıń ayırmasınan ádewir kishi. Sonlıqtan usı u - hám d -kvarklarınıń massaları bir birine teń degen jaqınlasıwdı paydalanǵan aqılǵa muwapıq keledi. Endi bir neshe betten keyin táriyplenetuǵın kúshli tásirlesiwdiń teoriyasında u - hám d -kvarkleriniń kúshli tásirlesiwi birdey. Eger u - hám d -kvarklarınıń massalarınıń ayırmasın hám olardıń elektr zaryadlarınıń hár qıylı ekenligin esapqa almasaq, onda kvarklıq lagranjian izotoplıq simmetriya dep atalatuǵın qosımsha

simmetriyağa iye boladı.

Izotoplıq simmetriyanıń sheklerinde u- hám d-kvarklardı izotoplıq keńislik dep atalatuǵın keńislikte spinordıń eki halı dep qaraydı (joqarǵı hám tómengi). u-kvark izotoplıq keńisliktegi bazı bir kósherge (bul kósherdi ádette z kósheri dep esaplaydı) túsirilgen shaması +1/2 ge teń izotoplıq spinniń proekciyasına, al d-kvark bolsa shaması -1/2 ge teń bolǵan izotoplıq spinniń proekciyasına juwap beredi. Lagranjian invariant bolıp qalatuǵın izotoplıq spinordıń túrlendiriwleri unitarlıq ($U^+U = 1$, bul teńlikte U^+ arqalı ermitlik-túyinles matrica, al 1 ólshemi 2×2 bolǵan birlik matrica) hám unimodulyar ($\det U = 1$) shártlerin qanaatlandıratuǵın ólshemi 2×2 ("ekige eki" dep oqıladı) bolǵan U kompleksli matricanıń járdeminde ámelge asırıladı. Bunday 2×2 matricalar SU(2) gruppasınıń ("es u eki" dep oqıladı) eń ápiwayı kórinisi bolıp tabıladı. Bul jerde S háribi túrlendiriwdiń arnawlı ekenligin (biz qarap atırǵan jaǵdayda - unimodulyarlıq), U háribi olardıń unitarlıq ekenligin, al 2 sanı gruppanıń eń ápiwayı bolǵan kórinisiniń eki qatarlı matricalar ekenligin bildiredi. Sonıń menen birge SU(2) gruppasınıń kórinisiniń keńisliginiń eki qurawshıǵa iye spinor ekenligin ańǵarıw kerek.

SU(2) gruppası menen onnan quramalı bolǵan SU(N) gruppaları ($N > 2$) elementar bóleksheler fizikasında áhmiyetli orındı iyeleydi. Sonlıqtan eki ólshemli U matricalarınıń qásiyetlerin kórip shıǵıwǵa toqtaw mániske iye boladı. SU(2) gruppasınıń quramalıraq bolǵan kórinisleri hám SU(2) gruppasına salıstırǵanda joqarıraq bolǵan gruppalar usı matricalar menen ulıwmalıq bolǵan kóp qásiyetlerge iye boladı. Ulıwma jaǵdayda eki ólshemli unitar unimodulyarlıq U matricası úsh haqıyqıy (zatlıq) α_k parametriniń ($k = 1, 2, 3$) járdeminde anıqlanadı hám olardıń bılayınsha jazılıwı múmkin:

$$U = e^{\frac{i\alpha_k\tau_k}{2}} = 1 + \frac{i\alpha_k\tau_k}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{i\alpha_k\tau_k}{2}\right)^2 + \dots$$

Bul ańlatpada k indeksi boyınsha summalaw ámelge asadı dep esaplanadı hám τ_k arqalı Paulidiń úsh matricası belgilengen:

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

$\tau_+ = 1/2(\tau_1 + i\tau_2)$ matricası onıń tómengi qurawshısın joqarǵı qurawshınıń ornına, al $\tau_- = 1/2(\tau_1 - i\tau_2)$ matricası joqarǵı qurawshınıń tómengi qurawshınıń ornına qoyadı. Al $\frac{1}{2}\tau_1$ matricası bolsa izotoplıq keńislikte izotoplıq spinniń z kósherine túsirilgen proekciyasınıń mánisin beredi.

Pauli matricaları bir biri menen kommutaciyanbaydı:

$$[\tau_i, \tau_k] \equiv \tau_i\tau_k - \tau_k\tau_i = 2\varepsilon_{iik}\tau_l \quad (i, k, l = 1, 2, 3).$$

Bul ańlatpada ε_{iik} tolıǵı menen asimmetriyalıq tenzor:

$$\varepsilon_{123} = \varepsilon_{321} = \varepsilon_{312} = 1; \quad \varepsilon_{213} = \varepsilon_{132} = \varepsilon_{321} = -1.$$

Eger ε_{iik} tenzorınıń qurawshılarınıń eń keminde ekewi birdey bolsa, onda olar nolge teń boladı.

Hár qıylı túrlendiriwleri bir biri menen kommutaciyanbaytuǵın gruppalar abellik emes gruppalar bolıp tabıladı. SU(2) gruppası abellik emes gruppalarardıń eń ápiwayısı bolıp tabıladı.

SU(2) gruppasınıń misalında jáne bir túsinikti anıqlaymız. Eger gruppanıń túrlendiriw parametrleri (biz qarap atırǵan jaǵdayda α_1, α_2 hám α_3) sanlar bolıp tabılatuǵın bolsa, onda simmetriyanı globalıq simmetriya dep ataydı. Eger olar keńisliklik-waqıtlıq koordinatalardıń funkciyaları bolatuǵın bolsa, onda simmetriyanı lokalıq dep ataydı. Biz baptır ekinshi yarımında u- hám d-kvarklardıń bir birine uqsaslıǵınıń saldarınan payda bolǵan simmetriyanıń globalıq bolatuǵınlıǵın kóremiz. Sonıń menen birge "reń" túsinigi menen baylanıslı bolǵan lokalıq simmetriyaǵa qızıqlı misaldı da kóremiz.

Aldırǵı betlerde keltirilgen matematikalıq anıqlamalar keyinirek paydalanıw ushın kerek. Olar usı kitapta hám elementar bóleksheler teoriiyası boyınsha kitaplarda ushırasatuǵın quramalı bolǵan fizikalıq simmetriyalardı tallaw ushın járdem beredi. Al, úsh kvarkten bariondı, al mezondı kvark penen antikvarktan "konstrukciyalaw" ǵa keletuǵın bolsaq, onda usınday "kvantlıq

konstruktor" menen oynaw h tte kishi klasslard n oqıwshılarınıń da qolınan keledi. Bul jaǵday izotoplıq simmetriyanıń bir qatar aspektlerine de tiyisli.

I izotoplıq spinge iye bolǵan ıqtıyarlı izotoplıq multiplet ushın multiplettegi b leksheler sanı n  piwayı formulanıń j rdeminde beriledi:

$$n = 2I + 1.$$

Eger izospinniń proekciyasınıń maksimallıq m nisiniń I ge, minimallıq m nisiniń $-I$ ge, al ΔI adımıń birge teń ekenligin esapqa alǵan jaǵdayda joqarıdaǵı formulanı alıw ańsat. Usı jaǵdayǵa baylanıslı nuklonnıń izospini $\frac{1}{2}$ ge, π -mezonlardıń izospini 1 ge, al Δ -izobarlar ushın izospin $3/2$ ge teń.

Kvarklar haqqında k z-qaraslarǵa tiykarlangan izotoplıq simmetriya haqqındaǵı biziń osherkimizde biz m seleniń tariyxı j ninde hesh n rseni aytpaǵanımızdı ańǵaramız. Tariyxıy jaqtan izotoplıq spin t sinigi fizikaǵa neytron ashılǵannan keyin XX  sirdiń 30-jılları Geyzenberg t repinen kirgizildi h m ol nuklonlar h m yadrolıq k shlerge baylanıslı paydalanıldı. K p uzamay bul t sinik sol waqıtları bar ekenligi YUkava t repinen bolǵan gipotezalıq bolǵan π -mezonlarǵa tarqatıldı. Haqıyqıy π -mezonlardıń h m Δ -izobarlardıń multipletleri shama menen 20 jıldan keyin ashıldı h m tek 1964-jılı ǵana kvarklardıń bar ekenligi haqqındaǵı gipoteza usınıldı. Bul gipotezaǵa jol ersi b leksheler dep atalatuǵın b lekshelerdiń q siyetlerin j ne $SU(3)$ simmetriyanı  yreniw alıp keldi.

Ersi b leksheler

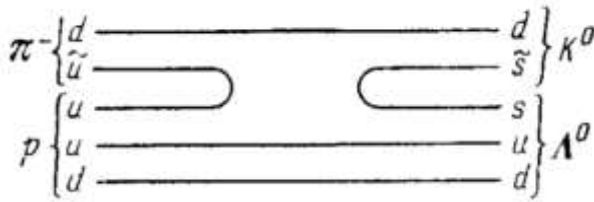
Ersi adronlardıń semeystvosı ersi emes adronlardıń semeystvosına salıstırǵanda k p sanlı. Olardıń yadrolıq fizikada nuklonlar menen π -mezonlarǵa salıstırǵanda ádewir kishi orındı iyeleytuǵınlıǵın ersi adronlardıń stabilli emes (olardıń arasındaǵı eń uzaq waqıt jasaytuǵını K_L^0 -mezon $5 \cdot 10^{-8}$ s jasaydı) h m salmaǵı  lken. Sonlıqtan olardıń tuwılıwı ushın energiyası jetkilikli d rejede joqarı bolǵan b lekshelerdiń soqlıǵısıwı kerek.

Birinshi ersi b leksheler XX  sirdiń 40-jılları kosmoslıq nurlarda ashıldı. 50-jılları bolsa usınday maqsetler ushın qurılǵan arnawlı tezletkishlerdiń j rdeminde olardı  ndiriw jolǵa qoyıldı. Olardıń q siyetlerindegi paradokslıq, ersilik usınday b lekshelerdiń j d  k p bolıp tuwılıwı tuwılatuǵında bolıp k rinetuǵınlıǵı (soqlıǵısıwshı adronlardıń energiyaları jetkilikli d rejede  lken bolǵanda), sonıń menen birge olardıń ersi emes adronlarǵa  zzi,  stelik penen ıdıraytuǵınlıǵı menen baylanıslı (bul jaǵdaydan olardıń "ersi" ataması payda boldı)⁷.

Bul paradokstıń sheshimi mınadan ibarat: ersi b leksheler k shli t sirlesiwdiń esabınan payda boladı, al olar birimlep  zzi t sirlesiwdiń esabınan ıdıraydı. B gingi k nler bul jaǵdaydıń hər bir ersi b leksheniń quramında eń keminde bir ersi kvarktıń (s-kvarktıń) bolatuǵınlıǵı menen baylanıslı ekenligin bilemiz. Ersi kvark d-kvark sıyaqlı $-1/3$ zaryadqa iye. Biraq onıń massası d-kvarktıń massasınan  dewir  lken: onıń massası shama menen 150 MeV ke teń⁸. s-kvarklardıń ıdırawı haqqında biz  zzi t sirlesiwlerge baǵıshlangan bapta aytamız. Al h zir ersi kvarklardıń k shli t sirlesiwı menen tanısamız. K shli t sirlesiwde kvark-antikvarktıń jubı $s + \bar{s}$ payda boladı.

⁷ Yadrolıq masshtabta 10^{-8} s j d   lken waqıt bolıp tabıladı. Sebebi k shli t sirlesiw ushın  zine t n waqıt 10^{-23} s. K_L^0 -mezonnıń əmiri shama menen 10^{16} yadrolıq kəndi quraydı. Bul shamanı t rtibi 10^{12} k n bolǵan jerdiń jası menen salıstırıńız.

⁸ H zirgi waqıtları qabıl etilgen m nisi 95 MeV (Awdarıwshı).



9-súwret.

9-súwrette $\pi^+ p \rightarrow K^0 \Lambda^0$ processiniń kvarklıq diagramması súwretlengen. Biz ersi bólekshelerdiń jubınıń tuwılıwınıń kvarklıq diagrammada s \bar{s} "shash ildirgishtiń" payda bolıwı menen baylanıslı ekenligin kóremiz. Bunday jaǵdayda shash ildirgishtiń bir (\bar{s}) usınıń K -mezongá, al ekinshi (s) usınıń Λ -giperongá tiyisli ekenligin kóremiz.

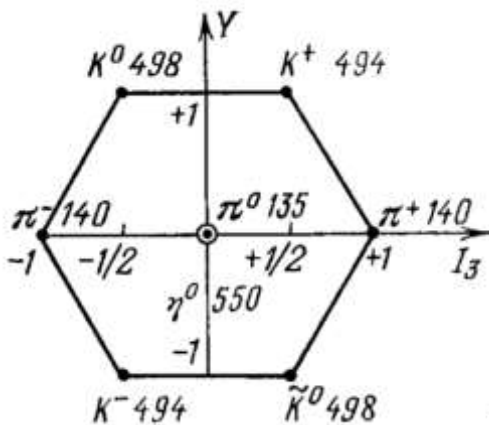
$SU(3)$ -simmetriya

K -mezon ersi mezonlardıń ishindegi eń jeńili bolıp tabıladı. Λ -giperon bolsa ersi barionlardıń ishindegi eń jeńili (ersi barionlardı giperonlar dep ataǵan). Ersi hám ersi emes adronlar ulıwmalıq semeystvonı payda etedi: mezonlardıń oktetleri menen singletleri, barionlardıń oktetleri menen deкупletleri. (singlet bir bóleksheden, oktet — 8, deкупlet — 10 bóleksheden turadı). Bul semeystvorlardıń strukturasını $SU(3)$ -simmetriyanıń járdeminde ańsat túsiniwge boladı. Kvarklik qáddide usı $SU(3)$ -simmetriya u -, d - hám s -kvarklardıń arasındaǵı simmetriyaǵa alıp kelinedi. Usınday $SU(3)$ -simmetriya izotoplıq $SU(2)$ -simmetriyanıń ulıwmalastırılıwı bolıp tabıladı.

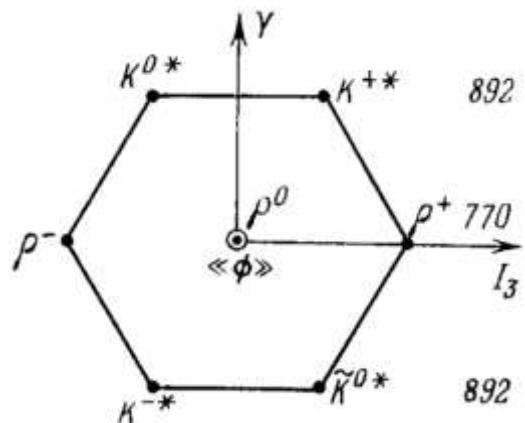
Ersi s -kvark ersi emes kvarklardan ádewir salmaqlı bolǵanlıqtan, $SU(3)$ -simmetriya tábiyatta $SU(2)$ -simmetriyaǵa salıstırǵanda kúshlirek buzılǵan:

$$m_s - m_u \approx m_s - m_d \gg m_d - m_u.$$

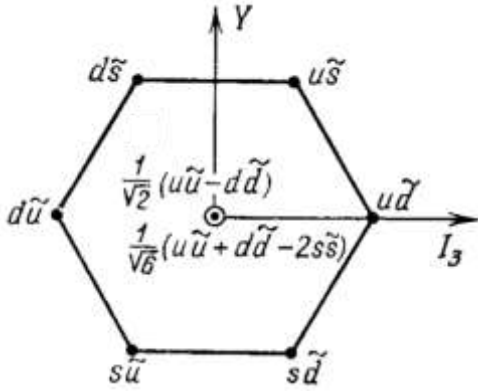
Bunıń nátiyjesi bir $SU(3)$ -multipletke kiretuǵın adronlardıń massalar boyınsha kúshli ajırılıwı bolıp tabıladı. Adronlardı úyreniw arqalı $SU(3)$ -simmetriyanıń bar ekenligin tabıw ańsat emes is boldı. Adronlardıń simmetriyalıq qásiyetlerin túsiniwge eń sheshiwshi úlesti Gell-Mann qostı. XX ásirdeń 50-jılları ol ersi bólekshelerge izotoplıq spin túsiniǵın tarqattı. Al 60-jıllardıń barısında ol mezonlar menen barionlardıń $SU(3)$ -simmetriyasınıń házirgi zaman formulirovkasını berdi hám 1964-jılı Gell-Mann kvarklar bar degen ideyanı usındı (Tap usınday jumıslardı onıń menen parallel sáykes Nishidjima, Neeman hám Cveyg tárepinen orınladı).



10-súwret.



11-súwret.



12-súwret.

$SU(3)$ -multipletlerdi $I_3 Y$ tegisliginde súwretlew qolaylı. Bul belgilewde I_3 arqalı izotoplıq spinniń úshinshi proekciyası, al Y arqalı giperzaryad belgilengen (anıqlaması boyınsha giperzaryad izotoplıq multiplettiń ekiletilgen ortasha zaryadına teń). 10-súwrette psevdoskalyar mezonlardıń oktetı súwretlengen ($J^P = 0^-$, bul teńlikte J arqalı bólekshelerdiń spini, al P arqalı olardıń juplıǵı belgilengen, juplıq haqqında tolıǵıraq ázzi tásirlesiwlerge arnalǵan bapta aytamız). 11-súwrette vektorlıq mezonlardıń ($J^P = 1^-$) súwretlengen. Bul $SU(3)$ -multipletlerdiń kvarklıq strukturası 12-súwrette berilgen.

Eger altı múyeshliktiń tóbelerinde jaylasqan bólekshelerdiń strukturası ayqın bolsa, onda orayda jaylasqan bólekshelerdiń strukturası túsiniq beriwdi talap etedi.

Barlıǵı bolıp úsh kvarktan hám úsh antikvarktan hár qıylı bolǵan toǵız kombinaciyanı dúziwge boladı. Olardıń úshewi haqıyqıy neytral: uu, dd, ss . Kúshli tásirlesiwdiń nátiyjesinde bul úsh kvark-antikvarklıq hallardıń bir birine ótiwi múmkin. Sonlıqtan, bul hallardıń úsh kvantlıq-mexanikalıq superpoziciyaları massalardıń belgili bolǵan mánislerine iye boladı. Eger $SU(3)$ -simmetriya qatań orınlanatuǵın bolǵanda, onda $SU(3)$ -invariantlıq superpoziciyanıń ajıralıwı orın alǵan bolar edi:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} (uu + dd + ss).$$

Psevdoskalyar mezonlar jaǵdayında ol $SU(3)$ -singletlik η -mezonǵa, al vektorlıq mezonlar jaǵdayında singletlik ω -mezonǵa juwap bergin bolar edi. Qalǵan eki superpoziciyalardıń birewi birge teń bolǵan izotoplıq simmetriyaǵa iye (bul psevdoskalyarlar ushın π^0 hám vektorlar ushın ρ^0):

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} + d\bar{d}).$$

(ol τ_3 matricasınıń járdeminde kvarklıq tolqınlıq funkciyalardan dúziledi). Eń aqırında, eń sońǵı superpoziciyada nollik izospin bar:

$$\frac{1}{\sqrt{6}} (u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}).$$

Onıń túri dáslepki eki superpoziciyanıń ortogonal bolıwı talabınan anıqlanadı. Ol psevdoskalyar ushın η -mezonǵa hám vektorlar ushın ϕ -mezonǵa juwap beredi. Usı barlıq úsh superpoziciyalardaǵı koefficientlerdiń kvantlıq-mexanikalıq hallardıń birge normirovkası boyınsha anıqlanatuǵınlıǵın ańǵaramız.

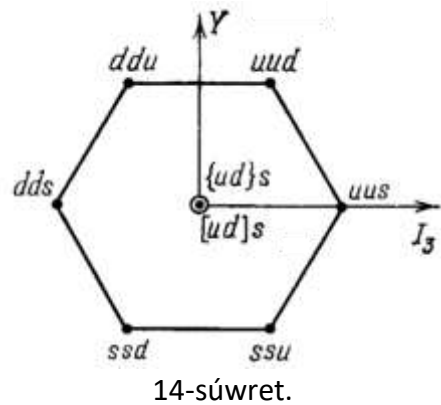
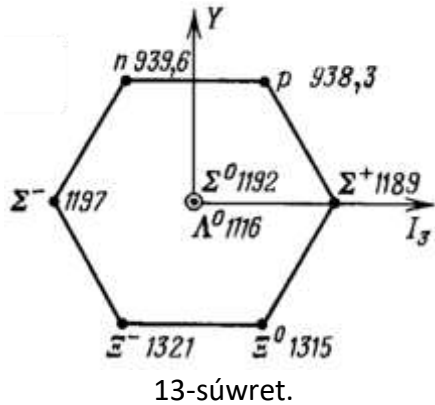
$SU(2)$ -simmetriya orın alǵan jaǵdaydaǵı Paulidiń úsh τ -matricasına sáykes $SU(3)$ -simmetriyada Gell-Mannıń segiz λ matricası áhmiyetli orındı iyeledi:

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \lambda_8 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}.$$

η -mezon menen λ_8 -matricanıń arasındaǵı kvarklıq struktura arasındaǵı baylanıstı ańǵarıw qıyın emes.



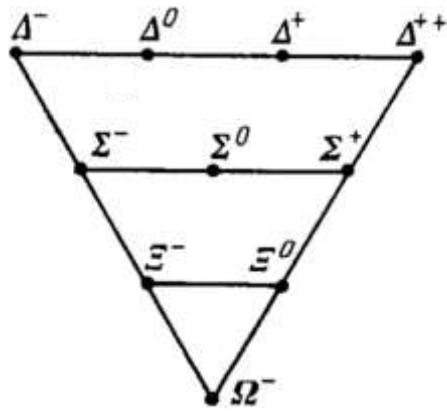
Tábiyatta $SU(3)$ -simmetriya buzılǵan bolǵanlıqtan $SU(3)$ -singletli mezonlar menen $SU(3)$ -oktetlerdiń segizinshi qurawshısı shalama-shekki aralasqan. Bul qubılıstı "miksing" dep ataydı. Vektorlıq mezonlar ushın aralasıw psevdoskalyarlar ushın aralasıwǵa salıstırǵanda ádewir kúshlirek. Aralasıwdıń saldarınan tómendegiler fizikalıq hallar bolıp tabıladı:

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} + d\bar{d}), m = 783 \text{ MeV},$$

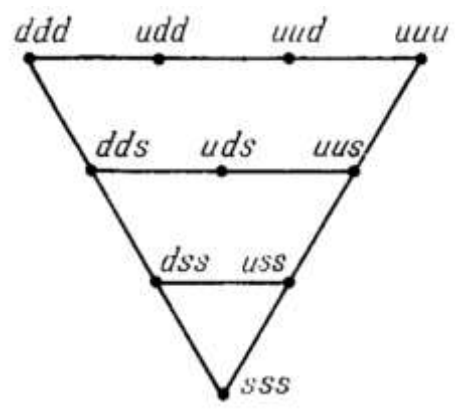
$$\phi \approx s\bar{s}, \quad m = 1020 \text{ MeV}.$$

13-súwrette $J^P = \frac{1}{2}^+$ barionlardıń oktetı súwretlengen. Ápiwayılastırılǵan túrde onıń kvarklıq strukturası 14-súwrette berilgen. Usı 14-súwrettiń orayında birge teń izospin $u \leftrightarrow d$ almasıwına qarata simmetriyalı bolǵan $\{ud\}s$ kombinaciyası Σ^0 -giperonın, al nolge teń bolǵan, $u \leftrightarrow d$ almasıwı boyınsha antisimmetriyalı $[ud]s$ kombinaciyası Λ^0 -giperondı táriyipleydi.

15- hám 16-súwretlerde bóleksheleriniń spini $J^P = 3/2^+$ shamasına teń barionlardıń deкупleti hám onıń kvarklıq strukturası kórsetilgen. Spini menen juplıǵı basqa bolǵan $SU(3)$ -multipletlerdiń bir qatarı belgili. Biraq, atap aytqanda, 10- hám 13-súwretlerde kórsetilgen oktetler adronlardıń $SU(3)$ -simmetriyanı hám kvarklıq strukturasın anıqlawshı sheshiwshi orındı iyeledi.



15-súwret.



16-súwret.

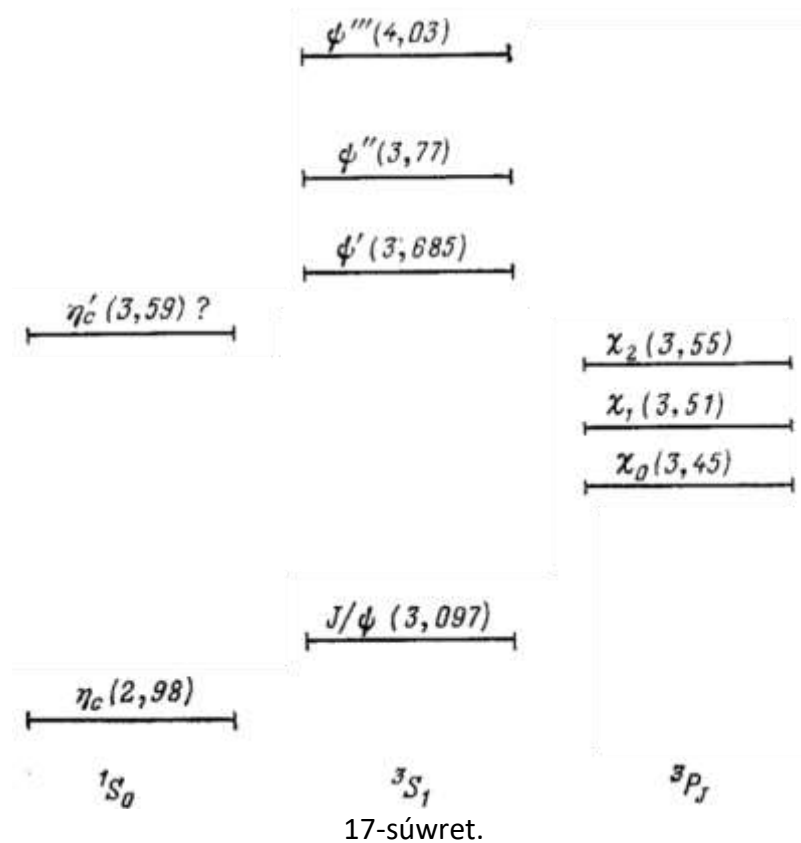
Súykimli (osharovanniy, charm) kvark

Rixter menen Tangtın toparları tárepinen ashılǵan óziniń quramında súykimli kvarklar dep atalatuǵın kvarklar bolǵan súykimli bólekshelerdiń ashılıwı adronlardıń kvarklik teoriyasınıń isenimli tastıyqlanıwı bolıp tabıladı. Bunday kvarklardı *c* arqalı belgileydi (ingliz tilindegi *charm* sózinen). 1974-jılı eń birinshi bolıp "jasırın súykimlilikke iye" hám 3S_1 haldaǵı $c\bar{c}$ jubınan turatuǵın J/ψ -mezon ashıldı.

Kóp uzamay sharmoniy dep atalatuǵın $c\bar{c}$ sistemasınıń basqa bir qatarı ashıldı. Házirgi waqıtları belgili bolǵan sharmoniydiń qáddileriniń sxeması 17-súwrette keltirilgen. Qáddilerdiń massaları GeV lerde berilgen. Vertikal boyınsha masshtab saqlanbaǵan. Shtrixlar menen belgilengen bóleksheler tómende jatqan hallardıń radiallıq qozıwı bolıp tabıladı. S-hal $c\bar{c}$ tiń nolge teń orbitalıq momentine, al P-hal birge teń orbitalıq momentke juwap beredi. Oń táreptegi tómengi indeks mezonniń spinin, al shep táreptegi joqarǵı indeks kvark penen antikvarktıń spinlik halın kórsetedi: 1 — singlet (spinlerdiń qosındısı nolge teń), 3 — triplet (spinlerdiń qosındısı birge teń).

Súykimlikke iye bolǵan jáne bir qatar bóleksheler ashıldı. Olar mezonlar $D^0[c\bar{u}]$ (1,865), $D^+[c\bar{d}]$ (1,869), $F^+[c\bar{s}]$ (1,97) hám $\Lambda_s^+[cdu]$ barion bolıp tabıladı. Bul jaǵdayda kvadrat qawsırmalarda kvarklıq quram, al ápiwayı qawsırmalarda GeV lerdegi bólekshelerdiń massaları belgilengen. Bul bólekshelerdiń qásiyetlerin úyreniw c-kvarktıń tek zaryadın emes, al massasını anıqlawǵa da múmkinshilik berdi. c-kvarktıń zaryadı $+2/3$ ge; onıń massası — shama menen 1,4 GeV ke teń⁹. Solay etip, c-kvark u-kvarktıń júdá awır bolǵan analogı bolıp tabıladı.

⁹ c-kvarktıń massası shama menen 1,28 GeV ke teń (Awdarıwshi).



b- kvark hám basqalar

1976-jılı Ledermannıń gruppası jańa bólekshe Υ -mezondı ("ipsilon" dep oqıladı) ashtı. Ol b-kvarklar dep atalatuǵın 5-sort kvarklardan turadı. b-kvarktıń zaryadı $-1/3$ ke teń bolıp shıqtı.

b-kvark d- hám s-kvarklardıń awır analogı bolıp tabıladı. Bunnan *bottom* ataması hám b hárıpi kelip shıqqan (bazı bir fizikler b hárıbin *beauty* - krasota, shıraylı sózine tiyisli dep esaplaydı).

b-kvark c-kvarkke salıstırǵanda ádewir salmaqılı: onıń massası shama menen 4,8 GeV ke teń¹⁰.

Massası 9,46 GeV bolǵan Υ -mezon $b\bar{b}$ jubınıń eń tómengi energiyalıq halı bolıp tabıladı. Usı waqıtlarǵa shekem bul sistemanıń úsh qozǵan 3S_1 qáddi tabıldı. Olardı geyde ipsiloniy, geyde bottoniy yamasa bottomoniy dep ataydı: $\Upsilon'(10,02)$, $\Upsilon''(10,40)$ hám $\Upsilon'''(10,55)$.

Usınıń menen birge ipsiloniydıń 2P-qáddi tabıldı. Sonıń menen birge bir b-kvarkqa iye bolǵan mezonlar da tabıldı: $B^0 = \bar{b}d$, $B^- = b\bar{u}$, $B^0 = b\bar{d}$. Bul mezonlardıń massaları mınaday $m_{\Upsilon''} < 2m_b < m_{\Upsilon'''}$ (dáliregi $m_b \approx 5,67$ GeV).

Solay etip, eksperimentlerde "tómengi tiptegi" d, s, b kvarklar hám "joqarı tiptegi" u, c kvarklardıń bar ekenligi tabıldı. Úshinshi "joqarǵı" kvarktıń bar ekenligi haqqında úlken tiykarǵa iye sebepler bar. Onı t-kvark dep ataydı (*top* sózinen). t-kvarklardı izlew usı waqıtlarǵa shekem tabıslı bolmadı¹¹. Hár bir dástesindegi energiya 18 GeV bolǵan bir birine qarama-qarsı elektronlıq-pozitronlıq PETRA dástesindegi "toponiydi" ($t\bar{t}$ -jubi) izlew islerine júdá úlken itibar berildi. Bul izlewler eger t-kvark haqıyqatında da bar bolsa, onda onıń massasınıń 18 GeV ten úlken bolıwınıń kerek ekenligin kórsetti¹². t-kvarkten awır bolǵan kvarklardıń bar ekenligi haqqında aytıwǵa tiykar

¹⁰ Házirgi maǵlıwmatlar boyınsha 4,18 GeV ke teń (Awdarıwshı).

¹¹ t-kvark 1994-1995 jılları (eksperimentler tiykarınan 1994-jılı ótkerildi) AQSh taǵı Tevatron kollaydarinde ótkerilgen eksperimentlerde ashıldı. Onıń massası $173,1 \pm 0,6$ GeV ke, al zaryadı $+2/3$ ke teń (Awdarıwshı).

¹² 2-basılıwǵa eskertiw. t-kvarklarǵa baylanıslı bolǵan situaciya radikallıq ózgerislerge ushıramadı. PETRA da t-kvarktıń massasınıń joqarǵı shegi 20 GeV ke shekem kóterildi. CERN degi proton-antineytronlıq

bolatuǵınday eksperimentallıq maǵlıwmatlar házirshe joq.

Aromatlar hám áwladlar

Hár qıylı tiptegi kvarklar bir birinen óziniń aromatları menen ayrıladı dep jıyı aytadı. Bul kvarklıq aromatlardıń bizge úyrenshikli bolǵan aromat haqqındaǵı túsinikke qatnası joq. Bul jerde "aromat" sózi kútilmegen orında qollanılǵanlıǵı sebepli qurǵaq fizikalıq tekstlerge jan beriw maqsetinde "tip" yamasa "sort" sózleriniń sinonimleri túrinde paydalanıladı. Kelesi paragrafta biz tallawǵa ótetuǵın "aromat" termini biziń "reń" terminine qarsı qoyıwımızǵa sáykes qolaylı.

Kórinip turǵanıday, hár qıylı aromatqa iye kvarklar menen leptonlardıń arasında qanday da bir tereń simmetriya bar. Usınday simmetriyanıń bar ekenligin tómendegi keste kórsetedi:

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ
u	c	t
d	s	b

Atap aytqanda, kvark-leptonlıq simmetriyanıń tiykarında 1964-jılı c kvarktıń bar ekenligi boljap ayılǵan edi (sol waqıtları 4 lepton menen 3 kvark belgili edi). 1975-jılı τ -lepton ashılǵannan keyin sol simmetriyanıń tiykarında b- hám t-kvarklardıń bar ekenligi boljandı.

Biz lepton-kvarklıq simmetriyanıń ásiresi ázzi tásirlesiwlerde ayqın kórinetuǵınlıǵın kóp uzamay kóremiz.

Álbette, bul simmetriya tolıq simmetriya bolıp tabılmaıdı: neytrino menen zaryadlangan leptonlardıń zaryadlarınıń ayırması joqarǵı hám tómengi kvarklardıń zaryadlarınıń ayırmasına teń bolsa da, leptonlar menen kvarklardıń ózleriniń zaryadları hár qıylı.

On eki lepton menen kvarklar tábiyiy túrde úsh gruppǵa yamasa, geypara jaǵdaylarda fundamentallıq fermionlardıń úsh áwladına bólinedi dep aytıladı. Hár bir áwlar tórt bólekshege iye hám olar sáykes kestede baǵananı iyeleydi: "joqarǵı" hám "tómengi" leptonlar hám "joqarǵı" hám "tómengi" kvarklar. Eń jeńil bóleksheler birinshi áwladtı payda etedi. Bunnan keyingi áwladlardıń barlıǵında zaryadlangan bóleksheler aldınǵı áwlad bólekshelerge salıstırǵanda salmaqlıraq.

Birinshi áwlad fermionlar fotonlar menen birge házirgi waqıtlardaǵı Álemdi quraytuǵın materiyanıń ózi bolıp tabıladı. u- hám d-kvarklardan nuklonlar, yaǵnıy atomlardıń yadroları quralǵan, al atomlıq qabıqlar elektronlardan turadı; elektronlıq neytrino bolmaǵan jaǵdayda Quyashtaǵı hám juldızlardaǵı yadrolıq sintez reakciyalrı júrmegen bolar edi. Al ekinshi hám úshinshi áwlad fermionlarǵa kelsek, onda házirgi waqıtlardaǵı dúnyadaǵı olardıń tutqan ornı joqtay hám birinshi ret qaraǵanda olarsız dúnya házirgi dúnyadan hesh bir jaman bolmaǵanday bolıp kórinedi. Bul bóleksheler Jaratıwshı sátsiz dep esaplap ılaqtırıp taslaǵan qopal eskizlerge hám biziń ózimizdiń quramalı texnikamızdıń járdeminde olardı musor taslaytuǵın ıdistan qazıp alǵanıımızǵa usaydı.

Házirgi waqıtları ekinshi hám úshinshi áwlad fermionlardıń eń ertedegi Álemde, Úlken partlanıw dep atalatuǵın partlanıwdıń eń dáslepki momentlerinde úlken áhmiyetke iye orındı iyelegenligin túsinе basladıq. Misalı, neytrinonıń sortlarınıń (aromatlarınıń) sanı Álemdegi vodorod penen geliydiń tarqalıwınıń qatnasın anıqladı. Kosmologiyalıq esaplawlar neytrinoliq aromatlardıń sanınıń tórtten kóp emes ekenligin kórsetedi. Lepton-kvarklıq áwladlardıń

kollayderde massası $m_t \approx 40 \text{ GeV}$ bolǵan t-kvarktıń tuwılǵanlıǵın kórsetetuǵın maǵlıwmatlar alındı. Biraq bul maǵlıwmatlardıń durıslıǵı tastıyıqlanǵan joq.

sxemasınıń sheklerinde bul kvarklik aromatlardıń sanınıń segizden kóp emes ekenligin ańǵartadı.

Kórinip turǵanıday, ekinshi hám úshinshi áwladlardıń tutqan ornınıń áhmiyeti birinshi áwlad bólekshelerdiń usı bóleksheler iye bolǵan massalardıǵa iye bolıwınan ibarat. Al u- hám d-kvarklardıń massaları menen elektronnıń massasınıń arasındadıǵı qatnastan biziń dúnyadaǵı bar bolıwımızdıń ózi ǵárezli. Sebebi, neytron menen protonnıń massalarınıń arasındadıǵı ayırma u - hám d -kvarklarınıń massalarınıń arasındadıǵı qatnastan kelip shıǵadı. Al, eger $m_p - m_n + m_e > 0$ teńsizligi orınlanganda vodorod ornıqlı (stabilli) bolmaǵan bolar edi.

Demek, biz joqarǵı áwladlardıń áhmiyetiniń kishi emes ekenligin túsine basladıq. Olardıń tutqan ornınıń jáne kvark-leptonlıq simmetriyanıń óziniń tábiyatınıń tereń áhmiyetin anıqlaw fizikanıń eń áhmiyetli máseleleriniń biri bolıp tabıladı. Usınday eskertiwler menen biz kvarklıq aromatlardı tallawdı juwmaqlaymız hám jańa tema bolǵan kvarklıq reńlerge ótemiz.

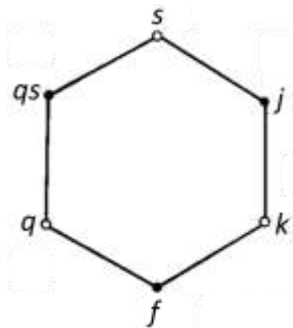
Reń hám glyuonlar

Usı waqıtqa shekem biz kvarklar arasındadıǵı kúshlerdiń qalayınsha dúzilgenligi haqqındadıǵı máseleden qashtıq. Endi bizge mınaday sorawlarǵa juwap beriwge waqıt keldi: 1) usınday kúshlerdiń deregi qanday zaryadlar bolıp tabıladı? 2) qanday bóleksheler olardıń alıp júriwshileri bolıp tabıladı? Bul sorawlarǵa beriletuǵın qısqasha juwaplar mınalardan ibarat: 1) reńli zaryadlar hám 2) glyuonlar.

Hár bir aromattıń kvarklarınıń úsh azǵınǵan túrleriniń bar ekenligi tabıldı. Bul túrler bir birinen reńi boyınsha ayrıladı dep aytıw qabil etilgen. Ádette kvarklardı úsh reńde boladı dep aytadı: sarı, kók hám qızıl. Álbette, bul kvarklardıń optikalıq reńlerge hesh qanday qatnası joq. Kvarklerdi qaraǵan jaǵdayda "reń" sol kvarklardı táriyipleytuǵın kvant sanların belgilew ushın qolaylı termin bolıp tabıladı. Kvarklardıń zaryadların belgiliw ushın tiykarǵı optikalıq reńler bolǵan sarı, kók hám qızıl reńlerdi saylap alıwdıń kórgizbeli optikalıq analogiyadan paydalanıwǵa múmkinshilik beretuǵınlıǵın biz házir kóremiz.

Antikvarklerdiń reńli zaryadları kvarklardıń zaryadlarına túyinles. Geyde olardı antisarı, antikók hám antiqızıl, al geyde optikalıq spektrdegi qosımsha reńlerdiń belgili bolǵan izbe-izligine sáykes fiolet, qızǵılt sarı (oranjeviy) hám jasil dep te ataydı (18-súwret) (belgili bolǵan mnemonikalıq frazanı eske túsirińiz: "Hár bir arńshı qırǵawıldıń qay jerde otırǵanın bilgendi jaqsı kóredi").

Kvarklıq reńlerdi usınday etip saylap alǵanda adronlardı tábiyiy túrde reńsiz, aq bóleksheler dep atawdıń múmkinshiligi tuwıladı. Barionlardıń reńi joq, sebebi olar bir birin tolıqtıratuǵın úsh reńnen turadı. Mezonlar kvarklar menen antikvarklardıń reńsiz superpoziciyaları bolıp tabıladı.



18-súwret.

Kvarklardıń reńlik azǵınıwı matematikalıq jaqtan reńli $SU(3)$ -simmetriyanıń bar ekenligin ańǵartadı: $SU(3)_e$ (e indeksi ingliz tilindegi *colour* — reń sózin ańǵartadı). Kvarklardıń reńli tripleti q^α ($\alpha = 1, 2, 3$) $SU(3)$ gruppasınıń fundamentallıq kórinisi dep atalatuǵın kórinis boyınsha, al antikvarklardıń \bar{q}_α tripleti túyinles kórinis boyınsha túrlenedi (antitripleti). Mezonlar (M) hám

barionlar (B) $SU(3)_c$ - singletler bolıp tabıladı:

$$M = \frac{1}{\sqrt{3}} \tilde{q}_\alpha q^\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} (\tilde{q}_1 q^1 + \tilde{q}_2 q^2 + \tilde{q}_3 q^3),$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{6}} q^\alpha q^\beta q^\gamma \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}.$$

Bul ańlatpada $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ - tolıǵı menen asimmetriyalıq tenzor. Bunday tenzor menen biz Pauli matricaların qásiyetlerin tallaǵanda tanıstıq. Tap usı sebepten baylanıslı bariondaǵı úsh kvark reń boyınsha antimimetrizaciyanıń saldarınan Pauli principin buzbaydı hám usı ózgesheligi boyınsha ádettegi barionlarday boladı.

Elektr zaryadları elektromagnitlik tásirlesiwde qanday orındı tutatuǵın bolsa, kúshli tásirlesiwde reńli zaryadlar sonday orındı iyeleydi. Bunday jaǵdayda fotonlardıń ornın glyuonlar dep atalatuǵın (ingliz tilindegi glue - jelim) vektorlıq bóleksheler iyeleydi. Glyuonlar menen almasıw arqalı kvarklar bir birine "jelimlenedi" hám adronlardı payda etedi.

Glyuonlardıń fotonlardan tiykarǵı ayırması fotonnıń birew hám onıń elektrlik jaqtan neytrallıǵınan ibarat. Al glyuonlar bolsa segiz hám olar reńli zaryadlarǵa iye. Usınday reńli zaryadlarınń bolıwınń saldarınan olar bir biri menen kúshli tásirlesedi. Usınday sıızqlı emes óz-ara tásirlesiwdiń saldarınan glyuonlardıń vakuumdıǵı tarqalıwınń fotonlardıń tarqalıwına, al reńli kúshlerdiń elektromagnit kúshlerge pútkilley usamaytuǵın bolıp shıǵadı.

Kvantlıq xromodinamika (KXD)

Kvarklar menen glyuonlardıń óz-ara tásirlesiwiniń teoriiyası kvantlıq xromodinamika (grek tilindegi "xromos" - reń mánisin beredi) dep ataladı. Kvantlıq xromodinamikanıń tiykarında mınaday postulat jatadı: reńli $SU(3)$ - simmetriya lokallıq, kalibrovkalıq bolıp tabıladı¹³.

Lokallıq invariantlıq talabı ózine tán bolǵan bir biri menen tásirlesiwge iye bolǵan glyuonlıq maydanlardıń oktetiniń bar bolıwına alıp keledi. Solay etip, simmetriya talabı kúshli tásirlesiwdiń barlıq dinamikasın anıqlaydı. Usınday kóz-qarasta $SU(3)_c$ reńli simmetriyasınıń fizikalıq mánisi $SU(3)_f$ globalıq aromatlıq simmetriyaǵa salıstırǵanda ádewir tereń (f indeksi ingliz tilindegi *flavour* — aromat sózinen alınǵan). Bul $SU(3)_f$ - simmetriya u -, d - s -kvarklardıń juwıq túrde azǵınǵan ekenligi menen baylanıslı payda boldı.

Kvantlıq xromodinamikanıń lagranjianı kvantlıq elektrodinamikanıń lagranjianına júdá usaydı (III bapqa qarańız). Ayırma mınalardan ibarat: elektromagnit tásirlesiwdiń konstantası bolǵan elektr zaryadı e niń ornına kúshli tásirlesiwdiń konstantası g kiredi. Onıń sebebi elektronlıq spinordıń ornına summalaw ámelge asırılatuǵın reńli indeksler kiretuǵınlıǵı hám lagranjianǵa kiretuǵın glyuonlıq vektorlıq potencial A_μ nıń fotonlıq potencialdan ayırmasıń reńli keńislikte mınaday matrica menen beriletuǵınlıǵı menen baylanıslı:

$$A_\mu = A_\mu^i \lambda_i / 2, \quad i = 1, 2, \dots, 8.$$

¹³ Túrlendiriwlerdiń parametrleri sáykes dinamikalıq ózgeriwshi berilgen keńislik-waqıttıń noqatınan ǵárezli bolǵan jaǵdaydaǵı fizikalıq sistemanı táriyipleytuǵın ózgeriwshilerdiń ústinen islengen túrlendiriwlerge qarata invariantlıǵı lokallıq simmetriya dep ataladı. Maydanlar teoriiyasında lokallıq simmetriya ádette kalibrovkalıq maydanlar kirgizilgen jaǵdayda júzege keledi. Lokallıq simmetriya talabı fizikalıq sistemadaǵı óz-ara tásirlesiwdiń xarakterin keskin túrde belgileydi, biraq lokallıq simmetriya qanday da bir saqlanıw nızamı menen baylanıslı emes. Lokallıq simmetriyaǵa misallar: kvantlıq elektrodinamikaǵı kalibrovkalıq invariantlıq, ulıwmalıq salıstırmalıq teoriiyasındaǵı Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariantlıq, kvantlıq elektrodinamikaǵı reńli $SU(3)$ - simmetriya.

Eger teoriyanıń lagranjianı (yamasa, dáliregi - háreket) qanday da bir lokallıq túrlendiriwge qarata invariant bolatuǵın bolsa, onda bul túrlendiriwdi teoriyanıń kalibrovkalıq simmetriyası dep ataydı. Kalibrovkalıq simmetriyalar keńislik-waqıttıń hár bir noqatında gruppanı payda etedi (Awdarıwshi).

Bul ańlatpada A_μ - segiz glyuonlıq maydannıń vektorlıq potencialları, λ_i - Gell-Mannıń segiz matricası. Bunday jaǵdayda kvantlıq xromodinamikanıń kovariantlıq tuwındısı (endi ol da matrica) mınaday túrge iye:

$$D_\mu = d_\mu - igA_\mu.$$

Glyuonlıq maydannıń kernewliginiń matricası mınaday túrge iye:

$$F_{\mu\nu} = F_{\mu\nu}^i \lambda_i / 2.$$

Glyuonlar ushın maydannıń $F_{\mu\nu}$ kernewligi fotonlar bolǵan jaǵdayǵa salıstırǵanda A_μ arqalı quramalı baylanısqa:

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ig[A_\mu A_\nu - A_\nu A_\mu].$$

Bul ańlatpada g arqalı kúshli tásirlesiwdiń konstantası belgilengen. Fotonlar ushın A_μ matrica emes, al san hám $F_{\mu\nu}$ ushın jazılǵan ańlatpadaǵı kommutator nolge aylanadı. Abellik emes kalibrovkalıq maydanlarda bolsa (glyuonlar sonday bolıp tabıladı), bul kommutator nolge teń emes. Atap aytqanda ol glyuonlardıń sıızıqlı emes ózine tásir etiwiniń xarakterin hám glyuonlıq kúshlerdiń ózine tán ózgesheliklerin anıqlaydı.

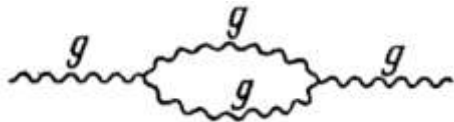
Ulıwma aytqanda kvantlıq xromodinamikanıń lagranjianınıń hám dara jaǵdayda $F_{\mu\nu}$ tenzorınıń usınday túri lagranjiannıń

$$q \rightarrow Sq, \bar{q} \rightarrow \bar{q}S^+, A_\mu \rightarrow SA_\mu S^+ - \frac{i}{g}(\partial_\mu S)S^+$$

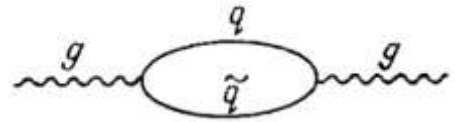
kalibrovkalıq túrlendiriwlerge qarata invariantlıǵınan kelip shıǵadı. Bul ańlatpalarda $S = \exp[i\alpha_i(x)\lambda_i/2]$, al α_i - dúnyalıq x noqatınan ǵárezli bolǵan segiz parametr.

Asimptotalıq erkinlik hám konfaynment

Eger glyuon tárepinen glyuonlıq vakuumnıń polarizaciyasına glyuonlardıń sıızıqlı bolmaǵan úlesin esapqa alatuǵın bolsaq (19-súwret), onda bul polarizacianıń (glyuonnıń kvarklıq vakuumdı polarizaciyalawınan ózgesheligi, 20-súwret) reńli zaryadtır ekranlanıwına emes, al antiekranlıwına alıp keletuǵınlıǵın kóriwge boladı. Glyuonnıń reńli zaryadı kvarktıń reńli zaryadınan úlken, sonıń menen birge glyuonlardıń sanı segiz bolǵanlıqtan glyuonlardıń antiekranlıw tásiriniń berilgen aromattır kvark-antikvarklıq jubınıń ekranlaw tásirinen ádewir úlken bolatuǵınlıǵın tań qalarlıq emes. Esaplawlar artıq bolıwdıń 33/2 shamasına teń koefficient penen ańlatılatuǵınlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan glyuonlıq antiekranirovkanı joq qılıw ushın kvarklardıń 17 aromattır bolıwı kerek. Kvarktı qorshap turǵan glyuonlıq bultqa tereń kirgen sayın sol kvarktıń reńli zaryadı kemeyedi. Bul kvarklardıń arasındaqı qashıqlıq sheksiz kishireygende olardıń arasındaqı reńli óz-ara tásirlesiwdiń pútkilley joq bolatuǵınlıǵın ańǵartadı. Bul qubılıs asimptotalıq erkinlik atamasına iye boldı.



19-súwret.



20-súwret.

Kishi qashıqlıqlarda kvarklar derlik erkin: olardıń arasında kulonlıq tiptegi α_s/r reńli potencial háreket etedi. Bul ańlatpadaǵı juwırıwshı $\alpha_s = g^2(r)/4\pi$ potencialı r qashıqlıǵınıń kemeyiwi yamasa berilgen q impulsiniń úlkeyiwi menen logarifmlik nızam boyınsha kishireyedi. q dıń jetkiliklik úlken mánislerinde

$$\alpha_s(q) \approx \frac{2\pi}{b \ln(q/\Lambda)}$$

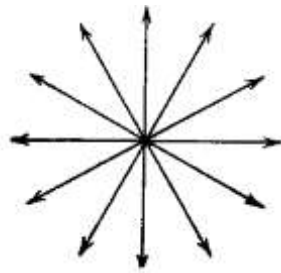
ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpadaǵı ólshem birligine iye bolmaǵan b koefficientiniń mánisi

19- hám 20-súwretlerdegi diagrammalardı teoriyalıq esaplawdıń járdeminde anıqlanadı. $b = 11 - \frac{2}{3}n_f$. Bul ańlatpada n_f - kvarklıq aromatlardıń sanı (eger $n_f = 6$ bolsa, onda $b = 7$ mánisin alamız).

Impulstıń ólshem birligine iye bolǵan Λ konstantası bolsa eksperimentallıq maǵlıwmatlardıń tiykarında alınadı (awır kvarkoniylerdiń qáddileriniń keńligi hám massası, joqarı energiyalardıǵı e^+e^- -annigiyaciyasında payda bolatuǵın adronlıq aǵıstıń qásiyetleri, tereń-serpimli emes shashırawdıń kese-kesimi haqqındaǵı maǵlıwmatlar boyınsha) hám onıń mánisi 0,1 GeV shamasında boladı. Λ konstantası (geypara jaǵdaylarda onı Λ_{QCD} dep te ataydı) kvantlıq xromodinamikada fundamentallıq orındı iyeleydi.

Asimptotalıq erkinliktiń keri tárepi kvarklardıń arasındaǵı qashıqlıqtıń úlkeyiw barısında reńli zaryadlardıń úlkeyiwı bolıp tabıladı. $r \sim 1/\Lambda \sim 10^{-13}$ sm qashıqlıqta reńli tásirlesiw haqıyqıy kúshli boladı. Bul oblastta uyıtqıw teoriyası islemeydi hám isenimli túrdegi esaplawlar joq. Biraq, usınday jaǵday orın alǵan bolsa da, qashıqlıqtıń úlkeyiwı menen óz-ara tásirlesiwdiń kúsheyiwiniń kvarklardıń "tutqınǵa alınıwına" alıp keletuǵınlıǵın hám izolyaciyalangán kvarklardı úlken aralıqlarǵa ayırıp jiberiwge bolmaytuǵınlıǵın kútiwge boladı.

Biz kútip atırǵan konfaynment kartinasınıń neden ibarat ekenligin ayqınlastırıw ushın jeńil kvarklar pútkilley bolmaytuǵın dúnyanı oylap tabayıq. Awır kvarktı hám awır antikvarktı qaraymız ($m \gg \Lambda$). Kishi qashıqlılarda ($r \ll 1/\Lambda$) olardıń arasındaǵı reńli potencial Kulon potencialın eske túsiredi ($\sim 1/r$), al kúshler bolsa $\sim 1/r^2$ nızamı boyınsha kemeyedi. Bul nızam reńli kúshlerdiń zaryadtan izotrop túrde tarqalatuǵınlıǵına juwap beredi, sebebi bettiń bir birliǵi arqalı ótetuǵın aǵıstıń shaması bettiń maydanına kerip proporcional kemeyedi (21-súwret). Kvarklardıń arasındaǵı qashıqlıq úlken bolǵan jaǵdayda ($r \gg 1/\Lambda$) glyuonlardıń bir biri menen kúshli sızıqlı emes tásirlesiwinen kúsh sızıqları qorshaǵan vakuum tárepinen radiusı $\sim 1/\Lambda$ shamasına teń nayǵa qısıladı. Nátiyjede ádettegi svetovodtı eske túsiretuǵın "glyuonovod" alınadı (22-súwret). Bunday jaǵdayda kvarklardıń arasındaǵı tásirlesiw kúshleriniń shaması olardıń arasındaǵı qashıqlıqtan ǵárezli bolmaydı, al potencial bolsa usı qashıqlıqqa proporcional. Usınıń saldarınan reńli potencial sharsharǵa usaǵan túrge iye boladı (23-súwret).

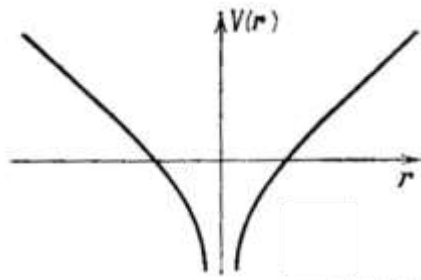


21-súwret.



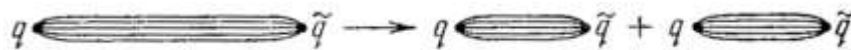
22-súwret.

Sharshar tipindegi fenomenologiyalıq potencial tiykarında sharmoniy hám ipsiloniydiń qáddileri ushın orınlangán esaplawlardıń nátiyjeleri eksperimentallıq maǵlıwmatlarǵa jaqsı sáykes keledi. Biraq, elege shekem kvantlıq xromodinamikanıń lagranjianınan kelip shıǵatuǵın teńlemenıń sheshimine tiykarlangán glyuonlıq sabaqtıń analitikalıq teoriyasın dúziwdiń sáti túspedi.



23-súwret.

Usınday sabaqtıń bar ekenligin júdá quwatlı kompyuterlerde orınlangan esaplawlar kórsetedi. Bunday jaǵdaylarda keńisliklik-waqıtlıq kontinuumnan túyinleriniń sanı shekli bolǵan tórt ólshemli pánjerege ótkende kvantlıq xromodinamikanıń teńlemeleri biraz ápiwayılasadı (10^4 ke shekem).



24-súwret.

Principinde awır kvark penen antikvarktıń arasındaǵı glyuonlıq sabaqtıń uzınlıǵınıń sheksizlikke shekem óse aladı. Bunday jaǵdayda kvarklardı bir birine ayırıw ushın kerek bolatuǵın energıyanıń shaması sabaqtıń massasına aylanǵan bolar edi. Biraq, jeńil kvarklar bar bolǵan haqıyqıy dúnyada ($m \ll \Lambda$) bunday jaǵday orın almaydı. Sabaq jańa mezonlar bolıp tabılatuǵın, ólshemleri $1/\Lambda \sim 10^{-13}$ sm bolǵan bóleklerge bólinedi. Úziliw júzege keletuǵın ornında jeńil kvark-antikvark júbı payda boladı (24-súwret).

Mezondı kvark-antikvarkqa "bóliwge" tırısw magnit strelkasın arqa hám túslik polyuslarǵa bóliwge tırıswday boladı. Magnit strelkasın ekige bólgen jaǵdayda da qolda eki dipol qaladı.

Kirallıq simmetriya

Kvarklar qalıń glyuonlıq hám kvark-antikvarklıq bultlar menen qorshalǵan bolǵanlıqtan kvarktıń massası haqqında usı massanıń qanday qashıqlıqta ólshengenin aytpay turıp hesh nársе aytıwǵa bolmaydı. Bul qashıqlıqlar qanshama kishi bolsa, massa da kishi boladı. Biz joqarıda keltirgen sanlar 10^{-14} sm shamasındaǵı qashıqlıqqa tiyisli. Asimptotalıq erkinlikke baylanıslı bunday qashıqlıqta bult siyrekseydi. Awır glyuonlıq bultqa iye bolmaǵan usınday "yarım jalańash" kvarklardı ádette toqlıq kvarklar dep ataydı. Glyuonlar menen tolıq oralǵan kvarklardı bolsa bloklıq yamasa konstituentlik dep ataydı. Nuklonlardıń massası relyativistlik emes úsh konstituentlik kvarktıń massasınan qosıladı dep boljap, u- hám d-kvarklardıń glyuonlıq postınlarınıń massası shama menen 300 MeV ke teń degen juwmaqqa kelemiz.

Jeńil kvarklardıń toqlıq massaları nolge teń bolǵan oylap tabılǵan dúnyanı qaraw júdá qızıq. u- hám d-kvarklar ushın olardıń $m_u \sim 5$ MeV hám $m_d \sim 5$ MeV bolǵan toqlıq massaları ushın usınday massasız jaǵday haqıyqıy dúnyǵa jaqın dep kútiwge boladı. Haqıyqatında da teoriyalıq tallaw bunday jaǵdayda barlıq barionlar menen derlik barlıq mezonlardıń massalarınıń ózgermeytuǵınlıǵın kórsetedi. Tek ǵana mezonlardıń eń jeńili hám olardıń massaları $\sqrt{(m_u + m_d)\Lambda_{QCD}}$ shamasına proporcional bolǵan π -mezon buǵan kirmeydi. π -mezonnıń basqa mezonlardan usınday bolıp ayrılıp turıwı olardıń kirallıq simmetriyanıń spontan buzılıwında áhmiyetli orındı iyeleytuǵınlıǵı menen baylanıslı. Házir biz "kirallıq simmetriya" menen "spontan buzılıw" terminleriniń neni ańǵartatuǵınlıǵın anıqlaymız.

Massaǵa iye bolmaǵan u- hám d-kvarklar ushın kvantlıq xromodinamikanıń lagranjianın qarap, usı lagranjiannıń tek ǵana $SU(2)$ izotoplıq simmetriyaǵa ǵana emes, al joqarıraq bolǵan globallıq $SU(2)_L \times SU(2)_R$ simmetriyaǵa iye bolatuǵınlıǵına iseniwge boladı. Másele sonnan

ibarat, massağa iye emes bolğan bóleksheler massaları nolge teń emes bolğan bóleksheler ushın lorenc-invariant túrde anıqlanıwı múmkin emes saqlanatuǵın ayırıqsha shamağa iye boladı. Bul shama bóleksheniń spininiń onıń impulsine túsirilgen proekciyası bolıp, onı spirallıq dep ataydı. Eger spinniń proekciyası impulske qarama-qarsı baǵıtlanǵan bolsa, onda spirallıq shep (L), al impuls baǵıtında bolsa spirallıq oń (R) dep ataladı. Massağa iye bolmaǵan bóleksheler jaqtılıqtıń tezligindey tezlik penen qozǵaladı. Sonlıqtan koordinatalar sistemasiniń hesh qanday qozǵalı menen (koordinatalar sistemaları barlıq waqıtta jaqtılıqtıń tezliginen kishi tezlikler menen qozǵaladı) massağa iye bolmaǵan bólekshelerdiń spirallıǵınıń baǵıtın ózgeriwge bolmaydı. Al massağa iye bolğan bóleksheler ushın spirallıqtı ańsat ózgeriwge boladı.

Kvarklardıń reńli zaryadlar tárepinen vektorlıq glyuonlardıń shıǵarılıwı hám jutılıwı olardıń spirallıǵın ózgerterdi. Sonlıqtan, kvantlıq xromodinamikanıń massağa iye bolmaǵan kvarkları ushın jazılǵan lagranjiani tábiyiy túrde eki qosılıwshıǵa ajraladı: olardıń biri shep u_L hám d_L kvarklarǵa, al ekinshisi oń u_R hám d_R kvarklarǵa iye boladı. Bul qosılıwshılardıń hár biri óziniń izotoplıq simmetriyasına iye boladı. Sonlıqtan tolıq lagranjian kirallıq, shep-oń simmetriyalı $SU(2)_L \times SU(2)_R$ gruppanıń túrlendiriwlerine qarata simmetriyalı. Olar "shep" hám "oń" izotoplıq gruppalardıń tuwrı kóbeymesi bolıp tabıladı.

Lagranjian qáddinde ádettegi izotoplıq $SU(2)$ simmetriya menen kirallıq $SU(2)_L \times SU(2)_R$ simmetriyanıń arasında hash qanday principiallıq ayırma joq. Biraq, eger bir adronlar dúnyasında bul simmetriyalardıń qalayınsha júzege keletuǵınlıǵına itibar beretuǵın sol ayırma ayqın túrde kózge túsedi.

Ádettegi izotoplıq simmetriya sızıqlı túrde júzege keledi: kvarklardıń izospinorı menen quramlı nuklonlardıń izospinorı burıwları sinxronlı túrde júredi. Kirallıq simmetriya bolğan jaǵdayda basqasha. Sebebi massağa iye emes kvarklardan nuklonlar massası boyınsha ayrıladı hám belgili bolğan spirallıqqa iye bolmaydı. Biz bul jaǵdayda lagranjianiń belgili bolğan simmetriyaǵa iye bolatuǵınlıǵın, al fizikalıq haldıń sol simmetriyaǵa iye bolmaytuǵınlıǵın birinshi ret kóremiz. Bunday situaciya qaralǵanda simmetriyanıń spontan túrde buzılıwı haqqında gáp etiledi hám bul jaǵday globalıq simmetriyanıń spontan buzılıwına misal bola aladı.

Simmetriyanıń spontan túrde buzılıwında barlıq waqıtta goldston bozonları dep atalatuǵın massağa iye bolmaǵan bozonlardıń payda bolıwı júzege keletuǵınlıǵı tabıldı. Biz oylap tapqan dúnyadaǵı (qıyalımızdaǵı bunday dúnyada u hám d kvarklar massağa iye emes edi) massağa iye bolmaǵan usınday úsh π -mezon goldston bozonları bolıp tabıladı. Haqıyqıy dúnyada bolsa u hám d kvarklardıń massaları kishi, biraq nolge teń emes hám lagranjianiń kirallıq simmetriyası juwıq simmetriya, al π -mezonlar psevdogoldston bozonları bolıp tabıladı: olardıń massaları nolge teń bolmasa da, basqa adronlardıń massalarına salıstırǵanda kishi.

Jeńil kvarklardan turatuǵın adronlardıń barlıq massaları principinde juwırıwshı α_s konstantası ushın jazılǵan ańlatpaǵa kiretuǵın ólshem birligi joq bir Λ_{QCD} parametri arqalı ańlatılıwı kerek. Házirinshe bul másele sheshilgen joq.

Kvantlıq xromodinamika rawajlanıw jolında

Kvantlıq xromodinamikanıń dóretiliwi elementar bóleksheler teoriyasındaǵı awhallardı keskin túrde ózgeretti. Burınları belgili bolmaǵan $SU(2)$ izotoplıq invariantlıq simmetriya hám onıń ulıwmalastırılıwı bolğan kúshli tásirlesiwlerdiń aromatlıq $SU(3)$ -simmetriyası, kirallıq $SU(2)_L \times SU(2)_R$ hám $SU(3)_L \times SU(3)_R$ simmetriyalar belgili boldı. Nátiyjede relyativistlik emes kvarklar modeli, qaltalar modeli (model meshkov) hám partonlar modeli júzege keldi. Kvantlıq xromodinamikanıń tiykarında bir qatar jańa fizikalıq obǵektler menen qubılıslardıń bar ekenligi boljandı: kvarklıq hám glyuonlıq aǵıslar, kvarklarǵa iye bolmaǵan hám tek glyuonlarǵa iye adronlar - glyubollar.

Kúshli tásirlesiwlerdiń eń tiykarǵı teoriyası bolaman deytuǵın kvantlıq xromodinamikanıń

qarsılasları joq. Adronlardı tolıq túsiniw jolındaǵı tiykarǵı jol ótildi - lagranjian jazıldı. Biraq, usı jaǵdayǵa qaramastan maqsetke jetiwge ele alıs, sebebi reńli tásirlesiw kúshli bolatuǵın oblastlardaǵı kvantlıq xromodinamikanıń teńlemelerin ele sheshe almaymız. Fizik-teoretikler ushın konfaynment mashqalaları quramalı mashqalalardıń biri bolıp qalmaqta. Teoriyanıń matematikalıq strukturası izertlenbegen bolıp qalmaqta.

Teoriyanıń rawajlanıwında adronlardı bunnan bılayǵı eksperimentallıq izertlewler biybaha orındı iyeleydi. Teoriya ushın tek maksimallıq joqarı energiyalarda ótkeriletuǵın eksperimentler ǵana emes, al tómengi energiyalıq eksperimentler de zor áhmiyetke iye. Tómengi energiyalarda ótkeriletuǵın eksperimentler adronlardıń spektroskopiyasında tártip ornatiwǵa múmkinshilik beredi. Bunday adronlardıń qatarına ekzotikalıq (*qq* tipindegi emes, al *qqq* tipindegi) hám kriptoekezotikalıq mezonlar menen barionlar, barioniy, eki barionlıq rezonanslar, glyubollar (kóp sanlı jańa terminlerden qorıqqan oqıwshıǵa terminler sózligin oqıw usınıladı).

1954-jılı Yang penen Millstıń abellik emes lokallıq SU(2) teoriiyası bayanlangan maqalası jarıq kórgen waqıtta ondaǵı kúshli tásirlesiwdiń bolajaq teoriiyasınıń prototipin kóriw qıyın edi. Teoriya tábiyatta joq bolǵan uzaqtan tásir etetuǵın kúshlerdiń payda bolıwına sózsiz alıp keletuǵın massaǵa iye bolmaǵan kalibrovkalıq maydanlarǵa iye edi. Yang-Mills teoriiyası kóplegen izertlewshilerge qızıqlı matematikalıq oyınshıq bolıp kórindi. Keyinirek (70-jıllardıń basında) Gell-Mann reń dep ataǵan azǵınıw menen baylanıslı bolǵan kalibrovkalıq maydanlar haqqındaǵı gipotezanıń Nambu tárepinen 1965-jılı kirgiziliwine alıp keletuǵın uzaq rawajlanıw talap etildi.

Biraq kvantlıq xromodinamika Yagn-Milstıń teoriiyasınıń birden-bir áwladı emes. Biz tómende elektr-ázzi tásirlesiwdiń házirgi zaman teoriiyası menen kúshli, ázzi hám elektromagnit tásirlesiwlerdi ullı birlestiriw modelleriniń abellik bolmaǵan kalbirovkalıq teoriyaları bolıp tabılatuǵınlıǵın kóremiz.

IV bap

ÁZZI TÁSIRLESIW

Ázzi ıdırawlar. Ázzi reakciyalar. Zaryadlangan toqtıń qosılıwshıları. Aynalıq asimmetriya. $V - A$ toq. C, P, T simmetriyalar. Neytral toqlar. Neytrinonıń massaları hám oscillıyacıyları. Qos β -ıdıraw. Eksperimentlerdiń isenimligi haqqında.

Ázzi ıdırawlar

1996-jılı Bekkereldiń urannıń duzlarınıń zatlar arqalı ótetuǵın nurlardı shıǵaratuǵınlıǵın ashqanına júz jıl toladı. Sol waqıtları Bekkerel ózi baqlaǵan nurlardıń β -nurları, yaǵnıy radioaktivli ıdırawda bólinip shıǵatuǵın elektronlar ekenligin bilgen joq (Bekkerelde torıydiń β -ıdırawı baqlandı). Usınday jollar menen β -ıdıraw ashıldı, tap usılay ázzi tásirlesiwdi izertlewdiń tariyxı baslandı.

Bunnan azmaz keyin ashılǵan nurlar bolǵan α -nurları awır radioaktivli nurlar tárepinen spontan túrde shıǵarılatuǵın geliy atomınıń yadroları bolıp tabıladı. α -bóleksheleri menen ótkerilgen tájiriybeler yadro menen yadrolıq kúshlerdiń ashılıwına alıp keldi. Solay etip, radioaktivliktiń ashılıwı ázzi tásirlesiwdiń de, kúshli tásirlesiwdiń de izertleniwiniń baslanıwı bolıp tabıladı. Ázzi hám kúshli tásirlesiwler ulıwmalıq bir "tuwılǵan kúnge" iye dep aytıwǵa boladı.

β -ıdırawdı úyreniwdiń birinshi etapı 30-jıllardıń baslarında Pauli eksperimentallıq maǵlıwmatlardıń tásirinde β -ıdırawda elektronlar menen birge jeńil neytral bolǵan bóleksheler - neytrinolar uship shıǵadı degen gipotezanı usınıwı menen juwmaqlandı. Bunnan keyin kóp uzamay Fermi β -ıdırawdıń kvantlıq-maydanlıq teoriyasın baspadan shıǵardı. Bul teoriyaǵa sáykes, neytronnıń ıdırawı eki toqtıń saldarınan júredi. Házirgi waqıtları biz birinshi toq adronlıq bolıp, ol neytrondı protonǵa aylandıradı dep aytqan bolar edik. Ekinshi leptonlıq toq elektron + antineytrino jubın payda etedi. Bul toqlardıń óz-ara tásirlesiwı tórt fermionlı óz-ara tásirlesiw atamasına iye boldı (sebebi bunday tásirlesiwge 4 fermion qatnasadı).

Tórt fermionlı tásirlesiwdiń konstantası bolǵan Fermi konstantası ólshem birlikke iye emes: $G_F = 1,436 \cdot 10^{-49} \text{ erg} \cdot \text{sm}^3$.

$\hbar, c = 1$ birliklerinde: $G_F \approx 10^{-5} m_p^{-2}$, bul jerde m_p arqalı protonnıń massası belgilengen. Yadrolıq masshtabta Fermi konstantası kishi. Sonlıqtan G_F^2 shamasına proporcional bolǵan β -ıdıraw processleriniń itimallıǵı kishi.

Myonlar, π -mezonlar hám, ayırıqsha, oǵash adronlar ashılǵannan keyin yadrolardıń β -ıdırawları sıyaqlı bul bólekshelerdiń ıdırawlarınıń G_F konstantasına iye bolǵan ázzi tórt fermionlı tásirlesiwine baylanıslı ekenligi anıq boldı. Bunday jaǵdayda jasaw waqıtlarınıń hár qıylı bolıwı (mısalı, myuon eki millisekund, al neytron bolsa shama menen mırń sekund jasaydı) ıdırawda bólinip shıǵatuǵın Δ energıyasınıń mánisleriniń hár qıylı bolatuǵınlıǵı menen túsindiriledi. Sebebi ıdırawdıń itimallıǵı $G_F^2 \Delta^5$ shamasına proporcional.

Solay etip ázzi tásirlesiwdiń elementar bólekshelerdiń ástelik penen bolatuǵın barlıq ıdırawlarına juwapker ekenligi tabıldı. Bólekshelerdiń jańa tiplerin bunnan keyingi izertlewler (súykimli bólekshelerdi, τ -leptonı, B-mezonlardı) ázzi tásirlesiwdiń universallıq xarakterge iye ekenligin tastıyıqladı. Sonday jollar menen ıdırawlardıń itimallıǵı ushın $G_F^2 \Delta^5$ nızamlıǵı tolıq tastıyıqlanadı. Mısalı, τ -lepton menen súykimli mezonlar myuonǵa salıstırǵanda shama menen 20 ese salmaqlıraq. Usıǵan sáykes, olardıń jasaw waqtı 7 tártipke kem hám shama menen 10^{-13} sekundtı quraydı.

$\bar{\nu}$ hám $\bar{n}p$ toqları zaryadlangan toqlar dep atalatuǵın klassqa kiredi. Bul termin fizikalıq ádebiyatta úlken, biraq sonıń menen birge túsiniqlirek bolǵan "qatnasatuǵın bólekshelerdiń elektr zaryadın ózǵertetuǵın toqlar" terminniń ornına paydalanıladı. Toqlardıń ekewinde de

zaryad bir birlikke kemeyedi: neytral bolǵan neytrinodan teris zaryadlangan elektron, al protonnan neytron alınadı. Bunday interpretaciya bizler v operatorınıń neytroni joq etetuǵınlıǵı, al \bar{e} operatorınıń elektrondı tuwdıratuǵınlıǵın esapqa alamız (hám usaǵan uqsas - nuklonlar ushin). Biraq v operatorı tek neytroni joq etip qoymaydı, al antineytroni da tuwdıradı. Sonlıqtan zaryadlangan $\bar{e}v$ toǵı teris zaryadlangan juptı tuwdıradı dep aytıwǵa boladı: elektron + antineytrino. Ol pozitron + neytrino jubın joq etedi.

$\bar{e}v$ hám $\bar{n}p$ toqları menen bir qatarda qatnasatuǵın bólekshelerdiń elektr zaryadların úlkeytetuǵın túyinles onı zaryadlangan $\bar{v}e$ hám $\bar{p}n$ toqları da bar. Bul toqlar onı zaryadlangan juplardı tuwdıradı hám fermionlardıń teris zaryadlangan jupların joq etedi.

β -ıdırawlıq óz-ara tásirlesiw, álbette, elektr zaryadın saqlaydı. Usıǵan sáykes, onıń lagranjianı onı zaryadlangan $\bar{p}n$ toǵı menen teris zaryadlangan $\bar{e}v$ toǵınıń kóbeymesinen turadı.

Ázzi reakciyalar

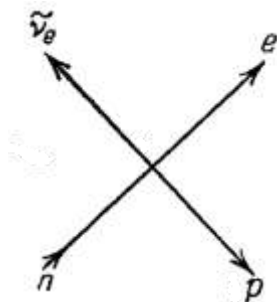
Fermi tárepinen neytronnıń β -ıdırawınıń sebebi sıpatında postulatlangan $\bar{e}v_e$ hám $\bar{p}n$ toqlarınıń óz-ara tásirlesiwı (25-súwret)

$$n \rightarrow p \bar{e} \bar{\nu}_e$$

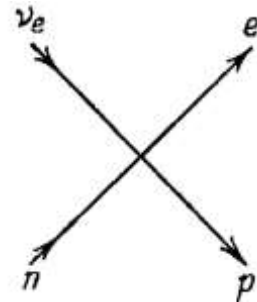
elementar bólekshelerdiń tómendegidey bir birine aylanıw reakciyasına alıp keliwi kerek (26-súwret):

$$\nu_e n \rightarrow p e^-.$$

Sebebi bizler antineytroniń tuwılıwı menen neytroniń joq etiliwin bir operatordıń ámelge asıratuǵınlıǵın bilemiz.



25-súwret.



26-súwret.

Tap usınday jollar menen zaryadlangan $\bar{v}_e e$ hám $\bar{n}p$ toqlarınıń kóbeymesi protonnıń ıdırawı bolǵan $p \rightarrow m e^+ \nu_e$ reakciyasın (ol protonnıń baylanıs energiyası neytronnıń baylanıs energiyasınan kishi bolǵan yadrolarda júzege keledi) hám $\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$ reakciyasın beredi

$\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$ reakciyasın birinshi ret yadrolıq reaktor tárepinen shıǵarılatuǵın antineytroniń aǵısın paydalanıw arqalı 1956-jılı baqlawdıń sáti tústi. Raynestiń gruppası tárepinen orınlangan bul eksperiment ázzi reakciyalardı úyreniwdiń baslaması bolıp tabıladı (oǵan shekem eksperimentlerde tek ázzi ıdırawlar baqlangán edi).

1962-jılı Brukxeyven laboratoriyasında (AQSh) birinshi tezletilgen neytrinoliq eksperiment tabıslı túrde ámelge asırıldı. Bul eksperimentte neytroniń atom yadroları menen serpimli bolmaǵan soqlıǵısıwları baqlandı. Bul jerde neytrinolar dástesi tez qozǵalatuǵın π -mezonlardıń ıdırawlarında alındı:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \text{ hám } \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu.$$

Bul π -mezonlardıń ózleri protonlar dástesiniń yadrolarǵa soqlıǵısıwınıń saldarınan alındı. Bul tájiriyyede myuonliq hám elektronliq neytrinoları hár qıylı ekenligi anıqlandı.

1964-jılı Moskvada Teoriyalıq hám eksperimentallıq fizika institutında yadrolıq reaktordan shıqqan neytronlardıń tásirinde júretuǵın yadrolıq reakciyalarda birinshi ret ázzi yadrolıq kúshler

baqlandı. Fermidiń tilinde bunday kúshler $\bar{p}n$ toǵı menen oǵan túyinles bolǵan $\bar{n}p$ toǵınıń óz-ara tásirlesiwiniń saldarınan payda boladı. Bul ilimiy ashılıw oǵan shekem usınılǵan birden-bir ázzi zaryadlangan toqtıń óziniń túyinles bolǵan toq penen tásirlesetuǵınlıǵı haqqındaǵı gipotezanı tastıyıqladı.

Eger zaryadlangan toqtıń barlıǵı tek eki qosılıwshıdan turatuǵın bolsa $(\bar{p}n + \bar{\nu}_e e)$, onda $(\bar{p}n + \bar{\nu}_e e)(\bar{n}p + \bar{e}\nu_e)$ kóbeymesinde tórt qosılıwshı bolǵan bolar edi. Elektronlıq β -ıdırawda $(\bar{p}n)(\bar{e}\nu_e)$ qosındısı payda boladı. Pozitronlıq β -ıdırawda túyinles $(\bar{\nu}_e e)(\bar{e}\nu_e)$ qosılıwshısı payda boladı. Ázzi yadrolıq kúshlerde bolsa diagonallıq qosılıwshı $(\bar{p}n)(\bar{n}p)$. Basqa diagonallıq qosılıwshı $(\bar{\nu}_e e)(\bar{e}\nu_e)$ elektronlardıǵı elektronlıq neytrınonıń shashırawın beriwı kerek. Bul processti baqlawdıń sáti birinshi ret 1976-jılı ǵana tústi. Biraq sol waqıtqa shekem "toq \times toq" sxemasınıń durıs ekenligine gúman qalǵan joq edi. Tek toqtaǵı nuklonlardıń ornın kvarklar iyeledi, al leptonlardıń sanı kóbeydi.

Zaryadlangan toqtıń qosılıwshıları

Búgingi kúni zaryadlangan toqlar menen baylanıslı bolǵan ázzi ıdırawlar hám reaksiyalar haqqındaǵı bizler biletuǵın nárselerdiń barlıǵın tolıq zaryadlangan toq j menen hám oǵan túyinles bolǵan j^+ toǵınıń óz-ara tásirlesiwiniń nátiyjesi túrinde ańlatıladı dep esaplawǵa boladı. j toǵı 9 qosılıwshınıń qosındısı ekenligi tabıldı. Olardıń úshewi leptonlıq $(\bar{e}\nu_e, \bar{\mu}\nu_\mu, \bar{\tau}\nu_\tau)$ hám altawı kvarklıq $(\bar{d}u, \bar{s}u, \bar{b}u, \bar{d}c, \bar{s}c, \bar{b}c)$ bolıp tabıladı. Eger altınshı t -kvark bar dep esaplasaq, onda j toǵına jáne úsh qosılıwshını qosıw kerek $(\bar{d}t, \bar{s}t, \bar{b}t)$. Biz bunnan bılay t -kvark bar dep esaplap ázzi toqtıń qásiyetin tallaymız hám j toǵın bılayınsha jazamız

$$j = \bar{e}\nu_e + \bar{\mu}\nu_\mu + \bar{\tau}\nu_\tau + V_{\bar{d}u}\bar{d}u + V_{\bar{s}u}\bar{s}u + V_{\bar{b}u}\bar{b}u + V_{\bar{d}c}\bar{d}c + V_{\bar{s}c}\bar{s}c + V_{\bar{b}c}\bar{b}c + \\ + V_{\bar{d}t}\bar{d}t + V_{\bar{s}t}\bar{s}t + V_{\bar{b}t}\bar{b}t.$$

Bul ańlatpada $V_{\bar{d}u}, V_{\bar{s}u}, V_{\bar{b}u}, \dots$ arqalı san túrindegi koefficientler belgilengen.

j ushın jazılǵan formulaǵa hátte birinshi ret asıǵıslıq penen qaraǵan jaǵdayda da leptonlar menen kvarklardıń arasındaǵı ayırma ayqın túrde kózge túsedı. Birinshiden, leptonlar tek ózleriniń neytrinoları menen toqlardı payda etedi, al "joqarǵı" kvarktıń qálegenı qaysı áwladqa tiyisli ekenligine qaramastan "tómengi" kvarktıń hár biri menen toqlardı payda etedi. Ekinshiden, úsh leptonlıq juplar birlik koefficientleri menen kiredi. Bul olardıń óz-ara tásirlesiwleriniń pútkilley birdey ekenligin ańǵartadı. Al kvarklıq toqlardıń aldındaǵı koefficientler bir birine teń emes.

Ázzi tásirlesiwdiń házirgi zaman teoriyasınıń tiykarında mınaday ideya jatır: eger kvarklıq toqqa "durıs" qaraytuǵın bolsaq, onda onıń leptonlıq toqqa pútkilley uqsas bolıwı kerek. Usı "durıs" qarawǵa ápiwayılastırılǵan mısalda ayqınlıq kirgizemiz. Onıń ushın qıyalımızda tek "elektronlıq" (ν_e, e, u, d) hám "myonlıq" (ν_μ, μ, c, s) áwladlar bar dúnyanı keltiremiz.

Haqıyatında da, 1975-jıldıń basında kóp fizikler dúnyanı tap sonday dep qaradı. Sol waqıtları c -kvark ashılǵan, al τ -lepton menen b -kvark ele ashılmaǵan edi. Usınday dúnyada tolıq toq bılayınsha jazıladı degen ideya boldı:

$$j = \bar{e}\nu_e + \bar{\mu}\nu_\mu + \bar{d}'u + \bar{s}'c.$$

Bul ańlatpadaǵı d' penen s' lar

$$d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c, s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c$$

óz-ara ortogonallıq kombinaciyaadan turatuǵın "burılǵan kvarklar" bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda tórt $a_{\bar{d}u}, a_{\bar{s}u}, a_{\bar{d}s}, a_{\bar{s}c}$ koefficientleri Kabibbo múyeshi dep atalatuǵın bir parametr - θ_c arqalı ańlatıladı.

Eksperimentallıq maǵlıwmatlardıń ázzi toqtıń usınday strukturasınıń durıs ekenligin tastıyıqlawı júdá zor bolıp tabıladı (úshinshi áwladtıń bar bolıwına baylanıslı dúzetiwlardıń dálligine shekemgi). Olardan alınǵan θ_c múyeshiniń mánisi 13° qa jaqın ($|\sin \theta_c| \approx 0,22$). θ_c múyeshiniń kishi ekenligi (álbette, $G_F^2 \Delta^5$ nızamı boyınsha birdey energiya shıǵarıladı dep

esaplaganda) ersi bólekshelerdiń ıdırawlarınń neytronnıń β -ıdırawında basılıp qalǵanlıǵı (\bar{u} s toǵınıń tásirinde júretuǵın), al súykimli (charm) bólekshelerdiń ersi (strange) bólekshelerge ıdırawdı (\bar{s} c toǵınıń tásirinde) artıqmash kóretuǵınlıǵı menen baylanıslı.

Eger θ_c múyeshiniń shaması nolge teń bolǵanda, onda ersi bólekshelerdiń barlıǵı stabilli bolatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Sebebi s-kvark principinde tek oǵan salıstırǵanda awır bolǵan c-kvarkqa aylanǵan bolar edi. Bul aylanıw energıyanıń saqlanıw nızamına sáykes qadaǵan etilgen.

Ázzi toqlar kóz-qarası boyınsha belgili massalarǵa iye bolmaytuǵın burılǵan d' hám s' hallar "haqıyqıy" bóleksheler bolǵan bolar edi. Massalar kóz-qarası boyınsha belgili hám hár qıylı massalarǵa iye bolǵan d menen s ler "haqıyqıy bóleksheler" bolıp tabıladı. Eger d' penen s' ler belgili bolǵan massalarǵa iye bolǵanda, onda bizler barlıq waqıtta d' hám s' ler menen is alıp barǵan bolar edik. Situaciya neytrino menen baylanıslı bolǵan situaciyanı eske túsirgen bolar edi (tómende keltirilgen).

Eger úsh áwlad bar haqıyqıy dúnyaǵa ótetuǵın bolsaq, onda

$$j = \bar{e}v_e + \bar{\mu}v_\mu + \bar{\tau}v_\tau + \bar{d}'u + \bar{s}'c + \bar{b}'t$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpada úsh kvark burılǵan: d, s, b \rightarrow d', s', b' hám ápiwayı 2×2 burıw matricesiniń ornına ulıwma túri ádewir úlken bolǵan 3×3 matricesı menen is alıp baramız.

Ulıwma jaǵdayda bul matricanıń matricalıq elementleri tórt gárezsiz parametrler, úsh θ_1 , θ_2 hám θ_3 múyeshleri hám fazalıq kóbetiwshi $e^{i\delta}$ arqalı ańlatıladı (sózliktegi zaryadlanǵan toq temasına qarańız).

θ_1 múyeshiniń mánisi Kabibbo múyeshiniń shamasına jaqın (tájiriybelerde ($|\sin \theta_1| = 0,231 \pm 0,003$)). Basqa eki múyeshtiń eksperimentalıq mánisleri házirshe juwıq túrde belgili:

$$0,05 \lesssim |\sin \theta_1| \lesssim 0,1 \text{ hám } 0,02 \lesssim |\sin \theta_2| \lesssim 0,6; |\delta| \lesssim 0,3.$$

Bul parametrlerdi anıqlaw hám burılǵan kvarklardıń barlıq sxemasın tekseriw - júdá qızıqlı hám áhmiyetli másele bolıp tabıladı. Biz bunnan keyin elektromagnitlik hám ázzi tásirlesiwlerdiń birden-bir kalıbrovkalıq teoriyasında burılǵan kvarklar ideyasınıń áhmiyetli orındı iyeleytuǵınlıǵın kóremiz.

Aynalıq asimmetriya

Joqarıdaǵı úsh paragraflarda biz ázzi tásirlesiwdiń aromatlıq strukturası dep neni ataytuǵınlıǵımızdı talladıq hám zaryadlanǵan toqlardıń keńisliklik-spinlik qásiyetleri menen is alıp barmadıq. Endi biz usı qásiyetlerdi kóriwge ótemiz.

Ázzi tásirlesiwdiń fundamentallıq qásiyeti ázzi processlerdiń aynalıq-asimmetriyaǵa iye bolıwında.

1956-jılı sol waqıtları paradokslıq bolıp kóringen K-mezonlardıń eki yamasa úsh pionǵa ıdırawı múmkin bolǵan túsindiriwlerdi tallawdıń barısında Li menen Yang ázzi tásirlesiw keńisliklik juplıqtı saqlamaydı degen gipotezanı usındı. Bunnan keyin bir neshe ay dawamında ótkerilgen eksperimentler bul gipotezanıń durıs ekenligin tastıyıqladı. Yadrolardıń β -ıdırawlarında, myuonlar menen pionlardıń, Λ -mezonlardıń hám giperonlardıń ıdırawlarında aynalıq asimmetriya anıqlandı. Bul jaǵdayda gáp kishi effekt haqqında júrip atırǵan joq, al onlaǵan hár qıylı ıdırawlardaǵı júz procentli asimmetriya haqqında júrip atır.

Ótken waqıtqa názer salǵanda usınday júdá áhmiyetli qubılıstıń uzaq waqıtlardıń ishinde baqlanbaǵanlıǵın túsiniw qıyın. Biraq, bul ashılıwdıń qanday soqqını bergenligin kóz-aldıǵa keltiriw ańsat. Sebebi, juplıqtıń saqlanıw nızamı impuls penen múyeshlik momenttiń saqlanıw nızamları sıyaqlı geometriyalıq saqlanıw nızamlarınıń biri túrinde qaraldı. Impulstıń saqlanıwı keńisliktiń bir tekliginen, al múyeshlik momenttiń saqlanıwı onıń izotropiyasınan kelip shıǵadı. Tap sol sıyaqlı juplıqtıń saqlanıwın bos keńisliktiń kórinip turatuǵın aynalıq simmetriyasınan,

vakuumnıñ vintlik qásiyetleriniñ joq ekenligin kelip shıǵadı dep esaplaw kerek.

Boslıq ápiwayı emes hám onıñ qásiyetleri biz kórip turǵanday emes ekenligi ayqın boldı. Biz joqarıda kvantlıq xromodinamikadaǵı vakuumnıñ ádettegidey emes ekenligin talladıq. Bunnan bilay biz basqa misallar menen de ushırasamız.

Juplıqtıñ saqlanbaytuǵınlıǵına baylanıslı júzege kelgen soqqı tiykarınan filosofiyalıq xarakterge iye boldı. Al máseleniñ teoriyalıq hám texnikalıq tárepinen keletuǵın bolsaq, onda maydannıñ kvantlıq teoriyası bul qubılıstı hesh qanday qıyınshılıqsız túsindire aldı.

Bazı bir fizikalıq shamanıñ keńisliklik juplıǵı P koordinatalıq kósherlerdiñ aynalıq shaǵılısındaǵı, P -shaǵılısı dep atalatuǵın shaǵılısındaǵı ($x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$). Bunday túrlendiriwlerde impuls \mathbf{p} , vektor-potencial \mathbf{A} hám elektr maydanınıñ kernewligi \mathbf{E} sıyaqlı vektorlıq shamalar (polyar vektorlar dep atalatuǵın vektorlar) belgisin ózǵertedi. Olar P -taq shamalar bolıp tabıladı. Psevdovektorlıq yamasa basqa ataması aksiallıq-vektorlıq bolǵan shamalar (eki vektordıñ vektorlıq kóbeymesi, orbitalıq múyeshlik moment \mathbf{L} , spin \mathbf{S} hám magnit maydanınıñ kernewligi \mathbf{H} belgisin ózǵertpeydi. Olar P -jup shamalar bolıp tabıladı.

Eki vektordıñ yamasa eki aksiallıq vektordıñ skalyar kóbeymesi skalyar bolıp tabıladı. Skalyar P -jup shama. Polyar vektor menen aksiallıq vektordıñ skalyar kóbeymesi psevdoskalyar bolıp tabıladı. Psevdoskalyar P -taq.

1956-jılǵa shekem lagranjiannıñ skalyar bolıwı shárt dep esapladı. 1956-jıldan keyin ázzi tásirlesiwdiñ eki qosılıwshılardan - skalyarlıq hám psevdoskalyarlıq qosılıwshılardan turatuǵınlıǵı belgili boldı.

Skalyar qosılıwshınıñ esabınan K^+ -mezon juplıǵın saqlaw menen úsh pionǵa ıdıraydı. Psevdoskalyardıq qosılıwshınıñ esabınan usı K^+ -mezon eki pionǵa ıdıraydı.

Biraq basqa ıdırawlardıñ kópshiliginde qosılıwshılardıñ ekewi de birdey bolǵan, biraq hár qıylı bolǵan orbitalıq-spinlik hallardaǵı aqırǵı bólekshelerdi beredi. Bul hallardıñ interferenciyası joqarıda esletilip ótilgen aynalıq-asimmetriyalıq effektlerdi, misalı, β -elektronnıñ spininiñ onıñ impulsına qarama-qarsı baǵıttaǵı boylıq polarizaciyasın, β -elektronnıñ impulsiniñ ıdırawshı neytronnıñ spini menen korrelyaciyasın hám t.b. beredi.

P -shaǵılısıwdı bunday korrelyaciyalar ózleriniñ belgisin ózǵertedi hám aynada biz tábiyatta joq bolǵan processlerdi (misalı, ıdırawdaǵı onı polarizaciyaǵa iye β -elektronlardı) kóremiz.

$V - A$ -toq

Ózinin eñ baslanǵısh teoriyasında Fermi ázzi toqlardı vektorlıq toqlar, yaǵnıy olar elektromagnit toqlar sıyaqlı tórt ólshemli vektor bolıp tabıladı dep esapladı. Bunnan keyin qátelikler menen ótkerilgen eksperimentlerdiñ tiykarında ázzi toqlardı skalyar hám tenzorlıq dep durıs emes juwmaq islendi. Tek 1957-jılı ǵana juplıqtıñ saqlanbaytuǵınlıǵı ashılǵannan keyin Feynman menen Gell-Mann hám olardan ǵárezsiz Marshak penen Sudarshan, solar menen bir qatar Sakurai sol waqıtlarǵa shekem toplanǵan eksperimentallıq maǵlıwmatlardı tallawdıñ nátiyjesinde ázzi toqlar vektor menen aksiallıq vektordıñ ayırmasınan turadı degen juwmaqqa keldi. Bunday toqtı $V - A$ -toǵı dep atadı ("ve-minus-a" dep oqıladı).

Eki $V - A$ -toǵınıñ kóbeymesi ázzi tásirlesiwdiñ lagranjianında tábiyiy túrde skalyar menen psevdoskalyardıñ summasın beredi hám, usıǵan sáykes juplıqtıñ saqlanbaytuǵınlıǵın túsindiredi.

Mısal sıpatında elektronlıq-neytrinolıq toqtı qaraymız. Onıñ vektorlıq V bólimi $\bar{e}\gamma_\alpha v_e$ túrine iye boladı. Onıñ aksiallıq-vektorlıq bólimi A : $\bar{e}\gamma_\alpha\gamma_5 v_e$ (minus belgisin tradiciya boyınsha jazadı). Sonlıqtan $V - A$ -toǵı

$$\bar{e}\gamma_\alpha(1 + \gamma_5)v_e$$

túrine iye boladı.

Bul jerde ázzi tásirlesiwler teoriyasında áhmiyetli orındı iyeleytuǵın γ_5 matricası haqqında bir neshe sóz aytıw orınlı. Anıqlaması boyınsha $\gamma_5 = i\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$. Bul terlikte $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ shamaları

Diraktirń tórt matricası bolıp tabıladı. $1/2 (1 + \gamma_5)$ shaması tórt ólsheмли massaǵa iye bolmaǵan bóleksheni táriyipleytuǵın ψ spinorına tásir etip, onnan shep spirallıqqa iye bolǵan ψ_L qurawshısın ayıradı. $1/2 (1 + \gamma_5)$ shaması oń spirallıq ψ_R qurawshısın ayıradı.

$$\bar{e}\gamma_\alpha(1 + \gamma_5)v_e = 2\bar{e}_L\gamma_\alpha v_L$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın arısat kórsetiwge boladı. Bul barlıq $e, v_e, \mu, \nu_\mu, \dots, u, d, \dots, t$ bóleksheleriniń $V - A$ -toǵına ózleriniń shep halları $e_L, \nu_{eL}, \dots, u_L, d_L, \dots, t_L$ menen kiretuǵınlıǵın, al barlıq antibólekshelerdiń oń $\bar{e}_R, \bar{\nu}_{eR}, \dots, \bar{t}_R$ halları menen kiredi. Ádette $V - A$ -toǵı haqqında gáp etkende shep toq haqqında aytadı. Bunday jaǵdayda oǵan bólekshelerdiń (antibólekshelerdiń emes) kiretuǵınlıǵı názerde tutiladı.

Barlıq zaryadlangan toqlar $V - A$ -strukturaǵa iye boladı dep tastıyıqlaw júdá batıl tastıyıqlaw boldı. Sebebi 1957-jılı bunday tastıyıqlaw durıslıǵına fiziklerdiń kópshiligi gúmanǵa iye bolmaǵan bir qatar eksperimentlerdiń nátiyjelerine qayshı keldi (keyinirek gúmanlanıwdıń kerek emes ekenligi anıqlanǵan bolsa da). Házirgi waqıtları barlıq zaryadlangan toqlardıń universallıq $V - A$ -strukturaǵa iye bolatuǵınlıǵına qayshı keletuǵın bir de fakt joq.

Bul paraqraftı zaryadlangan toqlardıń lagranjiani ushın arılatpanı jazıw menen juwmaqlaymız:

$$\mathcal{L}^{ch} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} j_\alpha j_\alpha^+.$$

Bul arılatpada

$$j_\alpha = 2(\bar{e}_L\gamma_\alpha v_{eL} + \bar{\mu}_L\gamma_\alpha v_{\mu L} + \bar{\tau}_L\gamma_\alpha v_{\tau L} + \bar{d}'_L\gamma_\alpha u_L + \bar{s}'_L\gamma_\alpha c_L + \bar{b}'_L\gamma_\alpha t_L),$$

al j_α^+ bolsa túyinles toq bolıp tabıladı.

C-, P-, T-simmetriyalar

P-shaǵılısıw bir biri menen tıǵız baylanısqa diskret túrlendiriwlerdiń biri, al qalǵan eki túrlendiriw - waqıttırń ótiwiniń baǵıtınıń ózgeriwi T menen zaryadlıq túyinleslik C bolıp tabıladı. Waqıttırń ótiwiniń baǵıtınıń ózgeriwi $t \rightarrow -t$ tuwrı hám keri processlerdiń itimallıqlarınıń amplitudalarınıń birdey bolıwın talap etedi. Zaryadlıq túyinleslikke salıstırǵandaǵı invariantlıq bir birinen barlıq bólekshelerdi ózleriniń antbóleksheleri menen almasıruǵınlıǵı menen ayrılatuǵın eki processtirń amplitudalarınıń teń bolıwın talap etedi.

Maydannırń kvantlıq teoriyasında fundamentallıq Lyuders-Pauli teoreması yamasa CPT-teoreması bar bolıp, bul teorema boyınsha CPT-invariant bolmaǵan aqılǵa muwapıq keletuǵın lagranjiani dúziw múmkın emes. Solay etip, P-simmetriyanıń buzılıwı C-simmetriyanıń yamasa usı simmetriyanıń ekewiniń de buzılıwına alıp keliwi kerek.

Haqıyqatında da, aynalıq simmetriyanıń buzılatuǵınlıǵı tabılǵan birinshi eksperimentler ázzi ıdırawlarda zaryadlıq simmetriyanıń 100 procentke buzılatuǵınlıǵın kórsetti. Sonlıqtan, mısalı, eger ıdırawdın payda bolǵan elektronlar kóbirek shep polarizaciyaǵa iye bolatuǵın bolsa, onda zaryadlıq-túyinles ıdırawlarda payda bolatuǵın pozitronlar kóbirek oń polarizaciyaǵa iye boladı.

P-simmetriyanıń da, C-simmetriyanıń buzılıwı massaǵa iye bolmaǵan neytrinolarıń qásiyetlerinde ayrıqsha kórinedi. Olar ideal túrdegi vintler bolıp tabıladı: barlıq neytrinolar shep spirallıqqa, al barlıq antineytrinolar oń spirallıqqa iye.

Eki qurawshıǵa iye bolǵan boylıq polarizaciyaǵa iye fermionlardırń teoriyası birinshi ret Veyl tárepinen 1929-jılı dóretildi. Sol waqıtları aynalıq asimmetriyanıń bolıwına baylanıslı teoriya itibarǵa alınbadı. Teoriya Landau, Salam, Li hám Yang tárepinen olardıń 1957-jıldıń basında jarıq kórgen jumıslarında eki qurawshıǵa iye neytrino teoriyası túrinde qaytadan tuwıldı hám olardıń jumısları $V - A$ -teoriyanı dóretiw jolındaǵı áhmiyetli etap boldı. Veyllik neytrinonı basqa fundamentallıq fermionlarǵa ulıwmalastırıp, bunnan aldırǵı paraqrafta táriyiplengen $V - A$ -teoriya P-simmetriyanıń da, C-simmetriyanıń da maksimallıq buzılıwın óziniń ishine aldı.

Tábiyattırń aynalıq hám zaryadlıq asimmetriyası ashılǵannan keyin bir neshe jıl dawamında

CP-simmetriya, al CPT-teoremanın talaplarına saykes T-qaytımlılıq ázzi tásirlesiwler tárepinen saqlanadı degen úmit orın alıp keldi. Bunday úmittiń bar bolıwına eksperimentallıq dálıktıń sheklerinde (eń jaqsı jaǵdaylarda dálıkk bir neshe procentti quradı) barlıq izertlengen ıdırawlardıń CP-invarianttıń bar bolıwı tiykar boldı. Biraq, 1964-jılı Kronin, Kristenson, Fitsh hám Terli uzaq jasaytuǵın neytrallıq K-mezonnıń $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ sxeması boyınsha eki π -mezonǵa ıdıraytuǵın taptı. K_L^0 -mezonlar tiykarınan úsh pionnıń CP-taq hallarına ıdıraytuǵın, al $\pi^+\pi^-$ halı bolsa CP-jup bolǵanlıqtan, $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ıdırawınıń ashılıwı CP-simmetriyasınıń da buzılǵanlıǵın ańǵarttı.

K_L^0 -mezonnıń bul hám basqa da ($\pi^0\pi^0$ ge, $e^\pm\nu\mu^\mp$ ke yamasa $\mu^\pm\nu\pi^\mp$ ke) ıdırawların muqiyatlı túrde eksperimentallıq hám teoriyalıq izertlewler CP-invariantlıqtıń buzılatuǵınlıǵın tastıyıqladı hám CPT-invariantlıqtıń buzılatuǵınlıǵı jóninde isenimli bolǵan izlerdi tappadı.

P- hám C-asimmetriyaǵa salıstırǵanda barlıq belgili bolǵan CP-asimmetriyalıq effektler júdá kishi (amplitudada 10^{-3} shamasında) hám tek K_L^0 -mezonlardıń ıdırawı menen sheklengen. Usınıń nátiyjesinde CP-invariantlıqtıń buzılıwınıń tábiyatı usı waqıtqa shekem anıqlanǵan joq¹⁴.

CP-buzılıwdıń mexanizmin tabıw ushın neytronnıń dipollik momenti d_n di tabıw úlken áhmiyetke iye boldı. Eger T-invariantlıq orın alǵan bolsa neytronnıń dipollik momentke iye bolıwı qadaǵan etilgen (T nıń baǵıtın ózǵertkende bólekshelerdiń elektrlik momenti óziniń belgisin ózǵertpeui kerek, al usı moment proporcional bolǵan onıń spini belgisin ózǵertedi). Házirgi waqıtları bar bolǵan joqarǵı eksperimentallıq shegara mınaday:

$$d_n \lesssim e \cdot 4 \cdot 10^{-25} \text{ sm}.$$

Bul ańlatpada e arqalı elektronnıń zaryadı belgilengen. Fizik-teoretikler tárepinen tallanıp kiyatırǵan CP nıń hár qıylı mexanizmleri d_n nıń

$$e \cdot 4 \cdot 10^{-38} \text{ sm} \lesssim d_n \lesssim e \cdot 4 \cdot 10^{-24} \text{ sm}$$

intervalındaǵı mánislerin beredi.

Teoretiklerdiń arasında keńnen tarqalǵan CP nıń múmkin bolǵan buzılıw mexanizminiń birewine irkilemiz. "Bırılǵan kvarklar" haqqında ayta kelip, biz kvarklıq toqtıń coefficientleriniń úsh Eyler múyeshinen hám $e^{i\delta}$ fazalıq kóbeytiwshisinen ǵárezli ekenligin atap óttik. δ fazasınıń 0 den (yamasa π den) ayırmaǵa iye bolıwı CP-invariantlıqtıń buzılıwın ańǵartatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Esaplawlar CP-invariantlıqtıń buzılıwınıń usınday mexanizmindegi neytronnıń kútilgen dipollik momentiniń júdá kishi bolatuǵınlıǵın kórsetedi ($d_n \lesssim e \cdot 4 \cdot 10^{-32} \text{ sm}$) hám onı eksperimentlerde tabıwdıń ámeliy jaqtan múmkinshiligi joq.

Eger $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ hám $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ıdırawlarınıń amplitudaların bir procenttiń onnan bir úlesi dáliliginde ólshewdiń sáti tússe, onda CP nıń buzılıwınıń bul modeliniń durıs ekenligin tekserip kóriwge boladı. Házirgi waqıtları usınday qıyın eksperimentti ótkeriwge tayarlıq kórilip atrı¹⁵.

¹⁴ Elementar bóleksheler fizikasında CP-invariantlıqtıń buzılıwı kombinaciyalanǵan juplıqtıń (CP-simmetriyanıń) buzılıwı, yaǵnıy fizikanıń nızamlarınıń aynalıq shaǵılıstırıw operaciyası menen usı operaciya menen bir waqıtta bólekshelerdi antibóleksheler menen almasıwǵa qarata invariant emes ekenligi bolıp tabıladı. Bul buzılıw biziń Álemimizdegi materiyanıń antimateriyaǵa salıstırǵanda kóp ekenligin túsindiriwge háreket etetuǵın kosmologiyalıq teoriyalarında áhmiyetli orındı iyeleydi. 1964-jılı neytral kaonlardıń ıdırawındaǵı CP-simmetriyanıń buzılıwınıń ashılıwı 1980-jılı fizika boyınsha Nobel sıylıǵınıń beriliwı menen belgilendi (Djeıms Kronin hám Vel Fitsh). 1967-jılı A.D.Saxarov CP-buzılıwdıń Álemniń rawajlanıwınıń eń dáslepki etapındaǵı antizattıń derlik ámeliy jaqtan tolıq joq bolıwınıń zárúrli bolǵan shártleriniń biri ekenligin kórsetti. 1973-jılı neytral kaonlardıń ıdırawlarındaǵı CP-buzılıwdı túsindiriwge tırıswıların barısında hám Nikola Kabibbonıń kvarklardıń eki áwladınıń aralasıwı ideyasınan bas tartıp, Makoto Kobayasi menen Tosixidj Maskava úshinshi áwladtıń bar ekenligin boljadı. Haqıyqatında da, b-kvark 1977-jılı, al t-kvark 1995-jılı ashıldı. Kobayasi menen Moskavanıń teoriyası boljaǵan B hám B-antimezonlardıń qásiyetleriniń hár qıylı ekenligi hám usıǵan qosımsha CP-buzılıw BaBar menen Belle lerdiń ótkergen eksperimentlerinde 2002-2007 jılları ashıldı hám olarǵa 2008-jılı Nobel sıylıǵınıń beriliwine jol ashıldı (Awdarıwshı).

¹⁵ 1986-jılǵı eskertiw: 1985-jılı eki eksperimenttiń dáliligi (birinshisi CERN, ekinshisi FNAL) shama

CP-simmetriyani qarawdı juwmaqlay kele kvantlıq xromodinamikada sol CP-simmetriya buzılatuǵınlıǵı yamasa buzılmaytuǵınlıǵı haqqındaǵı máseleniń júdá úlken qızıǵıwshılıq oyatatuǵınlıǵın atap ótemiz. Másele sonnan ibarat, belgili bolǵan ulıwmalıq principlerdiń hesh qaysısı kvantlıq xromodinamikanıń lagranjianına

$$\frac{\theta\alpha_s}{16\pi} F_{\alpha\beta}^a F_{\delta\gamma}^a \varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}$$

túrinde jazılatuǵın hám ol CP-taq bolǵan jáne bir qosılıwshını qosıwǵa qadaǵan etpeydi. Bul qosılıwshıda $F_{\alpha\beta}^a$ arqalı glyuonlıq maydannıń kernewligi tenzorı ($a = 1, 2, 3, \dots, 8$), $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}$ arqalı antisimmetriyalı tenzor, θ arqalı ólshem birligine iye bolmaǵan koefficient (geypara jaǵdaylarda onı vakuumlıq múyesh dep te ataydı), al α_s arqalı kúshli tásirlesiwdiń belgili konstantası belgilengen.

Ádette θ -aǵza dep atalatuǵın bul qosılıwshı C-jup, P-taq hám, soǵan sáykes, CP-taq (ol elektr hám magnit maydanlarınń skalyar kóbeymesi EH qa usaydı). Neytronnıń dipollik momentiniń shamasına eksperimentlerdiń nátiyjeleri boyınsha qoyılǵan sheklewden $\theta < 10^{-8}$ ekenligi kelip shıǵadı. θ -aǵzasınıń nelikten kishi ekenligi úlken qızıǵıwshılıqtı payda etedi. θ shamasınıń kishi ekenligin túsindiriw ushın aksion dep atalatuǵın júdá jeńil neytral psevdoskalyar bóleksheni de oylap taptı. Aksiondı eksperimentallıq izlewler bunday bólekshelerdiń bar ekenligin tastıyıqlamadı.

Neytral toqlar

Ázzi tásirlesiw ushın joqarıda ótkerilgen barlıq tallawlar zaryadlangan toqlar keltirip shıǵarǵan processlerge tiyisli.

1973-jılı neytral toqlar dep atalatuǵın toqlardıń óz-ara tásirlesiwiniń saldarınan júzege keletuǵın myuonsız ótetuǵın neytrinoliq reakciyalar tabıldı. Bunday reakciyalarda myuonlıq neytrino nuklonlar menen soqlıǵısıp hám olarǵa óziniń energiyasınıń bir bólegin berip myuonǵa aylanbay, kórinip turǵanınday, myuonlıq neytrino bolıp qala beredi. Bunday reakciyaǵa misal retinde

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p + \pi^+ + \pi^-$$

reakciyasın kórsetiwge boladı. Bul reakciyalardı baqlawlardan neytral neytrinoliq $\bar{\nu}_\mu \nu_\mu$ toǵı menen $\bar{u}u$ hám $\bar{d}d$ tipindegi neytral kvarklıq toqlardıń arasında óz-ara tásirlesiw orın aladı dep juwmaq shıǵarıldı. Bul óz-ara tásirlesiwdiń konstantasınıń zaryadlangan toqlardıń konstantasınday ekenligi, yaǵnıy G_F shamasınday ekenligi belgili boldı.

Basqa neytral toqlardı izlew 1978-jılı elektronlıq $\bar{e}e$ toǵınıń bar ekenligin kórsetti. Bul ázzi P-taq toq atom túrindegi vismuttıń jubı arqalı ótetuǵın lazer nurınıń polarizaciya tegisliginiń burılıwında birinshi ret kórinde. Bul effektı Barkov penen Zolotarev Novosibirsk qalasındaǵı akademqalada ótkerilgen eksperimentte taptı. Vismuttıń puwlarınıń optikalıq aktivligi atomdaǵı elektronlardıń yadrolar, yaǵnıy u jáne d kvarklar menen óz-ara tásirlesiwinde ázzi saqlanbaytuǵın juptıń bar ekenligin ańǵartadı. Azmaz waqıttan keyin $\bar{e}e$ toǵınıń $\bar{u}u$ hám $\bar{d}d$ toqları menen tásirlesiwı Stanford sıızqlı tezletkishinde boylıq polarizaciyalangán elektronlardıń deytronlardaǵı shashırawında baqlandı.

Eń aqırında, 1982-jılı $\bar{e}e$ toǵınıń $\bar{\mu}\mu$ hám $\bar{\tau}\tau$ toqları menen tásirlesiwı tabıldı. Gáp PETRA kollayderindegi

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \text{ hám } e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$$

reakciyalarındaǵı ázzi zaryadlıq asimmetriyanıń baqlanǵanlıǵı haqqında júrip atır. Usı waqıtqa shekem anıqlanǵan neytral toqlar olarǵa qatnasatuǵın bólekshelerdiń aromatlardıń ózgertpeydi, olar diagonalıq, yaǵnıy bóleksheni ózine ótkeredi: elektrondı elektrongá, myuondı myuonǵa hám

menen eki procent dállikke jetti ("Modeller... Modeller..." dep atalatuǵın paragraftaǵı tallawlarǵa qarańız).

t. b. $\bar{e}\mu$ yamasa $\bar{d}s$ tipindegi toqlar tabılmadı. Bizler keyinirek bul jaǵdaydıń 12 diagonallıq toqlardıń bar ekenligin boljaytuǵın teoriyaǵa sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz. Bul toqlar bilayınsha jazıladı:

$$\bar{e}e, \bar{\mu}\mu, \bar{\tau}\tau, \bar{\nu}_e\nu_e, \bar{\nu}_\mu\nu_\mu, \bar{\nu}_\tau\nu_\tau, \\ \bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s, \bar{c}c, \bar{b}b, \bar{t}t.$$

Neytral toqlardıń spirallıq strukturası zaryadlangan toqlardıń strukturasına salıstırǵanda ádewir quramalı. Tájiriybeler qosındı neytral toqtıń (j_α^n) eki tiptegi qosılıwshılardan turatuǵınlıǵın kórsetedi: shep $\bar{\psi}_L\gamma_\alpha\psi_L$ hám oń $\bar{\psi}_R\gamma_\alpha\psi_R$. "Joqarǵı" $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, u, c, t$ bólekshelerdiń shep toqları $\left(+\frac{1}{2} - Q \sin^2 \theta_W\right)$ koefficienti menen kiredi (Q - bólekshelerdiń zaryadı, θ_W - Vaynberg múyeshi dep atalatuǵın múyesh, bul haqqında tómende ayıladı). "Tómengi" e, μ, τ, d, s, b bóleksheleriniń shep toqları $\left(-\frac{x}{2} - Q \sin^2 \theta_W\right)$ koefficienti menen kiredi. Oń toqlardıń aldındaǵı koefficientler joqarǵı hám tómengi bóleksheler ushın birdey hám $-Q \sin^2 \theta_W$ shamasına teń.

Kelesi bapta bizler toqtıń usınday strukturasınıń shep bólekshelerdiń ázzi spin gruppasına qarata $(\nu_{eL}, e_L), (u_L, d_L)$ h.t.b. dubletlerdi payda etetuǵınlıǵın, al sonıń menen bir waqıtta ν_{eR}, e_R, u_R, d_R h.t.b. oń bólekshelerdiń izotoplıq singletler bolıwına juwap beretuǵınlıǵın kóremiz (payda bolıwı múmkin gúmannan qutılıw ushın usı jerde gáp etilip atırǵan ázzi izospinniń biz III bapta qarap ótken adronlardıń ádettegi izospinine hesh qanday qatnasınıń joq ekenligin atap ótiw gerek).

θ_W múyeshi boyınsha biz onıń eksperimentallıq mánisiniń

$$\sin^2 \theta_W \approx 0,22$$

ekenligin atap ótemiz (este saqlaw ushın $\sin^2 \theta_W \approx \sin^2 \theta_c \approx 0,22$ "mnemonlıq qatnas" qolaylı. $\theta_W \neq \theta_c$ teńsizliginiń orınlanatuǵınlıǵına itibar berin).

Neytral toqlardıń óz-ara tásirlesiwiniń Lagranjiani

$$\mathcal{L}^n = \frac{G_F}{\sqrt{2}} j^n j^n$$

túrine iye boladı.

Neytral toqlardıń bar ekenligi elektromagnitlik hám ázzi tásirlesiwlerdiń birden-bir teoriiyası tárepinen boljandı. Geypara waqıtları qısqaalıq ushın bul teoriyanı elektr-ázzi teoriya dep te ataydı. Neytral toqlardıń ashılıwı bul teoriyanıń jeńisi bolıp tabıladı. Kelesi bapta biz strukturası menen tanısatuǵın joqarıda táriyiplengen struktura túsiniklirek boladı. Biraq, onnan burın biz neytrinoliq massalar máselesine toqtaymız.

Sońǵı jılları bul másele úlken qızıǵıwshılıqtı payda ete basladı. Óziniń mazmunı boyınsha ol "burılǵan kvarklar" máselesine usaydı hám sonlıqtan onı "Zaryadlangan toqtıń qosılıwshıları" paragrafinan keyin dárhál tallaǵan aqılǵa muwapıq kelgen bolar edi. Biz onı usı baptıń aqırına jaylastırdıq. Sebebi aldınǵı paragraflarda gáp etilgen jaǵdaylarǵa salıstırǵanda eksperimentallıq situaciya házirinshe anıq emes bolıp qalmaqta.

Neytrinoliq massalar hám oscillyaciylar. Qos β -ıdıraw

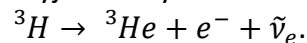
Leptonlıq hám kvarklıq toqlardı bir biri menen salıstırǵanda, biz kvarklıq toqlardıń ádewir ápiwayı ekenligin hám usı ápiwayılıqtıń neytrinolardıń massalarınıń nolge teń ekenligi menen baylanıslı ekenligin atap aytıdıq. Biraq, bul ápiwayılıq illyuziyalıq degen gúman bar: haqıyqatında, neytrinolardıń massaları nolge teń emes hám neytronlardıń hár qıylı tipleriniń arasında neytrinoliq oscillyaciylar dep atalatuǵın ótiwler orın aladı. Usınıń menen bir qatarda neytrino menen antineytrinoń arasında keskin ayırma joq.

Sońǵı waqıtlarǵa shekem ótkerilgen laboratoriyalıq eksperimentler neytrinolardıń massaları nolge teń emes degen tuwrıdan-tuwrı maǵlıwmatlardı bermedi. Biraq, bunday jaǵdaylarda joqarı dálilik elektronlıq neytrinolardı izertlewlerdiń barısında alındı: $m_{\nu_e} < 35$ eV. Myuonlıq hám,

ayırıqsha, τ -neytrino ushın joqarǵı shek ádewir pás: $m_{\nu_\mu} \lesssim 0,6 \text{ MeV}$, $m_{\nu_\tau} \lesssim 250 \text{ MeV}$ ¹⁶.

Neytrinolarǵı barlıq sortlarınǵı massaları ushın kosmologiyalıq sheklew de bar. Oǵan baylanıslı $m_{\nu_e} + m_{\nu_\mu} + m_{\nu_\tau}$ summasınıń mánisi 100 eV shamasınan úlken emes ekenligi anıq. Gershteyn menen Zeldovichler bul shektiń úlken partlanıw teoriyası boyınsha reliktlik neytrinolarǵı sanınıń reliktlik fotonlardıń sanına teń bolıwına kerek ekenligi menen baylanıslı bolatuǵınlıǵın ańǵardı (reliktlik fotonlardıń bar ekenligi 1965-jılı Penzias penen Vilson tárepinen ashıldı). Álemdegi hár bir protonǵa shama menen 10^9 - 10^{10} foton sáykes keledi¹⁷. Eger neytrinolarǵı da muǵdarı sonday bolsa hám hár bir neytrinoń massası, aytayıq, 100 eV bolsa, onda Álemdegi neytrino gazınıń massası ádettegi zattıń massasınan eki-úsh tártipke joqarı bolǵan bolar edi. Esaplawlar usınday joqarı tıǵızlıqtıń Álemniń tezirek evolyuciyasına alıp keletuǵınlıǵın hám sonlıqtan Álemniń jası ushın alıńǵan maǵlıwmatlar Jerdegi bazı bir taw jınıslarınıń jasınan da kishi bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Biraq, eger ν_μ menen ν_τ neytrinoları $\nu_e + \gamma$ bólekshelerine ıdıraytuǵın bolsa, onda olardıń massalarına qoyılatuǵın kosmologiyalıq shek óziniń háreketin toqtatadı.

1980-jılı Moskvadaǵı Teoriyalıq hám eksperimentallıq fizika institutında ótkerilgen eksperimentlerdiń nátiyjeleri baspadan shıqtı. Bul eksperimentler boyınsha elektronlıq neytrinoń massası nolge teń emes: $14 \text{ eV} \leq \nu_e \leq 46 \text{ eV}$. Bul juwmaq tritiydiń β -ıdırawındaǵı elektronlardıń spektrin izertlewdiń nátiyjeleri boyınsha islendi:



Elektron maksimalıq energiyaǵa jaqın energiya menen ushıp shıqsa, onda neytrinoń kinetikalıq energiyasın nolge jaqın. Bul jaǵday neytrinoń mımkin bolǵan massasın anıqlaw ushın optimallıq sharayattı dóretdi. Elektronlardıń spektriniń formasın onıń joqarı shegarasınıń qasında ólshep, eksperimentatorlar joqarıda keltirilgen nátiyjege keldi. Tritiydiń júdá kishi muǵdardaǵı energiyasını shıǵarıwı menen ıdırawı bunday ólshewler ushın júdá qolaylı boladı.

Tilekke qarsı, tek bir eksperimenttiń tiykarında mäseleni sheshilgen dep esaplawǵa bolmaydı. Bul házirgi zaman eksperimentallıq texnikasınıń mımkinshilikleriniń dálilikke iye bolǵan tájiriybelerge tiyisli. Házirgi waqıtları neytrinolarǵı massaların anıqlawǵa qaratılǵan tájiriybeler bir qatar laboratoriyalarda ótkerilmekte. Elektronlıq neytrinoń massasınıń shaması 10—30 eV intervalında jaylasqan ba degen másele jaqın jıllardıń ishinde ayqın boladı.

Neytrinoń massasınıń nolge teń emes ekenligi haqqındaǵı xabar tarqalǵanda bul xabar ásirese astrofiziklerde eń úlken entuziazm payda boldı. Astrofizikler massaǵa iye bolǵan neytrino eń keminde eki sebepke baylanıslı kerek dep esaplaydı. Birinshiden, galaktikalar menen galaktikalardıń jıynaǵınıń massaǵa iye bolǵan kórinbeytuǵın tajların túsindiriw ushın. Galaktikalardaǵı hám olardıń átirapındaǵı kórinbeytuǵın massalardıń bar ekenligi haqqında astronomlar bir neshe onlaǵan jıllar dawamında aytıp kelmekte¹⁸. Sonlıqtan massaǵa iye bolǵan

¹⁶ Eskertiw (1987-jıl, gúz): Házirgi kúnlerdegi shekler $m_{\nu_\mu} \lesssim 0,25 \text{ MeV}$, $m_{\nu_\tau} \lesssim 35 \text{ MeV}$.

Awdarıwshıdan: Neytrinoda massanıń bar bolıw faktı Standart model qaraytuǵın máselelerge kirmeydi hám sonlıqtan bul másele onı keńeytiwdiń zárúrli ekenligine alıp keledi. Neytrinolarǵı barlıq tipleriniń massalarınıń qosındısınıń joqarǵı eksperimentallıq bahası barlıǵı bolıp 0,28 eV. Hár qıylı áwladlarǵa kiretuǵın neytrinolarǵı massalarınıń kvadratlarınıń ayırması $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ shamasınan úlken emes.

¹⁷ Álemdi toltırıp turǵan reliktlik nurlanıwdıń (reliktlik fotonlardıń) spektri temperaturası 2,725 K bolǵan absolyut qara deneniń spektrine sáykes keledi. Onıń maksimumı 160,4 GGc jiyiligine (mikrotolqınlıq nurlanıw) yamasa 1,9 mm bolǵan tolqın uzınlıǵına iye. Reliktlik nurlanıw ushın qızılǵa awısıwdıń shaması ~ 1100 . Onıń energiyasınıń tıǵızlıǵı 0,25 eV/sm ($4 \cdot 10^{-14} \text{ Dj/m}^3$) yamasa 400—500 foton/sm³ shamasın quraydı (Awdarıwshı).

¹⁸ Házirgi waqıtları bul kórinbeytuǵın materiyanı "qarańǵı materiya" dep ataydı hám onıń tábiyatı usı kúnlerge (2021-jıl) shekem anıqlanǵan joq. Astronomiyadaǵı hám astrofizikadaǵı, sonıń menen birge

neytrinolarдың bultı dım qolaylı ob'ektke aylandı. Ekinshiden, sol neytrinoliq bultlardıń galaktikalardıń payda bolıw teoriyasınıń bazı bir qıyınshılıqların sheshiwdiń mımkinshiligi tuwıldı. Eki jaǵdayda da massası shama menen 10-30 eV bolǵan neytrinolar dım qolaylı.

Álbette, astrofizikalıq kóz-qaraslar boyınsha neytrinonıń massası joqarıda keltirilgen intervalda jatadı dep esaplaw ushın ele dım erte.

Házirgi waqıtları taza teoriyalıq kóz-qaraslar boyınsha neytrinolarдың massaların nolge teń dep esaplawǵa hesh qanday tiykar joq. Bul máselege qatnası boyınsha teoriyalıq awqamda húkimlik qılǵan kóz-qaraslar ótken on jıllıqta túpkilikli túrde ózgerislerge ushıradı. Burınları neytrinonıń massasın qanday da bir shamaǵa teń emes, al nolge teń dep esaplaw tábiyiy dep esaplandı. Sebebi "fizikada barlıq koefficientlerdiń shamasınıń tártibi boyınsha 1 ge teń, al tosattan kishi parametrdiń alınıwınıń keregi joq". Házir bolsa massaǵa iye bolmaǵan bóleksheler ushın qatań lokallıq simmetriya kerek dep esaplanadı, al neytrino ushın bunday simmetriya joq. Sonlıqtan neytrinolar ushın nollik massalardıń bolmawı kerek.

Neytrinonıń kútilgen massasınıń shaması qanday degen másele basqa is bolıp tabıladı. Bul máselede teoretiklerdiń arasında bir awızlıq joq. Biraq olardıń kópshiligi ullı birigiw modeline súyengen halda neytrinonıń massası júdá kishi, aytayıq, 10^{-5} eV shamasında dep esaplaydı. Bul san τ -leptonnıń massasınıń kvadratın ($\sim 1 \text{ GeV}^2$, ullı birlesiw haqqında tómende gáp etiledi) ullı birlesiwdiń massasına bóliw jolı menen alınadı. Eger τ -leptonnıń ornına elektron alınsa, onda 7 tártipke kishi shama alınadı. Sonlıqtan bul "pal ashıwlarǵa" ayırıqsha maǵana beriwdiń keregi joq.

Neytrinolarдың massaları haqqındaǵı máselelerge baylanıslı sońǵı jılları neytrinoliq oscillyaciya menen qos β -ıdıraw qubılıslarına bolǵan qızıǵıw keskin túrde ósti.

Neytrinoliq oscillyaciyalardıń bar ekenligine Pays penen Pishshioni neytral bolǵan K-mezonlardıń dástelerindegi oscillyaciyalıq effektlerdi boljaǵannan keyin birinshi ret 1950-jıllardıń ortasında Pontekorvo itibar berdi. Házirgi waqıtları neytrinoliq oscillyaciyalardı teoriyalıq tallawǵa arnalǵan júzlegen jumıslar belgili. Bir qatar laboratoriyalarda yadrolıq reaktorlarda bul qubılıstı eksperimentallıq jaqtan izlew jumısları ótkerilmekte¹⁹.

teoriyalıq fizikadaǵı qarańǵı materiya elektromagnit tásirlesiwge qatnaspaytuǵın hám sonlıqtan tuwrıdan-tuwrı baqlawǵa bolmaytuǵın materiyanıń forması bolıp tabıladı. Álemniń energiyalıq balansındaǵı qarańǵı materiyanıń tutqan ornı 22 procentti quraydı (Awdarıwshı).

¹⁹ Awdarıwshıdan: Neytrinoliq oscillyaciya dep elektronlıq, myuonlıq yamasa taonlıq neytrinonıń basqa sorttaǵı (basqa áwladqa kırıwshı) neytrinoǵa yamasa antineytrinoǵa aylanıwına aytadı. Teoriya neytrino tuwılǵannan momentten keyin onıń ótken jolınıń shamasına baylanıslı bóleksheni tabıwdıń itimallıǵınıń dáwirli túrde ózgeretuǵınlıǵın boljaydı.

2015-jılı Takaaki Kadzita hám Artur Makdonald neytrinoliq oscillyaciyalardıń bar ekenligin eksperimentte tastıyıqlaǵanı ushın fizika boyınsha Nobel sıylıǵın alıwǵa miyasar boldı.

Quyash neytrinosı mashqalasın sheshiw ushın neytrinoliq oscillyaciyalardıń bolıwı úlken áhmiyetke iye.

Oscillyaciya tómende keltirilgen neytrinolar baqlandı:

- Quyash neytrinosı (Devistiń xlor-argonlıq eksperimenti, SAGE, GALLEX/GNO galliy-germaniylı eksperimentler, Kamiokande menen SNO suw-sherenkovlıq eksperimentleri), BOREXINO scintillyaciyalıq eksperimenti;
- Kosmoslıq nurlardıń atmosferadaǵı atmosfera gazleriniń atomlarınıń yadroları menen tásirlesiwiniń saldarınan payda bolatuǵın atmosferalıq neytrino (Kamiokande, IMB);
- reaktorlıq antineytrino (KamLAND, Daya Bay, Double Chooz, RENO scintillyaciyalıq eksperimenti);
- Tezletkishlerdegi neytrino [eksperiment K2K (ingliz tilinde KEK To Kamioka) zattıń 250 km shamasındaǵı qalınlıq arqalı ótkendegi myuonlıq neytrinoları sanınıń kemeygenligin baqladı, 2010-jılı OPERA eksperiment myuonlıq neytrinonıń tau-neytrinoǵa oscillyaciasın hám bunnan keyin tau-leptonlardıń tuwılatuǵınlıǵı taptı, T2K (ingliz tilinde Tokai to Kamioka), MINOS];

ν_e hám ν_μ neytrinolarınıń ápiwayı misalında oscillyaciyalardıń mánisiniń qanday ekenligin ayqınlastıramız. Ázzi toqqa kiriwshi ν_e hám ν_μ neytrinolarınıń halı belgili massalarǵa iye bolmaydı, al m_1 hám m_2 massalarına iye bolǵan basqa ν_1 hám ν_2 hallarınıń ortonormirovkalangán kvantlıq-mexanikalıq superpoziciyası bolıp tabıladı

$$\nu_e = \nu_1 \cos \alpha + \nu_2 \sin \alpha; \quad \nu_\mu = -\nu_1 \sin \alpha + \nu_2 \cos \alpha.$$

Bul ańlatpalarda α múyeshi d- hám s-kvarklardaǵı Kabibbo múyeshine uqsas.

Misal sıpatında ν_μ neytrinolarınıń dástesin qaraymız. Meyli, dáste belgili bolǵan p impulsına iye bolsın. Bunday jaǵdayda massalardıń hár qıylı bolıwına baylanıslı ν_1 menen ν_2 ler hár qıylı boladı:

$$E_1 - E_2 = \sqrt{p^2 + m_1^2} - \sqrt{p^2 + m_2^2} \approx \frac{m_1^2 - m_2^2}{2E}.$$

Usınıń nátiyjesi sıpatında salıstırmalı faza ν_1 hám ν_2 waqıttan ǵárezli sıızqlı túrde ósedi hám dáslepki taza ν_μ dástede ν_e niń aralaspası payda boladı. Bul aralaspanıń úlesiniń qashıqlıqqa baylanıslı

$$\sin^2 2\alpha \sin \left(1,27 \frac{\delta m^2 L}{E} \right)$$

nızamı boyınsha dáwirli túrde ózgeretuǵınlıǵın arısat esaplawǵa boladı. Bul ańlatpada E arqalı neytrionıń energiyası (MeV lerdegi), L arqalı neytrionıń dereginen detektorǵa shekemgi qashıqlıq (metrlerdegi) belgilengen $\delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$.

Eger dástede neytrino jetkilikli dárejede joqarı energiyaǵa iye bolsa (ádette bunday jaǵday tezletkishlerde orın aladı), onda oscillyaciyalardıń júzege keletuǵınlıǵı dásteniń nishana menen hár qıylı bolǵan eki effekt boyınsha biliwge boladı. Birinshisi, basqa sorttaǵı neytrionıń payda bolıwı, ekinshiden, baslanǵısh neytrinolarardıń sanınıń kemeyiwı boyınsha. Reaktorlıq antineytrino $\bar{\nu}_e$ orın alǵan jaǵdayda birinshi effekt baqlanbaydı. Sebebi reaktorlıq neytrinolarardıń energiyası

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

reakciyasınıń bosǵasınan tómende jaylasadı. Sonlıqtan ekinshi effekt bolǵan baslanǵısh antineytrinolarardıń aǵıp ketiw effekti qaladı²⁰.

Aǵıp ketiwdiń baqlanǵanlıǵı haqqında 1980-jılı Savanna-River reaktorında (AQSh) isleytuǵın gruppa xabar berdi. Biraq, Franciyadaǵı hám Shveyariyadaǵı reaktorlarda ótkerilgen ólshewler bul effektiń bar ekenligin tastıyıqlamadı hám mınaday sheklerdi berdi:

$$\begin{aligned} \sin^2 2\alpha &\sim 1 \text{ bolǵan jaǵdayda } \delta m^2 \lesssim 10^{-2} \text{ eV}^2, \\ \sin^2 2\alpha &\sim 0,1 \text{ bolǵan jaǵdayda } \delta m^2 \lesssim 1 \text{ eV}^2. \end{aligned}$$

Tezletkishlerdegi oscillyaciyalardı baqlawǵa tırıswlar házirshe unamalı nátiyjelerdi bermedi. Kosmoslıq nurlar tárepinen Jerdiń atmosferasında tuwılǵan neytrinolarardı da oscillyaciyları tabılmadı. Eń dál ólshewler Baksan neytrinolıq observatoriyasında ótkerildi. Bul jerde Avstraliyanıń ústinde tuwılǵan hám Jer sharı arqalı ótken neytrinolar tárepinen júzege keltiriliwi kerek bolǵan reaksiyalardı baqladı. Derekten detektorǵa shekemgi usınday úlken jol orın alǵan bolsa da, aǵıp ketiwdiń hesh qanday belgisi kórinbedi (neytrionıń esaplawdıń nátiyjesinde alıńǵan esaplawǵa salıstırǵandaǵı).

Neytrinolıq oscillyaciylardı izlew jumısları dawam etpekte. Oscillyaciylar ashılǵan waqıtta (eger ashılса) olardı úyreniw ν_e menen ν_μ sisteması menen sheklenbeydi, al ν_τ neytrinosın da óziniń ishine aladı. Bunday jaǵdayda úsh leptonlıq toqtı táriyiplew úsh Eyler múyeshine hám fazadan ǵárezli bolǵan 3×3 túrindegi matricanı kirgiziwdi talap etedi. Leptonlıq toqlardı táriyiplew kvarklıq toqlardı táriyiplewden quramalaraq bolıp shıǵıwı da múmkin. Bunday quramalasıwdıń múmkinshiligi (kvarklardan ayırması) neytrionıń elektrlik jaqtan neytral bolıwı menen baylanıslı.

Kvarklar jaǵdayında lagranjianda bóleksheni bólekshege aylandıratuǵın tek $m\bar{\psi}\psi$ tipindegi

²⁰ Rus tilindegi "effekt uteshki" qaraqalpaq tiline "aǵıp ketiw effekti" túrinde awdarıldı (Awdarıwshı).

massalıq ağza boladı. Bul dirak massası dep atalatuǵın massa bolıp tabıladı. Neytrino jaǵdayında dirak massası menen bir qatarda bóleksheni antibólekshege aylandıratuǵın mayoran massaları dep atalatuǵın $m'\bar{\psi}C\psi$ tipindegi massalıq ağza da boladı (Bul ańlatpada C arqalı zaryadlıq túyinleslik matricası belgilengen. Kvarklar ushın bunday ağza bolmaydı, onıń sebebi kvarktır zaryadı menen antikvarktır zaryadınıń hár qıylı ekenligi menen baylanıslı).

Ádette leptonlardı leptonlıq kvant sanı L menen táriyipleydi. Onıń mánisi $e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ushın 1 ge hám $e^+, \mu^+, \tau^+, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$ ushın -1 ge teń. Ázzi tásirlesiwdiń standart teoriyasında leptonlıq san saqlanadı. Biraq, eger, neytrino mayoran massaǵa iye bolsa, onda leptonlıq san saqlanbaydı²¹. Bunday jaǵdayda úsh neytrinonıń hám úsh antineytrinonıń ornına biz altı haqıyqıy neytral bolǵan mayoran neytrinosına iye bolǵan bolar edik Ázzi toqlarǵa kiretuǵın neytral hallar usı mayoran neytrinolarınıń superpoziciyasınan turgan bolar edi.

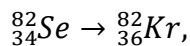
Leptonlıq sannıń saqlanbawı júdá ayırıqsha qubılıstı - neytrinosız ótetuǵın qos β -ıdırawdıń júriwin múmkin etedi. Ádettegidey β -ıdırawda bir d-kvarktır bir u-kvarkqa ótiwi júzege keledi. Al qos β -ıdırawda bolsa eki d-kvark eki u-kvarkqa ótedi. Eger usınday jaǵdayda antineytrino shıǵarılatsuǵın bolsa (27-súwret), onda ıdırawdı eki neytrinoliq ıdıraw dep ataydı $2\beta(2\nu)$, al eger bir kvark tárepinen shıǵarılǵan virtuallıq neytrino ekinshi kvark tárepinen jutılatsuǵın bolsa (28-súwret), onda ıdırawdı neytrinosız ıdıraw dep ataydı $2\beta(0\nu)$. Eger neytrino mayoranlıq bolsa, onda neytrinosız ıdırawdıń orın alıwı múmkin. Sebebi bul processte leptonlıq zaryad saqlanbaydı. Bul ıdırawdıń ekewi de uyıtqıwlar teoriyasınıń ázzi tásirlesiwdiń konstantası G_F tiń ekinshi tártibinde júredi hám sonlıqtan olar ushın kútiletuǵın yarım ıdıraw waqıtı $T_{1/2}$ júdá úlken.

Eki neytrinoliq processtiń itimallıǵın kóbirek yamasa kemirek isenimli túrde esaplawǵa boladı (onıń shaması bir yadrodan ekinshisine ótkende kúshli ózgeriske ushıraydı, sebebi energiyanıń shıǵarılıwınıń shamasına júdá sezgir). Al neytrinosız ıdırawdıń itimallıǵın isenimli túrde boljawǵa bolmaydı, leptonlıq sannıń saqlanbawınıń dárejesi menen mexanizmi házirshe belgisiz bolıp qalmaqta (neytrinosız processtiń amplitudasınıń neytrinonıń mayoranlıq massasına yamasa házirshe gipotezalıq oń zaryadlangan toqlardıń óz-ara tásirlesiw konstantasına proporcional ekenligin kórsetiwge boladı). Tájiriybelerde neytrinosız, eki neytrinoliq ıdırawlardı isenimli túrde baqlanǵan joq. Bul jóninde 1980-jılı bir qansha maǵlıwmatlar jariq kórdi hám onıń avtorları alınǵan nátiyjelerdi $2\beta(2\nu)$ -ıdırawınıń múmkin bolǵan kóriniwi dep interpretaciyaladı:

yarım ıdıraw waqıtı

$$T_{\frac{1}{2}}^{82} = 10^{19} - 10^{20} \text{ jıl}$$

shamasına teń



ıdırawı. Biraq basqa maǵlıwmatlar boyınsha

$$T_{\frac{1}{2}}^{82} = 10^{21,5} \text{ jıl}.$$

Laboratoriyalıq tómengi shegara $T_{\frac{1}{2}}^{48}$ ushın da (${}_{20}^{48}\text{Ca} \rightarrow {}_{22}^{48}\text{Ti}$), $T_{\frac{1}{2}}^{76}$ ushın da (${}_{32}^{76}\text{Ge} \rightarrow {}_{34}^{76}\text{Se}$)

shama menen usınday. Bul teńsizliklerdiń tiykarında neytrinonıń mayoranlıq massasına joqarıdan qoyılatsuǵın shegaranı alıwǵa boladı. Hár qıylı avtorlardıń maǵlıwmatları boyınsha, bul shekler hár qıylı hám birden júzlegen elektronvoltke shekem ózgeredi.

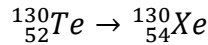
Qos β -ıdırawdı basqa yadrolarda laboratoriyalıq izlew isleri perspektivalıq bolıp kórinedi. Misalı ${}_{54}^{136}\text{Xe}$, ${}_{42}^{100}\text{Mo}$, ${}_{48}^{116}\text{Cd}$, sonıń menen birge pozitronnıń shıǵarılıwı menen júretuǵın atomlıq K-qabıqtan elektronnıń jutılıwı:

²¹ Neytronlardıń Mayorana fermionı yamasa Dirak fermionı bolıwı múmkin. (standart modelde barlıq fermionlar, solardıń ishinde neytrinolar dirak fermionları bolıp tabıladı. Elementar bóleksheler fizikasında mayoran fermionı (bólekshesi) dep óziniń antibólekshesi menen birdey bolǵan bólekshenge aytadı. Dirak fermionı bolǵan bólekshesi óziniń antibólekshesi bolıp tabılmaıdı.

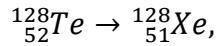
$e^- + (A, Z + 2) \rightarrow e^+ + (A, Z)$
 (mınaday tiptegi ótiwler ushın: ${}^{99}_{44}\text{Ru} \rightarrow {}^{99}_{42}\text{Mo}$, ${}^{106}_{48}\text{Cd} \rightarrow {}^{106}_{46}\text{Pd}$, ${}^{124}_{64}\text{Xe} \rightarrow {}^{124}_{62}\text{Te}$, ${}^{130}_{56}\text{Ba} \rightarrow {}^{130}_{54}\text{Xe}$, ${}^{138}_{68}\text{Se} \rightarrow {}^{138}_{56}\text{Ba}$).

$$T_{\frac{1}{2}}^{130} \approx 10^{21,3} \text{ jul}$$

bolǵan



hám



sonıń menen birge

$$T_{\frac{1}{2}}^{130} : T_{\frac{1}{2}}^{128} \approx 6,1 \cdot 10^{-4}$$

bolǵan ıdırawlardıń orın alıwınıń múmkin ekenligin interpretaciyalaytuǵın tábiyiy tellurdaǵı ${}^{130}_{54}\text{Xe}$ hám ${}^{128}_{54}\text{Xe}$ izotoplarınıń koncentraciyaları haqqındaǵı janapay geoximiyalıq maǵlıwmatlar da bar (mayoranlıq massa tárepinen júzege keltirilgen neytrinosız ıdırawdaǵı bul qatnastır shaması shama menen $1,25 \cdot 10^{-2}$ ni, al eki neytrinoliq ıdırawda bolsa shama menen $1,5 \cdot 10^{-4}$ shamasın quraydı). Maǵan neytrinonıń massası haqqında qanday da juwmaqlar shıǵarıwǵa ele erte bolıp kórinedi. Biraq, bazı bir avtorlar usınday maǵlıwmatlardıń tiykarında $m' = 10 - 30$ eV teńligi orınlı dep esaplaydı²².

Bul bapta dara máselelerge negizsiz kóp dıqqat awdarılǵanday bolıp kórinedi, al kúshli tásirlesiwlerge baǵıshlanǵan aldınǵı bapta bolsa tap sonday rangtaǵı máseleler bolsa tek esletilip ótildi. Bunday tásir tolıq durıs emes, usı bapta da, aldınǵı bapta da óz-ara tásirlesiwdiń lagranjianınıń qalayınsha dúzilgenine tiykarǵı dıqqat awdarıldı.

Eksperimentlerdiń isenimligi haqqında

Elementar bóleksheler fizikasın adamlar dóretdi. Adamlar, solardıń ishinde eksperimentatorlar da, teoretikler de, qátelesiwge beyim. Bazı bir qáteler haqqında biz joqarıda aytıp óttik. Mısalı, óziniń waqtında β -ıdırawlıq óz-ara tásirlesiwlerdiń túri durıs emes anıqlandı, kóp waqıtlar dawamında

$$\pi \rightarrow e\nu, K_L^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$$

ıdırawlarınıń itimallıqları ushın durıs emes bolǵan joqarı shekler saqlanıp keldi.

Jaqınaraq bolǵan mısallar da bar. Fizikler qubılıslardıń júdá úlken bolǵan jıyınqların nelikten eksperimentlerde anıqlanǵan dep esaplaydı? Házirgi waqıtları durıslıǵı tastıyqlandı dep esaplanatuǵın qubılıslar bolajaqtaǵı eksperimentlerde ashılmaı ma? Eger ótmishte júdá kóp sanlı durıs emes nátiyjeler orın alǵan bolsa, onda sol eksperimentlerdiń durıslıǵına kepillik qayda?

Eger nátiyje hár qıylı eksperimentallıq metodikalardı paydalanatuǵın bir birinen ǵárezsiz hár qıylı gruppalar tárepinen alınǵan bolsa, onda ol isenimli nátiyjelerdiń razryadına kiredi hám bul jaǵday nátiyjeniń isenimligine kepillik beredi. Bul shárt pútkilley zárúrli, biraq jetkiliksiz, júz procentlik kepillikti bere almaydı. Qubılıs ilimniń eń aldınǵı shetinde jatıwdı qoysa, ilimiy ashılıw tiykarında jatqan jatqan qubılısqa salıstırǵanda mırılǵan, hátte millionlaǵan waqıyalardıń statistikasınday bolıp qaytadan tiklenetuǵın bolsa júz procentlik kepillik orın alǵan payda boladı.

²² Eskertiw (1983-jıl, gúz). Jańa ólshepler (Kirstenniń gruppası, Geydelburg, 1982) burın alınǵan nátiyjelerdi tastıyqlamadı hám mınaday qatnastı berdi:

$$T_{\frac{1}{2}}^{130} : T_{\frac{1}{2}}^{128} = (0,90 \pm 0,95) \cdot 10^{-4}.$$

Jańa esaplawlar bul qatnastır kútiletuǵın shaması ushın

$$2\beta(0\nu) \text{ ushın } 4,4 \cdot 10^{-2}, \\ 2\beta(2\nu) \text{ ushın } 2,3 \cdot 10^{-4}$$

shamaların berdi.

Bunday jaǵdayda qubılıstı táriyipleytuǵın shamalar útirden keyingi bir neshe belgige shekem belgili boladı. Basqa jol - qanshama sanlıq bolsa, sonshama sapalıq - Drugoy put — ne stolko kolishestvenniy, skolko kashestvenniy — bir qatar baylanıslı bolǵan qubılıslardı izlew hám tabıw bolıp tabıladı. Bunday jaǵday ilimiy ashılıwlardan keyin jiwi bolıp turadı. Bul jollardıń ekewi de P-juplıqtıń hám CP-juplıqtıń saqlanbawı, sharma hám t. b.

Joqarı energiyalar fizikası oblastında islewdiń qıyınshılıqlarınıń biri tallawlar ushın ele júdá shiyki bolǵan nátiyjelerdiń jiwi usınılıwı bolıp tabıladı. Bul jerde ele ıssı bolǵan eksperimentallıq maǵlıwmatlardı "tabadan birden alatuǵın" fizik-teoretikler de ayıplı. Bul nátiyjeni túsindiriw ushın úlken kúshlerdiń jumsalıwına alıp keledi, al ótkerilgen jumıslar bir jıldan keyin sabınnıń kóbigindey bolıp jarıladı. Álbette, bul jerde eksperimentallıq gruppalardıń arasındadı konkurenciya da úlken orındı iyeleydi. Biraq, bir qansha waqıttan keyin haqıyqatlıq anıqlanadı hám turbulentliktiń ornına ápiwayı ayqınlıq keledi.

V bap

ELEKTRÁZZI TEORIYA

Ázzi tásirlesiwdiń ózgeshelikleri. $SU(2) \times U(1)$ simmetriyası. Foton hám Z-bozon. Zaryadlangan toqlardıń óz-ara tásirlesiwı. Zaryadlanbağan toqlardıń óz-ara tásirlesiwı. W-hám Z-bozonlardı izlew. Simmetriyanıń buzılıwı. Xiggs bozonları. Modeller, modeller... Skalyarlar — 1-sanlı mashqala. Teoriyanıń rawajlanıwı haqqında

Ázzi tásirlesiwdiń ózgeshelikleri

Bunnan aldınıǵı bapta tallanǵan ázzi processlerdiń ózine tán bolǵan belgileri mınalardan ibarat:

1. Olardıń ázziligi (ástelik penen ótetuǵınlıǵı). Ázzi processlerdiń itimallıǵı kúshli hám elektromagnit processlerdiń itimallıǵınan kóp tártipke úlken.
2. Tásirlesiwdiń kishi radiusı — bul shama kúshli tásirlesiwlerdiń radiusınan minimum eki tártipke kishi. 1982-jılǵa shekem ázzi processlerdiń hesh qaysısında noqatlıq tórt fermionlıq óz-ara tásirlesiwden qanday da bir awıtqıw baqlanbadı.
3. Keńisliklik hám zaryadlıq juplıqlardıń kúshli, maksimal múmkin bolǵan saqlanbawı. Mısalı, zaryadlangan toqlarǵa tek bólekshelerdi táriyipleytuǵın spinorlardıń shep qurawshıları ǵana hám antibólekshelerdi táriyipleytuǵın spinorlardıń on qurawshıları ǵana kiredi.
4. CP-juplıqtıń saqlanbawı.
5. Aromatlardıń saqlanbawı (ersilik, sharm hám t. b.).
6. Ázzi tásirlesiwlerde neytrionıń qatnasatuǵınlıǵı.

Keskin túrdegi ayırmaǵa iye bolsa da ázzi hám elektromagnit tásirlesiwler, kórinip turǵanıday, bir tásirlesiwdiń kórinıwı bolıp tabıladı. Bunday tásirlesiwdi sońǵı jılları elektrázzi tásirlesiw degen atamaǵa iye boldı.

Elektrázzi tásirlesiwge sáykes zaryadlangan toqlardıń tásirlesiwleri W-bozonlar menen, al neytral toqlardıń tásirlesiwleri Z-bozonlar menen almasıwdıń saldarınan júzege keledi (elektromagnit toqlardıń tásirlesiwiniń fotonlar menen almasıwdıń saldarınan júzege keletuǵınlıǵınday). Usınday jaǵdayda ázzi tásirlesiwdiń ázziligi menen kishi radiusqa iye bolıwı W-hám Z-bozonlardıń massalarınıń júdá úlken ekenligi menen baylanıslı (fotonlardan ayırması sonnan ibarat). Ázzi tásirlesiwdiń basqa ózgeshelikleri teoriyanıń baslanǵısh fermionlıq toqları haqqındaǵı boljawǵa jaylastırılǵan. Sonlıqtan elektrázzi teoriyadaǵı ázzi tásirlesiwdiń aynalıq-asimmetriyalı ekenligine emes, al elektromagnitlik tásirlesiwdiń aynalıq-simmetriyalı ekenligine tańlanıw kerek.

 $SU(2) \times U(1)$ simmetriyası

Elektrázzi tásirlesiwdiń teoriyası XX ásirniń 60-jılları dóretildi. Onı dóretiwge qatnasqanı ushın Gleshou, Salam hám Vaynberg 1979-jılı Nobel sıylıǵın alıwǵa miyasar boldı. Kalibrovkalıq $SU(2) \times U(1)$ simmetriya teoriyanıń fundamenti bolıp tabıladı. Bul ańlatpada $SU(2)$ - ázzi izospinniń gruppası, $U(1)$ - ázzi giperzaryadtıń gruppası bolıp tabıladı. Elektrázzi teoriyanı elektrodinamikadan hám xromodinamikadan ózine tán eki belgi ajıratadı.

Birinshiden, kalibrovkalıq $SU(2) \times U(1)$ simmetriya spontan buzılǵan, usınıń nátiyjesinde aralıqlıq bozonlar dep atalatuǵın W^\pm hám Z^0 kalibrovkalıq bozonlar massaǵa iye.

Ekinshiden, teoriya eń bastan baslap aynalıq-simmetriyalı emes. Bul asimmetriya teoriyanıń tiykarına qalanǵan: fermionlardıń shep qurawshıları $\psi_L = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi$ $SU(2)$ gruppasına qarata

izotoplıq dubletlerdi payda etedi:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} s \\ c' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L.$$

Al, usınıń menen bir waqıtta usı 12 fermionnıń oń qurawshıları $\psi_R = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\psi$ izotoplıq singletler bolıp tabıladı (shtrixlardıń járdeminde IV bapta tallanǵan "burılǵan kvarklar" belgilengen). Ázzi izospinniń kúshli tásirlesiwdi táriyipleytuǵın globalıq izotoplıq simmetriyaǵa hesh qanday qatnasqa iye emes ekenligin atap ótemiz. Tap usınday jaǵday ázzi giperzaryadta da orın aladı.

Buzılmaǵan $SU(2) \times U(1)$ simmetriya massaǵa iye bolmaǵan tórt vektorlıq bozonnıń bar bolıwın talap etedi. Solardıń ekewi zaryadlanǵan W^+ penen W^- hám qalǵan ekewi neytral Z^0 menen B^0 . Bunday jaǵdayda úsh W bozon $SU(2)$ gruppaaǵa qarata tripletti beredi, al B^0 - bozon - usı gruppaaǵa qarata singlet. W -bozonlar ázzi izospinniń $SU(2)$ gruppasınıń kalibrovkalıq maydanları bolıp tabıladı. Olardıń óz-ara tásirlesiw "zaryad" penen - kalibrovkalıq tásirlesiwdiń konstantası g_2 menen táriyiplenedi. B^0 -bozon ázzi giperzaryadtıń $U(1)$ gruppasınıń kalibrovkalıq maydanı bolıp tabıladı. Onıń tásirlesiw g_1 "zaryadı" menen táriyiplenedi.

Foton hám Z-bozon

Buzılmaǵan $SU(2) \times U(1)$ gruppalıq strukturanıń kóz-qarası boyınsha fotonnıń maydanı A menen Z -bozonnıń maydanı W^0 menen B^0 nıń maydanına salıstırǵanda kemirek fundamentallıq hám keyingi bozonlardıń bir birine salıstırǵandaǵı óz-ara-ortogonallıq sıızıqlı kombinaciyaları bolıp tabıladı:

$$\begin{aligned} A &= B^0 \cos \theta_W + W^0 \sin \theta_W, \\ Z &= -B^0 \sin \theta_W + W^0 \cos \theta_W. \end{aligned}$$

Bul ańlatpalarda θ_W shaması Vaynberg múyeshi bolıp tabıladı. Bizler házir $\tan \theta_W = g_1/g_2$ ekenligin kóremiz. A menen Z tiń superpoziciyaları simmetriyanıń spontan buzılıwınıń nátiyjesinde olardıń biri A massasız qaladı, al basqası, Z basqa eki W^+ hám W^- "qulaǵan perishteler" sıyaqlı massaǵa iye boladı.

Eger $SU(2) \times U(1)$ -simmetriyanıń spontan buzılıwınıń nátiyjesinde Q elektr zaryadınıń saqlanıwı menen baylanıslı bolǵan $U(1)_{em}$ -simmetriya buzılmaı qalatuǵın bolsa, onda A menen Z maydanlarınıń túrin ańsat tabıwǵa boladı. Bul jaǵdaydı kórsetemiz.

Kovariantlı tuwındı D_μ dan baslaymız. $W = W^+, W^-, W^0$ maydanlarınıń tripletiniń deregi izospin T , al B^0 maydanınıń deregi Y giperzaryad (dáliregi $\frac{1}{2}Y$) ekenligin esapqa alıp, kovariant tuwındı ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$D_\mu = \partial_\mu + i(g_1 \frac{1}{2} Y B_\mu^0 + g_2 T W_\mu).$$

Endi anıqlama boyınsha Q zaryadı (e birliğindegi), giperzaryad Y hám izospinniń úshinshi proekciyası T_3 bir biri menen $Q = T_3 + \frac{1}{2}Y$ ańlatpasınıń járdeminde baylanısqa ekenligin esapqa alamız hám deregi elektr zaryadı Q hám oǵan ortogonallıq Z bolǵan A maydanın ayıramız. Nátiyjede sáykes zaryadlarǵa iye A, Z, W^+, W^- maydanlarınıń shıǵarıw amplitudası mınaday túrge iye boladı

$$\begin{aligned} &i \frac{g_1 g_2}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} Q A + i \sqrt{g_1^2 + g_2^2} (T_3 - Q \sin^2 \theta_W) Z + \\ &+ i g_2 (T^- W^+ + T^+ W^-). \end{aligned}$$

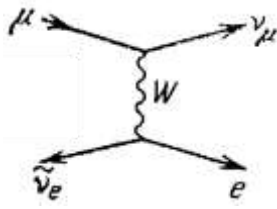
A menen Z tiń haqıyqatında da joqarıda keltirilgen B^0 hám W^0 maydanlarınıń superpoziciyası menen táriyipleniwinin kerek ekenligin ańsat kóriwge boladı. Bul ańlatpa elektrázzi teoriyanıń "oraylıq formulası" bolıp tabıladı: Bul ańlatpa elektromagnit tásirlesiw (birinshi qosılıwshı), neytral toqlar (ekinshi qosılıwshı) hám zaryadlanǵan toqlar (úshinshi qosılıwshı) haqqında barlıq informaciyanı óziniń ishine aladı. Onnan dara jaǵdayda elektromagnit tásirlesiwdiń konstantası e

niñ g_1 hám g_2 arqalı ańlatılatuǵınlıǵı kórinip shıǵadı

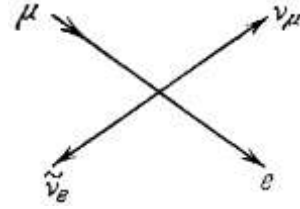
$$e = \frac{g_1 g_2}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} = g_2 \sin \theta_W.$$

Zaryadlangan toqlardıń óz-ara tásirlesiwi

e konstantasınıń fotonlardıń shıǵarılıwı menen jutılıwın táriyiplegeni sıyaqlı g_2 konstantası W^\pm -bozonlarınıń shıǵarılıwı menen jutılıwın táriyipleydi. Biz $g_2 > e$ teńsizliginiń orınlanatuǵınlıǵın kóremiz hám, usıǵan sıykes, ázzi tásirlesiw elektromagnit tásirlesiwden kúshlirek boladı. Usı waqıtlarǵa shekem baqlanǵan ázzi tásirlesiw processlerindegi shamalardıń elektromagnit tásirlesiw processlerindegi shamalardan kóp tártip ese kishi bolıwı W-bozonlardıń júdá salmaqılı ekenligi menen baylanıslı.



29-súwret.



30-súwret.

Mısal sıpatında myuonniń ıdırawın beretuǵın $\bar{e}_L \gamma_\alpha \nu_{eL}$ hám $\bar{\nu}_\mu \gamma_\alpha \nu_{\mu L}$ toqlarınıń óz-ara tásirlesiwini qaraymız. 29-súwrette bul tásirlesiwdiń W-bozon menen almasıw arqalı júzege keletuǵınlıǵı kórsetilgen. 30-súwrette bul tásirlesiw bir noqattaǵı eki toqtıń tásirlesiwi sıpatında kórsetilgen. W-bozon tárepinen alıp júreletuǵın 4-impulstıń kvadratı q^2 onıń massası bolǵan m_W^2 shamasına salıstırǵanda kishi bolǵanda bunday jaqınlasıw jaqsı jaqınlasıw bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda W-bozonniń propagatorı²³ onıń alıp júretuǵın impulsinen ǵárezli:

$$\frac{1}{m_W^2 - q^2} \rightarrow \frac{1}{m_W^2}.$$

Keńisliklik táriyiplewdi paydalanıp mınalardı aytıwǵa boladı: bul jaǵdayda awır vitruallıq bozon shıqqan noqattan jutılıw noqatına shekem usı processke qatnasatuǵın bólekshelerdiń tolqın uzınlıǵına salıstırǵanda esapqa almawǵa bolatuǵınday kishi aralıqtı ótedi.

29- hám 30-súwretlerge qarap G_F shaması g_2 arqalı ańlatıwǵa bolatuǵınlıǵın kórsetiw qıyın emes

$$G_F = \frac{g_2^2}{4\sqrt{2}m_W^2} = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}m_W^2 \sin^2 \theta_W}.$$

Bul teńlikte $G_F = 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ shaması Fermi konstantası bolıp tabıladı. $\alpha = e^2/4\pi$. $\sin^2 \theta_W$ shamasınıń mánisi neytral toqlar menen ótkerilgen tájiriybelerden anıqlanatuǵınlıǵı bunnan aldınǵı paragrafta esletilip ótildi hám onıń durılıǵına keyinirek isenemiz. Bul tájiriybeler $\sin^2 \theta_W \approx 0,22$ ekenligin beredi. G_F ushın jazılǵan teńlikten usınday jollar menen W-bozonlardıń massasını boljay alamız:

$$m_W = \left(\frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F} \right)^{1/2} \frac{1}{\sin \theta_W} = \frac{37,3}{\sin \theta_W} \text{ GeV} \approx 80 \text{ GeV}.$$

Bul jerde $\sin \theta_W$ shamasınıń tek g_2 menen e shamalarınıń arasındaǵı baylanıstı anıqlap ǵana

²³ Awdarıwshıdan: Propagator (tarqatıw funkciyası) - tásirlesiwdiń eki aktınıń arasındaǵı relyativistlik maydannıń (bóleksheniń) tarqalıwınıń itimallıǵınıń amplitudasın anıqlaytuǵın funkciya. Propagator virtuallıq bólekshelerdiń tásirin esapqa alıwǵa múmkinshilik beredi. Shın mánisinde propagator tolqın teńlemesiniń Grin funkciyası bolıp tabıladı.

qoymaytuǵınlıǵı, al neytral toqlardıń túrin de anıqlaytuǵınlıǵı principiallıq jaqtan áhmiyetli bolıp tabıladı.

Neytral toqlardıń bir biri menen tásirlesiwi

"Oraylıq formulaǵa" qaytıp kelemiz hám Z-bozon bar aǵzanı qaraymız. Onnan bunnan aldırǵı baptaǵı "Neytral toqlar" táriyplengen toqtıń túrinin kelip shıǵatuǵınlıǵına ańsat kóz jetkeriwge boladı. Haqıyqatında da, shep qurawshılar ushın bizler "joqarǵı" dep ataǵan barlıq bóleksheler ushın $T_3 = +\frac{1}{2}$, al bizler "tómengi" dep ataǵan barlıq bóleksheler ushın $T_3 = -\frac{1}{2}$. Sonlıqtan joqarǵı hám tómengi bóleksheler ushın shep toqlar sáykes

$$(\frac{1}{2} - Q \sin \theta_W) \bar{\psi}_L \gamma_\alpha \psi_L \text{ hám } (-\frac{1}{2} - Q \sin \theta_W) \bar{\psi}_L \gamma_\alpha \psi_L$$

túrine iye boladı. "Oń bólekshelerdiń" izotoplıq spini nolge teń. Sonlıqtan oń toqlar ushın "oraylıq formuladan"

$$Q \sin \theta_W \bar{\psi}_L \gamma_\alpha \psi_L$$

ańlatpası kelip shıǵadı.

Neytral toqlardıń ázzi tásirlesiwi virtuallıq Z-bozonlar menen almasıw jolı menen júzege keledi. Z-bozonnıń shıǵarılıw konstantası $\sqrt{g_1^2 + g_2^2}$ shamasınıń W-bozonnıń shıǵarılıw koefficienti bolǵan g_2 shamasınan úlken ekenligin ańǵaramız. Olardıń qatnası $1/\sin \theta_W$ shamasına teń. Biraq, tap sol "oraylıq formuladan" Z- hám W-bozonlardıń massalarınıń qatnasınıń da $1/\sin \theta_W$ shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı (bul haqqında keyinirek ayılıadı. Sonlıqtan, neytral hám zaryadlangan toqlar ushın effektivlik tórt fermionlıq konstanta birdey:

$$G_F = \frac{g_2^2}{4\sqrt{2}m_W^2} = \frac{g_1^2 + g_2^2}{4\sqrt{2}m_W^2}.$$

Bul jerde biz aromatlar haqqındaǵı máselege itibar beremiz. Ázzi izotoplıq fermionlıq dubletlerge d', s', b' "burılǵan" kvarklar kiretuǵın bolǵanlıqtan, zaryadlangan toqlar óziniń ishine hár qıylı áwladlar arasındǵı ótiwlerdi de aladı. Neytral toqlardı bunday jaǵday orın almaydı: elektrázzi teoriyada aromatlardı ózgartetuǵın ázzi toqlar joq. Bul barlıq tómengi kvarklar ushın ázzi toqlardıń birdey formaǵa iye bolǵanlıqtan hám sonlıqtan tolıq neytral toqqa $\bar{d}'d' + \bar{s}'s' + \bar{b}'b'$ summası túrinde kiredi.

Shtrixlangan hám shtrixlanbaǵan kvarklardı baylanıstıratuǵın matricanıń unitar ekenligin, yaǵnıy

$$\bar{d}'d' + \bar{s}'s' + \bar{b}'b' = \bar{d}d + \bar{s}s + \bar{b}b$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın kórsetiw qıyın emes. Al bul jaǵday neytral toqlardıń aromatlar boyınsha diagonallıq ekenligin ańǵartadı. Tap usınday jaǵday elektromagnit toqlarǵa da tiyisli.

W- hám Z-bozonlardı izlew

Birden-bir ázzi hám elektromagnit tásirlesiwler teoriyasın tekserip kóriw jolındaǵı sheshiwshi qádem W- hám Z-bozonlardıń ashılıwı bolıp tabılǵan bolar edi. Olardıń massaları, bul bólekshelerdiń ayırım ıdıraw kanallarınıń parciallıq keńlikleri hám olardıń tuwılıwınıń kesimi teoriya tárepinen tolıq boljanadı.

W- hám Z-bozonlardı óndiriw ushın CERN de proton-antiprotonlıq kollayder soǵıldı hám ol iske 1081-jılı jaz aylarında iske tústi. Kollayderde soqlıǵısatuǵın hár bir dásteniń energiyası 270 GeV. Massaları 80 GeV hám 90 GeV shamalarına jaqın bolǵan W- hám Z-bozonlardıń tuwılıwı ushın bunday energiya tolıq jetkilikli.

Aytayıq, W^+ -bozonnıń tuwılıwı ushın yadrodaǵı u -kvarktıń antiprotondaǵı \bar{d} -kvark penen soqlıǵıswı kerek:

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+.$$

Protonlardıń monoxromat dástesin impulsler boyınsha keń tarqalıwǵa iye bolǵan kvarklardıń dástesini dep qarawǵa boladı. Antiproton da tap sonday bolıp kórinedi. W-bozonniń tuwılıw processinde kvark ózine impulsini boyınsha sáykes keletuǵın antikvarktı saylap aladı. W-bozonniń payda bolıwın onıń leptonlıq ıdırawı boyınsha baqlaǵan jaqsı:

$$W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} \nu_e \text{ yamasa } W^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \nu_e.$$

Nátiyjede úlken kóldeneń impulslerge iye bolǵan jalǵız qozǵalatuǵın zaryadlangan leptonlar payda boladı.

CERN degi kollayderdiń proektlik jarqınlıǵı $\sim 10^{30} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Tilekke qarsı, birinshi jıldıń dawamında haqıyqıy jarqınlıq $K 10^{20} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ shamasına jaqın boldı. Nátiyjede W- hám Z-bozonlarınıń siyrek tuwılıw processini olardı baqlawǵa múmkinshilik bermedi. Kollayderdegi jarqınlıqtı $10^{28} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ shamasına jetkeriw hár kúni bir W-bozonniń ıdırawın hám 10 kúnniń ishinde bir Z-bozonniń ıdırawın baqlawǵa múmkinshilik bergen bolar edi²⁴

Házirgi waqıtları jáne bir proton-antiprotonlıq kollayder - Tevatron Bataviyadaǵı Fermi milliy laboratoriyasında qurılıp atır. Bul jerde dástelerdiń hár biriniń energiyası $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV}$ shamasına teń. 1990-jılları Serpuxov qalasınıń janında tezletiwshi-jıynawshı kompleksti paydalanıwǵa beriw jobalastırılmaqta. Ondaǵı soqlıǵısıwshı dástelerdiń hár qaysısınıń energiyasınıń shamasın 3 TeV ke jetkeriw múmkinshiligi bar.

Úlken úmitler qurılısı CERN de 1982-jılı baslangan hám 1989-jılı isley baslawı kerek bolǵan LEP elektronlıq-pozitronlıq kollayderi menen baylanıslı. Bul jerde soqlıǵısıwshı dástelerdiń hár qaysısınıń energiyası $m_Z/2$ shamasına teń bolǵanda Z-bozonlarınıń rezonanslıq tuwılıwınıń baqlanıwı kerek:

$$e^+ e^- \rightarrow Z^0.$$

LEP te hár bir 2-3 sekunda bir Z-bozon tuwıladı dep kútilmekte. Bul Z-bozonlardıń haqıyqıy fabrikası boladı.

Z-bozonlardıń tuwılıwı ushın arnalǵan elektronlıq-pozitronlıq kollayderdi dóretiw jobası Stenford tezletiwshi orayında (SLAK) usınıldı. Bul jerde kollayderdiń tiykari házirgi waqıtları islep turǵan sızıqlı tezletkish bolıp tabıladı.

Z-bozonlardı izertlewdegi eń birinshi ret sheshiliwi kerek bolǵan máselelerdiń biri bul bólekshelerdiń tolıq keńligin ólshew bolıp tabıladı. Másele sonnan ibarat, eger fermionlardıń belgili bolǵan úsh áwladınan basqa da áwladlar bar bolǵan jaǵdayda, onda Z-bozonlar belgili bolǵan áwladlarǵa kiretuǵın fermionlar menen qanday baylanısqa iye bolsa, basqa áwladlarǵa kiretuǵın fermionlar menen de tap sonday bolıp baylanısqa bolıwı kerek. Bunday jaǵdayda, eger awır zaryadlangan leptonlar menen kvarklardıń massaları Z-bozonlar usınday bólekshelerdiń jubına ıdıray almaytuǵınday shamada sonshama úlken bolsa, onda ele belgisiz bolǵan neytrinolardıń jubına ıdırawdıń sózsiz orın alıwı kerek. Solay etip, Z-bozonniń tolıq keńligi neytrinonıń sortlarınıń tolıq sanınıń esaplaǵışı bola aladı.

Keyinirek LEP tiń energiyasın kóteriwi názerde tutılǵan. Sonıń menen birge saqıyna tárizli emes al, energiyası joqarı bolǵan sızıqlı elektronlıq-pozitronlıq dásteler kollayderin qurıw bolǵan. Olar W^+W^- -juplarınıń tuwılıwına tiyisli bolǵan elektr-ázzi teoriyanıń júdá juqa, biraq júdá áhmiyetli bolǵan boljawların úyreniwge múmkinshilik beredi.

²⁴ Kitaptıń aqırındaǵı 1983-jılı jazılǵan eskertiwge qarańız.

Awdarıwshıdan: W- hám Z-bozonlar 1983-jılı CERN degi UA1 hám UA2 detektorlarına iye super-protonlı kollayderde (SPS) ashılıwı elementar bólekshelerdiń standart modeliniń eń baslı tabıslarınıń biri dep esaplanadı.

Simmetriyanıń buzılıwı

Biz elektrázzi tásirlesiwdiń imaratına aldırǵı qapıdan kalibrovkalıq simmetriya tárepinen kirdik. Bunday jaǵdayda barlıǵı júdá sulıw bolıp kórinedi. Biraq, onda áhmiyeti kishi bolmaǵan, biraq, sulıwlıǵı ádewir tómén bolǵan bólim de bar.

Másele sonnan ibarat, kalibrovkalıq $SU(2) \times U(1)$ simmetriya massaǵa iye bolmaǵan kalibrovkalıq bozonlar hám massaǵa iye bolmaǵan fermionlar ushın ǵana orınlanadı [sońǵı jaǵday lagranjiandaǵı massaǵa iye bolǵan aǵzalar $m\bar{\psi}\psi$ bir biri menen shep izodubletlerdi hám oń izosingletlerdi ($\bar{\psi}\psi = \bar{\psi}_R\psi_R + \bar{\psi}_L\psi_L$) baylanıstıradı hám sonlıqtan izospinniń saqlanıwın da, giperzaryadtıń saqlanıwın da buzadı]. Solay etip, tábiyatta tek lokallıq simmetriya ǵana emes, al globallıq $SU(2) \times U(1)$ simmetriya da buzılǵan.

Standart elektr-ázzi teoriya dep atalatuǵın teoriyanıń tiykarında $SU(2) \times U(1)$ simmetriya spontan túrde buzıladı degen boljaw jatadı. Teoriyanıń sulıw bolmaǵan bólimi haqqında gáp etkende simmetriyanıń usı buzılıwınıń mexanizmi názerde tutiladı.

III bapta kvantlıq xromodinamikanıń juwıq globallıq kirallıq simmetriyasın tallaǵanda biz globallıq simmetriyanıń spontan buzılıwında massaǵa iye bolmaǵan goldston bozonlarınıń payda bolatuǵınlıǵın aytqan edik. Lokallıq simmetriyanıń spontan buzılıwında bolsa bazı bir mániste keri qubılıs júzege keledi: kalibrovkalıq maydanlar payda bola almaǵan goldston bozonların "jep" massaǵa iye bolmaǵan kalibrovkalıq maydanlar massaǵa iye boladı. Eki spinlik halǵa iye bolatuǵın massaǵa iye emes vektorlıq maydannan hám massaǵa iye bolmaǵan skalyar maydannan spininiń úsh proekciyasına iye bolǵan massaǵa iye vektorlıq bólekshe payda boladı. Usınıń nátiyjesinde erkinlik dárejeleriniń sanı saqlanadı. Maydanniń teoriyasındaǵı bul qubılıs 1964-jılı ashıldı hám ol Xiggs mexanizmi atamasına iye boldı.

Standart elektr-ázzi teoriyadaǵı Xiggs mexanizminiń ayqın túrdegi realizaciyası φ^+ , φ^0 skalyar bóleksheleriniń (álbette, olardıń sáykes φ^- hám $\bar{\varphi}^0$ antibóleksheleriniń) izotoplıq dubletin paydalanıwǵa tiykarlanǵan. Izospinge de, giperzaryadqa da iye bolıp, bul skalyar maydanlar kalibrovkalıq-invariant túrde tórt W^+ , W^- , W^0 , B^0 kalibrovkalıq maydan menen tásirlesedi. Lagranjiandaǵı sáykes aǵza

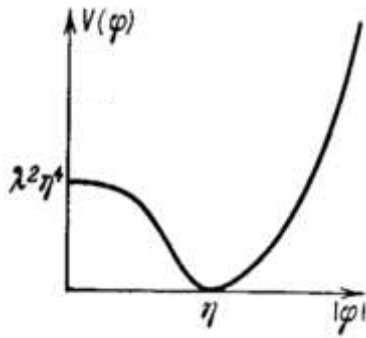
$$|D_\mu \varphi|^2 = (D_\mu \varphi)_i^* (D_\mu \varphi)_i$$

túrine iye boladı. Bul ańlatpadaǵı kovariantlıq tuwındı

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_2 \frac{\tau}{2} W_\mu + ig_1 \frac{Y}{2} B_\mu^0$$

$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^- \end{pmatrix}$ izotoplıq spinorǵa tásir etedi, al $i = 1, 2$ izotoplıq indeks boyınsha summalaw ótkeriledi.

Usınıń menen birge skalyar maydan φ de izotoplıq spin hám giperzaryad saqlanǵan halda fermionlar menen tásirlesedi. Bunday jaǵdayda usı φ skalyar maydanı izosinglet oń fermionlardı shep izobuletlik fermionlarǵa aylandıradı. Fermionlardıń skalyarlar menen usınday tásirlesiwı (olardı yukavalıq dep ataydı) barlıq altı leptonlıq hám kvarklıq juplarda bar: eger neytrinonı massası nolge teń dep esaplamay, basqa bóleksheler menen bir qatardaǵı bóleksheler dep esaplasaq hár bir jupta ekiden. YUkava konstantasın saylap alıw ushın hesh qanday teoriyalıq princip joq. Usı jaǵdayda orın alǵan ıqtıyarlıq júdá jaǵımsız bolıp kórinedi.



31-súwret.

Skalyar bólekshelerdiń $SU(2) \times U(1)$ kalibrovkalıq tásirlesiwi de, yukavalıq tásirlesiwi de lokallıq-invariant hám usı $SU(2) \times U(1)$ simmetriyanıń tikkeley spontan buzılıwın bermeydi. Bul buzılıwdıń tórinde φ maydanlarınń arasındaǵı sıızılıq emes tásirlesiw jatır. Biz onı potencial túrinde bilayınsha jazamız (31-súwret):

$$V(\varphi) = \lambda^2(|\varphi|^2 - \eta^2)^2.$$

Bul ańlatpada $|\varphi|^2 = \bar{\varphi}_i \varphi_i = \bar{\varphi}^+ \varphi^+ + \bar{\varphi}^0 \varphi^0$ - izoskalyar, λ - mánisi házirshe belgisiz bolǵan ólshem birligine iye bolmaǵan parametr.

η parametriniń ólshem birligi massanıń ólshem birligindey. Fermi konstantası G_F tiń durıs shamasın alıw ushın

$$\eta = 2^{-3/4} G_F^{-1/2} = 174 \text{ GeV}$$

shamasın saylap alıwǵa tuwrı keledi (tómende qarańız).

g_1 hám g_2 kalibroskalıq konstantaları jáne yukava tásirlesiwleriniń konstantaları ($\hbar, c = 1$ sistemasında) ólshem birligine iye emes bolǵanlıqtan η parametri teoriyanıń jalǵız ólshem birligine iye bolǵan konstantası bolıp tabıladı. Onıń mánisi arqalı barlıq bólekshelerdiń massaları ańlatıladı.

Kitaptıń bunnan aldınǵı betlerinde tallanǵan biz qarap atırǵan teoriyanıń tiykarǵı ózgesheligi $V(\varphi)$ shamasınıń aldındaǵı minus belgisi bolıp tabıladı. Fokustıń barlıǵı usı jaǵday menen baylanıslı. Minustıń ornında plus belgisi turǵan jaǵdayda teoriya ornıqlı hám simmetriyanıń spontan buzılıwı orın almaǵan jáne vektorlıq bozonlar menen fermionlar massaǵa iye bolmaǵan bolar edi. Al bul jaǵdayda teoriya bóleksheleriniń kópshiligi massaǵa iye bolǵan haqıyqıy dúnyanı táriyiplemegen bolar edi.

Simmetriyanıń spontan buzılıwında lagranjiannıń simmetriyaǵa iye bolatuǵınlıǵın, al fizikalıq haldıń simmetriyaǵa iye bolmaytuǵınlıǵın biz bilemiz. Dara jaǵdayda tiykarǵı fizikalıq hal bolǵan minimallıq energiyaǵa iye bolatuǵın vakuum lagranjiannıń simmetriyasına iye bolmaydı. Biz qarap atırǵan jaǵdayda minus belgisiniń bar bolıwına baylanıslı vakuum simmetriyaǵa iye emes. Haqıyqatında da, $V(\varphi)$ ańlatpasına qarap energianıń $|\varphi| = \eta$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda nolge aylanatuǵınlıǵın kórmew múmkin emes. Bul vakuumde skalyar maydanniń vakuumlıq kondensatı dep atalatuǵın turaqlı skalyar maydanniń bolatuǵınlıǵın ańǵartadı. Biraq, φ skalyar maydanı izospinge hám giperzaryadqa iye jáne $SU(2) \times U(1)$ gruppaaǵa qarata invariantlı emes bolǵanlıqtan vakuumniń ózi de usı gruppaaǵa qarata invariant emes. Simmetriya spontan buzılǵan bolıp tabıladı.

Baslanǵısh lagranjiannıń izotoplıq simmetriyasın paydalanıp, biz φ maydanın vakuumlıq ortasha shamanıń tek izotoplıq spinordıń tómengi, elektrlik jaqtan neytral bolǵan qurawshısında ǵana bolatuǵınday etip saylap alamız:

$$\langle \varphi \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \eta \end{pmatrix}.$$

Bunday jaǵdayda kondensattıń payda bolıwı elektr zaryadınıń saqlanıwın buzbaydı.

Endi kondensattıń qalayınsha aralıqlıq bozonlardıń massalarınıń payda bolıwına alıp keletuǵınlıǵın kóremiz. Onıń ushın joqarıda $|D_\mu \varphi|^2$ ushın jazılǵan ańlatpaǵa dıqqat penen

qaraymız. Oǵan φ shamasınıń ornına vakuumlıq ortasha bolǵan

$$\langle \varphi \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \eta \end{pmatrix}$$

shamasın qoyıp, biz dárhál W^\pm bozonlarǵa massa beretuǵın aǵzanı alamız:

$$\frac{1}{2}g_2^2\eta^2\bar{W}W.$$

Bunnan W aralıqlıq vektorlıq bozonınıń

$$m_W = g_2\eta/\sqrt{2}$$

massaǵa iye ekenligi kelip shıǵadı. Z -bozonnıń massalıq aǵzasın alıw ushın "oraylıq formulanı" paydalanıw kerek ("Foton hám Z -bozon" dep atalatuǵın paragrafqa qarańız). Nátiyjede Z -bozonnıń massasın beretuǵın aǵza alınadı:

$$\frac{1}{4}(g_1^2 + g_2^2)\eta^2\bar{Z}Z.$$

Bunnan

$$m_Z = m_W/\cos\theta_W$$

ekenligi kelip shıǵadı.

Kondansat $\langle \varphi \rangle$ elektrlik jaqtan neytral bolǵanlıqtan, oǵan zaryad operatorı Q dıń tásiiri noldi beredi hám foton massaǵa iye bolmaydı. Solay etip, aralıqlıq bozonlar massaǵa iye boldı, sebebi izospin saqlanbaydı, yaǵnıy kondensat izospinge iye boladı, al foton bolsa massasız bolıp qaladı, sebebi kondensattıń neytrallıǵına baylanisli elektr zaryadı saqlanadı.

Joqarıda ornatılǵan m_W menen η arasındaǵı baylanıs usı η nıń mánisin anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Onıń ushın

$$m_W = g_2\eta/\sqrt{2} \text{ hám } G_F/\sqrt{2} = g_2^2/8m_W^2$$

qatnasların salıstıramız. Olardan g_2 shaması qatnaspaytuǵın η menen G_F shamalarınıń arasındaǵı baylanıs dárhál kelip shıǵadı:

$$\eta = (2^{3/2}G_F)^{-1/2} = 174 \text{ GeV}.$$

Biz skalyar maydanlardıń ózine tásiriniń potencialın tallaǵanda bul qatnas haqqında aytıp edik.

Endi fermionlardıń massalarınıń qalayınsha payda bolatuǵınlıǵın kóremiz. Olardıń deregi $f(\bar{\psi}_L\psi_R\varphi + \bar{\psi}_R\psi_L\bar{\varphi})$ tipindegi yukava tásirlesiwı boladı. φ skalyar maydanı vakuumlıq ortasha η ǵa teń bolǵanda fermion $m = f\eta$ massasına iye boladı.

Leptonlar menen kvarklardıń massalarınıń spektrin payda etiw ushın yukava konstantaları f tiń mánisleri júdá kishi hám hár qıylı bolıwı kerek (10^{-1} den 10^{-6} ge shekem). Olardıń mánisleri baǵınatuǵın hesh bir simmetriya kórinip turǵan joq. Bul konstantalardıń ierarxiyasın α boyınsha uyıtqıwlar teoriyasınıń dárejeleri boyınsha qurıwǵa tırıswlar bar, biraq olar tek tırıswlar bolıp qalmaқта ...

Xiggs bozonları

Joqarıda táriyiplengenindey, simmetriyanıń spontan buzılıwınıń nátiyjesinde tórt $\varphi^+, \varphi^0, \varphi^-, \tilde{\varphi}^0$ skalyar maydandan úshewi vektorlıq bozonlar tárepinen "jep qoyıladı". Tek bir neytral bolǵan χ skalyar maydanı saqlanıp qaladı. Ol η turaqlı kondensattıń fonındaǵı tolqınlardıń kvantı bolǵan

$$\varphi = \begin{pmatrix} 0 \\ \eta + \chi \end{pmatrix}$$

"tiri" skalyar bozonlardı bildiredi. φ ushın jazılǵan bul ańlatpanı $V(\varphi)$ potencialı ushın jazılǵan ańlatpaǵa qoyıp, bul bozonlardıń massasınıń $m_H = 2\lambda\eta$ shamasına teń ekenligin tabıw qıyın emes (olardı xiggs bozonları dep ataydı). λ konstantası bizge belgili bolmaǵanlıqtan biz Xiggs bozonlarınıń massalarınıń mánislerin ayta almaymız. Teoriyalıq tallaw olardıń jeńil bolıwınıń múmkin emes ekenligin kórsetedi: m_H shamasınıń minimallıq mánisi 1 GeV ke jaqın. Joqarıda táriyiplengen usıldıń sheklerinde olardıń asa awır bolmaytuǵınlıǵın da biliwge boladı. Biraq 1 TeV shamasındaǵı massanı biykarlawǵa bolmaydı.

Biziń joqarıda kórgenimizdey, bólekshe qanshama awır bolsa, ol xiggs bozonı menen kúshlirek tásirlesedi: xiggs bozonları basqa bólekshelerge de massalardı beredi hám úlken massalar bolğan jaǵdaylarda olardıń sol basqa bóleksheler menen tásirlesiwı de kúshlirek. Mısalı, massası shama menen 50 GeV bolğan $t\bar{t}$ –kvarkoniy ushın $H\gamma$ hám $\mu^+\mu^-$ kanalları boyınsha ıdırawlardıń qatnası 1:10 ǵa jaqın bolıwı kerek hám, eger, H – bozonlar salıstırmalı jeńil bolğan jaǵdayda $H\gamma$ ıdırawın tabıw qıyın bolmaydı. Usınday H –bozonnıń ıdırawında $b\bar{b}$, $c\bar{c}$ lar bar bolğan adronlıq kanallardıń hám $\tau\bar{\tau}$ awır leptonlıq kanallardıń basım bolıwı kerek.

W- hám Z-bozonlar qatnasatuǵın reakciyalardıń H –bozonlardı izlew kóz-qarasında ayrıqsha perspektivalı bolıwı kerek. Mısalı jeńil H -bozondı LEP te

$$e^+e^- \rightarrow ZH$$

reakciyasında tabıwǵa boladı. H -bozonlar $p\bar{p}$ -kollayderlerde W- hám Z-bozonlarınıń tuwılıwı menen birge tuwılıwı kerek (shama menen 10^{-3} itimallıǵı menen). H -bozon qanshama awır bolsa, onı kollayderde tuwdırıw qıyın boladı. Sebebi bunday tájiriybeni júzege keltiriw ushın joqarı energiya kerek. Biraq, eger awır H -bozon tuwılğan bolsa, onda onı jeńil H -bozongá salıstırǵanda ańsat tabıw múmkin. Sebebi awır H -bozonlardıń ıdırawınıń ónimleri úlken kóldeneń impulsarǵa iye bolıwı kerek. Eger H -bozonnıń massası 180—200 GeV shamasınan úlken bolsa, onda ol Z^0Z^0 hám W^+W^- bozonlarınıń jubına iqlas penen ıdıraǵan bolar edi. Bul júdá sulıw qubılıs bolğan bolar edi.

Modeller, modeller...

Bir skalyar neytral xiggs bozonınıń payda bolıwına alıp keletuǵın skalyar maydanlardıń dubleti tárepinen $SU(2) \times U(1)$ simmetriyasınıń buzılıwı elektrázzi simmetriyanıń buzılıwınıń kóp sanlı teoriyalıq variantlarınıń tek birewi ǵana boladı. Bir neshe xiggs bozonları, sonıń ishinde zaryadlangan bozonlar bar modellerdi islep shıǵarıwǵa baǵıshlangan jurnal maqalaları bar.

Bir qatar modellerde aynalıq simmetriyanıń spontan buzılıwına tırıswlar orın alǵan. $SU(2) \times U(1)$ standart modelde aynalıq asimmetriyanıń modeldiń tiykarına qoyılǵanlıǵın esletip ótemiz. Onı "qollar" dep ataydı. Al, $SU(2)_L \times SU(2)_R$ simmetriya baslangısh bolatuǵın modellerde baqlanatuǵın aynalıq asimmetriya spontan túrde payda boladı. $SU(2)_L \times SU(2)_R$ simmetriyanıń sheklerinde shep te, teris te fermionlıq dubletler, kalibrovkalıq bozonlardıń eki tipi - "shep" hám "on" aralıqlıq bozonlar bar. Simmetriyanıń spontan buzılıwında "on" bozonlar "shep" bozonlarǵa salıstırǵanda úlkenirek massanı aladı. Sonlıqtan on toqlardıń bir biri menen tásirlesiwı shep toqlardıń bir birine tásirlesiwine salıstırǵanda ádewir ázzi. Usınday modeller tárepinen bolǵan on toqlardı eksperimentallıq izlewler júdá joqarı qızıǵıwları payda etedi. Bul jerde on zaryadlangan toqlardıń joq ekenligi tekserilip kórilgen tájiriybelerdiń dálliginiń 1% shamasınan úlken emes ekenligin ańǵarıw kerek (β -ıdırawdaǵı elektronlardıń boylıq polarizaciyasın ólshegendegi jetilgen dálilik te usınday).

Kóp xiggsli modeller haqqında gáp etkende CP-invariantlıqtıń buzılıwınıń deregin teoriyanıń xiggs sektorına, atap aytqanda hár qıylı xiggs bozonlarınıń bir biri menen tásirlesiwın táriyipleytuǵın lagranjiannıń aǵzalarına "jasırıw" ǵa tırıswlardı esletip ótpewge bolmaydı. Bunday teoriyalıq modeller neytronnıń dipollik momentiniń salıstırmalı úlken shamasın ($d_n \sim e \cdot 10^{-25}$ sm) boljaydı. Bul shama eksperimentallıq joqarı shekke jaqın. Bul modeller $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ hám $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ túrinde jazılatuǵın CP-taq ıdırawlardı táriyipleytuǵın ólshem birliklerine iye emes amplitudalardıń úlken ayırmaların da boljaydı:

$$|\eta_+ - \eta_{00}| : |\eta_+| \sim 6\%.$$

(házirgi waqıtları tájiriybeler bul qatnas ushın $3 \pm 4\%$ shamasın beredi²⁵).

²⁵ Eskertiw (1986-jıl): Jańa, ádewir dál bolğan tájiriybeler bul qatnas ushın 2 procentten kishi bolğan shamalı beredi. Solay etip, tallanǵan modeldi biykarlaydı ("C-, P-, T-simmetriyalar" paragrafındaǵı eskertiwge qarańız).

Kóp sanlı teoretikler

$$V(\varphi) = \lambda^2(|\varphi|^2 - \eta^2)^2$$

potencialın dım jasalma dep esaplaydı. Olar η^2 shamasınıń aldında plyus belgisi bar ornıqlı potencialdan baslaǵandı yamasa onnan da jaqsısı $\eta = 0$ teńligi orınlanatuǵın jaǵdaydı artıqmash kóredi. Bunday jaǵdayda da ornıqsızlıqtıń hám simmetriyanıń spontan buzılıwınıń orın alıwınıń múmkin ekenligi júdá qızıqlı. Biraq, olar radiaciyalıq dúzetiwlerdiń - virtualıq kalibrovkalıq maydanlar tárepinen payda etilgen qurılıqlardıń saldarınan júzege kelgen skalyar bozonlardıń óz-ara tásirlesiwın esapqa alǵannan keyin payda boladı. Bunday jaǵdayda payda bolǵan Koulmen-Vaynberg potencialı dep atalatuǵın effektivlik potencial

$$|\varphi|^4 \ln(|\varphi|^2/m^2)$$

túrine iye boladı, ol $|\varphi|^4 \neq 0$ bolǵan jaǵdayda minimumǵa iye boladı hám, usıǵan sáykes, skalyar kondensattıń payda bolıwına alıp keledi.

Joqarıda tallanǵan elektrázzi simmetriyanıń buzılıwınıń modelleri ushın ulıwmalıq jaǵday olardaǵı fundamentallıq skalyar bólekshelerdiń bar ekenligi bolıp tabıladı. Usınday bólekshelerden qutılıwǵa qaratılǵan tırısıwlar da boldı. Bul tırısıwlar da eger modelden fundamentallıq skalyar bozonlar shıǵarılıp taslanǵan jaǵdayda quramlıq skalyar bozonlardıń payda bolatuǵınligı anıqlandı. Bul bozonlardıń quramlıq bólekleri júdá kishi qashıqlıqlarda (10^{-17} sm) tutqında bolıp, házirgi waqıtları jetiw múmkin bolǵan energiyalarda bozonlardıń tábiyatı ámeliy jaqtan kórinbeydi hám olar noqatlıq bóleksheler túrinde kórinedi.

Skalyarlar quramlıq bolǵan modeller texnireńli modeller atamasına iye boldı. Bul modellerde júdá kóp sanlı texnikvarklar hám texniglyuonlar dep atalatuǵın bólekshelerdiń bar bolıwı boljanadı. Olardıń konfeynmeniniń radiusı 10^{-17} sm diń átirapında. Bunday jaǵdayda W- hám Z-bozonlar kvantlıq texnixromodinamikadaǵı kirallıq simmetriyanıń buzılıwınıń nátiyjesinde payda bolatuǵın goldston texnipionların "jep" massaǵa iye boladı. Tilekke qarsı, texnireń fermionlardıń massalarınıń payda bolıwınıń tábiyiy mexanizmin bermeydi hám modeldiń bul bólimi júdá jaǵımsız bolıp kórinedi.

Texnireń haqqında aytqanda, fundamentallıq skalyarlardıń fundamentallıq vektorlıq yamasa spinorlıq maydanlardan jaman bolıp kórinbeytuǵınligın aytqan bolar edim. Kóp sanlı teoretiklerdiń fundamentallıq skalyarlǵa bolǵan antipatiyasın maqullamayman. Eger xiggs bozonların quramlıq qılatuǵın bolsaq, onda kvarklardıń da, leptonlardıń da, aralıqlıq bozonlardıń da hám hátte massaǵa iye bolmaǵan kalibrovkalıq maydanlar bolǵan glyuonlardıń da, fotonlardıń da quramlıq bolıwı kerek. Biraq, bul pútkilley basqasha tema bolıp tabıladı.

Skalyarlar — 1-sanlı problema

Bunnan aldırǵı paragrafta gáp etilgen qaysı modelge qarasań da bir nárseni anıq sezeseń: skalyar maydanlırsız hesh nársede isley almaysań. Onıń menen elementar bóleksheler fizikasınıń sheshilmegen eń fundamentallıq problemaları - massalar problemi hám oǵan baylanıslı bolǵan ázzi toqlardaǵı kvarklardıń aralasıw, CP-invariantlıqtıń buzılıwı hám, múmkin, P-invariantlıqtıń buzılıw problemi baylanıslı.

Vektorlıq maydanlar dinamikanıń nıshanı bolsa, skalyar maydan inertliktiń nıshanı bolıp tabıladı. Eger vektorlıq maydanlar simmetriyanıń (lokallıq) ayqın kórinıwı bolsa, skalyar maydanlar oǵan salıstırǵanda kem emes informaciylardı - simmetriyanıń qıyrawın alıp júredi. Aralıqlıq bozonlar ashılǵannan hám usınıń menen baylanıslı bolǵan joqarǵı energiyalar fizikasındaǵı tiykarǵı kalibrovkalıq ideyalar tastıyıqlanǵannan keyin skalyar bozonlardıń ashılıwı menen olardıń qásiyetlerin úyreniwden basqa áhmiyetli bolǵan másele bolmaydı.

Fizik-teoretikler elektrázzi tásirlesiwdiń jumıs isleytuǵın, uzaq jasawǵa qábiletli modelin dúziwge tırısıwdıń saldarınan "Skalyarlandiya" eline tap boldı. Biraq, bul el ózinshe júdá qızıqlı el bolıp tabıladı. Bérken mınanı usınadı: fundamentallıq lagranjiandaǵı barlıq kalibrovkalıq

zaryadlardı sıızıp taslańız, bunday jaǵdayda siz házirgi waqıtları tábiyatı menen simmetriyalıq qásiyetleri haqqında tek pal asha alıw múmkın bolǵan kóp sanlı aǵzalar menen ǵana qalasız. Ádebiyatta tallanıp atırǵan kóp sanlı modeller fizikanıń jańa bólimi bolǵan jańa fizikalıq kontinentiniń - fundamentallıq skalyarlardıń tuwılıwı haqqında maǵlıwmat beretuǵın bolajaqtıń belgisi bolıp tabıladı.

Teoriyanıń rawajlanıwı haqqında

Elementar bóleksheler fizikasınıń eksperimentallıq ashılıwlarındaqı fizik-teoretiklerdiń tutqan ornı haqqında nelerdi aytıwǵa boladı?

Fizik-teoretikler ushın kúilmegen jaǵdaylar bolǵan bir qatar ashılıwlarıdı atap ótiwge boladı. Mısalı, radioaktiv ıdıraw, myuon, ersi bóleksheler, CP-invariantlıqtıń buzılıwı haqqında hesh qanday boljawlar bolǵan joq. Onıń ústine "Myuonniń ne keregi bar?" degen sorawǵa elege shekem juwap berilgen joq. Kúilmegen ashılıwlar fizikanıń tariyxında oǵada ullı áhmiyetke iye boldı. Bunnan keyin de olardıń aǵısı tawsılmaydı dep esaplawǵa barlıq tiykarlar bar. Sebebi biziń biliw oblastımız ele bilmegen oblastqa salıstırǵanda júdá kishi. Hár bir jańa tezletkishti proektlegende hám qurǵandaǵı olardan kúiletuǵın eń bahalı nársen - pútkilley kúilmegen ashılıwlar bolıp tabıladı.

Basqa bir qatar ilimiy ashılıwlarda teoretiklerdiń boljawları áhmiyetli orındı iyeledi. Mısal sıpatında sherek ásirde kóp waqt ishinde óziniń tuwrıdan-tuwrı eksperimentallıq tekserip kórilwin kútken Paulidıń neytrinolarıń bar ekenligi haqqındaǵı gipotezasın yamasa Li menen Yang tárepinen usınılǵan ázzi tásirlesiwlerdegi juplıqtıń saqlanbaytuǵınlıǵın izlew boyınsha oǵada zor eksperimentlerdiń dizimin keltiriwge boladı. Bul eki jaǵdayda da sırttan qaraǵanda sheshilmeytuǵın paradoksqa alıp keletuǵın eksperimentlerdiń seriyasınıń nátiyjelerin tereń teoriyalıq tallaw orın aldı. Neytrionıń ashılıwında β -ıdırawındaǵı energiyanıń joǵalıwı, al juplıqta - θ - τ paradoksı bolıp tabıladı (sol waqıtları θ ataması menen eki pionǵa ıdırǵan (K) mezon, al τ ataması menen úsh pionǵa ıdırǵan (K) mezon ataldı). Biraq, bul paradokslardı sheship, fizik-teoretikler eksperimentallıq maǵlıwmatlardan tek logikalıq juwmaqlardı ǵana shıǵardı. Tańlaǵanday basqa hesh nársen bolmadı dep aytıwǵa boladı.

Teoretiklerdiń tutqan ornı júdá áhmiyetli bolǵan úshinshi tiptegi ilimiy ashılıwlar da bar. Bul ashılıwlar tiykarınan teoriyalıq fizikanıń óziniń ishki rawajlanıwı menen baylanıslı tayarlanadı. Mısal retinde Quyashtıń maydanındaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtınıń ózgeriwi, pozitron, neytral toqlardı kórsetiwge boladı. Bul boljawlardıń baslanǵısh noqatları eksperimentallıq fizikanıń kúndelikli áhmiyetli bolǵan mashqalalarınan (hár qıylı dárejede bolsa da) alıp taslanǵan. Quyashtárepinen jaqtılıqtıń awısıwı qubılısı Eynshteyn tárepinen ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyasınıń teńlemeleriniń eń ulıwmalıq túrdegi lokallıq koordinatalıq túrlendiriwlerge qarata invariantlıǵı talabınan boljandı. Pozitronniń bar ekenligin boljaw Dirak tárepinen kvantlıq mexanikanı arnawlı salıstırmalıq teoriyası menen birlestiriwdiń saldarınan islendi. Neytral toqlardıń bar ekenligin boljaw elektrázzi teoriyanıń nátiyjesi bolıp tabıladı. Bul teoriyanıń nátiyjelerine W- hám Z-bozonlardıń ashılıwın da kirgiziwge boladı (olar usı kitap baspadan shıǵaman degenshe ashıladı dep úmit etemen). Bul nátiyjelerdiń qatarına xiggs bozonları da kiredi.

Álbette, elektrázzi teoriyanıń ideyalarınıń ayqın júzege keliwinde eksperimentallıq ashılıwlar tiykarǵı orındı iyeledi. Ásirese, bul ázzi tásirlesiwdiń universallıǵına hám onıń aynalıq asimmetriyasına tiyisli. Biraq, bári bir, onıń rawajlanıwındaǵı qozǵaltıwshı prujina teoriyalıq bolıp tabıladı.

Aralıqlıq vektorlıq bozonlar haqqındaǵı ideya YUkawa tárepinen 1935-jılı usınıldı hám sol waqıtlardan beri bul ideyaǵa neshshe ret qaytıp keldi. Bul ideyanıń ózine tartatuǵınlıǵın sonnan ibarat, bozonlardıń fermionlar menen tásirlesiwı ólshem biriligine iye emes bolǵan konstanta menen xarakterlenedi hám sonlıqtan perenormirovkalanatuǵın teoriya menen táriyiplenedi.

Bunday teoriya principinde uyıtwıw teoriyasınıń joqarı tártiplerinde esaplawlardı júrgiziwge hám bul esaplawlardıń tájiriybelerden alıńǵan bólekshelerdiń zaryadları menen massaları sıyaqlı parametrler arqalı ańlatıwǵa múmkinshilik beredi. Esaplangıshlıǵı boyınsha bunday teoriya tórt fermionlı teoriyadan ájayıp ayırmaǵa iye. Bunday tórt fermionlı teoriyada uyıtwıwlar teoriyasınıń hár bir tártibi jańa jáne qorqınıshlıraq hám kóp sanlı tarqalıwlardı beredi. Mánisi boyınsha tórt fermionlı lagranjian G_F boyınsha uyıtwıw teoriyasınıń tek birinshi tártibinde ǵana aqlǵa muwapıq keletuǵın nátiyjelerdi beredi hám bul nátiyjelerdi nege beretuǵınlıǵınıń ózi túsiniksiz.

Ekinshi jer júzlik urısqa shekemgi waqıtlardıń ózinde massaǵa iye vektorlıq bozonlardıń tórt fermionlı tásirlesiwge salıstırǵanda kúshli bolmaǵan, biraq perenormirovkanı buzıw ushın jetkilikli bolǵan tarqalıwlardı beretuǵınlıǵı ayqın boldı. Biraq, taza teoriyalıq ashılıwlar (dáslep lokallıq izotoplıq simmetriyanıń²⁶ hám Yang-Mills maydanlarınıń, bunnan keyin Xiggs mexanizminiń ashılıwı) vektorlıq bozonlardıń bul defektinen qutılıwǵa hám perenormirovkalanatuǵın teoriyanı dóretiwge múmkinshilik berdi.

Artqa qaray qarasaq, biz teoretiklerdiń izbe-iz, qádem be qádem, simmetriya menen baylanıslı bolǵan jańa ideyalardı paydalanıw jolınıń járdeminde ishki qarama-qarsılıqqa iye bolmaǵan sırtqı parametrlerdiń minimallıq sanın paydalanıw arqalı esaplawlar júrgiziwge múmkinshilik beretuǵın jáne mańızlı nátiyjelerdi beretuǵın teoriyanıń imaratın qurǵanlıǵın kóremiz.

Házirgi waqıtları belgili bolǵan hesh bir eksperimentallıq faktler óziniń tikkeley túsindiriliwi ushın skalyar bozonlardı tikkeley talap etpeydi. Teoriyalıq-texnikalıq jaqtan uyıtwıwlar teoriyasınıń joqarǵı tártiplerindegi qaldıq tarqalıwlardı joq qılıw ushın bul bozonlardıń kerek. Olardıń bar ekenligine biziń isenimimiz esaplanıw, teoriyalıq sulıwlıq (simmetriya) hám óz-ózine sáykeslik ideyasına tiykarlangan.

Elementar bóleksheler fizikasınıń tariyxı haqqında oylasań, onda simmetriya adamnıń túsinebewshilik asfaltı arqalı ótip, teoretiktiń qáleminiń qozǵalısnı basqaradı hám usınday jol menen eksperimentatorda onı ashıwǵa isenim payda etedi.

Kelesi bapta biz protonnıń ıdırawı, magnit monopollerı hám kóp sanlı supersimmetriyalıq bóleksheler sıyaqlı bir qatar tań qalarlıq qubılıslar menen qubılıslardıń boljanıwına alıp kelgen simmetriya ideyalarınıń tań qalarlıq "ózinin-ózi tuwılıwına" hám rawajlanıwına kóp sanlı mısallardı kóremiz. Eger bunnan bılay fizikanıń progressi usı boljawlardıń hesh bolmasa ayırımlarınıń tastıyıqlanıwına alıp kelse, onda júdá zor bolǵan bolar edi.

²⁶ Ázzi (hám kúshli) tásirlesiwdi táriyiplew ushın lokallıq izotoplıq simmetriyanı qollanıwǵa tırısıw 1938-jılı O.Kleyn tárepinen islendi. Ol teńdey tiykarda nuklonlardıń dubleti (n, p) menen leptonlardıń (v, e) dubletlerin qaradı. Onıń teoriyasınıń variantlarınıń birinde tórt kalibrovkalıq bozon boldı: foton hám (házirgi zaman belgilewlerinde) W^+ , W^- hám Z^0 . Barlıq kalibrovkalıq tásirlesiwler bir konstanta - elektr zaryadı e menen táriyiplendi.

Bul teoriyanı dúziwde Kleyn besinshi ólshem bar degen gipotezaǵa tiykarlandı. Besinshi koordinata cikllıq bolǵan bes ólshemli dúnyanıń modeli (bul modeldi Kaluca-Kleyn modeli dep ataydı) eki dúnyalıq urıstıń aralıǵında kóp sanlı izertlewlerdiń obǵektine aylandı. Usı modeldiń sheklerinde Kleyn elektromagnit, ázzi hám gravitaciyalıq tásirlesiwlerdiń birden-bir teoriyasın dóretiwge tırıstı. Tilekke qarsı, Kleyn eń ápiwayı bolǵan qádemdi qoya almadı: ol W^- hám Z -bozonlardıń kútilgen massaların bahalamadı. Kleynniń jumısı birotala umıtıldı hám házirgi zaman kalibrovkalıq teoriyaları Yang penen Millstıń jumıslarınan baslanadı.

Sońǵı jılları qosımsha keńisliklik ólshemlerge iye bolǵan teoriyalarǵa qızıǵıwdıń payda bolǵanlıǵın ańǵarıwımız kerek.

VI bap

BIRLESIWDIŇ PERSPEKTIVALARI

Qashıp ketetuǵın konstantalar. $SU(5)$ gruppasındaǵı fermionlar. $SU(5)$ gruppasındaǵı kalibrovkalıq bozonlar. Protonnıń ıdırawı. Magnit monopoller. Modeller, modeller, modeller... Supersimmetriya. Birlesiwdiń modelleri hám úlken partlanıw. Ekstrapolyaciya hám prognozlar haqqında. Eskertiw (1983-jıl, gúz).

Qashıp ketetuǵın konstantalar

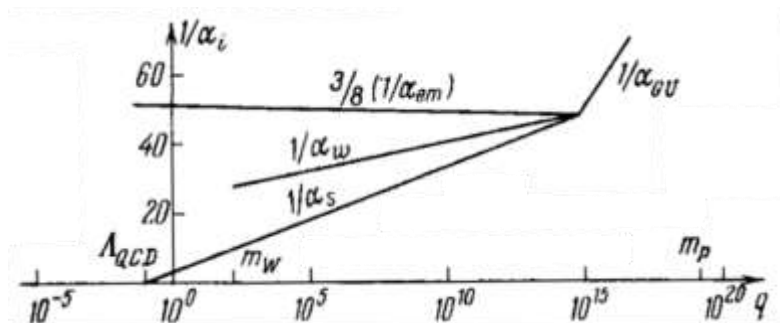
Eger bólekshelerdiń massaları menen skalyar bozonlarǵa baylanıslı tiyisli bolǵan "ǵargısqa ushıraǵan" máselelerge qaramasaq, onda fundamentallıq kúshlerdiń házirgi zaman kartinası júdá sulıw bolıp kórinedi: kúshli, ázzi hám elektromagnit tásirlesiwler $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ lokallıq simmetriyanıń, onıń úsh baylanıs konstantası bolǵan g_3, g_2, g_1 "zaryadlarınıń" hám on eki kalibrovkalawshı maydanlardıń (segiz glyuon, úsh aralıqlıq bozon hám foton) bolıwınń saldarınan júzege kelgen. Jetkilikli dárejedegi kishi qashıqlıqlarda bul kúshlerdiń barlıǵı tiykarınan bir birine usaydı hám $\sim g^2/r$ tipindegi potencialǵa alıp keledi. Kúshli tásirlesiwler ushın "kishi qashıqlıqlar" sózi adronlardıń ólshemlerinen, yaǵnıy 10^{-13} sm den kóp kishi uzınlıqtı ańǵartadı. Bunday qashıqlıqlarda asimptotalıq erkinlik húkimlik etedi. Elektrázzi tásirlesiw ushın Kulon nızamı W- hám Z-bozonlardıń komptonlıq tolqın uzınlıǵınan kóp kishi bolǵan, yaǵnıy 10^{-16} sm den kóp kishi bolǵan qashıqlıqlarda kúshke enedi. Bunday kishi qashıqlıqlarda bozonlardıń massalarınıń bolıwı áhmiyetke iye bolmay qaladı.

Shama menen 10^{-17} sm qashıqlıqta turǵan úsh zaryad bir birinen qashıq emes:

$$\alpha_s = \frac{g_3^2}{4\pi} \approx \frac{1}{10}, \alpha_w = \frac{g_2^2}{4\pi} \approx \frac{1}{27}, \alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{129}.$$

Sonıń menen birge olar bunnan bılay jaqınlasıw tendenciyasın kórsetedi.

α_{em} shamasınıń qashıqlıqtıń kishireyiwi menen vakuumlıq ekranırovkanıń kishireyiwine baylanıslı makroskopiyalıq standart shaması bolǵan $1/137$ ge jaqınlasqanlıǵın ańǵaramız. Biziń kitaptıń basında atap ótkenimizdey, vakuumnıń polarizaciyası effektiniń saldarınan α_s hám α_w shamaları kishireyedi, al α_{em} shaması úlkeyedi.



32-súwret.

32-súwrette keri $1/\alpha_s$, $1/\alpha_w$ hám $3/8(1/\alpha_{em})$ konstantalarınıń berilgen q impulsinen logarifmlik ǵárezligi kórsetilgen (GeV lerde ólshengen). $3/8$ koefficientiniń mánisi bir neshe betten keyin túsindiriledi.

Teoriyaǵa sáykes $1/\alpha_i$ shamasınıń $\lg q$ shamasınan ǵárezligi juwıq túrde sıızıqlı. $1/\alpha_s$ traektoriyasında eń úlken qıyalıq orın aladı. Bul úlken qıyalıq glyuonlıq vakuumnıń polarizaciyası menen baylanıslı. $1/\alpha_s$ shamasınıń qıyalıǵınıń $1/\alpha_w$ shamasınıń qıyalıǵına salıstırǵandaǵı úlken bolıwı glyuonlardıń aralıqlıq bozonlarǵa salıstırǵanda kóp ekenliginiń saldarı. Sonlıqtan glyuonlar

úlken antiekranlıw effektin beredi (kalibrovkalıq maydanlar qanshama kóp bolsa, asimptotalıq erkinlikke umtılw da sonshama kúshli boladı). α_{em} shamasında ekranırovkalanıw efekti kúshli hám sonlıqtan $1/\alpha_{em}$ shaması q dıń ósiwi menen kishireyedi.

Súwrette kórinip turǵanıday,

$$q_{GU} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ GeV}$$

teńligi orın alǵan jaǵdayda kerı $1/\alpha_i$ konstantası

$$1/\alpha_{GU} \approx 40$$

shamasına teń bir mániske umtıladı.

GU indeksi ingliz tilindegi *grand unification* sózin ańǵartadı hám úsh fundamentallıq tásirlesiwdiń ullı birlesiwın ańǵartadı.

Tek $q = q_{GU}$ teńligi orınlanǵanda ǵana emes, al $q \gg q_{GU}$ bolǵan jaǵdaylarda da elektromagnit, ázzi hám kúshli tásirlesiwlerdiń bir birinen ayırması bolmaydı hám α_{GU} kalibrovkalıq tásirlesiw konstantasınıń birden bir konstantası bar simmetriyanıń birden-bir ápiwayı lokallıq simmetriyası menen táriyiplenedi dep boljaw tábiyiy (32-súwretke qarańız).

Podgruppa sıpatında $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ kóbeymesine iye bolǵan minimallıq rangke iye bolǵan gruppa $SU(5)$ gruppası bolıp tabıladı. Bul gruppa ullı birlesiwdiń simmetriyası sıpatında 1974-jılı Djordji hám Gleshou tárepinen usınıldı.

$SU(3)$ gruppasındaǵı fermionlar

Dáslep ápiwayılıq ushın tek bir áwladtı qarap fermionlar ushın $SU(5)$ gruppasın táriyiplewden baslaymız. $SU(5)$ gruppasınıń fundamentallıq kórinisi boyınsha massaǵa iye bolmaǵan bes shep bólekshenge iye bolǵan bes ólshemli spinor túrlenedi: bir birinen óziniń reńleri boyınsha ayırılauǵın úsh antikvark ($\tilde{d}_{1L}, \tilde{d}_{2L}, \tilde{d}_{3L}$), elektron e_L jáne neytrino ν_L [shep bóleksheniń teris spirallıqqa iye, onıń spininiń impulsqa qarama-qarsı ekenligin eske túsiremiz, $\psi_L = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)$]. Bunnan keyingi tallawlarda biz tiykarınan shep bóleksheler menen is alıp baramız hám sonlıqtan geypara jaǵdaylarda L indeksin jazbaymız.

e_L jáne ν_L maydanları $SU(2)$ gruppa boyınsha dubletti payda etedi hám reńli singletler bolıp tabıladı; $\tilde{d}_{1L}, \tilde{d}_{2L}, \tilde{d}_{3L}$ lar $SU(3)$ gruppası boyınsha (anti)- tripletti payda etedi hám ázzi izospin boyınsha singletler bolıp tabıladı.

Leptonlar menen kvarklardı bir $SU(5)$ -multipletke birlestiriw d-kvarktıń zaryadınıń nelikten elektronıń $\frac{1}{3}$ zaryadına iye ekenligin túsindiredi. Másele sonnan ibarat, barlıq tásirlesiwlerdiń $SU(5)$ gruppası menen táriyipleniwin talap etiw menen birge biz Q zaryadın gruppanıń generatorlarınıń sanına kirgizdik (dáliregi Q elektr zaryadına proporcional bolǵan Q' shamasın). Bul óz gezeginde $SU(5)$ multipletine kiretuǵın bólekshelerdiń zaryadlarınıń qosındısına usı qosındınıń nolge teń bolıw talabın qoyadı (Bunday bolmaǵan jaǵdayda bólekshelerdiń hár biriniń zaryadında $SU(5)$ -invariant gruppa bolǵan bolar edi hám, usıǵan sáykes, zaryad $SU(5)$ gruppasınıń generatorı bolıp tabılmaǵan bolar edi. Bunı $SU(2)$ gruppası bolǵan jaǵdaydaǵı hám izospinordıń giperzaryadı $\nu_L e_L$ nolge teń bolmaǵan jaǵdaydaǵı $Q = T_3 + Y/2$ formulası menen salıstırıńız). Bunnan

$$3Q_{\tilde{d}} + Q_e + Q_\nu = 0$$

ekenligi kelip shıǵadı. $Q_\nu = 0$ hám $Q_{\tilde{d}} = -Q_d$ teńlikleriniń orınlanatuǵınlıǵın esapqa alsaq, onda

$$Q_d = \frac{1}{3}Q_e$$

teńligine iye bolamız.

Endi birinshi áwladqa kiretuǵın basqa fermionlardı qaraymız. Elektrázzi tásirlesiwge qatnaspaytuǵın shep antineytrino $SU(5)$ -singlet bolıp tabıladı. Qalǵan 10 fermion, $3d_L, 3u_L, 3\tilde{u}_L, e_L^+$ $SU(5)$ -dekupletti payda etedi.

Dál usınday bolıp eki basqa áwladlardıń bóleksheleri $SU(5)$ -multipletleri boyınsha tarqalǵan (Usıǵan baylanıslı $SU(5)$ -multipletlerdegi joqarı kvarklardıń, álbette, burılǵan bolatuǵınlıǵın

ańǵaramız).

SU(5) gruppasındaǵı kalibrovkalıq bozonlar

SU(2) gruppasında 3 kalibrovkalıq bozon, SU(3) gruppasında — 8, al SU(5) gruppasında 24 kalibrovkalıq bozon bar²⁷. Bul 24 bozonnıń ishindegi on ekisi bizge jaqsı tanıs (glyuonlar, aralıqlıq bozonlar hám foton), al basqa 12 bozon jańa bozonlar bolıp tabıladı.

Eski bozonlardıń óz-ara tásirlesiwlerin salıstırıp, biz joqarıda wáde berilgen $3/8$ kóbeytiwshisine túsinik beremiz. Bul kóbeytiwshisiz α_{em} niń α_s hám α_w ler menen ushırıaw ornına jete almaǵan bolar edi (32-súwretke qarańız). Glyuonlardıń fermionlar menen tásirlesiwiniń $g_3\lambda/2$ ge, al W-bozonlardıń fermionlar menen tásirlesiwiniń $g_2\tau/2$ ge proporcional ekenligin eske salamız. Bul ańlatpada λ arqalı Gell-Mannıń 8 matricası, al τ arqalı Paulidıń 3 matricası belgilengen. λ jáne τ matricalarınıń normirovkaları birdey bolǵanlıqtan, g_2 hám g_3 konstantaları birdey bolıp normirovkalanadı (mánisi boyınsha $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ matricaları τ_1, τ_2, τ_3 matricaları menen birdey). Al fotonlarǵa kelsek, onda olardıń tásirlesiwleri eQ ǵa proporcional.

Zaryadtıń operatori bolǵan Q operatori SU(5) gruppasınıń generatorı bolıp tabılmaıdı. $Q' = cQ$ shaması generator bolıp tabıladı, bul teńlikte c koefficienti Q' menen, aytayıq, izospin operatori $\tau/2$ niń birdey bolıp normirovkalanıwı talabı boyınsha anıqlanadı. Normirovkanı bes qurawshıǵa iye $\tilde{d}_{1L}, \tilde{d}_{2L}, \tilde{d}_{3L}, e_L$ hám ν_L spinorınıń misalında islegen qolaylı. Bólekshelerdiń izospinleriniń proekciyalarınıń kvadratlarınıń summası $\sum T_3^2$ mınaǵan teń:

$$1/4 + 1/4 = 1/2$$

(\tilde{d}_{1L} -kvarklarınıń izospini nolge teń, neytrino ushın $T_3 = +1/2$, al elektron ushın $T_3 = -1/2$). Demek normirovkalangan zaryadlarınıń kvadratlarınıń summası bolǵan Q'^2 shamasınıń mánisi $1/2$ ge teń bolıwı kerek. Biraq

$$\sum Q'^2 = c^2 \sum Q^2 = c^2 [3 (1/3)^2 + 1 + 0] = (4/3)c^2$$

teńligi orınlı boladı. Demek $c^2 = 3/8$ eken. Fotonnıń óz-ara tásirlesiwiniń $e'Q' = eQ$ túrinde jazıp, biz $e' = \sqrt{8/3}e$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın kóremiz. α_s hám α_w shamaları menen $\alpha_{em} = e^2/4\pi$ shamasın emes, al $\alpha'_{em} = \frac{e'^2}{4\pi} = (8/3)\alpha_{em}$ shamasın salıstırıw kerek (32-súwrette sonday salıstırıw orınlangan).

Bes qurawshıǵa iye spinordı qaraymız. Kvarklar glyuonlardı shıǵarıp hám jutıp bir birine ótedi. Elektron menen neytrino W-bozonlardı shıǵarıp hám jutıp bir birine ótedi. Al jańa 12 kalibrovkalıq maydanlardı shıǵarıw menen jutıwǵa qanday ótiwler baylanısqa? Bul sorawdıń juwabı ayqın: olardıń altawın \tilde{d} -kvarklar menen elektronlardıń arasındaǵı ótiwlerdi júzege keltiredi. Olardıń zaryadları $\pm 4/3$ ke teń. Bul X-bozonlar dep atalatuǵın bozonlar bolıp tabıladı. Qalǵan altawı Y-bozonlar dep atalatuǵın bozonlar \tilde{d} -kvarklar menen neytrinolardıń arasındaǵı ótiwlerde júzege keltiredi. Olardıń zaryadları $\pm 1/3$ ge teń.

X- penen Y-bozonlardıń massalarınıń shaması tártibi ullı birlesiw energiyası menen barabar bolıwı kerek: $m_X \approx m_Y \approx 10^{14} - 10^{15}$ GeV. $q \gg m_X, m_Y$ impulslerinde SU(5)-simmetriyanıń orın alıwı kerek. $q < m_X$ impulslerinde SU(5)-simmetriya buzılǵan. Usı SU(5)-simmetriyanıń buzılıwı spontan túrde ámelge asadı hám massaları m_X penen m_Y shamalarına jaqın bolǵan awır xiggs maydanlarınıń tásirinde júzege keledi dep boljaydı.

Protonnıń ıdırawı

Eger X- hám Y-bozonlardı menen tek bes d, e, ν fermionlar tásir etisetuǵın bolsa, onda usı

²⁷ Siz SU(n) gruppasında $2n-1$ kalibrovkalıq bozon boladı dep durıs boljadırız.

bozonlar kvarklardı leptonlarǵa ótkeretuǵın bolsa da barionlıq zaryad saqlanǵan bolar edi. Situaciya W-bozonlar ushın orın alatuǵın situaciyaǵa usaydı. Bunday bozonlar elektron↔neytrino ótiwlerin beredi, biraq, álbette, elektr zaryadınıń saqlanbawın payda etpeydi. Virtuallıq W-bozon bóleksheden shıqqan waqıtta onıń zaryadın alıp ketedi hám jutılǵanda zaryadtı sol bozondı jutqan bólekshege beredi.

X- hám Y-bozonlar bar bolǵan jaǵdaylardaǵı barionlıq zaryadtıń saqlanbawı bul bozonlardıń hár qıylı bolǵan eki toq penen tásirlesetuǵın bozon-jarastırıwshılar (qosımsha jumıs islewshiler) ekenligi menen baylanıslı. Bunday jarastırıw (qosımsha jumıs) elementar toqlardıń bozonlardıń sanına salıstırǵanda ádewir kóp bolıwınan kelip shıǵadı. Haqıyqatında da, kalibrovkalıq bozonlardıń tolıq sanı 24, al bir áwladqa kiriwshi 15 fermion arasında (gipotezalıq sterillik neytrinonı biz qospaymız) 125 toqlıq ótiwler orın aladı. Nátiyjede qosımsha jumıstı atqarıwshı sıpatında X-bozonlar u-kvarktı \tilde{u} -kvarkqa, al Y bozonlar bolsa u-kvarktı \tilde{d} -kvarkqa ótkeredi. Solay etip bir bozonnıń ózi antilepton-antikvark jubına da,

$$\begin{aligned} uu &\leftarrow X \rightarrow e^+ \tilde{d}, \\ ud &\leftarrow Y \rightarrow \tilde{\nu}_e \tilde{d} \end{aligned}$$

jubına da óte aladı. Shep tárepke karay baǵıtlanǵan strelkalardıń baǵıtın ózgartip hám \tilde{d} nı orń bólimnen shep bólimge alıp ótip (bunday jaǵdayda \tilde{d} dıń tuwılıwı d nıń joq etiliwi menen almasırladı), biz

$$\begin{aligned} uud &\rightarrow e^+, \\ udd &\rightarrow \tilde{\nu}_e \end{aligned}$$

ótiwlerin alamız. Endi uud kombinaciyasınıń proton, al udd kombinaciyasınıń neytron ekenligin eske túsiremiz. Demek bir nuklonlardıń ıdıraw processlerin aldıq. Álbette, energiya menen impulstıń saqlanıw nızamı orın alǵanlıqtan jalǵız leptonnıń ushıp shıǵa almaydı hám gáp

$$p \rightarrow e^+ \pi^0, n \rightarrow \tilde{\nu}_e \pi^0, n \rightarrow e^+ \pi^-, p \rightarrow e^+ \pi^+ \pi^-$$

tipindegi processler haqqında aytılip atır.

Protonnıń ıdırawınıń matricalıq elementiniń mánisi $\alpha_{GU} m_X^{-2}$ shamasında, al ıdırawdıń itimallıǵı $\alpha_{GU}^2 m_X^{-4} m_p^5$ shamasında bolıwı kerek. Bul jerde $\alpha_{GU} \approx 1/40$ ullı birlesiw konstantası, X-bozonnıń massası $m_X = 10^{14} - 10^{16}$ GeV, protonnıń massası m_p . Bul m_p mäseleniń juwabına kiredi, sebebi ıdırawdaǵı energiyanıń bólinip shıǵıwı shama menen usı m_p ǵa teń. m_p niń besinshi dárejesiniń kiretuǵınlıǵı ólshemlerdiń kóz-qarası boyınsha túsiniqli. Sebebi $\hbar, c = 1$ birliklerinde waqıt birligindegi ıdırawdıń itimallıǵınıń birligi massanıń birligine teń (ázzi ıdırawlar ushın $G_F^2 \Delta^5$ ti eske túsirińiz).

Eger joqarıda keltirilgen bahalawshı formulaǵa $m_X : m_p = 10^{-14}$ mánisin qoysaq hám ádettegi birliklerge ótsek, onda protonnıń jasaw waqıtı ushın $\tau_p = 3 \cdot 10^{27}$ jıl mánisin alǵan bolar edik. $m_X : m_p$ qatnasın bir tártipke úlkeytip biz $3 \cdot 10^{31}$ jıl shamasın alǵan bolar edik. Dál esaplawlar protonnıń jasaw waqıtı ushın usı intervaldıń ishinde jatatuǵın mánisti beredi. Tábiyatta minimallıq SU(5) simmetriyası dep atalatuǵın, yaǵnıy xiggs maydanlarınıń minimal jıynaǵı na sáykes keletuǵın simmetriya bar dep boljaytuǵın bul esaplawlardaǵı tiykarǵı anıqsızlıq 32-súwrette $1/\alpha_s$ traektoriyası ótetuǵın abscissa kósherindegi noqattı anıqlaytuǵın Λ_{QCD} shamasın saylap alıw menen baylanıslı.

Súwrette m_X shamasınıń Λ_{QCD} shamasına proporcional, soǵan sáykes τ_p shamasınıń Λ_{QCD}^4 shamasına proporcional ekenligi kórinip tur. 10^{28} jıl shaması $\Lambda_{QCD} \approx 100$ MeV shamasına sáykes keledi. Λ_{QCD} shamasın "qıymıldatqanda", álbette tek m_X shaması ǵana emes, al α_{GU} hám $\alpha_w(m_W^2)$ shaması da ózgeredi ("qıymıldaydı"). Bul jaǵday SU(5) teoriyası tárepinen boljanatuǵın $\sin^2 \theta_W$ shamasınıń da qıymıldaytuǵınlıǵın ańǵartadı. $\sin^2 \theta_W$ shamasın teoriyalıq jaqtan boljaw 0,22 shamasınıń qasında tájiriye menen jaqsı sáykes kelgen halda gruppalanadı.

32-súwret óziniń abscissa kósheri boyınsha logarifmlik shkalası menen ullı birlesiw modelinde bar bolǵan energiya boyınsha ekstrapolyaciyanıń júdá úlken bolǵan masshtabın jasıradı (14

tártipke). Neytrinolarıń adronlar menen tásirlesiwın hám adronlardıń tezletkishlerdegi e^+e^- -annigilyaciyası úyrenip tártibi 10^{-28} sm bolǵan qashıqlıqlardaǵı qubılıslardıń fizikası haqqındaǵı juwmaqlardı islewdiń múmkin ekenligi haqıyqatında da tań qalarlıq.

10^{30} jıl ishindegi intervaldıń Álemniń jasınan shama menen 20 tártipke úlken ekenligine qaramastan eki sebepten baylanıslı protonnıń usınday uzaq waqıt jasaw waqtın ólshewdi eki sebepten baylanıslı ámelge asırıwǵa boladı. Birinshiden, kvantlıq-mexanikalıq nızamlar boyınsha júdá kishi t/τ_p itimallıqqa iye hátte bir nuklonnıń ıdırawın qálegen qısqa l waqtınıń ishinde kóriwge boladı. Ekinshiden, biziń átirapımızdaǵı nuklonlardıń sanı júdá kóp (qálegen zattıń bir grammında $6 \cdot 10^{23}$ nuklon). Sonlıqtan, eger 16 tonna suw alıp (bul 10^{31} dana nuklon), onı 1 jıldıń dawamında biz alǵan úlgede 10 dana proton menen neytronnıń ıdırawın kórgen bolar edik.

Bunday "oydaǵı eksperimenttegi" tiykarǵı mashqala kosmoslıq nurlar payda etken fon menen baylanıslı. Jerdiń betiniń hár bir 1 sm^2 betine bir sekundtıń ishinde joqarı energiyaǵa iye bolǵan bir bólekshe kelip túsedı. Bul fondı kemeytiw ushın úlginı jerdiń astına tereńde jaylastırıw kerek. Bul zaryadlangan bólekshelerdiń aǵısın keskin kemeytedi hám endi tiykarǵı fon joq qılıw múmkin bolmaǵan neytrinolarıń aǵısı menen baylanıslı boladı. Neytrinolar beretuǵın fon júdá kishi, sebebi olar neytrinolar zatlar menen júdá ázzi tásirlesedi. Biraq biz baqlayın dep atırǵan effekt onnan da kishi. Protonnıń ıdırawın isenimli túrde ayırıp alıw ushın ondaǵı energiya menen impulstıń saqlanıwı menen júzege keletuǵın balanstıń qalayınsha kórinetuǵınlıǵın tekserip kóriw kerek boladı.

Házirgi waqıtları protonlardıń ıdırawın izlew yamasa usınday tájiriybelerdi ótkeriwge tayarlıq kóriw jumısları jigirmalaǵan jer astı laboratoriyalarında ótkerilip atır. Házirgi waqıtları protonnıń jasaw waqtınıń 10^{30} jıldan úlken ekenligi isenimli túrde anıqlandı.

Eksperimentatorlardıń protonlardıń ıdırawına "talaban" sıpatında qabıl etiw múmkin bolǵan jaǵdayları úlken qızıǵıw payda etti. Indiyadaǵı tereń shaxta islep atırǵan izertlewshiler bunday bir neshe jaǵdaylar haqqında Monblannıń²⁸ astındaǵı tonnelde islep atırǵan fiziklerdiń gruppası xabar berdi. Eger bul xabarlar haqıyqatında da protonnıń ıdırawına juwap beretuǵın bolsa, onda onıń jasaw waqtı shama menen $5 \cdot 10^{30}$ jıl bolǵan bolar edi. Bunday jasaw waqtı alınǵan jaǵdayda protonnıń stabilli emes ekenligi máselesi jerdiń astındaǵı kóp kilotonnalıq detektorlar iske túsken waqıtta tolıq sheshilgen bolar edi.

Eger protonnıń jasaw waqtı $10^{30} - 10^{32}$ jıl shamasındaǵı intervalǵa teń bolıp shıqsa, onda biz ózimizdi baxıtlı dep esaplaǵan bolar edik²⁹. Sebebi, eger $\tau_p > 10^{36}$ jıl bolǵan jaǵdayda házirgi waqıtları qurılıp atırǵan dúzilislerdiń hesh qaysısı da ıdırawdı registraciyalay almaǵan bolar edi. Kóp sanlı qanıgeler $\tau_p = 10^{36}$ jıl bolǵanda ıdırawdıń júdá siyrek júzege keletuǵınlıǵı sebepli onı baqlawdı ámeliy jaqtan pútkilley múmkin bolmaydı dep esaplaydı. Qalay degen menen, bunday jaǵdaylar ushın oǵada úlken detektorlar kerek boladı.

Ullı birlesiw massası $m_X = 10^{14} - 10^{16}$ GeV fizikler tezletkishlerde is alıp baratuǵın massalar menen energiyalarǵa salıstırǵanda Plank massası bolǵan $m_p = 10^{19}$ GeV shamasına ádewir jaqın. Eger ullı birlesiw haqıyqatında da bar bolsa, onda m_p menen m_X shamalarınıń arasında baylanıstıń bar bolıwı sózsiz. Protonnıń ıdırawınıń ashılıwı ásiridin ashılıwı bolıp esaplangan bolar edi. Usı ashılıw kamertonǵa usap elementar bóleksheler fizikasınıń barlıq jıyılıǵın dúzetken hám

²⁸ Evropada, Alp tawlarınıń astında (Awdarıwshı).

²⁹ Eskertiw (1983-1986 jıllar). 1570 m suw ekvivalentindegi tereńlikte massası 8000 tonna bolǵan suwdaǵı sherenkov detektorında isleytuǵın Irwayn-Mishigan-Brukheyven kollaboraciyası tómengi shekti anıqladı:

$$\tau_p/B(p \rightarrow e^+\pi^0) > 2,5 \cdot 10^{32} \text{ jıl.}$$

Bul ańlatpada τ_p arqalı protonnıń jasaw waqtı, al $B(p \rightarrow e^+\pi^0)$ arqalı $p \rightarrow e^+\pi^0$ ıdıraw kanalınıń salıstırmalı parciallıq keńligi belgilengen. Bul nátiyje bólekshelerdiń minimallıq jıyınǵı bolǵan SU(5) modeldi biykarlaydı, biraq ullı birlesiwdiń quramalıraq bolǵan variantların biykarlamaydı.

onıń kóp jıllar dawamındaǵı rawajlanıwın anıqlaǵan bolar edi.

Magnit monopolleri

Anıqlaması boyınsha magnit monopoli magnit zaryadı hám kernewligi $1/r^2$ nızamı boyınsha kemeyetuǵın sferalıq simmetriyaǵa iye magnit maydanınıń deregi bolıp tabıladı. Tájiriybelerde magnit monopolleri ele tabılǵan joq.

Kompaktlı yarım ápiwayı hám ápiwayı kalibrovkalıq gruppalarǵa [buǵan SU(5) gruppası da kiredi] tiykarlanǵan ullı birlesiw modelleri sheshimleri sıpatında magnit monopollerine iye. Bul monopoller júdá awır: olardıń massaları m_X/α_{GU} , yaǵnıy 10^{16} GeV shamasında. Bunday monopollerdiń tábiyatı qalǵan elementar bólekshelerdiń tábiyatına pútkilley usamaydı. Sheshimler abellik emes skalyar hám kalibrovkalıq maydanlardıń qurılǵan áhmiyeti joq keńisliklik-sozılǵan konstrukciyanı beredi.

Abellik emes kalibrovkalanǵan teoriyalardaǵı monopollik sheshimlerdi 1974-jılı birinshi ret 't Xooft penen Polyakovlar qurdı. Olar skalyar xiggs maydanlarınıń φ^a ($a = 1, 2, 3$) tripletine iye SU(2) gruppası hám kalibrovkalıq maydanlardıń A_μ^a ($\mu = 0, m, m = 1, 2, 3$) tripleti menen mınaday sheshimdi taptı:

$$\begin{aligned}\varphi^a &= c\delta_{an}\frac{x_n}{r}H(r), \\ A_\mu^a &= \varepsilon_{man}\frac{x_n}{2er^2}F(r), \\ A_0^a &= 0\end{aligned}$$

sheshimlerin aldı. Bul anlatpalarda e - kalibrovkalıq zaryad; $a = 1, 2, 3$ - izotoplıq keńisliktegi koordinatalardıń indeksleri; $m, n = 1, 2, 3$ - ádettegi úsh ólsheimli keńisliktegi x koordinatalarınıń indeksleri ($r^2 = x^2$); c - massanıń birligine iye bolǵan koefficient; $H(r)$ menen $F(r)$ funkciyaları $r = 0$ bolǵanda nolge teń, $r \gg 1/c$ teńsizligi orınlanǵanda, yaǵnıy monopoldiń ózeginiń sırtında 1 ge tez umılatsuǵın ólsheim birligine iye emes funkciyalar bolıp tabıladı.

$$\begin{aligned}a = m \text{ bolǵan jaǵdayda } \delta_{am} &= 1, \\ a \neq m \text{ bolǵan jaǵdayda } \delta_{am} &= 0, \\ \varepsilon_{123} = \varepsilon_{231} = \varepsilon_{312} &= +1, \\ \varepsilon_{132} = \varepsilon_{321} = \varepsilon_{213} &= -1\end{aligned}$$

hám indekslerdiń ekewi birdey bolsa, onda $\varepsilon_{amn} = 0$. Summalaw qaytalanatuǵın indeksler boyınsha júrgiziledi.

Bunday sheshim zor ózgeshelikke iye. Jaǵday sonnan ibarat, izotoplıq keńisliktegi xiggslik hám kalibrovkalıq maydanlardıń izotoplıq spinleriniń baǵıtları ádettegi keńisliktiń noqatlarınń funkciyaları bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda ádettegi keńisliktegi radius vektor qalay baǵıtlanǵan bolsa, izotoplıq keńisliktegi xiggs maydanınıń izotoplıq vektorınıń baǵıtı da solay baǵıtlanǵan, al kalibrovkalıq maydanniń izotoplıq vektorı oǵan ortogonal.

Bunday sheshimdi Polyakov "kirpi tiken" dep atadı. Teoriyanıń lokallıq izotoplıq invariantlıǵın paydalanıp, kirpi tikendi "taraq penen tarawǵa" tırıswǵa boladı. Usınday tarawdıń nátiyjesinde xiggstıń klassikalıq maydanınıń (kondensattıń) izotoplıq vektorların barlıq keńislikte bir baǵıtta, misalı úshinshi kósherdiń baǵıtında, baǵıtlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda elektr zaryadınıń standart anıqlaması boyınsha xiggs kondensatı ayqın túrde elektrlik jaqtan neytral boladı. Ol zaryadlanǵan vektorlıq maydanlarǵa massalardı beredi hám vektorlıq maydan bolǵan fotondı massasız qaldıradı. Elektrázzi teoriyadaǵı jaǵdaydan basqa, usınday xiggs kondensatı koordinatalar basınıń átirapındaǵı kishi oblastta ($r \leq 1/c$) joǵaladı. Sonlıqtan, usınday kishi qashıqlıqlarda vektorlıq maydanlardıń úshewi de massalarǵa iye emes. Bul jaǵday monopoldiń ishinde SU(2)-simmetriyanıń buzılmaǵanlıǵın ańǵartadı.

Kirpi tikendi tolıq úziksiz túrlendiriwdiń járdeminde tarawdıń sátińiń túspeytuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı (33-súwret). Súwrette oraydan túslik polyustıń baǵıtındaǵı yarım kósherdiń

boyındağı ózgeshelik kórinip tur. Bul ózgesheliktiń dirak sabaǵına - sheksiz jıńishke bolǵan baqlanbaytuǵın solenoidqa juwap beretuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Bul solenoid monopoldiń ishindegi magnit maydanınıń aǵısına sáykes keledi. Monopolden shıqqannan keyin bul aǵıs barlıq keńislikke tarqaladı. Bunday jaǵdayda magnit maydanınıń

$$\mathbf{H} = \mu \mathbf{x} / r^3$$

túrine iye bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Bul ańlatpada $\mu = 1/e$ magnit zaryadı. Eger bunday SU(2)-teoriyadaǵı minimallıq elektr zaryadın giperneytral izotoplıq dubletti payda etetuǵın zaryadı $+e/2$ hám $-e/2$ shamalarına teń bolǵan bólekshelerdiń payda etetuǵınlıǵı esapqa alatuǵın bolsaq, onda 't Xooft — Polyakov monopoli Diraktıń belgili shártin qanaatlandıradı: $\mu = 1/(2e_{\min})$. Al SU(2) monopoldiń massasına kelsek, onda onıń shamasınıń tártibiniń m_V/α shamasına barabar bolatuǵınlıǵın kóriwge boladı, m_V - zaryadlangan vektorlıq bólekshelerdiń massası.

Monopoldi qanday kalibrovkada jazıwdan ǵárezsiz, onnan hátte sheksiz qashıqlıqtaǵı vakuum ádettegi vakuumǵa sáykes kelmeytuǵın "buzılǵan" vakuumǵa aylanadı. "Taralmaǵan" kirpi tikennen ol óziniń "taramlaǵınlıǵın" menen, al "taralǵan" lıǵı menen - sheksizlikke dirak sabaǵı menen ketetuǵınlıǵı menen ayrıladı. Magnit monopolleriniń ádettegi bólekshelerden principiallıq ózgesheliginiń principiallıq ózgesheligi usınnan ibarat. Jalgız monopoldi payda etiw ushın pútkil Álemdi qaytadan islew kerek.

Eger monopol + antimonopol jubı bar bolsa, onda dirak sabaǵı olardı baylanıstıradı hám sheksizliktegi vakuum ádettegidey vakuum bolıp qaladı. Biraq, bunday jup kóp jasay almaydı, olar bir biri menen tartısıwdıń saldarınan jaqınlasadı, nátiyjede monopol menen antimonopol eń aqırında annigilyaciyalanadı.

Elektr-ázzi teoriyada gruppanıń ápiwayı yamasa yarım ápiwayı bolǵanlıǵı sebepli massası m_W/α shamasında bolǵan abellik emes monopoller payda bolmaydı: ol (gruppa) abellik invariant podgruppaǵa iye boladı. Biraq abellik emes monopoller ullı birlesiw modellerinde, mısalı SU(5)-modelinde boljanadı. Bunday grand-monopollerdiń massalarınıń tártibiniń m_W/α_{GU} shamasınday hám shama menen 10^{16} GeV bolıwı kerek. Grand-monopollerdiń ishinde reńsizleriniń de (yaǵnıy taza elektromagnitlik), magnitlik hám xromomagnitlik zaryadlarǵa iye reńlileriniń de bolıwı múmkin.

Grand-monopollerdiń massaları júdá úlken bolǵanlıqtan, olardı tezletkishlerdiń járdeminde payda etiw múmkin emes. Úlken partlanıwdan qalǵan (?) reliktlik monopollerge "ańǵa shıǵıwdan" basqa hesh nárese qalmaydı. Biraq, olardı qalay izlew kerek?

Magnit zaryadınıń shaması úlken bolǵanlıqtan, relyativistlik monopollerdiń zatları kúshli ionlastırıwı kerek. Usınday "juwan" ionlastıratuǵın treklerdi sátsiz izlewler tez qozǵalatuǵın monopollerdiń joqarǵı shegi ushın

$$(10^{-3} - 10^{-4}) m^2 \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{sutka}^{-1}$$

shamasın beredi.

Áste qozǵalatuǵın monopoller ($v/c < 10^{-4}$) atomları ionlastırmaydı hám sonlıqtan ionizaciyalıq izi boyınsha olardı tabıwdıń múmkinshiligi joq. Biraq, olardı asa ótkizgishten soǵılǵan katushkadaǵı toqtıń sekiriwi boyınsha detektorlawǵa boladı. Stenford universitetinde jaqında usınday katushkanı paydalanıw menen ótkerilgen eksperiment joqarǵı shekti berdi

$$0,6 m^2 \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{sutka}^{-1}$$

hám monopoldiń katushka arqalı ótkenine usaytuǵın bir waqıyanı berdi.

Sońǵı waqıtları (bul qatarlar 1982-jıl gúzdıń kúnleri jazıldı) Rubakov tárepinen usınılǵan oylar teperish túrde tallanbaqta. Rubakovtıń oyı boyınsha



processleri ádettegidey adronlıq serpimli emes processlerdiń kese-kesimindey kesimge iye bola aladı. Protonnıń usınday indukciyalanǵan ıdırawında monopol katalizatordıń ornın iyeleydi: ol saqlanadı hám, principinde, izbe-iz protonlardıń sheklenbegen sanın qıyratqan bolar edi. Eger indukciyalanǵan ıdırawdıń kesimi úlken bolsa, onda protonnıń ıdırawın izlew ushın arnalǵan

detektorda monopoldiń ótiwi protonlıq ıdırawlardıń dizbegin payda etken bolar edi (ámeliy jaqtan waqıt boyınsha sáykes keletuǵın). Bul júdá qızıq qubılıs bolǵan bolar edi.

Toqtap qalǵan monopollar tárepinen protonlıq ıdırawdıń katalizin energıyanı islep shıǵıw ushın usınıslar da payda boldı. Optimistlerdiń tastıyıqlawı boyınsha, bul jaǵdayda adamzat energiya krizisi qawıpinen barlıq waqıtta qutılǵan bolar edi.

Búgin XXI ásirdiń elektrostanciyaları magnit monopolleriniń "shımshıwı" menen indukciyalanǵan protonnıń ıdırawında bólinip shıqqan energiyada isleydi degen perspektivani áhmiyet berip tallaw qıyın³⁰. Indukciyalanǵan ıdırawdıń kese-kesimin bahalawda ele kóp ayqın emes jaǵdaylar bar. Álemde monopollerdiń bar yamasa joq ekenligi de ayqın emes. Aqır-ayaǵında, protonnıń "ádettegi" spontan ıdırawı ashılmaǵansha ullı birlesiw ideyası menen barionlardıń saqlanbawı da batıl túrde usınılǵan teoriyalıq gipoteza bolıp qala beredi. Hátte skeptiktiń ózi de monopollerdi paydalanıw boyınsha "oyda ótkerilgen eksperimentti" júdá qızıqlı dep esaplay almaydı. Ol tek eń abstrakt teoriyalıq qurılıslardıń bir ájayıp kúnde ullı texnikalıq revolyuciyaǵa alıp keliwiniń múmkinshiliginiń inscenirovkası ǵana bolıp tabıladı.

Modeller, modeller, modeller ...

SU(5) gruppası eń kishi rangke iye bolǵanlıqtan (4 ke teń) ádebiyatta ullı birlesiw modellerin qurıw ushın qollanılatuǵın gruppalardan keltirip shıǵarılǵan. Bul gruppanıń artıqmashlıǵı onıń boljawlarınń salıstırmalı qatań ekenligi menen baylanıslı. Onıń kemshilikleriniń qatarına hár qıylı áwladlarǵa kiretuǵın fermionlardıń bir biri menen birlespegenligi hám hátte bir áwladtıń formionlarınń gruppanıń birden bir keltirip shıǵarılmaıtuǵın kórinisi menen táriyiplenbeytuǵınlıǵında. Bul sońǵı kemshilik rangi 5 bolǵan hám óziniń ishine SU(5) gruppasınıń óziniń $SO(10) \supset SU(5)$ podgruppası túrinde alatuǵın SO(10) gruppasında joq. SO(10) gruppasınıń spinorlıq multipleti 16 qurawshıǵa iye bir áwladtıń barlıq shep spinorların birlestiredi. Onıń ishine shep antineytrino da kiredi:

$$16_{SO} = (1 + \bar{5} + 10)_{SU(5)}.$$

SO(10) gruppası SU(5) gruppası tárepinen qadaǵan etilgen bazı bir qubılıslardıń bar bolıwına ruqsat beredi. Mısalı, SU(5) gruppanıń sheklerinde B barionlıq kvant sanınıń saqlanbawı L leptonlıq kvant sanınıń saqlanbaytuǵınlıǵı menen bekkem baylanısqa. Sonlıqtan B-L saqlanadı (mısalı, $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ıdırawında). SO(10) gruppasında xiggs maydanlarınıń jetkilikli dárejedegi bay jıynaǵında $\Delta(B - L) = 0$ saqlanıw nızamı buzıla aladı. Tájiriybede bul jaǵdaydıń vakuumdegi neytron-antineytronlıq oscillyaciylar bar bolǵanda kórinıwi múmkin.

Barionlıq sannıń saqlanbawı kóz-qarasında neytronnıń antineytronǵa aylanıwı eki neytronnıń mezonlarǵa yamasa fotonlarǵa aylanıwına ekvivalent. Eki jaǵdayda da $|\Delta B| = 2$. $|\Delta B| = 2$ teńligi orınlangandaǵı yadrolardıń ıdırawına salıstırǵanda $n \leftrightarrow \bar{n}$ oscillyaciyları qızıǵıraq bolıp kórinedi. Másele sonnan ibarat, yadrodaǵı eki nuklonnıń ıdırawınıń itimallıǵın $|\Delta B| = 2$ teńligine iye matricalıq elementtiń kvadratına proporcional, al vakuumlıq ótiw bolsa usı teńlikke iye matricalıq elementtiń birinshi dárejesine proporcional. ıdırawdaǵı energıyanıń bólinip shıǵıwı 2m ge teń bolǵanlıqtan, ólshem birlikleri kóz-qarasları tiykarında

$$\frac{1}{\tau_{ıdırawdıń}} \approx \left(\frac{1}{\tau_{oscillyac}} \right)^2 \frac{1}{m}$$

teńligi alınadı. $\tau_{ıdırawdıń} \approx 3 \cdot 10^{30}$ jıl $\approx 10^{38}$ s dep boljap hám $1/m \approx 10^{-24}$ s ekenligin esapqa alıp biz oscillyaciylardıń kútilgen dáwirin alamız. Onıń shaması 10^7 , yaǵnıy shama menen bir jılǵa teń. Principinde usınday dáwirlerge iye bolǵan vakuumlıq ótiwlerdi reaktorlardan shıqqan neytronlardıń intensivli dástelerinde baqlawǵa boladı. Álbette, neytronlıq dásteni bir jıl

³⁰ 10^{16} GeV bolǵan atomlıq salmaqtaǵı monopollerdiń bir gramm-atomı 10^{16} g = 10^{10} tonna salmaqqa iye bolǵan bolar edi. Sonlıqtan monopollerdiń "shımshıwı" ádewir salmaqılı bolǵan bolar edi.

dawamında baqlawdıń múmkinshiligi joq. Biraq bunday baqlawdı shólkemlestiriwdiń de keregi joq. Jetkilikli dárejede intensivli dástede ayırım neytronlardıń aylanıwı sekundtıń kishi bólimleriniń ózinde júzege keledi. Bunday aylanıwdı dásteniń aldına nıshananı jaylastırıp, zattağı neytron menen antineytronniń annigilyaciyasınıń saldarınan bólinip shıǵatuǵın energiyanı baqlaw jolı menen registraciyalawǵa boladı. Házirgi kúnleri bir qatar yadroliq reaktorlarda usınday tájiriybeni ótkeriwge tayarlıq kórilip atır.

Gruppanıń rangı qanshama joqarı bolsa, onda onıń multipletleri keń hám olar sonshama kóp gipotezalıq bólekshelerdi óziniń ishine aladı. Mısalı, óziniń podgruppası sıpatında $SO(10)$ gruppasın óziniń ishine alatuǵın altınshı rangalı ayırıqsha E_6 gruppası 27-plettegi bir áwladtıń fermionlarına iye:

$$(27)_{E_6} = (16 + 10 + 1)_{SO(10)}.$$

Bul jerde 11 qosımsha bólekshelerdiń ishinde jańa kvarklar da, jańa leptonlar da bar. Usınday modellerdiń avtorları qosımsha bólekshelerdiń massaları júdá úlken bolǵanlıqtan olar elege shekem baqlanǵan joq dep esaplaydı.

Minimallıq $SU(5)$ modelinde spontan buzılıw eki etaptan turadı. Birinshi etap $10^{14} - 10^{16}$ GeV masshtabı menen xarakterlenedi. $SU(5)$ bul jaǵdayda $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ge shekem buzıladı. Ekinshi etap $10^2 - 10^3$ masshtabı menen xarakterlenedi; bul jerde simmetriyanıń $SU(3)_{\text{ázzı}} \times U(1)_{\text{em}}$ ge shekem buzılıwı orın aladı. Bul eki masshtabtıń arasında jańa bólekshelersiz, jańa fizikalıq qubılıslar bolmaǵan zeriktiretuǵın kalibrovkalıq shólistan orın aladı. Joqarıraq rangalarǵa iye gruppalarda shólistannan turatuǵın ushastkalar oazisler arqalı baylanısadı. Usınday hár bir oaziste energiyanıń joqarıdan tómenge qaray qozǵalıısında gezektegi aralıqlıq simmetriyanıń buzılıwı orın aladı. Eger baslanǵısh gruppa jetkilikli dárejede quramalı bolsa, onda onıń oazisleriniń hár qıylı alternativlik variantlarınıń bolıwı múmkin. Mısalı, $SO(5)$ gruppası da, $SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ gruppası da $SO(10)$ gruppasınıń buzılıwınıń birinshi etapı bolıwı múmkin. Ullı birlesiw modeliniń birinshi variantı waqıt boyınsha birinshi ret 1973-jılı Pati menen Salam tárepinen $SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ gruppasınıń tiykarında usınılǵanlıǵın ańǵaramız.

Joqarı rangke iye bolǵan gruppalardıń paydalanatuǵın modellerdiń ishinde tek bir áwladqa kiretuǵın fermionlardı birlestiretuǵın ǵana emes, al hár qıylı áwladlarǵa kiretuǵın fermionlardı birlestiretuǵın modeller ayırıqsha qızıqlı. Usınday "haqıyqatında da ullı" bolǵan modellerdiń bir neshe tipleri qaraldı: 1) ortogonallıq $SO(18)$, $SO(22)$, ...; 2) unitarlıq $SU(8)$, $SU(14)$, ...; 3) ayırıqsha bolǵan E_6 , E_7 , E_8 , ...; 4) tek bir kalibrovkalıq konstanta bolatuǵın diskret simmetriya menen baylanıslı bolǵan ápiwayı gruppalardıń kóbeymesi: $SU(5)^2 = SU(5) \times SU(5)$, $SO(10)^2 = SO(10) \times SO(10)$ hám t. b. Bul modeller áwladlar arasındaǵı gorizontallıq ótiwlerdi beretuǵın kalibrovkalıq bozonlarǵa iye:

$$\begin{aligned} e &\leftrightarrow \mu \leftrightarrow \tau, \\ \nu_e &\leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau, \\ d &\leftrightarrow s \leftrightarrow b, \\ u &\leftrightarrow c \leftrightarrow t. \end{aligned}$$

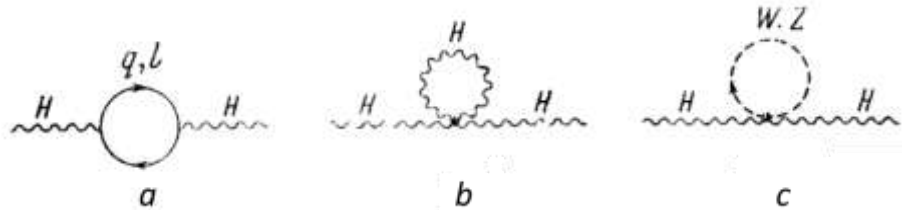
Eger "gorizontallıq" bozonlardıń massaları júdá úlken bolmasa, onda $\mu \rightarrow e + \gamma$ tipindegi júdá siyrek ıdırawlardıń orın alıwı kerek. Bunday ıdırawlardı izlew ayırıqsha qızıǵıwıardı payda etedi. Bunday ıdırawlardıń mezonlıq fabrikalarda júriwi múmkin (mezonlıq fabrikalar dep energiya 1 GeV ten kishi yamasa oǵan barabar bolǵan kúshli protonlıq tezletkishlerdi ataydı).

Modeller okeanındaǵı ayırıqsha noqat bolıp ayırıqsha gruppalardıń ishindegi eń jası úlkeni E_8 bolıp tabıladı. Onıń qızıqlı qásiyeti bolıp fundamentallıq hám biriktirilgen kórinislerdiń ólshemleriniń birdey ekenligi bolıp tabıladı: E_8 modelinde 248 fermion hám 248 kalibrovkalıq bozon bar. Tilekke qarsı, bul modeldegi skalyar bozonlardıń sanı mıńlaǵan. Bul jaǵday teoretiklerdi qorqıtadı hám sonlıqtan ádebiyatta E_8 gruppasın tolıq izertlewler joq.

Bul paragrafta esletilip ótilgen barlıq modellerdiń eń aytarlıqtay kemshiligi massalardıń

ierarxiyası problemi, energiyalıq masshtabtır ierarxiyası problemi bolıp tabıladı.

Ierarxiya problemi $SU(5)$ modelinde eń ápiwayı túrge iye. Onda tek eki masshtab bar: 10^{14} hám 10^2 GeV. Formal túrde, algebralıq jollar menen bir birinen gárezsiz bolğan eki energiyalıq minimumğa iye bolğan xiggs potencialın jazıwǵa boladı: birewi joqarı, ekinshisi tómengi energiyalarda. Biraq olardı bir birinen izolyaciylaw fizikalıq jaqtan qıyın. Kvantlıq effektlerge, kalibrovkalıq bozonlar menen almasıwǵa baylanıslı awır hám jeńil xiggs bozonları bir biri menen tásirlesedi. Sonlıqtan, eger vakuumlıq kondensatlardıń 12 tártipke ayırmasınıń baslanǵısh lagranjiandaǵı "asa juqa nastroykanıń" isleniwi támiyinlengen bolsa da, bul nastroyka kvantlıq dúzetiwler tárepinen qıyratılǵan hám W- bozonlardıń massalarınıń tártibiniń shamasınıń X- bozonlarınıń massalarına teń bolǵan bolar edi.



34-cúwret.

Sol problemanıń basqa da kórinuwin hátte ullı birlesiwdi qaramay-aq, al standart $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ teoriyanıń sheklerinde turıp ta kóriwge boladı. Másele sonnan ibarat, xiggs bozonlarınıń massaların úles qosatuǵın diagrammalar (34-súwrettegi tolqın tárizli sızıqlar spini 0 ge teń bolǵan, tegis sızıqlar spini $\frac{1}{2}$ ge teń, al shtrix sızıqlar spini 1 ge teń bólekshelerdi sáwlelendiredi) kvadratlıq túrde jayıladı. Eger bul diagrammalardıń bir biri menen kompensaciylanıwı orın almasa, onda kvadratlıq jayılwı Plank impulsinen kishi bolmaǵan impulslerde qıyıwdıń ámelge asırılıwı múmkin. Al, bul óz gezeginde xiggs bozonlarınıń, soǵan saykes W-bozonlardıń massalarınıń tábiyiy masshtabınıń tártibiniń Plank massasında bolatuǵınlıǵın ańǵartadı. Basqa sózler menen aytqanda, G_F Fermi konstantasınıń tártibi boyınsha G_N Nyuton konstantasında bolatuǵınlıǵın ańǵartqan bolar edi. Al tábiyatta bolsa Fermi konstantası Nyuton konstantasınan 33 tártipke úlken.

Eger 34-súwrettegi diagrammalardıń jıynaqlıqları bir birin kompensaciylaǵan jaǵdayda bul ierarxiyalıq paradokstı sheshiw múmkin bolǵan bolar edi. Fermionlıq qurıq teris belgige, al bozonlıq qurıqlar oń belgige iye bolǵanlıqtan principinde onı islewdiń múmkinshiligi bar. Biraq, kompensaciyanıń orın alıwı ushın fermionlar menen bozonlardıń arasında simmetriyanıń bolıwı kerek.

Usı jaǵdayǵa baylanıslı da, elementar bólekshelerdiń teoriyasında bir ret bolmaǵanı sıyaqlı, bunday simmetriya teoretikler tárepinen tek ilimiy qızıǵıwshılıqtıń saldarınan masshtablardıń ierarxiyası mashqalası menen pútkilley baylanıssız túrde birazdan beri úyrenilip atırǵan bolıp shıqtı. Onıń ústine, bul simmetriyaǵa supersimmetriya ataması bekkem bekitildi.

Supersimmetriya

Izotoplıq, reńli, elektrázzi yamasa ullı birlesiw simmetriyalarınıń hár qıylı bolatuǵınlıǵın kózge túsetuǵın bolsa da, olardıń barlıǵınıń ayırıqsha belgisi bar - olar ishki simmetriya bolıp tabıladı. "Ishki" sózi bul simmetriyalardıń túrlendiriwleriniń túrlenetuǵın hallardıń keńisliklik-waqıtlıq, geometriyalıq qásiyetlerine tásir etpeytuǵınlıǵın ańǵartadı. Izotoplıq burıwlardıń tásirinde neytronnıń tap sonday spinge iye bolǵan protonǵa aylanıwı múmkin. Biraq, aytayıq, π -mezongǵa aylana almaydı. $SU(5)$ túrlendiriwleri leptonlar menen kvarklardı bir birine aylandıradı. Biraq bul jaǵdayda da berilgen spinge (hám berilgen spirallıqqa) iye bolǵan halǵa aylandırıladı.

Supersimmetriyalıq túrlendiriwlerdiń taza ishki simmetriyalardan ayırması sonnan ibarat, bul jaǵdayda fermionlardıń bozonlarǵa, misalı, skalyar bóleksheni spinorlıq yamasa spinorlıq bóleksheni vektorlıq bólekshenge ótiwi orın aladı. 1971-jılı supersimmetriya haqqındaǵı birinshi jumıs jariq kórgende de (JETP tiń redakciyasına jazılǵan Golfand penen Lixtmannıń xatındaǵı), usı qatarlar jazılıp atırǵan hám supersimmetriya haqqındaǵı maqalalardıń sanı bir neshe mıńǵa jetken 1982-jıldıń aqırında da bizge belgili bolǵan elementar bólekshelerdiń spektrinde supersimmetriyanıń eń kishi bolǵan belgiler kóringen joq. Nelikten supersimmetriya (yamasa onıń qısqartılǵan belgisi SUSY) usınday úlken dıqqattı ózine qarattı? "Altın superlixoradka" qanday artıqmashlıǵı menen payda bolǵan? Bul sorawǵa skeptiklerdiń juwabı - moda. Entuziastlardıń juwabı - ullı kútiw.

Supersimmetriya haqıyqatında da supertuwılıwlar ushın tiykar jaratıp beredi.

Qanday da bir supermultipletti, misalı, barlıǵı bolıp eki bólekshenge iye eń ápiwayı supermultipletlerdiń biri bolǵan foton menen fotinonı — mayoran neytrinosına usaǵan spini $\frac{1}{2}$ ge teń gipotezalıq haqıyqıy neytral bóleksheni qaraymız. Supermultiplettiń ishindegi túrlendiriwlerdi spinorlıq generator Q ámelge asıradı. Supermultiplettegi maydannıń hár qıylı ólshemlerge iye bolatuǵınlıǵınan eń bolmaǵanda bul túrlendiriwlerdiń qarapayım emesligi kelip shıǵadı: bozonlıq m , fermionlıq $m^{3/2}$. Bunıń sáwlesi eki spinorlıq generetor Q dıń antikommutatorınıń Q dıń ólshem birliǵı m bolǵan shama arqalı, al atap aytqanda tórt ólshemli jılıw generatorı

$$\{Q, \bar{Q}\} = Q\bar{Q} + \bar{Q}Q = -2p_\mu v_\mu$$

bolǵan 4-impuls p_μ arqalı ańlatılauıǵında. Bul ańlatpada v_μ arqalı Diraktıń 4-matricası belgilengen. Spinorlıq túrlendiriw - jılıwdan alınǵan kvadrat túbir bolıp tabıladı.

Biz spinniń ishki ózgeriwshi bolıp tabılmaıtuǵınlıǵın ele kóremiz. Biz bunı burınraq ta kórdik, sebebi spin orbitalıq múyeshlik moment penen bir qatarda tolıq múyeshlik moment ushın jazılǵan ańlatpaǵa tolıq huqıqlı qosılıwshi sıpatında kiredi.

Keńisliklik-waqıtlıq jılıwlardıń generatorları p_μ spinorlıq generetorlar Q menen birgelikte supersimmetriyanıń graduırovkalıq algebrası dep atalatuǵın algebranı payda etedi. Ol óziniń ishine podalgebra sıpatında Puankare algebrasın da aladı (Graduırovkalanǵan algebra dep óziniń ishine kommutatorlar menen bir qatarda antikommutatorlardı da alatuǵın algebraǵa aytadı). Solay etip, supersimmetriya Puankare gruppasınıń ulıwmalastırılıwın jáne arnawlı salıstırmalıq teoriyasınıń tereńlestiriliwın talap etedi eken. Geometriyalıq jılıwlar menen burılıwlar bólekshelerdiń tábiyatın ózgertpeydi: qálegen jılıwlarda yamasa burılıwlarda elektron hesh ózgerissiz elektron bolıp qala beredi. Usı waqıtqa shekem biz úyrengen ishki túrlendiriwler bólekshelerdiń koordinataların ózgertpeydi. Endi bizler bir bóleksheden ekinshi bólekshenge ótip, al onnan keyin dáslepki bólekshenge kelgende onı keńisliktiń basqa noqatında tabılauıǵınlıǵı máselesi menen soqlıǵısamız.

Biz burın da keńisliklik hám ishki ózgeriwshilerdiń kórinwi menen ushırasqan edik. Bul jerde mene CPT-teoremanı názerde tutıp atırman. Zaryadlıq túyinleslik C menen waqıttıń aylanıwı T arasındaǵı baylanıs maydannıń kvantlıq teoriyasınıń tiykarında jatadı. Bir operatordıń bóleksheni payda etetuǵınlıǵın hám antibóleksheni joq etetuǵınlıǵın eske túsirińiz. Al Feynman diagrammaları tilinde pozitron waqıttıń ótiwi menen keyinge qaray qozǵalatuǵın elektron. Al P -túrlendiriwlerge keletuǵın bolsaq, onda ol 4 ólshemli Evklid keńisliktiń izotropiyası menen baylanıslı bolıp shıǵadı.

Abellik emes monopollerdegi izotoplıq hám keńisliklik koordinatalar ápiwayı emes túrde baylanısqan. Biraq, bul keńislikte sozılǵan obʼekttiń qásiyeti, teoriyanıń lagranjianı emes, al sheshimleri.

Matematikalıq apparatta supersimmetriya túrlendiriwlerdiń jańa hár qıylı tipleri arasındaǵı jańa tereń baylanıslardı ashadı. Eger globalıq simmetriyadan túrlendiriwleriniń parametrleri keńisliklik-waqıtlıq koordinatalardıń funkciyaları bolǵan lokalıq simmetriyaǵa ótsek (Volkov,

Akulov, 1972; Zumino, Vese, 1974), onda ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyanıń ulıwmalastırılıwın - supergravitaciyaǵa iye bolamız (Dezer, Zumino, Ferrara, Frimen, Nyuvenxoyzen, 1976). Eń ápiwayı supergravitaciyalıq multiplet eki bólekshge iye: graviton hám gravitino (spinleri $3/2$ ge teń bolǵan gipotezalıq neytral bóleksheler).

Bir multiplettegi fermionlar menen bozonlardıń simmetriyalıq qatnasıwı globallıq supersimmetriyadaǵı hám supergravitaciyaǵı jaǵımız jaýılıwlarıń kompensaciyanıwın joq etiwge "wáde" beredi. Sebebi (biz bul haqqında joqarıda atap óttik) fermionlıq qurıqlar teris belgige, al bozonlıq qurıqlar oń belgige iye.

Biz tallap atırǵan kompensaciylar ushın júdá áhmiyetli bolǵan qızıqlı shama kosmologiyalıq aǵza dep atalatuǵın λ shaması bolıp tabıladı. Ol vakuumnıń gravitaciyalıq "zaryadın", vakuumnıń energiya-impulsiniń gravitaciyalıq tıǵızlıǵın anıqlaydı. Tájiriybede λ -aǵzanıń tásiiri hesh waqıtta baqlanbadı hám usı λ -aǵzasın nolge teń dep boljaydı. Astronomiyalıq baqlawlar $\lambda < 10^{-47}$ GeV⁴ mánisiniń orın alatuǵınlıǵın kórsetedi (bul shek vakuumnıń 1 m³ kóleminde shama menen bir protonlıq massanıń bolıwına juwap beredi).

Ekinshi tárepten, qanday da bir maydannıń vakuumlıq fluktuaciyların nadanlıq penen ótkerilgen birliklik bahalaw tiykarında $\lambda \sim m_p^4 \sim 10^{78}$ GeV⁴ shamasın kútiw múmkin. Bul tábiyatta hár qıylı maydanlardıń asa dál kompensaciylarınıń bolatuǵınlıǵın arǵartpayma? Tilekke qarsı, házirgi waqıtları usınday fantastikalıq dál kompensaciyanıń qatań túrdegi supersimmetriyada emes, al buzılǵan supersimmetriyada qalayınsha júzege keletuǵınlıǵı kórinip turǵan joq. Al SUSY bolsa (eger ol tábiyatta bar bolsa) júdá kúshli buzılǵan. Hesh bir supermultipletti biz tájiriybede kórmedik hám biziń ádettegi bólekshelerimizdiń superserikleriniń ele tájiriybelerde tabılmaǵanlıǵı olardıń massalarınıń júdá úlken ekenliginde dep úmit etemiz.

Bizlerdiń joqarıda atap ótkenimizdey, supersimmetriya ishki simmetriylar menen geometriyalıq simmetriylardı birlestiriw ushın zor múmkinshilikti ashıp beredi. Ámeliy jaqtan, bunday birlesiw spinorlıq Q generatorına bazı bir ishki i indeksin ($1 < i < N$) "ildiriw" menen júzege keltiriledi. Q_i generatorı tek spindi emes, al bólekshelerdiń "aromatın" da ózgertedi. Bunday supersimmetriyanı keńeytilgen supersimmetriya dep ataydı.

Keńeytilgen globallıq supersimmetriyaǵa ayırıp kórsetilgen misal i indeksi 1 den 4 ke shekem ózgeretuǵın jaǵdayǵa sáykes keledi. Bul $N = 4$ - supersimmetriya dep atalatuǵın jaǵday bolıp tabıladı. Bul teoriyada massaǵa iye bolmaǵan bólekshelerdiń sanı 11: $j = 1$ bolǵan bir, $j = 1/2$ bolǵan tórt hám $j = 0$ bolǵan altı, barlıǵı bolıp segiz bozonlıq hám segiz fermionlıq hallar (Q_i diń tásirinde haldıń spini $1/2$ ge kishireyedi hám $i = j$ teńligi orınlanǵanda $Q_i Q_j \psi = 0$ teńligi orınlanatuǵınlıǵı esapqa alıp vektorlıq bólekshelerdiń birinshi spirallıq halınan baslap usı sandı ózlerińiz keltirip shıǵarıńız). Sırtqı faktor sıpatında $N = 4$ - globallıq konstrukciyanı óziniń ishine alatuǵın iqtıyarlı kalibrovkalıq model júdá qızıqlı. SU(2) kalibrovkalıq simmetriyaǵa iye hám triplettiń bóleksheleriniń hár qaysısı óziniń menshikli bolǵan 11 qurawshıǵa iye supermultiplettiń quramına kiretuǵın model iye bolǵan model usınday modeldiń misalı boladı. Jaqında usınday modellerdegi juwırıwshı kalibrovkalıq konstantanıń "juwırıwın" toqtatatuǵınlıǵı tabıldı. Tuwrıdan-tuwrı ótkerilgen esaplawlar kalibrovkalıq konstantanıń impulsten ǵárezligi bir-, eki hám úsh qurıqlı jaqınlasıwlarda joǵalatuǵınlıǵın kórsetti. Bunnan keyin uytqıwlar teoriyasınıń barlıq tártiplerinde usınday nolge aylanıwdıń orın alatuǵınlıǵı kórsetildi. Bul bunday teoriyanıń qálegen impulslerde konformlıq-invariant shekli bolatuǵınlıǵın arǵartadı.

Keńeytilgen supergravitaciyanıń onnan da qızıqlı perspektivalardı ashadı. Bul jerde ishki hám geometriyalıq erkinlik dárejeleriniń birlesiwı tábiyattaǵı barlıq fundamentallıq kushlerdiń, olardıń ishinde gravitaciyanıń birlesiwine úmit payda etedi.

Spinorlıq generatorlar Q_i menen izbe-iz tásir etip $J > 2$ bólekshelerine iye bolmaǵan maksimallıq keńeytilgen supergravitaciyanıń $N = 8$ ge juwap beretuǵınlıǵına ańsat iseniwge boladı. Bul jaǵdayda supermultiplet mınaday massaǵa iye bolmaǵan bólekshelerge iye boladı: 1 graviton, 8 gravitino, $J = 1,56$ ǵa iye bolǵan 28 bozon, $J = 1/2$ bolǵan 56 fermion hám 70 skalyar

bólekshe (barlıǵı 128 bozonlıq hám 128 fermionlıq spirallıq hallar). Bunday teoriya globalıq $SO(8)$ simmetriyaǵa iye boladı. $N = 4$ - supergravitaciya basqa globalıq simmetriyalardı salıstırǵanda qalayınsha ayrılgan bolsa, $N = 8$ - supergravitaciya kishi N lerge iye bolǵan teoriyalardı salıstırǵanda tap sonday bolıp ayrılgan. $N = 8$ - supergravitaciya ushın ultrafiolet jayılıwlarıń joq bolıwı qurılıqlardıń eń kóp sanı ushın dálillengen. Jaqın qashıqlıqlardaǵı onıń qásiyetleri ádettegi gravitaciyaǵa salıstırǵanda kemirek singulyarlıqqa iye (múmkin, $N < 8$ bolǵan onıń "kishi qarındaslarına" salıstırǵanda).

$N = 8$ - supergravitaciyanıń bazasında lokallıq $SU(8)$ -simmetriyaǵa iye bolǵan hám úsh áwladtıń hár biri ushın óziniń podgruppası sıpatında $SU(5)$ gruppasına, sonıń menen hár qıylı áwladlardı birlestiretuǵın gorizontallıq simmetriya gruppasına iye modeldi qurıwǵa tırısıwlar boldı. Bul baǵdarda islengen nárselerdiń kólemi ele isleniwı kerek bolǵan izertlewlerdiń kólemine ádewir kishi.

Sońǵı eki jıldıń ishinde $N = 1$ - simmetriyanı $SU(5)$ hám $SO(10)$ tipindegi ullı birlesiw modellerine endiriw boyınsha kóp sanlı jumıslar baspada jarıq kórdi. Bul másele superbirlesiw máselesi sıyaqlı júdá úlken emes. Avtorlar ózleriniń aldına biraz ápiwayıraq bolǵan maqsetti qoyadı: bunnan aldırǵı paraǵraftıń aldında ayılǵan massalardıń ierarxiyası mashqalasın sheshiw.

Jayılıwları qısartıw ushın tólenetuǵın qárejettiń bahası belgili bolǵan barlıq fundamentallıq bólekshelerdiń sanın ekige úlkeytiwden ibarat: hár bir bóleksheniń superserikleriniń bolıwı kerek. Bul superseriklerdiń barlıǵı ele turaqlı atamalarǵa iye bolǵan joq. Sonıń menen birge, "fotino" hám "glyuino" terminleri ulıwma túrde qabıl etilgen terminlerge aylandı. Basqa bólekshelerdiń atamalarında tártip joq. Misalı, leptonlardıń skalyar superseriklerin sleptonlar, xiggs bozonlarınıń spinorlıq seriklerin sxiggslar, al adronlardıń seriklerin sadronlar dep ataydı. Bul atamalar bar bolǵan bólekshelerge sáykes kelmeydi, olardı belgili bir bóleksheler menen, misalı, elektron menen baylanıstırıw qıyın. Barlıq superbólekshelerdiń atamaların "ino" suffiksiniń járdeminde birden-bir usılda keltirip shıǵarıw qolaylı bolıp kórinedi. Misalı: elektrino, nyuino, myuino, xiggsino, adrino. Sonıń menen birge olardı sáykes bólekshelerdiń belgisine shtrixtı qosıp belgilew maqsetke muwapıq keledi:

$$e', \nu', \mu', \dots^{31}$$

Bul usınısqqa qarsılıq kórsetiwge boladı. Superbólekshelerge kishi etip kórsetetuǵın italiyalıq "ino" suffiksi ("neytrino" sózi kishkene neytrondı ańǵartadı) álbette sáykes kelmeydi. Sebebi olar ádettegi aǵayınlerinen ádewir salmaqlı. Biraq, fizikalıq terminologiyalarda usınday tariyxıy jaqtan payda bolǵan aqılǵa muwapıq kelmeytuǵın terminler az emes. Fizikler olardı itibar bermewge úyrenen. Misalı: atomlar bólinedi, proton onday ápiwayı emes, bazı bir mezonlar kóp sanlı barionlarǵa salıstırǵanda salmaqlı.

Biraq, olardıń barlıǵı sonday; álbette mashqala superbólekshelerge qanday atama beriwdiń kerekligi menen baylanıslı emes, al olardıń qásiyetlerin, misalı massaların boljawdan ibarat.

Joqarıda ayılǵan skalyarlardıń massaların kompensaciyalaw ushın "ino" lardıń massaları 1 TeV ten ádewir kishi bolıwı kerek. Bunday bolmaǵan jaǵdayda elektrázzi teoriyadaǵı vakuumlıq ortasha shama óziniń belgili bolǵan 200 GeV shamasınan ádewir úlken bolǵan bolar edi. Superbólekshelerdiń massaların dálirek boljaw ushın bólekshelerdiń belgili bolǵan jıyınaǵına iye hám supersimmetriyanıń buzılıwınıń belgili bolǵan mexanizmi bar bolǵan kóp sanlı ayqın modellerdiń ishinen birewin saylap alıw kerek.

Bar bolǵan eksperimentallıq maǵlıwmatlardı fenomenologiyalıq tallaw fotinonıń neytrinoday sonshama jeńil bolıwınıń kerek ekenligin kórsetedi. Ekinshi tárepten, glyuinionıń hám oǵan iye bolǵan superadronlardıń (adrino) massaları bir neshe GeV ke teń bolıwı kerek. Házirgi waqıtları islep turǵan protonlıq tezletkishlerde bunday adrinolardı izlewge boladı.

Superbólekshelerdiń bar bolıwı protonnıń jasaw waqıtına tásirin tiygiziwi kerek. Sebebi

³¹ 2-basılıǵa eskertiw: Terminler sózligindegi "Sbóleksheler" maqalasına qarańız.

olardıń sanına hám supermultipletlerdiń tipinen juwırıwshı konstantalardıń juwırıw tezligi, usıǵan sıykes ullı birlesiw massası ǵárezli (32-súwrettegi traektoriyalardıń qıyalıǵı). Usınıń menen birge ıdırawdıń jańa mexanizmi de payda boladı.

Hátte, eger superbóleksheler salmaqlı hám olardıń massaları 100 GeV ke jaqın bolsa, onda kollariderlerdiń kelesi áwladı ushın hám qolaylı sharayatlarda olardıń ayırımların kelesi on jıllıqtıń ishinde ashıwǵa úlken múmkinshilikler bar³².

Superbólekshelerdiń ashılıwı simmetriya ideyalarınıń triumfa (jeńisi) bolǵan bolar edi. Usınıń menen birge ol bizge simmetriyanıń buzılıwınıń mexanizmleri haqqında kóp nárseni aytqan bolar edi.

Birlesiw modelleri hám úlken partlanıw

Biziń ádettegi birliklerdegi táriyiplegende astronomiyalıq sanlar bolǵan Plank massası m_P menen oǵan jaqın ullı birlesiw massası bolǵan m_{GU} shaması sıykes energiyalar menen tezletkishlerde tájiriye ótkeriwge bolǵan qálegen úmitti joq etedi.

Júdá úlken bolǵan, protonlardıń energiyası onlaǵan mıń GeV ke jetetuǵın protonlıq tezletkishti - kollariderdi qurıwdıń tolıq realistlik proektleri bar. Múmkın, tezletiwdiń jańa usılların paydalanǵanda protonlardıń 10^5 GeV energiyasınan úlken bolǵan energiyalardı alıwdıń múmkinshiligi tuwılatuǵın shıǵar. Biraq, hátte Jerdiń diametrinen úlken bolǵan kosmos keńisliginde soǵılǵan fantastikalıq asa ótkizgishli tezletkishte protondı 10^8 GeV energiyaǵa shekem tezletiwge boladı. Bul shama m_{GU} shamasınan júdá kishi (10^8 shegi sinxrotronlıq nurlanıwǵa baylanıslı kelip shıǵadı: bir aylanıwda orbitanıń turaqlı bolǵan radiusında nurlandırılátuǵın energiyanıń shaması bólekshelerdiń energiyasınıń tórtinshi dárejesine proporcional ósedı).

Eger grand-monopollerdi tutıp alıwdıń hám olardı ástelendiriwdiń sáti tússe, onda m_{GU} shamasına jaqın massalardaǵı eksperimentallıq fizikanıń bolıwı múmkın. Sebebi monopol menen antimonopoldıń annigilyaciyasında X- hám Y-bozonlardıń jáne ullı birlesiw sxemalarında qatnasatuǵın júdá salmaqlı bolǵan xiggs bozonlarınıń tuwılıwı kerek. Eger grandmonopollerdiń katalizator xızmetin atqaratuǵınlıǵı menen baylanıslı bolǵan úlken úmitlerdi esapqa alatuǵın bolsaq, onda monopoller ashılǵan waqıttaǵı (eger olar ashıla ǵoysa) olardı atıw boyınsha licenziyalar júdá kem muǵdarda beriledi.

Jerdegi perspektivalardıń bolmawı birlesiw mashqalaları menen shuǵıllanatuǵın fizik-teoretiklerdi kosmologiyaǵa, úlken partlanıwdıń eń dáslepki dáwirlerine diqqat awdarıwǵa májbúrleydi.

Qızǵan Álem teoriyasına sıykes, Álemnıń t jası menen T temperaturasınıń arasındaǵı shamalar tártibi boyınsha

$$t \sim \frac{m_P}{T^2}$$

ańlatpasınıń járdeminde beriledi. Bul ańlatpada t sekundlarda, al $\frac{1}{T^2}$ megaelektronvoltlarda beriledi. Sonlıqtan tártibi boyınsha $10^{15} - 10^{16}$ GeV shamasına teń temperatura $10^{-36} - 10^{-44}$ s jasqa sıykes keledi. Bunday asa jas Álem ullı birlesiw hám superbirlesiw modellerin tekserip kóriw ushın tábiyiy laboratoriya bolıp tabıladı.

Tilekke qarsı, júdá kishi bolǵan eń dáslepki dáwirleri ushın tuwrıdan-tuwrı gúwa bolǵanday hesh nárese qalǵan joq. Biraq bizdi qorshap turǵan dúnyanıń baǵı bir qásiyetleri boyınsha olar haqqında bir qansha tallawlardı júrgiziwge boladı. Dúnyanıń bunday tiykarǵı qásiyetlerine Álemnıń jası: $(1 \div 2) \cdot 10^{10}$ jıl, Xabbl nızamı boyınsha galaktikalardıń bir birinen qashıwı, temperaturası $T = 3$ K bolǵan reliklik nurlardıń bolıwı, bul gazdıń bir tekli hám izotrop ekenligi,

³² Superbóleksheler elege shekem (2021-jılǵa shekem) ashılǵan joq (Awdarıwshı).

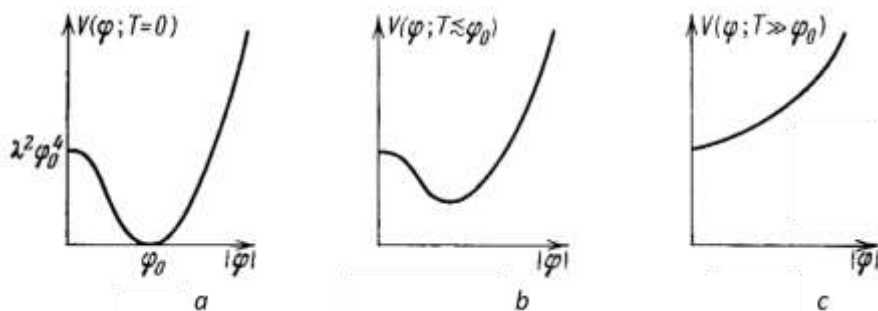
kóžge kórinetuǵın zatlardıń ortasha tıǵızlıǵı (1 m^3 ta shama menen 1 protonǵa sáykes keletuǵın) hám usı tıǵızlıq penen salıstırılıqtay yamasa onnan úlkenirek bolǵan galaktikalardıń tajlarındaǵı hám galaktikalardıń jıyınalındaǵı kóžge kórinbeytuǵın zatlardıń tıǵızlıǵı.

Álemniń tiykarǵı áhmiyetli parametrleriniń biri nuklonlardıń sanınıń reliktlik fotonlardıń sanına qatnası bolıp tabıladı. Baqlawlar usı qatnastıń $10^9 - 10^{10}$ shamasınday ekenligin kórsetti. 1967-jılı Saxarov bul qatnastı barionlıq zaryadtıń saqlanbawınıń hám CP-invariantlıqtıń buzılıwınıń sebebin eń ertedegi Álemdegi nuklonlardıń antinuklonlardıń sanınan $[(1 + 10^{-9})/1]$ shamasınday artıq bolıwı menen baylanıslı degen ideyanı usındı. Keyinirek, 70-jılları rawajlandırılǵan ullı birlesiwdiń modellerinde usı eki qurawshı da qatnasadı. Barionlıq artıqmashlıqtıń saqlanıwı qalıwı ushın zárúrli bolǵan úshinshi qurawshı Álemniń keńeyiwiniń saldarınan payda bolǵan teń salmaqlıqtıń bolmawı bolıp tabıladı.

Ullı birlesiwdiń hám superbirlesiwdiń hár qıylı modellerindegi barionlıq asimmetriyanı esaplaw boyınsha kóp sanlı ádebiyat bar. Bul esaplawlardıń kórsetiwı boyınsha, barionlardıń sanınıń antibarionlardıń sanınan artıq bolıwında tek X- hám Y-barionlar ǵana emes, al asa salmaqlı bolǵan xiggs bozonları da úlesin qosadı. Sońǵı esaplawlardıń nátiyjeleri usı xiggs bozonlarınıń qásiyetlerinen (házirgi shekem belgili bolmaǵan) ayrıqsha kúshli ǵárezli. Olardan Álemniń salkınlawınıń dinamikası da ǵárezli. Sonlıqtan barionlıq asimmetriyanı házirshe esaplawdıń sáti túspeı. Biraq, teoretik-kosmologlar ullı birlesiwdiń qálegen ayqın sxemasınıń sheklerinde barionlıq asimmetriyanı aqırına shekem esaplay alamız dep esaplaydı. Solay etip, keleshekte Álemniń barionlıq asimmetriyası sanlı túsindiriw qábiletligi grand-modeller konkursındaǵı jeńimpazdı saylap alıwıń oraylıq kriteriyleriniń biri bolıp xızmet etedi.

Barionlıq zaryad saqlanbaǵanda hám CP- juplıq saqlanǵanda qızǵan Álemnen ámeliy jaqtan foton menen neytrinodan basqa hesh nársede qalmaǵan bolar edi. Sonlıqtan, bizdi qorshaǵan nárselerdiń barlıǵınıń, sonıń ishinde biziń ózimizdiń de bar bolıwımız CP-invariantlıqtıń júdá kishi buzılıwı menen baylanıslı. Tap usı jaǵdayǵa baylanıslı 1964-jılǵa shekem fiziklerdiń basım kópshiliginde CP saqlanadı degen isenimniń bolǵanlıǵın oylaw dım qızıqlı.

Grand hám superkosmologiya boyınsha jumislardıń aldında 1972-jılı Kirjnic penen Linde tárepinen jetkilikli dárejedegi joqarı bolǵan temperaturalarda spontan túrde buzılǵan simmetriyalardıń tiklenetuǵınlıǵı áhmiyetli orındı iyeleydi. Bunnan salqınlawınıń eń birinshi waqıtları Álemniń simmetriyalardıń izbe-iz buzılıwı dáwirleri arqalı ótiwiniń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Minimallıq SU(5)-modelde dáwirlerdiń sanı tek eki: 10^{14} GeV temperaturadaǵı SU(5) tiń do SU(3)×SU(2)×U(1) ge, 10^2 GeV te SU(3)×U(1) ge buzılıwı. Quramalıraq modellerde bunday etaplardıń sanı kóp.



35-súwret.

Jetkilikli dárejedegi joqarı temperaturalardaǵı simmetriyanıń tikleniwiniń 35-súwret illyustraciyalaydı. 35-a súwrette nollik temperaturadaǵı xiggs potencialı kórsetilgen, bul súwrette φ_0 arqalı xiggs maydanınıń vakuumlıq ortashası belgilengen (31-súwret penen salıstırıńız). 35-c súwrette fazalıq ótiw temperaturası bolǵan $T \gg \varphi_0$ temperaturasınan júdá joqarı temperaturadaǵı effektivlik potencial kórsetilgen. 35-b súwret bolsa aralıqlıq temperaturaǵa

sáýkes keledi.

35-súwrette joqarı temperaturada vakuumlıq skalyar kondensattır joq ekenligi kórinip tur. Ol Álemniń salqınlawı menen payda boladı. Eger salqınlaw processı jetkilikli dárejede tez júrsen, onda keńisliktiń hár kıylı oblastlarınıń arasındaǵı signallar menen almasıw úlgermeydi hám sonlıqtan, kondensattırnıń fazaları bul oblastlardan ǵárezsiz payda boladı hám bir biri menen korrelyaciyaǵa iye emes (36-hám 37-súwretler). Bunday jaǵdayda, eger $U(1)$ abellik simmetriyanıń buzılıwı orın alatuǵın bolsa, onda vakuumde sabaqlar-naylar payda boladı hám olarda qorshaǵan xiggs kondensatı tárepinen kalibrovkalıq abellik maydannıń aǵısı qısılgan. 36-súwrette usınday naylardıń tegislik penen kesimi kórsetilgen. Bul kesimde aǵıslar qarama-qarsı táreplerge qaray baǵıtlangan. Eger abellik emes kalibrovkalıq simmetriya buzılatuǵın bolsa, onda tap sol sıyaqlı eń dáslepki salqınlawshı jelede³³ kirpi tikenler - monopoller payda bola aladı (37-súwrette monopol-antimonopol jubınıń payda bolıwı kórsetilgen, 33-súwret penen salıstırıńız). Eger diskret simmetriyanıń spontan buzılıwı orın alatuǵın bolsa, onda zatlıq maydan φ diń keńisliktiń qońsılas oblastlarındaǵı kondensatınıń hár kıylı belgilerge iye bolıwı múmkın ($\langle\varphi\rangle = \pm\varphi_0$, 38-súwret). Bunday jaǵdayda oń hám teris kondensatlarǵa iye bolǵan vakuumlıq domenlerdiń arasındaǵı shegara júdá juqa hám júdá tıǵız diywallar bolıp tabıladı: diywaldıń qalıńlıǵı $1/\lambda\varphi_0$ shamasında, betlik energiyanıń shaması $\lambda\varphi_0^3$. Bul ańlatpalardaǵı λ^2 shaması xiggs maydanınıń sıızıqlı emes ózi menen tásir etisiwdiń ólshem birlikke iye bolmaǵan konstantası. Usınday domenlik vakuumnıń tegis kesimi 39-súwrette keltirilgen.

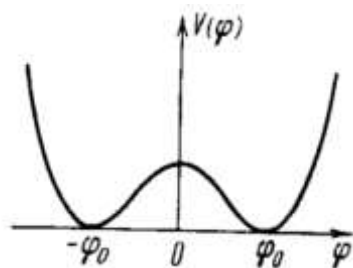


36-súwret.

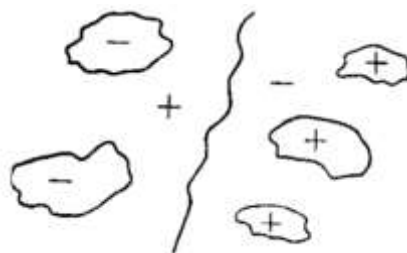


37-súwret.

Sabaqlar menen monopollerdiń kosmologiyalıq tuwılıwı birinshi ret 1976-jılı Kibbl tárepinen qaraldı. Vakuumlıq domenler, diywallardıń qásiyetleri hám olardıń Álemniń evolyuciyasına tásiiri 1974-jılı Kobzarev, Zeldovich hám men tárepten Li menen Vik tárepinen usınılgan modellik lagranjiannan kelip shıqqan halda qaraldı. Tap sol waqıtları Voloshin, Kobzarev hám men metastabillik vakuumnıń ıdırawı máselesi qaraldı.



38-súwret.

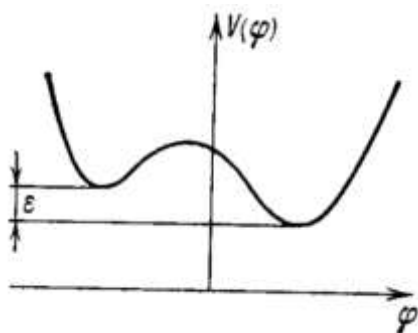


39-súwret.

Eger vakuumge juwap beretuǵın potencialdıń minimumı absolyut minimum bolmasa, onda bunday vakuum stabilli bolmaydı. 40-súwrette metastabilli vakuum shep táreptegi minimumǵa, al stabilli vakuum oń táreptegi minimumǵa sáýkes keledi. Metastabilli vakuumnıń stabilli vakuumǵa ótiw energiyalıq jaqtan utımlı emes. Biraq, 40-súwrette kórinip turǵanıday, bunday

³³ Awdarıwshı: jele - miyweden tayarlangan mazalı awqat, góshten, balıqtan qaytanıp islengen awqat (russha-qaraqalpaqsha sózlikten).

ótiw barer astınan ótiw bolıp tabıladı, sonlıqtan klassikalıq fizikanıń kóz-qarasları boyınsha ol qadağan etilgen. Ótiw barer astı arqalı jańa vakuumnıń kóbiginiń tuwılıwı menen júredi. Keyin kóbik klassikalıq keńeyiwge ushıraydı. Qala berse, bul keńeyiwdiń tezligi jaqtılıqtıń tezligine tez jaqınlasadı.



40-súwret.

Jańa tuwılǵan kóbiktiń kólemi qansha kishi bolsa, onıń tuwılıwınan itimallıǵı sonshama úlken boladı. Kóbiktiń minimallıq, kritikalıq radiusı R_c energiyalıq kóz-qaraslar boyınsha anıqlanadı - kóbiktiń kólemindegi energiyanıń utısı diwallardıń betlik energiyası menen baylanıslı bolǵan energiyalıq utilıstı kompensaciyalawı kerek:

$$\left(\frac{4}{3}\right) \pi R_c^3 \varepsilon = 4 \pi R_c^2 \sigma$$

hám usıǵan sıykes $R_c = 3\sigma/\varepsilon$. Bul teńlikte ε arqalı eki vakuumnıń energiyalarınan tıǵızlıqlarınan ayırması (40-súwretke qarańız), al σ arqalı diwaldıń betlik tıǵızlıǵı belgilengen.

Radiusı R_c bolǵan kóbiktiń barer astı payda bolıwınan itimallıǵınan $\exp(-\frac{1}{2}\pi\sigma R_c^3)$ eksponentasınıń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵın hám σ menen ε niń aqılǵa muwapıq keletuǵın mánislerinde júdá kishi ($\sim 10^{-100} - 10^{-1000}$) bolatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı (vakuumlıq kóbiklerge arnalǵan júdá kóp sanlı ádebiyattıń bar bolıwına qaramastan, eksponenciallıq funkciyanıń aldında turǵan koefficienttiń mánisi usı waqıtlarǵa shekem esaplangan joq).

Vakuumlıq kóbikler teoriyası óziniń ishine bir qatar qızıqlı teoremlardı aladı. Mısalı, Koulmen keńeyiwshi kóbiktiń Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant ekenligin ańǵardı (qálegen inerciallıq sistemada kóbiktiń orayı tınıshlıqta turadı). Ol bazı bir jaǵdaylarda gravitaciyanıń stabilizaciyalawshı tásirinde joqarı vakuumnıń pútkilley ıdıramaytuǵınlıǵın taptı.

Kosmologiyada eki yamasa kóp etajlı vakuumnıń tutqan ornın demonstraciyalaw ushın Álemniń keńeyiwın táriyipleytuǵın ápiwayı teńlemenı qaraymız:

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 - (4/3) \pi G_N \rho a^2 = K.$$

Bul teńlemede a - qanday da eki noqattıń arasındaǵı qashıqlıq (a nı masshtablıq faktor dep ataydı), al a niń ústindegi noqat waqıt boyınsha alınǵan tuwındı, G_N - waqıttan ǵárezsiz bolǵan Nyutonniń konstantası, ρ - Álemdegi energiyanıń ortasha tıǵızlıǵı; K - waqıttan ǵárezsiz bolǵan konstanta (Ádette, ádebiyatta tallanıp atırǵan teńlemenıń oń táreptegi bólimin teńliginiń $k = -2K$ teńliginiń orınlanıwı ushın $-k/2$ arqalı belgileydi).

Mánisi boyınsha birinshi qosılıwshı birlik massaǵa iye bolǵan sinap kóruletuǵın bóleksheniń kinetikalıq energiyası, al ekinshi qosılıwshı bolsa onıń potenciallyq energiyası bolıp tabıladı. Olardıń qosındısı K Álemniń evolyuciyası processinde ózgermeydi.

K konstantasınıń belgisi Álemniń evolyuciyasınıń tipin anıqlaydı. Eger $K < 0$ teńsizligi orınlansa, onda Álem jabıq hám onıń keńeyiwı erte yamasa kesh qısılw menen almasadı. Eger $K > 0$ bolsa, onda Álem ashıq, ol sheksiz uzaq waqıt keńeyedi. Shegaralıq $K = 0$ redimi tegis Álemge sıykes keledi. Bunday jaǵdayda Álemniń keńisliklik mayısıwı nolge teń hám úsh ólshemli keńislik evklidlik. Álem haqqında bizlerdiń biletuǵınımızdıń barlıǵı onıń tegis, evklidlik ekenligine qayshı kelmeydi.

Álemniń keńeyiwiniń teńlemesin ádette bilayınsha jazadı:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G_N \rho = \frac{2K}{a^2}.$$

$H = \frac{\dot{a}}{a}$ shaması Xabbl turaqlısı dep ataladı³⁴. Xabbl turaqlısının házirgi waqıtlardaǵı mánisi bir birinen qashıqlasatuǵın galaktikalardıń \dot{a} tezligin hám olarǵa shekemgi qashıqlıqlardı ólshew jolı menen anıqlanadı hám ayırım maǵlıwmatlar boyınsha onıń shaması $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$, al basqa maǵlıwmatlar boyınsha onnan eki ese úlken³⁵.

Álbette, H tıń mánisi Álemniń jasınıń ósiwi menen ózgeredi. $H(t)$ evolyuciya nızamı Álemdegi energiyanıń ortasha tıǵızlıǵı ρ nıń waqıt boyınsha ózgeriwi boyınsha anıqlanadı.

ρ nıń házirgi waqıtlardaǵı mánisi tiykarınan relyativistlik emes bólekshelerdiń massaları boyınsha anıqlanadı: bunday bóleksheler salqın shań túrine iye. Bul jaǵdayda $\rho \sim a^{-3}$.

Álem jetkilikli dárejede ıssı bolǵan rawajlanıwınıń ertedegi dáwirlerinde ol tiykarınan relyativistlik bólekshelerdiń gazinen turdı ("fotonlıq gaz"). Bunday jaǵdayda ápiwayı ólsheń birlikleri kóz-qarasları boyınsha $\rho \sim a^{-4}$ (fotonlardıń tıǵızlıǵı $\rho \sim a^{-3}$ nızamı boyınsha, al hár bir fotonniń energiyası a^{-1} nızamı boyınsha kemeyedi, sebebi fotonniń tolqın uzınlıǵı masshtablıq faktordıń úlkeyiwi menen kemeydi. Bul jaǵdayda qara deneniń nurlanıwı $\rho \sim T^4$ nızamı menen salıstırıńız).

Jipler menen tolǵan Álem ushın $\rho \sim a^{-2}$, diywallar menen toltırılǵan Álem ushın $\rho \sim a^{-2}$ hám, eń aqırında, nollik kosmologiyalıq aǵza bolǵan jaǵdayda (massaǵa iye vakuum bolǵan jaǵdayda) $\rho \sim a^0 = \text{const}$.

Ápiwayı differenciallıq teńlemenı sheship, fotonlar menen tolǵan Álem ushın $a \sim t^{1/2}$ ($t^{2/3}, t, t^2, e^t$) sheshimin alamız (shań, jipler, diywallar, massaǵa iye vakuum). Nollik emes kosmologiyalıq aǵza bolǵan jaǵdaydaǵı Álemniń eksponenciallıq keńeyiwidi ($a \sim e^t$) biz kelesi bette qaraymız, al házir K konstantası menen baylanıslı bolǵan qızıqlı jaǵdaydı qaraymız.

Tegis Álemge ($K = 0$ bolǵan jaǵdayǵa) juwap beretuǵın tıǵızlıq ρ nıń mánisin ádette kritikalıq tıǵızlıq dep ataydı hám onı ρ_c arqalı belgileydi. Bunday jaǵdayda

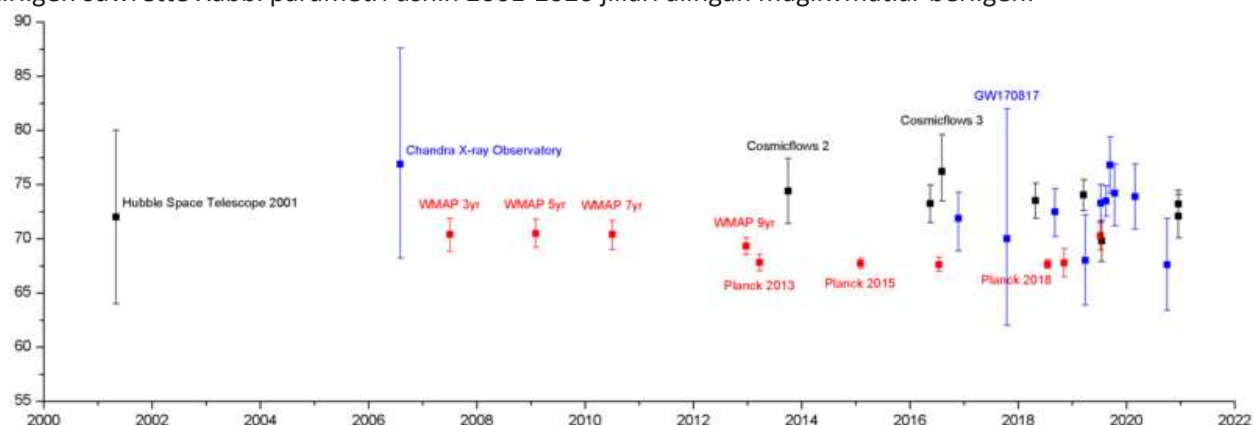
$$\rho_c = \frac{3H^2}{(8\pi G_N)}$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın ańsat tabıwǵa boladı. Baqlanatuǵın tıǵızlıq ρ nıń kritikalıq tıǵızlıq ρ_c ǵa qatnasın Ω arqalı ($\Omega = \rho/\rho_c$) arqalı belgileydi. Eger $\Omega > 1$ teńsizligi orınlanatuǵın bolsa Álem

³⁴ Bul shama Álemniń evolyuciyasınıń barısında ózgeredi. Sonlıqtan, házirgi waqıtları H shamasın Xabbl parametri dep ataydı (Awdarıwshı).

³⁵ 1 Mps (megaparsek) $\approx 3,26 \cdot 10^6$ jaqtılıq jılı.

Awdarıwshıdan: 2016-jılǵı maǵlıwmatlar boyınsha Xabbl parametriniń shaması $66,93 \pm 0,62$ (km/s)/Mpk. Al 2018-jılǵı maǵlıwmatlar boyınsha $H = 67,4 \pm 0,5$ (km/s)/Mpk. Xabbl parametri ushın hár qıylı eksperimentlerde hár qıylı mánisleriniń alınıwınıń sebepleri elege shekem belgisiz. Tórende keltirilgen súwrette Xabbl parametri ushın 2001-2020 jılları alınǵan maǵlıwmatlar berilgen:



jabıq, eger $\Omega < 1$ teńsizligi orınlansa, onda Álem ashıq, al $\Omega = 1$ teńligi orınlansa, onda Álem tegis.

Ádebiyatta Ω shamasına baylanıslı pikirlerdiń birligi joq, biraq avtorlardıń kópshiligi $0,1 < \Omega < 2$ bolǵan jaǵdaydı maqullaydı (Usınıń menen birge $\Omega_B \equiv \rho_B/\rho_c \leq 0,03$, bul ańlatpada ρ_B arqalı barionlardıń tıǵızlıǵı belgilengen. Qalǵanın kórinbeytuǵın zat beredi).

Házirgi waqıtları Ω shamasınıń mánisinıń tártibi boyınsha birge jaqın ekenligi fridmanlıq keńeyiwdiń basında $\Omega - 1$ shamasınıń oǵada úlken dálilikte nolge jaqın ekenligin ańǵartadı. Haqıyqatında da, ρ_c shamasınıń anıqlamasınan $\rho_c - \rho = 3K/(4\pi G_N a^2)$ teńliginiń orınlı ekenligi kelip shıǵadı. Bul teńlikte K arqalı waqıttan ǵárezsiz bolǵan konstanta belgilengen. Ekinshi tárepten, relyativistlik bóleksheler gazı ushın $\rho \sim a^{-4}$. Solay etip,

$$(\Omega - 1)_{a=a_1} : (\Omega - 1)_{a=a_2} = a_1^2 : a_2^2$$

teńligine iye bolamız (Bul jerde biz Álemnıń evolyuciyasınıń aqırǵı etapında $\rho \sim a^{-4}$ baylanısı orın alatuǵın relyativistlik gaz emes, al $\rho \sim a^{-3}$ shańı tiykarǵı orındı iyeleydi dep esapladıq). Eger $a_1^2 : a_2^2 = T_2 : T_1$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın esapqa alatuǵın hám T_2 sıpatında onıń házirgi waqıttaǵı 3 K mánisin, al T_1 sıpatında $T_{GU} \approx 3 \cdot 10^{14}$ ullı birlesiw temperaturasınıń alsaq, onda

$$\frac{(\Omega - 1)_{T_1}}{(\Omega - 1)_{T_2}} \approx \left(\frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^{14}} \right)^2 = 10^{-54}$$

shamasına iye bolamız. $(\Omega - 1)_{T=3K} \sim 1$ ekenligin esapqa alatuǵın bolsaq, onda $(\Omega - 1)_{T_{GU}} \sim 10^{-54}$ shamasına iye bolamız. T_{GU} temperaturasında H^2 penen $(8/3)\pi G_N \rho$ shamalarınń kompensaciyasındaǵı usınday fantastikalıq dáliliktı ne támiyinleydi?

Bul sorawǵa Álemnıń evolyuciyasını $t \sim t_p \sim 1/m_P$ momentten baslap baqlap hám waqıttıń usı momentinde

$$\frac{2K}{a^2} = H^2 - (8/3)\pi G_N \rho$$

ayırması tártibi boyınsha m_P^2 shamasına dep boljap juwap beriwge tırısamız. Eger usı ayırma teris mániske iye bolsa ($K < 0$), onda Álem $1/m_P$ Plank dáwiri shamasına teń dáwir menen oscillıyacılanǵan bolar edi. Eger ayırma oń shamaǵa teń bolsa ($K > 0$), onda Álem $1/m_{GU}$ waqıtı ishinde keńeygen hám $T_{GU} \sim m_{GU}$ temperaturasına shekem salqınlaǵan bolar edi (Bunıń foton gazdıń fridmanlıq keńeyiwine tán bolǵan m_P/m_{GU}^2 waqıtınıń ishinde emes, al $1/m_{GU}$ waqıtı ishinde bolıp ótetuǵınlıǵın atap ótemiz).

Bunnan bılay biz $K > 0$ bolǵan jaǵdayda tallaymız. K -aǵzanıń tásirinde sıızqlı keńeyiwdiń ($a \sim t$) úlkeyiwı menen relyativistlik gazdıń úlesi bolǵan $\sim G_N a^{-4}$ shamasınıń tutqan ornınıń áhmiyeti kemeyedi, biraq $T \sim m_P/m_{GU}^2$ bolǵan jaǵdayda mánisinıń tártibi $G_N^2 \lambda^2 \varphi_0^2$ shamasınday bolǵan kosmologiyalıq aǵzanıń úlesi basım bola baslaydı. Bul ańlatpada λ^2 arqalı xiggs maydanınıń ózine tásir etiwinıń ólshem birligine iye bolmaǵan konstantası, al φ_0 arqalı xiggslıq vakuumlıq ortasha belgilengen (35-súwretke qarańız), $\varphi_0 \sim m_{GU}$. Kosmologiyalıq aǵzanıń bar bolıwı $T \sim m_P$ bolǵan jaǵdayda $\langle \varphi \rangle$ ortasha xiggs maydanınıń nolge teń mánisinıń óziniń kondensatlıq φ_0 mánisine ele jetip úlgermegenligin bildiredi (35-súwretke qarańız).

Kosmologiyalıq aǵzanıń tásirinde Álemnıń sıızqlı keńeyiwı eksponenciallıq keńeyiw menen almasadı:

$$a \sim \exp\left(\frac{tm_{GU}^2}{m_P}\right).$$

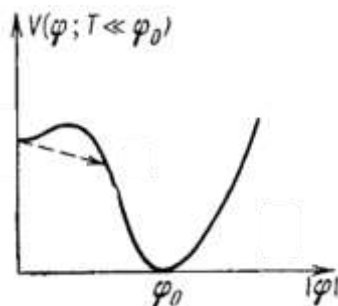
De-Sitter rejimi dep atalatuǵın usınday rejimde K -aǵzanıń úlesi waqıttıń ótiwi menen eksponenciallıq ráwishte tez óledi (a^{-2} dey) hám $2K/a^2$ aǵzasınıń ayırım túrde alınǵan H^2 hám $(8/3)\pi G_N \rho_{vak}$ shamalarına salıstırǵanda 54 tártipke kishi bolıwı ushın

$$t \sim 70 \left(\frac{m_P}{m_{GU}^2} \right) \sim 10^{-33} \text{ c}$$

shamasındaǵı waqıt jetkilikli. Solay etip, Álemnıń inflyaciyalıq úrleniwı (inflyaciya) onı K -aǵzadan

qutqarıp beredi. Biraq, bunday jaǵdayda Álem pútkilley bos hám asa salqınlaǵan túrde alınadı.

Inflyaciyalıq Álem teoriiyası 1980-jılları payda boldı. Házirgi waqıtları oǵan bir birinen kosmologiyalıq aǵzanıń payda bolıwı menen joq bolıw mexanizmleri boyınsha ayırılauǵın hár qıylı ayqın scenariylerge iye bolǵan kóp sanlı jumıslar baǵıshlanǵan. Geypara avtorlarda (Starobinskiy) kosmologiyalıq aǵza kvantlıq gravitaciyalıq effektlerdiń tásirinde dóretiledi, al ekinshilerde (Gus, Xoking) - standart xiggs potentsialı menen (35-súwretke qarańız), úshinshilerde (Linde) - V bapta gáp etilgen Koulmen-Vaynberg xiggs potentsialı menen payda boladı (Bunday jaǵdayda nollik temperaturada $\varphi = 0$ bolǵan jaǵdayda $V(\varphi, T)$ effektivlik potentsial metastabilli minimumǵa iye, 41-súwret).



41-súwret.

Xiggslik scenariylerdiń barlıǵında kosmologiyalıq aǵzaǵa iye bolǵan metastabilli vakuum jańa vakuumnıń kóbikleriniń payda bolıwı menen joq boladı. Linde tárepinen usınılǵan scenariyde - házirgi waqıtları ólshepleri Álemnıń kórinetuǵın ólsheplerinen kóp tártipke úlken bolǵan bir kóbik payda boladı. Bul kóbiktiń tunnelleniwiniń shama menen alınǵan ótiw jolı 41-súwrette shtrixlanǵan sızıqtıń járdeminde kórsetilgen. Kóbiktiń bos emes, al $(\varphi - \varphi_0)$ maydanı menen tolǵan ekenligi kórinip tur. Ol aqır ayaǵında temperaturası ullı birlesiw temperaturasınan bir tártipke kishi bolǵan relyativistik bólekshelerdiń gazına aylanadı. Bunday scenariy Álemnıń evklidligin hám uzaq jasaytuǵınlıǵın hám onda grandmonopollerdiń bolmaytuǵınlıǵın túsindire almaydı. Sebebi endi fridmanlıq keńeyiw jetkilikli dárejedegi joqarı temperaturadan baslanadı.

Álbette, usınday kosmologiyalıq scenariylerdi Álemnıń bunnan bılay rawajlanıwı ushın sol baslanǵısh shártlerdiń qalayınsha payda bolatuǵınlıǵı haqqındaǵı sorawǵa júdá, júdá aldın beriletuǵın juwaplardıń proekti sıpatında qaraw kerek. Usınday máselelerdi konstruktivlik túrde qarawǵa bolatuǵınlıǵınıń ózi qanday ájayıp.

Ekstropolyaciylar hám prognozlar haqqında

"Eger teoriya sońǵı 25 jıldıń ishinde sonday fantastikalıq ózgerislerge ushıraǵan bolsa, onda 25 jıldan keyin qanday ózgerislerge ushıraydı hám sonda búgingi kúndegi teoriyalıq konstrukciyalardı shıǵındılardı aparıp taslaytuǵın orınǵa aparıp taslawǵa tuwrı kelmey me? " Bul sorawdı kópshilikke arnalǵan lekciyalardan keyin, fiziklerdiń shanaraqlarındaǵı áńgimelesiwlerde skeptik tırlawshılar jiyi beredi.

Sońǵı jigirma bes jıl ishinde alınǵan eksperimentallıq hám teoriyalıq ashılıwlarǵa kelsek, onda olardıń barlıǵı da XX ásirdiń birinshi yarımında dóretilgen maydannıń lagranjlıq kvantlıq teoriyasınıń ańǵarında jatatuǵınlıǵı atap ótiw kerek. Kvarklar menen Xiggs bozonları sıyaqlı bunday obьektlerdiń ádettegidey emes ekenligine qaramastan, olardı táriyipleytuǵın teoriyalar bunnan burın tabılǵan principlerdiń hesh qaysısın buzbaydı Usınday teoriyalardıń zárúr ekenligi XX ásirdiń 50-jılları aytıp ótken Bor olardı "essiz" teoriyalardıń qatarına jatqarmaǵan bolar edi.

Eger tek sońǵı 25 jıldı emes, al úlkenirek bolǵan dáwirdi qarasaq, onda fizikalıq kartınanıń úlken bolǵan hár bir ózgerisinde jańa teoriyalardıń eski teoriyalardı qıyratpaytuǵınlıǵın kóriwge boladı. Eski teoriyalarǵa salıstırǵanda qollanıwı oblastları keń bolǵan jańa teoriyalar óziniń ishine

eski teoriyalardı shektegi jaǵdaylar sıpatında qamtıp aladı. Relyativistlik emes mexanikadan relyativistlik mexanikaǵa, klassikalıq mexanikadan kvantlıq mexanikaǵa, kvantlıq mexanikadan maydannıń kvantlıq teoriyasına ótkende usınday jaǵday júz berdi. Elektrázzi tásirlesiwdiń teoriyası tórt fermionlı tásirlesiwdi biykarlaǵan joq, al tereńlestirdi. Tap usınday jaǵdaydı endi dóretiletuǵın teoriyalardan da kútiw kerek.

Bolajaq teoriyalar biziń bilimlerimizdi keńeytedi hám olardıń dáliligin joqarılatadı. Olar jańa qubılıslardı táriyipleydi hám belgili bolǵan qubılıslardı úlken dálilikte táriyiplewge múmkinshilik beredi.

Solay etip, qollanıw oblastı boyınsha házirgi zaman teoriyaları sózsiz isenimli. Usı teoriyalardı paydalanıp, olardı biz jiyi túrde eksperimentallıq sınaqtan ótpegen uzaqtaǵı oblastlarǵa ekstrapolyaciyalaymız. Geypara jaǵdaylarda bunday ekstrapolyaciya sanalı emes túrde ótkeriledi hám olar faktler menen soqlıǵısqa qarama-qarsılıqlar hám paradokslar payda boladı. Biraq kópshilik jaǵdaylarda ekstrapolyaciya tolıq sanalı túrde ótkeriledi.

Alısqa ekstrapolyaciya awdıń ayqın mısaldıń gravitaciya beredi. Biziń joqarıda aytıp ótkenimizdey, eksperimentlerde gravitaciya tásirlesiw bir neshe santimetr qashıqlıqlarda sinap kórilgen. Biraq, usı jaǵdayǵa qaramastan, gravitaciya tásirlesiwdiń klassikalıq teoriyası (ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyası) bunday tásirlesiwdi Plank qashıqlıǵına jaqın, yaǵnıy 10^{-33} sm qashıqlıqlarda da (bunday kashıqlıqlarda kúshli kvantlıq dúzetiwler húkim súre baslaydı) durıs orınlanadı aladı dep esaplanadı.

Bunday ekstrapolyaciyaǵa tiykar bar ma? Álbette, bar. Ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyası júdá sulıw teoriya bolıp tabıladı, onnan bas tartıw yamasa onı modifikaciya aqılǵa muwapıq kelmeydi. Usınıń menen birge qanday da bir aralıqlıq qashıqlıqlarǵa modifikaciyanatuǵın sulıwıraq teoriyalıq modeller joq. Usınday shárt emes bolǵan oydaǵı modifikaciyalardı Okkama pákisi menen kesip taslawdı artıqmash kóredi.

Biraq, usıǵan qaramastan meniń tereń isenimim boyınsha bilimimizdiń oblastın keńeytiw hám isenimniń oblastın kemeytiw ushın hár bir qolaylı bolǵan jaǵdaydan paydalanǵan jaqsı. Maksimallıq múmkin bolǵan ekstrapolyaciya principin maksimallıq múmkin bolǵan tekseriw principini menen tolıqtırıw kerek. Misalı, gravitaciya haqqında aytatuǵın bolsaq, onda Nyutonniń nızamın múmkin bolǵan minimallıq qashıqlıqlarda tekserip kórgen qızıqlı hám usınday jaǵdayda, hátte turpayı dálilikte bolsa da, millimetrdiń bólimlerine shekem jetkende jaqsı bolǵan bolar edi.

Quyash sistemasınıń ólshemlerinen úlken bolǵan qashıqlıqlar ushın da standart gravitaciya tásirlesiwdiń sanlıq jaqtan tekserilip kórilmegenligin ańǵaramız.

Gravitaciya ushın ekstrapolyaciya tolıq sanalı túrde islenedi; biraq, joqarıda aytıp ótilgenindey, barlıq waqıtta bunday emes. Misalı, tábiyatta elektromagnit hám gravitaciya tásirlesiwden basqa uzaqtan tásir etetuǵın basqa tásirlesiw joq degen pikir keńnen tarqalǵan. Haqıyqatında da, bul jaǵdaydıń rásinde da orın alatuǵınlıǵı shınlıqqa sáykes keledi. Qanday bolsa da, házirgi waqıtları jańa uzaqtan tásir etisiwdi kirgizbewge hesh qanday eksperimentallıq tiykar joq. Biraq, usı waqıtlarǵa shekem ótkerilgen tájiriybelerdiń uzaqtan tásir etisiw kartasında ele de kóp sanlı aq daqlardı payda etetuǵınlıǵına ayqın túrde túsiniw zárúr.

Barlıǵınan da barionlıq hám leptonlıq fotonlardıń joq ekenligi jaqsıraq tekserilgen. Bunday fotonlar gipotezalıq bóleksheler, al olardıń deregi sáykes barionlıq hám leptonlıq zaryadlar bolıp tabıladı. Qanshama paradokslıq bolıp kórinse de, Barionlıq hám leptonlıq fotonlardıń bir biri menen tásir etisiwiniń konstantaları α_B hám α_L lardıń eń joqarı sheklerin XX ásirdiń basında ótkerilgen Etvesh tájiriybeleri hám onnan keyin ótkerilgen dáliligi joqarı bolǵan tájiriybeler beredi.

Etvesh tájiriybelerinde mayatniktiń terbelis dáwiriniń usı mayatnik soǵılǵan materialdıń tipinen gárezsizligi tekserildi. Basqa sóz benen aytqanda, inert hám gravitaciya massalardıń teńligi tekserilip kóridi. Gravitaciya óz-ara tásirlesiw júdá ázzi bolǵanlıqtan, hátte Jerdiń hám mayatniktiń barionları menen leptonlarınıń arasındıǵı qosımsha uzaqtan tásirlesiw tájiriybelerdegi inert hám gravitaciya massalardıń teńliginiń buzılıwına alıp kelgen bolar edi.

Sebebi atomnıń massası ondaǵı elektronlardıń sanına proporcional emes hám yadrolıq massalardıń defektine baylanıslı tek nuklonlardıń sanına proporcional.

Etvisht ótkergen tájiriybelardıń tipindegi tájiriybelerden barionlıq fotonlardıń óz-ara tásirlesiwı konstantası α_B ushın joqarǵı shegara 10^{-47} , al leptonlıq fotonlar α_L ushın alınǵan konstantanıń joqarı shegarası 10^{-49} shamaları alınadı. Bunı ádettegi elektromagnit tásirlesiwı menen salıstırıw kerek (elektromagnit tásirlesiw ushın $1/137$ shaması alınadı). 10^{-50} den kem bolǵan α_B hám α_L konstantaları bar uzaqtan tásirlesiwdiń kópshilik ushın haqıyqatlıqqa sáykes kelmeytuǵında bolıp kórinedi (eń bolmaǵanında házirgi waqıtları).

Tásirlesiwdiń múmkin bolǵan basqa tipleri ushın ádewir jamanıraq bolǵan qatnaslar bar.

Mısalı, gipotezalıq neytrallıq massaǵa iye bolmaǵan psevdoskalyarlıq bólekshelerdi shıǵarıw menen jutıw bólekshelerdiń magnit momenti menen elektromagnit maydanı arasındǵı óz-ara tásirlesiwge uqsas bolǵan qızıqlı kúshlik effektlerge alıp kelgen bolar edi. Biraq, ádettegi elektromagnit maydandan parqı, psevdoskalyar maydandı metall yamasa qanday da ekranniń járdeminde ekranlawǵa bolmaydı.

Qálegenshe uzın hám bekkem glyuon tárizli jipler arqalı abellik emes uzaqtan tásirlesiwdiń bar bolıwın biykarlanǵan dewge bolmaydı. Házirgi waqıtları belgili bolǵan bólekshelerde qosımsha azǵınıwlarıń bolmawı sebepli, olar usı jańa glyuonlar ushın kvarklardıń ornın iyeley almaydı. Biraq, eger usınday kvarklar bar bolǵanda hám olar júdá salmaqlı bolmaǵanda, onda olardı joqarı energiyalı ushırasıwshı dástelerde tabıwǵa hám bunday jaǵdayda kvark-antikvark jubınıń tuwılıwı sozılıwshı jip penen baylanıslı bolǵan bolar edi. Biraq, usınday tiykarsız, sonda da biykarlanbaǵan fantaziyalardan házirgi zaman fizikasınıń tiykarǵı aǵısına qaytıp keliw kerek.

Eger adamzat ulıwma insaniylik qádiriyatlardı hám, sonıń ishinde, taza ilimdi saqlap ózi ushın qáwip-qáter tuwdıratuǵın áskeriy, ekonomikalıq, ekologiyalıq krizislerden shıǵadı dep optimistlik túrde boljasaq,

— eger aldımızdaǵı on jılıqta elementar bóleksheler fizikasınıń rawajlanıwı hár qıylı ilimiy bolmaǵan jaǵdaylar menen irkinishke túspeydi dep optimistlik túrde boljasaq,

— eń aqırında fizik-teoretiklerdiń aralıqlıq vektorlıq bozonlar (usı paragraftan keyingi eskertiwdi oqırız), skalyar bozonlar, protonnıń ıdırawı, neytrinolarıń massaları menen superbóleksheler ashıladı dep optimistlik túrde boljasaq,

— eger joqarıda keltirilgen boljawlardıń barlıǵı júzege keledi dep úmit etsek, onda fizikalıq dúnyanı aqırına shekem túsiniwge boladı hám fundamentallıq fizika tewsildi dep aytıwǵa bola ma? Menińshe bul sorawǵa teris juwaptır beriliwı maǵan ózinen ózi túsiniwli bolıp kórinedi.

Joqarıda súwreti salınǵan kartinada fundamentallıq bólekshelerdiń, iqtıyarlı parametrlerdiń sanı dım kóp. Shın mánisinde bul kartinada spin hám zaryad sıyaqlı tiykarǵı túsiniwlerdiń ishki maǵanası ashılmaǵan bolıp qaladı. Bulardıń barlıǵı da fizikalıq dúnyanıń tereńirek bolǵan qáddi - subkvarklıq, subelektronlıq hám hátte subfotonlıq qáddi bar degen oydı payda etedi.

Ádebiyatta submikrodúnyaǵa hám preonlar, rishonlar, xaplonlar, glikler, ... dep atalatuǵın subbóleksheler ushın júzlegen spekulativlik baǵıshlanǵan maqalalar bar. Bul jerde sheshilmegen mashqalalardıń biri subbólekshelerden ámeliy jaqtan massalarǵa iye bolmaǵan ólshemleri boyınsha kishi hám júdá jeńil, sonıń menen birge bir birine júdá jaqın jaylasqan bólekshelerdi qalayınsha dóretiwge boladı mashqalası bolıp esaplanadı. Atomlarda da, yadrolarda da, nuklonlarda da biz bunday mashqala menen ushıraspadıq.

Eger anıqsızlıq qatnaslarına súyenetuǵın bolsaq, onda júdá kishi r ólshemlerine iye bolǵan sistemalardıń qáddilerdiń bir birinen $\Delta m \sim 1/r$ qashıqlıqta jaylasıwı kerek. Elektron menen myuonnıń magnit momentleriniń kvantlıq elektrodinamika menen júdá ájayıp sáykes keletuǵınlıǵı tiykarında $r \lesssim (1 \text{ TeV})^{-1}$ dep juwmaq shıǵarıwǵa boladı. Demek Δm nıń shaması $\gtrsim 1 \text{ TeV}$ bolıwı kerek. Sonlıqtan, aytayıq, myuondi elektronnıń qozǵan halı dep qarawǵa bolmaydı.

Bunnan basqa qıyınshılıqtıń mánisi mınadan ibarat: eger hár qıylı bóleksheler ushın ulıwmalıq konstituentler bar bolatuǵın bolsa, onda bunday bólekshelerdiń jetkilikli dárejede tez bir birine

ótiwi kerek. Mısalı:

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0, \mu \rightarrow e + \gamma \text{ h. t. b.}$$

Al, haqıyqatında, bunday ótiwler júzege kelmeydi. Eger hár qıylı subbólekshelerdiń sanın úlkeytsek, onda standart kartınaǵa salıstırǵandaǵı aytarlıqtay ápiwayılastırıw payda bolmaydı.

Fundamentallıq fizikanıń perspektivaların prognoz qılıw júdá qıyın. Fizikanıń rawajlanıwı tek retrospektivada ǵana logikalıq izbe-izlikte bolıp kórinedi. Eger "sońınan aytılatuǵın gáplerge" emes, al boljawlarǵa itibar beretuǵın bolsaq, onda gezekte qoyılatuǵın áhmiyetli qádem barlıq waqıtta kútilmegen boladı hám ol tek ǵana sırttan qarawshılar tárepinen ǵana emes, al onı orınlaytuǵınlar tárepinen de jiyi túrde mańızlı emes dep esaplanadı.

Biraq, usınday jaǵdaylarǵa qaramastan keleshek haqqında oylasaq, onda fizikanıń bunnan bılayǵı unifikaciyasındaǵı kelesi qádemniń tek qanday da bir fundamentallıq princip ashılǵannan keyin ǵana qoyılatuǵınday bolıp kórinedi. Ápiwayıraq bolıwı ushın fizikanıń házirgiden de quramalıraq bolıwı kerek. Ápiwayı bolǵan ápiwayılıq bolmaydı.

Eskertiw (1983-jıl, gúz)

Bul kitap jazılıp bolǵannan bir neshe ay ótkennen keyin CERN degi $p\bar{p}$ kollayderde isleytuǵın UA1 hám UA2 kollaboracıyları W-bozonlardıń tuwılıwı hám ıdırawı haqqında xabar berdi. W-bozonınıń ashılıwı haqqındaǵı CERN degi seminarda 1983-jılı 20-fevral kúni birinshi xabar payda boldı. Sáykes jumıslar preprintler túrinde 21-yanvar kúni (UA1-Collaboration) hám 15-fevral kúni (UA2-Collaboration), al onnan keyin jurnallardaǵı maqalalar túrinde járiyalandı: Arnison G. et al. // Phys. Lett.—1983.— V. 122B.— P. 103 hám Banner M. et al. // Phys. Lett.— 1983,—V. 122B.— P. 476.

W-bozonlardıń payda bolıwı olardıń elektron hám neytrinoǵa ıdırawı boyınsha registraciyalandı. W-bozonniń massası shama menen 80 GeV ke teń bolıp shıqtı³⁶. Bul shama teoriyalıq boljawlarǵa sáykes keledi.

1983-jılı iyun ayında UA1 gruppası (Arnison G. et al. // Phys. Lett.— 1983.— V. 126B.— P. 398) Z-bozonlardıń tuwılıwı menen ıdırawına sáykes keletuǵın 5 waqıyanıń baqlanǵanlıǵı haqqında xabarladı: tórt waqıya e^+e^- jubına ıdırawǵa hám bir waqıya $\mu^+\mu^-$ jubına ıdırawǵa sáykes keledi. Z-bozonniń massası shama menen 95 GeV bolıp shıqtı³⁷.

1983-jılı avgust ayında UA2 gruppası (Bagnaia R. et al. // Phys. Lett.— 1983.— V. 129V.— P. 130) Z^0 -bozonniń $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ ıdırawınan ibarat bolǵan jáne bes waqıyanıń baqlanǵanlıǵın xabarladı ($m_Z \approx 92$ GeV). Sol waqıtta UA1 gruppası (Arnison G. et al. // Phys. Lett.— 1983.— V. 129V.— P. 273) W^\pm -bozonlardıń $e^-\bar{\nu}_e$ hám $e^+\nu_e$ jubına ıdırawına sáykes keletuǵın 52 waqıyanıń júzege kelgenligin járiyaladı. Tuwılıwdıń kesimi de, elektronlar menen pozitronlardıń tarqalıwınıń múyeshlik tarqalıwı da teoriyanıń nátiyjelerine sáykes keledi.

³⁶ Awdarıwshıdan: W-bozonniń massası $80,385 \pm 0,015$ GeV/c².

³⁷ Awdarıwshıdan: Z-bozonniń massası $91,1876 \pm 0,0021$ GeV/c².

Joqarı energiyalar fizikası 86 (Ekinshi basılımqá qosımsha³⁸)

Meniń túsiniwimshe bul kirisiw bayanatınıń aldında turǵan másele elementar bóleksheler fizikasınıń házirgi kúnlerdegi jaǵdayına ulıwmalıq sholıw jasawdan ibarat. Hár qıylı tezletkishlik ideyalar menen proektlerge baǵışlanǵan bul konferenciyaǵı meniń bayanatım teatrdrń ózine tán bolǵan saxnasınıń artqı tárepine (teatralnıy zadnik) ornatılǵan dekoraciyanıń bir bólimi bolıp tabıladı.

Eń dáslep barlıq kartinanıń ulıwmalıq tonın, kaloritin saylap alıw zárúr. Onıń jaqtılı, optimistlik yamasa muńlı bolıwı kerek pe? Áńgimelesiwlerde kóp sanlı pessimistlik argumentlerdi esitiwge boladı. Kópshiliktiń pikiri boyınsha bizlerdiń házirgi waqıtları kúshli hám ázzi tásirlesiwlerdiń oǵada gózzal bolǵan standart $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ kalibrovkalıq teoriyasına iye bolǵanımız pessimizmniń tiykarǵı derekleriniń biri bolıp tabıladı. 70- hám 80-jılları ótkerilgen hesh bir eksperiment bul teoriyanı áshkara qıla almadı. Al durıslıǵına hesh kimniń gúmanı joq bolǵan teoriyanıń tiykarında islengen boljawlardı tastıyıqlaw ushın qoyılǵan eksperimentlerden kóp quwanış alınǵan joq. Sonıń menen birge bazı bir kompyuterlik ekstremistler teoriyanı tekserip kóriw ushın tezletkishlerde ótkeriletuǵın tájiriýbelerdiń pútkilley keregi joq, al kompyuterlik eksperimentler menen sheklense de boladı dep esaplaydı.

Ekinshi tárepten eń teperish jas teoretikler superstrunalarǵa ketip qaldı, olar tiykarınan 2, 10, 26, ..., 506 ólshemler menen islep atır hám tórt ólshemli dúnyanıń ápiwayı bolǵan mashqalalarınan qashıwǵa tırısadı. Al usınday tórt ólshemli dúnyanı izertlew jumıslarına fenomenologlar, eksperimentatorlar hám tezletkishlerde islewshiler sazawar boladı.

Superstrunalar menen shuǵıllanıwshılar biziń tezletkishlerimiz hesh waqıtta jete almaytuǵın plank energiyalarına súyenedi. Olardıń quwanışları usı auditoriyadaǵı quwanıştı payda etpewi kerek hám bul jerde biz qaytadan pessimizmniń gezektegi deregine - kosmologiya menen astrofizikadaǵı pessimizmge duwshar bolamız. Sebebi biziń jerdegi tezletiwshi laboratoriyamız sheklik fizikalıq shınılıqtı izlewde eń ertedegi Álem bolıp esaplanatuǵın teńi-tayı joq joqarı energiyalar fizikası laboratoriyası menen konkurenciyaǵa túse almaydı.

Joqarı energiyalardıń tezletkishli fizikasına elewli shaqırıqtı jerdiń astındaǵı tómén fonlı laboratoriyalar beredi. Bunday laboratoriyalarda protonnıń ıdrawı, qos beta-ıdraw, elektr zaryadınıń saqlanbawı, Quyashtan uship keletuǵın neytrinonı detektorlaw sıyaqlı fundamentallıq qubılıslardı izlew jumısları alıp barılmaqta. Tap usınday laboratoriyalardan X3 Aqquw shoq juldızınan keletuǵın bárshe ushın jumbaq bolǵan "jaman úyrekler" hám soǵan usaǵan sensaciýalar kelip turadı.

Tezletkish fizikasınıń eski qarsılısı hám tuwısqanı bar ǵo: (1) neytrinolardıń massaların hám neytrinoliq oscillyaciýalardı, neytrino-antineytrinoliq oscillyaciýalardı aksio tárizli bolekshelelerdi izleytuǵın tómengi energiyalardıń yadroliq fizikası hám (2) tábiyat tárepinen joqarı energiyalarǵa iye bolǵan bólekshelerdiń aǵısın biypul beretuǵın kosmoslıq nurlardıń fizikası.

"Biypul" sózi arzan turmaytuǵın jańa kollayderlerdiń qurılısı ushın aqshanı bólip shıǵarıwǵa asıqpaytuǵın hám sonlıqtan kóp sanlı batıl túrde usınılǵan proektler kóp jıllardıń ishinde embrionlıq halda saqlanıp qalatuǵın húkimetlerdi eske túsiredi.

Usınıń üstine, jaqında Batıs Evopanıń bir mámleketinde avtorları Batıs Evropadaǵı (CERN) joqarı energiyalar fizikası ushın ajratılıp shıǵatuǵın qarjılardıń sheregin biziń biologiya, ximiya, qattı deneler fizikası hám ilimniń basqa oblastlarında isleytuǵın kásipleslerimizge alıp beriw haqqındaǵı hújjet payda boldı.

³⁸ Joqarı energiyalarǵa iye zaryadlanǵan bólekshelerdiń tezletkishleri boyınsha XIII xalıq aralıq konferenciya joqarı energiyalar fizikasınıń jaǵdayları menen perspektivaları haqqındaǵı sholıw bayanatı.

Solay etip pessimizm ushın jetkilikli tiykarlar bar. Biraq usınday jaǵdaylardıń orın alıwına qaramastan men optimistlik sholıwdı beremen.

Mendegi optimizmnıń tiykarında eń dáslep teoriyalıq fizika hám onıń sheshilmegen mashqalaları menen baylanıslı bolǵan oylar jatadı. Eger teoriya haqqında gáp etetuǵın bolsaq, onda bizler házirgi waqıtları jetkilikli dárejede aqıllımız

Standart teoriyanıń kalibrovkalıq principleriniń qanday jaqsı jumıs isleytuǵınlıǵına ǵana emes, al sol kalibrovkalıq principlerdiń juwaptıń teń bir bólimi ekenligin túsingenimizge quwanımımız kerek. Massaları bir neshe TeV ten úlken bolmaǵan skalyar bozonlardıń jańa eliniń bar ekenligine bizlerdiń isenimimiz mol. Teoretik bul mámleketten kalibrovkalıq simmetriyalardıń buzılıwın, ashılǵan barlıq (ele ashılmaǵan) bólekshelerdiń massaların, ázzi toqlardaǵı aralasıw toqların, CP-simmetriyanıń buzılıwın, al geypara teoretikler hátte P-simmetriyanıń buzılıwın importlaydı. Biz bul belgisiz bolǵan jerdi ashıwdıń kerek ekenligine absolyut isenemiz, oǵan tek tezletkishlerdiń járdeminde qol jetkiziwge boladı, sebebi tek tezletkishler ǵana bizge TeV shamasına teń energiyalarda jetkilikli bolǵan jarqınlıq penen hám muqıyatlı qadaǵalanatuǵın sharayatlarda tájiriybelerdi ótkeriwge múmkinshilik beredi.

Skalyarlar ashılǵannan hám úyrenilgennen keyin de fundamentallıq tezletkishlik fizikanıń aqırına shekem ele de uzaq ekenligin biz bilemiz. Sebebi biziń tezletkishlik oblastqa sáykes keletuǵın tábiyattı túsiniwimiz ele tolıq bolmaydı.

Teoriyanıń ózi menen ózi kelisken bolıwı ushın biziń ádettegi bólekshelerimizdiń superserikleri dep atalatuǵın bólekshelerdiń (sbólekshelerdiń) bolıwı kerek degen keń tarqalǵan pikir bar. Skalyarlar sıyaqlı sbólekshelerdiń massaları 1 TeV ten úlken bolmawı kerek. Bul joqarǵı shek Fermi masshtabı boyınsha anıqlanadı: $m_F = G_F^{-1/2}$. Sbóleksheler (rus tilinde "baxıt bóleksheleri" - "shastic sshastiya") eline alıp baratuǵın birden-bir jol tezletiwshi laboratoriyalar arqalı ótedi.

Superstrunalar modelleri joqarı simmetriyanıń "qaldıqları" bolǵan júdá kóp sanlı bólekshelerdiń bar bolıwın kórsetedi:

$$E_8 \times E_8 \supset E_0 \dots \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1).$$

Massasınıń shaması 1 TeV bolǵan bul bólekshelerdiń arasında ekinshi Z-bozon, E_8 gruppasınıń úsh 27-pletlerinen jańa leptonlar menen kvarklardıń, qosımsha xiggslardıń, aqır-ayaǵında barlıq bólekshelerdiń sserikleriniń bar bolıwı múmkin. Olardıń birewleriniń elektr zaryadına iye, al basqa (neytral bolǵan) birewleriniń júdá jeńil bolıwı múmkin.

Bul bólekshelerdiń qásiyetleriniń mayda-shúydesine shekem boljaytuǵın bir de superteoretik joq. Tek kollarayderlerde isleytuǵın eksperimentatorlar ǵana olardı asha hám izertley aladı.

Superstrunalardı hám qosımsha keńisliklik ólshemlerdi qısqa waqıt ómir súredi dep esaplaytuǵın qánigelerdiń pikir qollap-quwatlamayman. Men fizikanıń tariyxında óziniń áhmiyeti boyınsha maydannıń kvantlıq teoriyasınıń dóretiliwinen kem bolmaǵan ilimiy ashılıwdıń ishinde bolamız dep oylayman.

Atap aytqanda maydannıń kvantlıq teoriyasınıń sheklerinde standart model hám onıń barlıq ekstrapolyaciyaları dóretildi. Protonlardıń ıdırawı yamasa konfaynmen sıyaqlı ádettegidey bolmaǵan qubılıslar maydannıń kvantlıq teoriyasınıń tilinde tábiyiy túrde táriyiplenedi yamasa usı teoriyanıń sheklerinde tábiyiy túrde túsiniriledi.

Maydannıń kvantlıq teoriyası — kvantlıq mexanika menen arnawlı salıstırmalıq teoriyasınıń balası bolıp tabıladı (bul bala bunnan altı on jıl burın tuwıldı). Superstrunalar teoriyası maydannıń kvantlıq teoriyasınıń hám ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyasınıń balası. Bul teoriya dóretilgen jaǵdayda fizikanıń tiykarǵı túsinikleri bolǵan keńislik, waqıt, maydanǵa jańa, ádewir tereń bolǵan máni beredi.

Jańa fundamentallıq teoriya jańa matematikalıq tildi talap etedi. Superstrunalar boyınsha jumıslar fizikanı topologiya menen algebralıq geometriya menen bayıttı. Bazı bir superstrunalıq konstrukciyalar júdá sulıw.

Biraq, meniń pikirimshe, usınday jaǵdaylardıń orın alıwına qaramastan oǵada bálent hám "barlıǵınıń teoriyası" bolǵan superstrunalıq minardıń qurılıshıları kóp TeV lik kollayderler fundamentallıq faktlerdiń jańa qatlamların ashpaǵansha hám usıǵan baylanıslı bul minar ushın jetkilikli dárejedegi keń tırnaqtı dóretpegenshe óziniń jobaların júzege keltire almaydı (Tek ǵana Kaluca, Kleyn hám Eynshteyn tárepinen elektrogravitaciyalıq birlesiwdi ámelge asırıw proekti ústindegi miyneti ushın tiykardıń qanshama tar bolǵanlıǵın oylap kórińiz).

Endi astrofizika menen kosmologiyaǵa diqqat awdaramız. Maǵan massalarınıń masshtabı 1 TeV bolǵan materiyanıń fundamentallıq elementleri bolǵan skalyarlar menen sbólekshelerdiń qásiyetlerin bilmey turıp Álemniń bunnan keyingi rawajlanıwın anıqlaytuǵın birinshi úsh pikosekundlardıń unikallıq kosmologiyalıq scenariyin tabıw múmkin emes bolıp kórinedi. Yamasa basqa misal: kórinip turǵanıday, Álemniń tiykarǵı massasın quraytuǵın ataqlı qarańǵı zat. Onıń tábiyatın anıqlaw ushın házirge shekem ele ashılmaǵan neytrallıq stabilli bólekshelerdiń spektrin hám basqa da qásiyetlerin anıqlaw júdá áhmiyetli [fotonıń (?), gravitonıń (?), aksionlardıń (?), h.t.b.].

Kosmologiya burınları hesh bolıp kórimegendey dárejede tezletkish laboratoriyada alınatuǵın bilimlerde mútáj hám bul tezletkishler boyınsha qánigelerdiń ayrıqsha maqtanıshı bolıp tabıladı. Bóleksheler fizikası menen aspan fizikası arasında tereń hám bunnan da beter tereńlesip atırǵan baylanıs bar hám bizler astrofizika menen kosmologiyaǵa olardıń (ámeliy jaqtan) nollik kosmologiyalıq aǵza yamasa inflyaciyalıq dáwirdiń zárúrligi, asa jańa Álemdegi barionlardıń saqlanbaytuǵınlıǵı sıyaqlı jol kórsetetuǵın birinshi shamadaǵı juldızlardı bergenligi ushın tereń minnetdarmız.

Kollayderlerde isleytuǵın fiziklerdiń házirgi waqıtları úlken astrofizikalıq proektlerde, solardıń ishinde jer astında ótkerilip atırǵan jumıslarda da qatnasatuǵınlıǵı simptomatikalıq (kóp nárseni bildiretuǵın) bolıp tabıladı.

Tvorshestvolıq (dóretiwshilik) óz-ara baylanıs joqarǵı energiyalar fizikasıń tómengi energiyalar fizikası hám atom fizikası menen baylanıstıradı (misal retinde, juplıqtıń saqlanbaytuǵınlıǵı boyınsha ótkerilgen yadrolıq hám atomlıq eksperimentlerdegi, salmaqlı ionlar soqlıǵısqanda shıǵarılatuǵın prozitonlar menen elektronlardıń spektrindegı tań qalarlıq (ersi) sıziqlardıń baqlanǵanlıǵı haqqındaǵı jaqında Darmshtadtdan kelgen sensaciyalıq xabarǵa baylanıslı tınıshsızlanıwları eske túsiremiz. Hátte gravimetriya da sońǵı waqıtları elementar bóleksheler fizikasıń bir bólegine aylandı. Men effektivlik radiusı shama menen bir kilometr bolǵan "besinshi kúsh" dep atalatuǵın kúshti izlewlerdi názerde tutıp atırman. Usınday kúshtiń ashılǵanlıǵı haqqındaǵı jaqında payda bolǵan xabar jalǵan sensaciya bolıp shıqtı. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan, bul másele dálilgi joqarı qáddide bolǵan bunnan bılayǵı izertlewlerdiń júrgiziliwin talap etedi. Álbette, eger usınday uzaqtan tásir etisiw qashan bolsa da ashılsa, onda ol óziniń keń túrdegi qollanıwın tabadı.

Bizler úlken áhmiyetke iye bolǵan processtiń - pánler aralıq sintezdiń gúwaları hám qatnasıwshılarımız. Dóretiwshilik óz-ara baylanıstırın ruwxınıń tırısıwlarıń qosılıwı menen kóbeyiwın (al, alınıwı menen bóliniwı emes) talap etetuǵınlıǵın túsiniw óspekte. Usı ruwhtıń elementar bóleksheler fizikasıń qattı deneler fizikası, ximiya, biologiya hám basqa tábiyiy ilimler arasındaǵı óz-ara qatnasın anıqlaytuǵınlıǵına meniń gúmanım joq. Adamzat ushın fundamentallıq bilim fundamentallıq iygiliklerdiń potentsiallıq deregi bolıp tabıladı. Qosımsha aqshanı qońsınıń laboratoriyasınıń byudjetin qısqartıw jolı menen izlewdiń keregi joq. Taza ilimniń sheklerin tista, zulımlıqqa, tek áytewir-aq kóp aqsha jumsaladı.

Usınday eskertiwler menen joqarı energiyalar tezletkishleriniń fizikasıń ulıwmalıq kartinasın táriyiplewdi juwmaqlaymız hám biziń fundamentallıq bólekshelerimizge názer salamız.

1986-jılǵı fizikalıq dúnyanıń tiykarında 17 "element" jatır:

6 lepton (e , μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ);

6 kvark (d , s , b , u , c , t);

4 vektorlıq bozon (foton γ , glyuon g hám W, Z vionlar);

1 graviton.

Bul jerde meniń antibólekshelerdi hám reńli erkinlik dárejelerin esapqa almaǵanlıǵımdı, vion sóziniń ingliz tilindegi wion sóziniń transliteraciyası - weak intermediate boson (ingliz tilinde pion sózine uqsas [waion] dep oqıladı) ekenligin, t-kvarktıń ele ashılmaǵanlıǵın, gravitaciyalıq maydanniń ayırım kvantları bolǵan gravitonlardıń, kórinip turǵanıday, eksperimentallıq baqlanbaytuǵınlıǵın eskertip ótemen.

17 fundamentallıq bólekshelerdiń kópshiliginiń tezletiwshi tájiriybelerde ashılǵanlıǵın atap ótiw kerek:

3 lepton (τ, ν_μ, ν_τ);

barlıq kvarklar (u-, d-, s-kvarklardan turatuǵın jeńil adronlardıń kvarklıq strukturası, eń jeńil adronlardıń kópshiligi hám c-, b- kvarklarına iye awır adronlar);

3 vektorlıq bozon (glyuonlar hám vionlar).

Leptonlıq sektorda eń qızıqlısı hám jumbaq, álbette neytrino bolıp tabıladı. Neytrinoǵa tiyisli bolǵan bir qatar áhmiyetli máselelerdi qarap ótemiz:

1. Olar massaǵa iye me yamasa iye emes pe? Eger olar massaǵa iye bolsa, onıń shaması qanday?

2. Neytrinonıń sáykes antineytrinodan ayırması bar ma yamasa olar haqıyqıy neytral bolǵan bóleksheler me?

3. Úsh neytrinonıń hár qaysısınıń óziniń zaryadlangan serigine qatnası bar ma, eger qatnası bolmasa olar qalay oscillyaciyanadı, leptonlıq zaryadlangan toklardaǵı aralastırıw múyeshleri qanday?

4. Neytrinonıń elektromagnitlik dipollik momentiniń, diagonalıq hám/yamasa diagonalıq emes shaması qanday?

5. Neytrino qanday da anomallıq óz-ara tásirlesiwge iye me?

6. ν_e, ν_μ, ν_τ neytrinolardan basqa neytrinolar bar ma?

Sońǵı waqıtları myuonlıq hám tau-neytrinolardıń massaları ushın joqarǵı sheklerin ádewir jaqsılandı, biraq olar neytrinolardıń massası ushın teoretikler kútip atırǵan shamadan ádewir úlken.

Eger elektronlıq (anti) neytrinonıń massasına keletuǵın bolsaq, onda Teoriyalıq hám eksperimentallıq fizika institutınıń gruppası bergen 20 eV shamasınan úlken shama SIN (Shveytseriya) institutında jaqında ótkerilgen eksperimentte alınǵan maǵlıwmatlar menen sáykes kelmeydi. Bul institutta alınǵan maǵlıwmatlar tábiyiy túrde $m_{\nu_e} = 0$ teńligine alıp keledi hám $m_{\nu_e} > 18$ eV sheginiń orın alatuǵınlıǵın kórsetedi. Elektronlıq neytrinolardıń massasın bir qatar dál ólshewler jaqın keleshekte juwmaqlanadı. Mısalı, eger onıń mánisi 10 eV ten úlken bolsa, onda biz bul jaǵdaydı jaqında joqarı dálilikte bile alamız. Biraq 10 eV shamasınan 1 eV shamasına shekem jetiw ushın, kórinip turǵanıday, shama menen on jıllıq ótedi³⁹.

Neytrinosız ótetuǵın qos beta-ıdırawdıń ashılıwınıń neytrinonıń neytrallıǵı haqqında tuwrıdan-tuwrı beriletuǵın signal ekenligi belgili. Tilekke qarsı, házirshe yarım ıdırawdıń sáykes waqıtı ushın tómengi shek ǵana belgili. Usı shektiń mánisi sońǵı jılları $10^{22} - 10^{23}$ jılǵa jaqınladı.

Neytrinoliq oscillyaciylardı izlewdegi eksperimentallıq jetiskenligi teris xarakterge iye: Byuje reaktorında alınǵan bazı bir unamlı kórsetpeler Gëzgene hám Rovno reaktorlarında ótkerilgen eksperimentlerinde tolıǵı menen biykarlandı. Biraq, Mixeev penen Smirnov tárepinen islengen qızıqlı teoriyalıq boljaw arnawlı túrde esletip ótiwdi talap etedi. Bul boljaw boyınsha tıǵızlıq oraydan periferiyaǵa ótkende ástelik penen kemeyetuǵın Quyashta hátte júdá kishi aralasıw múyeshi elektronlıq neytrinonıń myuonlıq hám tau-neytrinoǵa derlik tolıq rezonanslıq ótiwine

³⁹ Búgingi kúnlerdegi maǵlıwmatlar boyınsha barlıq neytrinolardıń massaları 0,12 eV shamasınan kishi, biraq nolge teń emes (Awdarıwshı).

alip kele aladı. Bul jańa rezonanslıq mexanizm bolajaq Quyash neytrinolarınıń detektorları (ayırıqsha tallıylı) ushın boljawlardıń kemirek anıqlıqqa iye bolıwın támiyinleydi, al sáykes eksperimentlerdi onnan beter qızıqlı etedi⁴⁰.

Endi soǵılatuǵın Quyash neytrinolarınıń detektorları (ayırıqsha suıq argon detektor) neyrinoliq elektromagnit dipollik momentler mashqalasın sheshiwge járdem beredi. Eger bul momentlerdiń shaması 10^{-10} Bor magnetonına teń hám Quyashtıń konvektivlik zonasındaǵı magnit maydanı jetkilikli dárejede kúshli bolsa, onda Quyash neytrinolarınıń aǵısınıń 11 jıllıq hám yarım jıllıq variaciyaları orın alǵan bolar edi (usınday variaciyalardıń bar ekenligin xlor-argonlı Xoumsteyk Mayn detektorında alınǵan belgili bolǵan maǵlıwmatlarda kóriwge boladı)

Al, tek neytrinolar (hám gipotezalıq neytral bozonlar) qatnasatuǵın múmkin bolǵan anomallıq óz-ara tásirlesiwlerge keletuǵın bolsaq, onda tájiriybelerde usınday óz-ara tásirlesiwlerdi tabıw oǵada qıyın (eger olar kúshli bolsa da).

Taza leptonlıq ázzi processı júdá taza hám sonlıqtan olardı elektrázzi teoriyanıń joqarı dúzetiwleriniń boljawların tekserip kóriw ushın paydalanıwǵa boladı. Sonlıqtan bul jaǵday CERN degi jańa neytrinoliq eksperimenttiń maqseti bolıp tabıladı. Bul eksperimentte myuonlıq neytrino menen antineytrionıń elektrondaǵı shashırawlarınıń kese-kesimleriniń qatnası 2 procentlik dállikte ólshenedi. Tilekke qarsı, bul jerde bas radiaciyalıq dúzetiwlerdiń kelip shıǵıwı elektromagnitlik bolıp tabıladı; eger jańa awır fermionlar bolǵan jaǵdayda ǵana bul tájiriybelerde elektrázzi dúzetiwler baqlana alǵanday dárejede boladı. Usıǵan baylanıslı kvarklar menen leptonlardıń tórtinshi áwladınıń bar ekenligi (jeńil hám massaǵa iye bolmaǵan neytrino menen) Z-bozonnıń keńliginiń laboratoriyalıq ólshewlerinde de, geliydiń tarqalıwı boyınsha bar maǵlıwmatlar menen birge nukleosintezdiń kosmologiyalıq teoriyası menen ele biykarlangan joq.

Men bayanattıń neytrinoǵa baǵıshlangan bólimin yarım házil hám yarım ritorikalıq másele menen juwmaqlamaqshıman: "Eksperimentatorlardıń neytrionıń massaǵa iye, oscillıyacıalanatuǵınlıǵın hám ázzi tásirlesiwshi bóleksheler ekenligin ashqanlıǵınan teoretiklerdiń massaǵa iye bolmaytuǵınlıǵın, oscillıyacıaǵa ushıramaytuǵın hám mayıp tásirlesiwshi bólekshe túrinde neytrionı ashqanı jaqsı bolǵan bolar edi".

Endi kvarklarǵa ótemiz. Ázzi tásirlesiwden baslaymız. Aralasıwdıń úsh aralasıw múyeshiniń ekewi elege shekem absolyut adekvatlıq (barabar - Awdarıwshı) emes. Biraq eń kúshli qanaatlandırılmaǵanlıq sezimin CP-buzılıwı payda etedi. Usı waqıtqa shekem CP nıń buzılıwı uzaq jasaytuǵın kaonlardıń tek tórt kanalında baqlandı:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0, K_L^0 \rightarrow e^\pm \nu \pi^\mp, K_L^0 \rightarrow \mu^\pm \nu \pi^\mp.$$

Eki zaryadlangan hám eki neytral pionǵa ıdırawlardıń amplitudaları eń kúshli qızıǵıwdı payda etedi. K_S^0 -mezonlarınıń sáykes amplitudalarına bóliwdiń saldarınan alınǵan shamalar η_{+-} hám η_{00} túrinde belgilenedi. η_{+-} niń η_{00} ge qatnası bolǵan η_{\pm}/η_{00} shamasın qaraymız. OPT-simmetriyanıń bar bolıwına baylanıslı bul shamanıń fazasınıń nolge (1° shamasındaǵı dállikte) teń bolıwı kerek (Tájiriybede bul faza $9^\circ+5^\circ$). Bul shamanıń moduliniń birden awısıwı neytrallıq kaonniń eki pionǵa CP-taq qurawshısınıń tuwrıdan-tuwrı CP-nı buzıwshı ótiwleriniń ólshemi bolıp tabıladı. Usı esletilip ótilgen moduldi jaqında ótkerilgen ólshewler standart teoriyanıń boljawlarına tolıq sáykes kelmeydi. Standart modelde CP nıń barlıq buzılıwları zaryadlangan ázzi kvarklıq toqlardıń matricasındaǵı biz faza menen táriyiplenedi. Házirgi waqıtları moduldi jańa hám dálligi joqarı ólshewler ótkerilip atır hám CERN menen FNAL da fazanı $\pm 1^\circ$ dállikte ólshewge eki usınıs payda boldı.

Elementar bóleksheler fizikasındaǵı kaonniń tutqan ornınıń teńi-tayı joq. Bunnan otız jıl burın olardıń ıdırawları P- hám C-simmetriyanıń buzılıwı haqqındaǵı mäseleni qoyıwǵa májbúrledi; 1964-jılı usı ıdırawlardan CP-simmetriyanıń buzılatuǵınlıǵın kórsetti. Bunnan bir neshe jıl

⁴⁰ 2015-jılı Takaaki Kadzita menen Artur Makdonald neytrinoliq oscillıyacıalardı eksperimentallıq tastıyıqlaǵanı ushın fizika boyınsha Nobel sıylıǵın aldı.

ótkennen keyin uzaq jasaytuǵın hám qısqa jasaytuǵın kaonlardıń massalarınıń ayırmasınıń kishi bolıwı teoretiklerdi usınday kishi ayırmanıń sharm menen baylanıslı ekenligin hám c-kvarktıń massasınıń 1 GeV shamasına jaqın ekenligin boljawǵa múmkinshilik berdi. Aytpaqshı, $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ ótiwlerin ($K^0 \leftrightarrow d\bar{s} \leftrightarrow \bar{d}s \leftrightarrow K^0$) táriyipleytuǵın belgili kvadrat diagramma (1-súwret) sol waqıtqa shekem haqıyqatında da baqlanatuǵın qubılıslarǵa sózsiz qatnası bar ázı óz-ara tásirlesiwge qatnası bar birden-bir diagramma bolıp esaplandı. Bul diagrammanıń haqıyqıy bólimi K_L^0 hám K_S^0 mezonlardıń massalarınıń ayırmasına, al jormal bólimi bolsa CP-qadaǵan etilgen $K_2^0 \leftrightarrow K_1^0$ ótiwge juwapker. Kaonlar menen ótkeriletuǵın bunnan keyingi tájiriybeler, solardıń ishinde olardıń siyrek ıdırawların izlew menen sanlıq ólshewler elementar bóleksheler fizikasınıń eń tereń mashqalalarına qol tiygiziwge múmkinshilik beretuǵınlıǵına meniń isenimim mol.

Sonıń menen bir qatarda mezonlardıń jańa semeystvoları, kórinip turǵanınday, ázı tásirlesiwler haqqındaǵı maǵlıwmatlardı alıp kele basladı. Men B-mezonlardı yamasa qısqasha túrde beonlardı názerde tutıp atırman. $B_s^0 = \bar{b}s \leftrightarrow \bar{s}b = \bar{B}_s^0$ ótiwleri I súwretke uqsas bolǵan II súwrettegi kvadrat diagrammanıń járdeminde táriyiplenedi. $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ ótiwleri t-kvarktıń hám tórtinshi áwlad t'-kvarktıń qosqan úlesine sezimtalli.

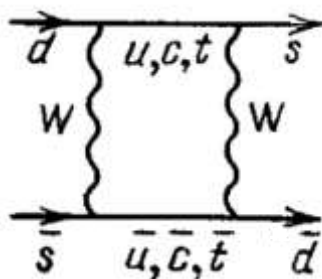
Jaqında UA1 kollaboraciya birdey belgige iye bolǵan dimyuonlardıń shama menen eki júzdey waqıyasınıń baqlanǵanlıǵın xabarladı. Bul waqıyalar $B_s^0 \bar{B}_s^0$ juplarınıń kúshli tuwılıwı processı hám vakuumdaǵı bunnan keyingi $B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$ ótiwleri hám B_s -mezonlardıń

$$B_s^0 \bar{B}_s^0 \rightarrow B_s^0 B_s^0 \rightarrow \mu^- \mu^- + \dots$$

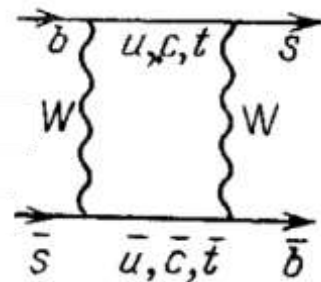
yamasa

$$B_s^0 \bar{B}_s^0 \rightarrow \bar{B}_s^0 \bar{B}_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^+ + \dots$$

yarım ıdırawları menen tábiyiy túrde túsindiriledi.



I súwret. $d\bar{s} \leftrightarrow \bar{d}s$ ótiwlerin táriyipleytuǵın kvadrat diagramma.

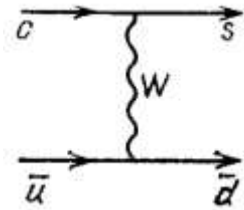


II súwret. $\bar{b}s \leftrightarrow \bar{s}b$ ótiwlerin táriyipleytuǵın kvadrat diagramma.

Joqarı energiyaǵa iye bolǵan giperonlar tárepinen áste qozǵalatuǵın V^0 -mezonlardıń hám oscillyaciyalardıń baqlanıwı, CP-taq effektlerdiń hám sol V^0 -mezonlardıń ıdırawı haqqında qızıqlı usınıslar bar. Neytral B- mezonlardıń K^0 -mezonlardan keyingi CP-invariantlıqtıń buzılatuǵınlıǵın ólshenetuǵın ob'ekt bolatuǵınlıǵı haqıyqatqa megezdi.

Charmed adronlardıń leptonlıq bolmaǵan ıdırawları teoretikler ushın sheshiliwı qıyın bolǵan máselege aylandı. Olar (teoretikler) dáslep awır c-kvarktı qanday jeńil kvarklardıń qasında turǵanlıǵına dıqqatın awdarmastan ıdıraydı dep boljadı. Biraq, bunday kartına júdá ápiwayı bolıp shıqtı. Tájiriybede D^0 mezonnıń jasaw waqıtı D^+ mezonnıń jasaw waqıtınan shama menen eki ese qısqa, al D_s -mezon menen Λ_s -giperon onnan da tezirek ıdıraytuǵın bolıp shıqtı. Postfaktum (onnan keyin) teoretikler qońsılás jeńil kvarklar menen tásirlesiwlerdiń nadansılıq penen kútiwlerge salıstırǵanda sapalıq jaqtan túsindiretuǵınlıǵın, biraq sanlıq boljawlardı usınıw ushın kúshli tásirlesiwlerdi tolıǵıraq túsiniwdiń kerek ekenligin kórsetti (III súwrettegi bir diagramma jetkiliksiz).

III súwret. D^0 -mezonnıń ıdırawına úles qosatuǵın c -kvarktıń \bar{u} -kvark penen tásirlesiwi.



Usınday jollar menen biz kelesi temaǵa - kvarklardıń kúshli tásirlesiwine kelip jettik. Biraq, bul temaǵa kirispesten burın ázzi tásirlesiwge joqarıda berilgen sholıwǵa tábiyiy juwmaqtı jasaymız: ázzi tásirlesiwlerdiń tolıq bir qatar áhmiyetli máselelerin sheshiw ushın bizge dálilgi joqarı bolǵan tezletkishler - strange, charm, botton fabrikaları kerek!

Kúshli tásirlesiwdegi situaciya ádettegidey emes. On jılıqtan da kóbirek waqıt biz usınday tásirlesiwdegi eń baslı nárseni - kvantlıq xromodinamikanıń (KXD) lagranjianın bilemiz dep esaplaymız. Bunday mániste kúshli tásirlesiw elektromagnitlik tásirlesiwden keyinde qalmaydı. Biraq kvantlıq elektrodinamikada jetilistirilgen uyıtwıqlar teoriyasınıń apparatı júdá kishi qashıqlıqlarda jumıs isleytuǵın kvantlıq xromodinamikada eksperimentlerde júdá joqarı dáliliktegi (geypara jaǵdaylarda útirde keyingi toǵızınshı sanǵa shekem) boljawlardı beriwge múmkinshilik bermeydi. Bunday jaǵdayda shama menen on procentlik dálilke jetiwge boladı. Tap usınday jaǵdaylar orın alǵan waqıtta úlken qashıqlıqlar qanday da bir roldi oynamaytuǵın bir de process joq (teoriyalıq kóz-qaraslar boyınsha kvantlıq xromodinamika menen kvantlıq elektrodinamikanıń arasındagı principiallıq ayırma tek baylanıs konstantalarınıń hár qıylı bolıwı menen ǵana emes, al tuwrıdan-tuwrı júzege keletuǵın kúshli glyuon-glyuonlıq tásirlesiwdiń bar bolıwı menen baylanıslı (tuwrıdan-tuwrı júzege keletuǵın foton-fotonlıq tásirlesiw joq). Úlken qashıqlıqlardıń tutqan ornın esapqa alıwǵa tırısıqlar júdá hár qıylı, jiyi júdá aqıllılıq penen islengen, siyrek jaǵdaylarda sheberlik penen orınlanǵan, onnan da siyrek jaǵdaylarda isenimli. Sonıń menen birge eger gáp joqarı dálilik haqqında júrmese, onda derlik barlıq waqıtta tabıslı (men "tilekke qarsı" dep aytayın dep qaldım). Tutası menen aytqanda, házirgi zaman kvantlıq xromodinamikadaǵı jaǵdaylar hár qıylı reńlerge tolı shıǵıs bazarın eske túsiredi.

Qattı (tereń serpimli emes) inklyuzivlik yamasa yarım inklyuzivlik processlerdiń, dara jaǵdayda kvarklıq hám glyuonlıq aǵıslardıń teoriyası isenimli bolıp kórinedi. Eger joqarı dálilke jetiwge tırıspasa, onda qattı kvarklar menen glyuonlardıń adronlarǵa fragmentaciyası kishi qashıqlıqlardıń úlesi boyınsha anıqlanatuǵın processlerdiń itimallıǵına tásirin tiygizbeydi.

Eger adronlardıń statistikalıq qásiyetlerine keletuǵın bolsaq (mısalı, olardıń massalarına, ıdıraw keńligine, magnit momentlerine), onda bul jaǵdayda teoriyalıq kóz-qaraslar boyınsha summalarardıń kvantlıq-xromodinamikalıq qaǵıydası eń tabıslı hám izbe-iz bolıp keldi. Bunday summalarda kishi hám úlken qashıqlıqlardıń arasındagı kópirdiń xızmetin dispersiyalıq qatnaslar atqaradı. Bunday qatnas jasawda perturbativlik emes tábiyatqa iye, yaǵnıy uyıtwıqlar teoriyasınıń járdeminde táriyiplenbeytuǵın, kvarklıq hám glyuonlıq vakuumlıq kondensatlar dep atalatuǵın vakuumlıq kondensatlar áhmiyetli orındı iyeleydi. Bul kondensatlar kvarklıq hám glyuonlıq maydanlardıń vakuumlıq ortashası bolıp tabıladı. Olardıń eń ápiwayıları bul maydanlar boyınsha bisizıqlı: $\langle \bar{q}q \rangle$, $\langle GG \rangle$ hám t. b. Parametrler sıpatında bul kondensatlardıń mánislerin paydalanıp, awır kvarklerge iye adronlarǵa da, jeńil kvarklardan turatuǵın adronlarǵa da, sonıń menen bir qatarda kvarklarǵa pútkilley bolmaǵan glyubollar dep atalatuǵın bólekshelerge de tiyisli bolǵan keń kólemli eksperimentallıq maǵlıwmatlardı táriyiplewge boladı.

Eksperimentallıq maǵlıwmatlardı summalarardıń kvantlıq-xromodinamikalıq qaǵıydası menen bir qatarda bekkem teoriyalıq bazaǵa iye bolmaǵan nadanlaw ápiwayılastırılǵan modeller de júdá tabıslı táriyipleydi. Olardıń qatarına awır kvarkoniylerdiń potenciallıq modelleri, relyativistlik emes kvarklar modeli, tarlar modeli, qaltalar modeliniń hár qıylı modelleri kiredi.

Kvantlıq xromodinamika menen usı modellerdiń bar bolıwınıń faktı kvantlıq

xromodinamikanıń sanlı teoriya sıpatında ele shiyki ekenliginiń dálili bolıp tabıladı. Kvantlıq xromodinamikanıń esaplaw apparatınıń tómén rawajlanganlıǵı, mısalı, ersi (strange) materiya sıyaqlı ekzotikalıq ob'ekttiń bar ekenligin teoriyalıq jaqtan biykarlawdıń múmkin emesliginde (bunday materiyanıń bar ekenligi haqqında qaltalar modelinde spekulyaciya bar) ayırıqsha ayqın kórinedi.

Kompyuterlik eksperimentler dep atalatuǵın eksperimentler máselesine, sonıń ishinde keńisliklik-waqtılıq kontinuum tórt ólshemli pánjereler almastırılatsuǵın jaǵdayǵa ayırıqsha toqtap ótkim keledi. Sońǵı esaplawlarda pánjereniń túyinleriniń sanı 10^5 ten asadı, al pánjereniń adımı shama menen 10^{-14} sm. Kompyuterlik esaplawlar dara jaǵday bolǵan kvantlıq glyuodinamikanıń sheklerinde glyubollardıń kútilgen massaların (yaǵnıy kvarklarsız KXD) bahalaw maqsetinde ótkerildi. Kvarklardı esapqa alıw menen de, mısalı ázzi leptonlıq emes amplitudalardı.

Tıǵızlıq penen temperaturanıń joqarı mánislerindegi kvantlıq xromodinamikanı kompyuterlik izertlewler eń úlken qızıǵıwshılıqtı payda etedi. Bul izertlewler 200 MeV shamasındaǵı temperaturalarda yadrolıq zattıń kvark-glyuonlıq plazma halına ótetuǵınlıǵı jónindegi teoriyalıq kútiwlerdi tastıyıqlaydı⁴¹. Usınday fazalıq ótiwdiń haqıyqatında da júretuǵınlıǵın kórsetetuǵın signallardıń qanday bolatuǵınlıǵı tolıq ayqın emes (mısalı, tuwrı fotonlardıń hám strange - ersi bólekshelerdiń sanınıń artıqmash bolıwı). CERN degi supersinxrotronda kvark-glyuonlıq plazmanı izlew ushın házirshe birinshi qádem sıpatında qozǵalmaytuǵın nishanani kislorodtıń ionlarınıń joqarı energiyaǵa iye bolǵan aǵısı menen bombalaw názerde tutilǵan.

Kúshli tásirlesiwlerdi izertlewlerdiń eksperimentallıq perspektivaları júdá qolaylı. Kvantlıq xromodinamikanıń kóz-qarasları boyınsha energiyanıń júdá keń intervalındaǵı (júdá kishi energiyalardan júdá joqarı energiyalarǵa shekem) qıyınshılıǵınıń qáddi hár qıylı bolǵan tájiriybeler úlken qızıǵıwshılıqtı payda etedi. Bul bahalı informaciylardı tek bolajaqtaǵı supertezletkishlerde ǵana emes, al házirgi waqıtları islep turǵan ádettegi mashinalarda da hám hátte házir islemey qalǵan mashinalarda da alıwdıń múmkin ekenligin kórsetedi. Bul aqırǵı eskertiwge $p\bar{p}$ -annigilyaciya rezonanslı tuwılǵan χ_1 - hám χ_2 -sharmoniydiń eki qáddiniń massaları menen keńligin házirgi waqıtları buzıp taslangan ISR kollayderde alınganlıǵı tiykar boldı. Bul eksperimenttiń nátiyjelerin qayta islewdiń nátiyjeleri 1986-jılı aprel ayında preprint túrinde jariq kórdi. Bul bunnan kóp waqıtlar burın sóngen juldızdan kelgen jaqtılıq sıyaqlı bolıp kórinedi.

Bizler leptonlar menen kvarklardı talladıq hám endi vektorlıq bozonlarǵa ótemiz. Bizler elektr-ázzi teoriyanı hám kúshli tásirlesiwdi tallaǵanda biz olar haqqında kóp ǵap ettik. SLK penen LEP⁴² tiń iske qosılıwı menen biz Z-bozonlardı islep shıǵarıw boyınsha siyrek gezlesetuǵın fabrikalardı alamız. Olar elektr-ázzi teoriyanıń kóp aspektlerin sanlıq tekseriwge múmkinshilik beredi.

⁴¹ Awdarıwshı: Kvark-glyuonlıq plazma (KGP, kvark supı, xromoplazma) joqarı energiyalar fizikası menen elementar bóleksheler fizikasındaǵı zattıń agregat halı. Ádettegi plazmada elektronlar menen ionlar qanday halda turatuǵın bolsa, kvark-glyuonlıq plazmada adronlıq zat tap sonday halda turadı. Kvark-glyuonlıq plazma kvarklardan, antikvarklardan hám glyuonlardan turadı. Bunday plazmanı burınları gaz dep qaradı, al 2005-jıldan baslap derlik ideal hám móldir emes suyıqlıq bolıp esaplanadı. Eksperimentlerde ashılǵansha kvark-glyuonlıq plazma gipotezalıq ob'ekt bolıp keldi. Xromoplazmanı úyreniwdiń Álemniń tariyxın biliwde járdem beriwı múmkin.

Kvark-glyuonlıq plazma 2005-jılı fevral ayında AQSh taǵı Brukseyven milliy laboratoriyasındaǵı RHIC tezletkishinde ótkerilgen eksperimentlerde alındı. Sol jerde 2010-jıl fevral ayında temperaturanıń mánisi 4 trillion gradusqa jetti.

⁴² Awdarıwshı: LEP (ingliz tilinde LEP, Large Electron-Positron collider) - xalıq aralıq ilimiy-izertlew orayı bolǵan CERN degi zaryadlangan bólekshelerdiń tezletkishi - Úlken elektron-pozitronlıq kollayder.

SLK - SLAC Milliy tezletkish laboratoriyası **SLAC** (ingliz tilinde SLAC National Accelerator Laboratory, 2008-jılǵa shekem Stenford sıızılıq tezletkishi orayı, (ingliz tilinde Stanford Linear Accelerator Center, SLAC) - AQSh tıń energetika ministrliginiń 17 milliy laboratoriyalarınń biri, onıń operatorı Stenford universiteti bolıp tabıladı.

Biraq búgin uzaq bolajaqqa názer salıw kerek: kalibrovkalıq bozonlardı izertlewlerdegi eń qızıqlısı olardıń óz-ara tásirlesiwi bolıp tabıladı. Vionlardıń óz-ara tásirlesiwin eksperimentallıq izertlew ushın LEP2 menen VLEPP kerek boladı. Al glyuon-glyuonlıq óz-ara tásirlesiwge kelsek, onda úlken adronlıq kollayderdegi jup glyuonlıq ağıslardı úyreniw júdá qızıq.

Abellik emes kalibrovkalıq teoriyalardıń ápiwayılıǵı menen sulıwlıǵına qaramastan, olardıń kem degende geyparalarınıń tek tereńirek fizikanıń fenomenologiyalıq táriyiplemesiniń ǵana bolatuǵınlıǵın umıtpaw kerek. Usınday kóz-qarastan, vionlar 1960-jılları abellik emes kalibrovkalıq simmetriya qollanılǵan (ádewir kishi tabıslar menen) jeńil vektorlıq mezonlarǵa (ρ , ω) salıstırǵanda kemirek fundamentallıq bolar edi. Kvarklardıń da, leptonlardıń da quramlıq bóleksheler bolıwı múmkin. Rás, usı kúnge shekem birde-bir sulıw bolǵan preonlıq teoriya házirshe usınılǵan joq. Biraq, bul jerde aqırǵı sózdi teoretikler emes, al eksperimentatorlardıń aytıwı kerek. Eger tájiriybeler preonlardı⁴³ tapsa (preonlar - házirgi fundamentallıq bólekshelerdiń quramlıq elementleri), onda sulıw sxemalardıń jetispewshiliginıń bolmaytuǵınlıǵına men isenimim mol.

Men graviton haqqında derlik hesh nárese de aytpadım. Házirgi zaman fizikasında ayrıqsha orın alatuǵın bolǵanlıqtan, men onı bayanattıń aqırına qaldırdım. Bul mına jaǵday menen baylanıslı: házirgi waqıtlardaǵı teoriyalıq kóz-qaraslar boyınsha gravitaciyalıq tásirlesiw tek eń úlken qashıqlıqlarda ǵana emes, al eń kishi qashıqlıqlarda da tiykarǵı orındı iyeleydi. Plank energiyalarınday hám onnan da joqarı energiyalarda gravitaciyalıq tásirlesiw kúshli bolatuǵın gravitaciyalıq qarama-qarsılıqqa iye bolmaǵan óz-ara tásirlesiw teoriyasın dúziw ushın teoretikler qosımsha keńislikli ólshemlerdi paydalanadı hám noqatlıq bólekshelerdi Plank ólshemlerge iye bolǵan kóp ólshemlerge iye bolǵan superstrunalar menen almasıradı. Superstrunalardıń qarama-qarsılıqlarǵa iye bolmaǵan teoriyasın dúziwge qaratılǵan tırıswıların tiykarında soǵı waqıtları simmetriyanıń eń joqarǵı gruppasın oylap tabıwǵa, onıń buzılıwın mexanizmin tabıwǵa hám bólekshelerdiń massaların hám ázzi toqlardaǵı aralasıw múyeshin túsindiriwge boladı degen úmit payda boldı.

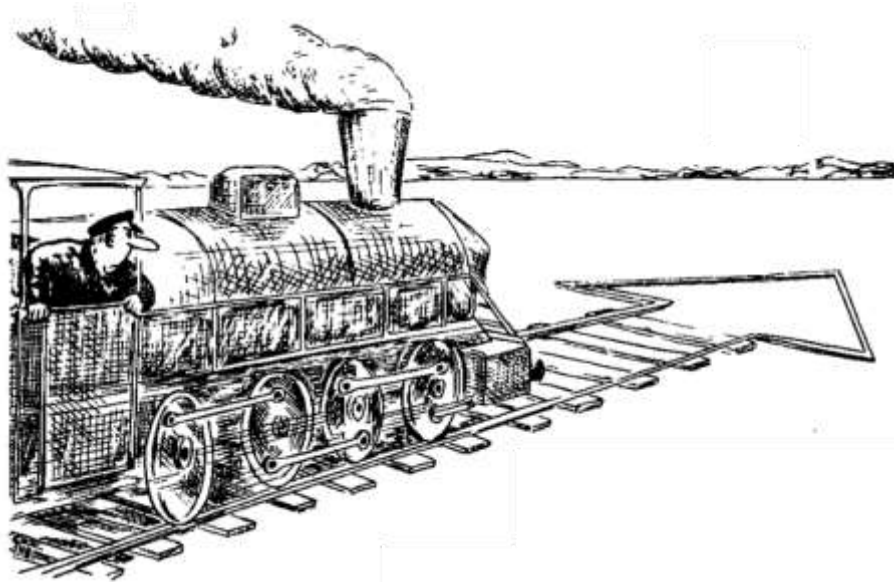
Bul bayanattaǵı tiykarǵı oylardıń biri pútkilley hár qıylı bolǵan tezletkishlerde orınlaw múmkin bolǵan fundamentallıq jaqtan qızıqlı bolǵan eksperimentlerdiń kóp ekenligin atap ótiw bolıp tabıladı.

Bári bir, joqarıraq bolǵan energiyalardaǵı baqlanatuǵın qubılıslar bizlerdiń barlıǵımızdı qızıqtıradı. Tilekke qarsı, E energiyanıń shaması qansha úlken bolsa qızıqlı processlerdiń kesesi kishi ($\sim E^2$) boladı hám fonlıq processlerdiń kópligi de kóbeyedi.

Joqarı energiyalı fizikanıń strategiyalıq triadası tezletkishler, detektorlar hám kompyuterler bolıp tabıladı. Bizler joqarı bolǵan energiyalarǵa, jarqınlıqlarǵa, dáliliklerge hám bizdiń teoriyalarımızdı muqiyatlı túrde tekseriw, olardıń sheshilmegen mashqalaların sheshiw hám, eń baslısı, hesh bir teoriya tárepinen boljanbaytuǵın qubılıslardı izlew ushın maǵlıwmatlardı qayta islewdiń júdá joqarı bolǵan templerine umtılamız. Aldımızda neniń jatırǵanlıǵın bilgimiz keledi.

Fizikanıń tabıslı rawajlanıwı ushın aldımızdaǵı júz jıllıqtıń basında jobalastırılıp atırǵan sıızqlı elektronlıq kollayderlerdiń úlkenligin hám jarqınlıǵı úsh tártipke, adronlıq kollayderlerdegi maǵlıwmatlardıń jıynalıwı menen olardı qayta islewdiń tempin úlkeytken jaqsı.

⁴³ Awdarıwshı: Preonlar - kvarklar menen leptonlardıń turıwı múmkin bolǵan gipotezalıq bóleksheler. Kvarklar menen leptonlardıń noqatlıq emesligi haqqında usı kúnlerge shekem hesh kaday eksperimentlik maǵlıwmatlar bolmasa da, bir qansha pikirler (fermionlardıń úsh áwladınıń bolıwı, kvarklardıń úsh reńiniń bolıwı, kvarklar menen leptonlardıń arasındǵı simmetriya) olardıń quramalı bóleksheler bola alatuǵınlıǵın kórsetedi.



IV súwret.

Bul bayanattı tayarlawdıń barısında men tosattan gazetadaǵı V.Neskovtıń házil súwretin kórdim (IV súwret)⁴⁴. Maǵan bul súwrettiń islengen bayanatqa qanday da bir qatnası barday bolıp kórindi. Bir qansha oylanıwdan keyin men súwretti bılayınsha túsindiriwge boladı degen juwmaqqa keldim: Parovoz joqarı energiyalar fizikasınıń nıshanı bolıp tabıladı. Al teoretiklerge kelsek, olar bul súwrette kórinbeydi. Biraq olardıń temir joldı qurıwı kerek dep túsiniw kerek. Biraq, geypara waqıtları olardıń ayırımları relsten soǵılǵan joldı emes, al relsten soǵılǵan strelanı soǵıw ushın óziniń hám basqalardıń waqtın paydalanadı. Teoretiklerdiń oyınsha sol strelalar bolajaq progresstıń baǵıtın anıqlawı kerek.

Usınday ózimdi-ózim áshkaralaytuǵın eskertiw menen men bayanatımdı juwmaqlayman. Úyge berilgen tapsırma sıpatında sizlerdiń basqa interpretaciyalardı izlewinińız múmkin.

Sizlerge tabıs tileymen.

Dıqqatlarıńız ushın raxmet.

Eskertiw (1987-jıldıń gúzi)

1987-jılı báhárde DEZI degi e^+e^- -jiynawshı DORIS saqıynasındaǵı ARGUS detektorlarında isleytuǵın xalıq aralıq kollaboraciya intensivli vakuumlıq $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ ótiwlerdiń baqlanǵanlıǵın xabarladı (Albrecht N. et al.//Phys. Lett. - 1987. - V. 192B. - P. 245). $B^0\bar{B}^0$ jupları γ (4s) idırawında baqlandı hám vakuumda $B^0B^0 + \bar{B}^0\bar{B}^0$ juplarına aylandı. $B^0B^0 + \bar{B}^0\bar{B}^0$ juplarınıń $B^0\bar{B}^0$ juplarına qatnası bolǵan r shamasınıń mánisi $r = 0,21$ ge teń bolıp shıqtı. $B^0 = \bar{b}d \leftrightarrow b\bar{d} = \bar{B}^0$ vakuumlıq oscillyaciyalardıń fizikalıq mexanizmi joqarıda tallanǵan $B_s^0 = \bar{b}s \leftrightarrow b\bar{s} = \bar{B}_s^0$ ótiwlerdiń mexanizmine júdá uqsas.

⁴⁴ Men 1969-jılı Lyublyan qalasında ótkerilgen Xalıq aralıq konkursta Altın medal alǵan súwrettiń originalın bergeni ushın V. Peskovqa minnetdarman.

1-qosimsha

FIZIKALIQ BIRLIKLERDİŇ SISTEMALARI HAQQINDA

\hbar , $c = 1$ sisteması. Elektronvolt. C_N menen C_F ti salıstırıw. Kelvin. Barn. SI. Onnıń dárejesi. Amper. Kulon. Volt. Farad. Om. Veber. Tesla. SI standart sıpatında. SI dıń artıqmashlıǵı menen kemshilikleri haqqında. Ádebiyat.

Qubılıslardıń bazı bir toparın táriyiplegende aqılǵa muwapıq saylap alınǵan birlikler ilimniń qudiretli quralına aylanadı. Sáykes birliklerdi paydalana otırıp qubılıslardı ólsheńlik tallawǵa shamanıń tártibi boyınsha onıń ózine tán bolǵan masshtabın, qálegen qubılıstıń birinshi ret qaraǵanda alista bolıp kóringen qubılıslar menen baylanısın anıqlawǵa boladı.

Usınıń menen bir qatarda paydalanılıwı ádetke aylanbaǵan birlikler arnawlı ádebiyattı oqıwǵa hám túsiniwge kesent jasaydı. Bul qosımsha usınday sırttan qaraytuǵın, qánige emes oqıwshı ushın járdem beriw maqsetinde jazılǵan. Qosımsha tiykarınan \hbar , $c = 1$ sistemasına hám onıń menen Xalıq aralıq birlikler sisteması bolǵan SI di salıstırıwǵa baǵıshlangan.

$\hbar, c = 1$ sisteması elementar bóleksheler fizikasında keńnen qollanıladı. Bul sistemaniń qolaylıǵı elementar bóleksheler fizikasınıń relyativistlik effektler menen is alıp baratuǵınlıǵında hám sonlıqtan hárekettiń birliǵı sıpatında háreket kvantı \hbar , al tezliktiń birliǵı sıpatında jaqtılıqtıń tezliǵı c tábiyiy túrde saylap alınadı. Bunnan keyin háreketti de, tezlikti de ólsheń birligine iye emes hám olardı 1 ge teń dep qabıl etiw tábiyiy (Astronomiyada qashılıqtı jaqtılıq jılında ólshegende jaqtılıqtıń tezliǵın 1 ge teń dep qabıl etedi; tek ǵana "jaqtılıq" degen sózdi alıp taslaw kerek). Bunday jaǵdayda tezlik, háreket S hám múyeshlik moment J ólsheń birliǵı joq shamalarǵa aylanadı: $[v] = [S] = [J] = 1$. Keńisliklik koordinatalar r menen waqıtlıq koordinata t nıń birlikleri birdey: $[r] = [t]$. E energiya menen p impulstıń birlikleri birdey $[E] = [p]$. Onıń ústine, energiya E menen jiyilik ω nıń arasındaǵı $E = \hbar\omega$ yamasa impuls p menen bóleksheniń tolqın uzınlıǵı λ nıń arasındaǵı $p = 2\pi\hbar/\lambda$ túrindegi kvantlıq-mexanikalıq baylanıslardı esapqa alsaq, onda

$$[r^{-1}] = [t^{-1}] = [p] = [E] = [m]$$

qatnasların alamız. $\hbar, c = 1$ birliklerinde

$$[A] = [A_0] = [m], [E] = [H] = [m^2]$$

teńlikleriniń orınlanatuǵınlıǵın kórsetiw qıyın emes. Bul teńliklerde A - vektorlıq potencial, A_0 - elektrlik potencial, E hám H sáykes elektr hám magnit maydanlarınıń kernewlikleri. \mathcal{L} lagranjian $[m^4]$ birligine, fotonlıq maydan sıyaqlı barlıq bozonlıq maydanlar $[\varphi] = [m]$ birligine, al barlıq fermionlıq maydanlar $[\psi] = [m^{3/2}]$ birligine iye. Bunday teńliklerdiń durıs ekenligine lagranjiandaǵı sáykes $m^2\varphi^+\varphi$ hám $m\bar{\psi}\psi$ massalıq aǵzalarǵa qarap joqarıda ayılǵanlardıń durıs ekenligine arısat iseniw múmkin. Solay etip, nollik ólsheńge iye bolatuǵın barlıq shamalardı $\hbar, c = 1$ sistemasında energiyaniń yamasa massanıń birliklerinde ólsheńge boladı eken.

$\hbar, c = 1$ sistemasında e elektr zaryadı ólsheń birligine iye emes⁴⁵: $e^2/\hbar c = \alpha$. Bul teńlikte α arqalı juqa strukturaniń turaqlısı belgilengen (bul atama atom fizikasında payda boldı hám α atomlıq qáddilerdiń juqa ajıralıwınıń masshtabın anıqlaydı); $\alpha^{-1} = 137,03604(11)$ ⁴⁶. Sonıń

⁴⁵ Bul qosımshada $e^2/\hbar c = \alpha$ túrinde normirovkalangan bir birlik zaryad e niń shamasın paydalanamız. Tap usınday normirovkaǵa juwap beretuǵın elektronnıń zaryadı ádette fizikalıq shamalardıń kestelerinde berilgen. Kitaptıń qalǵan tekstinde birlik elektr zaryadı basqasha normirovkalangan: $e^2/4\pi\hbar c = \alpha$. Usınday normirovka kvantlıq elektrodinamikası menen maydannıń kvantlıq teoriiyası boyınsha shıqqan kitaplar menen maqalalarda keń túrde qabıl etilgen. Birinshi jaǵdayda eki elektronnıń arasındaǵı kulonlıq potencial e^2/l , al ekinshi jaǵdayda $e^2/4\pi l$ túrine iye.

⁴⁶ Bul jerde hám qosımshanıń bunnan keyingi tekstinde qawsırmanıń ishindegi san tiykarǵı sannıń

menen birge reńli hám ázzi zaryadlar da ólshem birliklerine iye bolmaydı. Olardıń kvadratlardı sáykes α_s hám α_w arqalı belgilenedi. Al tórt ázzi tásirlesiwdiń tórt fermionlı Fermi konstantası G_F ke kelsek, onda bul shama ólshem birligine iye boladı: $[G_F] = [m^{-2}]$. Gravitaciyalıq tásirlesiwdiń nyutonlıq konstantası G_N de tap sonday birlikke iye.

Elektronvolt (eV). SI sistemasında energiyanıń birliginiń djoul ekenligi belgili:

$$1 \text{ Dj} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sek}^{-2} \text{ }^{47}.$$

SGS sistemasındaǵı energiyanıń birligi erg:

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ g} \cdot \text{sm}^2 \cdot \text{sek}^{-2} = 10^{-7} \text{ Dj}.$$

Elementar bóleksheler fizikasında energiyanıń birligi sıpatında elektronvolt hám onıń tuwındıları qullanıladı:

$$1 \text{ keV} (10^3 \text{ eV}),$$

$$1 \text{ MeV} (10^6 \text{ eV}),$$

$$1 \text{ GeV} (10^9 \text{ eV}) \text{ hám } 1 \text{ TeV} (10^{12} \text{ eV}).$$

Ásirese arnawlı ádebiyatta hám biziń kitabımızda 1 GeV birligi qullanıladı.

Elektron 1 V shamasına teń potenciallar ayırması arqalı ótkende 1 eV energiyaǵa iye boladı. Elektronnıń zaryadı $e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Kl}$; demek bir kulonda $6,241459(93) \cdot 10^{18}$ elektron boladı.

$$1 \text{ Dj} = 1 \text{ Kl} \cdot \text{V} = 6,241459(93) \cdot 10^{18} \text{ eV} \approx 6,24 \cdot 10^9 \text{ GeV},$$

$$1 \text{ GeV} = 1,6021892(46) \cdot 10^{-10} \text{ Dj} = 1,7826759(52) \cdot 10^{-24} \text{ g} \cdot \text{c}^2 \text{ (c arqalı jaqtılıqtıń tezligi belgilengen):}$$

$$s = 2,99792458(1,2) \cdot 10^{10} \text{ sm} \cdot \text{sek}^{-1},$$

$$\hbar c = 1,9732858(51) \cdot 10^{-14} \text{ GeV} \cdot \text{sm},$$

$$\hbar = 6,582173(17) \cdot 10^{-25} \text{ GeV} \cdot \text{sek} = 1,0545887(57) \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sek}.$$

$\hbar, c = 1$ birliklerinde

$$1 \text{ GeV} \approx 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Dj} \approx 1,8 \cdot 10^{-24} \text{ g},$$

$$1 \text{ GeV} \approx 0,7 \cdot 10^{-24} \text{ sek} \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ sm}.$$

G_N menen G_F ti salıstırıw. G_N menen G_F shamaların salıstırıw úlgi bolarlıqtay áhmiyetke iye. SGS hám SI sistemalarında

$$G_N \approx 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ sm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sek}^{-2} = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{sek}^{-2},$$

$$G_F \approx 1,4 \cdot 10^{-49} \text{ erg} \cdot \text{sm}^3 = 1,4 \cdot 10^{-62} \text{ Dj} \cdot \text{m}^3.$$

Eger bul sanlarǵa ústirtin túrde qarasa, onda G_N shaması G_F shamasınan kóp úlken degen oy payda boladı. Eger, tábiyiy birliklerge keletuǵın bolsaq, onda másele pútkilley basqasha, qarama-qarsı túrde sheshiledi:

$$G_N \approx 6,7 \cdot 10^{-39} \hbar c^5 \text{ GeV}^{-2},$$

$$G_F \approx 1,2 \cdot 10^{-5} \hbar^3 c^3 \text{ GeV}^{-2}.$$

Biz $\hbar, c = 1$ birliklerinde G_N gravitaciyalıq turaqlınnıń mánisiniń ázzi tásirlesiwdiń turaqlısınıń mánisinen 33 tártipke kishi ekenligin kóremiz. Bul jaqsı belgili faktke tolıq sáykes keledi: laboratoriyalıq sharayatlarda gravitaciyalıq tásirlesiw ázzi tásirlesiwge salıstırǵanda kishi.

Kelvin (K). Absolyut temperatura T bóleksheler ansambliniń ortasha energiyasın táriyipleytuǵın bolǵanlıqtan, temperaturanı elektronvoltlerde ólshew tábiyiy. Bunday jaǵdayda kT nıń ornına T nı jazıw kerek. Bolcman konstantası Kelvin boyınsha graduslardan energiyalıq birliklerge ótiwdegi tek esaplawshı kóbeytiwshi ǵana bolıp tabıladı: $k \approx 1 \text{ eV}/11604 \text{ K}$. Eger $k = 1$ dep qabil etsek, onda $1 \text{ eV} \approx 11604 \text{ K}$ teńligin alamız.

$\hbar, c = 1$ birliklerinde Stefan-Bolcman konstantası $\sigma = \pi^2/60$.

sońǵı mánisli cıfrasındaǵı bir standart awısıwdaǵı anıqsızlıqtı kórsetedi:

$$137,03604(11) = 137,03604 \pm 0,00011.$$

⁴⁷ SI standartı boyınsha sekunda c arqalı belgilenedi. Al jaqtılıqtıń tezligi c menen aljasıqtıń bolmawı ushın bir sekundanı "sek" arqalı belgileymiz.

Barn (b). Kese-kesimlerdi ólshew ushın yadroliq fizikada hám elementar bóleksheler fizikasında barn ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ sm}^2$), millibarn ($1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ sm}^2$), mikrobarn ($1 \text{ mkb} = 10^{-30} \text{ sm}^2$), nanobarn ($1 \text{ nb} = 10^{-33} \text{ sm}^2$), pikobarn ($1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ sm}^2$), femtobarn ($1 \text{ fb} = 10^{-38} \text{ sm}^2$) hám attobarn ($1 \text{ ab} = 10^{-42} \text{ sm}^2$) qollanıladi.

$$1 \text{ GeV}^{-2} = 0,389 \text{ mb}.$$

SI (Système International d'Unités francuz atamasınıń qısqartılıp jazılıwı) — Birliklerdiń xalıq aralıq sisteması.

Tiykargı mexanikalıq birlikler — metr (m); kilogramm (kg); sekund (sek). Tuwındı mexanikalıq birlikler: kúsh - nyuton ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sek}^{-2}$); energiya - djoul ($1 \text{ Dj} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$); quwat - watt ($1 \text{ Vt} = 1 \text{ Dj} \cdot \text{sek}^{-1}$); basım - paskal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$); jiyilik - gerc ($1 \text{ Gc} = 1 \text{ sek}^{-1}$).

Tiykargı elektromagnit birlik — amper. Tuwındı elektromagnit birlikler - kulon (KI); volt (V); farad (F); om (Om); veber (Vb); tesla (TI).

Onnıń dárejeleri SI sistemasına sáykes tómendegidey prefikslerdiń járdeminde belgilenedi:

10^{-1}	deci	d	10^1	deka	da
10^{-2}	santi	s	10^2	gekto	g
10^{-3}	milli	m	10^3	kilo	k
10^{-6}	mikro	mk	10^6	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^9	giga	G
10^{-12}	piko	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f	10^{15}	peta	P
10^{-18}	atto	a	10^{18}	eksa	E

SI sistemasında amper (A) vakuumda bir birinen 1 m qashıqlıqta jaylasqan uzınlıqları sheksiz bolǵan eki ótkizgishtiń arasında uzınlıqtıń hár 1 metrinde bir biri menen $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ kúsh penen tásirlesiw payda etetuǵın usı eki ótkizgish arqalı ótetuǵın ózgermeytuǵın toqtıń birligi sıpatında anıqlanadı.

Eger Amper nızamın

$$F = 2I^2l/c^2d$$

túrinde jazatuǵın bolsaq (F - kúsh, I - toqtıń kúshi, l - ótkizgishtiń uzınlıǵı, d - ótkizgishlerdiń arasındaǵı qashıqlıq, c - jaqtılıqtıń tezligi), onda amper ushın

$$1 \text{ A} = c\sqrt{10^{-7} \text{ N}}$$

shamasın alamız.

Biraq SI sistemasında amper tiykargı emes, al tuwındı shama túrinde qaraladı. SI de Amper nızamı

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{4\pi d}$$

túrine iye. Bul teńlikte μ_0 arqalı induktivliktiń birligi genri ($1 \text{ Gn} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^2 = 1 \text{ Vb} \cdot \text{A}^{-1}$, veberdiń anıqlaması tómende) arqalı ańlatılatuǵın vakuumnıń magnitlik sińirgishligi belgilengen.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Gn} \cdot \text{m}^{-1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}.$$

(Toq kúshiniń birligi sıpatında Amper 1881-jılı Elektriklerdiń birinshi xalıq aralıq kongressinde qabıl etildi. Amperdiń anıqlamasındaǵı 10^{-7} koefficienti bizge XIX ásirde miyras bolıp qaldı. Volt haqqında gáp etilgende usı koefficienttiń kelip shıǵıwı haqqında ayıladı).

Kulon (KI) óziniń SI deǵı anıqlaması boyınsha $1 \text{ A} \cdot 1 \text{ sek}$ shamasına teń. Elektr zaryadınıń muǵdarınıń bul anıqlaması menen Kulon nızamına tiykarlanǵan anıqlama menen baylanısın qaraymız. Onıń ushın SGS sistemasına itibar bergen (sm, g, sek) hám elektrdiń elektrostatikalıq birligin ese de anıqlaǵan qolaylı⁴⁸

⁴⁸ Biz bul jerde xalıq aralıq "esu" (electrostatic unit) belgisiniń ornına "ese" belgisin paydalanamız.

$$1 \text{ ese}^2 \cdot \text{sm}^{-1} = 1 \text{ erg}.$$

Bunday jaǵdayda

$$1 \text{ ese}^2 = \text{g} \cdot \text{sm}^3 \cdot \text{sek}^{-2} = 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sek}^{-2} = 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}^2.$$

Bul ańlatpanı SI sistemasındaǵı kulonnıń anıqlaması menen salıstırıp

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kl}^2 &= 1 \text{ A}^2 \cdot \text{sek}^2 = 10^{-7} \text{ s}^2 \cdot \text{N} \cdot \text{sek}^2 = \\ &= 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \left(c \cdot 1 \frac{\text{sek}}{\text{m}} \right)^2 = 10^2 \text{ ese}^2 \left(c \cdot 1 \frac{\text{sek}}{\text{m}} \right)^2 \end{aligned}$$

ekenligin kóremiz. Demek,

$$1 \text{ Kl} = \frac{1}{10} \text{ ese} \left(c \cdot 1 \frac{\text{sek}}{\text{m}} \right) = 1 \text{ ese} \frac{1}{10} \xi.$$

Bul ańlatpada $\xi = 2,99792458(1,2) \cdot 10^{10}$ - vakuumdaǵı jaqtılıqtıń tezligi c nıń $\text{sm} \cdot \text{sek}^{-1}$ birliklerinde ólshengen san mánisi. ξ koefficienti SI birliklerinen SGSE birliklerine ótiwde jiyi ushırasadı. Bunday jaǵdayda kulonǵı anıqlaǵandaǵı $1/10$ koefficienti amperdi anıqlawdaǵı tariyxıy 10^{-7} koefficientiniń nátiyjesi bolıp tabıladı.

SI sistemasında Kulon nızamı mınaday túrge iye:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2}.$$

Bul ańlatpada Q - kulonlarda ańlatılǵan elektr zaryadı, r - olardıń arasındaǵı qashıqlıq (metrlerdegi), ϵ_0 - vakuumnıń dielektriklik sińirgishligi (ol sıyımlıqtıń birliǵi farad arqalı ańlatıladı):

$$\epsilon_0 = (4\pi \xi^2)^{-1} \cdot 10^{11} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} = 8,85418782(7) \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1},$$

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{10^4}{\xi^2} \frac{\text{F} \cdot \text{Gn}}{\text{m}^2} = \frac{10^4}{\xi^2} \left(\frac{\text{sm}}{\text{sek}} \right)^2 = \frac{1}{c^2}.$$

Volt (V). Elektr kernewiniń, elektr potencialınıń, elektr qozǵawshı kústiń (e.q.k.) birliǵi. SI ge sáykes $1 \text{ V} = 1 \text{ Dj} \cdot 1 \text{ Kl}^{-1}$. Demek,

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{erg}}{\text{ese}} \frac{10^8 \text{ sm} \cdot \text{sek}^{-1}}{c} = 10^8 \frac{\text{erg}^{1/2}}{\text{sm}^{1/2}} \frac{\text{sm} \cdot \text{sek}^{-1}}{c} = 1 \frac{\text{Dj}}{\text{ese}} \frac{10}{\xi}.$$

Elektr qozǵawshı kústiń ámeliy birliǵi sıpatında volt joqarıda esletilip ótilgen kongresste 1881-jılı qabıl etildi. Sol kongresste SGSMS sistemasınıń 10^8 birliǵi sıpatında alınǵan edi:

$$1 \text{ V} = 10^8 \left(\frac{\text{erg}}{\text{sm}} \right)^{1/2} \frac{\text{sm} \cdot \text{sek}^{-1}}{c}.$$

1889-jılǵı Elektriklerdiń ekinshi xalıq aralıq kongressinde djouldıń absolyut ámeliy elektr birliǵine jumıs penen energıyanıń birliǵi sıpatında voltten keyin kirgizilgenligin ańǵaramız.

Voltti erg hám ese arqalı anıqlaǵandaǵı 10^8 koefficientiniń kulonǵı ese arqalı, usıǵan sáykes amperdi nyuton arqalı anıqlaǵandaǵı 10 koefficientine alıp keletuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Al voltı anıqlaǵandaǵı 10^8 koefficientiniń saylap alınıwı ne menen baylanıslı? Juwap mınadan ibarat: usınday jollar menen anıqlanǵan voltıń mánisi normal elementler dep atalatuǵın toqtıń derekleriniń elektr qozǵawshı kúshiniń shamasına jaqın. Normal element dep elektr qozǵawshı kúshi waqıttıń ótiwi menen ózgermeytuǵın hám ekzemplıyardan ekzemplıyǵa ótkende qaytadan tiklenetuǵın galvanikalıq elementke aytadı. Óziniń dáwirinde normal elementler voltın etalonı sıpatında xızmet etti. Házirgi waqıtları olar texnikadaǵı kernewdi standartlaw ushın keńnen qollanıladı.

Farad (F) (burınǵı ataması farada) — elektr sıyımlıǵınıń birliǵi:

$$1 \text{ F} = 1 \text{ Kl} \cdot 1 \text{ V}^{-1} = 1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{sek}^4 \cdot \text{A}^2.$$

Endi

$$1 \text{ A} \cdot \text{sek} = 1 \text{ Kl}, 1 \text{ Kl}^2 = 10^{-7} \text{ c}^2 \text{ N} \cdot \text{sek}^3$$

qatnasınan paydalanamız hám SGS sistemasına ótip

SGSE sistemasındaǵı elektrdiń muǵdarınıń birliǵi 1 ese ge teń. Bul qosımshanıń aqırında keltirilgen ádebiyattıń dizimindegi [1] ge qarańız.

$$1 \text{ F} = 10^{-7} \text{ c}^2 \frac{\text{N} \cdot \text{sek}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} = 10^{-7} \text{ sm} \left(\frac{\text{s} \cdot \text{sek}}{\text{sm}} \right)^2 = \\ = 10^{-9} \xi^2 \text{ sm} \approx 9 \cdot 10^{11} \text{ sm}.$$

Om - qarsılıqtıń birliǵı:

$$1 \text{ Om} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ Dj} \cdot \text{Kl}^{-2} \cdot \text{sek} = \\ = 1 \frac{\text{Dj} \cdot \text{sek}}{\text{ese}^2} \left(\frac{10}{\text{c} \cdot \text{sek}} \right)^2 = 10^9 \frac{\text{sek}}{\text{sm}} \left(\frac{\text{sm}}{\text{c} \cdot \text{sek}} \right)^2 = \frac{10^9}{\xi \cdot \text{c}}.$$

Solay etip, Om (tezlik)⁻¹ ólshemge iye boladı eken.

$c = 1$ bolǵan birliklerde

$$1 \text{ Om} \approx 1/30.$$

Veber (Vb). Magnit aǵısı (magnit indukciyasınıń aǵısı) SI ge sáykes veberlerde ólshenedi:

$$1 \text{ Vb} = 1 \text{ Dj} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ V} \cdot \text{sek}.$$

Tesla (Tl). Magnit aǵısınıń tıǵızlıǵı (magnit indukciyası) teslalarda ólshenedi:

$$1 \text{ Tl} = 1 \text{ Vb} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ kg} \cdot \text{sek}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ V} \cdot \text{sek} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$10^{-4} \text{ Tl} = 1 \text{ Gs (gauss)}.$$

Misal sıpatında zaryadı e hám impulsı p ($\text{GeV} \cdot \text{c}^{-1}$) bolǵan elektronnıń radiusı ρ (m) bolǵan orbita boyınsha kóldeneń H (Tl) magnit maydanındaǵı qozǵalısnı qaraymız. SI birliklerinde:

$$pc = eH\rho c.$$

Bunday jaǵdayda

$$pc (\text{GeV}) \approx 0,3 H\rho (\text{Tl} \cdot \text{m}).$$

Biz bul jerde $e \cdot 1 \text{ Tl} \cdot \text{m} = e \cdot 1 \text{ V} \cdot \text{sek} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ eV} \cdot \text{sek} \cdot \text{m}^{-1}$ ekenligin esapqa aldıp hám juwıq túrde $10^{-9} \text{ c} \cdot \text{sek} \cdot \text{m}^{-1} \approx 0,3$ almasırdıq paydalandıq.

SI standart sıpatında. SI ge ótiw Ólshemler menen salmaqlar boyınsha XI bas konferenciya tárepinen usınıldı (1960-jılı). SI ge tiykarlanǵan standart (ST SEE 1052-78 "Metrologiya. Edinici fizisheskix velishin", 1980) SSSR dıń mámleketlik standartı sıpatında SSSR Mámleketlik standartınıń 1979-jıl 25-iyun kúngi qararı menen háreketke túsirilgen (kelisim-huqıyqıy qatnaslarında hám xalıq xojalıǵında paydalanıwdı 1980-jıldıń 1-yanvarınan baslaw názerde tutilǵan).

SI sistemasınıń artıqmashlıǵı menen kemshilikleri. SI dıń tiykarǵı bahalılıǵı bul sistemanıń birlikleriniń kópshiliginiń ilimniń, texnikanıń hám xalıq xojalıǵınıń bir qatar bólimlerinde ámeliy jaqtan paydalanıwdıń qolaylı bolıwı menen baylanıslı. Hár bir fizikalıq shama ushın tariyxıy jaqtan qalıplesken birliklerdiń kópliginiń ornına bir birlik bekitedi hám onnan pútin ese úlken bolǵan yamasa úleslik birlikler kirgiziledi.

SI sistemasınıń tiykarǵı kemshiligi mınadan ibarat: Fundamentallıq fizika oblastında usı sistemada jazılǵan kóp formulalar tek fizikalıq emes, al tariyxıy xarakterge iye júdá úlken bolǵan qaytadan esaplanatuǵın kóbeytiwshilerge iye hám olar fizikalıq qubılıslardıń mánisin túsiniwdi qıyınlastıradı. Bul birinshi gezekte vakuumdıǵı elektr hám magnit maydanlarınıń kernewlikleri E menen H hár qıylı ólshemlerge iye, vakuumǵa birge teń bolmaǵan hám ólshem birliklerine iye μ_0 magnit sińirgishligi hám ϵ_0 dielektriklik sińirgishlik jazıladı. Sonlıqtan barlıq tórt vektordıń (H penen E kernewlikler menen eki indukciya $B = \mu_0 H$ hám $D = \epsilon_0 E$) ólshem birlikleri hár qıylı. Bunday anıqlamalar elektrodinamikanıń revolyuciyaǵan burınǵı qáddine sáykes keledi (bunday qáddide elektrodinamika bunnan shama menen 100 jılday burın turdı) hám Maksvell teńlemeleriniń fizikalıq mánisine qarama-qarsı keledi. Misalı, H penen E kernewlikleri elektromagnit maydandıń $F_{\mu\nu}$ tórt ólshemli tenzorınıń qurawshıları bolıp tabıladı. Kulon, volt, djouldıń ámeliy birliklerin saqlawǵa tábiyiy umtılw SI dıń joqarıda esletilip ótilgen defektlerin pútkilley aqlamaydı. Usı birliklerdi de, vakuum menen elektromagnit maydanlarınıń kernewlikleriniń aqılǵa muwapıq keletuǵın anıqlamaların saqlawǵa boladı ǵo.

Ulıwma aytqanda, hátte SI ge salıstırǵanda da izshilirek fizikalıq birliklerdiń bir sistemasına

tiykarlangan shártli túrde standartlastırıw tek zıyandı ǵana alıp keledi. Biz \hbar , $c = 1$ sistemasın paydalanǵan jaǵdayda elementar bóleksheler fizikasınıń kóp qubılıslarınıń ápiwayılasatuǵınıń kórdik. Biraq, bul sistemanı kúndelikli turmısta yamasa awıl xojalıǵında paydalanıw tek zıyan bergen bolar edi.

Joqarıda esletilgen standart fizikalıq birliklerdi aqıl menen saylap alıwdıń ilimiy jumıs ushın zárúrli ekenligin kórsetedi. Onda arnawlı túrde "standart ilimiy izertlewlerde hám teoriyalıq xarakterdegi ilimiy maqalalarda qollanılatuǵın birliklerge tarqatılmaıdı" degen mánistegi arnawlı sózler ayıldı. Biraq bul jarım-jartı moyınlaw bolıp tabıladı, sebebi bunnan keyin standarttıń teksti "barlıq oqıw orınlarındaǵı oqıw processı (sonıń ishinde oqıwlıqlar menen oqıw qollanbaları) SI birliklerin hám 3.1, 3.2, 3.3 punktlerine sáykes qollanıwǵa ruqsat etilgen birliklerdi paydalanıwǵa tiykarlangan bolıwı kerek". Fizikada keń túrde paydalanılatuǵın SGS hám \hbar , $c = 1$ sisteması bul punktlerde esletilip te ótilmegenligin ańǵaramız. Biraq, ilim menen bilim alıwdıń arasındaǵı baylanıstı qalayınsha úziwge boladı? Sebebi búgin Maksvell teńlemeleriniń mánisin túsinetuǵın student erteń olardı qollana almaydı.

Standartqa sáykes fizikada djoul menen bir qatarda elektronvolttı qollanıwǵa ruqsattır berilgenligi jaqsı. Biraq kese-kesimniń birliǵı bolǵan barnnıń (10^{-24} sm²) hám onıń 10^{-18} den kishi úlesin ańǵartatuǵın tuwındılarınıń SI de názerde tutılmaǵanlıǵı ókinishli.

Bir neshe jıl burın standart bolmaǵan millimetr sınap baǵanasınıń basımınıń ornına gektopaskallar batıl túrde hám tosınnan radio menen gazetalardaǵı hawa rayı boyınsha maǵlıwmatlarǵa kirgizildi. Biraq, bir neshe hápte ótkennen keyin bul jańalıqtı biykarlawǵa tuwrı keldi. Onıń tayarlanbaǵanlıǵı hám waqıtqa say kelmeytuǵınlıǵı bárshe ushın ayqın boldı. Ólshewsiz hám sátsiz standartizaciyanıń sebebinen ilimge zıyan tiygiziw aqırǵı esapta texnikaǵa zıyan tiygiziwge alıp keledi. Bul jaǵdaydı kóp adamlardıń sezbeui múmkin. Biraq onıń áhmiyeti salıstırmas dárejede úlken.

Ádebiyat

Oboznasheniya, edinıcı izmereniya hám terminologiya v fizike. Dokument U.I.P. 20 (1978) Soyuz shistoy hám prikladnoy fiziki// UFN.— 1979.— T. 129, vıp. 2,— S. 289.

Sivuxin D. V. O Mejdunarodnoy sisteme fizisheskix velishin II UFN.— 1979.— T. 129, vıp. 2,— S. 335.

Leontovich M. A. O sistemax mer // Vesti. AN SSSR. —1964.— № 6.— S. 123. (M. A. Leontovich penen D. V. Sivuxinniń maqalasında SI áshkaralangán. D. V. Sivuxinniń maqlanası SSSR Ilimler Akademiyasınıń ulıwma fizika hám astronomiya Bóliminiń Byurosınıń sheshimi menen baspadan shıqtı).

Kamke D., Kremer K. Fizisheskie osnovı edinic izmereniya.— M.: Mir, 1980.

Kvantovaya metrologiya i fundamentalnie konstantı: Sb. statey / Per. s angl, pod red. R. N. Faustova, V. P. Shelesta.— M.: Mir, 1981.

2-qosımsha

TERMINLER SÓZLIGI

Sózlik elementar bóleksheler fizikasına tiyisli bolǵan shama menen 100 termindi óziniń ishine aladı. Olar tiykarınan teoriyalıq hám matematikalıq terminler bolıp tabıladı (biraq onday emesleri de bar). Mısalı, sózlik maqalalardıń bir qatarı tezletkishlerge de baǵıshlangan.

Sózlikti tayarlaǵanda onıń bir neshe funkciyalardı atqarıwınıń kerek ekenligi názerde tutıldı.

1. Sholıwdıń tekstin tolıqtırıw hám túsindiriw.

2. Sholıwǵa baylanıssız maǵlıwmatlar ushın xızmet etiw.

3. Endi baslap atırǵan oqıwshıǵa terminologiyada baǵdar alıwǵa járdem beriw. Ilimniń jańa oblastı menen tanısqanda payda bolatuǵın terminologiyalıq tosqınlıq júdá úlken orındı iyeleydi. Etimologiyanı kórsetiw menen berilgen terminlerdiń ápiwayı hám qısqasha anıqlamaları bul tosqınlıqtan ótiwge tolıq emes bolsa da járdem beredi.

4. "Tınıshlıqtaǵı massa" yamasa "myu-mezon" sıyaqlı eskergen terminlerdi paydalanıwdan saqlaydı.

5. \hbar , $c = 1$ birlikler sistemasına tiykarlangan ápiwayı ólshemlik bahalardı beriwge mısallar keltiriw.

Funkciyalardıń usınday hár qıylı bolıwınıń saldarınan sózliktiń forması menen stiliniń birdey túrge iye bolmawı tábiyiy. "Shashtı pútkilley alıp taslawdı" oǵan járdem beredi dep oylamayman. Men tek hár bir sózliklik maqalanıń basınıń ápiwayı hám anıq jazılıwına tırıstım. Geypara maqalanıń barlıǵı jetkilikli dárejede ápiwayı jazılǵan, biraq teksttiń ayırım bólimleri kóbirek tayarlıqqa iye bolǵan oqıwshıǵa mólsherlengen. Eger siz oqıwdıń barısında túsınbey, qıyınshılıqqa tap bolǵan bolsańız, onda siz usınday bólekke tap bolǵansız. Onı oqımay, qaldırıp ketińiz.

Kóp sanlı áhmiyetli terminler sózlikte ayırım maqalalarǵa iye emes. Kópshilik jaǵdaylarda olar basqa sózliklik maqalalarda yamasa sholıw tekstinde túsindirilgen. Eger predmetlik kórsetkishten paydalansańız, olardı tez tawıp alasız.

Adronlar — kúshli tásirlesiwge qatnasatuǵın bóleksheler. Spini pútin bolǵan adronlardı mezonlar, al spini yarım pútin bolǵan adronlardı barionlar dep ataydı. Adronlardıń bir neshe júzi belgili.

Adronlardıń kópshiligi júdá turaqsız (stabilli emes). Olar rezonanslar dep atalatuǵın bóleksheler bolıp tabıladı: olar kúshli tásirlesiwdiń sebebinen jeńilirek bolǵan adronlarǵa ıdıraydı. Rezonanslardıń jasaw waqıtı 10^{-12} sekundtan kishi⁴⁹.

Kvazistabilli adronlar ádewir uzaq waqıt ómir súredi hám ázzi jáne elektromagnit tásirlesiwlerdiń sebebinen ıdıraydı. Kvazistabilli mezonlardıń ıdırawınıń eń aqırǵı ónimleri olarǵa salıstırǵanda jeńilirek mezonlar, leptonlar hám fotonlar bolıp tabıladı. Eger ıdıraytuǵın mezonlar jetkilikli dárejede awır bolsa, onda olar barion + antibarion jubına ıdıraydı.

Eń jeńil barionlardı (proton hám neytron) nuklonlar dep, al awırırmaq bolǵan kvazistabilli barionlardı (Λ , Σ , Ξ , Ω , Λ_c , ...) giperonlar dep ataydı. Giperonlardıń ıdırawınıń aqırǵı ónimleri leptonlar, fotonlar, mezonlar hám sózsiz nuklon boladı.

Atomniń yadrosı protonlar menen neytronlardan turadı. Bizdi qorshap turǵan stabilli (ornıqlı) zattıń quramına qalǵan adronlar kirmeydi. Olar joqarı energiyalarǵa iye bolǵan bólekshelerdiń soqlıǵıswınıń saldarınan tuwıladı. Bunday bólekshelerdiń derekleri tezletkishler menen kosmoslıq nurlar bolıp tabıladı. Házirgi waqıtlardaǵı kóz-qaraslar boyınsha adronlar haqıyqıy elementar bóleksheler bolıp tabılmaydı: olar kvarklardan turadı.

⁴⁹ Aldıńǵı qosımshadaǵıday, terminler sózliginde de sekundlar ushın qısqasha sek belgisi qollanıladı.

"Adron" sózi "xadros" grek sózinen kelip shıqqan - úlken massağa iye, kúshli, iri degen mánisti beredi.

Aksiallıq vektor (latin tilindegi axis — kósher sózinen) — psevdovektor qanday bolsa aksiallıq vektor da sonday boladı. Ádettegi (polyar) vektordan ayırması, koordinatalardıń aynalıq shaǵılısında (inversiyasında) aksiallıq vektordıń qurawshıları belgisin ózertpeydi. Mısalı, eki polyar vektordıń vektorlıq kóbeymesi aksiallıq vektor bolıp tabıladı. Aksiallıq vektorlar bolıp tabılatuǵın fizikalıq shamalarǵa mısallar: magnit maydanınıń kernewligi \mathbf{H} , múyeshlik moment \mathbf{J} , aksiallıq ázzi toq.

Magnit maydanında úsh ólshemli aksiallıq vektor bolǵan \mathbf{H} vektorı altı qurawshıǵa iye bolǵan elektromagnit maydandıń kernewliginiń antisimmetriyalı tórt ólshemli kernewligi $F_{\mu\nu}$ dıń úsh keńisliklik qurawshısı bolıp tabıladı.

Aksiallıq toq bolǵan jaǵdayda úsh ólshemli aksiallıq vektor tórt ólshemli aksiallıq vektordıń úsh keńisliklik qurawshısı, al bunday jaǵdayda sol tórt ólshemli aksiallıq vektordıń waqıtlıq qurawshısı taza keńisliklik burılıwlar menen shaǵılısıwlarǵa qarata psevdoskalyar bolıp tabıladı.

Aksiallıq tok — aksiallıq-vektorlıq toq, yaǵnıy tórt ólshemli aksiallıq vektorday bolıp túrlenetuǵın toq. Toliq ázzi toq vektorlıq hám aksiallıq toqlardıń qosındısınan turadı. vektorlıq hám aksiallıq toqlardıń kóbeymesi (bul kóbeyme psevdoskalyar bolıp tabıladı) ázzi tásirlesiwdegi juplıqtıń saqlanbawınıń deregi bolıp tabıladı.

Aksion — gipotezalıq neytral, spinge iye emes, jeńil bólekshe (aksionnıń massası 1 MeV ten ádewir kishi). Aksion zatlar menen júdá ázzi tásirlesedi hám eki fotonǵa ıdıraydı. Aksionlardıń bar ekenligi haqqındaǵı gipoteza kúshli tásirlesiwlerdegi (θ -aǵza menen baylanıslı bolǵan mashqalaǵa baylanıslı) CP- juplıqtıń saqlanıwı mashqalası hám onıń menen baylanıslı bolǵan abellik aksiallıq toqtıń saqlanıwı mashqalası menen baylanıslı payda boldı (bunnan aksion sózi payda boldı). Fizikalıq jaqtan baqlanatuǵın aksionnıń bar bolıwı teoriyanıń sózsiz orın alatuǵın nátiyjesi bolıp tabılmaıdı.

Algebra (arab tilindegi *الْجَبْر* *al-djabr* "tolıqtırıw") — arifmetikanıń ulıwmalastırılıwı hám keńeytiliwi dep qatań emes táriyiplewge bolatuǵın matematikanıń bólimi; bul bólimde sanlar menen basqa da matematikalıq obıektler háripler hám basqa da simvollar menen belgilenedi. Bul olardıń qásiyetlerin eń ulıwmalıq túrde jazıwǵa hám izertlewge múmkinshilik beredi. "Algebra" sózi ulıwma algebrada hár qıylı algebralıq sistemalardıń atamalarında qollanıladı. Keńirek mániste algebra haqqında gáp etkende sanlardıń ádettegi qosıw hám kóbeytiw operaciyların ulıwmalastıratuǵın ıqtıyarlı tábiyatqa iye bolǵan kópliklerdiń elementleriniń ústinen islenetuǵın operaciylardı úyreniwge baǵıshlanǵan matematikanıń bólimin túsinedi.

Li algebrası — kommutaciyalaw dep atalatuǵın [,] operaciyası menen támiyinlengen hám tómendegidey qásiyetlerge iye bolǵan sızıqlı L keńisligi:

$$[al_1 + bl_2, l_3] = a[l_1, l_3] + b[l_2, l_3] \text{ (sızıqlılıq),}$$

$$[l_1, l_2] = -[l_2, l_1] \text{ (antisimmetriyalıq),}$$

$$[l_1[l_2, l_3]] + [l_2[l_3, l_1]] + [l_3[l_1, l_2]] = 0 \text{ (Yakobi teńligi).}$$

Bul ańlatpalarda l_i - algebranıń elementleri, a hám b - sanlar.

Eger a hám b sanları zatlıq bolsa, onda algebranı zatlıq, al eger a hám b sanları kompleksli bolsa, onda algebranı kompleksli dep ataydı.

Mısal: Kommutatorı $[\tau_i, \tau_k] \equiv \tau_i \tau_k - \tau_k \tau_i$ bolǵan τ_1, τ_2, τ_3 Pauli matricalarınıń algebrası.

Eger qálegen l_i hám l_k ushın $[l_i, l_k] = 0$ teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda algebranı abellik (kommutativlik) dep ataydı.

Qálegen $l \in N$ hám $n \in N$ ushın $[l, n] \in N$ shárti orınlanatuǵın bolsa, onda N podalgebrasın ideal dep ataydı.

Eger abellik bolmasa hám $\{0\}$ den hám L dep ózgeshe bolmaǵan idealları bolmasa, onda L algebrasın ápiwayı dep ataydı. Eger qálegen $m \in N$ hám $n \in N$ ushın $[m, n] = 0$ teńligi orınlı bolatuǵın bolsa, onda L algebrasın M menen N algebralarınıń summası dep ataydı.

Li gruppası G menen Li algebrası L arasındığı baylanıs simvolliq túrde bılayınsha jazıladı: $G \sim \exp(L)$.

Processtń amplitudası — kvantlıq mexanika menen maydannń kvantlıq teoriyasındığı shama, onń moduliniń kvadrattı processtń itimallıǵın anıqlaydı. Eki bóleksheniń soqlıǵısıwında processtń itimallıǵı onń kese-kesimi menen anıqlanadı, al stabil bolmaǵan bólekshelerdiń ıdırawında itimallıq ıdırawdıń keńligi boyınsha anıqlanadı.

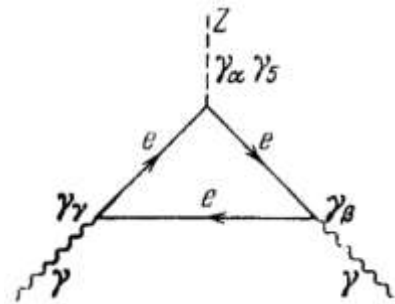
Annigilyaciya — bólekshe menen onń antibólekshesi soqlıǵısıp, basqa bólekshelerdi payda etiw menen júretuǵın bir birin joq qılıw processi. Tariyxıy jaqtan birinshi bolıp elektron menen pozitronnıń eki fotonǵa aylanıwı baqlandı:

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

Házirgi waqıtları joqarı energiyalardığı bir biri menen qarama-qarsı táreplerge tarqalatuǵın elektronlar hám pozitron dástelerindegi elektron menen pozitronnıń adronlarǵa annigilyaciya processi eń úlken qızıǵıwdı payda etedi.

Anomaliya — maydannı kvantlıq teoriyasında — lagranjiannıń belgili simmetriyasınan, sol lagranjiannıń tiykarında esaplangan kvantlıq dúzetiwlerden kelip shıǵatuǵın qanday da bir saqlanıw nızamınıń buzılıwı. Bunday paradokslıq qubılıs virtuallıq bólekshelerdiń impulsleriniń sheksiz úlken mánislerinde Feynman diagrammalarınıń ayırımlarınıń jáne qosımsha anıqlama beriwdi talap etiwı menen baylanıslı, al usınday qosımsha anıqlama beriw bolsa lagranjiannıń dáslepki simmetriyasına qayshı keledi.

42-súwret.



Anomaliya ushın eń belgili bolǵan misal massaǵa iye bolmaǵan zaryadlangan aksiallıq toqtır saqlanbawı bolıp tabıladı. Formallıq jaqtan, bunday jaǵdayda lagranjian kirallıq-invariant, biraq usı jaǵdayǵa qaramastan (42-súwret) aksiallıq toqtı qıyratatuǵın úsh múyeshli diagramma dep atalatuǵın diagramma bar. 42-súwrettegi úsh múyeshliktiń tárepleri virtuallıq fermionnıń ("elektronnıń") tarqalıwın súwretleydi. Joqarǵı tóbe fermionlıq aksiallıq toqtırnıń Z-bozon menen tásirlesiwın, al tómengi eki tóbe elektromagnitlik fermionlıq toqtırnıń fotonlar menen tásirlesiwın sáwlelendiredi.

Úsh múyeshli diagrammanıń aksiallıq toqtırnı divergenciyasına qosatuǵın úlesi sheklengen bolsa da, onıń aksiallıq toqtırnı ózine qosatuǵın úlesi joqarı shekte "otırıptı" hám virtuallıq bólekshelerdiń úlken impulslerinde regulyarizaciyanı talap etedi. Aksiallıq toqtı buzbaytuǵın aqılǵa muwapıq keletuǵın regulyarizaciyanı júzege keltiriwdiń múmkinshiligi joq.

Teoriyadığı aksiallıq anomaliyanıń bolmawı talabı fermionlıq multipletlerdiń ruqsat etiletuǵın strukturası ushın qatań túrdegi sheklewlerdi qoyadı. Misal sıpatında mına jaǵdaydı kórsetemiz: $SU(5)$ -modelinde anomaliyalar joq, sebebi kvarklik hám leptonlıq anomaliyalar bir birine dál kompensaciyalaydı.

Basqa áhmiyetli misal — energiya-impuls tenzorınıń izindegi anomaliya. Bul anomaliya kvantlıq xromodinamikada áhmiyetli orındı iyeleydi.

Glyuodinamikada massaǵa iye bolmaǵan glyuonlıq maydannı lagranjiani

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a, \quad a = 1, 2, 3, \dots, 8.$$

masshtablıq invariantlıqqa iye. Sonlıqtan bunday jaǵdayda energiya-impulstıń izi bolǵan $\theta_{\mu\mu}$

shamasınıñ izi nolge teñ dep esaplaw nadanlıq bolğan bolar edi. Turpayı túrde aytqanda $\theta_{\mu\mu} \sim p_\mu p_\nu$. Bul arılatpada p arqalı glyuonnnıñ 4-impulsi belgilengen. Glyuonnnıñ massağa iye bolmawınıñ sebebinen $p^2 = 0$ bolğanlıqtan, $\theta_{\mu\mu} = 0$ teñliginiñ orınlanıwı kerek. Biraq, eger úsh múyeshli diagrammanı regularizaciyalasa (43-súwret), onda $\theta_{\mu\mu} \neq 0$ teńsizligi alınıadı (Diagrammada joqarğı tóbe glyuonnnıñ graviton menen tásirlesiwiniñ, al tómengi eki tóbe - glyuonlardıñ bir biri menen sızıqlı tásirlesiwiniñ súwretleydi). Esaplawlar

$$\theta_{\mu\mu} = \frac{1}{2} \frac{\beta(g_s^2)}{g_s^2} F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a$$

teñliginiñ orınlı ekenligin kórsetedi. Bul teñlikte $\beta(g_s^2)$ - Gell-Mann - Lou funkciyası dep atalatuğın funkciya, al $g_s^2 = 4\pi\alpha_s$ - glyuonlardıñ tásirlesiwiniñ ólshem birligine iye bolmağan konstantası:

$$\beta(g_s^2) = -\frac{g_s^4}{(4\pi)^2} + \frac{g_s^2}{4\pi} \text{ boyınsha joqarıraq tártipke iye aǵzalar.}$$

Glyuodinamikada [SU(3)-simmetriya] $b = 11$.

Energiya-impuls tenzorınıñ izi dilataciyalıq toq dep atalatuğın K_μ ($K_\mu = x_\nu \theta_{\mu\nu}$) toqtırñ divergenciyasına teñ. Esli $\theta_{\mu\mu} \neq 0$ teńsizligi orınlanatuğın bolsa, onda masshtablıq invariantlıq buzıladı hám dilataciyalıq toq saqlanbaydı.

Solay etip, glyuodinamikadaǵı masshtabtıñ payda bolıwı (ólshem birliǵı bar Λ_{QCD} konstantası) energiya-impuls tenzorınıñ izindegi anomaliya menen tıǵız baylanıslı eken. Usı anomaliya menen asimptotalıq erkinlik penen konfaynmant te baylanıslı. Massağa iye bolmağan fermionlar da energiya-impuls tenzorınıñ anomaliyasına ózleriniñ úlesin qosadı (44-súwretke qarańız, onda úsh múyeshlik massağa iye bolmağan kvarktırñ úlesine juwap beredi). Tek glyuonlardı ǵana emes, al jeńil kvarklardı da esapqa alǵanda kvantlıq xromodinamikada $b = 11 - \frac{2}{3} n_f$ teńligi orın aladı, bul teñlikte n_f arqalı jeńil kvarklardıñ aromatlarınıñ sanı belgilengen.

80-jılları anomaliyalardıñ joq bolıwına qoyılatuğın talap superstrunalar teoriyasınıñ ishki simmetriyasınıñ túrin anıqlawda áhmiyetli orındı iyeledi ($SO(32)$ hám $E_8 \times E_8$ kalibrovkalıq gruppaları).

Antibólekshe (berilgen bólekshege qarata) — tap sonday massağa, spinge, jasaw waqtına iye, biraq barlıq zaryadlıq kvant sanları qarama-qarsı belgige iye bolğan bólekshe. Zaryadlıq kvant sanı degende bul jerde elektr zaryadı, leptonlıq kvant sanı (geyde leptonlıq zaryad dep ataladı), barionlıq kvant sanı (geyde barionlıq zaryad dep ataladı), giperzaryad, reńli zaryad hám t. b. túsiniledi. Mısalı, elektronnnıñ antibólekshesi pozitron, al pozitronnnıñ antibólekshesi elektron bolıp tabıladı. Tap usınday juptı proton menen antiproton da payda etedi (p hám \bar{p}). Neytron menen antineytroonnnıñ ekewi de neytral bóleksheler bolıp tabıladı hám bir birinen barionlıq zaryadıñ belgisi hám magnit momentiniñ belgisi menen ayrıladı. Σ^+ - giperonnnıñ antibólekshesi barionlıq zaryadıñ belgisi Σ^+ -barionnnıñ zaryadıñ belgisindey bolğan Σ^- bolıp tabılmaydı, al $\bar{\Sigma}^-$ - giperon bolıp tabıladı (geyde onı $\bar{\Sigma}^+$ túrinde de belgileydi).

Bóleksheni qanday belgi menen belgilese, antibóleksheni de tap sonday belgi menen, biraq belginiñ ústine "tilda" belgisin yamasa belginiñ ústine sızıqsha qoyıw menen belgileydi. Bunday belgilew júdá qolaylı emes, sebebi bóleksheler menen antibóleksheler arasındǵı teńdey huqıqtırñ orın alatuğınlǵın saqlamaydı. Biraq onnan jaqsı bolğan belgilewdi ele oylap tapqan joq.

Hesh qanday zaryadlıq kvantlıq sanlarǵa iye bolmağan bólekshelerdi haqıyqıy neytral bóleksheler dep ataydı. Olardıñ ózleri ózleriniñ antibóleksheleri bolıp tabıladı. Haqıyqıy neytral bolğan bólekshelerge mısallar: foton, π^0 -mezon, η -mezon, η' -mezon, f-mezon, sharmoniydiñ qáddileri, ipsiloniydiñ qáddileri.

Aromat (ingliz tilindegi flavour sózinen) - kvarktırñ (berilgen reńdegi) yamasa leptonnnıñ tipiniñ xarakteristikası. Kvarklardıñ 6 aromati: u, d, s, c, b (altınshı t-kvark házirshe ashılğan joq) — hám leptonlardıñ 6 aromati: $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ belgili.

Aromat kúshli hám elektromagnit tásirlesiwlerde saqlanadı, biraq ázzi tásirlesiwlerde

saqlanbaydı. Stranje, sharm hám but sıyaqlı kvant sanları hár qıylı aromatlardı kórsetedi.

Asimptotalıq erkinlik — bólekshelerdiń arasındaǵı qashıqlıqtıń asimptotalıq kishireyiwi menen kúshli (reńli) tásirlesiwdiń logarifmlik nızamlıq boyınsha hálsirewi. Asimptotalıq erkinlik qásiyeti kvantlıq xromodinamikadaǵı kalibrovkalıq tásirlesiwge hám ulıwma abellik emes kalibrovkalıq teoriyalardı tń. Tájiriybede asimptotalıq erkinlik tereń-serpimli emes processlerde hám awır kvarkoniylerde kórinedi. Matematikada bolsa "asimptotalıq" sózi sheksiz jaqınlasadı degen mánisti beredi.

Abellik emes teoriyalardıń asimptotalıq erkinlik qásiyeti 1973-jılı Gross, Vilshek hám Politcer tárepinen ashıldı. Kalibrovkalıq teoriya ushın baylanıs konstantası g nıń (invariant zaryad dep atalatuǵın zaryadtıń) berilgen impulstıń kvadratı bolǵan q^2 shamasınan logarifmlik baylanısı tń (bul jerde hám tómende $q^2 = q^2 - q_0^2$):

$$\frac{dg^2(q^2)}{d \ln q^2} = \beta(g^2).$$

Bul teńlikte $\beta(g^2)$ - Gell-Mann - Lou funkciyası dep atalatuǵın funkciya. Asimptotalıq qásiyettiń tiykarında kvantlıq xromodinamikada $\beta(g^2)$ funkciyasınıń teris bolıw faktı jatır:

$$\beta(g^2) = -\frac{b g_s^4}{16 \pi^2} + \frac{g_s^2}{4 \pi^2} \text{ boyınsha joqarı tártipli aǵzalar.}$$

Bul jaǵdayda $b = 11 - \frac{2}{3} n_f(q^2)$, al $n_f(q^2)$ bolsa $4m^2 \ll q^2$ shártin qanaatlandıratuǵın kvarklardıń massasına iye bolǵan kvarklıq aromatlardıń sanı. Bul qatnastan kvarklardıń altı aromadı bar bolǵan standart xromodinamika ushın asimptotalıq

$$\alpha_s(q^2) \equiv \frac{g_s^2(q^2)}{4\pi} \sim \frac{4\pi}{7 \ln(q^2/\Lambda_{QCD}^2)}$$

ańlatpanıń orın alatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul ańlatpada Λ_{QCD} shaması anıqlaması boyınsha α_s shaması sheksizlikke aylanatuǵın impulstıń mánisin kórsetedi (Álbette, usınday kishi q^2 shaması orın alǵanda joqarıda keltirilgen α_s ushın jazılǵan formula durıs bolmaydı). b ushın jazılǵan ańlatpadan kvarklıq aromatlardıń jetkilikli dárejedeǵı úlken sanında ($n_f > 16$) asimptotalıq erkinlik buzıladı.

R_f kórinisindeǵı Dirak fermionları hám R_s kórinisindeǵı kompleksli skalyarlar qatnasatuǵın ıqtıyarlı G kalibrovkalıq gruppası ushın mınaǵan iye bolamız:

$$b = (11/3) C(G) + (4/3) T(R_f) + (1/3) T(R_s).$$

Bul teńlikte

$$C(G)\delta^{ab} = t^{acd}t^{bcd}, \\ T(R)\delta^{ab} = tr \{ \Gamma^a, \Gamma^b \}.$$

Bul ańlatpalarda $C(G)$ arqalı G gruppasınıń qosılǵan kórinisi (prisoedinennoe predstavlenie - Awdarıwshı) ushın Kazimirdiń kvadratlıq operatorı, t^{acd} - gruppanıń strukturalıq konstantaları, al Γ^a arqalı R kórinisiniń generatorları belgilengen. Mısalı, SU(N) gruppasınıń qosılǵan kórinisi ushın $C = N$ hám sol gruppanıń spinorlıq kórinisi ushın $T = 1/2$.

b-adronlar — b-kvarkler bolǵan adronlar. Geypara jaǵdaylarda b-adronlardı shıraylı bóleksheler dep ataydı. b-adronlardıń ishindeǵı eń jeńilleri B-mezonlar bolıp tabıladı: $B^- = b\bar{u}$, $B^+ = \bar{b}u$, $B^0 = b\bar{d}$, $B^0 = \bar{b}d$. Olardıń massaları 5 GeV ten azmaz úlken. b-barionlardıń eń jeńili $\Lambda_b = udb$ biraz salmaqlı (5,5 GeV tiń átirapında).

b-kvark penen b-antikvarktan turatuǵın "jasırın shıraylılıqqa iye" mezonlar ipsiloniydiń qáddilerin payda etedi. Ipsiloniydi jiıy bottoniy yamasa bottomoniy dep ataydı. Terminologiya ele qáliplesken joq. Geypara jaǵdaylarda b-adronlar haqqında gáp etkende tek "ayqın shıraylı" bolǵan bólekshelerdi názerde tutadı.

Barioniy — bir birine kúshli tartısatuǵın barion menen antibarionnan turatuǵın sistema.

CERN degi tómengi energiyalı antiprotonlıq saqıynada baylanıs energiyası 200 MeV ten kishi yamasa onıń menen teń barioniydi muqıyatlı túrde izlewler házirshe unamalı nátiyjelerge alıp

kelmedi.

Barionlar — yarım pütün spinge iye bolğan adronlar. Barlıq barionlar barionlıq kvant sanı +1 ge teń bolğan (barionlıq zaryad), al antibarionlar -1 ge teń mánisi menen táriyiplenedi. Kúshli, ázzi hám elektromagnit tásirlesiwlerde barionlıq kvant sanı saqlanadı. Sonlıqtan usınday tásir etisiwler menen baylanıslı bolğan barlıq processlerde barionlardıń sanı menen antibarionlardıń sanınıń ayırması saqlanadı. Ullı birlesiw modelleri barionlıq zaryad saqlanbaytuǵın processlerdiń bar ekenligin boljaydı (protonlardıń ıdırawı).

"Barion" sózi grek tilindegi "barios" - salmaqlı sózinen alınğan.

Kvarklıq model boyınsha belgili bolğan barionlardıń hár qaysısı úsh kvarktan turadı.

Kvarkları tek birinshi áwladqa (u- hám d-kvarklardan turatuǵın) kiretuǵın barionlardıń izotoplıq spini $\frac{1}{2}$ ge teń bolsa, onda olardı N háribiniń járdeminde belgileydi. Al, izotoplıq spinniń mánisi 3,2 ge teń bolğan jaǵdayda Δ háribi qullanıladı. 20 dan aslam N-dubletler hám Δ -kvartetler (Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-) belgili. N-barionlardıń eń jeńili proton menen neytron, eń awırı - N(3000). Bul jerde hám bunnan keyin MeV lerdegi massa keltirilgen. Δ -barionlardıń ishindegi eń jeńili $\Delta(1230)$, eń salmaqlısı $\Delta(3000)$.

Kvarklarınıń ekewi birinshi áwladqa, al úshinshisi salmaqlıraq bolğan barionlar izospini nolge teń bolğan jaǵdayda Λ , al izospini 1 ge teń bolğan jaǵdayda Σ arqalı belgilenedi.

Eger úshinshi kvark ersi, s bolsa, onda Λ menen Σ lar indekske iye bolmaydı, misalı $\Lambda(2585)$ yamasa $\Sigma(3170)$. Λ^0 diń 18 singleti hám 27 triplet belgili (Σ^+ , Σ^- , Σ^0). Eger úshinshi kvark c, b yamasa t bolsa, onda onıń simvolı tómengi indeks túrinde kórsetiledi, misalı $\Lambda_c^+(2282)$, $\Sigma_c^{++}(2450)$, $\Sigma_c^+(2450)$, $\Sigma_c^0(2450)$ yamasa $\Lambda_b^0(5425)$. Joqarǵı indeks bóleksheniń elektr zaryadın kórsetedi.

Kvarklarınıń tek birewi birinshi áwladqa, al qalğan ekewi ekinshi áwladqa kiretuǵın barionlar Ξ arqalı belgilenedi (olardıń izotoplıq spini $\frac{1}{2}$ ge teń). Bunday jaǵdayda s-kvarklardıń qatnasıwı indeks penen belgilenbeydi, al salmaqlıraq bolğan kvarklardıń qatnasıwı tómengi indeksler menen belgilenedi. Ξ -dubletlerdiń on biri belgili (Ξ^0 , Ξ^-). $\Xi_c(2460)$ barionın da baqladı (onıń eski ataması $\Lambda(2460)$). Ξ_{cc} hám Ξ_{cb} tipindegi barionlar ele baqlanğan joq.

Birinshi áwladqa kiretuǵın kvarklarǵa iye bolmağan barionlardı Ω -barionlar dep ataydı (olardıń izotoplıq spini nolge teń). Ω -barionlardıń eń jeńili úsh s-kvarktan turadı. Ol $\Omega^-(1672)$ bolıp tabıladı. Ω_c^0 -barionınıń bar ekenligin kórsetetuǵın maǵlıwmatlar da bar [Onıń eski ataması $\Omega(2740)$]. Joqarıdaǵı basqa jaǵdaylardagıday, tómengi indeksler awır kvarklerdiń (c, b, t) qatnasatuǵınlıǵın kórsetedi.

Bozonlar — pütün spinge iye bolğan elementar yamasa quramlıq bóleksheler. Bozonlar Boze-Eynshteyn statistikasına baǵınadı. Berilgen kvantlıq halda berilgen tiptegi iqtıyarlı kóp sandaǵı bozonlardıń jaylasıwı múmkin. Bozonlarǵa misallar: foton, mezonlar, He^4 yadrosı, bul izotoptır atomı geliy hám t. b.

"Bozon" sózi Hindistan fizigi Bozeniń familiyasınan kelip shıqqan (1894—1974).

Vakuum, fizikalıq (fizikalıq vakuum) — kvantlanğan maydanlar sistemasınıń eń kishi energiyaǵa iye bolğan halı. Onıń fonında barlıq fizikalıq processler júzege keledi. Kvantlıq effektlerdiń bar bolıwınıń saldarınan (kvantlanğan maydanlardıń quramalıraq bolğan vakuumlıq fluktuaciýalarınan saldarınan virtuallıq bólekshelerdiń jubınıń tuwılıwı) fizikalıq vakuum quramalı strukturaǵa iye boladı hám nolge teń bolmağan kvant sanlarına iye bola aladı. Nyutonsha mániste yamasa uyıtqıwlar teoriyasınıń mánisinde vakuumdı matematikalıq vakuum dep jiyi ataydı.

Idırawdıń itimallıǵı — stabilli bolmağan bólekshelerdiń ıdırawınıń intensivligin táriyipleytuǵın shama; sek^{-1} ólshem birligine iye hám bazı bir ansambldiń waqıt birliginde ıdıraytuǵın úlesine teń. Idırawdıń itimallıǵı

$$w = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau}$$

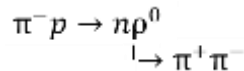
shamasına teń. Bul teńlikte τ - bólekshelerdiń jasaw waqıtı, al N - bólekshelerdiń sanı. Bólekshelerdiń ıdırawı eksponenciallıq nızam boyınsha júredi, sonlıqtan t waqıtqa shekem

jasáǵan bólekshelerdiń muǵdarı $e^{t/\tau}$ ǵa teń. Eger bólekshelerdiń jasaw waqıtı jetkilikli dárejede úlken bolsa, onda sol jasaw waqıtı tikkeley ólshenedi (mısalı, berilgen tezlikte bólekshe tuwılǵan noqattan ıdırawǵa ushıraytuǵın noqatqa shekemgi joldıń uzınlıǵın anıqlaw arqalı). Usınday usıldıń járdeminde 10^{-16} sek bolǵan waqıtlar ólshenedi (π^0 -mezonnıń jasaw waqıtı).

Júdá kishi τ ǵa iye bolǵan bólekshelerdiń jasaw waqıtı kese-kesimniń energiyalıq ǵárezligi boyınsha ólshenedi. Bul itimallıq Breyt-Vigner formulasınıń járdeminde táriyiplenedi:

$$\sigma(E) = \sigma(M) \frac{(\Gamma/2)^2}{(E-M)^2 + (\Gamma/2)^2}.$$

Bul ańlatpada $\sigma(M)$ arqalı $E = M$ processiniń kesimi, al M arqalı bólekshelerdiń massası belgilengen.; E — bólekshe tınıshlıqta turatuǵın sistemadaǵı ıdıraw ónimleriniń qosındı energiyası. Mısal retinde eki pionnıń



reakciyasındaǵı yamasa

$$e^+ e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

reakciyasındaǵı baslanǵısh bóleksheler bolǵan elektron menen pozitronnıń qosındı energiyasını kórsetiwge boladı. Bul ańlatpalarda Γ arqalı rezonanslıq iymekliktiń keńligi belgilengen. Bizler házir paydalanıp atırǵan $\hbar, c = 1$ sistemasında $\Gamma = w = \frac{1}{\tau}$. Geypara jaǵdaylarda bólekshelerdiń tolıq kesiminen ıdırawdıń ayırım kanalların táriyipleytuǵın parciallıq Γ_i keńligi menen shatastırmaw ushın Γ nıń ornına Γ_{tot} dep jazadı. Ólshem birligine iye bolmaǵan $B_i = \Gamma_i / \Gamma_{tot}$ shamasın berilgen kanaldıń salıstırmalı itimallıǵı yamasa tarmaqlanıw dep ataydı (ingliz tilinde branching ratio); $\sum_i B_i = 1$.

Virtuallıq bóleksheler — Feynman diagrammalarınıń tilinde: haqıyqıy, erkin bóleksheler ushın orınlanatuǵın

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

shártı orınlanbaytuǵın bólekshelerdi virtuallıq bóleksheler dep ataydı. Bul teńlikte E - bóleksheniń energiyası, \mathbf{p} - onıń impulsı, m - bóleksheniń massası.

Bul teńliktiń buzılatuǵınlıǵın názerde tutıp virtuallıq bóleksheler haqqında olardı massalıq bettiń sırtında jatadı dep aytadı. Virtuallıq bólekshelerdi shıǵarıw menen jutiwǵa ámeliy jaqtan barlıq fizikalıq processler tiykarlanǵan.

Ingliz sózi virtual latin virtus (kúsh, mártlik) sózinen kelip shıqqan hám hár qıylı mánislerdi ańlatadı. Bul jaǵdayda mánisi boyınsha "múmkin", "haqıyqıy emes" sózleri jaqın (mexanikadaǵı "virtuallıq orın almastırıw" sózi menen salıstırıńız).

VLEPP — proekti 1970-jılları SSSR Ilimler Akademiyasınıń Sibir bóliminiń Yadrolıq fizika institutında islep shıǵılǵan bir birine qarsı qozǵalatuǵın sıızqlı elektronlıq-pozitronlıq dástelerdi alatuǵın dúzilis. Proekttiń birinshi gezegi hár bir dásteniń energiyası 150 GeV bolǵan qarama-qarsı baǵıtta tarqalatuǵın eki dásteni alatuǵın dúzilisti paydalanıwǵa beriwden ibarat. Ekinshi gezek tonneldi eki tárepke qaray simmetriyalı túrde uzaytıwdı hám hár bir dásteniń energiyasını 500 GeV ke jetkeriwden ibarat. Bunday jaǵdayda tonneldiń tolıq uzınlıǵı 10 km di qurawı kerek. Áste qozǵalatuǵın elektronlar menen pozitronlardıń derekleri de, tezletiwden keyingi olardıń ushırasıw ornı da tonneldiń ortasında onıń shetlerinen teńdey qashıqlıqta jaylasıwı kerek. Sonlıqtan birinshi gezekten ekinshi gezekke ótkende dúzilisti qayta islewdiń keregi bolmaydı. VLEPP tipindegi kollayderlerdiń artıqmashlıǵı kishi sinxrotronlıq nurlanıw bolıp tabıladı. Saqıyna tárizli elektronlıq-pozitronlıq kollayderlerde sinxrotronlıq nurlanıw energiyasınıń ósiwi menen tez ósedı. Sonlıqtan elektronlar menen pozitronlarınıń energiyası 100 GeV ten úlken bolǵan jaǵdayda saqıyna tárizli kollayderler ekonomikalıq jaqtan utımlı emes.

VEPP — SSSR Ilimler Akademiyasınıń Sibir bóliminiń Yadrolıq fizika institutındaǵı qarama-qarsı qozǵalatuǵın elektron-pozitronlı dástelerdiń saqıyna tárizli tezletkishi hám jiynaǵışı

(Novosibirsk akademqalası). VEPP-2M niń dásteleriniń hár qaysısınıń energiyası 0,7 GeV; VEPP-4 dúzilisinde bolsa 5,5 GeV ke shekem.

Giperzaryad — izotoplıq multipletti táriyipleytuǵın kvant sanı. Giperzaryad multipletke kiretuǵın bólekshelerdiń (e birliklerindegi) ekiletılgen elektr zaryadına teń. Bul anıqlama adronlardıń izotoplıq multipletleri ushın da elektr-ázzi teoriyanıń kalibrovkalıq teoriyasındaǵı leptonlardıń spirallıq hallarındaǵı izotoplıq multipletler ushın da durıs. Mısallar: izotoplıq dubletti payda etetuǵın proton menen neytronnıń giperzaryadı 1 ge; izosinglet bolıp tabılatuǵın oń spirallıq $e_{\bar{R}}$ elektronnıń giperzaryadı -2 ge teń.

Tereń-serpimli emes processler — Úlken E energiyası hám úlken impuls q dıń beriliwi menen júretuǵın leptonlardıń adronlar menen tásirlesiwı (qala berse $|E^2 - q^2| \gg 1 \text{ GeV}^2$). Bunday tásirlesiwlerde kóp sanlı adronlardıń tuwılıwı orın aladı. Tiykargı tereń-serpimli emes processler:

1) elektronlar menen myuonlardıń nuklonlardaǵı tereń-serpimli emes shashırawı (tereń-serpimli emes processler haqqında gáp etkende jiı tek usı shashıraw processlerin názerde tutadı);

2) soqlıǵısıwshı dástelerdegi elektronlar menen pozitronlardıń energiyaları joqarı bolǵanda e^-e^+ tiń adronlarǵa annigilyaciyası;

3) joqarı energiyalardaǵı adronlıq soqlıǵısıwlardaǵı úlken massaǵa iye bolǵan leptonlıq juplardıń (e^+e^- yamasa $\mu^+\mu^-$) tuwılıwı (yaǵnıy, juptıń inerciya orayı sistemasındaǵı úlken qosındı energiyaǵa iye).

Tereń-serpimli emes processlerge úlken kóldeneń impuls p_t ǵa iye tuwrı fotonlar tuwılatuǵın, sonıń menen birge úlken p_t menen adronlardıń aǵısı yamasa ayırım adronlar tuwılatuǵın adronlardıń soqlıǵısıwı usaydı. Bunday processler qattı processler dep ataladı.

1969-jılı Stenfordta (AQSh) orınlanǵan nuklonlardaǵı elektronlardıń tereń-serpimli emes shashırawın izertlew boyınsha birinshi tájiriybeler nuklonlardıń bir tekli jelege usamaytuǵınlıǵın, al noqatlıq qurawshılardı - konstituentlerge - qattı dánler túrine iye bolǵan bólekshelerge iye ekenligin kórsetti. Elektron olar menen soqlıǵısqanda óziniń dáslepki impulsın keskin túrde ózgetedi. Bul tájiriye qanday da bir mániste α -bóleksheleriniń atomlardaǵı shashırawı boyınsha ótkerilgen Rezerfordtıń tájiriybelerindegi atom yadrosınıń ashılıwına usaydı.

Noqatlıq konstituentlerdi Feynman partonlar dep atadı (ingliz tilindegi part — bólimi). Bunnan keyinirek ótkerilgen eksperimentler partonlardıń kvarklar ekenligin kórsetti. Tereń-serpimli emes processlerde kvarklar leptonlar menen kishi qashıqlıqlarda tásirlesedi hám asimptotalıq erkinliktiń orın alıwına baylanıslı kvarklar ózlerin derlik erkin bolǵan noqatlıq parton túrinde sezedi. Partonlıq model tájiriybelerde baqlanatuǵın tereń-serpimli emes shashırawdıń masshtablıq invariantlıǵı qásiyetin túsindiredi. (Bérken skeylingi, belgili amerikalı teoretiktıń atı boyınsha). Skeyling qubılısınıń ózi sıyaqlı, dálirek bolǵan eksperimentlerde baqlanǵan skeylingten úlken bolmaǵan awıtqıw da kvantlıq xromodinamikada túsindiriledi. Kvantlıq xromodinamika boyınsha tereń-serpimli emes processlerde parton-kvarklar menen bir qatarda parton-glyuonlardıń da kórinıwı kerek. Bul boljawlardıń durıs ekenligi eksperimentallıq maǵlıwmatlar tiykarında tastıyqlanadı. Bul maǵlıwmatlar boyınsha glyuonlıq partonlar tez adronnıń tolıq impulsiniń shama menen yarımın alıp júredi.

Glyubol (yamasa glyuoniy) — eki yamasa onnan da kóp valentli glyuonlardan turatuǵın hám valentli kvarklarǵa iye bolmaǵan reńsiz adronlıq (mezonlıq) sistema. Glyubollardıń bar ekenligi kvantlıq xromodinamika tárepinen boljanadı. Bul bólekshelerdi awır kvarkoniylerdiń ıdırawınıń ónimleriniń, solardıń ishinde J/ψ - hám Υ -mezonlardıń arasınan izlew kerek. 1981-jılı J/ψ -mezonnıń radiaciyalıq ıdırawlarında eki mezonlıq rezonans ashıldı: ι (yota) hám θ (teta). Yota-mezonnıń massası 1440 MeV, onıń spini nolge teń hám teris juplıqqa iye; teta-mezonnıń massası 1640 MeV, spini ekige teń hám juplıǵı oń. Geypara avtorlar usınday mezonlardı glyubollar dep boljaydı. Biraq bul ele (2021-jılǵa shekem) tastıyqlanǵan joq.

Glyuodinamika — kúshli tásirlesiwdiń ápiwayılastırılǵan kvantlıq-maydanlıq teoriyası.

Kvantlıq xromodinamikadağıday, bul teoriyada da bir biri menen tásirlesiwshi reńli glyuonlardıń oktetı orın aladı, biraq kvarklar joq. Xromodinamikanıń bazı bir aspektlerin jaqsıraq túsiniw ushın glyuodinamikanı úyrenedi.

Glyuonlıq kondensat — $F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a$ operatorınıń nolge teń bolmağan vakuumlıq ortashası. $F_{\mu\nu}^a$ - glyuonlıq maydannıń kernewligi. Usı perturbativlik emes vakuumlıq ortasha arqalı glyuonlıq vakuumnıń energiyasınıń tıǵızlıǵı ε ańlatıladı:

$$\varepsilon = -\frac{9}{32} \langle 0 | \frac{\alpha_s}{\pi} F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a | 0 \rangle \approx -\left(\frac{1}{4} \text{GeV}\right)^4.$$

ε nıń bul mánisi sharmoniy menen basqa mezonlarǵa tiyisli bolǵan eksperimentallıq maǵlıwmatlardı summawdıń kvantlıq-xromodinamikalıq qaǵıydası tiykarında teoriyalıq tallaw jolı menen anıqlandı. Glyuonlıq kondensat adronlardıń fizikalıq qásiyetlerin anıqlawda áhmiyetli orındı iyeleydi.

Glyuonlar — reńli zaryadlarǵa iye, spini 1 ge teń, massaǵa iye emes segiz elementar bólekshe. Segiz glyuon reńli oktetı payda etedi: olar bir birinen tek reńi boyınsha ayrıladı. Kvarklardıń glyuonlardı shıǵarıwı menen jutıwı kvarklardıń arasındaǵı kúshli tásirlesiwdiń tiykarında jatadı. Glyuonlar menen kvarklardıń tásir etisiwiniń teoriyası kvantlıq xromodinamika dep ataladı. Reńli zaryadqa iye bolǵanlıqtan, glyuonnıń óziniń reńin ózgerтип basqa glyuondı shıǵarıwı da, jutıwı da múmkin. Glyuonlardıń ózine tán bolǵan qásiyeti mınaday jaǵdayǵa alıp keledi: alıp beriletuǵın impulslerdiń ósiwı menen (qashıqlıqlardıń kishireyiwı menen) glyuonlar menen kvarklardıń effektivlik reńli zaryadları kishireyedi hám kúshli tásirlesiw hálsireydi (asimptotalıq erkinlik dep atalatuǵın erkinlik). Qashıqlıqlardıń úlkeyiwı menen effektivlik reńli tásirlesiw ósedi. Kvarklar menen glyuonlardıń konfaynmentiniń (ushıp shıqpawınıń tiykarında) usı jaǵdaydıń jatiwı múmkin.

"Glyuon" sózi ingliz tilindegi glue — jelim sózinen kelip shıqqan.

Gravitaciyalıq turaqlı (Nyutonnıń turaqlısı) G_N — gravitaciyalıq tartısıw kúshin táriyipleytuǵın konstanta. Bir birinen r qashıqlıǵında turǵan massaları m_1 menen m_2 bolǵan eki relyativistik emes bóleksheler $G_N m_1 m_2 k^{-2}$ kúshi menen tartıladı⁵⁰:

$$\begin{aligned} G_N &= 6,6720(41) \cdot 10^{-8} \text{ sm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sek}^{-2} = \\ &= 6,7065(41) \cdot 10^{-39} c^5 \hbar \text{ GeV}^{-2}. \end{aligned}$$

Gravitaciyalıq tolqınlar — ózgermeli tezleniw menen qozǵalatuǵın deneler tárepinen nurlandırılatuǵın, vakuumda jaqtılıqtıń tezligi menen tarqalatuǵın ózgermeli gravitaciyalıq maydanlar. Hár qıylı ellerdegi shama menen jigirma laboratoriyalarda jerden sırttaǵı derekler tárepinen nurlandırılıp atırǵan (mısalı, galaktikalardıń yadrolarınıń kollapsınıń nátiyjesinde) yamasa laboratoriyalarda generaciyalandırılǵan gravitaciyalıq tolqınlar detektorlaw ushın arnalǵan gravitaciyalıq antennalar islep shıǵılmaqta. Bul tájiriybeler unamalı nátiyjelerdi házirshe bergen joq, sebebi jetkiliksiz sezgirlikke iye.

Awdarıwshıdan: Házirgi waqıtları gravitaciyalıq tolqınlar dep ádettegi tolqınlarǵa usap tarqalatuǵın gravitaciyalıq maydannıń ózgeriwine aytadı. Qozǵalıwshı massalar tárepinen nurlandırıladı, biraq nurlandırılǵannan keyin olardan ajırılıp shıǵadı hám usı massalardan ǵárezsiz jasawın dawam etedi.

2016-jılı 11-fevral kúni LIGO hám VIRGO kollaboraciyaları tárepinen gravitaciyalıq tolqınlardıń eksperimentallıq ashılǵanlıǵı daǵazalandı. Amplitudası maksimumında 10^{-21} ge teń bolǵan eki qara qurdımnıń qosılıwınan kelgen signal 2015-jılı 14-sentyabr kúni UTC boyınsha saat 9:51 de LIGO nıń Xenfordtaǵı hám Livingstondaǵı eki detektorları tárepinen bir birinen 7 millisekundtan keyin baqlandı. Signaldıń forması ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyasınıń massaları Quyashtıń massasınan 36 hám 29 ese úlken bolǵan eki qara qurdımnıń qosılıwına sáykes keledi. Payda

⁵⁰ Bul jerde hám bunnan keyin sózliktiń tekstindegi qawsırmanıń ishindegi sanlar tiykarǵı sannıń sońǵı sanlardaǵı bir standart awısıwǵa sáykes keletuǵın anıqsızlıqtı kórsetedi: $6,6720(41) = 6,6720 \pm 0,0041$.

bolğan qara qurdımnıń massası Quyashtıń massasınan 62 ese úlken bolıwı kerek. Derekke shekemgi qashılıq shama menen 1,3 milliard jaqtılıq jılına teń. Sekundtıń onnan bir úlesine teń waqıttıń ishinde nurlandırılğan energiyanıń shaması 3 Quyashtıń massasınıń ekvivalentine teń.

Gravitaciya (latin tilindegi gravitas — salmaq) — eki bólekshe arasındaǵı universallıq tartısıw, pútkil dúnyalıq tartılıs. Gravitaciyalıq tartılıs bólekshelerdiń massalarına proporcional emes (mekteplerde usılay oqıtadı), al olardıń tolıq energiyası menen impulsinen ǵárezli. Misalı, uzaqtaǵı juldızdan kiyatırǵan jaqtılıq yamasa radiotolqınlar fotonnıń massası nolge teń bolsa da, Quyashtıń gravitaciyalıq maydanında tarqalıw baǵıtın ózgerterdi. Eki relyativistlik bóleksheniń gravitaciyalıq tásirlesiwı massalar orayı sistemasında olardıń energiyasınıń kvadrati túrinde ósiwı kerek. Gravitaciyalıq tásirlesiw kúshli bolatuǵın energiya ushın tán shama Plank massasına teń:

$$m_P = (\hbar c / G_N)^{1/2} \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-5} g.$$

Belgili elementar bólekshelerdiń massaları hám tezletkishlerde alınatuǵın energiyalardıń muǵdarı m_P ǵa salıstırǵanda júdá kishi bolǵanlıqtan házirgi zaman joqarı energiyalar fizikasındaǵı gravitaciyalıq tásirlesiwdiń tutqan ornı esapqa almastay dárejede kishi. Biraq fundamentallıq teoriyalıq fizikada, elementar bóleksheler fizikasında gravitaciya áhmiyetli, múmkin túyinlik orındı iyeleydi. Gravitaciyaǵa hám onıń basqa tásirlesiwler menen baylanısına baǵışlangan jumislardıń sanı jıldan jılǵa ósip atır.

Gravitaciyanıń klassikalıq (kvantlıq emes) teoriyası - ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyası bir qatar sanlı baqlawlarda tastıyqlanǵan jaqsı islep shıǵılǵan teoriya bolıp tabıladı. Ulıwmalıq salıstırmalıq teoriyası házirgi zaman kosmologiyasınıń tiykırı bolıp tabıladı. Gravitaciyanıń kvantlıq teoriyası házirshe dóretilgen joq. Kvantlıq gravitaciyanı dóretilwdegi hár qıylı usıllardıń ishinde supergravitaciyanıń teoriyalıq modelleri ayrıqsha perspektivalı bolıp esaplanadı.

Graviton — gravitaciyalıq maydannıń kvantı, spini 2 ge teń massaǵa iye emes neytral bólekshe. Gravitaciyalıq tásirlesiwdiń júdá ázzi bolǵanlıǵı sebepli gravitonlardı baqlaw házirgi zaman eksperimentallıq fizikasınıń múmkinshiliklerine kirmeytuǵın másele bolıp tabıladı.

Gruppa — kompoziciyanıń binarlıq operaciyası "." menen támiyinlengen (kóbeytiw dep jiyy aytilatuǵın) hám tómendegidey aksiomalardı qanaatlandıratuǵın

1. $g \cdot e = e \cdot g = g$ teńligin qanaatlandıratuǵın birlik e elementi bolatuǵın;
2. Hár bir g elementi ushın $g^{-1} \cdot g = g \cdot g^{-1} = e$ shártin qanaatlandıratuǵın kerı g^{-1} elementi bar;
3. Úsh elementiniń kóbeymesi asociativlik shárti bolǵan

$$g_1 \cdot (g_2 \cdot g_3) = (g_1 \cdot g_2) \cdot g_3$$

g_1, g_2, g_3 elementleriniń kópligi G ǵa aytadı.

Eger barlıq elementler kommutaciyanatuǵın bolsa $g_i \cdot g_k = g_k \cdot g_i$, onda gruppanı kommutativlik yamasa abellik dep ataladı. Kommutaciyanbaytuǵın jaǵdayda gruppanı abellik emes dep ataymız.

G gruppasınıń H podgruppası dep usı G gruppanıń elementleriniń kópliginiń 1-3 shártlerdi qanaatlandıratuǵın kishi bólimine aytadı. Eger gruppanıń qálegen elementi $h \in H$ hám $h \in G$ ushın $g^{-1}hg \in G$ shárti orınlanatuǵın bolsa, onda podgruppanı invariant dep ataydı. G gruppasınıń ápiwayı podgruppaları dep e menen G nıń ózin ataydı.

G gruppasınıń sızıqlı kórinisi dep usı G gruppanıń elementleri bazı bir sızıqlı keńisliktegi sızıqlı túrlendiriwler (matricalar) bolıp tabılatuǵın gruppadaǵı kórsetiliwine aytadı. Bul sızıqlı túrlendiriwlerdiń G gruppasınıń elementleri menen bir mánisli sáykeslikte bolıwı kerek.

Fizikada hár qıylı simmetriyalarǵa juwap beretuǵın túrlendiriwler gruppaları áhmiyetli orındı iyeleydi (yamasa qısqa túrde simmetriya gruppaları dep aytadı). Olardıń ishinde Li gruppaları ayrıqsha kórinip turadı.

Li gruppaları — elementleri úzliksiz parametrlerden analitikalıq ǵárezli bolǵan úzliksiz túrlendiriw gruppaları. Norvegiyalı matematik Sofus Lidiń (Lie, 1842—1899) atı menen atalǵan. Li gruppalarına dara jaǵdayda Puankare gruppası da (tórt ólshemli keńisliktiń tórt ólshemli jıljıwları

menen burıwları gruppası), kúshli hám elektr-ázzi tásirlesiwler teoriyasında hám ullı birlesiw modellerinde áhmiyetli orındı iyeleytuǵın unitarlıq abellik gruppa $U(1)$ jáne unitarlıq unimodullıq abellik emes $SU(n)$, $n \geq 2$ gruppası da kiredi.

Eger gruppanıń parametrleri keńisliklik-waqıtlıq koordinatalardan ǵárezsiz bolsa, onda gruppa hám sáykes simmetriya globalıq dep ataladı, al, eger ǵárezli bolatuǵın jaǵdayda gruppa hám oǵan sáykes simmetriyanı lokalıq, kalibrovkalıq dep ataydı.

Eger Li gruppası trivialıq emes invariant podgruppalarǵa bolmasa (diskret bolǵan podgruppalarǵa esapqa almaǵanda), onda onı ápiwayı dep ataydı. Eger Li gruppası trivialıq emes invariant abellik podgruppalarǵa iye bolmasa, onda onı yarım ápiwayı dep ataydı.

Li gruppasınıń elementi ǵárezli bolǵan ǵárezsiz parametrlerdiń sanı gruppanıń ólshemi dep ataladı (ingliz tilindegi dimension). Eger gruppalıq kóp túrliligi kompaktlı bolsa, onda Li gruppasınıń kompaktlı dep esaplaydı.

G gruppasınıń usı gruppanıń elementleri menen bir mánisli sáykesliktegi matricalar gruppasındaǵı sáwlesi G gruppasınıń matricalıq kórsetiliwi dep ataladı. Li gruppası bolǵanda birlik $G = 1 + d\omega_i$ túrlendiriliwine qanshama bolsa da jaqın bolǵan túrlendiriwlerdi júzege keltiretuǵın matricalar ayırıp alıńǵan orındı iyeleydi. Bul ańlatpada $d\omega_i$ arqalı túrlendiriwdiń sheksiz kishi parametrleri belgilengen, l_i berilgen kórsetiwdiń generatorları dep atalatuǵın shama. Sızıqlı ǵárezsiz generatorlardıń sanı gruppanıń ólshemlerine iye. Bir biri menen kommutaciyanatuǵın sızıqlı generatorlardıń maksimalıq sanın gruppanıń rang dep ataydı (ingliz tilinde rank).

Matricalar tásir etetuǵın sızıqlı keńisliktegi sızıqlı ǵárezsiz vektorlardıń sanı kórinistiń ólshemi dep ataladı (ishki simmetriya bolǵan jaǵdayda kórinistiń ólshemi - sáykes multiplettegi bólekshelerdiń sanı).

Fundamentallıq dep eń ápiwayı kórinislerge aytadı. Bul kórinislerden kóbeytiwdiń járdeminde gruppanıń barlıq kórinislerin dúziwge boladı ($SU(n)$ gruppasında bul n -qurawshıǵa iye spinorlar bolıp tabıladı). Qosılǵan (ingliz tilinde adjoint) kórinistiń ólshemi gruppanıń ólshemine teń.

Kartannıń klassifikaciyasına sáykes barlıq kompaktlı ápiwayı Li gruppaları gruppalarǵıń tórt regulyarlıq seriyalarına bólinedi: $SU(l+1)$, $SO(2l+1)$, $Sp(2l)$, $SO(2l)$. Olar A_l , B_l , C_l , D_l algebralarına sáykes keledi. Olardıń rangları bolǵan l shaması iqtıyarlı túrde úlken bola aladı: $l = 1, 2, \dots$, hám bes ayrıqsha gruppalar: G_2 , F_4 , E_6 , E_7 , E_8 (indeks gruppanıń rangın kórsetedi)

Biz M arqalı belgilegen $n \times n$ matricalarınıń tiykarǵı gruppaların bilayınsha dizimge alamız (kompaktlıq, ápiwayı yamasa yarım ápiwayı bolıwı shárt emes, d arqalı gruppanıń ólshemin belgileymiz):

$GL(n, C)$ — ulıwmalıq (G), sızıqlı (L) kompleksli (C) regulyarlı matricalarǵıń ($\det M \neq 0$) gruppası, $d = 2n^2$.

$SL(n, C)$ — arnawlı (S : $\det M = 1$) sızıqlı gruppa, $GL(n, C)$ nıń podgruppası, $d = 2(n^2 - 1)$.

$GL(n, R)$ — zatlıq (R , ingliz tilindegi real) regulyarlı matricalarǵıń ulıwmalıq sızıqlı gruppası, $d = n^2$.

$SL(n, R)$ — zatlıq matricalarǵıń sızıqlı gruppası, $GL(n, R)$ gruppasınıń podgruppası, $d = n^2 - 1$.

$U(n)$ — unitar (U : $MM^+ = M^+M = 1$, bul jaǵdayda M^+ shaması M niń ermitlik túyinlesi) matricalarǵıń unitarlıq gruppası, $d = n^2$.

$SU(n)$ — arnawlı unitarlıq gruppa, $U(n)$ gruppasınıń podgruppası, $d = n^2 - 1$.

$O(n, C)$ — kompleksli ortogonallıq ($M\tilde{M} = 1$, M ushın transponirlengen \tilde{M} arqalı belgilengen) matricalarǵıń ortogonallıq (O) gruppası, $d = n(n-1)$.

$O(n) = O(n, R)$ — zatlıq ortogonallıq matricalarǵıń ortogonallıq gruppası, $d = n(n-1)/2$.

$SO(n)$ — arnawlı ortogonallıq gruppa yamasa n -ólshemli keńisliktegi aylandırıwlar gruppası, $O(n)$ niń podgruppası, $d = n(n-1)/2$.

$Sp(n)$ — $n \times n$ unitar matricalarınıń simplektikalıq (Sp) gruppası, bul jaǵdayda n sanı $\tilde{M}JM =$

J shártin qanaatlandıratuǵın jup san, J arqalı singulyarlıq emes antisimmetriyalıq matrica belgilengen.

$U(m, n - m) - MgM^+ = g$ shártin qanaatlandıratuǵın psevdounitarlıq matrica, bul teńlikte g arqalı $1 \leq k \leq m$ teńsizlikleri orınlanganda $g_{kk} = 1$, $m + 1 \leq k \leq n$ shárti orınlanganda $g_{kk} = 1$ teńliklerin orınlı bolatuǵın diagonallıq matrica belgilengen. $d = n^2$.

$O(n, n - m) - MgM = g$ shártin qanaatlandıratuǵın zatlıq matricalarǵıń psevdootogonallıq gruppası; $d = n(n - 1)/2$.

Qos β -ıdıraw — Yadronıń zaryadı eki birlikke ózgeretuǵın hám eki elektron (yamasa eki pozitron) shıǵarılatuǵın atom yadrosınıń β -ıdırawı. Principinde qos β -ıdırawdıń eki tipiniń bolıwı múmkin: eki neytrinoliq $2\beta(2\nu)$ hám neytrinosız $2\beta(0\nu)$. β -ıdırawdıń eki túriniń birewi de házirshe isenimli túrde baqlanbadı.

Awdarıwshıdan: qos beta-ıdıraw radioaktiv ıdıraw processleriniń ishindegi eń siyrek ushırasatuǵını bolıp tabıladı. Bul process isenimli túrde baqlanǵan 14 nuklidtiń barlıǵında yarım ıdıraw waqıtı $7 \cdot 10^8$ jıldan úlken, al ^{128}Te nuklidinde bolsa yarım ıdıraw waqıtı $(3,5 \pm 2,0) \cdot 10^{24}$ jıl. Bul shama barlıq radioaktivli nuklidlerdiń ishindegi absolyut rekord bolıp esaplanadı.

DEZI (DESY — Deutsches Elektronen-Synchrotron) — Gamburg (Germaniya) qalasına jaqın jaylasqan laboratoriyanıń hám onda isleytuǵın tezletkishtiń ("Nemis elektronlı tezletkishi") ataması. 1964-jılı iske túsken, elektronlardıń maksimalıq energiyası 7,5 GeV. DEZI tezletkishiniń bazasında DORIS (DORIS) bir birine qarma-qarsı baǵıtta qozǵalatuǵın elektron-pozitronlıq dásteler isleydi. 1978-jılǵı báhárden baslap hár bir dásteniń energiyası 5 GeV ke, al 1982-jıldır jazınan baslap 5,4 GeV ke shekem kóterildi. Bunday energiyalarda ipsiloniydiń qáddileriniń rezonanslıq tuwılıwı baqlandı. Sonıń menen birge, DEZI laboratoriyasında bir birine qarama-qarsı qozǵalatuǵın dástelerge iye PETRA (PETRA) tezletkishi isleydi hám elektronlarınıń energiyası 30 GeV, protonlarınıń energiyası 800 GeV, saqıynasınıń uzınlıǵı 7 km, bolǵan GERA (HERA) elektronlıq-protonlıq kollarıderi qurılmaqta. GERA (HERA) kollarıderiniń 1990-jılı iske túsiwi názerde tutilǵan.

Awdarıwshıdan: GERA (HERA) kollarıderiniń jumısı 1992-jılı baslandı. Onıń saqıyna tárizli tonneli jerdiń astında 15-30 m tereńlikte jaylasqan hám uzınlıǵı 6,3 km ge teń. Kollarıderde massalar orayı sistemasındaǵı energiyası 314 GeV ke teń elektronlardıń yamasa pozitronlardıń protonlar menen soqlıǵısıwı baqlandı. Ol birinshi hám házirgi waqıtlarǵa shekemgi birden-bir lepton-protonlıq kollarıder bolıp qalmaqta.

HERA óziniń programmasın tabıslı túrde juwmaqladı hám 2007-jılı 30-iyun kúni jumıs islewin toqtattı.

Diagonallıq — bul termin oǵan sáykes keletuǵın ańlatpanıń bazı bir matricanıń bas diagonalında turǵanlıǵın ańǵartadı. Diagonallıq fermionlıq toqlardı qaraǵanda baǵanasına ψ_m operatorları, qatarlarǵa $\bar{\psi}_n$ operatorları, al hár bir kletkaǵa $\bar{\psi}_n \psi_m$ tipindegi j_{nm} toǵı juwap beretuǵın matrica haqqında gáp etiledi. Diagonallıq toq dep $n = m$ shárti orınlanatuǵın hám soǵan sáykes bóleksheni ózine ótkeretuǵın toqqa aytadı. Eki toqtıń diagonallıq tásirlesiwinde soǵan usaǵan $j_m^+ j_n$ matricasındaǵı $m = n$ kletkası haqqında gáp etiledi. Diagonallıq toqlar hám tásirlesiwler olarǵa qatnasatuǵın fundamentallıq bólekshelerdiń aromatların ózgertpeydi.

Feynman diagrammaları — bólekshelerdiń óz-ara tásirlesiwlerin grafikalıq súwretleytuǵın diagrammalar. Maydanlıq uyıtuqlardıń (bólekshelerdiń) tarqalıwın súwretleytuǵın sızıqlar menen olardıń lokallıq tásirlesiwiniń súwretleytuǵın tóbeler Feynman diagrammalarınıń (grafikleriniń) tiykarǵı elementleri bolıp tabıladı. Solay etip, qashıqlıqtaǵı tásirlesiwdiń quramalı processleri elementar lokallıq tásirlesiwge alıp kelinedi. Ádette, fermionlardıń tarqalıwına tuwrı sızıqtı, al bozonlardıń tarqalıwına tolqın tárizli sızıqtı paydalanadı. Eger processte bólekshelerdiń bir neshe sortları qatnasatuǵın bolsa, onda olardı bir birinen ayırıw ushın shtrixlangan, punktir, jarǵı tárizli, qos h.t.b. sızıqlardı paydalanadı. Feynman diagrammaları processlerdiń relyativistlik-invariant táriyiplemesini beredi. Usıǵan sáykes 4-impuls tek bólekshelerdiń tarqalıwında ǵana

emes, al tóbelerde de saqlanadı.

Feynman diagrammaları relyativistlik-invariant bolǵan uyıttıqlar teoriyasınıń tiykarında jatadı. Esaplawlarda hár bir ishki sıziqqa bólekshelerdiń propagatorı, hár bir tóbege tásirlesiwdiń lagranjianınıń sáykes aǵzası sáykes keledi. Kırıqtı payda etetuǵın bólekshelerdiń 4-impulsi boyınsha integrallaw esaplanadı. Solay etip, Feynman diagrammaları hár qıylı processlerdiń amplitudaların esaplawdıń algoritmlerin beredi.

Biz joqarıda kvantlangan maydanniń túsiniqleriniń bóleksheler túsiniǵine qaraǵanda salıstırmas dárejede bay ekenligin bir neshe ret atap ótken edik. Bul jaǵday dara jaǵdayda, Feynman, Mandelshtamm, Faddeev hám Popovlardıń ańǵarǵanıday, spini birge teń yamasa birden úlken bolǵan maydanlar ushın ulıwma aytqanda bólekshelerdiń propagatorları menen bir qatarda "ruwhlar" dep atalatuǵın propagatorlardı da esapqa alıw kerek bolǵanda kórinedi.

Dionlar — magnit zaryadlarına da, elektr zaryadlarına iye bolǵan gipotezalıq bóleksheler. Basqa sózler menen aytqanda elektr zaryadına iye magnit monopollerı bolıp tabıladı. Dionlar abellik bolmaǵan kalibrovkalıq teoriyalardıń arnawlı topologiyalıq ápiwayı bolmaǵan sheshimlerine sáykes keledi.

Zaryadlıq juplıq (C-juplıq) — haqıyqıy neytral bólekshelerdi yamasa bóleksheler sistemasın táriyipleytuǵın kvant sanı. Eger zaryadlıq túyinleslikte bólekshelerdiń tolqın funkciyası belgisin ózǵertpe, onda sol tolqın funkciyasınıń zaryadlıq juplıǵı oń ($C = +1$), al, eger ózǵertetuǵın bolsa, onda teris ($C = -1$). Pozitroniydiń (e^+e^-) qáddileriniń zaryadlıq juplıǵı L orbitalıq momentten hám elektron menen pozitronnıń qosındı spini S ten ǵárezli: $C = (-1)^{L+S}$. Tap usınday jaǵday kvarkoniydiń (kvark + antikvark sistemaları) qáddileri ushın da durıs. Fotonnıń, ρ^0 , ω , ϕ , J/ψ , Υ -mezonlardıń zaryadlıq juplıǵı teris. π^0 , η , η' -mezonlardıń zaryadlıq juplıǵı oń. Kúshli hám elektromagnit tásirlesiwlerde zaryadlıq juplıq saqlanadı. Ázzi tásirlesiwler zaryadlıq juplıqtıń saqlanıwın buzadı.

Zaryadlıq túyinleslik — bólekshelerdi antibóleksheleri menen almasıw operaciyası. Zaryadlıq túyinleslikte haqıyqıy neytral bóleksheler ózine ótedi.

Zaryadlangan toqlar — leptonlar menen kvarklardıń aralıqlıq zaryadlangan W^\pm - bozonlar menen tásir etisiwin anıqlaytuǵın ázzi toqlar. W^\pm - bozonlar tárepinen júzege keltiriletuǵın zaryadlangan toqlardıń arasındaqı tásirlesiwler belgili bolǵan barlıq ázzi idırawlardıń hám neytrinonıń tásirinde júretuǵın tolıq bir qatar reaksiyalardıń sebebi bolıp tabıladı. Belgili bolǵan barlıq leptonlıq hám kvarklıq zaryadlangan toqlar $\bar{a}O_\alpha b$ túrine iye boladı. Bul jerde \bar{a} arqalı a bólekshesiniń tuwılıw operatorı (hám \tilde{a} bólekshesin joq etiw operatorı), al b arqalı b bólekshesin joq etiw operatorı (\tilde{b} -bólekshesiniń tuwılıwı) belgilengen; $O_\alpha = \gamma_\alpha(1 + \gamma_5)$. Bul ańlatpada γ_α - Diraktıń tórt matricası ($\alpha = 0, 1, 2, 3$), $\gamma_5 = i\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$.

$\bar{a}\gamma_\alpha b$ shaması Lorenclik vektorday, al $\bar{a}\gamma_\alpha\gamma_5 b$ shaması bolsa Lorenclik aksiallıq vektorday bolıp túrlenedi. Tolıq zaryadlangan toq leptonlıq hám kvarklıq toqlardıń qosındısan turadı. Leptonlıq zaryadlangan toq úsh aǵzadan turatuǵın qosındı bolıp tabıladı: $\tilde{\nu}_e O_\alpha e + \tilde{\nu}_\mu O_\alpha \mu + \tilde{\nu}_\tau O_\alpha \tau$. Kvarklıq zaryadlangan toq házirshe belgili emes. Altı kvark bar dep boljap, kvarklıq toqtı úsh qosılıwshınıń qosındısı túrinde jazadı:

$$\bar{u}O_\alpha d' + \bar{c}O_\alpha s' + \bar{t}O_\alpha b'.$$

Bul ańlatpada hár bir qosılıwshıda reń boyınsha summaw túsiniledi. Mısalı:

$$\bar{u}O_\alpha d' = \bar{u}_1 O_\alpha d'_1 + \bar{u}_2 O_\alpha d'_2 + \bar{u}_3 O_\alpha d'_3.$$

Bul jaǵdayda 1, 2, 3 - úsh reńli indeks. "Tónkerilgen" d' -, s' -, b' -kvarklar Kobayashi-Maskawa matricası dep atalatuǵın

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & s_1 c_3 & s_1 s_3 \\ -s_1 c_2 & c_1 c_2 c_3 - e^{i\delta} s_2 s_3 & c_1 c_2 s_3 + e^{i\delta} s_2 c_3 \\ s_1 s_2 & c_1 s_2 c_3 - e^{i\delta} c_2 s_3 & -c_1 s_2 s_3 + e^{i\delta} c_2 c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

d -, s -, b -kvarklarınıń sıziqlı kombinaciyaları bolıp tabıladı. Bul jerde $s_1 = \sin \theta_1$, $c_1 = \cos \theta_1$, $s_2 = \sin \theta_2$, $c_2 = \cos \theta_2$, $s_3 = \sin \theta_3$, $c_3 = \cos \theta_3$ belgilewleri paydalanılǵan. θ_1 , θ_2 , θ_3

hám δ parametrlerinen házirshé tek θ_1 belgili.

IAE — I.V.Kurshatov atındaǵı Atom energiyası institutı (Moskva).

Qara deneniń nurlanıwı — qara dene tárepinen shıǵarılǵan fotonlar. Qara dene dep oǵan túsken barlıq fotonlardı jutatuǵın denegé aytadı. Óz gezeginde, qara deneniń ózi de fotonlardı nurlandıradı. Bunday nurlanıwdaǵı intensivlik hám nurlanıwdıń ózine tán jıyılıǵı qara deneniń temperaturası T dan ǵárezli.

Qara dene menen jıllılıq teń salmaqlıǵında turǵan foton gaziniń energiyasınıń tıǵızlıǵı $\rho = 4\sigma T^4$ ke teń, bul teńlikte $\sigma = \pi^2/60$ - Stefan-Bolcman konstantası. Biz bul jerde $\hbar, c = 1$ birliklerinen paydalanamız hám Bolcman konstantası k nı 1 ge teń dep boljaymız. Bunday birliklerde energiyanıń (hám jıyılıqtıń) ólshemi T ǵa teń, al kólemniń ólshemi T^{-3} ke teń. Sonlıqtan joqarıda keltirilgen T^4 ǵárezligi ólshemlik pikirlerdiń tiykarında tikkeley alınadı. Qara deneniń betiniń bir birliginen shıǵarılatuǵın energiyanıń aǵısı $j = \sigma T^4$ ke teń.

Qara deneniń nurlanıwınıń spektrallıq tıǵızlıǵı $d\rho(\omega)$ Plank formulasınıń járdeminde beriledi:

$$d\rho(\omega) = \frac{\omega^3 d\omega}{\pi^2 (e^{\omega/T} - 1)} = \frac{T^4 x^3 dx}{\pi^2 e^x - 1}.$$

Bul ańlatpada ω - nurlanıwdıń jıyılıǵı, $x = \omega/T$. Bul ańlatpanı x boyınsha 0 den ∞ ke shekem integrallaw

$$\rho = \frac{\pi^2}{15} T^4 = 4\sigma T^4$$

formulasın beredi.

Instanton — perturbativlik qubılıslar dep atalatuǵın qubılıslardıń, yaǵnıy uyıtqıw teoriyasınıń járdeminde táriyiplenbeytuǵın qubılıslardıń glyuonlıq maydanniń vakuumlıq fluktuaciýalarınıń ayırıqsha tipi. Glyuonlar menen kvarklardıń konfaynmentiniń mexanizminde áhmiyetli orındı iyeleytuǵın bolsa kerek.

Minkovskiy keńisliginde instantonlar kalibrovkalıq maydanlardıń vakuuminıń topologiyalıq hár qıylı halları arasındadı barer astındadı ótiwlerdiń kvaziklassikalıq teoriýaların táriyipleydi.

Instantonlardı Minkovskiy keńisliginde emes, al tórt ólshemli evklid keńisliginde (jormal waqıt bolǵan) interpretaciýalaǵan kórgizbelirek. Bul jerde instantonlar shekli háreketke iye bolǵan Yang-Millstiń klassikalıq teńlemeleriniń sheshimleri bolıp tabıladı.

Instantonlıq sheshimler 1975-jılı Belavin, Polyakov, Shvrac hám Tyupkinler tárepinen ashıldı. Evklid keńisligindegi $SU(2)$ lokallıq gruppası ushın koordinata basındadı instintonnıń kalibrovkalıq maydanı mınaday túrge iye:

$$A_\mu^a(x) = -\frac{2}{g} \frac{\eta_{a\mu\nu} x_\nu}{x^2 + \rho^2}.$$

Bul ańlatpada a - izovektorlıq indeks: $a = 1, 2, 3$; μ, ν — evklid koordinatalarınıń indeksleri: $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$; g — kalibrovkalıq tásirlesiwdiń juwırıwshı konstantası (invariant zaryad). ρ masshtablıq parametri instantonnıń ólshemin anıqlaydı. Ólshem birligine iye bolmaǵan $\eta_{a\mu\nu}$ shaması Xooft simvolı dep ataladı (ol "instaton" terminin kirgizgen edi):

$$\eta_{a00} = 0, \eta_{a0i} = -\eta_{ai0} = \delta_{ai}, \eta_{aij} = \varepsilon_{aij}.$$

Bul teńliklerde ε_{aij} arqalı tolıǵı menen antisimmetriyalı tenzor belgilengen ($a, i, j = 1, 2, 3$). Antiinstantonlıq sheshim dep atalatuǵın sheshimi instantonlıq sheshimnen $\eta_{aij} = \bar{\eta}_{aij}$ almasıwınıń járdeminde alınadı. Bul jerde

$$\bar{\eta}_{a00} = 0, \bar{\eta}_{a0i} = -\bar{\eta}_{ai0} = -\delta_{ai}, \bar{\eta}_{aij} = \varepsilon_{aij}.$$

Kalibrovkalıq maydanniń kernewliginiń instantonlıq tenzorı mınaday túrge iye boladı:

$$F_{\mu\nu}^a(x) = -\frac{4}{g} \frac{\rho^2 \eta_{a\mu\nu}}{[x^2 + \rho^2]^2}.$$

Al sáykes evklidlik háreket

$$S^{(E)} = \frac{1}{4} \int F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a d^4x = \frac{8\pi^2}{g^2}$$

shamasına teń.

Instantonlardıń fizikalıq processlerdiń amplitudasına qosatuǵın úlesi $e^{-S^{(E)}}$ shamasına proporcional hám kishi ólshemlerge iye bolǵan instantonlar júdá kishi (berilgen ρ daǵı $g^2(\rho)/4\pi$ shamasınıń kishi bolıwı sebepli konfaynementtiń radiusınan kóp kishi). Al úlken ólshemlerge iye instantonlarǵa kelsek, onda olar ushın úlken kvantlıq dúzetiwlerdiń sebebinen kvaziklassikalıq jaqınlasıwdı paydalanıwǵa bolmay qaladı. "Kishi instantonlardıń siyrekletilgen gazı" jaqınlasıwındaǵı esaplawlardı ótkergende sáykes formulalar (fizikada bunday jaǵdaylar jiyi ushırasadı) olardı paydalanıw múmkin bolǵan sheklerden alısta juwıq túrde durıs bolıp shıǵadı.

ITF — L.D.Landau atındaǵı Teoriyalıq fizika institutı (Shernogolovka).

ITEF — Teoriyalıq hám eksperimentallıq fizika institutı (Moskva).

IFVE — Joqarı energiyaları fizikası institutı (Serpukhov, Protvino). IFVE da energiyası 76 GeV bolǵan protonlıq tezletkish isleydi (saqıynasınıń perimetri 1,5 km), hám hár bir dástedegi bólekshelerdiń energiyası 3 TeV bolǵan protonlar menen antiprotonlardıń qarama-qarsı baǵıtta tarqalatuǵın tezletkishtiń qurılısınıń baslanıwı názerde tutilǵan (saqıynasınıń perimetri 20,7 km).

IYal — Yadrolıq izertlewler institutı (Moskva). IYal diń quramına Baksan neytrinolıq observatoriyası hám Moskvanıń qasındaǵı Troick qalasında salınıp atırǵan energiyası 400 MeV bolǵan joqarı dálilikke iye sızıqlı protonlıq tezletkish kiredi.

Kalibrovkalıq simmetriya — lagranjiannıń parametrleri keńisliklik-waqıtlıq koordinatalardan ǵárezli bolǵan qanday da bir úzliksiz túrlendiriw gruppasına qarata invariantlıǵı (Li gruppaları).

Buzılmaǵan kalibrovkalıq simmetriyalardıń parametrleri fotonlardıń zaryadlanǵan bóleksheler menen tásirlesiwiniń táriyipleytuǵın $U(1)_{em}$ Abel gruppası hám glyuonlardıń bir biri jáne kvarklar menen reńli tásirlesiwini (c indeksi ingliz tilindegi colour sózinen) táriyipleytuǵın Abellik emes $SU(1)_c$ gruppası.

Spontan túrde buzılmaǵan kalibrovkalıq simmetriyalardıń parametrleri elektr-ázzi tásirlesiwiniń standart modelindegi $SU(2)_W \times U_Y$ gruppası (W indeksi ingliz tilindegi weak sózi ázzi spinge, al Y indeksi ázzi giperzaryadqa juwap beredi) hám ullı birlesiw modelleriniń gruppaları [$SU(5)$, $SO(10)$ h.t.b.] bolıp tabıladı.

Kalibrovkalıq simmetriyanı ápiwayı emes júzege keltiriw massaǵa iye bolmaǵan kalibrovkalıq vektorlıq maydanlardıń bar bolıwın talap etedi (fotonlardıń, glyuonlardıń, W- hám Z-bozonlardıń, X- hám Y-bozonlardıń bar bolıwın). Kalibrovkalıq simmetriyanıń spontan buzılıwınıń aqıbetinde olardıń geyparaları massaǵa iye boladı.

"Kalibrovkalıq invariantlıq" terminini (nemis tilinde Eichinoarianz) Veyl tárepinen 1919-jılı kirgizildi hám ol bul termindi masshtablıq invariantlıq mánisinde paydalandı (ol birden bir elektr-gravitaciyalıq maydannıń teoriyasın dúziwge sátsiz túrde urındı). Keyinirek, kvantlıq mexanika dóretilgennen keyin, kalibrovkalıq túrlendiriw dep zaryadlanǵan bólekshelerdiń tolqın funkciyasınıń fazasınıń

$$\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{ie\alpha(x)}$$

hám

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \alpha$$

elektromagnit potencialdıń bir waqıttaǵı túrlendiriliwi atala basladı (V. A. Fok, 1927-jıl; Veyl, 1929-jıl). Rus ilimiy ádebiyatında kalibrovkalıq túrlendiriwlerdi jiyi gradientlik dep atadı, biraq sońǵı jılları bul termin siyrek ushırasatuǵın boldı. Ingliz tilindegi ilimiy ádebiyatta kalibrovkalıq túrlendiriwlerdi belgilew ushın gauge transformation hám gauge invariance terminleri paydalanıladı.

Kvant (nemis tilinde Quant, latin tilinde quantum — neshe) hár qıylı bolǵan bir neshe mániske iye:

Maydanniń kvantı — berilgen maydanniń elementar qoziwı bolǵan bólekshe; mısalı, foton — jaqtılıq kvantı (γ -kvant) — elektromagnit maydanniń qoziwı, elektronlar hám pozitronlar — elektronlıq-pozitronlıq maydanniń kvantları.

Energiyanıń kvantı — sistemaniń (mısalı, atomnıń) bir energiyalıq qáddiden ekinshi qáddige ótkende qanday da bir bólekshe tárepinen alıp ketiletuǵın energiyaniń porciyası (energiyanıń kvantı haqqında gáp etilgende kóbinese fotonlardı názerde tutadı).

Háreket kvantı — universallıq dúnyalıq turaqlı $1,0545887(57) \cdot 10^{-27}$ erg·sek, kvantlıq mexanikada fundamentallıq orındı iyeleytuǵın Plank turaqlısı.

Kvantlıq mexanika — óziniń ishine elementar bólekshelerdi, atomlardı, molekulalardı, kóp atomlı sistemalardı alatuǵın kóp sanlı qubılıslardı táriyipleytuǵın fundamentallıq fizikalıq teoriya. Olar ushın hárekettiń ózine tán shaması $S_{tán}$ hárekettiń kvantı \hbar tıń shaması menen barabar. $S_{tán} \gg \hbar$ teńsizligi orınlı bolǵan processlerdi kvaziklassikalıq processler dep ataydı. Eger \hbar shamasın tolıq esapqa almawǵa bolatuǵın bolsa, onda klassikalıq mexanika húkim súredi.

Kvantlıq-mexanikalıq sistemalar tolqınlıq qásiyetlerge de, korpuskulalıq qásiyetlerge de iye. Kvantlıq mexanikaǵa sáykes, bir qatar sorawlarǵa principinde tek olardıń itimallıǵı boyınsha juwap beriwge boladı. Mısalı, eki bóleksheniń soqlıǵısıwınıń kese-kesimi yamasa stabillı bolmaǵan bólekshelerdiń jasaw waqıtı iye boladı.

Kvantlıq mexanikada kvantlıq-mexanikalıq sistemaniń halı túsiniǵı fundamentallıq orındı iyeleydi. Taza hal dep atalatuǵın hal hallardıń gilbert keńisligindegi vektor menen, al aralas hal hallar keńisliginde tıǵızlıqtıń matricası menen táriyiplenedi.

Baqlanatuǵın fizikalıq shamalarǵa (energiyaǵa, impulske, múyeshlik momentke, koordinataǵa, zaryadqa, ...) operatorlar juwap beredi.

Kvantlıq-mexanikalıq hallar bir jaǵınan Rey Bredberidiń marsta jasawshılarına usaydı: hár bir operator olardıń hár qaysısında ózinikin kóredi. Eger hal berilgen operatordıń menshikli halı bolsa, onda bul halda sáykes fizikalıq shama belgili bolǵan menshikli mánisine iye boladı (belgili bolǵan kvant sanı). Bul jaǵdayda operatordıń hal vektorına tásiiri hal vektorın operatordıń menshikli mánisine kóbeytiwge alıp klinedi. Eger hal berilgen operatordıń menshikli halı bolmasa, onda onıń hal vektorı berilgen operatordıń múmkin bolǵan menshikli mánislerine iye menshikli vektorlardıń sızıqlı kombinaciyası túrinde kórsetiliwi múmkin. Bul superpoziciyanıń koefficientleri itimallıqtıń amplitudaları bolıp tabıladı; moduli boyınsha kvadratqa kóteriw qaralıp atırǵan fizikalıq shamanıń anaw yamasa minaw mánisiniń itimallıǵın anıqlaydı.

Joqarıda aytılıp ótilgen jaǵdaylarǵa sáykes kvantlıq-mexanikalıq máselelerdiń eki klassı bar: 1) fizikalıq shamalardıń menshikli mánislerin esaplaw (mısalı, atomlıq hám molekulalıq energiya qáddilerin); 2) hár qıylı processlerdiń itimallıqların esaplaw.

Eger eki operator bir biri menen kommutaciyanatuǵın bolsa (yaǵnıy olardıń halǵa tásiriniń tártibi áhmiyetke iye emes), onda eki operatordıń menshikli mánisleri bolǵan hallardıń tolıq jıynaǵı bar boladı. Eger operatorlar kommutaciyanabaytuǵın bolsa, onda olardıń ulıwmalıq menshikli mánisleri bolmaydı. Dara jaǵdayda, Geyzenbergtiń $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$ túrindegi anıqsızlıq qatnaslarına sáykes, bólekshe bir waqıtta impulstıń p_x hám koordinata x tıń belgili bolǵan mánislerine iye bola almaydı.

Maydanniń kvantlıq teoriiyası — relyativistlik kvantlıq qubılıslardıń teoriiyası. Mánisi boyınsha, maydanniń kvantlıq teoriiyası fizikalıq teoriyalardıń ishindegi eń fundamentallıǵı bolıp tabıladı. Relyativistlik emes kvantlıq mexanika menen maydanniń relyativistlik klassikalıq teoriiyası onıń sheklik jaǵdayları bolıp tabıladı: birinshisi jaqtılıqtıń tezliginen kóp kishi bolǵan tezliklerdegi, ekinshisi — \hbar tan kóp úlken bolǵan hárekettiń mánislerindegi. Maydanniń kvantlıq teoriiyasınıń tiykarında barlıq bóleksheler sáykes fizikalıq maydanlardıń kvantları bolıp tabıladı degen jaǵday jatır. Maydanniń kvantlıq teoriiyası elementar bólekshelerdiń tuwılıwı, bir biri menen tásir etisiwi hám joq bolıwı processlerin úyrenedi.

Maydanniń kvantlıq teoriiyasınıń usılları kvantlıq elektrodinamikanıń, elektr-ázzi tásirlesiwdiń

standart modeliniń, kvantlıq xromodinamikanıń, ullı birlesiw modelleriniń tiykarında turadı. Bul barlıq teoriyalar maydannıń kvantlıq teoriyasınıń ayırım bapları bolıp tabıladı.

Kvantlıq xromodinamika (KXD) — reńli zaryadlardıń (grek tilindegi "xromoe" - reń) bar bolıwınıń nátiyjesinde glyuonlıq hám kvarklıq maydanlardıń hám olardıń óz-ara tásirlesiwleriniń kvantlıq teoriyası.

Kvantlıq elektrodinamika (KED) — elektromagnitlik (fotonlıq) hám elektronlıq-pozitronlıq maydanlardıń hám olardıń óz-ara tásirlesiwleriniń kvantlıq teoriyası. Keńirek túsiniwde KED termini basqa da zaryadlangan leptonlardıń (myuonlardıń hám tau-leptonlardıń) elektromagnitlik tásirlesiwine de tiyisli.

Kvarklar — spinini $\frac{1}{2}$ ge teń, adronlıq quramlıq bóleksheleri bolıp tabılatuǵın bóleksheler. Ádettegi barionlar (ekzotikalıq emes barionlar) úsh kvarktan, al ádettegi bozonlar - kvarktan hám antikvarktan turadı. Kvarklardıń altı sortı (aromatı) belgili, olardıń úshewi b, s, d nıń zaryadları - $\frac{1}{3}$ ke, al úshewi u, c, t nıń zaryadları $+\frac{2}{3}$ ke teń.

Kvantlıq elektrodinamikaǵa sáykes, kvarklardıń arasındadı kúshli tásirlesiw kvarklardaǵı belgili bir reńli zaryadlardıń bolıwı menen baylanıslı. Hár bir aromattıń kvarkları úsh hár qıylı bolǵan reńlerge iye: "sarı", "kók" hám "qızıl". Reńli glyuondı shıǵarıw menen bir reńge iye kvark ekinshi túrli reńge óte aladı. Kvarklardıń arasındadı óz-ara tásirlesiw glyuonlar almasıw menen júzege keledi. Kvarklar adronlarda qosındı reńli zaryad nolge teń bolatuǵınday bolıp jaylasadı. Sonlıqtan adronlar haqqında gáp etkende olardı reńsiz yamasa aq dep aytađı.

Stenford universitetiniń gruppası bir neshe jıllar dawamında bólshek mánisli elektr zaryadına iye erkin bólekshelerdi baqlaǵanı haqqında aytıp kelse de, erkin kvarklardı izlew boyınsha basqa gruppalardıń ótkergen tájiriýbeleri kútilgen nátiýjelerdi bermedi hám fiziklerdiń kópshiligi erkin kvarklardıń bolatuǵınlıǵına skeptik kóz-qaras penen qaraydı. Kvantlıq xromodinamikanıń sheklerinde konfeynment haqqındaǵı gipoteza bar (onıń durıslıǵı ele dálillengen joq). Bul gipoteza boyınsha reńli bóleksheler (kvarklar, glyuonlar hám olardıń reńli kombinaciyaları) principinde erkin halda jasay almaydı. Usınıń menen birge adronlıq eksperimentlerde kvarklardıń bar ekenligi dálillendi. Kvarklardıń bar ekenligi haqqındaǵı birinshi janapay maǵlıwmatlar adronlardıń klassifikaciyasınıń tiykarında alındı. Bunnan keyin leptonlardıń adronlar menen tereń-serpimli emes eksperimentlerinde leptonlardıń ayırım kvarklar menen tuwrıdan-tuwrı soqlıǵısıwları registraciyalandı. Bul soqlıǵısıwlar adronnıń ishinde tereńde bolıp ótedi hám júdá qısqa waqıt dawam etedi. Usınday qısqa waqıttıń ishinde kvark basqa kvarklar menen glyuon almasıp úlgermeydi hám derlik erkin bóleksheler túrinde tásir etedi. Berilgen impulstıń shaması qanshama úlken bolsa, yaǵnıy leptonnıń kvark penen tásirlesiw qanshama kishi aralıqta júzege kelse, onda kvark sonshama erkin boladı. Asimptotalıq erkinliktiń saldarı bolǵan bul qubılıs kvarklardıń kvazibóleksheler de, adronlıq materiyanıń qanday da bir kollektivlik qozıwları da emes, al leptonlar sıyaqlı haqıyqıy elementar bóleksheler bolıp tabılatuǵınlıǵın ańǵartadı. Kvarklerdiń múmkin bolǵan elementar emesligi bul bólekshelerdiń ishine ele de tereńirek kirediń, yaǵnıy berilgen impulslardıń shaması ele de úlken bolǵan jaǵdayda tabılıwı múmkin.

"Kvark" terminini 1964-jılı Gell-Mann tárepinen kirgizildi hám bul termin Djeyms Djoystıń "Fennigan boyınsha eske alıw" kitabınan alındı (kitaptıń qaharmanı tús kóredi hám bul túste shaǵalalar "Mister Mark ushın úsh kvark" dep qışqıradı). Nemec tilinde "kvark" — súzbe (tvorog). u, d, s, c, b, t belgileri ingliz tilindegi up, down, strange, charm, bottom (beauty), top (truth) sózlerine juwap beredi.

Kvarklıq kondensat — $\bar{\psi}\psi$ operatorınıń nolge teń emes bolǵan vakuumlıq ortashası, bul jerde ψ - kvarktı joq etiw hám antikvarktı tuwdırıw operatorı, a $\bar{\psi}$ - kvarktı tuwdırıw hám antikvarktı joq etiw operatorı. Kvarklıq kondensat $\langle 0|\bar{\psi}\psi|0\rangle$ túrinde belgilenedi. Ol perturbativlik emes qubılıs bolıp tabıladı. Onıń payda bolıwı kvantlıq xromodinamikanıń kirallıq invariantlıǵın buzadı. Mezonlarǵa tiyisli bolǵan eksperimentallıq maǵlıwmatlardı teoriyalıq tallaw jeńil kvarklar ushın

$$\langle 0 | \bar{\psi} \psi | 0 \rangle \approx -(1/4 \text{ GeV})^3$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵı kórsetedi.

Kirallıq invariantlıq — ayırım alınǵan shep spirallıq hám oń spirallıq spinorlardıń izotoplıq (yamasa soǵan usaǵan úziksiz gruppalarıdaǵı) túrlandırıwlerge qarata invariantlıǵı. Eger u - hám d -kvarklardıń massaları nolge teń bolǵanda kvantlıq xromodinamika kirallıq-invariant $[SU(2)_L \times SU(2)_R]$ - simmetriyaǵa iye] bolǵan bolar edi. Bunday jaǵdayda kvarklardıń shep hám oń spirallıq halların bir birinen ǵárezsiz izotoplıq aylanıwlarǵa alıp kelgen bolar edi. Shep hám oń spinorlarǵa tásir etetuǵın generatorlardıń summası ádettegi izotoplıq aylandırıwlardıń generatorların beredi. Olardıń ayırması usı generatorlar tásir etetuǵın hallardıń juplıǵın ózgeretetuǵın izotoplıq aylandırıwlardıń psevdoskalyarlıq generatorların beredi.

Kvarklar erkin halda jasamaytuǵın, al olardı ózleriniń ishine alatuǵın nuklonlar massaǵa iye bolǵanlıqtan kvantlıq xromodinamikanıń qatań túrdegi kirallıq invariantlıǵı tek sıızılıq emes bolıp júzege kelgen bolar edi. Bunday sıızılıq emes realizaciya ushın massaǵa iye bolmaǵan π -mezonlardıń kerek ekenligin kórsetiwge boladı. Bunday jaǵdayda, nollik impulske iye π -mezonlardıń sanları hár qıylı bolǵan halları energiya boyınsha azǵınǵan, al joqarıda esletilip ótilgen psevdoskalyar generatorlar usınday π -mezonlardıń sanları jup hám taq bolǵan hallardı bir birine ótkeredi.

u - hám d -kvarklardıń massaları kishi, biraq nolge teń bolmaǵanlıqtan tábiyatta tek juwıq túrdegi kirallıq invariantlıq orın aladı. Usınıń nátiyjesinde π -mezonlar massaǵa iye, biraq, bári-bir, massaları basqa adronlardıń massalarınan ádewir kishi.

"Kirallıq" sózi grek tilindegi "xeir" - qol sózinen kelip shıqqan.

Klassifikaciya — obʼektlerdiń yamasa qubılıslardıń klasslar boyınsha tarqalıwı. Klassifikaciyanıń hár qıylı tiplerine keltirilgen kóp sanlı mısalları usı kitaptıń betlerinde ushırasadı.

Fizikanıń sheklerinensırtaǵı klassifikaciyaǵa mısál argentinalı jazıwshı Xorxe Luis Borxestiń (1899—1986) Djon Uilkinstiń analitikalıq tili" essesinde keltirilgen. Bul essede Borxes shıǵıs enciklopediyasınan (shıǵıs enciklopediyasınan dep jazılǵan) citata keltiredi (qarańız: Xorxe Luis Borxes. Proza raznıx let.— M.: Raduga, 1984, s. 218):

"Haywanlar mınalarǵa bólinedi: a) Imperatorǵa tiyisli, b) balzamlanǵan, v) úyretilgen, g) sút shoshqalarınday, d) sirenlerge usaytuǵın, e) erktektegi haywanlarǵa usaytuǵın, j) qarǵıp júrgen iytlerge usaytuǵın, z) bul klassifikaciyaǵa kirgizilgenlerge, i) aqlı joqtay bolıp qutırǵan, k) sheksiz kóp, l) túyenıń júnenen soǵılǵan juqa kistoshka menen súwreti salınǵan, m) hám basqa, n) házir ǵana gúzelerdi sindirǵan, o) alıstan qaraǵanda shıbınday bolıp kórinetuǵın".

Eger fizikanıń qanday da bir tarawınıń klassifikaciyası joqarıdaǵı haywanlardıń klassifikaciyasın eske túsiretuǵın bolsa, onda bul Siziń bul tarawdı tolıq úyrenbegenińizdi bildiredi. Tarawdı uqsaslıq joǵalǵansha úyrenińiz.

Kollaboraciya — birgelikte bir eksperimentti ótkeretetuǵın hár qıylı institutlardıń fizikleriniń gruppaları. Eń iri kollaboraciya júzden aslam fiziklerge iye, kópshiligi bir neshe onlaǵan fiziklerdi biriktiredi. Mısál sıpatında neytrinoliq tásirlesiwlerdi úyrenetuǵın kollaboraciya esletip ótemiz: CDHS (CERN — Dortmund — Heidelberg — Saclay); CHARM (CERN — Hamburg — Amsterdam — Rome — Moscow).

Geypara jaǵdaylarda kollaboraciyanıń ataması bolıp eksperimenttiń shıfır xızmet etedi, mısalı: UA1 (Underground Area № 1) — CERN degi jerdiń astında tereńde jaylasqan proton-antiprotonlıq kollarıderdegi eń iri eksperiment.

Konfaynment (ingliz tilindegi confinement — túrmege qamaw, qozǵalıstıń erkinligin sheklew) — reńge iye bolmaǵan adronlardan kvarklar menen glyuonlardıń uship shıqqawı, tutqınǵa alınıwı. Qatań konfaynment gipotezası erkin kvarklardı izlewdegi unamlı nátiyjelerdiń alınbaǵanlıǵın túsindiriw ushın usınıldı. Usınıń nátiyjesinde, kvantlıq xromodinamikanıń strukturasın izertlewdiń barısında konfaynment qásiyetiniń abellik emes kalıbrovkalıq simmetriyanıń nátiyjesi ekenligi haqqındaǵı úmit bekkemlendi.

Kóbinese bul úmit summawdın kvantlıq-xromodinamikalıq qağıydası dep atalatuǵın qağıydanın sheklerinde alınǵan nátiyjelerge hám kompyuterlik eksperimentlerdiń nátiyjelerine tiykarlanǵan. Usınday kompyuterlik eksperimentlerde sheksiz kvarklarǵa iye bolǵan glyuodinamikanıń teńlemeleri túyinleriniń sanı 10^4 ten zıyat bolǵan keńisliklik-waqtılıq pánjerelerde sheshildi. Bul perturbativlik emes bolǵan esaplawlardıń nátiyjeleri kvarklardıń arasındaqı potencialdıń olardıń arasındaqı qashıqlıqtıń ósiwi menen sıızıqlı ósetuǵınlıǵın kórsetedi (glyuonlıq sabaq bolǵan jaǵdayda da tap usınday nátiyjeniń alınıwı kerek). Biraq, konfaynmenttiń dálili hám bul qubılıstıń mexanizmin kvantlıq xromodinamikanıń sheklerinde ayqın túsiniw házirgi shekem ámelge asırılǵan joq.

Konformlı simmetriya — konformlıq túrlendiriwlerge, yaǵnıy baǵıtlardıń arasındaqı múyeshlerdi invariant etip qaldıratuǵın túrlendiriwlerge qarata simmetriya. Fizikada konformlıq túrlendiriwler gruppası dep ádette Minkovskiy gruppasındaqı 15-parametrlik konformlıq gruppası túsinedi. Skalyarlıq funkciyalardıń keńisligindegi bul gruppasınıń generatorları tómendegidey differenciallıq operatorlar menen beriledi:

$$\begin{aligned}M_{\mu\nu} &= x_\mu \partial_\nu - x_\nu \partial_\mu, \\P_\mu &= \partial_\mu, \\K_\mu &= 2x_\mu x_\nu \partial_\nu - x^2 \partial_\mu, \\D &= x_\nu \partial_\nu \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3).\end{aligned}$$

Bul ańlatpalarda $M_{\mu\nu}$ menen P_μ - konformlı gruppasınıń podgruppası bolǵan Puankare gruppasınıń 10 generatorı. K_μ — arnawlı sıızıqlı emes konformlıq túrlendiriwdiń 4 generatorı, al D — dilataciya generatorı (masshtabtıń ózgerisleri).

Teńlemelerdiń konformlıq invariantlıǵınıń zárúrli bolǵan shárti olardıń masshtablıq invariantlıǵı bolıp tabıladı. Teńlemelerdiń masshtablıq invariantlıǵı ushın lagranjianda bólekshelerdiń massaları tipindegi ólshemlik parametrlardıń yamasa G_F hám G_N tipindegi ólshemlik konstantalardıń bolmawı kerek. Konformlıq invariantlıqqa, misalı, bir biri menen tásirlespeytuǵın fotonlardıń lagranjianı menen bir biri menen tásirlespeytuǵın massaǵa iye bolmaǵan neytrinolardıń lagranjianı iye. Massaǵa iye bolmaǵan kvarklar menen glyuonlardı táriyipleytuǵın xromodinamikalıq lagranjian da konformlıq invariantlıqqa iye. Biraq sońǵı jaǵdaylarda kvantlıq dúzetiwlerdi esapqa alǵanda konformlıq invariantlıq buzıladı (konformlıq anomaliya).

Kosmoslıq nurlar — kosmos keńisliginen Jerge keletuǵın joqarı energiyaǵa iye bólekshelerdiń aǵısı (tiykarınan protonlardan turatuǵın, bunday aǵıstı dáslepki nurlanıw dep ataydı), sonıń menen birge tikkeley kosmos keńisliginen kelgen bólekshelerdiń atmosferanıń zatları menen soqlıǵısıwınıń saldarınan tuwılǵan bólekshelerdiń aǵısı (ekinshi gezektegi nurlanıw). Dáslepki kosmoslıq nurlanıw izotrop, onıń Quyashlıq qurawshısın esapqa almaǵanda (onıń bóleksheleriniń maksimalıq energiyası 10 GeV tiń shamasında) waqıttan ǵárezsiz. Energiyalardıń $10-10^6$ GeV intervalında energiyası E (GeV) den úlken bolǵan dáslepki kosmoslıq nurlardıń aǵısı shama menen mınaǵan teń

$$1,7 \cdot E^{-1,6} \text{ bólekshe} \cdot \text{sm}^{-2} \cdot \text{sek}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1}.$$

$E > 10^6$ GeV bolǵan jaǵdayda dáreje kórsetkishi 1,6 dan 2,2 ge shekem ósedi, sonlıqtan, misalı energiyası $E > 10^7$ GeV bolǵan bóleksheler 1 m^2 maydanǵa shama menen bir ret kelip túsedi.

Kosmoslıq nurlarda pozitron, myuon, K-mezonlar, Λ -giperon ashıldı, adronlardıń kóp ret tuwılıw qubılısı hám, joqarı bolmaǵan dállikte bolsa da, onıń tiykarǵı nızamlıqları tabıldı. Atap aytqanda, feynmanlıq skeyling dep atalatuǵın skeylingtiń bazı bir kóriniwleri ashıldı.

Kosmoslıq nurlarda tań qalarlıq, usı waqıtlarǵa shekem túsindirilmegen bir qatar qubılıslar, solardıń ishinde kentavrlar dep atalatuǵın qubılıs baqlandı. Kentavrlar $10^5 - 10^6$ GeV energiyadaǵı kóp sanlı tuwılıwlardıń bir neshe aktı bolıp tabıladı. Bul jaǵdayda shama menen 100 dey zaryadlanǵan bóleksheler tuwıladı hám π^0 -bozonlar is júzinde tuwılmaydı. CERN degi proton-

antiproton kollayderinde kentavrlarda izlew kútilgen nátiyjelerdi bermedi. Biraq, múmkin, bul jerde massalar orayındaǵı energiya joqarıda gáp etilgen kosmoslıq nurlardaǵı energiyadan bir qansha kishi.

Lagranjian — elementar bóleksheler teoriyasında fizikalıq maydanlardıń barlıq qásiyetlerin anıqlaytuǵın oraylıq orındı iyeleytuǵın fundamentallıq fizikalıq shama. Lagranjiandı ádette qoldan jazılatuǵın \mathcal{L} háripiniń járdeminde belgileydi. Maydanlardıń tarqalıwı menen tásirlesiwiniń teńlemeleri eń kishi háreket (dáliregi ekstremallıq) principiniń qatnasıwında anıqlanadı. S háreketi lagranjian \mathcal{L} den keńislik hám waqıt boyınsha alınǵan integralǵa teń:

$$S = \int \mathcal{L} dx dy dz dt.$$

Al,

$$L = \int \mathcal{L} dx dy dz$$

integralın Lagranj funkciyası dep ataydı.

Elementar bóleksheler teoriyasın dóretiwdi eki mäseleni sheshiwge alıp kelinedi dep jiyi aytadı: 1) tábiyattıń fundamentallıq maydanlarınıń túrin tabıw; 2) usınday túrdegi lagranjiannan kelip shıǵatuǵın eksperimentlerde tekserip kóрилиwı múmkin bolǵan nátiyjelerin tabıw.

Maydanniń kvantlıq teoriyasında lagranjian bir qatar qosılıwshılardıń summasınan turadı. Olardıń hár qaysısına maydanniń operatorlarınıń yamasa olardıń tuwındılarınıń kóbeymesi kiredi. Standart kvantlıq-maydanlıq teoriyalarda lagranjian lokallıq, yaǵnıy kóbeymege kiretuǵın maydanlar bir dúnyalıq noqatqa tiyisli (\mathbf{r} menen t niń bir mánisine).

Néter lagranjianniń túrlendiriwlerdiń hár qıylı gruppalarına qarata invariantlıǵınan sáykes saqlanıw nızamınıń kelip shıǵatuǵınlıǵın kórsetti. Idealda, lagranjianniń ayqın túri, kórinip turǵanıday, simmetriya principleri menen tolıq anıqlanadı. Biraq, ádebiyatta talqılanatuǵın haqıyqıy lagranjianlar dúnyanıń baqlanatuǵın fizikalıq kartinasın táriyiplew ushın "qoldan" kirgiziletuǵın dep atalatuǵın ayırım aǵzalarǵa hám parametrlerge iye boladı. Bul ásirese teoriyanıń skalyar sektorına, yaǵnıy lagranjianniń skalyar maydanlar kiretuǵın qosılıwshılardıńa tiyisli.

$\hbar, c = 1$ birliklerinde háreketiń ólshem birligi joq: $[S] = 1$, al lagranjian ólshem birligine iye (massa)⁴: $[\mathcal{L}] = [m^4]$. Lagranjianniń qurawshılardıń úsh gruppǵa bóliwge boladı: kinetikalıq aǵzalar, massalıq aǵzalar hám tásirlesiw aǵzaları (kalibrovkalıq teoriyalarda kinetikalıq aǵzalar hám vektorlıq maydanlardı táriyiplew aǵzalar bir biri menen tıǵız baylanısqa). Lagranjianǵa kiretuǵın ψ fermionlıq maydanlardıń operatorları (massa)^{3/2} birligine iye: $[\psi] = [m^{3/2}]$, al bozonlıq maydanlardıń operatorları bolsa $[\varphi] = [m]$. Uliwma aytqanda, $[\mathcal{L}] = [m^4]$ shártiniń orınlanıwı ushın hár qıylı qosılıwshılardıń aldında turǵan koefficientlerdiń birlikleriniń bolıwı shárt. Lagranjianniń perennormirovkalanıwı bul koefficientlerdiń birlikleriniń teris emes bolıwın talap etedi: $m^n, n > 0$.

Leptonlar — spini $\frac{1}{2}$ ge teń bolǵan, kúshli tásirlesiwlerge qatnaspaytuǵın bóleksheler. Úsh zaryadlangan lepton: elektron e^- , myuon μ hám τ -lepton hám úsh neytral lepton: elektronlıq neytrino ν_e , myuonlıq neytrino ν_μ hám tau-neytrino ν_τ belgili. Usı bólekshelerdiń hár qaysısınıń sáykes antibóleksheleri bar: e^+ (pozitron), μ^+ , τ^+ hám úsh antineytrino: $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$ ("anti-nyu-tau" dep oqıladı). Elektromagnitlik tásirlesiwde zaryadlangan leptonlardıń jupları tuwıladı: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$. Ázzi ıdırawlarda zaryadlangan leptonlardıń hár biri "óziniń" antineytrinosı menen tuwıladı: $e^-\bar{\nu}_e$, $\mu^-\bar{\nu}_\mu$, $\tau^-\bar{\nu}_\tau$. Eger barlıq leptonlar ózine tán kvant sanı (geyde leptonlıq "zaryad" dep atalatuǵın) bolǵan +1 ge teń leptonlıq sanǵa, al antileptonlar -1 ge teń kvant sanına iye dep boljansa, onda usı waqıtqa shekem baqlanǵan barlıq processlerde belgili bolǵan leptonlıq san saqlanadı. Leptonlıq sannıń saqlanbawı kúiletuǵın processler: protonnıń ıdırawı, qos β -ıdıraw, neytrinoliq oscillyaciýalar.

Myuon menen τ -lepton ázzi tásirlesiwdiń esabınan ıdıraydı. Elektron stabilli.

"Lepton" sózi grekshe "leptos" sózinen alınǵan hám ol mayda, tar degen mánisti ańǵartadı

(salıstırınız: lepta — mayda grek monetası).

LEP (LEP — ingliz tilindegi Large Electron Positron (Ring)) — CERN de qurılıp atırğan elektronlar menen pozitronlardıń qarama-qarsı baǵıtta tarqalatuǵın dástelerinde isleytuǵın saqıyna tárizli kollarayder. Saqıynanıń uzınlıǵı shama menen 27 km (± 2 sm ruqsat etiledi). Dásteleriniń hár biriniń energiyası 50 GeV ke shekem, energiyanıń shashawlıǵınıń mánisi 80 MeV shamasında. Kútilip atırğan jarqınlıq 10^{31} sm⁻²·sek⁻¹. Bahası shama menen 1 mlrd Shveytariya frankine teń bolǵan mashınanıń iske túsiwi 1989-jıldıń aqırına jobalastırılǵan. LEP tınıń birinshi gezektegi máselesi Z-bozonlardıń tuwılıwı menen ıdırawın izertlewden ibarat.

$$e^+e^- \rightarrow Z$$

soqlıǵısıwlarındaǵı Z-bozonınıń tuwılıw reakciyasınıń kese-kesimi rezonansta $4 \cdot 10^{-32}$ sm² shamasın quraytuǵın bolǵanlıqtan, LEP te hár bir 2-3 sekunda bir Z-bozonınıń tuwılıwı kerek. Keyinirek dástelerdiń hár biriniń energiyasın 80 GeV ke (II faza), al onnan keyin 125 GeV ke (III faza) shekem kóteriw názerde tutılǵan. Bul zaryadlangan W[±]-bozonlardıń

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$$

reakciyasındaǵı tuwılıwın baqlawǵa múmkinshilik beredi.

Diraktıń magnit monopoli — gipotezalıq magnit zaryadı. Eksperimentte házirshe baqlanǵan joq. Monopol tárepinen payda etilgen magnit maydanı jetkilikli dárejede juqa bolǵan (sheksiz juqa), al ekinshi ushın jetkilikli dárejede uzaqta jaylasqan solenoidtıń ushınıń qasında payda bolǵan magnit maydanına usaydı (sonday solenoidtıń ekinshi ushında payda etilgen maydan antimonopoldıń maydanına usaydı).

Solenoidtıń sheksiz jırńshke hám sheksiz uzın bolǵan sabasınıń baqlanbawı, al tek monopoldıń baqlanıwı ushın tek onıń átirapın uship ótetuǵın elektronınıń tolqın funkciyasınıń fazası $2\pi n$ ge teń bolıwına sáykes keletuǵın magnit maydanınıń aǵısınıń kvantlanıwınıń orın alıwı kerek (Bunday bolmaǵan jaǵdayda Bom-Aaronovtıń baqlanatuǵın interferenciyalıq effekti payda boladı). Joqarıda esletilip ótilgen faza mınaǵan teń:

$$e \int \mathbf{A} d\mathbf{l} = e \int H^0 dS.$$

Bul ańlatpada \mathbf{A} - vektor-potencial, H^0 — solenoidtıń ishindegi maydan. Sońǵı integral solenoidtıń kóldeneń kesimi boyınsha alınadı. Magnit maydanınıń kúsh sızıqlarınıń saqlanatuǵınlıǵın esapqa alıp, monopolden r qashılıǵındaǵı sferalıq simmetriyaǵa iye bolǵan magnit maydanınıń kernewligi ushın

$$H = \int H^0 dS / 4\pi r^2$$

ańlatpasın alamız. Eger H tı ($H = m/r^2$) magnit zaryadı arqalı belgilesek, onda magnit zaryadı ushın $e4\pi\mu = 2\pi n$ yamasa $\mu = n/2e$ teńliklerin alamız. Bul teńliklerde $e^2 = \alpha = 1/137$ (biz $\hbar, c = 1$ birliklerin paydalanıp atırmız).

Múmkin bolǵan normirovkalawshı túsinbewshiliklerden pútkilley qutılıwı ushın eki elektronınıń arasındaǵı potencialdı eki birlik ($n = 1$) monopoldıń arasındaǵı potencial menen salıstıramız. $\hbar, c = 1$ birliklerinde birinshisi α/r ge, al ekinshisi $1/4\alpha r$ ge teń.

Diraktıń magnit monopoli haqqındaǵı maqalası 1931-jılı baspadan shıqtı. 't Xoft penen Polyakov spontan buzılǵan simmetriyaǵa iye (mısalı, xiggs maydanlarınıń tripleti bolǵan SU(2) gruppasında) abellik emes kalibrovkalıq modellerde shekli massaǵa iye bolǵan magnit monopolleriniń klassikalıq sheshimleri sıpatında bar bolıwınıń kerek ekenligin tapqannan keyin 1974-jılı magnit monopoller teoriyasına ekinshi ilhám keldi. Ullı birlesiw modellerinde usınday klassikalıq monopollerdiń bolıwı kerek: SU(5), SO(10) hám basqalar. Bunday modellerde olardıń massaları shama menen 10^{16} — 10^{17} GeV shamasına teń bolıwı kerek. Jerge túsetuǵın usınday úlken massalardı iye bolǵan reliktlik monopollerdiń tezliklerin bahalaw boyınsha olardıń tezligi jaqtılıqtıń tezliginiń 10^{-3} in qurawı kerek. Kishi tezlikke baylanıslı zatlardıń monopollerdegi tormozlanıwınıń júdá ázzi bolıwı kerek. Usıǵan baylanıslı monopollerdi qalay tormozlaw hám

toqtatıw ushın neni islewdiń kerek ekenligi kórinip turǵan joq. Eger monopollerdi toqtatıwdıń sáti túsken jaǵdayda monopol menen antimonopoldıń annigilyaciyası reakciyasın baqlaǵan júdá qızıqlı bolǵan bolar edi. Bul annigilyaciyanıń ónimleri sıpatında ullı birlesiw modellerinde protonnıń ıdırawına juwapker bolǵan massaları júdá úlken bolǵan vektorlıq bozonlardıń ushıp shıǵıwı kerek (X hám Y).

Ádebiyatta dáslepki úlken partlanıwdan qalǵan reliklik monopollerdiń Álemdegi tarqalıwı haqqındaǵı isenimli bahalawlar joq.

Mayoran neytrinosı — haqıyqıy neytral bolǵan neytrino, spini $\frac{1}{2}$ ge teń hám zaryadlıq túyinleslikte ózi ózine ótetuǵın bólekshe. Bunday haqıyqıy neytral bolǵan neytrinonıń teoriyası italiyalı fizik Ettore Mayoran (1906—1938) tárepinen usınıldı. Eger neytrinonıń massası nolge teń, al ázzi tásirlesiwlerde olar tolıǵı menen boylıq polarizaciya menen shıǵarılatuǵın bolsa, mayoran neytrinosı ádettegi boylıq eki qurawshıǵa iye bolǵan veyel neytrinosınan ayırmashılıǵı joq (neytrinolar shep polarizaciyaǵa, al antineytrino oń polarizaciyaǵa iye). Biraq, eger neytrinonıń massası nolge teń bolmasa, onda mayoran neytrinolarınıń teoriyası bir qatar ózine tán boljawlarǵa alıp keledi. Olardıń biri qos beta-ıdırawdıń bar bolıwı.

Mayoron — zatlar menen júdá ázzi tásirlesetuǵın massaǵa da (yamasa júdá jeńil), spinge de iye emes gipotezalıq neytral bólekshe. Mayoronnıń bar bolıwı leptonlıq zaryadtıń saqlanıwı spontan buzılıwdıń nátiyjesinde neytrino mayoran massasına iye bolatuǵın bazı bir teoriyalıq modeller tárepinen boljanadı.

Massa — bóleksheni yamasa bóleksheler sistemasın táriyipleytuǵın relyativistlik-invariant shama. Massa m energiya E hám impuls p arqalı bılayınsha ańlatıladı:

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2.$$

Bul ańlatpada c arqalı jaqtılıqtıń tezligi belgilengen. $c = 1$ teńligi orınlı bolatuǵın birliklerdiń relyativistlik sistemasında

$$m^2 = E^2 - p^2.$$

Geypara waqıtları m shamasın E/c^2 qa teń bolǵan "qozǵalıstaǵı massadan" ayırıp kórsetiw ushın "tınıshlıqtaǵı massa" dep ataydı. Bul túsiniktiń ekewi de eskerdi. Olar salıstırmalıq teoriyası dóretilgen dáwirlerden qalǵan túsinikler bolıp tabıladı. Sol waqıtları relyativistlik bólekshelerdi táriyiplew ushın geypara jaǵdaylarda relyativistlik formulalardan, solardıń ishinde $p = Ev/c^2$ formulasınıń ornına $p = mv$ formulasınan paydalanıldı. Házirgi waqıtları "tınıshlıqtaǵı massa" hám "qozǵalıstaǵı massa" túsinikleri fizika boyınsha mańızlı kitaplarda derlik ushıraspaydı. Biraq, kópshilikke arnalǵan kitaplarda jiyi ushırasadı. Lorenclik invariant ushın da, lorenclik vektordıń qurawshıları ushın da bir "massa" atlıǵın paydalanıw júdá sátsiz. Usınıń menen bir qatarda bir shamanı (bul jaǵdayda energiyanı) eki terminniń járdeminde ataw aqılǵa muwapıq kelmeydi: qanday birliklerde ólshesek te energiya bolıp qala beredi. Ásirese, $c = 1$ sistemasında "qozǵalıstaǵı massa" túsinigi kúlkili bolıp kórinedi.

Gravitaciyalıq tartılısqa kelsek, onda ol massaǵa emes, al tartılıs bólekshelerdiń energiya-impuls tenzorına proporcional. Joqarıda atap ótilgenindey, massa emes, al energiya hám impuls gravitaciyalanadı; sonlıqtan massaǵa iye bolmaǵan fotonlar gravitaciyalıq maydanda óziniń jolın mayıstıradı.

Mezonlar — spini pútin bolǵan adronlar. Barlıq mezonlar nollik barionlıq kvant sanı menen táriyiplenedi.

"Mezon" sózi grek tilindegi "mezos" - aralıqlıq sózinen kelip shıqqan. Bul termindi oylap tapqanda mezonlardıń aralıqlıq massaǵa iye bolıwınıń kerekligi basshılıqqa alındı: elektronnıń massasınan úlken, biraq protonnıń massasınan kishi. Házirgi waqıtları terminniń mánisi joǵaldı, sebebi massası protonnıń massasınan ádewir úlken bolǵan mezonlar belgili.

Mezon emes, al lepton bolıp tabılatuǵın myuondı μ -mezon dep ataw pútkilley qáte. Házirgi waqıtlardaǵı ádebiyatlarda geyde usharısatuǵın termin ádebiyatta elementar bólekshelerdiń házirgi waqıtlardaǵı klassifikaciyası qalıplespesten burın, 30-, 40-jılları qabıl etilgen edi. Sonıń

menen birge aralıqlıq W- hám Z-bozonlardı, skalyar (xiggs) bozonların mezonlar dep ataw da qáte. Sebebi olardıń hesh qaysısı adronlar emes.

Qapshıqlar modeli (ingliz tilindegi bag model sózinen) — adronlardı kvarklar qozǵalatuǵın ózine tán kóbikler - "Kapshıqlar" túrinde qaraytuǵın fenomenologiyalıq model. Mánisi máseleniń shárti ushın sáykeslendirip alınǵan parametrlerdi paydalanıp, qapshıqlar modeli adronlardıń massalarınıń spektrin jaman emes táriyipleydi. Kvantlıq xromodinamikanıń kóz-qarası boyınsha kvantlıq-xromodinamikalıq vakuumdáǵı kóbiktiń payda bolıwı kvarklardıń ózleriniń reńli maydanları menen fizikalıq vakuumdáǵı glyuonlıq kondensattı "kúydiretuǵınlıǵı" (tolıq yamasa jarım-jartı) menen baylanıslı. Usınıń menen birge, fizikalıq vakuumdáǵı glyuonlıq kondensat teris energiyaǵa iye bolǵanlıqtan kóbik on energiyaǵa iye boladı.

Multiplet — bir birine uqsas qásiyetlerge iye bolǵan bólekshelerdiń yamasa hallardıń (energiya qáddileriniń) jıynaǵı.

Adronlardıń multipleti — birdey spinlerge hám juplıqqa, jaqın massalarǵa hám bir birine uqsas bolǵan kúshli tásirlesiwge iye adronlardıń jıynaǵı. Multipletlerdiń bar bolıwı kúshli tásirlesiwdiń simmetriyaları menen baylanıslı. Simmetriyalardıń sáykes gruppasınıń túrlendiriwleri multipletlerdiń bólekshelerin bir birine ótkeredi. Birinshi adronlıq multiplet bolǵan nuklonlardıń dubleti fizikaǵa 30-jılları neytron ashılǵannan keyin Geyzenberg tárepinen kirgizildi Proton menen neytron bir birinen óziniń elektromagnitlik qásiyetleri boyınsha ayrıladı (zaryadları, magnit momentleri, bul bólekshelerdiń ishindegi zaryadlar menen toqlardıń tarqalıwı boyınsha). Qalǵan basqa qásiyetleri boyınsha bul bóleksheler bir birine júdá usaydı: olardıń spinleri birdey, júdá jaqın massalar (ayırma 0,1 procenttiń átirapında) hám derlik birdey kúshli tásirlesiwler. Nuklonlardıń bir biri menen tásirlesiwın úyreniwde birinshi jaqınlasıwda olardıń arasındáǵı ayırmanı esapqa almawǵa hám olardı nuklon dep atalatuǵın bir bóleksheniń eki azǵınǵan halları hám yadrolıq kúshlerdi bul hallardıń bir birine túrlendiriwlerine qarata invariant dep qarawǵa bolatuǵınlıǵı tábiyiy. Nuklonlıq dubletti matematikalıq táriyiplew eki qurawshıǵa iye spinorlardı, Pauli matricaların hám SU(2) gruppasınıń barlıq qalǵan apparatın paydalanatuǵın spini $\frac{1}{2}$ ge teń bolǵan táriyiplewge uqsas.

Proton menen neytronniń arasındáǵı simmetriya izotoplıq simmetriya atamasına iye boldı. Bul jerde "izotoplıq" termini yadrolıq izotoplardıń arasındáǵı simmetriyadan basqa mániste qollanıladı. Sebebi yadrolıq fizikada qabil etilgen terminologiya boyınsha proton menen neytron izotoplar emes, al izobaralar bolıp tabıladı. Usı jaǵdayǵa baylanıslı óz waqıtında "izotoplıq simmetriya" terminin "izobaralıq simmetriya" terminin menen almastırıwǵa háreket etildi. Biraq bul sońǵı termin paydalanılmaı.

Izotoplıq keńislikte nuklon spinor menen táriyiplenedi. Proton menen neytron izotoplıq keńisliktegi izotoplıq spinniń bazı bir kósherge (z kósheri) túsirilgen mánisleri $+1/2$ menen $-1/2$ shamalarına teń bolǵan proekciyalardı sáykes keledi.

Kelesi izotoplıq multiplet — pionlardıń tripleti — 40-jıllardıń aqırında hám 50-jıllardıń basında ashıldı. 50-jıllardıń aqırında hám 60-jıllardıń basında ersi bólekshelerdiń hám rezonanslardıń kóp sanlı multipletleri ashıldı. 70-jılları bolsa súykimli bólekshelerdiń izotoplıq multipletleri tabıldı. Izotoplıq multiplettegi bólekshelerdiń sanı n izotoplıq spin I diń shaması menen ápiwayı bolǵan $n = 2I + 1$ ańlatpası menen baylanısqan.

Kvantlıq elektrodinamika dóretilgennen keyin izotoplıq simmetriyanıń tiykarında u- hám d-kvarklardıń is júzinde óz-ara almasatuǵınlıǵı menen baylanıslı ekenligi anıqlandı (sebebi olardıń massalarınıń arasındáǵı ayırmanıń olardıń adronlardıń ishindegi tán bolǵan energiylarınan kishi ekenligi menen baylanıslı).

Eger s-kvark u- hám d-kvarklar sıyaqlı jeńil bolǵanda barlıq úsh kvarktıń arasında bir birin almastırıwshılıq orın alǵan hám oǵan juwap beretuǵın SU(3)-simmetriyası izotoplıq SU(2)-simmetriyaday jaqsı bolǵan bolar edi. Tábiyatta SU(3)-simmetriya SU(2)-simmetriyaǵa salıstırǵanda kúshlirek buzılǵan. Bul s-kvarktıń massasınıń ádewir úlken ekenligi menen baylanıslı:

$m_s - m_u \approx m_s - m_d \approx 150 \text{ MeV}$. Adronlarning ápiwayı SU(3)-multipletleri — singletler, oktetler hám deкупletler.

Adronlarning joqarıraq bolğan "aromatlıq" simmetriyalari bolğan SU(4), SU(5), ... simmetriyalarning derlik tolıq buzılğanlıǵı gúmansız. Sebebi, awır c- hám b-kvarklarning massalari olarning adronlarning ishindegi ózine tán impulslerine salıstırǵanda aytarlıqtay úlken.

Neytral toqlar — kvarklar menen leptonlarning aralıqlıq Z bozonı menen tásirlesiwın anıqlaytuǵın ázzi toqlar. Virtuallıq Z bozonlar tárepinen júzege keltiriletuǵın neytral toqlarning arasındaǵı óz-ara tásirlesiw bir qatar ayrıqsha qubılıslarning júzege keliwine alıp keledi. Olarning qatarına 1973-jılı ashılğan myuonsız neytrinoliq reaksiyalar dep atalatuǵın reaksiyalar, 1978-jılı ashılğan elektronlar menen nuklonlarning arasındaǵı juplıqtıń saqlanbawı kiredi. Belgili bolğan neytral toqlar olarǵa qatnasatuǵın leptonlar menen kvarklarning aromatlari saqlaydı hám olarning barlıǵı da diagonallıq bolıp tabıladı.

Perturbativlik emes — uyıtuqlar teoriyasınıń sheklerinde qaytadan tiklenbeytuǵın. Kvantlıq xromodinamikada perturbativlik emes effektler $\exp[-const g_s^2]$ kóbeytiwshisine tuwrı proporcional.

OIYal — Yadrolıq izertlewlerding birlesken institutı. Dubna qalasında jaylasqan.

Okkama pákisi — mánisi "mańızdı zárurlıǵı bolmasa kóbeytiwge bolmaydı" degennen ibarat principi (latin tilinde "Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem"; inglizshe awdarması "Beings ought not be multiplied except out of necessity"). Bul princip ingliz filosofi Uilyam Okkam (Ockham, Occam, 1285— 1349) tárepinen usınıldı.

K-mezonlarning oscillyaciylari (latin tilindegi oscillare — terbeledi) — vakuumdegi neytrallıq K — mezonlarning dástelerindegi K^0 — mezonlar menen \bar{K}^0 — antimezonlarning bir birine aylanıwı. Bul ázzi óz-ara aylanıwlar K-mezonlar turatuǵın kvarklarning arasındaǵı ázzi tásirlesiwding saldarınan orın aladı:

$$K^0 = \bar{s}d \leftrightarrow s\bar{d} \rightarrow \bar{K}^0.$$

Usınday aylanıslarning saldarınan K^0 -mezon menen \bar{K}^0 -antimezon belgili massaǵa hám belgili jasaw waqtına iye bolmaydı. Belgili massaǵa hám belgili jasaw waqtına iye bolatuǵın hallar K_S^0 - hám K_L^0 -halları bolıp tabıladı. Olarning birinshisi qısqa jasaydı (ingliz tilindegi short sózinen), onıń jasaw waqtı

$$\tau_S \approx 0,9 \cdot 10^{-10} \text{ sek.}$$

Ekinshisi uzaq jasaytuǵın bólekshe (L indeksi ingliz tilindegi long sózinen)

$$\tau_L \approx 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ sek.}$$

K_L^0 -mezon K_S^0 -mezonǵa salıstırǵanda awır.

$$m_L - m_S \approx 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \approx 0,53 \cdot 10^{10} \text{ sek}^{-1}.$$

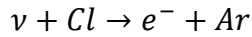
$K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ - oscillyaciasınıń dáwiri

$$\tau = 2\pi/(m_L - m_S) \approx 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ sek.}$$

K-mezonlarning oscillyaciylari birinshi ret 50-jıllardıń aqırında ótkerilgen tájiriybelerde baqlandı hám házirgi waqıtları júdá jaqsı uyrenilgen qubılıs bolıp tabıladı.

Neytrinolarning oscillyaciylari — vakuumdaǵı neytrino menen antineytrinionıń hár qıylı tipleriniń bir birine aylanıwı ($\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$). Neytrinoliq oscillyaciylarning múmkin ekenligi ádebiyatta 50-jıllardıń ortasınan baslap tallanıp kiyatır. Biraq eksperimentallıq izertlewlerding predmetine tek sońǵı jılları ǵana aylandı. Tezletkishlerdegi, reaktorlardaǵı hám kosmoslıq nurlardaǵı neytrinolarning oscillyaciylarin izlewler házirshe usınday oscillyaciylarning bar ekenligin dálillegen joq. Neytrinoliq oscillyaciylarning bar ekenligine janapay argument retinde Quyash neytrinolarınıń baqlanatuǵın aǵısınıń kútilgen aǵıstan shama menen úsh ese kem ekenligi alınbaqta. Bunday jaǵdayda Quyashtan Jerge shekem jetip kelemen degenshe ν_e elektronlıq neytrinionıń birdey muǵdardaǵı ν_e, ν_μ, ν_τ neytrinolarning aralaspasına aylanadı dep boljaydı.

Tómengi energiyalarda sońǵı eki neytrino "sterilizaciyalanǵan"⁵¹ day bolıp kórinedi, atap aytqanda olar Quyash neytrinoları detektorlanatuǵın



reakciyasın boldıra almaydı.

Neytrinoliq oscillyaciylardıń bar bolıwı ushın olardıń massası nolge teń bolmawı kerek (biraq bul shárt jetkilikli emes).

B.M.Pontekorvonıń eń dáslepki (pionerlik) jumısınan derlik 30 jıldan keyin neytrinoliq oscillyaciylarǵa baǵıshlanǵan áhmiyetli jumıstı S.P.Mixeev penen A.YU.Smirnovlar baspadan shıǵardı. Olar tıǵızlıǵı ástelik penen ózgeretuǵın zatta (atap aytqanda, Quyashta) principinde is júzinde elektronliq neytrinolarıń myuonliq hám tau-neytrinolarǵa tolıq ótiwiniń múmkin ekenligin kórsetti. Bul effekt ν_e niń elektrondaǵı shashırawınıń kese-kesiminiń ν_μ , ν_τ lerdiń shashırawınıń kese-kesiminen ózgeshe ekenligi menen baylanıslı. Usınıń nátiyjesinde zattıń bazı bir tıǵızlıǵında ν_e menen ν_μ diń (yamasa ν_e menen ν_τ diń) qáddileriniń kesilisiwiniń orın alıwı hám usınıń nátiyjesinde elektronliq neytroniń myuonliq neytrinoǵa (yamasa tau-neytrinoǵa) intensivli túrde ótiwi múmkin. Bunday ótiwdiń rezonansliq xarakterge iye bolıwı kerek, ótiw tek neytroniń energiyasınıń bazı bir intervalında ǵana júzege keledi.

Neytronlardıń oscillyaciyları — vakuumdıǵı neytronlar menen antineytronlardıń gipotezalıq bir birine aylanıwı. $n \leftrightarrow \bar{n}$ bir birine aylanıwı B barionliq kvant sanın ekige ózgetetuǵın tásir diń bolıwınıń kerek ekenligin talap etedi. Sebebi $B(n) = 1$, al $B(\bar{n}) = -1$. Usınday qásiyetke iye bolǵan óz-ara tásirlesiw ullı birlesiw diń bazı bir modellerinde bar. Protonniń $p \rightarrow e^- \nu^0$ sxeması boyınsha ıdırawınıń $n \leftrightarrow \bar{n}$ -ótiwlerine alıp kele almaytuǵınlıǵı áhmiyetli. Sebebi bul tásirlesiw barionliq hám leptonliq kvant sanlarınń ayırması $B - L$ diń saqlanıwın támiyinleydi, al $n \leftrightarrow \bar{n}$ -ótiwlerine bolsa bul ayırma eki birlikke ózgeredi. Solay etip, neytron-antineytron oscillyaciyların izlew boyınsha ótkerilip atırǵan hám jobalastırılıp atırılǵan eksperimentler óz aldına ótkeriletuǵın eksperimentler emes, al protonlardıń stabilligin tekserip kóretuǵın eksperimentlerde ótkeriletuǵın qosımsha baqlawlar ǵana boladı. Vakuumdıǵı $n \leftrightarrow \bar{n}$ -oscillyaciylar $\Delta B = 2$ teńligi orınlanatuǵın óz-ara tásirlesiwlerge qarata júdá sezgir. Sebebi neytron menen antineytronniń massaları birdey hám asa ázzi tásirlesiw azǵınǵan qáddilerdiń aralasıwın boldırıw ushın jetkilikli. Eger τ_{osc} oscillyaciya dáwiri shama menen 10^{10} sek shaması teń yamasa onnan kishi bolsa, onda yadrolıq reaktorlar yamasa kúshli dál isleytuǵın tezletkishler beretuǵın neytronlardıń intensivli dástelerin paydalanǵanda (10^{17} neytron·sek⁻¹) $n \leftrightarrow \bar{n}$ -ótiwlerin tabıwǵa boladı. Dástedegi antineytronlardıń sanlıq úlesi waqıt t niń ótiwi menen kvadratlıq ósedi. Bunday t waqıttı dáste derekten detektorǵa shekem jetiw ushın jumsaydı: $N_{\bar{n}}/N_n \sim t^2/\tau_{osc}^2$.

Yadrolardaǵı $n \leftrightarrow \bar{n}$ -ótiwleri eki nuklonniń mezonniń yadrosına aylanıwınday bolıp kóriniwi kerek. Biraq bunday ótiwler yadrodaǵı antineytronniń qáddi neytronniń qáddinen uzaqta jaylasqan hám júdá úlken annigilyaciyalıq keńlikke iye bolǵanlıqtan vakuumdıǵı ótiwlerge salıstırǵanda keskin túrde basılıp qalǵan.

PETRA (PETRA: Positron-Electron Tandem Ring Accelerator) — Gamburg qalasınıń qasındaǵı DEZİ laboratoriyasındaǵı bir birine qarama-qarsı tarqalatuǵın elektron-pozitronliq dásteler. Tezletkish 1979-jıldan 1986-jılǵa shekem isledi. Saqıynasınıń uzınlıǵı 2,3 km. Maksimallıq energiya 1984-jılı alındı hám onıń shaması 2·23 GeV ke teń, maksimallıq jarqınlıǵı $L \approx 2 \cdot 10^{31}$ sm⁻²·sek⁻¹ ge teń.

Plank massası m_p —

$$m_p = (\hbar c / G_N)^{1/2}$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın massa, bul teńlikte G_N - gravitaciyalıq turaqlı.

$$m_p = 1,224(4) \cdot 10^{19} \text{ GeV} \cdot c^2 \approx 2,18 \cdot 10^{-5} \text{ g}.$$

⁵¹ Awdarıwshıdan: Rus tilindegi "stirilniy" sózi qaraqalpaq tilinde stiralizaciyalanǵan, pishtirilgen, tuqımsızlandırılǵan degen mánisti ańǵartadı.

Plank turaqlısı \hbar - hárekettiń kvantı

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05445887(57) \cdot (10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sek} = 10^{-34} \text{ Dj} \cdot \text{sek}) = \\ = 6,582173(17) \cdot 10^{25} \text{ GeV} \cdot \text{sek}.$$

Pozitroniy — kulon tartısıwı menen baylanısqa elektron hám pozitronnan turatúgın atomğa megzes sistema. L orbitalıq momenttiń shamasına baylanıslı pozitroniydiń qáddilerin $L = 1, 2, 3, 4, \dots$ bolğan jaǵdaylar ushın sáykes úlken háripler menen S, R, D, F, G, ... arqalı belgileydi. Elektron menen pozitronniń spinleriniń qosındısı S ke baylanıslı pozitroniydiń singletlik ($S = 0$ bolğan jaǵdayda parapozitroniy dep atalatuǵın hám tripletlik ($S = 1$, ortopozitroniy) halların ayırıp kórsetedi. Para- hám ortopozitroniydiń tiykarǵı halları sáykes 1S_0 hám 3S_1 arqalı belgileydi. Bul jerde joqarǵı indeks qáddiniń spinlik multipletligi $2S + 1$ di, al tómengisi J - qáddiniń múyeshlik momentin ańǵartadı.

Qáddiniń keńisliklik juplıǵı

$$P = (-1)^{L+1},$$

al qáddiniń zaryadlıq juplıǵı

$$C = (-1)^{L+S}.$$

Múyeshlik momenttiń hám zaryadlıq juplıqtıń saqlanıw nazımlarına sáykes parapozitroniydiń tiykarǵı halı eki fotonğa, al ortopozitroniydiń tiykarǵı halı úsh fotonğa ıdıraydı. Pozitroniydiń qáddilerine uqsas kvarkoniydiń (bir aromatqa kiretuǵın kvark penen antikvarktan turatúgın sistema), mısalı sharmoniydiń qáddileri de klassifikaciyalanadı.

Awdarıwshıdan:

Pozitroniy tez annigilyaciyaǵa ushıraydı hám onıń jasaw waqıtı spininen ǵárezli. Vakuumda tınıshlıqta turǵan pozitroniy ortasha $t_0 = \frac{2\hbar}{m_e c^2 \alpha^5} = 0,1244 \text{ ns}$ ishinde annigilyaciyaǵa ushıraydı. Parapozitroniy hár qaysısınıń energiyası 511 keV, impulsleri qarama-qarsı eki gamma-kvanttı shıǵarıw menen annigilyaciyalanadı. Ortopozitroniy úsh tártipke uzaq jasaydı:

$$t_1 = \frac{\frac{1}{2} 9\hbar}{2m_e c^2 \alpha^6 (\pi^2 - 9)} = 138,6 \text{ ns}.$$

Ortopozitroniydiń tiykarǵı halınıń massası (3S_1 termi) parapozitroniydiń tiykarǵı halınan $8,4 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$ qa úlken (1S_0 termi). Bul eki hallardıń arasındaqı ótiwlerdiń bolıwı múmkin.

Pomeranshuk teoreması — bóleksheler menen antibólekshelerdiń (mısalı, proton menen antiprotonniń) bir nishana menen tásirlesiwiniń kese-kesimi energiyanıń ósiwi menen bir shekke umtilatuǵınlıǵı haqqındaǵı teorema (I. Ya. Pomeranshuk, 1913—1966).

Aralıqlıq bozonlar (basqa ataması: aralıqlıq vektorlıq bozonlar, ázzi vektorlıq bozonlar) — spini birge teń, ázzi toqlar shıǵaratuǵın hám sonlıqtan leptonlar menen kvarklardıń ázzi tásirlesiwiniń júzege keltiretuǵın zaryadlangan W^+ , W^- - hám neytral bolğan Z-bóleksheler. Elektr-ázzi tásirlesiwdiń standart teoriyasına sáykes W-bozonlardıń massası shama menen 80 GeV ke, al Z-bozonniń massası shama menen 90 GeV ke teń bolıwı kerek. Usınıń menen birge olardıń belgili bolğan bólekshelerge ıdırawınıń keńligi shama menen 2 GeV ke teń.

Tap usınday bolğan massalar hám keńlik penen aralıqlıq bozonlar CERN degi proton-antiprotonlıq kollayderdegi UA1 hám UA2 dúzilislerinde 1984-jılı ashıldı. Bul ilimiy ashılıwı 1984-jılı Nobel sıylıǵı menen atap ótildi. Bul sıylıq UA1 kollaboraciyasınıń basshısı K. Rubbiyaǵa hám CERN degi proton-antiprotonlıq kollayderdi qurǵanda paydalanılğan antiprotonlardı stoxastikalıq salqınlatıw usılın islep shıqqan S. Van der Meerge berildi.

1986-jıldıń basında baqlanǵan W-ıdırawlardıń tolıq sanı shama menen 300 ge jetti (olardıń onlaǵanı $W \rightarrow e\nu$, qalǵanları $W \rightarrow \mu\nu$), al Z-ıdırawlardıń sanı shama menen 40 boldı (olardıń onlaǵanı $Z \rightarrow \mu\mu$, qalǵanları $Z \rightarrow ee$).

Gilbert keńisligi — sheksiz kóp ólshemlerge hám skalyar kóbeytiwdiń saldarınan tuwılǵan metrika boyınsha tolıq bolǵan evklid keńisliginiń ulıwmalastırılıwı bolıp tabıladı. David Gilberttiń húrmetine atalǵan.

Sızıqlı operatorlar Gilbert keńisligindegi izertlewlerdiń eń áhmiyetli obǵektleri bolıp tabıladı.

PEP (PEP: Proton — Electron — Positron (Storage Ring)) — SLAK taǵı (Stenford sızıqlı-tezletiwshi orayında) elektronlıq-pozitronlıq jıynaǵısh saqıyna. Tonneldiń uzınlıǵı 2,2 km. Dástelerdiń hár biriniń energiyası 18 GeV. Jarqınlıq $Z \cdot 10^{30} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{sek}^{-1}$. mashina 1980-jılı sentyabr ayında isley basladı. Mashinanıń atamasındaǵı protonlardıń bolıwı eń dáslep onı eń dáslep *ep*-soqlıǵısıwlardı júzege keltiriw ushın múmkin bolǵan paydalanıwdıń variantlarınıń birin sáwlelendiredi. *pep* amerikanizmi (pepper sózinen — burish) energiyanı, quwattı, ómirdi, ruwhtıń kúshin ańǵartadı.

Jarqınlıq — birlik kese-kesimdegi bir sekundaǵı soqlıǵısıwlardıń sanı - bir birine qarama-qarsı baǵıtta tarqalatuǵın dásteleri bar kollariderler dep atalatuǵın dúzilisti táriyipleytuǵın shama. Jarqınlıq L arqalı belgilenedi hám $\text{sm}^{-2} \cdot \text{sek}^{-1}$ ólshemine iye. Processtiń sm^2 lardaǵı kese-kesimi σ ǵa kóbeytilgen jarqınlıq hár sekundaǵı sáykes waqıyalardıń sanın beredi.

Kese-kesim — maydannıń ólshemine iye hám bir biri menen soqlıǵısatuǵın bólekshelerdiń tásirlesiwiniń itimallıǵın táriyipleytuǵın shama; ádette σ arqalı belgilenedi. n_1 dana bólekshege iye dástes usı dástesge normal baǵıttaǵı maydanı S bolǵan hám maydannıń bir birligine n_2/S bólekshe bolǵan plastinka tárizli nishanaǵa kelip túskendege tásirlesiwlerdiń sanı N mına ańlatpanıń járdeminde esaplanadı: $N = n_1 n_2 \sigma / S$. Ádette kese-kesim sm^2 larda yamasa barnlarda ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ sm}^2$) ólshenedi.

Dásteniń energiyası 10 - 100 GeV intervalında bolǵan jaǵdayda nuklonlardıń nuklonlar menen tásirlesiwiniń kese-kesimi shama menen 40 mb dı quraydı. Bul shama nuklonlardıń ólsheminiń shama menen 10^{-13} sm ge, yaǵnıy konfaynmenttiń radiusına teń ekenligine sáykes keledi. Energiyanıń tap sonday intervalındaǵı π -mezonlardıń nuklonlar menen tásirlesiwiniń kesimi shama menen 25 mb nı quraydı. Bul sanlar soqlıǵısıwlardıń múmkin bolǵan barlıq nátiyjelerin esapqa alatuǵın tolıq kesimler dep atalatuǵın σ_{tot} kesimlerine tiyisli:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{inel}.$$

Bul teńlikte σ_{el} arqalı serpipimli shashırawdıń kese-kesimi, al σ_{inel} arqalı barlıq serpipimli bolmaǵan, solardıń ishinde qosımsha bólekshelerdiń payda bolıwın óziniń ishine alatuǵın processlerdiń kese-kesimi belgilengen (el — ingliz tilinde, elastic — serpipimli).

Eger serpipimli shashırawlarda shashıraǵan bólekshelerdiń impulsı anıqlanatuǵın bolsa, onda kese-kesim differenciallıq dep ataladı. Serpipimli shashırawdıń differenciallıq kesimin hár qıylı túrde jazıwǵa boladı. Mısalı, $d\sigma/d\Omega$ túrinde, bul ańlatpada $d\Omega = d\varphi d \cos \theta$ - denelik múyeshtiń elementi, yamasa φ boyınsha integrallap $d\sigma/d \cos \theta$ túrinde yamasa, eń aqırında, $d\sigma/dt$ túrinde (bul jerde t arqalı 4-ólshemli berilgen impulstiń kvadratı belgilengen). 60-jıllardıń basında Gribov tárepinen islengen boljawǵa sáykes $d\sigma/dt$ ushın tán bolǵan t nıń mánisi soqlıǵısıwshı adronlardıń energiyasınıń ósiwi menen logarifmlik nızam boyınsha páseyedi. Ádette, bul qubılıstı difrakciyalıq konustıń logarifmlik tarayıwı dep ataydı.

Eger serpipimli emes tásirlesiwde reakciyanıń belgili bolǵan kanalındaǵı barlıq tuwılǵan bólekshelerdiń impulsleri ólshenetuǵın bolsa, kese-kesimdi eksklyuzivlik dep ataydı. Eger serpipimli emes tásirlesiwde ekinshi bólekshelerdiń tek birewiniń impulsı anıqlanatuǵın bolsa, onda kese-kesimdi inklyuzivlik, al bir neshe bólekshelerdiń impulsı anıqlanatuǵın bolsa, onda yarım inklyuzivlik dep ataydı.

Adronlardıń kúshli tásirlesiwiniń tolıq kesimleri bir neshe onlaǵan GeV energiyalardan baslap energiyanıń ósiwi menen ástelik penen ósedi. Teoriya asimptotalıq joqarı energiyalardaǵı kúshli tásirlesiwlerdiń tolıq kesiminiń ósiwiniń tezligi ushın shekti anıqlaydı (Fruassar shegi dep ataladı): kesim energiyanıń logarifminiń kvadratınan tezirek óse almaydı. Tájiriybelerdegi baqlanatuǵın kesimniń ósiwi ósiwdiń fruassarlıq shegine jaqın.

Ázzi 4-fermionlıq tásirlesiwlerdiń tolıq kesimleri (mısalı neytrionıń nuklonlar menen tásirlesiwiniń) E^2 túrinde ósedi (soqlıǵısıwshı bólekshelerdiń massalarınń orayı sistemasındaǵı). Bunday qásiyetti Fermi konstantası G_F tiń ólshemin dıqqatqa alǵan halda ólshemlik kóz-qaraslar tiykarında túsiniwge boladı. Haqıyqatında da, $\hbar, c = 1$ birlikler sistemasında $\sigma \sim G_F^2 E^2$ (sebebi $[G_F] = [m^{-2}]$). Aralıqlıq bozonlardıń massaları menen salıstırarlıqtay E energiyalarda ázzi kesimlerdiń ósiwiniń toqtawınıń kerek ekenligin ańǵaramız.

Elektromagnitlik

$$e^+e^- \rightarrow \text{adronlar}$$

annigilyaciyasınıń kesimi de ólshemlik kóz-qaraslardan ańsat bahalanadı: $\sigma \sim \alpha^2 E^{-2}$, bul jerde $\alpha = 1/137$. Aralıqlıq bozonlardıń massalarınan kóp úlken bolǵan energiyalarda da qattı ázzi processler tap sonday bolıp ótedi.

Simmetriya (grek tilindegi "simmetros" — birgelikte ólshengen) — qanday da bir túrlendiriwlerdegi ob'ekttiń yamasa ob'ektlardıń jıyǵınıń óziniń formasın yamasa óz-ara sáykesligin saqlawı. Simmetriya túsiniǵı gózzallıq haqqındaǵı kóz-qaras penen tıǵız baylanısqa. Usınıń menen birge haqıyqıy, joqarǵı sulıwlıq sıyqırlı hám ózine tartatuǵın simmetriyanıń úlken bolmaǵan buzılıwın talap etedi.

Fundamentallıq fizikada simmetriyalardı ádette geometriyalıq hám ishki simmetriyalar dep bóledi. Geometriyalıq simmetriyalarǵa juwap beretuǵın túrlendiriwler óziniń ishine keńisliklik hám waqıtlıq jılıwları, keńisliktegi aylanıwları, keńisliklik-waqıtlıq aylanıwları, koordinata kósherleriniń aynalıq shaǵılısıwın (úsh keńisliklik hám bir waqıtlıq) aladı. Bul túrlendiriwlerdiń hár qaysısına qarata simmetriyalarǵa (sońǵısın esapqa almaǵanda) óziniń saqlanatuǵın shaması sáykes keledi: impuls, energiya, múyeshlik moment, Lorenc momenti, keńisliklik juplıq. Waqıtlıq kósherdiń shaǵılısıwına qarata simmetriya fizikalıq processlerdiń qaytımlıǵına juwap beredi.

Ishki simmetriyalarǵa juwap beretuǵın túrlendiriwler ádette hár qıylı, biraq bir birine tuwısqan bolǵan bólekshelerdi biriktiredi. Mısalı, zaryadlıq túyinleslik bólekshelerdi sáykes antibólekshelerge, izotoplıq túrlendiriwler bir birine izotoplıq multipletlerdiń hár qıylı qurawshıların, al reńli túrlendiriwler bolsa - reńli multipletlerdiń qurawshıların hám t.b. ótkeredi. Bul simmetriyalarǵa sáykes zaryadlıq juplıqtıń, izotoplıq spinniń, reńniń hám t.b. saqlanıw nızamları juwap beredi.

Geometriyalıq hám ishki simmetriyalar bir birinen tolıq izolyaciyalanbaǵan. Mısalı, zaryadlıq túyinleslik C, aynalıq shaǵılısıw P hám waqıttır baǵıtınıń ózgeriwi T bir biri menen CPT-teorema arqalı baylanısqa. Sonlıqtan CP-invariantlıqtıń buzılıwı waqıt boyınsha qaytımlıqtıń buzılıwına alıp keledi. Basqa misal - bozonlar menen fermionlardı bir biri menen baylanıstıratuǵın supersimmetriya. Supersimmetriyanıń birinen soń ekinshisi bolatuǵın izbe-izliktegi eki túrlendiriwi keńisliklik-waqıtlıq jılıwǵa iye.

Simmetriyanıń túrlendiriwleri gruppalarǵa payda etedi. Eger túrlendiriwler bir biri menen kommutaciyanatuǵın bolsa, onda simmetriyanı abellik dep, al kommutaciyanabaytuǵın bolsa, onda abellik emes dep ataydı.

Singlet (ingliz tilindegi single — jeke) — bir bóleksherge yamasa bir halǵa iye bolǵan eń ápiwayı multiplet. Nollık emes spinge iye bolatuǵın eki bólekshes spinleriniń qosındısı nolge teń bolǵan jaǵdayda spini boyınsha singletlik haldı payda etedi.

Skeyling (ingliz tilinde scale — shkala) — fizikalıq processlerdiń avtomodelligine usaǵan masshtablıq invariantlıq.

Bérken skeylingi (J. Bjorken) leptonlardıń adronlar menen tereń-serpimli emes soqlıǵısıwın táriyipleydi. Onıń mánisi minadan ibarat: bul processlerdi táriyipleytuǵın bazı bir birlikke iye emes funkciyalar bolıp tabılatuǵın tereń-serpimli emes formfaktorlar ólshem birligine iye bolmaǵan tek bir $x = q^2/2\nu$ ózgeriwshisinen ǵárezli boladı. Bul jerde q^2 - leptonnan nuklonǵa berilgen tórt ólshemli q impulsiniń kvadratı, al $\nu = qp$, p arqalı nuklonnıń 4-impulsit belgilengen

Nuklon tınıshlıqta turatuǵın koordinatalardıń laboratoriyalıq sistemasında $p = m$ hám

$\nu/m = E - E'$. Bul ańlatpalarda m - nuklonnıń massası, E - leptonnıń dáslepki, al E' akırǵı energiyası. Demek, laboratoriyalıq sistemada ν/m lepton tárepten nuklonga berilgen energiya. Běrken skeylingi qubılısı da, tájiriybelerde baqlanatuǵın oǵan sáykes kelmeytuǵın jaǵdaylar da kvantlıq xromodinamika tárepinen túsindiriledi.

KNO skeylingi (Koba, Nilsen, Olesen — Z. Koba, N. Nielsen, R. Olesen) kóp sanlı adronlardıń tuwılıwı waqıyalarınń kópligi boyınsha tarqalıwdı táriyipleydi. Adronlardıń ortasha kópligi bolǵan $\langle n \rangle$ shamasınıń soqlıǵısıwshı adronlardıń energiyalarınń ósiwi menen úlkeyetuǵınlıǵı belgili. KNO skeylingi mánisi mınadan ibarat: n kópligi boyınsha waqıyalardıń tarqalıwı tek $n/\langle n \rangle$ shamasınan ǵárezli hám soqlıǵısıwshı bólekshelerdiń energiyasınan ǵárezli emes. Solay etip, kóplik boyınsha tarqalıwdıń keńligi ortasha kóplik $\langle n \rangle$ ge proporcional, al $\sqrt{\langle n \rangle}$ shamasına proporcional emes ósedı (mısalı Puasson tarqalıwındaǵıday). Tájiriybede KNO skeylingi juwıq túrde júzege keledi CERN deǵı $p\bar{p}$ kollayderiniń energiyasınday energiyalarda tekserilgen.

Feynman skeylingi (R. Feynman) joqarı energiyalarǵa iye bolǵan adronlardıń soqlıǵısıwlarında kóp sanlı tuwılıwlar processindeǵı bólekshelerdiń spektrlerin táriyipleydi. Onıń mánisi dáslepki bóleksheler joqarı energiyalarǵa iye bolǵanda tuwılǵan bólekshelerdiń spektriniń forması sol dáslepki bólekshelerdiń energiyalarınan ǵárezli emes. Onıń mánisi tuwılǵan bólekshelerdiń p_t boylıq impulsiniń p_t kóldeneń impulsına qatnası bolǵan ólshem birligi joq x shamasınan ǵárezli. Bul nızamlıq kosmoslıq nurlardı izertlewdiń barısında tabıldı. 60-jıllardıń aqırında Serpuxov tezletkishi isley baslaǵanda bul qubılıs tezletkishlerdiń járdeminde dállicktiń joqarı qáddinde úyrenildi. Tap sol waqıtları onıń partonlıq modeldiń tiykarındaǵı tallanıwı Feynman tárepinen berildi hám qubılıstıń ózi "Feynman skeylingi" atamasına iye boldı.

SLK (SLC — SLAC Linear Collider) — SLAQ sızıqlı kollayderi. Stenford sızıqlı-tezletkish orayında 1987-1988 jılları iske túsken elektron-pozitronlıq kollayder. Z-bozonlardıń tuwılıwı menen ıdırawın baqlaw ushın SLK arnawlı túrde qurılǵan. Elektronlıq hám pozitronlıq dásteniń ekewi de bir tezletkishte 50 GeV energiyaǵa shekem tezletiledi. Kollayderdiń forması planda rushkası sızıqlı tezletkishi bolǵan tennis raketkasın eske túsiredi. Onnan shıǵıp, eki dásteniń joqarǵı eki doǵa boyınsha bóliniwi hám raketka sheńberiniń joqarı doǵasında soqlıǵısıwı kerek.

Quyash neytrinosı — Quyashtıń ishindeǵı yadrolıq reaksiyalardıń nátiyjesinde payda bolatuǵın neytrinolar. Quayash neytrinosınıń tiykarǵı dereǵı vodorod cikliniń yadrolıq reaksiyaları bolıp tabıladı. Usınıń nátiyjesinde tórt proton ${}^4\text{He}$ yadrosına, eki pozitronga hám eki neytrinoǵa aylanıwı kerek. Vodorodlıq cikl tómendegidey etaplardan turadı:

1. p niń janıwı:

$$99,75 \%: p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e, E_{\max} = 0,42 \text{ MeV}.$$

$$0,25 \%: p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e, E_{\max} = 1,44 \text{ MeV}.$$

2. d niń janıwı:

$$d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma, Q = 5,5 \text{ MeV}.$$

3. ${}^3\text{He}$ diń janıwı:

$$86 \%: {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p, Q = 12,9 \text{ MeV}.$$

$$14 \%: {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma, Q = 1,59 \text{ MeV}.$$

4. ${}^7\text{Be}$ niń janıwı:

$$90 \%: {}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e, E_\nu = 0,861 \text{ MeV},$$

$$10 \%: {}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \nu_e, E_\nu = 0,383 \text{ MeV},$$

$$0,015 \%: {}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma, Q = 0,133 \text{ MeV}.$$

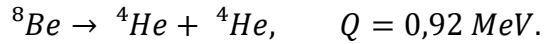
5. ${}^7\text{Li}$ niń janıwı:

$${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}, \quad Q = 17,3 \text{ MeV}.$$

6. ${}^8\text{B}$ diń ıdırawı:

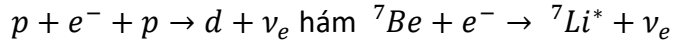
$${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e, \quad E_\nu^{\max} = 14,06 \text{ MeV}.$$

7. ${}^8\text{Be}$ diń ıdırawı:



Bul dizimde E_ν arqalı aqırǵı hal eki bólekshelik bolǵan reakciyalardaǵı neytrinionıń energiyası; E_ν^{max} arqalı úsh bóleksheli aqırǵı hal orın alǵandaǵı neytrinionıń maksimallıq energiyası; Q arqalı reakciyadaǵı yamasa ıdırawdaǵı tolıq energiyanıń bólip shıǵarılıwı belgilengen. Procentler berilgen tiptegi reakciyanıń shıǵıwın ańǵartadı.

Kórinip turǵanınday, ${}^8\text{B}$ ıdırawında payda bolatuǵın neytrino eń úlken energiyaǵa iye boladı. Bunnan keyin, energiyanıń tómencilew tártibinde



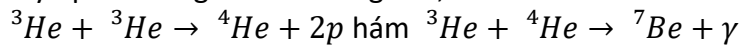
reakciyaları turadı. Barlıq neytrinolardıń tiykarǵı úlesi $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ reakciyasınıń saldarınan júzege keledi hám eń kishi bolǵan maksimallıq energiyaǵa (0,42 eV) iye.

Usı waqıtlarǵa shekem Quıyash neytrinosın izlew tek bir dúziliste (R. Devis hám xızmetkerleri, AQSh) alıp barıldı. Bul jumislardıń barlıǵı tiykarınan eń úlken energiyaǵa iye bolǵan, "bor" neytrinoları dep atalatuǵın neytrinoları izlewge qaratıldı. "Berilliy" neytrinoları menen $p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e$ reakciyasında tuwılǵan neytrinolar ádewir tómencilew registraciyalandı. Olardıń maksimallıq energiyası Devistiń detektorınıń bosǵasınıń qáddinen tómencilewde jaylasqan.

Devis eksperimenti 1,5 km tereńlikte Xoumsteyk Mayn shaxtasında ótkerildi. Neytrinionıń detektorı bolıp perxloretillen (C_2Cl_4) menen toltırılǵan bak xızmet etti. B.Pontekorvo tárepinen usınılǵan



reakciyası paydalanıldı (${}^{37}\text{Ar}$ izotopınıń yarım ıdıraw dáwiri $T_{1/2} = 35$ kún). Perxloretillenniń 600 tonnasında 1970-jıldan 1984-jılǵa shekem hár eki sutkada shama menen bir neytrino registraciyalandı. Bul máńis $2,0 \pm 0,3$ SNU (1 SNU shaması nishananiń bir atomınıń bir sekundaǵı 10^{-36} v-tutıw reakciyasına sáykes keledi). Bul sandı teoriyalıq boljawlar menen salıstırıw kerek: 7 SNU. Teoriya menen tájiriybeniń arasındaǵı bunday ayırmanıń mınaday faktorlar menen baylanıslı bolıwı múmkin: Quyashtıń ximiyalıq kuramınıń detalları, "bor" neytrinoları payda bolatuǵın Quyashtıń oraylıq bólimdegi turbulent aǵıslar,



reakciyalarınń procentlik úlesiniń isenimli emes bahalanıwı. Sonıń menen birge jáne bir gipoteza bar: neytrinoliq osciyallyaciyalardıń saldarınan Quyashtan Jerge shekemgi jolda elektronlıq neytrinionıń 2/3 bólegi tap sonday kishi energiyalarda is júzinde baqlanbaytuǵın myuonlıq hám tau-netrinoǵa aylanadı.

"Bor" neytrinosınan "protonlıq" neytrinolardıń parqı



reakciyalarında payda bolǵan neytrinolar isenimli túrde boljanadı. Sebebi bul reakciyalardıń kesimleri tómengi kulonlıq barerdiń saldarınan temperaturadan ázzirek gárezli. Energiyası kishi bolǵan protonlıq neytrinionı effektivli túrde baqlaw ushın tómengi bosǵaǵa iye detektor kerek. Usınday detektor sıpatında neytrinionı registraciyalaw bosǵası 0,231 MeV bolǵan ${}^{71}\text{Ga}$ detektorı xızmet ete aladı. Bir sutkada bir "protonlıq" neytrinionı registraciyalay alatuǵın 60 tonna galliy quyılǵan detektordı soǵıw jobalastırılmaqta.

Arnawlı salıstırmalıq teoriyası (AST) — barlıq fizikalıq processlerdiń keńisliklik-waqıtlıq qásiyetleriniń fundamentallıq fizikalıq teoriyası.

Arnawlı salıstırmalıq teoriyasınıń tiykarında eki princip jatadı. Birinshi principke sáykes jabıq fizikalıq sistemaniń ishinde ótkerilgen hesh bir fizikalıq tájiriybe bul sistemaniń tınıshlıqta turǵanlıǵın yamasa tuwrı sıızılıq teń ólshewli qozǵalıp baratırǵanlıǵın (sheksiz qashılıqtaǵı juldızlar sistemasına salıstırǵanda). Bul principiti Galiley-Eynshteyn principı, al sáykes esaplaw sistemaların inerciyalıq dep ataydı.

Ekinshi principke sáykes fizikalıq obǵektler menen tásirlesiwlerdiń tarqalıwınıń shekli tezligi bar (dúnyalıq c konstantası, c tezligi menen fotonlar ("jaqtılıq") hám basqa da massaǵa iye emes

bóleksheler vakuumda qozǵaladı). Solay etip, hár qıylı inerciallıq esaplaw sistemalarındaǵı barlıq fizikalıq qubılıslar, solardıń ishindegi jaqtılıqtıń tarqalıwı (usıǵan sáykes tábiyattıń barlıq nızamları) pútkilley birdey bolıp kórinedi. Tábiyattıń nızamlarınıń usınday invariantlıǵın Lorenclik invariantlıǵı dep ataladı.

Tábiyattıń nızamlarınıń Lorenclik invariantlıǵınıń eki waqıyanıń (dúnyalıq noqattıń) arasındaǵı keńisliklik qashıqlıqlar menen waqıtlıq aralıqlardıń bir esaplaw sistemasınan ekinshi esaplaw sistemasına ótkende ǵana orınlanatuǵınlıǵın tekserip kóriw qıyın emes. Atap aytqanda, bir koordinatalar sistemasındaǵı bir waqıtta júzege keletuǵın hám keńislikte bir birinen qashıqlatılǵan eki waqıya basqa esaplaw sistemasında bir waqıtta júzege kelmeydi. Solay etip, Nyuton mexanikasında orın alatuǵın bir waqıtlıq túsinigi óziniń mánisin joǵaltadı.

Burıńǵı inerciallıq sistemaǵa salıstırǵanda v tezligi menen qozǵalatuǵın jańa inerciallıq a hám b eki waqıyasınıń keńisliklik hám waqıtlıq koordinatalarınıń (x, y, z, t) arasındaǵı ayırmanıń $(x = x_a - x_b, y = y_a - y_b, z = z_a - z_b, t = t_a - t_b)$ túrlendiriwleri Lorenc túrlendiriwleri dep ataladı hám mınaday túrge iye boladı (v tezligi x kósheriniń baǵıtında bolǵan jaǵday ushın)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, y' = y, z' = z, t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Bul túrlendiriwlerdiń $c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ intervalın ózgerissiz (invariant) qaldıratuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı.

x^0, x^1, x^2, x^3 (ct, x, y, z) koordinataların Minkovskiy keńisligindegi tórt ólshemli vektordıń koordinataları dep qarawǵa boladı. Lorenc túrlendiriwleri bul keńisliktegi psevdoaylanıwlarǵa juwap beredi. Bólekshelerdiń (yamasa bóleksheler sistemasınıń) energiyası E menen impulsı $\mathbf{p}c$ da tórt ólshemli vektordı payda etedi. Usınıń menen birge bólekshelerdiń massası m invariant bolıp tabıladı: $m^2 c^4 = E^2 - \mathbf{p}^2 c^2$.

Keńisliklik aylandırıwlardıń generatorları menen bir qatarda keńisliklik koordinatalıq kósherler boyındaǵı úsh lorenclik túrlendiriwlerdiń generatorları algebranı hám onıń menen baylanıslı bolǵan Lorenc gruppasını payda etedi. Lorenc gruppasınıń $SL(2, C)$ gruppasınıń bir mánisli kórinisi (biraq óz-ara bir mánisli emes) ekenligin kórsetiwge boladı. Eger Lorenc Gruppasınıń generatorlarına tórt keńisliklik-waqıtlıq jıljıwlardıń generatorların qosatuǵın bolsaq, onda Puankarenıń algebrası menen gruppasını alamız.

Lorenc vektorlarınıń eki tipi bar: kontrvariantlıq $x^\mu = x^0, x^1, x^2, x^3$ hám kovariantlıq $x_\mu = x_0, x_1, x_2, x_3$. Olar $x_\mu = \eta_{\mu\nu} x^\nu$. Bul teńlikte $\eta_{\mu\nu}$ arqalı metrlik tenzor belgilengen, al qaytalanatuǵın indeksler (olar únsiz indeksler dep ataladı) boyınsha summalaw názerde tutiladı. Metrlik tenzorda tek diagonallıq qurawshılar nolge teń emes $\eta_{00} = -\eta_{11} - \eta_{22} - \eta_{33} = 1$. Geyde bunı $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ túrinde belgileydi. Eki u_μ hám v_μ vektorınıń skalyar kóbeymesi metrlik tenzordıń járdeminde payda etiledi:

$$uv = u_\mu v_\mu = u_\mu v^\nu = u_\mu v_\nu \eta^{\mu\nu} = u^\mu v^\nu \eta_{\mu\nu} = u^0 v^0 - u^1 v^1 - u^2 v^2 - u^3 v^3 = u^0 v^0 - \mathbf{uv}.$$

Bul kitapta bizler Feynman qabil etken tártip boyınsha júrip, kovariantlıq hám kontrvariantlıq indekslerdiń arasındaǵı ayırmaǵa itibar bermeymiz hám, sonlıqtan, tórt ólshemli vektorlardıń skalyar kóbeymesin bilayınsha jazamız:

$$u_\mu v_\mu = u_0 v_0 - u_1 v_1 - u_2 v_2 - u_3 v_3.$$

(salıstırmalıq teoriyası haqqındaǵı paragrafqa qarańız, bul paragrafta mınaday eskertiw islengen:

Bul jerde de, keyin de, birdey bolǵan indekslerdiń jubı ("únsiz" indeks dep atalatuǵın) summalawdı ańǵartadı. Tórt ólshemli indeksler bolǵan jaǵdayda keńisliklik qurawshılardıń kóbeytiwshileriniń aldına qosımsha minus belgisin qoyıw menen júzege keltiriledi. Sonlıqtan tórt ólshemli a_μ hám b_μ vektorlarınıń kóbeymesi mınaǵan teń:

$$ab = a_\mu b_\mu = a_0 b_0 - a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3.$$

Waqıtlıq hám keńisliklik qosılıwshılardıń belgileriniń hár qıylı bolıwı Minkovskiy keńisliginiń

psevdoevklidligi menen baylanıslı.

Simmetriyanıń spontan buzılıwı — simmetriyanıń bunday buzılıwında lagranjian bazı bir simmetriyaǵa iye boladı, biraq usı lagranjian táriyipleytuǵın ornıqlı fizikalıq hal, sonıń ishinde vakuum bunday simmetriyaǵa iye bolmaydı. Bunday jaǵdayda simmetriyalı hal ornıqlı emes hám oǵada kishi bolǵan sırtqı tásirlerde simmetriyalı bolmaǵan ornıqlı hallarǵa ótedi. Mısallar: ushınıń ústinde vertikal baǵıtta turǵan iyne qulaydı, al pivo quyılatuǵın shiysheniń túbiniń orayına muqiyatlı túrde jaylastırılǵan dán domalaydı hám usıǵan sáykes cilindrlik simmetriyanı buzadı.

Maydannıń kvantlıq teoriyasında ózine ózi tásir etiw energiyası (yaǵnıy ózi menen óziniń arasındǵı sızıqlı bolmaǵan tásir etisiw) $\lambda^2(\varphi^2 - \eta^2)$ túrine iye bolǵan φ skalyar maydanınıń tásirinde júzege keltiriwge boladı. Bul ańlatpada λ — ólshem birligine iye bolmaǵan parametr, al η parametriniń birligi massanıń birligindey. Bunday jaǵdayda φ maydanı barlıq keńislikte nolge emes al η shamasına teń bolǵanda ózine ózi tásir etiw energiyası maksimallıq (bul ornıqlı vakuumǵa sáykes keledi). Bul, mısalı, $\lambda^2(\varphi^2 - \eta^2)$ tipindegi ózi ózine tásir etiw bolǵan jaǵdayda kórinip edi.

Birden-bir elektr-ázzi tásirlesiwdiń teoriyasında tórt massaǵa iye bolmaǵan vektorlıq maydanlar menen kalibrovkalıq túrde tásir etisetuǵın φ skalyar maydanlarınń izotoplıq dubleti bar. Simmetriyanıń $SU(2) \times U(1)$ den $U(1)_{em}$ ge shekem spontan buzılıwınıń nátiyjesinde φ maydanı nollik bolmaǵan vakuumlıq η mánisine iye boladı, W^+ —, W^- — hám Z -bozonlar $e\eta$ shamasındǵı massaǵa iye boladı (e arqalı elektr zaryadı belgilengen) hám tek foton ǵana massaǵa iye bolmay qaladı. Bul qubilis "Xiggs mexanizmi" dep ataladı. Skalyar maydannıń baslanǵısh izotoplıq dubletinen tek bir neytral maydan — Xiggs bozonı maydanı dep atalatuǵın maydan qaladı. Atap aytqanda, Xiggs bozonları tájiriybelerde ele tabılǵan joq bolǵanlıqtan, tábiyatta tap usınday kartinanıń júzege keletuǵınlıǵı házirshe dálillengen joq. Olardı izlew joqarı energiyalar fizikasınıń áhmiyetli máseleleriniń biri bolıp tabıladı.

Supermultiplet — fermionlar menen bozonlardı biriktiretuǵın supersimmetriyalı multiplet. Eń ápiwayı supermultiplet bir vektorlıq hám bir spinorlıq bóleksherge iye boladı (mısalı foton hám massaǵa iye bolmaǵan neytral fotino). Bunday supermultipletti $N = 1$ - supersimmetriyanıń kalibrovkalıq multipleti dep ataydı. $N = 1$ - supersimmetriyada supermultiplettiń jáne bir túri bar - ol mayoran neytrinosı menen eki spinge iye bolmaǵan eki massasız bozonǵa iye kirallıq supermultiplet: skalyarlıq hám psevdoskalyarlıq. Keńeytilgen supersimmetriyanıń variantlarında ($2 \leq N \leq 8$) supermultipletler kóp sanlı bólekshelerge iye.

Superstrunalar — sızıqlı ólshemleri Plank uzınlıǵı $l \approx l_P = 1/m_P \approx 10^{-33}$ sm, al ózine tán bolǵan kerimniń mánisi m_P^2 shamasındǵı (m_P arqalı Plank massası belgilengen) gipotezalıq ob'ektler. Superstrunanıń tiykarǵı halına massaǵa iye bolmaǵan (yamasa m_P nıń masshtabındǵı derlik massaǵa iye bolmaǵan) bóleksheler juwap beredi. Bunday bólekshelerdiń sanı strunanıń túri hám ishki simmetriyasınıń gruppası boyınsha anıqlanadı. Superstrunanı qozdıruw ózine tán masshtabı, "adımi" m_P bolǵan qáddilerdiń sheksiz spektrin payda etedi. Solay etip, kvantlıq-maydanlıq kóz-qaraslar boyınsha bir superstrunanıń kvantlıq teoriyası sheksiz kóp sanlı kvantlıq maydanlardıń teoriyası bolıp tabıladı eken.

"Super" prefiksi (túbir aldı qosımtası) superstruna tárepinen táriyplenetuǵın bólekshelerdiń spektriniń supersimmetriyaǵa, yaǵnıy bozon-fermionlıq simmetriyaǵa iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Atap aytqanda, bozonlıq hám fermionlıq qozıwlarıń sanları birdey, al olardıń massaları azǵınǵan.

Tuyıq emes, ashıq strunalarǵa ("tayaqshalarǵa") spinleri 1 ge hám $\frac{1}{2}$ ge teń bóleksheler, al tuyıq superstrunalarǵa ("saqıynalarǵa") spinleri 2, $\frac{3}{2}$, 1, $\frac{1}{2}$ hám 0 bolǵan bóleksheler juwap beredi. Qarama-qarsılıqsız superstrunalar teoriyasın qurıw múmkin bolǵan keńislik-waqtıttıń minimallıq ólshemi 10 ǵa teń: olardıń biri waqtıtlıq, al qalǵan toǵız keńisliklik koordinata. "Saqıynalar" teoriyasınıń ishten ózi-ózi menen úylesken bolıwı ushın (anomaliyalarǵa iye bolmawı ushın) superstrunanıń kalibrovkalıq simmetriyasınıń gruppası $E_8 \times E'_8$ bolıwı kerek. 10-ólshemli

keńislikti kompaktifikaciya qılǵanda altı ólshem ózine tán ólshemi $1/m_P$ shamasına teń bolǵan kompaktlı kóp túrlilik, al qalǵan tórt ólshem "biziń" ádettegi Minkovskiy keńisligin payda etedi. Kompaktifikaciya E_8 gruppası buzıladı ($E_8 \rightarrow E_6 \rightarrow SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3)_c \times U(1)$ sxeması yamasa qanday da bir basqa izbe-izlikte). E'_8 gruppaga kelsek, onda ol "biziń" bóleksheler menen tek gravitaciyalıq tásirlesetuǵın gipotezalıq bólekshelerdi táriyipleydi.

Superstrunalar teoriiyası menen ol "barlıǵınıń teoriiyası" - barlıq bóleksheler menen gravitaciyanı da óziniń ishine alatuǵın tásirlesiwlerdiń teoriiyası bolıp esaplanadı degen úmit baylanıslı. Biraq, usı ullı maqsetke jeńil bolǵan hám tuwrı jol házirshe kórinip turǵan joq.

Sbóleksheler (ingliz tilindegi sparticles) — gipotezalıq bóleksheler — ádettegi bólekshelerdiń super serikleri. Sbólekshelerdiń (superbólekshelerdiń) bar ekenligi supersimmetriyaǵa tiykarlanǵan teoriyalıq modeller tárepinen boljanadı. Superbólekshe ádette sáykes bóleksheniń simvolı, biraq ústine tilda qoyıw menen belgilenedi. Mısalı, $\tilde{\gamma}, \tilde{e}, \tilde{q}$ (shtrixlar γ', e', q' yamasa qalpaqlar $\hat{\gamma}, \hat{e}, \hat{q}$ júdá siyrek qullanıladı). Usıǵan baylanıslı antibólekshelerdi belgilew ushın tilda belgisi siyreklew paydalanıla basladı hám onıń ornına sıziqsha belgisi paydalanılıp atır. Hár qıylı sbólekshelerdiń atamasın saylap alıwda eleǵe shekem pikirlerdiń birligi qalıplesken joq. Fotino menen glyuino terminleri ilimge nıq túrde kirdi. Kvarklar menen elektronlardıń superseriklerin ádette skvarklar hám selektronlar dep ataydı. W- hám Z-bozonlardıń superserikleri vino hám zino, al xiggs bozonı —sxiggs yamasa xiggsino atamasına iye boldı.

Elementar bólekshelerdiń birdeyligi (tojdestvennost elementarnıx shastic) — elementar bólekshelerdiń eń fundamentallıq qásiyetleriniń biri, onıń mánisi berilgen sorttaǵı bólekshelerdiń barlıǵı da birdey. Álemniń baqlanatuǵın bóliminde shama menen 10^{80} elektron bar. Olardıń barlıǵı da birdey hám olardıń bir birinen parqı joq. Bul gápler protonlarǵa da, neytronlarǵa da, usınday bólekshelerden turatuǵın atomlarǵa da tiyisli. Joqarı energiyadaǵı soqlıǵısıwlar da tuwılatuǵın hár bir berilgen tiptegi ornıqlı emes bólekshelerdiń de bir birinen parqı joq. Usınıń menen birge berilgen tiptegi barlıq bozonlar Álemde olardıń orınların almasırap qoyıwǵa qarata simmetriyalı halda, al barlıq fermionlar - antisimmetriyalıq halda turadı. Bozonlar menen fermionlardıń barlıq qásiyetleri bozonlar ushın Boze-Eynshteyn statistikada hám fermionlar ushın Fermi-Dirak statistikasında ózleriniń kórinuwin tabadı. Házir ǵana shıǵarılǵan foton dúnyadaǵı barlıq fotonlar menen simmetriyalanǵan, al házir ǵana tuwılǵan elektron qalǵan elektronlar menen antisimmetriyalanǵan. Maydannıń kvantlıq teoriiyasında bozonlar menen fermionlardıń bul qásiyetleri bozonlardıń tuwılıw operatorlarınıń bir biri menen kommutaciyanatuǵınlıǵı, al fermionlardıń tuwılıw operatorlarınıń bir biri menen anti kommutaciyanatuǵınlıǵı menen támiyinlenedi.

Joqarıda aytılgan jaǵdaydıń durıs yamasa durıs emes ekenligine qarsılıq kórsetiwge boladı. Sebebi bólekshelerdiń birdeyligi eksperimentlerde shekli dállikte ǵana tekseriledi. Al joqarıda keltirilgen bólekshelerdiń birdeyligi haqqındaǵı tastıyıqlaw absolyut xarakterge iye. Hár qıylı elektronlardıń bir birinen "azmaz" bolsa da ayırmasınıń bolıwı múmkin be? Bul sorawǵa beriletuǵın juwap minadan ibarat: házirgi zaman teoriiyasınıń matematikalıq apparatı "azmazǵa" jol qoymaydı — júdá kishi bolǵan ayırma erkinlik dárejeleriniń (sortlardıń sanın) sanın diskret túrde ózgeriske ushıratadı hám olardıń statistikasıń ózgeredi. Sonlıqtan, biz búgin birdeylik tekserilip kórilgen dállikte fenomenologiyalıq parametrlestiriwdi qalayınsha ámelge asırıwdı bilmeymiz. Bunday parametrizaciya maydannıń kvantlıq teoriiyasın revolyuciyalıq qayta qurıwdı talap etken bolar edi. Bul máseledegi isenimli usınıstı men usı waqıtqa shekem ushıratpadım.

Toq — bólekshelerdiń berilgen vektorlıq maydan menen tásirlesiwini anıqlaytuǵın fizikalıq shama. Mısalı, elektromagnit toq bólekshelerdiń elektromagnit maydanı menen tásirlesiwini anıqlaydı. Lagranjiandaǵı bul tásirlesiwge sáykes keletuǵın aǵza $eA_\alpha j_\alpha$ túrine iye. Bul jerde e - ólshem birligine iye bolmaǵan konstanta ($\hbar, c = 1$ sistemasında $e^2/4\pi = \alpha \approx 1/137$); A_α - elektromagnit maydandı táriyipleytuǵın tórt ólshemli vektor ($\alpha = 0, 1, 2, 3$); j_α - ol da tórt ólshemli vektor bolıp tabılatuǵın elektromagnit toq. A_α shamasınıń ólshemi massanıń

ólshemindey: $[A_\alpha] = [m]$, j_α shamasınıń ólshemi $[m^3]$ tiń ólshemindey. $A_\alpha j_\alpha$ ańlatpası

$$A_\alpha j_\alpha = A_0 j_0 - A_1 j_1 - A_2 j_2 - A_3 j_3$$

skalyar kóbeymesin ańlatadı.

Maydannıń kvantlıq teoriyasında elektronnıń elektromagnitlik toǵınıń operatori ψ elektrondı joq qılıw hám pozitrondı tuwdırıw operatori $\bar{\psi}$ menen bilayınsha ańlatıladı:

$$j_\alpha = \bar{\psi} \gamma_\alpha \psi.$$

Bul teńlikte γ_α arqalı Diraktıń tórt matricası belgilengen. Kvarklardıń elektromagnit toqları $2/3$ ke jáne $-1/3$ ke teń bolǵan bólshek elektr zaryadların esapqa alatuǵın qosımsha kóbeytiwshilerge iye boladı.

Leptonlar menen kvarklardıń elektromagnit toqlarınıń elektromagnit maydanınıń kvantları bolǵan fotonlardıń deregi bolıp tabılauıńında, leptonlar menen kvarklardıń ázzi toqları ázzi tásirlesiwlerdiń alıp júriwshileri bolǵan aralıqlıq vektorlıq W^+ , W^- hám Z -bozonlardıń derekleri bolıp tabıladı. W^\pm zaryadlangan bozonların shıǵaratuǵın ázzi toqlardı zaryadlangan toqlar dep ataydı. Al neytral bolǵan Z bozonların shıǵaratuǵın toqlardı neytral toqlardı dep ataydı. Taza vektorlıq elektromagnitlik toqtan ayırması, ázzi toqlar vektor menen aksiallıq vektordıń qosındısı bolıp tabıladı. Ázzi toqlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw barlıq ázzi processler ushın juwapker.

Barlıq kúshli tásirlesiwler segiz glyuonı bar segiz reńli toqlardıń óz-ara tásirlesiwleri menen táriyiplenedi.

Ullı birlesiw modellerinde asa awır bolǵan X - hám Y -bozonlarınıń shıǵarılıwı menen jutılıwına juwapker bolǵan toqlar bar; bul toqlar kvarklardı antikvarklarǵa yamasa antileptonlarǵa aylandıradı. Bul toqlardıń óz-ara tásirlesiwleri protonnıń ıdırawına alıp keledi.

Fenomenologiya — házirgi teoriyalıq fizikada qubılıslardı (empirikalıq maǵlıwmatlardı) olardıń tereń tábiyatın, ishki mexanizmin (grekshe "fenomen"- bolıp tabıladı degen mánisti beredi) anıqlamay, qubılıslardıń sırtqı belgilerine belgili bolǵan nızamlardı qollanıwdıń tiykarında klassifikaciyalaw.

Fermionlar — yarım pútin spinge iye bolǵan elementar yamasa quramlıq bóleksheler. Fermionlar Fermi-Dirak statistikasına baǵınadı. Berilgen kvantlıq halda berilgen tiptegi tek bir fermion ǵana jaylasadı. Bul principiti Pauli principini dep ataydı (W. Pauli, 1900— 1958; Paulidıń ózi bul principiti qadaǵan etiw principini dep atadı). Elektron hám basqa leptonlar, kvarklar, proton hám basqa barionlar, yarım pútin spinge iye atom yadroları menen atomlar fermionlar bolıp tabıladı. "Fermion" sózi Italiyalı fizik Fermidıń (E. Fermi, 1901—1954) familiyasınan kelip shıqqan.

FIAN — SSSR Ilimler Akademiyasınıń П. N. Lebedev atındaǵı fizikalıq institutı (Moskva).

FNAL (FNAL — Fermi National Accelerator Laboratory) — Fermi milliy tezletkishler laboratoriyası (Shikagonıń qasındaǵı Bataviya, AQSh).

Foton — massası nolge teń hám spini birge teń elementar bólekshe. Foton hesh qanday zaryadqa iye emes hám haqıyqıy neytral bólekshe bolıp tabıladı. Óziniń energiyasınıń ǵárezli foton radiotolqınlar, ádettegi jaqtılıq, rentgen nurları, qattı γ -kvantlar túrinde háreket etedi. Zaryadlangan bóleksheler tárepinen fotonlardıń jutılıwı menen shıǵarılıwı barlıq elektromagnitlik processlerdiń tiykarında jatadı.

Funkcional — bazı bir sıızqlı keńisliktegi (funkciyalar keńisligindegi) sanlı funkciya. Mısalı, berilgen uzınlıqqa iye tuyıq iymeklik penen sheklengen maydan funkcional bolıp tabıladı.

Funkcionalıq integral — kontinuallıq integral, jollar boyınsha integral - integrallawdıń sanı sheksizlikke umtılgandaǵı kóp ret integrallawdıń shegi. !

Xiggs bozonları — simmetriyanıń spontan buzılıwı orın alatuǵın elektr-ázzi tásirlesiwdegi hám basqa da teoriyalardaǵı áhmiyetli orındı iyeleytuǵın spinge iye emes bóleksheler.

Awdarıwshıdan - Xiggs bozonı, xiggson (ingliz tilinde *Higgs boson*) — elektr-ázzi simmetriyanıń spontan buzılıwınıń xiggs mexanizminen zárúrli túrde kelip shıǵatuǵın elementar bóleksheler fizikasınıń standart modelindegi elementar bólekshe (bozon). Onıń ashılıwı Standart modeldi juwmaqlaydı. Bul modeldiń sheklerinde bozonlar sıyaqlı elementar bólekshelerdiń inert

massasına juwap beredi. Xiggs maydanınıń járdeminde ázzi tásirlesiwdi alıp júretuǵın bólekshelerdiń (W- hám Z-bozonlar) inert massaǵa iye bolatuǵınlıǵı hám kúshli tásirlesiwdi alıp júretuǵın (glyuonlardıń) jáne elektromagnit tásirlesiwdi alıp júretuǵın (fotonlardıń) massasınıń joq ekenligi túsindiriledi. Qurılısı boyınsha Xiggs bozonı skalyar bóleksheler bolıp tabıladı, yaǵnıy nollik spinge iye boladı.

Massası $125,26 \pm 0,21 \text{ GeV}/c^2$, jasaw waqıtı $1,56 \cdot 10^{-22} \text{ sek}$.

CERN (CERN — Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire) — Yadrolıq izertlewlerdiń Evropalıq shólkemi, Jenevanıń qasında jaylasqan. Házirgi waqıtları atamadaǵı Conseil sózi Organisation sózi menen alıstırılǵan, biraq CERN ataması saqlandı.

CPT-teorema ("ce-pe-te" dep oqıladı) — maydanniń kvantlıq teoriyasınıń fundamentallıq teoreması. Bul teorema boyınsha teoriyanıń teńlemeleri úsh túrlendiriwdiń kóbeymesine qarata invariant: zaryadlıq túyinleslik C ǵa, keńisliklik inversiya P ǵa hám waqıttıń ótiw baǵıtınıń keri qaray ózgeriw T ǵa. Eger tábiyatta bazı bir process júzege keletuǵın bolsa, onda tábiyatta CPT-túyinles bolǵan processtiń júriwi de múmkin. Bunday jaǵdayda barlıq bóleksheler antibóleksheleri menen alıstırılǵan, spinniń proekciyalrı belgisin ózertken, al processtiń baslanǵısh hám aqırǵı halları orın alıstırılǵan. CPT-teoremadan bóleksheler menen antibólekshelerdiń massaları menen jasaw waqıtlarınıń birdey, olardıń magnit momentleriniń belgisi boyınsha ajratatuǵınlıǵı hám gravitaciyalıq maydan menen tásirlesiwiniń birdey bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Tájiriybelerde CPT-invariantlıqtıń buzılıwınıń bir de jaǵdayı anıqlanǵan joq. P- hám C-invariantlıqtıń buzılıwınıń ashılıwı (1956-jılı) menen CP-invariantlıqtıń buzılıwınıń ashılıwı (1964-jılı) fizikanıń teoriyalıq apparatına derlik tásir etken joq. Bul apparat usı qubılıstı ózine tábiyiy túrde qosıp aldı. Al, eger tájiriybede CPT-invariantlıqtıń buzılıwı tabıla qoyǵan jaǵdayda, sebeplilik principini (lagranjıannıń lokallıǵı) hám spinniń statistika menen baylanısı sıyaqlı maydanniń kvantlıq teoriyasınıń tiykarların tıpkillikli túrde ózertken bolar edi.

CPT-teorema G.Lyuders (1954-jılı) hám V.Pauli (1955-jılı) tárepinen oylap tabıldı hám dálillendi.

Sharmoniy — súykimli (charm) kvarktan hám súykimli kvarktan turatuǵın mezonlardıń jıynaǵı ($c\bar{c}$). Bul mezonlardıń barlıǵı (jasırın súykimlikke iye bolǵan mezonlar dep atalatuǵın) sharmoniydiń hár qıylı energiyalıq qáddileri bolıp tabıladı. Sharmoniydiń qáddilerin pozitroniydiń qáddileri sıyaqlı mınaday kvant sanları menen belgileydi: J, L, S, P, C, n_r . Bul belgilerde J - tolıq múyeshlik moment, L — kvark penen antikvarktıń orbitalıq múyeshlik momenti, S — olardıń qosındı spini, P — qáddiniń keńisliklik juplıǵı, C — onıń zaryadlıq juplıǵı, n_r — radiallıq kvant sanı.

Ádettegi atomlar menen pozitroniydaǵıday, $L = 0, 1, 2, 3, \dots$ bolǵan jaǵdaylarda $S-, P-, D-, F-, \dots$ qáddiler haqqında gáp etedi. $S = 1$ bolǵan qáddilerdi ortosharmoniydiń, al $S = 0$ bolǵan qáddilerdi parasharmoniydiń qáddileri dep ataydı.

P — juplıq $P = (-1)^{L+1}$ ańlatpasınıń; C — juplıq — $C = (-1)^{L+S}$ ańlatpasınıń járdeminde esaplanadı. $L = 0$ (3S_1) arqalı belgilenetuǵın ortosharmoniydiń eń tómengi halı J/ψ - mezon dep ataladı. Bul haldıń radiallıq qozıwı $\psi', \psi'', \psi''', \dots$ arqalı belgilenedi. Bul jerde shtrixlardıń sanı radiallıq qozıwdıń nomerine teń. Parasharmoniydiń tómengi halı [onı $L = 0$ (1S_1) arqalı belgileydi] η_c — mezon dep ataladı. $L = 1$ hám $J = 0, 1, 2$ ortohalları sáykes χ_0, χ_1, χ_2 arqalı belgilenedi.

Qara qurdım — gravitaciyalıq maydanı gravitaciyalıq radius r_g dan kishi bolǵan oblastta toplanǵan massa m tárepinen payda etilgen kosmoslıq ob'ekt. m massası ushın gravitaciyalıq radius r_g

$$r_g = 2G_N m / c^2$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul ańlatpada G_N - Nyuton turaqlısı. $\hbar, c = 1$ sistemasında

$$r_g = 2G_N m = 2m \cdot m_p^{-2}$$

ańlatpasına iye bolamız. m_p arqalı Plank massası belgilengen. Massası $2 \cdot 10^{33} \text{ g}$ bolǵan Quyash

ushın $r_g \sim 3$ km ekenligin ańsat tekserip kóriwge boladı. Jaqtılıq ta, basqa bóleksheler de radiusı r_g shamasına teń bolǵan sferanıń sheklerin shıǵıp kete almaydı. Biraq, usınday jaǵdaydıń orın alǵanlıǵına qaramastan, qara qurdımlardıń nurlanıwı nolge teń emes. Xoking kvantlıq effektlerdiń orın alatuǵınlıǵına baylanıslı radiusı r_g shamasına teń bolǵan qara qurdımńıń temperaturası $T = 1/4\pi r_g$ shamasına teń qara denedey bolıp nurlanatuǵınlıǵın kórsetti. Eger tek nurlanatuǵın fotonlardı esapqa alatuǵın bolsaq, onda waqıttıń ótiwi menen qara qurdımńıń massasınıń ózgerisi

$$\frac{dm}{dt} = -\sigma T^4 4\pi r_g^2$$

shamasına teń. Bul teńlikte σ arqalı Stefan-Bolcman konstantası belgilengen. Sonlıqtan $\frac{dm}{dt}$ ushın

$$\frac{dm}{dt} \approx -\frac{m_p^4}{15 \cdot 2^{10} \pi m^2}$$

añlatpasına iye bolamız. Bunnan qara qurdımńıń jasaw waqıtı ushın

$$t \approx 5 \cdot 2^{10} \pi m^3 m_p^{-4}$$

añlatpasın alamız. Esaplawlar $m > 10^{15}$ g bolǵan qara qurdımlar ushın jasaw waqıtınıń Álemniń jasınan úlken bolatuǵınlıǵın kórsetedi.

Joqarıda keltirilgen añlatpalardaǵı koefficientlerdi dál koefficientler dep qabıl etpew kerek. Sebebi olar bir qatar effektlerdi esapqa almaydı. Sanlı esaplawlar (Peydj, 1976-jılı) $m \gg 10^{17}$ g bolǵan qara qurdımlar ushın

$$\frac{dm}{dt} \approx -2 \cdot 10^{-4} m_p^4 m^{-2}$$

añlatpasın beredi. Bunday jaǵdayda energıyanıń 81 procentin ν_e menen ν_μ lar (esaplawlarda ν_τ esapqa alınbadı), 17 procentin fotonlar hám 2 procentin gravitonlar alıp ketedi.

Juplıq — bólekshelerdiń yamasa bóleksheler sistemasınıń tolqın funkciyasınıń bazı bir diskret túrlendiriwlerge qarata simmetriyasın táriyipleytuǵın kvant sanı. P-juplıq (keńisliklik Juplıq) haqqında gáp etilgende koordinatalar bası arqalı ótetuǵın bir birine perpendikulyar bolǵan úsh tegisliktegi aynalıq shaǵılastırıw názerde tutiladı. C-juplıqta (zaryadlıq Juplıq) gáp zaryadlıq túyinleslik - bólekshelerdi sáykes antibóleksheler menen almastırıw haqqında júredi. CP-juplıq yamasa Landaudıń bergen ataması boyınsha kombinaciyalanǵan Juplıq P- hám C-juplıqlardıń kóbeymesi bolıp tabıladı. 1956—1957 jılları ázzi processlerdiń aynalıq shaǵılısıw menen zaryadlıq túyinleslikke qarata simmetriyaǵa iye emes ekenligi tabıldı. Ázzi processlerdegi P- hám C-juplıqlardıń buzılıw effektleri úlken, shama menen 1 ge jaqın. 1964-jılı uzaq jasaytuǵın neytral K-mezonlardıń ıdırawlarındaǵı CP-invariantlıqtıń buzılıwınıń júdá kishi bolǵan effektleri tabıldı.

P - Juplıqtıń saqlanbaytuǵınlıǵınıń tiykarında ázzi toqlardıń vektor menen aksiallıq vektordıń qosındısınan turatuǵınlıǵı jatır. Aynalıq shaǵılısıwda vektor belgisin ózgetedi, al aksiallıq vektor bolsa belgisin ózgetpeydi. Vektorlıq hám aksiallıq toqlar olarǵa kiretuǵın bólekshelerdiń C-túyinlesliginde hár qıylı bolıp túrlenedi. Al CP-juplıqqa kelsek, onda onıń deregi házirshe ayqın emes.

Bozonlar ushın bólekshelerdiń P-juplıǵı menen sáykes antibólekshelerdiń P-juplıǵı birdey. Sonlıqtan olardıń kóbeymesi 1 ge teń. Fermionlar ushın bul kóbeyme -1 ge teń. Sonlıqtan ádette Dirak fermionı ushın Juplıqtı +1 ge teń, al antifermion ushın -1 ge teń dep qabıl etedi. Eger qarawǵa haqıyqıy neytral bolǵan fermionlardı (misalı, Mayoran neytrinoların) kirgizetuǵın bolsaq, onda fermionlar menen antifermionlardıń P-juplıǵın birdey hám jormal ($\pm i$) dep qabıl etiwge tuwrı keledi.

Eynshteyn — Podolskiy — Rozen paradoksı — úsh avtordıń 1935-jılı "Fizikalıq reallıqtı kvantlıq-mexanikalıq táriyiplewdi tolıq dep esaplawǵa bola ma" atamasındaǵı maqalasında qarap ótilgen oydaǵı eksperimentti ádette usınday dep ataydı. Bul oydaǵı tájiriyebede bir kvantlıq sistemanıń eki podsysteması bir birinen úlken qashıqlıqlarǵa ushıp ketedi. Biraq, bir birinen qansha qashıqlasqan bolsa da, olardıń bir biri menen qatań túrde korrelyaciyalanǵan bolıwı

kerek. Podsystemalardıń hár qaysısı óz betinshe hal vektorı (ψ -funkciyası) menen táriyiplenbeydi, al tıǵızlıqtıń matricesı dep atalatuǵın matrica menen táriyiplenedi. Bir obǵektıń halın ólshew ekinshi obǵektıń halınıń sol zamattaǵı ózgerisin (redukciyasın, kemeyiwın) boldırıwı kerek.

Kvantlıq mexanikanıń túsinipleri menen qaǵıydaları ishki qarama-qarsılıqlarǵa iye emes hám kóp sanlı tájiriybelerde tastıyqlanadı. Kvantlıq mexanikanıń sheklerinde bir zamatlıq redukciyada paradokslıq hesh nársede joq. Biraq, bazı bir fizikler bir zamatlıq redukciyanı sebeplilik haqqındaǵı intuitivlik kóz-qaraslarǵa qayshı keledi dep esaplaydı hám sonlıqtan Eynshteyn-Podolskiy-Rozen paradoksın tallaw usı kúnlerge shekem toqtamay atır. Bul tallawlardıń nátiyjeleri kvantlıq mexanikadaǵı ólshew processin tereńnen túsiniw bolıp tabılatuǵın shıǵar.

Ekzotikalıq barionlar — kvant sanları barionlardıń úsh kvarktan (qqq) turıwına múmkinshilik bermeytuǵın hám sonlıqtan minimum tórt kvarktan ($qqqq$) hám bir antikvarktan turatuǵın barionlar ($qqqq\bar{q}$). Mısal sıpatında ersiligi $+1$ ge hám soǵan sáykes valentli \bar{s} antikvarkqa iye bolǵan Z-barionlar xızmet ete aladı. Eger Z-barionlar haqıyqatında da bar bolsa, onda olar K^+ -mezonlardıń nuklonlarındaǵı shashırawında rezonanslar túrindegi kórinıwı kerek. Bazı bir eksperimentallıq gruppalar bunday rezonanslardıń baqlanǵanlıǵın xabarladı, biraq olar "1982-jılǵa bólekshelerdiń qásiyetlerin sholıw" kirgizilgen joq. Ekzotikalıq barionlardıń bar ekenligine basqa mısal retinde izotoplıq spini $5/2$ ge teń bolǵan erki emes barionlıq rezonanslar xızmet ete aladı. Bunday rezonanslardıń bar bolıwı adronlardıń bazı bir teoriyalıq modelleri tárepinen boljanadı.

Kriptoekzotikalıq (grekshe "kriptos" — sırlı, jasırın) dep óziniń kvant sanları menen ádettegi úsh kvarklıq barionlardan ayırmaǵa iye emes, biraq $qqqq\bar{q}$ yamasa $qqqg$ túrindegi strukturaǵa (g arqalı glyuon belgilengen) yamasa onnan da quramalı strukturaǵa iye bolǵan barionǵa aytadı. Tájiriybelerde kriptoekzotikalıq barionlardıń bar ekenligi ele anıqlanǵan joq.

Ekzotikalıq mezonlar — kvant sanları kvark penen antikvarktan ($\bar{q}q$) turmaytuǵınlıǵın, al minimum eki kvark penen eki antikvarktan ($qq\bar{q}\bar{q}$) yamasa kvark, antikvark hám glyuonnan ($q\bar{q}g$) turatuǵınlıǵına sáykes keletuǵın mezonlar. Qapshıqlar modeliniń tiykarında ótkerilgen esaplawlar kvant sanlarınıń $J^{PS} = 1^{-+}$ egzotikalıń jıynaǵına iye bolǵan $q\bar{q}g$ halınıń Υ''' — mezonǵa salıstırǵanda jeńil bolıwınıń múmkin ekenligin kórsetedi.

Kriptoekzotikalıq dep $q\bar{q}$ ke salıstırǵanda quramalı strukturaǵa iye bolǵan, biraq ádettegi mezonlardan ózleriniń kvant sanları boyınsha ayrılatuǵın mezonlarǵa aytadı.

Bólekshelerdiń elektrlik dipollik momenti — bólekshelerdiń statikalıq elektromagnit maydanı menen tásirlesiwın táriyipleytuǵın fizikalıq shamalardıń biri (basqa shamalar: zaryad, magnitlik dipollik moment, kvadrapollik elektr hám magnit momentleri hám t. b.). Elektrlik dipollik moment \mathbf{d} nıń elektr maydanı \mathbf{E} menen tásirlesiw energiyası \mathbf{dE} ge teń. Elementar bóleksheler, atom yadroları yamasa atomlar sıyaqlı ápiwayı obǵekterde \mathbf{d} vektorı tek \mathbf{J} spininiń baǵıtında baǵıtlanıwı múmkin hám soǵan sáykes \mathbf{dE} kóbemesi \mathbf{JE} kóbeymesine teń. Keńisliklik inversiyada \mathbf{E} belgisin ózgertedi (\mathbf{E} - polyar vektor), al \mathbf{J} bolsa belgisin ózgertpeydi (\mathbf{J} - aksiallıq vektor), al waqıttıń ótiwiniń baǵıtı ózgerse, onda \mathbf{E} belgisin ózgertpeydi, al \mathbf{J} belgisin ózgertedi. Solay etip \mathbf{dE} tásirlesiwı, al, soǵan sáykes elektrlik dipollik momenttiń bar bolıwı tábiyattaǵı aynalıq invariantlıqtıń da, waqıttıń ótiw baǵıtınıń ózgeriwine qarata invariantlıqtıń da buzılıwınıń saldarınan ǵana júzege keledi eken.

K^0 - mezonlardıń ıdırawında CP-invariantlıqtıń buzılıwı menen T-qaytımlılıqtıń buzılıwı effekti tabılǵannan keyin, elementar bólekshelerdiń dipollik elektr momentleriniń ulıwma aytqanda nolge teń emes ekenligi ayqın boldı. Biraq, T-qaytımlılıqtıń (CPT-teoremanıń orın alıwınıń sebebinen CP-invariantlıqtıń) buzılıwınıń mexanizmin túsinipli bolǵansha olardıń kútilgen shamaların boljawdıń múmkinshiligi joq. Eń qatańıraq eksperimentallıq shekler neytronnıń dipollik momenti ushın ornatılǵan: $|d_n| \lesssim |e| \cdot 6 \cdot 10^{-25}$ sm, e arqalı elektronnıń zaryadı belgilengen (Bul shamanı neytronnıń magnit momenti $|\mu_n| \lesssim |e| \cdot 6 \cdot 10^{-14}$ sm menen salıstırız).

YUkava tásirlesiwı — spini $\frac{1}{2}$ ge teń bolǵan bólekshede tárepinen spinge iye bolmaǵan

bozonniń shıǵarılıwı yamasa jutılıwı. Bul tásirlesiwdi táriyipleytuǵın ólshem birligine iye bolmaǵan koefficient YUkawa konstantası dep ataladı. Mısallar: nuklon tárepinen π -mezonniń jutılıwı yamasa shıǵarılıwı, kvark yamasa lepton tárepinen Xiggs bozonınıń shıǵarılıwı yamasa jutılıwı. Xideki YUkawa (1907—1981) π -mezonniń bar ekenligin boljaǵan yapon fizik-teoretigi.

Lagranjiandaǵı YUkawa tásirlesiwiniń táriyipleytuǵın aǵza ulıwma jaǵdayda $\bar{\psi}_b(f + f'\gamma_5)\psi_a\varphi$ túrine iye boladı. Bul ańlatpada ψ_a - spini $\frac{1}{2}$ ge teń bolǵan bólekshelerdi joq qılatuǵın a hám antibólekshelerdi tuwdıratuǵın \tilde{a} operatori, $\bar{\psi}_b = \psi_b^\dagger \gamma_0$ (krest ermitlik túyinleslikti ańǵartadı), φ — skalyar (psevdoskalyar) maydanniń operatori, $\gamma_5 = i\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$. P-juplıq saqlanǵan jaǵdayda YUkawa konstantalarınıń biri (maydanniń juplıǵına baylanıslı f yamasa f') nolge teń bolıwı kerek.

Yadrolıq kúshler (juplıqtı saqlamaytuǵın) — atom yadrolarında aynalıq-asimmetriyalıq effektler túrinde kórinetuǵın nuklonlardıń arasındaǵı ázzi tásirlesiwler. Bunday effektlerdiń mısalı yadrolıq γ -kvantlardıń P-taq múyeshlik tarqalıwı hám cirkulyarlıq polarizaciyası, uran menen toriydiń sınıqlarınıń taq múyeshlik tarqalıwı, $n + p \rightarrow d + \gamma$ reakciyasındaǵı fotonlardıń cirkulyarlıq polarizaciyası h.b. bolıp tabıladı.

Yang—Mills maydanları — abellik emes kalibrovkalıq simmetriyaǵa iye bolǵan vektorlıq, massaǵa iye emes bozonlardıń kalibrovkalıq maydanları. Mısál: glyuonlıq maydanlar — reńli $SU(3)_c$ gruppasınıń kalibrovkalıq maydanları. Abellik emes kalibrovkalıq maydanlardı 1954-jılı birinshi ret Yang Shjennin hám R. L. Mills qaradı.