

**O'zbekistan Respublikasi' Joqari' ha'm orta arnawli' bilim
ministrliqi**

Berdaq ati'ndag'i' Qaraqalpaq ma'mleketlik universiteti

Fizika-matematika fakulteti

Fizika kafedrası'

Fizika-matematika fakultetinin' 4-kurs studenti
Abdullaev Mardonni'n' pitkeriw qa'nigelik jumi'si'

**Elementar bo'leksheler fizikasi'n u'yrengende
gruppalar teoriyasi'n paydalani'wdi'n' fizikali'q
tiykarlari'**

Ilimiy basshi'si'

Kafedra basli'g'i'

Fakultet dekani'

professor B.Abdikamalov.

fizika-matematika ilimlerinin'
kandidati', docent J.Akimova.

fizika-matematika ilimlerinin'
kandidati', docent
B.Otemuratov.

No'kis 2016

Mazmuni'

Kirisiw.	3
I bap. Simmetriyalar ideyalari' haqqi'ndag'i' uli'wmali'q tu'sinikler.	6
1-§. Klassikali'q fizikadag'i' simmetriya.	6
2-§. Kvantli'q fizikadag'i' simmetriya.	12
3-§. Masshtabli'q tu'rlendiriwler ha'm basqa simmetriyalar.	15
4-§. Gruppalar teoriyasi' boyi'nsha tiykarg'i' tu'sinikler.	16
5-§. Bazi' bir juwmaqlar ha'm ma'selenin' qoyi'li'wi'.	18
II bap. Elementar bo'leksheler fizikasi'n u'yrengende gruppalar teoriyasi'n paydalani'wdi'n' fizikali'q tiykarlari'.	21
6-§. Elementar bo'leksheler fizikasi'nda simmetriya prinsiplerinin' qollani'li'wi'.	21
7-§. Gruppalar ha'm algebralar.	29
8-§. Toli'q simmetriya haqqi'nda.	34
9-§. Elementar bo'lekshelerdin' simmetriyasi' ha'm olardi' simmetriya tiykari'nda sistematizaciyalaw ma'selesini.	35
10-§. Bazi' bir juwmaqlar.	42
Pitkeriw qa'nigelik jumi'si' boyi'nsha uli'wmali'q juwmaqlar.	44
Paydalani'lg'an a'debiyatlar dizimi.	45

Kirisiw

1998-jı'lı Moskva qalası'nda jari'q ko'rgen "Fizika" dep atalatug'i'n u'lken enciklopediyalı'q so'zlikte "Fizikalı'q ni'zamlardı'n' simmetriyası'" dep atalatug'i'n maqalada mi'nalardı' oqi'ymi'z [1]:

Eger fizikalı'q sistemani' xarakterlewshi shamalar arası'ndag'i' qatnastı' sa'wlelendiretug'i'n ni'zamlar yamasa usı' shamalardı'n' waqı'ttı'n' o'tıwı menen o'zgerislerin ta'riyipleytug'i'n shamalar sistemag'a ta'sir etiwshi belgili bir operacijalarda (tu'rlendiriwlerde) o'zgermeytug'i'n bolsa, onda bul ni'zamlar usı' tu'rlendiriwlerge qarata simmetriyag'a iye yamasa invariantlı' dep ataydı. Matematikalı'q jaqtan bul simmetriyalı'q tu'rlendiriwler gruppanı' payda etedi. Ta'jiriybeler fizikani'n' ni'zamları'nı'n' to'mendegidey en' ulı'wmalı'q tu'rlendiriwlerge qarata simmetriyalı' ekenligin ko'rsetedi:

1. Ken'islik-waqı'ttı'n' u'zliksiz tu'rlendiriwleri (sistemani' tutası' menen ken'islikte jı'ljı'tı'w yamasa bir ori'nnan ekinshi ori'ng'a ko'shiriw, sistemani' tutası' menen ken'islikte buri'w, waqı't boyı'nsha esaplawdı'n' bası'n o'zgertiw (waqı't boyı'nsha jı'ljı'tı'w, berilgen esaplaw sistemasi'nan usı' sistemag'a salı'stı'rg'anda bag'i'ti' boyı'nsha da, shaması' boyı'nsha da turaqlı' tezlik penen qozg'alatug'i'n sistemag'a o'tiw (inerciallı'q esaplaw sistemaları'na qarata fizikalı'q ni'zamlardı'n' invariantlı'g'i');)

2. Ken'islik-waqı'ttı'n' diskret tu'rdegi tu'rlendiriwleri;

3. Birdey bo'lekshelerdin' ori'nları'n almastı'ri'wg'a qarata simmetriya;

4. Ishki simmetriyalar [Ku'shli ta'sirlesiwdin' izotoplı'q invariantlı'g'i' ha'm unitar SU(3)-simmetriya, "Ren'li" simmetriya, Kvarkler menen leptonlar arası'ndag'i' simmetriya, supersimmetriya, kalibrovkali'q simmetriya].

Simmetriya tek klassikalı'q fizikada g'ana emes, al kvantlı'q fizikada ju'da' a'hmiyetli ori'nları'n' birin iyeleydi. Sonı'n' menen birge mikrodu'nyada simmetriyani'n' ko'riniwi fizikler arası'nda u'lken qı'zi'g'i'wshi'lı'q payda etedi. Bul jag'day bir qatar sebeplerge iye. Mi'salı' mikroskopiyalı'q qa'ddide bir elektron ekinshi elektronnan hesh qanday ayı'rmag'a iye emes. Al uglerod yamasa kislorod atomı' bolsa basqa uglerod yamasa kislorod atomı' menen birdey. Bul jerde

ta'biyattag'i' ko'birek simmetriyag'a iye situaciyag'a iye bolami'z. Ekinshi ta'repten mikroskopiyali'q qa'ddide paydalani'latug'i'n kvantli'q mexanika klassikali'q mexanikag'a sali'sti'rg'anda a'dewir quramali' bolsa da simmetriya ori'n alg'an jag'daylarda a'dewir a'piwayi'lasadi'. Mi'sal retinde bo'lekshenin' iyelep turg'an orni' arqali' emes, al tolqi'n funkciyasi'ni'n' ja'rdeminde ta'riyiplenetug'i'nli'g'i'n atap o'tiw mu'mkin. Tap sol si'yaqli' ha'zirgi waqi'tlari' atomli'q ha'm subatomli'q sistemalardi', elementar bo'lekshelerdi izertlew ilimnin' en' aldi'n'g'i' shegi dep esaplanadi' ha'm bul jerde de simmetriya ideyalari' si'rttan qarag'anda xaos boli'p ko'rinetug'i'n sistemalarda ta'rtipti tabi'wg'a mu'mkinshilik beredi [2-3].

Qabi'l etilgen teoriyalar menen modellerdin' na'tijjelerin u'yreniw quraldi' si'pati'nda fizikada matematikani' paydalanadi'. Mi'sali' massasi' m bolg'an bo'lekshenin' x ko'sherinin' bag'i'ti'nda $f(x)$ ku'shinin' ta'sirinde tuwri' si'zi'qli' qozg'ali'si'nda Nyuton mexanikasi'ni'n' sheklerinde $f(x) = m \frac{d^2x}{dt^2}$ ten'lemesin paydalanadi'. Berilgen $f(x)$ funkciyasi'nda t waqi'ti' o'tkennen keyingi $x(t)$ koordinatasi'n tabi'w ushi'n x penen $\frac{dx}{dt}$ tuwi'ndi'si'ni'n' en' da'slepki ma'nislerin esapqa ali'p $f(x) = m \frac{d^2x}{dt^2}$ differencialli'q ten'lemesin sheshiwimiz kerek. Buni'n' ushi'n Nyuton mexanikasi'nda differencialli'q ha'm integralli'q esap sa'ykes matematikali'q apparat boli'p tabi'ladi'. Fizikali'q sistemalardi'n' simmetriyasi'n u'yrenip biz olardi'n' ha'r qi'yli' tu'rlendiriwlerde qa'siyetlerinin' qalayi'nsha o'zgeretug'i'nli'g'i'n qarap shi'g'a alami'z. Mi'sali' bo'lekshe potentsiali' $V(r)$ bolg'an maydanda qozg'alatug'i'n bolsa, onda bul maydan koordinata basi'na sali'sti'rg'anda aynali'q simmetriyag'a iye bola aladi' ha'm bunday jag'dayda $V(-x) = V(x)$ ten'lugin qanaatlandi'radi'. Bunday jag'dayda potentsialdi' x koordinatasi'n $-x$ penen almasti'ri'wg'a qarata invariant dep ataydi'. Bo'lekshe u'sh o'lshepli ken'islikte qozg'alatug'i'n bolsa, onda potentsial sferali'q simmetriyag'a iye boli'wi' mu'mkin. Bunday jag'dayda sferali'q polyar koordinatalarda potentsial $V(r)$ tu'rine iye boladi' ha'm mu'yeshlerden g'a'rezli bolmaydi'. Bunday potentsial koordinata basi' arqali' o'tetug'i'n qa'legen ko'sherdin' do'gereginde qa'legen mu'yeshlerge buri'wg'a karata invariant boli'p tabi'ladi'. Soni'n' menen birge bunday tu'rlendiriwlerdin' sani' sheksiz ko'p.

Sistemani'n' simmetriyasi'ni'n' ali'p keletug'i'n na'tiyjelerin izertlew ushi'n biz qanday da bir tu'rlendiriwler haqqi'nda, mi'sali', potencial si'yaqli' bazi' bir funkciyalardi' o'zgerissiz qaldi'ratug'i'n tu'rlerdiniwlerdin' ko'pligi (ji'ynag'i') haqqi'nda mag'li'wmatlarg'a iye boli'wi'mi'z kerek. Tu'rlendiriwlerdin' usi'nday ji'ynaqlari'n aydalanatug'i'n teoriyani' matematikler "Gruppalar teoriyasi'" dep ataydi'. Fizikler simmetriyani' u'yreniwde paydalanatug'i'n matematikali'q apparat sol gruppalar teoriyasi' boli'p tabi'ladi' [4-7].

Biz klassikali'q mexanikadag'i' differencialli'q ha'm integralli'q esapti' qollani'w menen kvantli'q mexanikadag'i' gruppalar teoriyasi'n qollani'w arasi'ndag'i' uqsasli'qqa itibar beriw u'lken qi'zi'g'i'w payda etedi. Eger ilim tariyxi'na itibar bersek Nyuton ni'zamlari' menen differencialli'q ha'm integralli'q esapti'n' shama menen bir waqi'tta payda bolg'anli'g'i'n ko'riwge boladi'. Al gruppalar teoriyasi'ni'n' ideyalari' 1810-ji'llari' payda boldi'. Biraq simmetriyani' u'yreniw ushi'n a'hmiyetli bolg'an ko'rinishler teoriyasi' (rus tilinde "teoriya predstavleniy") bolsa XX a'sirdin' jigirmalanshi' ji'llari' g'ana u'lken pa'tler menen rawajlana basladi'. Tap sol waqi'tlari' fizikler kvantli'q teoriyani' do'retti. Haqi'ykatida da kvantli'q mexanika ushi'n simmetriyani'n' tutqan ulli' orni' VignerdiN (1931-ji'li'), Veyldin' (1928-ji'li') ha'm Van-der-Verdennin' (1932-ji'li') jumi'slari'nda ko'rsetildi.

Elementar bo'leksheler fizikasi'ndag'i' (joqari' energiyalar fizikasi'ndag'i') son'g'i' 50-60 ji'lda sheshilgen en' a'hmiyetli ma'selelerdin' biri fizikani'n' usi' bo'limindegi simmetriyalardi' u'yreniw boli'p tabi'ladi'. Bul jag'day tiykari'nan ku'shli ha'm a'zzi ta'sirlesiwlerdin' birden bir qanaatlandi'rarli' teoriyasi'ni'n' do'retilmegenligi menen baylani'sli'. Sonli'qtan endi ashi'latug'i'n teoriyani'n' qanday simmetriyag'a iye ekenligin biliw og'ada a'hmiyetli ma'selelerdin' biri boli'p tabi'ladi'. Soni'n' menen birge izertlewlerdin' ju'da' jemisli oblasti' boli'p tabi'lg'anli'g'i' sebepli simmetriya teren' tu'rde izertlene basladi'. Izospin, unitarli'q simmetriya ha'm Ω^- , kvarkler, jupli'qti'n' buzi'li'wi', CP simmetriyasi'ni'n' buzi'li'wi', toqlar algebrasi' ha'm basqalar simmetriya menen tikkeley baylani'sli'.

Joqari'da keltirilgen mag'li'wmatlardin' barli'g'i' da simmetriyani'n' fizika ilimin u'yreniwde og'ada salmaqli' orni'ni'n' bar ekenligin an'g'artadi'. Fizikani'n' u'lken pa'tler menen rawajlani'p ati'rg'an en' aldi'n'g'i' bo'limlerin, soni'n' ishinde elementar

bo'leksheler fizikasi'nda simmetriya ideyalari', oni'n' matematikali'q apparati' bolg'an gruppalar teoriyasi' tabi's penen paydalani'li'p ati'r. Usi' jag'daylarg'a baylani'sli' bul pitkeriw qa'nigelik jumi'si' elementar bo'leksheler fizikasi'n u'yrengende gruppalar teoriyasi'n paydalani'wdi'n' fizikali'q tiykarlari'n teren'irek tu'siniw ha'm izertlew maqsetinde ori'nlandi'.

Pitkeriw qa'nigelik jumi'si' eki baptan ibarat boli'p, birinshi bapta simmetriyani'n' klassikali'q ha'm kvantli'q mexanikadag'i' qollani'li'wi', al ekinshi bapta elementar bo'leksheler fizikasi'nda gruppalar teoriyasi'n paydalani'wdi'n' fizikali'q tiykarlari'n izertlewdin' na'tiyjeleri bayanlang'an.

I bap. Simmetriyalar ideyalari' haqqi'ndag'i' uli'wmali'q tu'sinikler

1-§. Klassikali'q fizikadag'i' simmetriya

Ha'zirgi zaman fizikasi' menen fizika boyi'nsha joqari' bilimge iye qa'nigeler tayarlag'anda gruppalar teoriyasi', a'sirese elementar bo'leksheler fizikasi'ndag'i' gruppalar teoriyasi' haqqi'nda teren'irek ga'p etilgende a'dette to'mendegidey fundamentalli'q xarakterge iye bolg'an ma'seleler ha'm tu'sinikler na'zerde tuti'ladi' [2-7]:

Gruppa tu'sinigi, abellik (kommutაციali'q) gruppalar;

Koordinatalari'n' tu'rlendiriwler gruppasi': aylandi'ri'wlar, translyaciylar, uli'wmali'q tu'rlendiriwler;

Shredingerdin' aylandi'ri'wlar gruppasi': gamiltonianni'n' invariantli'g'i', skalyar funkciylar;

Gruppalardi' matricalaridin' ja'rdeminde ko'rsetiw: energiya spektrinin' azg'i'ni'wi', Shredinger ten'lemesinin' gruppasi'ni'n' ko'rinishlerinin' bazasi;

Gruppalardi'n' strukturasi': podgruppalar, klasslar (tu'yinles elementler, tu'yinles klasslar ha'm olardi'n' qa'siyetleri), invariant podgruppalar, aralas klasslar h.b.

Faktograppa, gruppalarli'n' golomorfli'q ha'm izomorfli'q sa'wlelendiriliwi, tu'rlendiriw gruppalari', gruppalarli' tuwri'dan-tuwri' ko'beytiw;

Gruppalarli'n' ko'rinishleri (predstavleniya grupp);

Li gruppalari' ha'm Li algebralari';

Izospin;

Klassikali'q gruppalar;

Puankare gruppalari' h.t.b.;

Joqari'da keltirilip o'tilgen matematikali'q ma'seleler ha'm tu'sinikler ju'da' quramali' boli'p ko'rinse de ha'zirgi zaman fizikasi'nda, atap aytqanda elementar bo'leksheler fizikasi'nda ken'nen qollani'ladi'.

Biz gruppalar teoriyasi'ni'n' en' a'piwayi' ma'seleleri si'pati'nda klassikali'q fizikadag'i' simmetriya menen tani'si'wdan baslaymi'z.

Fizikadag'i' simmetriya o'lshenbesliktin' yamasa ayi'ri'lmasli'qti'n' (aji'ralmasli'qti'n', birdeyliktin' yamasa teppe-ten'liktin') na'tiyjesi boli'p tabi'ladi'. Mi'sali' ken'islikte absolyut esaplaw sistemasi' joq: biz koordinata basi' retinde qa'legen noqatti' ala alami'z, al fizikani'n' ni'zamlari' bolsa koordinatalardi'n' basi'n qay ori'nda (noqatta) saylap alg'ani'mi'zdan g'a'rezsiz o'zgeriske ushi'ramaydi'. Basqa so'z benen aytqanda absolyut ori'ndi' o'lshemeydi.

Endi eki bo'leksheden turatug'i'n izolyაციyalang'an sistemani' alami'z. Bul bo'leksheler tek bir biri menen ta'sirlesedi. Eger sol bo'lekshelerdin' koordinatalari' $\mathbf{r}_1$ menen $\mathbf{r}_2$ arkali' belgilengen bolsa, onda olardi'n' bir biri menen ta'sirlesiwine sa'ykes keletug'i'n potentsialli'q energiyasi'

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \quad (1.1)$$

shamasi'na ten' ha'm ol eki bo'leksheler turg'an ori'nlardi'n' funkciyasi' boli'p tabi'ladi'. Ken'islikte absolyut baslang'i'sh ori'n bolmag'anli'qtan biz koordinatalar basi'n da'slepki koordinatalar basi'nan $\mathbf{a}$ qashiqli'g'i'na ji'li'sqan ori'nda da ala alami'z. Bunday koordinatalar sistemasi'nda potentsialli'q energiya

$$V(\mathbf{r}_1 + \mathbf{a}, \mathbf{r}_2 + \mathbf{a}) \quad (1.2)$$

shamasi'na ten' boladi'. Biraq eki noqat bir birine ekvivalent bolatug'i'n bolsa, onda

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = V(\mathbf{r}_1 + \mathbf{a}, \mathbf{r}_2 + \mathbf{a}) \quad (1.3)$$

ten'liginin' ori'nlani'wi' kerek. Bunday ten'lemeni qanaatlandi'ratug'i'n eki o'zgeriwshinin' funkciyasi' tek $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ ayi'rmasi'ni'n' funkciyasi' boli'wi' sha'rt. Mi'sali' biz

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2$$

yamasa

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \exp[i\mathbf{k}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)]$$

funkciyalari'n ali'wi'mi'z mu'mkin. Usi' funkciyalardi'n' ekewi de (1.3)-sha'rtti qanaatlandi'radi'. Biraq, ekinshi ta'repten

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)^2$$

ten'ligi ori'nlanatug'i'n jag'dayda

$$V(\mathbf{r}_1 + \mathbf{a}, \mathbf{r}_2 + \mathbf{a}) = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + 2\mathbf{a})^2$$

ten'ligi ori'n alatug'i'n bolg'anli'qtan (1.3)-sha'rt qanaatlandi'ri'lmaydi'. Sonli'qtan biz

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = V(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \quad (1.4)$$

ten'ligine iye bolami'z.

Ani'qlamasi' boyi'nsha ku'sh

$$\mathbf{F} = -\partial V / \partial \mathbf{r} \quad (1.5)$$

shamasi'na ten'. Bunday jag'dayda eki bo'lekshenin' ku'shleri sa'ykes

$$\mathbf{F}_1 = -\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_1}, \quad \mathbf{F}_2 = -\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_2} \quad (1.6)$$

shamalari'na ten' boladi'. Al sistemag'a ta'sir etetug'i'n ku'sh

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = -\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_1} - \frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_2} \quad (1.7)$$

formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplani'ladi'. Biraq, (1.4)-an'latpag'a sa'ykes

$$\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_1} = \frac{\partial V}{\partial (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)}, \quad \frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_2} = -\frac{\partial V}{\partial (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)}$$

ten'ligine iye bolami'z ha'm bunnan

$$\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_1} = -\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_2}$$

ten'liginin' ori'n alatug'i'ni'na isenemiz Bul jag'day

$$\mathbf{F} = 0 \quad (1.8)$$

ten'liginin' ori'n alatug'i'nli'g'i'n an'latadi'. Demek bir biri menen ta'sirlesetug'i'n eki bo'lekshege ta'sir etetug'i'n ku'shlerdin' qosi'ndi'si' nolge ten' boladi' eken. Bul neni an'g'artadi'? Nyutonni'n' ekinshi ni'zami' boyi'nsha

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}. \quad (1.9)$$

Bul an'latpada $\mathbf{p}$ arqali' impuls belgilengen. Bunday jag'dayda (1.8)- ha'm (1.9)- an'latpalardan

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = 0, \quad \mathbf{p} = \text{const} \quad (1.10)$$

ten'liklerin alami'z. Bul sistemani'n' impulsinin' saqlanatug'i'nli'g'i'n bildiredi. Bul mi'saldi' ko'p sanli' bo'lekhelerden turatug'i'n sistema ushi'n da uli'wmalasti'ri'wg'a boladi' ha'm soni'n' na'tiyjesinde izolyaciyalang'an sistemani'n' impulsinin' saqlanatug'i'nli'g'i' da'lillenedi.

Biz joqari'da ko'rgen mi'salda mi'naday jag'daylar arasi'ndag'i' baylani'sti' ko'rdik:

a) absolyut ori'nni'n' o'lshenbeytug'i'nli'g'i'n;

b) ken'islikte impulstin' saqlani'wi' menen ori'n almasti'ri'wg'a qarata invariantli'qti'.

Biz paydalang'an tu'sinikler arasi'ndag'i' baylani's ju'da' u'lken: bunday baylani's klassikali'q fizikada da, kvantli'q fizikada da ori'n aladi'. Ko'rsetilgen baylani'sti' tek koordinatalar basi' ushi'n g'ana emes, al basqa da o'lshenbeytug'i'n shamalar ushi'n du'ziw mu'mkin. Da'slep klassikali'q fizikada ori'n alg'an jag'daydi' qarap shi'g'ami'z.

Sistema bo'lekhelerdin' uli'wmalasqan koordinatalari' q_j , olardi'n' waqi't boyi'nsha ali'ng'an tuwi'ndi'lari'n bolg'an $\dot{q}_j$ shamalari'ni'n' ha'm waqi't t ni'n' funkciyasi' bolg'an Lagranjian L din' $[L = L(q_j, \dot{q}_j, t)]$ ja'rdeminde ta'riyiplenedi. Lagranj ten'lemesi

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} = \text{const} \quad (1.11)$$

tu'rinde jazi'ladi'. Biraq $\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} = p_j$ uli'wmalasti'ri'lg'an impuls boli'p tabi'ladi'. Bunnan $p_j = 0$ ten'ligin alami'z. Demek uli'wmalasti'ri'lg'an koordinatani'n' o'lshenbeytug'i'nli'g'i' uli'wmalasti'ri'lg'an impulstin' saqlanatug'i'nli'g'i'n an'latadi' eken. Eger q arqali' koordinata belgilense, onda p impulsti an'latadi', al q arqali'

mu'yeshli belgilesek, onda p mu'yeshlik moment boli'p tabi'ladi'. Bunday jag'dayda biz aylandi'ri'wlarg'a qarata invariantli'qqa iye bolami'z (bul ken'isliktegi absolyut bag'i'tti'n' o'lshenbeytug'i'nli'g'i'ni'n' na'tiyjesi boli'p tabi'ladi'). Al aylandi'ri'wlarg'a qarata invariantli'q mu'yeshlik momenttin' saqlani'w ni'zami'ni'n' tiykari'nda jatadi' eken. Tap sol si'yaqli' impulstin' saqlani'w ni'zami' ken'isliklik ori'n almasti'ri'wlarg'a qarata invariantli'qti'n' aqi'beti boli'p tabi'ladi'.

Waqi't boyi'nsha da esaplawdi'n' basi' bolmag'anli'qtan barli'q sistemalar waqi'tti'n' ji'lji'wi'na qarata invariant boli'wi' ha'm L lagranjian waqi'ttan g'a'rezsiz boli'wi' kerek:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0.$$

Biraq $\frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial t}$ ten'ligi ori'nlanatug'i'n bolg'anli'qtan (H arqali' gamiltonian belgilengen) $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$ ten'ligine ha'm sog'an sa'ykes

$$H = const$$

tu'rindagi juwmaqqqa kelemiz. Bul an'latpada H shamasi'ni'n' toli'q energiyag'a ten' ekenligine ha'm oni'n' saqlanatug'i'nli'g'i'na itibar beremiz.

Invariantlar ha'm saqlani'w ni'zamlari' 1-kestede berilgen [8]. Tap sonday sa'ykeslikti fizikani'n' qa'legen ni'zami' ushi'n ko'rsetiwge boladi' ha'm sonli'qtan ku'shli, a'zzi, elektromagnit ha'm gravitaciya'li'q ta'sirlesiwlerdin' simmetriyalari'ni'n' boli'wi' sha'rt dep juwmaq shi'g'arami'z.

1-keste.

Ta'biyatti'n' bazi' bir da'l ha'm juwi'q simmetriyalari'

O'lshenbeytug'i'n shama	Invariantli'q	Saqlanadi'	Simmetriyani'n' da'llik da'rejesi
Ken'isliktegi absolyut ori'nni'n' koordinatalari'	Ken'isliktegi awi'si'w (ori'n almasti'ri'w)	Impuls	Da'l
Absolyut waqi't momenti	Waqi't boyi'nsha awi'si'w (ori'n almasti'ri'w)	Energiya	Da'l

Ken'isliktegi absolyut bag'i't	Aylani'w	Mu'yeshlik moment	Da'l
Zaryadlang'an ha'm zaryadlanbag'an bo'lekshelerdin' fazalari'ni'n' sali'sti'rmali'g'i'	Zaryadti'n' kalibrovkali'q tu'rlendiriwleri	Q zaryadi'.	Da'l
Barionlardi'n' ha'm basqa da bo'lekshelerdin' fazalari'ni'n' sali'sti'rmali'g'i'	Barionli'q zaryadti'n' kalibrovkali'q tu'rlendiriwleri	B barionli'q san.	Da'l
e^- , ν_e ha'm basqa da bo'lekshelerdin' fazalari'ni'n' sali'sti'rmali'g'i'	Elektronli'q leptonli'q zaryadti'n' kalibrovkali'q tu'rlendiriwleri	L_e elektronli'q leptonli'q zaryad.	Da'l
μ^- , ν_μ ha'm basqa da bo'lekshelerdin' fazalari'ni'n' sali'sti'rmali'g'i'	Myuonli'q leptonli'q zaryadti'n' kalibrovkali'q tu'rlendiriwleri	L myuonli'q leptonli'q zaryad	
On' ha'm teristin' bir birinen parqi'ni'n' joqli'g'i'	P ken'isliklik inversiya	Jupli'q	A'zzi ta'sirlesiwlerde buzi'ladi'
Waqi'tti'n' o'tiw bag'i'ti'	T waqi'tti'n' belgisinin' o'zgeriwi	-	Buzi'ladi', biraq sebebi belgisiz.
Bo'leksheler ha'm antibo'leksheler arasi'ndag'i' ayi'rma	Zaryadli'q tu'yinleslik	zaryadli'q jupli'q.	A'zzi ta'sirlesiwlerde buzi'ladi'.

2-§. Kvantli'q fizikadag'i' simmetriya

Kvantli'q fizikada sistema $\psi(x, t)$ tolqi'n funkciyasi'ni'n' ja'rdeminde ta'riyiplenedi ha'm ol relyativistlik emes jag'daylarda Shredinger ten'lemesin qanaatlandi'radi' [9]:

$$H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (1.12)$$

Bul an'latpada H arqali' gamiltonian (energiya operatori') belgilengen. Kompleksli tu'yinles ten'leme to'mendegidey tu'rge iye boladi':

$$H\psi^* = i\hbar \frac{\partial \psi^*}{\partial t}. \quad (1.13)$$

Endi baqlanatug'i'n Q shamasi'n qaraymi'z. Oni'n' t waqi't momentindegi ku'tiletug'i'n ma'nisi mi'na formulani'n' ja'rdeminde esaplanadi':

$$\bar{Q}(t) = \int \psi^*(t) Q \psi(t) d^3x. \quad (1.14)$$

(1.12)- ha'm (1.13)-an'latpalarg'a sa'ykes Q shamasi'ni'n' o'zgeriw tezligin bi'layi'nsha esaplaymi'z:

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \bar{Q}(t) &= \int \psi^*(t) (QH - HQ) \psi(t) d^3x = \\ &= \int \psi^*(t) [Q, H] \psi(t) d^3x, \end{aligned} \quad (1.15)$$

Bul an'latpadag'i'

$$[Q, H] = QH - HQ \quad (1.16)$$

shamasi'n Q menen H shamalari'ni'n' kommutatori' dep ataymi'z. Eger ku'tiletug'i'n Q shamasi' saqlanatug'i'n bolsa, onda $\bar{Q}$ shamasi' da saqlanadi'. Bunday jag'dayda

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} = 0, \text{ ya'g'ni'y } [Q, H] = 0. \quad (1.17)$$

Bunday jag'dayda Q menen H shamalari' kommutaciyalanadi' dep ataydi'.

Endi x ko'sherinin' boyi' menen sheksiz kishi δx shamasina ori'n almasti'ri'wdi' qaraymi'z. Bunday jag'dayda tolqi'n funkciyasi' bi'layi'nsha o'zgeredi:

$$\psi(x) \rightarrow \psi(x + \delta x) = \left(1 + \delta x \frac{\partial}{\partial x}\right) \psi(x) = \left(1 + \frac{i}{\hbar} \delta x p_x\right) \psi(x) \quad (1.18)$$

Biz Teylor qatari'na jayg'anda qatardi'n' tek birinshi ag'zasi' menen sheklendik. Bul an'latpada

$$p_x = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \quad (1.19)$$

shamasi'n x ko'sherinin' bag'i'ti'ndag'i' translyaciya generatori' dep ataymi'z. Kvantli'q mexanikada $\hat{p}_x = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ operatori'n impuls operatori' dep ataytug'i'ni'n eske tu'siremiz.

Endi ken'isliktegi sheksiz kishi ori'n almasti'ri'wg'a qarata invariantli'qti'n' inmulstin' saqlani'wi'na ali'p keletug'i'nli'g'i'n ko'rsetemiz (eger qozg'ali's x ko'sherinin' bag'i'ti'nda ju'zege kelse, onda impulstin' x qurawshi'si' saqlanadi'). Haqi'yqati'nda da, eger sistema $x \rightarrow x + \delta x$ shamasi'na (sheksiz kishi ji'lji'wg'a) qarata invariant bolsa, onda ku'tiletug'i'n H shamasi' o'zgermeydi:

$$\begin{aligned} \int \psi^*(x) H \psi(x) d^3x &= \int \psi^*(x + \delta x) H \psi(x + \delta x) d^3x = \\ &= \int \psi^*(x) \left(1 - \frac{i}{\hbar} \delta x p_x\right) H \left(1 + \frac{i}{\hbar} \delta x p_x\right) \psi(x) d^3x. \end{aligned}$$

Bul jag'day

$$\begin{aligned} H &= \left(1 - \frac{i}{\hbar} \delta x p_x\right) H \left(1 + \frac{i}{\hbar} \delta x p_x\right) = \\ &= H - \frac{i}{\hbar} \delta x [p_x, H] + O(\delta x)^2, \end{aligned}$$

yag'ni'y

$$[p_x, H] = 0 \quad (1.20)$$

ten'liginin' ori'nlanatug'i'nli'g'i'na, demek p_x shamasi'ni'n' saqlanatug'i'nli'g'i'na ali'p keledi (basqa so'z benen aytqanda gamiltonian menen kommutaciyalanatug'i'n operatorg'a sa'ykes keletug'i'n shama'g'a sa'ykes keletug'i'n fizikali'q shama saqlanadi').

Tap usi'nday jollar menen $y \rightarrow y + \delta y$, $z \rightarrow z + \delta z$ ori'n almasti'ri'wlari' ushi'n esaplawlar ju'rgizip ken'isliktegi ori'n almasti'ri'wg'a qarata invariantli'qti'n' impulstin' saqlanatug'i'nli'g'i'g'i'na ali'p keletug'i'nli'g'i'na ko'z jetkeremiz (klassikali'q fizikada da tap usi'nday awhal ori'n aladi').

Waqi't boyi'nsha ori'n almasti'ri'wg'a qarata ("waqi't boyi'nsha ori'n almasti'ri'w" so'zi "waqi'tti'n' o'tiwi" degen ma'niske sa'ykes keledi) invariantli'qtan energiyani'n' saqlani'w ni'zami' kelip shi'g'adi'.

En' aqi'ri'nda mu'yeshlik momenti qarap o'temiz. z ko'sherinin' a'tirapi'nda sheksiz kishi $\delta\varphi$ mu'yeshine buri'w ushi'n mi'nalardi' alami'z:

$$\begin{aligned}
x' &= x + y\delta\varphi \equiv x + \Delta x, \\
y' &= y - x\delta\varphi \equiv y + \Delta y, \\
z' &= z \equiv z + \Delta z.
\end{aligned}
\tag{1.21}$$

Bunday jag'dayda tolqi'n funkciyasi' bi'layi'nsha o'zgeredi:

$$\begin{aligned}
\psi(\mathbf{r}) &\rightarrow \psi(\mathbf{r}) + \Delta\mathbf{r} \cdot \nabla\psi(\mathbf{r}) + \dots = \\
&= \psi + \Delta x \frac{\partial\psi}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial\psi}{\partial y} + \Delta z \frac{\partial\psi}{\partial z} + \dots = \\
&= \left[1 + \left(y \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial y} \right) \delta\varphi \right] \psi + \dots = \\
&= \left[1 - \frac{i}{\hbar} L_z \delta\varphi \right] \psi + \dots,
\end{aligned}
\tag{1.22}$$

Kelip shi'qqan an'latpada

$$L_z = \frac{\hbar}{i} \left(x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x} \right) \tag{1.23}$$

arqali' z ko'sheri do'geregindagi aylani'w generatori' belgilengen (kvantli'q mexanikada bul operator'di' impuls momentinin' qurawshi'si' operatori' yamasa impuls momenti operatori'ni'n' z qurawshi'si' dep ataytug'i'n edik). Bunnan keyingi tallawlar impulstin' saqlanatug'i'nli'g'i' boyi'nsha joqari'da keltirilgen tallawlarga sa'ykes keledi. Solay etip z ko'sherinin' do'geregindagi aylani'wg'a (buri'li'wg'a) qarata invariantli'q L_z shamasi'ni'n' saqlanatug'i'nli'g'i'na ali'p keledi eken:

$$[L_z, H] = 0, \quad \bar{L}_z \text{ saqlanadi'}. \tag{1.24}$$

(1.24)-an'latpa boyi'nsha L_z shamasi' saqlanadi'. Al barli'q ko'sherler do'geregindagi aylani'wlarga qarata invariantli'q mu'yeshlik momenttin' saqlanatug'i'nli'g'i'n bildiredi:

$$[L, H] = 0, \quad \bar{L} \text{ saqlanadi'}. \tag{1.25}$$

Endi (1.18)-an'latpada keltirilgen jazi'wlardi' (1.22)-an'latpadagi' jazi'wlardi'n' ja'rdeminde bi'layi'nsha jazi'w qolayli':

$$x \text{ ko'sherinin' bag'i'ti'ndagi' ori'n almasti'ri'w: } \psi \rightarrow \exp\left(\frac{ixp_x}{\hbar}\right) \psi, \tag{1.26}$$

$$i'qti'yarli' tu'rdegi ori'n almasti'ri'w: \psi \rightarrow \exp\left(\frac{ixp}{\hbar}\right) \psi.$$

$$z \text{ ko'sheri do'geregindagi aylani'w (buri'li'w): } \psi \rightarrow \exp\left(\frac{i\varphi L_z}{\hbar}\right) \psi, \tag{1.27}$$

$$i'qti'yarli' tu'rde aylani'w (buri'li'w): \psi \rightarrow \exp\left(\frac{i\varphi L}{\hbar}\right) \psi.$$

U'sh o'lshenbeytug'i'n tu'siniklardin' bar ekenliginen kelip shi'g'i'p biz klassikali'q ha'm kvantli'q teoriyalardagi' u'sh saqlanatug'i'n shamalardi'n' bar ekenligin tapti'q.

Bul shamalar fundamentalli'q xarakterge iye ha'm olardi'n' saqlanatug'i'nli'g'i' fizikani'n' ni'zamlari'ni'n' ken'isliktin' qa'legen noqati'nda ori'nlanatug'i'nli'g'i'n, olardi'n' waqi'ttan ha'm ken'isliktegi bag'i'ttan g'a'rezsiz ekenligin bildiredi. Eger usi invariantlar saqlanbag'anda ta'biyatti'n' ni'zamlari' waqi'tti'n' o'tiwi ha'm bir ori'nnan ekinshi ori'ng'a o'tkende o'zgergen bolar edi. Bunday jag'dayda eksperimentlerdi qaytalawg'a ha'm ilim haqqi'nda ga'p etiwge pu'tkilley bolmag'an bolar edi.

3-§. Masshtabli'q tu'rlendiriwler ha'm basqa simmetriyalar

Fizika iliminde jokari'da ayti'lg'an ni'zamlar menen bir qatarda ken'islik ha'm waqi't penen baylani'spag'an ja'ne de bir qansha ni'zamlar bar. Olar elektr zaryadi'ni'n' saqlani'w ni'zami' (Q), barionli'q sanni'n' saqlani'w ni'zami' (B), L_e elektronli'q san menen L_μ myuonli'q sanni'n' saqlani'w ni'zamlari' boli'p tabi'ladi'. Bul ni'zamlar fizikali'q ni'zamlardi'n' kalibrovkali'q tu'rlendiriwler dep atalatug'i'n tu'rlendiriwlerge qarata invariantli'g'i'ni'n' na'tiyjesi boli'p tabi'ladi'. Bul ni'zamlar zaryadlang'an bo'lekshenin' tolqi'n funkciyasi'ni'n' fazasi'ni'n' neytralli'q bo'lekshege sali'sti'rg'andag'i' o'lshewge bolmaytug'i'nli'g'i' menen baylani'sli'. Kalibrovkali'q (yamasa masshtabli'q) tu'rlendiriwlerge qarata invariantli'q toqti'n' saqlani'wi'na, al bul jag'daydi'n' o'zi zaryadti'n' saqlani'wi'na ali'p keledi.

To'rt tu'rli zaryadti'n' saqlani'w ni'zamlari' impulstin', energiyani'n' ha'm mu'yeshlik momenttin' saqlani'w ni'zamlari' menen birlikte absolyut boli'p tabi'ladi'. Olar da'l simmetriyalar boli'p tabi'ladi' (olar ku'shli, elektromagnit, a'zzi ta'sirlesiwlerdin' barli'g'i'ni'n' simmetriyasi' ma'nisinde). Bul bir biri menen ayi'ri'p turatug'i'n qarama-qarsi'li'q haqqi'nda keyinirek biz ga'p etemiz. Olardi' eki tipke bo'liwge boladi'. Birinshi tipke kiriwshi birinshi tip ken'isliktegi inversiya ha'm waqi'tti'n' belgisinin' o'zgeriwi (waqi'tti'n' o'tiwinin' bag'i'ti'ni'n' o'zgeriwi) menen baylani'sli'. Al ekinshi tipke kiriwshiler waqi't ha'm ken'islik penen baylani'sli' emes. Olar izospindi, ersilikti ha'm unitarli'q simmetriyani' o'z ishine aladi'. Bul simmeriyalardi'n' barli'g'i' da ta'sirlesiwlerdin' en' bolmag'anda birewinde buzi'ladi'. Olardi' juwi'q simmetriyalar dep ataymi'z. Juwi'q tu'rde ju'zege keletug'i'n

simmetriyalar ha'zirgi zaman elementar bo'leksheler fizikasi'nda a'hmiyetli ori'nli' iyeleydi.

4-§. Gruppalar teoriyasi' boyi'nsha tiykarg'i' tu'sinikler

Biz da'slep grupp (simmetriya gruppasi') tu'sinigine ani'qlama beriwden baslaymi'z. Qatti' deneler fizikasi' menen kondensაციali'q ortali'qlar fizikasi'ndag'i' kristalli'q denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n u'yrengende simmetriya elementleri, simmetriyalı'q operaciylar, simmetriyani'n' noqatli'q gruppalari', simmetriyani'n' ken'isliktegi gruppalari' tu'siniklari menen ken'nen tani'si'ladi'. Usi'ni'n' na'tiyjesinde simmetriyani'n' gruppasi' haqqi'nda ga'p etkende simmetriyalı'q operaciylardi'n' matematikali'q gruppasi' ekenligi ayqi'n tu'rde kelip shi'g'adi'.

Pitkeriw qa'nigelik jumi'si'ndag'i' tiykarg'i' matematikali'q obekt bolg'an gruppag'a ani'qlama beriwden baslaymi'z. Biz gruppani' G arqali', al oni'n' elementlerin x, y, z h.t.b. h. t. b. ha'riplerdin' ja'rdeminde belgileyemiz.

Eger G ko'pligine kiriwshi qa'legen x ha'm y jup elementtin' ($x, y \in G$) ko'beymesine usi' ko'pliktin' ishindegı qanday da bir $x \cdot y = z$ elementi ($z \in G$) sa'ykes keletug'i'n bolsa, onda G ko'pliginde binarli'q ko'beytiw operaciyasi' berilgen dep esaplaymi'z. Eger to'mendegidey sha'rtler ori'nlanatug'i'n bolsa, onda $x \cdot y$ binarli'q ko'beytiw operaciyasi' ori'n alatug'i'n G ko'pligin grupp dep ataymi'z.

1) barli'q $x, y, z \in G$ ler ushi'n ko'beytiw asociativlik, yag'ni'y $(xy)z = x(yz)$.

2) G ni'n' birligi dep atalatug'i'n $1 \in G$ elementi bar boli'p barli'q $x \in G$ lar ushi'n $x1 = 1x = x$ ten'liklari ori'nlanadi'.

3) qa'legen $x \in G$ elementi ushi'n og'an keri element dep atalatug'i'n x^{-1} elementi tabi'ladi', olar ushi'n $xx^{-1} = x^{-1}x = 1$ ten'liklari ori'nli' boladi'.

G gruppasi'ni'n' ta'rtibi dep G ko'pligindegı elementerdin' sani'n aytadi'. SHEksiz ta'rtipli de, shekli ta'rtipli de gruppalardi'n' boli'wi' mu'mkin. Fizika iliminde shekli gruppalar da, sheksiz gruppalar da ken'nen qollani'ladi'.

A'dette gruppani'n' elementlerin ko'beytkende xy ko'beymedegı olardi'n' ori'nlarini almashti'ri'p qoyi'wg'a ruqsat etilmeydi. Biraq bir qatar gruppalarg'a

kiretug'i'n elementlerdin' ori'nlari'n almasti'ri'p qoyi'wg'a boladi' (yag'ni'y $xy = yx$ ten'ligi ori'nli' boladi'). Bunday gruppalardi' Abellik grupp dep ataydi' (Nils Xenrik Abel, norvegiya tilinde Niels Henrik Abel, 1802-ji'li' tuwi'lg'an ha'm 1829-ji'li' qayti's bolg'an Norvegiya matematigi).

Biz elementar bo'leksheler fizikasi'nda abellik emes (yag'ni'y kommutativlik emes) gruppalardi'n' ori'n alatug'i'nli'g'i' haqqi'nda keyinirek ga'p etemiz.

Gruppalarg'a en' a'piwayi' mi'sallar keltiremiz.

1 menen -1 gruppani' payda etedi. Birlik element 1 din' o'zi, ker element te 1 boli'p tabi'ladi'. -1 elementi o'zine ker. Bul grupp ushi'n ko'beytiw kestesi bi'layi'nsha jazami'z:

	1	-1
1	1	-1
-1	-1	1

Endi 1, -1, i ha'm $-i$ lerdin' gruppani' payda etetug'i'nli'g'i'n ko'rsetemiz.

	1	-1	i	$-i$
1	1	-1	i	$-i$
-1	-1	1	$-i$	i
i	i	$-i$	-1	1
$-i$	$-i$	i	1	-1

Joqari'da keltirilgen eki grupp da ciklli'q grupp bolip tabi'ladi'. Ciklli'q gruppalarda olardi'n' elementlerinin' barli'g'i' da bir elementtin' da'rejesi si'pati'nda ali'nadi'. Ekinshi mi'salda barli'q elementler i^k tu'rinde ko'rsetiledi ($k = 0,1,2,3$). k sani'ni'n' u'lkeytiw arqali' biz sol cikldi'n' qaytalani'wi'n a'melge asi'rami'z. Bul jag'day to'mendegi kestedek keltirilgen:

k	0	1	2	3	4	5	6	7
i^k	1	i	-1	$-i$	1	i	-1	$-i$

Qa'legen ciklli'q gruppani'n' Abellik grupp bolatug'i'nli'g'i'n da'lillew qi'yi'n emes.

Izomorfizm. Elementleri pu'tkilley ha'r qi'yli' etip ali'ng'an eki grupp arasi'nda uqsasli'qti'n' ori'n ali'wi' mu'mkin ha'm sonli'qtan algebrali'q jaqtan olardi' bir

gruppa dep esaplawg'a boladi'. Matematika tilinde bul jag'daydi' bi'layi'nsha tu'sindiremiz:

Eger $\mathcal{G}$ gruppasi'ni'n' ha'r bir G_a elementi menen $\mathcal{H}$ gruppasi'ni'n' H_a elementi arasi'ndag'i' bir ma'nisli $G_a \leftrightarrow H_a$ sa'ykeslik ori'n alatug'i'n bolsa, onda biz $\mathcal{G}$ ha'm $\mathcal{H}$ gruppalari'n izomorfli' dep ataymi'z. Bunday jag'dayda $G_a G_b = G_d$ ten'liginen $H_a H_b = H_d$ ten'liginin' kelip shi'g'atug'i'nli'g'i'n da'lillewge boladi'. Solay etip eki izomorfli' gruppa birdey ko'beytiw kestesine iye boladi' ha'm gruppani'n' elementlerinin' basqasha jaylasti'ri'wlari' mu'mkin. Simmetriyani' u'yrengende bizdi tiykari'nan ko'beytiw kesteleri ta'repinen ani'qlanatug'i'n gruppalardi'n' algebrali'q qa'siyetleri g'ana qi'zi'qti'ratug'i'n bolg'anli'qtan gruppalardag'i' izomorfizmdi ani'qlap waqi'tti' ekonomlawg'a ha'm paydali' bolg'an uqsasli'qlardi' tabi'wg'a mu'mkinshilik beredi.

5-§. Bazi' bir juwmaqlar ha'm ma'selenin' qoyi'li'wi'

Fizika ilimindegi simmetriya teoriyasi'n bayanlag'anda anaw yamasa mi'naw simmetriyani'n' bar boli'wi'ni'n' saldari'nan ju'zege keletug'i'n na'tiyjelerdi tallaw ta'biyy boli'p tabi'ladi'. Biraq eksperimentte biz tek simmetriyani'n' na'tiyjesin g'ana baqlaymi'z, al onnan keyin g'ana qanday simmetriyani'n' usi'nday na'tiyjege ali'p kelgenligi haqqi'nda oylana baslaymi'z. Izlew processi tap usi'nday – eki ta'repli, fizikali'q teoriyani' islep shi'qqanda a'dette usi'nday jol menen ju'redi. Eksperimentalli'q mag'li'wmatlar simmetriyani'n' mu'mkin bolg'an tiplerin ko'rsetedi. Simmetriyani'n' na'tiyjelerin tallap boljawlar ayti'ladi'. Al usi' boljawlardi'n' duri's yamasa duri's emes ekenligin ani'qlaw ushi'n jan'adan eksperimentler o'tkeriledi.

Izertlew din' tap usi'nday usi'li'na ju'da' jaqsi' mi'saldi' ha'zirgi zaman elementar bo'leksheler fizikasi' beredi. Neytron menen protonni'n' massalari' derlik birdey (protonni'n' massasi' 1,672 621 898(21)·10⁻²⁷ kg = 1,007 276 466 879(91) m.a.b.¹, al neytronni'n' massasi' 1,674 927 471(21)·10⁻²⁷ kg = 1,008 664 915 88(49) m.a.b.). Tap usi'nday jag'day π^+ , π^- ha'm π^0 mezonlarda da

¹ m.a.b. massani'n' atomli'q birligi ma'nisin an'g'artadi'.

baqlanadi'. Tap usi'nday multipletler baqlani'latug'i'n derlik barli'q elementar bo'leksheler ushi'n xarakterli². Massa energiya menen relyativistlik baylani'sqan bolg'anli'qtan³ massag'a iye multipletlerdin' bar boli'wi' fundamentalli'q gamiltonianni'n' simmetriyasi' haqqi'nda mag'li'wmat beredi. Multiplettin' ha'r qi'yli' qurawshi'lari' ha'r qanday zaryadlarga iye bolg'anli'qtan, simmetriyalig' operatorlar "bo'lekshelerdin' zaryadli'q koordinatalari'n" o'z ishine ali'wi' kerek. Bul ideyani' rawajlandi'ri'w atom yadrosi'ni'n' strukturasi' menen elementar bo'lekshelerdin' qa'siyetlerin' interpretaciyalag'anda ju'da' a'hmiyetli bolg'an "izospin" koncepciyasi'na ali'p keldi.

Ha'zirgi zaman tezletkishlerinin' energiyasi'ni'n' u'lkeyiwi menen son'g'i' ji'llari' elementar bo'lekshelerdin' sani' ja'ne de arta basladi' (Mi'sali' 2008-ji'li' paydalani'wg'a berilgen Jeneva qalasi'ni'n' qasi'ndag'i' YAdroli'q izertlewlerdin' Evropali'q ken'esine (qi'sqasha CERN) tiyisli U'lken adronli'q kollayderde (ingliz tilinde Large Hadron Collider, qi'sqasha LHC) 2015-ji'li' 3-iyun ku'ni energiyasi' 13 TeV bolg'an protonlar ali'na basladi' [10]. Joqari'da ga'p etilgen bazi' bir zaryadli'q multipletlerbin' birdey massag'a iye boli'wi' da mu'mkin. Usi'ni'n' menen birge u'lken multipletlerdin' bar ekenligi de boljanbaqta. Bul jag'day o'z gezeginde izospin menen ta'riyiplenetug'i'n simmetriyag'a sali'sti'rg'anda joqari'raq simmetriyani'n' bar boli'wi'n talap etedi. Bunday simmetriyani' SU_3 dep atadi' [6]. Tilekke qarsi' SU_3 –multipletler ju'da' u'lken jon'qalarg'a bo'liniwge ushi'raytug'i'n boli'p shi'qti' (rasshepleniege). Bul jag'day gamiltonianni'n' bari' bir ag'zalari'ni'n'

² Multipletler: ximiyada atomni'n' yamasa molekulani'n' spinin xarakterliwshi shama. Fizikada bolsa bo'leksheler multipletleri dep birdey spinge iye, al eger bo'lekshe adronlardan turatug'i'n bolsa birdey ishki jupli'qqa iye elementar bo'lekshelerdin' gruppasi'na aytadi' (dubletler, tripletler, oktetler, dekuplerter ha'm basqalar). Multipletke kiretug'i'n bo'lekshelerdin' massalari' bir birine shama menen ten' boladi'. Multipletlerdin' bar boli'wi' elementar bo'lekshelerdin' ta'sirlesiwinde qanday da bir simmetriyani'n' bar ekenliginin' na'tiyjesi boli'p esaplanadi'. Matematikali'q jaqtan simmetriya (a'dette juwi'q simmetriya) bo'lekshelerdin' ta'sirlesiwini'n' anaw yamasa mi'naw gruppaga tiyisli tu'rlandiriwlerge qarata invariantli'g'i'nda ko'rinedi (mi'sali' izotopli'q invariantli'q gruppasi' bolg'an $SU(2)$ gruppasi'na, unitarli'q simmetriya gruppasi' bolg'an $SU(3)$ gruppasi'na h.t.b.). A'dette izotopli'q, multipletlik, unitarli'q h.t.b. multipletler haqqi'nda ga'p etedi. Simmetriyani'n' juwi'q tu'rde ori'nlani'wi' multipletke kiriwshi bo'lekshelerdin' massalari'ni'n' ha'r qi'yli' ekenligin boldi'radi'.

³ Massa, energiya ha'm impuls arasi'nda

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

tu'rindagi relyativistlik qatnasti'n' bar ekenligin atap o'temiz.

simmetriyasi'ni'n' a'dewir to'men ekenligin bildiredi (bul jag'day spektralli'q si'zi'qlardi'n' Zeeman bo'liniwinde magnit maydani'ndag'i' sferali'q simmetriyani'n' joq etiliwine sa'ykes keledi).

Solay etip elementar bo'leksheler fizikasi'nda simmetriya tu'sinigi orayli'q ori'nlardin' birin iyeleydi eken. Ori'n alg'an simmetriya boyi'nsha bo'lekshlerdin' xarakteristikalarini, tipleri ani'qlanadi, soni'n' menen birge jan'a elementar bo'lekshelerdin' bar ekenligi boljap ayti'ladi. Simmetriya haqqi'ndag'i' ta'limatti'n' orayi'nda gruppalar teoriyasi' turadi. Usi' jag'dayg'a baylani'sli' bul pitkeriw qa'nigelik jumi'si' gruppalar teoriyasi'ni'n' elementar bo'leksheler fizikasi'nda tutqan orni'n teren'irek izertlew maqsetinde ori'nlandi'.

Pitkeriw qa'nigelik jumi'si'nda to'mendegidey jag'daylar di'qqat orayi'na ali'nadi':

1. Bo'lekshelerdin' elementarli'q mashqalasi': materiyani'n' bo'liniwshiligi, bo'lekshenin' elementarli'q kriteriyi, bo'lekshelerdin' qozg'ali'si' ma'selesi.

2. Leptonlar, kvarklar ha'm 4 tu'rli fundamentalli'q ta'sirlesiwler teoriyalari' sheklerindegi materiya haqqi'ndag'i' ha'zirgi zamandag'i' ko'z-qaraslar. Usi' ko'z-qaraslardi' ta'riyiplegende fizika iliminin' aldi'nda payda bolatug'i'n mashqalalar.

3. Elementar bo'leksheler fizikasi'ndag'i' simmetriyani'n' fundamentalli'g'i'. Fizikali'q biliwdegi simmetriyani'n' u'sh principi: sho'lkemlestiriwshilik, shek qoyi'wshi'li'q ha'm birlestiriwshilik.

4. Simmetriya prinsiplerin elementar bo'leksheler fizikasi'nda qollani'w.

II bap. Elementar bo'leksheler fizikasi'n u'yrengende gruppalar teoriyasi'n paydalani'wdi'n' fizikali'q tiykarlari'

6-§. Elementar bo'leksheler fizikasi'nda simmetriya prinsiplerinin' qollani'li'wi'

Elementar bo'leksheler fizikasi'nda simmetriya ideyalari'ni'n' birinshi qollani'li'wi' shek qoyi'w funkciyasi' menen baylani'sli'. Simmetriyalardi' izlew 1926-ji'li' O.Kleyndi, V.A. Fokti' ha'm V.Gordondi' Shredingerdin' relyativistlik emes ten'lemesinen relyativistlik invariant maydan ten'lemesine ali'p keldi. Kleyn-Gordon-Fok ten'lemesi skalyar tolqi'n funkciyasi' ushi'n relyativistlik invariant an'latpa boli'p tabi'ladi' ha'm waqi't boyi'nsha ekinshi ta'rtpi tuwi'ndi'g'a iye. Bul jag'day tolqi'n funkciyasi'n itimalli'q ti'g'i'zli'g'i'ni'n' amplitudasi' dep qarawda u'lken qi'yi'nshi'li'q payda etedi. Bunday qi'yi'nshi'li'q P.Dirakti' birinshi ta'rtpi tuwi'ndi'g'a iye relyativistlik invariant ten'lemeni izlewge ma'jbu'rledi. Dirakti'n' izertlew jumi'slari' ushi'n Kleyn-Gordon-Fok ten'lemesi baslang'i'sh punkt boli'p tabi'ldi'. Ma'sele 1928-ji'li' sheshildi. Dirak ten'lemesi skalyar maydanli'q o'zgeriwshiden ko'p qurawshi'g'a iye (to'rt qurawshi'g'a iye) tolqi'n funkciyasi'na o'tiw joli' menen ali'ndi'. Bunday tolqi'n funkciyasi' skalyarg'a sali'sti'rg'anda quramali'raq transformaciyali'q (simmetriyali'q) qa'siyetlerge iye. Bunday quramali' struktura Dirakti'n' spinori' (duri'si'rag'i' bispinori') dep ataladi'. Dirak ten'lemesi spin si'yaqli' elektronni'n' ishki erkinlik da'rejesin ha'm elektronni'n' antibo'lekshesi bolg'an pozitronni' o'z ishine aladi'. Dirakti'n' jumi'slari' basqa fiziklerdin' ko'p sanli' izertlewlerine ali'p keldi ha'm bul izertlewlerde si'zi'qli', relyativistlik invariantli' maydan ten'lemelerinin' tipleri ushi'n barli'q mu'mkinshilikler tabi'ldi'. Usi'nday jollar menen massag'a iye bo'leksheler ushi'n jazi'lg'an vektorli'q maydan ten'lemeleri u'yrenildi, al XX a'sirdin' 30-ji'llari' V.Paulidin', V.Vayskofti'n', P.Iordanni'n', E.Vignerdin' ha'm basqa da ko'p sanli' fiziklerdin' jumi'slari'nda tenzorli'q ta'rtibi ha'r qi'yli' bolg'an relyativistlik invariant ten'lemelerdin' mu'mkin bolg'an tipleri jetkilikli da'rejede toli'q izertlendi. Bul izertlewlerdin' barli'g'i' da maydanlardi' kvantlaw ideyalari' menen ti'g'i'z

baylani'sta ori'nlandi'. Bul jumi'slarda ga'p tek klassikali'q maydan ten'lemeleri haqqi'nda emes, al bul maydanlardi' kvantlaw ha'm olardi' jan'adan ashi'lg'an yamasa bar ekenligi boljang'an gipotezali'q bo'lekshelerdi ta'riyiplew ushi'n qollani'w jo'ninde boldi'. Usi'nday jumi'slardi'n' ishinde G.Veyldin' spini $\frac{1}{2}$ ge ten' massasi' joq bo'leksheler ushi'n relyativistlik invariant ten'leme ali'wg'a arnalg'an jumi'slari'n atap o'tiwge boladi' [Veyl]. Bul ten'leme ken'isliktin' aynali'q shag'i'li'si'wi'na qarata invariant. Usi' jag'dayg'a baylani'sli' G.Veyldin' jumi'si'na itibar berilmedi ha'm bul jumi's umi'ti'ldi'. Biraq Ekinshi Jer ju'zi uri'si'nan keyingi elementar bo'leksheler fizikasi'ni'n' rawajlani'w da'wirinde jupli'qti'n' saqlanbaytug'i'nli'g'i' ashi'lg'annan keyin ten'leme "qaytadan tuwi'ldi'". Joqari'da qarap o'tilgen bag'dar si'rtqi' geometriyali'q simmetriyalar menen baylani'sli'. Biraq usi'ni'n' menen bir waqi'tta basqa da bag'dardag'i' izertlewler rawajlana basladi'. Bul izertlewlerde bo'leksheler fizikasi'na ishki, dinamikali'q simmetriyalar kirip keldi. Bunday krip keliwlerge ten' tiykarg'i' sebepshi elektronni'n' spininin' ashi'li'wi' boli'p tabi'ladi'. Spin bo'lekshenin' ishki erkinlik da'rejesi boli'p tabi'ladi'. Geometriyali'q tu'rlendiriwler spinlik o'zgeriwshilerge de ta'sir etetug'i'n bolsa da, spinlik xarakteristikalar tek geometriyali'q qa'siyetlerdin' ja'rdeminde toli'g'i' menen ani'qlanbaydi'. Spinnin' simmetriya menen baylani'si' B.Van-der-Vardennin', E.Kartanni'n' ha'm basqa da bir qatar matematikler menen fiziklerdin' jumi'slari'nda ani'qlandi'. $\frac{1}{2}$ ge ten' spin ushi'n spinlik o'zgeriwshiler simmetriyani'n' SU(2) gruppasi'na iye (bul u'sh o'lsheмли ken'isliktin' izomorfli'q aylani'wlar gruppasi' boli'p tabi'ladi'). Usi'ni'n' menen birge kvantli'q teoriyani'n' en' a'hmiyetli prinsiplerinin' biri bolg'an birdey bo'lekshelerdin' parqi'ni'n' joqli'g'i' principine sa'ykes spinnin' tu'rlendiriwler gruppasi' ori'n almasti'ri'wlar gruppasi' menen ti'g'i'z baylani'sqan. Spindi ishki erkinlik da'rejesi dep qaraw izotopli'q spin (izospin) tu'siniginin' payda boli'wi'na ali'p keldi. Al izospin tu'sinigi elementar bo'leksheler fizikasi'ni'n' bunnan bi'lay rawajlani'wi' ushi'n fundamentalli'q ori'ndi', atap aytqanda birlestiriwshi funkciyani' ju'zege keltiretug'i'n ori'ndi' iyeledi. Izospin tu'sinigi fizika ilimine 1932-j'i'li' V.Geyzenberg ta'repinen kirgizildi. Neytron ashi'lg'annan keyin fizikler ku'shli ta'sirlesiwde proton menen neytron birdey qa'siyetlerdi ko'rsetedi. Olar arasi'ndag'i' barli'q ayi'rma olardi'n' birewinin' (protonni'n') elektr zaryadi'na iye, al ekinshisinin'

(neytronni'n') elektr zaryadi'na iye emes ekenliginde. Usi'nday tiykarda Geyzenberg proton menen neytron bir bo'lekshenin' ha'm qi'yli' hallari'na sa'ykes keledi degen boljawdi' usi'ndi'. Soni'n' menen birge bul hallar ishki erkinlik da'rejesinin' ha'r qi'yli' proekciyalari'na sa'ykes keledi, al ishki erkinlik da'rejesi tek eki proekciyag'a iye ha'm sonli'qtan spinge uqsas. Ku'shli ta'sirlesiwlerdegi proton menen neytronni'n' simmetriyasi' izotopli'q simmetriya atamasi'n aldi', al bul simmetriyani'n' gruppasi' spinnin' gruppasi'nday $SU(2)$ boli'p tabi'ladi'. Bul ideya bo'lekshelerdi teoriyali'q-gruppali'q ko'z-qarastan ha'r qi'yli' bo'lekshelerdin' birlestiriwge qaratil'g'an birinshi qa'dem edi.

Biz joqari'da simmetriya principi'ning birlestiriwshi funkciyasi'ni'n' bar ekenligin ayqi'n ko'rdik. Usi'nday birlestiriwshi princip penen kalibrovkali'q simmetriyalar ideyasi' arasi'ndag'i' baylani'sti'n' ju'da' ku'shli ekenligin atap o'temiz. Maydan ten'lemelerinin' o'zine ta'n xarakteristikasi' si'pati'nda kalibrovkali'q invariantli'q Maksvell ten'lemelerinin' transformaciya'li'q qasidiyotlerin izertlewidin' bari'si'nda XX a'sirdin' basi'nda tabi'lg'an edi. Simmetriyani'n' bul tipi o'zine ta'n ishki xarakterge iye. Sebebi qozg'ali's ten'lemelerin (yamasa sistemani'n' lagranjiani'n) o'zgerissiz qaldi'ratug'i'n bunday tiptegi tu'rlendiriwler tikkeley dinamikali'q maydanli'q o'zgeriwshilerge tiyisli ha'm ken'isliklik-waqitli'q tu'rlendiriwlerdi o'z ishine almaydi'. Elektrodinamikadag'i' bunday tu'rlendiriwlerdin' ma'nisi mi'nadan ibarat: elektromagnit maydanni'n' 4 o'lshemli vektor-potenciali'na koordinata menen waqitli'n' 4 o'lshemli gradientin qosi'wg'a boladi' ha'm bul Maksvell ten'lemelerin o'zgertpeydi. Bo'leksheler fizikasi'na birinshi ret kalibrovkali'q invariantli'q ideyasi' 1919-jili G.Veyldin' jumi'si'nda paydalani'ldi'. Bul jumi'sta ol uli'wmali'q sali'sti'rmali'q teoriyasi'ni'n' ideyalari'n rawajlandi'ri'wg'a ha'm gravitaciya'li'q ha'm elektromagnitlik ta'sirlesiwlerdi birlestiriwge ti'ri'sti'. Usi' da'wirde kalibrovkali'q simmetriyalardi'n' og'ada ku'shli birlestiriwshi mu'mkinshilikleri ayqi'n ko'rindi.

Kalibrovkali'q simmetriyalar ideyalari' kvantli'q mexanikani'n' sheklerinde 1926-1929 jillari' V.A.Fokti'n', F.Londonni'n' ha'm G.Veyldin' (nemisse Hermann Klaus Hugo Weyl, 1885-jili tuw'lg'an ha'm 1955-jili qayti's bolg'an nemis matematigi ha'm fizigi) jumi'slari'nda bunnan bi'lay rawajlandi'ri'ldi' [11-18]. Kvantli'q-

maydanli'q ten'lemelerdin' (Shredingerdin', Kleyn-Gordon-Fokti'n') uli'wmali'q qa'siyeti tolqi'n funkciyasi'n fazali'q ko'beytiwshige ko'beytiwdi tu'rlendiriwlerge qarata olardi'n' invariantli'g'i' boli'p tabi'ladi'. Usi'nday tu'rlendiriwlerde elektromagnit maydani' menen ta'sirlesiwshi bo'lekshenin' maydanli'q ten'lemesi invariant boli'wi' ushi'n vektor-potencialg'a f funkciyasi'ni'n' 4 o'lsheмли gradientin qosi'w kerek. Basqa so'z benen aytqanda lokalli'q kalibrovkali'q invariantli'q bo'lekshe ha'm ta'sirlesiwdi ali'p ju'riwshi vektorli'q maydan (spini pu'tin sang'a ten' bo'lekshe, yag'ni'y bozon) arasi'ndag'i' ta'sirlesiw menen baylani'sli'. Usi'nday mi'sallar kalibrovkali'q simmetriyani'n' birlestiriwshi orni'n ja'ne de ko'rsetedi. Usi'g'an baylani'sli' Veyl 1929-ji'li' kalibrovkali'q simmetriyani'n' talaplari'ni'n' uli'wmali'q xarakterge iye ekenligin ko'rsetti [14].

Solay etip simmetriya principin qollani'wdi'n' birinshi da'wirinde tiykari'nan u'sh bag'dardag'i' izertlewler rawajlandi'ri'ldi': ten'lemelerdin' relyativistlik invariantli'g'i'n izertlew (yag'ni'y geometriyali'q simmetriya) ha'm ishki simmetriyalardi' (izotopli'q ha'm kalibrovkali'q) paydalani'w. Bul bag'darlardi'n' ha'r qaysi'si' o'tken a'sirdin' 40-ji'llari'ni'n' aqi'ri'nda baslang'an da'wirde bunnan bi'lay rawajlandi'ri'ldi'.

Uri'stan keyingi ji'llari' relyativistlik invariantli'q talabi'na baylani'sli' bolg'an izertlewler dawam etti. Biraq usi' da'wirde maydanni'n' kvantli'q teoriyasi'n do'retiw en' birinshi qatarg'a ji'lji'di'. Bul bag'darda eki ulli' na'tiyjeni atap o'tiw mu'mkin:

Birinshisi. O'tken a'sirdin' 50-ji'llari'ni'n' basi'nda YU.SHvingerdin', R.Feynmanni'n', S.Tomonagidin' ha'm F.Daysonni'n' jumi'slari'nda kvantli'q elektrodinamikani'n' relyativistlik invariant uyi'tqi'w teoriyasi' menen qaytadan normirovka (perenormirovka) teoriyasi' do'retildi.

Ekinshisi. V.Paulidin', G.Lyuderstin' ha'm YU.SHvingerdin' jumi'slari'nda relyativistlik invariantli'q, statistikani'n' tipi ha'm belgili bolg'an CPT teoremasi' arasi'ndag'i' baylani's tabi'ldi' [19-20].

Bul eki na'tiyje de elementar bo'leksheler fizikasi'ni'n' bunnan bi'layg'i' rawajlani'wi' ushi'n a'hmiyetli ori'ndi' iyeledi. Bunnan keyin relyativistlik invariantli'qti' izertlew juwmaqlandi' ha'm bo'leksheler fizikasi'ni'n' rawajlani'wi'ndag'i' ulli' ori'ndi' ishki simmetriyalar iyeley basladi'. Elementar

bo'leksheler fizikasi'nda izotopli'q simmetriya (invarinatli'qti'n' birlestirish funkciyasi') ideyasi' jedel tu'rde paydalani'la basladi'. Proton menen neytrondi' izotopli'q spinnin' ha'r qi'yli' proekciyasi' dep qaraw tiykari'nda ku'shli ta'sirlesiwshi bo'lekshelerdi biriktirish boyi'nsha jumi'slar jedellesti. Al bunday bo'lekshelerdin' sani' eksperimentalli'q texnikani'n' rawajlanishi'wi' menen keskin tu'rde o'sti. Na'tiyjede fundamentalli'q bo'leksheler si'pati'nda tek bir neshe bo'lekshelerdi qabi'l etiwge bag'darlang'an, al qalg'anlari' bolsa sol bo'lekshelerden turadi' dep esaplaytug'i'n ideyalar payda bola basladi'. Bunday modellerde simmetriya principlerinin' tutqan orni' ulli' ha'm usi'g'an baylanisli' bir eki aspektti qarap o'temiz.

Birinshisi simmetriyalardi'n' bo'lekshelerdi multipletlerge biriktirish tiykar bola alatug'i'nli'g'i'nan ibarat.

Ekinshisi simmetriya talabi'ni'n' bo'lekshelerdin' ha'r qi'yli' kanallar boyi'nsha i'di'rawi'ni'n' sali'sti'rmali' itimalli'g'i'n' ani'qlay ali'wi'nan ibarat. Usi' talaplarga sa'ykes geypara i'di'rawlar pu'tkilley qadag'an etilgen boli'p shi'qti'.

Joqari'da keltirilgen sharayatlar eksperimentte ali'ng'an na'tiyjeler menen birdey birlestirishlik qa'siyetlerine iye simmetriyani'n' ha'r qi'yli' gruppalari'na tiyisli bolg'an i'di'rawlardi' sali'sti'ri'wg'a mu'mkinshilik berdi. Bul bag'dardag'i' en' jemisli jumi'slar $SU(2)$ izospinlik simmetriya dubleti tiykari'nda emes, al fundamentalli'q bo'lekshelerdin' tripleti (yag'ni'y simmetriyani'n' $SU(3)$ gruppasi') tiykari'nda ori'nlandi'. Bul ideyani' izbe-iz rawajlandi'ri'w 1964-jili' M.Gell-Mandi', YU.Neemandi' ha'm G.Cveygti kvarkler gipotezasi'na ali'p keldi [21]. Kvarkler simmetriyani'n' $SU(3)$ gruppasi'ni'n' en' to'mengi keltirilip shi'g'ari'lmaytug'i'n ko'rinisleri (nepriwodimi'e predstavleniya) boyi'nsha tu'rlendiriletug'i'n u'sh bo'leksheden turatug'i'n topar boli'p tabi'ladi'. O'tken a'sirdin' 50-jillari'ni'n' aqi'ri'nda kvarklik modeldin' dinamikali'q na'tiyjeleri tabi'ldi'. Soni'n' menen birge kvarklik modeldi ken'eytiw za'ru'rli'gi de payda boldi'. Birinshi ta'repten tek u'sh kvarkten turatug'i'n model eksperimentte ali'ng'an ko'p sanli' na'tiyjelerdi tu'sindirish ushi'n jetkiliksiz boli'p shi'qti' ha'm sonli'qtan kvarklerdin' ji'ynag'i' ken'eytiw jan'a bo'lekshelerdi ashi'wda u'lken tabi'slarg'a ali'p keldi. Usi'ni'n' menen bir qatarda kvarklerdin' jan'a xarakteristikasi' bolg'an ren'di kirgizish za'ru'rli'gi

payda boldi'. Elementar bo'leksheler fizikasi'na ren'di kirgiziw de simmetriyani'n' qa'siyeti menen baylani'sli' edi. Solay etip elementar bo'leksheler fizikasi'na simmetriyani'n' jan'a gruppasi' – ren'li $SU(3)$ gruppasi' kirip keldi.

Simmetriya ideyasi'n paydalani'wdi'n' u'shinshi bag'dari' (bul ekinshi bag'dar menen qosi'ladi') kalibrovkali'q simmetriyani' paydalani'w boli'p tabi'ladi'. Bo'leksheler fizikasi'ndag'i' simmetriya ideyasi'n paydalani'wdi'n' birinshi etapi'nda baslang'an kalibrovkali'q simmetriya tiykari'nda teoriyalardi' birlestiriw 50-jillardi'n' basi'nda pu'tkilley umi'ti'ldi'. Kalibrovkali'q simmetriyani' paydalani'wdi'n' ekinshi da'wiri 1954-jilgi' Sh.Yang penen R.Millsti'n' jumi'slari'nan baslanadi' [22]⁴. Bul jumi'sti'n' tiykarg'i' ideyasi' kalibrovkali'q invariantli'q talabi' menen bo'lekshelerdin' bir biri menen ta'sirlesiw konsepciyasi'n arali'qli'q bozonlar (spini 1 ge ten' bolg'an vektorli'q bozonlar) almasi'w arqali' ju'zege keledi dep boljawdan ibarat. Bul jumi'sti'n' ayi'ri'm momentlerin atap o'temiz. Bul jumi'sta kalibrovkali'q simmetriya si'pati'nda izotopli'q simmetriya qaraldi' ha'm usi' jag'dayg'a baylani'sli' ga'p globalli'q emes, al lokalli'q invariantli'q haqqi'nda ayti'ldi'. Solay etip kalibrovkali'q ha'm izotopli'q simmetriya birgelikte qaraldi'. Yang-Millsti'n' jumi'si'nda f funkciyasi'n kalibrovkali'q tu'rlendirgende sanli'q funkciya emes (elektrodinamikada sanli'q funkciya qollani'ladi'), al qurawshi'lari' bir biri menen kommutaciyalanbaytug'i'n matricali'q vektor qollani'ladi'. Bul jag'day kalibrovkali'q tu'rlendiriwlerde simmetriyani'n' abellik (kommutativlik) gruppasi'nan abellik emes (kommutativlik emes) gruppasi'na o'tiw din' ori'n alg'anli'g'i'n bildiredi. Na'tiyjede teoriyani'n' bunnan bi'lay rawajlani'wi' ushi'n a'hmiyetli buri'li's ju'zege keldi.

Yang penen Millstin' jumi'si' en' aldi'n'g'i' qatar fiziklerdin' u'lken ko'lemlerdegi izertlew jumi'slari'ni'n' baslani'wi'na ali'p keldi. Bul jumi'slardi'n' barli'g'i'nda da

⁴ Yang-Mills teoriyasi' abellik emes kalibrovkali'q gruppaga iye teoriya boli'p tabi'ladi'. Bul teoriyadag'i' kalibrovkali'q maydanlar Yang-Mills maydanlari' dep ataladi'. Usi'nday teoriyalar 1954-jili' Shj.Yang ha'm R.Mills ta'repinen usi'ni'ldi' [22]. Biraq bir qansha waqitlar dawami'nda bul teoriyani'n' haqiyqatli'qqa qatnasi' joq matematikali'q izleniwler dep qabi'l etildi. Biraq usi'nday jag'daylarga qaramastan 1960-1970 jillari' Yang-Mills teoriyalari'ni'n' tiykari'nda elementar boleksheler fizikasi'ndag'i' standart modeldin' en' tiykarg'i' eki teoriyasi' doretildi: simmetriyani'n' $SU(3)$ gruppasi' tiykari'nda kvantli'q xromodinamika (ku'shli ta'sirlesiwlerdin' teoriyasi') ha'm simmetriyani'n' $SU(2)$ gruppasi' tiykari'nda elektra'zzi ta'sirlesiwlerdin' teoriyasi'.

Bul mag'li'wmatlardi'n' adresi https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_Янга_Миллса.

abellik emes kalibrovkali'q simmetriyag'a tiykarlang'an teoriyada ha'r qi'yli' ta'sirlesiwlerdi birlestiriw tiykarg'i' maqset etip ali'ndi'. A'zzi ha'm elektromagnit ta'sirlesiwlerdi birlestiriwge qaratil'g'an en' da'slepki izertlewler og'ada u'lken qi'zi'g'i'wshi'li'qlardi' payda etedi. Biraq alpi'si'nshi' ji'llardi'n' ortalari'nda bul oblasttag'i' progress aytarli'qtay emes edi. Bug'an sebep ta'sirlesiwlerdin' kalibrovkali'q abellik emes teoriya ushi'rasqan qi'yi'nshi'li'qlar boli'p tabi'ladi'. En' u'lken qi'yi'nshi'li'qlardi'n' biri mi'naday edi: do'retilip ati'rg'an teoriyalardi'n' barli'g'i'nda da ta'sirlesiwdi ali'p ju'riwshi vektorli'q bo'leksheler elektrodinamikadag'i' arali'qli'q bo'leksheler bolg'an fotonlar si'yaqli' massag'a iye bolmawi' kerek edi. Biraq usi' jag'dayg'a qaramastan eksperimentlerde massasi' nolge ten' bolg'an tek bir bo'lekshe – foton belgili edi. Basqa bozonlardi'n' barli'g'i' da massag'a iye. Bul bag'darda u'lken aldi'g'a ji'lji'w 1967-ji'li' S.Vaynbergtin', A.Salamni'n' ha'm L.Gleshoulardi'n' jumi'slari'nda ju'z berdi [23]. Olar $SU(2) \times U(1)$ gruppasi'na qarata lokalli'q kalibrovkali'q invariantli'q ideyasi'na tiykarlani'p elektromagnitlik ha'm a'zzi ta'sirlesiwlerdin' birden bir teoriyasi'n islep shi'qti' [$SU(2)$ – a'zzi ta'sirlesiwdi ta'riyipleytug'i'n izospinlik gruppasi' (abellik emes gruppasi'), $U(1)$ – elektrodinamikani'n' kalibrovkali'q tu'rlandiriw gruppasi' (abellik)]. Bul gruppasi' do'retilgende simmetriyani' paydalani'w ideyasi' menen birge og'an qarama-qarsi' mazmunga iye simmetriyani'n' buzi'li'wi' (da'liregi simmetriyani'n' spontan tu'rde buzi'li'wi') og'ada a'hmiyetli moment boli'p tabi'ladi'. Bunday ideya 1940-ji'llardan buri'n V.Geyzenbergtin' (Verner Karl Geyzenberg, nemishe Werner Karl Heisenberg, 1901-ji'li' tuwi'lg'an ha'm 1976-ji'li' qayti's bolg'an nemis fizik-teoretigi, 1932-ji'li' fizika boyi'nsha Nobel si'yli'g'i'n ali'wg'a miyasar boldi', kvantli'q mexanikani' do'retiwshilerdin' biri) ferromagnetiklerdegi spinlerdin' spontan ta'rtplesiwine bag'i'shlang'an jumi'slari'nda tuwi'lg'an edi.

Spontan tu'rde buzi'lg'an simmetriyag'a iye kvantli'q sistemalardi'n' qa'siyetlerin izertlew boyi'nsha fundamentalli'q jumi'slardi' o'tken a'sirdin' 60-ji'llari'ni'n' basi'nda Dj.Goldstoun ta'repinen ori'nlandi' [24]. 1965-1967-ji'llari' buzi'lg'an kalibrovkali'q simmetriyag'a iye maydanni'n' kvantli'q teoriyasi'ni'n' matematikali'q strukturasi'n izertlegen bir qatar fizikler ta'repinen arali'qli'q vektorli'q bozonlardi'n' massalari'ni'n' payda boli'wi'ni'n' mu'mkin ekenligi ashi'ldi'. Bul qubi'li's Xaggs

mexanizmi atamasi'na iye boldi'. Bul mexanizmda paydalani'p S.Vaynberg, A.Salam ha'm Gleshoular spini 1 ge ten' bolg'an massasi' joq araliqliq vektorliq bozonlardi'n' payda boli'w qi'yi'nshi'li'g'i'n saplasti'rdi'. Bul jag'day a'zzi baylani'stag'i' ta'sirlesiwlerdi ali'p ju'riwshi $W^\pm$ ha'm Z^0 bozonlari'na tiyisli edi. 1970-jil'lardi'n' basi' kalibrovkaliq simmetriya ideyasi'n paydalani'wda ja'ne de u'lken tabi'slarg'a ali'p keldi. Kvarklerdin' ren'li simmetriyasi'ni'n' gruppasi' (yag'ni'y SU(3) gruppasi'n) lokalli'q, kalibrovkaliq abellik emes simmetriya gruppasi' si'pati'nda tallaw kvantli'q xromodinamikani'n' payda boli'wi'n ta'miyinledi. Bul teoriya kvarkler menen ku'shli ta'sirlesiwlerdi ali'p ju'riwshiler bolg'an araliqliq vektorliq glyuonlardi'n' teoriyasi' boli'p tabi'ladi'. Solay etip 1970-jil'lardi'n' aqi'ri'nda elementar bo'leksheler fizikasi'nda lokalli'q abellik emes kalibrovkaliq simmetriyani' paydalanatug'i'n eki teoriya tasti'yi'qlandi':

a) kvantli'q xromodinamika [simmetriyani'n' SU(3) gruppasi'],

b) elektra'zzi ta'sirlesiwlerdin' birden bir teoriyasi' [simmetriyani'n' SU(2)xU(1) gruppasi'].

Bul teoriyalardi'n' ishki strukturalari'ni'n' teren' tu'rdegi uqsasli'g'i' olardi' uli'wmali'q bolg'an birden-bir teoriyani'n' qurami'ndag'i' eki teoriya si'pati'nda qarawg'a u'mit payda etedi. Elektra'zzi ha'm ku'shli ta'sirlesiwlerdi birlestiriw fiziklerdi gravitaciyani' da o'z ishine alatug'i'n birden-bir teoriyani' do'retiwge umti'ldi'radi'. Bunday birlestiriwdin' mu'mkinshiligin gravitaciyalig' ta'sirlesiw ushi'n kalibrovkaliq traktovkani'n' bar ekenligi ko'rsetedi. Biraq usi' jag'day menen bir qatarda qi'yi'nshi'li'qlar da ori'n almaqta. Gravitaciyalig' ta'sirlesiwge baylani'sli' bolg'an tu'rlendiriw gruppasi' si'rtqi' – "geometriyalig' simmetriya, al basqa barli'q u'sh ta'sirlesiwlerdin' simmetriyalari' ishki simmetriyalar boli'p tabi'ladi'. Oni'n' u'stine 1970-jil'lardi'n' basi'nda ishki ha'm si'rtqi' simmetriyalardi' birlestiriwdin' mu'mkinshiliginin' joq ekenligi da'lillendi.

Ta'sirlesiwlerdi birlestiriw mashqalasi'ni'n' ja'ne bir aspekti bar. Ma'sele sonnan ibarat, barli'q bo'leksheler keskin tu'rde fermionlar menen bozonlarg'a bo'linedi (fermionlardi'n' spini yari'm pu'tin, al bozonlardi'n' spini pu'tin $\hbar$ qa ten' ekenligi eske tu'siremez). Bozonlar menen fermionlar arasi'nda simmetriya joq (yag'ni'y olar simmetriya arqali' baylani'spag'an). Biraq sol 1970-jil'lari' fermionlar menen

bozonlardi' birlestirivdin' mu'mkinshiligi tabi'ldi'. Bul jag'daydi'n' maydanli'q o'zgeriwshiler ani'qlang'an ken'islikti grassmanli'q o'zgeriwshiler dep atalatug'i'n kommutაციаланbaytug'i'n koordinatalardi' kirgiziw arqali' mu'mkinshiligi da'lillendi. Bunday simmetriya supersimmetriya atamasi'n aldi' ha'm fermion-bozon-fermion (yamasa bozon-fermion-bozon) tu'rlandiriwinin' a'dettegi ken'islikte ji'lji'wg'a ali'p keletug'i'nli'g'i' ayqi'n boldi'. Demek supersimmetriya tiykari'nda ishki ha'm si'rtqi' simmetriyalardi' birlestiriwge boladi' eken ha'm bul jag'day o'z gezeginde barli'q ta'sirlesiwlerdi birlestiriw ushi'n jol ashi'p beredi. Fizika iliminde bul programmani' "Ulli' birlestiriw" dep ataydi'.

Elementar bo'leksheler fizikasi'nda teoriyali'q-gruppali'q usi'ldi' ju'zege keltirivdin' qi'sqasha tariyxi' joqari'dag'i'lardan ibarat.

7-§. Gruppalar ha'm algebralar

Biz gruppani'n' ani'qlamasi' haqqi'nda joqari'da uli'wma tu'rde ga'p ettik. Endi ma'seleni elementar bo'leksheler fizikasi'na tikkeley qatnasi' bar tu'rinde qaraymi'z [25].

Meyli $g_1, g_2, \dots, g_n$ elementlerine iye G ko'pligi berilgen ha'm bul ko'plik to'mendegidey qa'siyetlerge iye bolsi'n:

1. $g_i g_j = g_k$ ko'beytiw ni'zami' ornati'lg'an, bul an'latpada $g_i, g_j \in G$ sha'rti ori'nlanatug'i'n bolsa, onda $g_k \in G$ sha'rti de ori'nlanadi' (yag'ni'y ko'pliktin' eki elementinin' bir birine ko'beymesi usi' ko'pliktin' elementine ten' boladi').

2. Associativlik ni'zami' ori'nlanadi', yag'ni'y $g_i(g_j g_k) = (g_i g_j)g_k$.

3. e birlik elementi bar boladi': $eg_i = g_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

4. g_i^{-1} ker element bar boladi', bunday jag'dayda $g_i^{-1}g_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Joqari'da keltirilgen aksiomalar ori'nlanatug'i'n bolsa G ko'pliginde $g_1, g_2, \dots, g_n$ elementlerinin' gruppasi' berilgen dep esaplaydi'.

En' a'piwayi' mi'sal retinde tegisliktegi aylani'wdi' qaraymi'z. φ mu'yeshine buri'wlardan turatug'i'n Φ ko'pligin qaraymi'z. Bunday jag'dayda:

1. Ko'beytiw ni'zami' $\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_3 \in F$ qosi'ndi'si'nan turadi'.

2. Associativlik ni'zami' $(\varphi_1 + \varphi_2) + \varphi_3 = \varphi_1 + (\varphi_2 + \varphi_3)$ tu'rinde jazi'ladi'.

3. Bul jag'dayda birlik element 0 ge ten' mu'yeshke buri'w (yamasa $0+2\pi n$ mu'yeshke buri'w, n arqali' pu'tin san belgilengen).

4. Bul jag'dayda ker element $-\varphi$ (yamasa $-\varphi+2\pi n$ mu'yeshke buri'w).

Solay etip saylap ali'ng'an tegislikke perpendikulyar bolg'an ko'sherdin' do'gereginde buri'wlar gruppani' payda etedi eken.

Dekart sistemasi'n beretug'i'n x, y, z koordinatalar ko'sherlerinin' u'sh o'lsheмли ken'isliktegi x, y tegisligindegi z ko'sherinin' do'geregindegi θ_3 mu'yeshine aylani'wi'n qaraymi'z:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_3(\theta_3) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Meyli ε mu'yeshi sheksiz kishi buri'li'w mu'yeshi bolsi'n. $R_3(\varepsilon)$ matricasi'n (bul matricani' buri'w yamasa aylandi'ri'w matricasi' dep ataymi'z) Teylor qatari'na jayami'z ha'm ε shamasina si'zi'qli' bolg'an ag'zalar menen sheklenemiz:

$$R_3(\varepsilon) = R_3(0) + \frac{dR_3}{d\varepsilon_{\varepsilon=0}} \varepsilon + O(\varepsilon^2) = 1 + iA_3\varepsilon + O(\varepsilon^2). \quad (1.2)$$

Bul an'latpani' jazg'anda $R_3(\varepsilon)$ matricasi'n birlik matrica dep esapladi'q ha'm jan'adan

$$A_3 = -i \frac{dR_3}{d\varepsilon_{\varepsilon=0}} = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

matricasi'n kirgizdik. Bul matricani' z ko'sherinin' (u'shinshi ko'sherdin') do'geregindegi buri'wdi'n' generatori' dep ataymi'z. Endi ε shamasini'n' orni'na $\varepsilon = \eta_3/n$ shamasin' saylap alami'z. Bunday jag'dayda η_3 mu'yeshine buri'w $R_3(\varepsilon)$ operatori'n

$$R_3(\eta_3) = \lim_{n \rightarrow \infty} [1 + iA_3\eta_3/n]^n = e^{iA_3\eta_3} \quad (1.4)$$

sheklerinde n ret qollani'wdi' bildiredi.

y ko'sherinin' do'geregindegi buri'wdi' qaraymi'z:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_2(\theta_2) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (1.5)$$

Bul an'latpada y ko'sherinin' do'geregindagi buri'w ushi'n sa'ykes

$$A_2 = -i \frac{dR_2}{d\varepsilon_{\varepsilon=0}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

generatori' saylap ali'ng'an. x ko'sherinin' do'gereginde buri'w ushi'n

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ 0 & -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_1(\theta_1) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

an'latpasi'n jazami'z. Bul an'latpada bolsa x ko'sherinin' do'gereginde buri'w ushi'n

$$A_1 = -i \frac{dR_1}{d\varepsilon_{\varepsilon=0}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

generatori' jazi'lg'an.

Endi u'sh o'lsheмли ken'islikte 3 o'zshemli dekartli'q sistemani' i'qti'yarli' shekli mu'yeshlarga buri'w ushi'n mi'naday an'latpani' jazami'z:

$$R_1(\eta_1)R_2(\eta_2)R_3(\eta_3) = e^{iA_1\alpha}e^{iA_2\beta}e^{iA_3\gamma}. \quad (1.9)$$

Biraq u'sh o'lsheмли ken'isliktegi buri'wlar ushi'n a'dette basqasha, atap aytqanda Eyler mu'yeshlerin paydalang'an halda to'mendegidey an'latpani' jazadi':

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = e^{iA_1\alpha}e^{iA_2\beta}e^{iA_3\gamma}. \quad (1.10)$$

A_l generatorlari' ($l = 1, 2, 3$)

$$A_i \cdot A_j - A_j \cdot A_i = [A_i, A_j] = i \varepsilon_{ijk} A_k, \quad (1.11)$$

kommutatsiyali'q qatnaslari'n qanaatlandi'radi'. Bul an'latpada ε_{ijk} arqali' u'shinshi rangali' absolyut simmetriyali' tenzor belgilengen. A_l matricolari'ni'n' ($l = 1, 2, 3$) antisimmetriyali', al R_k matricadari'ni'n' ortogonalli'q ekenligin atap o'temiz. Bunnan $R_i^T R_j = \delta_{ij}$ ten'liginin' ori'nlanatug'i'nli'g'i'n ha'm T belgisinin' transponirlengen (yag'ni'y qatarlar bag'analar, al bag'analar qatarlar menen almasti'ri'lg'an) degan ma'nisti an'latatug'i'nli'g'i'n atap o'temiz. A_l generatorlari'ni'n' ($l = 1, 2, 3$) ja'rdeminde barli'q buri'wlardi'n' beriliwi mu'mkin. Basqa so'z benen aytqanda u'sh o'lsheмли aylani'wlardi'n' gruppasi' (soni'n' menen birge diskretlik tu'rlendiriwlerge shekemgi da'llikte qa'legen Li u'zliksiz gruppasi')

algebrani'n' beriliwi menen toli'q tu'rde xarakterlenedi $[yag'ni'y A_l \quad (l = 1, 2, 3)$ generatorlari'ni'n' beriliwi, olardi'n' si'zi'qli' kombinatsiyalari' ha'm kommutatsiyali'q qatnaslardi'n' ja'rdeminde].

Algebrani'n' ani'qlaması. Biz Li algebrasi'na ani'qlama beriwden baslaymi'z. Oni' L arqali' belgileyemiz. Eger to'mendegidey sha'rtler qanaatlandi'ri'latug'i'n bolsa, onda K haqi'yqi'y sanlar maydani' u'stinen Li algebrasi' dep aytami'z:

(i) L algebrasi' K u'stinen si'zi'qli' ken'islik (dlya $x \in L$ ushi'n K sani'na ko'beytiw ali'qlang'an),

(ii) $x, y \in L$ ushi'n $[x, y]$ kommutatori' ani'qlang'an, ol da L ge kiredi, qala berse $[x, y]$ to'mendegidey qa'siyetlerge iye boladi':

pri $\alpha \in K$ ha'm $[x_1 + x_2, y] = [x_1, y] + [x_2, y]$ bolg'anda $[\alpha x, y] = \alpha[x, y]$, $[x, \alpha y] = \alpha[x, y]$,

barli'q $x, y \in L$ lar ushi'n $[x, y_1 + y_2] = [x, y_1] + [x, y_2]$;

barli'q $x, y \in L$ lar ushi'n $[x, x] = 0$;

$[[x, y] z] + [[y, z] x] + [[z, x] y] = 0$ (Yakobi ten'ligi).

Gruppalardi'n' ha'm Li algebralari'ni'n' ko'rinisleri. Ko'riniske ani'qlama bermesten buri'n izomorfizm menen gomomorfizm tu'siniklari kerek boladi'.

Meyli G ha'm G' gruppalari' berilgen bolsi'n. G gruppasi'ni'n' G' gruppasi'ndag'i' f sa'wlelendiriwin gomo- yamasa izomorfizm dep ataymi'z (biz joqari'da basqasha tu'rdegi, biraq usi' ma'nistegi ani'qlama bergen edik).

Qa'legen $g_1, g_2 \in G$ ushi'n $f(g_1, g_2)$ sa'wlelendiriwi ushi'n $f(g_1, g_2) = f(g_1) f(g_2)$.

Demek, eger f shaması' g_1 tag'i' g_1 di sa'wlelendiretug'i'n bolsa, onda usi' f shaması' (funkciyasi') $g_1 g_2$ degi $g_1 g_2$ lerdi de sa'wlelendire aladi'.

Bunday jag'dayda, eger $f(e)$ G' tag'i' birlik elementti sa'wlelendiretug'ni' bolsa, onda kerı ma'nistegi tasti'yi'qlaw duri's emes, atap aytqanda G' ko'pliginen e' elementti f^{-1} den $f^{-1}(e')$ ge kerı tu'rlendiriwdin' ja'rdeminde sa'wlelendiriledi. Bul $f^{-1}(e')$ ni gomomorfizimnin' yadrosi' dep ataydi'.

Eger gomomorfizimnin' yadrosi' G gruppasi'nan e boli'p tabi'latug'i'n bolsa, onda usi'nday bir ma'nisli gomomorfizm izomorfizm dep ataladi'.

Ko'rinistin' ani'qlaması: Meyli G gruppasi' menen bazi' bir L si'zi'qli' ken'islik berilgen bolsi'n. G gruppasi'ni'n' L si'zi'qli' ken'isligindegi ko'rinisi T su'wreti

(su'wretleniwi) boli'p tabi'ladi'. Bul T ko'rinisi G gruppasi'ndag'i' ha'r bir g elementine L ken'isliginde bazi' bir $T(g)$ operatori'n jazadi'. Sonli'qtan to'mendegidey sha'rtler qanaatlandi'ri'ladi':

$$1. \text{Qa'legen } g_1, g_2 \in G \text{ ushi'n } T(g_1, g_2) = T(g_1)T(g_2).$$

Bul jag'daydi' a'dettegi kristallografiyada koordinatalar sistemasi'n birinen son' ekinshisin tu'rlendiriwdi ori'nlawg'a ekvivalent bolg'an koordinatalar sistemasi'n tu'rlendiriw matricasi'n usi' tu'rlendiriw matricalari'ni'n' ko'beymesine ten' dep aytadi'.

2. $T(e) = 1$, bul an'latpada 1 arqali' L si'zi'qli' ken'isligindegi birlik operator belgilengen.

$T(g)$ gruppasi'ni'n' ko'pligi G gruppasi'na gomomorfli'.

L si'zi'qli' ken'isligi ko'rinsler ken'isligi, al $T(g)$ operatorlari' ko'rinsler operatori' dep ataladi'. Qara berse olar L di L de o'z-ara bir ma'nisli ani'qlaydi'. 1-qa'siyet G gruppasi'ni'n' L degi ko'rinsinin' G gruppasi'ni'n' G^* gruppasi'ndag'i' gomomorfizmi ekenligin an'g'artadi'. Eger L ken'isliginin' o'lsheplerinin' sani' shekli bolsa, onda oni'n' o'lsheplerinin' sani' T ko'rinsinin' o'lsheplerinin' sani' dep ataladi' ha'm n_T arqali' belnilenedi. Bunday jag'dayda L ken'isliginde $e_1, e_2, \dots, e_n$ bazislerin saylap ali'p $T(g)$ operatorlari' n -ta'rtpili matricalardi'n' ja'rdeminde beriwge boladi':

$$t(g) = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1.12)$$

$$T(g)e_k = \sum t_{ij}(g)e_j, t(e) = 1, t(g_1, g_2) = t(g_1)t(g_2).$$

$t(g)$ matricasi' T ni'n' ko'rinsinin' matricasi' dep ataydi'. Eger G gruppasi'ni'n' o'zi belgili bir ta'rtpitegi matricalardan turatug'i'n bolsa, onda en' a'piwayi' ko'rinslerdin' biri $T(g) = g$ bolg'an jag'dayda ali'nadi' (teppe-ten' yamasa birlestirilgen (adjoint) ko'rinis).

Solay etip biz simmetriyani'n' gruppasi'ni'n' ko'rinsini haqqi'nda ga'p etkenimizde usi' gruppada'gi' simmetriyali'q operaciylar (simmetriyali'q tu'rlendiriwler) ushi'n jazi'lg'an matematikali'q an'latpalardi' – matricalardi' tu'sinedi ekenbiz.

Paragrafti'n' aqi'ri'nda biz elementar bo'lekshler fizikasi'nda unitarli'q gruppaga bolg'an ha'm U_N tu'rinde belgilenetug'i'n (unitarli'q unimodulyarli'q $SU(2)$ (spin ha'm

izospin gruppalari'), unitarli'q simmetriya gruppasi' $SU(3)$ tin' ha'm basqa da simmetriya gruppalari'ni'n') ken'nen qollani'latug'i'nli'g'i'n atap o'temiz.

8-§. Toli'q simmetriya haqqi'nda

"Kristallografiya", "Qatti' deneler fizikasi'", "kondensaciyalang'an hallar fizikasi'", "Kristallofizika" si'yaqli' pa'nlerden biz geometriyalig' figuralarda qanday simmetriya elementlerinin' bar bolatug'i'nli'g'i', soni'n' menen birge usi'nday figuralarda qanday simmetriyalig' operaciyalardi'n' ori'n talatug'i'nli'g'i' izertlenilip, simmetriyalig' operaciyalardan turatug'i'n simmetriyani'n' noqatli'q ha'm ken'isliklik gruppalari' ken' tu'rde ayti'ladi'. A'dette simmetriya elementlerin belgilew ushi'n to'mendegidey belgilewlerden paydalanami'z [26]:

Simmetriyani'n' buri'w ko'sherlerin (povorotni'e osi simmetrii) $1, 2, 3, \dots, \infty$ arqali', al aynali'q ko'sherlerdi $\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \dots, \bar{\infty}$ arqali' belgileymiz. Bunday jag'dayda $\bar{1}$ ko'sheri tegisliktegi a'piwayi' shag'i'li'si'wg'a, yag'ni'y simmetriya tegisligi m ge sa'ykes keledi. Ekinshi ta'rtpili aynali'q ko'sher $\bar{2}$ bolsa simmetriya orayi'ndag'i' shag'i'li'si'wg'a sa'ykes kelip oni' c arqali' belgileydi. Kristallografiyag'a baylani'sli' bolg'an barli'q tarawlarda bir ren'ge iye figuralar, qubi'li'slar izertleniledi.

Qosi'msha simmetriya ko'sherleri bi'layi'nsha jazi'ladi':

Antiko'sherler: $\underline{1}, \underline{2}, \underline{3}, \dots, \underline{\infty}$.

Antiaynali'q ko'sherler: $\bar{\underline{1}}, \bar{\underline{2}}, \bar{\underline{3}}, \dots, \bar{\underline{\infty}} (\bar{\underline{1}} = \underline{m})$.

Joqari'da ayti'lg'an simmetriya bir qatar shekleniwge iye. Atap aytqanda fizika iliminde ren' ma'selesu u'lken a'hmiyetke iye. Usi'ni'n' na'tiyjesinde elementar bo'leksheler fizikasi'nda da bir erkinlik da'rejesi retinde ren' qabi'l etilgen. Usi' jag'daylarga baylani'sli' "toli'q simmetriya" tu'sinigi qabi'l etilgen.

Belgili kristallograf A.V.SHubnikov simmetriya haqqi'ndag'i' ta'limatti' a'dettegi simmetriyadag'i' ten'liklerge [biriktiriwge bolatug'i'n (sovmestimi'y) ha'm aynali'q simmetriyalar (zernalnaya simmetriya)] ten'liklerdin' to'mendegidey eki tu'rin qosti' [27]:

- 1) biriktiriwge bolatug'i'n antiten'lik ha'm
- 2) aynali'q antiten'lik.

Biriktirivge bolatug'i'n antiten'lik operaciyalari'nda a'dettegi buri'wlar ha'm bunnan keyin ori'nlanatug'i'n ren'di "qarama-qarsi' ren'ge" o'zgertiw operaciyalari' ori'nlanadi'.

Aynali'q antiten'lik operaciyalari' figuralardi' (yamasa figuralardi'n' bir bo'limin) aynali'q buri'wlar ha'm bunnan keyin figurani'n' ren'in "qarama-qarsi'" ren'ge boyaw menen a'melge asi'ri'ladi' (antisimmetriya, aq-qara antisimmetriya yamasa "plyus-minus" simmetriya).

Antisimmetriyadag'i' ren'di o'zgertiw simmetriyasi' antiten'lestiriv operaciyasi' dep ataladi' ha'm 1 arqali' belgilendi.

Tenzorlardi'n' simmetriyasi'na qosi'msha simmetriyalardi' (antiko'sherlerdi ha'm antiaynali'q ko'sherlerdi) qosi'w arqali' toli'q simmetriyani' aladi'.

9-§. Elementar bo'lekshelerdin' simmetriyasi' ha'm olardi' simmetriya tiykari'nda sistematzaciyalaw ma'selesi

Ha'zirgi waqi'tlari' gruppalar teoriyasi'n qollani'p simmetriyani' paydalani'w joqari' energiyalar fizikasi'ndag'i' en' na'tiyjeli usi'llardi'n' qatari'na kirdi. Bo'lekshelerdi sistemag'a tu'siriv, olardi' ha'm olardi'n' qa'siyetlerin boljaw boyi'nsha bir qatar jetiskenlikler qolg'a kirgizildi. Biz to'mende toli'q simmetriya tiykari'nda elementar bo'lekshelerdi sistemag'a tu'siriv ma'selesin qi'sqasha tu'rde qarap o'temiz.

Qa'legen elementar bo'leksheni qanday da bir fizikali'q maydanni'n' qozi'wi' si'pati'nda qaray alami'z. Mi'sali' elektronlardi' elektronli'q maydanni'n', al protonlardi' sa'ykes protonli'q maydanni'n' bo'leksheleri dep qaraw ken'nen tarqalg'an. Bunday qozi'wlardi'n' ta'biyati'na itibar bermey ha'm tek polyar ha'm aksial vektorlar menen ta'riyiplenetug'i'nlari'n qaraw menen sheklenip olardi'n' sferali'q jag'dayg'a sa'ykes keliwshi simmetriyasi'n ko'rsetiw mu'mkin. Usi'nday maqsette da'slep toli'q simmetriyani'n' kristallografiyali'q gruppalari'ni'n' sistematzikasi'ni'n' 1-kestenin' ja'rdeminde beriletug'i'nli'g'i'n atap o'temiz [27]. Kestede toli'q simmetriyani'n' 11 sheklik ha'm derlik sheklik gruppalari'ni'n' simmetriyasi' berilgen. Olar mi'nalar: $\infty/\infty/mmm$, $\infty/\infty/\underline{m} \underline{m} \underline{m}$, $\infty/\infty/\underline{m} m m$,

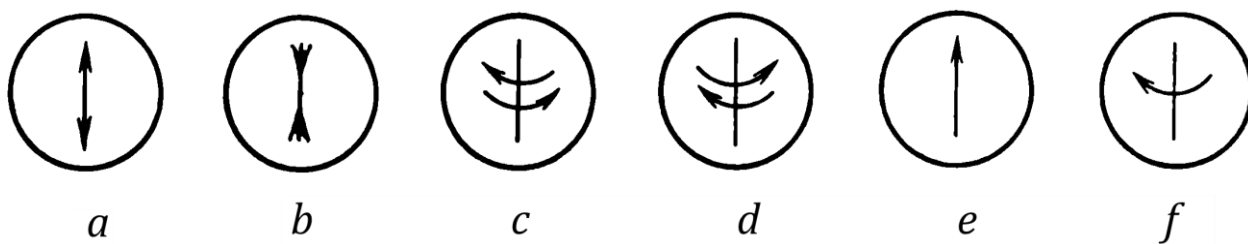
$\infty/\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$, $\infty/\underline{\infty}\underline{2}$, $\infty/\infty 2$, $\infty/\infty m$, $\infty/\infty/\underline{m}$, $\infty/\infty \underline{m}\underline{m}$, $\infty/\infty/\underline{m}\underline{m}$, ∞/∞ .

1-keste.

Toli'q simmetriyani'n' kristallografiyalig'q gruppalari'ni'n' sistematikasi' [27]

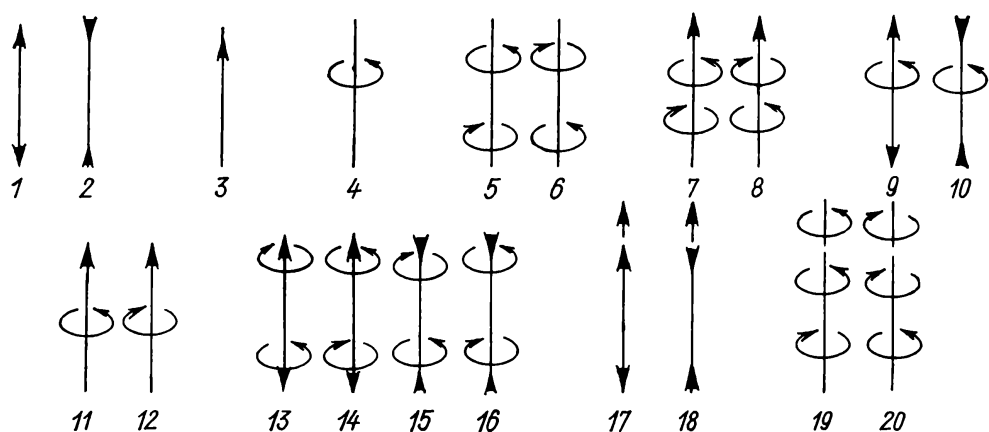
$m\bar{3}m$ $\infty/\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\bar{3}m$ $\infty/\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\bar{3}m$ $\infty/\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\bar{3}m$ $\infty/\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	432 $\infty/\infty 2$	$\bar{4}32$ $\infty/\infty 2$	$m\bar{3}$ $\infty/\infty/\underline{m}$	$\underline{m}\bar{3}$ $\infty/\infty/\underline{m}$	$\bar{4}3m$ $\infty/\infty \underline{m}\underline{m}$	$\bar{4}3m$ $\infty/\infty \underline{m}\underline{m}$	23 ∞/∞
$\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m2$ $4/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $6/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$ $\infty/\underline{m}\underline{m}\underline{m}$
2 32 $\infty 2$	222 422 622 $\infty 2$	2 32 $\infty 2$	222 422 622 $\infty 2$	$\bar{m}$ $\bar{6}$ $\infty/\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{6}$ $\infty/\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{6}$ $\infty/\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{6}/\underline{m}$ $\infty/\underline{m}$	$4/\underline{m}$ $\bar{6}/\underline{m}$ $\infty/\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{6}/\underline{m}$ $\infty/\underline{m}$	$4/\underline{m}$ $\bar{6}/\underline{m}$ $\infty/\underline{m}$
$\underline{m}$ $3m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $4m\underline{m}$ $6m\underline{m}$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}$ $3m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $4m\underline{m}$ $6m\underline{m}$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\underline{m}\underline{m}2$ $\bar{6}m\underline{m}$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$4m\underline{m}$ $\bar{6}m\underline{m}$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{3}m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\bar{4}2m$ $\bar{3}m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{3}m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\bar{4}2m$ $\bar{3}m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$2/\underline{m}$ $\bar{3}m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$
$2/\underline{m}$ $\bar{3}m$ $\infty \underline{m}\underline{m}$	$\bar{4}2m$ $\bar{6}22$ $\infty 2$	222 $\bar{6}22$ $\infty 2$	422 $\bar{6}22$ $\infty 2$	$\bar{1}$ $\bar{3}$ ∞	$\bar{4}$ $\bar{6}$ ∞	$\bar{1}$ $\bar{3}$ ∞	$\bar{4}$ $\bar{6}$ ∞	2 $\bar{6}$ ∞	4 $\bar{6}$ ∞	1 3 ∞

Geometriyalig'q jaqtan bul gruppalardi'n' barli'g'i' da to'rt elementar qozi'wlardi'n' superpozitsiyasi' si'pati'nda su'wretleniwi mu'mkin (skalyar, psevdoskalyar, polyarli'q-vektorli'q ha'm aksial vektorli'q). 11 kombinatsiyani'n' oni' 1-su'wrette, al olardi'n' "kristallografiyalig'q" varianti' 2-su'wrette berilgen (on bir kombinatsiyani'n' on danasi').



1 - su'wret. Sferali'q qozi'wlardi'n' sha'rtli tu'rde su'wretleniwi:

a, b — skalyarlar; c, d — psevdoskalyarlar; e, f — polyarli'q- ha'm aksial vektorli'q qozi'wlar

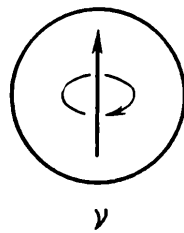
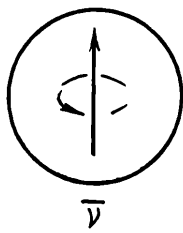


2-su'wret. Ekinshi rangali' tenzorlar ha'm olardi'n' kombinaciyalari'ni'n' ja'rdeminde bazi' bir shamalardi'n' grafikali'q su'wretleniwi.

1- ha'm 2- ekinshi rangali' on' ha'm teris polyar tenzorlar (∞/mmm gruppasi'), 3 - polyar vektor ($\infty/\underline{mmm}$ gruppasi'), 4 - aksialli'q tenzor ($\infty/m\underline{mm}$ gruppasi'), 5- ha'm 6- ekinshi rangali' aksialli'q tenzor (shep ha'm on', $\infty/\underline{mm} \underline{m}$ gruppasi'), 7- ha'm 8-aksialli'q tenzor menen polyar vektordi'n' kombinaciyasi' ($\infty/\underline{m}$ gruppasi'), 9-, 10- polyar tenzor menen aksialli'q vektordi'n' gruppasi' ($\infty/\overline{m}$ gruppasi'), 11- ha'm 12- polyar ha'm aksialli'q vektorlardi'n' kombinaciyasi' ($\infty \underline{2}$ gruppasi'), 13-16 polyar ha'm aksialli'q tenzorlardi'n' kombinaciyasi' ($\infty \underline{2}$ gruppasi'), 17- ha'm 18- polyar tenzor menen polyar vektordi'n' kombinaciyalari' (∞mm gruppasi'), 19- ha'm 20- aksialli'q tenzor menen aksialli'q vektordi'n' kombinaciyasi' ($\infty \underline{m} \underline{m}$ gruppasi').

SHA'rtli tu'rde shekli o'lshemlerge iye dep qaralatug'i'n ha'r bir elementar bo'lekshe belgili bir simmetriyag'a iye boladi'. Ha'r qi'yli' elementar bo'lekshelerdin' o'zine ta'n qa'siyetleri olardi'n' simmetriyasi'nda ori'n ali'wi' kerek. Biz a'melge asi'rayi'n dep ati'rg'an elementar bo'lekshelerdi sistemag'a tu'siriw mashqalasi' simmetriya gruppalari' menen elementar bo'leksheler arasi'ndag'i' sa'ykeslikti tabi'wdan ibarat. Bul jag'dayda biz sol elementar bo'lekshelerdin' qa'siyetlerinin' simmetriyalari'n toli'q esapqa ali'wi'mi'z kerek. Mi'sali', elektromagnitlik maydanni'n vektorli'q xarakteri ha'm fotonni'n' (fotondi' γ arqali' belgileymiz) vektorli'q tolqi'n funkciyasi' oni'n' simmetriyasi'ni'n' $\infty/\infty/\underline{mmm}$ gruppasi'na

kiretug'i'nli'g'i'n tasti'yi'qlawg'a mu'mkinshilik beredi. Foton spini 1 ge ten' bo'lekshe boli'p tabi'ladi'. Sonli'qtan foton ushi'n bo'lekshe menen antibo'lekshe birdey. Tek vektorli'q qurawshi'larg'a iye bolg'anli'qtan foton massag'a iye emes.

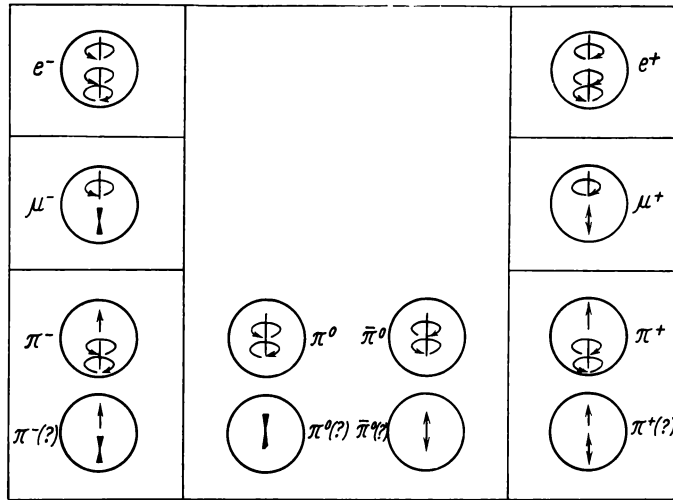


3-su'wret. Eki neytrinoni'n' sha'rtli tu'rde ali'ng'an su'wreti.

Polyarli'q-vektorli'q ha'm aksialli'q-vektorli'q qurawshi'lardi'n' o'z-ara basqasha orientaciyag'a iye boli'wi' da mu'mkin (bir birine perpendikulyar emes, al parallellik orientaciyag'a). Kombinaciyalardi'n' ekewi boli'wi' mu'smkin: on' ha'm shep, soni'n' menen birge bir bo'lekshe ekinshisinin' antibo'lekshesi boli'p tabi'ladi' (3-su'wret). Vektorli'q bo'lekshe bolg'anli'qtan bul bo'lekshenin' massasi'ni'n' nolge ten' boli'wi' kerek. Aksialli'q-vektorli'q qurawshi'g'a iye bolg'anli'qtan bunday bo'lekshe magnit maydani'nda tek eki bag'i'tqa iye bola aladi', oni'n' spini $\frac{1}{2}$ ge ten'. Bul mag'li'wmatlardi'n' barli'g'i' da bunday bo'lekshenin' neytrino (ν) ekenligi haqqi'nda mag'li'wmat beredi. Neytrinoni'n' simmetriyasi'ni'n' gruppasi' $\infty/\infty/2$ dep juwmaq shi'g'ara alami'z. Neytrinoda massani'n' bar ekenligin [neytrinoni'n' massasi'] skalyar ha'm psevdoskalyar qurawshi'lardi'n' bar ekenligi menen baylani'sti'ri'w kerek. Psevdoskalyar qurawshi'g'a π^0 mezon juwap beredi. Oni'n' aqi'lg'a muwapi'q keletug'i'n eki modifikaciyasi' (on' ha'm shep) bir birinin' antibo'lekshesi boli'p tabi'ladi'.

Polyar ha'm aksialli'q qozi'wlarg'a iye skalyar menen psevdoskalyardi'n' a'piwayi' tu'rdegi eki qosi'ndi'si'n qarawg'a boladi'. Psevdoskalyari' bar aksialli'q-vektorli'q qozi'wdi'n' qosi'ndi'si' elektron-pozitron jubi'ni'n' simmetriyasi'na sa'ykes keledi. Bunday bo'lekshe aksialli'q-vektorli'q qurawshi'ni'n' ori'n ali'wi'na baylani'sli' $\frac{1}{2}$ shamasina ten' spinge iye boladi'. Psevdoskalyar qurawshi'ni'n' boli'wi' bul jag'dayda bo'lekshe menen antibo'lekshenin' arasi'nda enantimorfizmnin' ha'r qi'yli' belgisinin' bar boli'wi'na ali'p keledi. Solay etip elektron menen pozitrong'a simmetriyani'n' $\infty/\infty \underline{m} \underline{m}$ gruppasi' sa'ykes keledi eken dep juwmaq shi'g'arami'z (4-su'wret). Tap sol si'yaqli' skalyardi'n' polyarli'q-vektorli'q uyi'tqi'w menen qosi'ndi'si' μ -mezonni'n' simmetriyasi'na sa'ykes keletug'i'n bolsa kerek. Bul

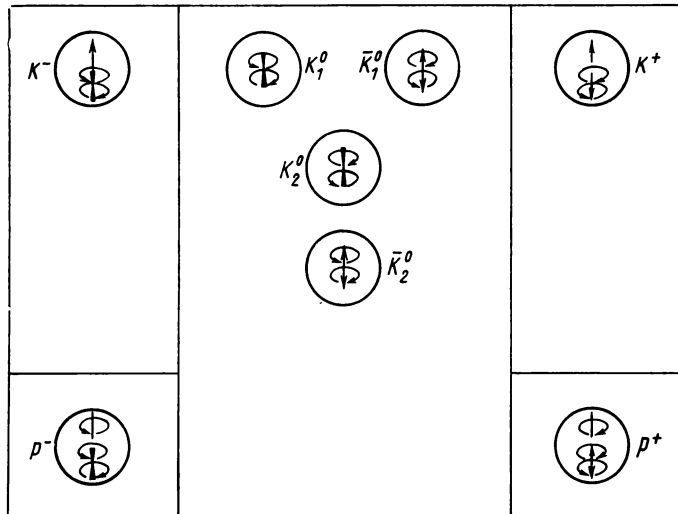
jag'dayda bo'lekshe menen antibo'lekshe skalyardi'n' belgisi menen aji'raladi'. Olardi'n' ekewi de $\frac{1}{2}$ ge ten' spinge iye. μ -mezonni'n' simmetriyasi' simmetriyani'n' $\infty/\infty/m$ gruppasi'na sa'ykes keledi.



4-su'wret. Elektronlar, μ - ha'm π - mezonlar skalyarli'q (psevdoskalyarli'q) ha'm vektorli'q (psevdovektorli'q) elementar qozi'wlardi'n' kombinaciyasi' si'pati'nda.

Qozg'ali'wshi' zaryad (polyarli'q-vektorli'q qurawshi') psevdoskalyar menen birgelikte zaryadlang'an π mezonni'n' simmetriyasi'n beriwi kerek (simmetriyani'n' $\infty/\infty/m$ gruppasi'). "Skalyar-polyar vektor" kombinaciyasi' (simmetriyasi'ni'n' gruppasi' $\infty/\infty mm$) zaryadlang'an π mezon'ga yamasa ele ashi'lmag'an sog'an usag'an bo'lekshege sa'ykes keledi (4-su'wret). Bul eki jag'dayda massasi' nolge ten' emes ha'm "azg'i'ng'an" sferali'q polyarli'q-vektorli'q qozi'wg'a iye bo'leksheni alami'z. Usi' qozi'w menen azg'i'ng'an elektr dipoline iye boli'w baylani'sti'ri'ladi'. Bul jag'dayda bo'lekshe magnit maydani' menen ta'sirlespeydi (pu'tin spin), biraq elektr maydani'nda spinge sa'ykes qa'siyetke iye boli'wi' kerek. Usi'nday maydanda bo'lekshe tek eki orientaciyag'a iye boladi': maydanni'n' bag'i'ti'nda ha'm maydanni'n' bag'i'ti'na qarama-qarsi'.

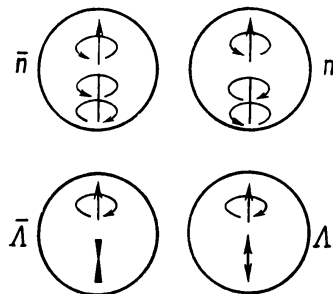
Skalyar menen psevdoskalyardi'n' to'rt tu'rli qosi'ndi'si'ni'n' ori'n ali'wi' mu'mkin (5-su'wret). Olardi'n' ekewi π^0 mezonni'n' ha'm oni'n' antibo'lekshesinin' jup qosi'ndi'si' tu'rinde ali'nadi'. Qalg'an ekewi aralas haldan turadi': bo'lekshenin' belgisine iye skalyar ha'm antibo'lekshenin' belgisine iye psevdoskalyar ali'nadi' (yamasa kerisinshe). Usi'nday qosi'ndi', shamasi', K^0 mezonlardi' olardi'n' "aljasti'ri'lg'an (yamasa shatasti'ri'lg'an)" hallari' menen ta'riyipleydi. Bunday bo'leksheler (π^0 mezon si'yaqli') pu'tin ma'nisli spinge iye.



5-su'wret. K-mezonlar ha'm
protonlar skalyarlar ha'm
psevdoskalyarlardi'n' vektooli'q
ha'm psevdovektorli'q qozi'wlar
menen qosi'ndi'lari'ni'n'
kombinaciyasi' si'pati'nda.

K^0 mezonlardi'n' ha'r bir jubi' menen, o'z gezeginde zaryadlang'an bo'lekshelerdi sa'ykeslendiriw mu'mkin. 5-su'wrette olardi'n' to'rtewi ko'rsetilgen: olardi'n' ekewi K^+ ha'm K^+ mezonlarg'a, birewi protong'a ha'm ja'ne birewi antiprotong'a sa'ykes keledi. Zaryadlang'an K mezonni'n' spini pu'tin san, al proton menen antiprotonni'n' spini $\frac{1}{2}$ ge ten'. Olardi'n' barli'g'i' da ∞/∞ simmetriyag'a iye.

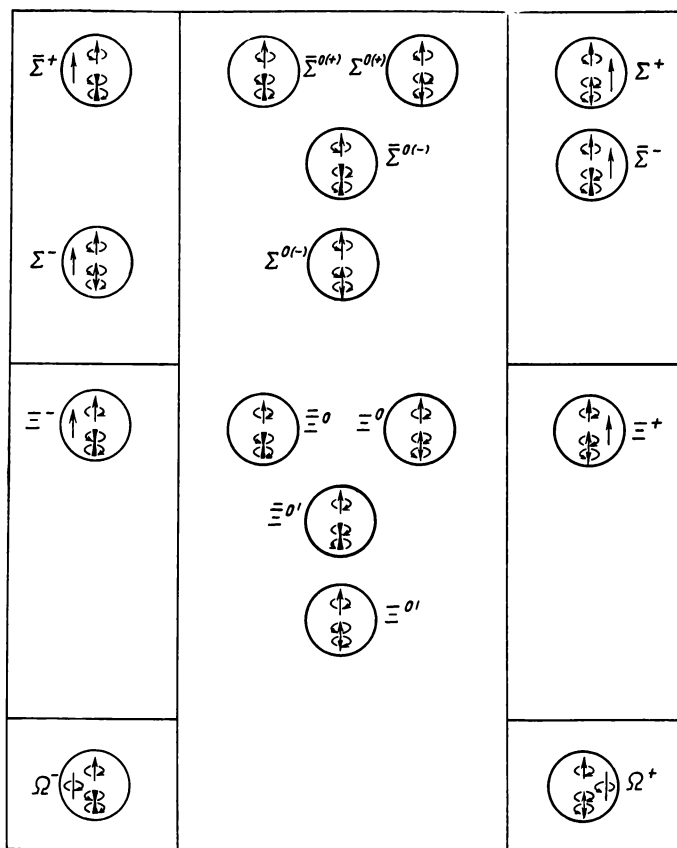
Jan'a gruppani' neytrino skalyar ha'm psevdoskalyar menen birgelikte payda etedi. Olar spini $\frac{1}{2}$ ge ten' bolg'an neytralli'q bo'leksheler boli'p tabi'ladi'. Bul jerde barli'g'i' boli'p segiz qosi'ndi'ni' qaraw mu'mkin. 6-su'wrette olardi'n' to'rtewi ko'rsetilgen: ekewi neytrino menen antineytrinoni' ta'riyiplewshi si'pati'nda, al qalg'an ekewi Λ menen $\bar{\Lambda}$ bo'lekshelerin ta'riyiplewshi si'pati'nda qaraladi'. Bunday qosi'ndi'lardi'n' simmetriyasi'ni'n' gruppasi' ∞/∞ . Proton menen neytron ha'r ki'yli' gruppalg'a kiretug'i'n bolsa da olar bir birine ju'da' usaydi' ha'm tek bir vektorli'q (zaryadli'q) qurawshi' menen aji'raladi'. Ekewi de birdey simmetriyag'a iye (∞/∞).



6-su'wret. Skalyar ha'm psevdoskalyar
qozi'wlar qosi'lg'an neytrino neytron
ha'm Λ -bo'lekshelerdin' modeli
si'pati'nda.

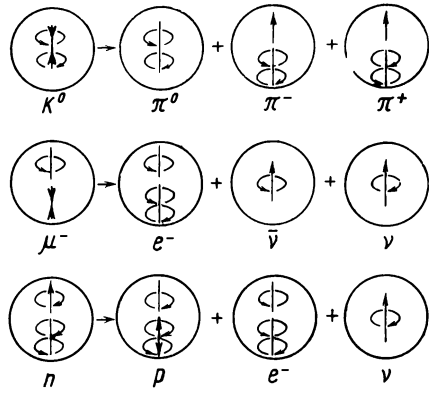
Quramali'li'g'i' boyi'nsha kelesi qosi'ndi' o'z ishine eki vektorli'q (neytrinoli'q varianttag'i') ha'm eki skalyarli'q qurawshi'ni' aladi' (7-su'wret). Sa'ykes keletug'i'n bo'leksheler neytralli'q bo'leksheler boli'p tabi'ladi'. Olardi'n' yari'mi'n Σ^0 -bo'leksheler (ha'm antibo'leksheler), al qalg'an yari'mi'n Ξ -bo'leksheler (ha'm

antibo'leksheler) quraydi'. Olardi' bir birinen tek neytrino boyi'nsha ayi'ri'w mu'mkin: yari'mi'na on' neytrino, al ekinshi yari'mi'na shep neytrino sa'ykes keledi. Usi'ni'n' menen elementar bo'lekshelerdi simmetriyasi' boyi'nsha sistemag'a tu'siriwdi tamamlawg'a bolar edi. Sebebi bul jag'dayda barli'q elementar qozi'wlar qosi'ladi'. Biraq su'wretlewdi' toli'q boli'wi' ushi'n keyingi neytralli'q bo'lekshelerge sa'ykes keliwshi zaryadlang'an bo'lekshelerdi de qarap o'tiw kerek. Bunday qosi'mshani' Σ ha'm Ξ bo'lekshelerdin' spininin' $\frac{1}{2}$ ten' ekenligin esapqa ali'w menen kirgiziw mu'mkin. Bul jag'day bunday bo'leksheler ushi'n "zaryadli'q" qurawshi'ni'n' polyarli'q-vektorli'q ekenligin bildiredi.



7-su'wret. Σ -, Ξ - ha'm Ω -
bo'lekshelerdin' simmetriyasi'

K^0 bo'leksheleri menen aksialli'q-vektorli'q qozi'wdi'n' qosi'ndi'si'ni'n' protondi' beretug'i'nli'g'i' tiykari'nda neytralli'q Σ^0 ili Ξ^0 -bo'lekshelerinin' aksialli'q-vektorli'q qozi'w menen qosi'ndi'si' haqqi'nda oylaw mu'mkin. Usi'nday kombinaciyani'n' spininin' shamasi' $3/2$ ge yamasa 0 ge ten' boli'wi' kerek. Bunday qosi'ndi'ni'n' keyinirek ashi'lg'an Ω -bo'leksheni ta'riyipleytug'i'n boli'wi' mu'mkin. Σ , Ξ ha'm bo'lekshelerge tiyisli bolg'an barli'q qosi'ndi'lar ∞/∞ simmetriyasi'na iye boladi'.



8-su'wret. K^0 , μ — ha'm neytronni'n' i'di'rawi'n illyustracialaw ha'm elementar qozi'wlardi'n' saqlani'wi'.

Joqari'da usi'ni'lg'an sistematikani'n' duri'sli'g'i'n olardi'n' i'di'rawi' boyi'nsha tekserip ko'riwge boladi'. Si'rtqi' ta'sirler bolmag'anda spontan tu'rde ju'zege keletug'i'n i'di'raw processi i'di'rawg'a shekemgi ha'm i'di'rawdan keyingi qurawshi'lardi'n' qosi'ndi'si'ni'n' ten' boli'wi'n talap etedi. Bul tasti'yi'qlaw simmetriyani'n' saqlani'w ni'zami' der atalatug'i'n ni'zamni'n' ju'zege keliwine ali'p keledi (bul ni'zam ta'biyatti'n' en' uli'wmali'q ha'm en' toli'q ni'zami' bolsa kerek). 8-su'wrette bazi' bir a'piwayi' bolg'an belgili i'di'rawlardi'n' interpretaciyalari' berilgen. Bul su'wretti u'yrengende ten'liktin' bir ta'repindegi belgileri ha'r qi'yli' bolg'an skalyar ha'm psevdoskalyar qozi'wlardi'n' simmetriya ko'z-qarasi'nda noldi beretug'i'nli'g'i'n an'g'ari'w kerek. Bir skalyarli'q qurawshi' (psevdoskali'rli'q qurawshi') eki vektorli'q qurawshi'g'a ha'm qarama-qarsi' bag'i'tta o'te aladi'.

10-§. Bir qatar juwmaqlar

XIX a'sirdin' ortalari'nda ulli' fizik Maksvell elektromagnitlik qubi'li'slardi' ta'riyipleytug'i'n fundamentalli'q ten'lemelerdi jazdi'. Sa'l keyinirek Lorenc bul ten'lemelerdin' belgili bir simmetriyag'a iye ekenligin tapti' ha'm bunday simmetriyani' oni'n' ati' menen Lorenc simmetriyasi' dep ataydi'. Francuz Puankare Lorenc simmetriyasi'n translyaciyani' qosi'w joli' menen ken'eytti. Simmetriyani'n' Puankare ha'm Lorenc gruppalari'na tiykarlani'p G.Minkovskiy biz jasap ati'rg'an du'nyani'n' 4 olshemli Rimanli'q ken'islik-waqi'tli'q geometriyalı'q obekt ekenligin ha'm bul obekttin' metrikasi'ni'n' $g_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ tu'rinde jazi'latug'i'nli'g'i'n ashti'. Solay etip elektromagnetizmdi u'yreniw du'nyani'n'

strukturalari haqqi'ndagi' bizin' bilimlerinmizdi $D = 3$ o'lsheмлиlikten $D = 4$ o'lsheмлиlikke shekem ken'eytti.

Keyinirek elektronni'n' teoriyasi' bul koncepciyani'n' duri's ekenligin tasti'yi'qladi'. Spinorli'q tolqi'n funkciyasi'ni'n' ja'rdeminde ta'riyiplenetug'i'n elektronni'n' spinlik strukturalari' simmetriyani'n' $SU(2)$ gruppasi'na kiredi. O'z gezeginde bul gruppasi' bizin' "ken'islik-waqi'tti'n'" ken'isliklik b'liminin' simmetriyasi'ni'n' $SO(3)$ gruppasi'ni'n' b'limi boli'p tabi'ladi'. $SO(3)$ gruppasi'n Lorencin' $SO(1,3)$ gruppasi'na shekem ken'eytiw 4 qurawshi'g'a iye tolqi'n funkciyasi'ni'n' qosi'msha erkinlik da'rejelerinin' bar ekenligin ashti' ha'm bul jag'day antib'lekshelerdin' bar ekenligin boljawg'a mu'mkinshilik berdi. Bunnan keyin jaqti'li'qti'n' ha'm elektronni'n' teoriyalari' Minkovskiydin' $D = 3 + 1$ o'lsheмли ken'isliginde ha'reket etetug'i'n ha'm Puankare- (Lorenc-simmetriyalar) ja'ne $U(1)_{em}$ simmetriyasi'na tiykarlang'an kvant elektrodinamikasi'na biriktirildi. Kalibrovkali'q simmetriya tu'sinigi ku'shli ha'm elektra'zzi ta'sirlesiwler teoriyalari'n d'rtiwde og'ana a'hmiyetli ori'nlardi' iyeledi. Al bul teoriyalar bolsa ha'zirgi zamanlardagi' elementar b'lekshelerdin' standart modeli menen olar arasi'ndagi' ta'sirlesiwlerdin' tiykari'n quraydi'.

Ha'zirgi waki'tlardagi' eksperimentalli'q mag'li'wmatlar A'lemde materiyani'n' jan'a tu'rlerinin' ha'm jan'a ta'sirlesiwlerdin' bar ekenligin k'rssetpekte. Materiyani'n' usi' jan'a formalari'ni'n' jan'a simmetriyalar menen ta'riyiplenedi dep boljaw ta'biyiy na'rse. Bul simmetriyalar qanday boladi' ha'm qanday algebralardi'n' ja'rdeminde ta'riyiplenedi? Bul ma'selelerdi sheshiw jaqi'n bolajaqtag'i' fizika iliminin' aldi'nda turg'an ma'selelerdin' biri boli'p tabi'ladi'.

Pitkeriw qa'nigelik jumi'si' boyi'nsha uli'wmali'q juwmaqlar

1. Pitkeriw qa'nigelik jumi'si'nda ha'zirgi zaman elementar bōleksheler fizikasi'ni'n' (joqari' energiyalar fizikasi'ni'n') tiykari'nda ken'isliklik-waqi'tli'q ha'm ishki simmetriyalar haqqi'ndag'i' ta'limatti'n' jatqanli'g'i', fizikani'n' bul fundamentalli'q bōliminin' rawajlani'wi'ni'n' simmetriya haqqi'ndag'i' bilimlerden' rawajlani'wi' menen tikkeley baylani'sli' ekenligi ayqi'n mi'sallar tiykari'nda kōrsetildi.

2. Materiyanı'n' tiykari'nda jatatug'i'n jan'a elementar bōlekshelerdin' ashi'li'wi', soni'n' menen birge barli'q fizikani'n' rawajlani'wi' simmetriya haqqi'ndag'i' ta'limatti'n', atap aytqanda ishki simmetriyanı'n' jan'a gruppaları'ni'n' ha'm usı gruppalardı'n' elementleri arası'ndag'i' matematikali'q qatnaslardı' ani'qlawshi' jan'a algebralardı'n' payda bolı'wi' menen tikkeley baylani's ayqi'n tu'rde sa'wlelendirildi.

3. Kristallofizikali'q principler kōz-qarasları'nda ha'r bir elementar bōlekshenin' yamasa olardı'n' ji'ynag'i'ni'n' (elektronlar, protonlar, neytrino, elektron-pozitron jubi' ha'm basqalar) belgili bir simmetriyag'a iye bolatug'i'nli'g'i', bul simmetriyanı'n' gruppalardı' payda etetug'i'nli'g'i' ayqi'n mi'sallarda kōrsetildi.

4. Pitkeriw qa'nigelik jumi'si'nda keltirilgen materiallar ha'zirgi zaman elementar bōleksheler fizikasi'n, bul fizikani'n' tiykarg'i' koncepciyaları' menen principlerin, olardı'n' matematikali'q tiykarları'n u'yreniwshiler ushi'n paydali' oqi'w-metodikali'q qollanba bolı'p tabı'ladi'.

Paydalani'lg'an a'debiyatlar dizimi

1. Большой энциклопедический словарь. Физика. Научное издательство "Большая Российская энциклопедия". Москва. 1998. 944 с.
2. Дж. Эллиот, П.Добер. Симметрия в физике. Том I. Издательство "Мир". Москва. 1983. 364 с.
3. Дж. Эллиот, П.Добер. Симметрия в физике. Том II. Издательство "Мир". Москва. 1983. 410 с.
4. М.Хамермеш. Теория групп и её применение к физическим проблемам. 588 с.
5. В.Д.Ляховский, А.А.Болохов. Группы симметрии и элементарные частицы. Издательство ЛГУ. Ленинград. 1983. 336 с.
6. У.Гибсон, Б.Поллард. Принципы симметрии в физике элементарных частиц. Атомиздат. Москва. 1979. 341 с.
7. Ю.Б.Румер, А.И.Фет. Теория унитарной симметрии. Издательство "Наука". Москва. 1970. 400 с.
8. Л.Райдер. Элементарные частицы и симметрии. Издательство "Наука". Москва. 1983. 317 с.
9. Л.Мишель, М.Шааф. Симметрия в квантовой физике. Серия: Новости фундаментальной физики. Вып. 3. Издательство "Мир". Москва. 1974. 250 с.
10. В.А.Рубаков. К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса. Успехи физических наук. Том 182. № 10. 2012. С. 1017-1025.
11. Fock V. Z. Phys. 39. 226. 1926.
12. Gordon W. Z. Phys. 40. 117. 1926.
13. Fock V. "On the invariant form of the wave and Motion Equation for a Charged Point-Mass", in The Dawning of Gauge Theory (Ed. L O'Raifeartaigh) (Princeton Series in Physics). Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1997.
14. Г.Кейн. Современная физика элементарных частиц. Издательство "Мир". Москва. 1990. 360 с.

15. Вейль Г. Избранные труды. Математика. Теоретическая физика. (Серия «Классики науки») М.: Наука, 1984. Вейль Г. Пространство. Время. Материя. Лекции по общей теории относительности. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
16. Герман Вейль. Симметрия. Издательство "Наука". Москва. 1968. 192 с.
17. Яглом И. М. Герман Вейль. М.: Знание, 1967, 48 с.
18. Теория групп и квантовая механика (Gruppentheorie und Quantenmechanik), Лейпциг, 1928; 2-е изд., 1931; англ. пер., Нью-Йорк, 1932 и Нью-Йорк, 1949.
19. Р.Фейнман. Теория фундаментальных процессов. Издательство "Наука". Москва. 1978.
20. Вольфганг Паули. Труды по квантовой теории. Под редакцией Я.А.Смординского. Издательство "Наука". Москва. 1977. 695 с.
21. Gell-Mann M., Glashow S.L. Ann. Phys. (NY). 1961. V. 15. P. 437. Gell-Mann M. «Phys. Lett», 1964, v. 8, p. 214. Gell-Mann M., Ne'eman Y. The Eightfold Way. N. Y., Benjamin, 1964r.
22. C. N. Yang, R. Mills. «Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance». Physical Review. 1954. **96** (1). 191–195.
23. Weinberg S. A model of Leptons. Phys. Rev. Lett. **19** 1264 (1967).
24. Goldstone J., Salam A., Weinberg S. Broken Symmetries. *Phys. Rev.* **127** 965 (1962). Salam A "Weak and electromagnetic interactions," in Elementary Particle Theory. Proc. 8th Nobel Symp., 19-25 May 1968, Lerum, Sweden (Ed. N Svartholm) (New York: Wiley; Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1968). P. 367.
25. В.А.Артамонов, Ю.Л.Словохотов. Группы и их приложения в физике, химии, кристаллографии. Москва. Издательский центр "Академия". 2005. 512 с.
26. И.С.Желудев. Симметрия и её приложения. Атомиздат. Москва. 1976. 288 с.
27. А.В.Шубников. Симметрия и антисимметрия конечных фигур. Издательство АН СССР. Москва. 1951. А.В.Шубников, В.А.Копчик. Симметрия в науке и искусстве. Издательство "Наука". Москва. 1972. 340 с.