

ZƏRRƏCİKLƏR FİZİKASINDA FERMİONLARIN ELEKTRİK YÜKLƏRİNİN KVANTLANMASI

S.S. RZAYEVA

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu

Az 1143, Bakı, H.Cavid pr. 131

nurelmar@gmail.com

Hal-hazırda zərrəciklər fizikasında Standart Model empirik olaraq ən uğurlu modeldir. Təqdim olunan işdə Standart model çərçivəsində, Hiqqs və fermion sahələrinin hiperyüklərinin ixtiyari qiymətlərdə elektrik yükünün kvantlanma şərtləri vasitəsi ilə hər bir fermionun elektrik yükləri təyin edilmişdir. Burada zərrəciklərin elektrik yüklərinin kvantlanması üçün Hiqqs sahəsinin zəruri şərt olduğu göstərilmişdir.

Açar sözlər: Hiqqs bozon, elektrik yükü, Standart Model, spontan simmetriyanın pozulması, Higgs mexanizmi, anomaliyalar.
PACS: 12.10.Dm; 12.10.-g; 12.15.-y; 14.80.-Bn; 11.15.-q

GİRİŞ

Müasir elementar zərrəciklər fizikasının nəzəriyyəsi elektromaqnit, zəif və güclü qarşılıqlı təsirlərin arasında müəyyən simmetriyanın olmasına əsaslanır. Hesab olunur ki, bu simmetriya erkən kainatda mövcud olub və buna görə də, əvvəlcə bütün zərrəciklər kütləsiz olub, lakin hər-hansı bir mərhələdə bu simmetriya öz-özünə pozulub və zərrəciklər kütlə qazanıb. Standart Modeldə simmetriyanın pozulmasını izah etmək üçün Hiqqs sahəsi daxil edilir. Standart Model məlum olan elementar zərrəcikləri və onlar arasındakı məlum qarşılıqlı təsirləri təsvir edir.

Hiqqs bozon fundamental zərrəciklərin və kalibrəmə bozonların kütlə qazanmasına və elektrozəif simmetriyanın spontan pozulmasına cavabdehdir.

Təcrübələr göstərir ki, yalnız kütləli elementar zərrəciklər elektrik yükünə malikdir. Nəzəri tədqiqatlardan alınan bu nəticələr Hiqqs sahəsinin təkcə fundamental zərrəciklərin və kalibrəmə bozonlarının kütlə qazanmasına deyil, həmçinin fundamental zərrəciklərin elektrik yüklərinin kvantlanmasına təsiri olduğunu sübut edir.

Təcrübədə müşahidə edilən ixtiyari zərrəciyin elektrik yükü elementar elektrik yükünün tam misllərinə bərabərdir. Elektrik yükünün təbiətdə yalnız elementar elektrik yükünün tam mislləri şəklində rast gəlməsi faktına elektrik yükünün kvantlanması deyilir.

Elektrik yükünün kvantlanması probleminin həllinə yönəlmiş böyük birləşmə [1, 2, 3, 4] və vahid elektrozəif modelləri çərçivəsində bir sıra işlər mövcuddur [5-6]. Qeyd etmək lazımdır ki, böyük birləşmə modelləri çərçivəsində elektrik yükünün kvantlanması olduqca təbii həllini tapmasına baxmayaraq, bu tip modellər təcrübələrə zidd olan nəticələrə gətirir (protonun parçalanması və s.).

Məsələn, Standart Model çərçivəsində qeyd edilir ki, kalibrəmə modellərində elektrik yükü aşağıdakı şərtlər daxilində kvantlanma və fiksə oluna bilər:

I. $U(1)_{em}$ kalibrəmə simmetriyası dəqiq saxlanılmalıdır;

II. nəzəriyyənin və kovariant olması üçün kalibrəmə və kalibrəmə-gravitasiya anomaliyaları ixtisar olunmalıdır;

III. fermionların kütlələri adi Hiqqs mexanizmi vasitəsilə generasiya olunmalıdır.

[5] işində göstərilmişdir ki, neytrionun sağ komponentini özündə saxlayan modellərdə, elektrik yükünün kvantlanması yalnız neytrionun Mayoran tipli olması halında anomaliyaların ixtisarı şərtlərindən alınır. Burada, Standart Modelə neytrionun sağ komponentinin daxil edilməsi, əlavə parametrin yaranmasına gətirir və anomaliyaların ixtisarı şərtlərindən elektrik yükünün kvantlanmasını almaq mümkün olmur.

Standart Modelə aşağıdakı sahələr daxil edilir:

$$\begin{aligned} \psi_L &= \begin{pmatrix} \nu_L \\ e^- \end{pmatrix}_L & e_R &= (1, 1, y_{e^-}), \\ \psi_L &= \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L & u_R &= (3, 1, y_u), \\ & & d_R &= (3, 1, y_d). \end{aligned} \quad (1)$$

Standart Modeldə hiperyüklər $y = 2\bar{Q}$ kimi təyin olunur və onlar aşağıdakı qiymətləri alır:

$$\begin{aligned} y_{dR} &= -\frac{2}{3}, y_{uR} = \frac{4}{3}, y_{QL} = -\frac{1}{3}, \\ y_{eR} &= -2, y_L = -1, y = -1. \end{aligned} \quad (2)$$

İlk növbədə Standart Modeldə fermion anomaliyalarının ixtisarı şərtlərinə baxaq.

Qeyd edək ki, bu yaxınlaşmada üçbucaq anomaliyaların ixtisarı şərtlərindən irəli gələn ifadələrdən istifadə olunur.

Üçbucaq anomaliyalarının əmsalı

$$A^{ijk} = \sum_{rep} Tr[\{T_L^i T_L^j\} T_L^k - \{T_R^i T_R^j\} T_R^k] J = 0, \quad (3)$$

kimi təyin olunur. Burada T^i - kalibrəmə qrupunun təsviridir.

Adətən, sahələrin hiperyükləri arasında belə əlaqələri Standart Modeldə fermionların kütlələrini generasiya edən qarşılıqlı təsir laqranjianından almaq mümkündür:

$$L_{mass}^f = f_e \bar{\psi}_L \psi_{eR} + f_d \bar{\psi}_{QL} \psi_{dR} + f_u \bar{\psi}_{QL} \psi_{uR} + h.c. \quad (4)$$

Məlumdur ki, zəif qarşılıqlı təsirdə hiperyüklərin saxlanması şərti ödənilir. Bu halda (4) ifadəsindən hiperyüklərin saxlanması halında:

$$y = y_L - y_{eR}, \quad y = -y_{QL} + y_{uR}, \quad y = y_{QL} - y_{dR},$$

şərtlərini alırıq.

Standart Modelin modifikasiya olunması, qarışma bucaqları və elektrik yükünün kvantlanma şərtləri:

Standart Modeldə fermionların, Hiqqs sahəsinin və kalibrəmə sahələrinin qarşılıqlı təsiri laqranjianını

$$L = i\bar{\psi}_{jL} \hat{D}\psi_{jL} + i\bar{\psi}_{jR} \hat{D}\psi_{jR} + (D_\mu \psi)^+ (D_\mu \psi), \quad (5)$$

Burada $\hat{D} = D_\mu \gamma_\mu$, ψ_{jL} - və ψ_{jR} -sol və sağ fermion sahələridir. (1) sahələrinin B_μ Maksvell sahələri ilə qarşılıqlı təsirinə şərtləndirən X parametrləri üçün aşağıdakı işarələmələri qəbul edək

$$\begin{aligned} X(\phi) &= \zeta, \quad X(\psi_L) = \zeta_L, \quad X(\psi_R) = \zeta_{eR}, \quad X(\psi_{vR}) = \zeta_{vR}, \\ X(\psi_{QL}) &= \zeta'_{QL}, \quad X(\psi_{uR}) = \zeta'_{uR}, \quad X(\psi_{dR}) = \zeta'_{dR}. \end{aligned} \quad (6)$$

Asanlıqla göstərmək olar ki, qarşılıqlı təsir laqranjianının neytral sahələrin qarışma bucağı üçün

$$\sin\theta_L = -\frac{\zeta_L g'}{\sqrt{g^2 + \zeta_L^2 g'^2}}, \quad (7)$$

$$\sin\theta_{QL} = \frac{\zeta'_{QL} g'}{\sqrt{g^2 + \zeta_{QL}^2 g'^2}}, \quad (8)$$

ifadələrini alırıq.

Qeyd etmək lazımdır ki, ən ümumi halda (7) və (8) bucaqları fərqli də ola bilər. Lakin bir tərəfdən, nəzəriyyədə yaranan bu qarışma bucaqlarının Standart Modelin Vaynberq bucağı ilə eyni olması istəyi, ikinci tərəfdən, Vaynberq bucağına təmiz lepton, lepton-adron və sırf adron proseslərindən alınan təcrübi qiymətlərin olduqca yaxın olması, bu bucaqların bir-birinə bərabər olmasını tələb edir. Bu halda neytral sahələrin qarışma bucaqlarının (7) və (8) ifadələrindən

$$\zeta = -\zeta_L, \quad \zeta = \zeta'_{QL}, \quad \zeta_L = -\zeta'_{QL}, \quad (8)$$

bərabərliklərini almış oluruq.

Hiqqs bozonun hiperyükünün ixtiyari qiymətində A_μ - və Z_μ - bozonların kütlələri üçün aşağıdakı ifadəni almaq olar:

$$m_A = \frac{v}{2\sqrt{2}} (g \sin\theta_W - g' y \cos\theta_W). \quad (9)$$

$$m_Z = \frac{v}{2\sqrt{2}} (g \cos\theta_W + g' y \sin\theta_W).$$

(9) şərtində birincisinin sıfıra bərabər olması (yəni $m_A=0$),

$$g \sin\theta_W - g' y \cos\theta_W = 0, \quad (10)$$

və elektromaqnit sahəsinin qarşılıqlı təsirinə düzgün formaya (yəni vektor formaya) malik olması tələbindən alınan şərt ilə

$$g \sin\theta_W + g' y_L \cos\theta_W = 0, \quad (11)$$

müqayisəsindən $\zeta = -\zeta_L$ ifadəsini almaq olar.

Standart Model çərçivəsində $\sin\theta_W = g' / \sqrt{g^2 + g'^2}$ və $\cos\theta_W = g / \sqrt{g^2 + g'^2}$ olduğunu nəzərə alsaq, fotonun kütləsi üçün

$$m_A = \frac{v}{2\sqrt{2}} \frac{g g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} (1 - y), \quad (12)$$

ifadəsini alırıq. Buradan isə fotonun kütləsinin sıfıra bərabər olması Hiqqs sahəsinin hiperyükünə ($y=1$) məhdudiyət qoyur. Beləliklə, (10) və (11) ifadələrindən alınan $\zeta = -\zeta_L$ şərti (1) ifadəsinə daxil olan lepton izomultipletinin hiperyükünü fiksə edir.

(8) ifadəsinin birinci şərti ($y = -y_L$) yuxarıda qarışma bucaqları üçün alınmış (7) və (8) ifadələrinin bərabər götürülməsinə əlavə bir sübutdur.

(8) bərabərliyindən məlum olur ki, X parametrləri və nəticə etibarı ilə Hiqqs və fermion sahələrinin B_μ sahəsi ilə qarşılıqlı təsirləri modulca bərabərdir. Standart Modeldə Hiqqs və fermion sahələrinin B_μ sahəsi ilə qarşılıqlı təsirlərini xarakterizə edən kəmiyyət hiperyükdür. (8) parametrlərin Standart Modelin adi hiperyükləri olduğu halda, Standart Modeldə Hiqqs və lepton izodubletləri ($y^{SM} = 1, y_L^{SM} = -1$) doğrudan da (8) ifadəsinin birinci şərtini ödəyir. Sol kvark izodubletinə gəldikdə isə, Standart Modeldə o, $y_{QL}^{SM} = 1/3$ - ə

bərabərdir və, deməli, (8) ifadəsinin ikinci və üçüncü şərtləri ödənilir. Nəticədə, sol kvark izodubletinin B_μ sahəsilə qarşılıqlı təsiri şərtləndirən ζ'_{QL} kəmiyyətinin Standart Modelin sol kvark izodubletinin hiperyükü

y_{QL}^{SM} ilə eyniləşdirmək olmaz və beləliklə, x'_{QL} kəmiyyətinin interpretasiyasına və onun y_{QL}^{SM} hiperyükü

ilə əlaqəsinin müəyyənləşdirilməsinə ehtiyac yaranır. Bu əlaqəni təyin etməzdən əvvəl, baxılan modeldə zərrəciklərin elektrik yüklərini hesablayaq.

Zərrəciklərin elektrik yükünü hesablamaq üçün, leptonların elektromaqnit sahəsilə qarşılıqlı təsirinə

$$L_{\nu} = \bar{\nu}\gamma_{\mu}(Q_{\nu} + Q'_{\nu}\gamma_5)\nu + \bar{e}\gamma_{\mu}(Q_{oe} + Q'_{oe}\gamma_5)eA_{\mu}, \quad (13)$$

ifadəsini alırıq. Burada,

$$Q_{\nu} = \frac{g}{4}\left(1 + \frac{\zeta_L \pm \zeta_{\nu R}}{\zeta}\right)\sin\theta, \quad (14)$$

$$Q_{oe} = -\frac{g}{4}\left(1 - \frac{\zeta_L \pm \zeta_{eR}}{\zeta}\right)\sin\theta$$

işarələmələrin qəbul olunmuşdur. (13) qarşılıqlı təsirdən görünür ki, əvvəla, neytrionun fotonla qarşılıqlı təsiri sıfırdan fərqlidir; ikincisi, neytrionun və elektronun elektromaqnit sahəsilə qarşılıqlı təsir ifadələrində γ_5 - ə mütənəsb olan həddlər mövcuddur. Bu arzu edilməz həddləri yox etmək üçün, elektromaqnit sahəsinin P -invariantlığı şərtindən istifadə etmək olar. Elektromaqnit sahəsinin P -invariantlığı $Q'_{\nu} = 0$ və $Q'_{oe} = 0$ olmasını tələb edir. Bu tələbdən

$$\zeta_L = \zeta_{\nu R} - \zeta, \zeta_L = \zeta_{eR} + \zeta, \quad (15)$$

şərtlərini alırıq. Qeyd edək ki, (15) ifadələri həm də sol (e_L) və sağ (e_R) elektronun elektrik yüklərinin bərabərliyi $Q_{eL} = Q_{eR}$ şərtindən və zəif qarşılıqlı təsirlərdə hiperyükün saxlanması nəzərə alınmaqla Yukava potensialından da alınır

$$L_{mass}^l = f_e \bar{\psi}_L \psi_{eR} + f_{\nu} \bar{\psi}_L \psi_{\nu}^e + h.c., \quad (16)$$

burada $\psi^c = i\tau_2 \dots$

(8) və (15) ifadəsinin birinci həddlərinin müqayisəsindən $\zeta_{\nu R} = 0$, yəni neytrionun sağ komponentinin hiperyükünün sıfıra bərabər olduğunu alırıq. Bu isə o deməkdir ki, neytrionun sağ komponentini özündə saxlayan modellərdə, [8, 16] işlərində göstərilənlərin əksinə olaraq, anomaliaların ixtisarı şərtlərində heç bir əlavə parametr yaranmır və elektrik yükünün kvantlanması məsələsinin həlli çərçivəsində Standart Modeldə Mayoran tipli neytrionun daxil edilməsi vacib deyil.

$$Q_{\nu} = \frac{Q_e}{2}\left(1 + \frac{\zeta_L}{\zeta}\right), \quad (17)$$

$$Q_{oe} = -\frac{Q_e}{2}\left(1 - \frac{\zeta_L}{\zeta}\right), \quad (18)$$

ifadələrini alırıq. Qeyd edək ki, (17) və (18) ifadələrinə sağ leptonların hiperyükləri daxil olmadığından, onlar neytrionun sağ komponentinin olmadığı halda da doğrudur.

İndi isə kvarkların elektromaqnit sahəsilə qarşılıqlı təsirinə baxaq. Lepton halına analogi hesablamalardan

$$L_{q} = \bar{u}\gamma_{\mu}(Q_{1u} + Q'_{1u}\gamma_5)uA_{\mu} + \bar{d}\gamma_{\mu}(Q_{2d} + Q'_{2d}\gamma_5)dA_{\mu},$$

ifadəsini alırıq.

Leptonların elektromaqnit sahəsi ilə qarşılıqlı təsirinə analogi olaraq, elektromaqnit sahəsinin P -invariantlığı

($Q'_{1u} = 0, Q'_{2d} = 0$) şərtindən

$$\zeta_{QL} = \zeta_{uR} - \zeta, \zeta_{QL} = \zeta_{dR} + \zeta, \quad (19)$$

ifadələrini alırıq.

Qeyd edək ki, (19) şərtləri, leptonlar halında olduğu kimi, sol və sağ kvarkların elektrik yüklərinin bərabərliyindən və kvarkların

$$L_{mass}^q = f_d \bar{\psi}_{QL} \psi_{dR} + f_u \bar{\psi}_{QL} \psi_{uR} + h.c., \quad (20)$$

Yukava potensialından da alınır.

Burada u və d kvarkların elektrik yükləri üçün

$$Q_u = \frac{Q_e}{2}\left(1 + \frac{\zeta_{QL}}{\zeta}\right), \quad Q_d = \frac{Q_e}{2}\left(1 - \frac{\zeta_{QL}}{\zeta}\right), \quad (21)$$

ifadələrini alırıq.

Zərrəciklərin elektrik yükləri üçün alınmış (19) və (21) ifadələrinə leptonların və kvarkların elektrik yükünün kvantlanması təsdiqi şərtləri kimi baxmaq olar. Eyni $\zeta_L = -3Q_{QL}$ - bu şərt Standart Modeldə elektrik yükünün kvantlanması alınmasına kifayət edir. Bu halda (8) şərtlərini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\zeta = -\zeta_L, \quad \zeta = \zeta'_{QL}, \quad \zeta_L = -3\zeta'_{QL}, \quad (22)$$

Buradan görünür ki, bütün ζ parametrlərinin Standart Model sahələrinin hiperyükləri ilə (22) əlaqələndirmək mümkündür. Standart Modeldə Hiqqz bozonunun olmadığı halda, (7) ifadələrindən yalnız bir $\zeta_L = -3\zeta'_{QL}$ şərti alınır. Beləliklə, nəzəriyyəyə Hiqqz bozonun daxil edilməsi sol fermion izodubletlərinin hiperyükərinin Hiqqz izodubletinin hiperyüku ilə fiksə olunduğuna gətirir.

(7) ifadələrini (17) və (20)-də nəzərə alsaq leptonların və kvarkların elektrik yükləri üçün elektronun yükü vahidlərində $Q_{\nu} = 0$, $Q_{oe} = -Q_e$, $Q_u = \frac{2}{3}Q$,

$Q_d = -\frac{1}{3}Q$ qiymətlərini almaq olar.

Göstərmək olar ki, digər lepton və kvark ailələri üçün də analogi ifadələr almaq olar. Bu qiymətlər lepton və kvarkların elektrik yüklərinin ədədi qiymətlərini təyin etməkdən başqa lepton və kvarkların elektrik yüklərinin kvantlandığını da göstərir. Beləliklə, belə bir nəticəyə gəlirik ki, (8), (19) və (22) ifadələri lepton və kvarkların elektrik yüklərinin kvantlanması üçün zəruri şərtlərdir və nəticə etibarlı ilə baxdığımız nəzəriyyələrdə Hiqqz bozonunun olmadığı halda zərrəciklərin elektrik yüklərinin kvantlanması mümkün deyil. Bundan başqa, baxdığımız hallarda zərrəciklərin elektriyükərinin kvantlanması almaq üçün, üçbucaq anomalialarının ixtisarı şərtlərindən istifadə etmək heç də vacib deyil və Hiqqz bozonun, ya da hər hansı bir izodubletin hiperyükünün fiksə olunmasına ehtiyac

yoxdur. Hıqqı saħesinin fermionlarla qarşıqlı təsiri (və ya elektromaqnıt saħesinin P - invariantlıđı) sađ fermionların hiperyüklərinin fıksə olunmasına da gətirir $\zeta_{vr} = 0, \zeta_{er} = -2\zeta, \zeta_{dr} = -\frac{2}{3}\zeta, \zeta_{ur} = \frac{4}{3}\zeta$.

Xüsüsılə qeyd etmək lazımdır ki, Standart Modelə neytrinonun sađ komponentinin diđer sađ komponentli zərrəciklər kimi daxil edilməsi halında belə zərrəciklərin elektrik yüklərinin kvantlanmasının alınması mümkündür.

-
- | | |
|--|--|
| [1] <i>K.S. Babu, R.N.Mohapatra.</i> Phys. Rev. Lett., 1989, 63, p. 938. | [11] <i>S.L.Glashow.</i> Nucl.Phys., 1961, v.22, p.57961. |
| [2] <i>J.C. Pati, A. Salam.</i> Phys. Rev., 1974, D10, p.275. | [12] <i>S. Weinberg.</i> Phys. Rev.Lett., 1967, v.19, p.12647. |
| [3] <i>H. Georgi, S.L. Glashow.</i> Phys. Rev. Lett., 1974, 32, p. 438. | [13] <i>P.V.Dong, H.N.Long.</i> Mod. Phys. A., 2006, v.21 p. 6677, 2006. |
| [4] <i>F. Gürsey, P. Ramond, P. Sikivie.</i> Phys. Lett., B 60 (2), 1976, p.177-180. | [14] <i>C. Bouchiat, J.Iliopoulos.</i> Ph. Meyer. Phys. Lett., 1972, 38B, p. 519. |
| [5] <i>P.Ramond.</i> Nucl.Phys., 1977, B126, p. 509. | [15] <i>X.G He, G.C.Joshi, H. Lew, B. H. McKellar; R.R. Volkas.</i> Phys. D, Rev., 1989, v.40, p.3140. |
| [6] <i>K.S. Babu, R. N. Mohapatra.</i> Phys. Rev., 1990, D, v. 42, p. 71. | [16] <i>S.L. Adler.</i> Phys. Rev., 1968, 177, p. 2426. |
| [7] <i>A. Abbas.</i> Nucl. Part. Phys., 1990, v.16, p.L163. | [17] <i>R. Foot, H. Lew, G. Joshi, R. R. Volkas.</i> Mod. Phys. Lett., 1990, A,v.5, p.95. |
| [8] <i>A. Abbas.</i> Phys. Lett., 1990, B 238, p.344. | [18] <i>T.D. Lee, C.N.Yang.</i> Phys.Rev., 1956, 104, p. 254. |
| [9] <i>C. Bouchiat, J. Iliopoulos, Ph. Meyer.</i> Phys. Lett., 1972, B 38, p.519. | [19] <i>H. Georgi, S.L. Glashow.</i> Phys. Rev., 1974, D 9, p.4164. |
| [10] <i>S.Rudaz.</i> Phys. Rev., 1990, D. v.41, p.2619. | [20] <i>D. Gross,R.Jackiv.</i> Phys. Rev.,1972, D6, p.477. |

S.S. Rzaeva

THE ELECTRIC CHARGE OF THE FERMIONS IN ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS

At present the Standard Model is empirically the most successful model of elementary particle physics.

In the given research, in the framework of the Standard Model the charges of every fermion have been defined out of the conditions of the quantization of the electric charges obtained for the various values of hypercharges of Higgs and fermion fields. Higgs fields are responsible for the formation of their charges.

It has been shown that, the existence of Higgs field is a necessary condition for the electric charge quantization.

С.С. Рзаева

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД ФЕРМИОНОВ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В настоящее время Стандартная модель эмпирически является наиболее успешной моделью физики элементарных частиц.

В данном исследовании в рамках Стандартной модели заряды каждого фермиона были определены из условий квантования электрических зарядов, полученных для различных значений гиперзарядов хиггсовских и фермионных полей. Поля Хиггса ответственны за формирование своих зарядов.

Было показано, что наличие поля Хиггса является необходимым условием квантования электрического заряда.

Qəbul olunma tarixi: 15.10.2020