

## STANDART MODELƏ UYUŞMAYAN HADİSƏLƏR – LEPTON UNİVERSALLIĞININ POZULMASI

B. İ. MEHDİYEV

*Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu  
H. Cavid pr. 131, AZ-1143, Bakı, Azərbaycan*

Mənfi müonların elektrondan səpilməsi prosesinə baxılmışdır. Lepton universallığının pozulması effektlərinin aşkar edilməsi imkanları araşdırılmışdır. Bu effektlər  $SU(2) \times U(1) \times U'(1)$ -modeli çərçivəsində tədqiq edilmişdir.

Məlumdur ki, Standart model (SM) hal-hazırda elmə məlum olan bütün elementar zərrəciklərin qarşılıqlı təsirlərin əsas hissəsini təsvir edir. SM-in əsas prinsiplərindən biri lepton universallığıdır (LU). Bu prinsipə görə leptonların bütün növləri – elektronlar, müonlar və taonlar kütlələrin müxtəlif olmasına baxmayaraq ətraf aləmlə eyni cür qarşılıqlı təsirdə olmalıdırlar. Lakin, Böyük Adron Kollayderində (BAK) çalışan fiziklər müxtəlif təcrübələrdə aşkar edirlər ki, leptonların özlərini SM-in irəli sürdüyü tələblərə uyğun aparmalarına şübhələr var. SM-dən kənar Yeni fizikanın axtarışı BAK qarşısında duran əsas məsələlərdən biridir.

BAK-da aparılan təcrübələr zamanı LHCb Kollektivi neytral B mezonun neytral  $K^*$  mezona və lepton-antilepton cütünə parçalanmasını qeyd edib:

$B^0 \rightarrow K^{0*} l^+ l^-$ ,  $l = e, \mu$ . LU –ya görə son hallarda müxtəlif nəsil leptonların yaranması ilə gedən parçalanma proseslərinin ehtimalları eyni olmalıdır. Lakin, SM-in tələbinin əksinə olaraq, təcrübədə hər üç elektron-pozitron cütü yarandığı zaman, təqribən iki müon-anti-müon cütünün yaranması prosesi müşahidə olunur [1].

LHCb Kollaborasiyası B mezonların  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$  və  $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$  parçalanması ehtimallarının nisbətini ölçüb.  $R_K$  ilə işarə olunan bu nisbət SM-də 1-ə çox yaxın olmalıdır, belə ki, zəif qarşılıqlı təsir elektronlara və müonlara eyni cür təsir edir ( $\mu e$  - universallığı). Lakin, LHCb-nin aldığı nəticələr vahid-dən xeyli kiçikdir:

$$R_K = 0,745_{-0,074}^{+0,090} \pm 0,036$$

Bu nəticə SM-in irəli sürdüyü qiymətdən  $2,6 \sigma$  qədər fərqlənir [2].

Göründüyü kimi bu təcrübələrdə müxtəlif növ leptonlar arasında simmetriyanın pozulmasına işarə var və “təbiətin nə dərəcədə ( $\mu e$  – universal olması” açıq qalır. Təbiətin ( $\mu e$  – qeyri universallığının reallaşmasını birinci növbədə zəif qarşılıqlı təsirdə, xüsusi halda elektron və müonun zəif qarşılıqlı təsir sabitlərinin müxtəlifliyində gözləmək ağılabatandır. Vahid kalibrlemə nəzəriyyələrində elektron və müon sahələrini müxtəlif izomultiplətlərin komponentləri kimi daxil etməklə buna nail olmaq olar [3].

Bu məqalədə mənfi yüklü müonun elektrondan səpilməsi prosesinə baxılmışdır:

$$\mu^-(k_1) + e^-(p_1) \rightarrow \mu^-(k_2) + e^-(p_2) . \quad (1)$$

Bütün zərrəciklərin uzununa polyarizasiyaları və elektrozəif qarşılıqlı təsirin bütün hədləri nəzərə alınmaqla prosesin diferensial kəsiyi hesablanmışdır. Zəif qarşılıqlı təsirdə lepton universallığının mümkün pozulmalarının verdiyi əlavələri nəzərə alan polyarizasiya effektlərinə baxılmışdır. Bu effektlər elektrozəif qarşılıqlı təsirin  $SU(2) \times U(1) \times U'(1)$ -modeli çərçivəsində [4] araşdırılmışdır. Qeyd edək ki, (1) prosesi üçün  $\mu e$  - universallığının pozulması effektləri  $SU(2) \times U(1)$ -modeli çərçivəsində [5]-də tədqiq olunmuşdur.

Elektrozəif qarşılıqlı təsirin  $SU(2) \times U(1) \times U'(1)$  – modeli çərçivəsində [4] elektron və müonun zəif qarşılıqlı təsir sabitlərinin müxtəlif olduğunu qəbul edərək (1) prosesinin amplitudunu aşağıdakı şəkildə yazı bilirik

$$\begin{aligned} M_{fi} = & \frac{4\pi\alpha}{q^2} [\bar{u}(p_2)\gamma_\alpha u(p_1)] \cdot [\bar{\nu}(k_2)\gamma_\alpha \nu(k_1)] - \\ & - \sqrt{2}G_F D_Z [\bar{u}(p_2)\gamma_\alpha (g_V + g_A\gamma_5)u(p_1)] \cdot [\bar{\nu}(k_2)\gamma_\alpha (G_V + G_A\gamma_5)\nu(k_1)] - \\ & - \sqrt{2}G_F D_X y [\bar{u}(p_2)\gamma_\alpha (g'_V + g'_A\gamma_5)u(p_1)] \cdot [\bar{\nu}(k_2)\gamma_\alpha (G'_V + G'_A\gamma_5)\nu(k_1)], \end{aligned}$$

Burada,  $D_Z = \left(1 - \frac{q^2}{M_Z^2}\right)^{-1}$ ,  $D_X = \left(1 - \frac{q^2}{M_X^2}\right)^{-1}$ ,  
 $q = p_1 - p_2 = k_2 - k_1$  virtual bozonların 4-ölçülü impulsu,  $M_Z$  və  $M_X$  uyğun olaraq Z və X vektor bozonların kütlələri,  
 $y = \frac{g_1^2 \sin^2 \gamma}{4\sqrt{2}G_F M_X^2}$  -nəzəriyyədən irəli gələn parametrdir [4].

Bütün zərrəciklərin uzununa polyarizasiyaları nəzərə alındıqda (1) prosesinin diferensial kəsiyini aşağıdakı şəkildə yazı bilirik (Kütlə mərkəzi sistemində):

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} = & \frac{\alpha^2}{32E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \left[ \left( C_1 + C_2 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) (1 + s_1 s_2) (1 + \eta_1 \eta_2) + \right. \\ & + \left( C_1 - C_2 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) (s_1 + s_2) (\eta_1 + \eta_2) - \left( C_3 + C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) (\eta_1 + \eta_2) (1 + s_1 s_2) - \\ & \left. - \left( C_3 - C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) (s_1 + s_2) (1 + \eta_1 \eta_2) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

(3) ifadəsində aşağıdakı işarələmələr qəbul olunmuşdur:

$$\begin{aligned} C_1 = & \left[ 1 + \frac{1}{2} \varepsilon_z (g_V G_V + g_A G_A) + \frac{1}{2} \varepsilon_x (g'_V G'_V + g'_A G'_A) \right]^2 + \frac{1}{4} [\varepsilon_z (g_V G_A + g_A G_V) + \\ & + \varepsilon_x (g'_V G'_A + g'_A G'_V)]^2, \\ C_2 = & \left[ 1 + \frac{1}{2} \varepsilon_z (g_V G_V - g_A G_A) + \frac{1}{2} \varepsilon_x (g'_V G'_V - g'_A G'_A) \right]^2 + \frac{1}{4} [\varepsilon_z (g_V G_A - g_A G_V) + \\ & + \varepsilon_x (g'_V G'_A - g'_A G'_V)]^2, \\ C_3 = & \left[ 1 + \frac{1}{2} \varepsilon_z (g_V G_V + g_A G_A) + \frac{\varepsilon_x}{2} (g'_V G'_V + g'_A G'_A) \right] \cdot [\varepsilon_z (g_V G_A + g_A G_V) + \\ & + \varepsilon_x (g'_V G'_A + g'_A G'_V)], \\ C_4 = & \left[ 1 + \frac{1}{2} \varepsilon_z (g_V G_V - g_A G_A) + \frac{\varepsilon_x}{2} (g'_V G'_V - g'_A G'_A) \right] \cdot [\varepsilon_z (g_V G_A - g_A G_V) + \\ & + \varepsilon_x (g'_V G'_A - g'_A G'_V)], \\ \varepsilon_z = & -\frac{G_F q^2 D_z}{\sqrt{2} \pi \alpha}, \quad \varepsilon_x = -\frac{G_F q^2 D_x}{\sqrt{2} \pi \alpha} \cdot y, \quad q^2 = -4E^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}, \end{aligned}$$

$E$  - kütləmərkəzi sistemində zərrəciyin enerjisi (zərrəciyin kütləsinin verdiyi əlavələr nəzərə alınmayıb),  $\theta$  - müonun (və ya elektronun) səpilmə bucağı,  $s_1$  və  $s_2$  ( $\eta_1$  və  $\eta_2$ ) başlanğıc və son elektronun (müonun) uzununa polyarizasiyalarıdır.

İndi də (1) prosesinin müxtəlif xarakteristikalarını öyrənərək,  $\mu e$  – universallığının pozulması effektlərinin aşkar edilməsi imkanlarını araşdıraraq. Bu xarakteristikalar başlanğıc zərrəciklərin uzununa polyarizasiyası hesabına yaranan  $P$  – qeyri cüt asimetriya, son zərrəciklərin uzununa polyarlaşma dərəcəsi və ya elektron və müon dəstələrinin polyarizasiya effektləri ola bilər.

Başlanğıc zərrəciklərin uzununa polyarizasiyası

hesabına alınan  $P$  – qeyri cüt asimetriya və son zərrəciklərin uzununa polyarlaşma dərəcəsi aşağıdakı şəkllə malik olurlar:

$$A_{S_1} = P_{S_2} = -\frac{C_3 - C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2}}{C_1 + C_2 \cos^4 \frac{\theta}{2}} \quad (4)$$

$$A_{\eta_1} = P_{\eta_2} = -\frac{C_3 + C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2}}{C_1 + C_2 \cos^4 \frac{\theta}{2}} \quad (4a)$$

Elektron və müon dəstələrinin polyarizasiya effektlərini hesablayaraq aşağıdakı ifadələri alırıq

$$N_{s_1} = -s_1 \left( C_3 - C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) \left[ 2 \left( C_1 + C_2 \cdot \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) - s_1 \cdot \left( C_3 - C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

$$N_{\eta_1} = -\eta_1 \left( C_3 + C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) \left[ 2 \left( C_1 + C_2 \cdot \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) - \eta_1 \left( C_3 + C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) \right]^{-1} \quad (5a)$$

(4-5a) ifadələrindən göründüyü kimi bir zərrəciyin polarizasiyası hesabına yaranan effektlərdə lepton qeyri universallığı aşkar şəkildə büruzə vermir. Lakin, ayrı-ayrı təcrübələrdə alınan polarizasiya effektlərini

birdəşdirsək lepton universallığının pozulması effektlərini aşkar edə bilərik. Məsələn, aşağıdakı üsullardan hər hansı biri ilə təyin olunan  $B$  kəmiyyəti vasitəsilə

$$B = A_{s_1} - A_{\eta_1} = A_{s_1} - P_{\eta_2} = P_{s_2} - A_{\eta_1} = P_{s_2} - P_{\eta_2} = \frac{2C_4 \cos^4 \frac{\theta}{2}}{C_1 + C_2 \cdot \cos^4 \frac{\theta}{2}} \quad (6)$$

(1) prosesində lepton universallığının pozulmasını aşkar edə bilərik. (6) ifadəsindən göründüyü kimi lepton universallığı ödənildikdə ( $g_V = G_V$ ,  $g_A = G_A$  ( $g'_V = G'_V$ ,  $g'_A = G'_A$ ))  $B$  kəmiyyəti  $\theta$  – nın istənilən qiymətində sıfıra bərabər olur ( bu halda  $C_4 = 0$ ). Buradan belə bir vacib nəticə çıxır ki, əgər təcrübi faktlar göstərsə ki,  $B$  kəmiyyəti  $\theta$  – nın istənilən qiymətində sıfıra

bərabərdir, deməli lepton universallığı ödənilir. Əgər  $B$  kəmiyyəti  $\theta$  – nın istənilən qiymətində ( $\theta = \pi$  –dən başqa) sıfırdan fərqlidirsə, deməli lepton universallığı pozulur.

Qeyd edək ki, LU ödənildikdə (5, 5a) ifadələri sadələşir və aşağıdakı şəkllə düşürlər

$$N_{s_1} = -s_1 C_3 \left[ 2 \left( C_1 + C_2 \cdot \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) - s_1 C_3 \right]^{-1},$$

$$N_{\eta_1} = -\eta_1 C_3 \left[ 2 \left( C_1 + C_2 \cdot \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) - \eta_1 C_3 \right]^{-1}.$$

Əgər  $s_1 = \eta_1$  olarsa ( yəni elektron və müonun uzununa polarizasiyaları eynidir),  $N_{s_1}/N_{\eta_1} = 1$  olur. Bu nəticə isə təcrübi araşdırma mövzusuudur.

İndi isə  $B$ ,  $N_{s_1}$  və  $N_{\eta_1}$  kəmiyyətlərini kalibrəlmə nəzəriyyəsinin  $SU(2) \times U(1) \times$  –sxemi çərçivəsində araşdıraraq [4]. Sol polarizasiyalı elektron və müonu sol izodubletə daxil edək  $\begin{pmatrix} \nu_l \\ l \end{pmatrix}_L$  ( $l = e^-, \mu^-$ ). Elektron və müonun sağ komponentlərini isə aşağıdakı izomultipletlərin müxtəlif kombinasiyaları şəklində daxil edəcəyik

$$1. l_R, \quad 2. \begin{pmatrix} l \end{pmatrix}_{R'}, \quad 3. \begin{pmatrix} \cdot \\ l \end{pmatrix}_R.$$

Qarşılıqlı təsir laqranjianını hesablayaraq [4], leptonların neytral vektor bozonlarla qarşılıqlı təsir sabitlərini tapmaq olar və onlar cədvəl 1-də verilmişdir. Cədvəl 2-5-də isə uyğun olaraq ( $g_V G_A - g_A G_V$ ), ( $g'_V G'_A - g'_A G'_V$ ), ( $g_V G_V - g_A G_A$ ), ( $g'_V G'_V - g'_A G'_A$ ) kəmiyyətlərinin qiymətləri verilmişdir. Bu kəmiyyətlər isə öz növbəsində elektron və müonun sağ komponentlərinin müxtəlif variantlarda reallaşması zamanı lepton universallığının “pozulması” dərəcəsini müəyyən edirlər.

Cədvəl 1.

Sağ komponentlərin daxil edilməsi sxemləri	Qarşılıqlı təsir sabitləri			
	$g_V$	$g_A$	$g'_V$	$g'_A$
$l_R$				
1	$-\frac{1}{2} + 2x$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$
2	$-1 + 2x$	0	-1	0
3	$-\frac{3}{2} + 2x$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$

Cədvəl 2.

Müonun sağ komponentin daxil edilməsi sxemləri	Elektronun sağ komponentin daxil edilməsi sxemləri ( $g_V G_A - g_A G_V$ )		
	1	2	3
1	0	$\frac{1}{2} - x$	$1 - 2x$
2	$-\frac{1}{2} + x$	0	$\frac{1}{2} - x$
3	$-1 + 2x$	$-\frac{1}{2} + x$	0

Cədvəl3.

Müonun sağ komponentin daxil edilməsi sxemləri	Elektronun sağ komponentin daxil edilməsi sxemləri ( $g'_V G'_A - g'_A G'_V$ )		
	1	2	3
1	0	$-\frac{1}{2}$	-1
2	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$
3	1	$\frac{1}{2}$	0

Cədvəl 4.

Müonun sağ komponentin daxil edilməsi sxemləri	Elektronun sağ komponentin daxil edilməsisxemləri ( $g_V G_V - g_A G_A$ )		
	1	2	3
1	$2x(-1 + 2x)$	$4x^2 - 3x + \frac{1}{2}$	$4x^2 - 4x$
2	$4x^2 - 3x + \frac{1}{2}$	$(-1 + 2x)^2$	$(-1 + 2x)\left(-\frac{3}{2} + 2x\right)$
3	$4x^2 - 4x$	$(-1 + 2x)\left(-\frac{3}{2} + 2x\right)$	$4x^2 - 6x + 2$

Cədvəl5.

Müonun sağ komponentin daxil edilməsi sxemləri	Elektronun sağ komponentin daxil edilməsisxemləri ( $g'_V G'_V - g'_A G'_A$ )		
	1	2	3
1	2	$\frac{3}{2}$	1
2	$\frac{3}{2}$	1	$\frac{1}{2}$
3	1	$\frac{1}{2}$	0

Aparılan araşdırılmalardan alınır ki,  $B, N_{S_1}, N_{\eta_1}$  kəmiyyətlərinin təcrübədə ölçülməsi  $\mu e -$

universallığının “pözulmə dərəcəsi” haqqında məlumat verir və  $SU(2) \times U(1) \times U'(1)$ -modellərində sağ komponentlərin daha real seçimini təyin edə bilərik.

- [1] R. Aaij et. all. LHCb Collaboration, arXiv: 2017, 1705.05802 v1.  
 [2] R. Aaij et. all. LHCb Collaboration, Phys. Rev. Lett., 2014,113, 151601-151617, arXiv: 1406.6482 v1.  
 [3] H.A.Гулиев, И.Г. Джафаров, Б.И. Мехтиев, Р.Ш. Яхьяев. Эффекты нарушения  $\mu e -$  универсальности в процессе образования пары мюонов на встречных электрон-позитронных кучках. ЯФ, 34, 1981, 176-181.

- [4] H.A.Гулиев, И.Г. Джафаров, Б.И. Мехтиев, Р.Ш. Яхьяев. Об одной модели единого электрослабого взаимодействия. ДАН Азерб.ССР, 42, 1986, 23-26.  
 [5] И. Г. Джафаров, Б. И. Мехтиев, Р. Ш. Яхьяев. Эффекты нарушения  $\mu e -$  универсальности в процессах рассеяния мюонов на электроны, ДАН Азерб.ССР, 38, 1982, 21-25.

**B.I. Mehdiyev**

**PHYSICS BEYOND THE STANDARD MODEL – VIOLATION OF LEPTON UNIVERSALITY**

The process of negative muons scattering on electron have been considered. The possibilities of isolating the effects of violation of lepton universality have been found. These effects have been analyzed in the framework of  $SU(2) \times U(1) \times U'(1)$  - models of elektroweak interaction.

**Б.И. Мехтиев**

**ФИЗИКА ЗА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ – НАРУШЕНИЕ ЛЕПТОННОЙ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ**

Рассмотрен процесс рассеяния отрицательных мюонов на электроны. Исследованы возможности выделения эффектов нарушения лептонной универсальности. Эти эффекты проанализированы в  $SU(2) \times U(1) \times U'(1)$  – модели электрослабого взаимодействия.

Qəbul olunma tarixi: 27.01.2021