

DƏQİQ ELMLƏR
EXACT SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.36719/2663-4619/91/157-164>

Billurə Hacıyeva
Naxçıvan Dövlət Universiteti
fizika-riyaziyyat üzrə fəlsəfə doktoru
billur_haciyeva@mail.ru

**XARİCİ MAQNİT SAHƏSİNDƏ NEYTRİNO-ELEKTRON QARŞILIQLI TƏSİR
PROSESLƏRİ ÜÇÜN ÜMUMİ HALDA MATRİS ELEMENTİ**

Xülasə

Xarici maqnit sahəsində qızmar sıx mühitlərdə neytrino-elektron qarşılıqlı təsir prosesləri üçün ümumi halda diferensial ehtimalı, diferensial effektiv kəsiyi, enerji və impuls itkilərini hesablamaq üçün prosesin matris elementi ilə müəyyən edilən $|M|^2/\mathfrak{V}$ kəmiyyətini və ya prosesin amplitudu ilə müəyyən edilən $|A|^2$ kəmiyyətini bilmək lazımdır. Deməli, neytrinoların və elektronların dalğa funksiyalarından istifadə etməklə matris elementini ala bilirik.

Açar sözlər: maqnit sahəsi, matris elementi, neytrino, elektron, neytrino cütliyi

Billura Hacıyeva
Nakhchivan State University
Ph.D in Physics and Mathematics
billur_haciyeva@mail.ru

**Matrix element in the general case for neutrino-electron interaction processes
in an external magnetic field**

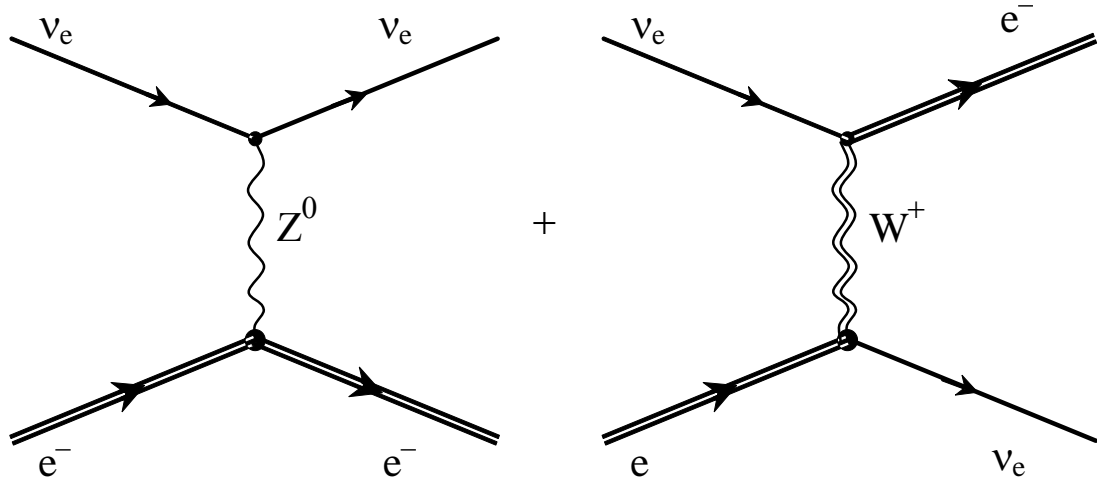
Abstract

In order to calculate the differential probability, differential effective cross section, energy and momentum losses for neutrino-electron interaction processes in hot dense environments in an external magnetic field, it is necessary to know the $|M|^2/\mathfrak{V}$ quantity determined by the matrix element of the process or the quantity $|A|^2$ determined by the amplitude of the process. So, we can get the matrix element by using the wave functions of neutrinos and electrons.

Keywords: magnetic field, matrix element, neutrino, electron, neutrino pair

Giriş

Həm neytral həm də yüklü cərəyanlar hesabına baş verən neytrino-elektron səpilmə prosesləri $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ reaksiyası ilə təsvir olunur. Bu prosesləri təsvir edən Feynman diaqramları şəkil 1-də verilmişdir.



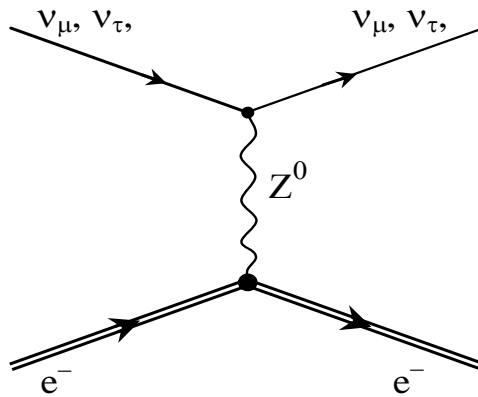
Şəkil 1

Yalnız neytral cərəyanlar hesabına baş verən neytrino-elektron səpilmə prosesləri.

$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-} \quad (1)$$

$$\nu_{\tau} + e^{-} \rightarrow \nu_{\tau} + e^{-} \quad (2)$$

ilə verilir. Bu reaksiyalara uyğun Feynman diaqramları şəkil 2-də verilmişdir.



Şəkil 2

$$\mu(n \neq 0) = -\left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)\mu_0 f(n, a), \quad a = \frac{H_0}{2H}$$

$$f(n, a) = \frac{2a \ln a}{n}, \quad \text{when } a \rightarrow a(H \gg H_0)$$

$$\Delta m(n=0) = \left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)m \ln^2\left(\frac{2H}{H_0}\right)$$

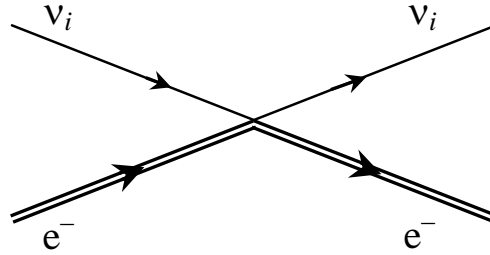
$$\mu(n=1) = \left(\frac{\alpha e}{4\pi m}\right)\left(\frac{H_0}{H}\right) \ln\left(\frac{2H}{H_0}\right)$$

Vaynberq-Salam nəzəriyyəsinin aşağı energetik yaxınlaşmasında, yəni kiçik impuls ötürmələrində

$$|q^2| \ll m_w^2 \quad (m_w \cong 80\text{GeV}) \quad (3)$$

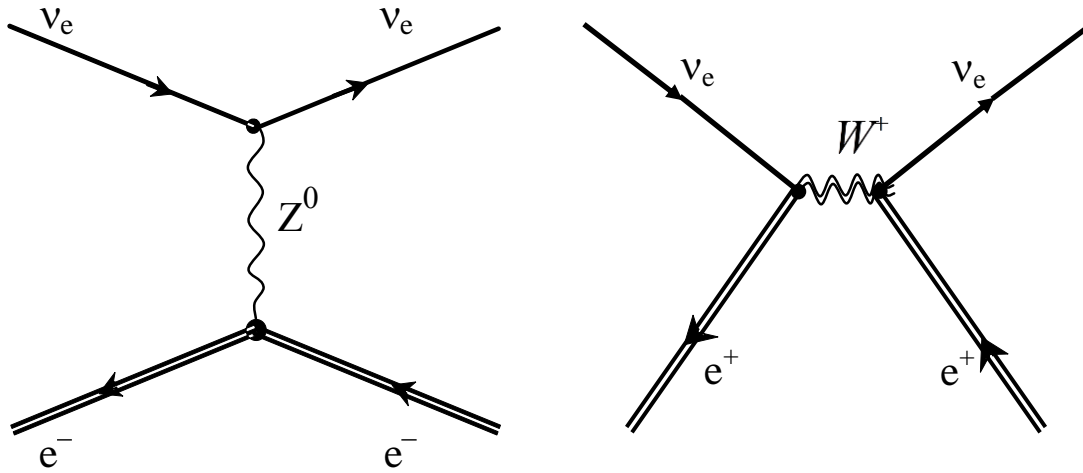
$$|q^2| \ll m_z^2 \quad (m_{z^0} \cong 91\text{GeV}) \quad (4)$$

Şəkil 1-də və Şəkil 2-də verilmiş Feynman diaqramları aşağıdakı sadə diaqrama gətirilir.



Şəkil 3

Həm neytral həm də yüklü cərəyanlar hesabına baş verən neytrino-pozitron səpilmə prosesləri $\nu_e + e^+ \rightarrow \nu_e + e^+$ reaksiyası ilə təsvir olunur. Bu prosesləri təsvir edən Feynman diaqramları Şəkil 1-də verilmişdir (Nəcəfov, 2012: 549; Akhiyezer, Berestetskiy, 1969: 624).



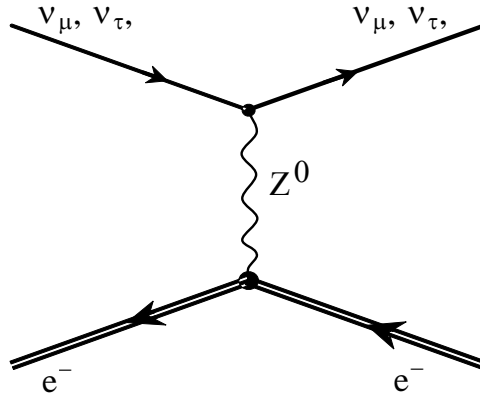
Şəkil 4

Yalnız neytral cərəyanlar hesabına baş verən neytrino-pozitron səpilmə prosesləri

$$\nu_\mu + e^+ \rightarrow \nu_\mu + e^+ \quad (5)$$

$$\nu_\tau + e^+ \rightarrow \nu_\tau + e^+ \quad (6)$$

ilə verilir. Bu reaksiyalara uyğun Feynman diaqramları Şəkil 2-də verilmişdir.



Şəkil 5

Artıq qeyd etdiyimiz kimi, biz neytron ulduzlarına və ifratyeniələrə baxırıq. Həmin obyektlərdə mövcud olan maqnit sahələrinin induksiya vektorunun qiyməti $10^{12} Q_s < B < 10^{18} Q_s$ intervalında dəyişir. Belə maqnit sahələri üçün səciyyəvi enerji miqyası W -bozonun (həmçinin Z -bozonun) sükunət kütləsindən ($m_w \cong 80 GeV$, $m_z \cong 91 GeV$) çox-çox kiçik olur:

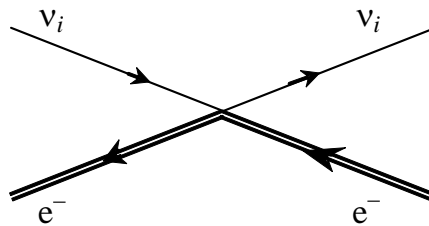
$$\sqrt{eB} = 7,69(B/10^{16} Q_s)^{1/2} MeV \ll m_w. \quad (7)$$

Eyni zamanda biz kiçik impuls ötürmələrinə baxırıq. Neytron ulduzlarında və ifratyeniələrdə buraxılan neytrinoların enerjiləri onlarla MeV tərtibini aşmır. Bütün bu qeyd olunanlar W -bozon və Z -bozon propaqatorları ilə bağlı effektləri nəzərə almamağa əsas verir. Bu halda biz Vaynberq-Salam nəzəriyyəsinin aşağı energetik yaxınlaşmasını tətbiq edə bilərik (Hüseynov, 2012: 235; Muxtarov, 1999: 608).

Vaynberq-Salam nəzəriyyəsinin aşağı energetik yaxınlaşmasında, yəni kiçik impuls ötürmələrində

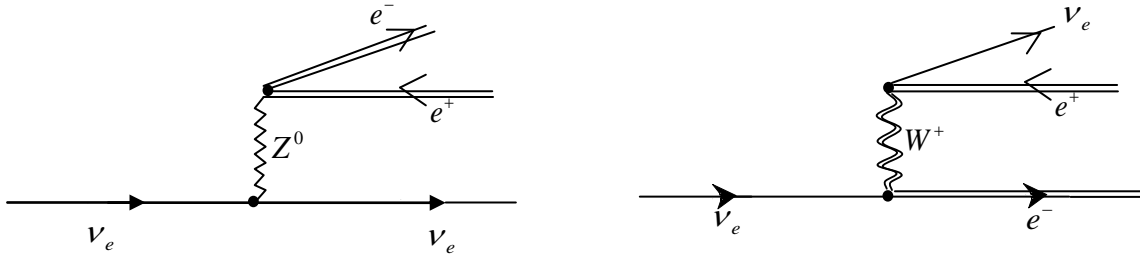
$$|q^2| \ll m_w^2, |q^2| \ll m_z^2 \quad (8)$$

Şəkil 4-də və Şəkil 5-də verilmiş Feynman diaqramları aşağıdakı sadə diaqrama gətirilir.



Şəkil 6

Xarici maqnit sahəsində həm neytral, həm də yüklü cərəyanlar hesabına gedən $\nu_e \rightarrow \nu_e + e^- + e^+$ reaksiyalarını təsvir edən Feynman diaqramları şəkil 7-də verilmişdir.

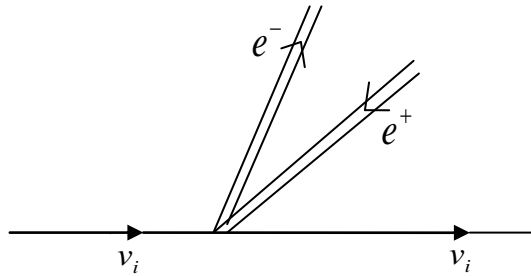


Şəkil 7

Kiçik impuls ötürmələrində

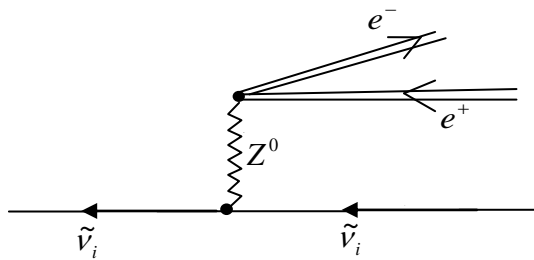
$$|q^2| \ll m_Z^2 \quad (9)$$

bu diaqram aşağıdakı diaqrama gətirilir.



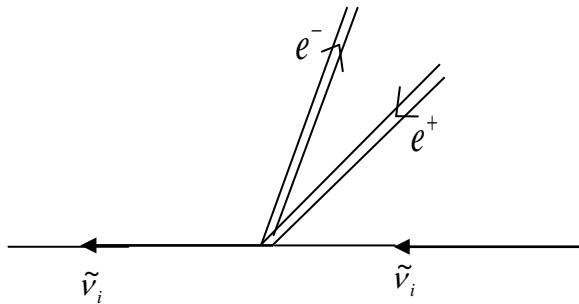
Şəkil 8

Xarici maqnit sahəsində yalnız neytral cərəyan hesabına gedən $\tilde{\nu}_i \rightarrow \tilde{\nu}_i + e^- + e^+$ reaksiyalarını təsvir Feynman diaqramları Şəkil 7-də verilmişdir.



Şəkil 9

Kiçik impuls ötürmələrində ($|q^2| \ll m_Z^2$) bu diaqram aşağıdakı diaqrama gətirilir.



Şəkil 10

Xarici maqnit sahəsində elementar zərrəciklərin qarşılıqlı təsirinin Standart Modelinin 4-fermionlu yaxınlaşmasında

$$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^-, \quad (10)$$

$$\nu_i + e^+ \rightarrow \nu_i + e^+, \quad (11)$$

$$\nu_i \rightarrow \nu_i + e^- + e^+, \quad (12)$$

$$\tilde{\nu}_i \rightarrow \tilde{\nu}_i + e^- + e^+ \quad (13)$$

neytrino-elektron qarşılıqlı təsir prosesləri üçün ümumi halda aşağıdakı matris elementi

$$M = \sqrt{2}G_F \int d^4x [\bar{\psi}_{\nu'}(x)\gamma_\alpha^L \psi_\nu(x)] [\bar{\psi}_e(x)\gamma^\alpha (g_V + g_A\gamma^5)\psi_e(x)] \quad (14)$$

doğrudur. Burada $\psi_\nu(x)$ və $\bar{\psi}_{\nu'}(x)$, uyğun olaraq, başlanğıc və son halda olan neytrinoların dalğa funksiyaları (ikinci funksiya dalğa funksiyasının Dirak qoşması olub, $\bar{\psi}_{\nu'} = \psi_{\nu'}^+ \gamma^0$ kimi təyin edilir), $\psi_e(x)$ və $\bar{\psi}_e(x)$, uyğun olaraq, başlanğıc və son halda olan elektronların (pozitronların, yəni mənfi tezlikli elektronların) dəqiq dalğa funksiyalarıdır və bu funksiyalar xarici maqnit sahəsi üçün yazılmış Dirak tənliyinin həllidir (Əsgərov, 2005: 625). (14) matris elementində γ^α - Dirak matrisləri, $\alpha = 0, 1, 2, 3$, $\gamma_\alpha^L = \gamma_\alpha(1 + \gamma^5)/2$, $G_F = 1,02 \times 10^{-5} / m_p^2 = (294 \text{QeV})^{-2}$ - zəif qarşılıqlı təsirin Fermi sabiti, $g_V = 1/2 + 2\sin^2 \theta_w$, $g_A = 1/2 (\nu_e e^\mp (\tilde{\nu}_e e^\mp)$ -spinləri üçün) və $g_V = -1/2 + 2\sin^2 \theta_w$, $g_A = -1/2 (\nu_\mu e^\mp (\tilde{\nu}_\mu e^\mp)$ -səpilmələri və ya $\nu_\tau e^\mp (\tilde{\nu}_\tau e^\mp)$ -səpilmələri üçün), θ_w - Vaynberq bucağı adlanır ($g \sin \theta_w = e$, $\sin^2 \theta_w \cong 0,23$, g - zəif qarşılıqlı təsir sabitidir, e elementar yüküdür).

Neytrinoların və elektronların (pozitronların) dalğa funksiyalarından istifadə etməklə matris elementini

$$M = \frac{\sqrt{2}G_F}{2V(\omega\omega')^{1/2}} [\bar{u}(k')\gamma_\alpha^L u(k)] C^\alpha(q) \quad (15)$$

şəklində yazmaq olar (Abdullayev, 2012: 484; Sokolov, Ternov, Zhukovskiy, Borisov, 1983: 312). Burada $u(k)$ və $\bar{u}(k)$ kütləsiz neytrinoların bispinorları, $k^\mu = (\omega, \vec{k})$ və $k'^\mu = (\omega', \vec{k}')$, uyğun olaraq, başlanğıc və son halda olan kütləsiz neytrinoların 4-ölçülü impulsarı ($k^2 = k'^2 = 0$), ω və ω' - başlanğıc və son halda olan kütləsiz neytrinoların enerjiləri, $q = k - k'$, $V = L_x L_y L_z$ - normallaşdırıcı həcmdir (Borisov, Zhukovskiy, Lysov, 1983: 30-34; Kuznetsov, Mikheyev, 2000: 863-876).

(15) ifadəsinə daxil olan $C^\alpha(q)$ yüklü lepton cərəyanı

$$C^\alpha(q) = \int d^4x e^{-iqx} [\bar{\psi}_e(x)\gamma^\alpha (g_V + g_A\gamma^5)\psi_e(x)] = 2\pi\delta(\omega' - \omega + E' \mp E) j^\alpha(\vec{q}) \quad (16)$$

ifadəsi ilə müəyyən edilir. Burada yuxarıda yazılmış “mənfi” işarəsi (10) reaksiyaları ilə təsvir olunan proseslərə, aşağıda yazılmış “müsbət” işarəsi (11) reaksiyası ilə təsvir olunan proseslərə aiddir. (10) reaksiyaları ilə təsvir olunan proseslər halında $E(E')$ - başlanğıc (son) halda olan elektronun və ya pozitronun enerjisidir. (11) reaksiyası ilə təsvir olunan proseslər halında $E(E')$ - pozitronun (elektronun) enerjisidir. (16) ifadəsinə daxil olan $j^\alpha(\vec{q})$ cərəyanı üçün

$$j^\alpha(\vec{q}) = \int d^3x e^{i\vec{q}\vec{r}} \bar{\psi}_e(\vec{r}) \gamma^\alpha (g_V + g_A \gamma^5) \psi_e(\vec{r}) \quad (17)$$

ifadəsi doğrudur.

Xarici maqnit sahəsində (10) və (11) reaksiyaları ilə təsvir olunan neytrino-elektron qarşılıqlı təsir prosesləri üçün ümumi halda $j^\alpha(\vec{q})$ cərəyanını uyğun 4-ölçülü cərəyanın keçid amplitudu J^α vasitəsilə ifadə etmək olar (Boriskov, Bykov, Dolotenko, 2011: 441-447).

$$j^\alpha = NJ^\alpha. \quad (18)$$

Burada

$$N = \frac{4\pi^2}{L_y L_z} e^{-i\alpha_0} e^{i(n-n')\varphi'} \delta(p'_y \mp p_y - q_y) \delta(p'_z \mp p_z - q_z) \quad (19)$$

sabit vuruqdur, φ' , φ , α_0 bucaqları və h kəmiyyəti isə aşağıdakı kimi təyin edilir:

$$\varphi' = \varphi - \frac{\pi}{2}, \quad (20)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{q_y}{q_x}, \quad (21)$$

$$\alpha_0 = \frac{q_x}{2h} (p_y + p'_y), \quad (22)$$

$$h = eH. \quad (23)$$

(16), (18) və (19) ifadələrini (15) düsturunda nəzərə almaqla xarici maqnit sahəsində (10) və (11) reaksiyaları ilə təsvir olunan neytrino-elektron qarşılıqlı təsir proseslərinin matris elementini

$$M = \frac{4\sqrt{2}G_F\pi^3}{VL_y L_z (\omega\omega')^{1/2}} \delta(\omega' - \omega + E' \mp E) \delta(p'_y \mp p_y - q_y) \delta(p'_z \mp p_z - q_z) \times e^{-i\alpha_0} e^{i(n-n')\varphi'} [\bar{u}(k') \gamma_\alpha^L u(k)] J^\alpha \quad (24)$$

şəklində yazıla bilər. Bu halda baxılan proseslərin

$$A = \frac{2\sqrt{2}G_F\pi^2}{VL_y L_z (\omega\omega')^{1/2}} \delta(p'_y \mp p_y - q_y) \delta(p'_z \mp p_z - q_z) e^{-i\alpha_0} e^{i(n-n')\varphi'} [\bar{u}(k') \gamma_\alpha^L u(k)] J^\alpha \quad (25)$$

amplitudunu daxil etməklə matris elementini

$$M = 2\pi A \delta(\omega' - \omega + E' \mp E) \quad (26)$$

şəklində vermək olar (Borisov, Vshivtsev, Zhukovskiy, Eminov, 1997: 229-255; Kuznetsov, Mikheyev, 2000: 863-876).

Nəticə

Xarici maqnit sahəsində gedən prosesləri iki qrupa ayırmaq olar: yalnız neytral cərəyanlar hesabına baş verən $\nu_i \rightarrow \nu_i + e^- + e^+$ prosesləri ($\nu_i = \nu_\mu, \nu_\tau$) və həm neytral, həm də yüklü cərəyanlar hesabına baş verən $\nu_e \rightarrow \nu_e + e^- + e^+$ prosesi. (2) reaksiyası ilə təsvir olunan proseslər yalnız neytral cərəyanlar hesabına baş verir. Ümumiyyətlə $\nu_i \rightarrow \nu_i + e^- + e^+$ proseslərinin ehtimalı zəif sahə halında standart model çərçivəsində güclü maqnit sahəsində (1) prosesinin ehtimalı və baxılan proses zamanı itirilən enerji və impuls itkilərinin orta qiyməti hesablanmışdır. Prosesin standart model çərçivəsində güclü maqnit sahəsində tədqiq olunmuş və prosesin baş vermə tezliyi Landau səviyyələrinin, ilkin neytrino enerjisinin və maqnit sahəsi intensivliyinin qiymətinin müxtəlif kombinasiyaları halında hesablanmışdır. Prosesin sonunda amplitudunu neytrinoların və elektronların dalğa funksiyalarından istifadə etməklə matris elementini alırıq.

Ədəbiyyat

1. Nəcəfov, İ.M. (2012). Müasir klassik elektrodinamika (dərs vəsaiti). Bakı: "Adiloğlu" nəşriyyatı, 549s.
2. Akhiezer, A.I., Berestetskiy, V.B. (1969). Kvantovaya elektrodinamika. Monografiya. Gl. red. fiz.-mat. lit. M.: Nauka, 624 s.
3. Hüseynov, V.A. (2012). Kvant elektrodinamikası. Ali məktəblər üçün dərslik. Bakı: "Şərq-Qərb" nəşriyyatı, 235 s.
4. Muxtarov, A.İ. (1999). Kvant mexanikası: Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti. Bakı: «Maarif» nəşriyyatı, 608 s., şəkilli.
5. Əsgərov, B.M. (2005). Termodinamika və statistik fizika: Ali məktəblər üçün dərslik. Bakı: "Bakı Universiteti" nəşriyyatı, 625 s.
6. Abdullayev, S.Q. (2012). Lepton-lepton və lepton-hadron qarşılıqlı təsirlərində zəif cərəyan effektləri. Bakı: AM965 MMC nəşriyyatı, 484 s.
7. Sokolov, A.A., Ternov, I.M., Zhukovskiy, V.Ch., Borisov, A.V. (1983). Kvantovaya elektrodinamika. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 312 s.
8. Borisov, A.V., Zhukovskiy, V.CH., Lysov, B.A. (1983). Rozhdeniye elektron-pozitronnoy pary neytrino v magnitnom pole. Izvestiya vuzov. Fizika, № 8, s.30-34.
9. Kuznetsov, A.V., Mikheyev, N.V. (2004). Vzaimodeystviye neytrino s sil'no zamagnichennoy elektron-pozitronnoy plazmoy. ZHETF, 118 vyp. 4 (10), c.863-876.
10. Boriskov, G.V., Bykov, A.I., Dolotenko, M.I. (2011). Fizicheskiye issledovaniya v sverkhsil'nykh magnitnykh polyakh. Uspekhi fizicheskikh nauk, t. 181, vyp. 4, s.441-447.
11. Borisov, A.V., Vshivtsev, A.S., Zhukovskiy, V.CH., Eminov, P.A. (1997). Fotony i leptony vo vneshnikh polyakh pri konechnoy temperature i plotnosti. Uspekhi fizicheskikh nauk, t. 40, vyp. 3, s.229-255.
12. Kuznetsov, A.V., Mikheyev, N.V. (2000). Vzaimodeystviye neytrino s sil'no zamagnichennoy elektron-pozitronnoy plazmoy. ZHETF, 118 vyp. 4 (10), c.863-876.

Göndərildi: 14.04.2023

Qəbul edildi: 01.06.2023