

НЕЙТРИННОЕ РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР В УМЕРЕННО СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*А. В. Кузнецов, Д. А. Румянцев, В. Н. Савин**

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия

В работе исследуются два процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар в умеренно сильном магнитном поле: $\nu\bar{\nu} \rightarrow e^-e^+$ и $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$. При таких условиях электроны и позитроны могут рождаться в состояниях, соответствующих возбужденным уровням Ландау. Полученные результаты могут быть использованы при расчетах эффективности нейтринной генерации электрон-позитронной плазмы в условиях аккреционного диска керровской черной дыры.

The processes of neutrino production of electron–positron pairs, $\nu\bar{\nu} \rightarrow e^-e^+$ and $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$, in a magnetic field of arbitrary strength, where electrons and positrons can be created in the states corresponding to excited Landau levels, are analyzed. The results can be applied for calculating the efficiency of the electron–positron plasma production by neutrinos in the conditions of the Kerr black hole accretion disc.

PACS: 13.15.+g; 95.30.Cq

Во внешнем магнитном поле возможны процессы, запрещенные в вакууме, например нейтринное рождение электрон-позитронной пары. Существенным фактором является также величина этого поля, от которой зависит техника расчетов. В большинстве случаев используются два предельных случая: во-первых, приближение скрещенного (относительно слабого) поля и, во-вторых, предел сильного поля, когда оно значительно превышает критическое значение $B_e = m_e^2/e \simeq 4,41 \cdot 10^{13}$ Гс, а электроны и позитроны могут заселять лишь основной уровень Ландау.

Однако возможны условия, в которых ни один из этих пределов не подходит. Например, при иерархии параметров $p_{\perp}^2 \geq eB \gg m_e^2$ частицы могут рождаться и на возбужденных уровнях. Подобное соотношение параметров соответствует условиям в аккреционных дисках керровских черных дыр, рассматриваемых специалистами в качестве наиболее вероятного источника ко-

*E-mail: vs_post07@mail.ru

роткого космологического гамма-всплеска [1]. Это приводит к необходимости использовать иную методику вычислений, которую мы называем пределом умеренно сильного магнитного поля. Ранее расчеты характеристик нейтринного рождения пар e^-e^+ проводились лишь в двух упомянутых выше приближениях. Обзор методик и результатов вычислений можно найти, например, в работе [2].

Основная цель данной работы состоит в исследовании процессов $\nu\bar{\nu} \rightarrow e^-e^+$ и $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$ в физических условиях, соответствующих умеренно сильному магнитному полю, и дальнейшем сравнении с результатами, полученными ранее с использованием других пределов.

В ситуации умеренно сильного поля необходимо учитывать вклад возбужденных уровней Ландау путем суммирования по ним вероятностей и сечений исследуемых процессов. Более подробно техника расчетов описана в статье [3]. Для астрофизических приложений важными характеристиками являются связанные с вероятностью средние потери энергии и импульса нейтрино под влиянием внешнего магнитного поля. Эти величины можно описать при помощи 4-вектора Q^α :

$$Q^\alpha = E \int q^\alpha dW = -E(\mathcal{I}, \mathbf{F}), \quad (1)$$

где q — разность импульсов начального и конечного нейтрино; $q = P - P'$; dW — дифференциальная вероятность процесса. Нулевая компонента (1) представляет собой средние потери энергии нейтрино за единицу времени в ходе данного процесса, $\mathcal{I} = dE/dt$. Пространственная составляющая 4-вектора Q^α определяет средние потери импульса, $\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt$.

В статье [1] использовано выражение для величины Q_0 , вычисленной ранее в пределе скрещенного поля. Однако при физических параметрах, в которых рассматривался процесс (B до $180B_e$, E_ν до 25 МэВ), предел скрещенного поля неприменим, как и приближение сильного поля, так как помимо основного уровня частицы могут рождаться и на более высоких энергетических уровнях. Выражение для величины Q_0 в случае умеренно сильного поля вычислено в работе [3]. Анализ показал, что предел скрещенного поля дает на порядок завышенный результат.

Локальная передача энергии-импульса в процессе $\nu\bar{\nu} \rightarrow e^-e^+$ определяется выражением [4]

$$Q_{\nu\bar{\nu}}^\alpha = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} f_\nu(p) \int \frac{d^3p'}{(2\pi)^3} f_{\bar{\nu}}(p') (p^\alpha + p'^\alpha) \frac{(pp')}{EE'} \sigma(\nu\bar{\nu} \rightarrow e^-e^+), \quad (2)$$

где σ — сечение процесса; p и p' — 4-импульсы нейтрино и антинейтрино; $f_\nu(p)$ и $f_{\bar{\nu}}(p')$ — локальные функции распределения. В отличие от вакуумного сечения, в которое входит только переменная Манделштама S , сечение

в присутствии поля зависит от целого ряда параметров, например, энергий нейтрино и антинейтрино E, E' , двух полярных и одного азимутального углов, определяющих направления импульсов относительно поля.

На рис. 1 и 2 представлена зависимость отношений вакуумного и полевого сечений к $\sigma_0 = 4G_F^2 m_e^2 / \pi$ от энергии E для случая, когда $E = E'$, а векторы импульсов начальных частиц и напряженности магнитного поля лежат в одной плоскости. Сечение будет зависеть от величины поля, энергии E , угла θ между \mathbf{P} и \mathbf{P}' и угла φ между $\mathbf{q} = \mathbf{P} + \mathbf{P}'$ и \mathbf{B} .

Сечение в магнитном поле имеет характерный пилообразный профиль, обусловленный корневыми сингулярностями [5]. Видно, что поле способно как усиливать реакцию, так и существенно подавлять ее, и предварительный вывод о его слабом влиянии на реакцию, сделанный в статье [6], оказался неточным.

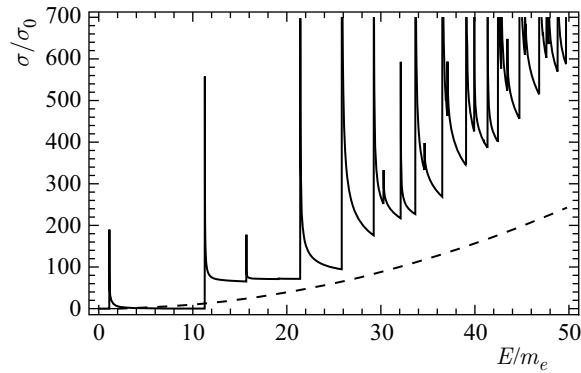


Рис. 1. Зависимость вакуумного (штриховая линия) и полевого (сплошная) сечений от энергии E при $B = 180B_e$ и значениях углов $\theta = \pi/3, \varphi = \pi/8$

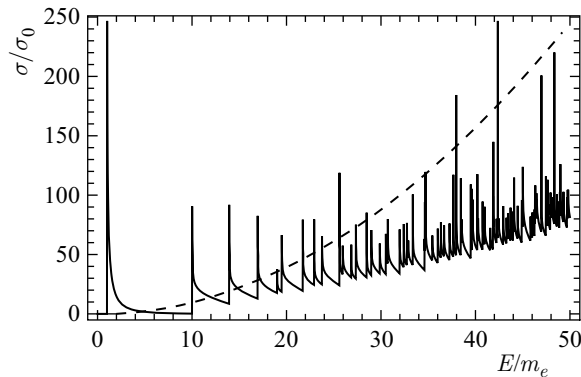


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, при значениях углов $\theta = \pi/10, \varphi = 3\pi/2$

Таким образом, в условиях аккреционного диска черной дыры пределы скрещенного и сильного полей дают для процесса $\nu \rightarrow \nu e^- e^+$ неудовлетворительный результат, отличный от случая умеренно сильного поля, когда суммируются несколько возбужденных уровней Ландау. Инвариантное сечение процесса $\nu\bar{\nu} \rightarrow e^- e^+$ зависит от направления импульсов сталкивающихся частиц и магнитного поля, которое при определенных условиях может делать это сечение значительно отличающимся от вакуумного значения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00233-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zalamea I., Beloborodov A. M.* // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2011. V. 410. P. 2302.
2. *Kuznetsov A. V., Mikheev N. V.* Electroweak Processes in External Active Media. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
3. *Kuznetsov A. V., Romyantsev D. A., Savin V. N.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 2014. V. 29. P. 1450136.
4. *Birkl R. et al.* // Astron. Astrophys. 2007. V. 463. P. 51.
5. *Клепиков Н. П.* // ЖЭТФ. 1954. Т. 26. С. 19.
6. *Kuznetsov A. V., Romyantsev D. A., Savin V. N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 675. P. 032019.