

Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов

А. Р. Попов^{1,*}, А. И. Студеникин^{2,†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра квантовой теории и физики высоких энергий

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра теоретической физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 22.01.2024; подписана в печать 29.01.2024)

Рассмотрены осцилляции нейтрино в магнитном поле в рамках формализма волновых пакетов. Изучено затухание осцилляций нейтрино в магнитном поле из-за расхождения волновых пакетов нейтрино. Получены выражения для вероятностей осцилляций нейтрино в магнитном поле, учитывающие эффекты декогеренции. Показано, что длины когерентности осцилляций нейтрино на магнитных частотах пропорциональны кубу энергии. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения анализа данных нейтринных телескопов IceCube, Baikal-GVD и KM3NeT, а также могут быть применены для описания эффектов осцилляций нейтрино от сверхновых, детектирование которых является одной из целей экспериментов JUNO, Hyper-Kamiokande и DUNE.

PACS: 13.15.+g, 95.85.Ry

УДК: 53.01.

Ключевые слова: магнитный момент нейтрино, осцилляции нейтрино, астрофизика.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что массивные нейтрино обладают нетривиальными электромагнитными свойствами, в частности ненулевыми аномальными магнитными моментами. Обзор теории и эксперимента в области электромагнитных свойств нейтрино приведён в работах [1, 2]. В настоящее время лучшее ограничение сверху на величину эффективного магнитного момента нейтрино получено в эксперименте XENONnT и находится на уровне $\mu_\nu \leq 6.4 \times 10^{-12} \mu_B$ [3, 4]. Взаимодействие магнитных моментов нейтрино с магнитным полем индуцирует спиновую прецессию нейтрино. В частности, прецессия спина может быть вызвана взаимодействием нейтрино с космическим магнитным полем, величина которого в нашей Галактике порядка микрогаусс [5].

Для изучения распространения нейтрино на астрофизических масштабах необходимо использовать формализм волновых пакетов, который учитывает эффекты декогеренции нейтринных осцилляций. Ранее формализм волновых пакетов был развит для случая осцилляций нейтрино в вакууме (обзор приведён в работах [6–8]), осцилляций нейтрино в веществе [9, 10] и коллективных нейтринных осцилляций [11]. В этой статье мы рассматриваем осцилляции нейтрино в магнитном поле с использованием волновых пакетов.

1. ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ФОРМАЛИЗМЕ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ

Осцилляции нейтрино в однородном магнитном поле описываются следующим модифицированным уравне-

нием Дирака

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i)\nu_i(x) - \mu_i \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{B} \nu_i(x) = 0, \quad (1)$$

где индекс $i = 1, 2, 3$ нумерует массовые состояния нейтрино. В работах [12, 13] уравнение (1) было решено в плосковолновом случае. Чтобы учесть потенциально важные эффекты декогеренции в осцилляциях нейтрино на больших расстояниях, мы решаем уравнение (1) предполагая, что в начальный момент $t = 0$ образ Фурье волновой функции нейтрино описывается гауссовым волновым пакетом

$$\begin{aligned} \nu_i(p, 0) &= f_i(p, p_0) u_i^-(p), \\ f_i(p, p_0) &= \frac{1}{(2\pi\sigma_p^2)^{1/4}} \exp\left(-\frac{(p-p_0)^2}{4\sigma_p^2}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где p_0 — средний импульс волнового пакета, σ_p — ширина волнового пакета в импульсном пространстве, а u_i^- — левоспиральное решение уравнения Дирака в вакууме.

Дисперсионное соотношение для нейтрино, взаимодействующего с магнитным полем, задается следующим выражением [12]

$$E_i^s(p) = \pm \sqrt{m_i^2 + p^2 + \mu_i^2 B^2 + 2s\mu_i \sqrt{m_i^2 B^2 + p^2 B_\perp^2}}, \quad (3)$$

где $s = \pm 1$. Здесь магнитное поле \mathbf{B} разложено на поперечную \mathbf{B}_\perp и продольную \mathbf{B}_\parallel составляющие относительно импульса нейтрино.

Используя уравнение (3), мы вычисляем групповые скорости волновых пакетов нейтрино

$$v_i^s(p_0) = \left. \frac{\partial E_i^s(p)}{\partial p} \right|_{p=p_0} = \frac{p_0}{E_i^s(p_0)} \left(1 + \frac{s\mu_i B_\perp^2}{\sqrt{m_i^2 B^2 + p_0^2 B_\perp^2}} \right). \quad (4)$$

* ar.popov@physics.msu.ru

† studenik@srd.sinp.msu.ru

Для вероятностей флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле мы получаем следующие выражения

$$P_{\nu_\alpha^h \rightarrow \nu_\beta^{h'}}(L) = \sum_{i,j} \sum_{s,s'} U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* C_{is}^{hh'} C_{js'}^{hh'} \times \exp\left(-i2\pi \frac{L}{L_{osc}^{ijss'}}\right) \exp\left(-\frac{L^2}{(L_{coh}^{ijss'})^2}\right), \quad (5)$$

где введены длины осцилляций и длины когерентности

$$L_{osc}^{ijss'} = \frac{\pi}{\omega_{ij}^{ss'}}, \quad L_{coh}^{ijss'} = \frac{2\sqrt{2}\sigma_x}{v_i^s - v_j^{s'}}. \quad (6)$$

При этом ширина волнового пакета в координатном пространстве σ_x связана с шириной волнового пакета в импульсном пространстве соотношением неопределённостей $\sigma_x \sigma_p = 1/2$. Частоты осцилляций $\omega_{ij}^{s\sigma}$ задаются формулой $\omega_{ij}^{s\sigma}(p_0) \approx \frac{\Delta m_{ij}^2}{2p_0} + (\mu_i s - \mu_j \sigma) B_\perp$.

Для коэффициентов $C_{is}^{hh'}$ в формуле (5) мы получаем

$$C_{is}^{LL} \approx \frac{1}{2} + \mathcal{O}\left(\frac{m_i^2}{p^2}\right), \quad C_{is}^{RL} \approx -\frac{s}{2} + \mathcal{O}\left(\frac{m_i^2}{p^2}\right). \quad (7)$$

Выражения для вероятностей осцилляций (5) обобщают выражения, полученные нами в работе [13] и учитывают экспоненциальное затухание нейтринных осцилляций на большом расстоянии, вызванное расхождением волновых пакетов. Используя уравнение (4), мы получаем следующие приближенные выражения для длин когерентности, учитывая, что $p \gg m_i \gg \mu_i B$:

$$L_{coh}^{ijss} \approx \frac{4\sqrt{2}\sigma_x p^2}{\Delta m_{ij}^2}, \quad (8)$$

$$L_{coh}^{ii-+} \sim \frac{\sigma_x p^3}{\mu_i B m_i^2}, \quad (9)$$

$$L_{coh}^{ij-+} \approx L_{coh}^{ijss}. \quad (10)$$

Длины когерентности L_{coh}^{ijss} и L_{coh}^{ii-+} описывают затухание осцилляций на вакуумных длинах $L_{osc}^{ijss} = \frac{4\pi p}{\Delta m_{ij}^2}$ и на магнитных длинах $L_{osc}^{ii-+} = \frac{\pi}{\mu_i B_\perp}$. Отметим, что в отличие от длин когерентности осцилляций на вакуумных частотах, длины когерентности L_{coh}^{ii-+} пропорциональны кубу среднего импульса нейтрино.

В пределе нулевого магнитного поля выражения для вероятностей осцилляций (5) переходят в известные формулы для вероятностей осцилляций нейтрино в вакууме, которые можно найти в работах [6–8]. Отметим, что в нашей работе не рассматриваются эффекты, связанные с расплыванием волновых пакетов массовых состояний нейтрино, которые могут привести к частичному восстановлению когерентности. Данный эффект рассмотрен в работе [8].

Взаимодействие с магнитным полем может привести к изменению флейворного состава потока нейтрино,

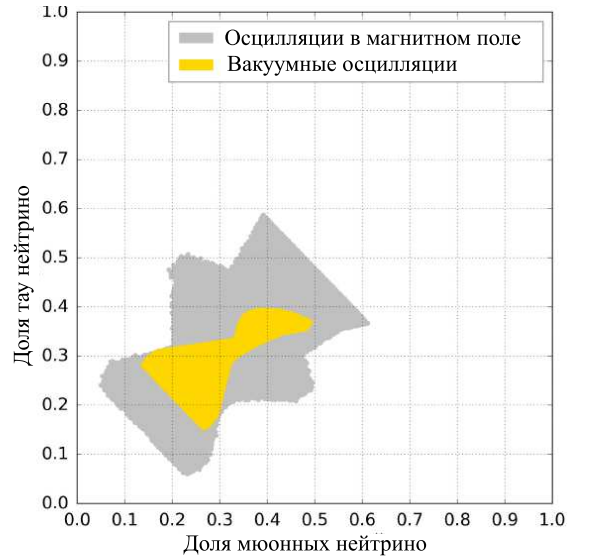
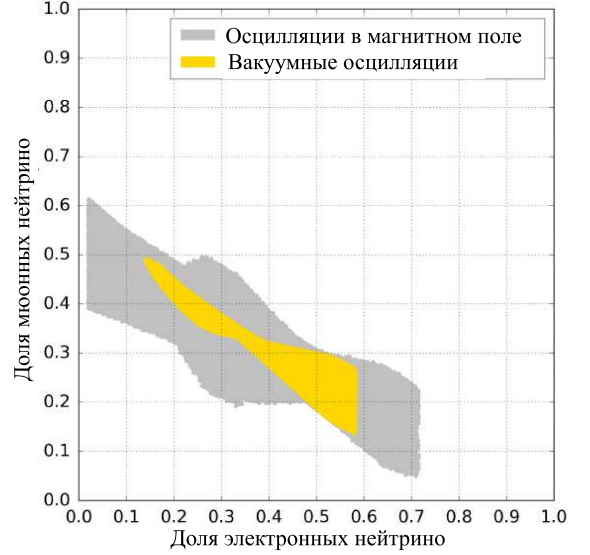


Рисунок. Флейворные составы нейтрино, исходящих из центра Галактики

исходящих от астрофизических объектов. Рассмотрим в качестве примера нейтрино высоких энергий, исходящие из центра Галактики. Флейворный состав на расстоянии L от источника задается формулой

$$r_\alpha(L) = \frac{\sum_\alpha r_\alpha^0 P_{\alpha\beta}(L)}{\sum_{\alpha\beta} r_\alpha^0 P_{\alpha\beta}(L)}, \quad (11)$$

где r_β^0 — начальный флейворный состав, а $P_{\alpha\beta} = P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu_\beta^L}$ — вероятности осцилляций нейтрино.

Механизм рождения астрофизических нейтрино высоких энергий в настоящее время неизвестен. Рассмотрим различные начальные флейворные составы, а также различные значения магнитных моментов нейтрино из интервала $(0.1, 6.4) \times 10^{-12} \mu_B$. При этом мы

делаем реалистичное предположение, что в источнике не рождаются тау-нейтрино, т.е. $r^0 = (r_e^0, r_\mu^0, 0)$. На рисунке показаны возможные конечные флейворные составы нейтрино, распространяющихся от центра Галактики к наземному нейтринному телескопу, для различных значений магнитных моментов нейтрино μ_1, μ_2, μ_3 и начальных флейворных составов r^0 в предположении, что магнитное поле имеет напряжённость $B = 2\mu\text{Г}$. Полученные флейворные составы сравниваются с предсказанными в случае осцилляций нейтрино в вакууме. Мы обнаружили, что взаимодействие нейтрино с магнитным полем может существенно изменить наблюдаемый флейворный состав потока нейтрино высоких энергий, если магнитные моменты нейтрино не меньше $\mathcal{O}(10^{-13}\mu_B)$, что на порядок ниже текущих самых строгих ограничений сверху [1–4].

Таким образом мы приходим к выводу, что эффекты взаимодействия нейтрино с магнитным полем потенциально могут быть исследованы нейтринными телескопами, такими как IceCube, Baikal-GVD и KM3NeT. Полученные результаты могут быть также применены для описания осцилляций нейтрино от сверхновых, детектирование которых является целью экспериментов JUNO, Hyper-Kamiokande и DUNE.

Благодарности

Исследование проведено в рамках Научной программы Национального центра физики и математики, Секция №8 (Этап 2023–2025).

-
- [1] *Giunti C., Studenikin A.* // *Rev. Mod. Phys.* **87**. 531. (2015).
 [2] *Studenikin A.* // *PoS CORFU2021* **057**. (2022).
 [3] *Aprile E. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* **16**. 161805. (2022).
 [4] *Giunti C., Ternes C.A.* // *Phys. Rev. D.* **108**. 095044. (2023).
 [5] *Beck R.* // *AIP Conf. Proc.* **1085**. 83. (2009).
 [6] *Giunti C.* // *Found. Phys. Lett.* **17**. 103. (2004).
 [7] *Giunti C., Kim C.W.* // Oxford University Press. 2007.
 [8] *Наумов Д.В., Наумов В.А.* // *ЭЧАЯ* **51**. 5-209. (2020).
 [9] *Peltoniemi J.T., Sipilainen V.* // *JHEP* **06**. 011. (2000).
 [10] *Kersten J., Smirnov A.Y.* // *Eur. Phys. J. C.* **76**. 339. (2016).
 [11] *Akhmedov E., Kopp J., Lindner M.* // *JCAP* **09**. 017. (2017).
 [12] *Popov A., Studenikin A.* // *Eur. Phys. J. C.* **79**. 144. (2019).
 [13] *Lichkunov A., Popov A., Studenikin A.* // arXiv:2207.12285.

Decoherence of neutrino oscillations in a magnetic field due to wave packets separation

A. R. Popov^{1a}, A. I. Studenikin^{1b}

¹*Department of quantum theory and high energy physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*

²*Department of theoretical Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
 Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aar.popov@physics.msu.ru, ^bstudenik@srd.sinp.msu.ru

Neutrino oscillations in a magnetic field considered within the formalism of wave packets. Damping of neutrino oscillations in a magnetic field due to neutrino wave packets separation is studied. The expressions for neutrino oscillations probabilities in a magnetic field accounting for decoherence effects are obtained. It is shown that the coherence lengths of oscillations on magnetic frequencies are proportional to the cube of neutrino energy. The obtained results are of interest for neutrino telescopes IceCube, Baikal-GVD and KM3NeT, and also can be applied for description of supernovae neutrino oscillations effects would be detected by JUNO, Hyper-Kamiokande and DUNE.

PACS: 13.15.+g, 95.85.Ry.

Keywords: neutrino magnetic moment, neutrino oscillations, astrophysics.

Received 22 January 2024.

Сведения об авторах

1. Попов Артем Романович — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-17, e-mail: ar.popov@physics.msu.ru.
2. Студеникин Александр Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-16-17, e-mail: studenik@srd.sinp.msu.ru.