

На правах рукописи

Попов Артем Романович

**Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных
полях и средах**

1.3.3. — «Теоретическая физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Студеникин Александр Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра теоретической физики, профессор.

Официальные оппоненты:

Дворников Максим Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, заведующий теоретическим отделом, ведущий научный сотрудник.

Тернов Алексей Игоревич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), кафедра теоретической физики, профессор.

Ведущая организация:

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г.Дубна.

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

В настоящее время физика нейтрино является одной из самых бурно развивающихся областей физики элементарных частиц. Открытие феномена осцилляций указало на наличие у нейтрино, изначально считавшегося безмассовой частицей, ненулевой массы. Данное открытие привело к необходимости модификации Стандартной модели физики элементарных частиц.

Существует множество источников нейтрино как земного, так и внеземного происхождения. Наземные источники нейтрино можно разделить на естественные и искусственные. К искусственным источникам относятся, например, ядерные реакторы и ускорители элементарных частиц. Естественные источники порождают в частности поток геонейтрино, испускаемый в результате распада радионуклидов внутри Земли. Кроме того, экспериментами наблюдаются атмосферные нейтрино, которые рождаются в результате взаимодействия космических лучей с земной атмосферой. Что касается нейтрино внеземного происхождения, или *астрофизических нейтрино*, на данный момент экспериментально обнаружены три их типа:

- 1) солнечные нейтрино,
- 2) нейтрино от сверхновых,
- 3) космические нейтрино высоких энергий.

В настоящее время в физике нейтрино имеется множество открытых вопросов. Большая часть из них связана с проблемой массы нейтрино. Из наблюдения феномена осцилляций следует, что как минимум два из трёх массовых состояний нейтрино обладают ненулевой массой. Однако порядок масс нейтрино неизвестен. На данный момент лучшее ограничение сверху на эффективную массу нейтрино получено коллаборацией KATRIN и составляет 0.8 эВ, что делает нейтрино легчайшими из известных массивных частиц. Кроме того, неизвестно какое из массовых состояний нейтрино обладает наименьшей массой. Эта проблема носит название упорядочения масс нейтрино. Определение упорядочения нейтринных масс является главной целью готовящегося на данный момент эксперимента JUNO.

Одним из важнейших является вопрос о наличии CP-нарушения в лептонном секторе. Нарушение CP-симметрии предполагает, что вероятности осцилляций нейтрино и антинейтрино в вакууме различны. На решение данной проблемы нацелены нейтринные эксперименты с длинной базой, в частности T2K, NO ν A, DUNE, Hyper-Kamiokande и другие.

В рамках минимально расширенной Стандартной модели предсказывается, что вследствие наличия у нейтрино ненулевой массы, они также должны обладать нетривиальными электромагнитными свойствами. В

частности, к ним относится аномальный магнитный момент нейтрино. Наиболее полный обзор электромагнитных свойств и взаимодействий нейтрино дан в работе [1]. В силу наличия в астрофизических объектах сильных магнитных полей ожидается, что электромагнитные свойства нейтрино могут наиболее ярко проявиться именно в астрофизике.

Предметом диссертационной работы являются флейворные и спиновые осцилляции астрофизических нейтрино. Возникновение спиновых осцилляций нейтрино может быть вызвано взаимодействием аномального магнитного момента нейтрино с магнитным полем. Явление спиновых осцилляций нейтрино может повлиять на потоки астрофизических нейтрино и их флейворный состав, таким образом предоставляя возможность для экспериментального изучения электромагнитных свойств нейтрино.

Актуальность исследования обусловлена тем, что на данный момент действуют или находятся в процессе подготовки большое количество экспериментов, целью которых является поиск нейтрино от астрофизических источников. Особый интерес вызывают нейтрино от сверхновых и нейтрино высоких энергий. Будущие эксперименты по детектированию нейтрино от сверхновых, такие как JUNO, Hyper-Kamiokande, DUNE, LENA и другие, могут предоставить статистику в десятки тысяч событий и более. Эксперименты IceCube, Baikal-GVD, KM3NeT нацелены на наблюдение потоков астрофизических нейтрино высоких энергий, в частности, на определение их источников и флейворного состава. Кроме того, имеется большое количество теоретических работ, посвящённых моделированию потоков нейтрино от астрофизических объектов, в особенности от сверхновых.

Электромагнитные свойства нейтрино являются объектом повышенного интереса как теоретических, так и экспериментальных исследований [1]. Особый интерес вызывают магнитные моменты нейтрино. В работах [2–4] получены экспериментальные ограничения сверху на эффективный магнитный момент нейтрино. Имеются также и новые предложения по изучению электромагнитных свойств нейтрино, в частности с помощью когерентного упругого рассеяния тритиевых нейтрино на атомах гелия-4 [5]. В работе [6] развита теория электромагнитного рассеяния нейтрино на мишени с учётом эффектов смешивания и осцилляций нейтрино.

Магнитный момент нейтрино в рамках минимально расширенной Стандартной модели был впервые вычислен в работах [7; 8]. Возможность возникновения спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле была впервые рассмотрена в статье [9], спин-флейворная прецессия для случая майорановских нейтрино рассмотрена в [10]. Эффекты влияния вещества на спиновые осцилляции нейтрино обсуждались в работах [11; 12]. Резонансное усиление спин-флейворных осцилляций нейтрино в веществе изучено в статьях [13; 14]. В [15; 16] показано, что спиновые осцилляции нейтрино могут быть вызваны слабыми взаимодействием с движущимся веществом

при условии наличия поперечного тока или поляризации вещества. В работах [17;18] обсуждается возможность поиска CP-нарушения в осцилляциях нейтрино от взрывов сверхновых. В работах [19–22] осцилляции нейтрино в магнитном поле рассматриваются в квантово-полево-матриальном формализме. В работах [23–25] проведено вторичное квантование уравнений движения для майорановских нейтрино в гамильтоновом формализме.

Осцилляции нейтрино в сверхновых с учётом эффектов взаимодействия с магнитным полем рассмотрены в [12–14; 26–29]. Спиновые осцилляции, вызванные взаимодействием индуцированного веществом магнитного момента нейтрино с магнитным полем, рассмотрены в [28–30]. Коллективные эффекты в осцилляциях нейтрино от сверхновых изучены в работе [31]. В статьях [32;33] были одновременно учтены коллективные эффекты и взаимодействие нейтрино с магнитным полем сверхновой.

Осцилляции нейтрино в вакууме были рассмотрены с использованием волновых пакетов в работах [34–36]. В статьях [37–40] разработана квантово-полевая теория нейтринных осцилляций, основанная на лоренц-ковариантных волновых пакетах. В [41] вычислена длина когерентности осцилляций нейтрино с использованием разработанного авторами квантово-полевого подхода. В [42;43] рассмотрена эволюция волновых пакетов нейтрино в веществе. Коллективные осцилляции нейтрино изучены с использованием волновых пакетов в работе [44].

Целью диссертационной работы является описание процесса осцилляций нейтрино при их распространении в условиях сильных магнитных полей и плотного вещества, характерных для астрофизических объектов. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) разработан новый подход к вычислению осцилляций дираковских нейтрино в магнитном поле,
- 2) указанный подход обобщён на случай осцилляций майорановских нейтрино в магнитном поле и веществе сверхновой,
- 3) развит формализм для описания осцилляций нейтрино в магнитном поле с использованием волновых пакетов.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались строгие методы современной теоретической физики, в частности квантовой теории поля и физики элементарных частиц. Для символьных вычислений использовались пакеты Maple и Wolfram Mathematica, а для численных расчётов были реализованы алгоритмы на языках программирования Python и C.

Научная новизна:

- 1) с использованием развитого нового подхода к описанию нейтрино в магнитном поле показано, что в общем случае вероятности флейворных осцилляций нейтрино в магнитном поле являются суперпозицией осцилляций на вакуумных и магнитных частотах;

- в частности, показано, что спиновые осцилляции могут модифицировать флейворный состав потоков нейтрино, наблюдаемый экспериментально;
- 2) впервые вычислены вероятности осцилляций майорановских нейтрино в магнитном поле и веществе с учётом возможности наличия ненулевых майорановских CP-нарушающих фаз и показано, что могут возникать новые резонансы в осцилляциях нейтрино при условиях, которые характерны для взрывов сверхновых звёзд;
 - 3) впервые вычислены длины когерентности для случая осцилляций нейтрино в магнитном поле; получен диапазон возможных флейворных составов потоков нейтрино высоких энергий от точечного источника, наблюдаемых наземными нейтринными телескопами, с учётом возможных эффектов взаимодействия нейтрино с космическим магнитным полем.

Теоретическая и практическая значимость

Общая теоретическая значимость проведённого исследования заключается в том, что разработан новый формализм для описания спиновых и флейворных осцилляций нейтрино в магнитном поле на основе спинового оператора, который является интегралом движения.

Практическая значимость работы заключается в том, что исследованные в диссертации эффекты важны для моделирования потоков нейтрино от астрофизических источников. Проведённое в диссертации моделирование эволюции потоков нейтрино необходимо для анализа данных от будущих нейтринных экспериментов, в частности, для поиска проявлений электромагнитных взаимодействий нейтрино.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность результатов диссертации обуславливается использованием в ней апробированных методов теоретической физики. Полученные соискателем выражения в предельных случаях сводятся к достоверным и хорошо известным в литературе результатам. Кроме того, все результаты диссертации прошли апробацию: вошли в 10 опубликованных автором статей и 19 сделанных автором докладов на российских и международных конференциях.

Апробация результатов диссертационной работы.

Результаты работы вошли в 10 публикаций автора в изданиях, индексируемых базой данных Scopus: [A1-A10].

Кроме того, по результатам диссертации были сделаны 19 докладов на российских и международных конференциях:

- 1) “Wave packet treatment of neutrino flavour and spin oscillations in galactic and extragalactic magnetic fields”, The First Edition of the

- African Conference on High Energy Physics, Рабат, Марокко, 23-27 октября 2023 (устный доклад).
- 2) “Supernova neutrino oscillations as a probe of leptonic CP-violation”, The XXVII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2023), Дубна, Россия, 29 октября - 3 ноября 2023 (устный доклад).
 - 3) “Осцилляции майорановских нейтрино при взрывах сверхновых и CP-нарушение”, II Всероссийская школа для студентов и молодых учёных по физике высоких энергий и ускорительной технике, Саратов, Россия, 24-29 июля 2023 (устный доклад).
 - 4) “Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation”, 23rd JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Большие Коты, Россия, 11-18 июля 2023 (устный доклад).
 - 5) “CP-violating effects in oscillations of supernova Majorana neutrinos”, XIV International School on Neutrino Physics and Astrophysics, Саратов, Россия, 18-23 июля 2022 (устный доклад).
 - 6) “Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation”, Bologna, Italy, 6 - 13 июля 2022 (устный и стендовый доклад).
 - 7) “CP-violating effects in oscillations of supernova Majorana neutrinos”, 30th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Seoul, Korea, 30 мая - 4 июня 2022 (стендовый доклад).
 - 8) “Majorana neutrino oscillations in a magnetic field and CP violation”, EuCAPT Astroneutrino Theory Workshop 2021, Prague, Czech Republic, 20 сентября - 1 октября 2021 (устный доклад).
 - 9) “The interplay of neutrino flavor and spin oscillations in a magnetic field”, EuCAPT Astroneutrino Theory Workshop 2021, Prague, Czech Republic, 20 сентября - 1 октября 2021 (устный доклад).
 - 10) “Effects of nonzero Majorana CP phases on oscillations of supernova neutrinos”, 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2021), онлайн-конференция, 26 августа - 3 сентября 2021 (стендовый доклад).
 - 11) “Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field”, The European Physical Society conference on high energy physics 2021 (EPS-HEP 2021), онлайн-конференция, 28 июля - 6 августа 2020 (стендовый доклад).
 - 12) “Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case”, 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020), онлайн-конференция, 26 августа - 3 сентября 2021 (стендовый доклад).
 - 13) “Neutrino oscillations in a magnetic field and CP violation: The three-flavor case”, The XXIX International Conference on Neutrino Physics

- and Astrophysics (Neutrino 2020), онлайн-конференция, 22 июня - 2 июля 2020 (стендовый доклад).
- 14) “Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field”, The European Physical Society Conference on High-Energy physics 2019 (EPS-HEP 2019), Ghent, Belgium, 10 – 17 июля 2019 (стендовый доклад).
 - 15) “Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field”, 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2018), Ghent, Belgium, 2018, (стендовый доклад).
 - 16) “Oscillations and exact eigenstates of neutrinos in a magnetic field”, 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2018), Ghent, Belgium, 2018, (стендовый доклад).
 - 17) “Neutrino flavour, spin and spin-flavour oscillations and consistent account for a constant magnetic field”, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018), Heidelberg, Germany, 3 - 9 июня 2018 (стендовый доклад).
 - 18) “Neutrino spin and spin-flavour precession in transversally moving or polarized matter and arbitrary constant magnetic field”, 15th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2017), Sudbury, Canada, 24-28 июля 2017 (стендовый доклад).
 - 19) “Neutrino spin precession and oscillations in transversal matter currents”, The European Physical Society Conference on High-Energy physics 2017 (EPS-HEP 2017), Венеция, Италия, 6-12 июля 2017 (стендовый доклад).

Личный вклад автора

Вклад соискателя во всех опубликованных работах был определяющим. Все выносимые на защиту положения получены лично соискателем.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём диссертации составляет 119 страниц, она включает 22 рисунка. Список литературы состоит из 201 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** даётся общая характеристика диссертации и формулируются положения, выносимые на защиту. Приводится список опубликованных по материалам диссертации работ.

В **Главе 1** рассмотрены основные проблемы физики нейтрино.

В **разделе 1.1** изложена теория дираковских и майорановских нейтрино. Рассмотрена теория смешивания и осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе. Рассмотрены эффекты, нарушающие CP-симметрию.

В **разделе 1.2** приведён обзор теории электромагнитных взаимодействий нейтрино. Рассмотрен случай как дираковских, так и майорановских нейтрино. Приведены современные экспериментальные ограничения на величины магнитных моментов нейтрино.

Раздел 1.3 посвящён астрофизическим нейтрино. Рассмотрены основные типы астрофизических нейтрино, детектируемых текущими и будущими экспериментами. Обсуждаются эксперименты по наблюдению нейтрино от взрыва сверхновой SN 1987A. Изложены перспективы детектирования нейтрино от сверхновых в будущих экспериментах. Представлен обзор свойств потока астрофизических нейтрино высоких энергий и экспериментов, целью которых является изучение данного потока.

Раздел 1.4 подводит итоги **Главы 1**.

В **Главе 2** изучены процессы флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле. Результаты главы опубликованы в работах [A1,A4,A6,A7,A8].

В **разделе 2.1** рассмотрено взаимодействие нейтрино с магнитным полем и вычислены вероятности флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле. Рассмотрен случай дираковских нейтрино, обладающих только диагональными магнитными моментами. В этом случае волновые функции массовых состояний нейтрино являются решениями следующего модифицированного уравнения Дирака:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i - \frac{\mu_i}{2} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta})\nu_i(x) = 0, \quad (1)$$

где μ_i - диагональные магнитные моменты нейтрино.

Получено выражения для энергетического спектра нейтрино в магнитном поле

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

где B_\perp обозначает перпендикулярную импульсу нейтрино компоненту магнитного поля, $p = |\mathbf{p}|$, $i = 1,2,3$, а $s = \pm 1$. Данное выражение было получено в работе [45] (см. также [46]), где авторы рассмотрели излучение нейтрино, движущегося во внешнем магнитном поле. Обобщение было получено в [47] для нейтрино во вращающемся магнитном поле. Индекс s нумерует стационарные состояния массивного нейтрино в магнитном поле.

Для классификации состояний нейтрино использован оператор

$$S_i = \frac{m_i}{\sqrt{m_i^2 B^2 + p^2 B_\perp^2}} \left[\boldsymbol{\Sigma} \mathbf{B} - \frac{i}{m_i} \gamma_0 \gamma_5 [\boldsymbol{\Sigma} \times \mathbf{p}] \mathbf{B} \right], \quad (3)$$

который является интегралом движения для случая движения нейтрино в магнитном поле.

Получены выражения для вероятностей флейворных осцилляций в магнитном поле. В случае $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$ они принимают вид

$$P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu_\beta^L}(x) = \cos^2(\mu B_\perp x) \left[\sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2 + 2 \sum_{i>j} A_{ij}^{\alpha\beta} \cos\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 x}{2p}\right) \right], \quad (4)$$

где введены амплитуды осцилляций $A_{ij}^{\alpha\beta} = U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^*$.

Как следует из (4), вероятности флейворных осцилляций нейтрино в магнитном поле являются комбинацией осцилляций на вакуумных частотах $\omega_{ij}^{vac} = \Delta m_{ij}^2/4p$ и магнитных частотах $\omega^B = \mu B_\perp$.

Так как правые нейтрино являются стерильными, мы не можем наблюдать состояния $\nu_{e,\mu,\tau}^R$. Однако, наблюдаемой величиной может быть дефицит активных левых нейтрино. Поэтому представляет интерес величина суммы вероятностей переходов активного левого нейтрино в правые нейтрино разных флейворов $P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu^R} = P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu_e^R} + P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu_\mu^R} + P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu_\tau^R}$, для которой в работе получено выражение

$$P_{\nu_\alpha^L \rightarrow \nu^R}(x) = \sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 \sin^2(\mu_i B_\perp x). \quad (5)$$

Таким образом, суммарная вероятность спиновых осцилляций зависит только от магнитных частот $\omega_i^B = \mu_i B_\perp$, но не от вакуумных частот осцилляций.

В целях более прозрачной интерпретации полученных результатов рассмотрены вероятности осцилляций нейтрино в магнитном поле для случая двух флейворов нейтрино. Для вероятности флейворных осцилляций получено выражение

$$P_{\nu_e^L \rightarrow \nu_\mu^L}(x) = \sin^2 2\theta \left\{ \cos(\mu_1 B_\perp x) \cos(\mu_2 B_\perp x) \sin^2 \frac{\Delta m^2 x}{4p} + \sin^2(\mu_+ B_\perp x) \sin^2(\mu_- B_\perp x) \right\}, \quad (6)$$

где введены обозначения $\mu_\pm = \frac{1}{2}(\mu_1 \pm \mu_2)$. В пределе нулевого магнитного поля и/или нулевых магнитных моментов формула (6) редуцируется к известному выражению для вероятности флейворных осцилляций нейтрино в случае двух флейворов нейтрино.

Для вероятности перехода $\nu_e^L \rightarrow \nu_e^R$ получено выражение

$$P_{\nu_e^L \rightarrow \nu_e^R}(x) = \left\{ \sin(\mu_+ B_\perp x) \cos(\mu_- B_\perp x) + \cos 2\theta \sin(\mu_- B_\perp x) \cos(\mu_+ B_\perp x) \right\}^2 - \sin^2 2\theta \sin(\mu_1 B_\perp x) \sin(\mu_2 B_\perp x) \sin^2 \frac{\Delta m^2 x}{4p}. \quad (7)$$

В этой формуле появились слагаемые, зависящие от частоты вакуумных осцилляций нейтрино $\omega_{vac} = \frac{\Delta m^2}{4p}$, которые отсутствовали в выражениях, полученных для случая одного флейвора в работах [7; 9].

Для вероятности осцилляций $\nu_e^L \rightarrow \nu_\mu^R$ в диссертации получено выражение

$$P_{\nu_e^L \rightarrow \nu_\mu^R}(x) = \sin^2 2\theta \left\{ \sin^2(\mu_- B_\perp x) \cos^2(\mu_+ B_\perp x) + \sin(\mu_1 B_\perp x) \sin(\mu_2 B_\perp x) \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4p} x \right\}. \quad (8)$$

Аналогичная формула была ранее получена в работе [48]. Суммарная вероятность перехода нейтрино ν_e^L в стерильные ν_e^R и ν_μ^R состояния согласно (5) равна

$$P_{\nu_e^L \rightarrow \nu^R}(x) = \cos^2 \theta \sin^2 \mu_1 B x + \sin^2 \theta \sin^2 \mu_2 B x. \quad (9)$$

Отметим, что в проведённом нами исследовании мы одновременно учитываем (в отличие от [48]) возможность переходов $\nu_e^L \rightarrow \nu_e^R$ и $\nu_e^L \rightarrow \nu_\mu^R$.

В разделе 2.2 рассматриваются осцилляции нейтрино в межзвёздном магнитном поле. Известно, что магнитные поля существуют на астрофизических масштабах. Магнитные поля галактик достигают $\sim 10 \div 100$ микрогаусс и наблюдаются на масштабах десятков килопарсек [49]. В галактических кластерах также обнаружены магнитные поля порядка 1 микрогаусс [50].

На Рисунке 1 приведена зависимость вероятности осцилляций нейтрино с энергией 10^{19} эВ в галактическом магнитном поле в случае магнитных моментов нейтрино $\mu_1 = 10^{-12} \mu_B$, $\mu_2 = 2 \times 10^{-12} \mu_B$ и $\mu_3 = 2 \times 10^{-12} \mu_B$. Указанная энергия выбрана для иллюстративных целей и соответствует нейтрино сверхвысоких энергий, которые не обнаружены на данный момент, но являются предметом поисков будущих нейтринных экспериментов. Видно, что флейворные осцилляции на вакуумных частотах $\omega_{ij}^{vac} = \Delta m_{ij}^2 / 2p$ модулируются осцилляциями на магнитных частотах $\omega_i^B = \mu_i B_\perp$ в соответствии с формулой (4).

На Рисунке 2 показана вероятность спиновых осцилляций нейтрино в галактическом магнитном поле. Рассмотрены случаи $\mu_2 / \mu_1 = 1$ и $\mu_2 / \mu_1 = 2$ при фиксированной величине $\mu_1 = 10^{-12} \mu_B$. Величина магнитного момента μ_3 в данном случае не важна, так как в соответствии с формулой (5) слагаемое с μ_3 подавлено малым множителем $|U_{e3}|^2 \approx 0.02$.

В разделе 2.3 обсуждаются полученные в Главе 2 результаты.

В Главе 3 исследовано влияние ненулевых дираковских и майорановских CP-нарушающих фаз на осцилляции нейтрино в магнитном поле сверхновой. Результаты данной главы опубликованы в работах [A2, A5]. Рассматривается случай как дираковских, так и майорановских нейтрино.

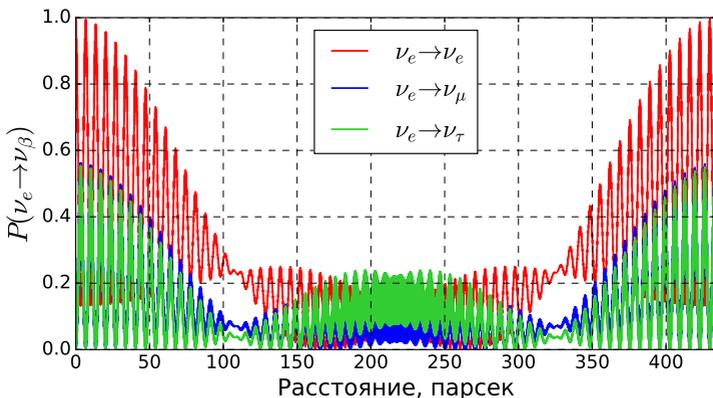


Рис. 1 — Вероятности флейворных осцилляций нейтрино в галактическом магнитном поле. Случай $\mu_1 = 10^{-12} \mu_B$, $\mu_2 = 2 \times 10^{-12} \mu_B$ и $\mu_3 = 2 \times 10^{-12} \mu_B$.

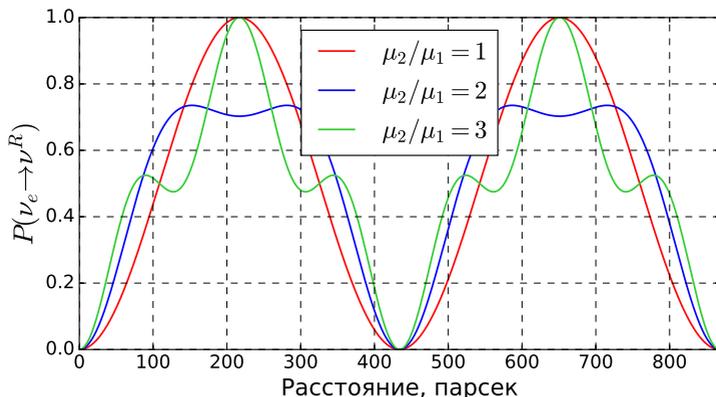


Рис. 2 — Вероятности спиновых осцилляций нейтрино в галактическом магнитном поле.

Показано, что для случая майорановских нейтрино в присутствии сильных магнитных полей и плотной материи, ненулевые СР-нарушающие фазы могут индуцировать новые резонансы, в частности в канале осцилляций $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$. Также рассмотрены другие возможные каналы осцилляций. Наличие данных резонансов может привести к новым явлениям в осцилляциях нейтрино, доступным для наблюдения в экспериментах. В частности, мы

показываем, что осцилляции нейтрино-антинейтрино в сочетании с майорановским CP-нарушением могут повлиять на соотношение $\bar{\nu}_e/\nu_e$ для нейтринных потоков, исходящих от взрыва сверхновой. Таким образом, изучение потоков нейтрино от сверхновых в будущих экспериментах, таких как JUNO, DUNE и Hyper-Kamiokande, может дать представление о природе CP-нарушения и природе массы нейтрино.

В разделе 3.1 рассмотрено взаимодействие дираковских и майорановских нейтрино с магнитным полем и веществом.

Взаимодействие дираковских нейтрино с магнитным полем описывается лагранжианами

$$\mathcal{L}_{mag}^D = \sum_{i,k} \frac{\mu_{ik}}{2} \left[\overline{\nu_i^R} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \nu_k^L + \overline{\nu_i^L} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \nu_k^R \right] \quad (10)$$

$$= \sum_{\alpha,\beta} \frac{\mu_{\alpha\beta}}{2} \left[\overline{\nu_\alpha^R} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \nu_\beta^L + \overline{\nu_\alpha^L} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \nu_\beta^R \right]. \quad (11)$$

В случае дираковских нейтрино взаимодействие с магнитным полем вызывает спиновую прецессию, которая изучалась ранее в Главе 2. В случае майорановских нейтрино взаимодействие с магнитным полем описывается лагранжианом следующего вида

$$\mathcal{L}_{mag}^M = \sum_{i,k} \frac{\mu_{ik}}{2} \left[(\nu_i^L)^c \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \nu_k^L + \overline{\nu_i^L} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} (\nu_k^L)^c \right] \quad (12)$$

$$= \sum_{\alpha,\beta} \frac{\mu_{\alpha\beta}}{2} \left[(\nu_\alpha^L)^c \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \nu_\beta^L + \overline{\nu_\alpha^L} \sigma_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} (\nu_\beta^L)^c \right]. \quad (13)$$

Из формы лагранжиана ясно, что взаимодействие с магнитным полем может индуцировать осцилляции нейтрино-антинейтрино $\nu_\alpha \leftrightarrow \bar{\nu}_\beta$.

Матрицы магнитных моментов дираковских и майорановских нейтрино можно параметризовать следующим образом

$$\mu^D = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{12} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{13} & \mu_{23} & \mu_{33} \end{pmatrix}, \quad \mu^M = \begin{pmatrix} 0 & i\mu_{12} & i\mu_{13} \\ -i\mu_{12} & 0 & i\mu_{23} \\ -i\mu_{13} & -i\mu_{23} & 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Взаимодействие дираковских и майорановских нейтрино с веществом описывается лагранжианами

$$\mathcal{L}_{mat}^M = - \sum_{\alpha} \frac{V_{\alpha}^{(f)}}{2} \left[\overline{\nu_{\alpha}^L} \gamma_0 \nu_{\alpha}^L - \overline{(\nu_{\alpha}^L)^c} \gamma_0 (\nu_{\alpha}^L)^c \right], \quad (15)$$

$$\mathcal{L}_{mat}^D = - \sum_{\alpha} \frac{V_{\alpha}^{(f)}}{2} \overline{\nu_{\alpha}^L} \gamma_0 \nu_{\alpha}^L, \quad (16)$$

где

$$V(f) = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \text{diag}(n_n - 2n_e, n_n, n_n) \quad (17)$$

есть потенциал Вольфенштейна, которой описывает взаимодействие нейтрино с электрически нейтральной неподвижной материей, состоящей из электронов, протонов и нейтронов.

Раздел 3.2 посвящён изложению развитого в диссертации формализма для вычисления вероятностей осцилляций дираковских и майорановских нейтрино в магнитном поле и веществе.

В **разделе 3.3** изучается возможность возникновения резонансного усиления осцилляций нейтрино в магнитном поле. Впервые рассмотрены осцилляции нейтрино в магнитном поле в случае ненулевых майорановских CP-нарушающих фаз. Показано, что для случая майорановских нейтрино при ненулевых значениях майорановских CP-нарушающих фаз может возникать новых резонанс в канале осцилляций $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$. Данный резонанс возникает при значении доли электронов в среде сверхновой $Y_e = 0.5$.

На **Рисунке 3** показаны амплитуды осцилляций нейтрино-антинейтрино в сверхновой для различных значений майорановских CP-нарушающих фаз α_1 и α_2 . На **Рисунке 3 (а)** показаны амплитуды осцилляций для случая $\alpha_1 = \pi$ и $\alpha_2 = 0$. В данном случае при $Y_e = 0.5$ возникает резонансное усиление осцилляций $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$, в то время как осцилляции $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ подавлены. На **Рисунке 3 (б)** показан случай $\alpha_1 = \frac{2}{3}\pi$ и $\alpha_2 = \frac{2}{3}\pi$, осцилляции возникают одновременно в двух каналах $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ и $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$.

Таким образом, при определённых значениях майорановских CP-нарушающих фаз может возникать новый резонанс в осцилляциях нейтрино-антинейтрино в среде, характерной для взрывов сверхновых.

На **Рисунке 4** показана зависимость амплитуды осцилляций $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ (слева) и $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ (справа) при $Y_e = 0.5$ как функции двух майорановских CP-нарушающих фаз α_1 и α_2 . Красной области на графиках соответствуют значения фаз, при которых амплитуда осцилляций близка к единице, а синей - значения, при которых она близка к нулю. Видно, что амплитуды осцилляций $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ максимальны в случае, когда значения обеих майорановских CP-нарушающих фаз близки к 0 или 2π . Максимальные значения амплитуды переходов $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ наблюдаются в случае $\alpha_1 \approx \pi$. Суммарная же амплитуда осцилляций $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ и $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ близка к единице. Таким образом, при $Y_e = 0.5$ для любых значений майорановских CP-нарушающих фаз наблюдаются переходы электронных нейтрино либо в мюонные антинейтрино, либо в тау антинейтрино.

Раздел 3.4 посвящён обсуждению возможности реализации резонансного условия для осцилляций нейтрино в магнитном поле при взрыве сверхновой. Рассматривается возможность наблюдения изученных в главе эффектов в будущих нейтринных экспериментах JUNO, Hyper-Kamiokande и DUNE.

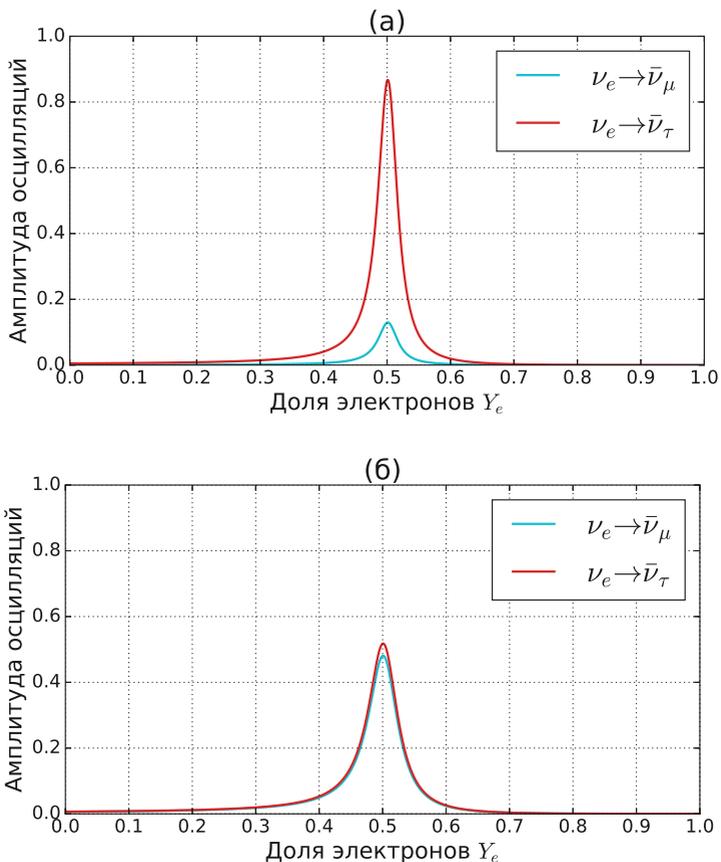


Рис. 3 — Зависимость амплитуд осцилляций нейтрино-антинейтрино от доли электронов Y_e для различных значений CP-нарушающих фаз. а) случай $\delta = 0$, $\alpha_1 = \pi$, $\alpha_2 = 0$; б) случай $\delta = 0$, $\alpha_1 = \frac{2}{3}\pi$, $\alpha_2 = \frac{2}{3}\pi$.

В разделе 3.5 подводятся итоги Главы 3.

В Главе 4 для описания осцилляций нейтрино в магнитном поле развит новый формализм, предполагающий использование волновых пакетов, что позволило описать декогеренцию нейтринных осцилляций. Для случая дираковских нейтрино без переходных магнитных моментов получены аналитические выражения для вероятностей осцилляций в магнитном поле. Показано, что длины когерентности для осцилляций на магнитных частотах $\omega_i^B = \mu_i B_\perp$ пропорциональны кубу энергии нейтрино $\sim E_\nu^3$, в то время как длины когерентности для осцилляций на вакуумных частотах

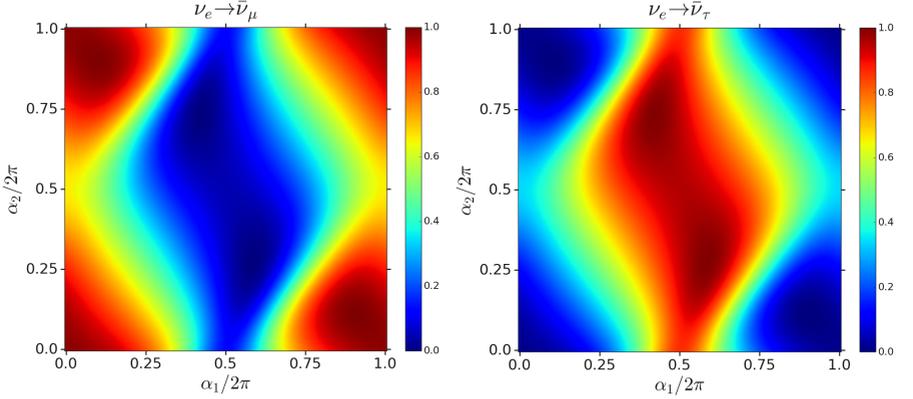


Рис. 4 — Зависимость амплитуд резонансных осцилляций нейтрино-анти-нейтрино при $Y_e = 0.5$ от майорановских CP-нарушающих фаз α_1 и α_2 (левый график - для осцилляции $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$, правый график - для $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$).

$\omega_{ik}^{vac} = \Delta m_{ik}^2/4p$ пропорциональны квадрату энергии $\sim E_\nu^2$. Результаты главы опубликованы в работе [A3].

В разделе 4.1 изложен формализм для описания осцилляций нейтрино в магнитном поле с использованием волновых пакетов.

Вычислены групповые скорости волновых пакетов нейтрино

$$v_i^s(p_0) = \left. \frac{\partial E_i^s(p)}{\partial p} \right|_{p=p_0} = \frac{p_0}{E_i^s(p_0)} \left(1 + \frac{s\mu_i B_\perp}{\sqrt{m_i^2 B_\perp^2 + p_0^2 B_\perp^2}} \right), \quad (18)$$

где p_0 - средний импульс нейтрино, а $E_i^s(p_0)$ задано формулой (2).

Получены выражения для вероятностей флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле с учётом затухания за счёт расхождения волновых пакетов

$$P_{\nu_\alpha^h \rightarrow \nu_\beta^{h'}}(L) = \sum_{i,j} \sum_{s,\sigma} U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* C_{is}^{hh'} C_{j\sigma}^{hh'} \exp\left(-i2\pi \frac{L}{L_{osc}^{ijs\sigma}}\right) \exp\left(-\frac{L^2}{(L_{coh}^{ijs\sigma})^2}\right), \quad (19)$$

где введены длины осцилляций

$$L_{osc}^{ijs\sigma} = \frac{\pi}{\omega_{ij}^{s\sigma}} \quad (20)$$

и так называемые длины когерентности

$$L_{coh}^{ijs\sigma} = \frac{2\sqrt{2}\sigma_x}{v_i^s - v_j^\sigma}. \quad (21)$$

Коэффициенты $C_{is}^{hh'}$ задаются выражениями

$$C_{is}^{LL} \approx \frac{1}{2}, \quad C_{is}^{RL} \approx -\frac{s}{2}. \quad (22)$$

Длины когерентности (21) описывают характерный масштаб, на котором в соответствии с формулой (19) проявляется затухание осцилляций нейтрино.

Получены приближенные выражения для длин когерентности при выполнении условий $p \gg m_i \gg \mu_i B$

$$L_{coh}^{ijss} \sim \frac{4\sqrt{2}\sigma_x p^2}{\Delta m_{ij}^2}, \quad (23)$$

$$L_{coh}^{ii-+} \sim \frac{\sigma_x p^3}{\mu_i B m_i^2}, \quad (24)$$

$$L_{coh}^{ij-+} \sim L_{coh}^{ijss}. \quad (25)$$

Длина когерентности L_{coh}^{ijss} описывает затухание осцилляций на вакуумных частотах $w_{ij}^{vac} = \Delta m_{ij}^2/4p$ и совпадает с длиной когерентности для вакуумных осцилляций, описанной ранее в литературе. С ростом энергии нейтрино она растёт как квадрат энергии E_ν^2 . Длины когерентности L_{coh}^{ii-+} и L_{coh}^{ij-+} описывают затухание осцилляций на частотах $\omega_i^B = \mu_i B$. В отличие от длин когерентности осцилляций на вакуумных частотах w_{ij}^{vac} , они пропорциональны кубу энергии нейтрино E_ν^3 . Следовательно, мы предсказываем, что для достаточно высоких энергий нейтрино осцилляции на магнитных частотах ω_i^B будут затухать медленнее осцилляций на вакуумных частотах w_{ij}^{vac} .

В разделе 4.2 рассмотрены осцилляции нейтрино высоких энергий в магнитном поле Галактики. Изучено влияние магнитного поля на флейворный состав потока нейтрино, регистрируемых наземными детекторами. В качестве примера источника нейтрино рассмотрен центр Галактики.

На Рисунке 5 показаны возможные флейворные составы нейтрино высоких энергий в наземном детекторе после распространения в галактическом магнитном поле. Предполагается, что нейтрино рождены в распаде пиона, то есть начальный флейворный состав задаётся соотношением $r^0 = (1/3, 2/3, 0)$. Как видно из Рисунка 5, при наличии взаимодействия с магнитным полем флейворный состав нейтрино в детекторе действительно может существенно отличаться от предсказаний для случая вакуумных флейворных осцилляций. В случае, когда центр Галактики является источником нейтрино, эффекты взаимодействия с магнитным полем начинают наблюдаться при магнитных моментах нейтрино порядка $\mu_\nu \sim 10^{-13} \mu_B$.

Завершает главу **раздел 4.3**, в котором подведены итоги **Главы 4**.

В **Заключении** подведены итоги исследований, изложенных в диссертационной работе.

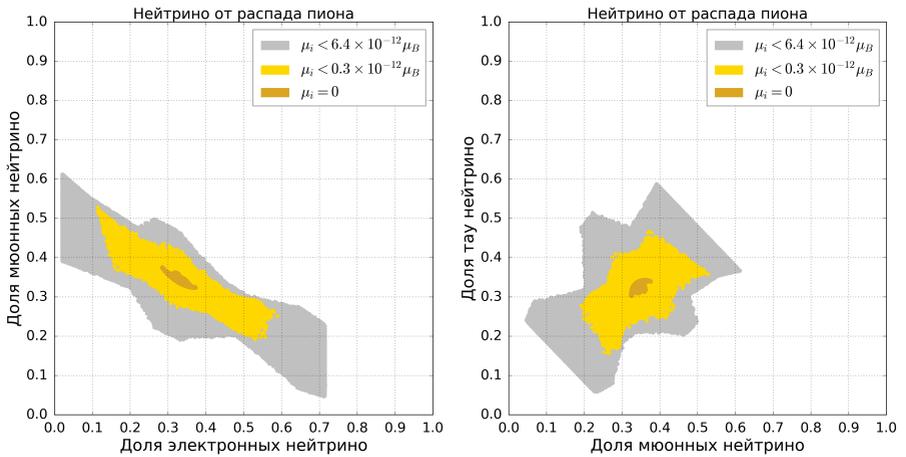


Рис. 5 — Флейворные составы нейтрино в случае осцилляций в магнитном поле.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На защиту выносятся следующие результаты, полученные в диссертации:

- 1) разработан новый подход для описания флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле и веществе, основанный на использовании спинового оператора, который является интегралом движения для нейтрино в магнитном поле; предложенный подход позволяет описать эволюцию потоков нейтрино в произвольных астрофизических средах;
- 2) получены с использованием разработанного нового подхода явные выражения для вероятностей флейворных и спиновых осцилляций дираковских нейтрино в магнитном поле;
- 3) получено численное решение уравнения для эволюции майорановского нейтрино в магнитном поле и веществе сверхновой; показано, что взаимодействие нейтрино с магнитным полем может приводить к наблюдаемому в экспериментах изменению состава потока нейтрино от сверхновой;
- 4) получены новые выражения для вероятностей осцилляций нейтрино в магнитном поле с учётом расхождения волновых пакетов; показано, что в отличие от осцилляций на вакуумных частотах, осцилляции на магнитных частотах не затухают даже на космологических масштабах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Результаты диссертации опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, RSCI.

[A1] A.Popov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field // The European Physical Journal C. – 2019. – Vol.79 – 144.

[A2] A.Popov, A.Studenikin. Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos // Physical Review D. – 2021. – Vol.103 – 115027.

[A3] Попов А.Р., Студеникин А.И. Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2024. – Том 2 – 2420101.

[A4] A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field // Proceeding of Science. - 2022. – Vol. 398 – 197.

[A5] A.Popov, A.Studenikin. Effects of nonzero Majorana CP phases on oscillations of supernova neutrinos // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. – Vol. 2156 – 012226.

[A6] A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case // Proceeding of Science. - 2021. – Vol. 390 – 208.

[A7] A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and oscillations in a magnetic field // Proceeding of Science. - 2021. – Vol. 364 – 415.

[A8] A.Popov, A.Studenikin. Oscillations and exact states of neutrinos in a magnetic field // Proceeding of Science. - 2019. – Vol. 340 – 926.

[A9] A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino motion and spin oscillations in magnetic field and matter currents // Proceeding of Science. - 2018. – Vol. 314 – 643.

[A10] A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino spin precession and oscillations in transversal matter currents // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. – Vol. 1342 – 012126.

Литература

1. *Giunti C., Studenikin A.* Neutrino electromagnetic interactions: a window to new physics // *Rev. Mod. Phys.* — 2015. — Vol. 87. — P. 531.
2. *Beda A. et al.* The results of search for the neutrino magnetic moment in GEMMA experiment // *Adv. High Energy Phys.* — 2012. — Vol. 2012. — P. 350150.
3. *Agostini M. et al.* Limiting neutrino magnetic moments with Borexino Phase-II solar neutrino data // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 96, no. 9. — P. 091103.
4. *Aprile E. et al.* Search for new physics in electronic recoil data from XENONnT // *Phys. Rev. Lett.* — 2022. — Vol. 129, no. 16. — P. 161805.
5. *Studenikin A. et al.* Potentialities of a low-energy detector based on ^4He evaporation to observe atomic effects in coherent neutrino scattering and physics perspectives // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Vol. 100, no. 7. — P. 073014.
6. *Kouzakov K., Studenikin A.* Electromagnetic properties of massive neutrinos in low-energy elastic neutrino-electron scattering // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 95, no. 5. — P. 055013. — [Erratum: *Phys.Rev.D* 96, 099904 (2017)].
7. *Fujikawa K., Shrock R.* The magnetic moment of a massive neutrino and neutrino spin rotation // *Phys. Rev. Lett.* — 1980. — Vol. 45. — P. 963.
8. *Shrock R.* Electromagnetic properties and decays of dirac and majorana neutrinos in a general class of gauge theories // *Nucl. Phys. B.* — 1982. — Vol. 206. — Pp. 359–379.
9. *Cisneros A.* Effect of neutrino magnetic moment on solar neutrino observations // *Astrophys. Space Sci.* — 1971. — Vol. 10. — Pp. 87–92.
10. *Schechter J., Valle J.* Majorana neutrinos and magnetic fields // *Phys. Rev. D.* — 1981. — Vol. 24. — Pp. 1883–1889. — [Erratum: *Phys.Rev.D* 25, 283 (1982)].
11. *Okun L., Voloshin M., Vysotsky M.* Neutrino electrodynamics and possible effects for solar neutrinos // *Sov. Phys. JETP.* — 1986. — Vol. 64. — Pp. 446–452.
12. *Voloshin M.* Resonant helicity flip of ν_e due to magnetic moment and dynamics of supernova // *Phys. Lett. B.* — 1988. — Vol. 209. — Pp. 360–364.

13. *Akhmedov E.* Resonant amplification of neutrino spin rotation in matter and the solar neutrino problem // *Phys. Lett. B.* — 1988. — Vol. 213. — Pp. 64–68.
14. *Lim C.-S., Marciano W.* Resonant spin - flavor precession of solar and supernova neutrinos // *Phys. Rev. D.* — 1988. — Vol. 37. — Pp. 1368–1373.
15. *Studenikin A.* Neutrinos in electromagnetic fields and moving media // *Phys. Atom. Nucl.* — 2004. — Vol. 67. — Pp. 993–1002.
16. *Pustoshny P., Studenikin A.* Neutrino spin and spin-flavour oscillations in transversal matter currents with standard and non-standard interactions // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 98, no. 11. — P. 113009.
17. *Balantekin B., Gava J., Volpe C.* Possible CP-Violation effects in core-collapse Supernovae // *Phys. Lett. B.* — 2008. — Vol. 662. — Pp. 396–404.
18. *Gava J., Volpe C.* Collective neutrinos oscillation in matter and CP-violation // *Phys. Rev. D.* — 2008. — Vol. 78. — P. 083007.
19. *Chukhnova A., Lobanov A.* Stationary and non-stationary solutions of the evolution equation for neutrino in matter // *EPJ Web Conf.* — 2018. — Vol. 191. — P. 03002.
20. *Chukhnova A., Lobanov A.* Neutrino flavor oscillations and spin rotation in matter and electromagnetic field // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Vol. 101, no. 1. — P. 013003.
21. *Chukhnova A., Lobanov A.* Resonance enhancement of neutrino oscillations due to transition magnetic moments // *Eur. Phys. J. C.* — 2021. — Vol. 81, no. 9. — P. 821.
22. *Egorov V., Volobuev I.* Quantum field-theoretical description of neutrino oscillations in a magnetic field and the Solar neutrino problem // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2022. — Vol. 135, no. 2. — Pp. 197–208.
23. *Dvornikov M.* Canonical quantization of a massive Weyl field // *Found. Phys.* — 2012. — Vol. 42. — Pp. 1469–1479.
24. *Dvornikov M.* Evolution of a dense neutrino gas in matter and electromagnetic field // *Nucl. Phys. B.* — 2012. — Vol. 855. — Pp. 760–773.
25. *Dvornikov M.* Massive majorana neutrinos in matter and a magnetic field. — 2011. — 10.
26. *Лухачёв Г., Студеникин А.* Осцилляции нейтрино в магнитном поле Солнца, сверхновых и нейтронных звезд // *ЖЭТФ.* — 1995. — Vol. 108. — P. 769.

27. *Ahrliche A., Mimouni J.* Supernova neutrino spectrum with matter and spin flavor precession effects // *JCAP*. — 2003. — Vol. 11. — P. 004.
28. *Grigoriev A., Kupcheva E., Ternov A.* Neutrino spin oscillations in polarized matter // *Phys. Lett. B*. — 2019. — Vol. 797. — P. 134861.
29. *Grigoriev A., Ternov A., Trunina E.* Matter polarization effect on neutrino spin oscillations // *PoS*. — 2022. — Vol. ICHEP2022. — P. 1153.
30. *Ternov A.* Matter-induced magnetic moment and neutrino helicity rotation in external fields // *Phys. Rev. D*. — 2016. — Vol. 94, no. 9. — P. 093008.
31. *Duan H., Fuller G., Qian Y.-Z.* Collective Neutrino Oscillations // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* — 2010. — Vol. 60. — Pp. 569–594.
32. *Abbar S.* Collective oscillations of Majorana neutrinos in strong magnetic fields and self-induced flavor equilibrium // *Phys. Rev. D*. — 2020. — Vol. 101, no. 10. — P. 103032.
33. *Kharlanov O., Shustov P.* Effects of nonstandard neutrino self-interactions and magnetic moment on collective Majorana neutrino oscillations // *Phys. Rev. D*. — 2021. — Vol. 103, no. 9. — P. 095004.
34. *Nussinov S.* Solar neutrinos and neutrino mixing // *Phys. Lett. B*. — 1976. — Vol. 63. — Pp. 201–203.
35. *Kiers K., Nussinov S., Weiss N.* Coherence effects in neutrino oscillations // *Phys. Rev. D*. — 1996. — Vol. 53. — Pp. 537–547.
36. *Kayser B.* On the quantum mechanics of neutrino oscillation // *Phys. Rev. D*. — 1981. — Vol. 24. — P. 110.
37. *Naumov D., Naumov V.* Relativistic wave packets in a field theoretical approach to neutrino oscillations // *Russ. Phys. J.* — 2010. — Vol. 53. — Pp. 549–574.
38. *Naumov D., Naumov V.* A Diagrammatic treatment of neutrino oscillations // *J. Phys. G*. — 2010. — Vol. 37. — P. 105014.
39. *Naumov D.* On the theory of wave packets // *Phys. Part. Nucl. Lett.* — 2013. — Vol. 10. — Pp. 642–650.
40. *Наумов Д., Наумов В.* Квантово-полевая теория нейтринных осцилляций // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2020. — Vol. 51, no. 1. — Pp. 5–209.
41. *Egorov V., Volobuev I.* Coherence length of neutrino oscillations in a quantum field-theoretical approach // *Phys. Rev. D*. — 2019. — Vol. 3. — P. 033004.

42. *Peltoniemi J., Sipilainen V.* Neutrino propagation in matter using the wave packet approach // *JHEP*. — 2000. — Vol. 06. — P. 011.
43. *Kersten J., Smirnov A.* Decoherence and oscillations of supernova neutrinos // *Eur. Phys. J. C*. — 2016. — Vol. 76, no. 6. — P. 339.
44. *Akhmedov E., Kopp J., Lindner M.* Collective neutrino oscillations and neutrino wave packets // *JCAP*. — 2017. — Vol. 09. — P. 017.
45. *Ternov I., Bagrov V., Khapaev A.* Electromagnetic radiation from a neutron in an external magnetic field // *Soviet Physics JETP*. — 1965. — Vol. 21, no. 3.
46. *Тернов А.* Основы релятивистской квантовой механики. — М. : МЦМО. - 2024.
47. *Dmitriev A., Fabricatore R., Studenikin A.* Neutrino electromagnetic properties: new approach to oscillations in magnetic fields // *PoS*. — 2015. — Vol. CORFU2014. — P. 050.
48. *Dvornikov M., Maalampi J.* Evolution of mixed Dirac particles interacting with an external magnetic field // *Phys. Lett. B*. — 2007. — Vol. 657. — Pp. 217–227.
49. *Beck R.* Galactic and extragalactic magnetic fields // *AIP Conf. Proc.* — 2009. — Vol. 1085, no. 1. — Pp. 83–96.
50. *Govoni F., Feretti L.* Magnetic field in clusters of galaxies // *Int. J. Mod. Phys. D*. — 2004. — Vol. 13. — Pp. 1549–1594.

Попов Артем Романович

Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных полях и средах

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____