

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Чухнова Александра Владимировна

**Квантовополевое описание влияния вещества и
электромагнитного поля на распространение
нейтрино**

Специальность 1.3.3. - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА — 2023

Диссертация подготовлена на кафедре теоретической физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** — **Лобанов Андрей Евгеньевич**
доктор физико-математических наук
- Официальные оппоненты** — **Волобуев Игорь Павлович**
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ «МГУ имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Отдел теоретической физики высоких энергий, ведущий научный сотрудник
- Кзаков Дмитрий Игоревич**
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор,
Объединенный Институт Ядерных Исследований, директор Лаборатории теоретической физики имени Н.Н.Боголюбова
- Нугаев Эмин Яткярович**
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН Институт Ядерных Исследований РАН, отдел теоретической физики, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «20» апреля 2023 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 2, физический факультет, физическая аудитория им. Р.В.Хохлова

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/011.2/2449>

Автореферат разослан «_____» марта 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук
профессор

П. А. Поляков

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы исследования

Описание осцилляций нейтрино на данный момент является одной из важнейших проблем теоретической физики. Феноменологическая теория, основанная на идеях Б. Понтекорво, хорошо описывает экспериментальные данные, которые получены на данный момент только для ультрарелятивистских нейтрино. Тем не менее, эта теория противоречит основным принципам квантовой теории поля, поскольку предполагает запись волновой функции флейворного нейтрино как суперпозиции волновых функций состояний с различными массами, что невозможно обеспечить, если считать, что частица описывается неприводимым представлением группы Пуанкаре. Математически корректное квантовополевое описание распространения нейтрино в вакууме на основе представления расширенной группы симметрии, устроенной как прямое произведение группы Пуанкаре и группы $SU(3)$, было предложено в работах [7, 8]. В рамках этой модели в работе [9] было учтено взаимодействие с движущейся поляризованной средой. В работах автора диссертации [1–6] впервые исследованы основные закономерности распространения нейтрино в веществе и электромагнитном поле на основе математически непротиворечивой квантовополевой модели.

Цели и задачи исследования

Целью диссертации является исследование влияния вещества и электромагнитного поля на распространение нейтрино в рамках квантовополевого подхода.

Научная новизна

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и не имеют аналогов в научной литературе.

Объект исследования

В рамках данного исследования рассматривается эволюция нейтрино в плотной среде и электромагнитном поле в рамках квантовополевого подхода.

Методы исследования

Исследование проводится на основе обобщения Стандартной модели, предложенного в работах [7, 8]. В диссертации волновое уравнение для нейтрино в среде обобщается на случай одновременного взаимодействия с веществом и электромагнитным полем. Так как в настоящее время экспериментально наблюдаются только нейтрино ультрарелятивистских энергий, для исследования основных закономерностей поведения нейтрино выводится и используется квазиклассический предел этого уравнения. Поскольку в общем случае для записи аналитического решения квазиклассического уравнения эволюции даже в случае постоянных внешних условий требуется решить алгебраическое уравнение высокой степени, в диссертации в явном виде вычисляются вероятности спин-флейворных переходов нейтрино в различных частных случаях. Случай распространения нейтрино в неоднородном электромагнитном поле исследуется в рамках адиабатического приближения. Все формулы получены аналитически. Выводы делаются на основе этих формул.

Положения, выносимые на защиту

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Получено квазиклассическое уравнение эволюции нейтрино, позволяющее описать как флейворные осцилляции, так и поворот спина нейтрино в веществе и электромагнитном поле.
2. Обнаружены корреляции между поворотом спина и осцилляциями нейтрино в плотной среде в модели двух флейворов. Выявлена зависимость вероятностей спин-флейворных переходов от начального

флейвора нейтрино.

3. Исследовано распространение нейтрино в однородном электромагнитном поле в приближении двух флейворов с учетом переходных магнитных моментов. Выявлена зависимость вероятностей спин-флейворных переходов в электромагнитном поле от начального флейвора нейтрино.
4. Рассмотрено распространение нейтрино в переменном электромагнитном поле в адиабатическом приближении. Показано, что поведение вероятностей спин-флейворных переходов для нейтрино в электромагнитном поле при учете переходных магнитных моментов может носить резонансный характер, причем наличие и выраженность резонанса в электромагнитном поле зависят от начальной поляризации нейтрино.
5. Найдено, что при учете взаимодействия нейтрино одновременно как с плотной средой, так и с электромагнитным полем, вероятности содержат нарушающие T -инвариантность вклады, которые отличны от нуля даже в случае вещественной матрицы смешивания и являются следствием влияния внешних условий. Показано, что в присутствии электромагнитного поля поведение левого нейтрино в среде из частиц и правого антинейтрино в среде из античастиц различно.

Теоретическая и практическая значимость

Основная теоретическая значимость заключается в том, что построен способ описания ультрарелятивистских нейтрино, взаимодействующих с веществом и электромагнитным полем, обоснованный в рамках квантовой теории поля. Предложенный подход позволяет воспроизвести основные результаты феноменологической теории осцилляций, однако также позволяет описать и неизвестные ранее эффекты, что и сделано в диссертации.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность результатов подтверждается согласием частных случаев полученных формул с результатами феноменологического подхода. В частности, при изучении резонанса в электромагнитном поле получены выражения, похожие по форме на выражения для резонанса Михеева–Смирнова–Вольфенштейна. Выражения для вероятности поворота спина в поле дипольного поля согласуются с вероятностью поворота спина массивной частицы в поле дипольного типа, если положить массы различных состояний нейтрино равными. Все вероятности, полученные в диссертации, сводятся к вероятностям осцилляций в вакууме, если положить характеристики внешних условий равными нулю.

Личный вклад соискателя

Основные идеи и положения диссертации изложены в работах [1–6]. Вклад автора в указанные работы является определяющим.

Апробация результатов

По результатам, изложенным в диссертации, были сделаны следующие доклады на всероссийских и международных конференциях и семинарах:

1. Лобанов А. Е., Чухнова А. В. «Осцилляции нейтрино в однородной движущейся среде». Ломоносовские чтения – 2017, Москва, Россия, 17–26 апреля 2017.
2. Лобанов А. Е., Чухнова А. В. «Волновые функции нейтрино в веществе». Ломоносовские чтения — 2018, Москва, Россия, 16–25 апреля 2018.
3. Chukhnova A. V., Lobanov A. E. «Stationary and non-stationary solutions of the evolution equation for neutrino in matter». 20th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2018, Валдай, Россия, 27 мая – 2 июня 2018.

4. Chukhnova A. V., Lobanov A. E. «Quantum-field theoretical description of neutrino propagation in dense matter and electromagnetic field». 19-я ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, Москва, Россия, 22–28 августа 2019.
5. Chukhnova A. V., Lobanov A. E. «Neutrino evolution in dense matter and electromagnetic field». The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory QFTHEP-2019, 22–29 сентября 2019.
6. Чухнова А. В. «Влияние движущейся среды и электромагнитного поля на осцилляции нейтрино». Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020», 10–27 ноября 2020.
7. Chukhnova A. V., Lobanov A. E. «T-violation in neutrino spin-flavor transition probabilities in the two-flavor model» (стендовый). XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Virtual Seoul, Korea, 30 мая — 4 июня 2022.
8. Лобанов А. Е., Чухнова А. В. "Нарушение T-инвариантности в осцилляциях нейтрино в плотной среде и электромагнитном поле". International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, Дубна, Россия, 17–22 июля 2022.
9. Chukhnova A. V. «T-violation in neutrino spin-flavor transition probabilities in the case of real mixing matrix» (стендовый). Мемориальная конференция памяти академика А.А. Славнова, Москва, Россия, 21 — 22 декабря 2022.

Доклады 1–7, 9 были сделаны автором лично.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Полный объем диссертации 126 страниц, число рисунков 12, список литературы включает 139 ссылок.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** дан краткий обзор истории исследования вопроса и приводится общая характеристика диссертационной работы. В частности, дается обоснование актуальности темы исследования, описываются его цели и задачи, используемые методы, формулируются положения, выносимые на защиту, обсуждается научная новизна, достоверность, теоретическая значимость результатов работы, а также личный вклад автора в их получение. Также во **Введении** описывается структура диссертации.

В **Главе 1** даны основы используемой модели и показана возможность построения пространства Фока для нейтрино с определенным флейвором, а также в соответствии с работой [9] приведен квантовополевой вывод уравнения, которое описывает нейтрино в плотной среде. Далее излагаются результаты, полученные автором диссертации. С учетом результатов работы [9] и работ К. Фуджикавы и Р. Широка [10, 11], в которых исследовалось взаимодействие нейтрино с электромагнитным полем, в работе [2] получено волновое уравнение в случае одновременного взаимодействия нейтрино как с веществом, так и с электромагнитным полем. Так как все экспериментальные результаты в настоящее время удается получить только для нейтрино ультрарелятивистских энергий, именно этот случай заслуживает особого внимания. Для описания ультрарелятивистских нейтрино в конце **Главы 1** выведено уравнение эволюции нейтрино в квазиклассическом приближении [1, 2], описывающее как осцилляции, так и поворот спина нейтрино в веществе и электромагнитном поле. На основе этого уравнения в последующих главах получены аналитические выражения для вероятностей спин-флейворных переходов в различных случаях.

В **Главе 2** исследуется распространение нейтрино в среде. Как в большинстве работ, посвященных данному вопросу, исследование производится в модели двух флейворов. Принципиальное отличие используемого подхода от феноменологической теории состоит в том, что наряду с флейворными осцилляциями в нашей модели автоматически учитывается явление поворота спина нейтрино. В соответствии с результатами наших работ [1, 2]

в **Главе 2** исследованы корреляции между флейворными осцилляциями и поворотом спина нейтрино в веществе. Показано, что в случае движущейся или поляризованной среды эти процессы нельзя рассматривать независимо. Более того, из явного вида выражений для вероятностей следует, что вероятности переходов существенно зависят от начального флейвора нейтрино.

В **Главе 3** исследуется распространение нейтрино в электромагнитном поле. В соответствии с [2] в модели двух флейворов показывается необходимость введения эффективного угла смешивания для нейтрино в случае, если учитываются не только диагональные, но и переходные магнитные моменты нейтрино. При этом в общем случае требуется вводить два угла смешивания — по одному на каждое из собственных состояний спинового интеграла движения нейтрино. Важно отметить, что выражение для косинуса одного из этих углов содержит в знаменателе величину, имеющую минимум при определенном значении энергии нейтрино и напряженности внешнего поля, что указывает на возможность резонансного поведения вероятностей спин-флейворных переходов в электромагнитном поле, напоминающего резонанс Михеева–Смирнова–Вольфенштейна в веществе.

Вообще говоря, наличие резонансного знаменателя у косинуса эффективного угла смешивания не обязательно должно приводить к резонансному поведению вероятностей переходов. Поэтому в **Главе 4** детально исследуется случай неоднородного электромагнитного поля. В этой главе, в соответствии с работой [4] получено условие адиабатичности, которое позволяет по аналогии с эффектом Михеева–Смирнова–Вольфенштейна исследовать поведение вероятностей при медленно меняющемся поле, и проверено предположение о наличии резонанса в указанном случае. При исследовании магнитного поля с медленно меняющейся напряженностью показано, что резонанс действительно имеет место. Также обнаружена существенная зависимость поведения вероятностей как от угла между скоростью нейтрино и вектором магнитной индукции, так и от поляризации нейтрино. Из полученных выражений следует, что при определенной поля-

ризации нейтрино резонанса может не быть вовсе. Также в **Главе 4** рассматривается поведение нейтрино в дорезонансной области, которое исследовалось в работе [3]. В этом случае влияние переходных магнитных моментов не является существенным вследствие их малой величины, и удается получить явный вид вероятностей в модели трех флейворов. При исследовании частного случая поля дипольного типа обнаружена угловая асимметрия вероятности обнаружения нейтрино, имеющего левую спиральность, на больших расстояниях от источника.

В **Главе 5** на основе наших работ [5, 6] рассматривается одновременное влияние вещества и электромагнитного поля на распространение нейтрино. Оказалось, что даже в модели двух флейворов, в которой все элементы матрицы смешивания вещественны, за счет влияния постоянных внешних условий возможно нарушение T -инвариантности в выражениях для вероятностей спин-флейворных переходов уже в простейшем случае, когда взаимодействие со средой осуществляется только через нейтральные токи и учитываются только диагональные магнитные моменты нейтрино. Далее получено достаточное условие T -нарушения в общем случае, а также показано, что в модели трех флейворов T -нарушение может быть вызвано не только наличием мнимого вклада в матрицу смешивания, описываемого инвариантом Ярлског, но и влиянием внешних условий. В результате анализа полученных формул в этой главе делается вывод, что в присутствии электромагнитного поля поведение левого нейтрино в среде из частиц и правого антинейтрино в среде из античастиц отличаются знаком T -нарушающего слагаемого.

В **Заключении** приведены итоги выполненного исследования.

В **Приложениях** приведен вывод достаточно простых, но полезных формул, которые используются при вычислениях.

Заключение

В диссертации построены основы математически непротиворечивого описания осцилляций и поворота спина ультрарелятивистских нейтрино

в среде и электромагнитном поле на основе квантовополевого подхода. С помощью разработанного подхода исследовано влияние внешних условий на распространение нейтрино.

Публикации автора в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, SCOPUS, RSCI

- [1] Лобанов А. Е., Чухнова А. В. Осцилляции нейтрино в однородной движущейся среде. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2017. — Т. 58, № 5. — С. 22. **ИФ WoS: 0.536.** WoS.
- [2] Chukhnova A. V., Lobanov A. E. Neutrino flavor oscillations and spin rotation in matter and electromagnetic field. // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 101. — P. 013003. **ИФ WoS: 5.296.** WoS.
- [3] Лобанов А. Е., Чухнова А. В. Асимметрия распространения левополяризованных нейтрино в неоднородном магнитном поле. // ЖЭТФ. — 2021. — Т. 160, № 4(10). — С. 595. **ИФ WoS: 1.111.** WoS.
- [4] Chukhnova A. V., Lobanov A. E. Resonance enhancement of neutrino oscillations due to transition magnetic moments. // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81. — P. 821. **ИФ WoS: 4.590.** WoS.
- [5] Chukhnova A. V., Lobanov A. E. T violation without complex entries in the lepton mixing matrix. // Phys. Rev. D. — 2022. — Vol. 105. — P. 073010. **ИФ WoS: 5.296.** WoS.
- [6] Лобанов А. Е., Чухнова А. В. Нарушение T -симметрии в осцилляциях нейтрино. // ЖЭТФ. — 2022. — Т. 162. — С. 364. **ИФ WoS: 1.111.** WoS.

Цитируемая литература

- [7] Лобанов А. Е. Осцилляции частиц в Стандартной модели. // ТМФ. — 2017. — Т. 192. — С. 70-88.
- Lobanov A. E. Oscillations of particles in the Standard Model. // Theor. Math. Phys. — 2017. — Vol. 192. — P. 1000–1015.
- [8] Lobanov A. E. Particle quantum states with indefinite mass and neutrino oscillations. // Ann. Phys. — 2019. — Vol. 403. — P. 82–105.
- [9] Лобанов А. Е. Осцилляции нейтрино в плотной среде. // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2016. — Т. 59. — С. 141–144.
- Lobanov A. E. Neutrino Oscillations in Dense Matter. // Russ. Phys. J. — 2017. — Vol. 59. — P. 1891–1895.
- [10] Fujikawa K. and Shrock R. E. Magnetic moment of a massive neutrino and neutrino-spin rotation. // Phys. Rev. Lett. — 1980. — Vol. 45. — P. 963–966.
- [11] Shrock R. E. Electromagnetic properties and decays of Dirac and Majorana neutrinos in a general class of gauge theories. // Nucl. Phys. B. — 1982. — Vol. 206. — P. 359–379.