

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Личкунов Алексей Андреевич

Нейтрино в теориях с аксионо-подобными частицами

Специальность 1.3.3. Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Диссертация подготовлена на кафедре теоретической физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Студеникин Александр Иванович**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рубцов Григорий Игоревич**,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, Институт ядерных исследований Российской академии наук,
заместитель директора по научной работе

Дубинин Михаил Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, отдел теоретической физики высоких энергий, заведующий отделом

Наумов Вадим Александрович,
кандидат физико-математических наук, Объединенный институт ядерных исследований, лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова, начальник сектора

Защита состоится “14” мая 2026 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, строение 2, физический факультет, ауд. Н-16.

E-mail: diss.sov.011.2@org.msu.ru

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/3897>.

Автореферат разослан “__” _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.011.2,
доктор физико-математических наук,
профессор

П.А.Поляков

Общая характеристика работы

В настоящее время исследования свойств нейтрино являются одним из наиболее актуальных направлений современной физики элементарных частиц. Наличие у нейтрино ненулевой массы, экспериментально подтвержденное открытием осцилляций, привело к необходимости модификации Стандартной модели, согласно которой нейтрино является безмассовой частицей.

Точного ответа на вопрос, как у нейтрино возникает масса, нет. Решение проблемы генерации масс нейтрино неразрывно связано с установлением его фундаментальной природы: является ли нейтрино дираковским или майорановским фермионом [1; 2]. Дираковское нейтрино может приобретать массу благодаря юкавскому взаимодействию с полем Хиггса. Для майорановского нейтрино возможен качельный механизм, предполагающий, что наблюдаемые лёгкие нейтрино (левые активные) получают малую массу за счёт взаимодействия с тяжёлыми (правыми) нейтрино. Один из гипотетических процессов, который возможен лишь в модели майорановского нейтрино – безнейтринный бета-распад. Также существует механизм, при котором нейтрино приобретает массу через петлевые радиационные поправки к взаимодействию со скалярными полями за пределами Стандартной Модели. Данный механизм возможен как для дираковского [3], так и для майорановского нейтрино [4].

На данный момент эксперименты с солнечными и атмосферными нейтрино позволяют измерить разности квадратов масс Δm_{12}^2 и Δm_{13}^2 . Однако, знак Δm_{13}^2 из экспериментальных данных получить не удаётся, вследствие чего возникает вопрос иерархии масс нейтрино. В случае прямого порядка предполагается, что массы нейтрино расположены в порядке возрастания следующим образом

$$m_1 < m_2 \ll m_3. \quad (1)$$

При обратном порядке расположение масс нейтрино меняется

$$m_3 \ll m_1 < m_2. \quad (2)$$

Проблема иерархии масс нейтрино исследуется в ряде экспериментов, среди которых можно выделить текущие проекты JUNO, T2K, NOvA и IceCube, а также готовящиеся к запуску DUNE, Hyper-Kamiokande и KM3NeT/ORCA.

Наличие массы у нейтрино приводит к проявлению нетривиальных электромагнитных свойств. В частности, ненулевая масса нейтрино обуславливает отличие от нуля и его магнитного момента. Самое сильное ограничение на магнитный момент нейтрино было получено экспериментом XENONnT [5]:

$$\mu_\nu < 6.4 \times 10^{-12} \mu_B. \quad (3)$$

Наличие магнитного момента у нейтрино обуславливает различные процессы взаимодействия нейтрино с фотонами (наиболее полный обзор электромагнитных свойств нейтрино дан в [6–8]), в том числе спиновый свет нейтрино в веществе [9–11].

Еще одно актуальное направление исследований в физике элементарных частиц связано с аксионами и аксионо-подобными частицами. Первые являются псевдоскалярными голдстоуновскими бозонами и были предложены в рамках решения проблемы CP-нарушения в сильном секторе Стандартной Модели. Их существование, предложенное в рамках механизма Печчеи–Куинн [12], не только устраняет данную проблему, но и делает их перспективными кандидатами на роль темной материи. Современные экспериментальные проекты (CASH, ADMX, CAST) направлены на обнаружение аксионов через их взаимодействие с фотонами (эффект Примакова) или спинами ядер [13–15].

Несмотря на то что аксион изначально вводится как безмассовая частица, в низкоэнергетическом режиме он приобретает эффективную массу вследствие взаимодействия с псевдоскалярными мезонами. В пределе двух легких кварков массовый член аксиона возникает из-за смешивания с π^0 -мезоном, поскольку оба поля являются псевдоскалярными. Масса аксиона и его константа распада жёстко связаны с массой и константой распада нейтрального мезона.

Для аксионо-подобных частиц, представляющих собой псевдоскалярные голдстоуновские бозоны, массы и константы распада являются свободными параметрами. Механизм возникновения данных частиц отличается от механизма возникновения аксионов [16].

Как и аксионы, аксионо-подобные частицы являются популярными кандидатами на роль тёмной материи. Кроме того, вклад аксионо-подобных частиц может представлять интерес при сравнении между теоретическим предсказанием и экспериментальным значением аномального магнитного момента мюона. Будучи бозонами, аксионы и аксионо-подобные частицы могут образовывать такие гипотетические астрофизические объекты как бозонные звёзды.

Объектом исследования диссертационной работы являются фундаментальные свойства нейтрино и аксионо-подобных частиц. **Предметом** диссертационной работы являются флейворные и спиновые осцилляции нейтрино в присутствии внешней среды, магнитного поля и аксионо-подобных частиц.

Актуальность работы обусловлена тем, что полученные результаты затрагивают фундаментальные основы теории взаимодействия нейтрино и в том числе могут быть полезны при рассмотрении вопроса о генерации масс нейтрино. Кроме того, исследование представляет особую значимость

в свете активного развития нейтринной астрофизики. В настоящее время ведётся работа целого ряда экспериментов, ориентированных на детектирование нейтрино астрофизического происхождения, а также подготовка будущих. Наибольший научный интерес вызывают нейтринные потоки, связанные со вспышками сверхновых, а также нейтрино высоких энергий.

Перспективные установки следующего поколения – JUNO, Hyper-Kamiokande, DUNE и другие – позволят регистрировать нейтрино от сверхновых с беспрецедентной статистикой, достигающей десятков тысяч событий. Параллельно такие эксперименты, как Baikal-GVD, IceCube и KM3NeT, сосредоточены на изучении высокоэнергетических астрофизических нейтрино, что открывает возможности для идентификации их источников и анализа флейворного состава [17–19].

Теоретический аспект проблемы также активно разрабатывается: в научной литературе представлены многочисленные работы по моделированию нейтринных потоков от различных астрофизических объектов, в том числе сверхновых и блазаров [20–22].

Состояние научной разработки темы

Ограничения на константы взаимодействия нейтрино с майоронами были получены в [23]. В указанной работе также было исследовано влияние майоронов на флейворные осцилляции нейтрино в среде и было показано, что при низких плотностях майоронов их влияние будет незначительным, однако они оказывают влияние на изменение спиральности нейтрино.

В исследовании [24] получены новые ограничения на эффективное взаимодействие нейтрино с аксионо-подобными частицами путем анализа его вклада в петлевые поправки к связи аксионо-подобных частиц с электрослабыми калибровочными бозонами. Работа включает расчеты в однопетлевом приближении и использует данные редких распадов мезонов и экспериментов на коллайдерах. Это позволило получить верхнюю границу на массу аксионо-подобные 100 МэВ.

В [25] исследуется возможная связь аксионо-подобных частиц со стерильными нейтрино, открывая перспективы для изучения этих взаимодействий на БАК. В нем используется эффективный подход теории поля и обсуждается УФ-полная модель, включающая аксионо-подобные частицы, стерильные нейтрино и тяжелый скаляр, которые могут быть протестированы в экспериментах на коллайдере.

Изучение модификаций осцилляций нейтрино под действием потенциала, индуцированного фоном аксионо-подобных частиц в Млечном Пути, описано в [26]. Учитывается эффект когерентного упругого рассеяния нейтрино на аксионо-подобных частицах, приводящий к появлению дополнительного вклада в уравнение эволюции нейтрино. В рамках модели со связью аксионо-подобных частиц с тремя поколениями активных нейтрино проведен анализ возможных наблюдаемых эффектов в современных и будущих экспериментах по нейтринным осцилляциям.

Современные исследования электромагнитных свойств нейтрино, в особенности их магнитных моментов, опираются на комплекс теоретических предсказаний [6] и экспериментальных ограничений [5; 27; 28]. Перспективным направлением представляется использование новых экспериментальных методик, таких как когерентное упругое рассеяние низкоэнергетических нейтрино, например, на атомах [29]. Отметим, что эффекты смешивания и осцилляций нейтрино являются важными факторами, которые необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных [30; 31].

Проблема квантовой декогеренции нейтрино, взаимодействующих со скалярными частицами, ранее рассматривалась в работе [32], где было показано, что квантовая декогеренция нейтрино может происходить за счет распада нейтрино на более легкое нейтринное состояние и безмассовую частицу, а также за счет обратного процесса поглощения безмассовой частицы нейтрино. Влияние флуктуаций плотности вещества и магнитного поля на квантовую декогеренцию нейтринных состояний исследовалось в [33–35], а стохастических гравитационных волн в [36].

Целью диссертационной работы является описание процесса осцилляций нейтрино при их распространении в различных средах с учетом возможного взаимодействия с магнитным полем и аксионо-подобными частицами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) получение замкнутых аналитических выражений для эффективно-гамильтониана взаимодействия нейтрино с аксионо-подобными частицами;
- 2) получение вероятности флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в реалистичных астрофизических объектах с учетом взаимодействия как с майоронами, так и с магнитным полем и веществом;
- 3) обоснование и развитие нового подхода, который позволил описать квантовую декогеренцию нейтрино за счёт взаимодействия с классическим полем аксионо-подобных частиц.

Методы исследования

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

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) разработанный подход, описывающий осцилляции нейтрино в среде майоронов с учётом их рассеяния на данных частицах, позволяет корректно учитывать влияние майоронов на нейтринные потоки;
- 2) предложенный подход позволил получить аналитические выражения для вероятностей флейворных осцилляций нейтрино в среде из майоронов;
- 3) применение предложенного подхода к эволюции майороновского нейтрино в магнитном поле, веществе и среде из майоронов позволило получить новое уравнение эволюции нейтрино в данных внешних условиях, решение которого было получено с использованием численных методов;
- 4) развитая теория квантовой декогеренции нейтрино с учетом взаимодействия с флуктуирующим классическим полем аксионо-подобных частиц даёт возможность оценить вклад аксионо-подобных частиц в эволюцию нейтринных потоков;
- 5) полученное выражение для диссипативной матрицы при эволюции нейтрино в классическом поле аксионо-подобных частиц содержит недиагональные элементы, что отличается от феноменологических моделей, рассматриваемых в литературе.

Научная новизна

- 1) в рамках разработанного подхода получены аналитические выражения для осцилляций нейтрино в среде из майоронов; показано, что при отсутствии других факторов майороны не меняют угол смешивания нейтрино и влияют лишь на длину осцилляций;
- 2) вычислены вероятности осцилляции нейтрино в веществе, магнитном поле и майоронов; показано, что в среде высокой плотности майоронов происходит сдвиг резонанса амплитуды осцилляций, появляются новые резонансы, а также изменяется зависимость осцилляций от CP-нарушающих фаз;
- 3) получена диссипативная матрица для случая взаимодействия нейтрино с классическим полем аксионо-подобных частиц; получены новые ограничения на константы взаимодействия нейтрино с аксионо-подобными частицами

Теоретическая и практическая значимость

Полученные выражения для вероятности флейворных осцилляций нейтрино в среде майоронов расширяют стандартный формализм описания нейтринных осцилляций во внешней среде с учётом влияния новых

гипотетических частиц. Это способствует углублению понимания динамики нейтрино в условиях, которые могут существовать в астрофизических объектах. Учёт взаимодействия нейтрино с веществом и магнитным полем в присутствии майоронов позволяет моделировать более реалистичные сценарии, например, в ядрах сверхновых, активных галактиках или нейтронных звёздах.

Анализ квантовой декогеренции нейтринных осцилляций под действием классического поля аксионо-подобных частиц вносит вклад в квантовую теорию открытых систем, описывая, как внешние поля могут разрушать когерентность нейтринных состояний.

Результаты работы могут быть использованы для моделирования нейтринного сигнала от экстремальных астрофизических источников (сверхновые, активные галактические ядра, нейтронные звёзды), где присутствие майоронов или аксионо-подобных частиц может влиять на наблюдаемые спектры нейтрино. Полученные формулы могут быть применены для анализа данных будущих экспериментов, таких как DUNE, Hyper-Kamiokande, JUNO, или астрофизических наблюдений, направленных на поиск новых взаимодействий нейтрино. Учёт декогеренции позволит улучшить интерпретацию данных нейтринных телескопов (Baikal-GVD, IceCube, KM3NeT) в поисках следов новой физики.

Личный вклад соискателя

Вклад соискателя во всех опубликованных работах является определяющим. Все выносимые на защиту положения являются результатами, которые получены лично соискателем. В публикации [A1] представлены проведённые соискателем расчёты аналитических выражений вероятностей спин-флейворных осцилляций нейтрино в магнитном поле. В работе [A2] соискателем представлен разработанный им новый теоретический подход для исследования квантовой декогеренции нейтрино в среде из аксионо-подобных частиц и также проведённый им расчёт и полученное выражение для диссипативной матрицы. В работе [A3] соискателем реализован предложенный им новый подход для описания нейтрино в среде из майоронов и представлены аналитические выражения вероятностей флейворных осцилляций в среде из майоронов. Постановка задачи о спин-флейворных осцилляциях нейтрино в магнитном поле (публикация [A1]) была выполнена совместно с А.Р.Поповым и А.С.Студеникиным. Постановка задачи о квантовой декогеренции нейтрино в среде из аксионо-подобных частиц (публикация [A2]) выполнена совместно с К.Л.Станкевичем и А.С.Студеникиным. Соискателем была проведена основная работа при подготовке текста всех статей, а также представление статей в архив и редакции журналов и переписка с редакторами и рецензентами.

Достоверность и апробация результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы были изложены в трёх статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук. Кроме того, по результатам диссертации были сделаны 10 докладов на российских и зарубежных конференциях:

- 1) «Neutrino quantum decoherence in a fluctuating ALPs field» 22nd Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 21-27 августа, 2025 (устный доклад);
- 2) «Neutrino mixing angle and neutrino oscillation in axion-like particle» 24th JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Большие Коты, Россия, 10-17 июля, 2024 (устный доклад);
- 3) «Neutrino oscillation in ALPs matter» the 14th International School on Neutrino Physics and Astrophysics will be held in the city of Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russia, 18- 23 июля 2022 (устный доклад);
- 4) «Neutrino mixing angle and neutrino oscillation in ALPs matter» XLI International Conference on High Energy Physics Bologna, Italy, 6-13.07.2022 (стендовый доклад);
- 5) «Neutrino oscillation in ALPs matter» XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Сеул, Корея, Республика, 30 мая - 4 июня 2022 (устный доклад);
- 6) «Neutrino quantum decoherence engendered by neutrino decay to photons, familons and gravitons» 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2021), Испания, 26 августа - 3 сентября 2021 (стендовый доклад);
- 7) «Neutrino decay processes and flavour oscillations» EPS-HEP2021 European Physical Society Conference on High Energy Physics, DESY, Германия, 26-30 июля 2021 (стендовый доклад);
- 8) «Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field» EPS-HEP2021 European Physical Society Conference on High Energy Physics, DESY, Германия, 26-30 июля 2021 (стендовый доклад);
- 9) «Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case» ICHEP2020: 40th International Conference on High Energy Physics, г. Прага, Чехия, 28 июля - 6 августа 2020 (устный доклад);
- 10) «Neutrino oscillations in a magnetic field and CP violation: The three-flavor case» The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Чикаго, США, 22 июня - 2 июля 2020 (стендовый доклад).

Структура работы:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём

диссертации составляет 96 страниц, она включает 13 рисунков. Список литературы состоит из 158 наименований.

Основное содержание работы

Диссертация посвящена развитию теории осцилляций нейтрино в присутствии аксионо-подобных частиц. Отдельно сделан акцент на влияние майоронов на нейтринные осцилляции, в том числе рассмотрен случай среды из майоронов высокой плотности, а также в присутствии внешней среды и электромагнитного поля. Диссертация состоит из четырёх глав.

В **Главе 1** представлен обзор современного состояния исследований в области физики нейтрино, аксионов и аксионо-подобных частиц. Рассматриваются дираковский и майороновский формализмы описания нейтрино, а также теоретические основы и феноменология смешивания и осцилляций нейтрино. Отдельное внимание уделено электромагнитным характеристикам нейтрино, в частности проблеме магнитных моментов. Завершает главу анализ теоретических моделей аксионов и аксионо-подобных частиц, включая механизмы их введения в формализм Стандартной модели и описание основных типов взаимодействий с другими частицами.

Глава 2 посвящена исследованию влияния аксионо-подобных частиц на осцилляции нейтрино. Для простоты интерпретации полученных результатов рассматривался случай двухфлейворных осцилляций. Получены аналитические выражения вероятностей флейворного перехода $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ для случая распространения нейтрино в классическом поле аксионо-подобных частиц, а также в среде из майоронов. Показано, что в случае высокой плотности классических полей аксионо-подобных частиц наблюдается новый резонанс нейтринных осцилляций. Однако, этого не возникает в случае майоронов. Показано, что майороны не оказывают влияние на угол смешивания, лишь на длину осцилляций.

Лагранжиан взаимодействия массивных нейтрино с аксионо-подобными частицами выглядит следующим образом [26]

$$\mathcal{L} = i \frac{a}{F} \bar{\nu}_i (g_V^{ij} (m_i - m_j) + g_A^{ij} (m_i + m_j) \gamma_5) \nu_j, \quad (4)$$

где a – поле аксионо-подобных частиц, ν_j – состояние нейтрино в массовом базисе, константа g_V^{ij} отвечает за векторное взаимодействие нейтрино с аксионо-подобными частицами, g_A^{ij} – за аксиальное, F является константой распада аксионо-подобных частиц на нейтрино. Как видно из лагранжиана (4), вершина взаимодействия прямо пропорциональна массе нейтрино.

Из уравнения эволюции, полученного из (4), выведены выражения вероятности флейворных переходов

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x) = \sin^2 \left(\frac{\pi x}{L_{eff}} \right) \sin^2 2\theta_{eff}, \quad (5)$$

где эффективный угол смешивания θ_{eff} и L_{eff} выражаются следующим образом

$$\sin^2 2\theta_{eff} = \frac{\sin^2 2\theta + A}{1 + A}, \quad (6)$$

$$L_{eff} = \frac{4\pi E_\nu}{\Delta\sqrt{1+A}}, \quad (7)$$

где Δ – разность квадратов масс

$$\Delta = m_2^2 - m_1^2. \quad (8)$$

Также введены следующие обозначения

$$A = \frac{4a^2 g^2}{F^2}, \quad (9)$$

$$g = g_V^{12} - g_A^{12}. \quad (10)$$

Таким образом, вклад постоянного классического поля аксионоподобных частиц в случае двухфлейворного нейтрино зависит от константы недиагонального взаимодействия нейтрино с аксионоподобными частицами в нейтринном массовом базисе.

При взаимодействии майорановских нейтрино с майороном лагранжиан можно описать следующим образом [37–39]

$$\mathcal{L}_J = -i \frac{J}{F} \bar{n}_i \left(g_V^{ij} (m_i - m_j) + \gamma_5 g_A^{ij} (m_i + m_j) \right) n_j, \quad (11)$$

где нейтрино в массовом базисе $n = n_R + n_R^c$ имеют следующий вид

$$n_R = V^\dagger (\nu_L^c, N_R), \quad (12)$$

где N_R описывает тяжёлые нейтрино. Константы g_V^{ij} и g_A^{ij} выражаются следующим образом

$$g_V^{ij} = \frac{1}{2} \text{Im} C_{ij}, \quad (13)$$

$$g_A^{ij} = \frac{i}{2} \left(\frac{1}{2} \delta_{ij} - \text{Re} C_{ij} \right). \quad (14)$$

Матрица C имеет следующий вид

$$C = \begin{pmatrix} 1 & i\sqrt{d_l} R^T \sqrt{d_h^{-1}} \\ -i\sqrt{d_h^{-1}} R^* \sqrt{d_l} & 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где $d_l = \text{diag}(m_1, m_2, m_3)$, $d_h = \text{diag}(M_1, M_2, M_3)$ и $R = (R^T)^{-1}$ – комплексная ортогональная матрица.

Из (15) видно, что для легких нейтрино лагранжиан взаимодействия диагонален

$$\mathcal{L}_J \sim J m_i \bar{\nu}_i \gamma_5 \nu_i. \quad (16)$$

Таким образом, вклад классического поля майоронов в нейтринные осцилляции в первом приближении будет нулевым. Для рассмотрения влияния майоронов на нейтринные осцилляции следует построить эффективный лагранжиан, который получается из рассмотрения диаграмм Фейнмана второго порядка, описывающие процесс рассеяния нейтрино на майоронах. Такой подход позволяет рассматривать майороны не только как классическое, но и как квантовое поле.

В диссертации показано, что для рассеяния вперед вклад такой диаграммы с лёгким нейтрино в качестве виртуальной частицы нулевой. В случае, когда виртуальной частицей становится тяжёлое нейтрино, вклад можно описать с помощью эффективной константы взаимодействия, которая после постановки (15) в (13) приобретает следующий вид

$$G^{ik} = \frac{m_i}{4F^2} \delta_{ik}. \quad (17)$$

Это делает эффективный лагранжиан взаимодействия диагональным

$$\mathcal{L}_{(J)} = \frac{\rho_J}{4F^2 m_J^2} m_i \bar{\nu}_i \nu_i, \quad (18)$$

где ρ_J описывает энергетическую плотность майоронов, а m_J – массу майоронов, и связаны они с усреднённым полем майоронов следующим образом

$$\frac{\rho_J}{m_J^2} = \langle J^2 \rangle. \quad (19)$$

Для двухфлейворного приближения вероятность перехода имеет следующий вид

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x) = \sin^2 \left(\frac{\pi x}{L_{eff}} \right) \sin^2 2\theta, \quad (20)$$

где

$$L_{eff} = \frac{4\pi E_\nu}{\Delta \left(1 + \frac{\rho_J}{4F^2 m_J^2} \right)}. \quad (21)$$

Таким образом, среда из майоронов не влияет на угол смешивания, но изменяет длину осцилляций.

В **Главе 3** исследуются спиновые и спин-флейворные осцилляции нейтрино в веществе, магнитном поле и среде из майоронов. Используя

результаты, полученные в Главе 2, показывается, что эффективное взаимодействие нейтрино с майоронами легко добавляется к взаимодействию нейтрино с веществом и магнитным полем. Таким образом, формулы для вероятностей спиновых и спин-флейворных переходов нейтрино в веществе и магнитном поле, полученные в [40; 41], можно обобщить на случай взаимодействия с майоронами. При рассмотрении зависимости нейтринных осцилляций от плотности электронов показано, что в среде из майоронов высокой плотности наблюдается сдвиг резонанса в вероятности нейтринных осцилляций, а также появляются новые резонансы. При рассмотрении зависимости амплитуды осцилляций от энергии нейтрино показано, что осцилляции нейтрино при низких энергиях подавляются. Также показано, что зависимость осцилляций от CP-нарушающих фаз меняется в присутствии среды из майоронов высокой плотности.

Взаимодействие майорановского нейтрино с магнитным полем \mathbf{B} описывается следующим лагранжианом (см. [41; 42])

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{mag} = & - \sum_{ik} \mu_{ik} \left[(\overline{\nu_i^L})^c \Sigma \mathbf{B} \nu_k^L + \overline{\nu_i^L} \Sigma \mathbf{B} (\nu_k^L)^c \right] = \\ & - \sum_{\alpha\beta} \left[\mu_{\alpha\beta}^{(f)} (\overline{\nu_\alpha^L})^c \Sigma \mathbf{B} \nu_\beta^L - (\mu_{\alpha\beta}^{(f)})^\dagger \overline{\nu_\alpha^L} \Sigma \mathbf{B} (\nu_\beta^L)^c \right], \end{aligned} \quad (22)$$

где μ и $\mu^{(f)}$ - матрица магнитных моментов нейтрино в базе массовых состояний и в базе флейворных состояний соответственно.

Для случая майорановских нейтрино матрица смешения U задается формулой

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

и содержит три фазы, нарушающие CP-инвариантность: дираковскую CP-нарушающую фазу δ , и майорановские CP-нарушающие фазы α_1 и α_2 .

Взаимодействие майорановских нейтрино с веществом описывается лагранжианом [43]

$$\mathcal{L}_{mat} = \sum_{\alpha} \frac{V_{\alpha}^{(f)}}{2} \left[\overline{\nu_{\alpha}^L} \gamma_0 \nu_{\alpha}^L - (\overline{\nu_{\alpha}^L})^c \gamma_0 (\nu_{\alpha}^L)^c \right], \quad (24)$$

где

$$V^{(f)} = \text{diag} \left(\frac{G_F n_e}{\sqrt{2}} - \frac{G_F n_n}{2\sqrt{2}}, -\frac{G_F n_n}{2\sqrt{2}}, -\frac{G_F n_n}{2\sqrt{2}} \right) \quad (25)$$

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

Используя результаты Главы 2, можно получить следующую систему уравнений эволюции для нейтрино, взаимодействующих с майороном, магнитным полем и веществом

$$\left(\gamma_\mu p^\mu - m_i - \frac{\rho J}{4F^2 m_J^2} m_i - V_{ii}^{(m)} \gamma_0 \gamma_5 \right) \nu_i(p) - \sum_{k \neq i} \left(-\mu_{ik} \Sigma \mathbf{B} + V_{ik}^{(m)} \gamma_0 \gamma_5 \right) \nu_k(p) = 0, \quad (26)$$

где $V^{(m)} = U^\dagger V^{(f)} U$ - потенциал вещества в массовом базисе, а p^μ - 4-импульс нейтрино.

В диссертации получено численное решение уравнения (26), в частности исследована возможность резонансного усиления осцилляций.

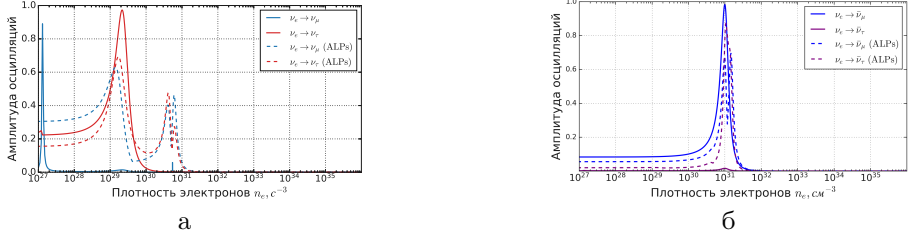


Рисунок 1 — Зависимость амплитуды осцилляции от плотности электронов. Дираковская и майороновские CP-нарушающие фазы равны нулю, энергия нейтрино $E_\nu = 10$ МэВ; а – Осцилляции нейтрино-нейтрино; б – Осцилляции нейтрино-антинейтрино

Амплитуды нейтринных осцилляций в зависимости от плотности электронов n_e и доли электронов Y_e показаны на (рис. 1-2). Взаимодействие с майоронами смещает положение резонанса. Более того, появляются два новых резонанса.

Как видно из (рис. 3), майороны размывают зависимость амплитуды нейтринных осцилляций от дираковской фазы. Резонанс нейтринных осцилляций становится слегка заметным.

Зависимость амплитуд нейтрино-антинейтринных осцилляций от энергии нейтрино показана на (рис. 4). Майороны подавляют нейтринные осцилляции при низких энергиях. Амплитуда осцилляций увеличивается при энергиях 10 МэВ и выше.

Наличие майоронов стирает зависимость вероятностей осцилляций нейтрино от майороновских фаз, как это видно из (рис. 5).

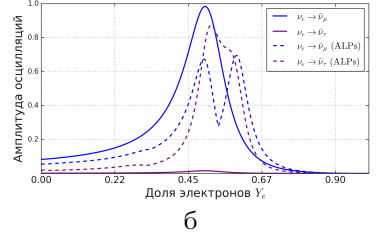
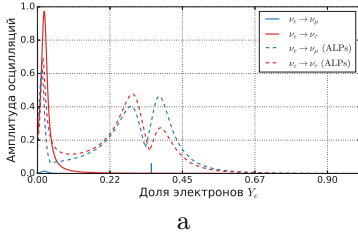


Рисунок 2 — Зависимость амплитуды осцилляций от доли электронов. Дираковская и майорановские CP-нарушающие фазы равны нулю, энергия нейтрино $E_\nu = 10$ МэВ; а – Осцилляции нейтрино-нейтрино; б – Осцилляции нейтрино-антинейтрино

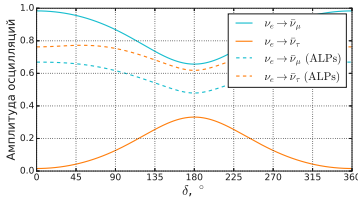


Рисунок 3 — Зависимость амплитуды нейтрино-антинейтринных осцилляций от дираковской фазы. Майорановские фазы равны нулю, энергия нейтрино $E_\nu = 10$ МэВ, доля электронов $Y_e = 0,5$

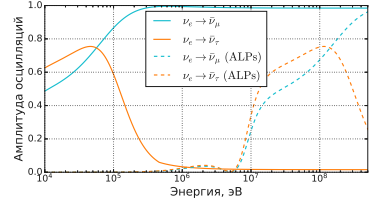


Рисунок 4 — Зависимость амплитуды нейтрино-антинейтринных осцилляций от энергии нейтрино. Дираковская и майорановские CP-нарушающие фазы равны нулю, доля электронов $Y_e = 0,5$

Предметом изучения **Главы 4** является квантовая декогеренция нейтринных осцилляций под действием рэлеевских флуктуаций классического поля аксионо-подобных частиц. Получено уравнение эволюции матрицы плотности нейтрино, имеющее вид уравнения Редфилда, так же была получена диссипативная матрица, зависящая от параметров декогеренции осцилляций. Показано, что для случая взаимодействия нейтрино с флуктуациями классического поля аксионо-подобных частиц данная диссипативная матрица имеет недиагональные элементы. Исходя из ограничений на параметры квантовой декогеренции, полученные из анализа данных реакторных нейтринных экспериментов [44], были сделаны оценки на константы взаимодействия нейтрино с аксионо-подобными частицами.

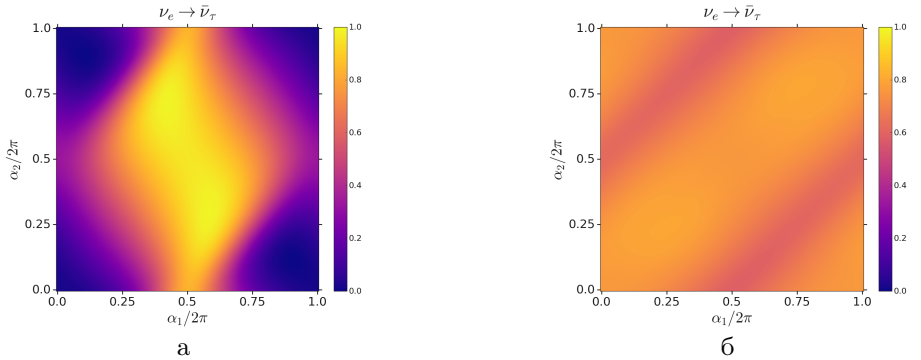


Рисунок 5 — Зависимость амплитуды перехода от $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ от майорановских фаз. Дираковская фаза равна нулю, доля электронов $Y_e = 0,5$, энергия нейтрино $E_\nu = 10$ МэВ: а – при отсутствии майоранов; б – при наличии майоранов

Уравнение эволюции матрицы плотности нейтрино имеет в представлении взаимодействия следующий вид

$$i \frac{d\rho_\nu(t)}{dt} = [H(t), \rho_\nu(t)], \quad (27)$$

где гамильтониан $H(t)$ описывает взаимодействие нейтрино с внешней средой

$$H(t) = \int d^3\mathbf{x} j(x) a(x), \quad (28)$$

где $a(x)$ описывает поле аксионо-подобных частиц, $j(x)$ – нейтринный ток

$$j(x) = i\bar{\nu}(x) (g_V + g_A\gamma_5) \nu(x), \quad (29)$$

g_V и g_A являются матрицами констант векторной и аксиальной связи, элементы которых выражаются в виде

$$g_V^{ij} = C_V^{ij} \frac{m_i - m_j}{F}, \quad (30)$$

$$g_A^{ij} = C_A^{ij} \frac{m_i + m_j}{F}, \quad (31)$$

где m_i описывает массу нейтрино, F – константа распада, C_V^{ij} – безразмерные константы (см., например, [45]).

Флуктуирующее поле аксионо-подобных частиц $a(x)$ имеет следующий вид [26; 46; 47]

$$a(x) \approx \alpha(t) \frac{\sqrt{2\rho}}{m_a} \cos(m_a t). \quad (32)$$

В данном уравнении ρ – плотность энергии аксионо-подобных частиц, m_a – их масса, $\alpha(t)$ – неотрицательная случайная величина, подчиняющаяся распределению Рэлея

$$f(\alpha) = \alpha \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right). \quad (33)$$

Выполняя усреднение формального решения уравнения (28) по флуктуациям поля аксионо-подобных частиц, а также по его когерентным осцилляциям, можно показать, что усредненное решение удовлетворяет уравнению Редфилда

$$\frac{d\rho'_\nu(t)}{dt} = -\frac{(4-\pi)\rho}{2m_a^2} \tau[J'(t), [J'(t), \rho'_\nu(t)]], \quad (34)$$

где

$$J(t) = \int d^3\mathbf{x} j(x), \quad (35)$$

τ – время корреляции флуктуаций поля аксионо-подобных частиц.

В представлении Шредингера уравнение имеет следующий вид

$$\frac{d\rho_\nu(t)}{dt} = -i[H_0, \rho_\nu(t)] - \frac{(4-\pi)\rho}{2m_a^2} \tau[J, [J, \rho_\nu(t)]], \quad (36)$$

где $J = J(0)$, H_0 представляет собой сумму вакуумного гамильтониана и описывающего взаимодействие нейтрино с веществом.

Второе слагаемое $-\frac{(4-\pi)\rho}{2m_a^2} \tau[J, [J, \rho_\nu(t)]] \equiv D[\rho_\nu(t)]$ называют диссипативным, и оно количественно характеризует декогеренцию нейтринных осцилляций. В случае нейтрино трёх флейворов его можно разложить по генераторам группы $SU(3)$, обозначаемые λ_j

$$D[\rho_\nu(t)] = \sum_{i,j=0}^8 D_{ij} \rho_i \lambda_j. \quad (37)$$

Множитель D_{ij} является элементом диссипативной матрицы 9×9 , содержащей свободные параметры системы. В массовом базисе нейтрино он имеет следующее выражение

$$D_{ab} = -\frac{(4-\pi)\rho}{2m_a^2} \tau \sum_{c,d,e=1}^8 h_c h_d f_{ceb} f_{dea}. \quad (38)$$

где $h_a = 2\text{Tr}(J\lambda_a)$, а f_{ijk} описывает структурные константы группы $SU(3)$.

Ненулевые коэффициенты h_a имеют следующий вид

$$h_2 = \frac{\Delta m_{21}^2 (C_V^{21} - C_A^{21})}{2E_\nu F}, \quad (39)$$

$$h_5 = \frac{\Delta m_{31}^2 (C_V^{31} - C_A^{31})}{2E_\nu F}, \quad (40)$$

$$h_7 = \frac{\Delta m_{32}^2 (C_V^{32} - C_A^{32})}{2E_\nu F}. \quad (41)$$

Равенство нулю элементов матрицы $D_{0i} = D_{i0} = 0$ свидетельствует об отсутствии диссипативных потерь нейтрино, обусловленных флуктуациями поля аксионо-подобных частиц. Также можно показать, что в данной матрице присутствуют недиагональные элементы, что отличает её от тех, что обычно рассматривают при экспериментальных оценках (см., например, [44; 48]).

Условие применимости уравнения (36) имеет следующий вид

$$\tau E_{max} \ll 1, \quad (42)$$

где E_{max} соответствует максимальному элементу матрицы $[H_0, J]$. В рамках данной работы предполагается, что корреляционное время соответствует времени когерентности из работ [49–51]

$$\tau = \frac{1}{m_a v^2}, \quad (43)$$

где v описывает скорость аксионо-подобных частиц. Как указывалось выше, её величина порядка 10^{-3} с [26]. Таким образом

$$\frac{|\Delta m_{13}^2|^2}{8m_a v^2 E_\nu^2 F} \ll 1. \quad (44)$$

Используя ограничения на параметр декогеренции, которые были получены в [44] из данных реакторных нейтринных экспериментов, где рассматривается диагональная матрица декогеренции без потери нейтрино, и ограничивая ими диагональные элементы матрицы (38), можно получить оценки на константы взаимодействия нейтрино с аксионо-подобными частицами

$$\frac{F}{C_V^{ij} - C_A^{ij}} > \frac{\Delta m_{ij}^2 \sqrt{3(4 - \pi)\rho\tau}}{2m_a E_0 \sqrt{\gamma_0}}. \quad (45)$$

Условие применимости (44) изучаемого метода накладывает дополнительное ограничение на константы взаимодействия

$$\frac{F}{C_V^{ij} - C_A^{ij}} > \frac{|\Delta m_{13}^2|^2}{8m_a v^2 E_\nu^2}. \quad (46)$$

Поскольку ограничения на параметр декогеренции получены из реакторных нейтринных экспериментов, энергия нейтрино берётся равной 10 МэВ. Используя массу аксионо-подобных частиц, равную $m_a = 10^{-7}$ эВ, мы получаем нижние оценки констант связи $F_{V,A}^{ij}$ нейтрино с аксионо-подобными частицами (таб. 1). В данной таблице рассмотрены следующие частные случаи взаимодействия нейтрино с аксионо-подобными частицами:

- V: только константы g_V ненулевые (аксионо-подобные частицы взаимодействуют с левыми и правыми нейтрино);
- A: только константы g_A ненулевые (аксионо-подобные частицы взаимодействуют с левыми и правыми нейтрино);
- V-A: $g_V = -g_A$ (аксионо-подобные частицы взаимодействуют с левыми нейтрино).

Таблица 1 — Нижние границы на константы связи нейтрино с аксионо-подобными частицами (в ГэВ) для массы аксионо-подобных частиц $m_a = 10^{-7}$ эВ

	V или A	V-A
$F_{V,A}^{31}$	3.5×10^{-2}	1.8×10^{-2}
$F_{V,A}^{32}$	3.4×10^{-2}	1.7×10^{-2}
$F_{V,A}^{21}$	1.0×10^{-4}	0.5×10^{-4}

Заключение

Таким образом, основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Разработан новый подход для описания осцилляций нейтрино в среде из майоронов с учётом процесса рассеяния нейтрино на майоронах. В рамках разработанного подхода были получены аналитические выражения для вероятности осцилляций нейтрино в среде из майоронов; было показано, что при отсутствии других факторов (наличия вещества и/или магнитного поля) майороны не меняют угол смешивания нейтрино и влияют лишь на длину осцилляций.

2. Получено численное решение уравнения для эволюции майороновского нейтрино в магнитном поле, веществе и среде из майоронов. Показано, что в среде из майоронов высокой плотности наблюдается сдвиг резонанса в вероятности нейтринных осцилляций. Для указанных внешних условий также исследовано возникновение новых резонансов в вероятности нейтринных осцилляций и исследована зависимость вероятности осцилляций от CP-нарушающих фаз.

3. Впервые развит подход для описания квантовой декогеренции нейтрино, возникающий за счёт взаимодействия нейтрино со стохастическими

флуктуациями в классическом поле аксионо-подобных частиц. Предполагая, что случайные флуктуации поля аксионо-подобных частиц имеют рэлеевский характер, продемонстрировано, что матрица плотности нейтрино для этого взаимодействия определяется уравнением Редфилда. Получена диссипативная матрица, показано, что она обладает недиагональными элементами. Используя ограничения на параметры декогеренции, полученные в результате анализа чувствительности реакторных нейтринных экспериментов, получены оценки констант связи между нейтрино и аксионо-подобными частицами.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук

[A1] A. Lichkunov, A. Popov, A. Studenikin. Three-flavour neutrino oscillations in a magnetic field // *International Journal of Modern Physics A* – 2026. – Vol. 41, no. 02. – P. 2650015 – DOI:10.1142/S0217751X26500156. – Импакт-фактор 5.296 (JIF), Личный вклад 1.30/1.62 п. л.;

[A2] A. Lichkunov, K. Stankevich, A. Studenikin. Neutrino quantum decoherence in a fluctuating ALPs field // *Physical Review D* – 2025. – Vol. 112, no. 12. – P. 123007. – EDN:PZMIXC. – Импакт-фактор 1.2 (JIF), Личный вклад 0.94/1.04 п. л.;

[A3] A. Lichkunov, A. Studenikin. Neutrino mixing angle and neutrino oscillation in axion-like particles matter // *Moscow University Physics Bulletin* – 2024. – Vol.79, no. S1 – Pp. 304-307. – EDN:DVGXGL. – Импакт-фактор 0.159 (SJR), Личный вклад 0.31/0.35 п. л.;

Литература

1. *Bilenky S.* Neutrinos: Majorana or Dirac? // *Universe*. – 2020. – Vol. 6, no. 9. – P. 134.
2. *Dubinina M. N., Kazarkina D. M.* Lepton universality in a model with three generations of sterile Majorana neutrinos // *Phys. Rev. D*. – 2024. – Vol. 109, no. 5. – P. 055004.
3. *Saad S.* Simplest radiative Dirac neutrino mass models // *Nuclear Physics B*. – 2019. – Vol. 943. – P. 114636.
4. *Hou W., Wong G.* Radiative Majorana neutrino masses // *Phys. Lett. B*. – 1994. – Vol. 339. – Pp. 109–113.
5. *Aprile E. et al.* Search for new physics in electronic recoil data from XENONnT // *Phys. Rev. Lett.* – 2022. – Vol. 129, no. 16. – P. 161805.
6. *Giunti C., Studenikin A.* Neutrino electromagnetic interactions: a window to new physics // *Rev. Mod. Phys.* – 2015. – Vol. 87. – P. 531.
7. *Ternov I., Bagrov V., Khapaev A.* Electromagnetic radiation from a neutron in an external magnetic field // *Soviet Physics JETP*. – 1965. – Vol. 21, no. 3.

8. *Тернов А.* Массивные нейтрино во внешних полях и в плотных средах. — дис. на соиск. учен. степ. доктора физ.-мат. наук: 01.04.02 // МГУ им. М.В. Ломоносова. — М., 2015. — 312 с.
9. *Lobanov A., Studenikin A.* Spin light of neutrino in matter and electromagnetic fields // *Phys. Lett. B.* — 2003. — Vol. 564. — Pp. 27–34.
10. *Grigoriev A., Studenikin A., Ternov A.* Spin light of neutrino in matter // *Russ. Phys. J.* — 2024. — Vol. 67. — P. 1864–1877.
11. *Grigoriev A., Studenikin A., Ternov A.* Neutrino spin states in moving matter and the effect of neutrino spin light // *Springer Proc. Phys.* — 2025. — Vol. 425. — Pp. 3–6.
12. *Peccei R. D., Quinn Helen R.* CP conservation in the presence of instantons // *Phys. Rev. Lett.* — 1977. — Vol. 38. — Pp. 1440–1443.
13. *Pankratov A. L. et al.* Search for dark matter axions beyond the quantum limit: The cosmological axion Sarov haloscope proposal // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 3. — P. 035003.
14. *Khatiwada R. et al.* Axion Dark Matter eXperiment: detailed design and operations // *Review of Scientific Instruments.* — 2021. — Vol. 92, no. 12. — P. 124502.
15. *Melcón A. Álvarez et al.* First results of the CAST-RADES haloscope search for axions at $34.67 \mu\text{eV}$ // *JHEP.* — 2020. — Vol. 10. — P. 075.
16. *Marsh D.* Axion cosmology // *Physics Reports.* — 2016. — Vol. 643. — Pp. 1–79.
17. *Allakhverdyan V. A. et al.* Constraints on the diffuse flux of multi-PeV astrophysical neutrinos obtained with the Baikal Gigaton Volume Detector // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 8. — P. 083025.
18. *Abbasi R. et al.* Probing the PeV region in the astrophysical neutrino spectrum using $\nu\mu$ from the Southern sky // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 1. — P. 012022.
19. *Aiello S. et al.* Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT // *Nature.* — 2025. — Vol. 638, no. 8050. — Pp. 376–382. — [Erratum: *Nature* 640, E3 (2025)].
20. *Alekseev E. et al.* Detection of the neutrino signal From SN1987A in the LMC using the INR Baksan underground scintillation telescope // *Phys. Lett. B.* — 1988. — Vol. 205. — Pp. 209–214.

21. *Abe K. et al.* Supernova model discrimination with Hyper-Kamiokande // *Astrophys. J.* — 2021. — Vol. 916, no. 1. — P. 15.
22. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Troitsky S. V.* Extreme jet beaming observed in neutrino-associated blazars // *Astrophys. J.* — 2025. — Vol. 991, no. 1. — P. 33.
23. *Tomas R., Pas H., Valle J. W. F.* Generalized bounds on majoron-neutrino couplings // *Phys. Rev. D.* — 2001. — Vol. 64. — P. 095005.
24. *Bonilla J., Gavela B., Machado-Rodríguez J.* Limits on ALP-neutrino couplings from loop-level processes // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 109. — P. 055023.
25. *Alves A., Dias A. G., Lopes D. D.* Probing ALP-sterile neutrino couplings at the LHC // *J. High Energy Phys.* — 2020. — Vol. 2020, no. 74.
26. *Huang G.-Y., Nath N.* Neutrinophilic axion-like dark matter // *Eur. Phys. J. C.* — 2018. — Vol. 78, no. 11. — P. 922.
27. *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.
28. *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.
29. *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.
30. *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)].
31. *Kouzakov K., Lazarev F., Studenikin A.* Effects of neutrino electromagnetic properties and spin polarization in elastic neutrino–nucleon scattering // *Int. J. Mod. Phys. E.* — 2025. — Vol. 34, no. 02n03. — P. 2541001.
32. *Stankevich K., Studenikin A., Vyalkov M.* Generalized Lindblad master equation for neutrino evolution // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 111, no. 3. — P. 036014.
33. *Loreti F. N., Balantekin A. B.* Neutrino oscillations in noisy media // *Phys. Rev. D.* — 1994. — Vol. 50. — Pp. 4762–4770.

34. *Burgess C.P., Michaud D.* Neutrino propagation in a fluctuating sun // *Annals of Physics.* — 1997. — Vol. 256. — Pp. 1–38.
35. *Benatti F., Floreanini R.* Dissipative neutrino oscillations in randomly fluctuating matter // *Phys. Rev. D.* — 2005. — Vol. 71. — P. 013003.
36. *Dvornikov M.* Interaction of supernova neutrinos with stochastic gravitational waves // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Vol. 104, no. 4. — P. 043018.
37. *Akita K., Niibo M.* Updated constraints and future prospects on majoron dark matter // *J. High Energ. Phys.* — 2023. — Vol. 2023, no. 132.
38. *Garcia-Cely C., Heeck J.* Neutrino Lines from majoron dark matter // *JHEP.* — 2017. — Vol. 05. — P. 102.
39. *Heeck J., Patel H. H.* Majoron at two loops // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Vol. 100. — P. 095015.
40. *Lichkunov A., Popov A., Studenikin A.* Three-flavor neutrino oscillations in a magnetic field // *International Journal of Modern Physics A.* — 2026. — Vol. 41, no. 02. — P. 2650015.
41. *Popov A., Studenikin A.* Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Vol. 103, no. 11. — P. 115027.
42. *Popov A., Studenikin A.* Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation // *Phys. Part. Nuclei Lett.* — 2024. — Vol. 21. — P. 430–433.
43. *Wolfenstein L.* Neutrino oscillations in matter // *Phys. Rev. D.* — 1978. — Vol. 17. — Pp. 2369–2374.
44. *De Romeri V. et al.* Neutrino oscillation bounds on quantum decoherence // *JHEP.* — 2023. — Vol. 09. — P. 097.
45. *Brune T., Pas H.* Massive majorons and constraints on the majoron-neutrino coupling // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Vol. 99. — P. 096005.
46. *Foster J. W., Rodd N. L., Safdi B. R.* Revealing the dark matter halo with axion direct detection // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 97. — P. 123006.
47. *Wang B. et al.* Detecting extragalactic axion-like dark matter with polarization measurements of fast radio bursts // *Commun. Phys.* — 2025. — Vol. 8, no. 1. — P. 130.
48. *Ternes C. A., Pagliaroli G., Villante F. L.* SN1987A bounds on neutrino quantum decoherence // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Vol. 112, no. 6. — P. 063058.

49. *Schive H., Chiueh T., Broadhurst T.* Cosmic structure as the quantum interference of a coherent dark wave // *Nature Phys.* — 2014. — Vol. 10. — Pp. 496–499.
50. *Centers G. P. et al.* Stochastic fluctuations of bosonic dark matter // *Nature Commun.* — 2021. — Vol. 12, no. 1. — P. 7321.
51. *Boddy K. K., Dror J. A., Lam A.* Ultralight dark matter statistics for pulsar timing detection // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 135. — P. 101001.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова»

Личкунов Алексей Андреевич

Нейтрино в теориях с аксионо-подобными частицами

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 _____