

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Лазарев Федор Михайлович

**Электромагнитные свойства нейтрино в рассеянии
нейтрино на нуклонах и ядрах**

Специальность 1.3.3.
Теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Константин Алексеевич Кузаков**,
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Дворников Максим Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн имени
Н.В. Пушкова Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Рубцова Ольга Андреевна,
доктор физико-математических наук,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Научно-иссле-
довательский институт ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына, отдел физики атомного
ядра, Лаборатория теории атомного ядра,
старший научный сотрудник

Григорьев Александр Валентинович
кандидат физико-математических наук,
доцент,
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский универси-
тет), Кафедра теоретической физики имени
Ландау, доцент

Защита состоится “2” апреля 2026 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, Дом 1, стр. 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/3780>.

Автореферат разослан “__” _____ 2026

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

П.А.Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Экспериментально обнаруженные осцилляции нейтрино — одно из явлений, явно указывающее на новую физику, а именно на наличие ненулевых масс нейтрино, считавшиеся безмассовыми в рамках Стандартной модели. Поэтому в настоящее время физика нейтрино является бурно развивающейся областью физики элементарных частиц.

Теории, описывающие различные механизмы возникновения массы у нейтрино, также предсказывают и новые взаимодействия, не описываемые Стандартной моделью. Поэтому исследования свойств нейтрино — это изучение нейтринных взаимодействий, которые могут проявляться как в осцилляциях, так и в процессах рассеяния нейтрино. Также, поскольку в рамках Стандартной модели нейтрино участвует только в слабых взаимодействиях, нейтринные пучки являются как и инструментом исследования структуры частиц мишени в процессах рассеяния нейтрино, так и отдельным каналом, несущим определенную информацию об источнике нейтрино.

На данный момент действуют или находятся в процессе подготовки большое количество экспериментов, целью которых является исследование свойств нейтрино, прецизионная проверка Стандартной модели, а также поиск новой физики. Особый интерес представляют эксперименты на основе процесса упругого рассеяния нейтрино на ядре ($CE\nu NS$), такие как COHERENT, Dresden-II, CONUS, CONNIE, Red-100 и др., так как когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядре является новым инструментом по детектированию нейтрино. Также в настоящее время на базе Национального центра физики и математики (НЦФМ) в г. Саров готовится эксперимент SATURNE по первой в мире регистрации процесса когерентного упругого рассеяния нейтрино на атоме ($CE\nu AS$).

Состояние научной разработки темы.

В исходной формулировке Стандартной модели нейтрино являются безмассовыми частицами и, как следствие, в этом случае нет места для смешивания и осцилляций нейтрино, что противоречит экспериментам. Поэтому уже сейчас известно, что Стандартная модель должна быть расширена до более общей теории, в частности, из-за нейтрино, которые являются единственными частицами, проявляющими экспериментально хорошо подтвержденные свойства за пределами Стандартной модели.

Одно из фундаментальных следствий ненулевой массы нейтрино — это наличие у нейтрино электромагнитных свойств, которые не могут быть описаны в рамках Стандартной модели взаимодействия частиц и которые допускают прямое электромагнитное взаимодействие нейтрино с электромагнитными полями и заряженными частицами или с частицами,

имеющими магнитные моменты. По этой причине изучение электромагнитных свойств нейтрино открывает окно в новую физику [1].

Среди многочисленных выполненных к настоящему времени экспериментов, целью которых является изучение электромагнитных свойств нейтрино, стоит указать на два эксперимента, в которых были получены наиболее жесткие значения ограничения на магнитный момента и миллизаряд нейтрино.

Это, прежде всего, российский эксперимент GEMMA по детектированию реакторных антинейтрино на Калининской атомной станции. Для регистрации событий электромагнитного рассеяния реакторных антинейтрино на электронах используется низкофоновый детектор из сверхчистого германия. Первые результаты эксперимента GEMMA были представлены в 2007 году, а начиная с 2012 года полученные ограничения сверху на магнитный момент в данном проекте являются одними из лучших в мире и регулярно включаются “Международной коллаборацией по свойствам элементарных частиц” (Particle Data Group Collaboration) в “Обзор по физике элементарных частиц” (см., в том числе, последний выпуск [2]). Последнее (наиболее жесткое) ограничение сверху на магнитный момент нейтрино эксперимента GEMMA равно величине 2.9×10^{-11} магнетонов Бора [3]. Также в работе [4] (ее исправления [5]) был рассчитан вклад в сечение рассеяния за счет возможного ненулевого миллизаряда нейтрино и с использованием данных эксперимента GEMMA получено лучшее в мире ограничение на миллизаряд нейтрино для реакторных нейтрино на уровне 1.5×10^{-12} элементарного заряда.

В другом эксперименте в подземной лаборатории в Гран Сассо (Италия) международной коллаборацией XENON при регистрации потока солнечных нейтрино 8-тонным детектором на основе жидкого и газообразного ксенона в 2022 году получено значение верхней границы магнитного момента солнечных нейтрино 6.4×10^{-12} магнетонов Бора [6]. Данный результат также включен в указанные выше “Обзоры по физике элементарных частиц”.

Стоит особо отметить проведенное недавно измерение процесса $SE\nu NS$ [7], которое является важнейшим новым результатом в фундаментальной физике элементарных частиц, открывающим новое направление исследований свойств нейтрино. В частности, на основе данных $SE\nu NS$ экспериментов COHERENT и Dresden-II, уже были получены новые ограничения на зарядовые радиусы нейтрино [8–11]. Полученные ограничения на зарядовые радиусы нейтрино как на важные характеристики нейтрино включены в перечень основных свойств элементарных частиц, содержащиеся в “Обзорах по физике элементарных частиц” [2; 12–15]. Также на Калининской атомной станции как продолжение проекта GEMMA в 2021 году завершилась подготовка нового эксперимента νGen , целью которого

является на основе использования аналогичных проекту GEMMA принципов получить более жесткое ограничение сверху на величину магнитного момента нейтрино, а также провести новое измерение когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядре. Первые данные по рассеянию реакторных нейтрино в эксперименте ν Gen были опубликованы в 2022 году [16].

Ожидается, что в рамках исследовательской программы международного эксперимента JUNO (Китай), который только недавно начал набор данных, будет возможным также повысить чувствительность к величине магнитного момента нейтрино.

Наконец, на базе НЦФМ в г. Саров готовится эксперимент по первой в мире регистрации процесса CEvAS. Цель эксперимента заключается, во-первых, в проверке Стандартной модели при беспрецедентно низких энергиях и, во-вторых, в поиске электромагнитных и нестандартных взаимодействий нейтрино с прежде недостижимой чувствительностью. Последнее, в частности, позволит достичь рекордного ограничения на величину магнитного момента нейтрино (почти на два порядка лучше существующих в настоящее время) [17; 18].

Объектом исследования диссертационной работы являются фундаментальные свойства нейтрино, в частности их электромагнитные взаимодействия. **Предметом** диссертационной работы являются процессы рассеяния нейтрино на нуклонах и ядра.

Целью диссертационной работы является описание процессов упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах с учетом нейтринных электромагнитных характеристик и спин-флейворных осцилляций на базе источник-детектор, учета слабых нейтральных и электромагнитных характеристик частиц мишени, связанных с их внутренней структурой.

Для достижения поставленной цели были решены нижеследующие задачи.

- 1) Разработка формализма для описания произвольного, в том числе смешанного, спин-флейворного in -состояния рассеяния нейтрино, учитывающего эффект флейворных и спиновых осцилляций нейтрино на базе источник-детектор.
- 2) Описание слабых нейтральных и электромагнитных взаимодействий нуклонов в терминах формфакторов с точностью, отвечающей требованиям текущих и готовящихся экспериментов.
- 3) Описание слабых нейтральных и электромагнитных взаимодействий ядер с нулевым спином в терминах формфакторов с точностью, отвечающей требованиям текущих и готовящихся экспериментов.
- 4) Вывод аналитических выражений для сечения упругого рассеяния нейтрино на нуклоне с учетом нейтринных электромагнитных

характеристик и спин-флейворных осцилляций на базе источник-детектор, а также с учетом слабых нейтральных и электромагнитных характеристик нуклона, связанных с его внутренней структурой.

- 5) Вывод аналитических выражений для сечения упругого рассеяния на ядре с нулевым спином с учетом нейтринных электромагнитных характеристик и спин-флейворных осцилляций на базе источник-детектор, а также с учетом слабых нейтральных и электромагнитных характеристик ядра, связанных с его внутренней структурой.
- 6) Проведение численного моделирования вкладов различных электромагнитных характеристик нейтрино, а также эффектов флейворных и спиновых осцилляций нейтрино, в процессы упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах.

Научная новизна:

В рамках развитого формализма впервые показано.

1. Вклады от электромагнитных характеристик нейтрино могут быть ошибочно интерпретированы как странный вклад в аксиальную константу связи нуклона и наоборот. Поэтому, для точного определения природы возможных вкладов требуются измерения дифференциальных сечений в довольно широких диапазонах переданной энергии.
2. Также продемонстрировано, что в каждом из процессов рассеяния нейтрино на нуклоне или на ядре для различных спиновых состояний нейтрино вклады зарядовых радиусов ведут себя одинаково, в то время как вклады анапольных моментов нейтрино ведут себя различно. Ранее отличие видимых в эксперименте возможных вкладов зарядового радиуса и анапольного момента нейтрино в процессы упругого рассеяния нейтрино не обсуждалось.
3. В случае ненулевого магнитного момента и спиновых осцилляций нейтрино появляется ранее не обсуждавшийся ненулевой вклад в дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах, зависящий не только от полярного, но и от азимутального угла импульса отдачи нуклона.

Теоретическая и практическая значимость

Общая теоретическая значимость проведённого исследования заключается в том, что развит формализм для описания эффектов электромагнитного взаимодействия и начального произвольного (смешанного) спин-флейворного состояние нейтрино в процессах упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах. Формализм также позволяет учитывать различные модели описания частиц мишени в терминах слабых нейтральных и электромагнитных формфакторов.

Практическая значимость работы заключается в том, что исследованные в диссертации эффекты важны для моделирования отклика детекторов нейтрино, среди каналов регистрации которых есть процессы упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и/или ядрах. В диссертации продемонстрировано характерное поведение вкладов электромагнитных характеристик нейтрино в рассматриваемые процессы. Обсуждаются их схожесть и различия с предсказаниями Стандартной модели и между собой. На основе результатов диссертации возможно определять характерные проявления исследованных эффектов в реальном детекторе.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались строгие методы современной теоретической физики, в частности квантовой теории поля и теоретического аппарата физики элементарных частиц. Для символьных и численных вычислений использовалась система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Разработанный формализм спин-флейворной матрицы плотности дираковской частицы позволяет учитывать произвольное спин-флейворное состояние нейтрино в процессах нейтринного рассеяния.
- 2) Полученные замкнутые выражения для сечений упругого рассеяния нейтрино на нуклоне учитывают электромагнитные формфакторы как нейтрино, так и электромагнитные и слабые нейтральные формфакторы нуклона, а также произвольное спин-флейворное состояние нейтрино.
- 3) Полученные замкнутые выражения для сечений упругого рассеяния нейтрино на бесспиновом ядре учитывают электромагнитные формфакторы как нейтрино, так и электромагнитные и слабые нейтральные формфакторы ядра, а также произвольное спин-флейворное состояния нейтрино.
- 4) Странный вклад в аксиальную константу взаимодействия нуклона и вклады от диагональных и переходных зарядовых радиусов и анапольных моментов, а также от магнитных моментов нейтрино могут приводить к одинаковым эффектам в сечениях упругого рассеяния нейтрино на нуклонах.
- 5) Исследование сечений упругого рассеяния нейтрино с различной спиновой поляризацией на нуклонах и ядрах дает возможность различить вклады зарядовых радиусов и анапольных моментов нейтрино.
- 6) Исследование сечений упругого рассеяния нейтрино с произвольной спиновой поляризацией и ненулевым магнитным моментом на

нуклонах и ядрах, а также электронах открывает возможность прямого экспериментального наблюдения спиновых осцилляций 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.

Апробация результатов диссертационной работы.

По результатам диссертации были сделаны 15 докладов на российских и международных конференциях:

- 1) “Probe of transverse neutrino spin polarization with the electromagnetic interactions in neutrino scattering on electrons, nucleons and nuclei”, 22nd Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 21-27 августа 2025 (устный доклад).
- 2) “Electromagnetic interactions in neutrino scattering on electrons, nucleons and nuclei as a probe of transverse neutrino spin polarization”, 25rd JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Большие Коты, Россия, 11-18 июля 2025 (устный доклад).
- 3) “Electromagnetic interactions in neutrino scattering on electrons, nucleons and nuclei as a probe of transverse neutrino spin polarization”, The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP’270), Москва, Россия, 30 июня - 5 июля 2025 (устный доклад).
- 4) “Effects of neutrino electromagnetic properties and spin state in elastic neutrino-nucleon scattering”, The 16th International School of Neutrino Physics and Astrophysics, Саров, Россия, 23-27 сентября 2024 (устный доклад).
- 5) “Effects of neutrino electromagnetic properties and spin state in elastic neutrino-nucleon scattering”, LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications, Дубна, Россия, 1-5 июля 2024 (устный доклад).
- 6) “Elastic neutrino-nucleon scattering: The effects of neutrino electromagnetic properties and polarization”, The First Edition of the African Conference on High Energy Physics (ACHEP 2023), Рабат, Марокко, 23-27 октября 2023 (стендовый доклад).
- 7) “Elastic neutrino-nucleon scattering: The effects of neutrino electromagnetic properties and polarization”, The 21st Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 24-30 августа 2023 (стендовый доклад).

- 8) “Electromagnetic effects in elastic neutrino-nucleon and neutrino-nucleus scattering”, 23rd JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Большие Коты, Россия, 11-18 июля 2023 (устный доклад).
- 9) “Effects of neutrino electromagnetic properties and spin state in elastic neutrino-nucleon scattering”, The 14th International School of Neutrino Physics and Astrophysics, Саров, Россия, 18-23 июль 2022 (устный доклад).
- 10) “Elastic neutrino scattering on nuclear systems as a probe of neutrino electromagnetic interactions”, The 41st International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2022), Болонья, Италия, онлайн-конференция, 6-13 июля 2022 (стендовый доклад).
- 11) “Elastic neutrino-nucleon and neutrino-nucleus scattering: The BSM electromagnetic channel”, The XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Сеул, Республика Корея, онлайн-конференция, 30 мая – 4 июня 2020 (стендовый доклад).
- 12) “Electromagnetic effects in elastic neutrino scattering on nucleons and nuclei”, EuCAPT Astroneutrino Theory Workshop 2021, Прага, Чехия, онлайн-конференция, 20 сентября - 1 октября 2021 (устный доклад).
- 13) “Electromagnetic effects in elastic neutrino scattering on nucleons and nuclei”, 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2021), Валенсия, Испания, онлайн-конференция, 26 августа – 3 сентября 2021 (стендовый доклад).
- 14) “Neutrino electromagnetic interactions in elastic neutrino scattering on nucleons and nuclei”, The European Physical Society conference on high energy physics 2021 (EPS-HEP 2021), Германия, онлайн-конференция, 26-30 июля 2021 (стендовый доклад).
- 15) “Electromagnetic neutrino interactions in elastic neutrino-proton scattering”, 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020), Прага, Чехия, онлайн-конференция, 28 июля - 6 августа 2020 (стендовый доклад).

Публикации.

По теме диссертации было опубликовано 6 работ [A1—A6] в изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М. В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

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 105 страниц, она включает 15 рисунков. Список литературы состоит из 167 наименований.

Основное содержание работы

В **Первой главе** представлен обзор современных представлений о свойствах нейтрино в Стандартной модели (СМ) и за ее пределами. Рассмотрены механизмы генерации массы нейтрино, включая дираковский и майорановский сценарии. Подчеркивается необходимость введения правокиральных нейтрино. Обсуждаются электромагнитные свойства нейтрино: магнитные и дипольные моменты, зарядовые радиусы и анапольные моменты, а также экспериментальные ограничения на них. Приведен обзор различных каналов взаимодействия нейтрино в детекторах современных и будущих экспериментов.

Во **второй главе** разработан общий формализм для описания упругого рассеяния нейтрино. В общем виде представлен вывод вершины взаимодействия фермионов со спином $\frac{1}{2}$ с векторным полем в однобозонном приближении. На основе этого записаны электромагнитные вершины нейтрино и нуклона и слабая нейтральная вершина нуклона

$$\begin{aligned}\Lambda_{\mu}^{(EM;\nu)fi}(q) &= (\gamma_{\mu} - q_{\mu}\not{q}/q^2)[f_Q^{fi}(q^2) + f_A^{fi}(q^2)q^2\gamma_5] - \\ &\quad - i\sigma_{\mu\nu}q^{\nu}[f_M^{fi}(q^2) + if_E^{fi}(q^2)\gamma_5], \\ \Lambda_{\mu}^{(EM;N)}(q) &= \gamma_{\mu}F_Q^N(q^2) - \frac{i}{2m_N}\sigma_{\mu\nu}q^{\nu}F_M^N(q^2) + \\ &\quad + \frac{1}{2m_N}\sigma_{\mu\nu}q^{\nu}\gamma_5F_E^N(q^2) - (q^2\gamma_{\mu} - q_{\mu}\not{q})\gamma_5\frac{F_A^N(q^2)}{m_N^2}, \\ \Lambda_{\mu}^{(NC;N)}(q) &= \gamma_{\mu}F_1^N(q^2) - \frac{i}{2m_N}\sigma_{\mu\nu}q^{\nu}F_2^N(q^2) - \\ &\quad - \gamma_{\mu}\gamma_5G_A^N(q^2) + \frac{1}{m_N}G_P^N(q^2)q^{\mu}\gamma_5,\end{aligned}$$

где f_Q^{fi} , f_A^{fi} , f_M^{fi} и f_E^{fi} — соответственно, зарядовые, анапольные, магнитные и электрические формфакторы нейтрино диагонального ($f = i$) и переходного ($f \neq i$) типов в массовом базисе. $F_{Q,M,E,A}$ — соответственно зарядовый, магнитный, электрический и анапольный формфакторы для протона ($N = p$) и нейтрона ($N = n$) и F_1^N , F_2^N , G_A^N , и G_P^N — соответственно дираковский, паулиевский, аксиальный и псевдоскалярный слабые нейтральные формфакторы нуклона. Далее показана взаимосвязь слабых нейтральных и электромагнитных формфакторов нуклона и введены параметризации, используемые в численных расчетах.

На основе нуклонных токов построены формфакторы для бесспиновых ядер нерелятивистских скоростей

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_Q(\mathbf{q}) &= \int d^3r e^{i(\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})} \langle 00 | \sum_{a=1}^A Q_a \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) | 00 \rangle, \\ \mathcal{F}_1(\mathbf{q}) &= \int d^3r e^{i(\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})} \langle 00 | \sum_{a=1}^A g_V^a \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) | 00 \rangle,\end{aligned}\quad (1)$$

где первые Z слагаемых в суммах относятся к протонам, а остальные $N = A - Z$ к нейтронам, поэтому $Q_a = 1$, $g_V^a = g_V^p = \mathcal{F}_1^p(0)$ — электрический заряд и слабая нейтральная векторная константа связи протона при $a \leq Z$ соответственно, а при $a > Z$ $Q_a = 0$, $g_V^a = g_V^n = \mathcal{F}_1^n(0)$ — те же характеристики нейтрона. $|00\rangle$ обозначает основное состояние ядра с нулевым спином.

Впервые введено описание произвольного спин-флейворного состояния падающего нейтрино в терминах спин-флейворной матрицы плотности

$$\rho_{ij} = \frac{1}{2} \not{k} \left(\tilde{\rho}_{ij} - \zeta_{ij}^{\parallel} \gamma_5 + (\zeta_{ij}^{\perp} \cdot \gamma_{\perp}) \gamma_5 \right), \quad (2)$$

где $\tilde{\rho}_{ij} = \frac{1}{2E_{\nu}} \text{tr}(\rho_{ij} \gamma^0)$ представляет собой приведенную матрицу плотности в пространстве масс нейтрино. ζ_{ij}^{\parallel} и ζ_{ij}^{\perp} — $\zeta_{ij}^x e_x + \zeta_{ij}^y e_y$, где $\{e_x, e_y, \mathbf{k}/E_{\nu}\}$ образуют базис 3-векторов, являются матрицами продольных (\parallel) и поперечных (\perp), относительно импульса нейтрино \mathbf{k} , диагональных ($i = j$) и недиагональных ($i \neq j$) компонент спиновой поляризации в системе покоя нейтрино. Если есть состояние с нулевой массой нейтрино, то диагональные и переходные компоненты ζ^{\perp} включающие это состояние исчезают.¹ Таким образом, матрица плотности (2) содержит информацию обо всех компонентах спина нейтрино, так что, например, $\frac{1}{2E_{\nu}} \text{tr}(\rho_{ij} \gamma^0 \frac{1}{2} \Sigma) = \frac{1}{2} \zeta_{ij}^{\parallel} \frac{\mathbf{k}}{E_{\nu}}$ являются значениями оператора спина, усредненными по спиновым состояниям нейтрино в лабораторной системе отсчета (имеется только продольная часть, как и должно быть для ультрарелятивистского предела). Но при этом поперечные компоненты спина остаются наблюдаемыми. Также отметим, что матрица плотности (2) может быть определена с учетом того, что в ультрарелятивистском пределе компоненты спин-флейворной матрицы плотности в массовом базисе, обычно используемой в расчетах осцилляций нейтрино, связаны с компонентами $\frac{1}{4E_{\nu}^2} (u_{k,r'}^{(\nu_i)})^{\dagger} \rho_{ij} \gamma^0 u_{k,r}^{(\nu_j)}$. Такая матрица плотности, действующая на вектор-столбцы в базисе состояний нейтрино $\{(\nu_1^R, \nu_2^R, \nu_3^R), (\nu_1^L, \nu_2^L, \nu_3^L)\}$ может быть представлена как

$$\rho = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \tilde{\rho} + \zeta^{\parallel} & \zeta^x - i\zeta^y \\ \zeta^x + i\zeta^y & \tilde{\rho} + \zeta^{\parallel} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left(\tilde{\rho} \mathbb{1} + (\zeta \cdot \hat{\sigma}) \right), \quad (3)$$

¹Исключается соответствующее правокиральное нейтрино, так как в этом случае его уже можно воспринимать как отдельную независимую частицу.

где $\mathbb{1}$ и матрицы Паули $\hat{\sigma}$ предполагаются блочными, компоненты которых являются матрицами, действующими на массовые состояния.

Далее получены аналитические выражения для дифференциальных сечений рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах с учётом электромагнитных свойств нейтрино и внутренней структуры мишени. Ввиду громоздкости формул в случае рассеяния на нуклоне здесь приводится только случай рассеяния на ядре с нулевым спином

$$\begin{aligned}
\frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{d\sigma^L}{d\Omega} + \frac{d\sigma^R}{d\Omega} + \frac{d\sigma^\perp}{d\Omega}, \\
\frac{d\sigma^K}{d\Omega} &= \frac{2G_F^2 E_\nu^2}{\pi^2} \cos\theta \left[\left(\sin^2\theta - 2\frac{E_\nu}{M} \cos^2\theta \right) C_V^K \right] + \\
&\quad + \frac{\alpha^2}{m_e^2 \cos\theta} \left(1 - 2\frac{E_\nu}{M} \cos^2\theta \right) |\mu_\nu^K|^2 \mathcal{F}_Q^2 \\
\frac{d\sigma^\perp}{d\Omega} &= -\frac{2\sqrt{2}\alpha G_F}{\pi m_e} E_\nu \cos\theta \sin\theta \left(1 - 2\frac{E_\nu}{M} \cos^2\theta \right) \left[C_{\mu_\nu, Z^0}^\perp \mathcal{F}_Q \mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_Q^2 C_{\mu_\nu, Q}^- \right],
\end{aligned} \tag{4}$$

где

$$\begin{aligned}
C_V^K &= \text{Tr} \left[\left(-\mathcal{F}_1 \delta_L^K + \mathcal{F}_Q Q^K \right)^2 \rho^K \right], \\
Q^{L,R} &= \frac{2\sqrt{2}\pi\alpha}{G_F t} (f^Q \mp t f^A), \quad \rho^{L,R} = \frac{1}{2} (\tilde{\rho} \mp \zeta^\parallel), \\
|\mu_\nu^{L,R}|^2 &= \text{Tr} \left[(f^M \pm i f^E) (f^M \mp i f^E) \rho^{L,R} \right], \\
C_{\mu_\nu, Z^0}^\perp &= \text{Re Tr} \left[(f^M + i f^E) \kappa^\dagger e^{i\varphi} \right], \\
C_{\mu_\nu, Q}^\pm &= \text{Re Tr} \left[[Q^L (f^M + i f^E) \pm (f^M + i f^E) Q^R] \kappa^\dagger e^{i\varphi} \right], \\
\kappa_{ij} &= \frac{1}{2} (\zeta_{ij}^x + i \zeta_{ij}^y).
\end{aligned} \tag{5}$$

В **третьей главе** приводятся основные результаты исследования электромагнитных эффектов в упругом рассеянии нейтрино на нуклонах и ядрах. Здесь приведём лишь некоторые иллюстрации, рассмотренных в диссертации случаев. В последней рассматривается влияние диагональных зарядовых радиусов и анапольных моментов нейтрино в рамках Стандартной модели на ядрах ^{40}Ar и ^{132}Xe (например рис. 1), переходных зарядовых радиусов лево- и правоспиральных нейтрино на протонах и ядрах (например рис. 2), переходных эффективных зарядовых радиусов, являющихся определенными комбинациями зарядовых радиусов и анапольных моментов, лево- и правоспиральных нейтрино на протонах и ядрах (например рис. 3) и, наконец, магнитных моментов лево- и правоспиральных нейтрино на протонах и ядрах (например рис. 4). В **четвертой главе** подробно рассмотрены вклады $\frac{d\sigma^\perp}{d\Omega}$ в сечения рассеяния, возникающие при ненулевом

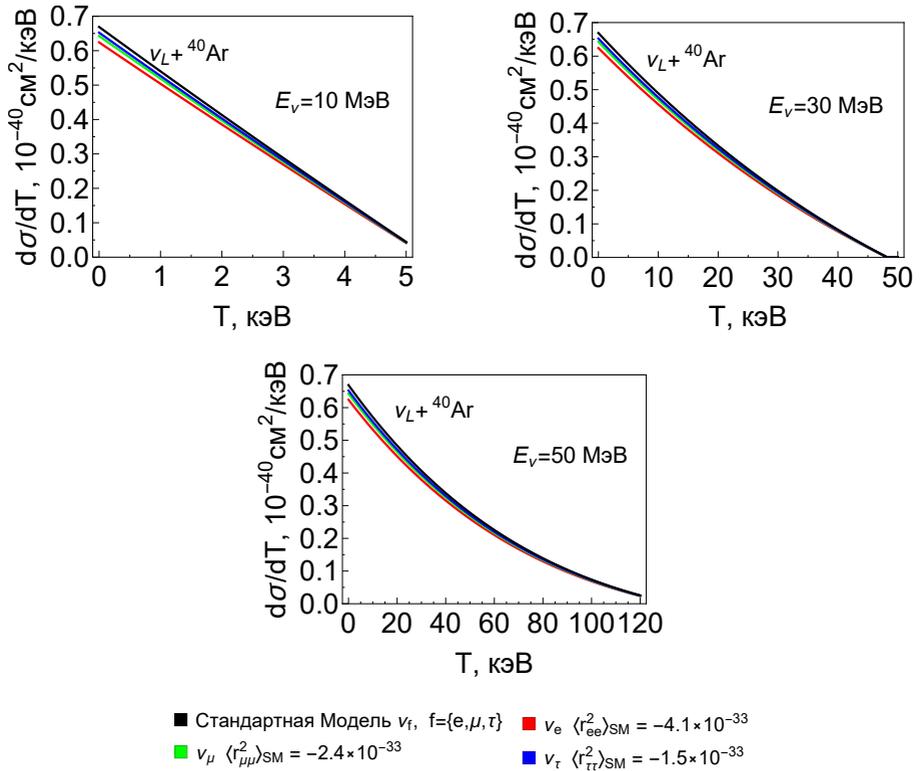


Рисунок 1 — Влияние диагональных зарядов радиусов нейтрино (в см^2) на дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтрино на ядре ^{40}Ar при различных энергиях нейтрино.

магнитном моменте и спиновых осцилляциях нейтрино. В первом разделе этой главы приводятся теоретико-групповое описание релятивистского спина и его поведение в ультрарелятивистском случае. Во втором разделе строятся примеры спин-флейворных матриц плотности прилетающего в детектор нейтрино после спиновых и спин-флейворных осцилляций. Далее, в следующем разделе, подробно обсуждается структура сечения и на каких мишенях эффекты спиновых осцилляций могут быть максимальны и наблюдаемы в реальных экспериментах. Наконец, в четвертом разделе представлены численные результаты, демонстрирующие эти эффекты в упругом рассеянии нейтрино от сверхновых с характерной энергией 10 МэВ на электронах, протонах (рис. 5) и ядрах ^{40}Ar и ^{132}Xe .

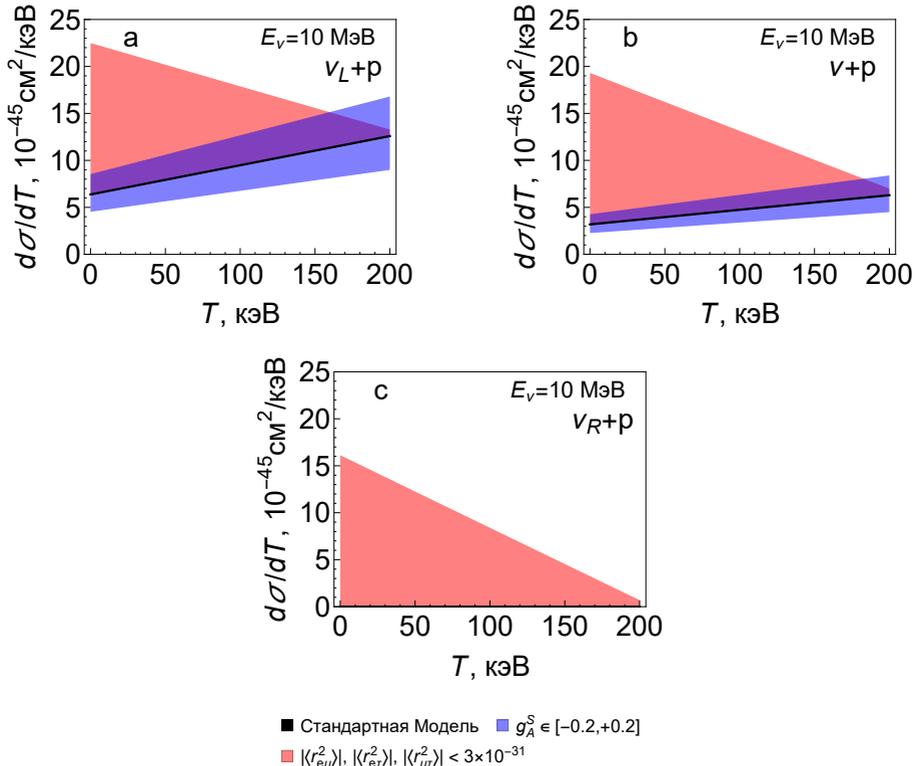


Рисунок 2 — Влияние переходных зарядовых радиусов нейтрино (в см^2) на дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтрино на протоне в случаях различных начальных спиновых состояний нейтрино в детекторе: (a) левоспиральное, (b) полностью неполяризованное и (c) правоспиральное. Энергия нейтрино равна $E_\nu = 10$ МэВ, что типично для сверхновой в качестве источника.

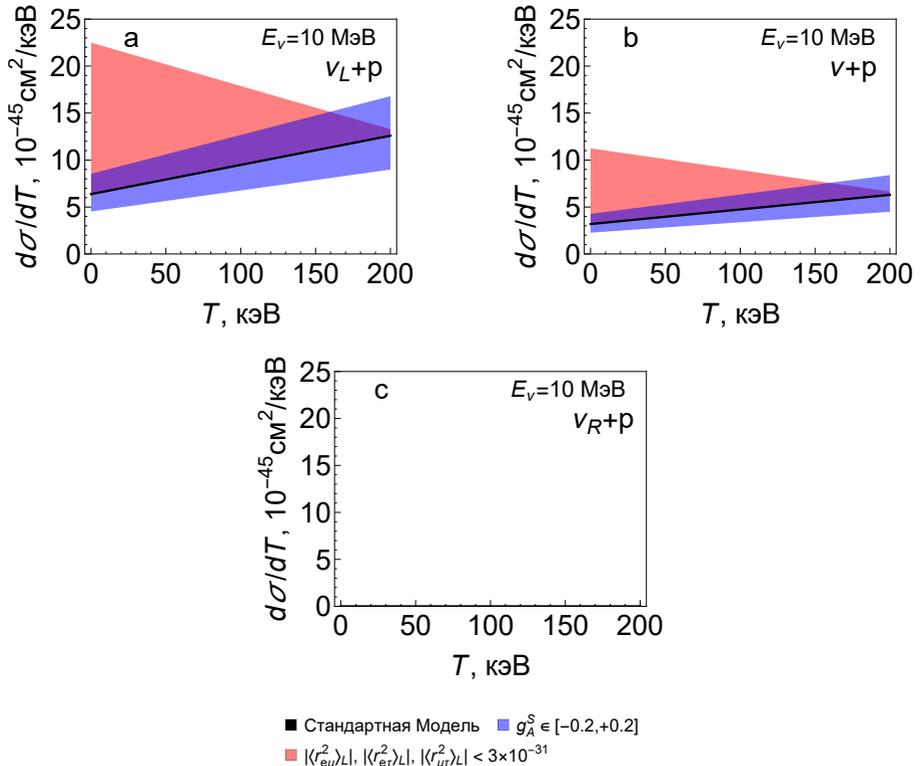


Рисунок 3 — То же, что и на рис. 2, но в случае эффективных переходных зарядовых радиусов нейтрино.

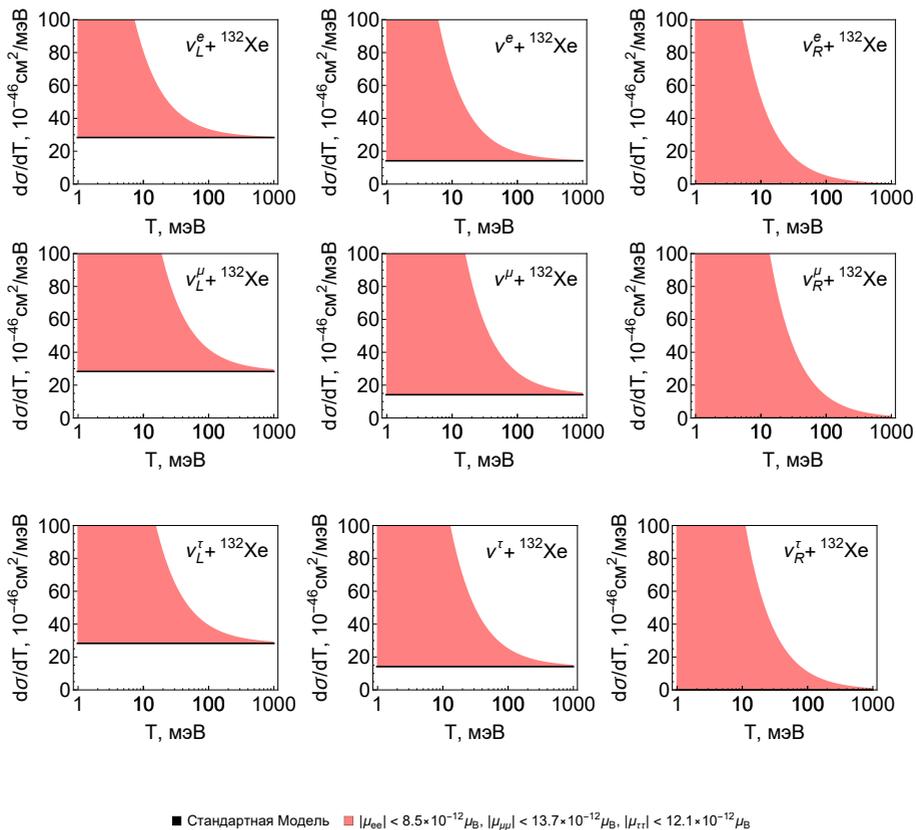


Рисунок 4 — Дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтрино на ядре ^{132}Xe с учетом магнитного момента нейтрино в случаях различных начальных состояний нейтрино в детекторе. Верхняя, средняя и нижняя строки соответствуют электронному, мюонному и таонному флейворам. Левый, средний и правый столбцы соответствуют левоспиральным, полностью неполяризованным и правоспиральным нейтрино.

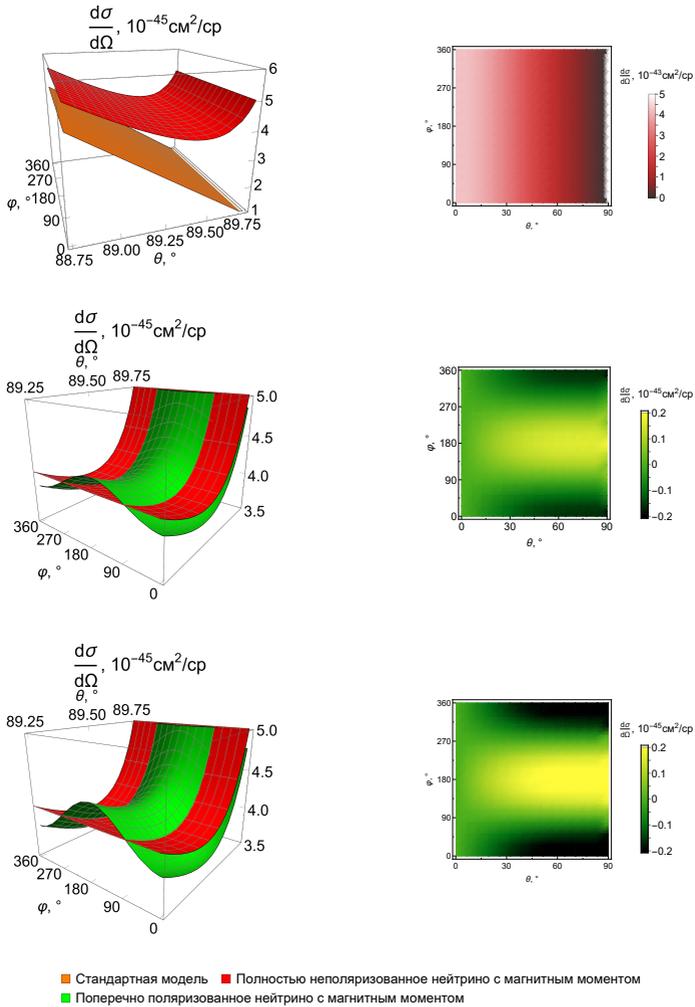


Рисунок 5 — Угловое дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтрино на протоне в случаях различных начальных спиновых состояний нейтрино в детекторе. В первой строке на 3D-графике представлены сечения для полностью неполяризованных нейтрино (i) в рамках СМ и (ii) с учетом магнитных моментов нейтрино $10^{-11} \mu_B$, а двумерный график плотности показывает только последнее поперечное сечение. Во второй строке на 3D графике сравниваются поперечные сечения, учитывающие магнитные моменты нейтрино $10^{-11} \mu_B$ в случаях полностью неполяризованных и поперечно поляризованных нейтрино, тогда как график плотности показывает разницу между этими сечениями. Наконец, третья строка такая же, как и вторая, но с учетом влияния значений СМ зарядовых радиусов и анапольных моментов нейтрино.

Заключение

Таким образом основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

- 1) Разработано новое описание произвольного спин-флейворного состояния нейтрино в терминах спин-флейворной матрицы плотности для дираковской частицы. Это позволяет учитывать эффекты не только, как обычно, флейворных, но и спиновых осцилляций нейтрино на базе источник-детектор.
- 2) Получены аналитические выражения для сечений упругого рассеяния нейтрино на нуклоне с учетом как электромагнитных формфакторов нейтрино, так и электромагнитных и слабых нейтральных формфакторов нуклона, а также произвольного спин-флейворного состояния нейтрино. Соответствующий формализм может быть также использован в случае упругого рассеяния нейтрино на ядре со спином $1/2$.
- 3) Получены аналитические выражения для сечений упругого рассеяния нейтрино на бесспиновом ядре с учетом как электромагнитных формфакторов нейтрино, так и электромагнитных и слабых нейтральных формфакторов ядра, а также произвольного спин-флейворного состояния нейтрино.
- 4) Проведены численные расчеты сечения рассеяния нейтрино на нуклонах, которые демонстрируют перекрытие странного вклада в аксиальную константу взаимодействия нуклона с вкладами от таких электромагнитных характеристик нейтрино, как диагональные и переходные зарядовые радиусы и анапольные моменты, а также магнитные моменты.
- 5) Проведены численные расчеты сечения рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах ^{40}Ar и ^{132}Xe , демонстрирующие поведение вкладов зарядовых радиусов и анапольных моментов нейтрино для лево- и правоспиральных нейтрино. На этой основе показано, что существует возможность экспериментально различить эти два набора электромагнитных характеристик нейтрино.
- 6) Проведены численные расчеты сечения рассеяния нейтрино на электронах, нуклонах и ядрах ^{40}Ar и ^{132}Xe , демонстрирующие эффект азимутальной асимметрии в угловом распределении частиц отдачи при ненулевом магнитном моменте нейтрино и суперпозиции спиральных состояний нейтрино, которая возникает вследствие спиновых или спин-флейворных осцилляций нейтрино. Это открывает принципиальную возможность непосредственного наблюдения спиновых осцилляций нейтрино в эксперименте.

Публикации автора по теме диссертации

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

- A1. Neutrino Scattering on Superfluid Helium with Account for Neutrino Electromagnetic Properties and Collective Effects / К. Kouzakov, **Lazarev, Fedor**, A. Studenikin, M. Vyalkov, A. Yukhimchuk // Physics of Atomic Nuclei. — 2025. — Vol. 88, no. 3. — Pp. 556—559. — DOI: 10.1134/S1063778825600836. — Импакт-фактор 0.420 (JIF), Личный вклад 0.18/0.46 п. л.
- A2. *Kouzakov, K. A.* Electromagnetic interactions in elastic neutrino-nucleon scattering / К. А. Kouzakov, **Lazarev, Fedor M.**, A. I. Studenikin // Physical Review D. — 2025. — Vol. 111, no. 3. — P. 035025. — DOI: 10.1103/PhysRevD.111.035025. — Импакт-фактор 5.296 (JIF), Личный вклад 1.28/1.50 п. л.
- A3. *Kouzakov, K. A.* Effects of neutrino electromagnetic properties and spin polarization in elastic neutrino–nucleon scattering / К. А. Kouzakov, **Lazarev, Fedor M.**, A. I. Studenikin // International Journal of Modern Physics E. — 2025. — Vol. 34, no. 02/03. — P. 2541001. — DOI: 10.1142/S0218301325410010. — Импакт-фактор 1.174 (JIF), Личный вклад 1.02/1.16 п. л.
- A4. *Kouzakov, K.* Electromagnetic Contribution to Scattering of Arbitrarily Polarized Neutrinos on Nucleons / К. Kouzakov, **Lazarev, F.**, A. Studenikin // Moscow University Physics Bulletin. — 2024. — Vol. 79, issue 1, supplement. — Pp. 296—299. — DOI: 10.3103/S0027134924701820. — Импакт-фактор 0.159 (SJR), Личный вклад 0.42/0.46 п. л.
- A5. *Кузаков, К. А.* Упругое рассеяние нейтрино на нуклонах и электромагнитные свойства нейтрино / К. А. Кузаков, **Лазарев, Ф. М.**, А. И. Студеникин // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2023. — Т. 78, № 6. — С. 2360203. — DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2360203. — Импакт-фактор 0.519 (РИНЦ), Личный вклад 0.59/0.69 п. л.
Kouzakov, K. A. Elastic Neutrino–Nucleon Scattering and Electromagnetic Properties of Neutrinos / К. А. Kouzakov, **Lazarev, F. M.**, A. I. Studenikin // Moscow University Physics Bulletin. — 2023. — Vol. 78, no. 6. — Pp. 797—803. — DOI: 10.3103/S0027134923060103. — Импакт-фактор 0.159 (SJR), Личный вклад 0.69/0.81 п. л.

- A6. *Кузаков, К. А.* Электромагнитные свойства нейтрино в уругом рассеянии нейтрино на протоне / К. А. Кузаков, **Лазарев, Ф. М.**, А. И. Студеникин // Ядерная физика. — 2023. — Т. 86, № 3. — С. 407—415. — DOI: 10.31857/S0044002723030121. — Импакт-фактор 0.357 (РИНЦ), Личный вклад 0.90/1.04 п. л.
Kouzakov, K. A. Neutrino Electromagnetic Properties in Elastic Neutrino-Proton Scattering / К. А. Kouzakov, **Lazarev, F. M.**, А. I. Studenikin // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Vol. 86, no. 3. — Pp. 257—265. — DOI: 10.1134/S1063778823030122. — Импакт-фактор 0.420 (JIF), Личный вклад 0.90/1.04 п. л.

Иные публикации

- A7. *Kouzakov, K.* Elastic Neutrino-Nucleon Scattering: The Effects of Electromagnetic Properties and Polarization / К. Kouzakov, **Lazarev, Fedor, A.** Studenikin // Springer Proceedings in Physics. — 2025. — Vol. 425. — Pp. 237—240. — DOI: 10.1007/978-3-031-88933-2_40. — Импакт-фактор 0.119 (SJR), Личный вклад 0.31/0.35 п. л.
- A8. *Kouzakov, K.* Neutrino electromagnetic interactions in elastic neutrino-nucleus scattering / К. Kouzakov, **Lazarev, Fedor, A.** Studenikin // Proceedings of Science. — 2022. — Vol. 398. — P. 203. — DOI: 10.22323/1.398.0203. — Импакт-фактор 0.126 (SJR), Личный вклад 0.39/0.46 п. л.
- A9. *Kouzakov, K.* Electromagnetic effects in elastic neutrino scattering on nucleons / К. Kouzakov, **Lazarev, Fedor, A.** Studenikin // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2156. — P. 012225. — DOI: 10.1088/1742-6596/2156/1/012225. — Импакт-фактор 0.187 (SJR), Личный вклад 0.41/0.46 п. л.
- A10. *Kouzakov, K.* Electromagnetic neutrino interactions in elastic neutrino-proton scattering / К. Kouzakov, **Lazarev, Fedor, A.** Studenikin // Proceedings of Science. — 2021. — Vol. 390. — P. 205. — DOI: 10.22323/1.390.0205. — Импакт-фактор 0.126 (SJR), Личный вклад 0.29/0.35 п. л.

Список литературы

1. *Giunti, C.* Neutrino electromagnetic interactions: A window to new physics / C. Giunti, A. Studenikin // Rev. Mod. Phys. — 2015. — Т. 87, вып. 2. — С. 531—591. — DOI: 10.1103/RevModPhys.87.531.
2. Review of Particle Physics / S. Navas [и др.] // Phys. Rev. D. — 2024. — Т. 110, вып. 3. — С. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001.

3. The results of search for the neutrino magnetic moment in GEMMA experiment / A. Buda [и др.] // *Adv. High Energy Phys.* — 2012. — Т. 2012. — С. 350150. — DOI: 10.1155/2012/350150.
4. *Studenikin, A.* New bounds on neutrino electric millicharge from limits on neutrino magnetic moment / A. Studenikin // *Europhys. Lett.* — 2014. — Т. 107, № 2. — С. 21001. — DOI: 10.1209/0295-5075/107/21001. — Исправления в [5].
5. *Studenikin, A.* Erratum: New bounds on neutrino electric millicharge from limits on neutrino magnetic moment / A. Studenikin // *Europhys. Letters.* — 2014. — Т. 107, № 3. — С. 39901. — DOI: 10.1209/0295-5075/107/39901.
6. Search for new physics in electronic recoil data from XENONnT / E. Aprile [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2022. — Т. 129, № 16. — С. 161805. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.161805.
7. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering / D. Akimov [и др.] // *Science.* — 2017. — Т. 357, № 6356. — С. 1123–1126. — DOI: 10.1126/science.aao0990.
8. Neutrino charge radii from COHERENT elastic neutrino-nucleus scattering / M. Cadeddu [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Т. 98, вып. 11. — С. 113010. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.113010. — Исправления в [9].
9. Erratum: Neutrino charge radii from COHERENT elastic neutrino-nucleus scattering [*Phys. Rev. D* 98, 113010 (2018)] / M. Cadeddu [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Т. 101, вып. 5. — 059902(E). — DOI: 10.1103/PhysRevD.101.059902.
10. Physics results from the first COHERENT observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon and their combination with cesium-iodide data / M. Cadeddu [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Т. 102, вып. 1. — С. 015030. — DOI: 10.1103/PhysRevD.102.015030.
11. Impact of the Dresden-II and COHERENT neutrino scattering data on neutrino electromagnetic properties and electroweak physics / M. Atzori Corona [и др.] // *J. High Energy Phys.* — 2022. — Т. 2022, № 9. — С. 164. — DOI: 10.1007/JHEP09(2022)164.
12. *Patrignani, C.* Review of Particle Physics / C. Patrignani // *Chinese Physics C.* — 2016. — Т. 40, № 10. — С. 100001. — DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
13. Review of Particle Physics / M. Tanabashi [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Т. 98, вып. 3. — С. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001.

14. Review of Particle Physics / P. A. Zyla [и др.] // PTEP. — 2020. — Т. 2020, № 8. — С. 083C01. — DOI: 10.1093/ptep/ptaa104.
15. Review of Particle Physics / R. Workman [и др.] // PTEP. — 2022. — Т. 2022. — С. 083C01. — DOI: 10.1093/ptep/ptac097.
16. First results of the ν GeN experiment on coherent elastic neutrino-nucleus scattering / I. Alekseev [и др.] // Phys. Rev. D. — 2022. — Т. 106, вып. 5. — С. L051101. — DOI: 10.1103/PhysRevD.106.L051101.
17. Potentialities of a low-energy detector based on ^4He evaporation to observe atomic effects in coherent neutrino scattering and physics perspectives / A. Studenikin [и др.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Т. 100, № 7. — С. 073014. — DOI: 10.1103/PhysRevD.100.073014.
18. SATURNE: Current status and physics potential / M. Cadeddu [и др.] // Int. J. Mod. Phys. E. — 2024. — Т. 33, № 11. — С. 2441011. — DOI: 10.1142/S0218301324410118.

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

Лазарев Федор Михайлович

Электромагнитные свойства нейтрино в рассеянии нейтрино на нуклонах и
ядрах

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

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

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

Типография _____