

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Лазарева Федора Михайловича
на тему: «Электромагнитные свойства нейтрино в рассеянии нейтрино
на нуклонах и ядрах»
по специальности 1.3.3. Теоретическая физика**

Диссертационная работа Лазарева Ф.М. посвящена развитию теоретического формализма для исследования электромагнитных взаимодействий нейтрино с нуклонами и ядрами, выходящих за рамки Стандартной Модели. Актуальность исследования не вызывает никаких сомнений. Поиск проявлений отклонений свойств нейтрино от предсказываемых в рамках Стандартной Модели является важным этапом развития современной теоретической физики. Такие исследования стали предметом наблюдений многих экспериментальных установок в мире. Непосредственно в связи с темой диссертационной работы можно выделить проекты CEvNS, в которых исследуется когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядрах, а также планируемый в России эксперимент SATURNE по рассеянию нейтрино на атомах. Результаты, полученные в диссертационной работе, будут безусловно востребованы при трактовке современных экспериментов, кроме того, они важны для разработки новых методов детектирования нейтрино.

Научная новизна результатов заключается в первую очередь в развитии нового формализма, позволяющего учесть помимо флейворных осцилляций также спиновые осцилляции нейтрино, прилетающих в детектор. В работе впервые исследованы особенности сечений упругого рассеяния на ядрах в случаях различных спиральностей нейтрино. Положения, выносимые на защиту, полностью обосновываются в проведенном исследовании. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения, при выполнении работы автор продемонстрировал высокий уровень владения

теоретико-полевым подходом и использовал разумные приближения. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав и Заключения. **Во Введении** обсуждаются актуальность исследования, его новизна, описываются поставленные цели и задачи работы, приводятся положения, выносимые на защиту. Здесь также описан личный вклад соискателя.

Первая глава диссертации посвящена детальному описанию современного состояния теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации. В этой главе рассматриваются различные механизмы появления массы нейтрино в случае дираковских и майорановских частиц. Обсуждаются возможные варианты электромагнитного взаимодействия нейтрино с ядрами, атомами и электронами, а также экспериментально определенные на настоящий момент ограничения на магнитный момент нейтрино и его миллизаряд.

Во второй главе диссертации выводятся основные формулы для вершинных функций нейтрино и нуклона для вычисления электромагнитных токов, а также вершинная функция нуклона для вычисления слабого нейтрального тока. Такие вершинные функции представляются в виде комбинаций слагаемых с формфакторами различного типа. При этом формфакторы для ядер с нулевым спином выводятся на основе нуклонных. Также здесь впервые используется формализм матрицы плотности для учета различных спин-флейворных состояний падающего нейтрино. В качестве основного результата приводятся явные выражения для сечений упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах с учетом электромагнитных свойств нейтрино и внутренней структуры мишени.

Третья глава посвящена расчетам сечений упругого рассеяния нейтрино на протоне, а также на ядрах ^{40}Ar и ^{132}Xe . Автор последовательно демонстрирует изменения в сечении, вызванные учетом диагональных зарядовых радиусов нейтрино различных флейворов, недиагональных

(переходных) зарядовых радиусов и анапольных моментов. Здесь рассмотрены случаи, когда электромагнитные эффекты проявляются для нейтрино с различной спиральностью и когда сечение становится нулевым для правоспиральных нейтрино. Также важным является исследование вклада от возможного магнитного момента нейтрино. Показано, что такой вклад растет с уменьшением энергии отдачи.

Наконец, в **четвертой главе** детально рассматривается поперечное сечение упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах в случае учета магнитного момента и различных начальных спиновых состояний нейтрино. Здесь используется теоретико-групповой формализм для релятивистского описания спина. На основе полученных в диссертации выражений сделаны детальные расчеты поперечных сечений упругого рассеяния нейтрино различной поляризации на протоне, ядрах ^{40}Ar и ^{132}Xe , а также на электроны. Впервые выявлена заметная азимутальная асимметрия рассматриваемых сечений. Следует отметить, что этот эффект открывает возможность прямого экспериментального детектирования спин-флейворных осцилляций нейтрино.

В Заключение приводятся основные результаты работы.

Представленная диссертационная работа Ф.М. Лазарева безусловно представляет важное и актуальное исследование, имеющее непосредственную практическую ценность. Исследования выполнены на высоком уровне, что свидетельствует о том, что автор является сформировавшимся специалистом в области теоретической физики. Наиболее значимым результатом является вывод общих явных выражений для сечений рассеяния нейтрино, прилетающих в детектор после спин-флейворных осцилляций. Среди достоинств работы следует также выделить выбор в качестве объекта для практических расчетов нейтрино, приходящих от сверхновых, так как именно для таких источников можно ожидать эффекты, связанные с переворотом спина. Также следует отметить уровень детальной проработки и анализа полученных результатов. Важным

практическим указанием является отмеченное перекрывание вкладов в сечение, возникающих от учета зарядовых радиусов, анапольных моментов и магнитного момента нейтрино, с вкладом от учета странного аксиального формфактора нуклона.

Следует отметить, что диссертация написана четким и ясным языком, расположение материала логично. Основные результаты, полученные в работе, доложены на нескольких международных конференциях и опубликованы в авторитетных журналах.

При прочтении работы не выявлено существенных недостатков. Некоторым недочетом является достаточно лаконичная форма изложения материала, особенно результатов в четвертой главе. Также у оппонента возникли следующие замечания.

1. В первой главе на стр. 30 упоминается выбор знака для средних квадратов зарядовых радиусов разных типов нейтрино, и в сноске дается пояснение, из которого следует, что в литературе встречаются различные варианты выбора этого знака. Желательно подробнее объяснить выбор для данной работы. Также возникает сопутствующий вопрос – влияет ли выбор знака на наблюдаемые, получающиеся в работе.

2. В тексте диссертации встречаются опечатки:

- в формуле (1.31), по-видимому, должна стоять m_W вместо m_τ ;
- на стр.39 в тексте после формулы (2.6) дается ссылка на уравнение (1.3), однако, это номер раздела, в котором приводится нужная формула. По-видимому, имелось в виду уравнение (1.24);
- также есть и несколько опечаток в написании слов.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5

Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Лазарев Федор Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории теории атомного ядра
отдела физики атомного ядра

Научно-исследовательского института ядерной
физики имени Д.В. Скобельцына
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»

Рубцова Ольга Андреевна

23.03.2026

Контактные данные:

тел.:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1 стр.2,
НИИЯФ МГУ, отдел физики атомного ядра
Тел.: +79391818; e-mail: info@sinp.msu.ru

Подпись старшего научного сотрудника НИИЯФ МГУ

О.А. Рубцовой удостоверяю:

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева

23.03.2026