

**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»**

В диссертации развит формализм описания процессов упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах с учётом электромагнитных свойств нейтрино и их произвольного спин-флейворного состояния. В частности, разработано новое описание произвольного спин-флейворного состояния нейтрино в терминах спин-флейворной матрицы плотности дираковской частицы, позволяющее учитывать как флейворные, так и спиновые осцилляции нейтрино на базе источник–детектор. Получены аналитические выражения для сечений упругого рассеяния нейтрино на нуклоне и бесспиновом ядре с учётом электромагнитных формфакторов нейтрино, а также электромагнитных и слабых нейтральных формфакторов нуклона и ядра. Проведено численное моделирование вкладов зарядовых радиусов, анапольных и магнитных моментов нейтрино в дифференциальные сечения рассеяния на протоне и ядрах  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{132}\text{Xe}$ , а также исследованы эффекты азимутальной асимметрии углового распределения частиц отдачи, обусловленные спиновыми осцилляциями нейтрино.

Актуальность исследования электромагнитных свойств нейтрино и влияния их спиновых состояний на процессы рассеяния обусловлена несколькими обстоятельствами. С одной стороны, ненулевые массы нейтрино, установленные экспериментами по осцилляциям, неизбежно влекут за собой наличие у нейтрино электромагнитных характеристик —

магнитных моментов, зарядовых радиусов и анапольных моментов, — которые являются чувствительными зондами физики за пределами Стандартной модели. С другой стороны, в последние годы когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядре ( $CE\nu NS$ ) превратилось в новый мощный инструмент исследования свойств нейтрино. На данный момент действуют или подготавливаются эксперименты COHERENT, Dresden-II, CONUS, Red-100,  $\nu$ Gen, CONNIE и ряд других. Кроме того, в Национальном центре физики и математики (НЦФМ г. Саров) готовится первый в мире эксперимент по регистрации когерентного упругого рассеяния нейтрино на атоме ( $CE\nu AS$ ), который обещает выйти на рекордную чувствительность к магнитному моменту нейтрино. Разработка единого последовательного теоретического аппарата для описания данных процессов, учитывающего как электромагнитные свойства нейтрино, так и внутреннюю структуру мишени, является, таким образом, насущной и актуальной задачей. Практическая ценность диссертации состоит в том, что полученные в ней выражения для сечений рассеяния непосредственно применимы к анализу и интерпретации данных перечисленных выше экспериментов.

Диссертация соискателя составляет объем 105 страниц и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 167 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, приведён обзор экспериментального состояния области, поставлены цели и задачи, сформулированы шесть основных положений, выносимых на защиту, и описана научная новизна результатов.

**В первой главе** представлена физика нейтрино в рамках Стандартной модели и её минимальных расширений: механизмы

генерации массы (дираковский и майорановский сценарии), феноменология осцилляций нейтрино, электромагнитные характеристики нейтрино — магнитные и дипольные моменты, зарядовые радиусы, анапольные моменты — и экспериментальные ограничения на них, а также каналы взаимодействия нейтрино с веществом, включая когерентное упругое рассеяние на ядре.

**Вторая глава** содержит ключевые методологические построения диссертации. Здесь вводятся электромагнитные и слабые нейтральные формфакторы нуклонов и ядер с нулевым спином, развивается оригинальный формализм описания произвольного спин-флейворного состояния нейтрино через матрицу плотности дираковской частицы, а также выводятся общие аналитические выражения для дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтрино на нуклоне и бесспиновом ядре.

**Третья глава** посвящена численному анализу электромагнитных эффектов в сечениях рассеяния. Последовательно рассматриваются вклады диагональных зарядовых радиусов нейтрино в рамках Стандартной модели для ядер  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{132}\text{Xe}$ , переходных зарядовых радиусов и переходных анапольных моментов лево- и правоспиральных нейтрино на протоне и ядрах, а также магнитных моментов нейтрино. В этой главе получен важный результат: вклад электромагнитных характеристик нейтрино перекрывается со странным вкладом в аксиальную константу связи нуклона, что требует проведения измерений в широком диапазоне переданных энергий для разделения этих эффектов. Кроме того, показано, что измерения с нейтрино различной спиральности позволяют различить вклады зарядовых радиусов и анапольных моментов нейтрино.

**Четвёртая глава** посвящена эффектам спиновых осцилляций нейтрино в процессах рассеяния. Вводится групповое описание

релятивистского спина частицы, рассматривается влияние флейворных и спин-флейворных осцилляций на структуру сечений рассеяния на электронах, нуклонах и ядрах. Ключевым результатом главы является предсказание ненулевого вклада в дифференциальное сечение рассеяния, зависящего от азимутального угла импульса отдачи нуклона, который возникает при ненулевом магнитном моменте нейтрино и суперпозиции спиральных состояний — в частности, при поперечной поляризации нейтрино, появляющейся вследствие спин-флейворных осцилляций. Данный эффект азимутальной асимметрии, продемонстрированный на рис. 4.1 и 4.2 для протона,  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{132}\text{Xe}$ , открывает принципиальную возможность прямого экспериментального наблюдения спиновых осцилляций нейтрино.

В заключении систематизированы основные результаты и указана область применимости полученных выражений для анализа данных экспериментов MicroBooNE, XENONnT, JUNO, COHERENT, CONUS, Red-100 и других.

Достоверность и новизна полученных результатов подтверждается публикациями в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также докладами на российских и международных конференциях.

Тем не менее, работа не лишена недостатков, список которых приведён ниже.

1. Между формулами (1.10) и (1.11) пропущен один шаг. Поля  $\nu_{1L}, \dots$ , с помощью которых диагонализуется массовая матрица в (1.10), действительно являются массовыми состояниями. Однако, ниоткуда не следует, что это майорановские частицы. Майорановскими являются состояния  $\nu_{1} = \nu_{1L} + (\nu_{1L})^c, \dots$  Формально,

соотношение (1.11) записано верно, но не в тех полях, которые фигурируют в тексте.

2. Текст разд. 2.1 на стр. 38 и 39 частично дублирует разд. 1.3.
3. Половина стр. 45 пустая.
4. Судя по построению в разд. 2.3 матрица плотности определена для массовых состояний. Однако, в разд. 4.1 утверждается, что данная матрица соответствует частицам с неопределённой массой.
5. В начале разд. 2.4, где определяется матричный элемент рассеяния нейтрино на нуклонах, используется матрица плотности нейтрино. Эта матрица плотности задана в разд. 2.3 в массовом базисе. Однако в разд. 2.4 нигде не фигурируют матрицы смешивания. Возможно они каким-то образом скрыты внутри матриц  $O_{\nu}^{\{M'_J M_J\}}$  в формуле (2.45).

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, определённым пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных 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 Фёдор Михайлович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. — «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник

ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук»

ДВОРНИКОВ Максим Сергеевич

\_\_\_\_\_ «12» марта 2026 г.

Контактные данные: Дворников Максим Сергеевич, доктор физ.-мат. наук,

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.02 — Теоретическая физика.

Адрес: 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН

Тел.: 8(495)8510912; e-mail: [maxdvo@izmiran.ru](mailto:maxdvo@izmiran.ru)