

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
на диссертацию Лучука Станислава Владимировича  
«Квазиупругое взаимодействие мюонных нейтрино заряженным током в экспериментах MiniBooNE и NOvA»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.15 - физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Открытие осцилляций нейтрино послужило мощным толчком к проведению новых экспериментов по измерению параметров нейтринных осцилляций. Цель этих экспериментов — измерить ещё не известные параметры, такие как значение фазы нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, определить иерархии масс нейтрино, а также проверка 3-х флейворной парадигмы. Большинство таких экспериментов проводится и планируется проводить с мощными пучками ускорительных нейтрино, чтобы уменьшить систематическую ошибку до уровня нескольких процентов. Тогда точность измерения параметров осцилляций будет определяться систематическими погрешностями. Уменьшение этих ошибок достигается сравнением спектров событий как функций энергии нейтрино, измеренных на двух детекторах, один из которых находится на близком расстоянии от источника нейтрино, где эффекты осцилляций пренебрежимо малы, а второй на расстоянии нескольких сотен километров, где осцилляционные эффекты максимальны при энергии нейтрино порядка 1 ГэВ.

Однако, даже в этом случае, неопределённости в сечениях процессов квазиупруго-подобного рассеяния нейтрино на ядрах, которое доминирует при этих энергиях, а также в восстановленной энергии нейтрино будут одними из основных источников систематической ошибки при определении параметров осцилляций нейтрино. В связи с этим актуальность диссертации С.В. Лучука, которая посвящена исследованию квазиупругих взаимодействий электронов и нейтрино на ядрах углерода и аргона (кальция) — основных компонентов нейтринных детекторов не вызывает сомнения.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объем диссертации составляет 109 страниц и 31 рисунок. Список литературы содержит 139 наименований.

**Во введении** указывается важность изучения процессов рассеяния лептонов на ядрах вещества. Взаимодействие электронов и нейтрино с

веществом рассматривается в контексте нейтринных экспериментов. Описаны проблемы, затрудняющие изучение этих процессов. Приведена научная новизна данной работы. Поставлены цели и задачи работы для решения проблем, встречающихся в данной тематике. Описана практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена теоретическому обзору взаимодействия электронов и нейтрино на ядрах. Детально проиллюстрирована кинематика процессов рассеяния. Приведены выражения для лептонного и адронного тензоров, а также формулы для дифференциальных сечений, квазиупруго-подобных процессов, выраженные через ядерные функции отклика и соответствующие кинематические коэффициенты. Рассмотрены электромагнитные и слабые форм-факторы нуклонов. Анализируются вклады токов обменных мезонов.

**Во второй главе** детально описана релятивистская модель искаженных волн в импульсном приближении (RDWIA). Эта модель основывается на оболочечной структуре ядра, где часть нуклонов находится в коррелируемых нуклон-нуклонных парах. Рассеяние происходит на одном нуклоне, который находится в общем среднем поле ядра. Учитывается взаимодействие выбитого нуклона с остаточным ядром. Отдельно рассматривается рассеяние на коррелированных парах нуклонов. Приведены параметризации ядерных функций отклика процессов рассеяния на обменных мезонах (MEC). Приводится описание метода для определения аксиального форм-фактора нуклона с использованием измеренных дифференциальных сечений квазиупругого рассеяния нейтрино на ядрах с учётом вкладов 2-х частичных токов обменных мезонов.

**Третья глава** посвящена проверке RDWIA+MEC модели, в которой были включены вклады барионных резонансов, на данных по рассеянию электронов на ядрах углерода, кальция и аргона. Для этого было проведено сравнение ядерных функций отклика и квазиупругих сечений рассеяния электронов. Согласие результатов модели с данными говорит о её надёжности при описании как квазиупругих процессов, так и процессов рассеяния на обменных мезонах. В этой главе исследуется, также, влияние вкладов 2-х частичных токов обменных мезонов и больших аксиальных масс нуклонов на поведение дифференциальных сечений рассеяния нейтрино.

**В четвертой главе** получены значения аксиального форм-фактора нуклона, связанного в ядре углерода, как функции квадрата переданного 4-импульса. Для этого использовались дифференциальные сечения, измеренные в эксперименте MiniBooNE. Определено значение аксиальной массы нуклона, которое хорошо согласуется с современными мировыми данными. Вычислены интегрированные по спектру нейтрино квазиупруго-подобные сечения рассеяния нейтрино на нейтрон при энергиях эксперимента NOvA. Детекторы этого эксперимента имеют сложный химический состав, поэтому здесь можно измерить только усреднённые сечения рассеяния нейтрино на нейтрон. Для экспериментов MiniBooNE и NOvA оценен вклад обменных мезонов.

**В заключении** перечислены основные результаты данной работы.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

- впервые использована объединённая модель RDWIA+MEC для расчётов квазиупруго-подобных сечений рассеяния электронов и нейтрино на ядрах
- впервые проведён анализ эффектов большой аксиальной массы нуклона и вкладов обменных мезонов на поведение дифференциальных сечений рассеяния нейтрино
- впервые в объединённой модели RDWIA+MEC определён аксиальный форм-фактор нуклона как функция квадрата переданного 4-х импульса и определено значение аксиальной массы нуклона
- получена оценка сечений квазиупруго-подобных процессов при энергиях эксперимента NOvA

**Научная и практическая значимость** работы состоит в том, что релятивистская модель искажённых волн в импульсном приближении с учетом вкладов токов обменных мезонов успешно описывает экспериментальные данные по рассеянию электронов и нейтрино. Данная модель может быть использована в будущих нейтринных экспериментах для вычисления квазиупруго-подобных сечений. Помимо этого, в рамках данной модели и данных эксперимента MiniBooNE получено значение аксиальной массы нуклона.

**Личный вклад автора** диссертации в представленное исследование является определяющим. Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии.

**Достоверность** полученных результатов детально продемонстрирована в работе. Это следует из согласия полученных результатов о квазиупругом рассеянии электронов и нейтрино с экспериментальными данными в широкой кинематической области. Помимо этого, значение аксиальной массы нуклона, определённое в данной работе согласуется с результатами других исследований.

В целом, диссертационная работа С. В. Лучука представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Выводы и заключения грамотно сформулированы и обоснованы. Автореферат полно и корректно отражает содержание диссертации. Результаты работы, вынесенные на защиту, докладывались на международных конференциях и опубликованы в международных научных журналах, входящих в список ВАК.

Вместе с тем работа не лишена некоторых недочётов и упущений:

- в разделе 4.1 на рисунке 16 (б) приведены аксиальные форм-фактора нуклона, полученные с учётом и без учёта вклада обменных мезонов. Как следует из графика форм-фактор, полученный без учёта вклада обменных мезонов, лучше описывается дипольным приближением, чем с учётом. Чем это можно объяснить?
- в диссертации приводится значение аксиальной массы нуклона, которая является параметром в дипольном приближении аксиального форм-фактора. Физической величиной является аксиальный радиус нуклона, поэтому было

бы уместным приводить значения этого радиуса, как это делается во многих работах.

- в модели RDWIA при расчётах инклюзивных сечений пренебрегается мнимой частью оптического потенциала, недостаточно полно описаны погрешности, вызванные таким упрощением
- использование многочисленных аббревиатур затрудняет чтение диссертации.

Приведённые замечания не снижают достоинств диссертационной работы С.В. Лучука.

Диссертация С.В. Лучука «Квазиупругое взаимодействие мюонных нейтрино заряженным током в экспериментах MiniBooNE и NovA» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а его автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа С.В. Лучука была обсуждена и получила положительную оценку на семинаре межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ «28» августа 2023 года

Отзыв составил

доктор физико-математических наук

заведующий межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики

А.И. Болоздыня

115409, Российская Федерация, г. Москва,

Каширское шоссе, д.31,

тел. 8 (495) 788 56 99 доб.9015,

e-mail: AIBolozdynya@mephi.ru

Проректор

Н.И. Каргин

Сведения о ведущей организации:

полное название организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

сокращённое название: НИЯУ МИФИ

адрес: 115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское шоссе, д.31

телефон: 8 (499) 324 87 66

адрес электронной почты: [9999@mephi.ru](mailto:9999@mephi.ru)

веб-сайт: <http://www.mephi.ru>

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя за последние 5 лет:

- 1) Akimov D. et al. A next generation Liquid Xenon Observatory for dark matter and neutrino physics, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 50 (2023) 013001.
- 2) Akimov D. et al. Simulating the neutrino flux from the Spallation Neutron Source for the COHERENT experiment, *Phys. Rev. D* 106 (2022) 032003.
- 3) Akimov D. et al. (RED-100 collaboration). RED-100 experiment, *JINST* 17 (2020) T11011.
- 4) Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). A D<sub>2</sub>O detector for flux normalization of a pion decay-at-rest neutrino source, *JINST* 16 (2021) 08, P08048.
- 5) Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). First Measurement of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering on Argon, *Phys. Rev. Lett.* 126 (2021) 012002.
- 6) Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). Sensitivity of the COHERENT Experiment to Accelerator-Produced Dark Matter, *Phys. Rev. D* 102 (2020) 5, 052007.
- 7) Akimov D.Yu. et al (RED-100 collaboration). First ground-level laboratory test of two-phase xenon emission detector RED-100, *JINST* 15 (2020) P02020.
- 8) Akerib D.S. et al. (LZ Collaboration). The LUX-ZEPLIN (LZ) experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 953 (2020) 163047.
- 9) Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon, *Phys. Rev. D* 100 (2019) 115020.
- 10) Акимов Д.Ю. и др. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре – недавно обнаруженный тип взаимодействия нейтрино низких энергий, *УФН* 189 (2019) 173-186.