

**Отзыв научного руководителя о диссертационной работе Лазарева Федора Михайловича «Электромагнитные свойства нейтрино в рассеянии нейтрино на нуклонах и ядрах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 «Теоретическая физика»**

Диссертационная работа Федора Михайловича Лазарева посвящена развитию теории рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах и поиску физики за пределами Стандартной модели в этих процессах. Актуальность работы связана в первую очередь с тем, что в настоящее время в мире наблюдается значительный рост числа теоретических и экспериментальных исследований когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах ( $CE\nu NS$  – Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering). Повышенный интерес к процессам  $CE\nu NS$  со стороны как экспериментаторов, так и теоретиков объясняется рядом факторов, среди которых особо стоит выделить следующие: прецизионная проверка стандартной теории электрослабых взаимодействий при беспрецедентно низких энергиях, изучение структуры ядра, поиск нестандартных взаимодействий, а также электромагнитных свойств нейтрино. Именно вклад последних, а конкретно нейтринных зарядовых, магнитных, электрических и анапольных формфакторов, в упругое рассеяние нейтрино на нуклонной или ядерной мишени является одним из главных предметов проведенного в диссертационной работе Федора Михайловича теоретического исследования. Поиск электромагнитных свойств нейтрино активно ведется в различных экспериментах по рассеянию нейтрино, так как они, в частности, нейтринный магнитный момент, возникают уже в минимальном расширении Стандартной модели с правыми массивными дираковскими нейтрино. Обнаружение и измерение этих новых фундаментальных характеристик нейтрино предоставит возможность прямого экспериментального изучения новой физики и даст неоценимый толчок к развитию соответствующей теории.

Федор Михайлович начал вести научно-исследовательскую работу в области теории процессов рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах еще во время своего обучения в бакалавриате и магистратуре на кафедре теоретической физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Уже на том начальном этапе основной акцент в его теоретических исследованиях делался на описание проявлений электромагнитных свойств нейтрино в рассматриваемых процессах. Им был проделан большой объем работы с литературой по этой и связанной с ней тематикам, а также

были освоены теоретические основы современной физики нейтрино. Это позволило ему не только блестяще защитить выпускные квалификационные работы сначала бакалавра, а затем магистра, но и заложило добротную базу для данного диссертационного исследования.

В диссертационной работе Федором Михайловичем получен ряд новых результатов, представляющих важность для теоретического и экспериментального изучения эффектов электромагнитных свойств нейтрино в упругом рассеянии нейтрино на нуклонах и ядрах. В частности, им впервые разработан наиболее полный теоретический инструментарий для поиска нейтринных электромагнитных свойств в указанных процессах. Благодаря этому становится возможным получение новых ограничений на электромагнитные характеристики нейтрино по уже имеющимся экспериментальным данным и проведение анализа чувствительности готовящихся экспериментов к этим характеристикам.

Кроме того, в диссертационной работе Федора Михайловича предложен и исследован новый эффект, который связан с поперечной спиновой поляризацией прилетающего в детектор нейтрино, которая может возникать в результате спиновых осцилляций нейтрино на базе источник-детектор. Это открывает уникальную возможность для первого экспериментального наблюдения данного типа нейтринных осцилляций с помощью измерений угловых распределений частиц отдачи (электронов, нуклонов и ядер) в детекторе. Также результаты, полученные Федором Михайловичем, могут быть использованы при изучении взаимодействий и осцилляций нейтрино в веществе астрофизических объектов, изучении анапольного момента нуклона и поиске электрического дипольного момента нейтрона.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который включает 167 наименований. Общий объем работы – 104 страницы, включая 15 рисунков и 5 таблиц.

Во введении сформулированы актуальность выбранной проблемы, цели и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору современных представлений о фундаментальных свойствах нейтрино. Рассмотрены механизмы возникновения дираковских и майорановских нейтринных масс, смешивание и осцилляции нейтрино. Обсуждаются

электромагнитные свойства нейтрино и каналы взаимодействия нейтрино в детекторах, в которых эти свойства могут проявляться.

Во второй главе представлено общее теоретическое описание процессов рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах. Сформулированы вершины электромагнитного и слабого нейтрального взаимодействия нейтрино, нуклона и ядра в терминах соответствующих формфакторов. Приведена параметризация нуклонных и ядерных формфакторов. Дано описание состояния нейтрино перед рассеянием в терминах спин-флеворной матрицы плотности. Получены выражения для дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтрино, находящегося в произвольном спин-флейворном состоянии, на нуклонах и ядрах.

В третьей главе приведены численные результаты для дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах. Проиллюстрированы характерные эффекты зарядовых радиусов, анапольных и магнитных моментов в сечениях упругого рассеяния левоспиральных, правоспиральных и полностью неполяризованных нейтрино на протоне и ядрах Ar-40 и Xe-132.

В четвертой главе подробно рассмотрен вклад в дифференциальное сечение рассеяния нейтрино, возникающий при ненулевом магнитном моменте и спиновых осцилляциях нейтрино. Приведено теоретико-групповое описание спина релятивистской частицы и его поведение в ультрарелятивистском случае. Получено общее выражение для спин-флейворной матрицы плотности нейтрино как функции энергии нейтрино и расстояния от источника до детектора. Проанализирована структура сечения в зависимости от объекта (электрон, протон или ядро), на котором рассеивается нейтрино, и обозначены случаи, в которых эффекты спиновых осцилляций могут быть максимальны. Представлены численные результаты, демонстрирующие эти эффекты в упругом рассеянии нейтрино на электроне, протоне и ядрах Ar-40 и Xe-132.

Необходимо отметить, что Федор Михайлович проявил высокую степень самостоятельности при выборе темы и методов диссертационного исследования, глубокое понимание современной физики нейтрино и её фундаментальных проблем, а также отличное владение аппаратом квантовой теории поля, квантовой электродинамики и теории электрослабых взаимодействий. Все положения диссертации, выносимые на защиту, сформулированные в диссертации научные

выводы и рекомендации для будущих теоретических и экспериментальных исследований являются строго обоснованными, а их достоверность и новизна не вызывает сомнений. Результаты диссертации Федора Михайловича отражены в десяти публикациях в реферируемых изданиях, которые индексируются базами данных WoS и Scopus, в том числе из квартиля Q1, и неоднократно докладывались на ведущих международных конференциях.

Все вышесказанное свидетельствует об очень высоком научном уровне выполненной Федором Михайловичем диссертационной работы. Диссертация удовлетворяет критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова и может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 «Теоретическая физика» в диссертационном совете.

Научный руководитель, профессор кафедры физики атомного ядра  
и квантовой теории столкновений  
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук, доцент

К.А. Кузаков  
10 декабря 2025 г.

Подпись профессора К.А. Кузакова заверяю  
Ученый секретарь Ученого совета  
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
профессор

Л.Ю. Стремоухов