

ОТЗЫВ

официального оппонента диссертацию

Колупаевой Людмилы Дмитриевны на тему

«Анализ данных эксперимента NOvA с целью измерения параметров осцилляций нейтрино»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация Л.Д. Колупаевой состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Структура диссертации и содержание разделов полностью соответствует п. 3.1 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Введение начинается с обсуждения актуальности диссертации. Осцилляции нейтрино и существование частиц темной материи - единственные в настоящее время явления, указывающие на существования «новой физики» за пределами Стандартной модели и, в силу этого, исследования осцилляций нейтрино, безусловно, актуальны. К 2010 году ряд параметров (углы смешивания и разности квадратов масс нейтринных состояний) осцилляций был измерен с разумной точностью. В 2012 году в реакторных экспериментах с километровой базой (DayaBay, DoubleChooz и RENO) были измерены угол смешивания между первым и третьим массовым состоянием нейтрино – угол θ_{13} . Значение этого угла оказалось неожиданно большим – около 10° и это сделало осуществимым измерения фазы CP нарушения в лептонном секторе и решение проблемы иерархии масс между массовыми состояниями нейтрино в создаваемых в это время установках T2K и NOvA.

Задачи, которые решает автор, и положения, вынесенные на защиту, связаны нейтринным экспериментом NOvA. В рамках эксперимента получен ряд пионерских результатов мирового уровня с активным участием автора.

В силу этого вопрос об актуальности и научной новизне и практической значимости диссертации решается однозначно.

Для работ, представляемых большими коллаборациями, важно выделить личный вклад автора. Эксперимент NOvA, как любой крупный эксперимент, кроме основной темы, ради которой создавался эксперимент, позволяет проводить исследования в ряде других областей – например, поиск нейтрино от гравитационного коллапса звезд, поиск магнитных монополей, поиск темной материи и т.д. Автор диссертации занимался центральной для эксперимента темой эксперимента – изучение параметров трехфлейворных осцилляций и своей работой внес существенный вклад в результаты, представляемые коллаборацией за последние годы. Во всех положениях диссертации, вынесенных на защиту личный вклад автора определяющим.

Первая глава посвящена истории исследования нейтрино и нейтринных осцилляций. Проведен краткий обзор экспериментов, в которых были открыты осцилляции, и получены первые важные для понимания физики нейтринных осцилляций результаты. Приводятся необходимые для понимания диссертации выражения из теории осцилляции нейтрино. Глава написана на хорошем профессиональном уровне. Очень полезен на мой взгляд рисунок 1.1, на котором представлены все современные эксперименты по исследованию осцилляций нейтрино.

Более подробно в этой главе автор рассматривает нейтринные эксперименты с большой базой и стратегию измерения осцилляционных параметров в этих экспериментах.

В качестве небольшого недостатка отмечу, что не включен в обзор эксперимент BOREXINO. История осцилляций нейтрино, как известно, начинается с работы Б.Понтекорова 1957 года. Это в главе, конечно отмечается, а вот фамилии А.Ю.Смирнова и С.П.Михеева почему-то явно не

упоминаются, упоминается только МСВ-резонанс. В приложении, в списке сокращений и условных обозначение аббревиатура МСВ, конечно, расшифрована. Наличие этого списка сокращений существенно облегчает чтение диссертации.

Глава вторая посвящена описанию ускорительного эксперимента NOvA. Эксперимент NOvA- нейтринный ускорительный эксперимент с длинной базой -810 км. Для измерения параметров осцилляций используются два структурно похожих детектора -ближний (БД) и дальний (ДД). Детекторы расположены под углом 14 мрад к оси пучка для получения узкого энергетического пика в спектре нейтрино, пиковая энергия нейтрино 1.8 ГэВ. Пучок нейтрино создается в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми. Сделаю маленькое замечание. Наверное, имело смысл прокомментировать, почему для энергии 1.3 ГэВ выбрано расстояние 810 км. Далее в главе достаточно подробно описываются детекторы нейтрино. Оба детектора -это трековыежидкосцинтилляционные калориметры из ПВХ ячейкесечением 4 см × 6 см, которые могут хорошо регистрировать как мюонные, так и электронные нейтрино. За счет этого у эксперимента есть чувствительность к порядку расположения нейтринных масс и фазе нарушения CP инвариантности в лептонном секторе.

Конструкция детектора и типы нейтринных событий описаны кратко, но с необходимой для понимания результатов диссертации подробностями. Детектор находится на поверхности и основной фон при регистрации нейтринных событий составляют события от атмосферных мюонов.

Третья глава посвящена описанию разработанной соискателем процедуры отбора событий-кандидатов взаимодействий *вечерез* заряженные токи в эксперименте NOvA.

В эксперименте NOvA отбор сигнальных событий, т.е. событий от электронных нейтрино, образовавшихся от мюонных нейтрино, представляет

собой смесь традиционных критериев в отбора (отбор по качеству событий, по энергетическим характеристикам, по попаданию в доверительный объем) и отбора с использованием сверхточной нейронной сети CVN. CVN идентифицирует нейтринные взаимодействия на основе их топологии без необходимости детальной реконструкции. Входным объектом для нейронной сети являются изображения событий в детекторе в виде сработавших ячеек изначений энерговыделений.

Все события разделялись на две выборки - Центральную и Периферийную. Автор описывает по каким критериям события попадают в Центральную выборку. Периферийная выборка состоит из событий, которые не прошли в Центральную выборку, но которые имеют очень высокие значения классификаторов CVN. Введение в анализ Периферийной выборки – заслуга автора.

Число событий от взаимодействия электронных нейтрино в ДД составляет 10^{-6} от полного числа событий до применения критериев отбора, причем конечно большую часть в числе этих событий составляют события от атмосферных мюонов. В каждом временном окне 10 мкс прихода пучка нейтрино число событий от мюонов равно примерно 1, а ожидаемое число событий от электронных нейтрино - около 50 за 1 год набора статистики. Эти мюоны могут с определенной вероятностью симитировать сигнальные события. Во временном окне 10 мкс прихода пучка нейтрино число событий от мюонов равно примерно 1, а ожидаемое число событий от электронных нейтрино - около 50 за 1 год набора статистики. Эти мюоны могут с определенной вероятностью симитировать сигнальные события. Сигнатура событий от электронных нейтрино – электромагнитный каскад от электрона и адронный ливень. Самые сложные в отборе источники фона - это события, имеющие электронные нейтрино, которые остались в пучке мюонных нейтрино.

Для предсказания фоновых событий от электронных нейтрино, событий от нейтральных токов и событий от мюонных нейтрино используются скорректированные с помощью данных ближнего детектора Монте–Карло предсказания. До критериев отбора число событий от электронных нейтрино из пучка всего в два раза меньше сигнальных событий (событий от электронных нейтрино, появившихся при переходе мюонных нейтрино в электронные) (таблица 5). После применения критериев отбора число сигнальных событий уменьшается в 2 раза, а число событий от нейтрино из пучка почти в 10 раз.

Для анализа 2017 года автором впервые было использовано машинное обучение для отбора событий от атмосферных мюонов. Для этого было настроено дерево принятия решений (BoostedDecisionTree). Для обучения использовалось 5 переменных, которые имеют высокую чувствительность к разделению событий пучка и атмосферных мюонов. Это позволило для Периферической выборки событий эффективно подавить события от атмосферных мюонов. Ранее периферическая выборка просто не рассматривалась, а для подавления мюонов в Центральной выборке использовалось уменьшение чувствительного объема детектора.

В терминах экспозиции детектора в 2017 году, после введения критериев отбора автора, по сравнению с предыдущим отбором данных в 2016 году оптимизация критериев Центральной выборки дала выигрыш +6.8%, что суммарно с введением группы событий из Периферической выборки составило +17.4%. Разработанная схема отбора событий применялась в 2017–2019 годах.

В главе также рассматривается проведенная автором проверка эффективности отбора событий от электронных нейтрино классификатором CVN на данных ближнего детектора. В ближнем детекторе событий очень мало, но можно событие от мюонного нейтрино перевести в событие от

электронного, заменив трек от мюона на электромагнитный ливень. Это процедура называется MRE (MuonRemovedElectronadded). При этом отпадает необходимость моделировать адронный ливень, в аккуратном моделировании которого до сих пор существуют проблемы. Эффективность работы классификатора на таким образом полученных события находится в хорошем согласии с эффективностью отбора чисто МК событий.

Четвертая глава посвящена анализу данных эксперимента NOvA в 2018 – 2020 годах.

В течение этих трех лет автор активно участвовал в анализе данных эксперимента. Им выполнялась, как пишет автор, подгонка данных Дальнего детектора целью извлечения ограничений на параметры осцилляций.

Кроме финальной аппроксимации данных автор участвовал в разработке различных частей осцилляционного анализа: в способе учета систематических ошибок, разработке процедур экстраполяции и интерпретации данных.

В главе приводится описание последовательности осцилляционного анализа данных в эксперименте, статистических методов интерпретации результатов, а также полученных в 2018 – 2020 годах результатов.

Главная задача - определить по данным Ближнего детектора число и энергетический спектр событий от электронных нейтрино, которые будут основным источником фона для выделения сигнальных событий в Дальнем детекторе.

Далее в главе подробно обсуждаются источники систематических неопределенностей, связанные с потоком нейтрино, с моделями взаимодействия нейтрино, с откликом и калибровкой детектора.

Итоговые предсказания сигналов и фонов используются для подгонки данных в дальнем детекторе. При подгонке данных минимизируется логарифм отношения функций правдоподобия для пуассоновской статистики для всех бинов и всех систематических неопределенности. Варьировались

основные осцилляционные параметры. Следуя процедуре, описанной выше, в 2018 – 2020 годах были получены значения основных осцилляционных параметров, представляемых коллаборацией. В 2020 году были представлены следующие значения параметров осцилляций:

$\sin^2\theta_{23} = 0.57 + 0.03 - 0.04$. максимальное значение угла смешивание θ_{23} равное 45° отвергается всего на уровне 1.1 сигма,
 $\Delta m_{32}^2 = (+2.41 \pm 0.07) 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\delta_{CP} = (0.82 + 0.24 - 1.0) \pi$, т.е фактически нулевое значение фазы не исключается.

Область $\delta_{CP} = \pi/2$ исключена для обратной иерархии на уровне 3 сигма, а область $\delta_{CP} = 3\pi/2$ для нормальной иерархии исключена на уровне 2 сигма.

С 2018 года данные антинейтринного пучка включаются в анализ данных. Автором была разработана процедура для определения уровня значимости, на котором в эксперименте наблюдалось появление электронных антинейтрино. Процедура похожа на процедуру Фельдмана-Казинса, но из-за ряда упрощений не требует серьезных вычислительных мощностей. В 2018 уровень значимости, на котором наблюдались появление электронных антинейтрино составил 4.1 сигма. В 2019 году уровень значимости увеличился до 4.4 сигма.

В пятой главе диссертации рассматривается чувствительность ускорительных экспериментов к измерению осцилляционных параметров. Результаты этой главы были опубликованы в 3 статьях за авторством диссертанта (это не статьи коллаборации). В расчетах были использованы как с программы с открытым доступом GLoBES (GeneralLongBaselineExperimentSimulator), так и с полноценным Монте-Карло моделированием эксперимента NOvA. Прежде всего исследовалась чувствительность эксперимента NOvA за 6 лет набора статистики к иерархии массовых состояний. Показано, уровень значимости может достигнуть 2.5- 3 сигма, но только для узкого диапазона значений фазы нарушения CP. При продлении работы эксперимента NOvA до 2025 года уровень значимости будет находится в диапазоне 0.5 – 5 сигма, т.е открытие иерархии масс

возможно, но не гарантированно. Чувствительность к фазе нарушение δ_{CP} может превысить 2 сигма при значении фазы около $3\pi/2$ для нормальной иерархии и около $\pi/2$ для обратной.

Существенно другой уровень чувствительности ожидается для эксперимента DUNA. За 6 лет набора статистики уровень значимости превысит 5 сигма для любого значения фазы нарушения δ_{CP} . Таким образом, к началу 30-х годов мы гарантированно должны узнать, какая иерархия масс нейтринных массовых состояний – нормальная или обратная.

В шестой главе рассматриваются результаты эксперимента NOvA в сравнении с результатами других экспериментов. Остановимся более подробно на измерениях значения фазы нарушения δ_{CP} , измерения которой в настоящее время кроме NOvA проводит эксперимент T2K. Из-за малой статистики результаты обоих нейтринных экспериментов подвержены изменениям от года к году, при этом эксперименты NOvA, T2K стабильно предпочитают разные значения фазы δ_{CP} . Так в 2019 году коллаборация T2K представляла значение фазы δ_{CP} равное 1.4π , точки с сохранением δ_{CP} четности (0 и 2π) отвергались на уровне 3 сигма.

Эксперимент NOvA в 2019 году предпочитал значение фазы равное нулю. В 2020 году оптимальное значение фазы стало равным 0.82π . Фаза равная нулю не отвергалась из-за больших ошибок. T2K в 2020 представил значение фазы $\delta_{CP} = 1.37\pi$. Таким образом, ситуация с измерением фазы δ_{CP} остается неопределенной. Возможно, ситуацию прояснит совместный анализ данных, который планируют провести коллаборации экспериментов NOvA и T2K.

Для полноты картины в главе представлен статус измерения остальных осцилляционных параметров (θ_{13} , θ_{12} и Δm_{21}^2) на 2020 год, к которым NOvA не имеет чувствительности. Точность измерения угла θ_{13} DayaBay, Double CHOOZ и RENO останется непревзойденной в ближайшие годы. В измерении θ_{12} и Δm_{21}^2 определяющий вклад принадлежит SNO, Super-Kamiokande и KamLAND.

В заключение описывается экспериментальная программа будущих нейтринных экспериментов.

Глава в целом производит очень хорошее впечатление полнотой анализа современной ситуации в экспериментальной нейтринной физике.

Автор лично представлял результаты эксперимента на 11 международных и российских конференциях и известных научных семинарах. Основные результаты диссертации представлены в 8 статьях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных Диссертационным советом МГУ, 6 - в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Всего диссертант является соавтором 19 статей.

Диссертация написана ясным языком и легко читается. Иногда встречаются жаргонные термины, как например, фреквентистский. Еще раз отмечу, что очень облегчает чтение диссертации таблица сокращений, приведенная в конце работы.

К замечаниям отмеченными выше добавлю еще два. На рисунке 2.12 (рисунок сцинтилляционной ячейки) не указаны размеры сцинтилляционной ячейки. На стр. 41 отмечается, что величина FOM пропорциональна увеличению экспозиции, более корректно надо было написать, что FOM пропорциональна квадратному корню из экспозиции.

Незначительные замечания, сделанные выше, не умаляют высокого уровня диссертации и важности полученных результатов. В процессе работы над диссертацией автор, за сравнительно короткий срок приобрел уровень квалификации, позволивший ему активно и продуктивно участвовать в работе крупной международной коллаборации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц» (по

университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Колупаева Людмила Дмитриевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией наземной гамма-астрономии
Научно-исследовательского института ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)
ФГБОУ высшего образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»

Кузьмичев Л.А.

Контактные данные:

тел.: +7 495 939 10 72, e-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16– физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, дом 1, строение 2.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, (Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В.Скобельцына, лаборатория наземной гамма-астрономии)

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева