

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований
Российской академии наук, член-корр. РАН



Л.В. Кравчук

«07» августа 2017

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук
на диссертацию

Гончара Максима Олеговича

**ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА СМЕШИВАНИЯ θ_{13} И РАСЩЕПЛЕНИЯ МАСС
НЕЙТРИНО Δm^2_{32} В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DAYA BAY,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности

01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Диссертация посвящена одной из **актуальных** проблем современной физики элементарных частиц — измерению параметров нейтринных осцилляций, а именно угла смешивания θ_{13} и расщепления масс нейтрино Δm^2_{32} , используя данные реакторного эксперимента Daya Bay. Впервые указание на ненулевое значение угла θ_{13} было получено в эксперименте T2K. Затем прецизионные измерения были выполнены в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz. Довольно большое значение этого угла около 9 градусов позволило получить принципиальную возможность поиска CP нарушения в лептонном секторе и измерения иерархии масс нейтрино. До 2012 года основными способами измерения разности квадратов масс нейтрино Δm^2_{32} было наблюдение дефицита атмосферных и ускорительных мюонных нейтрино в экспериментах Супер-Камиоканде, T2K и MINOS и измерение искажения их спектра, а также наблюдение угловой зависимости направления прилета нейтрино в атмосферных экспериментах. Методика измерения этой величины, доступная экспериментам с реакторными антинейтрино — это наблюдение искажения спектра энергии антинейтрино. Данный подход позволяет не только независимым образом проверить измерения ускорительных и атмосферных экспериментов, но и улучшить точность этих измерений. **Фундаментальная значимость** полученных в диссертации результатов и **актуальность** исследований не вызывают никаких сомнений.

Во **введении** диссертации показана актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, новизна и практическая значимость полученных в ней результатов, приведены данные о публикациях автора и апробации работы.

Основной **целью работы** является измерение параметров нейтринных осцилляций в эксперименте Daya Bay: $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm^2_{32} . Вспомогательной задачей является разработка

программного обеспечения для обработки данных эксперимента Daya Bay как для исследования осцилляций нейтрино, так и для других задач.

В **первой главе** излагается описание физики нейтрино в рамках Стандартной модели, вводятся массы нейтрино и понятие нейтринного смешивания, дается обзор текущего состояния исследований осцилляций реакторных электронных антинейтрино. Указывается необходимость измерения угла смешивания θ_{13} , одного из наименее изученных параметров смешивания на время планирования эксперимента Daya Bay. Прецизионное измерение θ_{13} необходимо для проведения будущих экспериментов, целью которых является поиск нарушения CP-инвариантности в нейтринных взаимодействиях и определения иерархии масс нейтрино. Первое измерение угла смешивания θ_{13} со статистической значимостью более пяти стандартных отклонений было получено в эксперименте Daya Bay в 2012 году. Значение этого параметра оказалось достаточно большим, что открыло дорогу к измерению еще одного параметра нейтринных осцилляций в прецизионных реакторных экспериментах — расщепления масс нейтрино Δm^2_{32} . Современное состояние исследований по измерению расщепления масс нейтрино Δm^2_{32} дано конспективно.

Во **второй главе** дается обзор эксперимента Daya Bay. Сформулированы требования к экспериментальной установке: использование нескольких детекторов для подавления систематических неопределенностей потоков реакторных антинейтрино и эффективности детектирования, использование радиоактивно чистых материалов и установка детекторов на достаточной глубине для подавления естественного радиационного фона и фона, вызванного космическими мюонами. Описана методика проведения экспериментов с реакторными антинейтрино. Подробно описаны детекторы антинейтрино, которые имеют идентичный дизайн, что позволяет существенно подавить коррелированные неопределенности: неопределенности абсолютного потока и формы спектра антинейтрино и коррелированной части неопределенности эффективности детектора. Во второй половине главы приведен обзор критериев отбора событий, используемых в эксперименте Daya Bay. Рассмотрены источники фоновых событий. Описана методика реконструкции положения и энергии событий и описаны основные эффекты, приводящие к искажению энергетического отклика детектора: наличие пассивных материалов в детекторе, общая нелинейность энергетической шкалы, связанная с физическими свойствами сцинтиллятора и особенностями работы электроники, энергетическое разрешение. Особое внимание уделено описанию систематических неопределенностей эксперимента: рассмотрены источники погрешностей и приведены значения неопределенностей для процессов рождения и детектирования нейтрино для каждого из рассматриваемых в диссертации периодов набора данных. Полное количество отдельных параметров, неопределенность которых учитывается в анализе, превышает 200 штук.

В **третьей главе** рассмотрено программное обеспечение `dubOscar`, разработанное автором диссертации в составе дубненской группы для анализа данных эксперимента Daya Bay. Данное программное позволяет на уровне конфигурации переключать модели осцилляций нейтрино, модели реакторного спектра, эффекты детектора, методику интегрирования кинематики, функции подгонки, методы статистического анализа и др. Реализована возможность удобной работы с большим количеством наблюдаемых и модельных параметров. Описаны методики оптимизации, используемые для упрощения программы и повышения эффективности вычислений.

В **четвертой главе** рассматривается вопрос статистического тестирования программного обеспечения `dubOscar` и исследованию отклонений в результатах, которые могут возникать при использовании функции хи-квадрат для подгонки параметров. Тестирование заключается в многочисленном повторе процедуры подгонки исследуемых

параметров для статистики предсказаний с известными модельными параметрами и исследовании распределений оценок параметров подгонки. Приведены результаты двух тестов для анализа данных в разных режимах. Таким образом показано, что результат оценки параметров осцилляций $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm^2_{32} в среднем соответствует истинным значениям модели. Оценка ошибки соответствует реальной ширине распределения. Показано, что при замене используемой модели на линейное приближение, которое гарантирует нормальное распределение оценок, отклонение оценок не превышает стандартной ошибки. Из этого сделан вывод, что незначительное смещение оценок связано с нелинейностью задачи поиска минимума по $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm^2_{32} . В третьем тесте проводилось исследование влияния вариации спектра реакторных антинейтрино за пределами погрешности на адекватность подгонки осцилляционных параметров. Показано, что для данных, соответствующих статистике Daya Bay, набранной в течение 621 дня, отклонение оценок осцилляционных параметров достигает в среднем 0.2 стандартных отклонения. Также показано, что использование параметризации спектра антинейтрино с 15-ю свободными параметрами позволяет полностью избавиться от отклонения, связанного с использованием неверной модели спектра. Вторая половина главы посвящена вопросу зависимости ошибок от параметров подгонки при минимизации функции хи-квадрат и смещению оценок параметров, к которому она приводит. Для общего случая функции хи-квадрат показано, что в среднем смещение возникает при наличии флуктуаций в исследуемых данных. Также продемонстрировано, что смещение может быть компенсировано добавлением логарифма определителя матрицы ошибок к функции хи-квадрат.

В пятой главе произведён обзор результатов, полученных автором диссертации на основе данных эксперимента Daya Bay. Был проведен анализ данных в двух режимах и измерены величины параметром осцилляций $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm^2_{32} . Полученное значение Δm^2_{32} согласуется с результатами ускорительных экспериментов и является первым измерением, полученным с реакторными электронными антинейтрино. С физической точки зрения результат согласуется по значению и сравним по точности с результатами ускорительных экспериментов. Полученное на основе анализа данных, набранных за 1230 дней, значение угла смешивания θ_{13} является наиболее точным измерением данного параметра и согласуется как с предыдущими результатами Daya Bay, так и с результатом анализа этих же данных в другом режиме. Результаты измерения осцилляционных параметров, полученные автором в составе дубненской группы на статистике 1230 дней были приняты в качестве официальных результатов коллаборации Daya Bay.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна. Основные результаты диссертационной работы являются новыми и получены впервые. Впервые продемонстрировано отличие угла смешивания θ_{13} от нуля со статистической значимостью, превышающей 5 стандартных отклонений, значение $\sin^2 2\theta_{13}$ измерено с наилучшей точностью, впервые измерено значение Δm^2_{32} на основе данных реакторных экспериментов. Точность измерения в настоящее время сравнима с точностью измерения данной величины в ускорительных экспериментах.

Научно-практическая значимость. Результаты диссертационной работы представляют значительный интерес для специалистов в области физики элементарных частиц, так как угол смешивания θ_{13} и расщепление масс нейтрино Δm^2_{32} являются фундаментальными параметрами Стандартной Модели, что определяет ценность их прецизионного измерения. Измерение Δm^2_{32} в реакторных экспериментах является хорошим дополнением к результатам экспериментов с ускорительными нейтрино, так как измерение использует другой канал осцилляций, имеет отличную методику детектирования и независимую систематику. Значение Δm^2_{32} , получаемое в реакторных экспериментах

практически не зависит от других осцилляционных параметров, в том числе, при достаточной точности эксперимента, от $\sin^2 2\theta_{13}$. Фаза нарушения CP-инвариантности δ_{CP} появляется в общепринятой параметризации в матрице смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаматы совместно с углом θ_{13} , поэтому измеренное относительно большое значение угла смешивания нейтрино $\theta_{13} \approx 9^\circ$ открывает возможность измерения δ_{CP} . Также стоит отметить, что прецизионное измерение θ_{13} необходимо для определения иерархии масс нейтрино.

Личный вклад автора. Работа выполнена автором в составе международной коллаборации Daya Bay. Автор непосредственно участвовал во всех работах, результаты которых вошли в диссертацию, обработке данных эксперимента, интерпретации и оформлении результатов. Им внесён существенный вклад в разработку программного обеспечения `dubOscar12` для анализа данных эксперимента Daya Bay в режиме «поток», а так же основной вклад в разработку программного обеспечения `dubOscar`, предназначенного для анализа данных реакторных экспериментов в режиме «поток+спектр».

По представленной диссертации можно сделать ряд **замечаний**:

1. В таблице 1.3 приводятся модели для описания антинейтринного спектра. Не лишним было бы представить графическое сравнение этих моделей. Также в тексте диссертации говорится, что в данном исследовании используется модель «Huber+Mueller», однако, выбор именно этой модели (по сравнению с другими) для предсказания спектра антинейтрино никак не объясняется.
2. Таблица 1.7 составлена не совсем удачно, так как только интуитивно понятно как сопоставляются между собой первая и вторая колонки и совершенно не понятно к какому эксперименту (или обзору) относится самая первая строчка второй колонки. Также, если следовать хронологическому порядку появления результатов, то результаты эксперимента T2K должны быть перед результатами эксперимента MINOS в 2011 году.
3. Аналогичное замечание относится и к таблице 1.8, в которой непонятно разделение результатов по годам, а именно, где заканчиваются результаты одного года и начинаются результаты следующего.
4. В главе 2 описаны критерии отбора необходимых событий, однако неполно описаны методы измерения эффективности этих критериев. В частности, не описано каким образом проводилось моделирование отклика детекторов.

Общая оценка работы. Диссертационная работа **Гончара Максима Олеговича** представляет собой полноценное оригинальное исследование, посвященное решению актуальной задачи физики элементарных частиц. В результате работы были получены новые фундаментальные результаты. Заявленные и поставленные цели достигнуты, результаты признаны международной коллаборацией Daya Bay. Представленные результаты своевременно опубликованы в ведущих научных журналах (4 публикации), удовлетворяющих требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией, и известны специалистам. Представленные результаты были лично доложены автором на международных и российских семинарах и конференциях. Практически полное отсутствие опечаток облегчает восприятие и демонстрирует ответственное отношение диссертанта к работе.

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации.

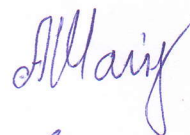
Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают ценность представленной автором работы.

Диссертационная работа «ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА СМЕШИВАНИЯ θ_{13} И РАСЩЕПЛЕНИЯ МАСС НЕЙТРИНО Δm^2_{32} В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DAYA BAY» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, учрежденного Постановлением

Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор **Гончар Максим Олегович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

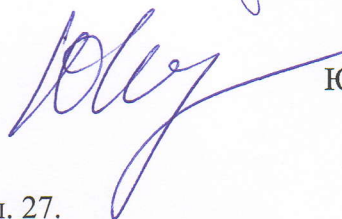
Диссертация была доложена, обсуждена и одобрена 19 июня 2017 года на семинаре Отдела физики высоких энергий Института ядерных исследований РАН.

Отзыв составил с.н.с. лаборатории
физики электрослабых взаимодействий
Отдела физики высоких энергий
к.ф.-м.н.



А.Т. Шайхиев

Зав. Отделом физики высоких энергий
д.ф.-м.н., профессор



Ю.Г. Куденко

Сведения о ведущей организации:
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27.
Телефон: +7 (495) 850-42-01
Email: inr@inr.ru