

На правах рукописи

ГОНЧАР МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ

**Измерение угла смешивания θ_{13} и расщепления
масс нейтрино Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2017

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова
Объединённого института ядерных исследований

Научный руководитель: **Наумов Дмитрий Вадимович**,
кандидат физико-математических наук, Лаборатории ядерных проблем, Объединённый институт ядерных исследований, Дубна.

Официальные оппоненты: **Дербин Александр Владимирович**,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом полупроводниковых ядерных детекторов, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, Санкт-Петербург.

Семикоз Виктор Борисович,
доктор физико-математических наук, заведующий теоретическим отделом, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

Защита состоится «__» _____ 201__ г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по адресу: 141980, Дубна, ОИЯИ, Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайтах:
http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC_dlnp.htm и <http://astronu.jinr.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 720.001.03

доктор физ.-мат. наук
Г. А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Нейтринные осцилляции — эффект, впервые предложенный Бруно Понтекорво в 1957 году и подтверждённый многочисленными экспериментами с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино.

Недостаток потока солнечных нейтрино был обнаружен в эксперименте в Хоумстейке в 1964, а в 2002 году эксперимент SNO показал, что электронные нейтрино от Солнца за счёт смешивания частично превращаются в мюонные и тау-нейтрино. Глобальный анализ солнечных нейтринных данных [1], проведённый в 2002 году показал, что соответствующий угол смешивания нейтрино θ_{12} значительно отличается от нуля. Также было измерено значение расщепления масс Δm_{21}^2 .

В 1992 году был обнаружен недостаток потока мюонных нейтрино по отношению к электронным в эксперименте KamioKande [2] с атмосферными (анти)нейтрино. Наблюдаемый недостаток хорошо описывается гипотезой осцилляций между мюонными и тау-нейтрино. Это позволило измерить соответствующие угол θ_{23} и расщепление масс Δm_{32}^2 .

В отличие от случая кварков, нейтрино характеризуются очень сильным смешиванием с углами $\theta_{12} \approx 34^\circ$ и почти максимальным $\theta_{23} \approx 45^\circ$. Однако, значение последнего угла смешивания θ_{13} долгое время оставалось неизвестным. Эксперименты с реакторными электронными антинейтрино [3—13], проведённые в период с 1980 по 2000 годы с детекторами, расположенными на расстояниях от нескольких метров до километра от реактора, смогли установить только верхнюю границу $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$. Это связано с малостью θ_{13} , что накладывает высокие требования на чувствительность эксперимента. Также, определённую роль сыграло недостаточно точно измеренное значение Δm_{32}^2 , которое необходимо для определения оптимального расстояния между детектором и реактором, максимизирующим чувствительность к $\sin^2 2\theta_{13}$.

В период с 2006 по 2008 год эксперимент MINOS значительно увеличил точность измерения Δm_{32}^2 [14; 15], что позволило определить оптимальное расстояние для измерения угла смешивания θ_{13} : один из детекторов должен находиться на расстоянии около 2 км от реакторов.

Измерение неизвестного параметра осцилляций нейтрино, угла смешивания $\sin^2 2\theta_{13}$ — цель реакторных нейтринных экспериментов нового поколения: Double CHOOZ, RENO и Daya Bay, начавших набор данных в 2011 году. В результате измерений, отличие угла θ_{13} от нуля было продемонстрировано с высокой статистической значимостью, а его величина определена с большой точностью.

До 2012 года основными способами измерения расщепления масс ней-

трино Δm_{32}^2 было наблюдение исчезновения ускорительных мюонных нейтрино в экспериментах MINOS и T2K и наблюдение искажения их спектра, а также наблюдение угловой зависимости направления прилёта нейтрино в атмосферных экспериментах. Методика измерения этой величины, доступная экспериментам с реакторными электронными антинейтрино — это наблюдение искажения спектра энергии антинейтрино. Данный подход позволяет не только независимым образом проверить измерения ускорительных и атмосферных экспериментов, но и значительно увеличить их точность.

Цель диссертационной работы

Основной целью работы является измерение параметров нейтринных осцилляций в эксперименте Daya Bay: $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm_{32}^2 . Вспомогательной задачей является разработка программного обеспечения (ПО) для анализа данных реакторных экспериментов, подходящего для обработки данных эксперимента Daya Bay как для исследования осцилляций нейтрино, так и для других задач.

Научная новизна

- 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_{32}^2 на основе данных реакторных экспериментов. Точность измерения в настоящее время сравнима с точностью измерения данной величины в ускорительных экспериментах.

Практическая значимость

- Угол смешивания θ_{13} и расщепление масс нейтрино Δm_{32}^2 являются фундаментальными параметрами Стандартной Модели, что определяет ценность их прецизионного измерения.
- Измерение Δm_{32}^2 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_{32}^2 , 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-Сакавы (ПМНС) совместно с углом θ_{13} , поэтому измеренное

относительно большое значение угла смешивания нейтрино $\theta_{13} \approx 8^\circ$ открывает возможность измерения δ_{CP} .

- Прецизионное измерение θ_{13} необходимо для определения иерархии масс нейтрино.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. ПО для анализа данных реакторных нейтринных экспериментов и, в частности, эксперимента Daya Bay.
2. Результат измерения амплитуды осцилляций нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$ на основе данных о полном числе событий в детекторах эксперимента Daya Bay.
3. Результат измерения амплитуды осцилляций нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$ на основе спектра и потока реакторных антинейтрино в эксперименте Daya Bay.
4. Результат измерения расщепления масс нейтрино Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных российских и международных конференциях: XVIII и XIX научные конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ, Дубна, 2014, 2015; 57-й симпозиум DAE по ядерной физике, Дели, Индия, 2012; международное рабочее совещание по неускорительной новой физике NANPino-2013, Валдай, 2013; 27-я международная конференция по физике нейтрино и астрофизике Neutrino 2016, Лондон, Великобритания, 2016; а также на научном совете ОИЯИ 2013 года, на рабочих совещаниях и научных семинарах ЛЯП, на собраниях и рабочих совещаниях коллаборации Daya Bay.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 5-и печатных работах, из них 4 статьи в рецензируемых журналах [16—19] и 1 статья в сборнике трудов конференций [20]. Кроме того, диссертант является соавтором 11-и публикаций в рецензируемых журналах [21—31] и 2-х статей [32; 33], принятых к печати. Следует отметить [32], результат которой получен при помощи разработанного диссертантом ПО dybOscar.

Личный вклад автора

Автор непосредственно участвовал во всех работах, результаты которых вошли в диссертацию, обработке данных эксперимента, интерпретации и оформлении результатов. Им внесён существенный вклад в разработку ПО dybOscar12 для анализа данных эксперимента Daya Bay в

режиме „поток“, а так же основной вклад в разработку ПО dybOscar, предназначенного для анализа данных реакторных экспериментов в режиме „поток+спектр“.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения и 3-х приложений. Полный объём диссертации составляет 248 страниц, включая 102 рисунка и 22 таблицы. Список литературы содержит 214 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цели работы, новизна и практическая значимость полученных в ней результатов, приведены данные о публикациях автора и апробации работы, кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** даётся краткий обзор теории нейтрино и текущего состояния исследований осцилляций реакторных электронных антинейтрино.

Конспективно излагается описание физики нейтрино в рамках Стандартной Модели, вводятся массы нейтрино и понятие нейтринного смешивания. Смешивание нейтрино приводит к красивому макроскопическому эффекту — нейтринным осцилляциям. В упрощённом изложении данный эффект выражается в том, что в пучке нейтрино определённого аромата на определённом расстоянии от источника можно обнаружить нейтрино другого типа. Вероятность перехода (вероятность обнаружить нейтрино другого типа), как и вероятность выживания (вероятность обнаружить нейтрино того же типа) зависит гармонически от отношения расстояния к энергии нейтрино.

В рамках плосковолнового подхода рассматривается феномен нейтринных осцилляций и его параметры. Указывается необходимость измерения угла смешивания θ_{13} , одного из наименее изученных параметров Стандартной Модели и 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.

Наиболее удобным методом измерения угла смешивания нейтрино θ_{13} является измерение потока реакторных антинейтрино. В связи с использованием реакторных антинейтрино подробно исследуется вопрос их рождения и способы предсказания их энергетического спектра. Описываются проблемы современной модели спектра реакторных антинейтрино — модели Huber+Mueller: пятипроцентный недостаток наблюдаемого потока антинейтрино относительно предсказания, также известный как реакторная аномалия; и значительное, превышающее 4 стандартных отклонения, локальное искажение потока антинейтрино с энергиями от 4 МэВ до 6 МэВ, также известное как плечо, бамп или эксцесс.

Далее, рассмотрено сечение взаимодействия обратного бета-распада (ОБР) — основного канала детектирования реакторных антинейтрино. Отдельное внимание уделено зависимости нормировки сечения от времени жизни нейтрона. Вариация результатов экспериментальных измерений времени жизни нейтрона превысила 5 стандартных отклонений за

последние 10 лет.

Данные проблемы, а именно реакторная аномалия, плечо в области от 4 МэВ до 6 МэВ и вариация нормировки сечения ОБР накладывают на экспериментальную методику измерения угла смешивания θ_{13} определённые ограничения, которые были преодолены только в экспериментах нового поколения, использующих несколько детекторов с разными базами.

Кратко описывается история измерения угла смешивания нейтрино θ_{13} . Подробно даны описания экспериментов Райнеса и Коуэна, первые детектировавших реакторные электронные антинейтрино, а также измеривших полное сечение ОБР. Рассмотрены первые эксперименты, предназначенные для прямого измерения угла смешивания θ_{13} : CHOOZ и Palo Verde. Методика детектирования, развитая в описанных экспериментах до сих пор является основной для исследования реакторных антинейтрино. В данных экспериментах использовалось по одному детектору, находящемуся на недостаточно большом расстоянии от реактора. В результате эти эксперименты поставили ограничения $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$ на уровне достоверности 90 %.

Первые указания на ненулевое значение θ_{13} появились в 2010–2011 годах. Данные результаты и получившие их эксперименты: KamLAND [34], T2K [35], MINOS [36], Double CHOOZ [37] — описаны конспективно.

Первое измерение угла смешивания θ_{13} со статистической значимостью более пяти стандартных отклонений было получено в эксперименте Daya Bay [16] в 2012 году. За ним последовали подтверждения от эксперимента RENO [38]. Приведено сопоставление всех мировых измерений θ_{13} , демонстрирующее хорошую согласованность в результатах различных экспериментов.

Значение угла смешивания θ_{13} оказалось достаточно большим, что открыло дорогу к измерению ещё одного параметра осцилляций в прецизионных реакторных экспериментах — расщепления масс нейтрино Δm_{32}^2 . Современное состояние исследований по измерению расщепления масс нейтрино Δm_{32}^2 дано конспективно. Приведены таблицы, сопоставляющие мировые измерения абсолютного значения Δm_{32}^2 , начиная с 2008 года.

Вторая глава посвящена обзору эксперимента Daya Bay.

Введение кратко суммирует основные систематические неопределённости и проблемы прецизионного измерения угла смешивания нейтрино θ_{13} в реакторных экспериментах, следующие из первой главы диссертации. На их основе формируются требования к экспериментальной установке: использование нескольких детекторов для подавления систематических неопределённостей потоков реакторных антинейтрино и эффективности детектирования; использование радиоактивно-чистых материалов и установка детекторов на достаточной глубине для подавления естественного радиационного фона и фона, вызванного космогенными мюонами.

Далее мы описываем методику проведения экспериментов с реакторными антинейтрино. Детектируемый антинейтринный спектр имеет куполообразную форму и занимает диапазон от 1.8 МэВ до 10 МэВ с максимумом около 4 МэВ. При регистрации событий в жидком сцинтилляторе (ЖС) скорость счёта будет составлять около 100 событий ОБР на тонну сцинтиллятора в день на расстоянии 100 м от реактора тепловой мощностью 1 ГВт.

Вероятность выживания электронных антинейтрино, имеет локальный минимум при $L/E_\nu \approx 4 \text{ МэВ}/2 \text{ км}$, что определяет оптимальное положение для проведения эксперимента. Глубина этого минимума определяется значением $\sin^2 2\theta_{13}$ и практически не зависит от других параметров осцилляций кроме расщепления масс Δm_{32}^2 , определяющим его положение.

Наблюдаемое событие ОБР в детекторе формируется двумя сигналами: „мгновенным“ сигналом от позитрона с энергией пропорциональной энергии нейтрино и „запаздывающего“ сигнал от нейтрона с энергией порядка 8 МэВ. Наблюдение коррелированных сигналов позволяет в значительной мере подавить вклад естественного радиоактивного фона.

Далее описывается эксперимент Daya Bay. Эксперимент проводится на юго-востоке Китая недалеко от атомных электростанций Дая Бей (Daya Bay), Лин Ао (Ling Ao) и Лин Ао II (Ling Ao II) общей тепловой мощностью 17.4 ГВт. Эксперимент в полной конфигурации состоит из восьми антинейтринных детекторов, расположенных группами в среднем на расстояниях 350 м, 500 м и 1.5 км от реакторов. Каждый детектор заполнен 20 т ЖС с добавлением гадолиния в качестве мишени и оборудован 192 фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). В среднем светосбор детектора составляет около 162 фотоэлектронов на один МэВ.

Четыре детектора расположены попарно на экспериментальных площадках ЕН1 и ЕН2, находящихся на расстояниях 350 м и 500 м от атомных электростанций (АЭС) Дая Бей и Лин Ао (I и II) соответственно. Поток и спектр антинейтрино на данных расстояниях незначительно искажены эффектом нейтринных осцилляций. Четыре детектора расположены на расстоянии 1.5 км от всех АЭС. Искажение потока и спектра антинейтрино на данном расстоянии является максимальным за счёт осцилляций. Измерение относительного искажения потока и спектра антинейтрино между дальней и ближними площадками позволяет определить параметры осцилляций нейтрино. Недостаток полного потока антинейтрино связан с величиной $\sin^2 2\theta_{13}$, в то время как искажение формы спектра определяется расщеплением масс Δm_{32}^2 (Δm_{ee}^2). Детекторы антинейтрино имеют идентичный дизайн, что позволяет существенно подавить коррелированные неопределённости: неопределённости абсолютного потока и формы спектра антинейтрино и коррелированной части неопределённости эффективности детектора. При относительном измерении, то есть

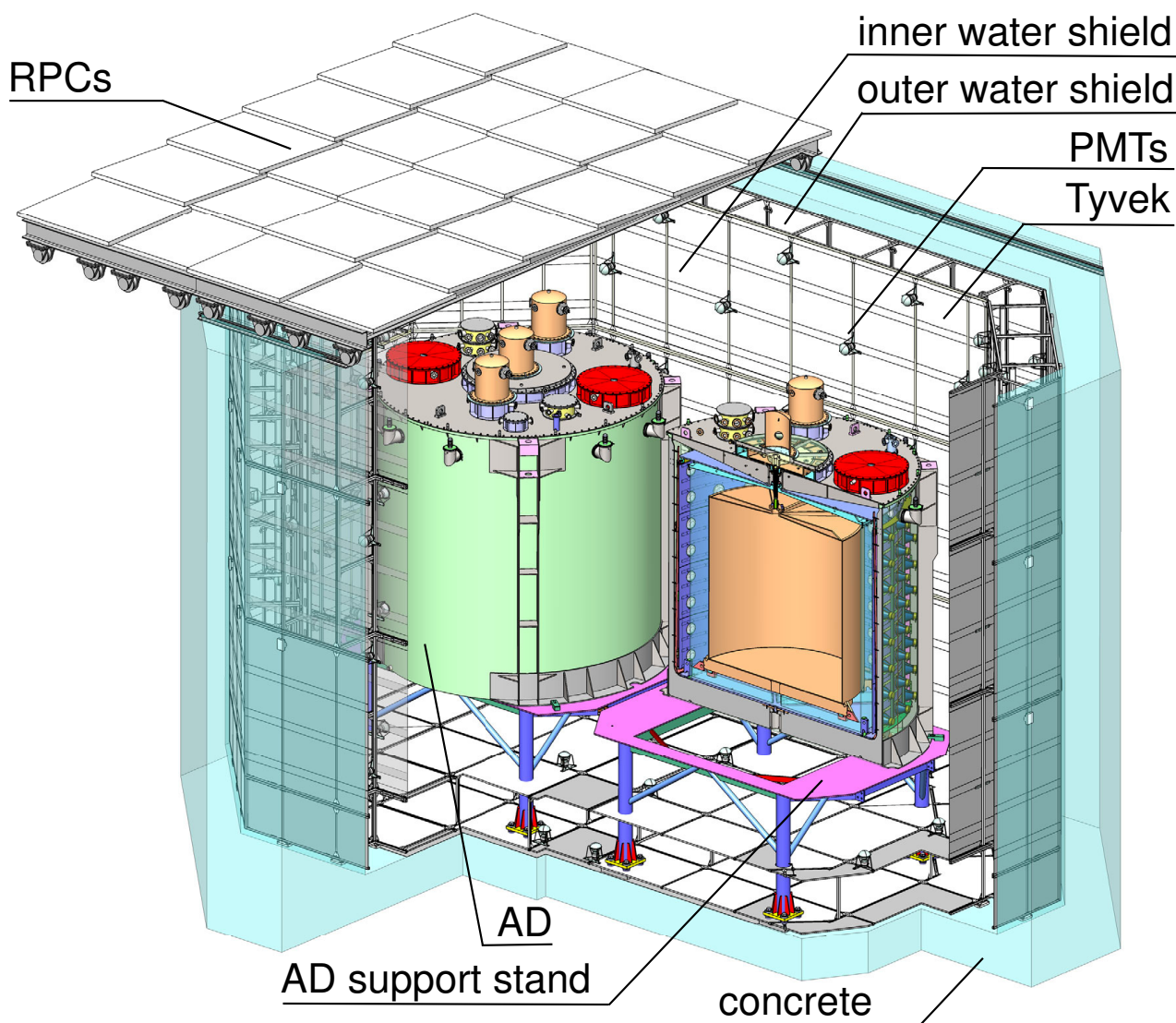


Рис. 1. Два детектора антинейтрино в бассейне на ближней экспериментальной площадке.

при наблюдении искажений измерения дальних детекторов относительно ближних, коррелированная часть неопределённости сокращается.

Группы детекторов на каждой площадке помещены в водяные бассейны, также оборудованные ФЭУ. Сверху бассейны закрыты несколькими слоями резистивных плоских камер (РПК). Водяные бассейны и РПК используются как комбинированное мюонное вето с общей эффективностью, превышающей 99.5 %, при неопределённости < 0.25 %.

Каждый детектор оборудован тремя автоматическими калибровочными устройствами (АКУ). Каждое АКУ оборудовано несколькими радиоактивными источниками (^{68}Ge , ^{60}Co и $^{241}\text{Am}^{13}\text{C}$) и светодиодом, которые могут быть опущены вертикально внутрь детектора. Источники используются для калибровки энергетической шкалы детектора, которая происходит каждую неделю.

Определены основные периоды набора данных в эксперименте и от-

мечены основные результаты. Первые два детектора на ближней площадке ЕН1 были запущены 23.09.2011. Данные, набранные за последующие 90 дней были использованы для исследования отклика детекторов. Продемонстрирована достаточная идентичность эффективностей и энергетических шкал [21]. Первые физические данные были получены 24.12.2011, когда все три площадки стали работать одновременно. В это время эксперимент работал в частичной конфигурации: на площадке ЕН2 был установлен только один детектор из двух планируемых, а на дальней площадке ЕН3 — три из четырёх. Несмотря на это, данных, набранных за 55 дней оказалось достаточно для открытия ненулевого значения угла смешивания θ_{13} с достоверностью более 5 стандартных отклонений. В полной конфигурации эксперимент был запущен 19.10.2012, а полная опубликованная статистика на сегодняшний день составляет более 2.5 миллионов событий, накопленных в течение 1230 дней набора данных [19].

Во второй половине главы приведён обзор критериев отбора событий ОБР, используемых в эксперименте Daya Bay. Рассмотрены источники фоновых событий. Событие ОБР имеет чёткую сигнатуру: событие состоит из двух сигналов, мгновенного, обладающего энергией от 0.7 МэВ до 12 МэВ, и запаздывающего, с энергией от 6 МэВ до 12 МэВ, разделённых интервалом от 1 мкс до 200 мкс. К дополнительным критериям относятся мюонное вето и критерий множественности — отбрасываются все события с более чем двумя сигналами и события, следующие за зарегистрированными мюонами.

К источникам фона, проходящим такой отбор относятся: фон от случайных совпадений, распады долгоживущих изотопов $^8\text{He}/^9\text{Li}$, быстрые нейтроны, реакция $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ и фон от калибровочного источника ^{241}Am ^{13}C . В связи с высоким порогом на энергию запаздывающего сигнала общий вклад фона мал и составляет 2 % (3 %) от сигнала для ближних (дальней) площадок. Основной вклад связан со случайными совпадениями радиоактивных сигналов, поток и спектр которых измеряется с неопределённостью порядка 1 %. Вклад $^8\text{He}/^9\text{Li}$ составляет 0.4 % и неопределённостью порядка 50 %. Остальные источники фона дают вклад менее 0.1 % в наблюдаемый сигнал.

Далее описана методика реконструкции положения и энергии событий и описаны основные эффекты, приводящие к искажению энергетического отклика детектора: наличие несцинтиллирующих материалов в детекторе; общая нелинейность энергетической шкалы, связанная с физическими свойствами сцинтиллятора и особенностями работы электроники; энергетическое разрешение.

Особое внимание уделено описанию систематических неопределённостей эксперимента: рассмотрены источники погрешностей и приведены значения неопределённостей для процессов рождения и детектирования нейтрино для каждого из рассматриваемых в диссертации периодов наборо-

ра данных. Полное количество отдельных параметров, неопределённость которых учитывается в анализе, превышает 200 штук.

Благодаря тому, что измерение осцилляционных параметров в эксперименте связано с относительным искажением потока и спектра антинейтрино между ближними и дальней площадками, влияние большинства источников неопределённостей на результат невелико. Величина $\sin^2 2\theta_{13}$ связана с изменением полного потока антинейтрино, поэтому основной систематический вклад в ошибку связан с некоррелированной неопределённостью эффективности детектирования, которая составляет 0.13 % и связана в большой степени с неопределённостью эффективности отбора по запаздывающей энергии. В свою очередь, некоррелированная неопределённость энергетической шкалы, составляющая 0.2 % влияет на чувствительность к относительному искажению наблюдаемого спектра и является доминирующим источником систематики при измерении расщепления масс Δm_{32}^2 .

Глава завершается обсуждением требований к анализу данных эксперимента Daya Bay, необходимых для достижения надёжного результата: все исследования, необходимые для публикации результатов, проводятся параллельно несколькими группами, а разрешение на публикацию возможно, только когда все группы придут к совместимым результатам. Часть проверок делается в режиме „слепого“ анализа, когда входные данные намеренно искажаются, чтобы исключить несознательную подгонку результатов.

В **третьей главе** рассмотрено ПО `dubOscar`, разработанное автором диссертации в составе дубненской группы для анализа данных эксперимента Daya Bay.

Глава начинается с общего описания возможностей ПО `dubOscar` и его основных характеристик. ПО предназначено для аналитического моделирования экспериментов с реакторными электронными антинейтрино, подгонки и статистического исследования параметров осцилляций нейтрино и спектра реакторных антинейтрино. Особое внимание при разработке уделено модульности: `dubOscar` 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. Например, в последнем анализе данных, набранных в течение 1230 дней [19] исследуется 280 наблюдаемых интервалов, 17 свободных параметров и 237 ограниченных параметров модели.

Для подгонки используется функция хи-квадрат с гауссовыми штрафными членами. Также реализована функция хи-квадрат с ковариационной матрицей, являющейся приближением первого порядка. Отдельное внимание уделено вопросу зависимости ошибок от параметров миними-

зации и получению несмещённой оценки. Математические подробности используемых функций рассмотрены в Приложении А, а вопрос несмещённости оценки — в следующей главе.

Далее подробно объяснены формулы, используемые для вычисления предсказания наблюдаемого спектра в эксперименте Daya Bay. В `dybOscar` используется подробная модель, учитывающая зависимые от времени антинейтринные спектры от 4-х делящихся изотопов в реакторе и от отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), а также кинематику взаимодействия нейтрино в детекторе в первом порядке по обратной массе протона с учётом направлений вылета продуктов распада. Описана методика учёта эффектов детектора посредством линейных преобразований.

Далее приведено описание кусочно-гладкой экспоненциальной параметризации спектра антинейтрино от реактора. Параметризация используется для свободной подгонки формы усреднённого наблюдаемого спектра антинейтрино. При этом учитывается разница в антинейтринных спектрах между отдельными цепочками распада в реакторе.

Отдельно описаны упрощения, используемые при моделировании наблюдаемых в отдельных детекторах чисел событий в анализе в режиме „поток“. Этот подход был использован для получения первых значений $\sin^2 2\theta_{13}$ [16; 17].

Описаны методики оптимизации, используемые для упрощения программы и повышения эффективности вычислений. Порядок вычислений устроен таким образом, что при вариации углов смешивания обновление происходит в 40 раз быстрее, чем полное вычисление. Промежуточные вычисления сохраняются и обновляются только в том случае, когда соответствующие модельные параметры изменяются. Интеграция наблюдаемого сигнала по углу вылета позитрона и по его энергии в каждом интервале производится по методу Гаусса-Лежандра с заранее заданной точностью, которая выбирается в зависимости от частоты осцилляций вероятности выживания в данном энергетическом интервале. Результаты промежуточных вычислений также могут быть табулированы в зависимости от одного или двух модельных параметров. В случае фиксированных систематических погрешностей, например при использовании функции хи-квадрат с ковариационной матрицей в задаче Фельдмана-Казинса [39], использование табулирования позволяет ускорить предсказание модели на шесть порядков. Полное вычисление модели занимает 0.4 с.

Далее приведены примеры вычисления ковариационных матриц. Глава завершается описанием этапов развития ПО `dybOscar` и описанием вклада автора диссертации в разработку. Приведён список задач и результатов помимо оценки параметров осцилляций нейтрино, в которых используется `dybOscar`.

В **четвёртой** главе рассматривается вопрос статистического тестирования ПО `dybOscar` и исследованию отклонений в результатах, которые

могут возникать при использовании функции хи-квадрат для подгонки параметров.

Глава начинается с описания методики тестирования. Тестирование заключается в многочисленном повторе процедуры подгонки исследуемых параметров для статистики предсказаний с известными модельными параметрами и исследовании распределений оценок параметров подгонки. Результаты проверки считаются удовлетворительными, если отклонений средней оценки параметра не отличается от истинного значения параметра более чем на 0.1 стандартных отклонений. Данное условие выбрано вручную и считается достаточно консервативным. Кроме того, отклонение средней оценки сравнивается со стандартной ошибкой, которая для статистики в 10000 экспериментов составляет 0.01 стандартных отклонений. Проводится также сравнение оценки получаемой ошибки с реальной шириной распределения решений. В исследовании участвуют параметры осцилляций нейтрино θ_{13} и Δm_{32}^2 (Δm_{ee}^2).

В следующем разделе приведены результаты тестирования ПО `dybOscar12` для анализа данных в режиме „поток“, использованного для получения результатов [16; 17]. В модели использовались следующие значения параметров осцилляций: $\sin^2 2\theta_{13} = 0.05$ и $\Delta m_{ee}^2 = 2.23 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$. Демонстрировано, что при исследовании данных со статистическими флуктуациями без учёта систематических погрешностей ПО демонстрирует согласие средней оценки $\sin^2 2\theta_{13}$ в пределах 0.01 стандартных отклонений и адекватную оценку ошибки. Точность подгонки остаётся той же как при использовании параметра Δm_{ee}^2 , отличающегося на $\pm 1\sigma$ от модельного, так и при учёте систематических погрешностей модели при подгонке. В силу ограничений ПО на момент проведения исследования, тестирования с флуктуациями систематических параметров не проводилось.

Далее приведены результаты исследования ПО `dybOscar`, предназначенного для анализа данных в режиме „поток+спектр“, то есть с учётом наблюдаемого спектра. В качестве модельных данных используются следующие значения параметров: $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ и $\Delta m_{32}^2 = 2.32 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$. В этот раз при моделировании разыгрываются как статистические, так и систематические флуктуации. Для этого используются два метода. В первом методе флуктуации подвергаются сами значения модельных параметров, а статистические флуктуации добавляются к полученному предсказанию. Во втором случае в модели используются номинальные значения модельных параметров, а к предсказанию добавляются флуктуации согласно многомерному Гауссову распределению с матрицей ошибок, включающей как статистические, так и систематические погрешности. Для подгонки в обоих случаях используется функция хи-квадрат с ковариационной матрицей.

В результате исследования показано, что результат оценки $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm_{32}^2 в среднем соответствует истинным значениям модели в пределах

0.1 стандартного отклонения, но не всегда в пределах 0.01 стандартного отклонения. 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_{32}^2 .

В третьем тесте проводилось исследование влияния вариации спектра реакторных антинейтрино за пределами погрешности на адекватность подгонки осцилляционных параметров. В данном исследовании в модели используются теоретические антинейтринные спектры Fallot [40], а при подгонке не согласующиеся с ними антинейтринные спектры модели Huber+Mueller [41; 42]. Различие в спектрах составляет не более 10 %. Данная замена призвана имитировать реальные несогласия модельных и измеряемых антинейтринных спектров. 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.

Распределение оценок для этого случая представлено на рисунках 2 и 3. Для каждого распределения приведены две вложенные диаграммы. Первая иллюстрирует абсолютное смещение средней оценки от истинного значения; сплошными областями отмечены интервалы 0.1 стандартного отклонения (0.1σ) и стандартная ошибка (0.01σ). Вторая иллюстрирует среднее оценки дисперсии параметра по отношению к ширине распределения оценок дисперсии; сплошной областью отмечена ширина распределения оценок ошибок. Рисунок иллюстрирует хорошее согласие между результатами подгонок и истинными значениями параметров, используемыми в модели. Оценка ошибки соответствует реальной ширине распределения.

Вторая половина главы посвящена вопросу зависимости ошибок от параметров подгонки при минимизации функции хи-квадрат и смещению оценок параметров, к которому она приводит. Для исследования используется модель эксперимента Daya Bay, соответствующая 621 дням набора данных. Исследуется единственный параметр — нормировка, масштабирующая предсказание. Показано, что для функции хи-квадрат Пирсона зависимость матрицы ошибок от параметров минимизации приводит к переоценке нормировки до 5 % для количества исследуемых интервалов порядка 160. Для случая статистических ошибок приведены приближенные решения для оценок, смещения в которых пропорциональны отношению количества исследуемых интервалов к полной статистике.

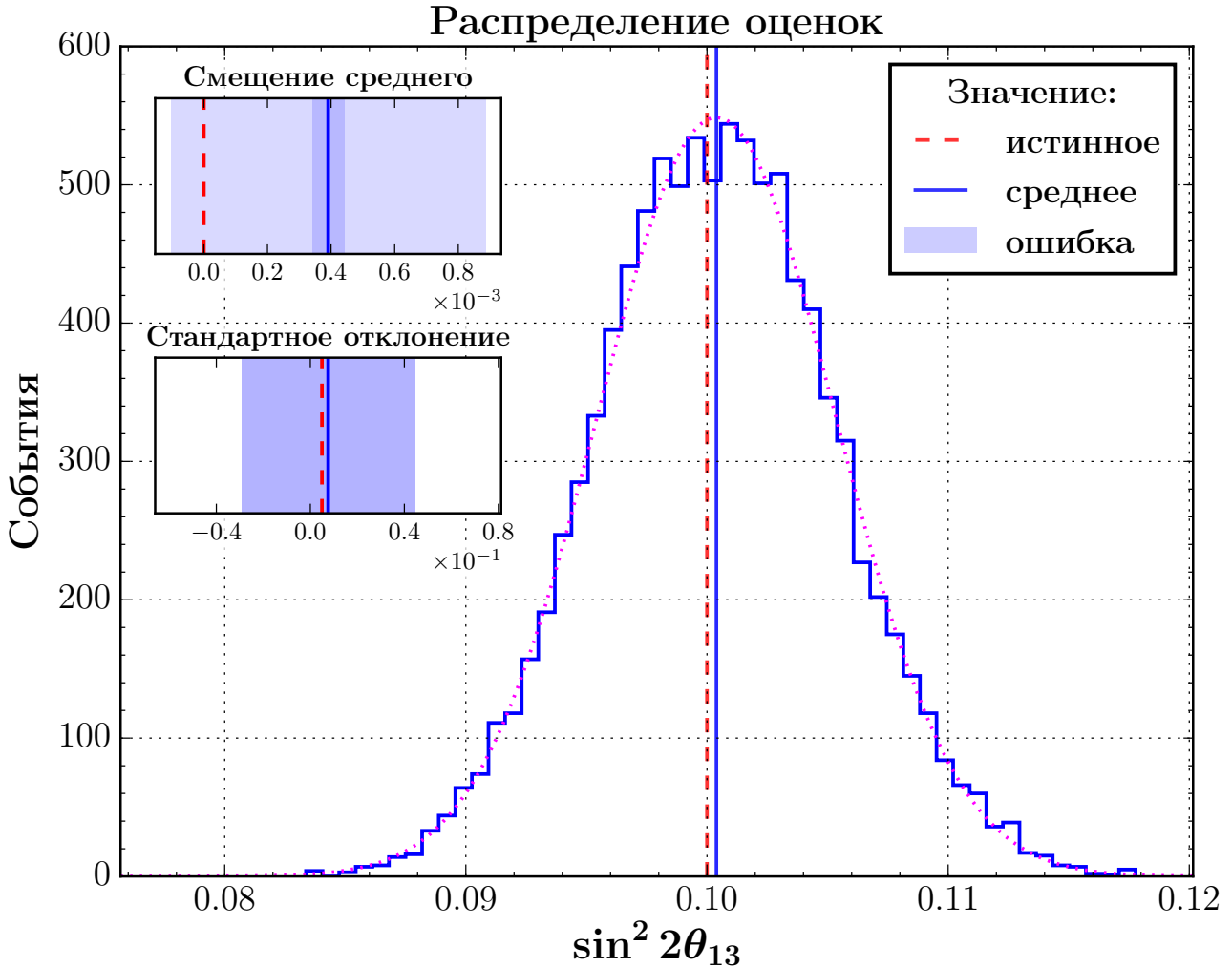


Рис. 2. Распределения решений для $\sin^2 2\theta_{13}$ для случая подгонки со свободным спектром антинейтрино. В качестве модели использовались антинейтринные спектры Fallot, в то время как для подгонки использован свободный усреднённый спектр на основе модели Huber+Mueller.

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.

С математической точки зрения возникновение подобного смещения является естественным и может быть понято в рамках Байесовского подхода к статистике. При оценки значений параметров функция хи-квадрат не является в общем виде несмещённым эстиматором, а является следствием использования функции правдоподобия \mathcal{L} в виде многомерного нормального распределения. Минимум $\chi^2 = -2 \ln \mathcal{L}$ соответствует максимуму правдоподобия только в случае, когда матрица ошибок, используемая в нормальном распределении, не зависит от параметров минимизации. В противном случае минимум \mathcal{L} даётся выражением $-2(\ln \mathcal{L} + \ln V)$, где V — матрица ошибок. Математический вывод представлен в Прило-

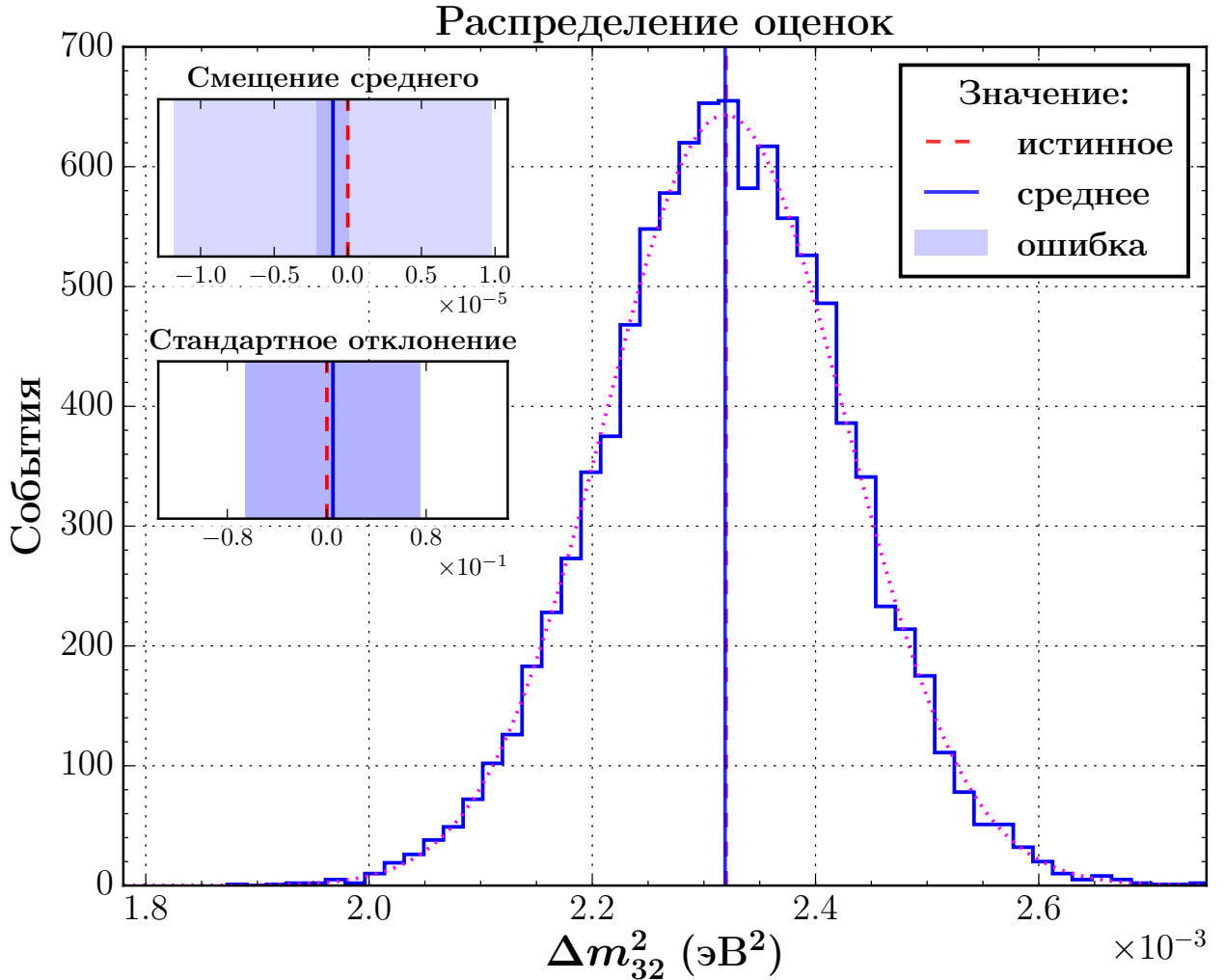


Рис. 3. Распределения решений для Δm_{32}^2 для случая подгонки со свободным спектром антинейтрино. В качестве модели использовались антинейтринные спектры Fallot, в то время как для подгонки использован свободный усреднённый спектр на основе модели Huber+Mueller.

жении А.

Таким образом, делается вывод о том, что при использовании функции хи-квадрат для подгонки параметров, используемые ошибки должны быть постоянными в процессе минимизации. В противном случае функция хи-квадрат должна быть поправлена на логарифм матрицы ошибок $\ln V$.

В **пятой главе** произведён обзор результатов, полученных автором диссертации на основе данных эксперимента Daya Bay.

По мере набора статистики экспериментом Daya Bay был проведён ряд исследований с целью измерения параметров нейтринных осцилляций θ_{13} и Δm_{32}^2 и спектра реакторных антинейтрино.

На основе данных, набранных на шести детекторах эксперимента Daya Bay за период 55 дней, был проведён анализ в режиме „поток“, то есть с учётом наблюдаемых в детекторах чисел событий и без учёта их

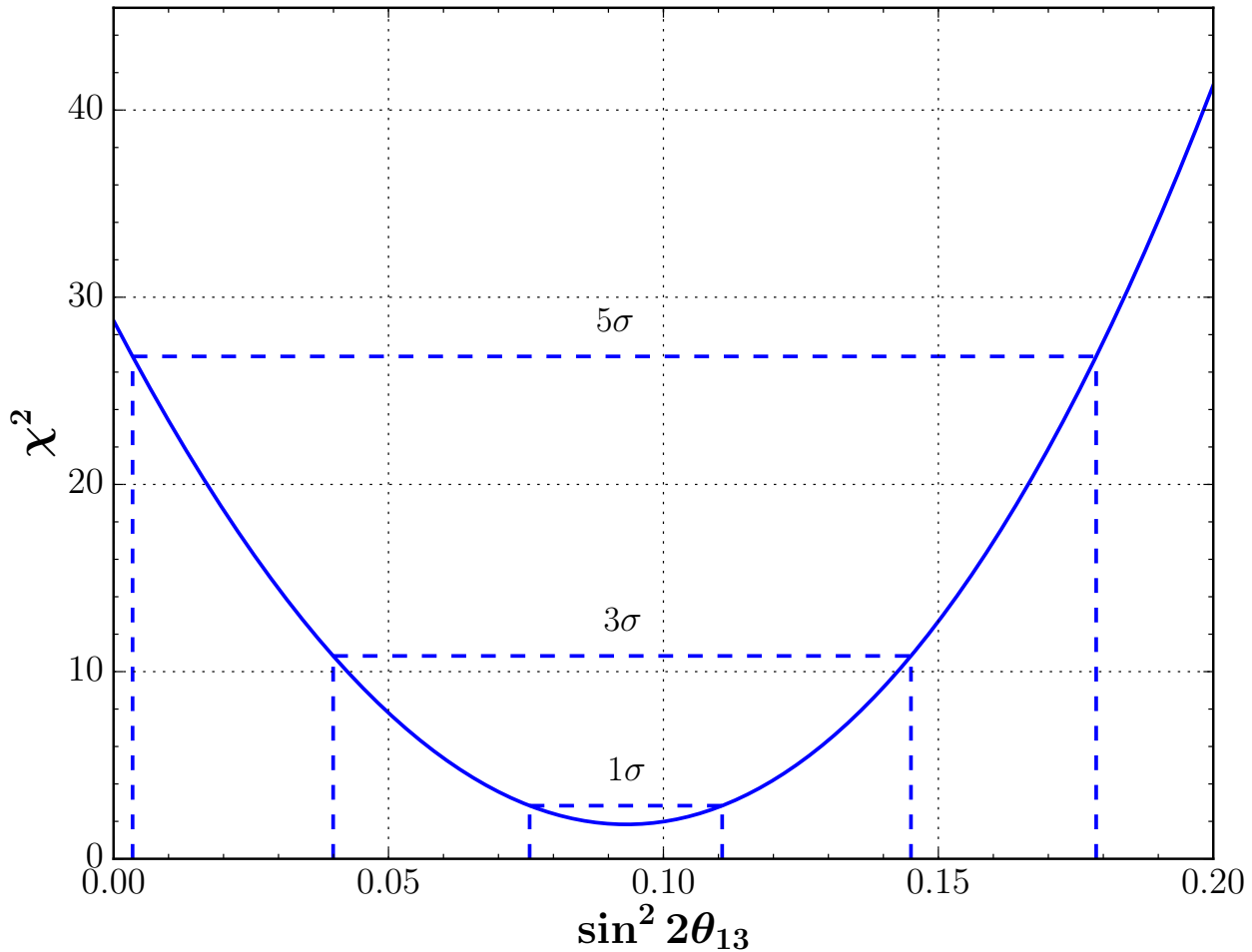


Рис. 4. Профиль χ^2 как функция $\sin^2 2\theta_{13}$ для периода 55 дней набора данных в эксперименте Daya Bay.

спектра. В результате получено первое измерение угла смешивания θ_{13} :

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.093 \pm 0.016 \text{ (стат.)} \pm 0.007 \text{ (сист.)}, \quad (1)$$

демонстрирующее отличие угла θ_{13} от нуля со значимостью более пяти стандартных отклонений. Соответствующий профиль функции хи-квадрат представлен на рисунке 4. На рисунке 5 приведена наблюдаемая вероятность выживания реакторных электронных антинейтрино в зависимости от расстояния до детектора.

Следующий анализ данных был проведён также в режиме „поток“ на основе данных, набранных за период 139 дней. Значимость отличия угла смешивания θ_{13} от нуля теперь превышает семь стандартных отклонений. Полученное значение:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.010 \text{ (стат.)} \pm 0.006 \text{ (сист.)} \quad (2)$$

согласуется с предыдущим, а также с результатами измерений других экспериментов.

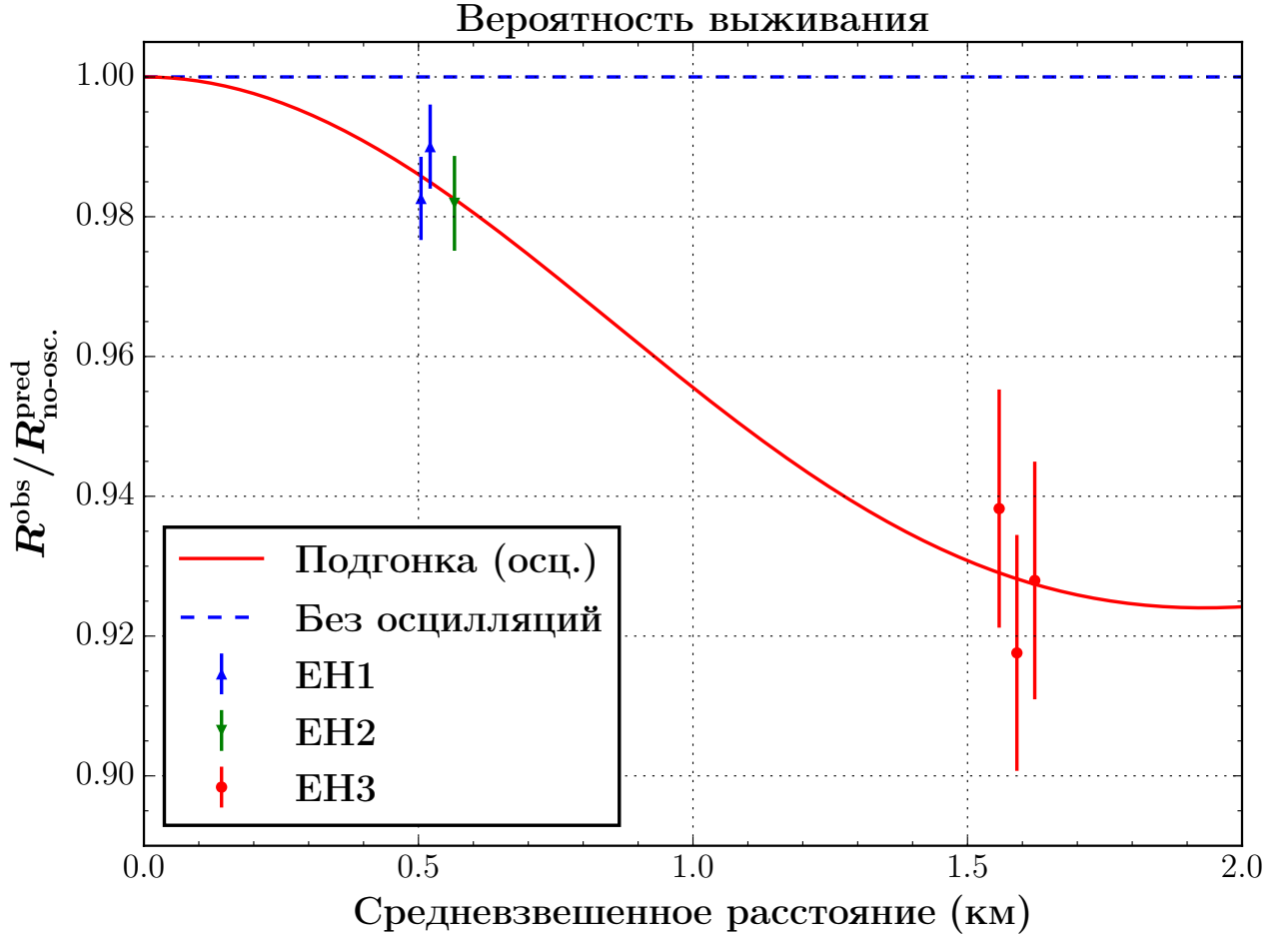


Рис. 5. Вероятность выживания реакторных электронных антинейтрино как функция от средневзвешенного расстояния до реактора, усреднённая по спектру реакторных антинейтрино. Точки соответствуют отношению наблюдаемого числа событий к ожидаемому в предположении отсутствия осцилляций. Указаны статистические ошибки. Отсчёты для дальних детекторов смещены на ± 50 м для наглядности.

Следующий анализ данных был проведён в режиме „поток+спектр“, то есть с учётом наблюдаемых в детекторах эксперимента спектрах. Используются данные, набранные за период 621 день, 404 дня из которых были набраны в полной конфигурации эксперимента с восемью детекторами. Новое измерение угла смешивания:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.083 \pm 0.005 \quad (3)$$

находится в согласии с предыдущими результатами, полученными в режиме „поток“. Наблюдение искажения спектра, измеренного на дальних площадках относительно наблюдения ближних площадок позволило также измерить значение расщепления масс нейтрино:

$$\Delta m_{32}^2 \text{ (НИ)} = (2.41 \pm 0.11) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 \quad (4)$$

в предположении нормальной иерархии. Результат измерения Δm_{32}^2 согласуется с результатами измерения данной величины в ускорительных экспериментах и является первым измерением, полученным с реакторными электронными антинейтрино.

Новое измерение осцилляционных параметров, использующее статистику более 2.5 миллионов антинейтринных взаимодействий, зарегистрированных за период 1230 дней было завершено в 2016 году. Полученное значение:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0027 \text{ (стат.)} \pm 0.0019 \text{ (сист.)} \quad (5)$$

является наиболее точным измерением угла смешивания и согласуется как с предыдущими результатами эксперимента Daya Bay, так и с результатом анализа данных в режиме „поток“:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0850 \pm 0.0030 \text{ (стат.)} \pm 0.0028 \text{ (сист.)}. \quad (6)$$

Результат измерения расщепления масс:

$$\begin{aligned} |\Delta m_{ee}^2| &= [2.50 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (сист.)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \\ \Delta m_{32}^2 \text{ (НИ)} &= [2.45 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (сист.)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \\ \Delta m_{32}^2 \text{ (ОИ)} &= [-2.56 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (сист.)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \end{aligned} \quad (7)$$

формально является наиболее точным измерением данной величины. С физической точки зрения результат согласуется по значению и сравним по точности с результатами ускорительных экспериментов. Результаты измерения осцилляционных параметров, полученные на статистике 1230 дней были приняты в качестве официальных результатов коллаборации Daya Bay [19].

В результате анализа в режиме „поток+спектр“ одновременно с осцилляционными параметрами был измерен спектр реакторных антинейтрино. Результат измерения на основе статистик 621 день и 1230 дней представлен как отношение наблюдения к предсказанию на основе модели Huber+Mueller и приведён на рисунке 6. Результат измерения спектра отражает две особенности измеренного антинейтринного спектра. Первая — это реакторная аномалия, то есть недостаток полного потока антинейтрино около 5%. Вторая — плечо в области энергии антинейтрино 4–6 МэВ, значительный локальный избыток антинейтрино. Результат измерения спектра антинейтрино, проведённый совместно с измерением осцилляционных параметров на данных всех восьми детекторов, находится в согласии с официальным результатом измерения спектра на основе данных только ближних детекторов [30].

Полученные на основе данных эксперимента Daya Bay значения параметров нейтринных осцилляций θ_{13} и Δm_{32}^2 являются наиболее точными значениями этих величин. Анализ был проведён на основе детальной

модели детектора с учётом всех возможных систематических погрешностей. В рамках одной программы `dubOscar` было проведено сравнение различных способов учёта систематических погрешностей и использовано две независимых модели спектра антинейтрино с получением хорошо согласующихся результатов. Результат также согласуется с результатами других групп Daya Bay, полученных разными методиками и различными способами учёта систематических погрешностей.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Для анализа данных, набранных в эксперименте Daya Bay, разработано ПО `dubOscar`. ПО предназначено для моделирования отклика антинейтринного детектора в произвольном реакторном нейтринном эксперименте и поддерживает возможность гибкой замены основных элементов вычислений. Реализованы компоненты, необходимые для предсказания наблюдаемых антинейтринных спектров от ядерных реакторов в сцинтилляторных детекторах эксперимента Daya Bay с учётом фоновых событий. Отдельное внимание уделено учёту систематических погрешностей и статистическому анализу. На основе обширного тестирования `dubOscar` на модельных данных, в том числе полученных из независимых источников, продемонстрирована аккуратность и стабильность результатов.

ПО `dubOscar` используется также для ряда других исследований: исследование эффектов квантовой декогерентности в экспериментах Daya Bay и KamLAND, поиск стерильных нейтрино, измерение спектра антинейтрино от реактора.

2. При помощи ПО `dubOscar12` был проведён анализ данных эксперимента Daya Bay в режиме „поток“. Результатом анализа данных, набранных за период 55 дней, является открытие ненулевого значения угла смешивания θ_{13} со статистической значимостью более пяти стандартных отклонений:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.093 \pm 0.016 \text{ (стат.)} \pm 0.007 \text{ (сист.)}. \quad (8)$$

После анализа увеличенной статистики, набранной за период 139 дней, значимость отличия угла смешивания от нуля выросла до семи стандартных отклонений. Получено новое измерение угла смешивания

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.010 \text{ (стат.)} \pm 0.006 \text{ (сист.)}. \quad (9)$$

Анализ данных в режиме „поток“ был повторён в 2016 при помощи последней, наиболее детальной версии `dubOscar` для данных, набранных за период 1230 дней:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0850 \pm 0.0030 \text{ (стат.)} \pm 0.0028 \text{ (сист.)}. \quad (10)$$

Приведённые результаты согласуются между собой и с результатами последнего анализа в режиме „поток+спектр“.

3. При помощи ПО `dybOscar` был проведён анализ данных эксперимента Daya Bay в режиме „поток+спектр“. В результате анализа данных, набранных за период 621 день, в 2014 году было получено новое, более точное значение угла смешивания нейтрино:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.083 \pm 0.005. \quad (11)$$

Последнее на сегодняшний день измерение угла смешивания, полученное в 2016 году на основе данных, набранных за период 1230 дней:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0027 \text{ (стат.)} \pm 0.0019 \text{ (сист.)}, \quad (12)$$

является наиболее точным измерением этой величины и было использовано в качестве официального результата эксперимента Daya Bay [19]. Результат измерений согласуется с предыдущими результатами эксперимента Daya Bay, результатами других групп Daya Bay, а также результатами других экспериментов.

4. В результате осцилляционного анализа данных эксперимента Daya Bay, набранных за период 621 день было также получено значение расщепления масс нейтрино Δm_{32}^2 . В результате анализа данных в режиме „поток+спектр“ в 2014 году получено значение:

$$\Delta m_{32}^2 \text{ (НИ)} = (2.41 \pm 0.11) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 \quad (13)$$

в предположении нормальной иерархии. В 2016 году результат был обновлён:

$$\begin{aligned} |\Delta m_{ee}^2| &= [2.50 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (сист.)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \\ \Delta m_{32}^2 \text{ (НИ)} &= [2.45 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (сист.)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \\ \Delta m_{32}^2 \text{ (ОИ)} &= [-2.56 \pm 0.06 \text{ (стат.)} \pm 0.06 \text{ (сист.)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \end{aligned} \quad (14)$$

что является наиболее точным измерением данной величины среди реакторных экспериментов. Измерение (14) было использован в качестве официального результата эксперимента Daya Bay [19]. Точность измерения Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay сравнима с точностью измерений ускорительных экспериментов. Последний результат измерения согласуется с предыдущим измерением данной величины в эксперименте Daya Bay, с результатами других групп эксперимента Daya Bay, а также результатами других экспериментов. Результаты измерения в эксперименте Daya Bay θ_{13} и Δm_{32}^2 имеют очень слабую корреляцию $\rho = -0.03$, а также практически не зависят от других параметров осцилляций.

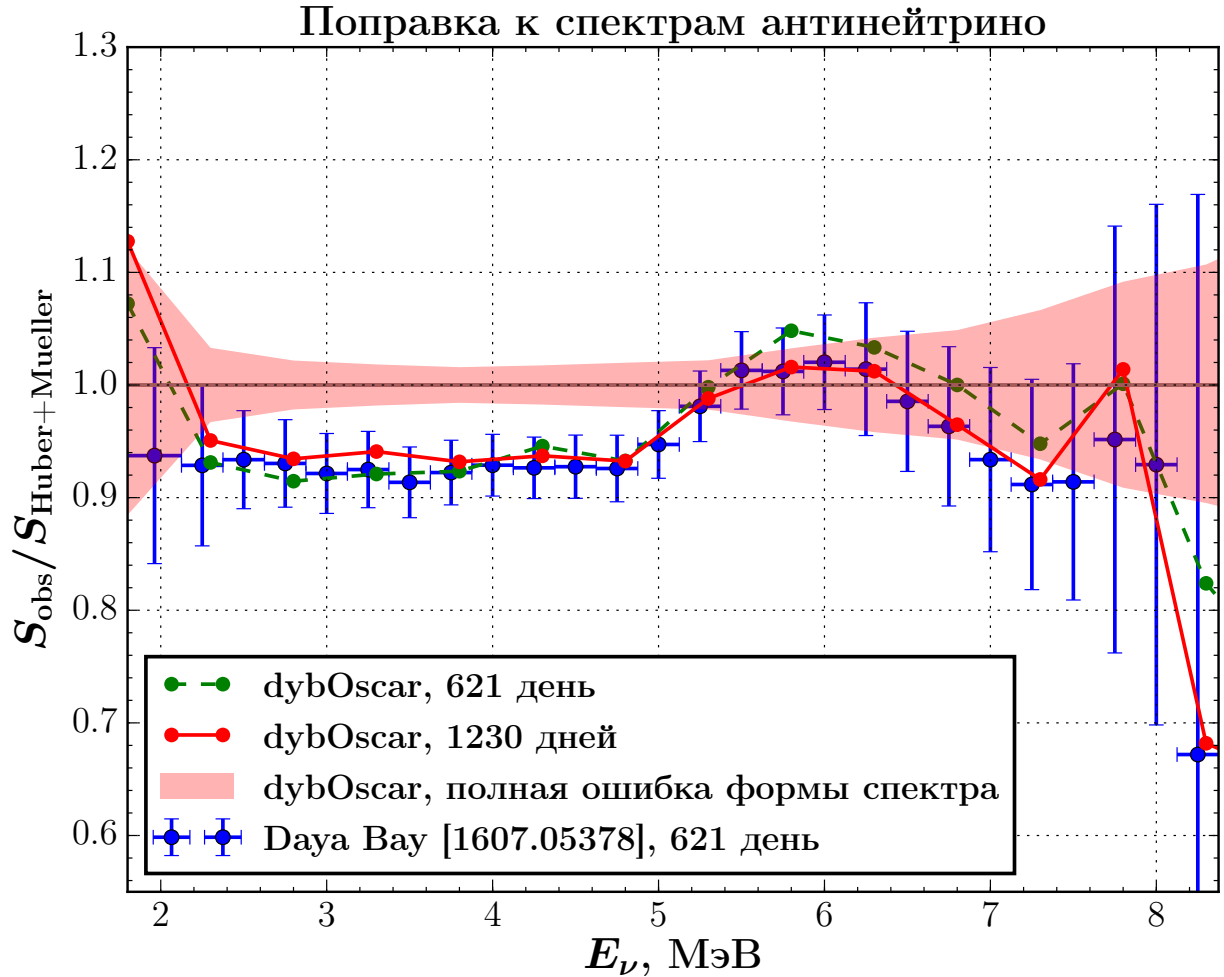


Рис. 6. Поправочные коэффициенты к среднему спектру антинейтрино на основе модели Huber+Mueller, измеренные одновременно с осцилляционными параметрами нейтрино на основе данных периода 1230 дней. Для сравнения приведён результат измерения dybOscar и официальный результат [30], полученные на данных периода 621 день. Ошибки dybOscar (сплошная область) соответствуют полной неопределённости формы спектра. Ошибки для [30] соответствуют полной неопределённости как формы спектра, так и потока антинейтрино.

Список использованных обозначений и сокращений

- „поток+спектр“** способ анализа данных, в котором учитывается энергетический спектр событий, наблюдаемых в каждом детекторе. 6, 14, 19–22
- „поток“** способ анализа данных, в котором учитываются только числа событий, наблюдаемые в каждом детекторе. Наблюдаемый энергетический спектр при в данном анализе полностью игнорируется. 6, 13, 14, 17–21
- EH** experimental hall — экспериментальная площадка, см. раздел диссертации 2.3.2. 9, 11
- Fallot** набор моделей спектров антинейтрино от ядерного реактора [40], полученных методом суммирования. Включает спектры для делящихся изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu . См. также раздел 1.3 диссертации и таблицу 1.3 на странице 33 там же. 15–17
- Huber+Mueller** набор моделей спектров антинейтрино от ядерного реактора. Для делящихся изотопов ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu используются конверсионные спектры [41], а для ^{238}U спектр [42], полученный методом суммирования. См. также раздел 1.3 диссертации и таблицу 1.3 на странице 33 там же. 7, 15–17, 20, 23
- АКУ** automated calibration unit (ACU) — автоматическое калибровочное устройство. 10
- АЭС** атомная электростанция. 9
- ЖС** жидкий сцинтиллятор. 9
- ОБР** обратный бета-распад. 7–9, 11
- ОЯТ** отработавшее ядерное топливо. 13
- ПМНС** (матрица смешивания) Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты. 4
- ПО** программное обеспечение. 4, 5, 12–14, 21, 22
- РПК** resistive plate chamber (RPC) — резистивная плоская камера. 10
- ФЭУ** photomultiplier tube (PMT) — фотоэлектронный умножитель. 9, 10

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Vol. 108. — P. 171803. — arXiv: 1203.1669 [hep-ex].
- A2. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay / F. An [et al.] // Chin.Phys. — 2013. — Vol. C37. — P. 011001. — arXiv: 1210.6327 [hep-ex].
- A3. A new measurement of antineutrino oscillation with the full detector configuration at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Vol. 115, no. 11. — P. 111802. — arXiv: 1505.03456 [hep-ex].
- A4. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. — 2017. — Vol. D95. — P. 072006. — arXiv: 1610.04802 [hep-ex].
- A5. *Gonchar M.* Precise $\sin^2 2\theta_{13}$ measurement by the Daya Bay reactor neutrino experiments, // DAE Symp. Nucl. Phys. — 2012. — Vol. 57. — Pp. 54–59.
- A6. A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors / F. An [et al.] // Nucl.Instrum.Meth. — 2012. — Vol. A685. — Pp. 78–97. — arXiv: 1202.6181 [physics.ins-det].
- A7. Spectral measurement of electron antineutrino oscillation amplitude and frequency at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Vol. 112. — P. 061801. — arXiv: 1310.6732 [hep-ex].
- A8. Independent measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} via neutron capture on hydrogen at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev. — 2014. — Vol. D90, no. 7. — P. 071101. — arXiv: 1406.6468 [hep-ex].
- A9. The muon system of the Daya Bay Reactor antineutrino experiment / F. An [et al.] // Nucl.Instrum.Meth. — 2015. — Vol. A773. — Pp. 8–20. — arXiv: 1407.0275 [physics.ins-det].
- A10. Search for a Light Sterile Neutrino at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Vol. 113. — P. 141802. — arXiv: 1407.7259 [hep-ex].
- A11. The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment / F. P. An [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2016. — Vol. A811. — Pp. 133–161. — arXiv: 1508.03943 [physics.ins-det].
- A12. Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 116. — P. 061801. — arXiv: 1508.04233 [hep-ex].
- A13. New measurement of θ_{13} via neutron capture on hydrogen at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. — 2016. — Vol. D93, no. 7. — P. 072011. — arXiv: 1603.03549 [hep-ex].
- A14. Improved Search for a Light Sterile Neutrino with the Full Configuration of the Daya Bay Experiment / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 117, no. 15. — P. 151802. — arXiv: 1607.01174 [hep-ex].
- A15. Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Chin. Phys. — 2017. — Vol. C41, no. 1. — P. 013002. — arXiv: 1607.05378 [hep-ex].
- A16. Limits on Active to Sterile Neutrino Oscillations from Disappearance Searches in the MINOS, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments / P. Adamson [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 117, no. 15. — P. 151801. — arXiv: 1607.01177 [hep-ex]. — [Addendum: Phys. Rev. Lett.117,no.20,209901(2016)].

Список литературы

1. Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of Super-Kamiokande I data / S. Fukuda [et al.] // Phys. Lett. — 2002. — Vol. B539. — Pp. 179–187. — arXiv: hep-ex/0205075 [hep-ex].
2. Observation of a small atmospheric muon-neutrino / electron-neutrino ratio in Kamiokande / K. Hirata [et al.] // Phys.Lett. — 1992. — Vol. B280. — Pp. 146–152.
3. Search for Neutrino Oscillations at a Fission Reactor / H. Kwon [et al.] // Phys.Rev. — 1981. — Vol. D24. — Pp. 1097–1111.
4. Study of reactor anti-neutrino interaction with proton at Bugey nuclear power plant / Y. Declais [et al.] // Phys.Lett. — 1994. — Vol. B338. — Pp. 383–389.
5. Search for neutrino oscillations at 15-meters, 40-meters, and 95-meters from a nuclear power reactor at Bugey / Y. Declais [et al.] // Nucl.Phys. — 1995. — Vol. B434. — Pp. 503–534.
6. Neutrino induced deuteron disintegration experiment / S. P. Riley [et al.] // Phys. Rev. — 1999. — Vol. C59. — Pp. 1780–1789. — arXiv: hep-ex/9904001 [hep-ex].
7. A study of the reaction $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ on a nuclear reactor / A. I. Afonin [et al.] // JETP. — 1988. — Vol. 67. — Pp. 213–221. — [Zh. Eksp. Teor. Fiz.67,213(1988)].
8. Neutrino Oscillation Experiments at the Gosgen Nuclear Power Reactor / G. Zacek [et al.] // Phys.Rev. — 1986. — Vol. D34. — Pp. 2621–2636.
9. Detection of antineutrinos in the flux from two reactors / G. S. Vidyakin [et al.] // JETP. — 1987. — Vol. 66. — Pp. 242–247. — [Zh. Eksp. Teor. Fiz.66,242(1987)].
10. Limitations on the characteristics of neutrino oscillations / G. S. Vidyakin [et al.] // JETP Lett. — 1994. — Vol. 59. — Pp. 390–393. — [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.59,364(1994)].
11. Results of a two position reactor neutrino oscillation experiment / Z. D. Greenwood [et al.] // Phys. Rev. — 1996. — Vol. D53. — Pp. 6054–6064.
12. Final results from the Palo Verde neutrino oscillation experiment / F. Boehm [et al.] // Phys.Rev. — 2001. — Vol. D64. — P. 112001. — arXiv: hep-ex/0107009 [hep-ex].
13. Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment / M. Apollonio [et al.] // Phys.Lett. — 1999. — Vol. B466. — Pp. 415–430. — arXiv: hep-ex/9907037 [hep-ex].
14. Observation of muon neutrino disappearance with the MINOS detectors and the NuMI neutrino beam / D. Michael [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2006. — Vol. 97. — P. 191801. — arXiv: hep-ex/0607088 [hep-ex].
15. Measurement of Neutrino Oscillations with the MINOS Detectors in the NuMI Beam / P. Adamson [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2008. — Vol. 101. — P. 131802. — arXiv: 0806.2237 [hep-ex].
16. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Vol. 108. — P. 171803. — arXiv: 1203.1669 [hep-ex].
17. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay / F. An [et al.] // Chin.Phys. — 2013. — Vol. C37. — P. 011001. — arXiv: 1210.6327 [hep-ex].
18. A new measurement of antineutrino oscillation with the full detector configuration at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Vol. 115, no. 11. — P. 111802. — arXiv: 1505.03456 [hep-ex].
19. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. — 2017. — Vol. D95. — P. 072006. — arXiv: 1610.04802 [hep-ex].
20. *Gonchar M.* Precise $\sin^2 2\theta_{13}$ measurement by the Daya Bay reactor neutrino experiments, // DAE Symp. Nucl. Phys. — 2012. — Vol. 57. — Pp. 54–59.
21. A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors / F. An [et al.] // Nucl.Instrum.Meth. — 2012. — Vol. A685. — Pp. 78–97. — arXiv: 1202.6181 [physics.ins-det].
22. Spectral measurement of electron antineutrino oscillation amplitude and frequency at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Vol. 112. — P. 061801. — arXiv: 1310.6732 [hep-ex].

23. Independent measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} via neutron capture on hydrogen at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev. — 2014. — Vol. D90, no. 7. — P. 071101. — arXiv: 1406.6468 [hep-ex].
24. The muon system of the Daya Bay Reactor antineutrino experiment / F. An [et al.] // Nucl.Instrum.Meth. — 2015. — Vol. A773. — Pp. 8–20. — arXiv: 1407.0275 [physics.ins-det].
25. Search for a Light Sterile Neutrino at Daya Bay / F. An [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Vol. 113. — P. 141802. — arXiv: 1407.7259 [hep-ex].
26. The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment / F. P. An [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2016. — Vol. A811. — Pp. 133–161. — arXiv: 1508.03943 [physics.ins-det].
27. Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 116. — P. 061801. — arXiv: 1508.04233 [hep-ex].
28. New measurement of θ_{13} via neutron capture on hydrogen at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. — 2016. — Vol. D93, no. 7. — P. 072011. — arXiv: 1603.03549 [hep-ex].
29. Improved Search for a Light Sterile Neutrino with the Full Configuration of the Daya Bay Experiment / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 117, no. 15. — P. 151802. — arXiv: 1607.01174 [hep-ex].
30. Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Chin. Phys. — 2017. — Vol. C41, no. 1. — P. 013002. — arXiv: 1607.05378 [hep-ex].
31. Limits on Active to Sterile Neutrino Oscillations from Disappearance Searches in the MINOS, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments / P. Adamson [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 117, no. 15. — P. 151801. — arXiv: 1607.01177 [hep-ex]. — [Addendum: Phys. Rev. Lett.117,no.20,209901(2016)].
32. Study of the wave packet treatment of neutrino oscillation at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Accepted to: Eur. J. Phys. — 2016. — arXiv: 1608.01661 [hep-ex].
33. Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Accepted to: Phys. Rev. Lett. — 2017. — arXiv: 1704.01082 [hep-ex].
34. Constraints on θ_{13} from A Three-Flavor Oscillation Analysis of Reactor Antineutrinos at KamLAND / A. Gando [et al.] // Phys.Rev. — 2011. — Vol. D83. — P. 052002. — arXiv: 1009.4771 [hep-ex].
35. The T2K experiment / K. Abe [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 2011. — Dec. — Vol. 659. — Pp. 106–135. — arXiv: 1106.1238 [physics.ins-det].
36. P-875: A Long baseline neutrino oscillation experiment at Fermilab / E. Ables [et al.]. — 1995.
37. Double Chooz: A Search for the neutrino mixing angle $\theta(13)$ / F. Ardellier [et al.]. — 2006. — arXiv: hep-ex/0606025 [hep-ex].
38. Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment / J. Ahn [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Vol. 108. — P. 191802. — arXiv: 1204.0626 [hep-ex].
39. *Feldman G. J., Cousins R. D.* Unified approach to the classical statistical analysis of small signals // Phys.Rev. — 1998. — Apr. — Vol. D57. — Pp. 3873–3889. — eprint: physics/9711021.
40. New antineutrino energy spectra predictions from the summation of beta decay branches of the fission products / M. Fallot [et al.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Vol. 109. — P. 202504. — arXiv: 1208.3877 [nucl-ex].
41. *Huber P.* On the determination of anti-neutrino spectra from nuclear reactors // Phys.Rev. — 2011. — Vol. C84. — P. 024617. — arXiv: 1106.0687 [hep-ph].
42. Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra / T. Mueller [et al.] // Phys.Rev. — 2011. — Vol. C83. — P. 054615. — arXiv: 1101.2663 [hep-ex].

Гончар Максим Олегович

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА СМЕШИВАНИЯ θ_{13} И РАСЩЕПЛЕНИЯ МАСС НЕЙТРИНО Δm_{32}^2
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DAYA BAU

Автореф. дис. на соискание учёной степени физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____