

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гончара Максима Олеговича “Измерение угла смешивания  $\theta_{13}$  и расщепления масс нейтрино  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа М.О. Гончара выполнена в рамках работ коллаборации Daya Bay по изучению осцилляций реакторных нейтрино на расстояниях порядка 2 км, определяемых углом смешивания  $\theta_{13}$  и разностью квадратов масс  $\Delta m^2_{32}$ . Эксперименты Daya Bay, а также весьма похожие RENO и Double CHOOZ это, так называемые эксперименты на "исчезновение" нейтрино со "средней" базой, которые ориентированы на измерение доли третьего массового состояния в электронном нейтрино (угла смешивания  $\theta_{13}$ ).

Можно уверенно сказать, что коллаборация Daya Bay добилась наиболее впечатляющих успехов. Она первая объявила об открытии ненулевого значения амплитуды осцилляций  $\sin^2 2\theta_{13}$  на уровне более  $5\sigma$ . В настоящее время определенное коллаборацией значение угла смешивания  $\theta_{13}$  является наиболее точным. Все эти достижения отражены в диссертационной работе, а автор диссертации, как и вся группа ОИЯИ, имеют непосредственное отношение к полученным результатам.

Революционное обнаружение большого значения угла смешивания  $\theta_{13}$ , открывающее путь к поиску CP-нарушения в нейтринном секторе и определению иерархии масс нейтрино, делает участие в этом эксперименте крайне актуальным. Важно, что группа ОИЯИ продолжает активно работать в эксперименте JUNO, основной целью которого является определение иерархии масс нейтрино и прецизионное измерение осцилляционных параметров.

Диссертационная работа М.О. Гончара посвящена анализу данных эксперимента Daya Bay с целью определения значений осцилляционных параметров. Для этого разработано специализированное программное обеспечение, позволившее получить в 2016 году наиболее точные результаты для осцилляционных параметров, которые выбраны коллаборацией в качестве официальных. Разработанное программное обеспечение также может быть использовано и для решения других важных задач, таких как поиск осцилляций нейтрино в стерильное состояние, исследование эффекта декогерентности в нейтринных осцилляциях и других.

Таким образом, **актуальность** исследований, представленных в диссертационной работе, не вызывает сомнений.

Диссертация М.О. Гончара состоит из введения, 5-и глав, заключения, 3-х приложений и списка литературы из 214 наименований. Объем диссертации составляет 248 страниц, включая 102 рисунка и 22 таблицы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели диссертационной работы, перечислены выносимые на защиту положения, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены данные о публикациях и апробации работы, указан личный вклад автора, кратко изложена структура диссертации.

**В первой главе**, которая называется "Обзор литературы", дан краткий обзор теоретических положений в физике нейтрино и достаточно подробный обзор экспериментальных работ, направленных на изучение реакторных антинейтрино.

Описаны проблемы современных моделей спектра реакторных антинейтрино, которые, возможно, приводят к "реакторной аномалии" и существенному превышению числа антинейтрино в интервале 4 - 6 МэВ.

Во второй части главы рассмотрен пионерский эксперимент на реакторе Саванна-Ривер и первые эксперименты CHOOZ и Palo Verde, ориентированные непосредственно на измерение угла смешивания  $\theta_{13}$ . Отмечено, что методика детектирования, примененная в данных экспериментах, является основной для исследования реакторных антинейтрино. Указано, что использовать два идентичных детектора было предложено в работе сотрудников КИ Л. Микаэляна и В. Синева. Кратко описан реакторный эксперимент KamLAND и ускорительные эксперименты T2K и MINOS, в которых были получены первые указания на ненулевое значение  $\theta_{13}$ .

В заключении главы приведены данные по измерению угла  $\theta_{13}$ , полученные в различных экспериментах, и проведено их сравнение.

**Вторая глава** посвящена детальному описанию эксперимента Daya Bay.

Вначале рассмотрены основные требования к экспериментальной установке для прецизионного измерения угла смешивания  $\theta_{13}$ , описана методика проведения экспериментов с реакторными нейтрино, основанная на регистрации реакции обратного бета распада. Далее подробно рассматривается конструкция отдельного жидко-сцинтилляционного детектора массой 20 т и окончательный вариант эксперимента Daya Bay, в котором используется восемь детекторов, расположенных в среднем на расстояниях 350 м, 500 м и 1500 м от реакторов. Представлены основные временные этапы эксперимента и соответствующие им полученные результаты.

Во второй половине главы дан список критериев отбора событий обратного бета-распада, используемых в эксперименте Daya Bay. Подробно рассмотрены главные источники фона. Далее описана используемая методика восстановления положения и энергии события и возникающие при этом проблемы, связанные, в частности с нелинейностью энергетической шкалы. Перечисляются систематические ошибки эксперимента.

В завершении главы обсуждаются требования к процедуре анализа данных для достижения надёжного результата. Отмечается, что анализ проводится параллельно несколькими группами, при этом используется и режим "blind" анализа.

**В третьей главе** подробно рассматривается программное обеспечение, использовавшееся для анализа данных Daya Bay, которое было разработано М.О. Гончаром совместно с группой ОИЯИ (и названное `dubOscar`). Хотя очевидная основная задача пакета программ это подгонка осцилляционных параметров в эксперименте Daya Bay, оно может быть использовано для моделирования и других экспериментов. Фитирование реализовано двумя способами: функция  $\chi^2$  используется со штрафными членами и с ковариационной матрицей. В завершении главы представлен личный вклад М.О. Гончара в разработку данного программного обеспечения.

**В четвертой главе** приводятся результаты тестирований разработанного программного обеспечения `dubOscar`, которые заключались в многократном повторении процедуры фитирования для различных статистик с заданными параметрами. Приводятся результаты тестирования `dubOscar` для анализа данных в режиме, учитывающем только скорости счета детекторов (названном автором "поток") и в режиме, учитывающем также форму энергетического спектра позитронов ("поток + спектр"). Дополнительно исследовалось влияние больших вариаций спектра реакторных антинейтрино на результаты подгонки осцилляционных параметров. Показано, что результаты подгонки `dubOscar` соответствуют модельным представлениям параметров. Специально были проверены смещения оценок при

использовании функции  $\chi^2$  с ковариационной матрицей для случая, когда ошибки зависят от параметров подгонки. Обсуждаются способы коррекции смещения.

**В пятой главе дан обзор результатов**, полученных автором на основе данных эксперимента Daya Bay. При анализе, учитывающем только скорости счета детекторов (режим "поток") на статистике, набранной за 55 и 139 суток, было обнаружено ненулевое значение угла смешивания  $\theta_{13}$  со статистической значимостью более 5 и 7 стандартных отклонений, соответственно.

В результате анализа с учетом формы энергетического спектра позитронов ("поток + спектр"), выполненного в 2014 году на статистике, накопленной за 621 сутки, было получено новое, значение  $\sin^2 2\theta_{13}$  с точностью 6 %. Сравнение формы спектров дальних и ближних детекторов позволило измерить значение разности квадратов масс  $\Delta m_{32}^2$  с точностью лучше 5 %.

Наконец, в 2016 году был выполнен совместный анализ более 2.5 миллионов антинейтринных событий, зарегистрированных за период 1230 суток. В результате установлено наиболее точное значение угла смешивания  $\theta_{13}$ .

Полученное значение согласуется с предыдущими результатами эксперимента Daya Bay и с результатом анализа данных в режиме "поток". Важно, что результаты, полученные на статистике 1230 дней с использованием программного обеспечения, разработанного группой ОИЯИ, были приняты в качестве официальных результатов коллаборации Daya Bay. Это большой успех дубненской группы.

Проведенный анализ позволил установить спектр реакторных антинейтрино. Отношение определенного спектра антинейтрино к широко используемому теоретическому спектру (Huber PRC84, 024617 и Mueller et al., PRC83, 054615) сохраняет как "реакторную аномалию", так и существенный избыток антинейтрино в области 4-6 МэВ.

Автор также упоминает последний результат Daya Bay по измерению эволюции спектра реакторных нейтрино (PRL 118, 251801), согласно которому, возможно, величина дефицита нейтрино в реакторной аномалии коррелирует с вкладом от  $^{235}\text{U}$ -нейтрино.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем:

Выполнено новое измерение осцилляционных параметров, использующее более  $2.5 \times 10^6$  событий обратного бета распада, зарегистрированных за период 1230 дней в эксперименте Daya Bay. Полученное значение угла смешивания  $\sin^2 \theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0027 \pm 0.0019$  является наиболее точным измерением данной величины.

Впервые измерено значение разности квадратов масс  $\Delta m_{32}^2$  ( $|\Delta m_{ee}^2| = (2.50 \pm 0.06 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ ) на основе данных реакторных экспериментов с точностью, сравнимой с достигнутой в ускорительных экспериментах.

Вышеуказанные официальные результаты коллаборации Daya Bay для осцилляционных параметров, опубликованные в PRD 95, 072006 (2017), были получены в результате анализа, выполненного с помощью программного обеспечения, разработанного М.О. Гончаром совместно с группой ОИЯИ.

**Практическая значимость** состоит, в первую очередь в том, что разработанное программное обеспечение может быть использовано для моделирования конкретных реакторных экспериментов, в том числе, связанных с определением степени выгорания ядерного топлива в активной зоне промышленного реактора АЭС по измеренному спектру реакторных нейтрино.

**Обоснованность и достоверность** результатов диссертации подтверждается тем, что в ней используются строгие и проверенные методы измерения с использованием жидко-сцинтилляционных детекторов, современные методы статистического анализа, согласием с результатами, полученными другими группами анализа эксперимента Daya Bay, а также согласием с данными других экспериментов по изучению осцилляций. В частности, результаты схожих по методике экспериментов Double CHOOZ и RENO, уступая по точности, находятся в хорошем согласии с результатами, выносимыми на защиту.

По диссертационной работе можно сделать некоторые **замечания**.

1. В списке литературы с удивлением не обнаружил традиционных ссылок на оригинальные работы Б.М. Понтекорво в которых предлагается идея нейтринных осцилляций: Б.М. Понтекорво, ЖЭТФ 33, 549 (1957) и ЖЭТФ 34, 247 (1958). Нет ссылки на работу В.Н. Грибова и Б.М. Понтекорво (Phys. Lett. B 28 493 (1969)), в которой впервые был развит математический формализм, описывающий осцилляции между разными типами нейтрино. В диссертации, конечно, неоднократно упоминается матрица Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты, но ссылка на оригинальную работу Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata, Prog.Theor. Phys. 28, 870 (1962) тоже отсутствует. Возможно, автор, который, конечно, хорошо знаком с данными работами, считает их настолько известными, что они не нуждаются в цитировании.

2. В разделе 1.5.3. "Первые осцилляционные эксперименты с реакторными антинейтрино" отмечается, что *"В период с 1977 по 1996 был проведён ряд экспериментов по поиску осцилляций реакторных антинейтрино на расстояниях от десятков до сотни метров от реакторов ILL [3], Bugey [4—6], ROVNO [7], Gösgen [8], Krasnoyarsk [9; 10], Саванна Ривер [11]. Эксперименты давали хорошо согласующийся друг с другом результат: поток антинейтрино соответствовал ожиданиям в гипотезе отсутствия нейтринных осцилляций"*. Возможно, здесь стоило бы упомянуть работу 1984 г на реакторе Буже "Cavaignac J. F. et al. Indication for neutrino oscillation from a high statistics experiment at the BUGEY reactor, PL B148, 387 (1984)", в которой утверждалось о наблюдении осцилляций нейтрино с  $\Delta m^2 \sim 0.2 \text{ эВ}^2$  ( $\sim 50 \text{ м}$ ) и которая, в существенной мере, стимулировала вышеуказанные работы. В течении нескольких лет ситуация была очень интригующей, пока другие эксперименты, в том числе и авторы положительной работы, не дали "хорошо согласующийся" отрицательный результат.

3. В главе 5 приведены результаты проверки разработанного программного обеспечения на различной статистике детектора Daya Bay, которая соответствует временным интервалам 55, 139, 621 и 1230 суток. После каждой проверки отмечается, что полученные результаты для осцилляционных параметров хорошо согласуются с результатами, полученными другими группами, в том числе с официальными результатами. Возможно, следовало бы сравнить приведенные результаты (в том числе и официальные) для осцилляционных параметров нейтрино в отдельной таблице, чтобы читатель мог сам легко убедиться в хорошем согласии.

Отмеченные недостатки не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы М.О Гончара. Она написана хорошим языком, практически отсутствуют замечания к оформлению работы.

В работе получены **новые** важные результаты, среди которых можно выделить следующие:

1. Автором, совместно с группой ОИЯИ, разработан пакет программ `dybOscar` для анализа данных эксперимента Daya Bay с целью определения значений осцилляционных

параметров. Пакет может быть использован, и уже использовался, для решения и других физических задач, в частности для восстановления спектра реакторных антинейтрино и для получения экспериментальных ограничений на параметры декогерентности в нейтринных осцилляциях.

2. С помощью разработанного программного обеспечения, автором, в составе коллаборации, выполнен анализ данных детектора Daya Bay за 1260 суток, в результате которого установлены наиболее точные значения осцилляционных параметров. Выполненный анализ принят в качестве официального анализа коллаборации, что, конечно, является большим достижением группы ОИЯИ и М.О. Гончара.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации. Результаты работы представляют интерес для ряда лабораторий и центров, в нашей стране - ИЯИ РАН (Москва), НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), ПИЯФ НИЦ КИ (С.-Петербург), ИТЭФ НИЦ КИ (Москва) и ИФВЭ НИЦ КИ (Протвино).

Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными и получены впервые. Они обоснованы и убедительны, хорошо известны специалистам и опубликованы в ведущих физических журналах. **В целом диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, соответствующем уровню школы нейтринной физики ОИЯИ, она отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, а ее автор М.О. Гончар заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник ПИЯФ НИЦ КИ,  
доктор физико-математических наук

А.В. Дербин

*Подпись А.В. Дербина заверяю:*  
Ученый секретарь ПИЯФ НИЦ КИ,  
кандидат физико-математических наук

С.И. Воробьев

Дербин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий Отделом полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий лабораторией низкофоновых измерений Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова.

Адрес: Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща, ПИЯФ НИЦ КИ.  
телефон: 8(81371)46327  
e-mail: derbin\_av@npfi.nrcki.ru