

ОТЗЫВ

официального оппонента Дербина А.В. на диссертацию Наумова Дмитрия Вадимовича “Измерения θ_{13} и Δm^2_{32} и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа Д.В. Наумова состоит из трех частей. Помимо хорошего обзора по физике нейтрино, она содержит две основные части, которые, условно, можно определить, как теоретическую и экспериментальную части. Теоретическая часть посвящена развитию квантово-полевой теории нейтринных осцилляций в модели релятивистского волнового пакета, экспериментальная - прецизионному измерению осцилляционных параметров, угла смешивания θ_{13} и разности квадратов масс Δm^2_{32} , в эксперименте Daya Bay. Важно, что обе части оказываются связанными, для разработанных теоретических положений предлагается конкретная экспериментальная проверка, которая уже частично осуществлена.

Кроме классического плосковолнового анализа экспериментальных данных эксперимента Daya Bay с помощью пакета программ, развитых группой ОИЯИ, впервые проводится исследование эффекта декогерентности в нейтринных осцилляциях в модели волнового пакета, развитой в настоящей диссертации. Это обстоятельство делает диссертационную работу Д.В. Наумова разнообразным, но единым и целостным трудом.

Эксперименты Daya Bay, 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 θ_{13}).

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

Революционное обнаружение большого значения угла смешивания θ_{13} , открывающее путь к поиску CP-нарушения в нейтринном секторе и определению иерархии масс нейтрино, делает продолжение участия 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.

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

Диссертация Д.В. Наумова состоит из введения, трех частей, которые в сумме содержат 8 глав, заключения, одного приложения, списка литературы из 300 наименований, а также списка рисунков и таблиц. Объем диссертации составляет 324 страницы, включая 81 рисунок и 16 таблиц.

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

Диссертация Д.В. Наумова разделена на три части. Первая часть, названная "Обзор литературы", содержат две главы, вторая часть "Квантово-полевая теория осцилляций

нейтрино в модели с релятивистским волновым пакетом" состоит из трех глав и третья часть "Измерение угла смешивания θ_{13} и разности квадратов масс Δm^2_{32} в эксперименте Daya Bay" также включает три главы.

В первой главе дан обзор свойств нейтрино, начиная с истории предсказания нейтрино до их прямого обнаружения в реакторных и ускорительных экспериментах. Кратко изложены основы Стандартной Модели, объясняется появление матриц смешивания для кварков и лептонов, приводящих, в частности к эффекту нейтринных осцилляций. Завершает главу обзор существующих ограничений на массы нейтрино и на магнитные моменты нейтрино.

Вторая глава посвящена описанию наиболее актуальных нерешенных вопросов нейтринной физики. Рассматриваются эксперименты по прямому измерению массы нейтрино, по определению иерархия масс нейтрино, по поиску нарушения CP инвариантности в нейтринном секторе, по поиску безнейтринного двойного бета-распада и осцилляций нейтрино в стерильное состояние. Обсуждается проблема определения металличности Солнца, и, связанная с ней, задача регистрации солнечных нейтрино из CNO цикла, а также эксперименты по регистрации астрофизических и гео-нейтрино.

С третьей главы начинается часть диссертации, которая посвящена разработке квантово-полевого подхода к описанию нейтринных осцилляций. В первом разделе дано введение в теорию осцилляций нейтрино в классическом плосковолновом приближении и в модели волнового пакета. Далее обсуждается неполнота и парадоксы плосковолнового приближения, обосновывается, что корректное описание нейтринных осцилляций требует выхода за рамки данного приближения.

Рассматривается модель волнового пакета, как один из вариантов возможного расширения плосковолнового варианта. Выведена новая формула для вероятности осцилляций, которая зависит от длины осцилляций, длины когерентности, длины дисперсии и размера волнового пакета нейтрино. Показано что, хотя рассмотренная модель нейтринных осцилляций решает некоторые проблемы плосковолнового подхода, она не является удовлетворительной при описании релятивистских нейтрино и противоречит релятивистской инвариантности. Разработке ковариантных моделей посвящены две следующие главы раздела.

В четвертой главе развивается квантово-полевая теория релятивистского волнового пакета. Устанавливаются свойства волнового пакета, как когерентной суперпозиции фоковских состояний. Построена модель релятивистского пакета в гауссовой форме, которая применяется для описания процессов рассеяния.

В пятой главе дано развитие теории осцилляций нейтрино в предложенной модели с релятивистским волновым пакетом. Вычислены основные блоки диаграмм Фейнмана, сформулированы изменения в правила Фейнмановских диаграмм. Вычисляется амплитуда процесса с рождением двух разных заряженных лептонов в макроскопически разделённых вершинах диаграммы. Найдены релятивистски-инвариантные дисперсии волнового пакета для испускаемого и поглощаемого нейтрино. Получено выражение для квантовополевого обобщения значения вероятности осцилляций.

Шестая глава открывает часть диссертации, которая посвящена измерению угла смешивания θ_{13} и разности квадратов масс Δm^2_{32} в эксперименте Daya Bay. В главе дано подробное описание детектора и эксперимента Daya Bay, использующего сравнения потоков антинейтрино от реактора на разных расстояниях. 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. Детально описана энергетическая и временная калибровки детектора. Обсуждаются факторы, влияющие на точность калибровки,

такие как изменение усиления ФЭУ, поправка на число работающих ФЭУ, стабильность световыхода, пространственная неоднородность светосбора и другие.

В седьмой главе дано детальное описание критериев отбора событий обратного бета-распада и возможных источников фона. Отмечается, что критерии отбора были выбраны таким образом, чтобы минимизировать относительные неопределенности при сравнении спектров антинейтрино, наблюдаемых различными детекторами.

Различие в отношениях эффективностей детекторов составило не более чем 0.13%. Это величина, которую невозможно достичь для абсолютной калибровки детектора. В этом состоит преимущество предложенного сотрудниками КИ метода относительных измерений.

Среди многочисленных обсуждаемых источников фона основной вклад в коррелированный фон детектора с распадами ядер ${}^9\text{Li}$ и ${}^8\text{He}$, которые образуются в сцинтиляторе под действием мюонов. Представлены основные временные этапы эксперимента и соответствующие им полученные результаты.

Восьмая глава посвящена осцилляционному анализу данных эксперимента Daya Bay. Глава состоит из 6 разделов и содержит много материала. Вначале приводятся данные о том, как контролируется мощность реактора и как изменяется состав топлива в зоне реактора. Обсуждаются методы вычисления спектра реакторных антинейтрино. Приводятся данные о "реакторной аномалии", давшей дополнительный толчок к поиску осцилляций активных нейтрино в стерильное состояние, и наблюдаемого превышения скорости счета реакторных антинейтрино в области 4 - 6 МэВ. Далее обсуждается сечение обратного бета-распада и вычисляется ожидаемое число событий обратного бета-распада.

Кратко обсуждается пакет программ `dubOscar`, разработанный группой ОИЯИ для осцилляционного анализа, и используемый для получения официальных результатов коллаборации Daya Bay. В конце главы приводятся результаты стандартного осцилляционного анализа экспериментальных данных Daya Bay и анализа в модели, которая была разработана и изложена автором в теоретической части диссертации. Получены первые ограничения на дисперсию импульса волнового пакета.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

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

Впервые разработана ковариантная квантово-полевая теория релятивистского волнового пакета. В рамках теории получена формула для вероятности осцилляций нейтрино с учетом пространственной дисперсии волнового пакета нейтрино.

Выполнено новое измерение осцилляционных параметров, использующее более 2.5×10^6 событий обратного бета распада, зарегистрированных 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 Δm_{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.

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.

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 группой ОИЯИ под руководством Д.В. Наумова. Это, конечно, является важным достижением.

Практическая значимость состоит, в первую очередь в том, что разработанный комплекс компьютерных программ может быть использован для моделирования конкретных реакторных экспериментов, в том числе, связанных с определением степени выгорания ядерного топлива в активной зоне промышленных реакторов АЭС, используя измеренный спектр реакторных нейтрино.

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

1. Автор справедливо отмечает, что "Основополагающие работы по теории осцилляций нейтрино были выполнены сотрудниками ОИЯИ – Б. М. Понтекорво и С. М. Биленьким." Однако, отсутствует ссылка 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 и обсуждению которой, например, посвящен раздел в обзоре С.М. Биленького “Бруно Понтекорво и нейтрино” (УФН 184, 531 (2014)).

С некоторым 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).

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)) отсутствует.

Не сомневаюсь, что автор отлично знает указанные классические работы, но, вероятно, считает, что классические работы настолько известны, что не обязательны к цитированию.

2. Можно высказать ряд предложений по использованию устоявшихся русскоязычных специальных терминов. Вместо выражения «разрешение энергии» - лучше использовать «энергетическое разрешение» или «разрешение по энергии». Вместо «космогенные мюоны» - «мюоны космических лучей» или «космические мюоны». Вместо «развал ядра» - «деление ядра», там, где речь идет о деление ядра. Вместо «темпы счета» - «скорости счета». Вместо выражения «термальная мощность реактора» - лучше «тепловая мощность реактора». Вместо «ядро реактора» - «активная зона реактора». Вместо «дозаправка топлива» - «перегрузка зоны» или ППР (планово-профилактические работы).

3. В диссертации имеется приемлемое количество опечаток и неточностей.

Так на стр.11 во введении указано что диссертация состоит из 4-х глав, а не из 8-ми. Имеются опечатки, например, на стр 21, матрица Понтекорво- Маки-Накагава-Саката (ПМНС) названа немного по-другому, есть опечатки на стр. 47, 83, 182 и 208. Отметим также, что рисунок 5.4 на стр.123 идентичен рисунку 5.3 на стр. 122, хотя подписи к ним различны.

4. Согласно рис.6.5 в эксперименте Daya Bay наблюдается практически монотонный дрейф положения пика, соответствующего среднему одноэлектронному заряду, регистрируемому фотоумножителями. Положение пика увеличивалось, примерно, на 5 % за три года. В диссертации отмечено, что данный эффект частично объясняется изменением температуры электроники (FEE). Хотелось бы понять, существует ли в настоящий момент понимание причин этого дрейфа? Это может быть интересно для целого ряда аналогичных сцинтилляционных детекторов.

Отмеченные недостатки не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы Д.В. Наумова. В работе предложено и развито **новое направление** научных исследований в области нейтринных осцилляций, получены **новые** важные результаты, которые можно квалифицировать как **крупные научные достижения**, среди которых можно выделить следующие:

1. Разработана теория ковариантного волнового пакета, исследованы свойства релятивистского гауссова пакета. Получена новая формула для вероятности осцилляций нейтрино, которая учитывает пространственную дисперсию волнового пакета и которая может быть проверена экспериментально.

2. В составе коллаборации выполнен эксперимент Daya Bay в котором впервые обнаружено отличное от нуля значение угла смешивания θ_{13} . Под руководством автора диссертации разработан и создан комплекс программ для анализа данных реакторного эксперимента Daya Bay. Выполнен анализ данных детектора Daya Bay за 1230 суток, в результате которого установлены наиболее точные значения осцилляционных параметров. Полученные данные приняты в качестве официальных результатов коллаборации, что, конечно, является большим достижением Д.В. Наумова и группы ОИЯИ, участвующей в эксперименте Daya Bay.

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), НИЦ КИ ПИЯФ (С.-Петербург), НИЦ КИ ИТЭФ (Москва) и НИЦ КИ ИФВЭ (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, заложенной Б.М. Понтекорво, она отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, а ее автор Д.В. Наумов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.**

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

29.09.2017

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, заместитель руководителя Отделения физики нейтрино НИЦ КИ.

Адрес: 188300 Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща, ПИЯФ НИЦ КИ.
телефон: 8(81371)46327; e-mail: derbin_av@pnpi.nrcki.ru

Дербин Александр Владимирович

доктор физико-математических наук, специальность 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. M. Agostini, .. A.V. Derbin, .. et al., Seasonal Modulation of the ^7Be Solar Neutrino Rate in Borexino, *Astropart. Phys.* 92, 21 (2017)
2. M. Agostini, .., A.V. Derbin, .. et al., Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts, *Astropart. Phys.* 86, 11 (2017)
3. S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, A measurement method of a detector response function for monochromatic electrons based on the Compton scattering, *Nucl. Instrum. Meth.* A821 13 (2016)
4. P. Agnes .., A.V. Derbin, .. et al., Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search, *Phys. Rev. D* 93 no.8, 081101, (2016)
5. С. В. Бахланов, А. В. Дербин, И. С. Драчнев, А. С. Каюнов, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков, Метод измерения функции отклика детектора для монохроматических электронов, основанный на Комптоновском рассеянии, *Приборы и Техника Эксперимента*, № 3, 13, (2016)
6. P. Agnes., A.V. Derbin, .. et al., First results from the DarkSide-50 dark matter experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Physics Letters B* 743, 456 (2015)
7. M. Agostini., A.V. Derbin, .. et al., Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data, *Phys. Rev. D* 92, 031101 (2015)
8. M. Agostini., A.V. Derbin, .. et al., Test of Electric Charge Conservation with Borexino, *Phys. Rev. Lett.* 115, 231802 (2015)
9. G. Bellini., A.V. Derbin, ...et al., Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun, *Nature* 512 (2014) 7515, 383
10. G. Bellini., A.V. Derbin, ... et al., Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy, *Phys. Rev. D* 89, 112007 (2014)
11. А.В. Дербин, Эксперименты с солнечными нейтрино, *УФН* 184 (2014) 555
12. G. Bellini, ... A. Derbin, ...et al., Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino, *Phys. Lett. B* 722 (2013) 295-300
13. A. Derbin, ...et al., Study of the Rare Processes with the BOREXINO Detector, DOI:10.1142/9789814436830_0037, *Proceedings 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics*, p.173-176 (2013)