

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.119.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от **19.10.2017 г. № 7/34**

О присуждении **Наумову Дмитрию Вадимовичу**, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Измерение θ_{13} , Δm_{32}^2 и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций» по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц принята к защите 01.06.2017г., протокол № 4/31 диссертационным советом Д002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г.Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель Наумов Д.В., 1975 года рождения, в 1997 году окончил с отличием физический факультет Иркутского Государственного Университета по специальности «Радиофизика и электроника», специализации «Теоретическая физика».

Наумов Д.В. в 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в диссертационном совете Д720.001.03, созданном на базе Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна). Тема диссертации «Рождение странных адронов и поляризация Лямбда и анти-Лямбда гиперонов в нейтринных взаимодействиях в эксперименте NOMAD» по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, научные руководители - доктор физико-математических наук, профессор С.А. Бунятов и кандидат физико-математических наук Б.А. Попов. Был выдан диплом КТ № 064772,

дата выдачи 8 февраля 2002 г. Работает заместителем директора лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Диссертация выполнена в Лаборатории ядерных проблем имени Джелепова Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

1. Горбунов Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел теоретической физики, главный научный сотрудник;

2. Дербин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», отдел полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий отделом;

3. Тельнов Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник, -

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН, г.Москва) в своем положительном заключении, подписанном Н.Г. Полухиной (доктор физ.-мат. наук, заведующая лабораторией элементарных частиц ОЯФА ФИАН), О.Д. Далькаровым (доктор физ.-мат. наук, профессор, председатель ученого совета отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН), Н.П.Топчиевым (кандидат физ.-мат. наук, секретарь ученого совета отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН), указала, что диссертация Д.В. Наумова соответствует всем

критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Д.В. Наумов, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Соискатель имеет 65 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 22 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях - 18. Работы соискателя, представленные в диссертации, посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию осцилляций нейтрино. Впервые измерено отличное от нуля значение θ_{13} в эксперименте Daya Bay на уровне достоверности, превышающем 25 стандартных отклонений. Впервые в реакторных экспериментах измерено значение Δm_{32}^2 с наилучшей точностью. Измерен спектр реакторных антинейтрино. Разработана теория релятивистского волнового пакета, в рамках которой вычислено сечение рассеяния релятивистских волновых пакетов в квантовой теории поля; вычислена вероятность процесса, нарушающего лептонные ароматы, с релятивистскими волновыми пакетами, соответствующими частицам в начальном и конечном состоянии, нейтрино в виртуальном состоянии, источником и детектором нейтрино, разделенными макроскопическим расстоянием. Получена формула для вероятности осцилляций нейтрино в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии эффективного волнового пакета нейтрино и конечных интервалов активности “источника” и “детектора”. Соискатель внес определяющий вклад в каждую из опубликованных работ.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Bednyakov V. A., Naumov D. V., Smirnov O. Y. Neutrino physics and JINR // УФН — 2016. — Т. 59, No 3. — С. 225—253.
2. Naumov D. On the theory of wave packets // Письма в ЭЧАЯ — 2013. — Т. 10. — С. 642—650.

3. Naumov D. V., Naumov V. A. Relativistic wave packets in a field theoretical approach to neutrino oscillations // Известия ВУЗов — 2010. — Т. 53. — С. 549—574.
4. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. — 2017. — Т. D95. — С. 072006. — arXiv: 1610.04802 [hep-ex].
5. Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Chin. Phys. — 2016. — Т. C2017. — С. 41. — arXiv:1607.05378 [hep-ex].
6. Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 116, No 6. — С. 061801. — arXiv:1508.04233 [hep-ex].
7. Naumov D., Naumov V. A Diagrammatic treatment of neutrino oscillations // J.Phys.G. — 2010. — Т. G37. — С. 105014. — arXiv: 1008.0306 [hep-ph].
8. Spectral measurement of electron antineutrino oscillation amplitude and frequency at Daya Bay / F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Т. 112. — С. 061801. — arXiv: 1310.6732 [hep-ex].
9. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay / F. An [и др.] // Chin.Phys. — 2013. — Т. C37. — С. 011001. — arXiv: 1210.6327 [hep-ex].
10. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay / F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Т. 108. — С. 171803. — arXiv: 1203.1669 [hep-ex].
11. A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors / F. An [и др.] // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. — 2012. — Т. A 685. — С. 78—97. — arXiv: 1202.6181 [physics.ins-det].

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов, ведущей организации, профессора кафедры теоретической физики Федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет», доктора физико-математических наук Коренблита Сергея Эммануиловича, а также главного научного сотрудника Института математики СО РАН им. С.Л. Соболева, профессора, доктора физико-математических наук, Гинзбурга Ильи Файвильевича.

Во всех отзывах сделан вывод о том, что работа содержит хорошо обоснованные новые результаты и полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

В отзывах отмечается, что диссертация Д.В. Наумова является фундаментальным научным трудом, решающим крупные научные задачи в теоретической и экспериментальной физике. Уникальной особенностью работы является симбиоз - построение теории - экспериментальная проверка нового теоретического рассмотрения. 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 Daya Bay.

Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными и получены впервые. Они обоснованы и убедительны, хорошо известны специалистам и опубликованы в ведущих физических журналах. Диссертационная работа Д.В. Наумова выполнена на высоком научном уровне, соответствующем уровню школы нейтринной физики ОИЯИ, заложенной Б.М. Понтекорво.

Отмечается, что в работе приведены также оригинальные и очень важные результаты, которые не нашли своего отражения в положениях, выносимых на защиту, среди которых выделяются детальные описания многокомпонентных релятивистских волновых пакетов и доказанная теорема о факторизации адронных токов в вершинах диаграммы, разделенных макроскопическим расстоянием. Полученный экспериментальный результат был высоко оценен научным сообществом. Диссертант, в составе коллаборации Daya Bay, был удостоен самой крупной премии в науке “Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2016” за исследование осцилляций нейтрино.

В отзывах имеются **замечания**. Указывается, что отсутствует ссылка на работу В.Н. Грибова и Б.М. Понтекорво, в которой впервые был развит математический формализм, описывающий осцилляции между разными типами нейтрино, а также на другие оригинальные работы Б.М. Понтекорво, в которых предлагалась идея нейтринных осцилляций. При обсуждении лептонной матрицы смешивания автор не ссылается на оригинальную работу Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata. Раздел «Обзор литературы» можно было бы значительно сократить без ущерба для понимания дальнейшего материала. Аргумент автора о важности прецизионных измерений нейтринных

осцилляциям для обнаружения пути к построению расширений Стандартной модели не бесспорен, поскольку существуют многочисленные примеры расширений, согласующиеся с известными величинами параметров нейтринного сектора и совместные с любыми величинами пока не измеренных параметров. Отмечается, что автором используется термин «Стандартная модель» для описания теоретической схемы с правыми нейтрино, что не является единственно возможным введением масс нейтрино в расширения Стандартной модели. Построенная теоретическая схема описания осцилляций нейтрино в квантовой теории поля заметно выиграла бы, если бы она могла предсказывать величину дисперсии импульса волнового пакета. Отмечается, что автором не показано, как связаны второе из защищаемых положений о законе обратных квадратов с известным поведением радиальной плотности потока в стационарной картине рассеяния. В диссертационной работе содержится приемлемое количество опечаток, неизбежное для такого большого труда. Отмечается совпадение рисунков 5.3 и 5.4.

Данные замечания не снижают ценности данной работы и не влияют на справедливость полученных результатов.

В отзывах имеются **предложения**. Предлагается использование устоявшихся русскоязычных специальных терминов. Например, 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 делении 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). Предлагается при дальнейшем развитии теории нейтринных осцилляций учесть собственную длину когерентности, обусловленную конечной шириной исходного

квантового состояния, а также перевести описание на язык матрицы плотности. Наконец, предлагается издать данную работу в виде отдельной монографии для развития отечественной физики нейтрино.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой научной квалификацией, полученными ими научными результатами мирового уровня и многолетним опытом научных исследований по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что совокупность полученных в диссертации результатов можно квалифицировать как крупное научное достижение. На основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработана теория релятивистского волнового пакета. Исследованы свойства релятивистского волнового пакета. В рамках развитой теории вычислено сечение рассеяния релятивистских волновых пакетов в квантовой теории поля.
2. Доказано, что пространственная дисперсия волнового пакета в плоскости, перпендикулярной направлению его движения, приводит к подавлению вида $1/4\pi x^2$ плотности потока, проинтегрированного по времени, на расстоянии $|x|$ от источника рождения волнового пакета.
3. Предложен метод и результат вычисления вероятности процесса, нарушающего лептонное число, с релятивистскими волновыми пакетами, соответствующими частицам в начальном и конечном состояниях, нейтрино в виртуальном состоянии, источником и детектором нейтрино, разделенными макроскопическим расстоянием.
4. Предложен метод макроскопического усреднения квантово-полевой вероятности процесса с участием волновых пакетов.
5. Получена формула для вероятности осцилляций нейтрино в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии эффективного волнового пакета нейтрино и конечных интервалов активности “источника” и “детектора”.

6. Развита методика измерения осцилляционных параметров в реакторном эксперименте и создан комплекс компьютерных программ анализа экспериментальных данных эксперимента Daya Bay.
7. Предложена методика измерения энергетического спектра реакторных антинейтрино.
8. Получен результат измерения параметра смешивания нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$.
9. Получен результат измерения разницы квадратов масс Δm_{32}^2 .
10. Получен результат измерения энергетического спектра реакторных антинейтрино.

Все результаты диссертации являются обоснованными.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Разработанная теория релятивистского волнового пакета положена в основу вычисления вероятности осцилляций нейтрино в рамках квантовой теории поля. Анализ сечения рассеяния частиц в рамках квантово-полевой теории релятивистских волновых пакетов предоставляет возможность измерения фазы соответствующего матричного элемента; измерения формы волновой функции сталкивающихся частиц; исследования осцилляций нейтрино, рожденных в ускорителях частиц, в реакторах, в атмосфере и в других источниках.
2. Полученная общая формула для вероятности осцилляций нейтрино применена для анализа данных экспериментов Daya Bay, KamLAND, для оценки чувствительности новых экспериментов (JUNO, RENO-50) к величине дисперсии волнового пакета нейтрино.
3. Обнаруженное ненулевое значение $\sin^2 2\theta_{13}$ открыло путь к измерению иерархии масс нейтрино и фазы, ответственной за нарушение CP-инвариантности, что используется в ряде экспериментов (T2K, NOvA) и при подготовке новых экспериментов (JUNO, RENO-50, T2HK, DUNE и др.).

4. Прецизионные измерения $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm_{32}^2 уменьшают систематическую неопределенность в определении иерархии масс нейтрино и параметра лептонной матрицы смешивания - фазы δ , ответственной за нарушение CP-инвариантности.
5. Измеренный энергетический спектр реакторных антинейтрино положен в основу будущих прецизионных измерений с реакторными антинейтрино.

Оценка достоверности результатов выявила:

1. Результаты развитой теории релятивистского волнового пакета сводятся в нерелятивистском пределе к известным результатам теории нерелятивистского волнового пакета.
2. В плосковолновом пределе S-матричная теория с релятивистскими волновыми пакетами в качестве начальных и конечных состояний сводится к стандартной S-матричной теории.
3. Формула для осцилляций нейтрино, полученная в квантово-полевой теории в модели релятивистского волнового пакета сводится к известным результатам в соответствующих приближениях, что подробно обсуждается в тексте диссертации.
4. Результаты измерения $\sin^2 2\theta_{13}$ и разницы квадратов масс Δm_{32}^2 находятся в согласии с результатами, полученными с большими неопределенностями, в экспериментах RENO, Double-Chooz, T2K, MINOS, NOvA, IceCube.
5. Результаты измерения энергетического спектра реакторных антинейтрино находятся в согласии с результатами, полученными с большими неопределенностями, в экспериментах RENO и Double-Chooz.

Личный вклад соискателя состоит в том, что он принимал непосредственное участие в развитии теоретического подхода к нейтринным осцилляциям, получении и обработке экспериментальных данных, анализе и физической интерпретации результатов, получении основных результатов,

подготовке основных публикаций по выполненным работам. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

На заседании 19.10.2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Наумову Д.В. ученую степень доктора физико-математических наук. Было особо отмечено, что работа содержит выдающиеся результаты.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за- 18, против- нет, недействительных бюллетеней- нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета Д002.119.01

д.ф.-м.н.

Безруков Л.Б.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Троицкий С.В.

19.10.2017 г.