

ОТЗЫВ

Официального оппонента Тельнова В.И. на диссертационную работу Наумова Дмитрия Вадимовича «Измерение θ_{13} , Δm_{32}^2 и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Диссертационная работа посвящена изучению свойств нейтрино – одной из наиболее актуальных и динамично развивающихся разделов физики элементарных частиц. После открытия в 1998 году осцилляций атмосферных нейтрино, свидетельствующих о наличии у нейтрино ненулевых масс, стала актуальной задача измерения с высокой точностью масс частиц, углов смешивания, выяснения наличия фазы, ответственной за нарушение CP-четности, и др.

Нейтринные осцилляции изучаются во многих лабораториях мира, используя нейтрино от природных источников (атмосферные, солнечные нейтрино), реакторные нейтрино и нейтрино, получаемые на ускорителях. Осцилляции для трех типов нейтрино (без CP-нарушения) характеризуются тремя разностями квадратов масс $m_i^2 - m_j^2$ и тремя углами смешивания θ_{ij} .

Довольно быстро удалось измерить 5 из 6 величин, но труднее всего оказалось определить последний параметр, θ_{13} ввиду его малости. Он был впервые измерен только в 2012 г в реакторном эксперименте Daya Bay (Китай). Вторая часть диссертация как раз посвящена данному эксперименту, в котором Д. В. Наумов руководил дубненской группой, занимающейся анализом данных.

Наряду с экспериментальной частью, упомянутой выше, диссертация содержит также теоретическую часть, где была развита квантово-полевая теория нейтринных осцилляций в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии. Получены формулы, позволяющие с помощью диаграммной техники рассчитывать процессы с нарушением лептонного числа, где нейтрино в виртуальном состоянии соединяет источник и детектор нейтрино, разделенные макроскопическим расстоянием.

Таким образом, актуальность, новизна и значимость исследования не вызывает сомнения.

Диссертация, объемом 324 страницы, содержит 81 рисунок, 16 таблиц и 300 библиографических ссылок, 3 части из 9 глав.

В **Части I**, Введении, приводится обзор научной литературы по изучаемой тематике. В **первой главе** дается обзор известных свойств нейтрино, история открытий, излагаются основы стандартной модели, вводятся матрицы смешивания, обсуждаются на качественном уровне нейтринные осцилляции в вакууме и веществе.

Вторая глава посвящена текущим открытым вопросам в физике нейтрино (массы, иерархия, CP-фаза, нейтрино Дирака или Майорана, стерильное нейтрино, реликтовые и др.), обсуждаются эксперименты, проводимые в мире на реакторах, ускорителях, космических нейтрино, где что измеряется, и какие эксперименты позволят дать ответ на нерешенные проблемы.

Часть II посвящена разработке квантово-полевого подхода к описанию нейтринных осцилляций.

Третья глава является введением в квантово-механическую теорию осцилляций в плосковолновом приближении и в модели волнового пакета. Изначально нейтринные осцилляции описывались простой моделью плоских волн. При этом, были получены правильные формулы для фазы осцилляций. Однако при критическом рассмотрении оказалось, что эта модель не физична. Для получения результата приходится угадывать, как соотносятся энергии и импульсы интерферирующих нейтрино разных масс. В сотнях статей и учебниках (и даже в последнем выпуске Particle Data Group) повторяют необоснованные выводы формул. На самом деле, нейтринные осцилляции описываются логически непротиворечиво только в модели волновых пакетов. Эта модель используется уже давно. Автор диссертации дополнил квантово-механическое рассмотрение нейтринных осцилляций учетом дисперсии волнового пакета со временем. Однако, автор отмечает, что квантово-механическая модель не свободна от недостатков. Она не удовлетворяет

релятивистской ковариантности; дисперсию пакета нельзя охарактеризовать количественно. Автор аргументирует, что требуется ковариантный квантово-полевой подход без постулирования явного вида волновой функции нейтрино. Разработке такой теории посвящены 4-я и 5-я главы.

Глава 4 посвящена развитию теории релятивистского волнового пакета, исследованы его свойства, вычислена светимость при рассеянии волновых пакетов. Это сделано впервые и выносится на защиту.

В главе 5 развита квантово-полевая теория осцилляций нейтрино в модели с релятивистскими пакетами. По-существу, была решена задача расчета нейтринных осцилляций на языке макроскопической диаграммы Фейнмана с двумя лептонами (в источнике и детекторе) и виртуальным нейтрино. Такие попытки предпринимались и ранее, но, как отмечает диссертант, во всех работах были существенные недочеты (они подробно перечислены по каждой работе).

Диссертанту удалось полностью решить задачу, до расчета числа событий. Техника расчета использует корректный метод макроскопического усреднения и применима для конечных временных интервалов работы источника и детектора, что важно для ускорительных нейтрино. Такое вычисление единственное в литературе. Получена наиболее общая формула для вероятности осцилляций. В известных предельных случаях вероятность осцилляций совпадает с известными в литературе выражениями. На основе полученной диссертантом формулы открываются новые возможности для измерения дисперсии импульса нейтрино из анализа ускорительных нейтрино. На мой взгляд, это большое достижение.

Часть III посвящена измерению угла смешивания θ_{13} , Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay (Китай). Эксперимент был проведен на реакторных нейтрино, путем измерения скорости счета в зависимости от энергии антинейтрино и расстояния между реактором и детектором.

Ранее подобные измерения проводились в эксперименте KamLAND в Японии при большом расстоянии детекторов от реактора, порядка 100-200 км. KamLAND имеет чувствительность к Δm_{21}^2 (длина осцилляции порядка 60 км).

Для того, чтобы почувствовать недостаток количества нейтрино, зависящий от угла θ_{13} , необходимо проводить измерения на базе порядка 1.5-2 км, т.к. этот эффект определяется длиной осцилляции, зависящей от большой разности масс, $\Delta m_{32}^2 \approx \Delta m_{31}^2$.

Эксперимент Daya Bay, нацеленный на эту задачу, был проведен рядом с 6 реакторами с термальными мощностями - 2.9 ГВт каждый. Расстояния от 8 идентичных детекторов до реакторов составляли порядка 500 м (ближние) и 1600 м (дальние). Необходимо было как можно точнее измерить число событий и спектр (так как длина осцилляций зависит от энергии).

Ввиду малости угла θ_{13} , ожидаемый эффект был не более нескольких процентов, поэтому требовалась максимальная идентичность эффективностей регистрации детекторов, и ее удалось, путем различных калибровок, довести до уровня 0.13%. Энергетическое разрешение составило около 8% при 1 МэВ. Регистрировалось по ~ 2000 событий в ближних и ~ 250 событий в дальних детекторах за день.

Команда Д. В. Наумова занималась обработкой данных, реконструкцией событий обратного бета распада, оценкой фона и получением физического результата. Благодаря самоотверженной работе, при конкуренции еще четырех групп, им удалось добиться наиболее надежного результата, который был признан официальным и опубликован.

Результат по первому измерению угла θ_{13} был очень неожиданным. Угол оказался не слишком маленьким, и позволяет надеяться на успешный поиск CP-нарушения в нейтринном секторе.

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. Это дает основание считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными.

Что касается оформления диссертации и замечаний, то такой большой труд без опечаток не бывает, например, в таблице на странице 26 в значении Δm_{32}^2

пропущен множитель 10^{-3} , но такие погрешности никак не влияют на оценку диссертации.

Заключение

Диссертационная работа В.А. Наумова выполнена на высоком научном уровне. Результаты работы является очень существенным вкладом в физику элементарных частиц, открывают новые перспективы более глубокого изучения свойств нейтрино. Личный вклад автора не вызывает сомнений.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Наумов Дмитрий Вадимович, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Официальный оппонент,
глав. научный сотр. ИЯФ СО РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.И. Тельнов
29 сентября 2017 г.

Email: telnov@inp.nsk.su
<http://www.inp.nsk.su/~telnov/>

Tel: 8-383-329-4533

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Сайт: <http://www.inp.nsk.su/>

Подпись Тельнова В.И. удостоверяю
Ученый секретарь ИЯФ СО РАН,
кандидат физико-математических наук

Я.В. Ракшун
29 сентября 2017 г.

Тельнов Валерий Иванович,

профессор, доктор физико-математических наук по специальности **01.04.16**

«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Список основных публикаций за последние 5 лет:

1. V.I. Telnov, Prospects of high energy photon colliders, Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 219-224.
2. V.V. Anashin et al., Measurement of R_{uds} between 3.12 and 3.72 GeV at the KEDR detector, Phys.Lett. B753 (2016) 533-541.
3. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, et al., Final analysis of KEDR data on J/ψ and $\psi(2S)$ masses, Physics Letters B749 (2015) 50-56.
4. V.I. Telnov, Photon collider Higgs factories, JINST 9 (2014) 09, C09020.
5. A.J. Bevan et al., The Physics of the B Factories, Eur.Phys.J. C74 (2014) 11, 3026.
6. V.V. Anashin et al., Measurement of J/ψ to $\gamma \eta_c$ decay rate and η_c parameters at KEDR, Phys. Lett. B738 (2014) 391-396.
7. L.I. Shekhtman, V.I. Telnov, A concept of the photon collider beam dump, JINST 9 (2014) C09031.
8. V.I. Telnov, Energy calibration at high-energy photon colliders, JINST 9 (2014) C09029.
9. M. Bicer, et al., First Look at the Physics Case of TLEP, JHEP 1401 (2014) 164.
10. B. Aubert et al., (BABAR Collaboration), The BABAR Detector: Upgrades, Operation and Performance, Nucl.Instrum.Meth. A729 (2013) 615-701.
11. V.I. Telnov, Restriction on the energy and luminosity of e^+e^- storage rings due to beamstrahlung, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 114801.