

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Синёва Валерия Витальевича

на тему: «Исследование осцилляций нейтрино в реакторных экспериментах»

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Нейтрино является уникальной частицей, которая уже более восьмидесяти лет с момента, когда В.Паули предсказал её существование, играет особую роль в физике элементарных частиц и не перестаёт удивлять неожиданностью своих свойств.

Несмотря на значительные усилия исследователей до сих пор остаются открытыми вопросы о фундаментальных характеристиках частицы, и прежде всего, каковы абсолютные значения масс нейтрино и является ли нейтрино дираковской или майорановской частицей.

В то же время, за последние два десятка лет в исследованиях нейтрино достигнут впечатляющий прогресс благодаря тому, что удалось найти согласованное объяснение результатам экспериментов с атмосферными, солнечными, реакторными и ускорительными нейтрино на основе концепции смешивания и осцилляций различных типов нейтрино. Из факта существования смешивания и осцилляций нейтрино следует наличие у нейтрино ненулевой массы и несохранение лептонных чисел. Открытие смешивания и осцилляций нейтрино является прямым указанием на необходимость выход за пределы Стандартной теории взаимодействий частиц, в рамках которой нейтрино является безмассовой частицей и смешивание отсутствует.

Объяснение экспериментальных данных в рамках концепции смешивания и осцилляций нейтрино позволяет получать ограничения на разности квадратов масс и углы смешивания нейтрино. Напомним, что осцилляции между тремя поколениями нейтрино определяются шестью параметрами: тремя углами смешивания θ_{12} , θ_{23} и θ_{13} , двумя независимыми значениями из трех разностей квадратов масс нейтрино ($\Delta m^2_{13} = \Delta m^2_{12} + \Delta m^2_{23}$) и так называемой *CP*-нарушающей фазы δ_{CP} .

Ограничения на пару значений параметров (θ_{12} , Δm^2_{12}) следует из экспериментов по изучению осцилляций солнечных нейтрино (Хоумстейк, SAGE,

GALLEX/GNO, Kamiokande, Super-Kamiokande, Borexino) и независимо подтверждаются результатами реакторного эксперимента KamLAND.

Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с атмосферными нейтрино (окончательное подтверждение существования осцилляций атмосферных нейтрино было сделано коллаборацией Super-Kamiokande в 1998 г.) позволяет получать ограничения на вторую пару параметров (θ_{23} , Δm^2_{23}).

В значительной степени прогресс в понимании свойств нейтрино стал возможен благодаря проведению исследований осцилляций нейтрино в реакторных экспериментах. Большая часть настоящей диссертационной работы как раз и посвящена изучению эффекта осцилляций в потоках нейтрино от ядерных реакторов.

До недавнего времени в нейтринных осцилляциях наблюдались и изучались переходы между электронными и мюонными нейтрино, а также между мюонными и таонными нейтрино, а переходы электронных нейтрино в таонные не удавалось обнаружить. И только совсем недавно, в 2011-2012 гг., в нескольких экспериментах, идея постановки которых принадлежит В. В. Синёву и Л. А. Микаэлян, были обнаружены переходы электронных в тау-нейтрино.

Обычно смешивание нейтрино описывается матрицей смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты, элементы которой определяются указанными выше тремя углами смешивания θ_{12} , θ_{23} и θ_{13} . До последнего времени отсутствовала информация о величине угла смешивания θ_{13} . Теперь же он измерен в нескольких экспериментах, в одном из которых активное участие принимал автор диссертации.

Автором диссертационной работы также был проведен совместный анализ разнородных реакторных экспериментов с целью обнаружения стерильных нейтрино (т.е., нейтрино, которые не участвуют во взаимодействиях с другими частицами, но существование которых не противоречит современным экспериментам). При этом был развит метод, предполагающий проведение анализа отношений спектров, а не самих спектров. Такой подход исключает необходимость точного учета функции отклика детектора и позволяет анализировать данные от независимых экспериментов. С использованием данного метода автором были получены новые ограничения на параметры осцилляций нейтрино в стерильное состояние, которые согласуются с данными других авторов.

Одной из важных проблем, решение которой необходимо при проведении исследований потоков нейтрино от ядерных реакторов, является вопрос об интерпретации полученных результатов. При этом при проведении фундаментальных и прикладных исследований с использованием потоков антинейтрино от ядерного реактора возникает

необходимость в метрологических стандартах при анализе экспериментальных данных. В диссертации автор рассматривает вопросы метрологии в нейтринной физике.

Одной из важнейших частей метрологических данных является знание спектров антинейтрино, испускаемых делящимися изотопами урана и плутония. Автором рассматривается метод разделения измеренного спектра антинейтрино на составляющие его компоненты и предложен новый эффективный метод выделения спектров антинейтрино отдельных компонент из полного экспериментального спектра. При этом впервые представлен экспериментально полученный спектр антинейтрино от распада урана-238. Важно отметить, что в ближайшее время станут доступны реакторные спектры, измеренные с высокой статистикой (эксперименты Double Chooz и Daya Bay) и появятся данные по спектрам изотопов с улучшенной точностью для использования их в качестве эталонных.

Ещё одной фундаментальной задачей, которую решет автор в диссертационной работе, является изучение нейтринных потоков от естественных природных источников. Речь идёт о потоках нейтрино от сверхновых и геонейтрино (т.е., нейтрино, возникающих в цепочках радиоактивных семейств урана и тория, находящимися в недрах планет). Для изучения природных нейтринных потоков различного происхождения автор предлагает создание большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. В диссертационной работе автором приведены расчеты измеряемых таким детектором потоков нейтрино и антинейтрино.

Остановимся кратко на структуре диссертационной работы. Диссертация состоит из введения шести глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Введение посвящено общему рассмотрению нейтринных осцилляций, их влияния на развитие физики нейтрино. Также сформулировано предложение по новому эксперименту для измерения угла смешивания θ_{13} . Обсуждается проблема осцилляций нейтрино в стерильное состояние.

В первой главе излагается история открытия осцилляций в потоках солнечных и атмосферных нейтрино. Приводятся данные реакторных и ускорительных экспериментов, подтверждающих существование осцилляций двух типов: электронных нейтрино в мюонные и мюонных в тау-нейтрино.

Во второй главе рассматривается феноменологическая теория осцилляций. Обсуждаются подтверждающие феноменологическую теорию осцилляций результаты измерений потока солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

В третьей главе рассматриваются эксперименты по измерению угла смешивания θ_{13} . Особое внимание уделено результатам измерения угла θ_{13} в эксперименте Double Chooz. Рассматриваются также результаты еще двух экспериментов на ядерных реакторах (Daya Bay и RENO), подтверждающие результат Double Chooz с лучшей статистикой.

В четвертой главе обсуждаются наблюдаемые аномалии при регистрации нейтрино на близких расстояниях от источника и рассматриваются стерильные нейтрино. Анализируются экспериментальные данные о потоках реакторных нейтрино на различных расстояниях от реактора, определяются параметры нейтринных осцилляций, которые могут соответствовать переходам в стерильные нейтрино.

Пятая глава посвящена проблеме метрологии в нейтринной физике на ядерных реакторах. Приводится результат расчета энергии на акт деления. Анализируется эксперимент на реакторе в Ровно, который позволяет выделить спектры антинейтрино отдельных делящихся изотопов урана и плутония. Проведено сравнение полученных автором результатов с данными других исследователей.

В шестой главе обсуждаются задачи, стоящие перед большим сцинтилляционным детектором, создание которого возможно на базе Баксанской нейтринной обсерватории. Указано на чрезвычайную важность подобного большого детектора для изучения слабых природных потоков нейтрино, в частности, для измерения суммарной радиоактивности Земли и проверки различных гипотез об образовании Земли. Обсуждается возможность использования такого детектора для изучения потока нейтрино от сверхновых.

В заключении приведены основные результаты исследования.

Актуальность приведенного исследования обусловлена важностью изучения явления нейтринных осцилляций для развития физики элементарных частиц.

Новизна исследования подтверждается тем, что основные вошедшие в диссертацию результаты впервые получены автором работы. Отличие от нуля угла смешивания θ_{13} впервые было замечено в эксперименте Double Chooz при активном участии автора диссертации. Особо отметим, что идея этого эксперимента также принадлежит автору. Также автором впервые в прямом эксперименте на ядерном реакторе был получен спектр антинейтрино от одного из компонентов ядерного топлива ^{238}U .

Практическая ценность диссертации состоит в том, что ее результаты могут быть использованы как в фундаментальных исследованиях (значение угла смешивания

θ_{13} используется для расчета вероятностей перехода различных типов нейтрино между собой), так и в прикладных (знание спектра антинейтрино от распада ^{238}U обеспечивает метрологическую базу для дистанционного мониторинга ядерных реакторов).

Диссертационная работа не свободна от недостатков. Основным из них является некоторая небрежность в изложении материала, проявляющаяся, в частности, в неточном цитировании литературы. Например, указано, что резонансное усиление осцилляций нейтрино в веществе было предсказано в работе С.П. Михеева и А.Ю. Смирнова и независимо в работе Л. Вольфенштейна, что неверно, так как именно в указанной первой работе был предсказан данный эффект на основе использования результатов второй из упомянутых работ. Также предсказание С.П. Михеева и А.Ю. Смирнова датируется по работе, вышедшей в 1986 году, хотя этот эффект указанные авторы предсказали в своей работе 1985 года. В самом начале диссертации приведен неверный год предсказания В.Паули о существовании нейтрино. В тексте имеются необоснованные повторы одних и тех же утверждений, например на стр. 63 и 65.

Однако указанные недостатки не снижают качества работы. Диссертация В.В.Синёва является законченным научным исследованием, в котором содержится ряд новых важных результатов, существенно развивающих современную физику нейтрино.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается результатами экспериментов нескольких коллабораций, выполненных в последнее время.

Обоснованность научных положений и выводов базируется на материалах публикаций, выполненных автором самостоятельно и в соавторстве. По основным результатам, вошедших в данную диссертацию, автором опубликованы 32 работы в реферируемых отечественных и зарубежных изданиях, в том числе из списка ВАК. Так что обоснованность научных результатов диссертации не вызывает сомнения. Материалы, вошедшие в диссертацию, много раз представлялись автором на семинарах и рабочих совещаниях, а также на международных конференциях.

Материалы диссертации полно изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат отражает содержание диссертации.**

Таким образом, диссертация **Валерия Витальевича Синёва** на соискание ученой степени доктора наук является **научно-квалификационной работой**, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение**, что соответ-

ствуем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» », утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент,

профессор, д.ф.-м.н. _____ А. И. Студеникин
(подпись)

Подпись А.И.Студеникина заверяю

Декан физического факультета МГУ,

профессор, д.ф.-м.н. _____ Н.Н.Сысоев

Дата

Гербовая печать