

## 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.

Диссертация посвящена изучению эффекта нейтринных осцилляций на ядерных реакторах. Эффект осцилляций нейтрино является фундаментальным свойством нейтрино и является объектом изучения уже много лет. Осцилляции нейтрино были открыты сравнительно недавно. Обнаруженные массовые параметры осцилляций указывают на существование трех типов нейтрино, которые могут осциллировать друг в друга. Количество типов нейтрино подтверждается анализом данных при распаде  $Z^0$  бозона. Были найдены переходы электронных нейтрино в мюонные и мюонных в таонные. Однако до последнего времени не удавалось обнаружить переходы электронных нейтрино в таонные. Это было сделано в 2011-2012 гг. в нескольких экспериментах, идея постановки которых принадлежит Синёву В. В. и Микаэляну Л. А. Исследование нейтринных осцилляций позволяет проверить модель поведения нейтральных легких лептонов (нейтрино) при распространении от источника. Нейтрино является смешанной частицей, то есть оно представляет собой суперпозицию трех массовых состояний, которые следуют из решения уравнения Дирака. Смешивание описывается матрицей смешивания Маки-Накагавы-Саката-Понтекорво, содержащей комбинации синусов и косинусов углов смешивания. До последнего времени в этой матрице недоставало члена, обозначаемого как  $\theta_{13}$ . Теперь он измерен в трех экспериментах, в одном из которых принимал участие автор диссертации.

К настоящему времени в ряде экспериментов получены указания на возможность существования стерильных нейтрино. Автором был проведен совместный анализ разнородных реакторных экспериментов на предмет поиска стерильных нейтрино. При этом был предложен метод анализа отношений спектров, а не самих спектров, что исключает необходимость точного учета функции отклика детектора и позволяет анализировать данные от независимых экспериментов. Получены ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние, которые пересекаются с данными других авторов.

В исследованиях нейтрино на ядерных реакторах стоит вопрос интерпретации полученных результатов. Для проведения прикладных и фундаментальных исследований в потоках антинейтрино от ядерного реактора необходимо иметь метрологические стандарты для анализа экспериментальных данных. В диссертации рассматриваются вопросы метрологии в нейтринной физике. Одной из важнейших частей метрологических данных является знание спектров антинейтрино, испускаемых делящимися изотопами урана и плутония. В диссертации рассматривается метод разделения измеренного спектра антинейтрино на составляющие его компоненты. Автором предложен оригинальный метод выделения спектров антинейтрино отдельных компонентов из экспериментального спектра. Впервые представлен полученный экспериментально спектр антинейтрино урана-238. Учитывая, что в скором времени будет доступен реакторный спектр, измеренный с высокой статистикой (эксперименты Double Chooz, Daya Bay), можно надеяться, что появятся более точные данные по спектрам изотопов, которые будут использоваться в качестве эталонных.

Изучение нейтринных потоков от естественных природных источников является фундаментальной физической задачей. К таким потокам относятся нейтрино от сверхновых и нейтрино, производимые цепочками радиоактивных семейств урана и тория, находящимися в недрах планет. Автор рассматривает проблему изучения природных нейтринных потоков различного происхождения. Для этого предлагается создание большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Приведены расчеты измеряемых таким детектором потоков нейтрино и антинейтрино.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на материалах научных работ автора, опубликованных в реферируемых отечественных и зарубежных изданиях. Автором опубликованы 32 работы по материалам диссертации. Результаты диссертации представлялись на семинарах и рабочих совещаниях, а также неоднократно докладывались автором на различных конференциях, как в России, так и за рубежом.

Диссертация состоит из введения шести глав, заключения и списка цитируемой литературы.

**Во введении** рассматривается явление нейтринных осцилляций, влияние их открытия на развитие нейтринной физики, и рассматривается предложение проведения

нового эксперимента по измерению угла смешивания  $\theta_{13}$ . Рассматривается проблема осцилляции в стерильное состояние. Приводятся положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** изложены сведения об открытии нейтринных осцилляций в потоках солнечных и атмосферных нейтрино. Приводятся данные реакторных и ускорительных экспериментов, подтверждающих существование осцилляций в двух каналах: электронных в мюонные и мюонных в таонные нейтрино.

**Во второй главе** коротко рассматривается феноменологическая теория нейтринных осцилляций и приводится матрица смешивания нейтрино. Также здесь же приведены результаты эксперимента SNO по измерению потока солнечных нейтрино, который подтверждает феноменологическую теорию.

**В третьей главе** рассматриваются эксперименты по измерению угла смешивания  $\theta_{13}$ . Приводятся результаты измерения угла  $\theta_{13}$  в эксперименте Double Chooz. Также рассматриваются результаты еще двух экспериментов на ядерных реакторах (Daya Bay и RENO), подтверждающие результат Double Chooz с лучшей статистикой.

**В четвертой главе** обсуждаются аномалии при регистрации нейтрино на близких расстояниях от источника. Вводится понятие стерильных нейтрино. Приводится анализ экспериментальных данных измерения реакторных экспериментов на различных расстояниях от реактора, где найдены параметры нейтринных осцилляций, которые могут рассматриваться, как переходы в стерильные нейтрино.

**В пятой главе** рассматриваются проблемы метрологии в нейтринной физике на ядерных реакторах. Приводится результат расчета энергии на акт деления. Автор приводит результат анализа эксперимента в Ровно, который позволяет выделить спектры антинейтрино отдельных делящихся изотопов урана и плутония из измерений. Полученные результаты сравниваются с данными других авторов.

**В шестой главе** обсуждаются задачи, решаемые большим сцинтилляционным детектором, который предполагается создавать на базе Баксанской нейтринной обсерватории. Показана важность создания большого детектора вблизи поверхности Земли для изучения слабых природных нейтринных потоков, в частности, измерения суммарной радиоактивности Земли и проверки ряда гипотез образования Земли. Приведены возможности использования такого детектора для изучения сверхновых.

**В заключении** автор приводит основные результаты диссертационной работы.

**Актуальность** проведенного исследования определяется повышенным интересом к теме нейтринных осцилляций во всем мире. Множество экспериментов ставится с це-

лью проверки известных параметров нейтринных осцилляций и поиском новых каналов.

**Новизна** исследования подтверждается тем, что многие результаты автора диссертации получены впервые. Угол смешивания  $\theta_{13}$  впервые был замечен в эксперименте Double Chooz, где автор принимает участие. Надо отметить, что идея этого эксперимента также принадлежит автору. Впервые был экспериментально получен спектр антинейтрино от  $^{238}\text{U}$  – одного из компонентов ядерного топлива в прямом эксперименте на ядерном реакторе.

**Практическая ценность** диссертации состоит в том, что ее результаты могут быть использованы, как в фундаментальных исследованиях (значение угла смешивания  $\theta_{13}$  используется для расчета вероятностей перехода типов нейтрино между собой), так и в прикладных (уточнение спектра антинейтрино  $^{238}\text{U}$  улучшает метрологическую базу для использования в задачах дистанционного мониторинга ядерного реактора).

**В диссертации можно отметить и некоторые недостатки**, например, некоторую сумбурность изложения. Несколько затянута вводная часть, первая и вторая главы могут быть отнесены собственно к введению. Собственно изложение начинается с третьей главы. Имеются также и опечатки. Предпоследний рисунок повторяет первый т.д. В обзоре, посвященном экспериментам с атмосферными нейтрино, не приводятся данные экспериментов, где не наблюдались осцилляции, можно было бы привести анализ отрицательных результатов и показать, как сформировалось убеждение о существовании осцилляций атмосферных нейтрино.

Однако эти недостатки не снижают качества работы. Диссертация Синёва В.В. является законченным научным исследованием, в котором представлено измерение последнего элемента матрицы смешивания нейтрино. Диссертация отражает состояние экспериментальных исследований в нейтринной физике на настоящее время.

**Достоверность** результатов, полученных в диссертации, подтверждается результатами экспериментов нескольких коллабораций, выполненных в последние годы.

**Обоснованность** научных положений и выводов базируется на материалах публикаций, выполненных автором самостоятельно и в соавторстве. Всего по материалам диссертации автором опубликованы 32 работы. Результаты также докладывались автором на международных и российских конференциях, семинарах.

Материалы диссертации со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат отражает содержание диссертации.**

Таким образом, диссертация **Синёва Валерия Витальевича** 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 соответствует 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,  
главный научный сотрудник ФИАН,  
доктор физико-математических наук

Рябов В.А.

Подпись Рябова В.А. заверяю:  
и.о. Ученого секретаря ФИАН,  
доктор физико-математических наук

Богачев С.А.