

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Дмитриевского Сергея Геннадьевича "Поиск нейтринных взаимодействий и исследование свойств нейтрино с помощью электронных детекторов в эксперименте OPERA", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа С.Г. Дмитриевского выполнена в рамках работ коллаборации OPERA по обнаружению осцилляций мюонных нейтрино в τ -нейтрино ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) в "эксперименте на появление". Хотя факт исчезновения атмосферных и ускорительных мюонных нейтрино хорошо зафиксирован, доказать переход в τ -нейтрино можно только экспериментально обнаружив их появление в пучке. Согласно последней публикации коллаборации от 6-го июля [arXiv:1507.01417], одним из авторов которой является С.Г. Дмитриевский, обнаружен 5-й кандидат на распад τ -лептона. Таким образом, вслед за обнаружением осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в экспериментах T2K и MINOS, впервые надежно, на уровне 5.1σ , установлено появление τ -нейтрино в пучке первоначальных мюонных нейтрино. Результат OPERA существенно улучшает данные эксперимента Super-Kamiokande с атмосферными нейтрино, зарегистрировавшего избыток τ -нейтрино на уровне 3.8σ за 8 лет измерений.

Диссертационная работа С.Г. Дмитриевского посвящена изучению электронных детекторов эксперимента OPERA, главное назначение которых состояло в формировании триггера в системе сбора данных при регистрации нейтрино и идентификации свинцово-эмульсионных блоков с вершиной нейтринного взаимодействия для проведения последующего анализа информации в ядерной эмульсии. В ходе эксперимента электронные детекторы использовались для решения важных независимых задач, таких как изучение потоков космических мюонов и измерение скорости нейтрино.

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

Диссертация С.Г. Дмитриевского состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 133 наименований. Объем диссертации составляет 141 страницу, включая 74 рисунка и 15 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели диссертационной работы, перечислены выносимые на защиту положения и отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены данные о публикациях и апробации работы, кратко изложена структура диссертации.

В первой главе дан достаточно подробный обзор теоретических и экспериментальных работ, направленных на изучение осцилляций нейтрино. Рассматривается вклад экспериментов с солнечными, атмосферными, ускорительными и реакторными нейтрино в определение параметров матрицы смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты (PMNS). Описываются эксперименты DONUT и CHORUS, использовавшие технологию ядерных фотоэмульсий для регистрации τ -лептона до эксперимента OPERA.

Во второй части главы обсуждаются вопросы измерения скорости нейтрино. Отмечается, что возможности проведения ускорительных экспериментов по проверке отклонения скорости нейтрино от скорости света активно обсуждались в ЦЕРНе начиная с конца 1990-х гг., чему способствовал ряд теоретических работ, рассматривавших такую возможность. Приводятся результаты экспериментов по измерению скорости нейтрино, выполненных во

FNAL в 1970-х гг. Подробно описан эксперимент MINOS, который является наиболее чувствительным к отклонению v/c от единицы.

Отмечено, что существенно более строгое (примерно, на три порядка) ограничение на отклонение скорости нейтрино от скорости света было получено из данных по регистрации нейтрино от сверхновой SN1987A.

Вторая глава посвящена описанию непосредственно эксперимента OPERA, основной целью которого является прямая регистрация τ -лептона, рождающегося в реакции заряженного тока при взаимодействии τ -нейтрино, которые появляются в первоначальном пучке мюонных нейтрино. Подробно описаны параметры нейтринного пучка в ЦЕРНе, подземная лаборатория Гран Сассо, общая структура детектора OPERA и его основных частей - мишени и эмульсионного и электронного детекторов.

Особое внимание уделено описанию калибровки и мониторингирования трековой системы целеуказания, которая ответственна за идентификации блоков мишени, содержащих вершину взаимодействия нейтрино. Вклад автора в данную часть эксперимента OPERA очень большой и существенная часть выполненных работ выносится на защиту.

В третьей главе детально описаны разработанные автором методы поиска вершины взаимодействия нейтрино с помощью электронных детекторов. Для решения этой важнейшей задачи группой ОИЯИ, при активном участии автора, были разработаны способы анализа данных электронных детекторов, такие как фильтрация сигналов в трековой системе целеуказания, включающая подавление фоновых сигналов и шумов электроники, определение направления мюонного трека и оси адронного ливня вблизи начала события, определение стенок и блока мишени с наибольшей вероятностью содержащих вершину взаимодействия.

Четвертая глава посвящена измерению скорости нейтрино в эксперименте OPERA. Для определения момента взаимодействия нейтрино в детекторе группой ОИЯИ был предложен и разработан новый метод мюонных треков, использующий временную информацию сигналов от мюонов, треки которых были восстановлены при помощи электронных детекторов. Помимо метода мюонных треков, коллаборация использовала еще три метода для определения момента взаимодействия, однако для получения объединенного результата были использованы результаты метода ОИЯИ и метода, измерявшего время с помощью газовых камер, поскольку их статистические и систематические ошибки были наименьшими и наименее коррелирующими между собой.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

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

Разработаны методы анализа данных электронных детекторов OPERA для поиска вершины взаимодействия нейтрино в мишени экспериментальной установки: фильтрация сигналов в ТСЦ, восстановление мюонного трека и оси адронного ливня, определение стенки и блока мишени с вершиной взаимодействия нейтрино. Эти методы были объединены в едином программном пакете и применены для поиска τ -нейтрино в пучке нейтрино из ЦЕРНа.

Разработан метод определения момента времени взаимодействия нейтрино по сигналам от мюонов, треки которых были реконструированы по данным электронных детекторов. С помощью этого метода определена величина отклонения времени пролета нейтрино и антинейтрино между источником в ЦЕРНе и детектором OPERA от ожидаемого значения и для установления новых ограничений на отклонение скорости нейтрино от скорости света.

Следует особо отметить, что основные результаты диссертации докладывались автором на 14-ти международных конференциях и научных школах.

Практическая значимость состоит, в первую очередь в том, что полученная оценка изменения функции отклика используемого пластического сцинтиллятора серии UPS-923A со временем $-(1,7 \pm 0,2) \%$ в год – подтверждает возможность использования таких детекторов в будущих экспериментах.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации подтверждается тем, что в ней используются строгие и апробированные методы измерения параметров электронных детекторов, современные методы статистического анализа, а также согласие с данными других авторов. В частности, последний результат эксперимента MINOS по измерению скорости нейтрино от 15 июля 2015 г. [arXiv:1507.04328v1], который появился после написания диссертации, находится в хорошем согласии с результатом, выносимом на защиту.

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

1. В разделе "Введения", при перечислении основополагающих работ, посвященных осцилляциям нейтрино, следовало бы привести знаменитую 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.

2. В список работ, в которых была предпринята первая серия попыток обнаружить осцилляции нейтрино на реакторах ILL, BUGEY, Красноярска, PALO VERDE и CHOOZ, следовало бы добавить работы, выполненные группой Курчатовского Института под руководством Л.А. Микаэляна на реакторе Ровенской АЭС (например, Письма ЖЭТФ, 55, 544 (1992)). Отметим также, что в процитированном эксперименте на реакторе BUGEY (ссылка [37]) как раз было объявлено об исчезновении нейтрино на расстоянии 18 метров от зоны реактора на уровне 3σ . Другими группами этот результат не был подтвержден.

3. В качестве основных результатов диссертации приведены важные пределы на отклонение скорости нейтрино и антинейтрино от скорости света. Представляется естественным в тексте диссертации сравнение полученных результатов с результатами, достигнутыми в других работах. В диссертации приведены ссылки на работы коллабораций LVD, Borexino и ICARUS, однако самих результатов LVD, Borexino и ICARUS и их сравнения с результатом коллаборации OPERA не приведено. Возможно, следовало бы сравнить все существующие результаты по измерению скорости нейтрино в отдельной таблице, а особенности экспериментов LVD, Borexino и ICARUS по измерению скорости нейтрино, которые были инициированы первым ошибочным результатом OPERA, описать более подробно.

Отмеченные недостатки не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы С. Г. Дмитриевского. Она написана хорошим языком, практически отсутствуют замечания к оформлению работы (разве, что на стр. 23 в предложении "В сравнении с черенковскими детекторами BOREXINO обладает б'ольшим энергетическим разрешением", прилагательное "б'ольшим" можно было бы заменить на "лучшим").

В работе получены **новые** важные результаты, среди которых можно выделить следующие:

1. Разработаны методы анализа данных электронных детекторов OPERA для поиска вершины взаимодействия нейтрино, что позволило обнаружить пять событий взаимодействия τ -нейтрино и таким образом надежно установить наличие осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

2. Разработан метод определения момента времени взаимодействия нейтрино в детекторе OPERA по сигналам от мюонов, треки которых были реконструированы на основе данных

электронных детекторов. Применение метода позволило измерить скорость нейтрино с использованием электронных детекторов. Благодаря наличию магнитных спектрометров в установке OPERA, удалось разделить скорости нейтрино и антинейтрино, что недоступно для других детекторов нейтрино в Гран Сассо.

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), ИТЭФ НИЦ КИ (Москва), ПИЯФ НИЦ КИ (С.-Петербург) и ИФВЭ НИЦ КИ (Протвино).

Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными и получены впервые. Они обоснованы и убедительны, хорошо известны специалистам и опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных физических журналах. **В целом диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, соответствующем уровню школы нейтринной физики ОИЯИ, она отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, а ее автор С.Г. Дмитриевский заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

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

Подпись руки 
ЗАВЕРЯЮ:
Зам. нач. ОК 

ЗИНОВЬЕВА

С отзывом ознакомлен 6.10.2015
Дмитрий (Дмитриевский С.Г.)