

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Дмитриевский Сергей Геннадьевич

**ПОИСК НЕЙТРИННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ
СВОЙСТВ НЕЙТРИНО С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННЫХ
ДЕТЕКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ OPERA**

01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2015

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, начальник сектора ЛЯП ОИЯИ, руководитель проекта OPERA в ОИЯИ, *Горнушкин Юрий Алексеевич*

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий Отделом полупроводниковых ядерных детекторов Научно-исследовательского центра “Курчатовский институт” Федерального государственного бюджетного учреждения Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова (г. Гатчина), *Дербин Александр Владимирович*,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра “Курчатовский институт” Федерального государственного бюджетного учреждения “Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт теоретической и экспериментальной физики” (г. Москва), *Прокудин Михаил Сергеевич*

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится 2015 г. в час. мин.
на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при ОИЯИ по адресу:
141980, Дубна, ОИЯИ, Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова,
корп.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте
http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC_dlnp.htm

Автореферат разослан

2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Стандартная модель (СМ) взаимодействий элементарных частиц прошла успешную проверку в многочисленных экспериментах. В то же время многое говорит за то, что СМ требует дальнейшего развития и обобщения. Исходя из этого, поиск и изучение явлений, выходящих за рамки СМ, приобретают все большую актуальность. На сегодняшний день, возможно, единственным таким явлением, установленным с достаточной надежностью, являются осцилляции нейтрино, которые связаны с ненулевой массой и смешиванием этих частиц. Сейчас явление нейтринных осцилляций интенсивно исследуется во многих экспериментах с нейтрино от разных источников [1]. Большинство осцилляционных экспериментов проводится в режиме “на исчезновение”, когда измеряется уменьшение потока определенного типа нейтрино по сравнению с его ожидаемой величиной в отсутствие осцилляций. Не менее важное значение для проверки теории трехкомпонентного смешивания имеют также эксперименты “на появление”, где производится регистрация нейтрино, имеющих аромат отличный от того, который изначально присутствует в исследуемом потоке.

В 2008–2012 гг. в эксперименте OPERA [2] проводился поиск ν_τ в режиме “на появление” в пучке мюонных нейтрино CNGS [3] в области параметров осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, характерных для атмосферного сектора. Гибридная установка OPERA включала мишень, состоявшую из 150 000 свинцово-эмульсионных блоков общей массой 1,25 кт, и электронные детекторы (ЭД): Трековую систему целеуказания (ТСЦ) и магнитные спектрометры (с РПК и дрейфовыми трубками). При помощи ЭД осуществлялась регистрация нейтрино в режиме реального времени, а в ядерной эмульсии производился поиск характерной топологии распада короткоживущих частиц. ТСЦ отводилась главная роль при идентификации блоков мишени, содержащих вершину взаимодействия нейтрино, для проведения последующего анализа информации в эмульсии. Кроме выполнения указанных функций при поиске нейтринных осцилляций, ЭД использовались также как самостоятельный инструмент при проведении других физических исследований на детекторе OPERA, в частности, при измерении скорости нейтрино [A5].

Измерение скорости нейтрино представляет значительный интерес [4–6] с точки зрения поиска возможных проявлений физики за пределами СМ. Среди моделей, расширяющих СМ, есть и такие (см., например, [7–9]), в которых предсказываемое отличие отношения $\beta_\nu \equiv v_\nu/c$ (где v_ν – скорость нейтрино) от единицы достигает величины $|\beta_\nu - 1| \sim 10^{-4}$ для нейтрино с энергией E_ν в несколько ГэВ. В случае справедливости этих моделей подобный эффект мог бы быть обнаружен в наземных экспериментах с нейтринными пучками от ускорителей.

В 2007 г. в эксперименте MINOS [10] с целью проверки упомянутых выше моделей было проведено измерение скорости нейтрино на пучке NUMI [11] (наиболее вероятное значение $E_\nu \approx 3$ ГэВ) и поставлено ограничение: $(\beta_\nu - 1) = (5,1 \pm 2,9) \times 10^{-5}$ [12]. Статистическая значимость отличия β_ν от единицы, полученная в этом эксперименте, не была высокой ($\approx 1,8$ стандартных отклонения), однако, возможность такого эффекта тоже не исключалась.

В 2009–2012 гг. в эксперименте OPERA также были сделаны измерения β_ν на пучке CNGS.

Цель работы.

Данная диссертация посвящена поиску вершины нейтринных взаимодействий при исследовании осцилляций и измерению скорости нейтрино с использованием электронных детекторов в эксперименте OPERA.

Научная новизна.

1. На основе результатов калибровок определены индивидуальные характеристики сцинтилляционных стрипов ТСЦ установки OPERA: значения световых выходов, параметры “короткого” и “длинного” затухания.
2. Проведено мониторинговое обслуживание эффективности ТСЦ и стабильности ее отклика при помощи мюонов, регистрировавшихся этой системой с 2006 по 2013 гг.
3. Впервые прямым методом получена оценка изменения отклика пластического сцинтиллятора серии UPS-923A со временем.
4. 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 объединены в едином программном пакете OpBrickFinder.
5. Разработан метод определения момента времени взаимодействия нейтрино в детекторе OPERA по сигналам от мюонов, треки которых были реконструированы в ТСЦ. С помощью этого метода:
 - рассчитана величина отклонения δt времени пролета $\nu(\bar{\nu})$ между источником в CERN и детектором OPERA от своего номинального значения: $\delta t = (1,2 \pm 1,0 \text{ (стат.)} \pm 3,3 \text{ (сист.)})$ нс;
 - при объединении с результатами измерения δt , полученными по информации с другого детектора (РПК мюонных спектрометров), рассчитана итоговая величина отклонения:
 $\delta t = (0,7 \pm 0,4 \text{ (стат.)} \pm 1,6 \text{ (сист. — некорр.)} \pm 2,5 \text{ (сист. — корр.)})$ нс;
 - впервые установлены отдельные ограничения на отклонение скоростей нейтрино v_ν и антинейтрино $v_{\bar{\nu}}$ от скорости света c :
 $-1,8 \times 10^{-6} < (v_\nu/c - 1) < 2,3 \times 10^{-6}$ и
 $-1,6 \times 10^{-6} < (v_{\bar{\nu}}/c - 1) < 3,0 \times 10^{-6}$
(на уровне достоверности 90%).

Практическая значимость.

1. Расчитанные калибровочные характеристики ТСЦ использованы для калориметрических измерений при анализе данных эксперимента OPERA (реконструкции энергии события и, в частности, адронного ливня при взаимодействии нейтрино).

2. Мониторирование ТСЦ с помощью мюонов позволяло контролировать эффективность отдельных модулей ТСЦ на протяжении всего набора данных в эксперименте OPERA. Наблюдаемая эффективность ТСЦ на уровне 99% обеспечивала высокую надежность проведения анализа нейтринных событий, в частности, для поиска блока мишени с вершиной взаимодействия нейтрино.
3. Полученная оценка изменения отклика пластического сцинтиллятора серии UPS-923A со временем – $(1,7 \pm 0,2)\%/год$ – подтверждает возможность использования детектора ТСЦ в будущих экспериментах.
4. Разработанный программный пакет OpBrickFinder показал эффективность локализации вершины взаимодействия нейтрино на уровне $(71 \pm 5)\%$ (для наиболее вероятного блока мишени) и был успешно использован для анализа всех данных, набранных в эксперименте OPERA с середины 2009 по конец 2012 гг., что позволило обнаружить несколько событий взаимодействия тау-нейтрино из пучка CNGS.
5. С помощью разработанного метода определения момента времени взаимодействия нейтрино в детекторе OPERA удалось обнаружить и устранить один из источников систематической ошибки при анализе экспериментальных данных OPERA 2009–2011 гг., отобранных для измерения скорости нейтрино. Применение этого метода для анализа экспериментальных данных OPERA 2012 г. (в специальном режиме коротких импульсов пучка CNGS) позволило рассчитать величину отклонения δt времени пролета $\nu(\bar{\nu})$ между источником в CERN и детектором OPERA от своего номинального значения, а также (при объединении с результатами измерения другим методом) впервые установить отдельные ограничения на отклонение скоростей нейтрино ν и $\bar{\nu}$ от скорости света.

Личный вклад автора.

Все результаты, приведенные в диссертационной работе, кроме специально оговоренных случаев, были получены непосредственно автором или при его активном участии.

Автор защищает:

1. Результаты определения калибровочных характеристик сцинтилляционных стрипов ТСЦ установки OPERA и их применение при анализе нейтринных событий в ЭД.
2. Результаты мониторинга эффективности ТСЦ и стабильности ее отклика при помощи мюонов, и полученную на основе этих результатов оценку изменения отклика пластического сцинтиллятора серии UPS-923A со временем.
3. Методы поиска вершины взаимодействия нейтрино в мишени установки OPERA с помощью ЭД и результаты применения этих методов для анализа экспериментальных данных с целью поиска тау-нейтрино в пучке CNGS.
4. Метод определения момента времени взаимодействия нейтрино в детекторе OPERA по сигналам от мюонов, зарегистрированных в ТСЦ, и результаты применения этого метода для анализа экспериментальных данных

с целью измерения времени пролета нейтрино между источником в CERN и детектором в Лаборатории LNGS, а также для установления новых ограничений на отклонение скорости нейтрино от скорости света.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались автором на следующих международных конференциях и научных школах: XVI Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (Moscow, Russia, 2013), XV International Workshop on Neutrino Telescopes (Venezia, Italy, 2013), Astroparticle Physics Workshop on Russian-German Perspectives (Dubna, Russia, 2011), XVI Cracow Epiphany Conference on Physics in Underground Laboratories and Its Connection with LHC (Cracow, Poland, 2010), XXX and XXXI International Workshops on Neutrino Physics at Accelerators (Dubna, Russia, 2008, 2009), The European School of High Energy Physics (Třešt', Czech Republic, 2007), VIII International School-seminar on the Actual Problems of Microworld Physics (Gomel, Belarus, 2005), IV and V International Pontecorvo Neutrino Physics Schools (Alushta, Ukraine, 2010, 2012), VIII International Scientific Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics (Irkutsk reg., Russia, 2008), XXXII Meeting of the Programme Advisory Committee for Particle Physics (Dubna, Russia, 2010), IX and X Scientific Conferences of Young Scientists and Specialists of JINR (Dubna, Russia, 2005, 2006), а также на научных семинарах и рабочих совещаниях Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, Лаборатории LNGS, Коллаборации OPERA.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ [A1–A10], в числе которых 4 статьи – в рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации – 141 страница, включая 74 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 133 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цели работы, новизна и практическая значимость полученных в ней результатов, приведены данные о публикациях автора и апробации работы, кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** дается обзор состояния исследования осцилляций нейтрино, а также некоторых других его свойств.

В первом разделе рассматривается явление нейтринных осцилляций. Вначале кратко излагаются основы теории осцилляций: дается описание матрицы смешивания, выводятся выражения для вероятностей сохранения и изменения аромата нейтрино при распространении в вакууме. Затем приводится обзор прошлых и современных экспериментальных исследований по поиску осцилляций

и измерению параметров смешивания с использованием нейтрино от разных источников. Подчеркивается важность экспериментов “на появление” (когда производится регистрация нейтрино, имеющих аромат отличный от того, который изначально присутствовал в исследуемом потоке). Обосновывается актуальность поиска осцилляций в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Обсуждается технология детектирования тау-нейтрино с помощью ядерной фотоэмульсии. Описываются эксперименты, использовавшие эту технологию, до эксперимента OPERA.

Во втором разделе обсуждается возможность поиска экзотических свойств нейтрино, связанных, в частности, с особенностью его распространения в пространстве. Приводятся ссылки на работы с описанием некоторых моделей, расширяющих СМ, в которых предсказывалась возможность для наблюдения отклонения скорости высокоэнергетических нейтрино от скорости света. В заключении первой главы приводятся результаты экспериментальных измерений скорости нейтрино, выполненных до эксперимента OPERA, в частности, результат эксперимента MINOS, полученный в 2007 г. в ходе проверки предсказаний упомянутых выше моделей.

Вторая глава посвящена описанию эксперимента OPERA, основной целью которого является прямая регистрация тау-нейтрино, появившихся в результате осцилляций в изначально чистом пучке мюонных нейтрино CNGS.

Гибридный детектор OPERA (см. Рис. 1), включающий мишень и электронные детекторы (ЭД), располагается в подземной Лаборатории LNGS на расстоянии $L \approx 730$ км от CERN. Мишень детектора, имевшая общую массу 1250 т., содержала $\sim 150\,000$ блоков из чередующихся пластин свинца и ядерной эмульсии. Главное назначение ЭД, включавших Трековую систему целеуказания (ТЦ) и магнитные спектрометры, состояло в формировании триггерного сигнала в системе сбора данных при регистрации нейтрино в режиме реального времени и идентификации блоков с вершиной нейтринного взаимодействия.

Каждая панель ТЦ собрана из четырех независимых модулей, содержащих по 64 полосы (стрипа) пластического сцинтиллятора длиной 6,86 м, шириной 26,3 мм и толщиной 10,6 мм. Свет, возникающий в результате ионизационных потерь заряженных частиц при прохождении слоя пластика, собирается световодом и посредством полного внутреннего отражения направляется на 64-канальные фотоумножители (ФЭУ) (см. Рис. 2).

Перед установкой ТЦ в детектор все ее модули были прокалиброваны электронами от β -радиоактивного источника.

Облучение стрипов производилось в девяти точках, равномерно распределенных вдоль модуля. Полученные для каждого стрипа амплитудные зависимости были аппроксимированы [A2] функцией затухания сигнала, которая представляет собой сумму двух экспонент:

$$\begin{cases} A_{left} = A_0 \left(\alpha e^{-\frac{\Delta x}{\lambda_s}} + (1 - \alpha) e^{-\frac{\Delta x}{\lambda_l}} \right) \\ A_{right} = \beta A_0 \left(\alpha e^{-\frac{L_0 - \Delta x}{\lambda_s}} + (1 - \alpha) e^{-\frac{L_0 - \Delta x}{\lambda_l}} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где Δx – длина световода между точкой облучения и одним из ФЭУ, где находится начало координат; A_0 – количество фотоэлектронов ФЭУ при $\Delta x = 0$; λ_s и λ_l – характерные длины “короткого” и “длинного” затухания, соответствен-

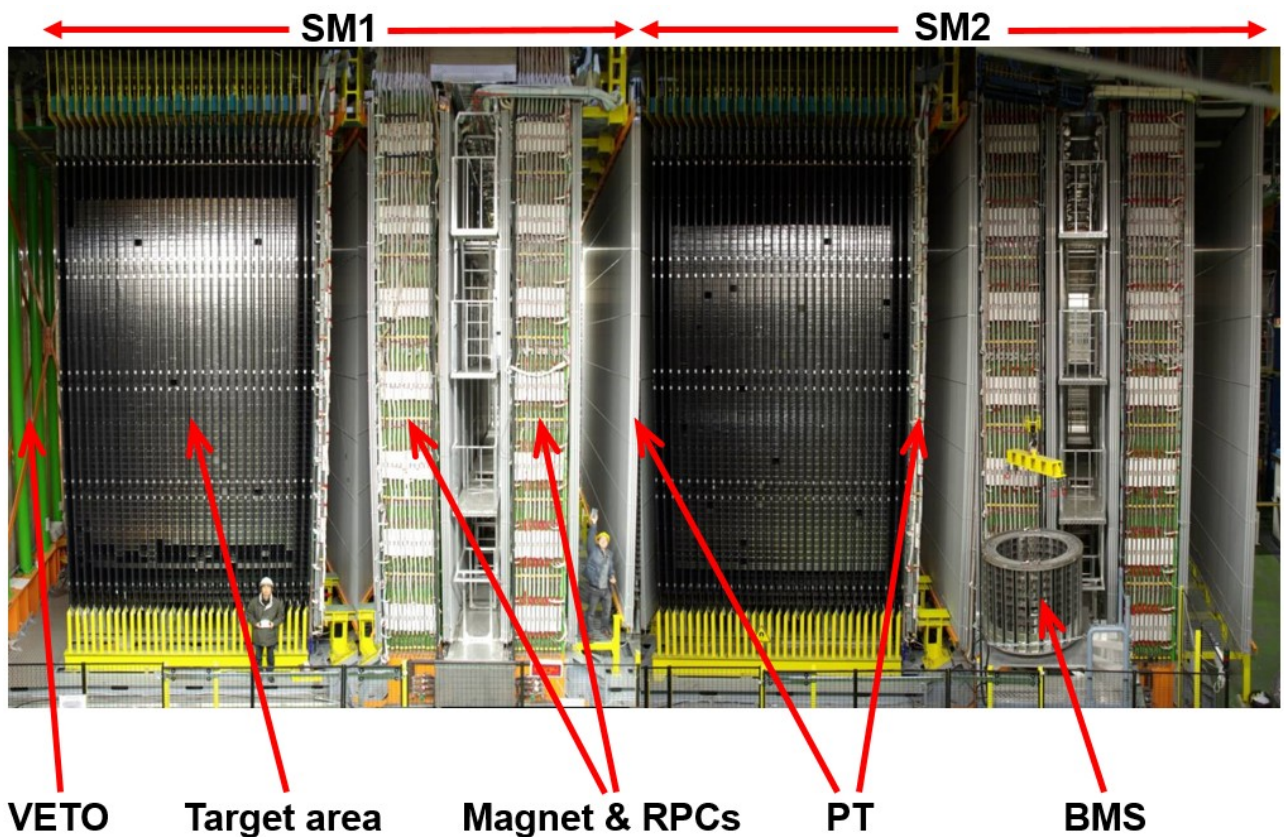


Рис. 1: Общий вид детектора OPERA: два идентичных супермодуля (SM1 и SM2), включавшие секцию мишени вместе со сцинтилляционными детекторами (Target area) и мюонный спектрометр, состоявший из магнита (Magnet), резистивных плоских камер (RPC) и дрейфовых трубок (PT). Также указаны вето-система (VETO) и робот для извлечения блоков мишени (BMS).

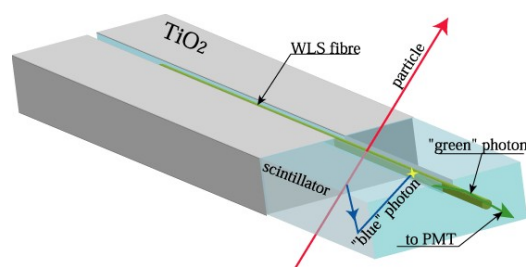


Рис. 2: Принцип детектирования частиц в сцинтилляционном стрипе ТСЦ.

но; $\alpha \in (0; 1)$ – коэффициент, характеризующий вклад каждой из экспонент в затухание сигнала; β – коэффициент качества, учитывающий возможную разницу оптических контактов на одном и другом ФЭУ; L_0 – длина стрипа.

Используя калибровку (1), энергию, выделившуюся в стрипе при прохождении через него минимально ионизирующей частицы (которая при пересечении 1 см пластического сцинтиллятора оставляет в среднем энер-

гию $E_{MIP} = 2,15$ МэВ), можно оценить как

$$E^{rec} = \frac{A^{rec}}{A_0} E_{MIP}, \text{ где}$$

$$A^{rec} = \frac{1}{2} \left(\frac{A_{left}}{\left(\alpha e^{-\frac{\Delta x}{\lambda_s}} + (1 - \alpha) e^{-\frac{\Delta x}{\lambda_l}} \right)} + \frac{A_{right}}{\beta \left(\alpha e^{-\frac{L_0 - \Delta x}{\lambda_s}} + (1 - \alpha) e^{-\frac{L_0 - \Delta x}{\lambda_l}} \right)} \right).$$

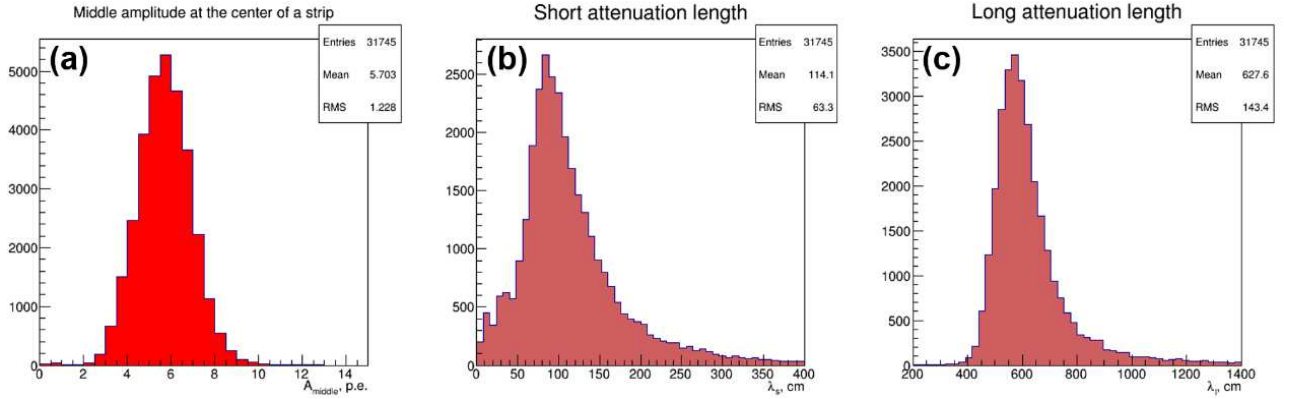


Рис. 3: Распределение параметров затухания сцинтилляционных стрипов: (a) среднее количество фотоэлектронов, собираемых с центра стрипа; характерные длины “короткого” (b) и “длинного” (c) затухания.

Качество используемого в OPERA сцинтиллятора можно охарактеризовать средним количеством фотоэлектронов, собираемых с центра стрипа (точки, максимально удаленной от обоих ФЭУ). Как видно из Рис. 3, среднее значение этой величины по всем стрипам составило 5,7 ф. э., что значительно выше минимально допустимого значения 4 ф. э., установленного спецификацией в соответствии с требованием эксперимента. На этом же рисунке приведены распределения параметров λ_s и λ_l , средние значения которых составили, соответственно, 1,1 м и 6,3 м.

Начиная с августа 2006 г. по апрель 2013 г. ЭД установки OPERA почти непрерывно производился набор данных от космических мюонов. Кроме того, во время сеансов CNGS регистрировались мюоны, рождавшиеся во взаимодействиях ν_μ по каналу заряженного тока (charged current, CC). Информация о мюонных треках использовалась, в частности, для мониторинга эффективности ТСЦ и стабильности отклика ее элементов.

Для выполнения задачи по мониторингу ТСЦ автором диссертации проводилось восстановление прямолинейных мюонных треков. Сигналы в ТСЦ от мюонов из двух независимых проекций (горизонтальной (XZ) и вертикальной (YZ)) объединялись в 3D-трек, определяемый уравнениями $x = A_x z + B_x$ и $y = A_y z + B_y$. За весь период наблюдения было реконструировано свыше миллиона 3D-треков. Их угловое распределение приведено на Рис. 4.

Эффективность отдельного модуля ТСЦ определялась как отношение количества случаев, когда проходивший через модуль мюон оставлял в нем сигнал,

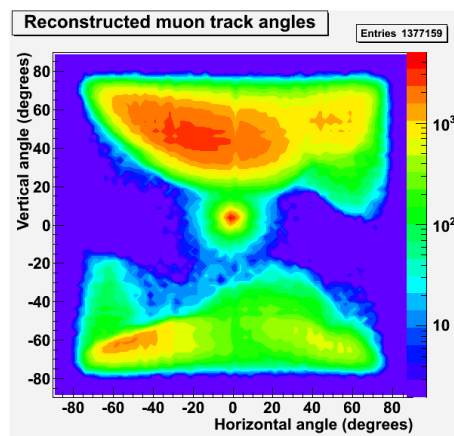


Рис. 4: Угловое распределение восстановленных в ТСЦ мюонных треков. Область в центре рисунка соответствует трекам в событиях от пучка CNGS.

превышающий пороговое значение, к ожидаемому количеству всех сигналов от мюонных треков, которые пересекали данный модуль за рассматриваемый период времени. При наборе данных сигналы с двух сторон модуля регистрировались независимо. При последующем анализе можно рассматривать два режима регистрации сигналов: режим 'OR' – когда сигнал выше порогового имелся по крайней мере с одного конца световода, и режим 'AND' – когда требовалось наличие сигналов с обоих концов. Для примера, на Рис. 5 приведено распределение эффективности модулей ТСЦ в режиме 'OR' (для порога 0,3 ф.э.), полученное по данным, набранным за один месяц.

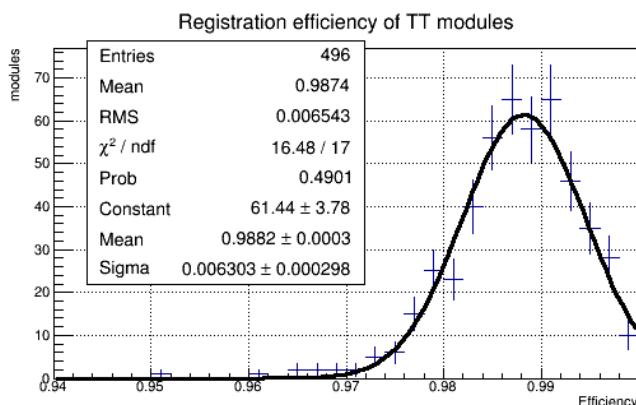


Рис. 5: Эффективность модулей ТСЦ в режиме 'OR' для порога 0,3 ф.э. (по данным за один месяц).

На Рис. 6 слева представлены графики эволюции среднего значения эффективности всех модулей ТСЦ для режимов 'OR' и 'AND' для трех значений порога за весь период наблюдения. На том же рисунке справа приведены аналогичные графики, полученные без учета тех модулей, которые в соответствующий промежуток времени находились в нерабочем состоянии (например, по причине замены или отключения ФЭУ, деактивации сенсоров модуля системой сбора данных и т.п.). Отсутствие точек на графиках соответствует периодам отключения системы сбора данных, а видимые колебания эффективности вызваны влиянием

поля от магнитов мюонных спектрометров (магнитная система детектора активировалась на время сеансов работы пучка CNGS).

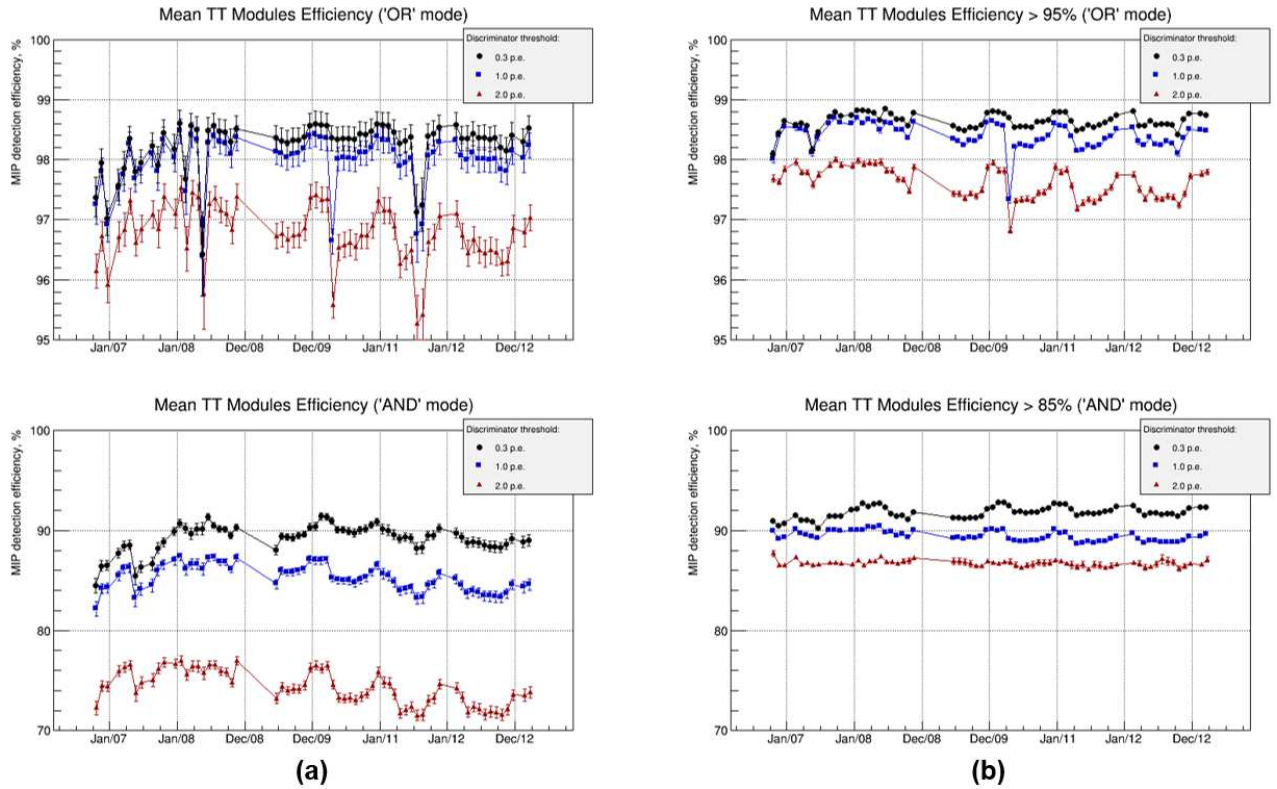


Рис. 6: Эволюция среднего значения эффективности модулей ТСЦ за весь период наблюдения: (а) для всех модулей, (б) только для модулей с эффективностью выше 95% (для режима 'OR') или выше 85% (для режима 'AND').

Изучение стабильности световыхода пластического сцинтиллятора, применяемого в OPERA, производилось путем наблюдения за изменением с течением времени амплитуды отклика ТСЦ при прохождении мюонов. Для корректировки амплитуды сигналов с ФЭУ использовались следующие поправки:

- поправка на затухание света при распространении в световоде;
- поправка на среднюю длину пути мюона в сцинтилляционном стрипе;
- поправка, на разницу dE/dx для двух рассматриваемых классов мюонов.

На Рис. 7 слева представлен график эволюции наиболее вероятного значения, усредненного по всему угловому диапазону в обеих проекциях. Здесь, так же как и при мониторингировании эффективности ТСЦ, наблюдалось небольшое влияние поля от магнитов спектрометров, включаемых на время работы пучка CNGS. По этой причине, для оценки скорости изменения отклика ТСЦ были использованы только данные, набранные во время пяти сеансов CNGS, с 2008 по 2012 гг. (Рис. 7, справа). Для их аппроксимации использовалась экспоненциальная зависимость:

$$R(t) = \exp(p_0 - p_1 t). \quad (2)$$

Найденные значения параметров функции (2), соответствуют амплитуде отклика ТСЦ в начальный период наблюдений (август

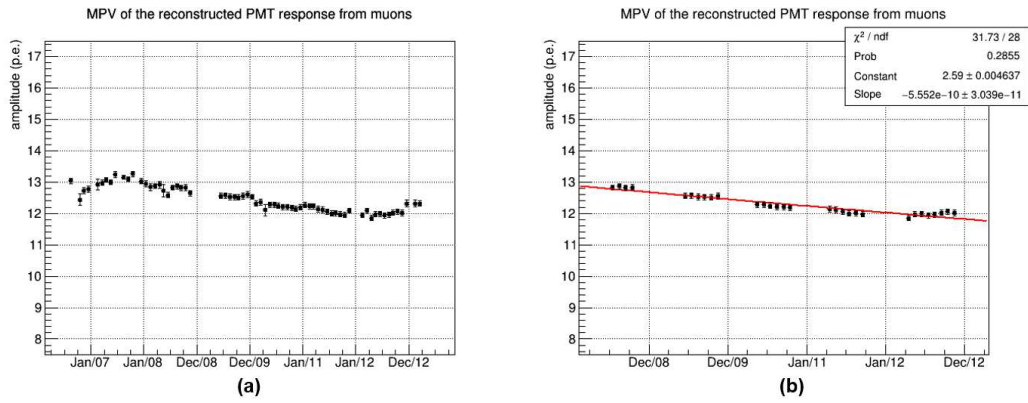


Рис. 7: Зависимость от времени наиболее вероятного (MPV) значения амплитуд сигналов от мюонов: слева – данные за весь период наблюдения, справа – данные за периоды сеансов CNGS, аппроксимированные экспоненциальной функцией (2).

2006 г.) $R_0 \equiv e^{p_0} = (13,2 \pm 0,1)$ ф. э. и характеристике изменения отклика ТСЦ $\alpha_R \equiv (1 - e^{-p_1 t}) \cdot 100\%/год = (1,7 \pm 0,2)\%/год$.

В конце второй главы приводится общая схема анализа нейтринных событий при поиске осцилляций в детекторе OPERA, а также освещается современный статус эксперимента.

В третьей главе дано подробное описание разработанной автором процедуры идентификации блоков мишени, содержащих вершину взаимодействия нейтрино, с помощью ЭД установки OPERA.

Идентификация блоков с вершиной взаимодействия являлась одной из важных задач обработки данных эксперимента [A2, A9]. Повышение эффективности этой идентификации позволяло, во-первых, ускорить процесс локализации вершины в фотоэмульсии за счет существенного сокращения объема анализируемой информации, а во-вторых, замедлить сокращение массы мишени в детекторе с течением времени (поскольку после анализа эмульсии извлеченные блоки не возвращались в детектор и не заменялись новыми).

Для решения задачи поиска вершины группой из ОИЯИ при активном участии автора был разработан подход, который включал этапы анализа данных ЭД, описанные ниже.

Фильтрация сигналов в ТСЦ. Для поиска вершины взаимодействия нейтрино наиболее существенной является трековая информация. Однако в событиях могут присутствовать не связанные с треками (изолированные) сигналы или группы сигналов, появившиеся, например, в результате взаимодействия нейтральных частиц (нейтронов и гамма квантов) с веществом в детекторе, шума и перекрестных наводок (cross-talks) в соседних каналах многоканального ФЭУ. Наличие таких сигналов искажает топологию событий и осложняет их обработку. С целью подавления изолированных сигналов в ТСЦ группой из ОИЯИ при активном участии автора был разработан алгоритм предварительной фильтрации событий, основанный на принципах *клеточного автомата* [13, 14]. Применение этого алгоритма при обработке нейтринных событий не влияло на трековую

информацию, сохраняя в среднем более 99% сигналов от мюонов, и в то же время помогало надежнее локализовать стенку мишени, содержащую вершину взаимодействия нейтрино, подавляя сигналы от частиц, вылетающих в заднюю полусферу. Пример применения фильтрации для одного из событий OPERA, приведен на Рис. 8.

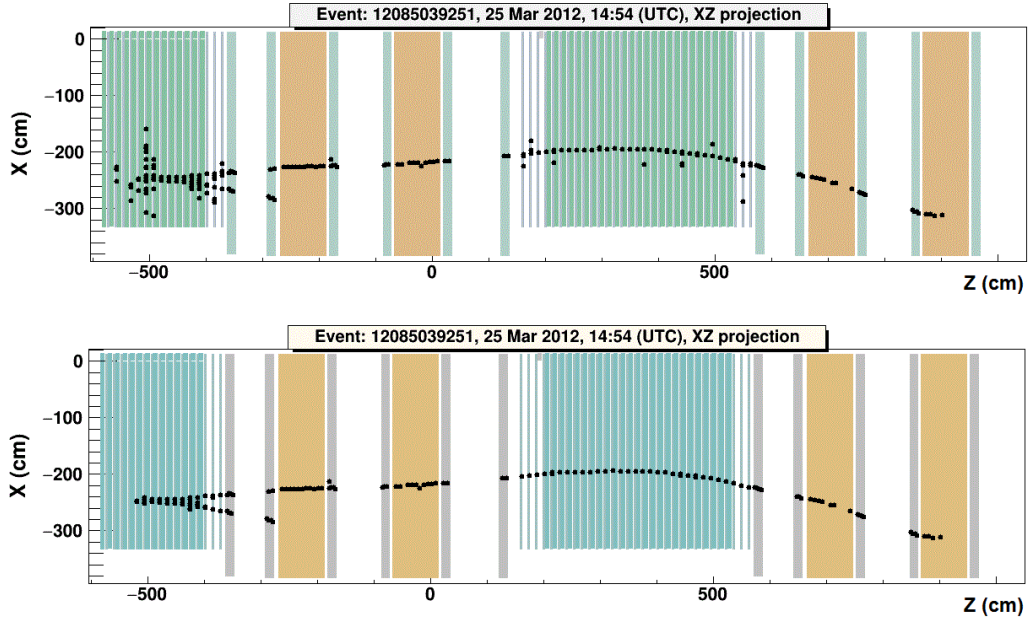


Рис. 8: Вид события в детекторе OPERA до фильтрации (вверху) и после фильтрации (внизу).

Реконструкция мюонного трека. Наличие мюонного трека в СС-событиях ν_μ , а также в событиях с распадом $\tau \rightarrow \mu$, значительно облегчало поиск блока, в котором произошло взаимодействие нейтрино. Благодаря тому, что мюон обычно проходил большое расстояние в детекторе, его трек хорошо выделялся и указывал направление на вершину события. Реконструкция треков других частиц в ЭД почти всегда оказывалась затруднительной, особенно в районе развития адронного ливня, поскольку пространственное разрешение ТСЦ детектора OPERA (около 7,5 мм) в общем случае не позволяло различать отдельные треки вблизи вершины взаимодействия.

Для реконструкции мюонного трека группой из ОИЯИ при активном участии автора были разработаны два метода: метод, основанный на использовании линейного преобразования Хафа (Hough transform) [15], и метод прослеживания, основанный на алгоритме поиска минимального покрывающего дерева (minimal spanning tree algorithm) (см., например, [16]). На Рис. 9 приведен пример восстановления мюонного трека в одном из СС-событий ν_μ .

Точность реконструкции направления на вершину события, обеспечиваемая разработанными методами, была протестирована при анализе примерно одной трети событий, зарегистрированных OPERA в 2009 г. Для подтверждения блока с вершиной, предсказанного по параметрам мюонного трека, реконструированном в ЭД, использовалась внешняя пара эмульсионных пленок (CSd).

Во второй строке Таб. 1 приведены результаты сравнения параметров (положения и наклона) мюонных треков, реконструированных в ЭД, с соответствующими

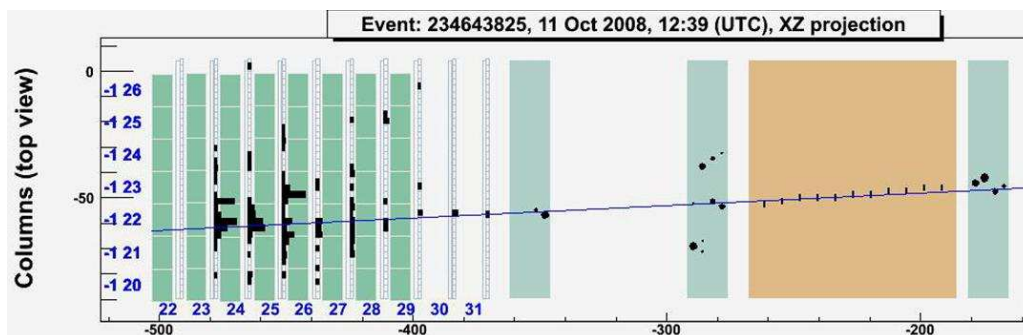


Рис. 9: Пример мюонного трека, реконструированного в ЭД.

щими параметрами, измеренными в CSd (по данным сканирующей лаборатории в LNGS), для выборки событий СС-взаимодействия ν_μ , анализировавшихся группой из ОИЯИ. Из приведенной таблицы видно, что достигнутая в 2009 г. точность реконструкции, оказалась заметно выше той, что была получена другим методом реконструкции трека, использовавшемся в эксперименте в 2008 г.

Таблица 1: Результаты сравнения двух разных методов реконструкции с экспериментальными данными.

Год	Кол-во событий	σ_D (мм)	σ_A (мрад)
2008	424	$17,0 \pm 0,6$	$25,4 \pm 1,0$
2009	279	$10,8 \pm 0,6$	$19,8 \pm 1,0$

Результаты сравнения параметров, полученные на начало 2015 г., для выборки 2010–2012 гг. представлены на Рис. 10.

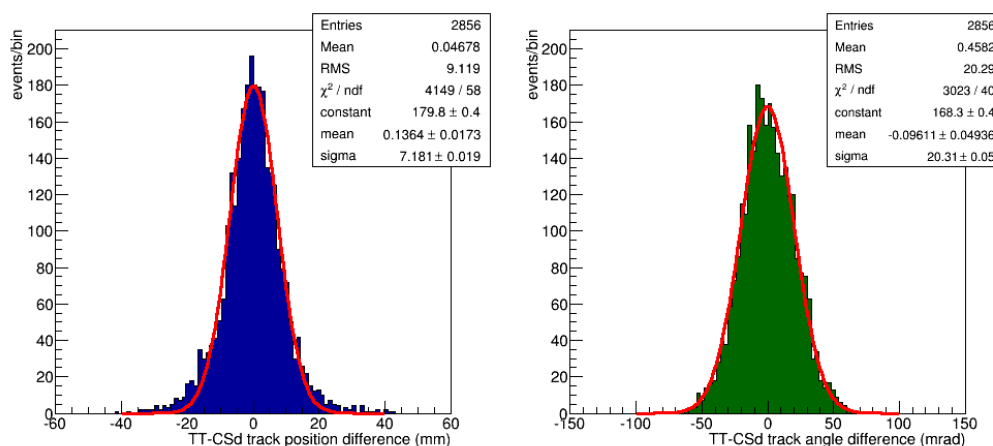


Рис. 10: Сравнение параметров мюонных треков, реконструированных в ЭД, с соответствующими параметрами, измеренными в эмульсии CSd (для выборки 2010–2012 гг.).

При аппроксимации разницы между предсказанным и измеренным положением трека нормальным распределением стандартное отклонение (σ на Рис. 10, слева) близко к теоретическому пределу разрешения ТСЦ ($\approx 7,5$ мм), что говорит о хорошей геометрической калибровке детекторов и качественной реконструкции треков.

Реконструкция оси адронного ливня. Реконструкция мюонного трека эффективно помогала найти направление на вершину события, но во многих случаях, таких как, например, взаимодействия нейтрино по каналу нейтрального тока (neutral current, NC), в ЭД вообще могло не оказаться различных треков. В этих случаях производилось восстановление оси адронного ливня, которая должна была указывать на вершину, в предположении, что ливень развивался симметрично относительно этой оси. Для восстановления оси адронного ливня был применен метод устойчивой аппроксимации (МУА) прямой линией (*robust line fitting*) [17]. Идея этого метода заключается в использовании модифицированного функционала, который минимизируется в методе наименьших квадратов (МНК), таким образом, чтобы минимизация давала устойчивую оценку в условиях негауссовых отклонений аппроксимируемых точек (координат сигналов ТСЦ) от прямой линии. Это достигается путем присваивания веса каждой точке, который зависел от амплитуды сигнала ТСЦ и от его положения относительно аппроксимирующей прямой (см. Рис. 11).

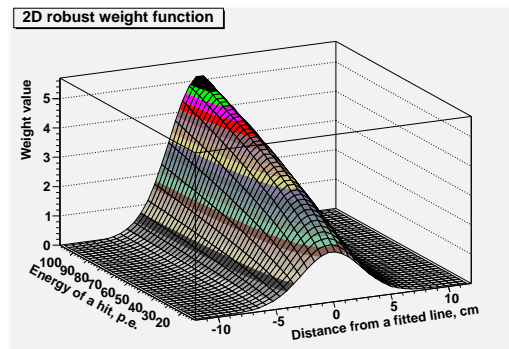


Рис. 11: Вид функции, использовавшейся в качестве весовой для сигналов ТСЦ при восстановлении оси адронного ливня.

За начальное приближение для оси ливня выбиралась прямая линия, параллельная направлению нейтринного пучка и проходившая через центр тяжести события. Начальные веса всех точек инициализировались единицами, а затем пересчитывались перед каждой последующей итерацией до тех пор, пока значения свободных параметров искомой прямой не переставали изменяться. Пример восстановления оси адронного ливня приведен на Рис. 12.

Для реконструкции оси ливня был протестирован также метод аппроксимации прямой линией по центрам тяжести выделенной энергии в каждой плоскости ТСЦ, но этот метод (так же как и метод наименьших квадратов) показал меньшую эффективность восстановления направления на вершину взаимодействия по сравнению с описанным методом устойчивой аппроксимации. Результаты сравнения трех разных методов восстановления оси ливня приведены на Рис. 13.

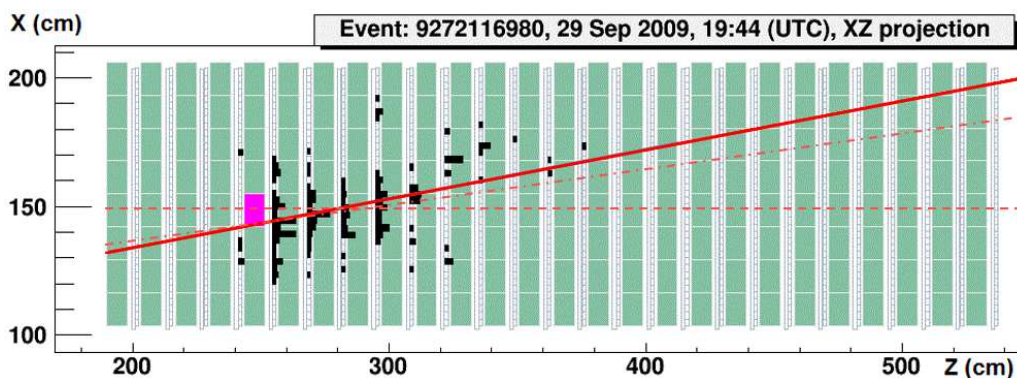


Рис. 12: Пример восстановления оси адронного ливня в одном из событий взаимодействия ν_μ по каналу нейтрального тока. Пунктирной линией изображено начальное приближение (горизонтальная прямая, проходящая через центр тяжести), штрих-пунктирной – одно из промежуточных положений, сплошной линией – конечный результат. Также отмечен блок ЕСС, содержащий вершину события.

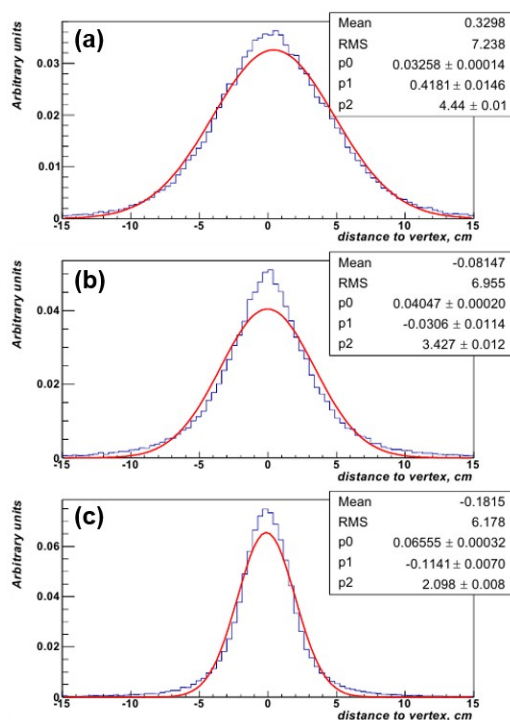


Рис. 13: Отклонение восстановленной оси адронного ливня от вершины события: для МНК (а), для аппроксимации по центрам энерговыведения в плоскостях ТСЦ (b), и для устойчивой аппроксимации (с). Все гистограммы аппроксимированы кривыми нормального распределения: $p_0 \exp\left(-\frac{(x - p_1)^2}{2p_2^2}\right)$.

Определение стенки мишени с вершиной события. Трудность в определении стенки мишени, содержавшей блок с вершиной нейтринного события, была связана, главным образом, с наличием продуктов взаимодействия, вылетающих в заднюю полусферу (против направления пучка нейтрино). Такие частицы мог-

ли оставлять сигналы в плоскостях ТСЦ, расположенных перед искомым блоком мишени, существенно размывая область поиска.

По результатам тестирования (см. Таб. 2) разных классификаторов для распознавания стенки с вершиной был выбран многослойный персептрон (МСП). Автором был определен набор характеристик начальной области события (использовавшихся в качестве входных параметров для МСП), позволивший вычислять вероятности нахождения вершины для трех первых стенок мишени, соответствовавших трем первым плоскостям ТСЦ, которые содержали сигналы данного события.

В качестве входных параметров для МСП были выбраны 19 переменных, перечисленных ниже:

- 1-3: Количество сигналов в трех первых плоскостях ТСЦ;
- 4-6: Дисперсия положений сигналов в трех первых плоскостях ТСЦ;
- 7-9: Флаг наличия мюонного трека в трех первых плоскостях ТСЦ;
- 10-12: Средняя удаленность сигналов до оси адронного ливня в трех первых плоскостях ТСЦ.
- 13-15: Суммарная энергия, выделившаяся в трех первых плоскостях ТСЦ;
- 16: Отношение энергий в первой и второй плоскостях ТСЦ;
- 17: Отношение энергий во второй и третьей плоскостях ТСЦ;
- 18: Расстояние от первой плоскости ТСЦ до плоскости с максимальным энерговыделением;
- 19: Расстояние от первой плоскости ТСЦ до плоскости с максимальным количеством сигналов.

Обучение МСП проводилось на выборке из $\sim 100\,000$ смоделированных событий СС- и НС-взаимодействия ν_μ (в отношении НС/СС $\approx 1/3$, близком к наблюдаемому). При этом минимизация энергетического функционала осуществлялась *методом сопряженных градиентов* [18]. На выходе нейронная сеть выдавала три вероятности для первых трех стенок мишени содержать вершину взаимодействия нейтрино.

Таблица 2: Результаты сравнения эффективности определения стенки с вершиной (ϵ_{WF}) для смоделированных событий у трех различных классификаторов: МСП, использовавшегося автором, МСП аналогичной структуры из *штутгартского симулятора (SNNS)* [19] и алгоритма, основанного на *дереве принятия решений (boosted decision tree, BDT)* [20].

Классификатор	ϵ_{WF} для канала СС	ϵ_{WF} для канала НС
МСП	$0,877 \pm 0,032$	$0,821 \pm 0,028$
МСП (из SNNS)	$0,876 \pm 0,025$	$0,827 \pm 0,036$
BDT	$0,825 \pm 0,033$	$0,749 \pm 0,038$

Определение блока мишени с вершиной события.

После восстановления мюонного трека или оси адронного ливня, а также вероятностей P_{wall} для соответствующих стенок мишени, полученных на выходе МСП, определялись блоки с наибольшей вероятностью содержавшие вершину

события. Формула, использовавшаяся для расчета вероятности P_{brick} нахождения вершины в объеме блока, определяемом координатами (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) , имела вид:

$$P_{brick} = P_{wall}P_xP_y, \quad \text{где } P_t = \int_{t_1}^{t_2} \int_{z_1}^{z_2} \rho_t(t, z) dt dz \quad (t = x \text{ или } y).$$

Здесь ρ_t – плотность вероятности прохождения мюонного трека (или оси адронного ливня) через точку (t, z) , определяемая погрешностью восстановления параметров трека (или оси ливня) и расстоянием от него до этой точки. Набор функций ρ_t был получен на выборке из $\sim 100\,000$ смоделированных нейтринных событий для различных интервалов значений импульса мюона (в событиях с восстановленным мюонным треком) и суммарного отклика ТСЦ (в событиях с восстановленной осью адронного ливня), указанных в Таб. 3.

Таблица 3: Стандартные отклонения функций ρ_t для различных интервалов значений импульса мюона (P_μ) и суммарного отклика ТСЦ ($A_{ТСЦ}$).

В случае мюонного трека		В случае оси адронного ливня	
P_μ (ГэВ/c)	σ_{ρ_t} (см)	$A_{ТСЦ}$ (ф. э.)	σ_{ρ_t} (см)
0 – 4	2,5	0 – 250	3,1
4 – 6	1,6	250 – 500	2,7
6 – 10	1,1	500 – 1500	2,3
> 10	0,9	> 1500	1,9

Описанная процедура идентификации блоков, содержащих вершину взаимодействия нейтрино, была разработана группой из ОИЯИ при активном участии автора диссертации на языке C++ и интегрирована в программное обеспечение OPERA в виде единого пакета с открытым исходным кодом OpBrickFinder [21]. Эта программа была применена для анализа ~ 1400 (40%) нейтринных событий OPERA 2009 г. и продемонстрировала высокую эффективность, удобство использования и скорость обработки данных по сравнению с программным обеспечением, применявшимся в эксперименте до этого. С 2010 г. по настоящее время OpBrickFinder используется для анализа всех остальных $\sim 12\,000$ событий эксперимента.

Эффективность идентификации блоков ЕСС с вершиной взаимодействия, ϵ_{BF} , в зависимости от максимального количества извлекаемых для каждого события блоков оценивалась путем моделирования. В Таб. 4 приведены результаты этой оценки для различных выборок: 5000 событий СС-взаимодействия ν_μ , 5000 событий NC-взаимодействия ν_μ , а также для смешанной выборки из $\approx 14\,000$ событий СС-, NC- и квазиупругого (QE) взаимодействия ($\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$).

Полный анализ экспериментальных данных OPERA в настоящее время еще не завершен. На момент написания диссертации на уровне предварительного анализа внешних пар эмульсионных пленок (CSd), обработано $\approx 80\%$ всех ней-

Таблица 4: Эффективность идентификации блоков с вершиной взаимодействия (ϵ_{BF}) в зависимости от количества извлекаемых блоков (для смоделированных событий). Статистическая погрешность приведенных результатов находится на уровне 1%.

Кол-во блоков	ϵ_{BF}, CC	ϵ_{BF}, NC	$\epsilon_{BF}, \text{CC/NC/QE}$
1	0,775	0,585	0,741
2	0,913	0,754	0,880
3	0,948	0,823	0,922
4	0,967	0,861	0,944

тринных событий. Для данных, набранных за период 2010–2012 гг., подтверждение предсказаний из ЭД в эмульсии CSd для блоков, имеющих наибольшую вероятность содержать вершину взаимодействия нейтрино, получено в $\approx 56\%$ случаев. С учетом доли эмульсионных пленок, непригодных для анализа из-за сильной засветки ($\approx 6\%$), доли событий, где вершина взаимодействия находится вне пределов чувствительной области эмульсии ($\approx 7\%$), а также эффективности поиска треков в CSd ($\approx 90\%$), эффективность подтверждения предсказаний из ЭД в 1-м (наиболее вероятном) блоке ЕСС составляет $(71 \pm 5)\%$ в согласии с соответствующим ожидаемым значением $(74,1 \pm 1)\%$, полученным на этапе моделирования.

Как отмечалось выше, определение блока мишени, содержащего вершину взаимодействия нейтрино, является важным этапом анализа данных при поиске ν_τ в эксперименте OPERA. Достигнутая высокая эффективность поиска блоков с вершиной позволила ограничить объем анализируемой в эмульсии информации (в среднем анализировалось < 2 блоков на событие) и добиться относительно небольшого ($\approx 9\%$) сокращения массы мишени в течение эксперимента.

Четвертая глава посвящена измерению скорости нейтрино в эксперименте OPERA. Непосредственно измеряемой величиной являлось отклонение времени пролета нейтрино TOF_ν между источником в CERN и детектором в Лаборатории LNGS от своего номинального значения TOF_c , вычисленного в предположении, что нейтрино распространяется со скоростью света:

$$\delta t \equiv TOF_c - TOF_\nu.$$

Временная структура нейтринного пучка определялась на основе измерения интенсивности пучка протонов, выведившихся из ускорителя SPS на мишень канала CNGS. Точность, необходимая для измерения TOF_ν , обеспечивалась с помощью двух идентичных GPS-систем в CERN и Лаборатории LNGS. Каждое нейтринное событие OPERA и соответствующий ему сигнал вывода протонов на мишень имели отметки Всемирного координированного времени (UTC).

Для определения момента взаимодействия нейтрино в детекторе (t_{OPERA}) группой из ОИЯИ был предложен и разработан так называемый **Метод мюонных треков (ММТ)**, использовавший временную информацию сигналов от мюонов, треки которых были восстановлены в ТСЦ.

Метод мюонных треков

Значение t_{OPERA} рассчитывалось по среднему времени сигналов от мюонов с реконструированным в ТСЦ треком:

$$t_{OPERA} = \frac{1}{N_\mu} \sum_{i=1}^{N_\mu} \left(t_\mu^i + \Delta t_{shift} - \Delta t_{TT_{fiber}}^i + \Delta t_{A1}^i + \Delta t_{TT_{delays}}^i \right) - \Delta t_\gamma. \quad (3)$$

Здесь N_μ – количество сигналов на треке, t_μ^i – время i -го сигнала, $\Delta t_{shift} = 5$ нс – смещение измеренного времени сигнала в центр 10-наносекундного интервала дискретизации системы сбора данных, $\Delta t_{TT_{fiber}}^i$ – задержка на распространение сигнала вдоль световода ТСЦ, Δt_{A1}^i – поправка на расстояние от положения сигнала до начала системы координат детектора, $\Delta t_{TT_{delays}}^i$ – набор дополнительных задержек на распространение сигнала по кабелям ТСЦ. Значение $\Delta t_\gamma = 7,6$ нс, полученное автором диссертации путем моделирования полного отклика ТСЦ, учитывало среднее время между моментом взаимодействия нейтрино и прибытием на фотокатод ФЭУ фотонов, инициировавших регистрацию сигнала от мюона.

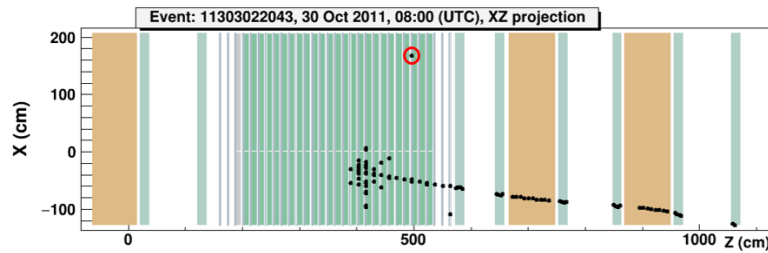


Рис. 14: Пример события, в котором наиболее ранний сигнал в ТСЦ (отмеченный кружком красного цвета) не относится к зарегистрированному взаимодействию нейтрино, произошедшему примерно на 200 нс позднее.

К преимуществам ММТ относятся:

- устранение возможного влияния срабатываний ТСЦ, непосредственно не связанных с взаимодействием нейтрино (шум электроники и т.п.), на измерение момента прихода нейтрино в детектор (см. Рис. 14 и 15);
- уменьшение неопределенности измеряемого времени, связанной с наличием 10-наносекундной дискретизации системы сбора данных OPERA, путем увеличения статистики измерений (т.е., за счет использования информации от многих сигналов одного и того же нейтринного события).

Анализ данных для специального режима пучка CNGS 2012 г.

В стандартном режиме работы пучка CNGS величина δt вычислялась статистически [22], поскольку каждое нейтрино, регистрировавшееся детектором OPERA, порождалось одним из $\sim 10^{13}$ протонов, выводившихся из ускорителя SPS на графитовую мишень CNGS в течение 10,5 мкс. Для уточнения измерений, касающихся определения скорости нейтрино, на короткое время был задействован специальный режим работы комплекса CNGS, во время которого нейтрино посылались в LNGS импульсами длительностью ~ 1 нс (см. Рис. 17). Такая временная структура позволяла производить измерение величины δt на уровне от-

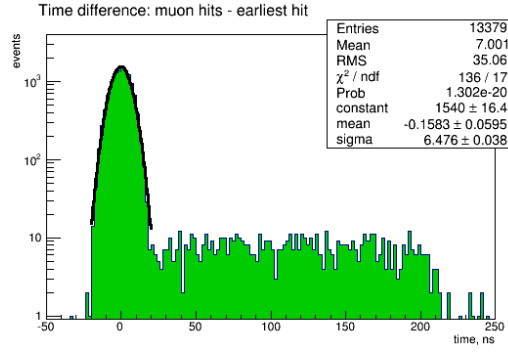


Рис. 15: Разность между средним временем сигналов от мюона и временем наиболее раннего сигнала в ТСЦ для экспериментальных данных 2009–2011 гг. Вблизи нуля распределение аппроксимировано гауссианом.

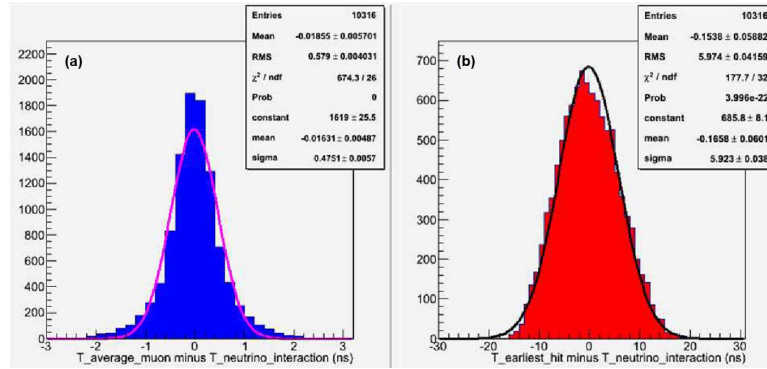


Рис. 16: Разность времени между моментом взаимодействия нейтрино и средним временем сигналов от мюонного трека (а) или временем наиболее раннего сигнала в ТСЦ (б) для смоделированных данных.

дельных наблюдаемых событий, поскольку для каждого из них можно было безошибочно определить положение импульса вывода протонов на мишень t_{CERN} , соответствующего времени регистрации нейтрино в детекторе t_{OPERA} :

$$\delta t = t_{CERN} - t_{OPERA} + \Delta t_{offset},$$

где t_{CERN} – время максимального значения интенсивности протонного импульса, соответствовавшего t_{OPERA} ; Δt_{offset} – суммарное значение всех поправок и задержек времени (с учетом знака) в системе CERN–CNGS–OPERA.

За две недели сеанса детектором OPERA было зарегистрировано 104 события, соответствующих по времени импульсам CNGS, но в сумме только около 70 из них удовлетворяли критериям отбора для дальнейшего анализа. Величина δt вычислялась несколькими методами (предложенными разными группами участников эксперимента), в которых использовалась информация с различных ЭД (ТСЦ и РПК) и по-своему определялся момент взаимодействия нейтрино в детекторе t_{OPERA} .

На Рис. 18 представлено распределение значений δt , рассчитанных для 48 событий СС-взаимодействия ν_μ , которые были использованы для анализа **Методом мюонных треков**. Полученное среднее значение распределения составило

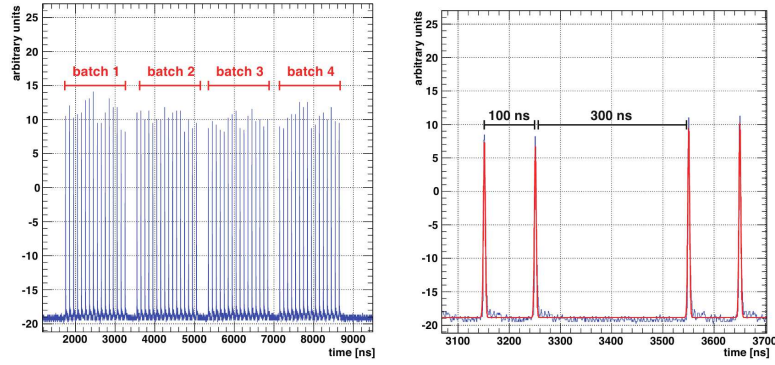


Рис. 17: Интенсивность пучка при однократном извлечении протонов на мишень в специальном режиме CNGS 2012 г. Справа показано увеличение для интервала времени между двумя сериями импульсов. Стандартное отклонение для ширины одного импульса равнялось 1,8 нс.

$$\delta t = (1,2 \pm 1,0 \text{ (стат.)} \pm 3,3 \text{ (сист.)}) \text{ нс.}$$

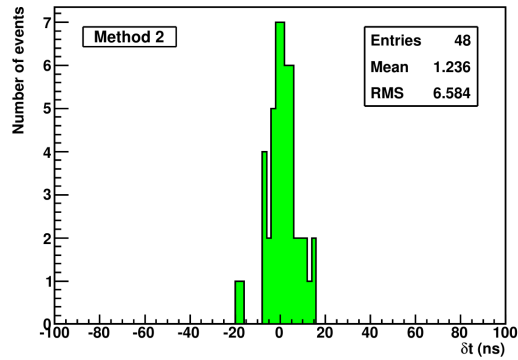


Рис. 18: Распределение значений δt для 48 нейтринных событий с реконструированным в ТСЦ мюонным треком, использовавшихся в ММТ.

Для получения объединенного результата были использованы результаты ММТ для ТСЦ и метода, измерявшего время события в РПК, поскольку их статистические и систематические ошибки были наименьшими из всех полученных, а также наименее скоррелированными друг с другом. После применения стандартной процедуры объединения результатов при наличии скоррелированных измерений [23] было получено [A5] итоговое значение:

$$\delta t = (0,7 \pm 0,4 \text{ (стат.)} \pm 1,6 \text{ (сист. — некорр.)} \pm 2,5 \text{ (сист. — корр.)}) \text{ нс.}$$

Этот результат, уточнял предыдущие измерения OPERA, а также находился в согласии с результатами других экспериментов LNGS по анализу данных в специальном режиме работы комплекса CNGS. Кроме того, поскольку заряд мюонов, сигналы от которых использовались в расчетах, мог быть определен с помощью магнитных спектрометров установки OPERA, оказалось возможным впервые измерить время пролета и получить δt отдельно для нейтрино и антинейтрино:

$$\begin{aligned}\delta t_\nu &= (0,6 \pm 0,4 \text{ (стат.)} \pm 3,0 \text{ (сист.)}) \text{ нс и} \\ \delta t_{\bar{\nu}} &= (1,7 \pm 1,4 \text{ (стат.)} \pm 3,1 \text{ (сист.)}) \text{ нс.}\end{aligned}$$

Поскольку оба эти значения сравнимы с нулем, были также получены отдельные ограничения на отличие скорости ν и $\bar{\nu}$ от скорости света (для уровня достоверности 90%):

$$-1,8 \times 10^{-6} < (\beta_\nu - 1) < 2,3 \times 10^{-6} \quad \text{и} \quad -1,6 \times 10^{-6} < (\beta_{\bar{\nu}} - 1) < 3,0 \times 10^{-6}.$$

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Определены калибровочные характеристики сцинтилляционных стрипов ТСЦ установки OPERA, которые использованы для калориметрических измерений при анализе данных эксперимента (реконструкции энергии события и, в частности, адронного ливня при взаимодействии нейтрино). Проведено мониторингирование эффективности ТСЦ и стабильности ее отклика при помощи мюонов, регистрировавшихся этой системой с 2006 по 2013 гг. Показано, что значение эффективности ТСЦ находилось на уровне 99% на протяжении всего набора данных в эксперименте OPERA. Впервые прямым методом получена оценка изменения отклика пластического сцинтиллятора серии UPS-923A со временем – $(1,7 \pm 0,2)\%/год$, подтверждающая возможность использования детектора ТСЦ в будущих экспериментах.
2. 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 объединены в едином программном пакете OpBrickFinder, который показал эффективность на уровне $(71 \pm 5)\%$ (для наиболее вероятного блока мишени) и был успешно использован для анализа всех данных, набранных в эксперименте OPERA с середины 2009 по конец 2012 гг., что позволило обнаружить несколько событий взаимодействия тау-нейтрино из пучка CNGS.
3. Разработан метод определения момента времени взаимодействия нейтрино в детекторе OPERA по сигналам от мюонов, треки которых были реконструированы в ТСЦ. Применение разработанного метода позволило обнаружить и устранить один из источников систематической ошибки при анализе экспериментальных данных OPERA 2009–2011 гг., отобранных для измерения скорости нейтрино. Этот метод был также применен для анализа экспериментальных данных OPERA 2012 г. (в специальном режиме коротких импульсов пучка CNGS) и с его помощью:
 - рассчитана величина отклонения δt времени пролета $\nu(\bar{\nu})$ между источником в CERN и детектором OPERA от своего номинального значения: $\delta t = (1,2 \pm 1,0 \text{ (стат.)} \pm 3,3 \text{ (сист.)}) \text{ нс}$;
 - при объединении с результатами измерения δt , полученными по информации с другого детектора (РПК мюонных спектрометров), рассчитана итоговая величина отклонения: $\delta t = (0,7 \pm 0,4 \text{ (стат.)} \pm 1,6 \text{ (сист. – некорр.)} \pm 2,5 \text{ (сист. – корр.)}) \text{ нс}$;

- впервые установлены отдельные ограничения на отклонение скоростей нейтрино v_ν и антинейтрино $v_{\bar{\nu}}$ от скорости света c :
 $-1,8 \times 10^{-6} < (v_\nu/c - 1) < 2,3 \times 10^{-6}$ и
 $-1,6 \times 10^{-6} < (v_{\bar{\nu}}/c - 1) < 3,0 \times 10^{-6}$
(на уровне достоверности 90%).

Список публикаций по теме диссертации

- A1. Dmitrievsky S. G. Status and updated results of the OPERA experimental search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations // World Scientific, Singapore. 2015. P. 62–66. Proceedings of the XVI Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (Moscow, Russia, 2013).
- A2. Chukanov A. V., Dmitrievsky S. G., Gornushkin Y. A. Locating the neutrino interaction vertex with the help of electronic detectors in the OPERA experiment // Phys.Part.Nucl.Lett. 2015. Vol. 12, no. 1 (189). P. 89–99.
- A3. Dmitrievsky S. G. Target Tracker detector of the OPERA experiment // PoS. 2013. Vol. Neutel2013 069. P. 356–359. Proceedings of the XV International Workshop on Neutrino Telescopes (Venezia, Italy, 2013).
- A4. Agafonova N. Y. et al. New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam // JHEP. 2013. Vol. 1311. P. 036.
- A5. Adam T. et al. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data // JHEP. 2013. Vol. 1301. P. 153.
- A6. Agafonova N. Y. et al. Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment // New J.Phys. 2011. Vol. 13. P. 053051.
- A7. Dmitrievsky S. G. Status of the OPERA neutrino oscillation experiment // Acta Phys.Polon. 2010. Vol. B41. P. 1539–1546. Proceedings of the XVI Cracow Epiphany Conference on Physics in Underground Laboratories and Its Connection with LHC (Cracow, Poland, 2010).
- A8. Dmitrievsky S. G. et al. Neural networks, cellular automata, and robust approach applications for a vertex localization in the OPERA Target Tracker // Dubna. 2007. Vol. 1. P. 112–126. Proceedings of the VIII International School-seminar on the Actual Problems of Microworld Physics (Gomel, Belarus, 2005).
- A9. Dmitrievsky S. G., Gornushkin Y. A., Ososkov G. A. Neural networks, cellular automata, and robust approach applications for vertex localization in the OPERA Target Tracker detector // Dubna. 2006. Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research E10-2005-216.
- A10. Dmitrievsky S. G., Gornushkin Y. A., Ososkov G. A. Localization of a neutrino interaction vertex in the OPERA Target Tracker detector // Dubna. 2006. P. 200–205. Proceedings of the X Conference of Young Scientists and Specialists (Dubna, Russia, 2006).

Цитированная литература

1. Olive K. A. et al. Review of Particle Physics (RPP) // Chin.Phys. 2014. Vol. C38. P. 090001. Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov/>.

2. Guler M. et al. OPERA: An appearance experiment to search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations in the CNGS beam. Experimental proposal. 2000. CERN-SPSC-2000-028, CERN-SPSC-P-318, LNGS-P25-00.
3. Bailey R. et al. The CERN neutrino beam to Gran Sasso (NGS): Tech. Rep.: CERN-SL-99-034-DI. INFN-AE-99-05. Geneva: CERN, 1999. Addendum to report CERN 98-02, INFN-AE-98-05.
4. Glashow S. L. et al. Remarks on neutrino tests of special relativity // *Phys.Rev.* 1997. Vol. D56. P. 2433–2434.
5. Kostelecky V. A., Mewes M. Lorentz and CPT violation in neutrinos // *Phys.Rev.* 2004. Vol. D69. P. 016005.
6. Ellis J. R. et al. Probes of Lorentz violation in neutrino propagation // *Phys.Rev.* 2008. Vol. D78. P. 033013.
7. Ammosov V. V., Volkov G. G. Can neutrinos probe extra dimensions? 2000. Padua preprint DFPD-00-TH-39, arXiv:hep-ph/0008032, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0008032v1>.
8. Asanov G. S. Can neutrinos and high-energy particles test Finsler metric of space-time? 2000. arXiv:hep-ph/0009305, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0009305v1>.
9. Volkov G. G. Geometry of Majorana neutrino and new symmetries // *Annales Fond.Broglie.* 2006. Vol. 31. P. 227.
10. Michael D. G. et al. Observation of muon neutrino disappearance with the MINOS detectors and the NUMI neutrino beam // *Phys.Rev.Lett.* 2006. Vol. 97. P. 191801.
11. Anderson K. et al. The NUMI facility technical design report. 1998. FERMILAB-DESIGN-1998-01.
12. Adamson P. et al. Measurement of neutrino velocity with the MINOS detectors and NUMI neutrino beam // *Phys.Rev.* 2007. Vol. D76. P. 072005.
13. Glazov A. et al. Filtering tracks in discrete detectors using a cellular automaton // *Nucl.Instrum.Meth.* 1993. Vol. A329. P. 262–268.
14. Casolino M., Picozza P. A cellular automaton to filter events in high-energy physics discrete calorimeter // *Nucl.Instrum.Meth.* 1995. Vol. A364. P. 516–523.
15. Hough P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns. 1962. US Patent 3069654.
16. Cassel D. G., Kowalski H. Pattern recognition in layered track chambers using a tree algorithm // *Nucl.Instrum.Meth.* 1981. Vol. 185. P. 235.
17. Ososkov G. A. Elastic arm methods of data analysis as a robust approach // *Tatra Mt.Math.Publ.* 2003. Vol. 26. P. 291–306.
18. Branch M. A., Coleman T. F., Li Y. A subspace, interior, and conjugate gradient method for large-scale bound-constrained minimization problems // *SIAM Journal on Scientific Computing.* 1999. Vol. 21, no. 1. P. 1–23.
19. Zell A. et al. SNNS – Stuttgart Neural Network Simulator. User manual, Version 4.2. 1998. University of Stuttgart, Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems (IPVR); University of Tübingen, Wilhelm-Schickard-Institute for Computer Science, <http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/SNNS>.
20. Quinlan J. R. Simplifying Decision Trees // *Int. J. Man-Mach. Stud.* 1987. Vol. 27, no. 3. P. 221–234.

21. Chukanov A. V., Dmitrievsky S. G., Gornushkin Y. A. Neutrino interaction vertex location with the OPERA electronic detectors. 2013. OPERA public note n.162. <http://operaweb.lngs.infn.it/Opera/publicnotes/note162.pdf>.
22. Adam T. et al. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam // JHEP. 2012. Vol. 1210. P. 093.
23. Lyons L., Gibaut D., Clifford P. How to combine correlated estimates of a single physical quantity // Nucl.Instrum.Meth. 1988. Vol. A270. P. 110.