

На правах рукописи

ИЗМАЙЛОВ Александр Олегович

**Исследование осцилляций мюонных нейтрино в
ускорительном эксперименте T2K**

Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.Г. Куденко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор А.И. Студеникин

доктор физико-математических наук Ж.М. Джилкибаев

Ведущая организация:

Институт ядерной физики им Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2012 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д.002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.002.119.01
кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

К началу 1970-х годов в результате интенсивных исследований сложилась стройная система описания элементарных частиц и соответствующих экспериментальных данных, получившая название «Стандартная модель», которая включает в себя квантовую хромодинамику для описания сильных взаимодействий и модель Глэшоу-Вайнберга-Салама для описания электро-слабых взаимодействий.

В рамках Стандартной модели нейтрино являются безмассовыми частицами, обладают полуцелым спином $1/2$, не имеют электрического заряда и взаимодействуют исключительно слабым образом. Существуют три нейтринных аромата: ν_e , ν_μ и ν_τ . Экспериментально измеренная ширина распада Z^0 бозона с большой точностью соответствует общему числу различных типов нейтрино равному трем, что подтверждает полноту описания и является одним из основополагающих положений модели. Требование нулевой массы нейтрино в Стандартной модели приводит к отсутствию переходов между различными нейтринными ароматами и сохранению собственных лептонных чисел: L_e , L_μ и L_τ . Нейтрино также полагаются Дираковскими частицами, то есть нейтрино и антинейтрино соответствующего аромата являются различными частицами. В Стандартной модели нейтрино считаются левыми частицами (значение проекции спина частицы на направление импульса отрицательно), а антинейтрино – правыми. В слабых взаимодействиях участвуют левые нейтрино и правые антинейтрино, что связано с так называемой V-A природой слабых процессов.

Поиск отклонений от Стандартной модели («новой физики») является активно развивающимся направлением физических исследований последнего времени. Открытие явления нейтринных осцилляций, переходов между нейтринными ароматами, в экспериментах с солнечными, атмосферными, реакторными нейтрино, а также в ускорительных экспериментах привело к принципиальному изменению нашего понимания физики нейтрино, так как существование этого явления требует наличия у нейтрино ненулевой массы. Как следует из осцилляций, нейтрино имеют малую, но ненулевую массу, смешиваются, что приводит к несохранению индивидуальных лептонных чисел. Указанный результат явился прямым экспериментальным доказательством существования физики вне рамок Стандартной модели и положил начало изучению этой физики.

Исследование нейтринных осцилляций и определение абсолютной величины массы нейтрино являются фундаментальными вопросами физики слабых взаимодействий. В различных экспериментах удалось измерить ряд параметров смешивания нейтрино, однако несмотря на достигнутый прогресс остается множество важнейших вопросов, ждущих своего решения. Некоторые проблемы представлены ниже.

- Каково значение величины угла смешивания между первым и третьим массовыми состояниями нейтрино θ_{13} ?
- Насколько $\sin^2 2\theta_{23}$ (определяет осцилляции атмосферных нейтрино) отличается от единицы?
- Существует ли CP–нарушение в лептонном секторе и чему равна δ_{CP} ? Ответ на этот вопрос важен для понимания механизмов лептогенезиса, а также для понимания роли нейтрино в барионной асимметрии Вселенной.
- Существуют ли переходы в другие, не взаимодействующие слабым образом, стерильные нейтрино?
- Какова иерархия нейтринных масс?

Найти ответы на некоторые из перечисленных вопросов нейтринной физики, возможно, удастся в проводимых в настоящее время экспериментах, а также в готовящихся проектах. Центральная роль в этом процессе отводится ускорительным экспериментам с длинной базой, одним из которых является эксперимент второго поколения T2K (Tokai-to-Kamioka) в Японии. Этому эксперименту посвящена настоящая работа.

Цель, научная новизна и методы исследования

Основная задача – это исследование осцилляций мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте T2K:

- Поиск осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и определение угла смешивания θ_{13} . Это последний на сегодняшний день неизмеренный угол смешивания нейтрино, для которого существует лишь верхнее ограничение, полученное в экспериментах CHOOZ и MINOS ($\sin^2 2\theta_{13} < 0.13$, 90% C.L.).
- Изучение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ и прецизионное измерение параметров смешивания θ_{23} и Δm_{23} .

Эксперимент T2K – это нейтринный ускорительный эксперимент второго поколения с длинной базой. В эксперименте используется два детектора: ближний, на расстоянии 280 м от протонной мишени (ND280), и дальний – водный черенковский детектор Супер-Камиоканде (Super-Kamiokande). Длина базы эксперимента составляет 295 км. Принципиально новым подходом является использование так называемой «вне-осевой» («off-axis») концепции нейтринного пучка. Нейтрино детектируются под небольшим углом к оси протонного пучка (2.5°), что позволяет работать с практически монохроматическим пучком нейтрино, настроить энергию пучка на осцилляционный максимум, подавить фон от примеси электронных нейтрино в первичном пучке и от взаимодействий нейтрино, идущих через нейтральные токи.

Важным вопросом для изучения нейтринных осцилляций является точное измерение сечений взаимодействия нейтрино с веществом. Ближний нейтринный детектор ND280 T2K, состоящий из нескольких детекторов, каждый из которых оптимизирован для работы с определенным типом взаимодействий, позволит не только измерить спектр нейтрино до осцилляции, но и оценить вклад от различных источников в фоновые процессы, а также улучшить известные на сегодняшний день значения сечений в различных каналах.

Практическая ценность

В эксперименте T2K получено указание на наличие ненулевого угла смешивания нейтрино θ_{13} . Этот результат имеет важное значение для разработки теоретических и феноменологических конструкций физики нейтрино, а также для дальнейшего развития экспериментального изучения осцилляций, так как открывается возможность экспериментального изучения CP-нарушения в лептонном секторе в ускорительных экспериментах. В T2K также впервые использована концепция «вне-осевого» пучка нейтрино, которая позволяет работать с практически монохроматическим пучком с энергией, настроенной на осцилляционный максимум. Так, осцилляции мюонных нейтрино в процессе $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (эксперимент «на исчезновение») были надежно подтверждены в T2K за короткое время набора данных с использованием небольшой статистики. Успешное применение методики «вне-осевого» пучка в T2K позволяет начать его широкое использование в других ускорительных нейтринных экспериментах, что даст возможность существенно улучшить точность измерений.

Практическую ценность представляет также разработанная в ИЯИ РАН экспериментальная база для создания детекторов и методика тестирования сцинтилляционных детекторов и их отдельных элементов: оптоволокон, сцинтилляционных пластин, лавинных фотодиодов. Следует отдельно отметить, что в ближнем детекторе T2K впервые в большом количестве в качестве фотодетекторов успешно используются многопиксельные лавинные фотодиоды, накоплена статистика по более чем 55000 каналам в течение 3 лет измерений. В настоящее время применение этих приборов в различных экспериментах становится все более широким.

Практической ценностью также обладают созданные алгоритмы калибровки и реконструкции событий, т.к. они имеют существенное значение для восстановления событий в ближнем детекторе ND280 T2K, а также могут использоваться при создании новых детекторов нейтрино.

Личный вклад

Автор принимал участие на всех этапах подготовки и проведения эксперимента:

- внес вклад в разработку, создание и тестирование прототипов, а также индивидуальных счетчиков детектора мюонного пробега SMRD в ИЯИ РАН и Японии,
- принимал активное участие в запуске детектора SMRD и настройке его на космических мюонах и нейтринном пучке,
- осуществлял контроль за функционированием детектора во время набора физических данных и выполнял роль эксперта по работе SMRD детектора,
- создал ряд алгоритмов, используемых для калибровки детектора SMRD, а также детектора нейтральных пионов и электромагнитного калориметра ND280, выполнил настройку моделирования «отклика» индивидуальных SMRD счетчиков,

- внес вклад в разработку алгоритмов реконструкции событий в детекторе ND280; был одним из создателей компьютерного кода для реконструкции событий в SMRD детекторе, также создал алгоритм согласования отдельных событий в SMRD с треками из внутренней части ND280,
- создал алгоритм анализа событий с использованием SMRD детектора при отсутствии информации время–проекционных камер,
- внес вклад в анализ спектра нейтрино в ближнем нейтринном детекторе ND280; результат используется для осцилляционного анализа T2K.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработка и создание детектора мюонного пробега (SMRD) для ближнего нейтринного детектора ND280 эксперимента T2K. Исследование параметров SMRD счетчиков, изготовленных на основе экструдированных пластин стинциллятора, со спектросмещающими оптоволоконными и микропиксельными лавинными фотодиодами. Запуск ближнего нейтринного детектора ND280 T2K на пучке мюонных нейтрино.
2. Измерение спектра «вне-осевого» пучка нейтрино и определение состава нейтринного пучка вблизи протонной мишени с помощью ближнего детектора ND280.
3. Разработка алгоритмов калибровки и настройка моделирования «отклика» счетчиков SMRD. Создание алгоритмов реконструкции событий в SMRD детекторе и разработка программы согласования событий в SMRD с треками из внутренней части ближнего детектора ND280.
4. Создание алгоритма анализа событий с использованием SMRD детектора при отсутствии информации время–проекционных камер.
5. Обнаружение $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций в нейтринном ускорительном эксперименте T2K и измерение угла смешивания нейтрино θ_{13} .
6. Измерение параметров нейтринных осцилляций в процессе $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (эксперимент «на исчезновение») с использованием «вне-осевого» пучка мюонных нейтрино в эксперименте T2K.

Апробация работы

Непосредственно по материалам диссертации опубликовано 12 работ (8 в реферируемых журналах). Результаты исследований были представлены автором в виде докладов на следующих конференциях:

- 1) «The 1st International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics», TIPP09, Цукуба, Япония, 12-17 марта 2009,
- 2) Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», ИТЭФ, Москва, 23-27 ноября 2009 г.,
- 3) «International Neutrino Summer School», INSS 2010, Йокогама-Токай, 23-31 августа 2010 г., Япония,
- 4) «11th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors», 11th NNN Workshop, Тояма, Япония, 13-16 декабря 2010 г.,

5) 15-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, МГУ, Москва, 18-24 августа 2011 г.,

6) 53-я научная конференция МФТИ, г.Долгопрудный, 24-29 ноября 2010 г.,

7) 7-я Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ 2006), 22 - 27 октября 2006 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем работы: 142 страницы, включая 98 рисунков, 15 таблиц и список литературы, состоящий из 157 ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** излагаются цель и методы исследования; раскрываются актуальность, научная новизна и практическая ценность диссертации; перечисляются положения, выносимые на защиту, и приводятся фактические данные о работе и ее апробации.

Глава 2 посвящена обзору физики нейтринных осцилляций и описанию современного состояния проблемы экспериментального исследования нейтринных осцилляций. Рассматривается феноменология осцилляций, приводится оценка вероятности нейтринных переходов в вакууме и веществе. Приведен обзор экспериментов по измерению различных параметров смешивания нейтрино: экспериментов с солнечными, атмосферными нейтрино, а также ускорительных и реакторных экспериментов. Представлены значения параметров осцилляций, измеренные на настоящий момент. Кратко рассмотрено будущее нейтринных экспериментов.

В **Главе 3** приведено описание эксперимента T2K, представлены основные цели и задачи эксперимента. Эксперимент T2K – это ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой, проводящийся в Японии. Международная коллаборация T2K включает в свой состав более 500 ученых из 58 национальных лабораторий 12 стран. В эксперименте используется практически чистый пучок мюонных нейтрино от 30 ГэВ-ного протонного синхротрона в J-PARC. Нейтрино рождаются в результате распадов в основном пионов и каонов, последние рождаются при взаимодействии протонов с графитовой мишенью. Дальним детектором является водный черенковский детектор Супер-Каимоканде, длина базы составляет 295 км. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Основными целями эксперимента является поиск переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и определение угла смешивания нейтрино θ_{13} , а также прецизионное измерение параметров осцилляций в процессе $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$. Ожидается, что при статистике, соответствующей 8×10^{21} протонов

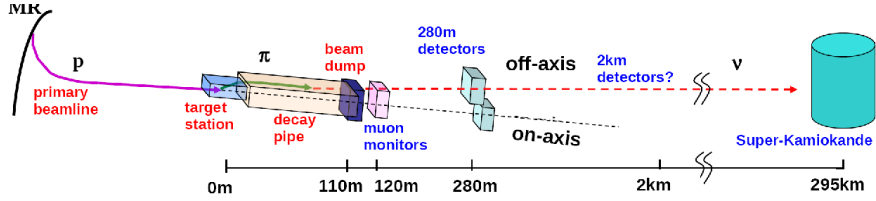


Рис. 1: Общая схема ускорительного эксперимента Т2К.

на мишени (p.o.t.), для θ_{13} удастся примерно в 20 раз превзойти ограниче- ние эксперимента CHOOZ, а для процесса $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ достигнуть точности: $\delta(\Delta m_{atm}^2) \simeq 10^{-4}$ эВ² и $\delta(\sin^2 2\theta_{atm}) \simeq 1\%$ (90% C.L.).

Ключевой особенностью эксперимента Т2К является использование так называемой «вне-осевой» концепции пучка. При нулевом угле θ относитель- но оси протонного пучка энергия нейтрино пропорциональна энергии пиона, таким образом, в этом случае получим широкий энергетический спектр ней- трино, если пучок пионов имеет широкий диапазон энергий. Можно пока- зать, что при угле $\theta \simeq \gamma^{-1} = \frac{m_\pi}{E_\pi}$ практически исчезает зависимость от энер- гии пиона и мы имеем почти монохроматический пучок мюонных нейтрино, настроенный на осцилляционный максимум. В Т2К используется «off-axis» угол 2.5° . Максимум энергетического спектра соответствует энергии пример- но в 600 МэВ, что соответствует первому максимуму осцилляций для «ат- мосферных» параметров смешивания нейтрино и длины базы Т2К. Использо- вание «вне-осевой» концепции также позволяет снизить фон для поисков осцилляций. В области энергий Т2К доминирующим процессом являются квазиупругие процессы, идущие через заряженные токи (CCQE), соответ- ствующие лептоны дают искомый сигнал в ближнем и дальнем детекторах эксперимента. С ростом энергии увеличивается доля других каналов взаи- модействия нейтрино, соответствующие процессы являются фоновыми для изучения осцилляций. Заметим также, что с ростом энергии растет доля примеси электронных нейтрино в первичном пучке (распады каонов, боль- шая энергия), эта примесь являются одним из основных источников фона для поиска $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. «Вне-осевая» концепция нейтринного пучка имеет, конечно, и обратную сторону: необходимость тщательного монитори- рования параметров пучка нейтрино во время набора статистики. Для из- мерения параметров осцилляций с заявленной точностью сдвиг положения пика энергетического спектра нейтрино должен быть менее $\frac{\sigma_E}{E} < 2\%$, что соответствует отклонению на угол около 1 мрад. Для измерения параметров нейтринного пучка до процесса осцилляции используются мюонные монито- ры, а также комплекс ближних детекторов ND280.

Для изучения осцилляций в Т2К нейтрино детектируются дважды: ком- плексом ближних детекторов, расположенном на расстоянии 280 м от протон- ной мишени, и дальним детектором Супер-Камиоканде. Комплекс ближних детекторов состоит из детектора INGRID (14 модулей, имеющих сэндвич- структуру железо-сцинтиллятор, собранных в крестообразную конструкцию,

и также два дополнительных модуля), расположенного на оси пучка, и «вне-осевого» детектора (рис. 2). Основными задачами последнего являются опре-

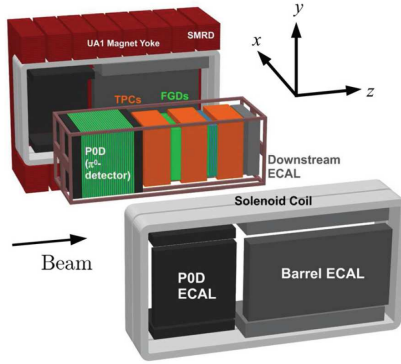


Рис. 2: Общая схема «вне-осевого» ближнего нейтринного детектора ND280 T2K.

деление спектра нейтрино, первичного состава пучка до процесса осцилляции, а также измерение сечений взаимодействия нейтрино с веществом. Детектор состоит из нескольких «внутренних» детекторов, расположенных внутри магнита UA1 (магнитное поле 0.2 Т): электромагнитный калориметр – детектор нейтральных пионов P0D, трекер: три время-проекционные камеры TPC, разделенные высоко сегментированными сцинтилляционными детекторами FGD, электромагнитный калориметр ECAL и детектор мюонного пробега SMRD. Для представляемого в работе осцилляционного анализа, использовались данные трекера FGD+TPC. Отметим, что для время-проекционных камер при измерении dE/dx разрешение достигает $<10\%$ при длине трека более 70 см, что дает возможность разделять электроны и мюоны на уровне более 5σ ; для энергий мюонов $\lesssim 1$ ГэВ импульсное разрешение $\sigma(p)/p$ составляет около $\simeq 8\%$.

Как говорилось выше, в качестве дальнего детектора используется черенковский детектор Супер-Камиоканде. Детектор расположен в шахте под горой Камиока (2400 м водного эквивалента) на западе Японии и представляет собой заполненный водой цилиндр, общая масса – 50 кт. Детектор хорошо работает в области энергий T2K, позволяя с большой эффективностью идентифицировать однокольцевые электронные и мюонные события (вероятность неправильной идентификации частицы составляет около 1%) .

Первый успешный запуск нейтринного пучка T2K был осуществлен в начале апреля 2009 года. В январе 2010 года T2K начал набор статистики, на которой основывается представляемый в работе результат исследования нейтринных осцилляций.

Глава 4 посвящена разработке и созданию детектора мюонного пробега SMRD, входящего в состав «вне-осевого» ближнего детектора ND280. Детектор мюонного пробега SMRD был разработан и создан в России, в ИЯИ РАН. Этот детектор является основным вкладом института в эксперимент T2K. Детектор представляет собой сцинтилляционные счетчики, помещенные в

воздушные прослойки магнита, окружающего детектор ND280. В детекторе используется 2008 индивидуальных счетчиков (4016 каналов), собранных в специальные модули по пять («вертикальные» воздушные прослойки) и по четыре («горизонтальные») штуки.

Основными задачами детектора являются: регистрация мюонов, вылетающих под большими углами к оси нейтринного пучка (эффективность регистрации таких частиц трекером ND280 низка), создание триггера для калибровки внутренних детекторов ND280 с помощью космических мюонов, выполнение функций вето-детектора для учета взаимодействий в стенах детекторной шахты и ярме магнита. SMRD детектор также может использоваться для измерения и мониторинга профиля нейтринного пучка.

В качестве активных элементов SMRD используются экструдированные пластины сцинтиллятора на основе полистирола (рис. 3). Светосбор осу-

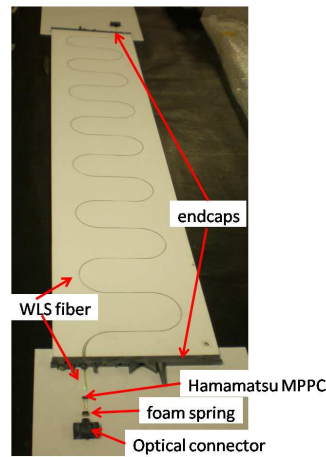


Рис. 3: Индивидуальный SMRD счетчик (без светозащитной оболочки). Показаны также основные элементы счетчика.

ществляется с помощью одного спектросмещающего (WLS) оптоволокна, вклеенного в канавки S-формы. Такая структура позволяет эффективно собирать свет со всей поверхности сцинтиллятора, при этом сводя к минимуму число используемых каналов. В SMRD счетчиках светосбор осуществляется с двух сторон волокна. В SMRD используются сцинтилляционные пластины двух размеров: $875 \times 175 \times 7 \text{ мм}^3$ («вертикальные») и $875 \times 167 \times 7 \text{ мм}^3$ («горизонтальные»).

Вследствие наличия магнитного поля и ограниченного пространства внутри магнита в качестве фотодетекторов используются многопиксельные лавинные фотодиоды, работающие в ограниченной Гейгеровской моде. Применяются приборы, изготовленные компанией Hamamatsu, Япония. В эксперименте используется около 55000 лавинных фотодиодов (детекторы P0D, ECal, FGD, INGRID, SMRD). Применяются 667-пиксельные лавинные фотодиоды с активной областью $1.3 \times 1.3 \text{ мм}^2$. Приборы показывают хорошие характеристики при комнатной температуре: эффективность регистрации фо-

тонов зеленого света $>25\%$, низкий уровень шума 0.3-1 МГц, соответствующий рабочему напряжению, усиление $\sim 7 \times 10^5$. Из недостатков стоит назвать достаточно сильную температурную зависимость ($\simeq 2\%/^{\circ}\text{C}$ для коэффициента усиления), а также наличие так называемых cross-talk'a и послеимпульсов (суммарно 10-20%). Для исследования лавинных фотодиодов в большом количестве в ИЯИ РАН была создана экспериментальная база и протестировано около 1600 приборов.

Экструдированные пластины сцинтиллятора изготавливались на предприятии Унипласт в г. Владимир. Поверхность сцинтиллятора вытравливалась в растворе полистирола для создания тонкого слоя (30–100 мкм) диффузного отражателя (очень хороший контакт между отражателем и сцинтиллятором). Стоит отметить хорошую временную стабильность сцинтилляционных пластин.

Приведено описание WLS-метода светосбора. В SMRD счетчиках используются двухслойные оптические волокна Y11(200) компании Kuraray. Диаметр волокна – 1 мм. Процесс изгибания волокна может привести к проблемам в долгосрочной перспективе, были проведены соответствующие исследования. Измерения показали, что используемая конфигурация волокна приводит к незначительному падению сигнала, в среднем на 5% (после прохождения света по волокну), по сравнению с прямым волокном. Дальнейшего уменьшения сигнала не было обнаружено в течение более года непрерывных измерений.

Далее приводится описание сборки индивидуальных SMRD счетчиков. Для дополнительного увеличения световыхода пластины сцинтиллятора с вклеенными оптоволоконными панелями обернуты слоем Tyvek. Для защиты от света, влаги и механических повреждений при установке счетчики помещены в контейнеры из нержавеющей стали.

Приводится описание тестирования прототипов SMRD-счетчиков и готовых детекторов. Первые прототипы детекторных счетчиков SMRD тестировались на пучке протонов и пионов (1.4 ГэВ/с) в КЕК, Япония. Для тестов использовались фотосенсоры MRS APD. С помощью узкого пучка было проведено сканирование всей поверхности сцинтиллятора. Последующий анализ показал, что наличие световыхода более 12 фотоэлектронов (сумма с двух концов) позволяет достичь эффективности регистрации минимально ионизирующих частиц (MIP) более 99%.

На этапах массового производства и установки SMRD счетчиков в магнитные детекторы тестировались с помощью космических мюонов. В эксперименте T2K планируется набирать статистику в течение около десяти лет, что предъявляет высокие требования к параметрам детекторов. Поэтому во время тестов использовались строгие критерии отбора: суммарный световой выход более 25 ф.э./MIP (20°C), асимметрия сигналов с двух концов счетчика менее 10% (для отбраковки счетчиков с дефектами оптоволоконки). Для центра пластины суммарный световой выход с двух концов составил 25-50 ф.э./MIP (без коррекции на cross-talk и послеимпульсы, $T=20-22^{\circ}\text{C}$), наличие такого световыхода позволяет достичь эффективности регистрации MIP более 99%, пространственного разрешения $\sigma_x < 10$ см и временного $\sigma_t < 1$ нс. Разре-

шение главным образом определяется временем высвечивания оптоволоконна. Для последнего измеренная величина составила около 12 нс.

Массовое производство детекторов началось в декабре 2007 года, а в феврале 2009 все счетчики были доставлены в J-PARC. Установка модулей в магнит была завершена в конце июля 2009 года и в августе детектор был успешно запущен.

В **Главе 5** описывается запуск детектора SMRD для набора физических данных, изложен процесс калибровки детектора и представлены его (детектора) параметры. Приведено описание системы сбора данных SMRD и принципа организации космического триггера. В SMRD детекторе для считывания сигнала используется такая же электроника, как и в ряде других детекторов комплекса ND280 T2K, использующих фотосенсоры MPPC (P0D, ECal, INGRID): сигнал с MPPC интегрируется и оцифровывается с помощью так называемых TFB («TRIP-t front-end board») модулей. TFB модуль использует стандарт Trip-t Asic («Application Specific Integrated Circuit», каждая TFB имеет четыре независимых ASIC чипа), разработанный в Fermilab. На каждое срабатывание триггера Trip-t интегрируют сигнал в течении 23 циклов (23 емкости), внутри каждого цикла время интегрирования составляет 480 нс, расстояние между циклами интегрирования – 100 нс. Время сигнала оцифровывается с размером бина 2.5 нс. Непосредственно система сбора данных использует «фрэймворк» MIDAS («Maximum Integration Data Acquisition System»), который работает под операционной системой Linux и предоставляет ряд стандартных C++/C процедур для «общения» с электроникой.

Для определения световыхода счетчика является необходимым определение коэффициента усиления в каналах ADC («gain») и соответствующего пьедестала. Набор «темновой» статистики осуществляется постоянно вместе с набором физических данных (для данных нейтринного пучка генерация констант калибровки осуществляется каждые три часа). Зная собранный заряд в каналах ADC и величину коэффициента усиления, можно определить число сработавших пикселей MPPC. В идеальном случае число сработавших пикселей N_{peu} в зависимости от числа фотонов определяется двумя параметрами: квантовой эффективностью – PDE и эффективным числом пикселей N_{pix} , и может быть представлено как:

$$\langle N_{peu} \rangle = N_{pix} \left(1 - \exp\left(-\frac{N_{\gamma} \times PDE}{N_{pix}}\right) \right). \quad (1)$$

В действительности для учета дополнительных эффектов, таких как «cross-talk» и послеимпульсы, зависимость можно представить в следующем виде:

$$\langle N_{peu} \rangle = f_1(dV) \left(1 - \exp\left(-\frac{N_{\gamma} \times f_0(dV)}{f_1(dV)}\right) \right), \quad (2)$$

где dV –величина напряжения смещения. Отметим, что так как емкости индивидуальных MPPC весьма схожи между собой, то значение коэффициента усиления может быть использовано для определения напряжения смещения,

то есть фактически можно выполнить температурную коррекцию. Показано, что световойход SMRD счетчиков, остается стабильно высоким в течение времени эксплуатации, измеренный световойход (на MIP) находится в хорошем согласии с данными, полученными при тестовых измерениях.

Процесс моделирования детектора ND280 включает в себя симуляцию «отклика» детекторов и электроники, то есть в итоге как для данных, так и для Монте-Карло результатом является ADC и TDC информация отдельных каналов. Настройка электронной симуляции для SMRD осуществлялась при помощи космических мюонов (нас интересует световойход на MIP). Моделирование также включает в себя учет «темновых» сигналов.

Для временной калибровки детекторов выполняется время-амплитудная коррекция. Для этих целей применялись специальные калибровочные сеансы (коррекция сделана для P0D, ECal и SMRD), во время которых на дискриминатор подавался калибровочный заряд переменной величины. Для учета зависимости временной отметки от амплитуды сигнала использовалась модель зарядки конденсатора. Дополнительные задержки связаны с механизмом высвечивания света волокном. Принимая во внимание экспоненциальную зависимость интенсивности света, можно оценить вероятность того, что n -ый фотон из N будет испущен в момент времени t :

$$P \sim \exp\left(\frac{-t(N-n+1)}{\tau}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\right)^{(n-1)}, \quad (3)$$

где $\tau \simeq 12$ нс – время высвечивания волокна. Зная величину вероятности можно оценить среднее значение времени прихода в зависимости от величины сигнала (в фотоэлектронах), в также оценить соответствующую неоднозначность.

Представлены результаты контроля работы детектора на нейтринном пучке T2K: изменение усиления (в каналах ADC), а также положение пиков временных отметок нейтринного пучка в окнах интегрирования электроники во время набора данных. Из представленной информации можно сделать вывод о том, что детектор стабильно работал во время набора статистики, эффективно регистрируя события от нейтринных взаимодействий. Из 4016 каналов SMRD какие-либо проблемы были обнаружены для $\simeq 10$ каналов (<0.3% !, причины могут быть как в электронике, так и в фотосенсорах; всего один канал полностью не работает). Следует также подчеркнуть, что для примерно 55000 каналов ND280, где используются Hamamatsu MPPC, число отказов за примерно три года работы составило 0.17%, что безусловно является хорошим показателем стабильности работы приборов.

Также показано распределение числа событий в детекторе (под событием понимается совпадение сигналов с двух концов счетчика) во время набора статистики. Для первого сеанса набора статистики было получено среднее значение: $N_{hit}/10^{14} p.o.t. = 5.93 \pm 0.11$, для второго $N_{hit}/10^{14} p.o.t. = 6.12 \pm 0.07$. Приведены результаты измерения профиля пучка (число сработавших счетчиков в зависимости от расстояния от оси пучка нейтрино).

В **Главе 6** дано описание алгоритмов реконструкции событий в детекторе

SMRD. Так как в индивидуальных SMRD детекторах съём сигнала осуществляется с двух сторон пластины, то используя разницу по времени двух сигналов и эффективную скорость распространения света, можно определить координату события вдоль счетчика. Используемый алгоритм основан на Байесовском методе с использованием разности временных отметок сигналов с двух сторон SMRD счетчика и асимметрии сигналов $a(q_1, q_2) = \frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2}$. Здесь используется двухступенчатый метод: начинаем с равномерной вероятности распределения событий вдоль счетчика, далее последовательно включаем в рассмотрение асимметрию сигналов и после разность времен прихода. Объединяя указанным выше образом сигналы с двух концов счетчика, получаем «восстановленный» сигнал («хит»), эти хиты используются в дальнейшей реконструкции треков.

Далее рассмотрен алгоритм согласования событий в SMRD детекторе с треками из внутренней части ND280. ND280 для «сшивки» треков используется итерационный алгоритм фильтров Калмана (для реконструкции событий в ND280 применяется набор «инструментов» RECPACK). Для согласования SMRD событий с треками из внутренней части ND280 используется два метода: основным является последовательная фильтрация отдельных индивидуальных хитов в SMRD, в дополнение к этому используется также «сшивки» восстановленных индивидуальных SMRD треков с «внутренними». Отметим, что наряду с геометрической используется также и временная информация – $\Delta t(track - hit) < 200$ нс (большой интервал взят для учета возможных проблем синхронизации между детекторами). Подчеркнем, что в первом методе мы имеем возможность работать даже с одиночными хитами в SMRD, в случае же использования индивидуальных SMRD треков требуется как минимум два хита. В дальнейшем полученный «суммарный» трек фитируется с помощью фильтров Калмана. Представлены результаты изучения эффективности «сшивки» с использованием Монте-Карло моделирования (мюоны). Показано, что даже одиночные хиты «сшиваются» с хорошей эффективностью (90%), в других случаях эффективность близка к 99%. Полнота включения хитов (отношение числа SMRD хитов, включенных в трек к общему числу мюонных хитов в SMRD) составляет более 98%.

Хиты в SMRD, которые остаются после процесса «сшивки» с треками из внутренней части ND280, описанного выше, используются для восстановления индивидуальных SMRD треков. Процесс реконструкции начинается с группировки хитов на основе геометрической и временной информации (распознавание образа). Используя сгруппированные хиты, индивидуальные треки восстанавливаются с помощью метода главных компонент (ROOT PCA fit), главная компонента выбирается в качестве искомого трека. Далее трек фитируется с помощью алгоритма Калмана для получения соответствующих параметров ковариационной матрицы, которые используются при «сшивке» с другими детекторами ND280. Эффективность восстановления мюонных треков с помощью алгоритма индивидуальной реконструкции в среднем составляет около 95%.

Далее в приводится описание алгоритма анализа событий из трековой ча-

сти ND280 в случае отсутствия или низкого качества информации время-проекционных камер, наличие SMRD компоненты в треке дает указание на его соответствие мюону. Анализ таких событий может быть использован для кросс-проверки результатов измерения спектра нейтрино трековой частью ND280. Для исследования указанных событий использовались данные первого этапа набора статистики (2.93×10^{19} p.o.t.). Изучалось два класса событий: FGD-SMRD и FGD-TPC-SMRD в случае «низкого качества» TPC трека (небольшое число хитов). Интерес для анализа представляли CCQE взаимодействия. Для изучения критериев отбора и сравнения результатов использовались данные нейтринного генератора NEUT. Для событий первого класса (FGD-SMRD) чистота отбора мюонов составила примерно 70%, чистота отбора CCQE событий из эффективного объема FGD (используется для подавления фона от событий снаружи детектора) – 52%. Во втором случае чистота отбора мюонов – 68% и CCQE событий – 48%.

Для восстановления импульса мюонов учитывались потери энергии в детекторах и окружающем веществе. Для обоих классов событий была получена точность восстановления импульса мюона около 20%. Дополнительно для калибровки метода изучались FGD-TPC-SMRD треки в случае «качественной» информации время-проекционных камер, мюоны отбирались на основе данных TPC, сравнивались импульсы мюонов, восстановленные двумя способами. Как для данных, так и для моделирования было получено хорошее совпадение величин, а также приемлемое значение σ в обоих случаях: $\sigma \simeq 30\%$.

Для FGD-SMRD класса при анализе экспериментальных данных было отобрано 107 событий. Для отношения $\frac{N_{data}}{N_{MC}}$ в результате была получена величина $\frac{N_{data}}{N_{MC}} = 0.92 \pm 0.09$ (стат.). Для FGD-TPC-SMRD треков с «неприемлемой» для анализа информацией время-проекционных камер было отобрано 41 событие. Для отношения $\frac{N_{data}}{N_{MC}}$ имеем в этом случае $\frac{N_{data}}{N_{MC}} = 1.12 \pm 0.19$ (стат.).

Для FGD-SMRD событий результаты сравнения кинематических параметров (данные–моделирование) представлены на рис 4.

В заключение сделан вывод, что созданные алгоритмы реконструкции позволяют использовать SMRD для анализа событий из внутренней части ND280. Используя информацию детектора мюонного пробега, можно работать с мюонными треками в отсутствие данных время-проекционных камер.

Глава 7 посвящена осцилляционному анализу. Эксперимент T2K начал набирать статистику в январе 2010 года. Данные набирались в течении двух сеансов. Первый продолжался с января по июнь 2010 года, второй – с ноября 2010 по март 2011 года. Набор статистики был остановлен в связи со случившимся в Японии сильным землетрясением. Осцилляционный анализ, представляемый в работе, основывается на интегральном потоке 1.43×10^{20} p.o.t. ($\simeq 2\%$ от общего числа событий, которое планируется набрать в эксперименте). Показана стабильность нейтринного пучка T2K в соответствии с данными мюонных мониторов и детектора INGRID. Дано описание метода изучения нейтринных осцилляций в T2K с использованием *Far/Near* отношения. Осцилляционный анализ нейтринного эксперимента T2K состоит из

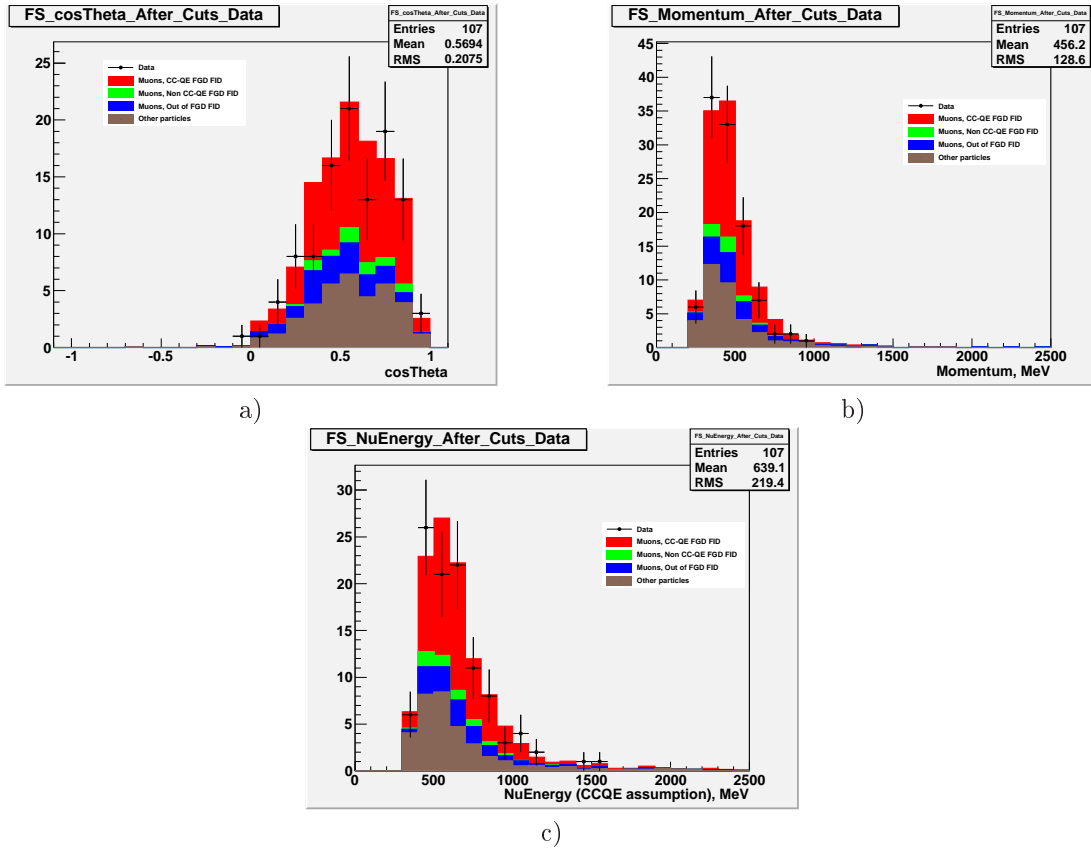


Рис. 4: Кинематические распределения для FGD-SMRD треков, восстановление импульса с помощью потерь энергии. Точки – данные нейтринного пучка (показаны статистические ошибки), гистограммы показывают результаты Монте-Карло моделирования пучка: а) – угол относительно оси нейтринного пучка; б) – импульс мюона; в) – энергия нейтрино, восстановленная в предположении CCQE взаимодействия.

нескольких частей, в конечный результат вносят вклад следующие компоненты, перечисленные ниже.

Предсказание потока нейтрино. Для изучения нейтринных осцилляций важно знать потоки нейтрино в ближнем и дальнем детекторах Т2К. Предсказание потока нейтрино в представляемом анализе основывалось на данных измерений мониторов протонного пучка, которые служат основой для моделирования с помощью FLUKA, результаты последнего корректируются с учетом данных эксперимента NA61 в ЦЕРНе (p+C рассеяние), дополнительно (фокусировка горнов, взаимодействия вне мишени) используется моделирование с помощью GEANT3 (GALOR). Отметим, что в соответствии с результатами моделирования примесь компоненты ν_e в первичном пучке составляет $\sim 1\%$.

Учет нейтринных взаимодействий. Эта часть анализа основывается на различных моделях нейтринных взаимодействий, а также на имеющихся экспериментальных данных по измерению сечений взаимодействия нейтрино с веществом. В представленном осцилляционном анализе для моделирования нейтринных взаимодействий использовался пакет NEUT. Стоит отметить, что наряду с NEUT в некоторых случаях использовался генератор GENIE, но конечный представляемый результат основан именно на использовании NEUT.

Измерения в ближнем детекторе. Анализ данных ближнего нейтринного детектора ND280 Т2К использует предсказания данных нейтринного пучка и данные по взаимодействиям нейтрино. В настоящем осцилляционном анализе использовались следующие результаты ближнего детектора: измерение отношения числа (нормировка на число протонов на мишени) нейтринных CC взаимодействий (инклюзивный анализ) для мюонных нейтрино к предсказаниям Монте-Карло моделирования $\frac{R_{\mu}^{ND,Data}}{R_{\mu}^{ND,MC}}$, а также измерение первичной примеси электронных нейтрино в пучке Т2К. Последнее явилось дополнительной проверкой правильности предсказаний потока нейтрино. Анализ данных ближнего детектора основывался на информации трекера FGD-TPC, критерии отбора были оптимизированы для отбора мюонных (электронных) событий из эффективного объема FGD. Некоторые результаты представлены на рис. 5. Для $\frac{R_{\mu}^{ND,Data}}{R_{\mu}^{ND,MC}}$ было получено значение:

$$\frac{N_{ND}^{CC,obs}}{N_{ND}^{CC,mc}} = 1.036 \pm 0.028(\text{стат.})_{-0.037}^{+0.044}(\text{дет. сист.}) \pm 0.038(\text{физ. модель}). \quad (4)$$

Для примеси электронных нейтрино оценка составила $\frac{N_{\nu_e}}{N_{\nu_{\mu}}} < 2\%$ (90% C.L.).

Измерения в дальнем детекторе Т2К Супер-Камиоканде. В дальнем детекторе идентифицируются события от мюонных (электронных) нейтрино путем регистрации мюонов (электронов) от CCQE взаимодействий. Основными источниками фона для поиска $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ осцилляций является примесь ν_e в первичном пучке, а также взаимодействия, идущие через нейтральные токи (NC) с рождением π^0 (в случае неидентификации одного

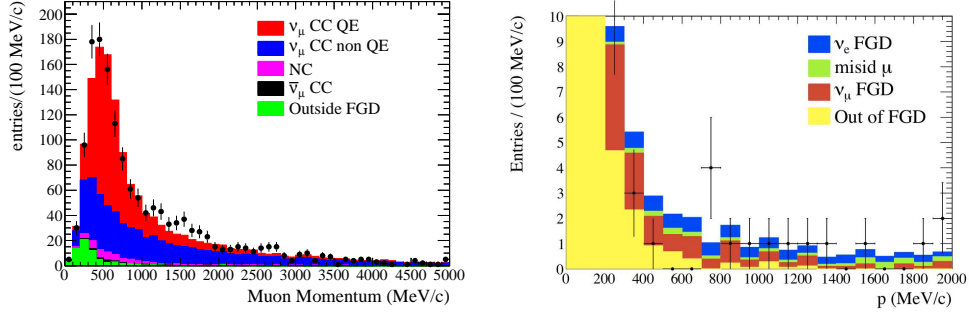


Рис. 5: Результаты анализа в ближнем детекторе ND280. Слева: распределение по восстановленному импульсу для событий, прошедших критерии отбора СС ν_μ событий в ближнем детекторе. Справа: распределение событий по восстановленному импульсу для СС ν_e анализа; показана уменьшенная шкала (события в интересующей нас области).

из гамма-квантов). Установленные критерии отбора ν_e событий позволяют достичь подавления фона от первичной примеси электронных нейтрино на уровне 77% и фона от NC взаимодействий на уровне 99%. Эффективность отбора сигнальных событий составляет 66%. Для $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ канала основным источником фона являются СС1 π взаимодействия.

Сравнение экспериментальных данных с предсказаниями моделирования. На основе предсказанного потока нейтрино и с учетом сечений нейтринных взаимодействий вычисляется ожидаемое число событий в детекторе Супер-Камиоканде. Это число нормируется с учетом $Data/MC$ отношения, измеренного в ближнем детекторе. В итоге предсказанное число событий в Супер-Камиоканде представляется следующим образом:

$$N_{SK}^{exp}(\vec{f}) = f_{ND}^{norm} N_{ND}^{obs} f_{SK/ND}^\phi \frac{N_{SK}^{mc}(\sin^2 \theta, \Delta m^2, \vec{f}^\sigma, f^{\vec{SK}})}{N_{ND}^{mc}(\vec{f}^\sigma, f^{\vec{ND}})}, \quad (5)$$

где $\vec{f}^\sigma, f^{\vec{ND}}, f^{\vec{SK}}$ – параметры, связанные с систематическими ошибками в определении сечений взаимодействия нейтрино, эффективности ближнего и дальнего детектора соответственно. Член $f_{SK/ND}^\phi$ определяется ошибкой, связанной с оценкой $Far/Near$ отношения. Член f_{ND}^{norm} – ошибка нормировки для ближнего детектора. Параметры нейтринных осцилляций извлекаются из сравнения ожидаемого числа событий (здесь варьируются изучаемые осцилляционные параметры) с фактически наблюдаемым. Для поиска $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ переходов ввиду малости набранной статистики используется только число зарегистрированных событий, что касается изучения $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ осцилляций, то здесь используется как измерение числа событий, так и анализ формы энергетического спектра нейтрино. Следует особо подчеркнуть, что использование $Far/Near$ отношения помогает существенно снизить систематику, так, ошибка отношения, связанная с оценкой потока нейтрино, для ν_e в отсутствие осцилляций составляет 8.5%, тогда как отдельно для числа событий

в ND280 и SK – около 15%.

Рассмотрены критерии отбора нейтринных событий T2K в дальнем детекторе Супер-Камиоканде. Показано влияние различных критериев отбора на число событий, приведены источники систематических ошибок и соответствующие величины для оценки числа событий в дальнем детекторе. Дано описание методики оценки осцилляционных параметров, основанной на применении алгоритма Фельдмана-Казинса.

Общие критерии отбора ν_e и ν_μ событий в дальнем детекторе: событие отбирается если его временная отметка находится во временном интервале окна нейтринного пучка ($-2 - +10$ мкс), событие полностью содержится (FC) в объеме Супер-Камиоканде (детектор разделен на две части: внешний (OD) и внутренний (ID) детекторы, требуется, чтобы восстановленная вершина находилась в ID, и отсутствовала активность в OD), далее используются FCFV события, для которых вершина находится в эффективном объеме (22.5 кт FV, вершина должна быть на расстоянии > 200 см от ближайшей стены ID), среди отобранных выделяются события, имеющие строго одно черенковское кольцо, к последним применяются критерии отбора по типу частицы (кольца), в итоге отобрано 41 событие: 33 мюонного и 8 электронного типа.

Для $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ переходов анализ начинается с 8 событий, оставшихся после применения базовых «катов». Дополнительные критерии отбора следующие: выделившаяся энергия $E_{vis} > 100$ МэВ (остается 7 событий), отсутствие электронов распада (6 событий), инвариантная масса $M_{inv} < 105$ МэВ (вычисляется в предположении наличия двух колец электронного типа), восстановленная энергия нейтрино $E_\nu < 1250$ МэВ (все 6 событий удовлетворили двум последним требованиям). Таким образом, число отобранных ν_e событий в дальнем детекторе – $N_{SK}^{obs} = 6$. Для $\theta_{13} = 0$ ожидаемое число событий (фон + $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ переходы, связанные с солнечными параметрами) составило $N_{SK}^{exp} = 1.5 \pm 0.3$ (принимая во внимания систематику – $+22.8\%$ / -22.7%). Вероятность зарегистрировать 6 и более событий составляет 0.7%, что дает результату статистическую значимость на уровне 2.5σ . Для параметра смешивания нейтрино θ_{13} были получены следующие значения (уровень достоверности – 90%): $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ для нормальной и $0.04 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.34$ для обратной иерархии нейтринных масс (при $\sin^2 2\theta_{23} = 1$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3}$ эВ² и $\delta_{CP} = 0$). Центральная величина – $\sin^2 2\theta_{13} = 0.11(0.14)$ (рис. 6).

Для анализа $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ переходов (эксперимент «на исчезновение») после «базовых» критериев отбора следуют два дополнительных требования: наличие менее двух электронов распада, а также, чтобы восстановленный импульс мюона $P_{rec}^\mu > 200$ МэВ. После применения всех критериев отбора осталось 31 событие. В соответствии с гипотезой отсутствия осцилляций получаем 104 события (систематика – $+13.2\%$ / -12.7%), таким образом, указанная гипотеза исключается на уровне 4.5σ . Также наблюдается искажение энергетического спектра нейтрино, связанное с осцилляциями (рис. 7). Комбинированный анализ, основанный на использовании как числа событий, так и формы энергетического спектра в дальнем детекторе, позволяет установить более строгое ограничение на вероятность отсутствия осцилляций – $\sim 10^{-10}$. Для уровня

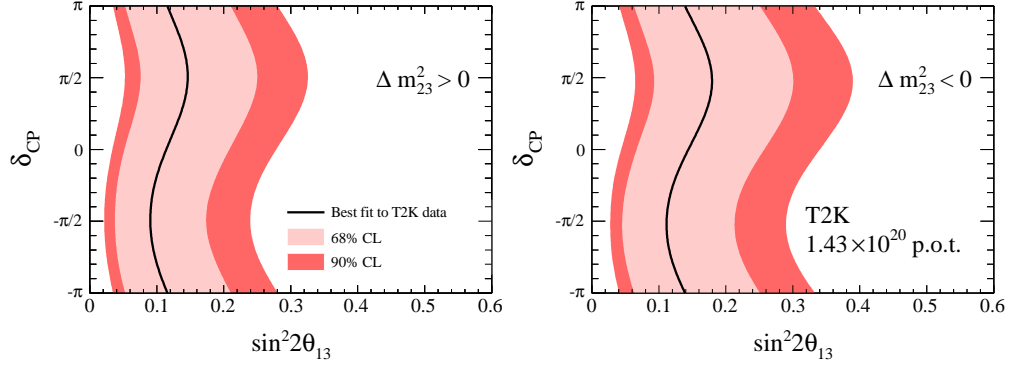


Рис. 6: Оценка параметров смешивания нейтрино из анализа вероятности $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций в T2K. Область параметров $\delta_{CP}-\sin^2 2\theta_{13}$. Показаны значения, лучшим образом описывающие экспериментальные данные (сплошная линия), а также интервалы, соответствующие 68% и 90% уровням достоверности для нормальной (слева) и обратной (справа) иерархий нейтринных масс. $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$.

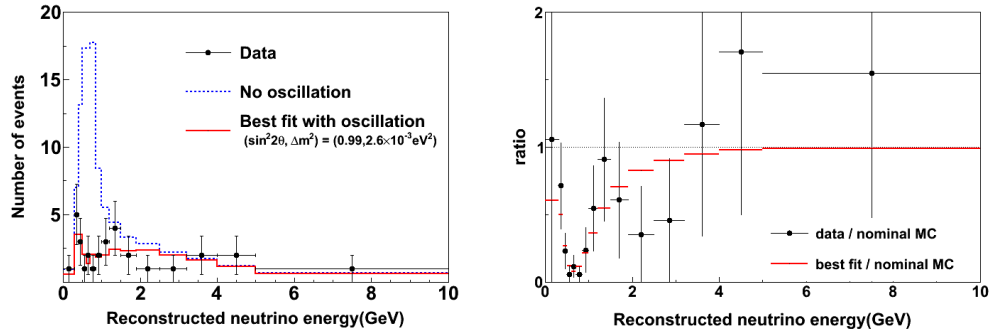


Рис. 7: Слева – энергетический спектр нейтрино в дальнем детекторе; пунктирной линией показан спектр в предположении отсутствия осцилляций; точками показаны экспериментальные данные; также показан результат фитирования экспериментальных данных. Справа – отношение реконструированной энергии нейтрино к предсказаниям Монте-Карло в отсутствие осцилляций.

достоверности 90% С.Л. получены следующие значения осцилляционных параметров (в предположении двух нейтринных ароматов): $\sin^2 2\theta_{23} > 0.85$ и $2.1 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3.1 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$.

В **Заключении** (Глава 8) приводятся основные результаты работы и выводы, а также выражается благодарность тем, кто оказывал помощь и содействие при проведении работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Ниже представлены основные результаты настоящей работы и соответствующие выводы:

1. Разработан и создан детектор мюонного пробега SMRD, входящий в состав ближнего нейтринного детектора ND280 эксперимента T2K. Основными задачами детектора является регистрация мюонов, рожденных при взаимодействиях нейтрино во внутренних детекторах ND280 и вылетающих под большими углами к оси нейтринного пучка, организация космического триггера для калибровки внутренних детекторов ND280, а также подавление фона от взаимодействий нейтрино в стенах детекторной шахты и ядре магнита. Активными элементами детектора являются сцинтилляционные счетчики, помещенные в воздушные прослойки магнита UA1, окружающего детекторы ND280. В индивидуальных SMRD счетчиках, изготовленных на основе экструдированных пластин полистирола, использована оригинальная синусоидальная форма спектро-сдвигающего оптоволоконна, которая позволяет эффективно собирать свет со всей поверхности пластины, сводя при этом число каналов светосбора к минимуму. В SMRD модулях в качестве фотодетекторов используются лавинные фотодиоды Hamamatsu MPPC. Для сцинтилляционных счетчиков был получен световыход 25-50 фотоэлектронов ($T=20-25 \text{ }^\circ\text{C}$) на минимально ионизирующую частицу, что позволило достичь эффективности регистрации заряженных частиц более 99%. Также получено хорошее пространственное и временное разрешение: $\sigma_x < 10 \text{ см}$ и $\sigma_t \simeq 1 \text{ нс}$.
2. Проведена настройка и успешный запуск ближнего нейтринного детектора ND280 на вне-осевом пучке мюонных нейтрино T2K. Детектор позволяет регистрировать реакции с участием мюонных и электронных нейтрино, измерять спектр нейтрино пучка до процесса осцилляции. SMRD детектор, как часть ND280, стабильно работал в течение всего периода набора статистики, эффективно регистрируя нейтринные события. Среднее число событий в детекторе составило шесть на 10^{14} протонов на мишени. Временное распределение событий находится в соответствии с временной структурой пучка T2K.

3. Разработан алгоритм калибровки и выполнена калибровка SMRD детектора с учетом коррекции на изменение световыхода в зависимости от окружающей температуры. Световыход SMRD счетчиков остается стабильно высоким в течение более трех лет работы детектора в составе комплекса ND280. Выполнена время-амплитудная коррекция временных сигналов (для SMRD детектора, детектора нейтральных пионов и электромагнитного калориметра), а также введена поправка на эффекты, связанные со временем высвечивания оптоволокна. Проведена настройка моделирования отклика SMRD счетчиков. Получено хорошее совпадение экспериментально измеренного световыхода SMRD счетчиков с результатами моделирования.
4. Созданы программные алгоритмы реконструкции событий в SMRD детекторе. Координата вдоль SMRD счетчика восстанавливается с использованием Байесовского подхода, основываясь на разнице по времени между сигналами с двух концов счетчика, а также на асимметрии амплитуд сигналов. Согласование SMRD событий с треками из внутренней части ND280 основано на использовании фильтров Калмана. Алгоритм позволяет эффективно работать даже с теми событиями, которым соответствует один сработавший SMRD счетчик, для таких событий получена эффективность «сшивания» – около 90%, для остальных – более 97%. В более чем 98% случаев удается учесть все сработавшие SMRD счетчики. Индивидуальные треки в SMRD восстанавливаются при помощи метода главных компонент, одиночные хиты группируются с учетом временной и геометрической информации. Эффективность восстановления трека составляет более 95%.
5. Показана возможность применения SMRD детектора для восстановления треков частиц, вылетающих под большими углами из внутренней части ближнего детектора ND280, когда информация из время-проекционных камер не может быть использована. Наличие трека в SMRD позволяет выделять мюонные события. Алгоритм восстановления импульса мюонов, основанный на потерях энергии частицей, позволил получить разрешение по импульсу около 20%. Была получена «чистота» отбора мюонов на уровне 70%, а также «чистота» отбора событий в трековой части ND280, соответствующих квазиупругим взаимодействиям, идущим через заряженные токи, на уровне $\simeq 50\%$. Отношение данных к предсказаниям моделирования составило $\frac{N_{data}}{N_{MC}} = 0.92 \pm 0.09$ (стат.).
6. В дальнем детекторе T2K было зарегистрировано шесть электроноподобных событий, в то время как в соответствии с гипотезой отсутствия $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций, т.е. $\theta_{13} = 0$, предсказывается 1.5 ± 0.3 события. Статистическая значимость результата составляет 2.5σ . Для параметра смешивания нейтрино θ_{13} были получены следующие значения (уровень достоверности – 90%): $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ для нормальной и $0.04 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.34$ для обратной иерархии нейтринных масс (при $\sin^2 2\theta_{23} = 1$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и $\delta_{CP} = 0$). Таким образом, в эксперименте

Т2К впервые обнаружены осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ при энергии пучка и длине базы, соответствующих «атмосферным» параметрам, и получено указание на ненулевое значение угла смешивания θ_{13} .

7. При изучении осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ в дальнем детекторе зарегистрировано 31 событие, в то время как в предположении отсутствия осцилляций ожидалось 104 события. Этот результат позволяет отвергнуть гипотезу отсутствия осцилляций на уровне 4.5σ . Также наблюдается характерное искажение энергетического спектра нейтрино, связанное с осцилляциями. При использовании модели двух нейтринных ароматов для «атмосферных» параметров осцилляций получены следующие значения: для 90% уровня достоверности $\sin^2 2\theta_{23} > 0.85$ и $2.1 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2 < \Delta m_{23}^2 < 3.1 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$. Эти значения находятся в хорошем согласии с данными экспериментов Super-Kamiokande и MINOS.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. K.Abe, ..., A.Izmaylov et al. T2K Collaboration. The T2K experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A659*, p. 106-135, 2011.
2. А.О. Измайлов и др. Исследование нейтринных осцилляций в ускорительном эксперименте с длинной базой Т2К. *Ядерная физика*, т.75, 2, 2012.
3. А.Измайлов. Первые результаты нейтринного ускорительного эксперимента второго поколения с длинной базой Т2К (Tokai-to-Kamioka). *Труды 53-й научной конференции МФТИ, 2010, часть VIII, стр. 243-245*.
4. K.Abe, ..., A.Izmaylov et al. T2K Collaboration. Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector. *arXiv: physics.ins-det/1111.3119*, submitted to *Nucl. Instr. and Meth. A.*
5. A.Vacheret, ..., A.Izmaylov et al. Characterization and Simulation of the Response of Multi Pixel Photon Counters to Low Light Levels. *Nucl. Instrum. Meth. A656*, p. 69-83, 2011.
6. Измайлов А.О. Исследование нейтринных осцилляций в эксперименте с длинной базой Т2К. *Труды седьмой Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики БМШ ЭТФ 2006.*, Том 2., М. МИФИ, 2007.
7. Yu.Kudenko, ..., A.Izmaylov et al. Study of MRS photodiodes for T2K experiment. *PoS PD07*, 016, 2006.
8. O.Mineev, ..., A.Izmaylov et al. Scintillator counters with multi-pixel avalanche photodiode readout for the ND280 detector of the T2K experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A577*, p. 540-551, 2007.
9. A.Izmaylov et al. Scintillator counters with WLS fiber/MPPC readout for the side muon range detector (SMRD) of the T2K experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A623*, p. 382-384, 2010.

10. M.Ziembicki, ..., A.Izmaylov et al. The SMRD subdetector at the T2K near detector station. *Acta Phys. Polon. B*, *v41*, p. 1001-1005, 2010.
11. K.Abe, ..., A.Izmaylov et al. T2K Collaboration. Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam. *Phys. Rev. Lett.*, *107:041801*, 2011.
12. A.Izmaylov. New oscillation results from the T2K experiment. *arXiv:hep-ex/1112.0273*.