

На правах рукописи

Дергачева Анна Евгеньевна

**Разработка и создание 3D сегментированного
сцинтилляционного детектора
нейтрино СуперFGD**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Куденко Юрий Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел физики высоких энергий, главный научный сотрудник с совмещением должности заведующего отделом физики высоких энергий и лаборатории физики электрослабых взаимодействий отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН.

Официальные оппоненты:

Соколов Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ), отделение экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

Литвинович Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), отделение физики нейтрино, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), Лаборатория 3-3.

Защита состоится _____ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе 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 и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <https://www.inr.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов С.В.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке и созданию 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино СуперFGD (Супер Fine-Grained Detector), который является ключевым элементом модернизированного комплекса ближних нейтринных детекторов ND280, расположенного на расстоянии 280 м от протонной мишени ускорительного комплекса J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) в эксперименте T2K (Tokai-to-Kamioka). Модернизация ND280 направлена на снижение систематических ошибок осцилляционного анализа в эксперименте T2K с 6–7% до 3–4% и, как следствие, на повышение чувствительности эксперимента к CP-нечетной фазе.

В диссертации приводятся результаты работ по разработке и созданию детектора нейтрино СуперFGD, также результаты по анализу данных, полученных в тестах с двумя прототипами СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН, и результаты детектирования первых взаимодействий мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD, установленном на нейтринном канале T2K в J-PARC.

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных вопросов в области физики высоких энергий является фундаментальный вопрос, выходящий за рамки Стандартной модели, о причинах нарушения симметрии между материей и антиматерией или, иначе говоря, барионной асимметрии Вселенной. В 1967 году А. Сахаров сформулировал три необходимых условия, при одновременном выполнении которых возможна генерация барионной асимметрии Вселенной [1] на ранней стадии космологического расширения из зарядово-нейтрального начального состояния [2]. Одним из таких необходимых условий является нарушение комбинированной зарядово-пространственной CP-четности.

На сегодняшний день известен физический эффект CP-нарушения в кварковом секторе, который характеризуется инвариантом Jarlskog: $J_{CP,q} = (3.12^{+0.13}_{-0.12}) \times 10^{-5}$ [3]. Эта величина в виду малости масс кварков по сравнению с характерным размером шкалы электрослабого взаимодействия ~ 100 ГэВ является недостаточной для генерации барионной асимметрии Вселенной. В случае лептонного сектора $J_{CP,\nu} = J_{CP,\nu}^{max} \times \sin \delta_{CP}$, где $J_{CP,\nu}^{max} = 0.0330 \pm 0.0006 (\pm 0.0019)$ на уровне $1\sigma(3\sigma)$ для обеих иерархий масс [3]. Принимая во внимание тот факт, что физический эффект CP-нарушения в лептонном секторе на три порядка выше по сравнению с кварковым сектором, наряду с отличными от нуля углами смешивания, явление нейтринных осцилляций, в основе которых лежит механизм смешивания

нейтрино трех ароматов, представляет особый интерес в качестве нового источника CP-нарушения для объяснения барионной асимметрии Вселенной через механизм лептогенезиса в случае отличного от нуля $\sin \delta_{CP}$ [4, 5].

В настоящее время существует два эксперимента с длинной базой: T2K [6, 7] и NOvA [8], основной целью которых является поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях. Оба эксперимента отдают предпочтение нормальной иерархии масс нейтрино. Однако, эксперимент T2K в случае нормальной иерархии масс наблюдает максимальное CP-нарушение ($\delta_{CP} = -\pi/2$ или $3\pi/2$) с ограничением на фазу CP-нарушения $\delta_{CP} = -1.97_{-0.70}^{+0.97}$, тогда как эксперимент NOvA, напротив, наблюдает сохранение CP-четности с наиболее вероятным значением $\delta_{CP} = 0.82\pi$ и исключает $\delta_{CP} = 3\pi/2$ на уровне 2σ . В случае обратной иерархии масс результаты обоих экспериментов находятся в хорошем согласии, а именно исключают CP-сохранение ($\delta_{CP} = 0, \pi$) на уровне $>3\sigma$. Кроме того, и в случае нормальной, и в случае обратной иерархий масс оба эксперимента исключают значение $\delta_{CP} = \pi/2$ на уровне $>3\sigma$. На Рисунке 1 показаны ограничения на δ_{CP} , полученные в ускорительных экспериментах T2K и NOvA, в зависимости от измеренного $\sin^2 \theta_{23}$ для нормальной и обратной иерархий масс нейтрино. Как видно из Рисунка 1 в случае нормальной иерархии масс расхождение данных двух экспериментов не превосходит 2σ , в случае обратной иерархии масс допустимые области δ_{CP} для T2K и NOvA находятся в хорошем согласии.

Эксперимент T2K, помимо такой важной задачи, как поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях, нацелен на повышение точности измерения осцилляционных параметров в области атмосферных нейтрино: угла смешивания θ_{23} и разности квадратов масс Δm_{32}^2 . С целью уменьшения систематических погрешностей осцилляционного анализа в эксперименте T2K с 6-7% до уровня 3-4%, и, как следствие, повышения чувствительности эксперимента к CP-нарушению, коллаборацией T2K было принято решение о запуске обширной программы, направленной на модернизацию ближнего внеосевого нейтринного детектора ND280, в рамках которой был запущен процесс разработки и создания 3D сегментированного сцинтилляционного детектора СуперFGD, который в настоящий момент установлен и запущен в работу на нейтринном канале T2K в J-PARC.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является разработка, создание и запуск в работу на нейтринном канале T2K 3D сегментированного детектора нейтрино СуперFGD, который будет выполнять роль полностью активной нейтринной мишени в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K. Для достижения поставленных целей были выполнены следующие **задачи**:

1. Осуществлено постоянное измерение и контроль стабильности световых выходов кубических сцинтилляторов объемом 1 см^3 на протяжении

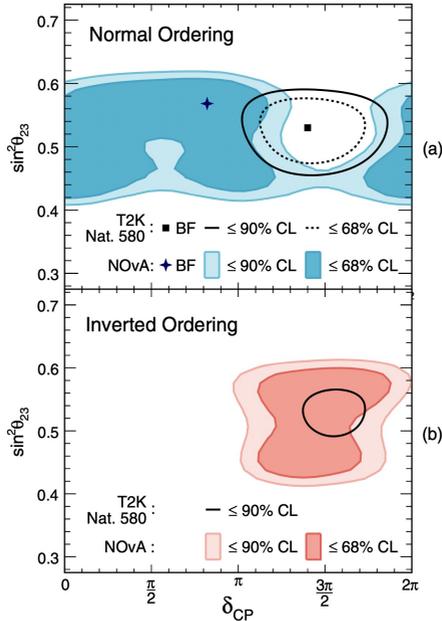


Рис. 1 — Доверительные контуры 68% и 90%, полученные в экспериментах T2K и NOvA для нормальной (а) и обратной (б) иерархий масс нейтрино. Крестиком показано наиболее вероятное значение δ_{CP} для NOvA, квадратиком — для T2K в случае нормальной иерархии масс [8].

их изготовления методом литья под давлением для создания детектора СуперFGD.

2. Измерены основные параметры кубических сцинтилляторов: световыход, временное разрешение и оптическая связь (crosstalk) между кубическими сцинтилляторами с использованием данных, полученных в тестах прототипов детектора СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН.
3. Осуществлено восстановление треков мюонов и остановившихся протонов в магнитном поле 0.2 Тл в прототипе СуперFGD, состоящем из ~ 10000 сцинтилляционных элементов, и изучены параметры треков.
4. Разработан 3D сегментированный детектор СуперFGD, состоящий из $\sim 2 \times 10^6$ сцинтилляционных элементов со спектросмещающими волокнами. Выполнены монтаж, тестирование, настройка и запуск детектора на нейтринном канале T2K.
5. Восстановлены и измерены треки космических мюонов, в том числе с остановкой, в СуперFGD. Измерен световыход сцинтилляционных элементов СуперFGD.

6. На пучке мюонных нейтрино T2K зарегистрированы в СуперFGD первые взаимодействия нейтрино через реакцию квазиупругого рассеяния, идущую через заряженный ток.
7. Восстановлены треки остановившихся протонов, образованных при взаимодействии мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD и измерены параметры этих треков.

Методология и методы исследования

Для разработки и создания детектора СуперFGD были использованы следующие **методы**:

1. Изготовлены кубические сцинтилляторы объемом 1 см^3 с тремя ортогональными сквозными отверстиями с использованием метода литья под давлением, что позволило получить полностью активную сегментированную нейтринную мишень массой около двух тонн с 3D оптическим считыванием сигнала с каждого сцинтилляционного элемента с помощью спектросмещающих оптоволокон с общим числом каналов считывания ~ 56000 .
2. Разработан метод сборки $\sim 2 \times 10^6$ кубических сцинтилляторов объемом 1 см^3 в трехмерную структуру объемом $\sim 200 \times 200 \times 60 \text{ см}^3$, что позволило решить проблему, связанную с флуктуацией размеров сцинтилляторов и положений отверстий. 3D структура детектора формировалась с помощью калиброванной лески диаметром 1.3 мм, которая была заменена спектросмещающими волокнами диаметром 1.0 мм в процессе сборки детектора СуперFGD.
3. Разработан метод восстановления и исследования треков мюонов и остановившихся протонов с использованием данных, полученных в тестах прототипов на пучках заряженных частиц в ЦЕРН, что позволило восстановить треки заряженных частиц, рожденных в нейтринных взаимодействиях, в полной конфигурации СуперFGD и измерить их параметры.

Научная новизна

1. Разработанный и созданный 3D сегментированный детектор нейтрино СуперFGD является принципиально новым ближним нейтринным детектором для ускорительных осцилляционных экспериментов с длинной базой за счет его полностью активной трехмерной структуры, созданной на основе $\sim 2 \times 10^6$ кубических сцинтилляторов объемом 1 см^3 с тремя ортогональными отверстиями, что позволяет выполнять считывание сигнала с каждого сцинтиллятора в трех направлениях посредством спектросмещающих оптоволокон.
2. Детектор СуперFGD является центральным детектором модернизированного комплекса ND280 эксперимента T2K и позволяет:

- повысить точность измерения спектра и состава нейтринного пучка до осцилляций;
 - повысить точность измерения сечений мюонных и электронных нейтрино и антинейтрино;
 - существенно уменьшить систематические погрешности и повысить чувствительность к CP-нарушению в нейтринных осцилляциях, а также повысить точность измерения осцилляционных параметров.
3. Впервые зарегистрированы взаимодействия мюонных нейтрино в полностью активном 3D сегментированном сцинтилляционном детекторе СуперFGD, установленном и запущенном в работу на нейтринном канале T2K в J-PARC. Восстановлены треки вторичных заряженных частиц, а именно мюонов и протонов, рожденных от нейтринных взаимодействий в полном телесном угле.

Практическая и теоретическая значимость

Технология изготовления кубических сцинтилляторов, разработанная для создания детектора СуперFGD, а также уникальный метод их сборки в изотропную структуру [9, 10], обеспечивающую 3D считывание сигнала с каждого из $\sim 2 \times 10^6$ сцинтилляционного элемента, представляет собой **практическую значимость** для методики эксперимента, разработки и создания новых детекторов в области нейтринной физики.

Детектор СуперFGD в составе модернизированного ND280 благодаря своей мелкозернистой структуре, обеспеченной $\sim 2 \times 10^6$ сцинтилляционных элементов с 3D оптическим считыванием, наряду с высоким световыходом ~ 40 фотоэлектронов/МПР/волокно [10] и временным разрешением менее 1 нс/волокно [11], способен обеспечить регистрацию коротких треков от протонов и пионов, снизив порог регистрации по импульсу с 450 МэВ/с до 300 МэВ/с. Кроме того, СуперFGD за счет своей изотропной структуры, обеспеченной 3D считыванием сигнала с каждого из $\sim 2 \times 10^6$ кубических сцинтилляторов с помощью спектросмещающих волокон, способен регистрировать треки заряженных частиц от нейтринных взаимодействий в полном телесном угле, что осуществляется в дальнем детекторе Супер-Камиоканде. До установки детектора СуперFGD два высоко-сегментированных детектора FGDs в трековой части ND280, состоящие из сцинтилляционных стрипов, ориентированных перпендикулярно оси пучка, позволяли с хорошей эффективностью регистрировать исключительно длинные треки заряженных частиц в направлении вперед, то есть вдоль оси пучка. Кроме того, для точного определения кинематических параметров заряженных частиц от нейтринных взаимодействий их необходимо было восстанавливать по крайней мере в одной из время-проекционных камер (TPCs). Как следствие, эффективность детектирования значительно падала при отклонении трека лептона более чем на 50 градусов от оси пучка. Также, благодаря высокому

временному разрешению СуперFGD способен регистрировать нейтроны от антинейтринных взаимодействий и измерять их кинетическую энергию методом времени пролета, а также гораздо лучше идентифицировать электроны и гамма-кванты по сравнению с ND280 до его модернизации.

Перечисленные выше возможности модернизированной конфигурации ND280 обеспечивают практическую значимость разработанного и созданного 3D сегментированного детектора СуперFGD в виде снижения систематической ошибки осцилляционного анализа и повышения точности восстановления энергии нейтрино в эксперименте T2K с 6-7% до 3-4%. Также, детектор СуперFGD будет основным элементом ближнего детектора в проекте Гипер-Камиоканде, запуск которого запланирован на 2028 год.

Теоретическая значимость состоит в том, что снижение систематической ошибки осцилляционного анализа в эксперименте T2K, а также в будущем проекте Гипер-Камиоканде [12], за счет использования детектора СуперFGD в качестве центрального элемента модернизированного ND280 позволит:

- повысить чувствительность эксперимента к поиску CP-нарушения и к CP-нечетной фазе, измерение которой приблизит нас к объяснению явления барионной асимметрии Вселенной;
- измерить сечения нейтринных взаимодействий через заряженные и нейтральные токи, что важно для разработки и оптимизации теоретических моделей взаимодействия нейтрино с нуклонами и легкими ядрами;
- повысить точность измерения осцилляционных параметров в области атмосферных нейтрино: угла смешивания θ_{23} и разности квадратов масс Δm_{32}^2 , что важно для понимания механизма смешивания активных нейтрино.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм измерения светового выхода кубических сцинтилляторов и контроль за его стабильностью в процессе изготовления с использованием данных, полученных в тестах на стенде из 24 сцинтилляционных элементов с короткими спектросмещающими волокнами.
2. Измерение и анализ основных параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD: световой выход, временное разрешение и crosstalk с использованием данных, полученных в тестах двух прототипов СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН.
3. Алгоритм восстановления треков мюонов с импульсом 2 ГэВ/с и треков остановившихся протонов с импульсом 0.8 ГэВ/с в магнитном поле 0.2 Тл на основе данных, полученных в тестах прототипа СуперFGD, состоящего из ~ 10000 сцинтилляционных элементов

- объемом $\sim 1 \text{ см}^3$ каждый. Измеренный световыход релятивистских мюонов и остановившихся протонов в кубических сцинтилляторах.
4. Сборка из $\sim 2 \times 10^6$ кубических сцинтилляторов, объемом 1 см^3 каждый, в сегментированный детектор СуперFGD объемом $\sim 200 \times 200 \times 60 \text{ см}^3$ со спектросмещающими волокнами и микропиксельными лавинными фотодиодами в количестве ~ 56000 . Монтаж детектора в магните ND280 и запуск в работу на нейтринном канале T2K для набора статистики на пучке мюонных нейтрино.
 5. Восстановление треков космических мюонов, в том числе остановившихся, в детекторе СуперFGD. Измерение и анализ параметров сцинтилляционных элементов СуперFGD с использованием космических мюонов: средний световыход и временное разрешение.
 6. Регистрация взаимодействий мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD в измерениях с нейтринным пучком T2K в первом сеансе в 2024 году.
 7. Восстановление треков вторичных частиц: мюонов и остановившихся протонов, образованных в результате квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино через заряженный ток в полной конфигурации СуперFGD. Измерение световыхода вдоль треков остановившихся протонов и среднего световыхода в точке остановки протонов.

Личный вклад автора

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Достоверность результатов

1. Параметры кубических сцинтилляторов, измеренные в тестах двух прототипов на пучках заряженных частиц в ЦЕРН, обеспечивают возможность регистрации мюонных нейтрино в СуперFGD с использованием восстановленных треков мюонов и остановившихся протонов.
2. Результаты тестов прототипов СуперFGD на пучке нейтронов в LANL (США) показывают способность СуперFGD к регистрации и восстановлению энергии нейтронов от взаимодействий мюонных антинейтрино в детекторе.
3. Восстановленные в СуперFGD треки мюонов и протонов, образованные в результате взаимодействий мюонных нейтрино через заряженный ток, подтверждают возможность использования разработанного и созданного детектора в качестве нейтринной мишени в модернизированном ND280 эксперимента T2K.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены в виде устных докладов на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Анализ данных теста прототипа детектора SuperFGD на пучке в CERN. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021», Москва, Россия, 12-23 апреля 2021.
2. Исследование характеристик сцинтилляционных сегментов ближнего нейтринного детектора SuperFGD для эксперимента T2K. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021», Москва, Россия, 12-23 апреля 2021.
3. Scintillator cubes for 3D neutrino detector SuperFGD. International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2021), 24-28 May 2021, online.
4. Результаты теста прототипа нейтринного детектора SuperFGD на пучке заряженных частиц в CERN. Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2021, Москва, Россия, 15-18 ноября 2021.
5. Реконструкция треков заряженных частиц в прототипе нейтринного детектора SuperFGD в магнитном поле. 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 29 ноября-3 декабря 2021.
6. 3D SuperFGD detector for the T2K experiment. The 16th Vienna Conference on Instrumentation (VCI 2022), 21-25 February 2022, online.
7. 3D scintillator neutrino detector SuperFGD of the T2K experiment. The 14th International School on Neutrino Physics and Astrophysics, Sarov, Russia, 18-23 July 2022.
8. Current status of the novel 3D SuperFGD detector for the T2K experiment. The 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022), Moscow, Russia, 29 Nov-2 Dec 2022.
9. Текущий статус 3D сегментированного детектора нейтрино SuperFGD для эксперимента T2K. 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ в честь 115-летия Л.Д. Ландау, Москва, Россия, 3-8 апреля 2023.
10. Исследование треков заряженных частиц в прототипе нейтринного детектора SuperFGD для эксперимента T2K. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», Москва, Россия, 10-21 апреля 2023.
11. Исследование протонных треков в прототипе нейтринного детектора SuperFGD для эксперимента T2K. II Всероссийская школа для студентов старших курсов и молодых учёных по физике высоких энергий и ускорительной технике, Саров, Россия, 24-29 июля 2023.

12. Segmented scintillator neutrino detector SuperFGD for T2K experiment. The 06th Technology and Instrumentation in Particle Physics conference (TIPP 2023), Cape Town, South Africa, 4-8 September 2023.
13. Ближний нейтринный детектор SuperFGD эксперимента T2K. Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, Дубна, Россия, 1-5 апреля 2024.
14. Detection of muon neutrinos using 3D segmented scintillator detector SuperFGD. XVI International School on Neutrino Physics and Astrophysics, Sarov, Russia, 23-27 September 2024.

Публикации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 7 статьях, которые индексируются базами данных Web of Science и/или Scopus: [A1-A7].

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 147 страниц, включая 105 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 119 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цели и задачи работы; описаны методы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость; приведены положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и данные об апробации работы.

Первая глава посвящена истории открытия и феноменологии осцилляций нейтрино с отдельно рассмотренным случаем смешивания нейтрино двух типов в вакууме. Приведен обзор и результаты экспериментов, нацеленных на поиск осцилляций нейтрино и измерение параметров смешивания, с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино.

Вторая глава посвящена детальному описанию эксперимента T2K и его основных элементов, также выделены преимущества используемой в эксперименте концепции внесевого пучка нейтрино. Приведены последние ограничения T2K для атмосферных параметров осцилляций: Δm_{32}^2 и θ_{23} , угла смешивания θ_{13} и CP-нечетной фазы δ_{CP} . Представлены результаты T2K по измерению сечений взаимодействия нейтрино с веществом и ограничение на параметр $\sin^2 \theta_{24}$ для модели “3+1” с легким стерильным нейтрино [13].

T2K (Tokai to Kamioka) [14] — первый ускорительный эксперимент с длинной базой второго поколения, нацеленный на изучение нейтринных осцилляций на пучке мюонных нейтрино от ускорительного комплекса J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). Основными элементами T2K

являются нейтринный канал, комплекс ближних детекторов ND280 [15], расположенный на расстоянии 280 м от протонной мишени, и дальний детектор Супер-Камиоканде (СК) [16], расположенный на расстоянии 295 км от J-PARC. Схема эксперимента T2K показана на Рисунке 2. Ком-

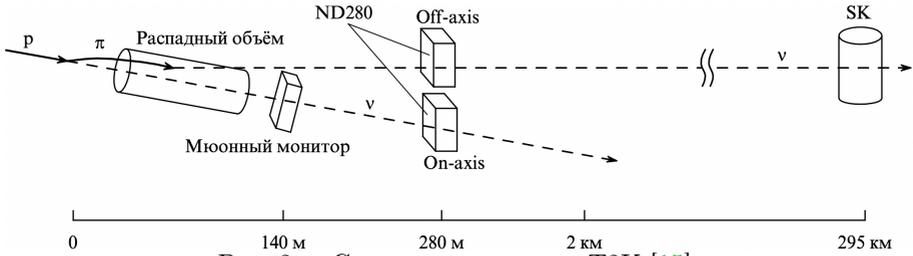


Рис. 2 — Схема эксперимента T2K [15].

плекс ближних детекторов включает монитор нейтринного пучка INGRID (Interactive Neutrino GRID), расположенный на оси протонного пучка, и детектор ND280, расположенный на оси, соединяющей распадный объем и дальний детектор СК, то есть под углом 2.5 градуса к оси протонного пучка. В качестве источника мюонных нейтрино используется пучок протонов высокой интенсивности, генерируемый протонным синхротроном ускорительного комплекса J-PARC, с энергией 30 ГэВ.

В эксперименте T2K была впервые принята концепция квазимоноэнергетичного внеосевого (off-axis) пучка нейтрино, отклоненного от оси протонного пучка на угол $\Theta = 2.5^\circ$ [17, 18]. Выбор такой концепции позволяет получить достаточно чистый пучок мюонных нейтрино в узком диапазоне энергий, а также настроить его на первый осцилляционный максимум с $\Delta m_{32}^2 \simeq 2.4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и пиковой энергией 600 МэВ.

В 2013 году в эксперименте T2K было получено первое указание на максимальное нарушение CP-четности в нейтринных осцилляциях [19]. Последние результаты T2K, показанные на Рисунке 3 (справа), исключают сохранение CP-четности ($\delta_{CP} = 0, \pi$) на уровне достоверности более 90% с предпочтением к максимальному CP-нарушению ($\delta_{CP} = -\pi/2$ или $3\pi/2$) для нормальной иерархии масс нейтрино [6, 7]. T2K отдает предпочтение нормальной иерархии масс ($\Delta m_{32}^2 > 0$) и верхнему октанту угла смешивания θ_{23} ($\sin^2 \theta_{23} > 0.5$), при этом обратная иерархия масс исключена на уровне 1σ (Рисунок 3, слева) [6, 7].

Третья глава посвящена физической мотивации создания детектора СуперFGD (Супер Fine-Grained Detector) в рамках программы модернизации ND280. Рассмотрены новые возможности конфигурации детекторов в модернизированном ND280 по сравнению с его предыдущей версией. Также приведены результаты тестов сцинтилляционных элементов СуперFGD с космическими мюонами.

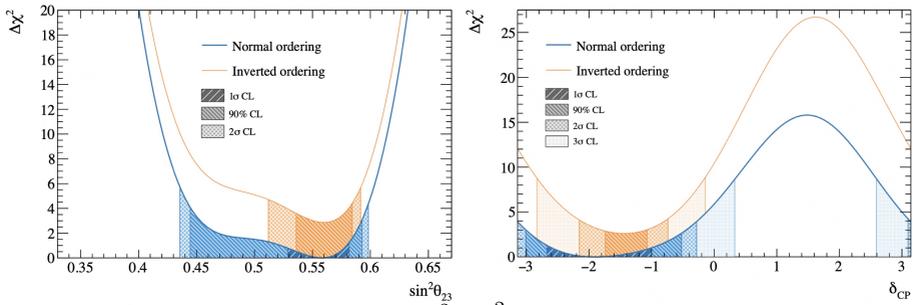


Рис. 3 — Слева: Распределение $\Delta\chi^2(\sin^2\theta_{23})$ для нормальной и обратной иерархий масс нейтрино. Справа: Распределение $\Delta\chi^2(\delta_{CP})$ для нормальной и обратной иерархий масс нейтрино [7, 20].

Идея модернизации ND280 предполагала замену детектора нейтральных пионов $P\bar{O}D$ на новый трекер, включающий детектор СуперFGD, расположенный в центральной части между двумя горизонтальными время-проекционными камерами HA-TPCs (High-Angle Time Projection Chambers) [21], и шесть сцинтилляционных плоскостей, составляющих время-пролетную систему ToF (Time-of-Flight) [22]. Общий вид ND280 до и после модернизации показан на Рисунке 4.

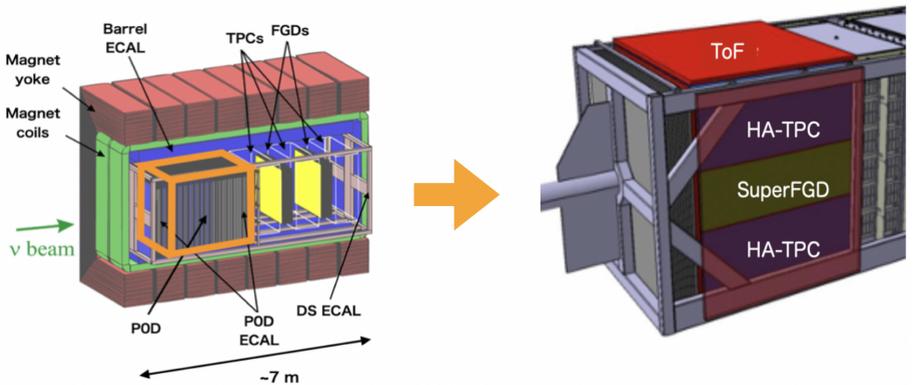


Рис. 4 — Схема ближнего детектора нейтрино ND280 до и после модернизации [23].

Детектор СуперFGD представляет собой полностью активную нейтринную мишень, состоящую из 1,956,864 оптически изолированных кубических сцинтилляторов со стороной грани 1 см. Полный размер СуперFGD составляет $192(x) \times 182(z) \times 56(y)$ см³, а его общий вес — около 2-х тонн. Кубические сцинтилляторы, изготовленные для СуперFGD на предприятии «Унипласт» (Владимир, Россия) методом литья под давлением,

были собраны в виде 56-ти плоскостей размером $192 \times 182 \text{ см}^2$ с использованием калиброванной лески диаметром 1.3 мм в ИЯИ РАН (Троицк, Москва) в 2021 году (Рисунок 5). Использование калиброванной лески позволило



Рис. 5 — 56 плоскостей $192 \times 182 \text{ см}^2$ детектора СуперFGD, собранные с использованием калиброванной лески диаметром 1.3 мм. На этапе подготовки СуперFGD к установке в ND280 леска была заменена на WLS оптоволокна [24].

решить проблему, связанную с флуктуацией размеров сцинтилляторов и положений отверстий [10, 25].

Сигнал с каждого кубического сцинтиллятора СуперFGD собирается с помощью трех оптических волокон со сдвигом длины волны WLS (Wave-Length Shifting). Один из концов WLS волокна считывается микропиксельным счетчиком фотонов MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) производства Hamamatsu Photonics К.К. серии S13360-1325PE [26]. В общей сложности в детекторе СуперFGD задействованы 55,888 каналов считывания MPPCs. Другой конец WLS волокна используется для калибровки СуперFGD с помощью калибровочной системы на основе световодной пластины LGP (Light Guide Plate) с импульсным светодиодным источником LED (Light Emitting Diode). Информация о времени и амплитуде импульса, полученная от срабатывающих волокон в трех направлениях, позволяет определять координаты взаимодействия заряженной частицы с веществом детектора СуперFGD с точностью, определяемой размером кубического сцинтиллятора.

В процессе изготовления кубических сцинтилляторов для детектора СуперFGD проводился контроль за их качеством. Для этого был предложен и реализован алгоритм измерения световыхода с использованием данных,

полученных в тестах с космическими мюонами на стенде из 24 сцинтилляционных элементов с короткими спектросмещающими волокнами длиной 35 см. Средний световыход, измеренный с учетом поправок на температуру помещения, составил ~ 45 фотоэлектронов/МП/волокно. Световыход отобранных для СуперFGD сцинтилляторов отклоняется не более чем на 10% от этой величины. Полученный результат подтверждает стабильность процесса изготовления сцинтилляционных элементов СуперFGD методом литья под давлением и удовлетворяет требованиям эксперимента T2K к новому детектору СуперFGD в качестве активной нейтринной мишени для модернизированного ND280.

В **четвертой главе** представлены результаты измерений основных параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD: световыход, временное разрешение и crosstalk между кубическими сцинтилляторами. Результаты получены с использованием данных тестов прототипов СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН (Рисунок 6). Средний световыход



Рис. 6 — Слева: первый прототип СуперFGD ($5 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$) с установленными WLS волокнами [27]. Справа: вид снизу частично инструментированного второго прототипа СуперFGD ($24 \times 8 \times 48 \text{ см}^3$) [28].

ход составил ~ 45.0 фотоэлектронов/МП/волокно, временное разрешение ~ 0.95 нс/волокно, средний crosstalk через одну сторону кубического сцинтиллятора $\sim 3.0\%$.

Представлены результаты по восстановлению и исследованию свойств треков мюонов и остановившихся протонов в магнитном поле 0.2 Тл в прототипе СуперFGD, состоящем из ~ 10000 сцинтилляционных элементов. Пример трека протона с импульсом 0.8 ГэВ/с, остановившегося в прототипе СуперFGD, показан на Рисунке 7 в проекциях на три плоскости. Вдоль восстановленных ~ 1800 треков протонов измерена амплитуда сигнала с X(Y)-волокон, которая меняется в интервале от ~ 100 фотоэлектронов в начале трека до ~ 500 фотоэлектронов в точке остановки протона.

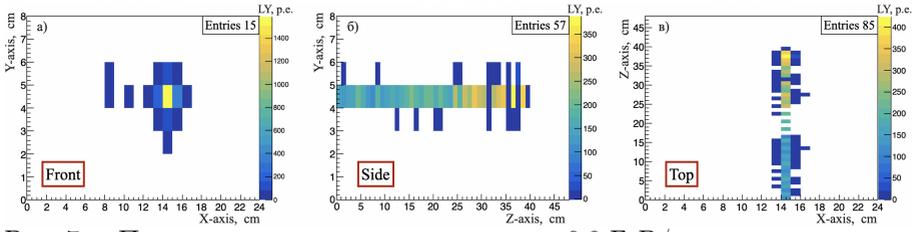


Рис. 7 — Пример трека протона с импульсом 0.8 ГэВ/с в магнитном поле 0.2 Тл с остановкой в прототипе СуперFGD в трех плоскостях: XY (а), YZ (б), XZ (в).

Показаны результаты измерений сечения взаимодействия нейтронов на углеводороде в зависимости от кинетической энергии нейтронов в тестах прототипов детектора СуперFGD на пучке нейтронов в LANL. Полное сечение нейтрон-СН (Hydro-Carbon), измеренное в диапазоне кинетической энергии нейтронов от 98 до 688 МэВ, составляет от 0.36 ± 0.05 барн [29].

Полученные параметры удовлетворяют требованиям к детектору СуперFGD для его применения в качестве центрального элемента ближнего детектора в экспериментах Т2К и Гипер-Камиоканде.

В **пятой главе** описаны основные этапы работ по монтажу детектора СуперFGD, а также его основные компоненты: механический контейнер, печатные платы PCBs (Printed Circuit Boards) с микропиксельными счетчиками фотонов MPPCs (Multi-Pixel Photon Counters), оптические волокна со сдвигом длины волны WLS (Wave-Length Shifting), система калибровки на основе световодной пластины LGP (Light Guide Plate) с LED (Light Emitting Diode) источником и считывающая электроника на основе чипа CITIROC (Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip) [24]. Приведены результаты тестов на качество установленных вместо калиброванной лески горизонтальных и вертикальных WLS волокон, а также результаты измерения прогиба механического контейнера под весом расположенных в нем 56 слоев сцинтилляционных элементов. Показан детектор СуперFGD, установленный в магнит ND280 и подготовленный к запуску в работу на нейтринном канале Т2К в J-PARC (Рисунок 8).

Шестая глава посвящена регистрации первых взаимодействий мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD, установленном на нейтринном канале Т2К в J-PARC в составе ближнего детектора ND280. Представлены результаты по восстановлению и исследованию свойств треков космических мюонов и остановившихся в СуперFGD протонов, образованных в результате квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино в веществе детектора через заряженный ток:

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p. \quad (1)$$

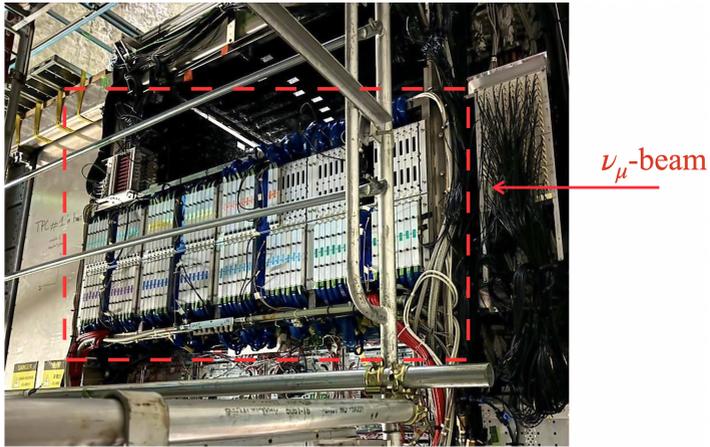


Рис. 8 — Детектор СуперFGD, смонтированный в магните ближнего нейтринного детектора ND280 на пучке мюонных нейтрино T2K в J-PARC [23].

Идентификатором ν_μ -события, произошедшего в объеме СуперFGD, служит детектирование мюона и остановившегося протона, восстановленные треки которых, выходящие из одной точки (точки взаимодействия нейтрино с веществом детектора), изображены на Рисунке 9 в трех проекциях. Для каждой плоскости показано направление пучка мюонных нейтрино T2K относительно детектора СуперFGD.

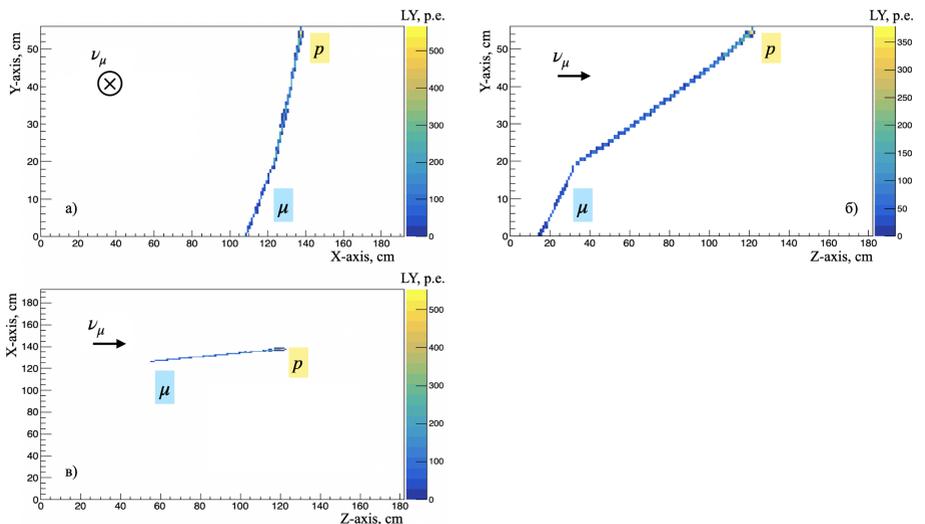


Рис. 9 — Событие-кандидат в мюонное нейтрино, зарегистрированное в СуперFGD по реакции квазиупругого рассеяния через заряженный ток в трех проекциях: XY (а), YZ (б) и XZ (в).

На Рисунке 10 показано распределение световых выходов вдоль восстановленных 120 треков протонов (вдоль оси Y) относительно точки остановки, смещенной в координату $Y=0$, в плоскостях XY и YZ (сверху). Средний

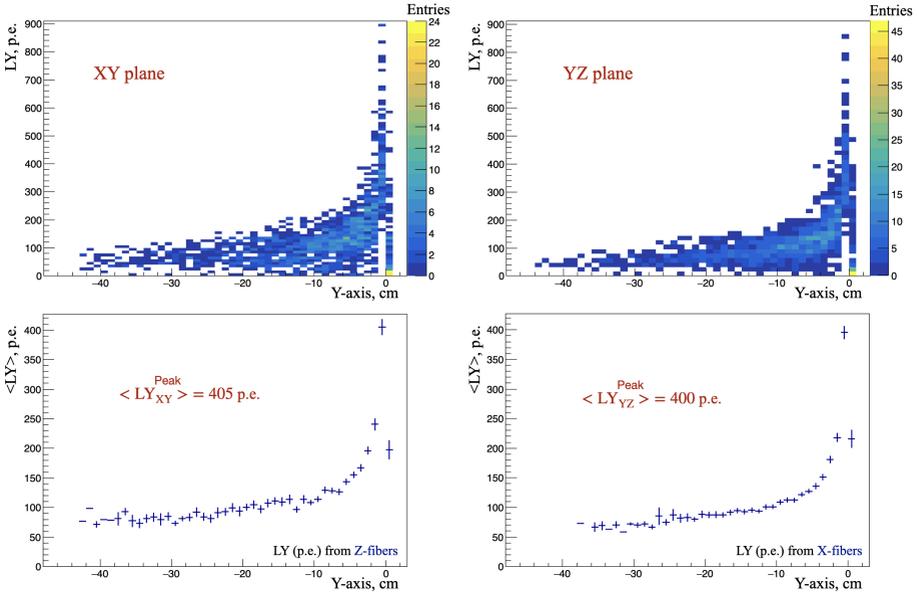


Рис. 10 — Сверху: Распределение световых выходов вдоль треков остановившихся протонов, восстановленных из вершины взаимодействия мюонного нейтрино в СуперFGD, относительно точки остановки ($Y = 0$) в плоскостях XY (слева) и YZ (справа). Снизу: Средний световой выход вдоль треков остановившихся протонов, измеренный с Z- (слева) и X- (справа) волокон.

световой выход в точке остановки протонов составил ~ 400 фотоэлектронов/волокно.

В **заклЮчении** диссертации представлены полученные результаты и выводы:

1. Световой выход кубических сцинтилляторов объемом 1 см^3 , измеренный в процессе их изготовления для детектора СуперFGD в тестах с космическими мюонами на стенде из 24 сцинтилляционных элементов с короткими спектросмещающими волокнами длиной 35 см, составил ~ 45 фотоэлектронов на один канал считывания. Световой выход отобранных для СуперFGD сцинтилляторов отклоняется не более чем на 10% от этой величины.
2. На пучке заряженных частиц в ЦЕРН измерены основные параметры кубических сцинтилляторов: световой выход ~ 45.0 фотоэлектронов/МР/волокно, временное разрешение ~ 0.95 нс/волокно,

средний crosstalk через одну сторону кубического сцинтиллятора $\sim 3.0\%$. Восстановлены треки релятивистских мюонов с импульсом $2 \text{ ГэВ}/c$ и треки остановившихся протонов с импульсом $0.8 \text{ ГэВ}/c$ в прототипе СуперFGD, состоящем из ~ 10000 сцинтилляционных элементов. Показано, что по длине треков протонов амплитуда сигнала с X(Y)-волокон меняется в интервале от ~ 100 фотоэлектронов в начале трека до ~ 500 фотоэлектронов в точке остановки протона. Полученные параметры удовлетворяют требованиям к детектору СуперFGD для его применения в качестве центрального элемента ближнего детектора в экспериментах T2K и Гипер-Камиоканде.

3. По результатам тестов двух прототипов СуперFGD окончательно определена конфигурация 3D сегментированного детектора СуперFGD, разработана схема регистрации сцинтилляционных сигналов с помощью спектросмещающих волокон, микропиксельных лавинных фотодиодов MPPCs и электроники на основе чипа CITIROC. Структура детектора массой ~ 2.0 тонны включает в себя около 2-х миллионов сцинтилляционных элементов (сцинтилляционных кубических детекторов объемом 1 см^3 каждый с тремя ортогональными отверстиями), ~ 56000 спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов MPPCs.
4. Детектор СуперFGD успешно собран, протестирован и прокалиброван с использованием космических мюонов и LED калибровочной системы на поверхности Земли. СуперFGD установлен в магнит ND280 в шахте ближнего детектора и запущен в работу на нейтринном канале T2K в J-PARC. Детектор начал набор данных с пучком мюонных нейтрино в феврале 2024 года.
5. Измерены параметры детектора СуперFGD с использованием космических мюонов. Средний световыход, измеренный в центральном объеме детектора $20 \times 20 \times 56 \text{ см}^3$, составил ~ 30 фотоэлектронов/MIP/волоконно. Временное разрешение составило $\sim 1 \text{ нс}/\text{волоконно}$. Восстановлены треки космических мюонов с остановкой в СуперFGD. Световыход в точке остановки космического мюона составил ~ 150 фотоэлектронов/волоконно.
6. В детекторе СуперFGD в первом физическом сеансе зарегистрированы мюонные нейтрино, идентифицированные по восстановленным трекам мюонов и протонов, образованным в результате квазиупругого рассеяния мюонного нейтрино в веществе детектора через заряженный ток. В результате анализа восстановленных в СуперFGD треков остановившихся протонов получено распределение световыхода вдоль треков протонов относительно точки их остановки (пик Брэгга). Средний световыход в точке остановки протона составил ~ 400 фотоэлектронов/волоконно. Полученные результаты позволяют повысить точность измерения энергии нейтрино в

ближнем детекторе эксперимента T2K, используя восстановленные кинематические параметры всех заряженных частиц, возникающих в результате квазиупругого взаимодействия мюонного нейтрино через заряженный ток.

Публикации автора по теме диссертационного исследования

- A1. Scintillator cubes for 3D neutrino detector SuperFGD / S. Fedotov, A. Dergacheva, A. Filik, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, Yu. Kudenko, O. Mineev, N. Yershov // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2022. — Vol. 2374, no. 1. — P. 012106.
- A2. 3D SuperFGD detector for the T2K experiment / A. Dergacheva, A. Khotjantsev, Y. Kudenko, A. Mefodiev // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2022. — Vol. 1041. — P. 167219.
- A3. SuperFGD prototype time resolution studies / I. Alekseev, T. Arihara, V. Baranov, L. Bartoszek, L. Bernardi, A. Blondel, A.V. Boikov, M. Buizza-Avanzini, F. Cadoux, J. Capó, J. Cayo, J. Chakrani, P.S. Chong, A. Chvirova, M. Danilov, Yu.I. Davydov, A. Dergacheva, N. Dokania, D. Douqa, O. Drapier, A. Eguchi, Y. Favre, D. Fedorova, S. Fedotov, Y. Fujii, F. Gastaldi, A. Gendotti, V. Glagolev, R. Guillaumat, K. Iwamoto, M. Jakkapu, C. Jesús-Valls, C.K. Jung, H. Kakuno, S.P. Kasetti, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, H. Kikutani, T. Kobayashi, S. Kodama, A. Korzenev, U. Kose, Y. Kudenko, T. Kutter, D. Last, B. Li, Z. Li, L.S. Lin, S. Lin, M. Louzir, T. Lux, L. Maret, S. Martynenko, T. Matsubara, C. Mauger, C. McGrew, A. Mefodiev, O. Mineev, T. Nakadaira, K. Nakagiri, J. Nanni, L. Nicola, E. Noah, V. Paolone, S. Parsa, R. Pellegrino, M.A. Ramirez, M. Reh, C. Ricco, A. Rubbia, K. Sakashita, F. Sanchez, D. Sgalaberna, A. Shvartsman, N. Skrobova, I.A. Suslov, S. Suvorov, D. Svirida, A. Teklu, V.V. Tereshchenko, M. Tzanov, I.I. Vasilyev, K. Wood, G. Yang, N.Yershov, M. Yokoyama, Y. Yoshimoto, X. Zhao, P. Zilberman, E. D. Zimmerman // *Journal of Instrumentation.* — 2023. — Vol. 18, no. 1. — P01012.
- A4. Total neutron cross-section measurement on CH with a novel 3D-projection scintillator detector / A. Agarwal, H. Budd, J. Capo, J. Chaves, P. Chong, G. Christodoulou, M. Danilov, A. Dergacheva, A. De Roeck, N. Dokania, D. Douqa, K. Dugas, S. Fedotov, S. Gwon, R. Howell, K. Iwamoto, C. Jesus-Valls, C. K. Jung, S. P. Kasetti, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, T. Kikawa, U. Kose, Y. Kudenko, S. Kuribayashi, T. Kutter, D. Last, S. Lin, T. Lux, S. Manly, D. A. Martinez Caicedo, S. Martynenko, T. Matsubara, C. Mauger, K. McFarland, C. McGrew, A. Mefodiev, O. Mineev, T. Nakadaira, E. Noah, A. Olivier, V. Paolone, S. Palestini, A. Paul-Torres, M. A. Ramirez, C. Riccio, J. Rodriguez Rondon, F. Sanchez, D. Sgalaberna,

- W. Shorrock, A. Sitraka, K. Siyeon, N. Skrobova, S. Suvorov, A. Teklu, M. Tzanov, Y. Uchida, C. Wret, G. Yang, N. Yershov, M. Yokoyama, P. Zilberman // *Phys. Lett. B.* — 2023. — Vol. 840. — P. 137843.
- A5. Current status of the novel 3D SuperFGD detector for the T2K experiment / A. Dergacheva, D. Chernov, A. Chvirova, G. Erofeev, D. Fedorova, S. Fedotov, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, Y. Kudenko, A. Mefodiev, O. Mineev, N. Yershov // *Physics (Switzerland).* — 2023. — Vol. 5, no. 3. — Pp. 690–703.
- A6. Новый высокосегментированный нейтринный детектор SuperFGD для эксперимента T2K / С.А. Федотов, А.Е. Дергачева, Н.В. Ершов, Ю.Г. Куденко, А.В. Мefодьев, О.В. Mineев, Д.В. Федорова, М.М. Хабибуллин, А.Н. Хотянцев, А.А. Чвирова // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* — 2023. — Т. 2. — С. 2320205.
- A7. Ближний нейтринный детектор SuperFGD эксперимента T2K / А.Е. Дергачева, М.А. Колупанова, А.В. Мefодьев, Ю.Г. Куденко, А.Н. Хотянцев, Д.В. Федорова, С.А. Федотов, А.А. Чвирова, А.С. Шварцман // *Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ).* — 2025. — Т. 56, вып. 3.

Список литературы

1. Sakharov A. D. Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe // *Sov. Phys. Usp.* — 1991. — Vol. 34, no. 5. — Pp. 392–393.
2. Standard Model CP-violation and Baryon asymmetry / M. B. Gavela [et al.] // *Mod. Phys. Lett. A.* — 1994. — Vol. 09, no. 09. — Pp. 795–809.
3. Review of Particle Physics / S. Navas [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110, no. 3. — P. 030001.
4. Davidson S., Nardi E., Nir Y. Leptogenesis // *Phys. Rept.* — 2008. — Vol. 466. — Pp. 105–177.
5. Fukugita M., Yanagida T. Baryogenesis Without Grand Unification // *Phys. Lett. B.* — 1986. — Vol. 174. — Pp. 45–47.
6. Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations / K. Abe [et al.] // *Nature.* — 2020. — Vol. 580. — Pp. 339–344.
7. Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target / K. Abe [et al.] // *Eur. Phys. J. C.* — 2023. — Vol. 83. — P. 782.

8. Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment / M. A. Acero [et al.] // Phys. Rev. D. — 2022. — Vol. 106. — P. 032004.
9. Scintillator cubes for 3D neutrino detector SuperFGD / S. Fedotov, A. Dergacheva, [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2022. — Vol. 2374, no. 1. — P. 012106.
10. 3D SuperFGD detector for the T2K experiment / A. Dergacheva [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2022. — Vol. 1041. — P. 167219.
11. SuperFGD prototype time resolution studies / I. Alekseev, ..., A. Dergacheva, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2023. — Vol. 18, no. 01. — P01012.
12. Kudenko Y. Recent results and prospects of LBL accelerator experiments // PoS. — 2024. — Vol. ICPPCRubakov2023. — P. 043.
13. Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km / K. Abe [et al.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 99. — P. 071103.
14. The T2K Experiment / K. Abe [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2011. — Vol. 659. — Pp. 106–135.
15. Kudenko Y. The Near neutrino detector for the T2K experiment // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2009. — Vol. 598. — Pp. 289–295.
16. The Super-Kamiokande detector / Y. Fukuda [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 501. — Pp. 418–462.
17. Hayato Y. T2K at J-PARC // Nuclear Phys. B. — 2005. — Vol. 143. — Pp. 269–276.
18. Куденко Ю. Г. Исследование нейтринных осцилляций в ускорительных экспериментах с длинной базой // Усп. физ. наук. — 2011. — Т. 181, № 6. — С. 569–594.
19. Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam / K. Abe [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Vol. 112. — P. 061802.
20. Ali A. Latest Results from the T2K and NOvA Experiments // PoS. — 2024. — Vol. HQL2023. — P. 024.
21. Performances of a resistive MicroMegas module for the Time Projection Chambers of the T2K Near Detector upgrade / D. Attié [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2020. — Vol. 957. — P. 163286.
22. A 4pi time-of-flight detector for the ND280/T2K upgrade / A. Korzenev [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2022. — Vol. 17, no. 01. — P01016.

23. Ближний нейтринный детектор SuperFGD эксперимента T2K / А. Дергачева [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ). — 2025. — Т. 56, вып. 3.
24. Current Status of the Novel 3D SuperFGD Detector for the T2K Experiment / A. Dergacheva [et al.] // Physics (Switzerland). — 2023. — Vol. 5, no. 3. — Pp. 690–703.
25. Новый высокосегментированный нейтринный детектор SuperFGD для эксперимента T2K / С. А. Федотов, А. Е. Дергачева [и др.] // Ученые записки физического факультета Московского университета. — 2023. — Т. 2. — С. 2320205.
26. Hamamatsu. MPPC – Multi-Pixel Photon Counter // White Paper. — URL: https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html.
27. Beam test results of 3D fine-grained scintillator detector prototype for T2K ND280 neutrino active target / O. Mineev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2019. — Vol. 923. — Pp. 134–138.
28. The SuperFGD Prototype Charged Particle Beam Tests / A. Blondel [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — Vol. 15, no. 12. — P12003.
29. Total neutron cross-section measurement on CH with a novel 3D-projection scintillator detector / A. Agarwal, ..., A. Dergacheva, [et al.] // Phys. Lett. B. — 2023. — Vol. 840. — P. 137843.

Дергачева Анна Евгеньевна
Разработка и создание 3D сегментированного
сцинтилляционного детектора
нейтрино СуперFGD

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 13.02.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 016/25 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а