

Проект

Т2К-II

02-2-1144-2021/2023

ЛЯП: Артиков А.М., Баранов В.Ю., Бойков А.В., Бражников А.О., Будагов Ю.А.,
Васильев И.И., Глаголев В.В., Давыдов Ю.И., Демин Д.Л., Киричков Н.В., Кисеева
В.И., Колесников А.О., Красноперов А.В., Малышев В.Л., Попов Б.А., Суслов И.А.,
Терещенко В.В., Терещенко С.В., Хомутов Н.В., Шайковский А.В.
ЛТФ: Козлов Г.А., Матвеев В.А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Куденко Ю.Г., Минеев О.В., Хабибуллин М.М., Хотянцев А.Н.,

Институт ядерных исследований Российской академии наук

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА В.В. Глаголев, Ю.И. Давыдов

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ 30.06.2022 НОМЕР ДОКУМЕНТА _____

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА ____2022____

ДАТА СЕМИНАРА В ЛАБОРАТОРИИ 15.12.2021, 29.06.2022

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

T2K-II

02-2-1144-2021/2023

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА В.В. Глаголев, Ю.И. Давыдов

подпись

дата

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

НАЧАЛЬНИК НОО

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА

ОДОБРЕН

ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Проект

Т2К-И

Содержание

1. Аннотация
2. Введение
3. Состояние исследований по данной проблеме
4. Описание предлагаемого исследования
5. Вклад сотрудников ОИЯИ в Проект
6. Планы сотрудников ОИЯИ на 2023 г.
7. Оценка кадровых ресурсов
8. Краткий ССВУ-анализ
9. Ссылки
10. Оценка бюджета проекта

Аннотация

Основная цель этого проекта – полноценное участие физиков ОИЯИ в японской экспериментальной программе мирового значения по нейтринной физике [1][2]: в модернизированном эксперименте T2K-II и в перспективе в проекте Hyper-Kamiokande, который в настоящее время находится в стадии подготовки.

Уже утвержденная экспериментальная программа T2K-II позволит продлить время работы T2K-II до 2026 года и набрать статистику до 10×10^{21} протонов на мишень, с целью наблюдения нарушения CP со значимостью 3σ или выше для случая большого CP-нарушения и измерения параметров смешивания нейтрино, θ_{23} and Δm_{32}^2 , с точностью 1.7° или лучше и 1%, соответственно[3]. Для достижения этих целей проводится модернизация ускорительного комплекса J-PARC[4] и ближнего детектора – ND280[5].

Дальнейшие цели включают участие группы в проекте нового поколения Hyper-Kamiokande, который продолжит эксперимент T2K-II и будет использовать тот же пучок нейтрино от ускорителя J-PARC и набор ближних детекторов.

Ближайшей целью проекта является создание уникального активного детектора с мелкой сегментацией (SuperFGD), состоящего примерно из 2 миллионов сцинтилляционных кубиков, пронизанных сцинтилляционными волокнами в трех перпендикулярных направлениях. Эта мишень нужна для модернизации ближнего детектора ND280. Благодаря своей мелкоячеистой геометрии, окруженной времяпролетными детекторами (TOF) и двумя время-проекционными камерами (HA-TPC), SuperFGD обладает уникальной способностью восстанавливать короткие треки и регистрировать быстрые нейтроны, что требуется для реконструкции энергии (анти)нейтрино, а также для повышения эффективности восстановления треков заряженных частиц, вылетающих под большими углами (почти перпендикулярно и назад) по отношению к направлению налетающего (анти) нейтрино. Это также позволит снизить порог регистрации импульсов для пионов и нуклонов, образующихся в (анти) нейтринных взаимодействиях.

Методы и технология создания новой мишени SuperFGD включают изучение свойств отдельных сцинтилляционных элементов (кубиков) с диффузным покрытием, перекрестных световых наводок между элементами, световых выходов, тестирование прототипа мишени и выполнение анализа данных. Разрабатывается система калибровки всех оптоволоконных каналов и фотодетекторов (SiPM) с помощью системы светодиодов. Особо отметим конструктивные трудности создания такой мишени - ящика, в основном из стеклопластика, во всех стенках которого должны быть отверстия для выхода оптических волокон с шагом 1 см и создания платформы и приспособлений для сборки мишени из ~ 2000000 кубиков, пронизанных волокнами в трех направлениях внутри такого ящика. Разрабатывается порядок сборки и дооснащения мишени электронными платами для считывания сигналов и калибровки.

Участники проекта имеют большой опыт создания и обслуживания сцинтилляционных детекторов (CDF-мюонные счетчики, модули вето-системы и элементов кристаллического калориметра Mu2e), проектирования и программирования электронных плат (OPERA, Mu2e, COMET), моделирования и анализа данных (CDF, Mu2e), дизайн различных объектов.

Запрашиваемое финансирование на 1 год составляет 80 тыс. долларов.

Введение

Ожидается, что фаза II эксперимента T2K начнется в 2023 году и продлится до 2026 года. За ней последует эксперимент Hyper-Kamiokande (HK), в котором будет использоваться пучок нейтрино, произведенный ускорителем J-PARC и тот же ближний детектор ND280. Физическими целями T2K-II являются измерения параметров осцилляций нейтрино θ_{23} and Δm_{32}^2 с точностью $1,7^\circ$ и 1% соответственно, а также подтверждение на уровне 3σ или более асимметрии вещество-антивещество в нейтринном секторе в широком диапазоне возможных значений δ_{CP} - параметра, ответственного за нарушение CP-четности. Достижение этих целей требует уменьшения статистических и систематических ошибок и, следовательно, значительной модернизации ближнего детектора ND280, модернизации ускорителя, а также улучшений в программном обеспечении и методах анализа данных.

Существующая конструкция ближнего детектора ND280 хорошо оптимизирована для обнаружения и реконструкции движущихся вперед частиц (в основном заряженных лептонов: мюонов и электронов), но также имеет ряд ограничений, таких как низкая эффективность восстановления частиц, вылетающих почти перпендикулярно и в обратном направлении к направлению налетающего нейтрино, а также слишком высокий порог импульса, чтобы восстановить большую часть образовавшихся пионов и выбитых нуклонов (протонов и нейтронов). Важно оптимизировать детектор, чтобы он был чувствителен к частицам с малым импульсом, возникающими в результате ядерных эффектов, что снизило бы систематическую ошибку в анализе осцилляций нейтрино, связанную с моделями нейтринных взаимодействий.

SuperFGD - это детектор размером около 2 x 2 x 0,5 м, состоящий примерно из 2 миллионов сцинтилляционных кубиков полистирола объемом 1 см³ каждый. Через кубики в трех направлениях проходят оптические волокна для осуществления светосбора от сцинтилляционного излучения при прохождении заряженных частиц. В отличие от применяемых в настоящее время активных мишеней- FGD, SuperFGD обеспечивает квази-трехмерную реконструкцию событий. Эта конфигурация увеличивает шансы восстановления коротких треков почти равномерно во всех направлениях. Благодаря своей геометрии и в сочетании с время-проекционными камерами (HA-TPC), расположенными выше и ниже SuperFGD, SuperFGD обладает способностью регистрировать быстрые нейтроны, что необходимо для восстановления энергии антинейтрино.

На основе дважды получившего Нобелевскую премию эксперимента Super-Kamiokande и чрезвычайно успешной японской нейтринной программы с длинной базой, водный Черенковский детектор третьего поколения, Hyper-Kamiokande, разрабатывается международным сообществом как ведущий мировой эксперимент. В нем будут рассмотрены самые большие нерешенные вопросы в рамках рассчитанной на несколько десятилетий программы по физике. Начало эксплуатации детектора Hyper-Kamiokande запланировано на 2027 год.

Hyper-Kamiokande сможет с высочайшей точностью измерить лептонное CP-нарушение, которое могло бы объяснить барионную асимметрию во Вселенной. Эксперимент также обладает отличной способностью к поиску распада протона, обеспечивая значительное улучшение чувствительности обнаружения по сравнению с текущими ограничениями на время жизни протона. Регистрация атмосферных нейтрино позволит определить иерархию масс

нейтрино и вместе с ускорительными нейтрино точно протестировать парадигму осцилляций трех ароматов нейтрино и провести поиски новых явлений. В эксперименте будет реализована мощная астрофизическая программа, которая также позволит регистрировать нейтрино от вспышек сверхновых и точно измерить осцилляции солнечных нейтрино. Планируется ряд других основных физических исследований, таких как поиск темной материи.

Состояние исследований по данной проблеме

T2K [1] - это действующий в настоящее время эксперимент, который использует хорошо известный Super-K в качестве дальнего детектора для измерения (анти) нейтрино, произведенных на ускорителе J-PARC. Hyper-K будет использовать большую часть существующей инфраструктуры, созданной для T2K, особенно канал вывода пучка и ближние детекторы. Hyper-K также выиграет от улучшенных методов анализа данных, разработанных для T2K. В ближайшие годы запланировано несколько важных обновлений и улучшений T2K, и это окажет прямое влияние на повышение точности измерений Hyper-K.

В эксперименте T2K используется ближний детектор ND280 с самого начала набора данных. Будущие усовершенствования анализа данных, связанные с ND280, направлены на уточнение измерений (анти) нейтринных сечений и уменьшение неопределенностей в знании потока нейтрино.

В июне 2015 года коллаборация Super-Kamiokande одобрила проект SK-Gd. Этот проект представляет собой модернизацию возможностей детектора, достигаемую путем растворения 0,2% сульфата гадолиния в воде Super-K с целью повышения эффективности обнаружения нейтронов от взаимодействий нейтрино. Следовательно, после быстрого обнаружения позитрона, нейтрон от обратного бета-распада (IBD) может быть идентифицирован в SK-Gd по задержанному во времени гамма-каскаду, результату захвата нейтрона на гадолинии. В результате такой идентификации истинных событий IBD может быть достигнуто значительно улучшенное разделение между сигналом и фоном. Опыт заливки гадолиния в крупномасштабный водный Черенковский детектор Super-K и результаты работы с ним трудно переоценить для решения применить аналогичную заливку в детекторе Hyper-K.

Можно определить иерархию масс нейтрино путем сравнения абсолютных значений разностей квадратов эффективных масс, определяемых реактором (исчезновение $(\bar{\nu}_e)$) и ускорителем (исчезновение ν_μ) с высокой точностью [10],[7]. Ожидается, что примерно к 2025 году иерархия масс может быть определена на уровне $\sim (3-4) \sigma$ или более путем объединения будущих данных, поступающих из текущих экспериментов, таких как NOvA[19], T2K и реакторных экспериментов, Daya Bay [8], RENO [9], Double Chooz [10], и вступающих в строй экспериментов, таких как JUNO[11], RENO-50 [12], ICAL [13], PINGU [14], и ORCA [15] где последние три проекта будут использовать атмосферные нейтрино для определения иерархии масс.

Величина нарушения зарядово-пространственной четности (CP) в осцилляциях нейтрино может быть охарактеризована разницей вероятностей осцилляции нейтрино между нейтринным и антинейтринным каналами [16,17]. Текущие данные, полученные в T2K [18], в сочетании с реакторным измерением θ_{13} , указывают на предпочтение $\delta_{cp} \sim -\pi/2$ (или, что эквивалентно, $\delta_{cp} \sim 3\pi/2$) для обеих иерархий масс. хотя статистическая значимость все еще невелика.

Интересно, что данные об атмосферных нейтрино Super-K также предпочитают аналогичные значения δ_{CP} с аналогичной статистической значимостью [20].

Если CP нарушается максимально ($|sin\delta_{CP}| \sim 1$), нарушение CP ($sin\delta_{CP} \neq 0$) может быть установлено на уровне $\sim (2-3)\sigma$ путем объединения будущих данных, поступающих от T2K и NOvA, а также данных, поступающих из реакторного измерения θ_{13} . В настоящее время проводится совместный анализ данных экспериментов T2K и NOvA.

Одной из основных целей T2K также является поиск стерильных компонент в исчезновении ν_μ путем наблюдения событий по каналу нейтрального тока (поскольку события нейтрального тока производятся всеми видами активных нейтрино, дефицит будет указывать на осцилляцию в стерильные нейтрино).

В Hyper-K параметры осцилляций нейтрино будут измеряться с использованием двух источников нейтрино, которые будут предоставлять комплементарную информацию. Будут использоваться как атмосферные нейтрино, где нейтринные осцилляции были впервые обнаружены Super-K, так и пучок нейтрино с длинной базой, где появление электронного нейтрино было впервые зарегистрировано T2K.

При суммарной мощности пучка протонов $1,3 \text{ МВт} \times 10^8 \text{ с}$ (соответствует $2,7 \times 10^{22}$ протонов на мишени от пучка протонов 30 ГэВ) со смещенным на 2,5 градуса пучком нейтрино, ожидается, что лептонная CP-фаза δ_{CP} может быть определена с точностью выше 23 градусов для всех возможных значений δ_{CP} , а нарушение CP может быть установлено со статистической значимостью более 3σ (5σ) для 76% (57%) области значений параметра δ_{CP} .

Hyper-K будет многоцелевым детектором нейтрино с богатой физической программой, которая направлена на решение некоторых из наиболее важных вопросов, с которыми сегодня сталкиваются физики. Исследования осцилляций от ускорительных, атмосферных и солнечных нейтрино позволят уточнить углы смешивания нейтрино и параметры разности квадратов масс и могут привести к первому наблюдению асимметрии в осцилляциях нейтрино и антинейтрино, возникающих из-за CP-нарушающей фазы, проливая свет на одно из самых многообещающих объяснений асимметрии вещества и антивещества во Вселенной. Поиск распадов протонов интересен для одного из ключевых принципов теории Великого Объединения. В случае близлежащей сверхновой Hyper-K будет наблюдать беспрецедентное количество нейтринных событий, предоставляя столь необходимые экспериментальные результаты исследователям, стремящимся понять механизм взрыва. Наконец, обнаружение астрофизических нейтрино из таких источников, как аннигиляция темной материи, выбросы гамма-всплесков и ветры пульсаров, могло бы еще больше расширить наше понимание некоторых из наиболее впечатляющих и наименее понятных явлений во Вселенной.

Эксперимент Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), ранее LBNE[21], представляет собой нейтринный эксперимент с 40 килотоннами жидкого аргона, который, по прогнозам, начнет собирать данные примерно в то же время, что и Hyper-K. Поскольку DUNE будет использовать другой материал мишени, чем Hyper-K (жидкий аргон, а не воду), могут быть выполнены многие дополнительные измерения, включая изучение распада нуклонов и обнаружение нейтрино сверхновых. Информация о сигнатуре нейтрино от сверхновых очень востребована, и Hyper-K и DUNE добавят данные к общей картине. Первичным каналом реакции для этих нейтрино в Hyper-K является канал обратного бета-распада, в котором будут участвовать только электронные антинейтрино. В DUNE

каналом реакции будет реакция заряженного тока на ^{40}Ar , которая измеряет электронные нейтрино. Взятые вместе, эти измерения смогут определить относительное содержание нейтрино по отношению к антинейтрино. Кроме того, DUNE сможет лучше определять некоторые особенности спектра нейтрино, в которых доминирует сигнал электронного нейтрино, например всплеск нейтронизации, который происходит в ранние времена, в то время как Нурег-К будет лучше измерять особенности, где есть сигнал антинейтрино, такие как фазы аккреции и охлаждения, которые происходят в более поздние времена. В связи с тем, что расстояние между ускорителем и детектором Нурег-К будет короче, чем аналогичное расстояние в эксперименте DUNE, эти два эксперимента будут иметь некоторую взаимодополняемость в информации, которую они могут извлечь из своих ускорительных программ. Более длинная база в эксперименте DUNE означает, что их измерения будут больше зависеть от влияния вещества, что придаст им большую чувствительность к иерархии масс. Более короткая базовая линия эксперимента Нурег-К означает меньшую чувствительность к влиянию материи, что должно привести к повышенной чувствительности к измерению фазы CP-нарушения.

Описание предлагаемого исследования

T2K («Токай то Камиока») - эксперимент по физике элементарных частиц, изучающий осцилляции ускорительных нейтрино (Рис.1). Эксперимент проводится в Японии. T2K был первым экспериментом, в котором наблюдалось появление электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино [22], он также обеспечил лучшее в мире измерение параметра осцилляций θ_{23} [23] и намек на значительную асимметрию вещества-антивещества в осцилляциях нейтрино [2]. Измерение асимметрии осцилляций нейтрино-антинейтрино может приблизить нас к объяснению эволюции нашей Вселенной, в которой преобладает материя.

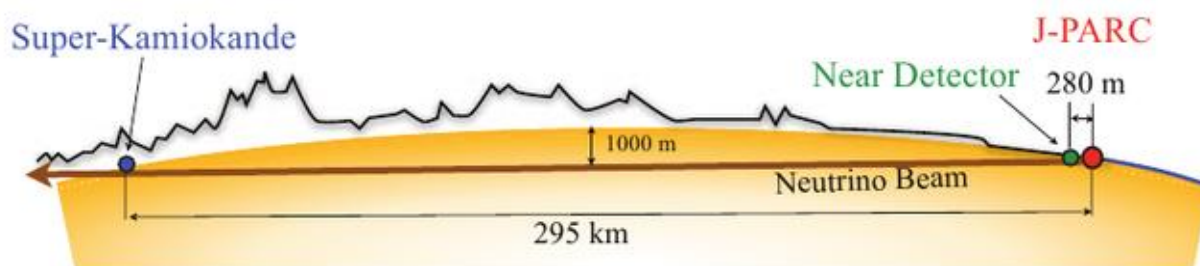


Рис. 1: Интенсивный пучок мюонных нейтрино производится на установке J-PARC (Японский исследовательский комплекс протонных ускорителей) в Токай на восточном побережье Японии. Пучок нейтрино направлен на дальний детектор Super-Kamiokande, расположенный на расстоянии 295 км, вблизи города Хида (префектура Гифу). Свойства и состав нейтринного потока сначала измеряются системой ближних детекторов (ND280), расположенной в 280 м от места генерации пучка в J-PARC, а затем снова в детекторе Супер-Камиоканде.

В эксперименте с нейтрино T2K-II будет накоплено 10×10^{21} протонов на мишень, что в 3 раза превышает текущую статистику. Это нацелено на наблюдение CP-нарушения на уровне 3σ или более высокой значимости, если CP-нарушение является максимальным. Дальнейшее увеличение статистики в 10 раз произойдет

с введением в строй детектора Hyper-Kamiokande, с увеличением массы дальнего детектора с 22,5 кт до более чем 200 кт [24].

Текущая конфигурация ND280 приводит к систематическим ошибкам в определении фазы CP- нарушения порядка 6% и задача состоит в снижении этого числа до ~ 4% для T2K-II [5] и до ~ 3% или ниже для Hyper-Kamiokande.

Мы планируем улучшить характеристики ND280, добавив новый высокогранулярный сцинтилляционный 3D детектор Super-FGD, состоящий из небольших пластиковых сцинтилляционных кубиков, считываемых волокнами WLS в трех ортогональных направлениях. Выше и ниже этого детектора расположены две время-проекционные камеры (High-Angle TPC) при атмосферном давлении. Эти три детектора образуют примерно куб со сторонами 2 м (рис. 2). Он расположен в передней по пучку части магнита ND280 и окружен шестью тонкими времяпролетными сцинтилляционными слоями. Эта конфигурация обеспечивает 4тп регистрацию мюонов, образующихся при взаимодействии нейтрино с ядрами. Super-FGD эффективно регистрирует заряженные частицы.

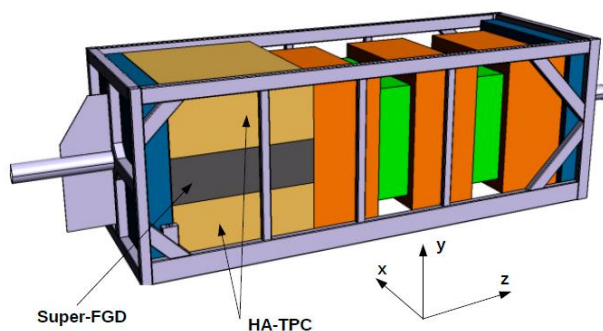


Рис. 2: CAD 3D модель модернизированного детектора ND280. В левой части будут установлены два High-Angle TPC (коричневые) со сцинтилляторным детектором Super-FGD (серый) в середине. В правой части – трековая система, состоящая из трех TPC (оранжевый) и двух FGD (зеленый), они остаются неизменными.

Детекторы TOF на этом графике не показаны. Пучок параллелен оси z, магнитное поле параллельно оси x.

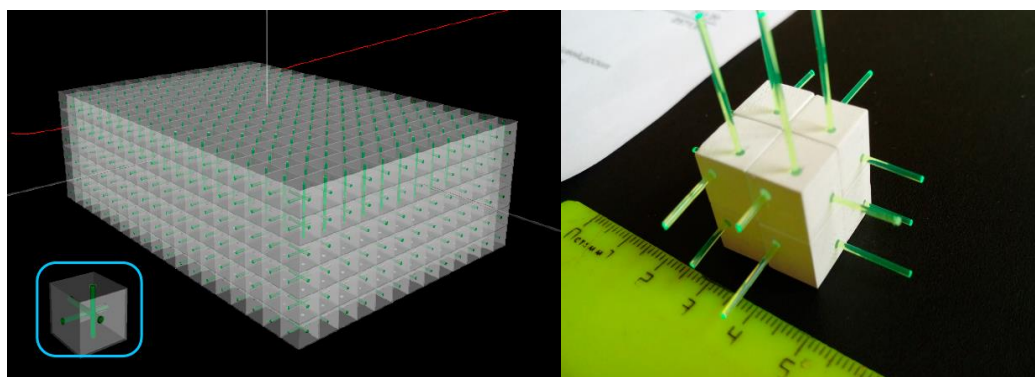


Рис. 3: Слева: схематический вид детектора Super-FGD. Справа: изображение небольшого прототипа Super-FGD

SuperFGD (рис. 3) - это новая идея мелкоячеистого полностью активного пластикового сцинтилляционного детектора, состоящего из множества оптически независимых кубиков размером 1 см. Сцинтиллятор представляет собой композит из полистирола, легированного 1,5% паратерфенила, и покрытого химическим отражателем толщиной ~ 50 мкм. Каждый кубик имеет три отверстия диаметром

1,5 мм, просверленных по осям X, Y и Z, через которые проходят волокна WLS. Полный детектор составляет около $2 \times 2 \times 0,6 \text{ м}^3$, состоит примерно из 2 миллионов кубиков и считывается при помощи $\sim 60\,000$ каналов электроники. Он имеет вдвое лучшее разрешение, чем существующий FGD, и обеспечивает трехмерную реконструкцию событий.

Для достижения точности порядка 4-5% в предсказании потоков нейтрино и антинейтрино для будущих экспериментов с нейтрино на ускорителях (таких как T2K-II, DUNE, T2HK и др.) необходимо измерить выходы адронов во взаимодействиях протон-ядро и пион-ядро с использованием адронных пучков (ЦЕРН). Данная работа [25] успешно выполняется на первом этапе нейтринного эксперимента с длинной базой T2K при активном участии группы физиков из ЛЯП ОИЯИ.

Мы планируем провести новый набор данных с точной копией длинной углеродной мишени T2K. Эти измерения имеют решающее значение для дальнейшего уменьшения неопределенностей нейтринного потока в T2K-II / НК.

Группа физиков ЛЯП принимает участие в

- сборе и анализе экспериментальных данных с использованием адронных пучков ЦЕРН;
- разработке программного обеспечения для обработки и анализа данных;
- подготовке научных публикаций.

Мы планируем подключиться к исследованиям, выполняемым коллаборацией T2K, цель которых - определить параметры осцилляций нейтрино, такие как $\sin^2\theta_{23}$, $\sin^2\theta_{13}$, Δm^2_{32} и δ_{CP} (хотя чувствительность T2K к $\sin^2\theta_{13}$ меньше, чем у реакторных экспериментов). В настоящее время существуют ограничения для углов θ_{12} и θ_{13} , а также для двух разностей масс Δm^2_{21} и Δm^2_{32} . Угол θ_{23} все еще имеет большую неопределенность, и пока неизвестно, имеет ли он значение $\pi/4$ (соответствующее максимальному смешиванию) или выше (ниже) этой величины. Еще один чрезвычайно важный параметр осцилляций - комплексная фаза δ_{CP} . Любое значение δ_{CP} , отличное от 0 или π , приведет к CP-нарушению в лептонном секторе, при этом $\pm \pi / 2$ представляет максимальное CP-нарушение. Остается еще одна задача - определение иерархии масс нейтрино (МН), которая может быть нормальной (NH) или инвертированной (IH). В дополнение к этим измерениям также исследуется согласованность матрицы смешивания Понтекорво – Маки – Накагава – Саката (PMNS).

Параметры осцилляций извлекаются из фитирования ожидаемого распределения событий к измерениям Super-Kamiokande (SK), в то время как данные от ND280 используются для точного предсказания спектра и числа событий в дальнем детекторе. Есть три набора систематических неопределенностей, которые используются для фитирования:

- 1) Неопределенности потока нейтрино. Поток нейтрино моделируется с помощью пакета моделирования FLUKA, а затем настраивается с учетом внешних данных из эксперимента по выходу адронов в ЦЕРНе для уменьшения погрешностей смоделированных взаимодействий адронов в графитовой мишени.
- 2) Систематические погрешности детектора, параметризованные для каждого детектора (ND280 или SK).
- 3) Неопределенности в сечении взаимодействия нейтрино с веществом детекторов. Модель взаимодействия нейтрино настроена на мировые данные с учетом нашего понимания теории взаимодействия нейтрино с ядром.

Данные и смоделированные наборы в ND280 классифицируются в соответствии с множественностью пионов в конечном состоянии, типом

нейтринного или антинейтринного пучка и мишенью, в которой произошло взаимодействие. Данные SK классифицируются аналогично данным ND280. События классифицируются по кратности и типу Черенковского кольца. T2K проверяет методы анализа и модель систематических ошибок с помощью моделирования. Альтернативные методы или настройки используются для создания дополнительных наборов событий, которые проходят процедуру осцилляционного анализа. Результаты сравниваются с номинальным моделированием. Такие исследования позволяют выявить расхождения и мотивировать улучшение метода. В случае значительного отклонения ошибка включается в систематическую погрешность метода.

Мы планируем участвовать в анализе данных T2K, полученных с помощью модернизированного детектора ND280, в разработке методов отбора событий и выполнении исследований различных типов систематических неопределенностей, чтобы лучше понять и уменьшить их. Эта деятельность подразумевает проведение Монте-Карло исследований и разработку программных инструментов для анализа, получение физических результатов, участие в процессе подготовки публикаций по T2K и в научных конференциях.

Вклад сотрудников ОИЯИ в Проект

Сотрудники ОИЯИ за прошедший период сумели внести весьма значимый вклад в Проект:

- 1) Проектирование, защита перед коллаборацией T2K и воплощение в «железе» системы оснастки для сборки активной мишени SFGD, которая включает в себя решетчатое основание и систему доступа сверху для обеспечения процедуры сборки мишени. Оборудование готовится к отправке в J-PARC через ИЯИ летом 2022 г.
- 2) Завершение разработки и воплощение в «железе» одного электронного блока в стандарте NIM для системы калибровки SFGD. Остальные 7 блоков, вероятно, необходимо будет собирать непосредственно в J-PARC.
- 3) Проведение исследования оптических наводок между соседними кубиками SFGD мишени. Доклады по этому материалу перед группой SFGD, на семинаре ЛЯП и сдача материалов в печать.
- 4) Уточнение систематических неопределенностей по восстановлению импульсов по пробегу в ближнем детекторе T2K, материал представлен в виде T2K Note. Расчет эффективностей спаривания реконструированных объектов в FGD, Escal и SMRD, готовится техническая нота с результатами исследования. Поиск «темных» фотонов на данных ближнего детектора установки T2K.
- 5) Измерения рождения адронов для улучшенного предсказания (анти)нейтринных потоков и более точных измерений параметров нейтринных осцилляций в T2K-II.

Более подробное описание проделанных работ представлено ниже.

Подтверждение существования темной материи имеет фундаментальное значение для космологии, астрофизики и физики элементарных частиц, и сейчас в этом направлении проводится множество экспериментов. Однако традиционные стратегии поиска менее чувствительны к легким кандидатам в темную материю с массами менее одного ГэВ, и поэтому важно рассмотреть альтернативные экспериментальные подходы к обнаружению темной материи в этом интервале масс. Показано, что эксперименты с фиксированной мишенью могут обеспечить значительную чувствительность к легкой темной материи (LDM), взаимодействующей с обычной материей через посредника, которым выступает «темный фотон» [26,27]. В этом подходе поток частиц темной материи создается в результате столкновений протонов с неподвижной мишенью с последующим обнаружением темной материи путем ее рассеяния в детекторе, расположенном ниже по потоку от мишени. Процессы упругого рассеяния LDM на нуклонах и электронах, квазиупругого рождения нейтрального пиона обеспечивают нуклонный, электронный и пионный каналы поиска.

Мы ставим своей целью оценить потенциал T2K в поиске легкой темной материи и выполнить исследование на данных. Поиск LDM может осуществляться как в ближнем так и в дальнем детекторах T2K. Поток LDM имеет большую интенсивность в ближнем детекторе. Для Super-K более длительное время полета кандидата в темную материю по сравнению с нейтрино позволяет разделить сигнал, вызванный темной материей, и фон от нейтрино.

Интересна также возможность набора данных в специальных сеансах с выключенными магнитами фокусировки вторичных частиц («horn off» mode). При использовании такого режима нейтринный фон, который представляет основную трудность в такого рода исследованиях, может быть значительно уменьшен. Мы планируем провести исследование и оценить возможные улучшения в поиске LDM на таких данных.

Нами было начато исследование по поиску LDM-кандидатов в электронном канале в детекторе ND280. При отборе мы ищем события с отрицательно заряженным треком, который бы начинался в одном из FGD и проходил через впередистоящий TPC. Трек должен обладать PID электрона. В других частях трекового детектора ND280 должны отсутствовать сигналы, используется вето на активность в них. Мы требуем, чтобы рассеяние электрона происходило строго вперед, косинус угла вылета электрона должен быть больше 0.99. Данное условие позволяет сильно уменьшить нейтринный фон.

Нами были проведены оценки эффективностей регистрации LDM-кандидатов при различных значениях их масс. Для этих исследований использовался BdNMC генератор рождения и рассеяния легкой темной материи [26]. MC события, полученные с помощью генераторов нейтринных взаимодействий с веществом NEUT и GENIE, использовались для оценки фона. Мы провели также оценку систематических ошибок от некоторых источников детекторной систематики.

Далее в 2022-2023 годах мы планируем оценить чувствительности данного поиска LDM-кандидатов при текущей доступной статистике ($\sim 2 \times 10^{21}$ POT), при ожидаемой статистике T2K-II эксперимента (10×10^{21} POT) и при проведении специальных сеансов с уменьшенной интенсивностью нейтринного пучка. При возможности улучшить пределы на существование LDM мы проведем исследование на данных или предложим коллаборации провести специальный набор данных для поиска LDM. Мы планируем также оценить перспективы T2K в поиске LDM-кандидатов в нуклонном и пионном каналах.

Наши исследования выполнялись с целью оценки систематических неопределенностей, связанных с вычислением импульса мюона (или протона) по пробегу в различных поддетекторах ND280. Импульс по пробегу вычислялся из длины трека и энергетических потерь частицы в соответствии с определенной гипотезой о типе частицы. Данное значение сравнивалось с импульсом, полученным из кривизны трека во время-проекционной камере (TPC) и проверялась согласованность экспериментальных данных и моделирования MC. Полученные результаты важны при определении систематической ошибки в исследованиях, использующих импульс по пробегу для треков при отсутствии надежной информации от TPC. Например, исследования мюонов, летящих назад или под большим углом по отношению к направлению пучка нейтрино.

Для исследований использовались данные, набранные детектором ND280 в ранах 2-9. В зависимости от различных условий пучка и детектора раны разбиваются на периоды. А именно, периоды определяются наличием или отсутствием воды в детекторе POD и прямым или обратным током в фокусирующих магнитах вторичных частиц (нейтринная или антинейтринная моды пучка). Используемый MC учитывал различие условий в разных ранах. Как данные, так и MC были получены при версии T2K софта 6T.

Для отбираемых событий мы требовали наличие у них метки качества в базе данных ND280. Мы отбирали события, в которых был найден трек в одном из TPC. Для восстановления трека сегменты TPC должны иметь более 18 хитов. Требовалось отсутствие других треков в детекторе. Поскольку точность импульса по пробегу ухудшается на краях детектора, мы определили уменьшенный рабочий объем для детекторов, в которых треки должны заканчиваться. Для треков с отрицательным зарядом требовалась PID мюона, с положительным зарядом — PID протона. В зависимости от знака заряда трека и топологии событий мы определили 10 категорий событий и получали результаты по ним отдельно.

Чтобы оценить возможные расхождения данных и MC, связанные с восстановленным по пробегу импульсом, мы строили распределения относительной разницы между импульсом, определенным по кривизне трека в TPC, и импульсом по пробегу. Затем сравнивали полученные распределения между данными и MC. При таком подходе импульс, восстановленный с помощью TPC, используется в качестве эталонного значения. Определялись характеристики распределений, такие как среднее, RMS, параметры фита специальной функцией. Данные значения представлялись в таблицах и заносились в файлы для вычисления соответствующей систематической ошибки. Результаты исследования были представлены на рабочих митингах и опубликованы в технической ноте T2K-TN-433.

Для оценки систематических погрешностей в исследованиях мюонов, летящих под большими углами в ND280, мы выполнили расчет эффективностей спаривания реконструированных объектов в FGD, Ecal и SMRD для данных и MC. Поскольку алгоритм восстановления треков сначала определяет сегменты треков в каждом отдельном детекторе FGD, Ecal и SMRD, а затем связывает их между собой, эффективность такого «спаривания» должна учитываться. Значения эффективностей могут отличаться для данных и MC, что служит источником систематической ошибки.

Для измерения эффективностей использовались высокоугловые треки, не попадающие в TPC, которые фактически останавливаются в объеме FGD. Мы требовали присутствие мишелевского электрона в FGD, чтобы определить такие треки. Полученные значения эффективностей заносились в специальные файлы для использования в различных анализах при вычислении данной систематической ошибки. Результаты исследования были представлены на

рабочих митингах Т2К и сейчас готовится техническая нота с результатами исследования.

Одна из сфер ответственности группы ОИЯИ - проектирование платформы и оборудования для сборки уникальной мишени SuperFGD. Перед ОИЯИ поставлена задача создать эту платформу и обеспечить процедуру сборки мишени в J-PARC перед ее установкой на место в эксперименте. Сборка мишени на этой специальной платформе должна состояться в 2022-2023 г.

Платформа SuperFGD (рис.4) предназначена для:

- сборки детектора SuperFGD на лесках на первом этапе, представляющим собой сборку детекторной матрицы, состоящей из сцинтилляционных кубиков размером 1 см³, расположенных слоями, размером 192x184 кубика и высотой 56 кубиков в соответствии с технологией сборки ;
- сборки детектора на втором этапе - установка оптических волокон, плат МРРС, системы калибровки и гибких кабелей для подключения системы регистрации;
- калибровка оптических каналов детектора и установка компонентов детектора;
- обслуживание детектора

Конструкция платформы и ее составные части на каждом этапе сборки обеспечивают беспрепятственный доступ к детектору со всех сторон и надежную фиксацию детектора в штатном пространственном положении. По своему применению платформа относится к объектам наземного обеспечения специального назначения и предназначена для использования в помещениях промышленного типа, лабораториях, капитальных жилых и других подобных помещениях.

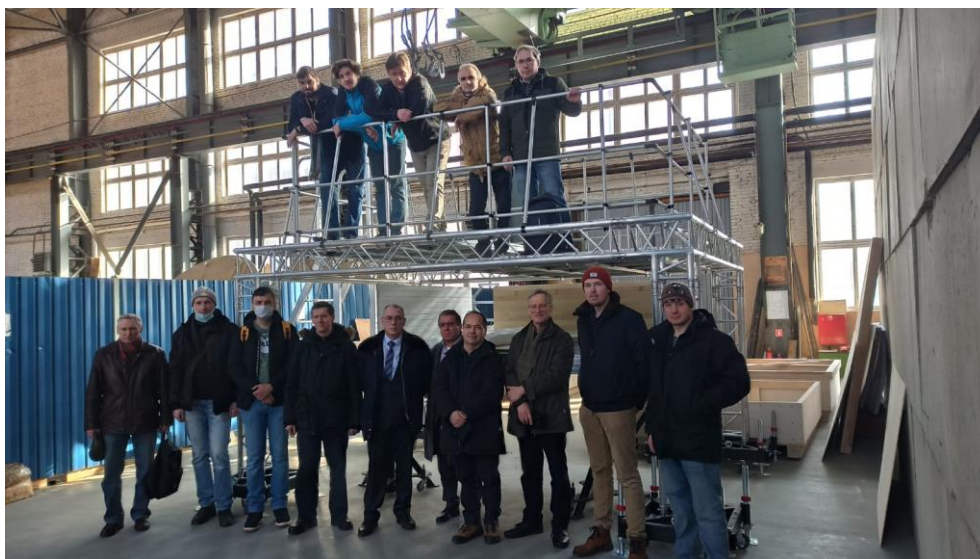


Рис.4 Общий вид платформы.

Мишень будет собрана на нижней решетке, начиная с нижней пластины и двух боковых стенок, образующих угол. Все стенки мишени (включая верхнюю и нижнюю панели) будут иметь отверстия с периодом 1 см для волокон. Платформа обеспечит процедуру сборки сначала на лесках и вертикальных спицах, которые будут заменены на оптические волокна после сборки полной матрицы

сцинтилляционных кубиков и установки двух других боковых стенок и верхней панели.

Наши конструкторы выполнили расчет прочности и жесткости основания для сборки мишени и платформы для доступа к мишени сверху по строительным нормам в сейсмических регионах Дальнего Востока (9 баллов, 0,65 g) и показали, что конструкция соответствует требованиям сейсмостойкости. Расчеты выполнены в соответствии со спектром частот землетрясений, предоставленным японскими коллегами.

Мы разрабатываем электронику для системы калибровки каналов SuperFGD с использованием световодных пластин с выемками (LGP). Система калибровки может равномерно распределять светодиодный свет сразу по нескольким каналам и используется для калибровки усиления SiPM и контроля стабильности. Модуль состоит из печатной платы с матрицей светодиодов, LGP, диффузора, контейнера и блока электроники. Концепция системы калибровки представлена на рис. 5.

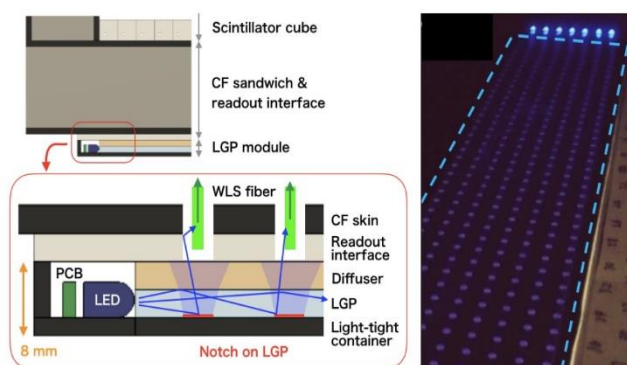


Рис. 5 Схема LGP (слева) и фото прототипа LGP (справа).

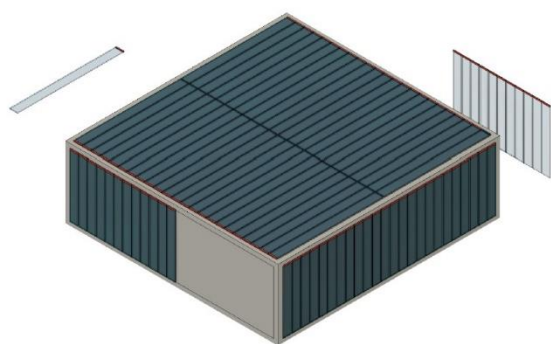


Рис. 6 Общий вид короба мишени и модулей LGP, прикрепленных к его поверхности.

На рис.8 показан общий вид ящика мишени и модулей LGP, прикрепленных к его поверхности. Система калибровки будет интегрирована в стенки мишени (рис. 6), и один модуль с 7 светодиодами должен покрывать 96x8 каналов SuperFGD. Всего необходимо 93 модуля LGP для полного покрытия детектора.

Для управления модулями LGP была разработана специальная электронная плата (рис. 7).

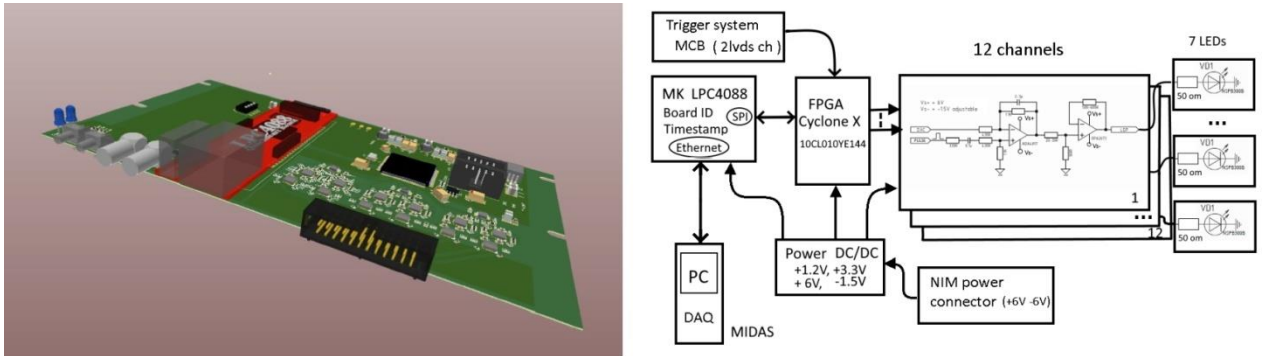


Рис.7 Специальная электронная плата для модулей LGP.

Плата состоит из микроконтроллера LPC4088, FPGA (Cyclone10 LE) и 12 каналов аналоговых драйверов. Разработанная схема позволяет принимать команды по протоколу UDP для управления длительностью и амплитудой импульсов калибровочного светодиода. На данный момент перед серийным производством проводится окончательная отладка схемы. После этого мы изготовим необходимое количество блоков. В начале 2023 года нам необходимо установить и настроить систему калибровки на SuperFGD.

Ближний детектор ND-280 эксперимента T2K включает SuperFGD размером около $2 \times 2 \times 0,6 \text{ м}^3$, состоящий из примерно 2 миллионов полистирольных кубических сцинтилляторов размером $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$. Каждый кубик изготовлен методом литья под давлением. Кубики имеют три сквозных отверстия, через которые проходят спектросмещающие волокна для сбора сигналов. Оптическая изоляция кубиков обеспечивается поверхностным слоем, образованным химическим травлением. Однако, такая поверхность не обеспечивает полной светоизоляции кубиков, поэтому важно контролировать прохождение света через поверхностный слой и его влияние на реконструкцию треков в детекторе.

Мы разработали способ исследования утечки света из кубика с помощью светодиода, который обеспечивает быстрый и надежный способ контролировать утечку света через поверхности кубиков. Для этого вспышка светодиода по оптоволокну передавалась в кубик через одно из трех отверстий. Длина волны светодиода составляет 375 нм, что перекрывает область спектра поглощения сцинтиллятора. Поглощенный свет переизлучается сцинтиллятором на более длинных волнах с пиком около 425 нм. Свет, излучаемый в кубике, захватывается оптическим волокном, сдвигающим длину волны, и регистрируется с помощью SiPM. В то же время сигнал считывается с соседнего кубика для измерения части света, которая попала в него через светоизолированные стенки двух кубиков, как показано на рис.8.

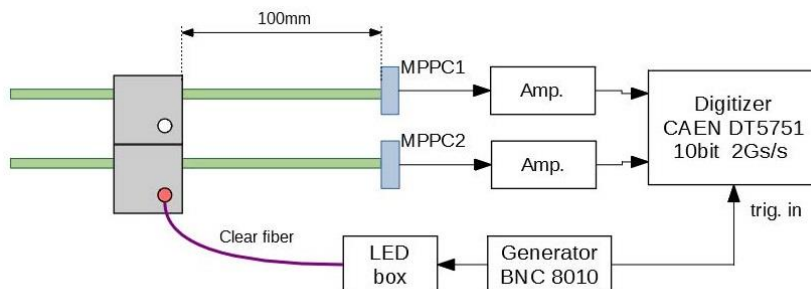


Рис.8 Схема съема сигналов

Мы сравнили утечки света при разной геометрии. На рис. 9 показаны два варианта. Здесь в одном случае свет проходил в кубик «0» и измерялась утечка света в кубик «1» (левый рисунок), в другом - засвечивался кубик «1» и измерялась утечка света в кубик «0» (правый рисунок). На рис. 10 показаны спектры сигналов от кубиков, полученные при засветке кубика «0». Левый спектр показывает сигнал от подсвеченного кубика «0», а правый - сигнал от кубика «1» за счет света, проходящего от кубика «0». В этом случае отношение среднего сигнала в кубике «1» к среднему сигналу в кубике «0» составляет 0,033. Это значение измеренной утечки света согласуется с данными, полученными нашими коллегами при измерениях на пучках ускорителей.

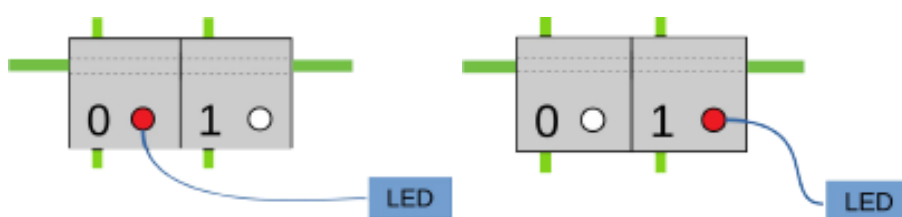


Рис.9 Схема теста кубиков

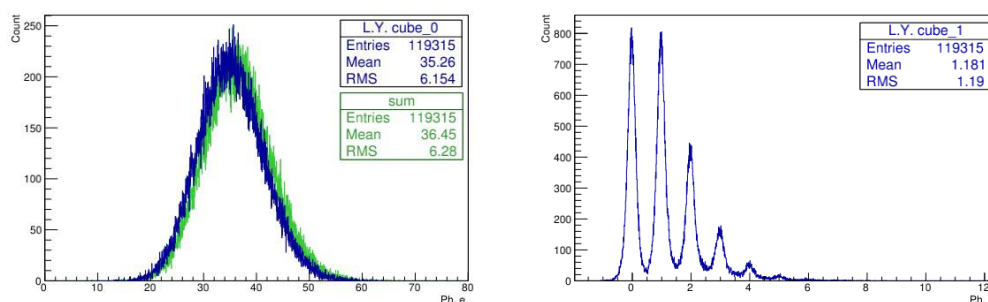


Рис.10 Спектры сигналов от кубиков, полученные при засветке кубика «0». Левый спектр показывает сигнал от подсвеченного кубика «0», а правый - сигнал от кубика «1».

Особо следует отметить разницу между двумя геометриями, показанными на рисунке 9. В случае засветки кубика «1» утечка света в кубик «0» заметно меньше, и отношение сигнала в «0» кубике к сигналу в кубике «1» равно 0,0187. Это связано с разным расстоянием от места засветки до границ кубиков и до оптических волокон, собирающих свет. Этот эффект демонстрирует зависимость утечек света в соседние кубики от расположения источника света и может быть использован для улучшения пространственной чувствительности при реконструкции треков заряженных частиц.

Обычно детекторы работают в стабильных условиях и больших колебаний температуры не ожидается. Тем не менее, в условиях транспортировки и хранения сцинтилляторов возможны разовые или циклические изменения температуры. Для изучения влияния повышенных температур на световыход и утечку света через стенки кубиков мы провели исследования поведения кубиков при повышении температуры. В результате исследований мы не обнаружили изменения световыхода и утечки света через стенки кубиков после циклического нагрева образцов до 60С.

По результатам выполненных исследований сделано несколько докладов на рабочих совещаниях группы ND280 коллаборации T2K, проведен семинар в ЛЯП, нами подготовлена статья и направлена в журнал.

Подчеркнем, что наша группа была приглашена к участию в эксперименте T2K лидерами коллаборации T2K и J-PARC для обеспечения проведения уникальной сборки и технического обслуживания трехмерной сцинтилляционной активной мишени нового типа. и участия в анализе данных по измерению фазы ср-нарушения. Мы тесно сотрудничаем с ИЯИ РАН по созданию SuperFGD, подписан соответствующий протокол о сотрудничестве.

Участники проекта имеют большой опыт работы со сцинтилляционными детекторами, включая создание части мюонной системы эксперимента CDF, тестовых модулей э.м. калориметра и вето-системы эксперимента Mu2e; измерение массы топ-кварка на CDF, моделирование для Mu2e, анализ данных эксперимента NA61 / SHINE, создание интерфейсных плат для калориметра Mu2e и электроники для других экспериментов.

С точки зрения позиций в эксперименте T2K отметим, что Борис Попов является руководителем группы по анализу данных для эксперимента T2K, полученных на графитовой мишени в ЦЕРНе, Юрий Давыдов – со-руководитель группы сборки мишени SuperFGD и член Technical Board группы по модернизации ближнего детектора ND280, Владимир Глаголев - член IB коллаборации T2K.

Над этим проектом у нас работают 5 молодых ученых и инженеров. Более того, в следующие года мы собираемся привлечь 2-3 молодых студентов/аспирантов к анализу данных T2K-II и дальнейшему развитию проекта НК.

Планы сотрудников ОИЯИ по Проекту на 2023 г.

Наши планы на 2023 год :

- 1) Сборка мишени SFGD на платформе и системе доступа сверху на лесках, затем - установка оптических волокон, оснащение мишени системой калибровки, тестирование каналов в процессе сборки, участие в инсталляции SFGD в шахте на нейтринный пучок. Участие в сменах по набору данных эксперимента T2K.
- 2) Создание 7-ми электронных блоков в стандарте NIM для оснащения всей системы калибровки SFGD мишени в J-PARC. Финальные тесты системы на мишени.
- 3) Поиск «темных» фотонов на данных ближнего детектора установки T2K. Подготовка предложения по проведению специальных наборов для поиска «темных» фотонов на обновленном ближнем детекторе T2K. Продолжение деятельности по исследованию и уменьшению систематических ошибок детектора.
- 4) Измерения рождения адронов для улучшенного предсказания (анти)нейтринных потоков. Калибровка и анализ этих данных; извлечение точных выходов адронов с поверхности копии мишени T2K.

Оценка кадровых ресурсов

Name	FTE	Positon	Work (apart common duties like shifts)
A.M. Artikov	0.5	Head of sector	SuperFGD cube tests
V.Yu. Baranov	1.0	Junior researcher	SuperFGD cube tests
A.V. Boikov	1.0	engineer	SuperFGD calibration system
A.O. Brazhnikov	0.3	design engineer	platform and tooling for SFGD assembly
Yu.I. Davydov	0.8	Head of department	SuperFGD assembly group leader
D.L. Demin	0.3	Head of sector	Tests at DLNP Linak-200
V.V. Glagolev	0.5	DLNP Deputy director	SuperFGD
N.V. Khomutov	0.3	scientist	Firmware development
N.V. Kirichkov	0.3	head of the design department	platform and tooling for SFGD assembly
V.I. Kiseeva	1.0	Young researcher	Monte Carlo, data analysis
A.O. Kolesnikov	0.8	scientist	SuperFGD tests
A.V. Krasnoperov	0.3	scientist	Software support
V.L. Malyshev	0.5	scientist	SuperFGD tests
B.A. Popov	1.0	Senior scientist	Data analyses
A.V. Shaikovskiy	0.4	design engineer category 1	platform and tooling for SFGD assembly
I.A. Suslov	1.0	Senior scientist	Monte Carlo, data analysis
V.V. Tereschenko	0.8	Head of group	SuperFGD calibration system
S.V. Tereschenko	0.6	Engineer	SuperFGD calibration system
I.I. Vasilyev	1.0	Junior researcher	SuperFGD cube tests
Total FTE	12.4		

Обоснование сметной стоимости

Для анализа данных и Монте-Карло моделирования в дополнение к существующим ресурсам требуется сервер данных, 2 компьютера с мониторами и ноутбуки. Ожидаемые затраты на 2023 г. составят 15 тыс. \$.

В 2023 г. для сборки SFGD мишени в J-PARC, сборки разработанных нами модулей калибровки данной мишени, проведения тестов электроники и участия в сеансе по набору данных понадобятся расходы на командировки сотрудников в размере 40 тыс \$.

ССВУ-анализ

Сильные стороны проекта, несомненно, заключаются в его фундаментальности и сосредоточении на недостающих модельных параметрах физики нейтрино -

измерении параметра смешивания нейтрино, ответственного за нарушение CP-четности и улучшении точности параметров смешивания нейтрино, θ_{23} and Δm_{32}^2 .

Эксперимент T2K-II основан на хорошо разработанной относительно простой методике восстановления Черенковского света в воде и оптимальных параметрах расстояния до дальнего детектора и энергии нейтрино для успешного и, вероятно, первого в мире результата измерения δ_{CP} .

Дальнейшие цели включают участие группы в проекте Hyper-Kamiokande нового поколения, который станет продолжением эксперимента T2K-II. Hyper-K, помимо изучения нейтрино от ускорителя, предоставит широкую программу физики нейтрино, в частности, обнаружение астрофизических нейтрино из таких источников, как аннигиляция темной материи, всплески гамма-излучения и ветры пульсаров, что может еще больше улучшить наше понимание некоторых из самых захватывающих и наименее изученных явлений во Вселенной.

Слабые стороны проекта - возможные задержки в реализации из-за пандемии.

Более длинная база в эксперименте DUNE означает, что их измерения будут больше зависеть от вклада вещества в осцилляции, что придаст им большую чувствительность к иерархии масс нейтрино.

Ожидается, что измерение иерархии масс может быть выполнено не только на НК, но и на комбинированном анализе будущих данных, поступающих из текущих экспериментов, таких как NOvA, T2K и реакторных экспериментов.

Ссылки

1. <http://www.jinr.ru/posts/68584/>
2. Nature 580 (2020) 7803, 339-344
3. K. Abe et al. [T2K Collaboration], arXiv:1607.08004 [hep-ex]
4. J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report e-Print: 1908.05141 [physics.ins-det]
5. T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report, CERN-SPSC-2019-001 (SPSC-TDR-006), e-Print: 1901.03750 [physics.ins-det]
6. de Gouvea, J. Jenkins, and B. Kayser, Phys. Rev. D71, 113009 (2005), arXiv:hep-ph/0503079 [hep-ph].
7. H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal, Phys. Rev. D72, 013009 (2005), arXiv:hep-ph/0503283 [hep-ph].
8. X. Guo et al. (Daya-Bay), (2007), arXiv:hep-ex/0701029.

9. J. K. Ahn et al. (RENO), (2010), arXiv:1003.1391 [hep-ex].
10. F. Ardellier et al. (Double Chooz), (2006), arXiv:hep-ex/0606025.
11. F. An et al. (JUNO), (2015), arXiv:1507.05613 [physics.ins-det].
12. S.-B. Kim, in Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2014) Conca Specchiulla, Otranto, Lecce, Italy, September 7-14, 2014 (2014) arXiv:1412.2199 [hep-ex].
13. S. Ahmed et al. (ICAL), (2015), arXiv:1505.07380 [physics.ins-det].
14. M. G. Aartsen et al. (IceCube PINGU), (2014), arXiv:1401.2046 [physics.ins-det].
15. U. F. Katz (KM3NeT), in Proceedings of the 15th International Workshop on Neutrino Telescopes (Neutel 2013) (2014) arXiv:1402.1022 [astro-ph.IM].
16. V. D. Barger, K. Whisnant, and R. J. N. Phillips, Phys. Rev. Lett. 45, 2084 (1980).
17. S. Pakvasa, Proceedings, 20th International Conference on High-Energy Physics, AIP Conf. Proc. 68, 1164 (1980).
18. K. Abe et al. (T2K), Phys. Rev. D 91, 072010 (2015), arXiv:1502.01550 [hep-ex].
19. M. Sanchez, "Results and Prospects from the NOvA Experiment," Talk presented at the XVII International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (NuFact15), Rio de Janeiro, Brazil, August. 2015.
20. R. Wendell (Super-Kamiokande), Proceedings, 26th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), AIP Conf. Proc. 1666, 100001 (2015), arXiv:1412.5234 [hep-ex].
21. <http://lbne.fnal.gov/>, LBNE collaboration.
22. T2K Collaboration (2011). "Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam". Physical Review Letters. 107 (4): 041801.
23. T2K Collaboration (2014). "Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam". Phys. Rev. Lett. 112 (18): 181801.
24. K. Abe et al., "Hyper-Kamiokande Design Report." KEK Preprint 2016-21, ICRR-Report-701-2016-1, 2 2016.
25. N. Abgrall et al. [NA61/SHINE Collaboration], Measurements of π^\pm , K^\pm and proton double differential yields from the surface of the T2K replica target for incoming 31 GeV/c protons with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS Eur. Phys. J. C 79 (2019) 2, 100; e-Print: 1808.04927 [hep-ex]

26. Patrick deNiverville, Chien-Yi Chen, Maxim Pospelov, and Adam Ritz. "Light dark matter in neutrino beams: Production modeling and scattering signatures at MiniBooNE, T2K, and ShiP". *Phys. Rev. D* 95, 035006 (2017)
27. A. A. Aguilar-Arevalo et al. (The MiniBooNE-DM Collaboration). "Dark matter search in nucleon, pion, and electron channels from a proton beam dump with MiniBooNE". *Phys. Rev. D* 98, 112004 (2018)

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
Проекта T2K-II / Hyper-Kamiokande**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.). Потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов		
			2023	2 год	3 год
Затраты	Основные узлы оборудования, работы по его обновлению, наладке и т.п.	15	15		
	Строительство/ремонт помещений				
	Материалы				
Необходимые ресурсы	Нормо-час Ресурсы – конструкторского бюро лаб.; – Опытного производства ОИЯИ; -опытного производства лаборатории; – ускорителя; – ЭВМ. Эксплуатационные расходы.	300ч	300ч		
		300ч	300ч		
Источники финансирования	Бюджетные средства	80	80		
	Внебюджетные средства				

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА

В.В.Глаголев Ю.И.Давыдов

Смета затрат по проекту T2K-II / Hyper-Kamiokande

Наименование статей затрат	Полная стоимость	2023	2 год	3 год
Прямые расходы на Проект				
1. Ускоритель, реактор	50 ч	50 ч		
2. ЭВМ				
3. Компьютерная связь				
4. Конструкторское бюро	300 ч	300 ч		
5. Опытное производство	300 ч	300 ч		
6. Материалы				
7. Оборудование	15 k\$	15 k\$		
8. Строительство/ремонт помещений				
9. Оплата НИР, выполняемых по договорам (коллорац. взнос)	25 k\$	25 k\$		
10. Командировочные расходы, в т.ч:	40 k\$	40 k\$		
а) в страны нерублевой зоны				
б) в города стран рублевой зоны				
в) по протоколам				
Итого по прямым расходам:	80 k\$	80 k\$		

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ

