

Отчет по проекту
«Участие ОИЯИ в эксперименте T2K-II»
за период с 01.2022 по 03.2023
Тема 02-2-1144-2021/2023

Вклад сотрудников ОИЯИ в Проект

Участие группы ОИЯИ в эксперименте T2K было одобрено на заседании ПКК по физике частиц в 2021 году и проект был открыт в 2022 году.

Сотрудники ОИЯИ в рамках проекта T2K/T2K-II внесли значимый вклад в эксперимент T2K:

- 1) На инженеров ОИЯИ легла полная ответственность за разработку и создание системы для сборки уникального детектора SFGD. Было проведено проектирование, защита перед коллаборацией T2K и воплощение в «железе» системы оснастки для сборки активной мишени SFGD в условиях высокой сейсмической активности. Оснастка включает в себя решетчатое основание и систему доступа сверху для обеспечения процедуры сборки мишени. Оборудование было отправлено в J-PARC летом 2022 г. и использовано для сборки SFGD.
- 2) Группа ОИЯИ разработала полную методику сборки SFGD в рабочем корпусе с использованием разработанной и изготовленной оснастки. Группа активно участвовала в сборке SFGD в J-PARC. SFGD собран в корпусе, установлены все спектросмещающие волокна и проведена проверка качества волокон после установки. В 2023 году будет проведено полное тестирование модернизированного ближнего детектора ND280 и его включение в эксперимент.
- 3) Группа ОИЯИ была ведущей в разработке системы калибровки SFGD. Нами разработан и изготовлен электронный блок в стандарте NIM для системы калибровки SFGD. Остальные 7 блоков собирались уже непосредственно в J-PARC

при нашем активном удаленном консультировании коллег. Разработка электроники и прототипа системы калибровки докладывались на конференции, опубликована журнальная статья.

- 4) Нами проведены исследования оптических наводок между соседними кубиками SFGD мишени. Эти результаты важны для дальнейшего моделирования распространения света в элементах SFGD и восстановления треков. Результаты докладывались на рабочих совещаниях по модернизации ближнего детектора ND280, на семинаре ЛЯП, опубликованы в журнале.
- 5) Уточнены систематические неопределенности по восстановлению импульсов по пробегу в ближнем детекторе T2K на существующих данных, материал представлен в виде T2K Note и будет использован в анализе данных с недостаточной информацией от время-проекционных камер.
- 6) Выполнен расчет эффективностей «сшивания» реконструированных объектов (треков) в FGD, Ecal и SMRD, подготовлена техническая нота с результатами исследования. Эти данные позволят уточнить систематические неоднозначности при восстановлении треков от частиц, проходящих в нескольких подсистемах ближнего детектора ND280.
- 7) Начаты работы по поиску кандидатов легкой темной материи в электронном канале на данных ближнего детектора ND280 установки T2K.
- 8) При активном участии сотрудников группы летом 2022 проведен сеанс набора данных с использованием точной копии мишени T2K: накоплено 180 миллионов событий! (для сравнения сейчас в анализе данных T2K используются данные NA61/SHINE, которые были накоплены в 2010 году (~10М событий)). Проведенные измерения выходов адронов служат 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 тёмной 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, Light dark matter), взаимодействующей с обычной материей через посредника, которым выступает «темный фотон». 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 впереди по потоку от мишени. Процессы упругого рассеяния LDM на нуклонах и электронах, квазиупругого рождения нейтрального пиона обеспечивают нуклонный, электронный и пионный каналы поиска.

Мы поставили своей целью оценить потенциал T2K в поиске легкой темной материи и выполнить исследование на уже набранных данных. Поиск LDM может осуществляться как в ближнем, так и в дальнем детекторах T2K. Поток LDM может иметь большую интенсивность в ближнем детекторе.

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 начато исследование по поиску LDM-кандидатов в электронном канале в детекторе ND280 (рис.1). При отборе мы ищем события с отрицательно заряженным треком, который бы начинался в одном из FGD и проходил через впереди стоящий 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 фон от нейтрино.

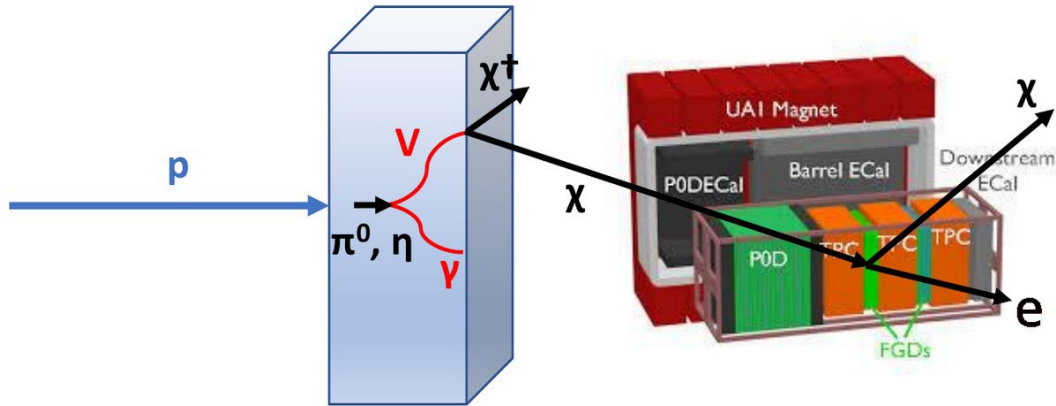


Рис.1. Поиск кандидатов в легкую темную материю в ближнем детекторе ND280 в электронном канале.

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. 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.

В 2023-2024 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. В качестве следующего шага мы планируем также оценить перспективы T2K в поиске LDM-кандидатов в нуклонном и пионном каналах.

Мы провели исследования для оценки систематических неопределенностей, связанных с вычислением импульса мюона (или протона) по пробегу в различных подсистемах 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 МС. Полученные результаты важны при определении систематической ошибки в исследованиях, использующих импульс по пробегу для треков при отсутствии надежной информации от TPC, например, при регистрации мюонов, летящих назад или под большим углом по отношению к направлению пучка нейтрино (рис.2).

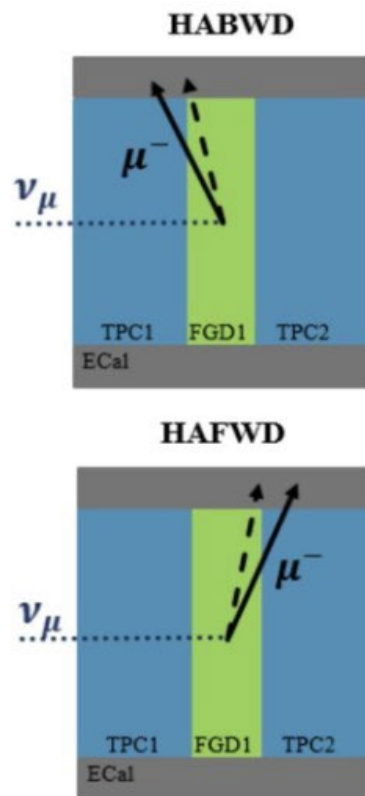


Рис.2. Определение импульса мюона по пробегу в FGD при отсутствии достаточной информации с TPC.

Для исследований использовались существующие данные, набранные детектором ND280 в наборах данных 2011-2019. В зависимости от различных условий пучка и детектора наборы данных разбиваются на периоды. А именно, периоды определяются наличием или отсутствием воды в детекторе ROD и прямым или обратным током в фокусирующих магнитах вторичных частиц (нейтринная или антинейтринная моды пучка). Используемый МонтеКарло моделирование учитывало реальные условия в разных наборах данных.

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 моделирования. 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 в анализе данных. Значения эффективностей могут отличаться для данных и MC, что служит источником систематической ошибки.

Для измерения эффективностей использовались высокоугловые треки, не попадающие в ТРС, 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.

Одной из сфер ответственности группы ОИЯИ было проектирование платформы и оборудования для сборки уникальной мишени SuperFGD SFGD в условиях высокой сейсмической активности. Перед группой ОИЯИ была 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 началась осенью 2022 года.

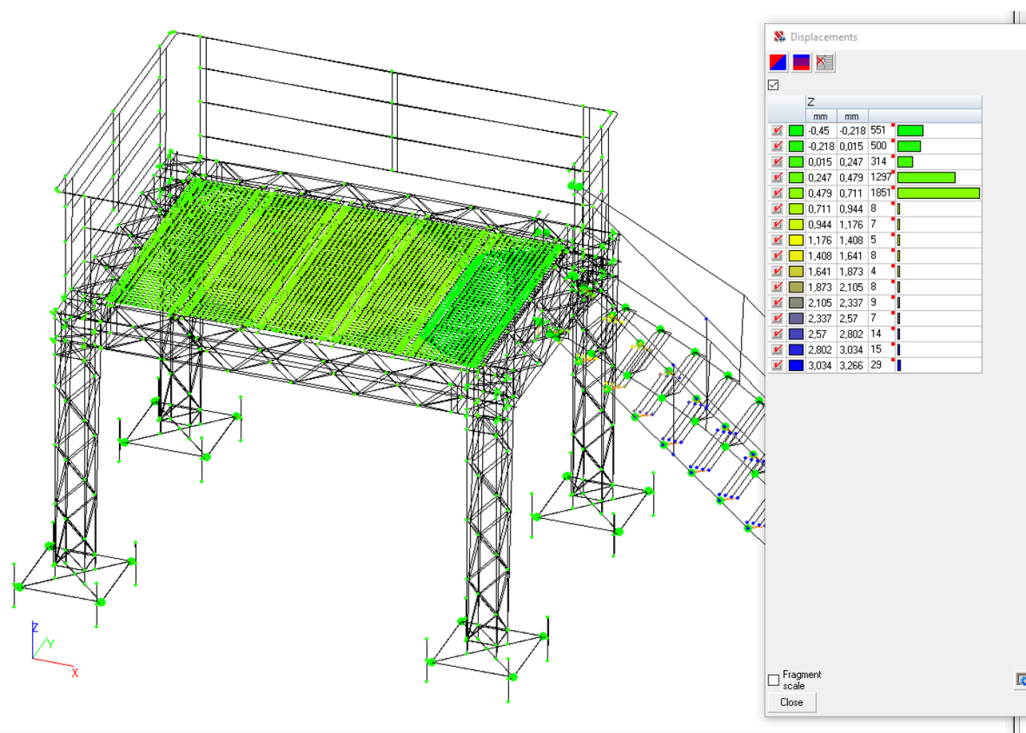


Рис. 3. Пример расчета амплитуды колебаний платформы в условиях динамической нагрузки.

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. На рис.3 в качестве примера показан один из многочисленных расчетов стабильности платформы – амплитуда колебаний в условиях динамической нагрузки.

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 - установки оптических волокон, плат МРРС, системы калибровки и гибких кабелей для подключения системы регистрации;
- облегчения калибровки оптических каналов детектора и установка компонентов детектора; обслуживания детектора.

Конструкция платформы и ее составные части на каждом этапе сборки мишени обеспечивали 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.

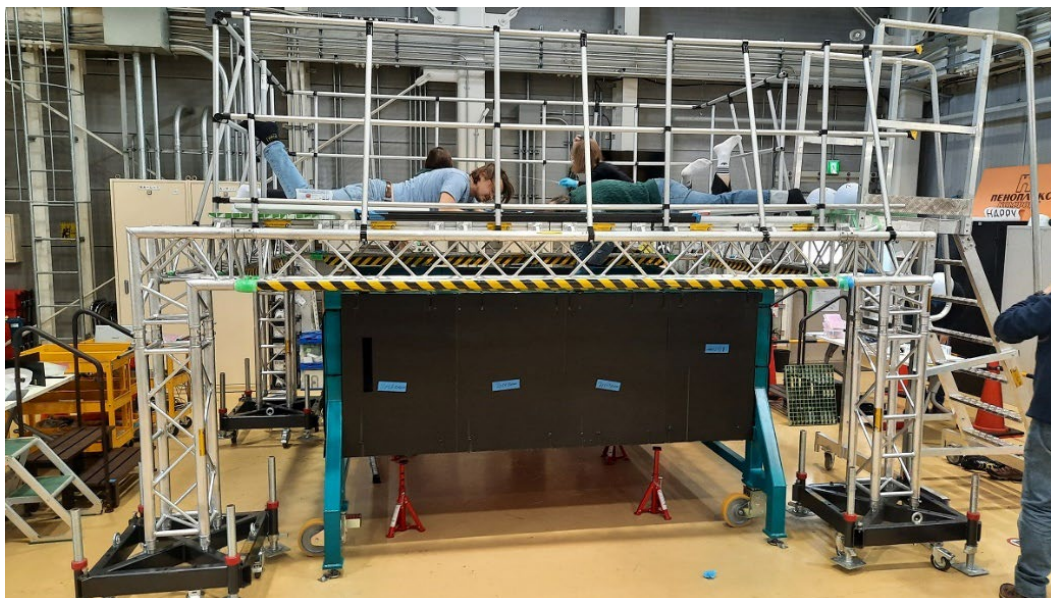


Рис.4. Использование платформы для установки вертикальных спектросмещающих волокон в SuperFGD в J-PARC.

Мишень вначале была собрана на нижней решетке, начиная с нижней пластины и двух боковых стенок, образующих угол. Все стенки мишени (включая верхнюю и нижнюю панели) имеют отверстия с периодом 1 см для волокон. Платформа обеспечила процедуру сборки сначала на лесках и вертикальных спицах, которые затем были заменены на оптические волокна после сборки полной матрицы сцинтилляционных кубиков и установки двух других боковых стенок и верхней панели.

Мы разработали электронику для системы калибровки каналов SuperFGD с использованием световодных пластин с выемками (LGP). Система калибровки равномерно распределяет светодиодный свет сразу по нескольким каналам и будет использоваться в процессе набора данных 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.

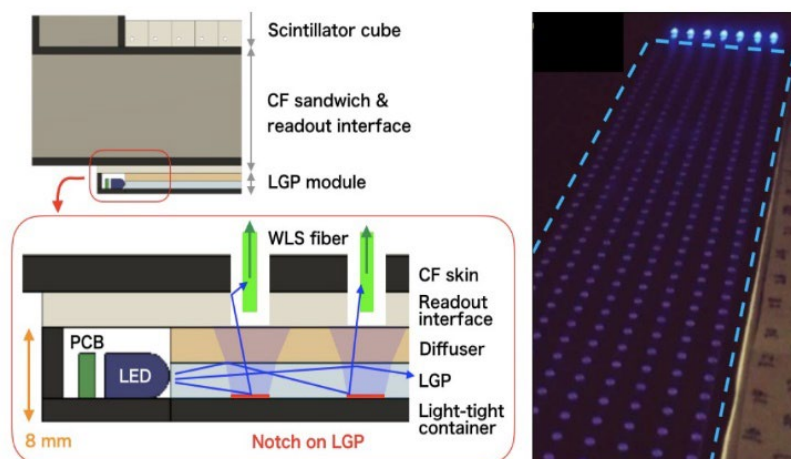


Рис. 5. Схема LGP (слева) и фото прототипа LGP (справа).

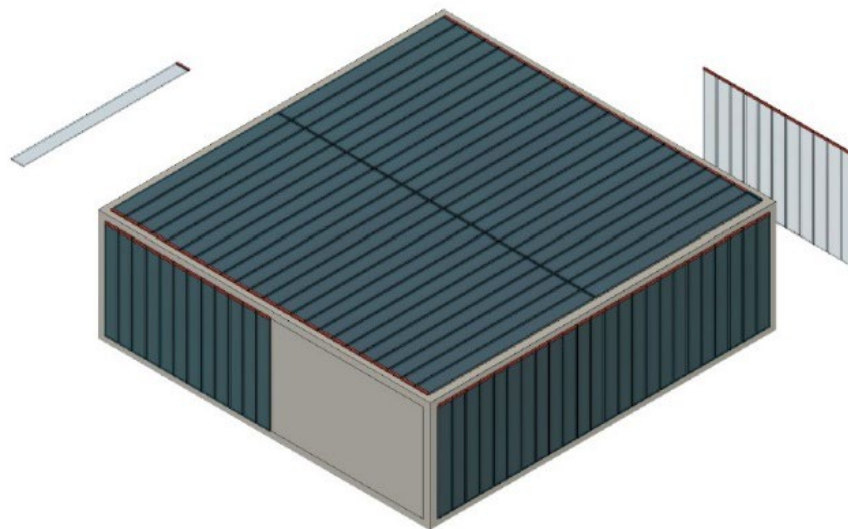


Рис. 6. Общий вид короба мишени и модулей LGP, прикрепленных к его поверхности.

На рис.6 показан общий вид короба мишени (дно показано сверху) и модулей LGP, прикрепленных к его поверхности. Система калибровки будет интегрирована в стенки

короба мишени, и один модуль с 7 светодиодами должен покрывать 96x8 каналов SuperFGD. Всего необходимо 93 модуля LGP для полного покрытия детектора.

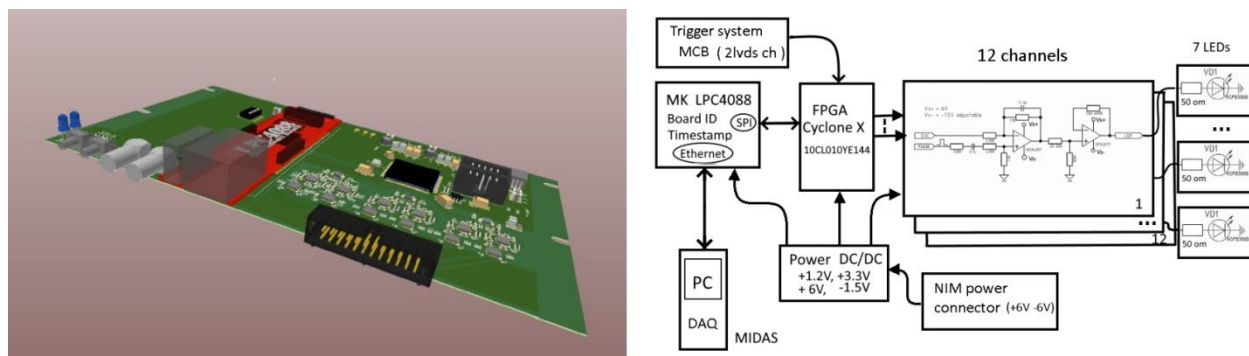


Рис.7. Специальная электронная плата для модулей LGP.

Для управления модулями LGP была разработана специальная электронная плата (рис. 7). 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. Перед серийным производством проведена окончательная отладка схемы и после этого изготовлено необходимое количество блоков. В марте 2023 года система калибровки SuperFGD была установлена на корпусе SFGD и в настоящее время проводится ее настройка и отладка.

Ближний детектор ND280 эксперимента T2K включает SuperFGD размером 192x184x56 см³, состоящий почти из 2 миллионов полистирольных кубических сцинтилляторов размером 1x1x1 см³. 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 знать 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.

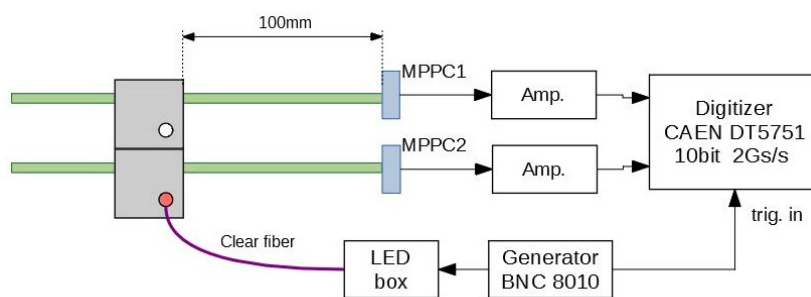


Рис.8. Схема съема сигналов с кубиков.

Мы сравнили утечки света при разной геометрии. На рис. 9 показаны два варианта. Здесь в одном случае свет направлялся 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.

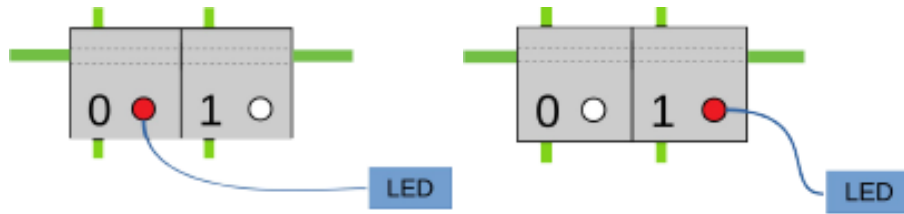


Рис.9. Схема подсветки при тестах утечек света из кубиков.

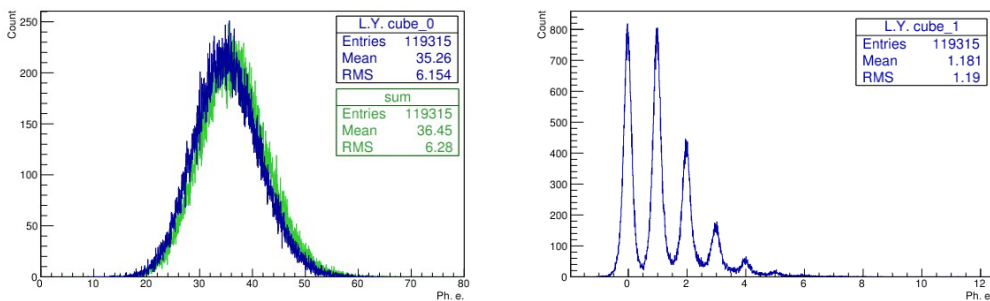


Рис.10. Спектры сигналов от кубиков, полученные при засветке кубика «0». Левый спектр показывает сигнал от подсвеченного кубика «0», а правый - сигнал от кубика «1».

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, опубликована статья в журнале.

Участники проекта имеют большой опыт моделирования и анализа данных, в частности в измерении массы топ-кварка на CDF, моделировании для Mu2e, анализе данных эксперимента NA61/SHINE. Кроме того, имеется обширный опыт создания систем сбора данных, работы со сцинтилляционными детекторами, включая создание части мюонной системы эксперимента CDF, электромагнитного калориметра и вето-системы эксперимента Mu2e, 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 ЦЕРН, Юрий Давыдов – со-руководитель группы сборки мишени SuperFGD, член Technical Board группы по модернизации ближнего детектора ND280 и член IB коллаборации T2K.

Полный список участников проекта с загрузкой каждого сотрудника приведен в таблице 1. Всего в проекте участвуют 20 человек, FTE составляет 12.2. Над этим проектом у нас в настоящее время работают 7 молодых ученых и инженеров. Более того, в следующие годы мы собираемся привлечь 2-3 молодых студентов/аспирантов к анализу данных T2K-II и к дальнейшему развитию проекта.

Планы работы на 2024-2026 годы:

- Участие в программе включения в эксперимент модернизированного детектора ND280, в инженерных наборах данных - 2023-2024
- Разработка системы сбора данных и контроля SFGD/ND280 на основе системы MIDAS - 2024
- Участие в наборах новых физических данных на T2K-II и их анализ - 2024-2026
- Продолжение работ по поиску легкой темной материи на данных ND280 и Super-Kamiokande - 2024-2026

- Разработка алгоритмов регистрации взаимодействий электронных нейтрино в SFGD и включение их в анализ данных с ближнего детектора SFGD - 2024.
- Разработка, унификация алгоритмов по реконструкции треков и получение физических параметров в случае единичных и множественных событий – 2024-2025.

Таблица 1. Оценка кадровых ресурсов.

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Артиков А.М.	НЭОМАП ЛЯП	нач.сектора	0.5
2.		Баранов В.Ю.	НЭОМАП ЛЯП	нс	1.0
3.		Бойков А.В.	НЭОМАП ЛЯП	мнс	0.6
4.		Давыдов Ю.И.	НЭОМАП ЛЯП	нач. отдела	0.7
5.		Глаголев В.В.	Рук-во ЛЯП	зам. дир.	0.5
6.		Хомутов Н.В.	НЭОМАП ЛЯП	нс	0.5
7.		Колесников А.О.	НЭОМАП ЛЯП	мнс	0.8
8.		Красноперов А.В.	ОНИРИ ЛЯП	снс	0.3
9.		Крылов В.А.	НЭОМАП ЛЯП	нс	0.4
10.		Попов Б.А.	ОНИРИ ЛЯП	снс	1.0
11.		Суслов И.А.	НЭОМАП ЛЯП	снс	1.0
12.		Терещенко В.В.	ОНИРИ ЛЯП	нач. сектора	0.7
13.		Васильев И.И.	НЭОМАП ЛЯП	нс	0.7
14.		Зимин И.Ю.	НЭОМАП ЛЯП	мнс	0.7
15.	инженеры	Атанова О.С.	НЭОМАП ЛЯП	инженер	0.7
16.		Бражников А.О.	КО ЛЯП	инженер	0.2
17.		Киричков Н.В.	КО ЛЯП	нач. КО	0.2
18.		Кисеева В.И.	НЭОМАП ЛЯП	инженер	1.0
19.		Шайковский А.В.	КО ЛЯП	инженер	0.2
20.		Терещенко С.В.	ОНИРИ ЛЯП	инженер	0.5
	Итого:				12.2

Список публикаций группы за время участия в проекте (первые две статьи – в журнале из второго квартеля):

1. I. Alekseev, T. Arihara, V. Baranov et al. *SuperFGD prototype time resolution studies*. *JINST* 18 (2023) P01012.
2. T2K Collaboration, K.Abe et al. *Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021*. *JINST* 17 (2022) 10, P10028.
3. Artikov, A., Baranov, V., Boikov, A. et al. *Investigation of Light Collection in Scintillation Cubes of the SFGD Detector*. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 19, #6, p.784–791 (2022).
4. T Arihara, A Boikov, Yu I Davydov, O Drapier, H Kakuno, T Matsubara, S Tereshchenko and V Tereshchenko. *Development of the in-situ Calibration System using LEDs and Light Guide Plates for the SuperFGD*. *Journal of Physics:Conference Series*, 2374(2022), 012118.

Руководитель проекта

Давыдов Ю.И.