

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17, 539.125

Рег. № 122112300056-3

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

М.В. Либанов

«28» декабря 2024 г.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

122112300056-3

**НОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРИНО ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ И
ПОДЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

(итоговый за 2024 год)

ФЦП


Руководитель НИР,
Старший научный сотрудник,
к.ф.-м.н.

А.О. Измайлов
«28» декабря 2024 г.

Москва 2024 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.О. Измайлов
(введение, раздел 1, 2, 3, 4, 5,
заклучение)

Исполнители:

Ст. науч. сотр.


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Е.П. Веретенкин
(введение, раздел 6)

Гл. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

В.Н. Гаврин
(введение, раздел 6, заключение)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

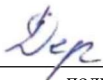
В.В. Горбачев
(раздел 6, заключение)

Лаборант


_____ 28.12.2024
подпись, дата

К.Ю. Горшанов
(раздел 1, заключение)

Мл. науч. сотр.


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.Е. Дергачева
(введение, раздел 1)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Н.В. Ершов
(раздел 1, 2, 4, 5)

Науч. сотр.


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Т.В. Ибрагимова
(раздел 6)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Ю.Г. Куденко
(введение, раздел 1, 2, 3, 4, 5)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Б.К. Лубсандоржиев
(введение, раздел 6, заключение)

Стажер-исследователь


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.Д. Луканов
(введение, раздел 6, заключение)

Мл. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.В. Мефодьев
(раздел 1)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

О.В. Минеев
(раздел 2, 3, 5)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Г.Я. Новикова
(введение, раздел 6, заключение)

Мл. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.Ю. Сидоренков
(раздел 6, заключение)

Стажер-исследователь


_____ 28.12.2024
подпись, дата

Н.А. Ушаков
(раздел 6)

Стажер-исследователь


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.Н. Фазлиахметов
(раздел 6)

Мл. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата


С.А. Федотов
(раздел 1, 4)

Науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 28.12.2024
подпись, дата


А.Н. Хотянцев
(раздел 1, 2, 4, 5)

Стажер-исследователь


_____ 28.12.2024
подпись, дата


А.С. Шварцман
(раздел 1, 2)

Науч. сотр.


_____ 28.12.2024
подпись, дата

А.А. Шихин
(раздел 6, заключение)

Нормоконтроль


_____ 28.12.2024
подпись, дата

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 49 с., 1 кн., 23 рис., 1 табл., 1 прил.

ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, ЭКСПЕРИМЕНТ Т2К/Т2К-II/ГИПЕР-КАМИОКАНДЕ, ЧЕРЕНКОВСКИЙ ДЕТЕКТОР, СЦИНТИЛЛЯТОР, БОЛЬШОЙ БАКСАНСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ЛАБ, СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА.

Основная цель НИР – разработка и создание новых детекторов для прецизионных исследований осцилляций нейтрино, проведение работ для нового низкофонового комплекса Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ) для изучения солнечных и гео-нейтрино с низким порогом регистрации и высоким энергетическим разрешением.

Закончена сборка обновленного ближнего детектора ND280Upgrade для проектов Т2К/Т2К–Гипер-Камиоканде. Ключевым элементом является модуль 3D SuperFGD. Проведен сеанс набора данных на нейтринном пучке. Сделана калибровка. Проведен анализ треков частиц, выполнена оценка световыходов и временного разрешения.

Продолжена отладка новой технологии изготовления сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS волокон. Создан стенд для измерений с использованием УФ-диода, использован микроскоп для контроля положения отверстий относительно сторон.

Для спектросмещающих пластин для внешней части Гипер-К выполнены: тесты по ускоренному старению, оптимизация положения ФЭУ-пластины, измерения темного сигнала, оценка радиоактивных примесей, сканирование различных ФЭУ. Финальная опция: ПММА пластины с добавкой РОРОР 50 мг/л. Создан стенд для быстрого тестирования пластин. Технологическая цепочка готова к массовому производству.

Сделаны подготовительные работы для производства модулей вето-системы промежуточного детектора проекта Т2К–Гипер-Камиоканде.

Для ББНТ разработана технологическая схема установки газовой продувки жидкого сцинтиллятора. Проведены работы по размещению и монтажу оборудования в БНО ИЯИ РАН для установки вакуумной дистилляции ЛАБа. Разрабатывалась методика измерения содержания радиоактивных примесей в сцинтилляторе на уровне 10^{-16} г/г для U и Th. Создана новая измерительная установка для исследования процессов ослабления сцинтилляционного излучения в жидких сцинтилляторах на основе ЛАБа.

В ИЯИ РАН продолжено развитие экспериментальной базы для подготовки проектов мирового уровня по получению фундаментальных результатов в физике нейтрино, решения задач на стыке физики частиц, космологии, астрофизики и геофизики.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/Гипер-Камиоканде	11
2. Работка новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон.....	17
3. Разработка внешнего детектора для нового водного черенковского комплекса Гипер-Камиоканде и прототипа детекторов для вето системы промежуточного детектора проекта ..	22
4. Проведение измерений радиоактивных свойств элементов для новых детекторов нейтрино	32
5. Изучение параметров ФЭУ для внешнего черенковского детектора Гипер-Камиоканде ..	35
6. Разработка системы очистки жидкого сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ)	40
6.1. Изготовление и проведение испытаний установки газовой продувки сцинтиллятора.....	40
6.2. Установка вакуумной дистилляции ЛАБа производительностью 100 л/час	40
6.3. Разработка методики измерения содержания радиоактивных примесей в сцинтилляторе на уровне 10^{-16} г/г для U и Th на прототипе детектора.....	41
6.4. Установка для измерения длины ослабления света в жидких сцинтилляторах	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.	49

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/Гипер-Камиоканде».

В рамках выполнения Госзадания будет разработан, создан и запущен новый высокосегментированный детектор нейтрино 3D SuperFGD.

Основная цель – модернизация ближнего детекторного комплекса ND280→ND280Upgrade ускорительного нейтринного осцилляционного эксперимента T2K (JPARC, Токай, Камиока, Япония): заменить бóльшую часть детектора нейтральных пионов ROD на активную мишень для нейтринных взаимодействий 3D SuperFGD, окруженную двумя горизонтальными время-проекционными камерами НТРС и временными детекторами пробега TOF. Новая структура позволит эффективно регистрировать продукты реакций нейтрино в широком диапазоне фазового пространства, существенно снизить порог регистрации, улучшить временное разрешение – получить новые уникальные данные по взаимодействиям нейтрино с веществом в области энергий ~ 1 ГэВ в различных каналах реакций. В итоге ожидается существенное снижение систематических ошибок, связанных с описанием взаимодействия нейтрино с веществом. Последние во многом определяют точность измерения параметров осцилляций и чувствительность к поиску CP нарушения в лептонном (нейтринном) секторе при увеличении статистики экспериментов.

Центральным элементом обновленного ближнего детектора является модуль 3D СуперFGD. Детектор состоит из 2-х миллионов сцинтилляционных кубиков, каждый объемом в 1 см^3 , с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон. Технология изготовления таких сцинтилляционных детекторов разработана в результате совместной работы ИЯИ РАН с ООО «Унипласт» (г. Владимир). ND280Upgrade с модулем СуперFGD будет использован для дальнейшего набора данных в T2K, а также в будущем проекте T2K-Гипер-Камиоканде.

2. Задача «Работка и применение на практике новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон».

В рамках выполнения Госзадания будет разработана новая технология прецизионного изготовления активных элементов для детекторов нейтрино на основе пластиковых сцинтилляторов со спектросмещающими волокнами.

Разработанная и реализованная силами ИЯИ РАН идея создания высокоточных активных 3D детекторов нейтрино на основе пластиковых сцинтилляционных элементов с тремя ортогональными WLS волокнами для светосбора представляет значительный интерес для будущих нейтринных проектов: T2K–Гипер-Камиоканде, DUNE. Создание и сборка

детекторов большого объема требует масштабирования и дальнейшего совершенствования технологии. Так, кубики из полистирола изготавливаются методом литья под давлением, далее наносится отражатель путем вытравливания поверхности химическим агентом, затем производится сверление отверстий для волокон. Сверление – трудоемкий процесс, который дополнительно приводит к ограничению точности, требуемой для геометрии отверстий. В новой технологии планируется использовать специальную высокоточную пресс-форму, которая даст возможность изготавливать сцинтилляционные элементы сразу с тремя прецизионными ортогональными отверстиями (3D геометрия). Применение полиуретановых заглушек, чувствительных к температурным режимам, обеспечит защиту отверстий при нанесении отражателя. Новая технология позволит значительно повысить точность изготовления элементов, улучшить сцинтилляционные параметры, упростить и ускорить массовое производство 3D сегментированных нейтринных детекторов, обеспечить возможность дальнейшей сборки активных детекторов большого объема.

3. Задача «Разработка внешнего детектора нового водного черенковского детектора проекта Гипер-Камиоканде и вето-детекторов для промежуточного комплекса проекта».

В рамках выполнения Госзадания будет разработан внешний детектор для водного черенковского комплекса Гипер-Камиоканде, а также вето-счетчики для промежуточного детектора проекта Т2К-Гипер-Камиоканде.

Прецизионное изучение смешивания нейтрино, поиск наличия CP/CPT нарушения в лептонном секторе, определение иерархии нейтринных масс – решение этих фундаментальных вопросов требует проведения экспериментов нового поколения. Особая роль отводится ускорительным экспериментам с длинной базой с пучками мюонных (анти)нейтрино высокой интенсивности и чистоты, а также комплексом ближних и дальним детектором большого объема. В настоящее время ведется подготовка двух проектов: эксперимент DUNE (США), а также проект Гипер-Камиоканде (Япония) на пучке Т2К. Именно в них планируется решить вопрос (чувствительность на уровне открытия) о наличии CP нарушения в осцилляциях нейтрино.

Одна из основных целей НИР – разработка детектора Гипер-Камиоканде, водного черенковского детектора (самого) большого (в мире) объема: Супер-Камиоканде 50 килотонн → Гипер-Камиоканде 258 килотонн. Физическая программа включает исследование ускорительных, солнечных, атмосферных, космических нейтрино, а также поиск распада протона. ИЯИ РАН участвует в создании модулей светосбора для внешнего детектора Гипер-К. Будут использованы ФЭУ, окруженные спектросмещающими WLS пластинами. Пластины позволяют существенно повысить эффективность регистрации

светового сигнала. Предложено использование отечественных пластин на основе ПММА. В рамках НИР будут исследованы и выбраны: состав добавок, геометрия пластин, дополнительные отражатели, разработана необходимая механика. Будут детально изучены характеристики пластин, проведены измерения с различными длинами волн и черенковским светом, разработана и введена в эксплуатацию технологическая линия массового производства и тестирования спектросмещающих пластин.

В эксперименте Т2К–Гипер-К планируется создание промежуточного (1 км от протонной мишени) водного черенковского детектора массой около 1 килотонны. Комбинация данных магнитного трекового ND280Upgrade и промежуточного детектора позволит существенно снизить систематические погрешности осцилляционных измерений. Группа ИЯИ РАН занимается разработкой вето-детекторов заряженных частиц в модулях, состоящих из 19 ФЭУ диаметром 80 мм. Вето-система необходима для подавления фона от космических мюонов. Предлагается использовать две пластины из экструдированного полистирола, которые собираются в конечный счетчик круглой формы: относительно простой и дешевый детектор с одним WLS волокном, вклеенным в изогнутую канавку в сцинтилляторе, и лавинным фотодиодом для светосбора. Необходимо показать возможность эффективной регистрации частиц по всей поверхности детектора. В дальнейшем, по мере развития проекта, разработать механику вето-модулей, создать, настроить и запустить линию массового производства счетчиков.

4. Задача «Проведение измерений радиоактивных свойств элементов для новых детекторов нейтрино».

В рамках выполнения Задания будут измерены радиоактивные свойства элементов детекторов для будущих нейтринных проектов.

Проведение прецизионных исследований, успешное выполнение научной программы экспериментов требует детального учета и снижения возможных источников фона. При разработке детекторов необходимо контролировать содержание радиоактивных изотопов в используемом оборудовании. В рамках работ по новому проекту Гипер-Камиоканде будут проведены измерения радиоактивных примесей в спектросмещающих пластинах, эти пластины будут использованы в модулях светосбора во внешнем детекторе эксперимента. В дальнейшем также планируются исследования других компонентов модулей: отражателей, элементов механики, ФЭУ. Оценку примесей необходимо проводить в условиях, соответствующих низкому уровню естественной радиоактивности. Измерения будут выполнены в БНО ИЯИ РАН, где есть низкофоновые камеры с высоким уровнем защиты и чувствительными германиевыми полупроводниковыми детекторами для проведения прецизионных тестов. Общая задача стоит даже более широко: наладить сотрудничество с

Баксанской нейтринной обсерваторией по контролю «радиоактивной чистоты» элементов, используемых в нейтринных детекторах ускорительных экспериментов, что несомненно актуально для подготовки будущих проектов, где требования существенного снижения фоновых процессов играют достаточно важную роль.

5. Задача «Изучение параметров ФЭУ для внешнего черенковского детектора Гипер-Камиоканде».

В рамках выполнения Задания будут изучены параметры 80 мм ФЭУ для внешнего черенковского детектора Гипер-Камиоканде.

Общая цель НИР – достижение эффективной регистрации света в детекторе Гипер-Камиоканде при использовании ФЭУ в комбинации со спектросмещающими пластинами, обеспечение низких значений темнового сигнала, стабильной работы фотодетекторов на протяжении длительного времени набора статистики (в течение 20 лет). Физический анализ данных, настройка моделирования отклика детектора требуют хорошего понимания аспектов работы фотоумножителей. Задачей настоящих исследований является детальное изучение параметров 80 мм ФЭУ для внешнего детектора Гипер-К: квантовой эффективности фотокатода, коэффициентов усиления, однородности фотокатода, темнового сигнала, временного и амплитудного разрешения одноэлектронного пика, радиоактивности материалов, стабильности параметров ФЭУ во времени. Исследования проводятся различными участниками проекта Гипер-Камиоканде, в том числе группой ИЯИ РАН. Для Института работа непосредственно связана с задачами по разработке модулей ФЭУ+спектросмещающая пластина. Исследуются два основных кандидата ФЭУ для нужд внешнего детектора: R14374 Hamamatsu (Япония) и NNVT N-2031 (Китай), необходимо выполнить обширный набор исследований на большой выборке приборов, чтобы определиться с наиболее подходящей опцией ФЭУ.

6. Задача «Разработка системы очистки жидкого сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ)».

В качестве сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ) планируется использовать жидкий органический сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола (ЛАБ). При этом сцинтиллятор должен обладать хорошими оптическими характеристиками (длина поглощения света при 420 нм не менее 20 м) и низким содержанием радиоактивных примесей, таких как ^{238}U и ^{232}Th на уровне менее 1×10^{-17} г/г и ^{40}K менее, чем 1×10^{-18} г/г, а также радиоактивных газов Ar, Kr, Rn и т.д. Промышленно изготавливаемый ЛАБ не обладает необходимыми характеристиками, и достижение требуемых свойств возможно только с использованием комплексной системы

очистки, включающей ультрафильтрацию, жидкостную экстракцию, сорбционную очистку, дистилляцию и газовую продувку.

Разработанные и созданные в ходе НИР системы и методики необходимы для проведения подготовительных работ с целью создания нового низкорогового низкофонового сцинтилляционного детекторного комплекса ББНТ, а также для создания необходимой инфраструктуры для функционирования прототипов ББНТ.

1. Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/Гипер-Камиоканде

В 2024 году закончена модернизация ближнего детектора эксперимента T2K (Япония): ND280→ND280Upgrade (рисунок 1).

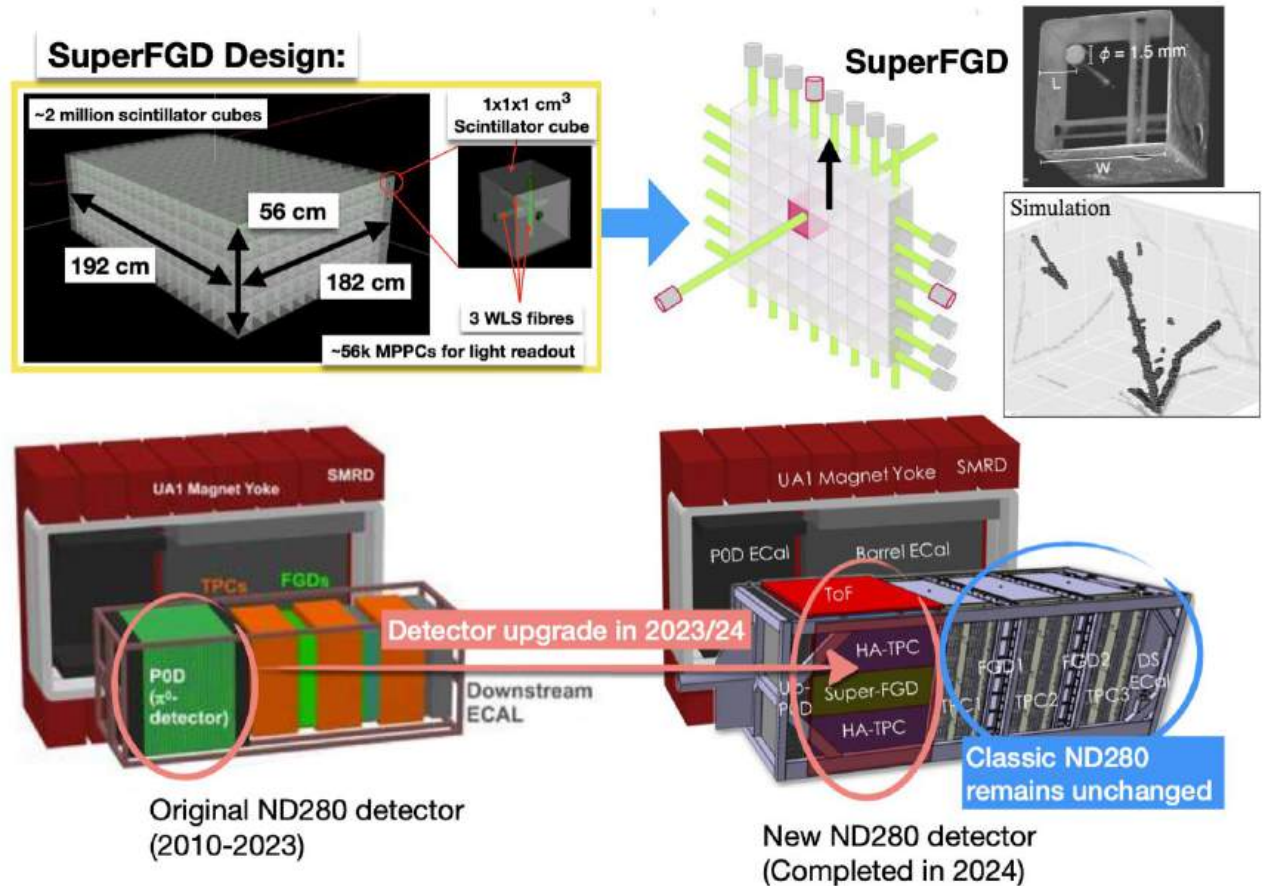


Рисунок 1 – Обновленный ближний детектор ND280Upgrade T2K и детектор 3D СуперFGD. Вверху – схема СуперFGD, фотография кубика с отверстиями без отражателя, пример восстановленного нейтринного события в детекторе. Внизу – общая схема обновленной конфигурации ND280Upgrade ближнего детектора T2K

Центральным элементом является новый уникальный модуль 3D SuperFGD (СуперFGD). Разработка этого сцинтилляционного сегментированного нейтринного детектора велась в ИЯИ РАН в течение шести лет, существенную часть работ удалось выполнить в рамках настоящего Задания. ND280Upgrade будет работать в составе проектов T2K и T2K–Гипер-Камиоканде, экспериментов по прецизионному изучению параметров смешивания нейтрино на ускорителях.

Детектор 3D SuperFGD представляет собой сборку из примерно 2-х миллионов активных элементов, сцинтилляционных кубиков, каждый объемом 1 кубический сантиметр. Кубик имеет три ортогональные отверстия для размещения спектросмещающих WLS (Kuraray Y11) волокон. Съем сигнала осуществляется с одной стороны волокна с помощью

кремниевых мультипиксельных фотодетекторов Hamamatsu MPPC (Япония, модель S13360-1325PE), вторая сторона покрыта отражателем. Идея детектора предложена ИЯИ РАН. Разработка дизайна детектора, последующее изготовление и тестирование всех активных элементов СуперFGD выполнены силами Института. Технология изготовления сцинтилляционных кубиков была разработана и успешно реализована в результате совместной работы ИЯИ РАН с ООО «Унипласт» (г. Владимир). Кубики изготавливаются методом литья под давлением. Применяется сцинтиллятор на основе полистирола с добавлением 1,5% паратерфенила (РТР) и 0,01% 1,4-бис(трихлорметил)бензола (РОРОР). Общая масса детектора СуперFGD около 2 тонн. В детекторе используются 56000 каналов.

В 2024 были протестированы и установлены все недостающие модули электроники СуперFGD, что обеспечило чтение сигнала с трех волокон для всего детектора. Ранее во время первых пробных сеансов съема сигнала с трех оптоволокон был возможен для примерно 75% детектора, для остальных 25% светосбор осуществляется с двух волокон. В детекторе используется электроника на основе чипов CITIROC. Число «проблемных» каналов в детекторе после сборки (вся система: волокна, фотоприемники, контакты, электроника) составило 27 из ≈ 56000 , то есть 0,05% – очень хороший результат для технологически сложного детектора, сборка которого потребовала чрезвычайной аккуратности и множества человеко-часов.

В июне 2024 года проведен сеанс набора данных на нейтринном пучке J-PARC, впервые использовался ND280Upgrade в своей полной конфигурации (рисунок 2). Также набиралась статистика с триггером космических частиц и калибровочным триггером СуперFGD. В СуперFGD применяется система калибровки с использованием LED-диодов и диффузных пластин для распределения света, световой сигнал для калибровки требуется вследствие низкого шумового сигнала новых MPPC, а также особенностей используемой электроники на основе чипов CITIROC («обрезание» первого фотоэлектронного пика). Для СуперFGD выполнена настройка, отладка и расширена функциональность системы «медленного» контроля (slow control) детектора: установка и контроль напряжения и тока (модули электроники, фотодиоды), мониторинг температуры, управление системой калибровки детектора на LED-диодах. Обновлена прошивка чипов электроники, что позволило существенно снизить количество сбоев и обеспечить стабильность работы. Усовершенствован алгоритм распаковки данных СуперFGD, а также соответствующий код интегрирован в общий пакет программ ND280 для обработки данных.

June 2024 Run

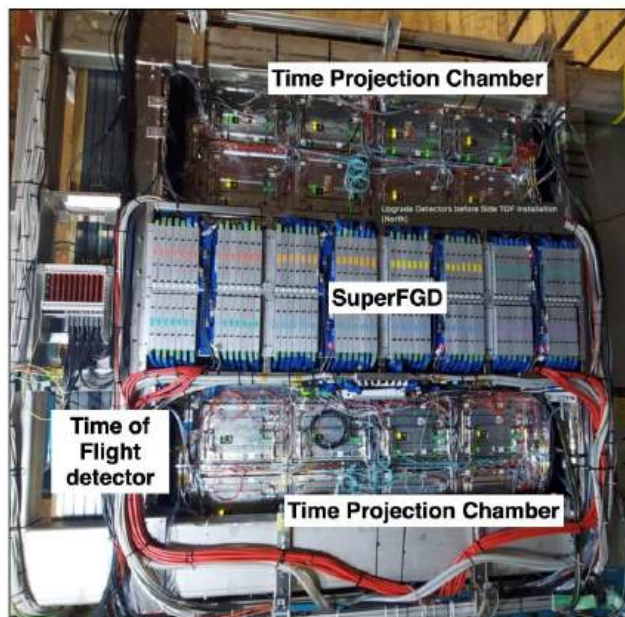
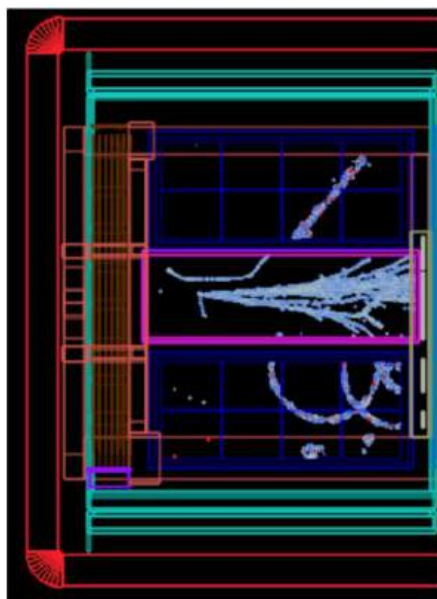


Рисунок 2 – Модули ND280Upgrade T2K, установленные в магнит UA1 детектора. SuperFGD, две горизонтальные камеры TPC, панели детекторов времени-пролета TOF. Слева: нейтринное событие в детекторе. Данные нейтринного пучка, июнь 2024 года

Сделана калибровка всех активных элементов детектора СуперFGD с применением LED системы и с помощью треков, соответствующих триггеру космических мюонов. Определены параметры для оценки световых выходов каналов (рисунок 3): нижний порог электроники, эффективные коэффициенты усиления для каналов с высоким и низким усилением сигнала (используются для расширения динамического диапазона сигнала), учтены эффекты нелинейности отклика электроники. Отметим, что после всех тестов и калибровок, а также дополнительной тонкой настройки, число не работающих каналов снизилось до 5 (0,01%) – подтверждено высокое качество и надежность активных элементов.

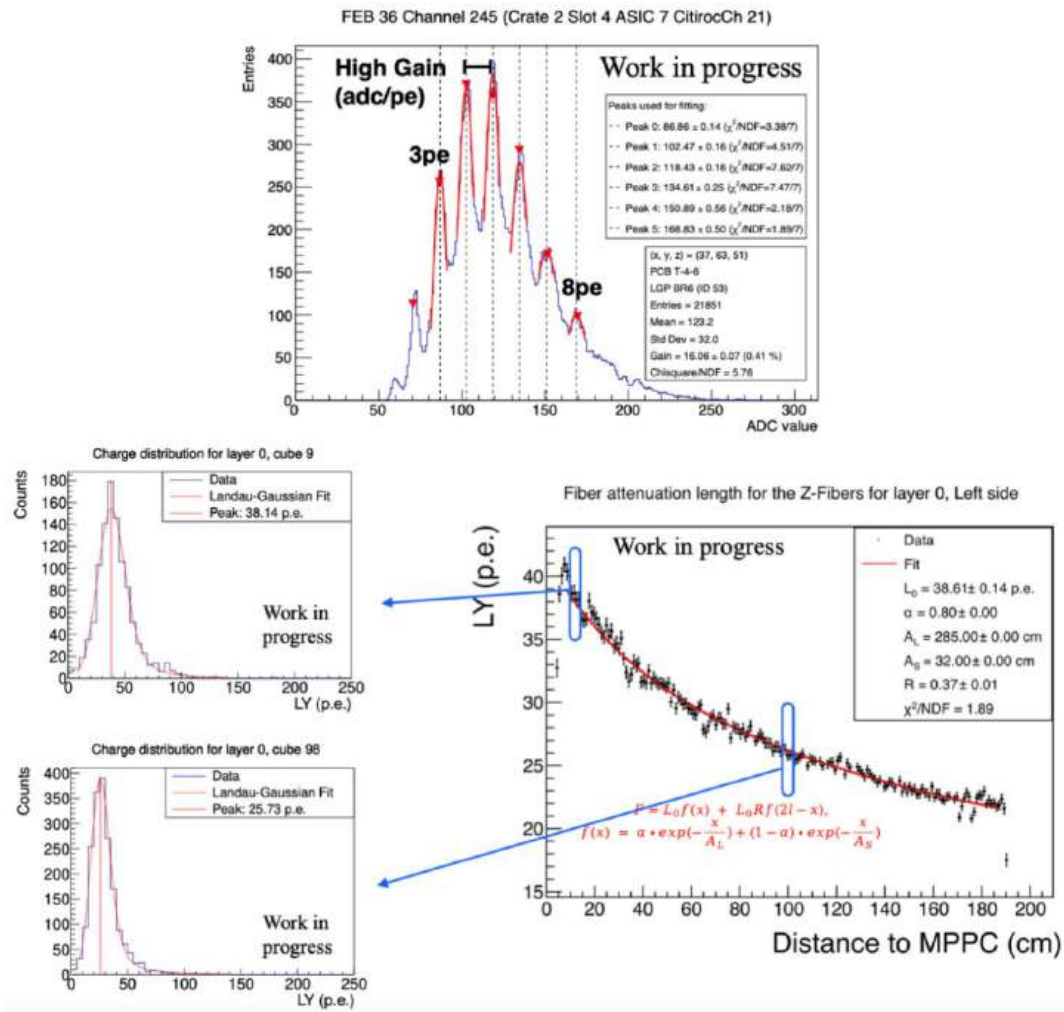


Рисунок 3 – Калибровка и измерение световыхода каналов детектора СуперFGD. Данные калибровочного триггера и триггера космических мюонов. Вверху: калибровка канала, видны отдельные пики фотоэлектронов. Внизу: световыход в зависимости от расстояния до фотосенсора МППС, измерение параметров ослабления и отражения света в оптоволоконках

Определены параметры ослабления света в спектросмещающих оптоволоконках детектора СуперFGD, а также коэффициентов отражения света на конце волокна. Указанные параметры используются для коррекции сигнала, а также для моделирования отклика детектора. Для реальных данных использовались треки, соответствующие сигналу космического триггера. Было обнаружено, что требуется дополнительный параметр общей нормировки световыхода, соответствующий определенным группам волокон, что связано с особенностями сборки детектора. В итоге получено хорошее согласие между данными и результатами моделирования.

Световыход с одного кубика для релятивистской частицы составил около 40 фотоэлектронов для сигнала с одного волокна. При суммировании с трех волокон – около 120 фотоэлектронов. Оптический cross-talk («утечка» света в соседние кубики) между кубиками составил 3,0-3,5%. В дальнейших планах переход к калибровке отдельных кубиков, что потребует большей статистики.

Выполнено измерение временного разрешения детектора СуперFGD (рисунок 4). Хорошее временное разрешение в детекторе является важным условием для возможности определения направления частицы, регистрации нейтронов от восстановленных нейтринных вершин, идентификации типа частицы по времени пролета. Выполнена калибровка зависимости времени сигнала от заряда (time-walk), а также учтены временные сдвиги сигналов между каналами. Временное разрешение для волокон определялось использованием сравнения временных сигналов с двух волокон для одного кубика, разрешение является (приблизительно обратной) функцией собранного заряда. Для светового сигнала, соответствующего минимально ионизирующим частицам (MIP), временное разрешение для канала составляет $\sim 1,5$ нс. Определяюсь также разрешение для треков частиц, использовались события космического триггера. Для треков длиной $l > 40$ см получено разрешение менее 300 пс.

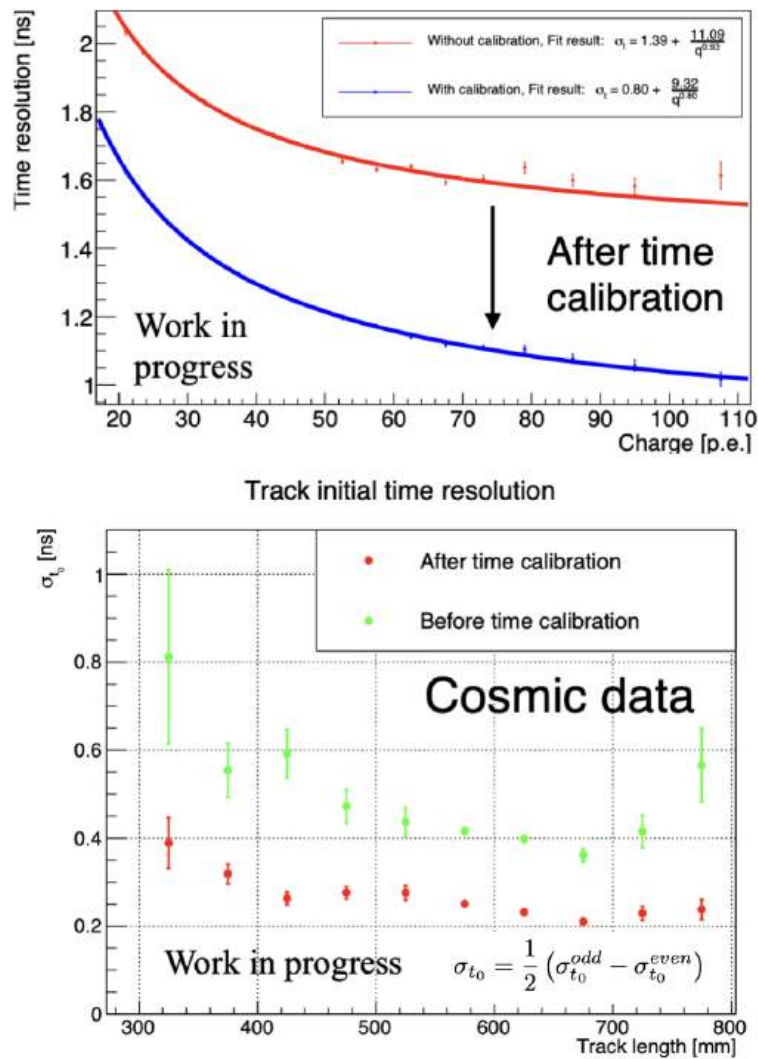


Рисунок 4 – Калибровка и измерение временного разрешения СуперFGD. Данные триггера космических мюонов. Вверху: временное разрешение отдельного канала до и после калибровки; зависимость от световыхода. Внизу: временное разрешение для треков частиц до и после калибровки, зависимость от длины трека

Полученные в результате калибровки параметры, характеризующие как зарядовый, так и временной сигнал СуперFGD, использованы для настройки программ моделирования отклика детектора. Такая настройка на параметрах, характеризующих реальные данные детектора, важна для последующего прецизионного анализа нейтринных взаимодействий.

В рамках НИР продолжены работы по совершенствованию моделирования детектора, разработке алгоритмов и методов восстановления топологий нейтринных событий, кинематики продуктов реакций, созданию критериев отбора сигнальных событий, соответствующих различным каналам взаимодействий мюонных и электронных (анти)нейтрино. Алгоритм восстановления треков частиц в СуперFGD интегрирован в общую систему реконструкции ND280Upgrade: сегменты треков в СуперFGD объединяются с треками и активностью в других модулях ближнего детектора, что позволяет эффективно использовать всю собранную информацию о событии. Используемые в Супер-FGD алгоритмы применяют как геометрическую, так и зарядовую информацию для эффективного восстановления различных топологий нейтринных взаимодействий, позволяют добиться существенного снижения порога регистрации пионов и протонов, что важно для учета ядерных процессов при реакциях нейтрино. Широкое применение находят методы машинного обучения и многомерного анализа данных: в частности, инструменты ROOT для многомерного анализа и построения расширяемых деревьев решений, TMVA BDTG – классификация используется для определения типов частиц и регрессия для определения их импульса. Высокое временное разрешение дает возможность регистрации нейтронов-продуктов реакций, что важно для работы с антинейтринными взаимодействиями. Пример восстановленного события взаимодействия нейтрино из данных, набранных в июне 2024 года, представлен на рисунке 5.

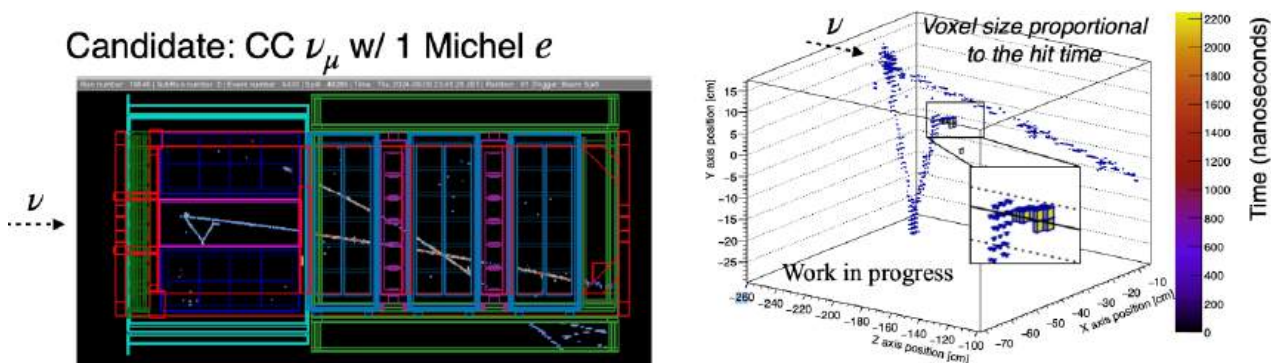


Рисунок 5 – Нейтринное взаимодействие в СуперFGD. Трек мюона и пион, который взаимодействует, останавливается и дает задержанный по времени мишелевский электрон. СуперFGD позволяет детально восстановить топологию реакции. Данные нейтринного пучка T2K, июнь 2024 года

2. Работка новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон

Рассматривается возможность дальнейшего усовершенствования комплекса ближних детекторов нейтринного эксперимента T2K, что может быть реализовано в рамках набора данных в проекте T2K–Гипер-Камиоканде. Цель – расширение возможностей регистрации и восстановления событий нейтринных реакций в различных каналах взаимодействия с различными конечными продуктами. Одним из вариантов, в связи с успешной реализацией модуля СуперFGD, является создание полностью активного 3D сегментированного детектора массой 4 тонны, т.е. в два раза больше нынешнего детектора. Создание такого модуля требует масштабирования технологии изготовления сцинтилляционных кубиков. Ключевым моментом является производственная точность изготовления мелких активных элементов, отдельных сцинтилляционных кубиков с отверстиями. Для детектора СуперFGD кубики изготовлены методом литья под давлением, далее нанесен диффузный отражатель методом химического травления (флуктуации размеров ~30 мкм), отверстия для волокон изготовлены сверлением на фрезерно-гравировальном станке – итоговые флуктуации позиций отверстий относительно сторон ~ 50 мкм. При производстве элементов для SuperFGD было отбраковано более 5% элементов. Технология изготовления является трудоемкой и времязатратной. Для нового детектора большего размера необходимо увеличить точность до ~30 мкм.

ИЯИ РАН совместно с ООО «Унипласт» (г. Владимир) проводит исследования новой технологии производства пластиковых сцинтилляционных кубиков на основе полистирола с добавками. Главная идея – изготовление кубиков сразу с необходимыми отверстиями, из процесса исключается операция сверления. Литье под давлением производится с использованием сложной прецизионной пресс-формы с четырьмя камерами (рисунок б). Процесс проводится под давлением 500-600 кг/см² и при температуре 200-300 градусов. Технология дает возможность изготавливать кубики с тремя ортогональными отверстиями диаметром 1,5 мм. В опытных партиях достигнута точность позиционирования отверстий до уровня 30 микрон. Дополнительно изучается новый способ покрытия сцинтилляционных кубиков химическим отражателем. Ключевым моментом является недопущение проникновения раствора в отверстия, что в дальнейшем приводит к потере светового сигнала. Отверстия в кубиках закрываются с помощью материала с высоким коэффициентом температурного расширения, и после этого происходит травление поверхности кубиков химическим агентом для нанесения слоя отражателя.

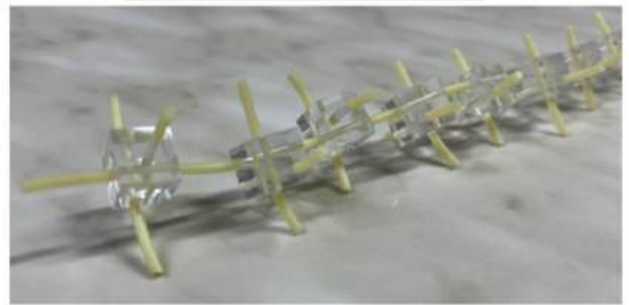
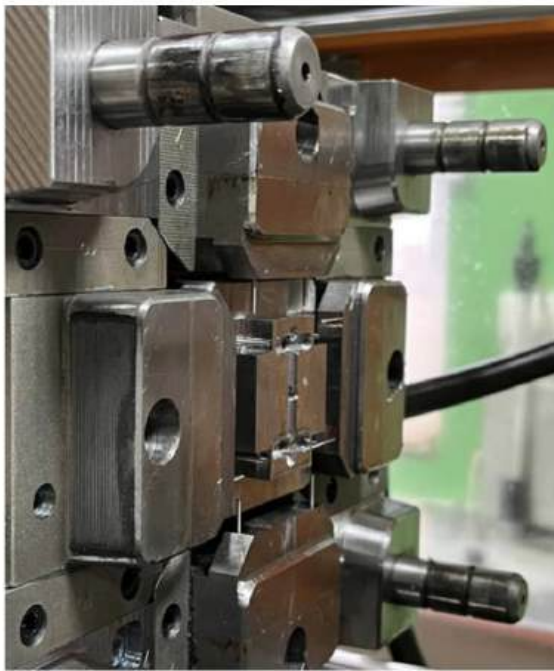


Рисунок 6 – Технология производства сцинтилляционных кубиков из полистирола с тремя отверстиями для размещения оптоволокон. Слева – пресс-форма с четырьмя кубическими камерами для литья под давлением кубиков с отверстиями, справа – кубики без отражателя после литья; кубики с отверстиями, закрытыми специальным материалом, для защиты от попадания отражателя при химическом травлении

Задачей НИР является: производство достаточно большого количества партий кубиков, изготовленных по новой технологии, проведение детального исследования их параметров, отладка и настройка технологической цепочки, обеспечивающей возможность массового производства элементов с низким процентом брака, высокой точностью, высоким световыходом и низким кросс-током между кубиками.

Первоначально кубики, изготовленные по новой технологии, тестировались с помощью космического телескопа (триггерные счетчики по схеме совпадений сверху и снизу исследуемой сборки элементов). Эти тесты позволяют определить абсолютные значения световыхода, но имеют ряд недостатков, в основном обусловленных малым размером каждого из кубиков: длительное время набора статистики (порядка суток на одно измерение), на одном волокне тестируется сразу несколько кубиков, сборка из 8x3 элементов – в этом случае затрудняется обнаружение отклонения в сигнале конкретного кубика, за одно измерение в каждом кубике исследуется только одно отверстие из трех. Для обеспечения возможности исследования отдельных элементов был разработан и создан стенд для измерения сцинтилляционных кубиков с использованием УФ-диода (рисунок 7). Свет от УФ-диода через световод диаметром 1 мм направляется в одно из отверстий сцинтилляционного кубика диаметром 1,5 мм. Сигнал снимается с двух других отверстий с помощью спектросмещающих волокон Kuraray Y11 диаметром 1 мм и длиной 35 см и

фотосенсоров Hamamatsu MPPC S13081 с размером пикселя 50 мкм и чувствительной областью $1,3 \times 1,3 \text{ мм}^2$. Разработанная методика обеспечивает: возможность проводить тестирование попадания отражателя одновременно для трех отверстий в кубике, быстрое время набора статистики, процедура занимает около 30 секунд, высокую относительную точность и повторяемость измерений. Отметим, что методика тестирования с использованием УФ-диода хорошо подходит для проведения относительных измерений, для определения абсолютных значений световыхода предпочтительнее использовать реальные релятивистские частицы, работать с космическим телескопом или мощным источником (в возможных планах на будущее), в случае УФ диода дополнительно присутствуют колебания интенсивности.



Рисунок 7 – Тестирование сцинтилляционных кубиков с помощью LED-диода. Слева: спектр свечения УФ-диода (OSV1YL511A). В центре: инжектор на основе световода с коническим рассеивателем на конце. Справа: свет от диода через световод инжeksiруется в кубик через одно из отверстий, сигнал снимается с двух отверстий через волокна

На стенде с УФ-диодом было протестировано 300 кубиков (900 отверстий), изготовленных по новой технологии. За время проведения исследований не было найдено ни одного отверстия со следами попавшего внутрь отражателя, что подтверждает функциональные возможности новой технологии.

Также в отчетном периоде продолжено тестирование с использованием космического телескопа. Исследовались сборки из 8×3 кубиков: имеем восемь значений световыхода с восьми оптоволокон, соответствующих 8 каналам, в каждом из которых находятся 3 элемента. Два канала являются референсными (опорными, базовыми), здесь находятся кубики, изготовленные по старой технологии. Шесть каналов соответствуют элементам, изготовленным по новой технологии. Для калибровки и проверки результатов световыход опорных каналов сравнивался со значениями, полученными в предыдущих тестах при той же температуре. Измерения проводились в температурном диапазоне от 16 до 23 °C и после нормированы на температуру 23 °C. Значения световыхода для исследуемых кубиков не уступают базовым. Световыход элементов остается стабильно высоким на протяжении двух лет исследований.

С помощью микрометра были измерены размеры сторон кубических элементов опытных партий без отражателя. Установлено, что сторона кубического элемента, на которую действует толкатель, меньше остальных на $\sim 0,07$ мм. Также были проведены измерения размеров сторон кубических элементов, покрытых отражателем. Средний размер элементов составляет $\sim 10,42$ мм (рисунок 8). На распределении выделяются два пика, что показывает необходимость корректировки положения толкателя, дальнейшей настройки процедуры литья в новой пресс-форме. Проводилось измерение положения отверстий относительно сторон кубика с использованием микроскопа (рисунок 8). Полученные предварительные результаты также подтверждают необходимость продолжения отладки технологии производства. В дальнейшем планируется развить и усовершенствовать процедуру измерений с применением микроскопа: повысить точность вычислений, основанных на обработке пиксельных данных, путем применения более точного алгоритма анализа изображений и также увеличения разрешения снимков.

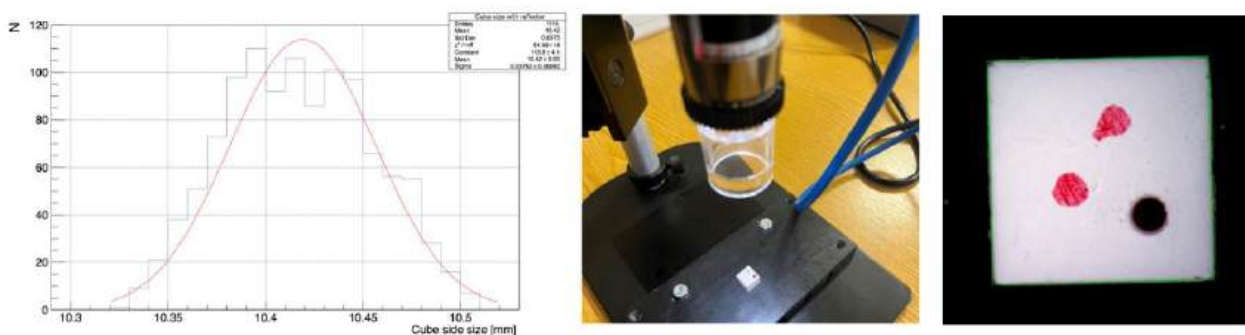


Рисунок 8 – Слева: распределение размеров сторон кубиков, покрытых отражателем. Заметно отличие от нормального, что связано с отличным размером для стороны, на которую действует толкатель. Справа: исследование геометрии и размеров кубиков с помощью микроскопа

В рамках НИР также исследуется различное сырье, полистирол, для производства пластиковых сцинтилляторов. В 2024 году проведены измерения нескольких партий сцинтилляционных элементов: немецкий, российский и иранский полистирол, в качестве опорных использовались кубики СуперFGD. Результаты измерения световыходов на стенде с УФ-диодом согласуются с теми, что были получены на космических мюонах. Кубики, изготовленные по новой технологии из немецкого полистирола, показывают световыход, не уступающий значениям, соответствующих кубикам СуперFGD. Результаты для российского полистирола в пределах точности измерений не отличаются от таковых для немецкого сырья. Значения в случае иранского полистирола оказались ниже примерно на 10-20%.

В качестве вывода: новая технология является перспективной, так как не требует трудозатрат для сверления отверстий, что способствует снижению процента производственного брака и увеличению скорости производства в несколько раз,

дополнительно упрощает процесс и снижает себестоимость изготовления. Удастся обеспечить высокий световыход элементов, исключить попадание отражателя в отверстия. Вместе с этим требуется продолжение отладки технологии в плане обеспечения точности размеров и позиционирования отверстий. Проведение соответствующих НИР важно для доказательства, а далее и непосредственно обеспечения создания высокосегментированных сцинтилляционных детекторов в несколько миллионов элементов, предлагаемая технология дополнительно откроет возможности для разработки сложных систем детектирования частиц.

3. Разработка внешнего детектора для нового водного черенковского комплекса Гипер-Камиоканде и прототипа детекторов для вето системы промежуточного детектора проекта

Гипер-Камиоканде – это водный черенковский детектор нового поколения, работы над созданием которого ведутся в настоящее время участниками международной коллаборации. Детектор представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 68 м и высотой 71 м, общая масса воды – 258 килотонн (рисунок 9). Используется вода высокой степени очистки, длина ослабления – до 100 м для видимого света. Гипер-Камиоканде оптически разделен на две области: внутренний (Inner Detector, ID) и внешний (Outer Detector, OD) детекторы. Световые сигналы в области внешнего детектора регистрируются ФЭУ, расположенными позади счётчиков ID и направленными наружу. Размер слоя OD составляет 2 м в верхней и нижней частях детектора и 1 м по сторонам. Основная задача OD – регистрация фоновых событий снаружи внутреннего детектора, таких как треки космических мюонов, как попадающие в ID, так и останавливающиеся ранее, последние могут приводить к фону от ядерного расщепления («spallation backgrounds»). Важна также регистрация активности из внутренней части для определения треков, полностью содержащихся в ID. Гипер-Камиоканде расположен в подземной шахте, защита – примерно 1750 м водного эквивалента. Меньшая толщина породы и большие размеры приводят к увеличенному потоку космических мюонов по сравнению с Супер-Камиоканде (в ~15 раз): около 45 Гц (4×10^6 мюонов/день). Активная область детектора также меньше, чем в Супер-Камиоканде. Во внешнем детекторе будет использовано примерно 3600 ФЭУ диаметром 8 см. Важной задачей является повышение эффективности регистрации светового сигнала.

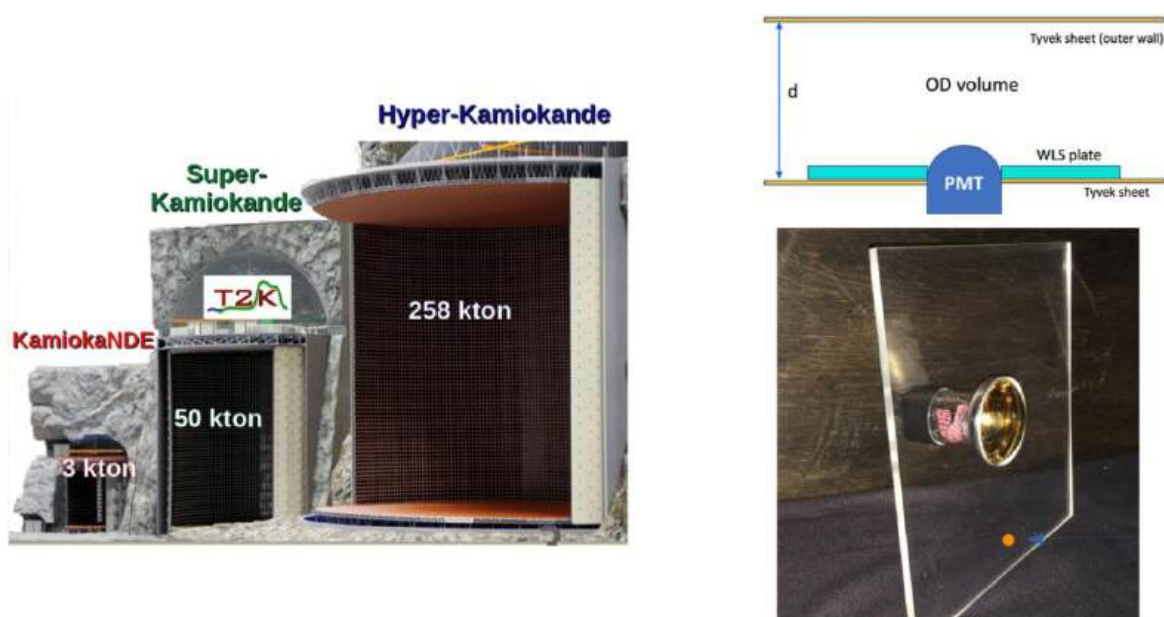


Рисунок 9 – Слева: детекторы «серии» Камиоканде. Справа: схема модуля ФЭУ+спектрсмещающая пластина для внешнего детектора OD

Увеличение светосбора достигается применением различных методов. Стены внешнего детектора будут покрыты отражающим материалом Tyvek. Для светосбора будут использованы модули: ФЭУ, расположенные внутри спектрсмещающих WLS пластин (рисунок 9). Пластины поглощают черенковский свет от заряженных частиц в ультрафиолетовой области и переизлучают его в видимой области, в которой ФЭУ обладают высокой чувствительностью. Основные опции ФЭУ: Hamamatsu R14374 (Япония, главные кандидат) и NNVT (Китай).

В рамках НИР в ИЯИ РАН выполняется разработка WLS пластин для OD. Налажено сотрудничество с НИИ полимеров им. Каргина (г. Дзержинск) по изготовлению спектрсмещающих пластин для нужд нейтринных детекторов. В Гипер-К будут использованы пластины на основе полиметилметакрилата (ПММА). Для исследования пластин в ИЯИ РАН созданы стенды для измерений с использованием субнаносекундных LED источников PicoQuant Co (260, 315, 380 и 410 нм). Также разработан водный детектор (Infant-К, «младенец Камиоканде») объемом 100 л для проведения тестов непосредственно с черенковским светом.

Будут использованы пластины на основе полиметилметакрилата (ПММА) со спектрсмещающими добавками. По результатам моделирования (WCSim (<https://github.com/WCSim/WCSim>), пакет для моделирования водного черенковского детектора, применяется в том числе для работ по Гипер-К), а также проведения измерений были определены оптимальные геометрические размеры пластин: квадратные $300 \times 300 \times 7$ мм³, ФЭУ размещается в цилиндрическое отверстие диаметром 78 мм в центре пластины. Для дополнительного увеличения светосбора на торцы пластины будет наклеен зеркальный отражатель, полимерная пленка 3M DF2000MA, на задней большой грани пластины – Tyvek. Измерения в Infant-К: полная сборка ФЭУ+пластина+отражатели (3M DF2000MA и Tyvek) дает увеличение светосбора примерно в ~2,5 раза, эффект отражателя 3M DF2000MA на уровне ~50% (увеличение света в 1,5 раза).

Для регистрации света черенковского спектра рассматривалось использование двухкомпонентной добавки: PPO 3000 мг/л + POPOP 50 мг/л. Такая комбинация эффективна для первичного спектра. Наличие и свойства отражателя определяют фактический спектр света, попадающего на ФЭУ. В OD вклад прямого света существенно снижен вследствие малого размера и относительно небольшого количества используемых фотоумножителей. Коэффициент отражения Tyvek падает с ~80-90% при > 350 нм до ~50-60% при 250-300 нм. Отражения приводят к снижению доли коротковолновой компоненты. В 2024 году вопрос спектрсмещающих добавок был тщательно исследован. Проведены измерения пластин конечного размера и концентраций (мг/л): PPO/POPOP 3000/50, POPOP – 50, 100, 200, 400,

800 (рисунок 10). Тесты проводились с диодами, а также с отраженным и прямым светом в Infant-K, направление черенковского конуса регулировалось изменением положения счетчиков космического телескопа, стенки бака Infant-K покрывались панелями с Tyvek. Измерения с диодами проводятся по следующей схеме: сигнал снимается для четырех положений диода по углам пластины, далее результаты усредняются (рисунок 10). Измерения с LED-диодами показали, что высокой эффективности (сравнение с PPO/POPOP) светосбора в коротковолновой области можно достичь увеличением концентрации одной добавки POPOP. Отметим, что в НИИ полимеров была измерена максимальная концентрация POPOP в ПММА: примерно 1200 мг/л. Измерения в Infant-K с отраженным светом подтвердили отсутствие выраженного положительного эффекта от использования PPO. Отметим также хорошие результаты для низкой концентрации POPOP 50 мг/л (относительно высоких концентраций POPOP потеря ~10% для света, собираемого с пластины, ~5% для суммы ФЭУ+пластина) в сравнении с двухкомпонентной добавкой, а также и с POPOP100 и 200. В последнем случае эффект может быть связан с перекрытием спектров поглощения и высвечивания добавок, что влияет на подбор оптимальной концентрации. Тесты с прямым светом показали работу двухкомпонентной добавки, а также эффективность в случае увеличения концентрации одной POPOP. Результаты находятся в согласии с измерениями с LED-диодами и подтверждают необходимость учета реального черенковского спектра в детекторе.

The results in light yield were normalized to the light output from the WLS plate with double fluor

LED wavelength	265 nm	315 nm	380 nm	405 nm
POPOP 50 — PPO 3000	100%	100%	100%	100%
POPOP 50	13%	133%	124%	118%
POPOP 100	33%	130%	105%	142%
POPOP 200	46%	124%	100%	160%
POPOP 400	84%	154%	117%	230%
POPOP 800	100%	153%	124%	261%

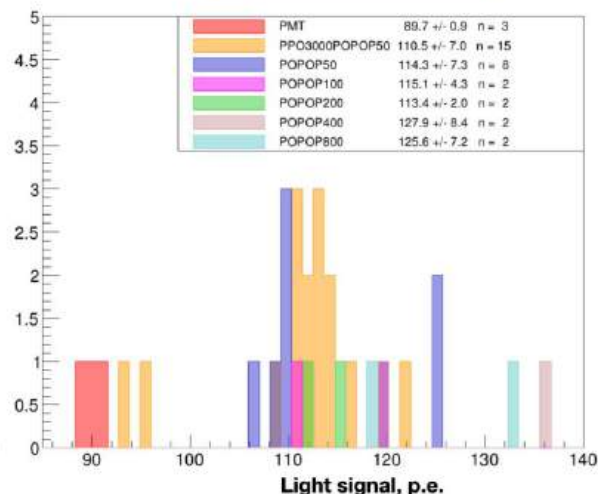
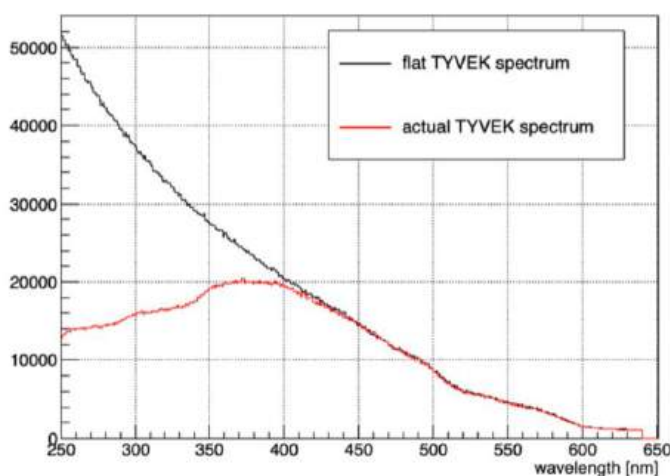
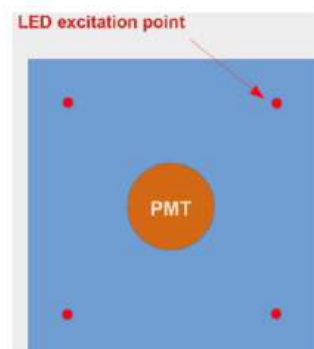


Рисунок 10 – Вверху: значения сигнала для пластин с различной концентрацией добавок и для разных длин волн LED-диодов, результаты нормированы на значения двухкомпонентной пластины; схема измерения с LED-диодом. Внизу: моделирование, изменение спектра черенковского света в OD Гипер-К при использовании параметров Tyvek, соответствующим измерениям; значения светового сигнала пластин по тестам с отраженным черенковским светом в детекторе Infant-К, показаны значения за вычетом вклада сигнала от ФЭУ без пластины. Все измерения выполнены с отражателем 3М DF2000MA на торцах пластины

Помимо эффективности светосбора, важной характеристикой пластин является уровень темнового сигнала. Возможность установки низкого порога регистрации при наборе данных важна для эффективного подавления фона. Были проведены измерения темнового сигнала с порогом 0,3 ф.э. (фотоэлектрон) модуля ФЭУ+пластина. ФЭУ – Hamamatsu R14374. Тесты проведены в термостате для обеспечения контроля температуры. Условия в Гипер-К соответствуют 13 °С. Показано, что повышение концентрации добавки приводит к увеличению темнового сигнала (рисунок 11). Для POPOP800 достигает ~800 Гц, PPO/POPOP 3000/50 – ~700 Гц и выше. В случае POPOP50 уровень темнового сигнала минимальный: ~300 Гц (200 Гц – для ФЭУ без пластины). Предполагается, что эффект может быть связан с самовозбуждением добавок вследствие теплового движения молекул.

Dark-rate measurements of WLS plates. Threshold: 0.25-0.3 p.e. Temp: ~13-14 °C. Hamamatsu R14374. Dead time to suppress afterpulses: 1500 ns.	
Plate: POPOP/PPO (mg/l)	Dark Rate, Hz
Bare PMT	200
PMMA w/o WLS	240
800-1	790
800-2	850
400	490
200	390
50	330
50/3000-1	600
50/3000-2	760

Рисунок 11 – Значения темного сигнала для пластин с различной концентрацией добавок. Порог ~0,3 ф.э. Температура ~13°C

Таким образом, в качестве конечной опции для использования в модулях светосбора внешнего детектора Гипер-К для регистрации черенковского света после множественных отражений (продемонстрировано моделированием в WCSim) от стен (отражатель Tyvek) выбрано использование пластин с одной добавкой POPOP50 мг/л. Такая концентрация обеспечивает достаточно высокую эффективность светосбора, а также низкий уровень темного сигнала.

Выполнены измерения ускоренного старения пластин (рисунок 12). Эффекты старения изучались путем выдерживания пластин в водяной бане при высокой температуре. Эмпирическое правило Вант-Гоффа: скорость химических процессов возрастает в 2-4 раза при повышении температуры на каждые 10 градусов. Выбрана температура 59°C, важно не допустить нагревания до момента деградации свойств ПММА: верхний рабочий диапазон температур для изделий из ПММА – 70-80°C. Две недели в водяной бане соответствуют одному году работы детектора ($t=13^\circ\text{C}$). Шесть пластин были помещены в стальной бокс, наполненный дистиллированной водой, и выдерживались в термостате. Каждые две недели проводились измерения световыхода модуля ФЭУ+пластина с использованием LED источника, в качестве опорных служили измерения с пластиной, хранящейся при комнатной температуре. ФЭУ: Hamamatsu R14374, отражатель: 3M DF2000MA. Тесты выполнены с диодами $\lambda=260$ нм и $\lambda=380$ нм. В конце тестов (эквивалент работы детектора — 17 лет) дополнительно измерен световыход с заменой отражателя на новый. Идея состоит в разделении эффектов старения пластины и эффектов, связанных с поведением отражателя.

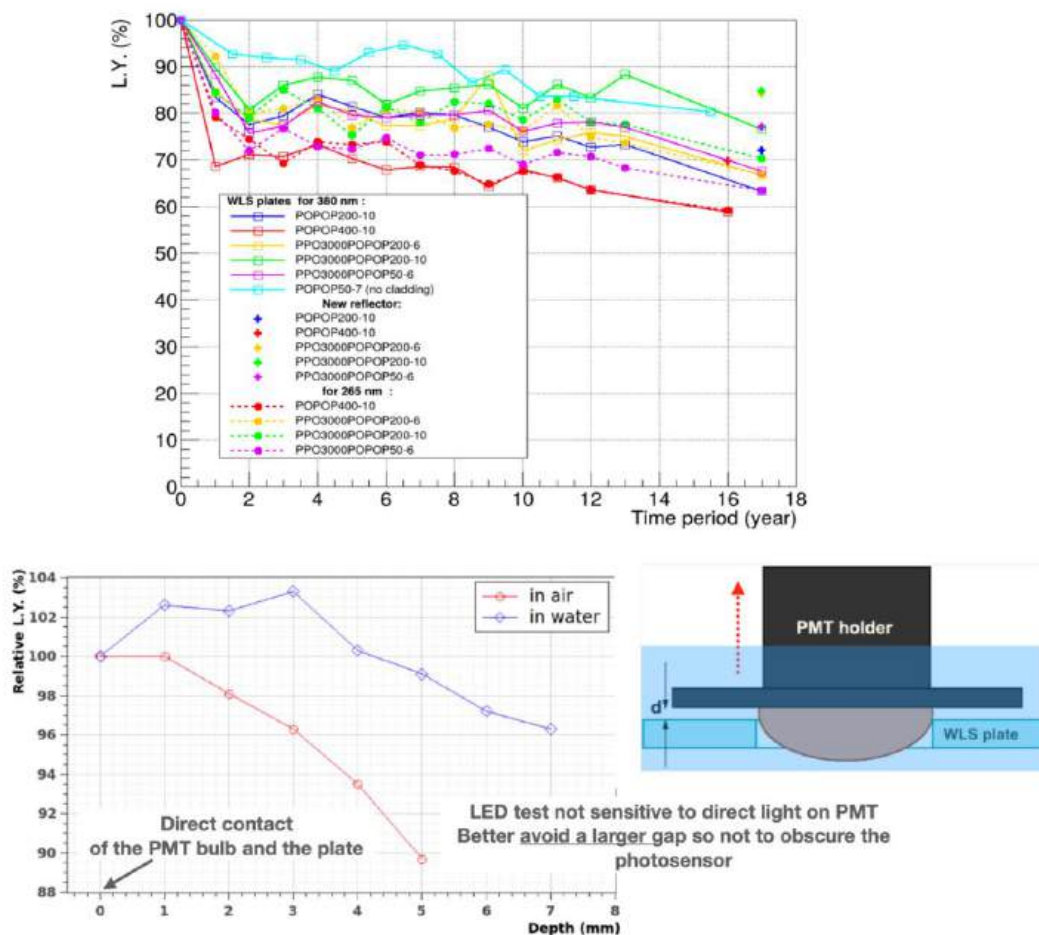


Рисунок 12 – Вверху: результаты тестов по ускоренному старению пластин, сигнал нормирован на значения перед нагреванием, показан эквивалент времени работы детектора. Внизу: измерения зависимости сигнала от расстояния между ФЭУ и пластиной, показано относительное изменение сигнала для воздуха (красная линия) и воды (синяя); схема измерений

Полученные результаты можно суммировать следующим образом:

- Существенное падение световыхода в первые четыре недели. Может быть связано с деградацией отражателя. Появление пузырьков воздуха под пленкой при нагревании.
- Эффект старения пластин, снижение световыхода: 0,8%/год при исключении первоначального падения, 1,3%/год при исключении эффектов, связанных с отражателем. Результаты согласуются со значениями, полученными, например, для сцинтилляционных детекторов из полистирола.
- Не было обнаружено различия в эффектах старения для: пластин с одно- и двухкомпонентными добавками, при измерениях с LED с $\lambda=260$ нм и $\lambda=380$ нм, пластин с толщиной 6/7 и 10 мм.
- Постепенное снижение световыхода со временем с высокой вероятностью связано со деградацией свойств, прозрачности ПММА, а не со старением добавки.

– Эффекты, связанные со старением отражателя, пренебрежимо малы. Здесь, однако, стоит отметить необходимость сохранения хорошего оптического контакта (см. первоначальное падение световыхода при нагревании). Не было обнаружено ухудшения механического контакта между пластиной и отражателем на протяжении всего цикла исследований.

– Не было обнаружено ни как заметного глазом пожелтения пластин, так и ни следов «крейзинга» (образование и рост волосных трещин).

Проведены новые исследования зависимости светосбора от взаимного расположения ФЭУ и пластины (рисунок 12), что важно для разработки конечной механики модуля. Использовался LED диод $\lambda=380$ нм. Получены результаты для воздуха и воды, так как существенный эффект связан с разницей в показателях преломления среды и пластины. Для конечных модулей оптимальным выбрано расстояние в 1 мм от прямого контакта между колбой ФЭУ и пластиной. В водной среде заметное падение световыхода начинается после ~5 мм, однако желательно не уменьшать телесный угол для прямого света на ФЭУ, тесты с диодами чувствительны только к сбору света непосредственно с пластины.

Продолжались работы по механике конечного модуля (рисунок 13). В ИЯИ РАН выполнено изучение (измерения как с диодами, так и в воде) влияния размеров отверстий в WLS пластинах, служащих для механического соединения с базой модуля, на количество собираемого света: будут вырезаны четыре отверстия по краям пластины для соединения с базовой, на которой выполняется фиксация ФЭУ. Выбраны отверстия в 5 мм под саморез М4, такой размер отверстий приводит к потере ~4-5% света. Совместно с коллегами из других групп Гипер-К ОД продолжается усовершенствование механики для крепления пластин и ФЭУ, важным является обеспечение стабильной фиксации ФЭУ относительно пластины для гарантии оптимальной работы модуля, высокой эффективности светосбора, защиты от механических повреждений в случае прямого контакта. В ИЯИ РАН с помощью 3D принтера изготавливаются прототипы, которые исследуются на предмет надежности и удобства в эксплуатации.

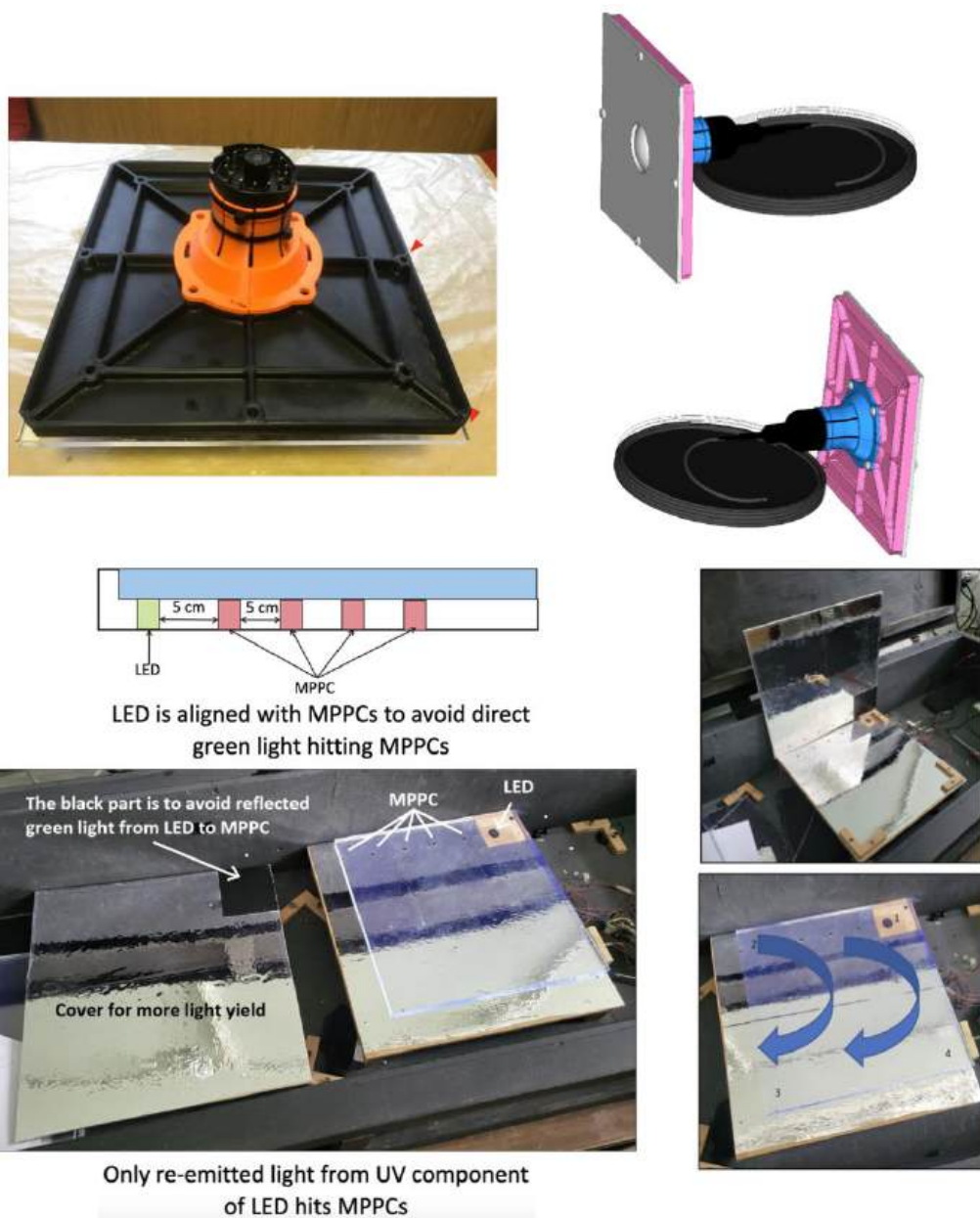


Рисунок 13 – Вверху: прототип механики модуля ФЭУ+пластина для внешнего детектора Гипер-Камиоканде. Внизу: схема и фотографии стенда для быстрого тестирования пластин с помощью LED-диода и фотосенсоров MPPC

В ИЯИ РАН совместно с НИИ полимеров разработана, создана и протестирована технологическая цепочка массового производства спектросмещающих пластин. Было закуплено, настроено (например, режимы работы лазерного станка требуют тщательного подбора) и введено в эксплуатацию соответствующее оборудование: лазерный станок для нарезки больших пластин из ПММА до нужных размеров и вырезания отверстий для ФЭУ и крепежной конструкции, алмазный полировальный станок для конечной полировки граней пластин, стеллажи для хранения и учета пластин на этапе массового производства и тестирования. Изготовлен тестовый стенд для контроля геометрии конечных пластин и отверстий после обработки на станке: конструкция с цилиндром в центре, который

соответствует центральному отверстию под ФЭУ, и четырьмя выступами по краям, что служат для контроля положений отверстий под базовую пластину модуля. Во время производства конечных пластин каждая будет проверяться на указанном стенде, что позволит избежать проблем при сборке механики модулей в Японии.

В ИЯИ РАН разработан стенд для быстрого тестирования пластин (рисунок 13) во время массового производства, поиска брака: установка с использованием LED диода (360-380 нм) и лавинных мультипиксельных кремниевых фотоумножителей Hamamatsu MPPC (S13081-050C). Источник располагается в углу пластины, сигнал снимается с большой грани с помощью пяти MPPC, расположенных на каждые 5 см от источника. Показана чувствительность к наличию спектросмещающей добавки. Процедура тестирования: измерения проводятся для четырех положений пластины — снятие сигналов, поворот на 90 градусов, новое измерение, далее результаты усредняются, полное время для одной пластины – 10-15 минут, для контроля используется опорная пластина. Применяемая конфигурация не может служить для точной характеристики модуля ФЭУ+пластина, однако удобна для быстрой проверки качества и отбраковки. Во время массового производства пластины будут также выборочно измеряться в полной конфигурации с ФЭУ как в водном детекторе, так и с LED диодами.

В НИИ полимеров начато изготовление заготовок для последующей обработки в ИЯИ РАН: пластины большого размера $950 \times 650 \times 7$ мм³ из ПММА с добавкой PPOP50. В нескольких партиях произведены около 200 заготовок, что соответствует 1200 конечных малым пластинам для ОД Гипер-К. Световыход был выборочно измерен с диодами и в водном детекторе, значения согласуются со световыходом опорных пластин, изготовленных ранее, что предварительно показывает хорошее качество при массовом производстве.

Велись работы по разработке вето-системы для промежуточного водного черенковского детектора будущего ускорительного нейтринного проекта Т2К–Гипер-Камиоканде. В промежуточном детекторе в качестве фотоприемников будут использованы модульные приборы, состоящие из 19-ти отдельных ФЭУ диаметром 8 см в общем корпусе. Группа ИЯИ РАН разрабатывает идею создания вето-системы для учета и подавления фона от космических мюонов: использование пластиковых сцинтилляционных счетчиков в виде дисков, которые располагаются в нижней части модуля ФЭУ. Счетчик состоит из двух полукруглых пластин из экструдированного полистирола с добавками, две пластины собираются в конечный диск. Для эффективного сбора света по всей поверхности пластины в ней вырезаются канавки S-формы для размещения WLS волокон. Светосбор осуществляется с одной стороны волокна с помощью лавинных фотодиодов Hamamatsu MPPC, другой конец волокна покрывается отражателем.

Измерения с использованием космического телескопа, а также с помощью радиоактивного источника ^{90}Sr показали высокие значения световыхода, в среднем ~ 20 фотоэлектрон (ф.э.) на минимально ионизирующую частицу (МИР). В случае сканирования с источником минимальное значение вдали волокна составляет 10 ф.э, что дает эффективность регистрации $> 97\%$ для МИР, проходящих по нормали к поверхности счетчика. В реальном детекторе частицы будут пересекать пластины под разными углами, а также с различными импульсами, что приведет к большему среднему световыходу. В итоге значение эффективности регистрации мюонов, усредненное по поверхности детектора, составит $> 99\%$, что полностью удовлетворяет требованиям для вето системы.

Помимо опытного прототипа изготовлены еще четыре образца пластин, для которых проведены измерения с помощью космического телескопа. Полученные значения световыхода соответствуют опытному образцу. Для массового производства пластин стоит вопрос используемого сырья, полистирола и добавок. Исследовательская работа здесь связана с НИР по изготовлению сцинтилляционных кубиков из полистирола, где изучается полистирол из Германии, Ирана, а также сырье отечественных производителей. По результатам измерений для полистирола из России и Германии получены схожие значения световыхода. Для иранского сырья световыход оказывается примерно на 20% ниже.

4. Проведение измерений радиоактивных свойств элементов для новых детекторов нейтрино

Продолжены работы по измерению в Баксанской низкофоновой лаборатории наличия радиоактивных примесей в элементах будущих детекторов ускорительных нейтрино. Для настоящей НИР исследования направлены на измерение радиоактивности в материалах, используемых для создания модулей светосбора для внешнего детектора проекта Гипер-Камиоканде. Наличие и количество радиоактивных примесей определяют число и характер фоновых процессов, значение минимального порога регистрации активности – в конечном итоге чувствительность детектора к определенным физическим процессам. Снижение и контроль фона критически важны для успешного выполнения научной программы эксперимента. В Гипер-Камиоканде особое внимание уделяется присутствию радона, распады дочерних элементов радона ^{222}Rn (например, бета-распады с $Q = 3,27$ МэВ от ^{214}Bi) могут приводить к срабатываниям ФЭУ, имитировать сигнал от нейтринных взаимодействий. Помимо Rn, гамма-распады от U и Th в окружающей породе, элементах конструкции и всех компонентах детектора, в частности гамма-излучение 2,6 МэВ от ^{212}Pb , могут также инициировать срабатывание ФЭУ. Установлены следующие требования по содержанию радиоактивных примесей во внешнем детекторе:

- активность от радона должна быть ниже < 20 мБк/модуль, оценка является предметом дальнейших исследований с помощью моделирования.
- для других источников активности: U-ряд: < 30 Бк/модуль, Th-ряд: < 10 Бк/модуль, ^{40}K : < 15 Бк/модуль.

Для задач Гипер-Камиоканде выполнялись исследования радиоактивности спектросмещающих пластин, разрабатываемых в ИЯИ РАН для модулей светосбора внешнего детектора. Для тестов используются небольшие образцы (5×5 см²). Измерения проводятся в помещении Низкофоновой Камеры (НИКА) БНО ИЯИ РАН на глубине 660 м в.э., лаборатория НИКА активно используется в низкофоновых измерениях примесей естественной радиоактивности в материалах (рисунок 14). Конструкция включает элементы защиты от фона: стены облицованы низкорadioактивным бетоном на основе дунита, ультраосновной породы с низким содержанием естественных радиоактивных элементов. Рабочее помещение камеры отделено засыпкой из дунитового щебня. В рабочем помещении находится низкофоновая защита, состоящая из борированного полиэтилена плюс слой свинца и меди. Измерения проводятся с помощью германиевых полупроводниковых детекторов. Защитные кожухи детекторов сделаны из высокочистой электролитической меди. Охлаждение детекторов идет через хладопроводы, выведенные наружу защитной области и опущенные в сосуды с жидким азотом.

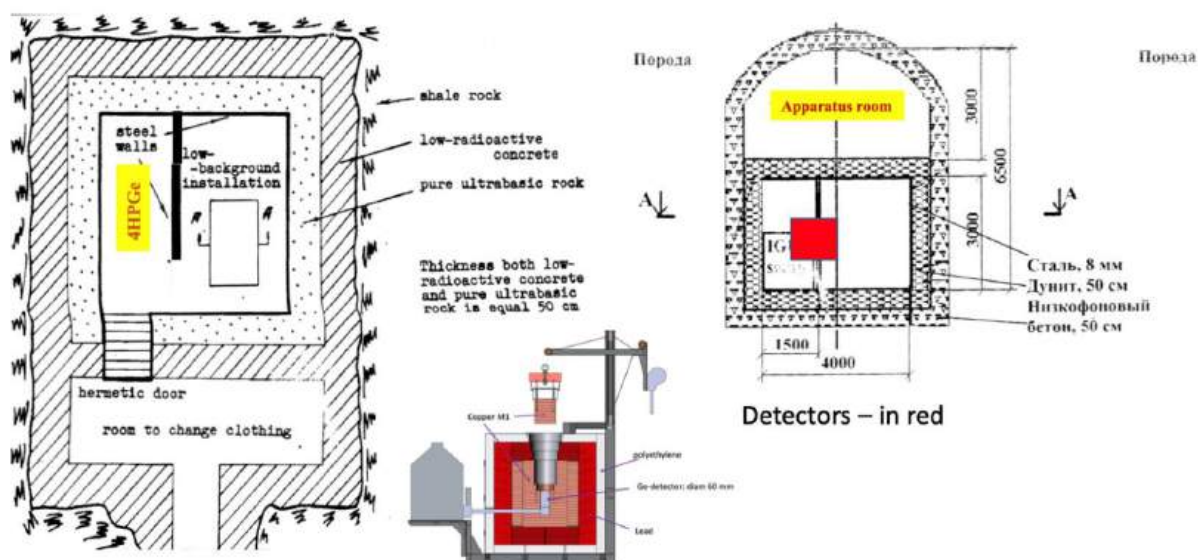


Рисунок 14 – Схема экспериментального зала НИКА БНО ИЯИ РАН. Детектор для измерения радиоактивных примесей материалов

Активность, соответствующая определенным рядам, определяется по γ -излучению дочерних изотопов, при этом предполагается, что ряды находятся в равновесии. Для оценки активности ^{232}Th берется значение скорости распада дочернего ^{208}Tl по линии 2614 кэВ, а для ^{238}U - дочернего ^{214}Bi по нескольким линиям: 609, 1120 и 1765 кэВ. Для оценки активности ^{40}K берется значение скорости счета в линии 1460 кэВ.

Были проведены измерения образцов пластин из ПММА со спектросмещающей добавкой РОРОР50 (мг/л), образцы изготовлены из заготовок, которые будут использованы для производства конечных пластин для установки в модули внешнего детектора Гипер-К. Масса образца: 45 грамм, время измерения – 312 часов. Измерения на низкофоновом германиевом полупроводниковом детекторе «НИКА-2» Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Активность радиоактивных изотопов в исследуемом образце (Бк/кг). Пределы установлены на 90% уровне достоверности (У.Д.)

Образец, материал	Изотопы			
	^{226}Ra (^{214}Bi)	^{228}Ac (^{232}Th)	^{40}K	^{208}Tl
	Активность радиоактивных изотопов			
Пластина РОРОР50	≤ 18 мБк/кг (90% C.L.)	≤ 37 мБк/кг (90% C.L.)	≤ 196 мБк/кг (90% C.L.)	$\leq 9,2$ мБк/кг (90% C.L.)

Масса одной пластины составляет около 0,7 кг. Полученные оценки активности, таким образом, удовлетворяют требованиям внешнего детектора. Стоит отметить, что интерес представляет продолжение измерений с большей чувствительностью, что может быть достигнуто путем проведения тестов в Низкофоновой Лаборатории Глубокого Заложения (4900 м в.э.; НЛГЗ- 4900) БНО, а также измерение активности для других используемых элементов: ФЭУ, Туvek, отражатель.

5. Изучение параметров ФЭУ для внешнего черенковского детектора Гипер-Камиоканде

В модулях светосбора ФЭУ+спектрсмещающая пластина внешнего детектора Гипер-Камиоканде будут использованы фотоумножители диаметром 80 мм. Рассматриваются два кандидата, заявленные характеристики которых удовлетворяют требованиям детектора: Hamamatsu R14374 (Япония) и NNVТ N-2301 (Китай). В ИЯИ РАН ведется изучение указанных приборов, всего приобретены девять ФЭУ R14374 и пять NNVТ N-230, а также необходимые для работы делители напряжения.

Выполнено детальное сканирование поверхности фотокатода с улучшенной версией стенда с использованием LED источника (рисунок 15).

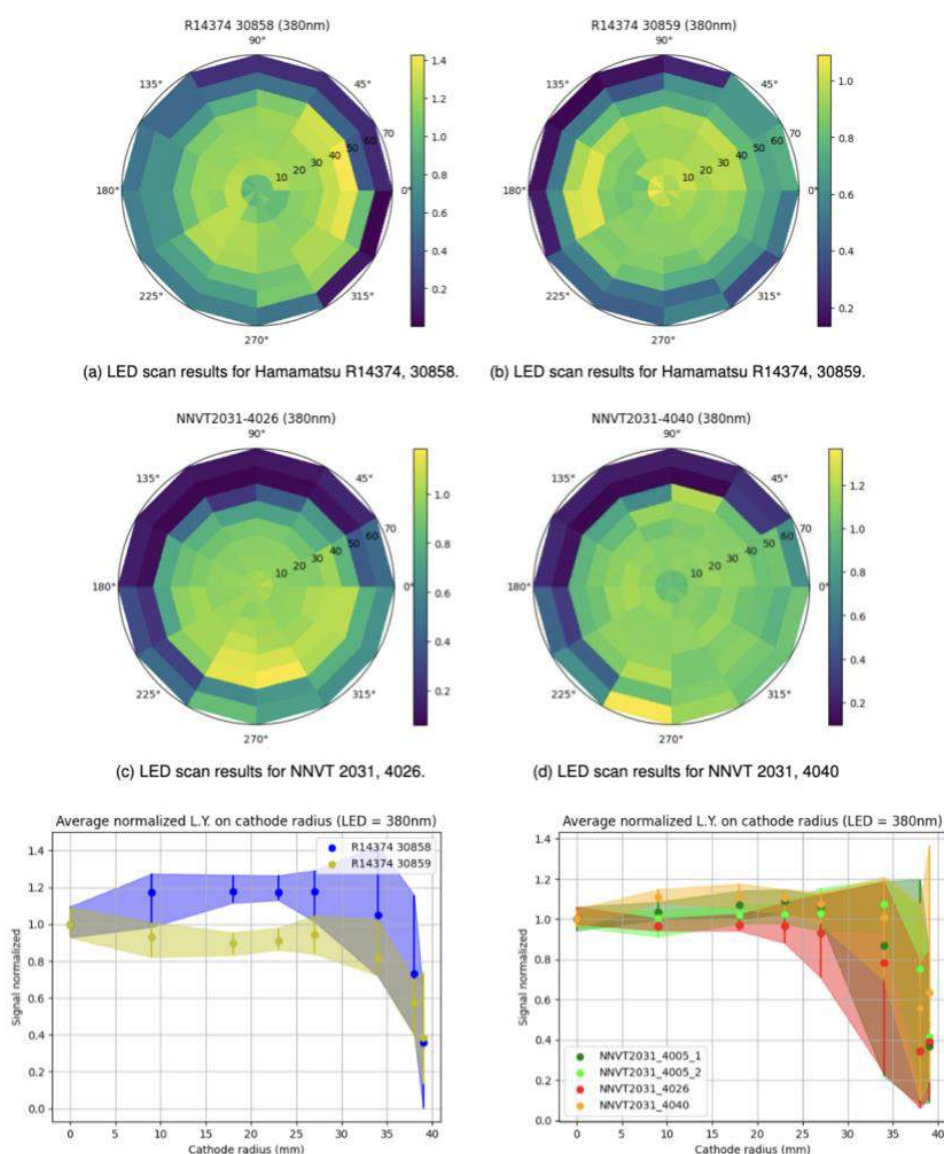


Рисунок 15 – Результаты сканирования фотокатода ФЭУ с помощью LED источника. Значения нормированы на сигнал в центре ФЭУ. Вверху: два ФЭУ R14374. В центре: NNVТ2031. Внизу: проекция на радиус фотокатода

Была усовершенствована система фиксации диода и ФЭУ, что позволило повысить точность позиционирования и также обеспечить повторяемость результатов. Коллимированный ($\approx 1,5$ мм) свет от светодиода ($\lambda=380$ нм), установленного внутри подвижного держателя, используется для сканирования фотокатода путем изменения как полярного, так и азимутального углов. Всего для каждого прибора выполняется $12 \times 7 + 6 = 90$ измерений: 6 снимаются в центре ФЭУ, затем для каждого фиксированного полярного угла ($0-70^\circ$) выполняются измерения, изменяя азимутальный угол с шагом 30° . Для центра ФЭУ полярный угол фиксируется на 0, а держатель поворачивается для проведения шести измерений с шагом 60° по азимутальному углу, это делается для усреднения результатов, учета отклонений, связанных с точностью установки ФЭУ и диода. Полученные значения сигнала нормируются на значения для центра ФЭУ, это делается для сравнения между собой разных приборов, чтобы избежать различий в абсолютных значениях сигнала, которые зависят от интенсивности диода. Проведены измерения двух ФЭУ R14374 и трех NNVT N-2301 (рисунок 15). Показано относительное изменение сигнала в зависимости от радиуса сегмента фотокатода, соответствующего положению LED-диода для определенного полярного угла, результаты усреднены по азимутальным углам. Отклик приборов в целом относительно однородный по поверхности фотокатода, резкое падение светового сигнала начинается при достижении углов, соответствующих радиусу $r \approx 35$ мм, что согласуется со спецификацией приборов с диаметром фотокатода в 72 мм. Падение сигнала в два раза соответствует радиусу примерно в 39 мм, что использовано при оптимизации диаметра центрального отверстия в WLS пластинах для размещения ФЭУ, $d=78$ мм. Исходя из полученных данных, для приборов NNVT наблюдается большая неоднородность фотокатода, видны более выраженные «темные/слепые» пятна, заметные ближе к краям фоточувствительной области. Такая неоднородность может негативно сказываться на эффективности сбора света модулем ФЭУ+WLS, способности ФЭУ собирать свет с краев окружающей пластины. Наличие областей со сниженной эффективностью фотокатода в случае NNVT может являться одной из причин более низких значений световыходов, полученных в тестах с возбуждением пластин LED диодами (265 и 380 нм): сигнал при использовании NNVT составил около 70% от значений для Hamamatsu. Отметим, что в указанных выше измерениях напряжение на ФЭУ устанавливалась согласно рекомендованной в спецификации: 1250 В для R14374 и 1150 В для NNVT 2031.

Выполнены исследования темнового сигнала ФЭУ+WLS пластина, порог устанавливался на уровне 0,3 фотоэлектронов. Указанные измерения проводятся в термостате, что позволяет варьировать температуру в пределах $0-30^\circ\text{C}$. Порог дискриминатора подбирается согласно полученному АЦП спектру сигнала. Отметим

отдельно, что ширина одноэлектронного пика составляет около 40%, значения примерно одинаковы для обоих приборов-кандидатов. Измерения темнового сигнала сделаны с использованием ФЭУ Hamamatsu R14374. Перед каждым измерением ФЭУ выдерживается в темноте в течение суток для стабилизации шума после. На рисунке 16 показаны результаты измерения темнового сигнала (порог около 0,3 ф.э.) для ФЭУ+пластина РОРОР50. Представлены два набора тестов, между которыми модуль держался в темноте в термостате при комнатной температуре в течение 30 дней. Получено хорошее согласие результатов, что показывает стабильность темнового сигнала со временем. Отметим, что уровень темнового сигнала для $T=13^{\circ}\text{C}$ (соответствует условиям в Гипер-К) заведомо удовлетворяет требованиям внешнего детектора (менее 1 кГц). Также излучалось влияние длительности «мертвого» времени дискриминатора на значения шумового сигнала, на рисунке 16 представлены результаты с двумя длительностями в 250нс и 1500 нс. Эффект связан с подавлением сигналов, следующих во времени после основного («послеимпульсы»), который вызвал начальное срабатывание счетчика темновых импульсов. Пример таких сигналов показан на рисунке 17: большой начальный импульс может иметь длинный спадающий хвост с флуктуациями, которые могут вызвать дополнительные срабатывания; также ФЭУ может дать выброс одиночных фотоэлектронных сигналов, которые, при коротком «мертвом» времени, будут учтены как независимая активность, хотя соответствуют одному начальному импульсу. На рисунке 17 показана зависимость темнового сигнала для модуля ФЭУ+РОРОР800 ($T=13^{\circ}\text{C}$, порог в $\sim 0,3$ ф.э.) от длительности «мертвого» окна.

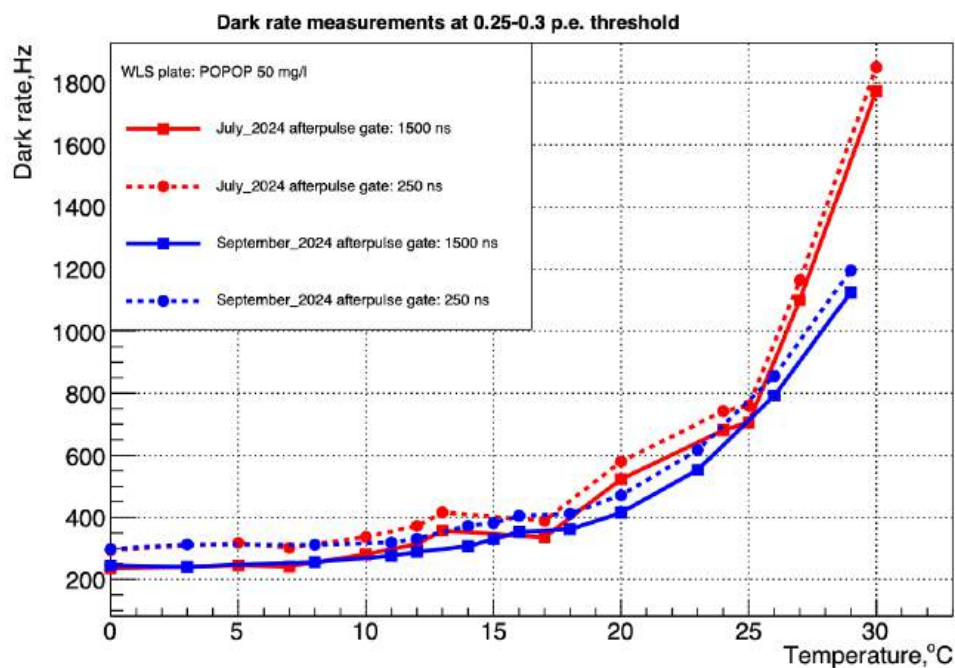


Рисунок 16 – Результаты измерения температурной зависимости темнового сигнала модуля светосбора ФЭУ+WLS пластина РОРОР50 для внешнего детектора Гипер-Камиоканде. ФЭУ R14374, порог ~0,3 ф.э.. Измерения в июле (красные линии) и сентябре (синие). Два разных окна для подавления послеимпульсов: 250 нс (пунктирные линии), 1500 нс (сплошные)

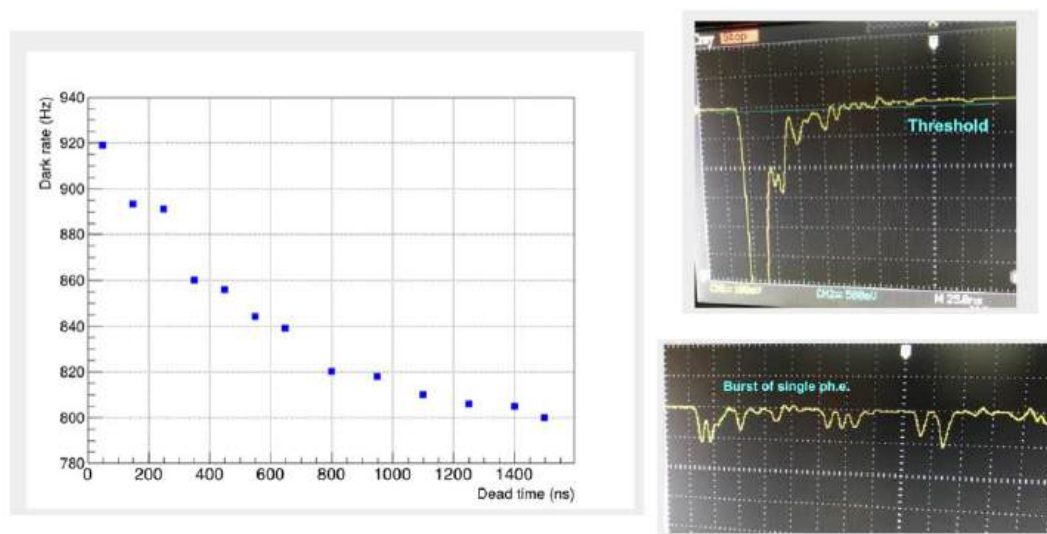


Рисунок 17 – Изучение влияния «послеимпульсов», задержанных по времени сигналов, вызванных срабатыванием ФЭУ. Слева: зависимость частоты темнового сигнала от длины окна для подавления послеимпульсов; ФЭУ+WLS РОРОР800, ФЭУ R14374, порог ~0,3 ф.э., T=13°C. Справа: пример сигналов, которые могут вызвать дополнительные срабатывания счетчика измерителя частоты

Для приборов R14374 получены зависимости коэффициентов усиления от напряжения (рисунок 18), что позволяет выполнить подбор напряжения для проведения дальнейших исследований при одинаковом усилении приборов. Измерены зависимости темнового сигнала (T=20°C) от напряжения (рисунок 18) и коэффициента усиления. Замечен

незначительный тренд к увеличению шума в зависимости от напряжения, для двух ФЭУ зависимость достаточно заметная, что требует дополнительных исследований. Планируется выполнить аналогичные измерения для китайских ФЭУ, а также сделать сравнение сигналов для всех имеющихся в распоряжении группы ИЯИ РАН фотоумножителей R14374 и NNVT для модулей ФЭУ+пластина с LED диодом, а также для прямой засветки ФЭУ LED источником.

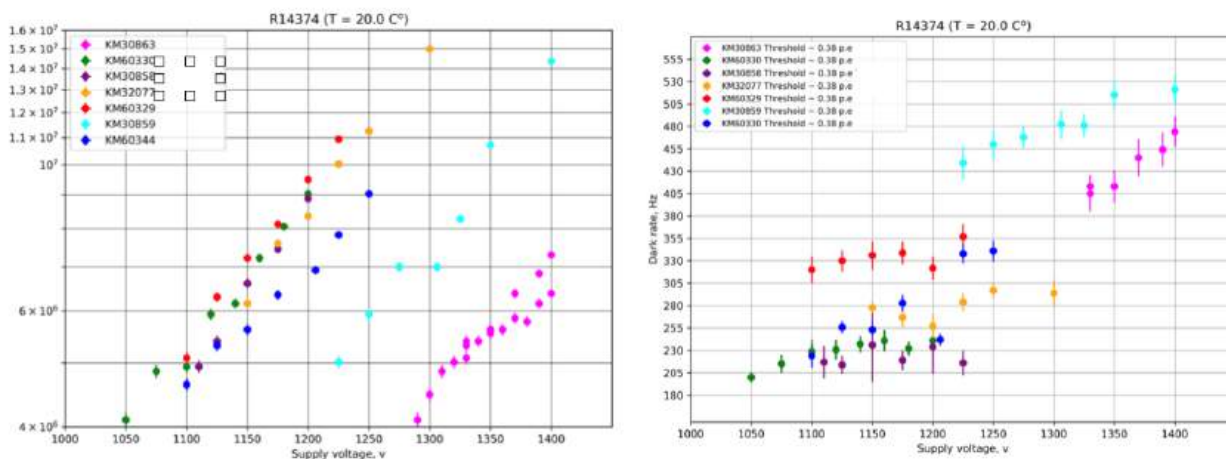


Рисунок 18 – ФЭУ R14374, T=20°C. Слева: зависимость коэффициента усиления от напряжения. Справа: зависимость частоты темного сигнала (порог ~0,38 ф.э.) от напряжения

6. Разработка системы очистки жидкого сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ)

6.1. Изготовление и проведение испытаний установки газовой продувки сцинтиллятора

Выполнена работа по разработке технологической схемы установки газовой продувки жидкого сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ). Установка газовой продувки необходима для удаления из сцинтиллятора растворенных радиоактивных газов Ar-39, Ar-42 и Kr-85. Источником загрязнения сцинтиллятора этими примесями является атмосфера, и характерное содержание этих радионуклидов в исходном сцинтилляторе составляет 1 Бк/м³.

Для очистки предполагается использовать насадочную колонну из нержавеющей стали. В верхнюю часть колонны подается предварительно нагретый сцинтиллятор, который, стекая вниз по насадке, контактирует с потоком азота, подаваемым в нижнюю часть колонны. Насадка обеспечивает большую площадь контакта газ-жидкость. Растворенные в сцинтилляторе радиоактивные газы десорбируются и переходят в газовую фазу, а затем удаляются вакуумным насосом. После охлаждения очищенный сцинтиллятор перекачивается в емкость готового продукта. Необходимая степень очистки порядка 10⁶.

6.2. Установка вакуумной дистилляции ЛАБа производительностью 100 л/час

В отчетном периоде продолжались работы с установкой вакуумной дистилляции ЛАБа производительностью 100 л/час, начатые в 2023 году.

Оборудование для установки было поставлено в БНО ИЯИЯ РАН. Проведены подготовительные работы по размещению и монтажу поставленного оборудования для установки вакуумной дистилляции ЛАБа производительностью 100 л/час (рисунок 19).



Рисунок 19 – Слева: вакуум-выпарная колонна с падающей пленкой VS-01 и промывная колонна VS-01. В центре: охладитель неконденсированных паров и сборник технического конденсата. Справа: емкость исходного раствора и термомасляный котел

6.3. Разработка методики измерения содержания радиоактивных примесей в сцинтилляторе на уровне 10^{-16} г/г для U и Th на прототипе детектора

В течение отчетного периода проводилась работа по разработке методики измерения содержания радиоактивных примесей в сцинтилляторе на уровне 10^{-16} г/г для U и Th на полутонном прототипе ББНТ.

На рисунке 20 показан спектр фоновых событий, полученный с полутонным прототипом проекта ББНТ. Время экспозиции 5,6 часа. Энергетическая калибровка детектора выполнена с набором радиоактивных источников: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{137}Cs , ^{60}Co .

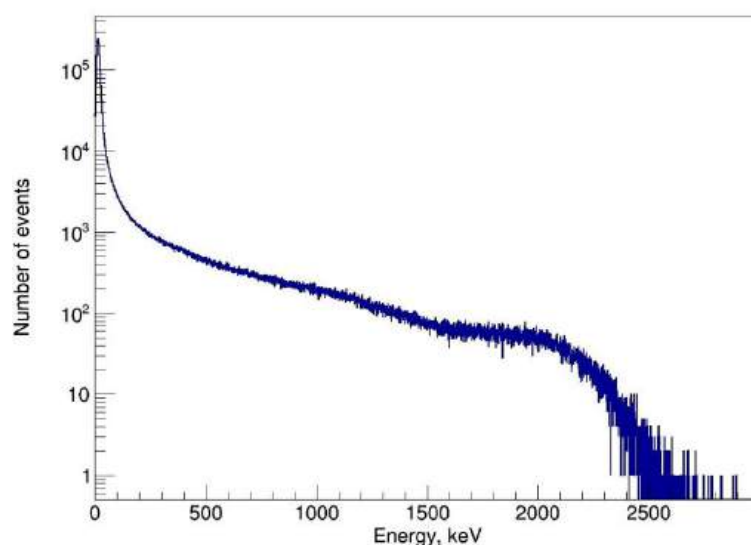


Рисунок 20 – Энергетический спектр фоновых событий в полутонном прототипе проекта ББНТ

Анализ спектра, особенно в области наиболее энергичной ее части, в области энергий 2,6 МэВ (^{208}Tl) позволяет получить оценку верхнего предела содержания ^{232}Th в детекторе на уровне $<10^{-15}$ г/г. Более комплексный анализ формы спектра дает оценку верхнего предела содержания ^{238}U приблизительно на таком же уровне: $<10^{-15}$ г/г. Тщательный анализ внутреннего радиоактивного фона акриловой сферы, воды, фотоумножителей и всех элементов конструкции установки позволит достичь уровня чувствительности по ^{238}U и ^{232}Th лучше 10^{-16} г/г.

6.4. Установка для измерения длины ослабления света в жидких сцинтилляторах

Разработана и создана новая измерительная установка для исследования процессов ослабления сцинтилляционного излучения в жидких сцинтилляторах на основе линейного алкилбензола. Схема измерительной установки показана на рисунке 21.



Рисунок 21 – Схема измерительной установки для изучения процессов ослабления сцинтилляционного излучения в жидких сцинтилляторах

Исследуемый образец жидкого сцинтиллятора заливается в трубку из полиметилметакрилата (ПММА) длиной 1 м. Внешняя сторона трубки покрывается черной светонепроницаемой пленкой. На одном торце трубки устанавливается конец пластикового оптоволоконного кабеля с сердцевинкой из ПММА диаметром 1 мм. На другом торце трубки установлен фотоумножитель марки ET9302В. Вся система помещается в светонепроницаемый «черный» ящик. Засветка осуществляется от быстродействующего светодиодного источника света с помощью пластикового оптоволоконного кабеля.

На рисунке 22 показаны спектры излучения некоторых ультраярких светодиодов InGAN/GaN, использующихся в установке.

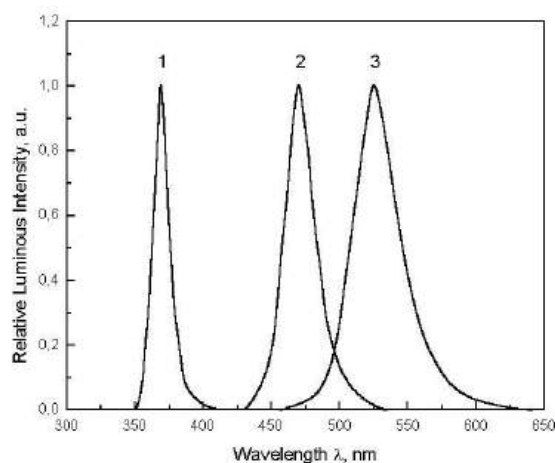


Рисунок 22 – Спектры излучения ультраярких светодиодов InGAN/GaN, использующихся в установке

На рисунке 23 показаны фотографии установки без фотоумножителя, источника света и электронной части.



Рисунок 23 – Фотографии измерительной установки для изучения процессов ослабления сцинтилляционного излучения в жидких сцинтилляторах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Создана надежная основа для дальнейшего проведения работ и исследований по тематике Задания.

1. Задача «Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/Гипер-Камиоканде».

В 2024 году при ключевом и во многом определяющем участии группы ИЯИ РАН завершено создание обновленного ближнего детектора ND280Upgrade международного нейтринного эксперимента T2K (Япония). Детектор также будет важной частью будущего нейтринного мегапроекта T2K–Гипер-Камиоканде. Основным элементом в новой конфигурации является уникальный высокосегментированный сцинтилляционный модуль 3D СуперFGD. Детектор разработан и создан в ИЯИ РАН. СуперFGD состоит из отдельных активных элементов, 2-х миллионов сцинтилляционных кубиков размером 1 см^3 , светосбор осуществляется с помощью трех ортогональных WLS оптоволокон. В 2024 году были установлены недостающие платы электроники для СуперFGD, что обеспечило чтение сигнала со всех каналов детектора. Была обновлена прошивка чипов, что повысило стабильность набора и качество данных. Обновлена система мониторинга параметров детектора. Весной 2024 года установлена верхняя время-проекционная камера НТРС и две оставшиеся (из шести) временные панели TOF. Детектор ND280Upgrade в полной конфигурации был успешно запущен. Выполнена отладка на калибровочном триггере и триггере космических частиц. В июне 2024 года проведен сеанс набора данных на нейтринном пучке T2K, набор данных продолжен в ноябре-декабре. Выполнена калибровка детектора СуперFGD, на реальных данных определены параметры работы детектора: световыход модулей, ослабление и отражения света в волокнах, временное разрешение. Моделирование отклика детектора настроено на реальных данных. Разработаны алгоритмы восстановления и отбора треков частиц в ND280Upgrade, которые использованы для реконструкции событий в данных нейтринного пучка.

Успешный запуск и дальнейшая работа полного собранного модуля СуперFGD в составе ближнего комплекса эксперимента T2K – это завершение большого и важного этапа по дальнейшему развитию нейтринных исследований на пучке T2K. Данные ND280Upgrade позволят существенно снизить систематические ошибки, связанные с описанием взаимодействий нейтрино, и в итоге существенно повысить точность экспериментального измерения параметров нейтринных осцилляций, достичь в будущем чувствительности к CP-нарушению в лептонном (нейтринном) секторе на уровне открытия.

2. Задача «Работка и применение на практике новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон».

Продолжена НИР по разработке новой технологии производства активных элементов детекторов, сцинтилляционных кубиков с тремя ортогональными отверстиями. Используется литье под давлением с применением сложной прецизионной пресс-формы, которая позволяет производить кубики с готовыми отверстиями. Нанесение диффузного отражателя выполняется методом химического травления, в процессе используются специальные нити из эластомера, что позволяет защитить отверстия от попадания хим. агента. Новая технология дает возможность существенно улучшить точность позиционирования отверстий, в опытных партиях достигнут уровень 30 микрон, необходимый для создания и сборки больших сегментированных 3D детекторов. В ИЯИ РАН для исследования кубиков создан стенд с LED-диодом, позволяющий проводить быстрые относительные измерения отдельных элементов. Новый стенд и космический телескоп используются для тестирования сцинтилляторов из опытных партий. Для 300 кубиков (900 отверстий), изготовленных по новой технологии, не было найдено ни одного отверстия с попавшим внутрь отражателем. Результаты измерения световыхода с использованием LED-диода сопоставимы с теми, что были получены на космических мюонах. Новые кубики обладают высоким световыходом, не уступающим значениям опорных из СуперFGD. Развивается методика определения с помощью микроскопа точности изготовления кубиков и отверстий. Показано, что технология изготовления требует продолжения настройки и отладки, так как в партиях выделяется отличие в размерах сторон кубика, на которые действует толкатель.

Исследуется различное сырье, полистирол, для производства детекторов. Кубики из российского полистирола, изготовленные по новой технологии, показали высокий световыход, сопоставимый со значениями для произведенных из сырья из Германии. Иранский полистирол показал заметно более низкий результат.

3. Задача «Разработка внешнего детектора нового водного черенковского детектора проекта Гипер-Камиоканде и вето-детекторов для промежуточного комплекса проекта».

Выполнен большой объем НИР по разработке модулей светосбора для внешней части водного черенковского детектора Гипер-Камиоканде. В качестве фотодетектирующих элементов будут использованы ФЭУ небольшого размера (диаметр 80 мм), расположенные в центре спектромещающих WLS пластин. Разработка пластин на основе ПММА выполнена совместно с НИИ полимеров им. Каргина (г. Дзержинск). Созданы экспериментальные

стенды, разработана методика, проведен широкий спектр измерений различных характеристик пластин и модулей ФЭУ+пластина: тесты с LED-диодами, измерения с черенковским светом в детекторе Infant-K объемом ~100 л, исследования ускоренного старения, измерения темнового сигнала модулей. Следующая конфигурация выбрана для использования во внешнем детекторе Гипер-K: пластины из ПММА с одной спектросмещающей добавкой POPOP 50 мг/л, размером 300×300×7 мм³, центральное отверстие диаметром 78 мм для ФЭУ, оптимальным является фиксация ФЭУ на расстоянии ~ 1 мм от пластины, зеркальный отражатель 3M DF2000MA на торцах, Тувек на внешней стороне пластины. Применение пластин существенно увеличивает эффективность сбора света в детекторе, эффект ~x2 по сравнению с «голым» ФЭУ. При 13°C темновой сигнал модуля составляет ~300 Гц (порог 0,3 ф.э.), что надежно удовлетворяет требованиям детектора и в перспективе даст возможность работы с низким порогом регистрации. Тесты по ускоренному старению: деградация свойств в основном связана с ПММА и составляет ~1%/год, что согласуется с данными по сцинтилляционным детекторам. Выполнялись работы по механике модулей, выбран размер отверстий по краям пластины для соединения с базой. Настроена технология массового производства пластин: обработка с помощью CO₂ лазера, вырезание отверстий, полировка, проверка качества, разработан стенд для быстрого тестирования пластин с использованием LED-диода и МРРС.

Продолжилась НИР по разработке вето-счетчиков для оптических модулей ФЭУ промежуточного водного детектора проекта T2K–Гипер-Камиоканде. Две полукруглые сцинтилляционные пластины собираются в конечный модуль в форме диска. Съём сигнала с одной стороны волокна, вклеенного в канавку S-формы, фотодетекторы – МРРС. Произведены и измерены новые прототипы счетчиков. Обеспечено достаточно высокое значение световыхода по поверхности, что позволяет добиться эффективности регистрации космических мюонов вето счетчиками более 99%. Готовность к массовому производству.

4. Задача «Проведение измерений радиоактивных свойств элементов для новых детекторов нейтрино».

Продолжены исследования радиоактивности детекторных элементов для будущего нейтринного эксперимента Гипер-Камиоканде. В рамках НИР налажено сотрудничество с БНО ИЯИ РАН. Измерения проводятся в зале НИКА (660 м в.э.), в составе которой имеется низкофоновая защита и низкофоновый спектрометр с германиевыми полупроводниковыми детекторами. В планах сделать аналогичные исследования в НЛГЗ-4900 (Низкофоновая Лаборатория Глубокого Заложения на глубине 4900 м в.э.). Выполнены измерения пиков гамма-активности для образцов пластин, которые будут использованы в дальнем детекторе Гипер-K. Получена оценка примесей для: ⁴⁰K, ²²⁸Ac, ²⁰⁸Tl, ²²⁶Ra(²¹⁴Bi). Активность

достаточно мала, полученные значения удовлетворяют требованиям, предъявляемым к компонентам детектора для надежного контроля фона и возможности работы с достаточно низким порогом регистрации. Ожидается продолжение измерений других элементов детекторов, увеличение чувствительности тестов.

5. Задача «Изучение параметров ФЭУ для внешнего черенковского детектора Гипер-Камиоканде».

Выполнены измерения параметров ФЭУ для модулей светосбора внешнего детектора Гипер-Камиоканде. В распоряжении группы ИЯИ РАН имеются 9 приборов Hamamatsu R14374 (Япония) и 5 NNVT N2031 (Китай), ФЭУ диаметром 80 мм. Выполнено сканирование чувствительной области фотокатода с помощью коллимированного LED источника, улучшен используемый стенд, что позволило повысить точность позиционирования элементов, обеспечить повторяемость результатов. Для приборов NNVT наблюдается большая неоднородность фотокатода, пятна низкой чувствительности заметные ближе к краям. Такая неоднородность может являться одной из причин более низких значений световых выходов, полученных в тестах с возбуждением пластин LED диодами (265 и 380 нм): сигнал при использовании NNVT составил около 70% от значений для Hamamatsu.

Выполнены исследования темнового сигнала ФЭУ+WLS пластина, порог устанавливался на уровне 0,3 фотоэлектронов. Проведены два набора тестов, между которыми модуль держался в темноте в термостате в течение 30 дней. Получено хорошее согласие результатов, что показывает стабильность темнового сигнала со временем. Уровень темнового сигнала (при $T=13^{\circ}\text{C}$ в Гипер-К) для модулей, ~300 Гц, заведомо удовлетворяет требованиям внешнего детектора. Уровень шума для ФЭУ ~200 Гц. Изучены эффекты «послеимпульсов» при оценке темнового сигнала.

Для приборов R14374 получены зависимости коэффициентов усиления от напряжения, что позволяет выполнить подбор напряжения для проведения дальнейших исследований при одинаковом усилении приборов. Исследованы зависимости темнового сигнала от напряжения и коэффициента усиления. В планах выполнить аналогичные измерения для NNVT, сделать сравнение сигналов для всех имеющихся в распоряжении группы ИЯИ РАН фотоумножителей R14374 и NNVT для модулей ФЭУ+пластина с LED диодом, а также для прямой засветки ФЭУ LED источником.

На настоящий момент сделан вывод о предпочтительном использовании ФЭУ Hamamatsu R14374 в качестве фотоприемников во внешнем детекторе Гипер-Камиоканде.

6. Задача «Разработка системы очистки жидкого сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ)».

Разработана технологическая схема установки газовой продувки жидкого сцинтиллятора для ББНТ.

Проведены подготовительные работы по размещению и монтажу оборудования для установки вакуумной дистилляции ЛАБа производительностью 100 л/час.

На полутонном прототипе ББНТ проводилась разработка методики измерения содержания радиоактивных примесей в сцинтилляторе на уровне 10^{-16} г/г для U и Th. Из комплексного анализа фонового спектра получено ограничение на содержание ^{238}U и ^{232}Th на уровне $< 10^{-15}$ г/г.

Обновлена конструкция и создана измерительная установка для исследования процессов ослабления сцинтилляционного излучения в сцинтилляторах на основе ЛАБа.

Разработанные и созданные в ходе НИР системы и методики необходимы для проведения подготовительных работ с целью создания нового низкорогового низкофонового сцинтилляционного детекторного комплекса ББНТ, а также для создания необходимой инфраструктуры для функционирования прототипов ББНТ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2023 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Система сбора света с помощью спектросмещающих пластин для внешнего детектора проекта Гипер-Камиоканде / Измайлов А.О. [и др.] // ЭЧАЯ – 2025. – Т. 840. – Вып. 3. – в печати.

2. Ближний нейтринный детектор SuperFGD эксперимента T2K / Дергачева А.Е. [и др.] // ЭЧАЯ – 2025. – Т. 840. – Вып. 3. – в печати.

3. Commissioning of 3D-segmented neutrino detector SuperFGD in the T2K neutrino beam / Dergacheva A. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – в печати.

А.2 Иные публикации по теме

1. Characterization of the optical model of the T2K 3D segmented plastic scintillator detector / S.Abe [et al.] // arXiv:2410.24099. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.24099>.