

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

Per. № 125101311516-9

Per. №



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИЯИ РАН,
чл.-кор. РАН

М.В.Либанов

«30» декабря 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ НОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ
НЕЙТРИНО И ПОИСКА «НОВОЙ ФИЗИКИ» В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С СОЛНЕЧНЫМИ
И УСКОРИТЕЛЬНЫМИ НЕЙТРИНО
(промежуточный за 2025, этап 1)

ФЦП

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

30.12.2025

А.О. Измайлов

подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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




30.12.2025

подпись, дата

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

Исполнители:

Ст. науч. сотр.



30.12.2025

подпись, дата

Е.П. Веретенкин
(введение, раздел 5)

Гл. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук



30.12.2025

подпись, дата

В.Н. Гаврин
(введение, раздел 5, заключение)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



30.12.2025

подпись, дата

В.В. Горбачев
(раздел 5, заключение)

Стажер-исследователь



30.12.2025

подпись, дата

К.Ю. Горшанов
(раздел 1, заключение)

Мл. науч. сотр.



30.12.2025

подпись, дата

А.Е. Дергачева
(введение, раздел 1)

Стажер-исследователь



30.12.2025

подпись, дата

Г.С. Ерофеев
(раздел 1, заключение)

Науч. сотр.



30.12.2025

подпись, дата

Т.В. Ибрагимова
(раздел 5)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



30.12.2025

подпись, дата

В.В. Казалов
(раздел 5)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук



30.12.2025

подпись, дата

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






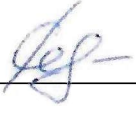
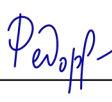





Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук



30.12.2025

подпись, дата

Б.К. Лубсандоржиев
(введение, раздел 5, заключение)

Стажер-исследователь	 _____	30.12.2025	А.Д. Луканов (введение, раздел 5, заключение)
	подпись, дата		
Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 _____	30.12.2025	А.В. Мефодьев (раздел 1)
	подпись, дата		
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 _____	30.12.2025	О.В. Минеев (раздел 2, 3, 5)
	подпись, дата		
Мл. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 _____	30.12.2025	А.Ю. Сидоренков (раздел 6, заключение)
	подпись, дата		
Стажер-исследователь	 _____	30.12.2025	Н.А. Ушаков (раздел 5)
	подпись, дата		
Стажер-исследователь	 _____	30.12.2025	А.Н. Фазлиахметов (раздел 5)
	подпись, дата		
Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 _____	30.12.2025	С.А. Федотов (раздел 1, 4)
	подпись, дата		
Стажер-исследователь	 _____	30.12.2025	Д.В. Федорова (раздел 1, 4)
	подпись, дата		
Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 _____	30.12.2025	А.Н. Хотянцев (раздел 1, 2, 4, 5)
	подпись, дата		
Стажер-исследователь	 _____	30.12.2025	А.А. Чвирина (раздел 1, 2)
	подпись, дата		
Стажер-исследователь	 _____	30.12.2025	Н.А. Шварев (раздел 1, 2)
	подпись, дата		
Науч. сотр.	 _____	30.12.2025	А.А. Шихин (раздел 5, заключение)
	подпись, дата		
Нормоконтроль	 _____	30.12.2025	О.Н. Либанова
	подпись, дата		

РЕФЕРАТ

Отчет 50 с., 1 кн., 17 рис., 6 табл., 7 источн., 1 прил.

ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, ЧЕРЕНКОВСКИЙ ДЕТЕКТОР, ОРГАНИЧЕСКИЙ И НЕОРГАНИЧЕСКИЙ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ, БОЛЬШОЙ БАКСАНСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ГАЛЛИЙ-GERМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП

Общей целью являются разработка новых и дальнейшее развитие имеющихся технологий производства, исследования и непосредственно создание и использование конечных детекторов для прецизионных экспериментов-лидеров в нейтринной физике.

Модули светосбора для (сверх) большого водного детектора Гипер-Камиоканде: показано преимущество большей концентрации добавки РОРОР 50→400 мг/литр. Выполнены исследования темнового сигнала, а также измерения на новом 2-тонном водном детекторе в ИЯИ РАН, адаптация к новому сырью мономера. Разработанные спектросмещающие пластины превосходят зарубежные аналоги, успешно идет массовое производство пластин для Гипер-К. В первом приближении пластины могут быть использованы также для нужд промежуточного детектора эксперимента.

Новая технология изготовления сцинтилляционных кубиков: дополнительным обжатием однородность размеров доводится до <15 мкм, не снижая при этом световыход. Разработан новый дизайн пресс-формы для литья. Показана возможность сборки кубиков, сделанных по новой технологии. Проведены тесты сборок на пучке в ИФВЭ в Протвино.

Оценена эффективность отбора событий от распадов гипотетических «тяжелых нейтральных лептонов (нейтрино)» ($m < \sim 500$ МэВ) в ближнем детекторе эксперимента T2K. По сравнению с результатом 2019 года: увеличена статистика, расширен диапазон исследуемых масс, повышена эффективность отбора, фон также полностью подавлен.

Разработка низкофоновых быстродействующих галлий-содержащих неорганических сцинтилляторов и изучение их параметров: создан измерительный стенд для изучения галлий-гадолиний содержащих сцинтилляторов. Исследовались кристаллы GAGG:Ce, произведенные в России, Японии и Китае.

Создание опытной установки для получения высокочистого металлического галлия: разработана технология получения и комплексная схема очистки металлического галлия до содержания основных примесей на уровне $10^{-7} - 10^{-8}$ масс. % из солянокислых галлиевых растворов.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. Создание внешнего вето-детектора для водного черенковского детектора нового поколения Гипер-Камиоканде и разработка прототипов модулей светосбора для промежуточного водного черенковского детектора IWCD проекта Гипер-Камиоканде	11
2. Разработка новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон для создания высокосегментированных 3D детекторов частиц. Исследование новых материалов, технологий, а также сырья для создания пластиковых детекторов	21
3. Анализ данных ближнего нейтринного детектора ND280 ускорительного эксперимента T2K по поиску распадов тяжелых нейтральных лептонов (тяжелых нейтрино) с массами $<500 \text{ ГэВ}/c^2$	29
4. Исследования параметров галлий-гадолиний содержащих неорганических сцинтилляторов и возможности создания на их основе компактных детекторов для широкого круга задач нейтринной физики	33
5. Разработка технологии получения сверхчистого галлия для создания компактных твердотельных детекторов.....	35
5.1. Технические требования к высокочистому галлию и методы анализа его примесного состава	35
5.2. Получение черного галлия	39
5.3. Отработка технологии получения галлия высокой чистоты	39
5.4. Результаты анализа химического состава металлического галлия.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.	50

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Создание внешнего вето-детектора для водного черенковского детектора нового поколения Гипер-Камиоканде и разработка прототипов модулей светосбора для промежуточного водного черенковского детектора IWCD проекта Гипер-Камиоканде»

В рамках выполнения Госзадания будет создан внешний вето-детектор для водного черенковского детектора нового поколения Гипер-Камиоканде (Япония). Активными элементами светосбора являются модули, состоящие из ФЭУ небольшого размера диаметром 80 мм и спектрсмещающих пластин размером $30 \times 30 \times 0,7$ см³. Пластины поглощают черенковский свет от заряженных частиц в ультрафиолетовой области и переизлучают его в видимой области, где ФЭУ обладают высокой чувствительностью. Пластины на основе полиметилметакрилата со спектрсмещающей добавкой РОРОР разработаны ИЯИ РАН совместно с НИИ полимеров им. Каргина (г. Дзержинск) и ООО Унипласт (г. Владимир). Детально изучены параметры пластин, используемых отражателей, а также характеристики модулей ФЭУ+пластина (Hamamatsu R14347, Япония, и NNVT N2031, Китай). Использование пластин позволяет более чем в два раза повысить эффективность светосбора, достичь планируемого уровня подавления фона от взаимодействий снаружи детектора (до $\sim 10^{-5}$). В рамках Проекта будут изготовлены и протестированы все требуемые 3600 пластин + ~ 200 запасных. Будет завершена разработка механики детектора, выполнена сборка и тестирование модулей ФЭУ+пластина перед установкой в конечный детектор, выполнен монтаж конечных модулей.

Будут разработаны прототипы модулей светосбора для промежуточного водного черенковского детектора IWCD проекта Гипер-Камиоканде. Технологии и конструкции, предлагаемые для дальнего детектора, будут адаптированы для нужд IWCD, основной задачей которого является регистрация ускорительных нейтрино, то есть, в этом случае требования к подавлению фоновых процессов менее строгие. Планируется использовать модули ФЭУ+спектрсмещающая пластина: всего около 400 штук, конечное число и схема распределения модулей по детектору будут определены с помощью моделирования. Также будет разработана необходимая механика для сборки и монтажа элементов.

2. Задача «Разработка и применение на практике новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон для создания высокосегментированных 3D детекторов частиц. Исследование новых материалов, технологий, а также сырья для создания детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов»

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. Будут исследованы новые материалы, технологии, а также сырье для создания детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов и сместителей спектра. В качестве пластиковых сцинтилляторов в нейтринных детекторах как правило используется (например, экструдированный) полистирол с активатором (PTP) и спектросмещающей добавкой (POPOP). Такой состав и соответствующие технологии хорошо изучены, освоены на производстве (относительно дешевы) и потому активно применяются при создании детекторов. Учитывая, что указанные вещества используются уже более полувека, интерес представляет изучение новых возможностей.

В рамках проекта планируется исследовать использование кремний-органических соединений (наноструктурные кремний-органический люминофоры, NOL) для создания пластиковых сцинтилляторов на основе полистирола. NOL, соединяющие в одной молекуле активатор и спектросместитель, обеспечивают эффективную и быструю передачу энергии, что может позволить существенно увеличить световой выход счетчиков (оценки дают ~1,5 раза), а также на ~40% снизить характерное время срабатывания детекторов. Также будет продолжено тестирование различного сырья для производства пластиковых

сцинтилляторов. Важен выбор сырья, полистирола, а также добавок для массового производства с предпочтением отечественных производителей. Необходимо убедиться в обеспечении хороших характеристик (высокий световыход) и стабильности качества.

3. Задача «Анализ данных ближнего нейтринного детектора ND280 ускорительного эксперимента T2K по поиску распадов тяжелых нейтральных лептонов (тяжелых нейтрино) с массами $<500 \text{ ГэВ}/c^2$ »

Будет выполнен физический анализ данных ближнего нейтринного детектора ND280 ускорительного эксперимента T2K по поиску распадов тяжелых нейтральных лептонов (тяжелых нейтрино, HNL) с массами $<500 \text{ ГэВ}/c^2$, существование которых предсказывается в различных расширениях Стандартной модели. Поиск вершин распадов частиц выполняется во время-проекционных газовых (Ar) камерах ND280 TPC для подавления фона от взаимодействий обычных легких нейтрино. Включены в анализ как рождение HNL в распадах каонов, так и пионов, что позволяет расширить диапазон исследуемых масс по сравнению с предыдущим результатом T2K[1]. Также используется обновленная версия программного обеспечения для моделирования, распаковки, калибровки данных и восстановления треков частиц в детекторе. Включены в анализ двух и трех-частичные моды распада, соответствующие парам наблюдаемых в детекторе частиц с противоположными зарядами: μL , $e\text{L}$, $e\text{e}$ и $\mu\mu$. Сигналом являются вершины во время-проекционных камерах TPC с двумя треками разных зарядов, далее используются дополнительные критерии отбора для определения типов частиц, накладываются требования по восстановленной кинематике. Ожидается, что получится увеличить эффективность отбора сигнальных вершин, добиться практически полного подавления фоновых событий. Основными источниками фона являются когерентное взаимодействие нейтрино на газе (аргон) с рождением пионов, а также гамма-конверсия. Оценку параметров смешивания тяжелых нейтрино планируются сделать как с помощью независимого рассмотрения каждой моды рождения и последующего распада HNL отдельно (такой подход достаточно прост в исполнении и использовался, в частности, при анализе данных PS191, MicroBooNE, однако подразумевает строгие ограничения на иерархию элементов смешивания), так и с применением комбинированного подхода, одновременного рассмотрения различных мод рождения и распада HNL, в таком случае будут получены ограничения на элементы смешивания (θ_{12} , θ_{13} , θ_{23}) без предположений об иерархии элементов смешивания.

4. Задача «Исследование существующих галлий-содержащих неорганических сцинтилляторов и возможности создания на их основе компактных детекторов для широкого круга задач нейтринной физики»

Разработка компактного нейтринного детектора на основе галлий-гадолиний содержащих неорганических сцинтилляторов представляет большой интерес для нейтринной физики. Высокое содержание галлия и гадолиния в таких сцинтилляторах, высокая эффективность сцинтилляторов и их относительно хорошее быстродействие позволяет рассматривать эти сцинтилляторы для использования в экспериментах по изучению «галлиевой аномалии», по прецизионным измерениям солнечных $\nu\nu$ -нейтрино, по поиску двойного безнейтринного бета-распада ядер и т.д. Для этих целей хорошим кандидатом является сцинтилляторы GAGG:Ce – активированные церием алюминий-галлий-гадолиниевые гранаты.

Новый неорганический сцинтиллятор GAGG:Ce – это тяжелый сцинтиллятор с плотностью $\rho=6,63 \text{ г/см}^3$, со световыходом 30-60 тысяч фотонов на 1 МэВ (по литературным данным). Тщательные исследования оптических и сцинтилляционных параметров данных сцинтилляторов представляют исключительную важность для будущих нейтринных экспериментов.

5. Задача «Разработка новых технологий получения сверхчистого галлия для создания компактных твердотельных детекторов»

Галлий высокой чистоты необходим для изготовления твердых неорганических галлий содержащих сцинтилляторов, например, гадолиний-алюминий-галлиевый гранатов, активированных церием (GAGG (Ce) - $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$) [2]. GAGG (Ce) является недавно разработанным сцинтилляционным кристаллом с пиком излучения на 520 нм, обладающим хорошей тормозной способностью, он физически прочен и хорошо подходит для широкого спектра применений. В работе [3] рассматривается возможность создания нейтринного детектора на базе сцинтилляционных кристаллов GAGG (Ce) для независимой проверки галлиевой аномалии на уровне достоверности 5σ .

Кроме того, галлий высокой чистоты используется в микроэлектронике для получения арсенида галлия, применяемого в микроволновых, высокоскоростных коммутационных и инфракрасных схемах. Полупроводниковые нитриды галлия и нитриды индия-галлия применяются при производстве синих и фиолетовых светоизлучающих диодов и диодных лазеров.

Основными методами глубокой очистки металлического галлия являются: микрофльтрация, гидрохимическая обработка (ГХО), вакуум термическая обработка (ВТО), электрохимическое рафинирование (ЭХР), направленная кристаллизация (НК). Достижение высокого уровня чистоты возможно только при применении комплексной схемы очистки галлия, определяемой происхождением и примесным составом исходного материала.

В настоящей работе сырьем для получения металлического галлия являются солянокислые растворы галлия, которые образуются в результате работы галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) при проведении извлечений германия из металлической галлиевой мишени массой ~ 50 т [4].

Целью настоящей работы является разработка технологии получения и комплексной схемы очистки металлического галлия до содержания основных примесей на уровне 10^{-7} – 10^{-8} масс. % из солянокислых галлиевых растворов.

1. Создание внешнего вето-детектора для водного черенковского детектора нового поколения Гипер-Камиоканде и разработка прототипов модулей светосбора для промежуточного водного черенковского детектора IWCD проекта Гипер-Камиоканде

Гипер-Камиоканде – это флагманский, (самый) большой искусственный водный черенковский детектор нового поколения, создание которого ведется членами международной коллаборации. Гипер-К представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 68 м и высотой 71 м, с общей массой воды – 258 килотонн (рисунок 1).

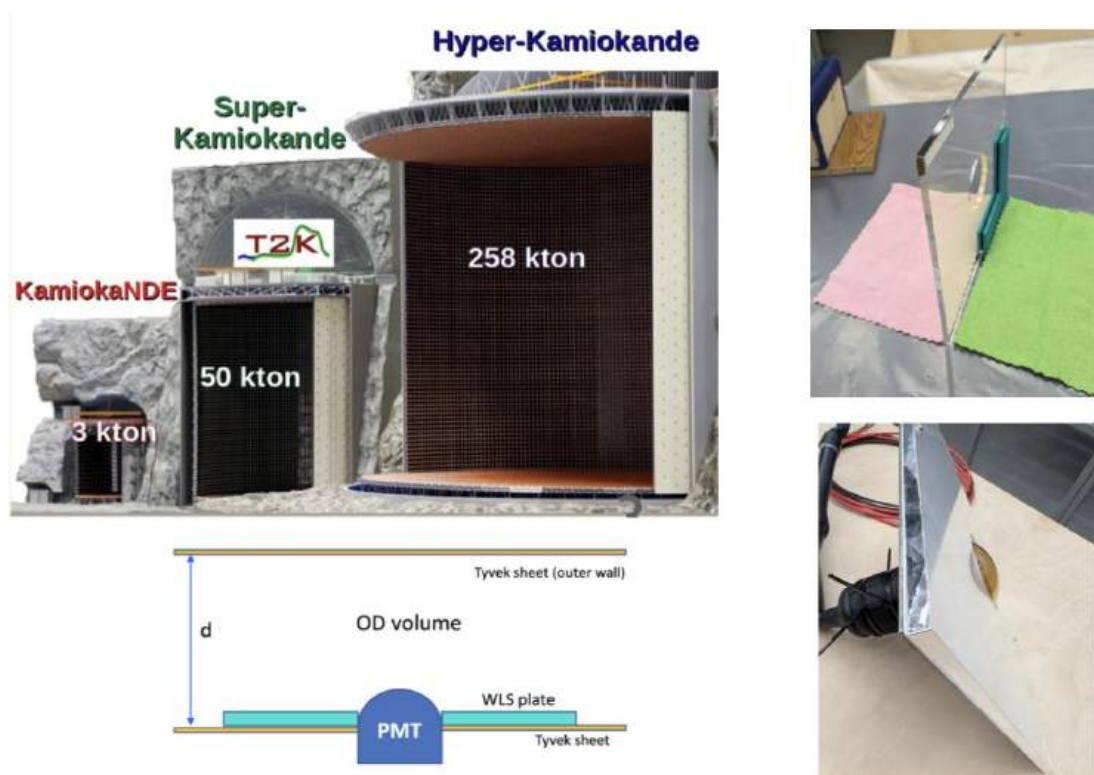


Рисунок 1 – Слева сверху: три поколения детекторов Камиоканде. Слева внизу: схема модуля светосбора внешнего детектора Гипер-Камиоканде. Справа: спектросмещающие пластины для модулей светосбора внешнего детектора Гипер-Камиоканде

Система очистки обеспечивает длину 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”). Необходимо отметить также регистрацию активности из внутренней части для идентификации событий, полностью содержащихся в ID. Гипер-Камиоканде

расположен в подземной шахте, обеспечивающей защиту в примерно 1750 м водного эквивалента. По сравнению с Супер-Камиоканде, экспериментом-предшественником, меньшая толщина породы и большие размеры приводят к увеличенному потоку космических мюонов в ~ 15 раз: оценка дает около 45 Гц (4×10^6 мюонов/день). Активная область внешнего детектора по сторонам также меньше, тоньше, чем в Супер-Камиоканде (2 м). Во внешнем детекторе будет использовано 3600 ФЭУ диаметром 8 см. Важней и ключевой задачей является повышение эффективности регистрации светового сигнала во внешнем детекторе, на решении этой проблемы во много сфокусированы усилия в рамках настоящего задания.

Увеличение светосбора достигается комбинацией следующих подходов. Стены внешнего детектора будут покрыты отражающим материалом Tyvek. Для светосбора будут использованы модули: ФЭУ, расположенные внутри спектроемещающих WLS пластин (рисунок 1). 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, основной кандидат) и NNVT 2031 (Китай).

В рамках НИР в ИЯИ РАН выполняется разработка WLS пластин для OD. Налажено сотрудничество с НИИ полимеров им. Каргина (г. Дзержинск) по изготовлению спектроемещающих 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 разработаны и созданы водный детектор Infant-K («младенец Камиоканде») объемом 100 л и Toddler-K («малыш Камиоканде») в ~ 2000 литров для проведения тестов непосредственно с черенковским светом в условиях, близких к реальным в Гипер-Камиоканде.

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 путем проведения прямых измерений в ИЯИ РАН 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-K и Toddler-K показали, что полная сборка ФЭУ+пластина+отражатели (3M DF2000MA и Tyvek) дает увеличение светосбора

примерно в ~2,5 раза, при этом эффект диффузного отражателя 3М DF2000МА находится на уровне ~50% (увеличение света в 1,5 раза).

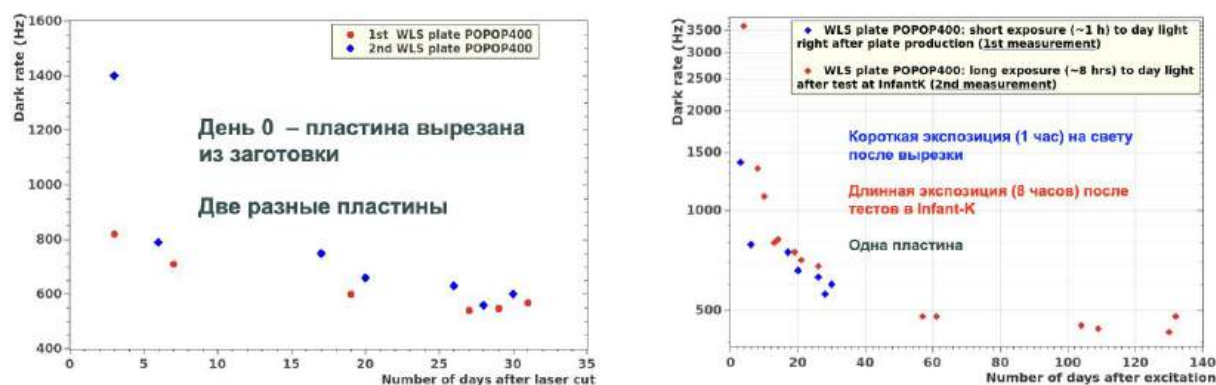
Для регистрации черенковского света в реальном детекторе, то есть света после отражения(-ий) Тувек`ом, была показана эффективность использования в пластинах одной спектросмещающей добавки РОРОР. Тесты проводились с диодами, а также с отраженным и прямым светом в Infant-K, направление черенковского конуса регулировалось изменением положения счетчиков космического телескопа, стенки бака Infant-K покрывались панелями с Тувек. Измерения с диодами проводятся по следующей схеме: сигнал снимается для четырех положений диода по углам пластины, далее результаты усредняются. Отметим, что в НИИ полимеров была измерена максимальная концентрация РОРОР в ПММА: примерно 1200 мг/л. Обобщение результатов измерений можно найти на рисунке 2.



Рисунок 2 – Обобщение различных результатов ИЯИ РАН по измерению параметров пластин (слева: световой сигнал, справа: темновой сигнал)

Видно, что использование одной добавки в большой концентрации позволяет получить преимущество по всему интересующему диапазону света в УФ-А менее 400 нм. Отметим дополнительно преимущество отечественных пластин с РОРОР над «лидерами рынка» Kuraray (Япония). Оптимальным выглядит использование концентрации РОРОР400. Проведенные ранее тесты показали, что концентрации РОРОР100 и 200 не дают преимущества по сравнению уже с РОРОР50, что может быть связано с особенностями перекрытия спектров поглощения и излучения. Помимо эффективности светосбора, важной характеристикой пластин является уровень темнового сигнала. Возможность установки низкого порога регистрации при наборе данных важна для эффективного подавления фона.

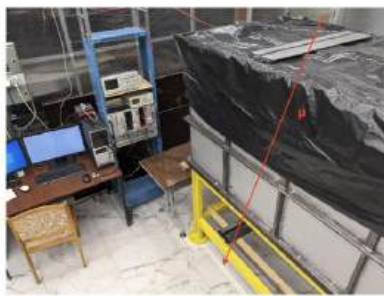
В ИЯИ РАН проводятся измерения темнового сигнала с порогом 0,3 ф.э. (фотоэлектрон) модуля ФЭУ+пластина. ФЭУ – Hamamatsu R14374. Тесты проводятся в термостате для обеспечения контроля температуры. Условия в Гипер-К соответствуют 13-14 °С. Измерения темнового сигнала требуют кропотливости и усердия. После возбуждения – производство (механические напряжения и температурные градиенты), экспозиции на свету (фотореакции, еще и в кислородной среде, разрушение связей) – требуется значительное время для стабилизации темнового сигнала пластины: до десятков дней! Отжиг, как ожидалось, позволяет несколько ускорить стабилизацию, снижая первоначальный уровень темнового сигнала. Природа темнового сигнала от пластины может быть связана со стабилизацией – реакции после воздействия, образование химических связей с характерными энергиями в единицы эВ. Далее, после стабилизации, шум может быть связан с окислительными процессами в кислородной среде. Можно ожидать еще большее снижение темнового сигнала со временем в реальном Гипер-Камиоканде. Некоторые результаты представлены на рисунке 2 и рисунке 3, где показаны стабилизация темнового сигнала модуля ФЭУ+пластина, а также вклад различных компонент в общий уровень шума. Так, для ROROP400 вклад от пластины составляет около 150 Гц, для ROROP50 – менее 50 Гц. Общий уровень темнового сигнала – 300-350 Гц в случае ROROP50 и около 500 Гц для ROROP400, последний является приемлемым (на границе желательного). 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 ROROP. Первая партия пластин (~1700 штук) изготовлена с концентрацией добавки в 50 мг/л, для оставшихся пластин решено перейти на ROROP 400 мг/литр: такая концентрация обеспечивает высокую эффективность светосбора, при этом сохраняя приемлемо низким уровень темнового сигнала.



Contributors to dark rate of PMT+WLS module. Threshold: 0.25-0.3 p.e. Temp: ~13-14 °C. R14374.	
WLS Plate	Dark Rate, Hz
Bare PMT	200
Reflected PMT photons	50
Background in lab	100
Originated in WLS plate	150
Total POPOP400	500

Рисунок 3 – Вверху: изменение темнового (порог в 0,3 ф.э.) сигнала от времени при различных условиях. Вклад в полный темновой сигнал пластины POPOP400

В 2025 году начались измерения на большом водном тестовом детекторе Toddler-K (рисунок 4). Это детектор достаточно большого объема размерами: $200 \times 100 \times 100 \text{ см}^3$, ~2000 литров. Характерные размеры соответствуют таковым в OD Гипер-Камиоканде. То есть, установка позволяет: использовать съемные панели с Тувек на стенах, проводить одновременные измерения до трех модулей, изменяя положение триггерных счетчиков, работать как с прямым, так и с отраженным Тувек'ом светом – получить уникальные данные для настройки моделирования отклика детектора OD Гипер-К, изучать модули ФЭУ+пластина и их элементы в реальных условиях. Отметим проведенные измерения модуля светосбора с двумя различными кандидатами ФЭУ – сравнительные тесты двух приборов актуальны в свете подготовки к тендеру на заказ фотоумножителей для OD, который (тендер) запланирован на начало 2026 года. Измерялся сигнал модуля пластина + ФЭУ NNVT N2031 (Китай) и R14374 Hamamatsu (Япония). Данные набирались в трех конфигурациях (рисунок 4): один «голый» ФЭУ без пластины, ФЭУ+СПП:



PMT+WLS Measured in Toddler-K, Light Signal in p.e.			
PMT	Bare PMT	PMT+WLS POPOP400 PMT-cap	PMT+WLS POPOP400
N2031	9.9	13.1	24.8
R14347	13.2	14.8	28.7

PMT+WLS Measured in Toddler-K, Relative Light Signal			
PMT	Bare PMT	PMT+WLS POPOP400 PMT-cap	PMT+WLS POPOP400
N2031	75%	89%	86%
R14347	100%	100%	100%

Рисунок 4 – Тестовый водный черенковский детектор Toddler-K в ИЯИ РАН. Таблицы: световой сигнал ФЭУ+пластина для различных конфигураций и двух разных ФЭУ NNVT N2031 (Китай) и R14374 Hamamatsu (Япония). Bare PMT – один «голый» ФЭУ без пластины; PMT-cap – ФЭУ+СПП: ФЭУ закрыт, сбор света только пластиной; PMT+WLS – полный модуль OD, ФЭУ+СПП: ФЭУ открыт: свет с пластины + прямой

ФЭУ закрыт – сбор света только пластиной, полный модуль OD, ФЭУ+СПП: ФЭУ открыт – свет с пластины + прямой на ФЭУ. Показано (рисунок 4), что R14374 обладает преимуществом в среднем в ~15% во всех конфигурациях. Также отметим подтверждение увеличения светового сигнала при использовании пластины в > 2 раза.

В ИЯИ РАН совместно с НИИ полимеров разработана, создана, протестирована и успешно используется технологическая цепочка массового производства спектросмещающих пластин. Было закуплено, настроено и введено в эксплуатацию соответствующее оборудование: лазерный станок для нарезки больших пластин из ПММА до нужных размеров и вырезания отверстий для ФЭУ и соединения с базой для сборки, алмазный полировальный станок для конечной полировки граней пластин, дополнительные 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. 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 во время массового производства, в основном для поиска явного брака: установка с использованием LED диода 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 каждом 5 см от источника. Пластина поворачивается и измерения повторяются. Показана чувствительность к наличию спектросмещающей добавки. Применяемая конфигурация не может служить для точной характеристики модуля ФЭУ+пластина, однако удобна для быстрой проверки качества и отбраковки. Во время массового производства пластины также выборочно измеряются в полной конфигурации с ФЭУ как в водных детекторах, так и с LED диодами.

К настоящему моменту произведено около 1700 пластин (после отбраковки на уровне 5%) конечных пластин (рисунок 5), которые подготовлены для отправки в Японию в фанерных ящиках. Это пластины с ROPOR50. Оставшиеся пластины будут изготовлены с концентрацией ROPOR400 для увеличения эффективности сбора света. В конечном детекторе пластины с известной низкой эффективностью будут использованы для оборудования частей детектора с меньшим количеством ожидаемого фона – это, в частности, низ OD.

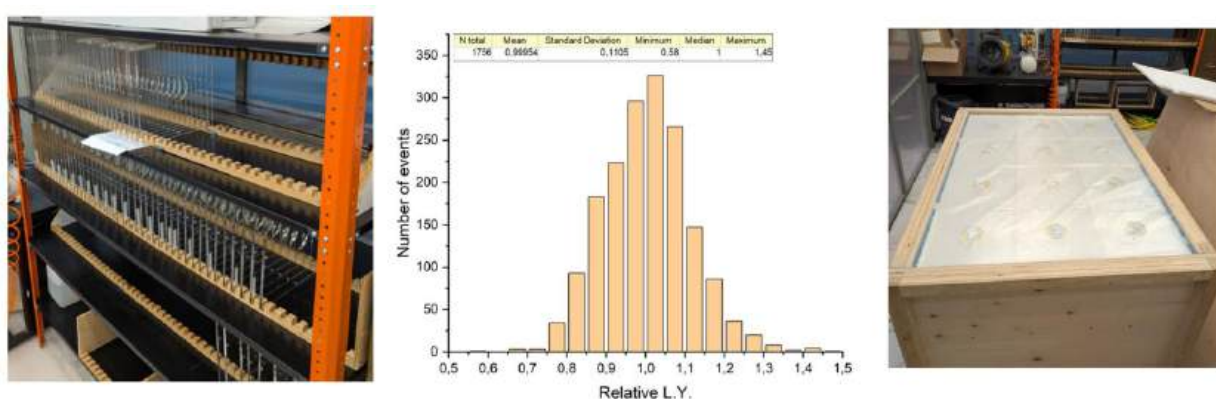


Рисунок 5 – Слева: изготовленные пластины в ИЯИ РАН перед тестами с MPPC. По центру: распределение относительного (относительно сигнала с референсной пластины, менее 0,8 → в брак) светового сигнала по пластинам для первой серии в ~1700 пластин. Справа: упакованные пластины для отправки в Японию

Процедура массового производства пластин следующая (рисунок 6): в НИИ полимеров – изготовление заготовок для последующей обработки в ИЯИ РАН: пластины большого размера $950 \times 650 \times 7 \text{ мм}^3$ из ПММА с добавкой ROPOR50/400. Далее пластины нарезаются с помощью CO_2 лазера до конечных размеров, вырезаются необходимые отверстия, четыре грани полируются на станке с алмазным резцом, далее отжиг в печи при температуре в 80°C , медленное охлаждение для комнатной температуры, после – наклейка отражателя, полимерной пленки 3M DF2000MA, на грани, затем тестирование на стенде с УФ-диодом и MPPC (или LED+ФЭУ, Infant-K, Toddler-K) и упаковка в фанерный контейнер для последующей отправки в Японию.

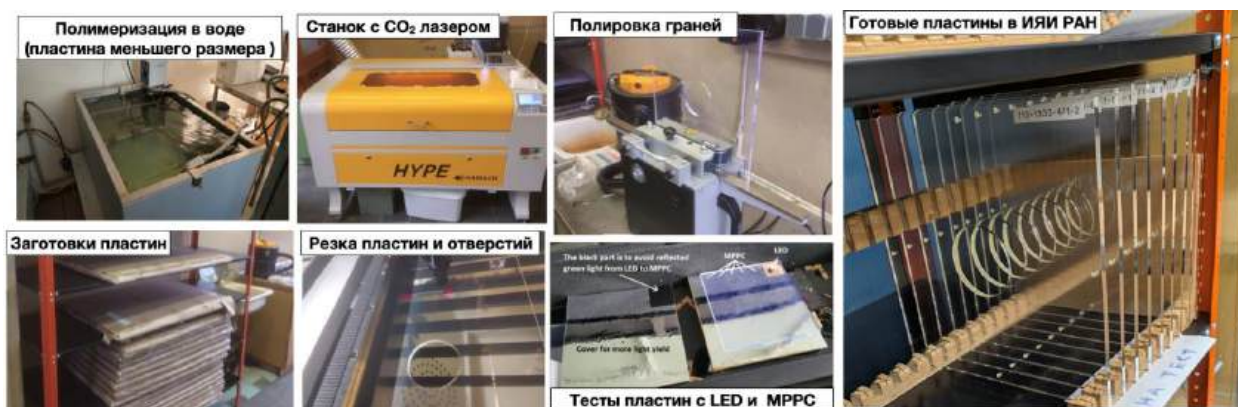


Рисунок 6 – Этапы технологической цепи производства спектросмещающих пластин для внешнего детектора Гипер-Камиоканде. Слева вверху: полимеризация пластин малого размера не в цеху, а в лаборатории

Стоит подробнее остановиться на процедуре отжига пластин. Механический/температурный стресс может вызвать эффект появления «серебра» (crazing), который может развиваться и усиливаться со временем. Отметим, что это не физические трещины, а изменение оптических свойств внешней поверхности. Для предотвращения появления «серебра» как раз и используется отжиг. Пластины помещаются в термостат и доводятся до $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, далее выдерживаются некоторое время (рекомендации дают, например, от 2 часов для 6 мм и менее и $1/3 \times$ на ширину далее), затем термостат выключается и пластины естественным образом охлаждаются до комнатной температуры. Были проведены измерения светового сигнала пластин до и после отжига, какого-либо значимого изменения световыходов не обнаружено.

В рамках проекта была проделана большая исследовательская работа по выбору оптимальной основы для производства пластин: ингибитора и концентрации ингибитора для мономера. Так, в 2025 году НИИ полимеров перешел с использования в основном отечественного мономера, ингибированного параметоксифенолом, на импортное сырье, ингибированное топанолом-А. Основа (без добавки) спектросмещающих пластин соответствует марки стекла СО-120, для последнего НИИ полимеров подбирала соответствующие технологические условия полимеризации с учетом смены состава мономера. Группа ИЯИ РАН изучала влияние концентрации ингибитора на требуемые свойства для нужд ОД Гипер-К: величина светового сигнала, эффективность светосбора, уровень шума, темнового сигнала. Проведены тесты с LED диодом на длине волны 380 нм пластин с концентрацией топанол-А: 0 ppm (разогнанный мономер, очищенный от ингибитора), ~1.7 ppm, 7–10 ppm (типичная концентрация для производства СО-120 в НИИ полимеров), ~18.5 ppm. Для пластин без WLS флуорофола были измерены коэффициенты пропускания от длины волны. Никакого заметного влияния концентрация ингибитора в исследованном диапазоне не оказала: все изготовленные пластины обладают высоким

световыходом. Отметим превосходство над японскими Kuraray. Отметим, что в случае с концентрацией PPOP400, первые опытные пластины декабря 2023 года были, так получилось в связи с временным наличием в НИИ полимеров сырья только такого типа, изготовлены также на топанол-А с ~7 ppm. Получается, что фактически исследования ведутся уже более двух лет, и не было выявлено никакой заметной деградации свойств пластин на матрицах мономера с топанолом-А.

В этой связи необходимо отметить, что в случае со «стандартным» (до 2025 года) ингибитором П-МОФ`ом ситуация в свете требований для Гипер-К сложнее: концентрация в 10 ppm и менее + небольшая концентрация самой добавки, например, в 50 мг/литр, не приводят к каким-либо заметным изменениям характеристик пластин. Однако в ~20 ppm и около – пластины приобретают характерный желтый оттенок (виден на гранях, срезе центрального отверстия), и при последующих измерениях наблюдается падение световыхода за счет пассивного поглощения света.

По-видимому, топанол-А с большой объемной трет-бутиловой группой защищен от окисления до нежелательных продуктов и, соответственно, инертен в контексте влияния на свойства пластин для их применения в Гипер-Камиоканде. Пара-МОФ же быстрее окисляется в получаемой среде (мономер + окислитель перкадокс-16 + добавка PPOP) до хинона, имеющего характерный желто-зеленый цвет. Массовое производство пластин с добавкой PPOP400 будет проводиться с мономером, ингибированным топанолом-А с концентрацией 20 ppm и менее.

Положено начало разработке прототипов модулей светосбора для промежуточного водного черенковского детектора IWCD (рисунок 7) проекта Гипер-Камиоканде. Членами группы ИЯИ РАН сделано предложение, что механика, разработанная для OD, а также сам дизайн пластин и модель ФЭУ могут быть применены для задач IWCD. Опора на уже разработанные конструкции позволит существенно сократить требуемые затраты. Основной задачей IWCD является регистрация ускорительных нейтрино, то есть, требования к подавлению фоновых процессов менее строгие, чем для OD. Детектор расположен на небольшой глубине и перемещается в шахте для измерения потока нейтрино под различными эффективными углами. Область для внешнего детектора узкая, ~70 см, контакты ФЭУ необходимо вывести в канал между внутренней и внешней частями IWCD, здесь может потребоваться сделать выход кабелей сбоку ФЭУ, а не с его конца. В 2026 году запланирована проверка различных систем и крепежа внешних модулей светосбора IWCD на опытных стендах в Японии.

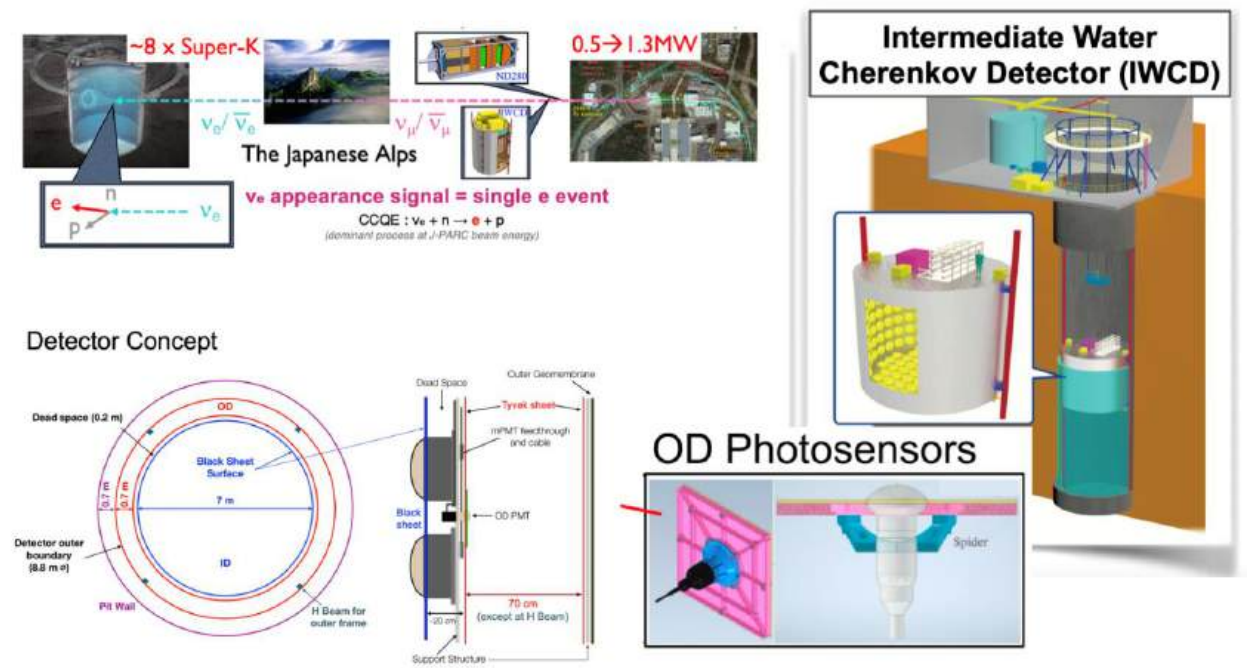


Рисунок 7 – Слева вверху: общая схема эксперимента Гипер-Камиоканде с ближним и промежуточным детекторами. Слева внизу: разрез вид сверху и схема модулей светосбора IWCD. Справа: общая схема детектора IWCD и конструкция модуля ФЭУ+пластина для внешней части IWCD

2. Разработка новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон для создания высокосегментированных 3D детекторов частиц. Исследование новых материалов, технологий, а также сырья для создания пластиковых детекторов

При прямом и определяющем участии ИЯИ РАН был разработан и создан уникальный детектор 3D СуперFGD, который был собран и успешно запущен в Японии на пучке J-PARC осенью 2023 года, и который в настоящий момент набирает статистику нейтринных событий в качестве активной нейтринной мишени в составе общего обновленного комплекса ND280Upgrade. Детектор состоит из 2 миллионов отдельных $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$ кубиков из полистирола, покрытого диффузным отражателем, нанесенным методом химического травления. В каждом кубике просверлены три ортогональные отверстия для размещения 1-мм оптоволокон Y11 S Kuraray. То есть, каждый элемент считается тремя сенсорами Hamamatsu MPPC. Детектор позволяет эффективно восстанавливать топологии событий вне зависимости от угла вылета, существенно (до $< 300 \text{ МэВ/с}$) снизить порог регистрации протонов, обеспечить хорошее ($< 1 \text{ нс}$) временное разрешение – определить направление и также тип частицы. Детектор представляет интерес для использования и валидации различных алгоритмов и подходов многомерного анализа, машинного обучения, нейронных сетей – классификация по характерным паттернам распределения собранного заряда по детектору, восстановление истинного сигнала по неполным и размытым конечным изображениям.

Итак, идея воплощена в жизнь, следующая задача – дальнейшее масштабирование технологии. В качестве большой цели поставлено рассмотрение возможности создания большего Гипер-FGD в составе комплекса ND280++ (рисунок 8), который будет являться продолжением улучшения и обновления комплекса ближнего детектора ND280 T2K уже для нужд мега-проекта T2K–Гипер-Камиоканде. В планах имеем создание полностью активного 3D сегментированного детектора массой около 4 тонн, т.е. в два раза больше нынешнего детектора. Таким образом, надо отметить и разрешить все «слабые» моменты технологии и всей производственной цепочки изготовления, контроля и тестирования мелких активных элементов, отдельных сцинтилляционных кубиков с отверстиями. Целевая точность изготовления элементов и позиционирования поставлена в $< 30 \text{ мкм}$, что согласно результатам моделирования и опыту, полученному с СуперFGD, позволит выполнить масштабирование до 4-х тонного детектора в ND280++.

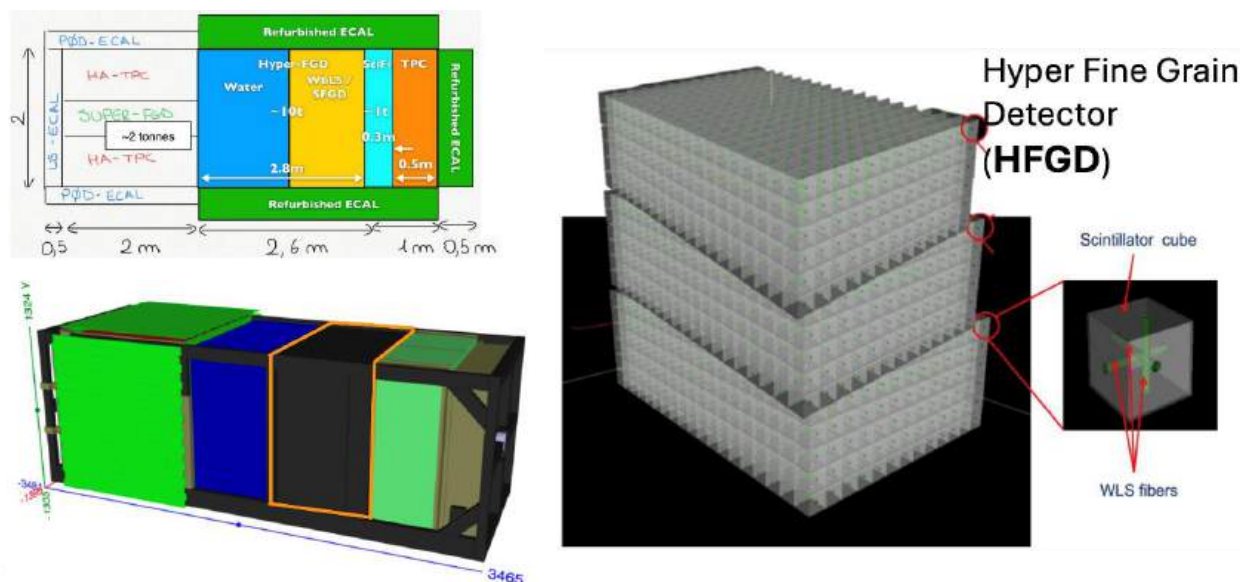


Рисунок 8 – Схема предлагаемого детектора ND280++ и модуля Гипер-FGD

Для нужд СуперFGD кубики изготовлены методом литья под давлением, затем на них нанесен диффузный отражатель методом химического травления (флуктуации размеров ~ 30 мкм), отверстия для волокон изготовлены сверлением на гравировально-фрезерном станке – итоговые флуктуации позиций отверстий относительно сторон ~ 60 мкм. При производстве элементов для SuperFGD было отбраковано более 20%(!) элементов. Технология изготовления является трудоемкой и времязатратной. Так, изготовление всех необходимых элементов для нужд Супер-FGD заняло около двух лет. Особенную сложность, с которой связаны большое количество брака и ресурсоемкость, представляет операция сверления отверстий. Оператору необходимо настраивать, калибровать и контролировать установки станка для обеспечения точности позиционирования, в противном случае значительные смещения отверстий приводят к потере возможности собирать детектор из множества отдельных кубиков. В случае Супер-FGD в работе использовалось 5 сверлильных станков и до 13 операторов. Неизбежный человеческий фактор привел к отбраковке примерно 20% кубиков по причине проблем с размерами и позиционированием.

Собственно, уход от операции сверления отверстий – один, если не основной, из ключевых первичных моментов для изменения. ИЯИ РАН совместно с ООО «Унипласт» (г. Владимир) проводит изучение новой технологии производства пластиковых сцинтилляционных кубиков на основе полистирола с добавками (РТР 1,5%, 0,01% РОРОР). Главный момент – производство кубиков сразу с необходимыми отверстиями, из процесса исключается операция сверления(!). Литье под давлением происходит с использованием сложной прецизионной пресс-формы с четырьмя камерами (ранее, в SuperFGD, было 12 камер). Процесс проводится под давлением $500-600 \text{ кг/см}^2$ и при температуре $200-300$

градусов. Технология позволяет производить кубики с тремя ортогональными отверстиями диаметром 1,5 мм.

Другим важным моментом является новый способ покрытия сцинтилляционных кубиков химическим отражателем. Здесь, если производить сразу с отверстиями, то важно не допустить проникновения раствора вовнутрь, ведь в дальнейшем это приведет к потере светового сигнала. Что предлагается: при низкой температуре отверстия в кубиках закрываются с помощью материала с высоким коэффициентом температурного расширения, эластомером, и после этого происходит травление поверхности кубиков химическим агентом для нанесения слоя отражателя. Эта последняя процедура выполняется при комнатной температуре, таким образом, эластомер расширен и все надежно закрыто. Далее – снова охлаждение, и нити легко выходят из пластика. Технологическая цепочка представлена на рисунке 9.

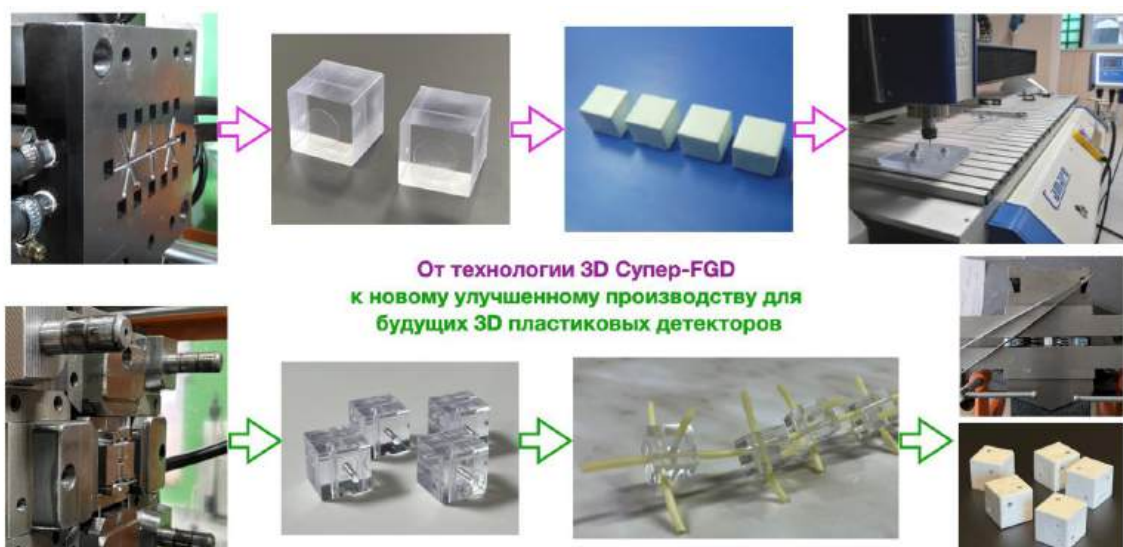


Рисунок 9 – общая технология производства сцинтилляционных кубиков из полистирола с тремя отверстиями для размещения оптоволокон. Вверху – предыдущая технология, использованная для Супер-FGD, внизу – элементы разрабатываемой новой технологии

Задачей НИР в этой связи являлось и будет являться: производство достаточно большого количества партий кубиков с применением 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.

Начнем с геометрии. 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 элемента составляет $\sim 10,41$ мм (рисунок 10), отклонение до 60 мкм. На распределении выделяются два пика, что показывает необходимость корректировки положения толкателя, дальнейшей настройки процедуры литья в новой пресс-форме. Эффект здесь связан как непосредственно с самой пресс-формой, так и с неизбежными флуктуациями при литье и, особенно, при химическом травлении поверхностей. Соответственно, первое решение – работа над улучшением самих камер: в настоящий момент применяются четыре камеры, в каждой по три подвижных элемента, вот эти взаимные степени свободы приводят к разбросу в размерах кубиков из разных слотов до 40 мкм. В новом дизайне, который подготовлен совместно с сотрудниками «Унипласт» и будет заказан к производству, используется только один подвижный элемент, что, как ожидается, позволит существенно снизить разброс в конечных размерах.

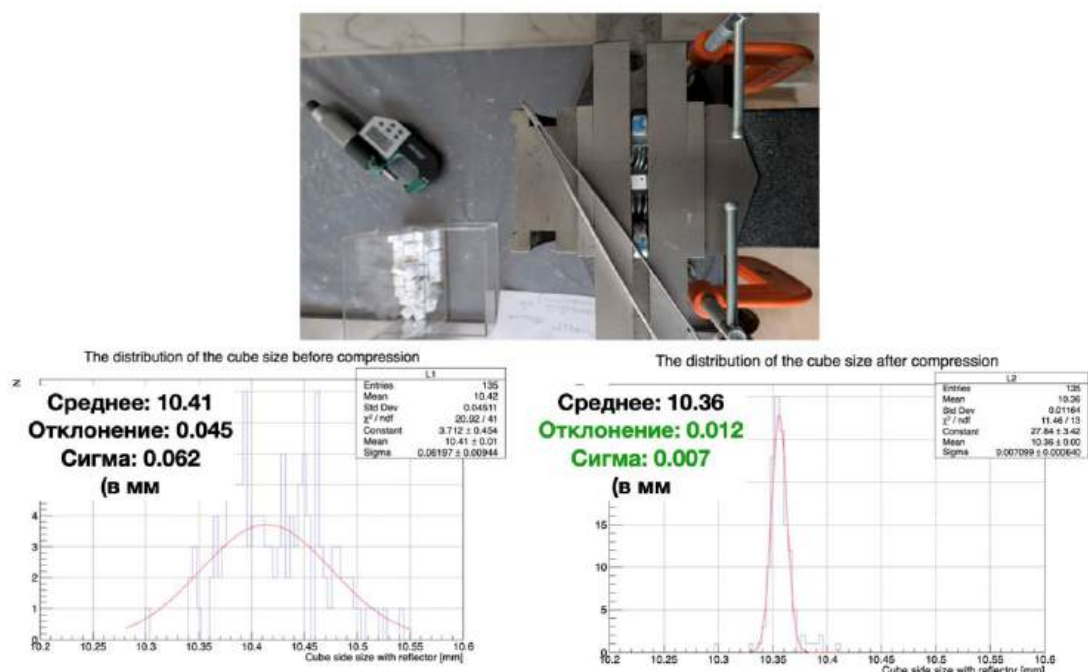
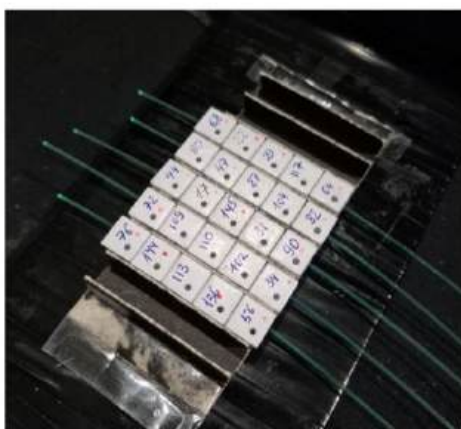


Рисунок 10 – Вверху: приспособление для обжата сцинтилляционных кубиков. Внизу: распределения измеренных размеров кубиков до (слева) и после (справа) обжата

Далее рассматриваем неоднородности и флуктуации после нанесения диффузного отражателя, по сути слоя в 40-150 мкм вспененного полистирола, получаемого травлением химическим агентом. Этот относительно мягкий слой позволяет выполнить дальнейшее формование кубика путем сжатия. Для проведения соответствующих исследований был создан небольшой стенд с тисками и прецизионными направляющими из нержавеющей стали, пружинами для выравнивания (рисунок 10) – путем обжата кубикам придается однородность. Были сделаны измерения размеров 45 кубиков до и после обжата, результаты представлены на рисунке 10. Показано, что относительно простая процедура позволяет достичь однородности в < 15 мкм, что с хорошим запасом удовлетворяет

поставленным требованиям к обновленной технологии изготовления активных элементов 3D детектора. Дополнительно было выполнено небольшое исследование по ускоренному старению кубиков, обжатых согласно новой предлагаемой технологии: кубики выдерживались в термостате при $T=59\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение времени, соответствующего ~2 годам. Какого-либо заметного изменения размеров обнаружено не было. Также были выполнены измерения светового сигнала от космических мюонов кубиков до и после обжатия (рисунок 11) – обнадеживающий результат, никакого заметного изменения светового сигнала. Возможность дополнительного обжатия пластин после изготовления обсуждена с сотрудниками ООО «Унипласт» и может быть применена во время дальнейшего производства, для этих целей разрабатывается специальный гидравлический пресс.



Исследуемые кубики / номер канала	1	2	3	4	5
Российское сырье до обжатия	25.1	22.9	29.3	29.8	27.7
Российское сырье после обжатия	24.9	22.7	29.3	29.4	27.4

Рисунок 11 – Результаты измерения светового сигнала (в ф.э.) кубиков до и после обжатия. Измерения с космическими мюонами. Вверху: фотография используемой сборки

Основой исследования «физических» характеристик кубиков являются измерения с помощью космического телескопа: триггерные счетчики, собранные по схеме совпадений, располагаются сверху и снизу исследуемой сборки кубиков. Такие тесты позволяют определить абсолютные значения световых выходов, 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, например, сборка из 8×3 элементов – в этом случае затрудняется обнаружение отклонения в сигнале конкретного кубика, за одно измерение в каждом кубике исследуется только одно отверстие из трех.

В частности, измерения светового сигнала до и после обжатия проводились на сборке из 5×5 кубиков (рисунок 11). Тесты осуществлялись на космических мюонах при

стабильной температуре 21 °С. Во всех тестах кубики располагались одинаково и исследовались на одном и том же волокне и МРРС (Hamamatsu S13081-050С). Тестировались 5 групп по 5 кубиков на одном волокне. Группы кубиков изолированы друг от друга черным картоном. Для каждого измерения кубики позиционировались идентично. Сигнал с каждой группы снимался с помощью одного волокна Kuraray Y11 длиной 35 см и фотосенсора МРРС Hamamatsu S13081-050С. Дальний от МРРС конец волокна был отполирован и без отражающего покрытия. Итоговое значение световыхода является средним для 5 групп. Точность определения световыхода для каждого измерения составила ~ 5%.

Для обеспечения возможности исследования отдельных элементов был разработан и создан стенд для измерения сцинтилляционных кубиков с использованием УФ-диода. Свет от УФ-диода через световод диаметром 1 мм направляется в одно из отверстий сцинтилляционного кубика. Сигнал снимается с двух других отверстий с помощью спектросмещающих волокон Kuraray Y11 диаметром 1 мм и длиной 35 см и фотосенсоров Hamamatsu МРРС 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. В 2025 году существенное внимание было уделено используемым диодам: необходим засвет с длинами волн, оптимальными для возбуждения РТР (< 300 нм) и с отсутствием/существенным подавлением зеленого/желтого хвоста, связанного с наличием примесей в материале диода. Наличие хвоста длинных волн приводит к постоянному сигналу (прохождение ~видимого света по волокну), что мешает выделить сигнал от реального возбуждения и переизлучения света добавками. Были закуплены УФ-диоды 250, 280 и 310 нм, и из них отобраны образцы с наименьшим хвостом в видимой области, которые и используются в измерениях. С такими приборами удалось добиться четкой корреляции с измерениями с космическим телескопом.

На стенде с УФ-диодом было протестировано 400 кубиков (1200 отверстий), изготовленных по новой технологии, за все время 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 5×5 кубиков: имеем пять значений световыхода с восемью 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 °С и после нормированы на температуру 23 °С. Световыход элементов остается стабильно высоким на протяжении трех лет исследований.

В декабре 2025 года проведены сеансы набора данных со сборками 5×5×5 и 7×6×3 кубиков – пять видов: новая и старая технологии с обжатием и без, кубики без отражателя с матированной поверхностью – на пучке пионов в ИВФЭ в Протвино. π^- с 28,5 ГэВ с примесью каонов (4%) и антипротонов (0,5%).

В рамках НИР существенное внимание уделяется исследованию различного сырья, используемого в производстве. В 2024 году проведены измерения нескольких партий сцинтилляционных элементов: немецкий, российский и иранский полистирол, в качестве опорных использовались кубики СуперFGD. Результаты новых (2025 года) измерений световыхода на стенде с УФ-диодом согласуются с теми, что были получены ранее 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 примерно на 10-30% ниже.

Касательно новых материалов для пластиковых детекторов, то исследования в этом направлении ведутся как в области спектросместителей в приложении к регистрации черенковского света, так и для применения в пластиковых сцинтилляторах. В рамках развития НИР изучаются различные варианты использования других спектросмещающих добавок, новых веществ и материалов для дальнейшего повышения эффективности светосбора и, таким образом, светового сигнала. Интерес представляют, например, кумарины, среди которых можно подобрать образцы с большим сдвигом Стокса и спектрами поглощения и флуоресценции, подходящими для работы с черенковским светом в пластинах. Так, для первичных исследований: изучение растворения в ММА, фильтрации, влияния на процесс полимеризации, были выбраны кумарины: 4-метилумбеллиферон или 7-гидрокси-4-метилкумарин (желчегонное лекарство Гимекромон), АМСА (ацетат аминометилкумарина, <https://ru.lumiprobe.com/fluorophore-chart>) – один из самых ярких синих флуоресцентных красителей, имеющий относительно большой Стоксов сдвиг, высокую устойчивость к фотовыгоранию и рН-независимую флуоресценцию в диапазоне рН от 4 до 10, также Alexa Fluor 350, далее, например,

карбостирил 124 (N-карбоксиэтилметантиосульфона), добавка ВВОТ. Достигнута договоренность с НИИ полимеров о производстве в лаборатории опытных образцов с различными добавками и их концентрацией, определении максимальной растворимости добавок и соответствующих технологических условиях, планируется провести схожие исследования и в ООО Унипласт, с которым также достигнута договоренность о совместных исследованиях в этом направлении.

3. Анализ данных ближнего нейтринного детектора ND280 ускорительного эксперимента T2K по поиску распадов тяжелых нейтральных лептонов (тяжелых нейтрино) с массами $<500 \text{ ГэВ}/c^2$

В рамках работ получена эффективность отбора вершин сигнальных событий, сделана оценка фона, выполнен предварительный анализ вклада различных источников систематических ошибок – создан и наконец доведен до реалистичной, с учетом и контролем всех необходимых ингредиентов, оценки чувствительности анализ по поиску рождения и последующих распадов так называемых «тяжелых нейтрино» (тяжелые нейтральные лептоны, HNL, $m \sim 500 \text{ МэВ}$), гипотетических частиц, существование которых полагается в различных расширениях Стандартной модели, с помощью ближнего детектора ND280 нейтринного ускорительного эксперимента с длинной базой T2K. Общая идея состоит в следующем: в эксперименте используется пучок мюонных нейтрино, который создается в распадах мезонов, в основном, пионов и каонов, которые в свою очередь образуются при взаимодействиях начального пучка протонов с графитовой мишенью. За счет смешивания со «стандартными» легкими нейтрино, тяжелые нейтрино с соответствующими массами (рисунок 12) могут рождаться в распадах мезонов с вероятностями, пропорциональными квадрату элемента смешивания (и с учетом кинематики массивных частиц). В последующем эти тяжелые лептоны, также за счет смешивания и с учетом доступного диапазона масс, могут распадаться на пары лептонов, лептонов и мезонов и тд, что обеспечивает возможность их дальнейшей регистрации в комплексном детекторе ND280.

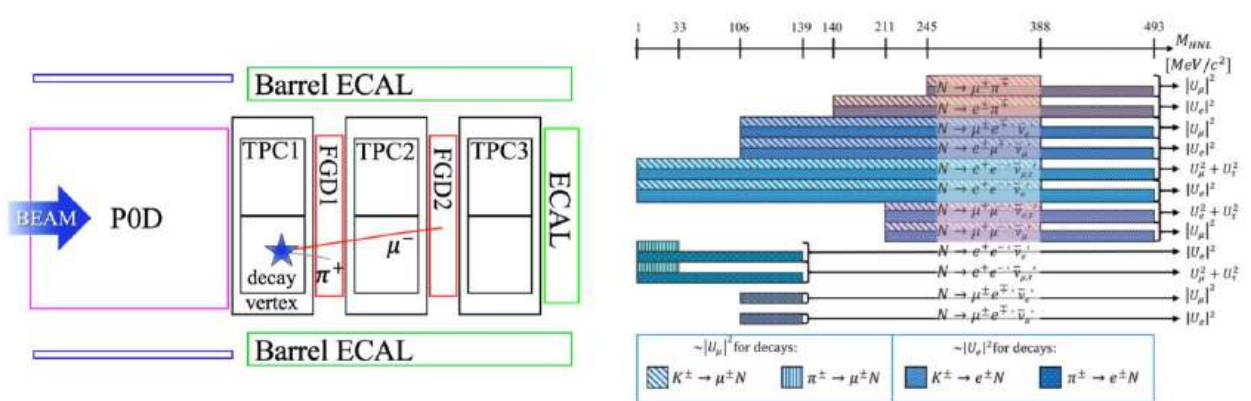


Рисунок 12 – Слева: пример распада тяжелого нейтрального лептона $N \rightarrow \mu + \pi$ в TPC1 ND280. Справа: различные каналы рождения и распада HNL, включенные в анализ

Концептуально анализ является продолжением и дальнейшим развитием работы [1]. В новой работе помимо родителей-каонов включены также пионы, что позволяет расширить чувствительность в область меньших масс тяжелых лептонов. Помимо этого

используется новое программное обеспечение для обработки данных в ND280, основой которого является существенно пересмотренный и улучшенный алгоритм поиска и восстановления вершин во время-проекционных камерах TPC. T2K набирает статистику в двух так называемых модах нейтринного пучка J-PARC: с положительной и отрицательной поляриностью системы фокусирующих горнов, что обеспечивает преимущественно нейтринный и антинейтринный пучки (мюонных) нейтрино. В анализе 2019 года для каждой из мод в анализ были включены мезоны одного соответствующего знака, в новый анализ – как «основные», так и «фоновые» каоны и пионы другого знака, что дает небольшое увеличение конечной статистики для анализа. Технически для оценки потока и моделирования событий распада тяжелых нейтральных лептонов в детекторе ND280 берется изначальный поток «безмассовых» нейтрино от соответствующего мезона (например, $K_{\mu 2}$) и «перевзвешивается» с учетом кинематики массивных частиц. Для оптимизации вычислений в начальной (по пучку нейтрино) плоскости детектора ND280 выбирается плоскость, для которой выбирается случайным образом точка и вычисляется вероятность получения соответствующей кинематики в распаде мезона, указанная вероятность в итоге определяет вес, который ассоциирован с событием. Распады мезонов разыгрываются произвольным образом на их пути (луче) в детекторе ND280, доступная длина пути для каждого HNL также учитывается в общем весе события для оценки конечной эффективности отбора – такой подход возможен, так как известно заведомо большое время жизни HNL и редкость (возможных) рождения и распадов HNL.

Ключевым в работе является поиск вершин во время-проекционных камерах, который эффективен для подавления фона от взаимодействий обычных легких нейтрино. Ищутся пары: лептон +лептон или лептон+мезон. Критерии отбора основаны на: требовании наличия вершины в эффективном объеме TPC – не близко к краям, не близко к катоду; вершины с двумя связанными с ней треками разного знака; выполнения критериев качества (достаточного количества сработавших каналов электроники) треков; критериев идентификации частиц (мюонов, электронов, пионов...) по потерям энергии dE/dX в TPC и, для некоторых мод, по активности в калориметрах ECal; критериев по вентированию активности в окружающих детекторах (P0D, FGD1, FGD2 для TPC1, TPC2 и TPC3 соответственно), а также отбору по восстановленной по продуктам распада кинематике – тяжелые нейтрино в основном движутся по пучку.

Итак, в конечный анализ включены как двух-, так и трех-частичные моды распада, соответствующие парам наблюдаемых в детекторе частиц с противоположными зарядами: $\mu\mu$, $e\mu$, $e\mu$ и $\mu\mu$. С обновленными алгоритмами реконструкции треков в детекторах ND280

последующего анализа HNL для большинства мод удалось повысить эффективность отбора сигнальных событий (рисунок 13).

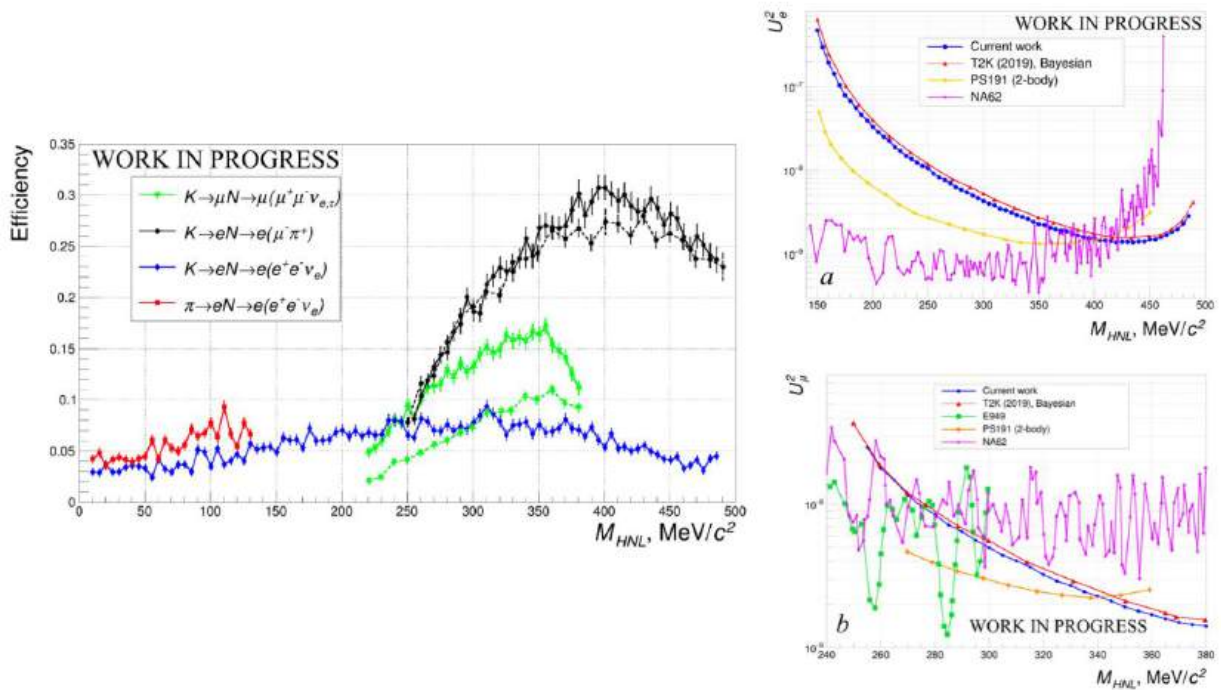


Рисунок 13 – Слева: эффективность отбора сигнальных событий для различных каналов рождения и распада в зависимости от массы тяжелого нейтрино. Справа: чувствительность нового анализа в сравнении с данными других проектов

Далее выполнена оценка числа фоновых событий в различных сигнальных каналах: общий предварительный результат – для всех рассматриваемых каналов ожидаемое число событий от фона составляет существенно меньше единицы, что показывает высокий уровень подавления активности, связанной с взаимодействиями «стандартных» легких нейтрино.

Основными источниками фона служат когерентное взаимодействие нейтрино на газе (аргоне) с рождением пионов, а также гамма-конверсия. В рамках работы также сделана предварительная оценка необходимых систематических ошибок. Здесь рассмотрены как «детекторные» неопределенности – эффективность восстановления треков, разрешения восстановленных кинематических переменных, симуляция вторичных взаимодействий в детекторе (например, реакции пионов) – так и точность оценки потока тяжелых лептонов, которая в основном определяется точностью симуляции пучка J-PARC и основана на данных адронного эксперимента NA61 (ЦЕРН), на котором изучены взаимодействия протонов с мишенью-репликой T2K, измерен выход и кинематика пионов и каонов. Далее на контрольных образцах проверены алгоритмы отбора сигнальных событий, где получено хорошее (в пределах статистики) согласие данных и предсказаний моделирования (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Оценка величины фоновых процессов в различных наблюдаемых каналах

Analysis channel	Background (ν -mode)	Background ($\bar{\nu}$ -mode)
$\mu^{\pm}\pi^{\mp}$	1.05 ± 0.40	0.36 ± 0.21
$e^{-}\pi^{+}$	0.05 ± 0.05	0 ± 0
$e^{+}\pi^{-}$	0.12 ± 0.13	0 ± 0
$\mu^{+}\mu^{-}$	0.93 ± 0.35	0.36 ± 0.21
$e^{+}e^{-}$	0.12 ± 0.12	0 ± 0

Начата работа над программами для конечной статистической обработки данных, создан модуль для анализа на базе пакета PyMC5. Разработана предварительная инфраструктура для оценки коэффициентов смешивания тяжелых нейтрино, эта оценка будет сделана следующими способами:

1) В одном канале: независимое рассмотрение каждой моды рождения и последующего распада HNL. ел, ее и $\mu\mu$ Например, $\mu^{\pm}\pi^{\mp}$ может быть использован для оценки U^2_{μ} , учитывая только $K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}N$, $N \rightarrow \mu^{\pm}\pi^{\mp}$, или $U_e \times U_{\mu}$, учитывая только $K^{\pm} \rightarrow e^{\pm}N$, $N \rightarrow \mu^{\pm}\pi^{\mp}$. Такой подход достаточно прост в исполнении, использовался, в частности, при анализе данных PS191 (ЦЕРН), MicroBooNE (США), однако подразумевает строгие ограничения на иерархию элементов смешивания.

2) Комбинированный подход: одновременное рассмотрение различных мод рождения и распада HNL. В таком подходе будут получены ограничения на элементы смешивания (U_e , U_{μ} , U_{τ}) без предположений об иерархии. Планируется использовать Байесовские методы для получения конечных ограничений. Для получения апостериорных распределений и соответствующих доверительных интервалов будет использован метод с применением цепей Маркова. Доверительные интервалы для элемента смешивания будут получены, интегрируя по другим оставшимся элементам или беря для них наиболее вероятное значение (“marginalising or profiling”). Отметим, что комбинированный подход является ресурсоемким, вычисления в настоящее время переносятся и реализуются на кластере ИЯИ РАН с GPU.

4. Исследования параметров галлий-гадолиний содержащих неорганических сцинтилляторов и возможности создания на их основе компактных детекторов для широкого круга задач нейтринной физики

Для исследования параметров галлий-гадолиний содержащих неорганических сцинтилляторов разработан и создан специализированный комплексный измерительный стенд. Исследовались кристаллы GAGG:Ce, произведенные в России, Японии и Китае. Все кристаллы выращены методом Чохральского и имеют одинаковые размеры – $5 \times 5 \times 5$ мм³. Все грани кристаллов тщательно полированы.

Измеряемые параметры – спектр пропускания, спектр излучения, световыход, кинетика излучения, послесвечение.

Для измерения спектра пропускания, поглощения и излучения сцинтилляторов в состав измерительного стенда введен спектрофотометр. Максимальный уровень пропускания света с последующим выходом на плато достигается при длине волны ~500 нм, уходя далее в инфракрасную область. В ближней ультрафиолетовой области наблюдается довольно узкий пик в области длин волн 360-400 нм с максимумом на длине волны 380 нм. Измеренный спектр излучения кристаллов GAGG:Ce покрывает широкую область длин волн 480-650 нм с максимумом излучения на длине волны 540 нм. Длина ослабления света составляет ~ 60 см. Показатель преломления света составляет – 1,9.

Сцинтилляционные параметры кристаллов GAGG:Ce исследовались как с помощью кремниевых фотоумножителей (Hamamatsu MPPC S13360-6075CS), так и традиционных вакуумных фотоумножителей с фотокатодами с высокой квантовой эффективностью (XP5301B).

Разрешение пика полного поглощения (FWHM), измеренное при облучении сцинтилляционных кристаллов GAGG:Ce гамма-квантами с энергиями ~662 кэВ от радиоактивного источника ¹³⁷Cs, составляет: ~6,8% (японский кристалл), ~7,2% (китайский кристалл) и 13,7% (российский кристалл). Кинетика свечения кристаллов GAGG:Ce имеет сложный многоэкспоненциальный характер с несколькими постоянными времени высвечивания.

Измерения кинетики свечения кристаллов проводились методом счета коррелированных во времени фотонов с использованием широкодиапазонного время-цифрового преобразователя с 75 пс на канал, а также с помощью быстродействующего оцифровщика импульсов. Измеренные значения постоянных времен высвечивания кристаллов при облучении гамма-квантами с энергиями ~662 кэВ составляют: $\tau_1=43,4$ нс (17,8%), $\tau_2=90,2$ нс (24,7%), $\tau_3=295,0$ нс (52,2%), $\tau_4=2857$ нс (5,2%) для японского кристалла,

$\tau_1=140,4$ нс (77,8%), $\tau_2=497,2$ нс (21,8%) для китайский кристалла, $\tau_1=27,5$ нс (13,1%), $\tau_2=81,8$ нс (61%), $\tau_3=189,1$ нс (18,9%), $\tau_4=488$ нс (7%) для российского кристалла.

Полученные результаты исследований показывают высокую перспективность использования сцинтилляционных кристаллов GAGG:Ce в разработках высокоэффективных компактных детекторов нейтрино.

5. Разработка технологии получения сверхчистого галлия для создания компактных твердотельных детекторов

5.1. Технические требования к высокочистому галлию и методы анализа его примесного состава

Требования к содержанию примесей в галлии высшей категории качества зафиксированы в действующих Технических условиях (ТУ) 48-4-350-84. Данные по качественному и количественному примесному составу галлия марок 99,999(5N), 99,9999(6N) и 99,99999(7N) указаны в таблице 5.1. Поставленные в настоящей работе целевые значения содержания примесей на один-два порядка меньше указанных в ТУ.

Таблица 5.1 – Уровень качества галлия, соответствующий высшей категории качества [5]

	Марка	Ga– 99,999	Ga– 99,9997	Ga– 99,9999	Ga– 99,99999
Содержание контролируемых примесей, %, не более	никель	$1,10^{-4}$	$1,10^{-5}$	$2,10^{-6}$	$2,10^{-6}$
	цинк	$5,10^{-5}$	$8,10^{-6}$	$3,10^{-6}$	$3,10^{-6}$
	медь	$4,10^{-5}$	$3,10^{-6}$	$2,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	олово	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$	$3,10^{-6}$	$3,10^{-6}$
	алюминий	$1,10^{-4}$	$3,10^{-5}$	$1,10^{-5}$	$1,10^{-5}$
	свинец	$1,10^{-5}$	$3,10^{-6}$	$2,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	магний	$5,10^{-5}$	$2,10^{-5}$	$6,10^{-6}$	$6,10^{-6}$
	железо	$1,10^{-4}$	$6,10^{-5}$	$2,10^{-5}$	$2,10^{-5}$
	кремний	$3,10^{-4}$	$7,10^{-5}$	$3,10^{-5}$	$3,10^{-5}$
	висмут	$5,10^{-5}$	$5,10^{-6}$	$1,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	кадмий	$5,10^{-5}$	$5,10^{-6}$	$1,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	хром	$5,10^{-5}$	$5,10^{-6}$	$1,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	марганец	$5,10^{-6}$	$5,10^{-6}$	$1,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	сера	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$
	селен	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$	$1,10^{-5}$	$1,10^{-5}$
	теллур	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$	$1,10^{-5}$	$1,10^{-5}$
	фосфор	$5,10^{-5}$	$5,10^{-5}$	$1,10^{-6}$	$1,10^{-5}$
	серебро	-	-	$1,10^{-6}$	$1,10^{-6}$
	индий	-	$8,10^{-5}$	$3,10^{-6}$	$3,10^{-6}$
	кобальт	-	-	$3,10^{-6}$	$3,10^{-6}$

Методы контроля массовых долей примесей регламентируются межгосударственными стандартами ГОСТ 13637.0-93 ÷ 13637.9-93, включающими атомно-

эмиссионный и химико-атомно-эмиссионный методы определения металлических примесей и специальные методы определения неметаллических примесей (селен, сера, фосфор). Стандарты устанавливают следующие значения определяемых этими методами массовых долей примесей в галлии (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Массовые доли контролируемых примесей в металлическом галлии высшей категории качества [6]

Элемент	Массовая доля, %
алюминий	от $2 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}$
висмут	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
индий	от $3 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$
железо	от $2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
кадмий	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
кобальт	от $2 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
кремний	от $3 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$
магний	от $6 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
марганец	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-5}$
медь	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-6}$
никель	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
свинец	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
селен	от $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
сера	от $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
серебро	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^{-6}$
фосфор	от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
хром	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$
цинк	от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$

В лаборатории РХМДН ОЛВЭНА имеется в наличии прибор Optima 7000, используемый для атомно-эмиссионного метода анализа химического состава галлия ИСП-ОЭС (Опτικο-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой). В таблице 5.3 представлены ориентировочные диапазоны определения металлических элементов методом ИСП-ОЭС на приборе Optima 7000. Видно, что пределов обнаружения

выделенных элементов (Al, Mg, Ca, Fe, Cr, Mn, Zn, Cu) достаточно для контроля технологий очистки галлия вплоть до уровня 5N-6N. Метод ИСП-ОЭС позволяет по некоторому ряду элементов контролировать исходный черновой галлий, технологические среды, растворы и материалы. Он позволяет подводить материальные балансы (цементация или выход элементов из галлия) и по ряду надежно контролируемых элементов делать выводы по работе процедуры очистки по всем элементам таблицы Менделеева.

Таблица 5.3 – Ориентировочные диапазоны определения элементов методом ИСП-ОЭС на приборе Optima 7000

Элемент	Диапазон измерений массовой доли элемента, %		Элемент	Диапазон измерений массовой доли элемента, %	
	от	до		от	до
Li	$1,0 \cdot 10^{-6}$	100	Zr	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
Be	$0,3 \cdot 10^{-6}$	100	Nb	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
Mg	$0,3 \cdot 10^{-6}$	100	Mo	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
Al	$1,0 \cdot 10^{-6}$	100	Ag	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
V	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100	Cd	$1,0 \cdot 10^{-6}$	100
Cr	$5,0 \cdot 10^{-6}$	100	In	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
Mn	$1,0 \cdot 10^{-6}$	100	Sn	$5,0 \cdot 10^{-5}$	100
Fe	$3,0 \cdot 10^{-6}$	100	Te	$1,0 \cdot 10^{-4}$	100
Co	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100	Ba	$0,3 \cdot 10^{-6}$	100
Ni	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100	Ta	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
Cu	$5,0 \cdot 10^{-6}$	100	W	$1,0 \cdot 10^{-5}$	100
Zn	$3,0 \cdot 10^{-6}$	100	Pb	$3,0 \cdot 10^{-5}$	100
Sr	$0,5 \cdot 10^{-6}$	100	Bi	$1,0 \cdot 10^{-4}$	100

Учитывая развитие аналитических методов анализа химического состава материалов, утвержденные стандарты допускают использование других методов анализа, обеспечивающих необходимую точность измерений. В настоящее время наиболее разработанным и распространенным методом анализа содержания металлических примесей является масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС).

В российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева (РХТУ) разработана и утверждена методика анализа массовой доли примесных элементов в металлическом галлии методом ИСП-МС. Регистрационный номер методики № 223.0078/RA.RU.311866/2024. Содержится в документе ЦРНВ.7707780830.0011 М.

В Методике заявлены следующие диапазоны определения элементов (таблица 5.4):

Таблица 5.4 – Диапазоны измерений массовых долей элементов в металлическом галлии по утвержденной методике

Элемент	Диапазон измерений массовой доли элемента, %		Элемент	Диапазон измерений массовой доли элемента, %	
	от	до		от	до
Li	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Mo	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Be	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Ag	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
V	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Cd	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Cr	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	In	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Mn	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Sn	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Fe	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Te	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Co	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Cs	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Ni	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Ba	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Cu	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Ta	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Sr	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	W	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Zr	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Pb	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Nb	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Bi	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$

Заявленных по методике нижних пределов хватает для контроля чистоты образцов галлия до 5N-6N, а по многим элементам для требований на материал чистотой 7N. Анализ химического состава чернового галлия и галлия, очищенного в настоящей работе в пилотной лабораторной установке очистки галлия методом перекристаллизации, проводился по этой методике в РХТУ.

Наиболее точным методом анализа особо чистого галлия в настоящее время считается метод ТР-МС (масс-спектрометрия с ионизацией в тлеющем разряде). Этим методом анализа можно получить результаты по всем элементам Таблицы Менделеева, в т.ч. по С, N, O, F, Si, S, Р, достижимые пределы обнаружения по большинству элементов составляют менее 10^{-7} %. Однако, к большому сожалению, в Российской Федерации пока нет работающих по этой методике приборов. На сегодняшний день достигнута предварительная договоренность с китайской лабораторией фирмы Eurofins EAG Materials Sciences о проведении анализа химического состава высокочистого металлического галлия, очищенного в рамках настоящей работы.

5.2. Получение черного галлия

Технологический регламент по получению черного галлия был разработан лабораторией № 13 института ГИРЕДМЕТ. Основой технологии получения черного металлического галлия является процесс регенерации галлия из водного раствора хлорида галлия с составом: Cl – $45 \div 47$ масс. %, Ga – $30 \div 34$ масс. %.

Технологическая схема процесса состоит из следующих основных операций:

- **Приготовление раствора едкого натрия** заключается в растворении сухого NaOH в деионизованной воде до достижения концентрации 250 – 300 г/л.
- **Нейтрализация раствора галлия раствором едкого натрия** осуществляется путем порционного добавления раствора хлорида галлия в раствор едкого натрия. Этот экзотермический процесс проходит при температуре 90 – 120 °С и проводится до получения pH среды 6,5 – 7,0. В результате нейтрализации образуются пульпа, состоящая из осадка гидроокиси галлия $Ga(OH)_3$, и раствор хлорида натрия.
- **Промывка пульпы** предназначена для удаления ионов хлора из смеси после нейтрализации и осуществляется в три стадии добавлением деионизованной воды. После отстаивания пульпы в течение 1 часа раствор хлорида натрия сливается (содержание NaCl после 3-й промывки – 10 г/л).
- **Растворение гидроокиси галлия** осуществляется путем добавления в него сухого едкого натрия и деионизованной воды с перемешиванием до получения раствора галлата натрия с содержанием галлия не менее 150 г/л.
- **Цементация черного галлия** предназначена для извлечения металлического галлия из раствора галлата натрия. Для этого к раствору галлата натрия, залитому в цементатор и нагретому до температуры 40 °С, добавляется черновой галлий, полученный от предыдущей стадии цементации, и гранулированный металлический алюминий. При этом алюминий переходит в раствор, а галлий осаждается из раствора в виде металла по реакции: $Ga\text{ р-р} + Al\text{ мет} \rightarrow Ga\text{ мет} + Al\text{ р-р}$. Добавление металлического алюминия осуществляется порционно по изменению потенциала, измеряемого между металлом и раствором (~0,3 В). Температура цементации поддерживается на уровне 55-65 °С добавлением деионизованной воды или уменьшением частоты загрузки алюминия. Время проведения цементации составляет 30-35 часов, общая загрузка алюминия – 0,6 кг/кг галлия. После промывки металлического галлия в деионизованной воде, черновой галлий разливается во фторопластовые канистры.

5.3. Оработка технологии получения галлия высокой чистоты

При разработке технологии очистки полученного в результате цементации черного галлия были использованы следующие способы обработки: промывка галлия в

растворе соляной кислоты, дополнительная ГХО в растворе соляной кислоты и перекиси водорода, перекристаллизация расплава металлического галлия на монокристаллической затравке.

Промывка галлия в растворе соляной кислоты осуществляется для удаления оксидных и гидроксидных включений и металлических примесей, более электроотрицательных, чем галлий: литий, натрий, калий, кальций, магний, алюминий, цинк [7]. Образующиеся при этом окислы примесей растворяются в кислоте и переходят в раствор, который откачивается.

Для промывки использовался водный раствор соляной кислоты марки ОСЧ (1:1). Расплавленный черновой галлий заливался во фторопластовый стакан, в который добавлялся раствор кислоты, и перемешивался с использованием магнитной мешалки в течение 2 часов при температуре 40 – 60°C. После промывки галлия деионизованной водой до кислотности $\text{pH} = 5$, отбиралась проба для анализа примесного состава.

При разработке технологии извлечения германия из галлиевой мишени ГГНТ [4] было показано, что при использовании промывки в смеси соляной кислоты и перекиси водорода, коэффициент извлечения германия значительно увеличивался. Аналогичная процедура была опробована и для очистки черного галлия: в расплав галлия последовательно добавлялись слабый раствор соляной кислоты, перекиси водорода для образования окислов примесных металлов и дисперсной фазы металлического галлия, раствора соляной кислоты для удаления окислов, деионизованной воды для финишной промывки галлия. После процедуры извлечения также отбиралась проба галлия для анализа.

Перекристаллизация металлического галлия является одним из основных и эффективных методов очистки. Для проведения пробных процессов перекристаллизации черного галлия использовалась лабораторная установка (рисунок 14), состоящая из титанового стакана-кристаллизатора объемом 0,8 л с двойными стенками (1) для циркуляции воды, термостата LT400 (2) с точностью поддержания температуры воды 0,01°C, шестеренчатого насоса Ismatec ISM 901B (3)) с регулируемым расходом воды и магнитной мешалки с подогревом HS (4) для ускорения отвода примесных элементов от фронта кристаллизации.

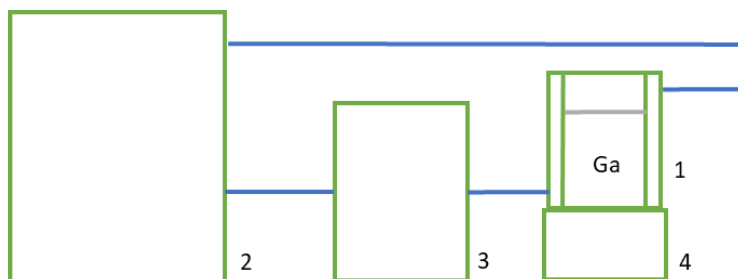


Рисунок 14 – Схема лабораторной установки очистки галлия методом перекристаллизации. 1 – титановый стакан-кристаллизатор, 2 – термостат, 3- шестеренчатый насос, 4 – магнитная мешалка

Предварительно расплавленный черновой галлий массой ~ 4,5 кг заливался в титановый стакан. Охлаждающая вода от термостата ($T = 28-29\text{ }^{\circ}\text{C}$) с расходом ~ 50 л/час подавалась в водяную рубашку титанового стакана. При охлаждении Ga до температуры кристаллизации ($T_{пл} = 29,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) в галлий с помощью титанового пинцета помещалась предварительно подготовленная затравка (рисунок 15).



Рисунок 15 – Монокристаллические затравки Ga (6N)

Использовалась следующая процедура получения затравок: фторопластовый стакан, содержащий расплавленный галлий марки 6N, помещался в холодильник ($T \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) до образования отдельных кристаллических зародышей.

После кристаллизации галлия на затравке в течение ~ 1 часа, образовавшийся кристалл (пример на рисунке 16) извлекался титановым пинцетом из расплава, в расплав галлия помещалась новая затравка для последующей кристаллизации. Скорость кристаллизации при перемешивании расплава составляла ~ 10 г/мин, без перемешивания ~ 5 г/мин. Процесс повторялся до кристаллизации 60 % от массы полной загрузки металлического галлия.



Рисунок 16 – Кристаллы Ga, сформировавшиеся на монокристаллической заправке

Процедура очистки галлия перекристаллизацией повторялась 4 раза, в качестве загрузки использовались полученные на предыдущем этапе кристаллы. В каждом цикле было закристаллизовано 60 % загрузки с отбором проб для анализа химического состава.

5.4. Результаты анализа химического состава металлического галлия

Как отмечалось ранее, после каждой процедуры очистки отделялись пробы для отслеживания изменений примесного состава галлия. Результаты количественного анализа перечисленных в ТУ 48-4-350-84 металлических примесей, полученные методом ИСП-МС, представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты анализа содержания примесных элементов в металлическом галлии на разных этапах очистки, полученные методом ИСП-МС, масс. %

Элемент	Ga 7N TУ масс. %	Черновой Ga масс. %	Ga после HCl масс. %	Ga после HCl+H2O2	Ga 1-я кр-я	Ga 2-я кр-я	Ga 4-я кр-я
Mg	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$< 1,3 \cdot 10^{-5}$	$< 7,3 \cdot 10^{-6}$	$< 1,3 \cdot 10^{-5}$	$< 1,3 \cdot 10^{-5}$	$< 1,3 \cdot 10^{-5}$	
Al	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$< 4,5 \cdot 10^{-5}$	$< 1,9 \cdot 10^{-5}$	$< 4,5 \cdot 10^{-5}$	$< 4,5 \cdot 10^{-5}$	$< 4,5 \cdot 10^{-5}$	
Si	$3,0 \cdot 10^{-5}$		$< 8,9 \cdot 10^{-5}$				
P	$1,0 \cdot 10^{-5}$						
S	$5,0 \cdot 10^{-5}$						
Cr	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$< 1,9 \cdot 10^{-6}$	$< 3,7 \cdot 10^{-7}$	$< 1,9 \cdot 10^{-6}$	$< 1,9 \cdot 10^{-6}$	$< 1,9 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Mn	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$< 2,4 \cdot 10^{-6}$	$< 2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Fe	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$< 5,8 \cdot 10^{-6}$	$< 2,7 \cdot 10^{-6}$	$< 2,1 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$< 4,3 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$
Co	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 6,2 \cdot 10^{-8}$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 1,9 \cdot 10^{-8}$
Ni	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$	$< 2,0 \cdot 10^{-7}$
Cu	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$< 7,7 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Zn	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$< 2,9 \cdot 10^{-6}$	$< 2,9 \cdot 10^{-6}$	
Se	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$< 8,6 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$< 4,1 \cdot 10^{-5}$	$< 4,1 \cdot 10^{-5}$	
Ag	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$< 9,6 \cdot 10^{-8}$
Cd	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$< 6,8 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$< 2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$< 1,1 \cdot 10^{-7}$
In	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$< 3,2 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$< 5,3 \cdot 10^{-7}$	$< 5,3 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
Sn	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$< 5,9 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Te	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$< 1,9 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Pb	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$< 2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$< 8,8 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$< 1 \cdot 10^{-8}$
Bi	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$< 1,0 \cdot 10^{-7}$	$< 1,0 \cdot 10^{-7}$	$< 1,0 \cdot 10^{-7}$	$< 1,0 \cdot 10^{-7}$	$< 1,0 \cdot 10^{-7}$	$< 2,7 \cdot 10^{-8}$

Промывка черного галлия в растворе соляной кислоты существенно снизила содержание большинства контролируемых металлических примесей: Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Sn – на порядок величины, Fe, Cd, In, Te, Pb – в ~2 раза, содержание Ag не изменилось. Процедура, аналогичная извлечению германия из галлия, с использованием соляной кислоты и перекиси водорода значительно снизила содержание Cu и Zn (1 – 2 порядка), Cd и Sn (в 2-3 раза), содержание остальных металлических примесей практически не изменилось.

В результате перекристаллизации черного металлического галлия существенно снизилось содержание большинства металлических примесей: Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Pb,

Bi – на 1-2 порядка величины, Mn, Ag, In, Te – в 2-4 раза, Mg, Al, Se – менее пределов обнаружения, содержание Fe незначительно увеличилось.

Необходимо отметить, что результаты химического анализа являются предварительными из-за малой статистики измерений и довольно высоких пределов обнаружения элементов. Однако, очевидно, что сочетание ГХО в растворе соляной кислоты и четырехкратной перекристаллизации черного галлия приводит к снижению содержания контролируемых металлических примесей в галлии до уровня 7N, устанавливаемого ТУ 48-4-350-84, за исключением Cu (ТУ - $1,0 \cdot 10^{-6}$, Ga 4-я кристаллизация – $2,2 \cdot 10^{-6}$).

Для снижения уровня содержания примесных элементов в лаборатории начата разработка конструкторской документации для изготовления рабочей установки очистки металлического галлия методом направленной кристаллизации объемом рабочей камеры 24 л. Оборудование будет установлено в чистой зоне MaxCleanRoom (производительность по классу чистоты ISO7), закупка и монтаж которой уже произведен (рисунок 17).

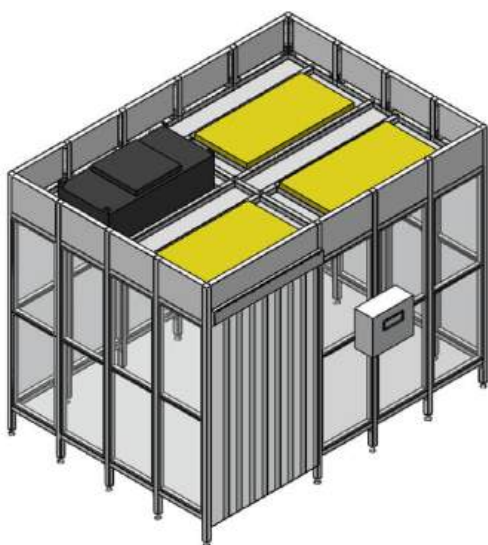


Рисунок 17 – Схема (слева) и фотография локальной чистой зоны MaxCleanRoom

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2025 год выполнен полностью и успешно. Получены действительно значимые научные результаты. Создан задел, надежная база для дальнейшего развития, реализации и полноценного воплощения начатого.

1. Задача «Создание внешнего вето-детектора для водного черенковского детектора нового поколения Гипер-Камиоканде и разработка прототипов модулей светосбора для промежуточного водного детектора IWCD проекта Гипер-Камиоканде»

В целом закончена разработка спектросмещающих пластин для модулей светосбора внешнего детектора Гипер-Камиоканде. Пластины разработки ИЯИ РАН и АО «НИИ полимеров» (г. Дзержинск) с участием ООО «Унипласт» (г. Владимир). Пластины из ПММА с одной добавкой РОРОР: $300 \times 300 \times 7$ мм³, в центре цилиндрическое отверстие диаметром 72 мм для размещения 8-см ФЭУ, по торцам отражатель полимерная пленка 3М DF2000MA, на задней стороне Tyvek для создания общего отражающего покрытия в детекторе Гипер-К. Концентрация добавки: 50 мг/литр в первой партии (1700 пластин) и 400 мг/литр во второй. Всего 3600 пластин + 200 запасных. Использование пластин в дополнение к ФЭУ позволяет более чем в два раза повысить эффективность светосбора в детекторе. Уровень темнового сигнала модуля ФЭУ+пластина – на уровне ниже 500 Гц при пороге в 0,3 ф.э. и T=13-14 °C. Темновой сигнал пластины спадает после возбуждения в течение длительного времени ~O(10-30 дней). Отечественные пластины не только не уступают, но и превосходят по эффективности светосбора зарубежные аналоги (Kuragay (Япония), Eljen (США), LabLogic(США)). Изготовлены и готовы к отправке в Японию 1700 пластин с РОРОР50.

Сделано предложение использовать механику, общий дизайн и конструкцию модулей светосбора, разработанных для внешнего детектора Гипер-Камиоканде для вето-счетчиков промежуточного детектора IWCD. Показано, что можно адаптировать уже имеющиеся элементы, что позволит существенно сократить время и ресурсозатратность разработки и последующего изготовления.

2. Задача «Разработка и применение на практике новой технологии изготовления активных элементов – сцинтилляционных кубиков с отверстиями для WLS оптоволокон для создания высокосегментированных 3D детекторов частиц. Исследование новых материалов, технологий, а также сырья для создания детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов»

НИР по разработке и настройке новой технологии производства активных элементов детекторов, сцинтилляционных кубиков с тремя ортогональными отверстиями.

Цель: обеспечить точность в < 30 мкм, упростить, ускорить и удешевить производство. Основная идея: исключение ресурсоемкой и сложной (в плане количества производимого брака) операции сверления отверстий – литье под давлением с применением прецизионной пресс-формы, которая позволяет производить кубики с готовыми отверстиями, далее методом химического травления наносится диффузный отражатель, отверстия защищаются специальными нитями из эластомера. Предложена и применена процедура дополнительного обжата сцинтилляционных кубиков из полистирола с диффузным отражателем: таким образом, разброс по размерам сторон был уменьшен до < 15 мкм, что заведомо удовлетворяет поставленным целям. Обжатие не оказывает заметного негативного влияния на световыход, что было показано в измерениях с космическими мюонами. Разрабатывается новая пресс-форма с меньшим числом подвижных элементов камер (один вместо трех), что дополнительно позволит увеличить однородность производимых кубиков.

В декабре 2025 года проведены сеансы набора данных со сборками $5 \times 5 \times 5$ и $7 \times 6 \times 3$ кубиков – пять видов: новая и старая технологии с обжатием и без, кубики без отражателя с матированной поверхностью – на пучке пионов в ИВФЭ в Протвино.

Продолжается исследования сырья, полистирола, для производства детекторов. Проводились тесты с новыми УФ-диодами, отобранными по малому «желтому хвосту». Кубики из российского полистирола, изготовленные по новой технологии, показали высокий световыход, сопоставимый со значениями для произведенных из сырья из Германии. Иранский полистирол показал заметно (15-25%) более низкий результат.

3. Задача «Анализ данных ближнего нейтринного детектора ND280 ускорительного эксперимента T2K по поиску распадов тяжелых нейтральных лептонов (тяжелых нейтрино) с массами < 500 ГэВ/ c^2 »

Для анализа данных T2K ND280 по поиску распадов тяжелых нейтрино (тяжелых нейтральных лептонов, HNL, масса $< \sim 500$ МэВ), рождающихся в распадах заряженных каонов и пионов: выполнен перевод анализа на новую версию обработки данных, а также новую версию пакета конечного анализа, выполнена оценка релевантных систематических ошибок, получены эффективности восстановления сигнальных событий. Также на основе моделирования (NEUT) получено число ожидаемых фоновых событий, определены основные источники фона, разработаны контрольные образцы для проверки анализа на реальных данных и оценки числа фоновых событий на данных эксперимента. По сравнению с результатом 2019 года: увеличена статистика, расширен диапазон исследуемых масс, повышена эффективность отбора, фон также полностью подавлен.

4. Задача «Исследование существующих галлий-содержащих неорганических сцинтилляторов и возможности создания на их основе компактных детекторов для широкого круга задач нейтринной физики»

Разработан и создан специализированный комплексный измерительный стенд для исследования параметров галлий-гадолиний содержащих неорганических сцинтилляторов. Исследовались кристаллы GAGG:Ce, произведенные в России, Японии и Китае. Были измерены следующие параметры кристаллов: спектр пропускания, спектр излучения, световыход, кинетика излучения, послесвечение.

Полученные результаты исследований показывают высокую перспективность использования сцинтилляционных кристаллов GAGG:Ce в разработках высокоэффективных компактных детекторов нейтрино.

5. Задача «Разработка новых технологий получения сверхчистого галлия для создания компактных твердотельных детекторов»

Разработана технология получения и комплексной схемы очистки металлического галлия до содержания основных примесей на уровне $10^{-7} - 10^{-8}$ масс. % из солянокислых галлиевых растворов.

- Проведен сравнительный анализ современных методов измерения концентрации основных примесных элементов (ИСП-ОЭС, ИСП-МС, ТР-МС).

- Имеющийся в лаборатории масс-спектрометр Optima 7000 может быть использован для контроля процедуры очистки исходного чернового галлия, а также чистоты используемых химикатов и материалов.

- Количественный контроль содержания примесных элементов предполагается проводить в РХТУ им. Д.И. Менделеева по утвержденной методике анализа массовой доли примесных элементов в металлическом галлии методом ИСП-МС на основании договора по оказанию услуг.

- Окончательный результат химического анализа высокочистого металлического галлия предполагается проводить методом ТР-МС в КНР.

- Опробованная технология очистки чернового галлия, полученного из солянокислых галлиевых растворов, показала, что гидрохимическая промывка галлия в растворе соляной кислоты и неоднократная перекристаллизация расплава металлического галлия приводит к достижению уровня галлия, соответствующего высшей категории качества.

- Начата разработка конструкторской документации для изготовления рабочей установки получения высокочистого галлия методом направленной кристаллизации.

- Установка направленной кристаллизации будет расположена в смонтированной чистой зоне.

Полученный в ходе работ высокочистый галлий может быть использован как для использования в галлиевой мишени ГГНТ, так и для получения галлий содержащих сцинтилляционных и полупроводниковых соединений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Search for heavy neutrinos with the T2K near detector ND280. / K. Abe [et al.] // Phys.Rev.D. – 2019. – Vol 100(5). – P. 052006.
2. Optical characteristics of single crystal $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12} : \text{Ce}$. / N.S. Kozlova [et al.] // Modern Electronic Materials. – 2018. – Vol 4(1). – P. 7–12.
3. P. Huber. Testing the gallium anomaly [Электронный ресурс] //arXiv.org. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/hep-ph/2209.02885v2>. (дата обращения: 15.09.2022).
4. Эффективность химико-технологического цикла 30-тонного галлий-германиевого нейтринного телескопа / Е.П. Веретенкин [и др.] // П-692. – 1991. – ИЯИ РАН. – 16 стр.
5. ГАЛЛИЙ ТУ 48-4-350-84. – https://www.epitaxy.ru/images/pdf/Gallium_TU-48-4-350-84.pdf.
6. ГОСТ 13637.3-93, 13637.6-93, 13637.7-93, 13637.9-93. // МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. ГАЛЛИЙ. – 1993. – <https://docs.cntd.ru/document/>.
7. Р.В. Иванова. Химия и технология галлия. – Москва: Металлургия, 1973. – 392 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.

A.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2025 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Joint neutrino oscillation analysis from the T2K and NOvA experiments. / S.Abubakar,...A.Izmaylov [et al.] // Nature. – 2025. – Vol. 646, № 8086. – P. 818-824. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09599-3>.

2. Measurement of muon neutrino induced charged current interactions without charged pions in the final state using a new T2K off-axis near detector WAGASCI-BabyMIND / K.Abe,...A.Izmaylov [et al.] // Phys.Rev.D. – 2025. – Vol. 112, № 11. – P. 112020. – URL: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/fpqb-j6nv>.

3. Comparative studies of GAGG:Ce scintillators. / Yu. Sidorenkov [et al.] // Radiation Detection Technology and Methods. – Направлена в журнал.

4. Precision Light Yield and Crosstalk Characterization for the SuperFGD scintillator cubes. / I. Alekseev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – Направлена в журнал.

5. K. Gorshanov. Search for Heavy Neutral Leptons in T2K Experiment. // Письма в ЭЧАЯ. – Направлена в журнал.

6. A. Chvirova. Uniformity study of the light yield and crosstalk in cubic scintillators // Письма в ЭЧАЯ. – Направлена в журнал.

A.2 Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ, баз данных, иные РИД, имеющие официальную регистрацию

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. RU2025687534. Дата регистрации: 10.10.2025. Название программы для ЭВМ: Автоматизированный прецизионный анализ геометрических параметров объектов на цифровых изображениях с использованием компьютерного зрения. Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (RU).

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. RU2025688108. Название программы для ЭВМ: Анализ перекрёстных шумов (crosstalk) между элементами кубических твердотельных детекторов нейтрино. Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (RU).