

Приложение 3.

Форма открытия (продления) Проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____ / _____ /

“ _____ ” _____ 2024 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ
ПРОЕКТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы: 02-2-1144-2021

1.2. Шифр проекта: 02-2-1144-1-2021/2024

1.2. Лаборатория: ЛЯП

1.3. Научное направление: Физика элементарных частиц

1.4. Наименование проекта: Эксперимент СОМЕТ

1.5. Руководитель проекта: Цамалаидзе Звиад

1.6. Заместитель руководителя проекта:

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Процессы с нарушением лептонного числа в секторе заряженных лептонов (CLFV), обеспечивают весомый вклад в поиск новой физики с чувствительностью к параметрам широкого спектра новых физических моделей - SUSY, дублетов Хиггса, дополнительных размерностей и, в частности, моделей, объясняющих иерархию масс нейтрино. Наиболее чувствительное исследование CLFV обеспечивается экспериментами, которые используют

высокоинтенсивные мюонные пучки для поиска переходов CLFV мюона в электрон - это эксперименты: $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ (MEG в PSI, Швейцария); $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ (Mu3e в PSI, Швейцария) и когерентная безнейтринная конверсия мюона в электрон в поле ядра $\mu^- N \rightarrow e^- N$ (COMET в J-PARC, Япония; Mu2e в Fermilab, США).

Эксперимент COMET [1] будет проводиться с использованием двухэтапного подхода: Фаза-I [2] и Фаза-II [3].

Экспериментальная цель Фазы-I – это достижение чувствительности для процесса мюон-электронной конверсии на уровне 3.1×10^{-15} , или с 90%-ой вероятностью 7×10^{-15} , что в 100 раз превышает существующий предел 7×10^{-13} , полученный коллаборацией SINDRUM-II в PSI на атомах золота ($\mu^+ Au \rightarrow e^- Au$) [4]. Целью Фазы-II является SES 2.6×10^{-17} , что в 10 000 раз лучше, чем существующий экспериментальный предел. Общее расчетное значение фона для Фазы-I составляет примерно 0.032 события, с коэффициентом затухания протонов 3×10^{-11} . Для достижения требуемой чувствительности и фоновый уровень будет использоваться 8 ГэВ протонный пучок мощностью 3.2 кВт ускорительного комплекса J-PARC (Япония). Два типа детекторов: CyDet (детекторная система цилиндрической пропорциональной камеры) и StrECAL (строу трекер и электромагнитный калориметр (ECAL)), будут использоваться для обнаружения событий преобразования $\mu^- \rightarrow e^-$ и для измерения фоновых событий, связанных с пучком.

Специалисты ЛЯП ОИЯИ успешно участвуют в подготовительном этапе эксперимента COMET. Для Фазы-I сотрудники ОИЯИ изготовили и протестировали весь комплект строу-трубок диаметром 9.8 мм, длиной 1.6 м (более 2700 штук), а для Фазы-II изготовят весь комплект строу-трубок диаметром 5 мм. Специалисты ОИЯИ активно участвуют в создании строу трекера, электромагнитного калориметра и системы исключения космических лучей (CRV) на этапах моделирования и производства научно-технических работ. Они также продолжают принимать активное участие в сборке и обслуживании этих детекторов. Специалисты ОИЯИ участвуют в анализе данных тестовых измерений и будут участвовать в анализе данных эксперимента COMET.

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

2.2.1. Физическая мотивация

Исторически сложилось так, что меняющие аромат нейтральные токи играют важную роль в раскрытии деталей базовых симметрий, лежащих в основе Стандартной Модели (СМ). В СМ не существует известной симметрии, сохраняющей лептонный аромат. Открытия смешивания кварков и смешивания нейтрино дали глубокое понимание физики, лежащей в основе СМ. Мотивированная этими успехами, существует глобальная программа по исследованию процессов нарушения лептонного аромата, обеспечивающая глубокое и широкое зондирование физики за пределами СМ.

Цель исследования состоит в поиске доказательств существования новой физики за пределами СМ с помощью процессов нарушения лептонного аромата в мюонном секторе. Эти процессы чувствительны к эффективным масштабам масс новой физики 10^3 - 10^4 ТэВ/ c^2 , что значительно превышает возможности прямого исследования на коллайдерах. В ближайшем будущем запланированные эксперименты начнут получать данные и расширят чувствительность к взаимодействиям нарушения лептонного числа на порядки. Экспериментально одним из наиболее перспективных процессов поиска нарушения лептонного числа является прямая конверсия мюона в электрон через взаимодействие с ядром $\mu^- N \rightarrow e^- N$.

Эксперимент COMET направлен на измерение безнейтринного когерентного перехода мюона в электрон ($\mu \rightarrow e$ конверсия) в поле ядра алюминия.

Сигнатурой события когерентного безнейтринного $\mu \rightarrow e$ преобразования в мюонном атоме является испускание моноэнергетического одиночного электрона в определенный интервал времени. Энергия сигнального электрона для алюминия равна 104.97 МэВ, а время жизни мюонного атома составляет 864 нс.

Это делает безнейтринную $\mu \rightarrow e$ конверсию очень привлекательной с экспериментальной точки зрения. Во-первых, энергия e^- около 105 МэВ намного выше конечной энергии спектра распада мюона (~52.8 МэВ). Во-вторых, поскольку сигнатурой события является моноэнергетический электрон, измерение совпадений не требуется. В-третьих, большое время жизни означает, что фон, связанный с пучком, может быть устранен. Таким образом, поиск этого процесса имеет потенциал для улучшения чувствительности за счет использования высокой скорости мюонов, не имея при этом случайных фоновых событий.

2.2.2. Фаза-I

Фаза-I эксперимента COMET будет решать две основные задачи: измерение фоновых событий для Фазы-II и поиск $\mu \rightarrow e$ конверсии с промежуточной SES. Схема эксперимента COMET показана на Рис. 1.

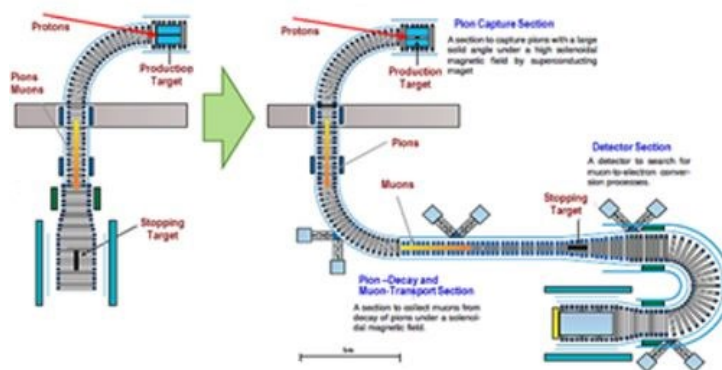


Рис. 1. Схематическое изображение COMET Фазы-I и Фазы-II

Выполнение программы исследований Фазы-I позволит получить опыт работы со многими элементами детекторной системы, которые будут использоваться в Фазе-II, и конкурентоспособные физические результаты, как для процесса $\mu \rightarrow e$ конверсии, так и для других процессов, которые не будут исследоваться в Фазе-II.

Эксперимент будет проходить в J-PARC (Япония) в экспериментальном зале ядерной физики и физики частиц (NP Hall) с использованием импульсного пучка протонов с энергией 8 ГэВ, выводимого с главного кольца (MR) и имеющего высокий коэффициент погашения фона между банчами. Мюоны для эксперимента COMET будут результатом распада пионов, образующихся при столкновениях 8 ГэВ пучка протонов с мишенью. Количество низкоимпульсных мюонов, попадающих в экспериментальную зону, увеличивается за счет сверхпроводящего соленоида для захвата пионов, окружающего протонную мишень в секции захвата пионов. Мюоны отбираются по импульсу и заряду с помощью сверхпроводящих соленоидов С-образной формы мюонной транспортной системы, после чего останавливаются в алюминиевой мюонной мишени, затем они транспортируются с помощью дополнительных соленоидов С-образной формы к детекторной системе, включающей цилиндрическую дрейфовую камеру (CDC) и детектор StrECAL.

В сравнении с Фазой-II, Фаза-I будет иметь только секции захвата пионов и транспортировки мюонов до конца первого 90° изгиба (Рис. 2). Мюоны будут останавливаться в алюминиевой мишени в центре CDC, находящейся в магнитном поле 1Т.

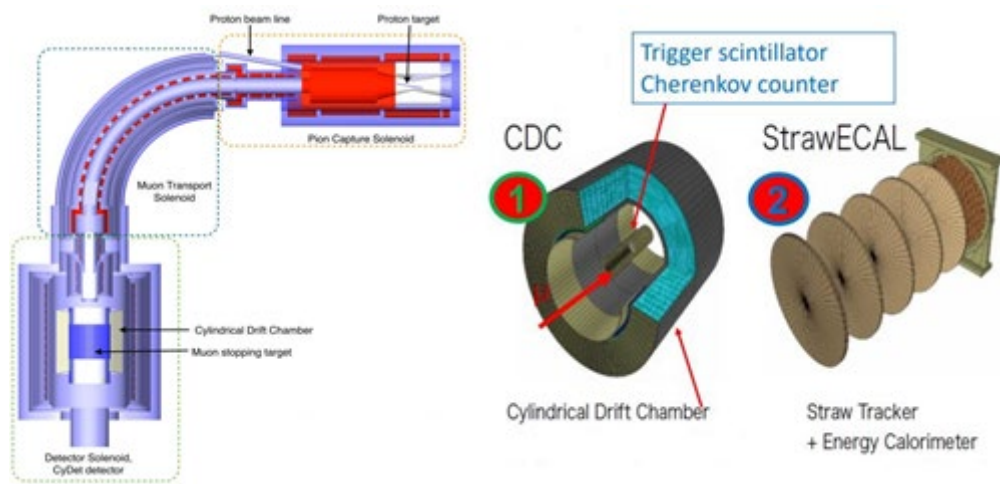


Рис. 2. Схематическое изображение Фазы-I COMET

Основная детекторная система Фазы-I CyDet будет дополнена прототипами детекторов Фазы-II - StrECAL.

Для Фазы-I планируется получить 3.2×10^{19} протонов на мишени, что обеспечит около 1.5×10^{16} остановленных в мишени мюонов. Это позволит достичь требуемого уровня SES, что в отсутствие сигнала соответствует 90% уровню достоверности 7×10^{-15} .

Физическая чувствительность для Фазы-I

Для поиска процесса $\mu \rightarrow e$ конверсии в Фазе-I будет использоваться CyDet. Для заданного числа остановленных в мишени мюонов SES определяется по формуле:

$$B(\mu^- + Al \rightarrow e^- + Al) = \frac{1}{N_\mu \cdot f_{cap} \cdot f_{gnd} \cdot A_{\mu-e}} \quad (1)$$

где N_μ - число мюонов, остановленных в мишени. Отношение остановленных мюонов к общему количеству мюонов на мишени берется $f_{cap} = 0.61$, а доля перехода $\mu \rightarrow e$ из основного в конечное состояние берется $f_{gnd} = 0.9$ [5]. $A_{\mu-e} = 0.041$ - акцептанс сигнального события. Для достижения SES 3×10^{-15} необходимо $N_\mu = 1.5 \times 10^{16}$. Для того, чтобы получить 4.7×10^{-4} мюонов на протон необходимо 3.2×10^{19} протонов. При токе протонного пучка 0.4 мкА измерение будет занимать около 146 дней, хотя существуют значительные неопределенности, связанные с рождением пионов.

Другие исследования

Детектор CyDet в Фазе-I будет располагаться вокруг мишени, останавливающей мюоны, и регистрировать как положительные, так и отрицательные частицы, вылетающие из мишени. Это позволяет осуществлять поиск процесса, нарушающего лептонное число $\mu^- N \rightarrow e^+ N$ ($\mu^- \rightarrow e^+$ конверсия) одновременно с поиском $\mu^- N \rightarrow e^- N$. Ожидаемая экспериментальная чувствительность процесса $\mu^- \rightarrow e^+$ конверсии может быть аналогична чувствительности процесса $\mu^- N \rightarrow e^- N$, хотя детальная оценка еще не проводилась. Кроме того, геометрические размеры CDC обеспечат измерение совпадений в большом телесном угле. Используя пучок меньшей интенсивности ($< 10^7$ мюон/с) и детектор CyDet, можно исследовать не изученный ранее процесс $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$.

2.2.3. Измерение фонов

Поскольку сигнальным событием $\mu^- N \rightarrow e^- N$ является моноэнергетический 105 МэВ электрон, существует несколько потенциальных источников ложных сигналов от электронов с энергией примерно 100 МэВ, которые можно разделить на следующие три категории: собственные физические фоновые события от мюонов, остановленных в мишени; фоны, связанные с пучком, и фоны, вызванные космическими лучами.

Фаза-I будет использоваться для уточнения оценок фона для Фазы-II. В Фазе-I детектор StrECAL будет размещен в конце секции транспортировки мюонов и будет использоваться для измерений фонов, в частности: измерения коэффициента затухания между импульсами пучка, измерения нежелательных вторичных частиц от пучка, таких как пионы, нейтроны, антипротоны, фотоны и электроны; измерение фоновых процессов, которые не были измерены с требуемой точностью, таких как распад мюонов на орбите (DIO) и радиационный захват мюонов (RMC).

2.2.4. Фаза-II

Этот этап включает в себя создание полной системы транспортировки пучка более высокой интенсивности и изменение конфигурации детектора. Основными детекторами для поиска процесса $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии будут строу трекер и ECAL. Эта модификация, вместе с опытом, полученным в Фазе-I, позволит осуществить поиск процесса $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии с SES 3×10^{-17} [3]. Сравнение параметров Фазы-I и Фазы-II приведено в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры Фазы-I и Фазы-II эксперимента COMET

Параметры	Фаза-I	Фаза-II
Мощность пучка	3.2 кВт (8 ГэВ)	56 кВт (8 ГэВ)
Время набора данных	150 дней	1 год
Материал протонной мишени	графит	вольфрам
Число протонов на мишени	3.2×10^{19}	8.5×10^{20}
Число остановок мюона (N_μ)	1.3×10^{16}	2.0×10^{18}
Скорость мюона /с	5.8×10^9	1.0×10^{11}
Число остановок мюонов /протон	0.00052	0.00052
Фоновых событий	0.032	0.34
Акцептанс детектора ($A_{\mu-e}$)	0.06	0.04
SES	3.1×10^{-15}	2.6×10^{-17}
Верхний предел (90% CL)	$< 7 \times 10^{-15}$	$< 6.0 \times 10^{-17}$
Планируемое начало измерений	2025-2026	2028-2029

2.2.5. Необходимые условия эксперимента COMET

Высокоинтенсивный источник мюонов

Для достижения экспериментальной чувствительности более 10^{-16} требуется $O(10^{18})$ мюонов. Для увеличения интенсивности мюонного пучка применяются два метода. Один из них - использование высокомоощного протонного пучка J-PARC, другой - использование высокоэффективной системы сбора пионов. Последнее достигается размещением протонной мишени внутри сверхпроводящего соленоида с индукцией магнитного поля 5 Тл. Принцип работы этой системы захвата пионов был экспериментально продемонстрирован на установке MuSIC (Muon Science Innovative beam Channel) Исследовательского центра ядерной физики (RCNP) Осацкого университета [6].

Импульсный протонный пучок с минимальной утечкой протонов между банчами

Для уменьшения фоновых событий, связанных с пучком, будет использоваться импульсный протонный пучок, где подавление фона от протонов между импульсами строго контролируется. Поскольку время жизни мюона в мюонном атоме алюминия составляет порядка 1 мкс, импульсный пучок может использоваться для устранения фоновых событий, связанных с пучком, путем выполнения измерений с задержкой во времени, при условии, что длительность импульсов пучка короче вышеуказанного времени жизни, а интервалы между

импульсами сопоставимы или больше него. Необходимы строгие требования к затуханию пучка, определяемые как количество протонов утечки по отношению к количеству протонов в импульсе пучка. Настройкой работы протонного пучка и использованием методов, улучшающих затухание, был достигнут коэффициент затухания порядка 10^{-11} .

Соленоиды С-образной формы для разделения частиц по заряду и импульсу

Мюоны с высоким импульсом могут создавать фоновые электроны с энергией в области 100 МэВ и, следовательно, должны быть устранены. Это достигается транспортировкой пучка пионов/мюонов через систему сверхпроводящих соленоидов С-образной формы. При движении по изогнутому соленоиду, центры спирального движения заряженных частиц дрейфуют перпендикулярно плоскости, в которой изгибаются их траектории, причем величина дрейфа пропорциональна их импульсу. Чтобы компенсировать это, по требуемому предельному значению импульса необходимо создать такое дипольное поле, параллельное направлению дрейфа, чтобы центры спиральных траекторий оставались в плоскости изгиба. Следовательно, соответствующим размещением диполей можно подавить высокоэнергетические мюоны и положительно заряженные частицы. Поскольку распределение мюонных импульсов пропорционально совокупному углу изгиба, линия движения пучка С-образной формы в эксперименте СОМЕТ обеспечит хорошее разделение треков мюонов в зависимости от импульса и, следовательно, улучшит отбор по импульсу. В Фазе-II эксперимента СОМЕТ дополнительные изогнутые соленоиды будут использоваться в С-образной транспортной системе электронов между мюонной мишенью и электронным спектрометром, для устранения низкоэнергетических фоновых событий.

Получение пионов

Протонная мишень будет установлена внутри соленоида захвата пионов и сконструирована таким образом, чтобы максимально увеличить захват низкоэнергетических отрицательных пионов, вылетающих в обратном направлении. Соленоид, протонная мишень и область соленоида для захвата мюонов будут рассчитаны на мощность пучка Фазы-II, равную 56 кВт. В процессе работы, при облучении пучком механическая система мишени станет радиоактивной, и ее нельзя будет заменить. Однако сама мишень будет заменена между фазами эксперимента, для этого система позиционирования мишени сконструирована с возможностью дистанционного управления.

Поскольку количество пионов увеличивается при использовании материала с высоким значением атомного числа Z , предлагается использовать графитовую мишень для Фазы-I. Это уменьшит облучение механической системы мишени и тепловой защиты, что значительно облегчит необходимую модернизацию для Фазы-II, где будет использоваться вольфрамовая мишень.

В Фазе-I пучок мощностью в 3.2 кВт создаст тепловую нагрузку в материале графитовой мишени примерно в 100 Вт, которая может быть легко передана защитному экрану соленоида. Опорная система для точного позиционирования мишени внутри соленоида будет иметь малую массу. Выбор энергии протонов был обусловлен показателями пионов и фонов. Наиболее важным является фон, связанный с рождением антипротонов. Для протонов выбрана энергия 8 ГэВ, что выше порога энергии образования антипротонов (6.56 ГэВ).

Захват пионов

Система захвата пионов состоит из мишени для рождения пионов, соленоидов с мощным магнитным полем, обеспечивающим большой пространственный угол захвата пионов, и радиационной защиты. Пионы, испускаемые в обратном направлении с поперечным импульсом

менее 100 МэВ/с, захватываются 5 Тл магнитным полем соленоида. Это обеспечит необходимое количество пионов для рождения мюонов с импульсом ниже 75 МэВ/с.

Транспортировка мюонов

Секция транспортировки мюонов состоит из изогнутого и прямого сверхпроводящих соленоидов длиной ~7.6 м, создающих магнитное поле 3 Тл. Требования к ней следующие:

- движение мюонов должно быть достаточно длительным, чтобы пионы распались на мюоны (например, на расстоянии около 20 м коэффициент выживаемости пионов с соответствующим импульсом составляет приблизительно 2×10^{-3});
- система транспортировки мюонов должна отбирать мюоны с низким импульсом (~40 МэВ/с) и исключать мюоны с высоким импульсом (>75 МэВ/с), чтобы избежать фона от распада мюонов на лету, **создающего ложные сигнальные события с энергией ≈ 105 МэВ.**

Оптимальный импульс мюона - это ~40 МэВ/с. Мюоны с более высоким импульсом менее вероятно создадут фон в области сигнала из-за распада на лету. Положительные мюоны также являются потенциальным источником фона. Для минимизации этих фонов используется изогнутый соленоид.

Чтобы центр спиральных траекторий мюонов с энергией 40 МэВ/с оставался в плоскости изгиба, в Фазе-I используется один изогнутый соленоид с углом изгиба 90° и компенсирующим дипольным полем ~0.05 Тл. Система коллиматоров предназначена для удаления частиц, движущихся на 8.5 см выше или на 10 см ниже уровня расположения пучка, и состоит из двух пластин из нержавеющей стали, установленных на выходе из мюонной транспортной системы. Чтобы отделить область мюонной мишени, заполненную гелием, от области движения мюонного пучка в вакууме, на выходе изогнутого соленоида будет установлено вакуумное окно из титана толщиной 500 мкм. Секция транспортировки мюонов и соленоид детекторов (DS) соединяются «мостовым» соленоидом (BS), внутри которого величина магнитного поля уменьшается с 3 до 1 Тл.

Мюонный пучок

С использованием модели QGSP_BERT было рассчитано число мюонов и пионов на протон на выходе из секции транспортировки мюонов и в мюонной мишени, данные приведены в Таблице 2. Для протонного пучка 0.4 мкА число остановленных в мишени мюонов составляет примерно 1.2×10^9 в секунду.

Таблица 2. Число мюонов и пионов на протон на выходе из BS и остановленных в мюонной мишени

Число частиц, в расчете на 1 протон	На выходе из секции транспортировки мюонов	Остановленных в мюонной мишени
Мюоны	5.0×10^{-3}	4.7×10^{-4}
Пионы	3.5×10^{-4}	3.0×10^{-6}

Мюонная мишень

Мюонная мишень расположена в центре DS и спроектирована таким образом, чтобы максимально увеличить число остановленных мюонов и акцептанс сигнальных электронов $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии. Конструкция мишени также должна минимизировать потерю энергии конверсионными электронами, поскольку это увеличивает разброс их импульсов.

Чтобы исключить фоновые события, связанные с пучком, окно измерения будет открываться только через приблизительно 0.7 мкс после импульса протонного пучка.

Материалы с высоким значением атомного числа Z не подходят для мюонной мишени, поскольку время жизни мюонного атома уменьшается с увеличением Z , поэтому был выбран алюминий ($Z = 13$) с временем жизни мюонного атома 864 нс.

Мишень состоит из 17 алюминиевых плоских дисков радиусом 100 мм и толщиной 200 мкм с расстояниями между ними 50 мм [7].

2.2.6. Детекторы

В Фазе-I эксперимента COMET будет использоваться CyDet, система детекторов StrECAL и система вето детектора (CRV).

Основной задачей StrECAL в Фазе-I является проведение прямых измерений состава мюонного пучка и фонов, также эта система детекторов очень похожа на детекторы, которые будут использоваться в Фазе-II, поэтому она выступает в качестве прототипа детекторов Фазы-II.

2.2.6.1. CyDet

Детекторная система цилиндрической пропорциональной камеры является основным детектором для поиска $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии в Фазе-I. Она состоит из цилиндрической дрейфовой камеры (CDC) и цилиндрического триггерного годоскопа (СТГ). На Рис. 3 изображена схема детектора CyDet. Он расположен после BS, в секции транспортировки мюонов, и установлен внутри большого сверхпроводящего DS с магнитным полем 1 Тл, вокруг мишени.

Этот детектор был выбран для Фазы-I, так как в ней нет изогнутого соленоида для транспортировки электронов, и поэтому большинство частиц пучка, которые не останавливаются в мюонной мишени, выходят из области детектора и не регистрируются.

Ключевая особенность эксперимента COMET - это использование импульсного пучка, который позволяет исключить мгновенные фоновые события от пучка, рассматривая только события, появляющиеся через несколько сотен наносекунд после возникновения импульса пучка.

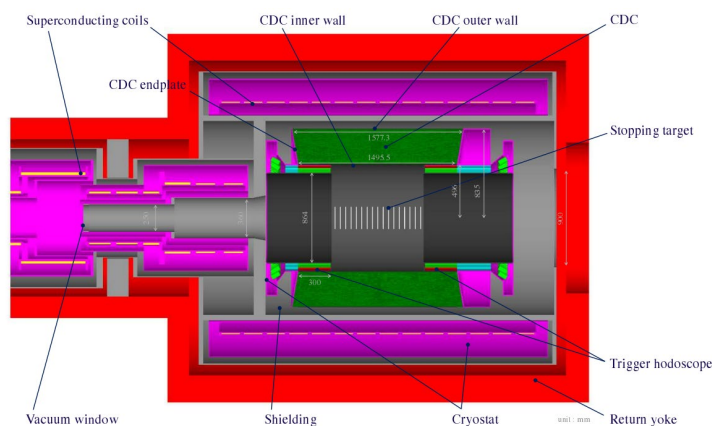


Рис. 3. Схематическое изображение CyDet

Основные параметры CDC приведены в Таблице 3. Радиусы внутренней и внешней стенок выбраны таким образом, чтобы избежать попадания в CDC электронов от распада мюонов на орбите (DIO) с импульсом менее 60 МэВ/с и зарегистрировать все сигнальные электроны с импульсом 105 МэВ/с. Стенки изготовлены из пластика, армированного углеродным волокном (CFRP). Внутренняя и внешняя стенки имеют тонкую алюминиевую фольгу, клеенную внутрь для устранения заряда на CFRP. Торцевые пластины имеют коническую форму и толщину около 10 мм. Триггерные годоскопы размещены как на восходящем, так и на нисходящем концах CDC.

Детектор спроектирован таким образом, чтобы избежать высоких значений попаданий частиц пучка, электронов DIO и низкоэнергетических протонов, испускаемых после радиационного захвата мюонов ядром. Среди небольшого количества частиц, которые в конечном итоге регистрируются в CDC, преобладают электроны DIO и низкоэнергетические протоны. Протоны легко идентифицируются, так как их энергия, выделяемая в CDC, примерно в 100 раз больше, чем у электронов с аналогичным моментом. Чтобы достичь требуемой чувствительности для Фазы-I, разрешение по импульсу должно составлять около 200 кэВ/с для электронов с энергией 105 МэВ. При таких параметрах доминирует многократное рассеяние. Следовательно, CDC должна быть маломассовым детектором, что определяет её конструкцию и выбор газовой смеси.

Таблица 3. Основные параметры CDC

		Длина (мм)	Радиус (мм)	Толщина (мм)
Внутренняя стенка		1495.5	496.0-496.5	0.5
Наружная стенка		1577.3	835.0-840.0	5.0
Число чувствительных слоев		20 (включая 2 пограничных слоя)		
	Материал	Диаметр (мкм)	Число (шт.)	Натяжение (г)
Анодные проволоки	Вольфрам, покрытый золотом	25	4986	50
Катодные проволоки	Алюминий	126	14562	80
		Состав		Объем (л)
Газовая смесь	He:i-C ₄ H ₁₀ (90:10)		2084	

2.2.6.2. Строу трекер

Поскольку импульс электронов $\mu^- \rightarrow e^-$ конверсии составляет всего 105 МэВ/с, преобладает многократное рассеяние электронов в материале трекера. Поэтому большое значение имеет уменьшение общей массы детектора и помещение его в вакуумную среду. В соответствии с этими требованиями в качестве детектора был выбран строу трекер.

В Фазе-I строу трекер будет осуществлять прямые измерения частиц мюонного пучка, интенсивность образования частиц (в частности, антипротонов) в зависимости от энергии пучка и других фонов. Он будет размещен внутри DS, величина магнитного поля которого составляет 0.8–1.1 Тл. В комбинации с калориметром, детектор обеспечит точное измерение импульса частиц и их идентификацию с помощью данных dE/dx , E/p и времени пролета. В Фазе-I, как показано на Рис. 4, различные частицы достигнут DS и войдут в него.

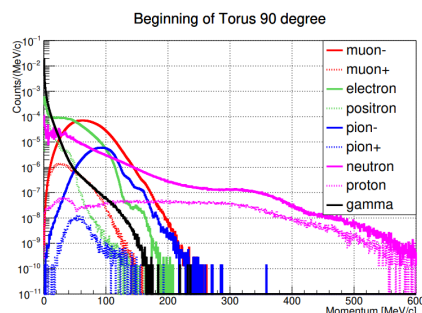


Рис. 4. Распределение импульсов различных частиц пучка на выходе из первого, изогнутого на 90°, соленоида, с использованием графитовой протонной мишени

Общая структура детектора

Конструкция строу трекера схематично изображена на Рис. 5. Каждая станция трекера состоит из четырех плоскостей: две для измерения координаты x и две для измерения координаты y . Все плоскости в парах смещены относительно друг друга на половину диаметра трубки, чтобы устранить неоднозначность лево-право. Каждая станция выполнена как отдельный блок и установлена в раме детектора, которая вставляется и извлекается из транспортного соленоида на линейных направляющих. Рабочая смесь подается в трубки из газовой системы через концевики, которые вклеиваются в строу и в которых закрепляются анодные проволоки. На аноды подается высокое напряжение, а стенки строу-трубок (катоды) заземлены. Трубки имеют диаметр 9.8 мм и 5 мм для Фазы-I и Фазы-II, соответственно. Корпус станции выполнен из алюминия, имеет круглую форму, поэтому длина трубок варьируется от 692 мм до 1300 мм.

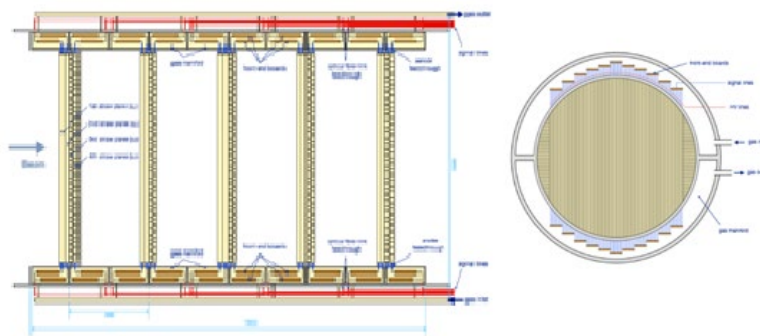


Рис. 5. Общая структура строу трекера (размеры строу увеличены в три раза для наглядности): (слева) вид сбоку; (справа) условный вид строу плоскости в поперечном сечении

Строу-трубки

Тонкостенные дрейфовые трубки изготавливаются методом ультразвуковой сварки с частотой колебания 44 КГц. Для Фазы-I толщина стенки строу составляет 20 мкм, диаметр 9.8 мм, для Фазы-II - 12 мкм и 5 мм. Трубки диаметром 9.8 мм были произведены в ЛФВЭ ОИЯИ на установке, созданной для NA62 [8]. Для производства строу диаметром 5 мм с использованием технологии ультразвуковой сварки группы NA62 в ЛЯП ОИЯИ было оборудовано помещение 6-го класса чистоты с постоянным контролем температуры в пределах 22-23°C ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) и влажности 43-44% ($\pm 10\%$), разработана и создана установка СРП-STRAW. Главным отличием СРП-STRAW от установки NA62 является использование фиксированного зазора между молотом и наковальней. Трубки изготавливаются из заранее нарезанной майларовой плёнки толщиной 20 мкм или 12 мкм с алюминиевым напылением толщиной 70 нм, ширина нарезки зависит от конечного диаметра строу: 9.8 ± 0.02 мм и 5 ± 0.02 мм. Уменьшение толщины стенок строу с 20 до 12 мкм обеспечивает снижение многократного рассеяния, а уменьшение диаметра трубки с 9.8 до 5 мм улучшает характеристики загрузки детектора. Ширина шва составляет примерно 500 мкм. Установка СРП-STRAW (Рис. 6) оснащена системой автоматического управления процессом сварки. На каждом этапе производства осуществляется строгий контроль качества на механические деформации, с использованием лазера и путем наддува строу. Начато производство строу диаметром 5 мм (Рис. 7). Результаты проверки 9.8 мм строу на прочность шва представлены на Рис. 8, стабильность диаметра строу 5 мм вдоль длины - на Рис. 9.



Рис. 6. Общий вид установки СРП-STRAW

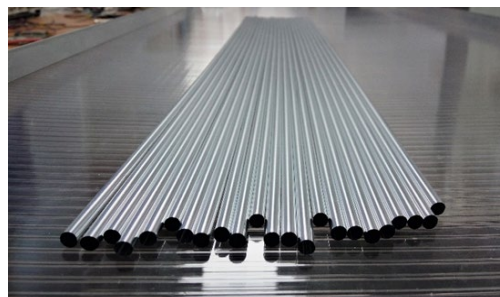


Рис. 7. Трубки диаметром 5 мм толщиной 12 мкм

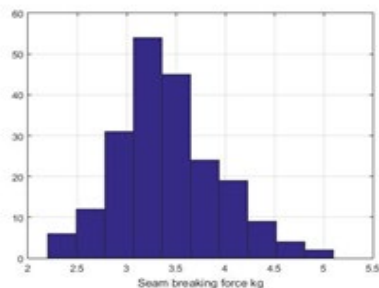


Рис. 8. Прочность шва строу 9.8 мм

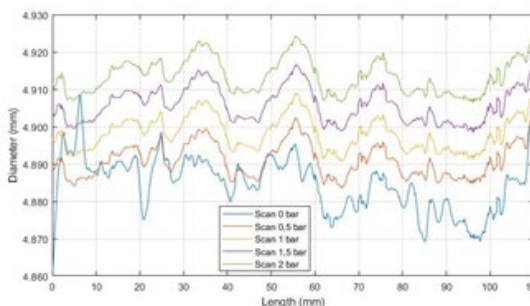


Рис. 9. Скан диаметра строу при разных давлениях

Рабочий газ

Газовая смесь $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6$ (50:50) является рабочей смесью в Фазе-I. Благодаря хорошим дрейфовым свойствам этой смеси, таким как малый угол Лоренца в магнитном поле, малый коэффициент диффузии и постоянная скорость дрейфа, можно достичь хорошего пространственного разрешения. В магнитном поле величиной 1 Тл угол Лоренца составляет $\sim 45^\circ$ при напряженности электрического поля 1 кВ/см и $\sim 20^\circ$ при 4 кВ/см. Ожидается, что скорость дрейфа в радиальном направлении составит 5 см/мкс при 1 кВ/см и 4.5 см/мкс при 4 кВ/см, что дает разрешение ~ 150 мкм. Для Фазы-II рассматриваются и другие варианты газовых смесей, например, смесь $\text{Ar}:\text{CO}_2$ (70:30).

Исследование механических свойств строу-трубок

Строу-трубки диаметром 9.8 мм, произведенные в ОИЯИ, были протестированы, и исследованы возможные деформации строу в зависимости от величины предварительного натяжения. Результаты измерения провисания (определяемого по деформации, вызванной действием силы тяжести, из нормального положения) и удлинения для строу-трубок длиной 1 м показаны на Рис. 10.

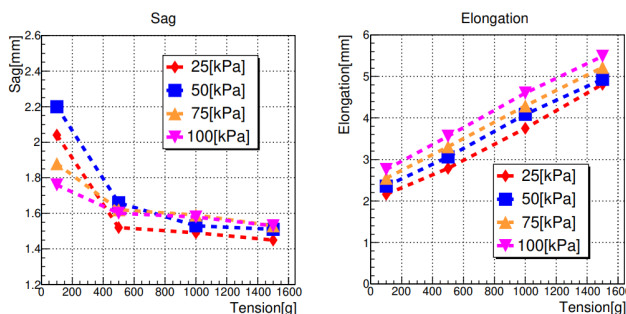


Рис. 10. Результаты исследования предварительного натяжения строу; (слева) провисание, определенное для различных перепадов давления в зависимости от приложенного натяжения, (справа) удлинения трубок

Исследования показывают, что натяжение более 1 кгс предотвращает провисание и приводит к удлинению на 1.7–2.0 мм. Таким образом, деформации строу-трубок можно избежать, растягивая их на 2 мм во время сборки.

Анодные проволоки, выполненные из позолоченного вольфрама, содержащего 3% рения, не требуют дополнительных опор, а требуемое натяжение проволоки для строу-трубок диаметром 9.8 мм и диаметром анодной проволоки 25 мкм, с погонной емкостью 10.5 пФ/м, при максимальном напряжении 2.2 кВ и максимальной длиной 2 м, составляет приблизительно 70 г.

Для строу важно также учитывать процесс релаксации связанный с уменьшением натяжения с течением времени [9]. Этот процесс обычно называют релаксацией натяжения. Для изучения процесса релаксации группой ОИЯИ-COMET был создан стенд (Рис. 11), обеспечивающий контроль влажности, температуры и натяжения строу во время измерений [10].

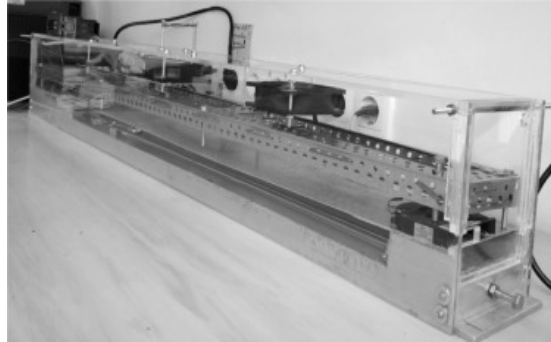


Рис. 11. Общий вид стенда

Процесс релаксации хорошо описывается экспоненциальной зависимостью с двумя константами:

$$T = 0.29 \cdot e^{-\frac{t}{0.23}} + 0.30 \cdot e^{-\frac{t}{7.0}} + 15. \quad (2)$$

На Рис. 12 приведен процесс релаксации в течение длительного периода времени. Через промежуток времени $3T_2$ действие экспоненциальных членов затухания натяжения прекращается и натяжение начинает падать по линейному закону с наклоном 0.0035 Н/сут. Зависимость релаксации натяжения во времени позволяет сделать оценку работоспособности строу детектора в эксперименте. С учетом начального натяжения $T_0 = 15.6$ Н, релаксация натяжения включает экспоненциальное падение в интервале 210 дней и линейное падение в интервале натяжения $(0.72-0.25)T_0$. С учетом приведенных оценок срок службы строу составит $(210 \text{ дней} + (0.72-0.25)/0.0035) = 6.5$ лет, что достаточно для проведения Фазы-I COMET.

Также была измерена зависимость напряжения строу от деформации [9] (Рис. 13). Вплоть до величины напряжения строу 30×10^6 Н/м² сохраняется линейная зависимость, деформация - пластическая и подчиняется закону Гука [11, 12], что соответствует натяжению строу 1850 ± 1 гс. Отсюда следует, что верхняя граница натяжения строу может быть увеличена до величины ~ 1.9 кгс.

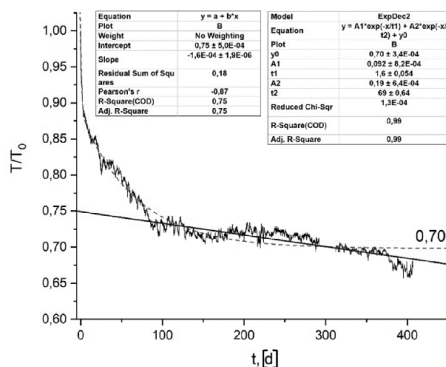


Рис. 12. Релаксация натяжения в длительном интервале времени

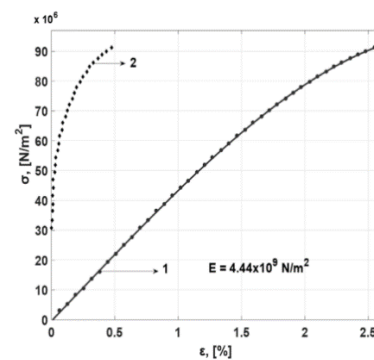


Рис. 13. Зависимость напряжения от деформации строу (ось X – натяжение, ось Y – относительное удлинение),

- (1) – интерполяция экспериментальных данных, область упругой деформации, (2) – пластическая деформация

В настоящее время проводится модернизация стенда для измерения релаксации натяжения строу диаметром 5 мм.

Считывающая электроника строу трекера

Электронный трек генерирует около 50–60 электрон-ионных пар в строу-трубке. Чтобы аналоговый сигнал, подаваемый на входной каскад ROESTI, составлял ~ 480 фКл необходимо газовое усиление $\sim 5 \times 10^4$. Около 10% этого заряда собирается за 6 нс. Чтобы установить порог дискриминатора примерно на уровне 16 фКл или двух первичных электронов, необходимо предварительное усиление сигнала ~ 1 В/пКл. Для достижения требуемого разрешения по импульсу (< 200 кэВ/с) в строу трекере пространственное разрешение в строу должно быть ~ 150 мкм. Учитывая скорость дрейфа в строу, считывающей электронике требуется временное разрешение ~ 2 нс и высокая радиационная стойкость. Общее количество каналов считывания - около 5 тыс., поэтому энергопотребление должно быть строго ограничено, а физические размеры детектора накладывают ограничения на линейные размеры считывающей электроники. Принципиальная схема платы ROESTI (Read Out Electronics for Straw Tube Instrument) представлена на Рис. 14.

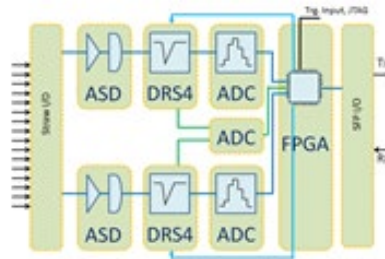


Рис. 14. Принципиальная схема платы ROESTI

Основным параметром, определяющим производительность электроники считывания, является временное разрешение. При подаче тестовых сигналов на вход платы ROESTI, временное разрешение составляет 160 пс, что достаточно для реконструкции трека (Рис. 15).

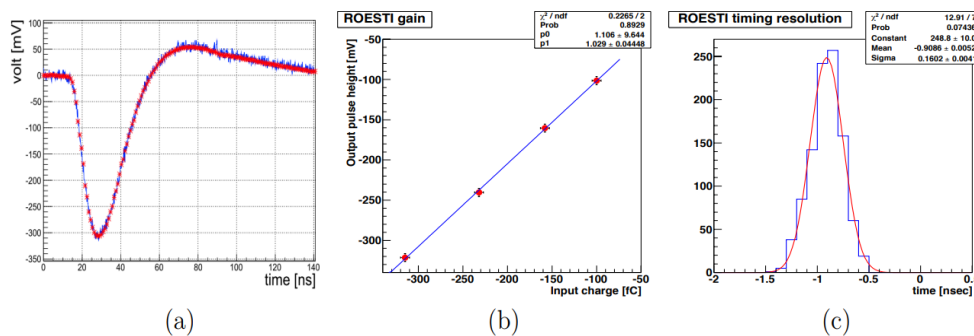


Рис. 15. Характеристики платы ROESTI: (а) выход тестового импульса, (б) калибровка усиления, (с) временное разрешение

Прототип с одним каналом строу 9.8 мм

Прототип с одним каналом строу был построен для изучения утечки газа при работе в вакууме (Рис. 16).

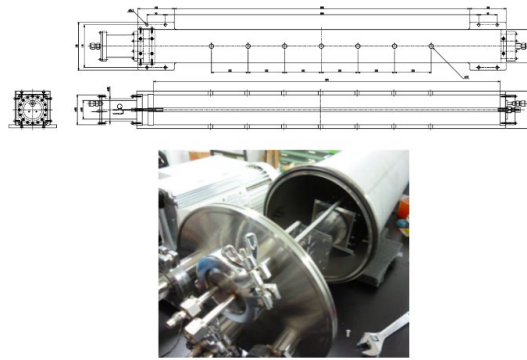


Рис. 16. Одноканальный прототип строу: (наверху) чертеж прототипа; (внизу) общий вид станда

Измерения герметичности выявили скорость утечки $0.0035 \text{ см}^3/\text{мин}$ на метр строу (Рис. 17), что в масштабе строу трекера находится в пределах допустимого уровня, необходимого для поддержания требуемой скорости прокачки газа.

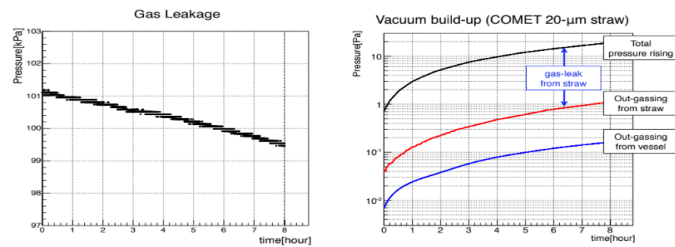


Рис. 17. Измеренная утечки газа: (слева) падение давления внутри строу со временем при начальном давлении 2 бар; (справа) повышение давления со временем после закрытия насоса

Результаты исследования одноканального прототипа подтверждают возможность использования строу с толщиной стенки 20 мкм изготовленной методом ультразвуковой сварки для Фазы-I COMET.

Полномасштабный прототип станции трекера со строу 9.8 мм

В Исследовательском центре Университета Тохоку (ELPH, Research Center for Electron Photon Science Tohoku University), Япония, было проведено тестирование полномасштабного прототипа с использованием электронного пучка с импульсами 50-300 МэВ/с, на Рис. 18 представлена схема и общий вид экспериментальной установки.

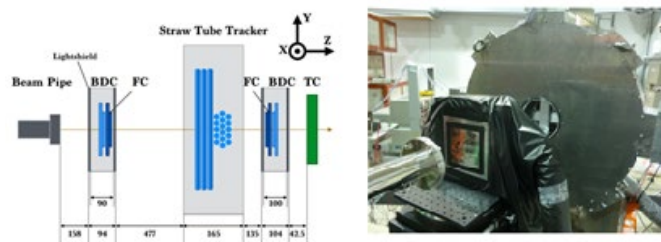


Рис. 18. Экспериментальная установка для тестирования прототипов трекера и калориметра: (слева) схематический вид установки, (справа) вид установки со стороны входящего пучка

BDC (Beam-Defining Counter) - счетчик определения траектории частиц пучка по их координатам в камере, который состоит из взаимно перпендикулярных рядов оптоволоконных сцинтиллирующих нитей счетчиков FC (Finger Counter - «пальцевый счетчик») толщиной 1 мм. Триггерный сигнал создается совпадением сигналов от FC и TC (Timing Counter) - счетчика времени, который состоит из пластикового сцинтиллятора с высокой светоотдачей и быстрым ФЭУ с мелкой сеткой для обеспечения точного измерения времени. На Рис. 19 показана измеренная эффективность работы одной строу-трубки для газовой смеси $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6$ (50:50) в зависимости от приложенного высокого напряжения. Из графика на Рис. 19 видно, что

напряжение выше 1800 В гарантирует максимально возможную эффективность для одной строу, хотя зазоры между строу в станции могут привести к небольшой потере эффективности.

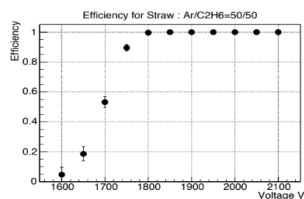


Рис. 19. Эффективность работы одной строу-трубки

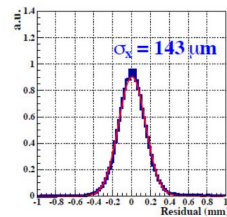


Рис. 20. Оценка пространственного разрешения прототипа станции трекера

На Рис. 20 представлено полученное пространственное разрешения ~ 143.2 мкм для трека (газовая смесь Ar:C₂H₆ (50:50), HV 1900 В). Если учесть погрешность определения точки входа-выхода пучка, пространственное разрешение станции можно оценить как ~ 119.3 мкм.

Слева на Рис. 21 показана измеренная зависимость пространственного разрешения от положения прохождения трека для Ar:C₂H₆ (50:50) и напряжения 2000 В, справа - пространственное разрешение, смоделированное в GARFIELD++: график зеленого цвета показывает идеальное пространственное разрешение, таким образом, видно, что зависимость пространственного разрешения от положения прохождения электрона хорошо воспроизводится при моделировании.

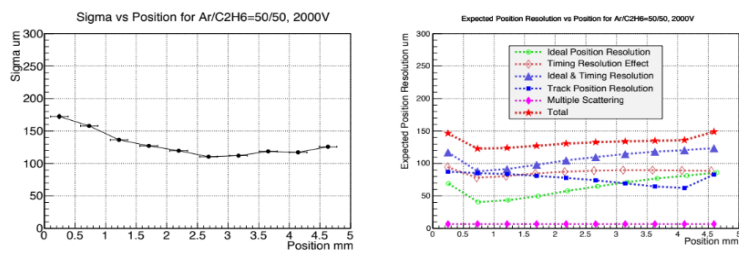


Рис. 21. Зависимость пространственного разрешения от положения трека: (слева) измеренная, (справа) промоделированная

В J-PARC ведется сборка рабочих станций строу трекера для Фазы-I COMET, полностью собрана одна станция (Рис. 11), на второй - идёт установка электроники, до конца года планируется собрать 4 станции. В сборке 2-ой станции принимают участие сотрудники ОИЯИ-COMET.



Рис. 22. Сборка станции трекера для Фазы-I

Прототип с одним каналом строу 5 мм

Для исследования электрических параметров строу в СРП ОИЯИ был создан одноканальный прототип (диаметр строу 5 мм, длина 50 см). Измерения проводились с газовой смесью Ar:CO₂ (60:40), при напряжении 1680 В, с радиоактивными источниками Fe⁵⁵+Co⁵⁷, на Рис. 23 представлен полученный энергетический спектр. Результаты измерения позволяют сделать вывод, что трубка работает в пропорциональном режиме, газовое усиление оценивается

$\sim 10^4$. Таким образом было показано, что 5 мм строу-трубки, изготовленные на установке СРП-STRAW, могут быть использованы в трековой системе детектора COMET.

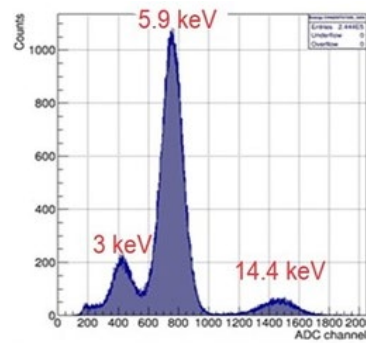


Рис. 23. Спектр, полученный на одноканальном прототипе (5 мм строу)

Мини прототип модуля трекера со строу 5 мм

В ЛЯП ОИЯИ начата сборка прототипа строу трекера, имеющего 32 трубки по оси X и 32 трубки по оси Y. Трубки имеют диаметр 5 мм, толщину стенок 12 мкм и длину 50 см. Работа над прототипом позволяет разработать технологию сборки и крепления 5 мм трубок в станциях трекера для Фазы-II (Рис. 24).

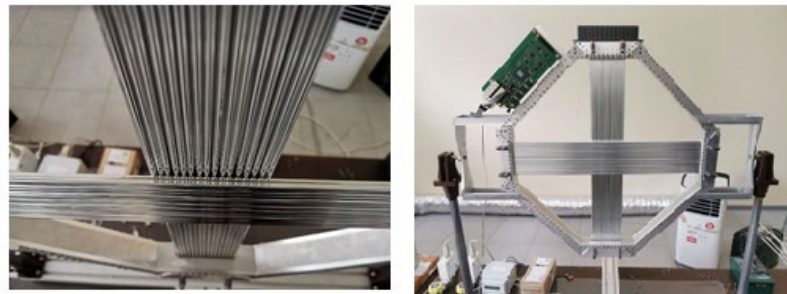


Рис. 24. Сборка 64-х канального мини прототипа модуля строу трекера

После завершения сборки и тестирования работоспособности каналов мини прототипа планируется измерить пространственное разрешение на пучке электронного ускорителя Линак-200 (ЛЯП, ОИЯИ). В дальнейшем прототип будет отправлен в Исследовательский центр Университета Тохоку (Япония).

Пилотный вариант рабочего модуля строу трекера ОИЯИ

На техническом совете коллаборации COMET было принято решение о разработке и изготовлении в ОИЯИ пилотного варианта рабочего модуля строу трекера, состоящего из 5 мм строу. Достижение этой цели требует решения целого ряда задач:

- разработка и производство несущего корпуса модуля (Рис. 25);
- производство 5 мм строу-трубок;
- разработка и производство всех компонент концевиков для строу-трубок;
- модификация и производство платы ROESTI;
- разработка и создание системы охлаждения плат ROESTI;
- разработка и создание системы подачи в строу газовой смеси;
- разработка и создание механической конструкции, обеспечивающей сборку модуля.

В настоящее время работа находится в промежуточной стадии, когда некоторые компоненты уже разработаны и произведены (несущий корпус, частично платы ROESTI), а некоторые (компоненты концевиков и др.) разработаны и будут изготовлены или закуплены.

Наиболее сложным и трудоемким были разработка и производство несущего корпуса модуля. Отметим, что производство такого рода изделия – это высоко-технологичный процесс

из-за огромного числа прецизионных фрезерований и сверлений на большую глубину при необходимости сохранять толщину стенок между соседними отверстиями 0.5 мм (Рис. 26). Для этого требуются прецизионные станки с большой базой для размещения изделия и способные двигать рабочую часть в 6-ти пространственных координатах. Нам удалось найти компанию, имеющую такое оборудование, и изготовить корпус.



Рис. 25. Корпус строу-модуля

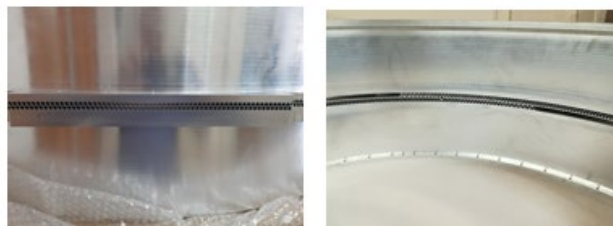


Рис. 26. Расстояние между отверстиями

Несущий корпус имеет следующие параметры:

- диаметр изделия в сборе 357 мм;
- число вставляемых в корпус строу 936 (468 вдоль X + 468 вдоль Y);
- диаметр каждого отверстия в корпусе 5 мм;
- расстояние между отверстиями в одном ряду 0.5 мм;
- расстояние между соседними рядами 0.5 мм;
- расстояние между рядами X и Y 5 мм;
- имеется четыре сборных газораспределительных блока для подачи газовой смеси в строу (Рис. 27).

Конструкция корпуса является сборной, газораспределительные блоки присоединяются к корпусу после того, как все трубки собраны в нем. Такая конструкция обеспечивает доступ строу-трубкам во время сборки и разделение потока рабочей газовой смеси, поступающей в камеры блоков газораспределительной системы от потока охлаждающего газа, протекающего по замкнутому пространству модуля, в котором находятся платы ROESTI.

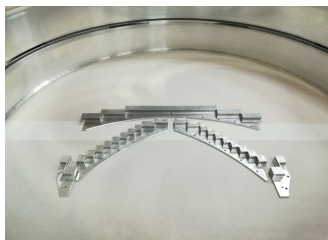


Рис. 27. Газораспределительный блок

Готовых к использованию плат ROESTI не было, но документация на них была передана от японских разработчиков. Ряд доработок был проделан для адаптации к местным условиям производства и улучшения некоторых условий их функционирования. Из 60 плат, необходимых для функционирования модуля, произведено и протестировано 25 (Рис. 28).



Рис. 28. Произведенная плата ROESTI

Процедура сборки модуля является довольно сложной и не может быть реализована без специальной конструкции - оснастки, обеспечивающей фиксацию корпуса и его вращение вокруг координат X и Z (Рис. 29).

Сборная конструкция концевиков (две части, диаметром 3.5 мм и 5 мм, Рис. 30) позволяет вставлять трубки в корпус надутыми и натягивать их после этого. Часть концевика диаметром 5 мм клеивается в трубку, а 3.5 мм часть, имеющая отверстие для пропускания рабочей смеси в строу-трубку, проходит через газораспределительный блок.

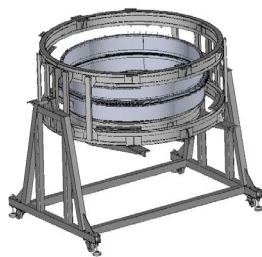


Рис. 29. Оснастка для сборки модуля с корпусом внутри

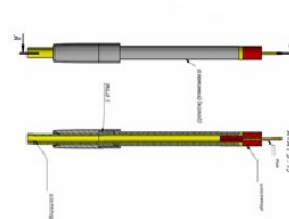


Рис. 30. Вид концевика

Газовая система для строу и система газового охлаждения для плат разработаны, отдельные компоненты закуплены.

2.2.6.3. Электромагнитный калориметр

Калориметр

Принципиальная особенность эксперимента COMET - большие углы падения регистрируемых электронов на торцевую поверхность ячеек сегментированного электромагнитного калориметра (ECAL), расположенного в однородном магнитном поле. Главная задача ECAL - измерение выделенной энергии при регистрации 105 МэВ электрона с точностью, достаточной для достоверного его выделения из фоновых событий. ECAL эксперимента COMET должен: во-первых, иметь энергетическое разрешение не хуже 5% для уменьшения влияния фона от DIO на регистрируемые сигнальные события, лежащие в узкой энергетической области 105 ± 0.5 МэВ и координатное разрешение не хуже 1 см, и, во-вторых, должен решать следующие задачи: 1) измерение энергии электрона с высокой точностью; 2) достоверно разделять электроны, нейтроны и низко энергетические гамма кванты [2].

Для ECAL эксперимента COMET были выбраны сцинтилляционные монокристаллы на основе оксиортосиликата лютеция, легированные церием (LYSO: Ce). Параметры этих кристаллов позволяют решить поставленные задачи эксперимента COMET, а именно: большую плотность (7.1 г/см^3), высокий световой выход (~ 32000 фотон/МэВ), короткое время высвечивания (~ 41 нс), что значительно расширяет диапазон их применения [13-16].

В настоящее время в экспериментальной физике, все еще нет экспериментов, где бы использовались эти кристаллы [17]. Основным фактором, ограничивающим применение этих кристаллов в экспериментальной физике, является их высокая цена, а также ряд недостатков: во-первых, это разброс световых выходов от кристалла к кристаллу; во-вторых, неоднородность световых выходов по длине и по периметру кристалла, которая будет приводить к ошибке измерения выделившейся в калориметре энергии и ухудшению энергетического разрешения [18-20].

Разработка ECAL требует решения следующих задач: 1) моделирования оптимальной структуры калориметра; 2) исследования влияния разброса световых выходов в кристаллах и неоднородности световых выходов по их длине на точность измеренной выделенной энергии в калориметре, т.е. на величину неопределенности отклика детектора; 3) разработки методики и алгоритмов улучшения равномерности отклика детектора, связанных с неоднородностью светосбора по длине кристалла; 4) измерения неоднородности отклика прототипа ECAL на кристаллах LYSO:Ce с помощью космических мюонов при разных углах (0° , 9° и 19° относительно торцевой поверхности кристаллов) падения частиц.

Для исследования неоднородности световых выходов по длине кристалла был разработан и собран прецизионный измерительный стенд. Базовые элементы стенда: механическая система,

устанавливающая положение источника с точностью 1 мкм; система сбора сигналов на базе двух быстрых малошумящих фотоумножителей (Hamamatsu H1949-51), расположенных с обеих торцов кристалла [21] и осуществляющая корреляционное измерение параметров кристалла; быстродействующая измерительная система на базе диджитайзера VX1742B [22] с частотой 5 ГГц, и быстродействующая триггерная система на NIM блоках. Стенд полностью автоматизирован.

Методом гамма спектроскопии была выполнена калибровка (однородность, потери светосбора по длине кристалла, относительный световыход) 50 кристаллов LYSO:Ce фирмы Saint-Gobain Crystals Inc. (S-G) размером $20 \times 20 \times 120$ мм³, которые затем использовались в прототипе ECAL в тестовых измерениях (2014, Март, 10-19, Тохоку, Япония). Калибровка проводилась для кристаллов без обертки. Относительный световыход измерялся при одинаковых условиях. Источник располагался в коллиматоре на высоте 12 мм над образцом, на расстоянии 60 мм от фотодетектора. На Рис. 31 представлены результаты измерения относительного световыхода этих кристаллов.

Из проведенных измерений следует, что значение разброса относительного световыхода для этой группы кристаллов составляет ~30% [23], а энергетическое разрешение (FWHM) LYSO:Ce составляет в среднем 8.9%, коэффициент неоднородности составляет около $1.2 \text{ \%}/\text{см}^{-1}$ [24]. Таким образом, при создании калориметра необходимо в модулях ECAL подбирать кристаллы с близкими по значению световыходами.

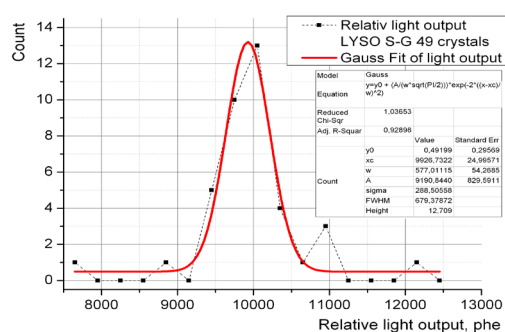


Рис. 31. Распределение относительного световыхода для 50 кристаллов LYSO:Ce

Основная проблема получения требуемого энергетического разрешения в ECAL эксперимента COMET связана с неоднородностью световыхода кристаллов LYSO:Ce, как по длине, так и по объему сцинтиллятора. При выращивании кристаллов методом Чохральского, в кристаллической структуре образуется множество дефектов (электронных ловушек), которые влияют на разброс сцинтилляционных свойств по длине и периметру кристалла. Поэтому фирма Saint-Gobain разработала кристаллы LYSO:Ce,Ca и LYSO:Ce,Mg с дополнительным допированием ионами Ca и Mg, которое значительно снижает эффективность электронных ловушек, что приводит к более равномерному распределению световыхода по длине и объему кристалла. Например, кристаллы двойного допирования LYSO:Ce,Ca имеют немного лучшие параметры (световыход больше на 20%, энергетическое разрешение ~6.5%, время высвечивания 40 нс). Коллаборация COMET имеет в своем распоряжении около 60 таких кристаллов, и возникла задача: изучить оптические свойства этого кристалла и сравнить с кристаллом LYSO:Ce.

Исследовались S-G LYSO:Ce кристаллы, а именно: восемь образцов LYSO:Ce, которые были выбраны случайным образом из партии 300 единиц и восемь образцов LYSO:Ce,Ca, также выбранных случайным образом из партии 60 единиц. Образцы имели размеры $20 \times 20 \times 120$ мм³. Исследуемые образцы были обернуты светоотражающей пленкой, толщиной 65 мкм (TEFLON AF1601). Измерения кристаллов проводились на прецизионном измерительном стенде методом

гамма спектроскопии. Источник излучения ^{22}Na в коллиматоре устанавливался на расстоянии 12 мм над поверхностью кристалла измерения проводились с шагом 5 мм.

В результате исследования были получены следующие результаты: 1) среднее значение неоднородности отклика сцинтилляторов LYSO:Ce (Рис. 32) кристаллов составляет $\sim 4.6\%$, а LYSO:Ce,Ca $\sim 1.1\%$; 2) для всей группы LYSO:Ce кристаллов разброс энергетического разрешения на середине длины составляет $\pm 0.21\%$, а LYSO:Ce,Ca (Рис. 33) $\pm 0.19\%$. Разброс световых выходов вблизи торцевой поверхности кристаллов составляет ~ 26 и 20% для LYSO:Ce и LYSO:Ce,Ca, соответственно. Время отклика кристаллов LYSO:Ce на 8 нс больше, чем LYSO:Ce,Ca.

Главный результат этих исследований: у LYSO:Ce кристаллов: неоднородность отклика сцинтилляторов примерно в 4 раза больше, чем у LYSO:Ce,Ca. Однако следует отметить, что кристаллы обоих типов позволяют создать детектор, удовлетворяющий требованиям эксперимента COMET; более подходящими для детектора эксперимента COMET будут кристаллы LYSO:Ce,Ca, позволяющие измерить энергию, выделившуюся в калориметре с ошибкой примерно в 4 раза меньшей, чем для случая использования кристаллов LYSO:Ce [25].

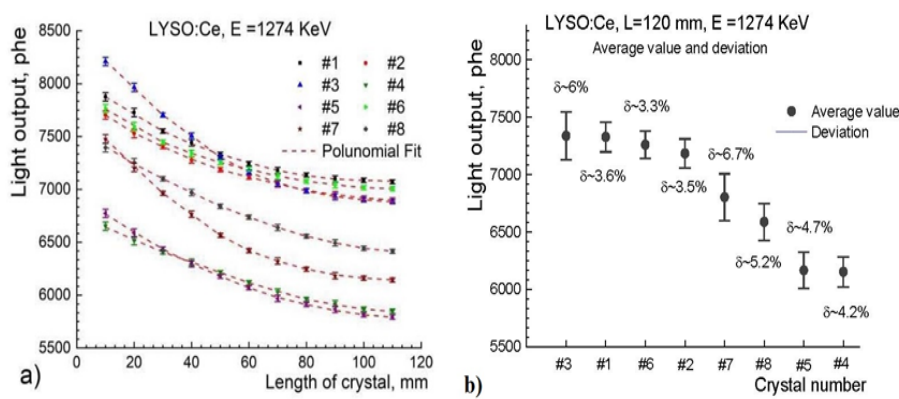


Рис. 32. а) Неоднородность световых выходов по длине LYSO:Ce кристаллов; б) Неоднородности откликов сцинтилляторов на энергии 1274 КэВ, нормированные на их среднее значение

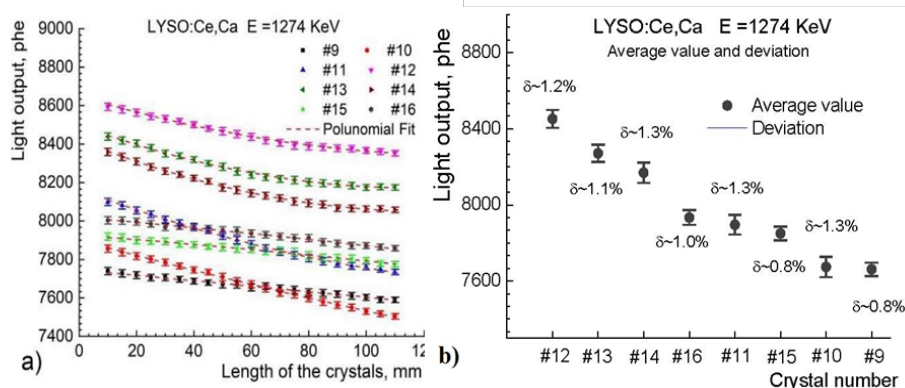


Рис. 33. а) Неоднородность световых выходов по длине LYSO:Ce,Ca кристаллов; б) Неоднородности откликов сцинтилляторов на энергии 1274 кэВ, нормированные на их среднее значение

Так как ECAL будет располагаться в однородном электромагнитном поле, все электромагнитные ливни будут непараксиальны, и будут пересекать под различными углами ряд активных (кристалл) и пассивных (обертка) ячеек калориметра. В этом случае, для уменьшения погрешности измерения выделенной энергии в ECAL необходимо решить следующие проблемы: 1) уменьшить потери электромагнитного ливня в материалах обертки кристаллов; 2) исключить оптическую кросс интерференцию между соседними ячейками

калориметра; 3) улучшить светосбор в ячейках калориметра за счет уменьшения потерь оптических эмиссионных фотонов.

Эти проблемы могут быть решены с помощью правильного выбора материалов светоотражающих оберток и метода их обертывания. В случае использования кристаллов LYSO:Ce обертки должны быть тонкими, создавать диффузную поверхность, прозрачными для электромагнитного излучения и при этом задерживать оптические фотоны внутри кристалла, не допуская перекрестной кросс-интерференции. Такими материалами могут быть Тефлон (AF1601) и ESR пленка (VM2000). На Рис. 34 представлены результаты исследования неоднородности световыхода для различных типов светоотражающих материалов [26].

Наилучшие результаты были получены при комбинированном типе обертывания: 2 слоя - Тефлон (внутренний) и 1 слой - пленка ESR (внешний). На Рис. 35 показан энергетический спектр LYSO:Ce кристалла, полученный для оптимальной обертки. Энергетическое разрешение для кристалла с оптимальной оберткой составляет 8.4 и 8% для энергии 1.173 и 1.332 МэВ, соответственно [19].

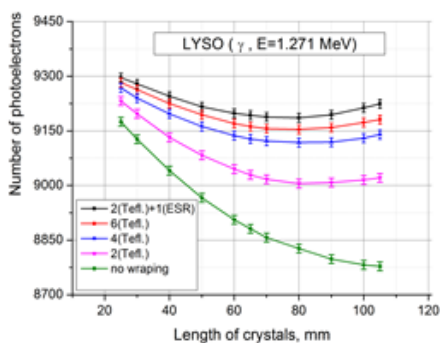


Рис. 34. Неоднородность световыхода по длине кристалла для различных типов светоотражающих материалов

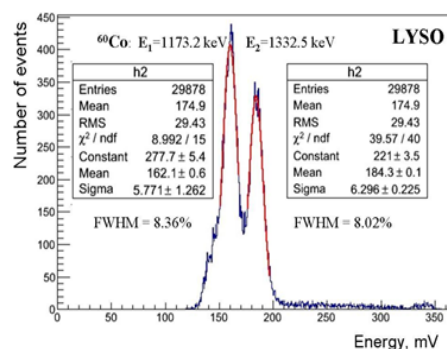


Рис. 35. Энергетический спектр, полученный с оптимальной оберткой: 2 слоя Тефлон и ESR пленка на источнике ^{60}Co

Для измерения неоднородности отклика ECAL при различных углах падения частиц на торцевую поверхность калориметра было выполнено измерение оптических параметров прототипа ECAL на кристаллах LYSO:Ce с помощью космических мюонов при углах падения частиц 0° , 9° и 19° относительно торцевой поверхности кристаллов.

В измерениях в качестве сцинтилляторов использовались кристаллы S-G LYSO:Ce [13]. Каждый кристалл был обернут двумя слоями Тефлона AF1601, толщиной 65 мкм, с коэффициентом поглощения 41%/см, одним слоем ESR пленки VM2000, с коэффициентом отражения 0.99/0.1 и толщиной 65 мкм, и одним слоем черной бумаги толщиной 200 мкм.

Прототип ECAL (Рис. 36), состоял из 4 LYSO:Ce кристаллов с размерами $120 \times 20 \times 20$ мм³. Для светосбора с кристаллов использовались фотоумножители (PMT) Hamamatsu H1949-51. PMT монтировались с торцевой стороны кристалла с помощью оптической смазки (OKEN6262A, Oken, Japan).

Триггерный счетчик был выполнен на пластике с размерами $10 \times 20 \times 1$ мм³, а для светосбора применялись PMT Hamamatsu E2183-500 [21]. Счетчики были расположены на расстоянии 256 мм друг над другом, а эффективная площадь перекрытия составляла $S_{\text{эф}} = 10 \times 5$ мм². Для измерения сигналов с PMT использовался 32-х канальный 5 ГГц диджитайзер VX1742B [22].

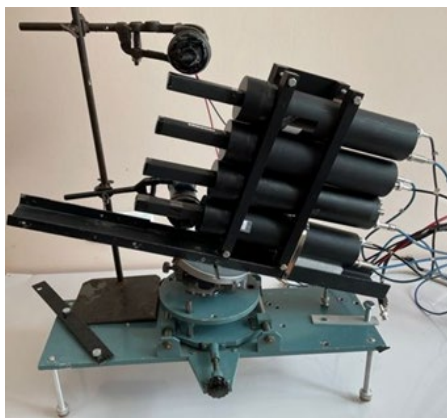


Рис. 36. Прототип СОМЕТ калориметра

Таким образом, неоднородность отклика детектора зависит от угла падения космических мюонов относительно торцевой плоскости прототипа ЕСАL. Средние значения и неоднородности отклика сцинтилляторов по углу представлены на Рис. 37. Оценка разрешения прототипа ЕСАL дает для угла 19° значение 6 %, для 9° – 2%, а для 0° – 4% [27, 28].

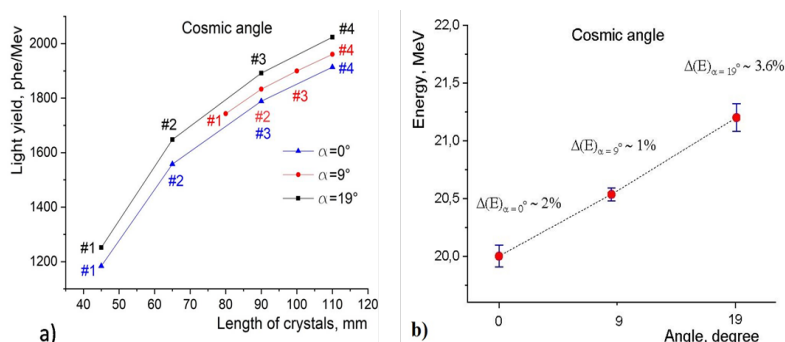


Рис. 37. Рис. Неоднородности отклика детектора для углов 0, 19 и 9° , измеренная на космических мюонах а) распределения откликов сцинтилляторов прототипа по углу; б) средние значения и неоднородности отклика сцинтилляторов по углу

В дальнейшем планируется изучение параметров прототипа ЕСАL на пучке электронного ускорителя Линак-200 (ЛЯП, ОИЯИ).

В результате проведенных научно-методических исследований и измерений можно сделать следующие выводы:

- при создании калориметра необходимо в модулях ЕСАL подбирать кристаллы с близкими по значению параметрами световых выходов;
- при сборке калориметра необходимо использовать материалы светоотражающих обертки и метода их обертывания, позволяющие улучшить светосбор в ячейках калориметра, уменьшить потери электромагнитного ливня в материалах обертки и исключить перекрестную кросс-интерференцию между ячейками калориметра;
- неоднородность отклика калориметра связана с физическими свойствами кристаллов LYSO:Ce , которая зависит от углов падения частиц на торцевую поверхность калориметра и будет влиять на энергетическое разрешение. Эта проблема не может быть решена физически. Ее решение требует использования специальных алгоритмов и методов офлайн обработки [19].

Сборка модулей ячеек и изучение параметров прототипа ЕСАL

Базовым блоком ЕСАL является модуль, представляющий собой матрицу 2×2 кристалла. Чтобы покрыть все поперечное сечение области детектора необходимо 480 модулей. Прототип модуля без предусилителя показан на Рис. 38. Каждый кристалл обернут двумя слоями светоотражающей тефлоновой пленки толщиной 76 мкм. К каждому кристаллу прикреплено по одному APD Hamamatsu S8664-1010 [29], а в качестве оптической смазки использовался

прозрачный силиконовый каучук толщиной 2 мм (ELJEN Technology, EJ-560) (Рис. 39 (а)). Затем эта кристаллическая структура оборачивалась майларом толщиной 20 мкм (Рис. 39 (b)). Этот модуль был протестирован на пучке электронного ускорителя университета Тохоку. Модули далее komponуются в супер модуль (Рис. 39 (c)).



Рис. 38. Кристаллический модуль без платы предусилителя

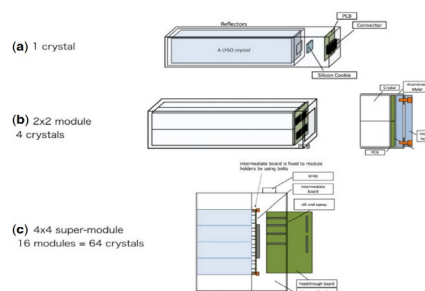


Рис. 39. Модульная структура ECAL: (а) 1 кристалл + 1 APD, (b) 2×2 кристаллический модуль; (c) супер модуль 4×4 (64 кристалла) и система считывания

Для изучения параметров прототипа ECAL была выполнена проверка и калибровка 50 LYSO:Ce фирмы Saint-Gobain [23] и GSO кристаллов. Впервые оба прототипа были протестированы на пучке электронного ускорителя с энергией 65–145 МэВ/с университета Тохоку (Япония) в марте 2014 г. Каждый прототип состоял из 49 кристаллов GSO (матрица 7×7 кристаллов; с размерами кристалла 20×20×150 мм³) и LYSO:Ce (матрица 7×7 кристаллов; с размерами кристалла 20×20×120 мм³), 7 платами предусилителя и прототипом электроники с APD Hamamatsu S8664-55 с активной площадью 5×5 мм². Прототипы помещались в вакуумную камеру, которая камера была сконструирована для оценки параметров прототипов ECAL в реальных условиях.

Разрешение было получено путем преобразования сигнала от каждого из 49 кристаллов с помощью алгоритма кластеризации. На Рис. 40 показаны энергетические спектры прототипов ECAL на GSO и LYSO:Ce кристаллах на электронном пучке 105 МэВ/с.

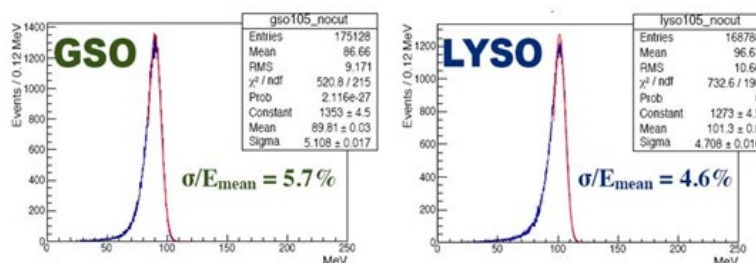


Рис. 40. Энергетические спектры прототипов на 105 МэВ/с электронном пучке

На Рис. 41 представлены энергетические разрешения, полученные для прототипов ECAL как функции от импульса пучка. Разрешение для импульса пучка 105 МэВ/с составило 5.70 ± 0.02 (стат) ± 0.04 (сист) % для GSO и 4.60 ± 0.01 (стат) ± 0.07 (сист) % для LYSO:Ce кристаллов. Установлено, что кристаллы LYSO:Ce соответствуют требуемому энергетическому разрешению менее 5 % при энергии 105 МэВ. Эти измерения также подтвердили, что LYSO:Ce кристаллы удовлетворяют требованию пространственного разрешения (1 см). Кроме того, по результатам измерений коллаборацией был выбран кристалл LYSO:Ce.

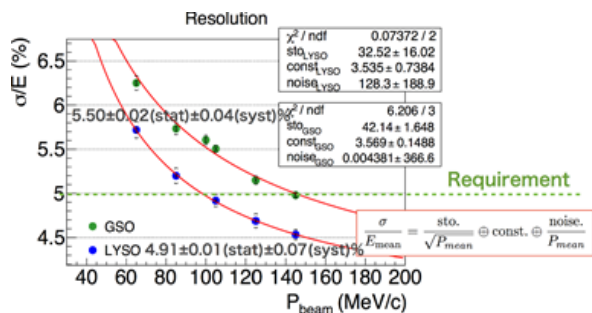


Рис. 41. Измеренное энергетическое разрешение как функция от импульса пучка

В декабре 2015 года прототип ECAL на LYSO:Ce кристаллах (матрица 8×8) был протестирован на пучке электронного ускорителя с энергией 65–145 МэВ/с университета Тохоку. Полученные результаты согласуются с результатами теста 2014 года, причем было получено значение энергетического разрешения прототипа ECAL - 4.2%, что свидетельствует о том, что кристаллы LYSO:Ce удовлетворяют требованиям ECAL эксперимента COMET.

2.2.6.4. Система исключения космических лучей (Cosmic-Ray Veto)

Введение

Система CRV является одной из важнейших частей эксперимента COMET, и цель ее использования — обнаружение космических мюонов с эффективностью не хуже 99.99%, чтобы пометить их в активном режиме во время сбора данных. В последствии события с их участием следует исключить из общего анализа, и таким образом добиться SES уровне 10^{-17} .

Активная защита обеспечивается системой обнаружения космических мюонов (Cosmic Ray muons, CRM), охватывающей область CyDet. Детальные исследования фона, вызванного космическими лучами, показывают, что область переходного соленоида (BS) также должна быть покрыта CRV, поскольку взаимодействия CRM в BS могут производить электроны, которые рассеиваются от BS и попадают в CDC, в СТН и имитируют сигнальные события. Необходим коэффициент подавления CRM фона не хуже 10^4 , и он получается путем использования офлайн анализа и нахождения CRM событий в CRV. Система активного вето, охватывающая CyDet, состоит из детекторов на основе сцинтилляторов (Scintillator CRV), тогда как в зоне BS предусмотрены камеры с резистивными пластинами на стекле (GRPC).

Система CRV на основе сцинтилляционных стрипов (SCRV)

Группа ОИЯИ-COMET является лидером в области НИОКР, проектирования и разработки системы SCRВ. Данная деятельность включает в себя две части: завершение проектирования SCRВ с обеспечением производства сцинтилляционных стрипов, испытаний, графика создания модулей CRV, и проектирование/создание/испытание электроники, встроенной в сцинтилляторы.

Мы спроектировали и изготовили первый модуль подсистемы сцинтилляционных стрипов системы COMET CRV, так называемый SCRВ-LS-0, который состоит из 4 слоев стрипов, по 16 стрипов в каждом слое, с алюминиевыми листами, разделяющими эти слои. Эти слои нужны для подавления гамма- и бета-излучения.

Принцип регистрации частиц и общая конструкция одиночного канала SCRВ показаны на Рис. 42. Одиночный сцинтилляционный стрип имеет площадь поперечного сечения $0.7 \times 5 \text{ см}^2$ и длину до 420 см. Он изготовлен из полистирола (Styron 143E), действующего как среда для ионизации и переноса фотонов, с добавлением 2% фторо-(п-терфенил) и 0.05% РОРОП сцинтилляционных присадок.

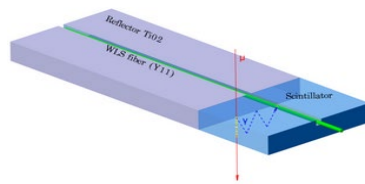


Рис. 42. Эскиз конструкции одного канала, принцип регистрации частиц

Стрипы SCRВ считываются с помощью волокон со сдвигом длины волны (WLS), которые передают свет к фотодетекторам. Использование WLS-волокон необходимо для того, чтобы компенсировать малую длину затухания сцинтилляторов и оптически соединить сцинтилляторы с фотодетекторами. Волокно WLS укладывается по длине стрипа в поверхностный паз.

Для достижения компромиссного результата между максимальной величиной светосбора со стрипов и равномерностью его по сечению стрипа было проведено множество исследований с точки зрения оптимизации светосбора со стрипов, а также уточнение геометрии стрипов и увеличение количества оптических волокон до двух. Также с помощью GEANT-4 исследовались разные толщины алюминиевой пластины между слоями модуля и величины сдвига между слоями.

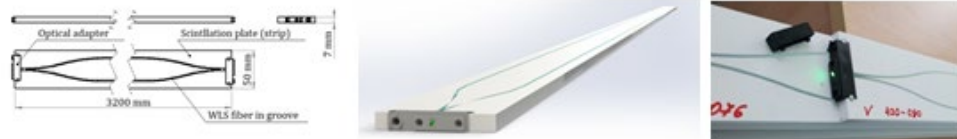


Рис. 43. Дизайн стрипа и фотография одного конца реального стрипа

Наши исследования показали, что конструкция модуля SCRВ, состоящая из 4-ех слоев по 16 пластиковых сцинтилляционных стрипов в каждом слое сечением $7 \times 50 \text{ мм}^2$ и с двумя WLS-волоконками диаметром 1.2 мм (для боковых модулей: CRV Left и CRV Right) и 1.4 мм (для верхних модулей - CRV Top), вклеенными в канавку вдоль стрипа, должна обеспечить требуемую эффективность до 99.99% для регистрации космических мюонов (Рис. 43). Сбор света осуществляется с помощью Hamamatsu MPPC/SiPM S14160-3050HS. Также был разработан дизайн печатной платы для размещения SiPM (Рис. 44).



Рис. 44. Чертеж дизайна сопряжения фотодетектора со стрипом, фотодетектор Hamamatsu MPPC/SiPM S14160-3050HS, распаянный на плате и приставленный к стрипу

Окончательные конструкции стрипа и модуля CRV обсуждались на 34-м и 35-м коллаборационном митинге COMET и были одобрены для SCRВ-LS-0.

SCRВ модуль: проектирование, моделирование и расчеты

Для выбора конструкции модуля нужно было провести как моделирование модуля, так и выбор оптимальной толщины алюминиевых пластин для подавления фоновых событий, а также выбор дополнительной защиты от нейтронов.

Моделирование эффективности модуля CRV: теоретические основы для расчета эффективности модуля

Для моделирования нужно рассчитать вероятность регистрации частицы индивидуально для каждого стрипа. Расчет вероятности регистрации частицы для одного стрипа с учетом

светосбора (μ) и при дискриминации на уровне $T_{ph.e.} = 5$ фотоэлектронов производится по формуле (3):

$$P(\mu) = \frac{1}{2} + \frac{\text{erf}\left(\frac{\mu - T_{ph.e.}}{\sqrt{2}\mu}\right)}{2} \quad (3)$$

Затем, эффективности стрипов, лежащих в одном слое, комбинируются для получения общей вероятности регистрации частицы слоем по формуле (4):

$$P_L = 1 - \overline{P_L} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{S_i}) \quad (4)$$

Совпадение любых 3-х из 4-х слоев создает общую вероятность регистрации прохождения частицы для CRV модуля и рассчитывается по формуле (5):

$$P_m = \sum_{n=0}^3 P_{L((i\%4)} P_{L((i+1)\%4)} P_{L((i+2)\%4)} (1 - P_{L((i+3)\%4)}) + P_{L0} P_{L1} P_{L2} P_{L3} \quad (5)$$

При моделировании нужно учесть технологические зазоры между активными областями стрипов, расстояние между слоями, а также сдвиг одного слоя относительно другого (Рис. 45). Набор таких сдвигов составляет так называемый паттерн. Нужно было определить эффективности более 64 тысяч паттернов, чтобы найти наиболее оптимальный. Каждый паттерн включал более 60 тысяч треков разных направлений и точек входа в модуль: позиция «0 мм» находилась в середине 8-го стрипа верхнего модуля; угол «0 градусов» соотносился к вертикали; область от -40 мм до +40 мм (красная область) была перебрана с шагом 0.1 мм; а угол варьировался с -75 до +75 градусов с шагом 1 градус (оранжевые линии) на каждой позиции от -40 до +40 мм (Рис. 45). Для значительной оптимизации времени расчетов мы разработали метод упрощенного расчета светосбора.



Рис. 45. Паттерн модуля, технологические зазоры. Иллюстрация трека мюонов от -75 до 75 градусов наклона и от -40 до +40 мм от центрального верхнего стрипа

Согласно упрощенной модели, сначала с помощью поперечного сканирования стрипа находится распределение светосбора поперек стрипа. Затем, с помощью этого распределения, рассчитывается светосбор согласно направлению трека и области пролета (Рис. 46). Светосбор считается по мюонному треку как сумма светосборов в каждом мини-участке по формуле (6):

$$\mu = \int F_{\mu}(y) dy \approx \sum \mu_i l_i \quad (6)$$

Здесь μ_i - средний светосбор на миллиметр внутри выбранного участка между двумя пунктирными линиями, а l_i - длина мюонного трека внутри этого участка.

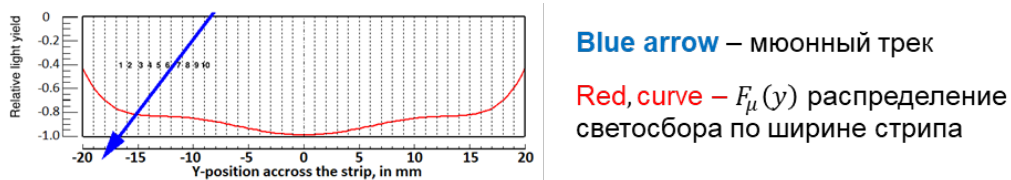


Рис. 46. Упрощенная модель подсчета светосбора

Сравнение разных модулей, составленных с разной геометрией стрипов, и одним или двумя спектросмещающими волокнами, показал наиболее оптимальный дизайн стрипа: $7 \times 50 \text{ мм}^2$ с двумя волокнами в параллельных канавках на расстоянии 30 мм друг от друга (Таблица 4).

Таблица 4. Сравнение эффективности двух модулей, составленных стрипами шириной 40 и 50 мм соответственно

Толщина алюминиевых листов (мм)	Эффективность модуля, составленного из стрипов шириной 40 мм и сдвиговым паттерном 9-7-7		Эффективность модуля составленного из стрипов шириной 50 мм и сдвиговым паттерном 9-7-7		Замечание
	для 21 ф.э.	для 25 ф.э.	для 21 ф.э.	для 25 ф.э.	
2	0.9998 95	0.9999 92	0.9999 24	0.9999 99	Зазор между соседними стрипами 100мкм для всех рассматриваемых случаев
10	0.9996 22	0.9999 25	0.9998 67	0.9999 81	

Коллаборация COMET рассмотрела и одобрила наше предложение, что для Top CRV модулей длиной 4.2 м нужно использовать 2 волокна диаметром 1.4 мм, две канавки на расстоянии 30 мм друг от друга, для получения наилучшего светосбора. А для модулей CRV Left/Right, длиной 3.2 м, можно применить 1.2 мм волокна и тоже две канавки с 30 мм расстоянием между ними. Сравнение эффективностей при одинаковых условиях показывает, что стрип шириной 50 мм предпочтительнее, чем 40 мм ширины, а фоновый шум при увеличении ширины с 40 мм до 50 мм незначительно увеличивается.

Предполагаемый радиационный фон

Расчеты показывают, что CRV система установки COMET будет испытывать значительную радиационную нагрузку от нейтронов, гамма-квантов и сопутствующих электронов (Таблица 5).

Таблица 5. Радиационная нагрузка от нейтронов и гамма

	Флюенс нейтронов за 100 дней, n/cm^2	Флюенс гамма-квантов, γ/cm^2	Число нейтронов на стрип, $N/(сек \times cm^2)$	Число гамма-квантов на стрип, $N/(сек \times cm^2)$	Оценка регистрации нейтронов при уровне дискриминации в 170 кэВ в секунду на cm^2	Оценка регистрации гамма-квантов при уровне дискриминации в 170 кэВ в секунду на cm^2
Top	6.6E9	11.7E9	7.6E2	13.5E2	46	26
Left side	7.4E9	11.1E9	8.6E2	12.8E2	52	24
Right side	9.5E9	19.2E9	10.9E2	22.2E2	66	42

Возникла необходимость рассчитать толщину алюминиевых пластин между слоями в модуле, а также дополнительную комбинированную защиту из 30% борированного полистирола толщиной 10 мм и 5 мм свинцового листа от нейтронов и электронов путем установки их перед модулем (Рис. 47).

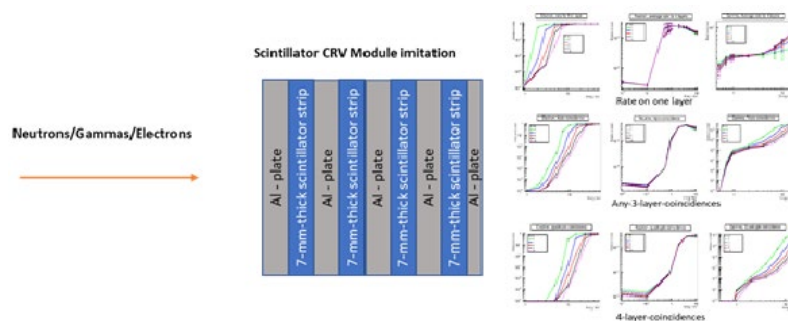


Рис. 47. Радиационные нагрузки на модуль при разной толщине алюминиевого листа между слоями; степень их ослабления в зависимости от толщины алюминиевых листов

Условия моделирования были следующими: уровень дискриминации установлен на уровне 170 кэВ, что соответствует 5 ф.э.-уровню при светосборе в 35 ф.э. для стрипа толщиной 7 мм. Для упрощения расчетов в GEANT-4 был создан квадратный модуль 1000×1000 мм, состоящий из 4 слоев сцинтиллятора и прослоенный алюминиевыми листами. Частицы попадали в центр модуля (Рис. 48). На основе этой симуляции, коллаборацией СОМЕТ была принята следующая геометрия модуля: первый, базовый слой - 10 мм алюминиевый лист; 2-ой, 3-ий и 4-ый – 5 мм; 5-ый, верхний слой – 2 мм.

Мы также исследовали фоновую загрузку при добавлении комбинированной защиты из 30% борированного полистирола толщиной 10 мм и 5 мм свинцового листа.

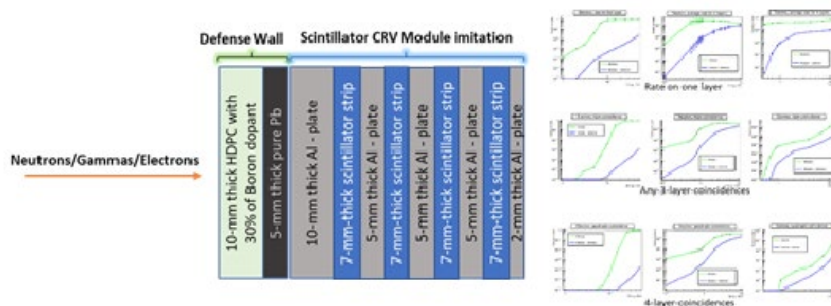


Рис. 48. Дополнительная защита и степень ослабления радиационной нагрузки в зависимости от толщины алюминиевых листов

Работы по созданию фронт-энд электроники для CRV модулей

В настоящее время ведутся два НИОКР для электроники CRV Front-End-Board (FEBE) (Рис. 49). Они включают в себя разработку прототипа FEBE на «Метеоре-32» (ИЯФ, Новосибирск) на базе «Метеора-8», FEBE на основе известного семейства ROC-подобных микросхем ASIC, в настоящее время чипов PetiROC (ОИЯИ, Дубна), прототипирование FEBE для GRPC также начато. Группа ОИЯИ-СОМЕТ уже внесла предложение попробовать использовать ASIC-чип АСТ-1-1 (разработка Института ядерных проблем Белорусского государственного университета), прототип платы с 32 каналами с этим ASIC в паре с Altera Cyclone 10 уже готов, и ведутся его испытания. Мы, совместно с коллегами из Института ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск), разработали формфактор макета и основной функционал для создания FEBE (Рис. 50).

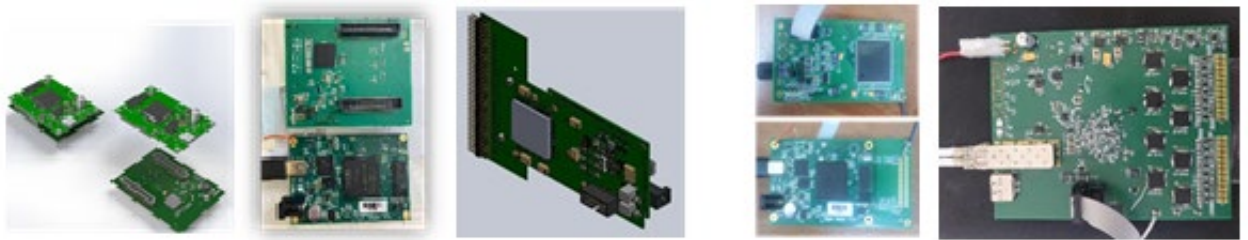


Рис. 49. Разработка фронт-энд электроники на основе СИТИРОС, РЕТИРОС, АСТ-1-1

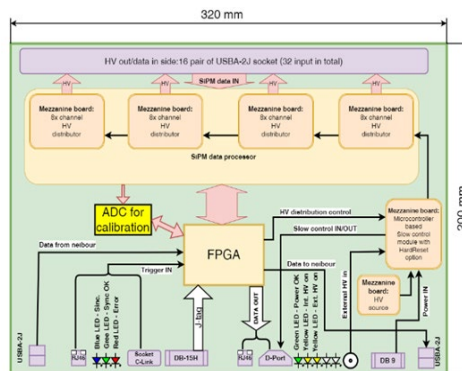


Рис. 50. Первый вариант FEBE, согласованный с коллегами из Новосибирска

Подготовка к производству CRV модулей

Спектрсмещающие волокна нужно обязательно проверять на качество перед заклейкой в стрип, так как было найдено, что в некоторых местах волокна были повреждены.

Для производства первого модуля решено изготовить 100 стрипов длиной 3.2 м и сечением 7×50, с двумя канавками, по одному WLS волокну Kuraray Y11 диаметром 1.2 мм в каждой. Эти счетчики были изготовлены фирмой “Унипласт” (Владимир). Было обнаружено, что волокно иногда имеет неоднородности или повреждения по длине. Надо было проверить WLS волокно ДО вклейки в канавку для уменьшения брака. Процедура проверки качества волокон должна была быть простой и быстрой для выполнения персоналом. Был создан стенд и процедура проверки, удовлетворяющая данным условиям (Рис. 51). Голубой свет создается засветкой УФ-диодами сцинтиллятора. Затем он захватывается спектрсмещающим волокном. Hamamatsu S12571-100C MPPC приставлен на конце волокна и работает в режиме генерации тока (aka “solar panel”), а фототок от SiPM регистрируется с помощью 5-разрядного мультиметра FLUKE 187. Фототок измеряется на расстоянии 20, 110, 170, 260 и 320 см. Таким методом коллеги из “Унипласта” измерили волокна для создания 100 стрипов. 14 волокон из 214 были найдены с дефектами и были отбракованы.

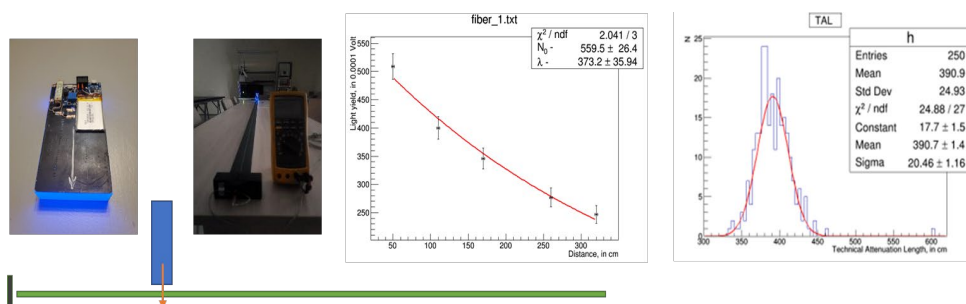


Рис. 51. Источник голубого света; источник света на расстоянии 320 см от фотоприемника; определение длины затухания для одного из волокон; распределение длин затухания

После создания стрипов, их светосбор будет исследоваться в ОИЯИ для дальнейшего отбора при создании модуля. Для этого был создан измерительный стенд для одновременного измерения 16 стрипов с использованием бета-радиоактивного источника. Мы спроектировали дизайн «черного ящика» с 2Д-порталом внутри (Рис. 52). Длина ящика 6 м, ширина 1.2 м.

Обеспечен доступ со всех сторон. Внутри установлен 2Д-портал, перемещающий бета-источник по длине и ширине стола. Управление порталом встроено в общую систему сбора данных.

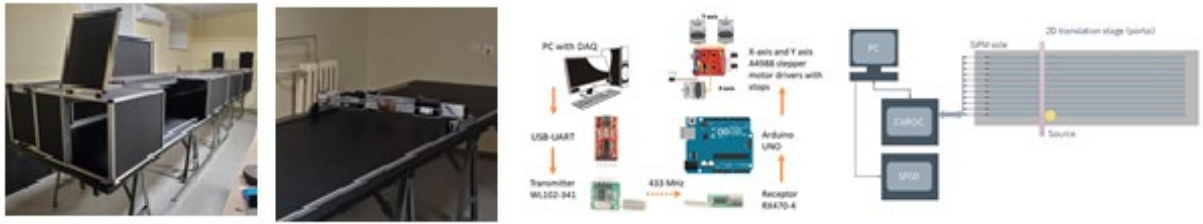


Рис. 52. «Черный ящик» с 2Д-порталом внутри; 2Д-портал на столе; блок-схема беспроводного управления 2Д-порталом для перемещения бета-источника; и блок-схема фронт-энд электроники для считывания данных

Производство первого модуля

Для создания первого модуля длиной 3.2 м, состоящего из 64 стрипов, изготовленных фирмой “Унипласт”, в 4 слоя по 16 стрипов в каждом, прослоенных алюминиевыми пластинами, была разработана технология сборки модуля. Для этой цели мы создали специальный стенд, обеспечивающий создание необходимого сжатия модуля во время склейки с давлением 1 атм путем вакуумирования для фиксации геометрии во время застывания клея (Рис. 53). Это эквивалентно сжатию модуля примерно 26 тоннами.

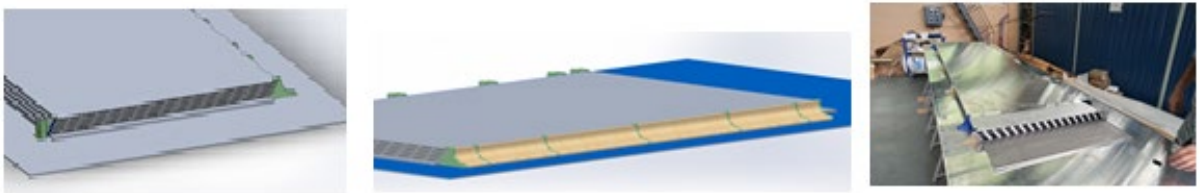


Рис. 53. Дизайн стола; плавные деревянные вставки обеспечивают уменьшение напряжения в покрывающем материале во время сжатия

Сначала нужно было провести предварительную сборку без склейки, проверить размеры и испытать процедуру фиксирования модуля ДО его окончательной сборки. По результатам этого этапа, убедившись, что все нормально, можно начинать окончательную склейку сборки модуля. Всего 3 часа есть на выполнение этой операции, пока клей не загустеет (Рис. 54).



Рис. 54. Процесс склейки; модуль, под вакуумным прессом в 26 тонн; готовый модуль в ящике

После сборки, модуль CRV и несколько стрипов были отправлены из ОИЯИ в Грузинский Технический Университет (ГТУ, Тбилиси) для проведения некоторых стендовых испытаний модуля CRV и исследования эффекта старения стрипов. Затем модуль был доставлен в КЕК/J-Park (Япония) для подготовки к проведению первых испытаний с использованием соответствующей электроники для обнаружения космических мюонов и подготовки к их исследованию во время Фазы- α эксперимента СОМЕТ в следующем году. На основании достигнутых результатов будет принято решение о серийном производстве этих

модулей, а также о производстве прилагаемой к нему электроники. Перед отправкой этот модуль был впервые протестирован с использованием Front-End электроники Метеор-32. Предварительные результаты показали, что расчетная эффективность CRV не менее 99.99% достигнута в стационарных условиях (Рис. 55).

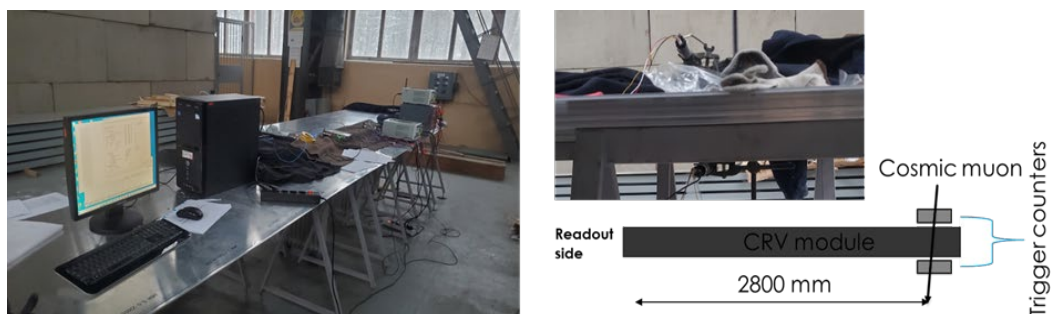


Рис. 55. Первые испытания модуля CRV с Метеором 32, проведенные в ОИЯИ

Мы запланировали первый запуск модуля CRV в J-PARC с Front-End электроникой на основе Метеор-32, поскольку важно убедиться, что расчетная эффективность CRV (не менее 99.99%) для детектирования космических мюонов будет повторена в реальной среде с высокими потоками нейтронов и гамма-квантов.

Далее, начиная с 2024 года, необходимо будет начать массовое производство CRV стрипов, опираясь на опыт создания первых 100 стрипов, и обеспечить контроль качества стрипов для обеспечения скорости производства 128 стрипов/месяц. Front-Electronics должна производиться в то же время. После производства стрипов их следует доставить в КЕК, чтобы начать сборку модулей CRV и массовое производство FEBE в местной лаборатории. Затем необходимо собрать всю систему и провести первый пуско-наладочный запуск.

Результаты всех проведенных исследований были представлены на коллаборационных митингах COMET. Также запланировано несколько публикаций в рецензируемой литературе, описывающих эти исследования.

2.2.6.5. Триггерные системы

Фаза-I будет иметь два различных режима работы. Один - со StrECAL в качестве основного детектора для измерения фона и определения характеристик пучка, и другой - с CyDet в качестве основного детектора для поиска $\mu^-N \rightarrow e^-N$. Для этих двух режимов будут использоваться разные, но схожие системы DAQ и триггеров. Такие детекторы, как монитор пучка и рентгеновский монитор (для определения профиля мюонного пучка и количества мюонов, захваченных в мишени, соответственно), будут использоваться в обоих режимах. Аналогично, CRV обеспечивает вето во время работы с пучком (которое может быть применено в автономном режиме), но также может обеспечивать калибровочный триггер.

Триггер CyDet

Основной триггер при работе в режиме CyDet требует совпадений на соседних счетчиках годоскопа и треков, зарегистрированных в CDC, т.е. 4-кратного совпадения. Дополнительное использование сигналов CDC, связано с тем, что сигналы электронов с высоким импульсом (сигнальных или DIO) совершенно иные, чем для шумовых сигналов частиц с низким импульсом. Для CyDet простая комбинация срабатывания счетчиков годоскопа и энергетического вклада позволяет обеспечить достаточно быстрый запуск с высокой эффективностью подавления фона, что приводит к общей частоте запусков в несколько кГц.

Триггер StrECAL

Энергия от одного трека может быть распределена между несколькими кристаллами, поэтому для восстановления полной энергии необходимо суммирование. Сумма энергий по кристаллам, образующим блок 4×4, составляет почти всю энергию, выделенную электроном с энергией около 100 МэВ. Поэтому базовым триггерным блоком (ячейкой) будет группа из 2×2 кристаллов (один кристаллический модуль ECAL), а полная энергия будет определяться суммированием всей совокупности энергий ячеек, называемых триггерной группой. Моделирование показывает, что при 90% эффективности обнаружения конверсионных электронов исключение сигналов DIO в энергетическом спектре составляет не менее 10⁶.

Триггер запуска от космических частиц в StrECAL необходим для проведения различных видов калибровок для детекторных систем при выключенном пучке. Запуск этого триггера основан на простых совпадениях сигналов с близко расположенных стрипов вето детектора.

Частота срабатывания триггера

Для триггера CyDet «мертвое время» составляет менее 1 мкс, поэтому фактическая максимальная загрузка в режиме CyDet равна 440 кГц. В режиме StrECAL «мертвое время» составляет 36.7 мкс, что приводит к максимальной загрузке 26 кГц. Однако загрузка, определяемая временем записи системой DAQ, не превышает 20 кГц.

2.2.7. СОМЕТ Фаза-α

Фазу-α планируется реализовать до Фазы-I, в 2025 году. В Фазе-α будут измеряться кинематические параметры каждой вторичной частицы, такие как время и энергия, а также самого протонного пучка. Из-за ограничений геометрии аксептанс будет примерно в 10⁻⁵ - 10⁻⁶ раз меньше, чем в Фазе-I. Для моделирования идентификации частиц (PID) была использована комбинация пластикового сцинтилляционного годоскопа и ECAL. Было показано, что e⁻ и большинство μ⁻ достоверно идентифицируются, в то время как эффективность PID для π⁻, составляющая в целом менее 80%, необходимо повысить.

Для более точной оценки характеристик вторичного пучка будет сделано моделирование с использованием обновленной, полностью детализированной геометрии установки.

Относительно эффективности PID: не были учтены эффекты от распадов частиц при движении между детекторами; положение и размеры детекторов нуждались в оптимизации для увеличения статистики; поэтому следует рассмотреть дополнительные алгоритмы для повышения точности PID, провести моделирование с реальными параметрами детекторов и изучить другие возможные комбинации детекторов.

Рассматриваются также следующие вопросы, помимо анализа PID. **Во-первых**, исследуется возможность Фазы-α измерять антипротоны. Антипротоны являются потенциальным источником фона, но их рождение в обратном направлении не достаточно хорошо изучено. Если оно будет измерено как малое или не будет наблюдаться в Фазе-α (в этом случае будет получен верхний предел рождения антипротонов), это станет важным результатом для физических измерений в Фазе-I. В настоящее время внедряются модели физики образования антипротонов в программное обеспечение СОМЕТ - ICEDUST. **Во-вторых**, разрабатываются детекторы для измерения протонного пучка. **В-третьих**, планируется использовать в установке мишень из алюминия, которая позволит измерить рентгеновское излучение мюонов. Наконец, можно установить блокиратор пучка в области детектора и оценить его останавливающую способность, поскольку в программе измерения пучка в Фазе-I он будет использоваться для подавления вторичного излучения от пучка до того, как оно достигает детекторов, для оптимизации конструкции этого компонента потребуется работа по моделированию.

2.2.8. Моделирование и анализ данных

Разработка систем строу трекера и ECAL потребовала большого объема работы по моделированию. Было выполнено моделирование строу-трубки и плоскости строу трекера. Моделирование строу-трубки диаметром 5 мм было выполнено с помощью GARFIELD, а моделирование геометрии плоскости и оценка точности детектора - с помощью специальной программы на языке C++. Результаты для строу-трубки (эффективность, пространственное разрешение) для газовой смеси Ar:CO₂ (80:20) и газового усиления 4×10^4 представлены в Таблице 6 [30]. На Рис. 56 представлен график R-T зависимости для строу-трубки диаметром 5 мм, а на Рис. 57 и Рис. 58 показано пространственное разрешение по диаметру трубки и интегральное пространственное разрешение, соответственно. Было выполнено моделирование оптимальной геометрии плоскости строу трекера, и получена оценка точности восстановления трека (лучше 0.6 мкм) (Рис. 59).

Таблица 6. Результаты моделирования строу-трубки

Диаметр строу-трубки [мм]	5	9.8
Максимальное время дрейфа [нс] stops/proton	38	120
Пространственное разрешение [мкм]	83	73
Область низкой эффективности вблизи катода [мкм]	100	50
Загрузка	Зависит от электроники	

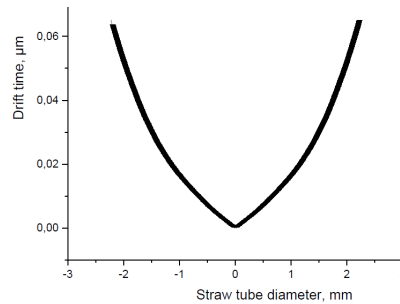


Рис. 56. Промоделированная R-T для строу-трубки диаметром 5 мм

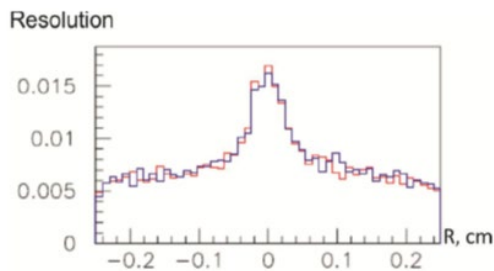


Рис. 57. Пространственное разрешение для строу по диаметру

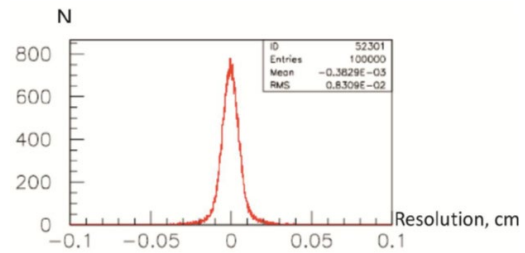


Рис. 58. Интегральное пространственное разрешение для строу-трубки

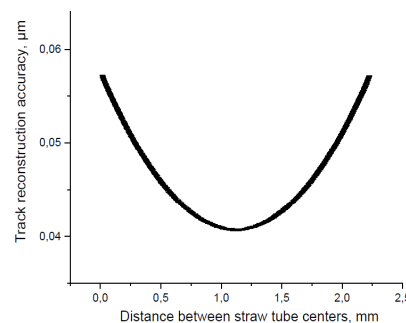


Рис. 59. Оценка точности восстановления трека

Специальное моделирование было проведено с целью оптимизации работы главного кольца J-PARC для достижения очень низкого коэффициента затухания, ниже 10^{-9} , что является обязательным для COMET.

Данные тестовых измерений прототипа ECAL, полученные на электронном ускорителе Тохоку, были проанализированы независимо от японской группы. На основе результатов этого анализа, был сделан вывод о том, что параметры LYSO:Ce кристаллов лучше, чем GSO кристаллов удовлетворяют требованиям эксперимента.

Было выполнено G4-моделирование оптимальной структуры сегментированного ECAL. Так как оптическая модель LYSO кристалла не реализована в пакете Geant4 (G4), была разработана оптическая модель кристалла LYSO:Ce. Для создания оптической модели кристалла использовался пакет SLitrani и выполненные специалистами ОИЯИ измерения основных оптических параметров кристалла. Для верификации G4-оптической модели было выполнено G4-моделирование LYSO:Ce кристалла. На Рис. 60 представлены промоделированный и измеренный энергетические спектры LYSO:Ce кристалла, для наглядности спектры наложенные друг на друга.

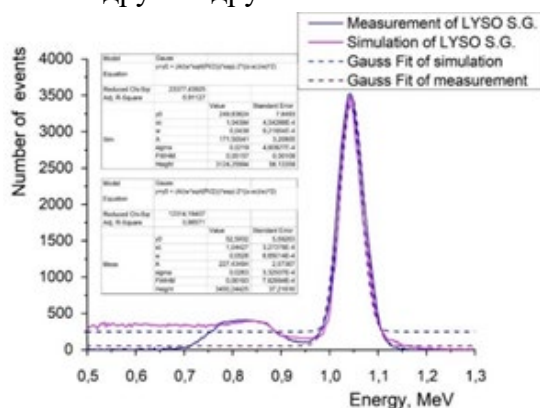


Рис. 60. Измеренный и промоделированный энергетические спектры LYSO:Ce кристалла, полученные для одинаковых условий (APD, 22Na: 1274 кэВ, отверстие коллиматора 0.5 мм)

G4-моделирование оптимальной структуры ECAL было выполнено с учетом оптической модели кристалла. При моделировании учитывались реальные условия эксперимента: 1) ECAL был помещен в однородное магнитное поле 1 Тл; 2) «размытость» по энергии электронного пучка составляла 10 ± 0.25 МэВ, а по геометрии ± 1 см; 3) каждый кристалл был обернут 2 слоями Тефлона (60 мкм).

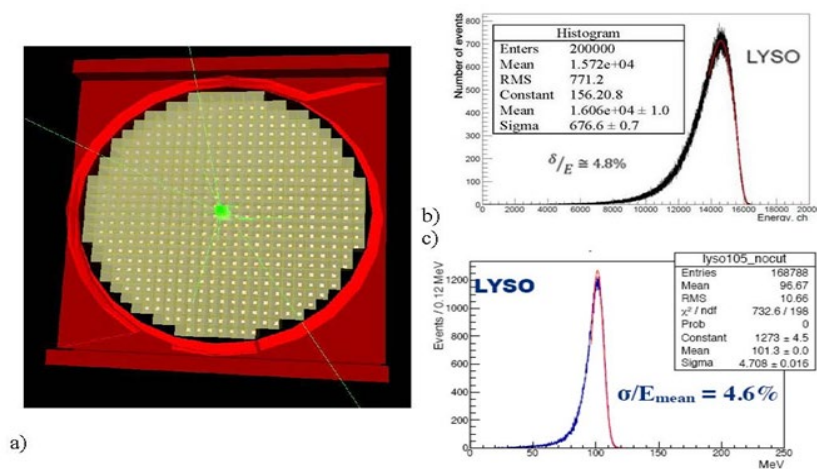


Рис. 61. Результаты моделирования калориметра: а) геометрия б) детектируемый энергетический спектр; в) результаты экспериментального измерения прототипа калориметра на электронном пучке ускорителя в Тохоку (Япония) в 2014 году

Результат моделирования ECAL на LYSO:Ce кристаллах представлен на Рис. 61. Энергетическое разрешение ECAL (Рис. 61 (b)) составило $\sim 4.8\%$, что хорошо согласуется с результатом $\sim 4.6\%$, полученным в тестовых измерениях в Тохоку (Рис. 61 (c)) [31]. Параметры моделирования прототипа ECAL на кристаллах LYSO:Ce аналогичны условиям, при которых проводились тестовые измерения за исключением магнитного поля (его не было при измерениях). Таким образом, полученная G4-оптическая модель может быть использована для моделирования ECAL и для обработки данных эксперимента COMET [19, 28].

Очень важной задачей является работа в программном обеспечении COMET – ICEDUST, в частности, была реализована оптимальная структура ECAL, выполняется работа по моделированию отклика строу трекера.

В будущем мы планируем расширить объем работ по моделированию и анализу данных, чтобы быть готовыми к физическому анализу данных COMET от J-PARC.

Ответственность ОИЯИ в COMET

- Группа ОИЯИ является единственной в коллаборации COMET, которая способна производить тонкостенные строу-трубки. Поэтому мы несем **полную ответственность** за производство всех строу-трубок. Различные процедуры проверки трубок на давление, утечку газа и удлинение также были обновлены в соответствии с требованиями COMET и установлены новые стандарты испытаний.
- ОИЯИ берет на себя **полную ответственность** за проведение научно-исследовательских работ по строу-трубкам диаметром 5 мм и толщиной стенки 12 мкм для Фазы-II COMET. Для этой цели мы подготовили новую линию производства строу-трубок в ЛЯП.
- Физики ОИЯИ вместе с коллегами из КЕК берут на себя **полную ответственность** за сборку, испытания и установку полномасштабного строу трекера для Фазы-I. Высоко оценивая решающий вклад ОИЯИ в создание строу трекера коллаборация избрала члена команды ОИЯИ-COMET одним из **координаторов системы строу трекера**.
- ОИЯИ предложил идею и взял на себя **полную ответственность** за изготовление полномасштабной строу-станции для Фазы-I с новым видом строу-трубок.
- ОИЯИ берет на себя **полную ответственность** за разработку и оптимизацию метода калибровки кристаллов для калориметра, который будет использоваться в Фазе-I и Фазе-II COMET.
- ОИЯИ совместно с КЕК и Университетом Кюсю берет на себя **полную ответственность** за сборку, испытания, установку и эксплуатацию калориметра.
- Физики из ОИЯИ берут на себя **полную ответственность** за сертификацию кристаллов и являются лидерами в научно-исследовательской работе.
- Физики ОИЯИ реализовали полномасштабную научно-исследовательскую работу для создания системы CRV. Эта программа была успешно завершена, и о результатах было доложено на совещаниях коллаборации. На основе этих результатов определяются все параметры и методы создания CRV. Кроме того, **основная ответственность** за сборку, тестирование и установку CRV для Фазы-I будет возложена на ученых из ОИЯИ. На основании этого член группы ОИЯИ был избран **руководителем COMET-CRV**.

Планы на 2025 – 2029 предусматривают

- Участие в подготовке, инженерно-физическом запуске, сборе и анализе данных Фазы-I, 2025-2027.
- Моделирование комплексной детекторной системы (трекер, калориметр и т.д.), 2025-2027.
- Научно-исследовательская программа по производству строу-трубок с толщиной стенки 12 мкм и диаметром 5 мм. Измерение всех механических свойств и разработка стандартов для контроля качества изготовленных новых строу-трубок диаметром 5 мм, 2025.

- Завершение сборки, испытаний, калибровки, установки, испытаний космической и технического обслуживания строу детектора для Фазы-I, 2025-2026.
- Производство строу-трубок (около 1000 шт.) для полномасштабного прототипа, 2026-2027.
- Изготовление полномасштабной строу-станции в ОИЯИ с новыми трубками (12 мкм, 5 мм), и измерения на пучке, 2027-2028.
- Подготовка, массовое производство и испытания строу-трубок для Фазы-II, 2028-2029.
- Разработка и оптимизация метода калибровки кристаллов для калориметра COMET с учетом особенностей эксперимента: наличие магнитного поля и калориметра высокого разрешения, 2025-2026.
- Участие в проектировании, сборке, монтаже, испытаниях космической и техническом обслуживании калориметра в полном объеме, 2025-2027.
- Участие в сборке и обслуживании CRV для Фазы-I и Фазы-II, 2025-2029.
- Участие в испытаниях пучком компонентов детектора для Фазы II, 2028-2029.
- Участие в сборке, тестировании, монтаже и техническом обслуживании всей детекторной системы для Фазы-II, 2028-2029.

Публикации и доклады на конференциях группы ОИЯИ-COMET

Публикации:

1. V. Kalinnikov, Velicheva and A. Rozhdestvensky, "Measurement of the LYSO:Ce and LYSO:Ce,Ca scintillator response for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment" / Physics of Particles and Nuclei Letters, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 995–1001.
2. A. Artikov, V. Baranov, A. Boikov, D. Chokheli, Yu.I. Davydov, V. Glagolev, A. Simonenko, Z. Tsamalaidze, I. Vasilyev, I. Zimin. High efficiency muon registration system based on scintillator strips. // Physics > Instrumentation and Detectors: arXiv:2309.14515, 2023.
3. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Measurement of the Electromagnetic Calorimeter Prototype using Cosmic Muons // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 225–234. © Pleiades Publishing, Ltd., 2022.
4. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Yusuke Uozumi, Comparison of the Scintillation Properties of Long LYSO:Ce Crystals from Different Manufacturers. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 457–468.
5. A. Volkov*, P. Evtoukhovich, M. Kravchenko, Y. Kuno, S. Mihara, H. Nishiguchi, A. Pavlov, Z. Tsamalaidze. Properties of straw 1 tubes for the tracking detector of the COMET experiment. // NIM, A, Volume 1004, article id. 165242, 2021.
6. H. Nishiguchi, P. Evtoukhovitch, Y. Fujii, E. Hamada, N. Kamei, S. Mihara, A. Moiseenko, K. Noguchi, K. Oishi, J. Suzuki, J. Tojo, Z. Tsamalaidze, N. Tsverava, K. Ueno, A. Volkov, Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I. NIM, A 958 (2020) 162800.
7. Kalinnikov et. al, Investigation of the light yield distribution in LYSO crystal by the optical spectroscopy method for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment // Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol. 23, no. 4 (2020), pp. 374 – 385.
8. А. Д. Волков, М. Д. Кравченко, А. В. Павлов. Стенд для исследования характеристик строу. Успехи прикладной физики, 2019, том 7, № 1, стр. 76 - 83.
9. А. Д. Волков, П. Г. Евтухович, А. С. Моисеенко, Б. М. Сабиров, З. Цамалаидзе, Н. Цверева. Влияние внутреннего давления на натяжение в сварных строу трекового детектора. Успехи прикладной физики, 2018, том 6, № 1, стр. 83 – 90.
10. А. Д. Волков, М. Д. Кравченко, А. В. Павлов. Устройство для исследования свойств строу трубки координатного детектора частиц. Патент № 2691770.

11. H. Nishiguchi, P. Evtoukhovitch, A. Moiseenko, Z. Tsamalaidze, N. Tsverava, A. Volkov, et al. Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum- The COMET straw tracker system. NIM, A 845, 269 (2017).
12. В. Калинин, Е. Величева, З. Цамалаидзе, А. Лобко, О. Мисевич, Исследование методов улучшения однородности светосбора в кристаллах для электромагнитного калориметра эксперимента «COMET»// Сб.: Аспекты сцинтилляционной техники. (под редакцией А.В. Гектина) – Харьков: “ИСМА”, 2017. С.21-41 с.
13. А. Д. Волков, З. Цамалаидзе. Способ определения коэффициента Пуассона материала герметичной тонкостенной полимерной трубки. Патент № 2653186.
14. COMET Phase-I. Technical Design Report 2016 (prepared with participation of the JINR physicists).
15. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Z. Tsamalaidze, Lobko, O. Missevitch, Y. Kuno. Spatial and temporal evolution of scintillation light in LYSO electromagnetic calorimeter for non-paraxial electromagnetic showers. //Nonlinear Phenomena in Complex. V. 19, No 4 (2016). Pp. 345 – 357.
16. V. Kalinnikov, E. Velicheva. Research of the ECAL calorimeter used in the COMET experiment. // Functional Materials, 22 (2015), 1, 116-125.
17. V. Kalinnikov, E. Velicheva. Research of long GSO and LYSO crystals used in the calorimeter developed for the COMET experiment. Functional Materials, 22 (2015), 1, 126-134.
18. V. Kalinnikov, E. Velicheva. Simulation of Long GSO Crystals for the COMET Experiment. // Nonlinear Phenomena in Complex. V. 8, No 2 (2015). Pp. 215 – 221.
19. В. Калинин, Е. Величева, А. Лобко. Исследование длинных кристаллов GSO и LYSO для создания сегментированных электромагнитных калориметров. Физика сцинтилляторов. Материалы, методы, аппаратура. Изд: ИСМА. 2015. С. 137-158.
20. Калинин В., Величева Е. Исследование параметров и разработка алгоритма пространственной реконструкции для калориметра COMET эксперимента. Изд: ИСМА. 2015. С. 186-203.
21. V. Kalinnikov, E. Velicheva. Investigation of LYSO and GSO crystals and simulation of the calorimeter for the COMET experiment. // Phys. Part. Nucl. Lett. 11 (2014) 3, 259-268.
22. M. Eliashvili, A. Khvedelidze, M. Nioradze, Z. Tsamalaidze. The COMET experiment at J-PARC: A step towards solving the muon enigma, TSU Science, N6, (2014).
23. А.Д. Волков. Контроль натяжения трубок в строу детекторах. Успехи прикладной физики, 2, №4, 413 (2014).
24. V. Kalinnikov, E. Velicheva, The Calorimeter Simulation. Comet Technical Note 108_V1.2014.
25. A.D. Volkov. Wire tension monitor for proportional chambers of the ANKE spectrometer. NIM A 701, 80 (2013).
26. А.Д. Волков. Устройство для измерения натяжения трубки в строу детекторах. Патент №2539107 (2013).
27. V. Kalinnikov, E. Velicheva, The Calorimeter Simulation. Comet Technical Note 26_V1.2012.

Доклады на конференциях:

1. N. Tsverava, D. Chokheli et al, “JINR/GTU straw laboratory current activity”, COMET Collaboration meeting 42 (CM42), Zoom J-PARC, Japan, Feb 2024
2. D. Chokheli, Z. Tsamalaidze, “Schedule to work with 1st CRV module and next plan for mass production”, COMET Collaboration meeting 42 (CM42), Zoom J-PARC, Japan, Feb 2024
3. D. Chokheli, “Some info about 1st CRV module: preparation”, COMET Collaboration meeting 41 (CM41), Zoom J-PARC, Japan, Nov 2023

4. D. Chokheli, "Summary of CRV status", COMET Collaboration meeting 41 (CM41), Zoom J-PARC, Japan, Nov 2023
5. D. Chokheli, Z. Tsamalaidze, "First CRV-Left module status and plan for coming autumn", COMET Collaboration meeting 40 (CM40), Zoom J-PARC, Japan, July 2023
6. P. G. Evtoukhovitch, Samartsev A., Pavlov A., Tsamalaidze Z., Tsverava N. et al, "Production of some components for 5mm straw module: status and perspectives", COMET Collaboration meeting 39 (CM39), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2023
7. D. Chokheli et al, "The CRV module, preliminary test with Meteor32, processing to send it to KEK", COMET Collaboration meeting 39 (CM39), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2023
8. D. Chokheli et al, "Straw chambers array as a temporary/backup solution for CRV front area for Phase-1", COMET Collaboration meeting 39 (CM39), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2023
9. D. Chokheli et al, "Summary of CRV status", COMET Collaboration meeting 39 (CM39), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2023
10. D. Chokheli, Z. Tsamalaidze, "COMET CRV STATUS for CM38", COMET Collaboration meeting 38 (CM38), Zoom J-PARC, Japan, Dec 2022
11. D. Chokheli et al, "Front-end electronics for CRV: design of version 1.0 is ready for discussion", COMET Collaboration meeting 38 (CM38), Zoom J-PARC, Japan, Dec 2022
12. D. Chokheli et al, "Creation of COMET CRV Module CRV-SL-0", COMET Collaboration meeting 38 (CM38), Zoom J-PARC, Japan, Dec 2022
13. D. Chokheli, Z. Tsamalaidze, "COMET CRV STATUS for CM37", COMET Collaboration meeting 37 (CM37), Zoom J-PARC, Japan, July 2022
14. D. Chokheli et al, "Creation of COMET CRV Module CRV-SL-0", COMET Collaboration meeting 37 (CM37), Zoom J-PARC, Japan, July 2022
15. N. Tsverava, "Status Report on 12 μ m Straw", COMET Collaboration meeting 37 (CM37), J-PARC, Japan, Jul 2022
16. P. G. Evtoukhovitch et al, "Production and testing the ROESTI slightly modified", COMET Collaboration meeting 37 (CM37), Zoom J-PARC, Japan, Jul 2022
17. D. Chokheli, "COMET CRV STATUS for CM36", COMET Collaboration meeting 36 (CM36), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2022
18. D. Chokheli et al, "Starting a creation of the 1st COMET CRV Module "0"", COMET Collaboration meeting 36 (CM36), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2022
19. A. Boikov, D. Chokheli et al, "DAQ for the quality test while mass production and first steps with PETIROC", COMET Collaboration meeting 36 (CM36), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2022
20. D. Chokheli et al, "Scintillator CRV: getting ready for mass production", COMET Collaboration meeting 36 (CM36), Zoom J-PARC, Japan, Mar 2022
21. A. Boikov, D. Chokheli et al, "DAQ for the quality test while mass production and first steps with PETIROC", COMET Collaboration meeting 35 (CM35), Zoom J-PARC, Japan, Nov 2021
22. D. Chokheli et al, "Scintillator CRV: getting ready for mass production", COMET Collaboration meeting 35 (CM35), Zoom J-PARC, Japan, Nov 2021
23. D. Chokheli, "COMET CRV STATUS for CM35", COMET Collaboration meeting 35 (CM35), Zoom J-PARC, Japan, Nov 2021
24. D. Chokheli et al, "CRV draft design for side and top", COMET Collaboration meeting 33 (CM34), Zoom J-PARC, Japan, July 2021
25. A. Boikov, D. Chokheli et al, "R&D for COMET CRV Front End Board electronics: some tests with CITIROC and LiROC", COMET Collaboration meeting 34 (CM34), Zoom J-PARC, Japan, July 2021

26. D. Chokheli, I. Zimin et al, “Background estimation for module: reflection from the back wall, rate for the electrons, neutrons, gammas”, COMET Collaboration meeting 34 (CM34), Zoom J-PARC, Japan, July 2021
27. D. Chokheli. “R&D for CRV system based on scintillator strips for the COMET experiment”, CM33 workshop, Tokai, J-PARC, 22 February to 4 March, 2021
28. D. Chokheli. “High Efficiency Muon Registration System based on Scintillator Strips”, CM32 workshop, Tokai, 2-6 November, 2020
29. S. Tereshchenko. “Proposal for Improvement of the efficiency and electronic for the CRV”, CM32 workshop, Tokai, J-PARC, 2-6 November, 2020
30. N. Tsverava et al., “Development of Ultrathin 12 μm Thick Straw Tubes for the Tracking Detector of COMET Experiment”, Proceedings, 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (NSS/MIC 2019): Manchester, United Kingdom, October 26-November 02, 2019
31. N. Tsverava. “Examination the quality of the seams of 12/20 μm straw tubes”, CM29 workshop, Tokai, J-PARC, 14-18 Oct, 2019
32. V. Duginov. “The certification of the LYSO(Ce) crystals for COMET calorimeter”, The COMET colloquium, Dubna, October 2019
33. M. Kravchenko. “Mechanical properties of the thin-walled straws of the COMET experiment”, The EPS-HEP2019 Conference, Ghent, Belgium, 10-17 July, 2019
34. N. Tsverava. “Straw tubes R&D for Phase-II”, CM28 workshop, Tokai, 10-14 June, 2019
35. A. Pavlov. “The first step in obtaining a three-dimensional drift line”, CM27 workshop, Tokai, 19-23 Feb, 2019
36. A. Pavlov, P. Evtoukhovitch. “The final result of simulation of the drift line in Garfield ++”, CM28 workshop, Tokai, 19-23 Feb, 2019
37. A. Pavlov., P. Evtoukhovitch. “The simplify model of electron drifting in the straw tube”, CM27 workshop, Tokai, 19-23 Feb, 2019
38. P. Evtoukhovitch. “New steps in the straw module development for 5 mm straws”, CM27 workshop, Tokai, 19-23 Feb, 2019
39. H. Nishiguchi, P. Evtoukhovitch, et al., “Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I”, The 15th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, February 18-22, 2019
40. V. Duginov. “The passportization of the LYSO(Ce) crystals for COMET”, the COMET CM26 workshop, Tbilisi, 1-5 October 2018
41. A. Pavlov. “Simulation of drift lines. The nature of the electron motion in the tube”, CM26 workshop, Tbilisi, 1-5 Oct, 2018
42. M. Kravchenko, A. Pavlov. “Mechanical properties of the thin-walled welded straws for the COMET experiment”, CM26 workshop, Tbilisi, 1-5 Oct, 2018
43. A. Pavlov. “The effect of the seam on the collection of primary ionization”, European School of High-Energy Physics, Maratea, Italy, 20 June – 3 July, 2018
44. A. Pavlov. “The effect of the gap on the collection of primary ionization”, CM25 workshop, Tokai, 21-25 May, 2018
45. P. Evtoukhovitch. “Present status of the straw module prototype with 5 mm straws”, CM25 workshop, Tokai, 21-25 May, 2018
46. A. Pavlov, P. Evtoukhovitch. “Position Resolution of the Straw Tube”, CM23 workshop, TU-Dresden, 24-30 Sep, 2017
47. K. Ueno, P. Evtoukhovitch, et al., “Development of a thin-wall straw-tube tracker for COMET experiment”, Proceedings, 2017 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2017): Venice, Italy, July 5-12, 2017

48. Z. Tsamalaidze. “The status and plans of JINR activity in the COMET experiment”, the COMET CM22 workshop, Tokai, 29 May – 02 June, 2017
49. E. Velicheva, V. Kalinnikov. “Simulation and Experimental Investigation of Optical Properties of Inorganic Crystals”, BelINP-2017, 1st International Symposium “Integration of Belarussian Scientists in the research programs of the world’s leading nuclear physics centers”. May 2017

ССЫЛКИ:

1. The COMET Collaboration, Conceptual design report for experimental search for lepton flavor violating $\mu^- \rightarrow e^-$ conversion at a sensitivity of 10^{-16} with a slow-extracted bunched proton beam (COMET), KEK Report 2009–10 (submitted to the J-PARC Physics Advisory Committee) (2009) (available at: <https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2009/0924/0924011.pdf>).
2. COMET Phase-I TDR, COMET Collaboration, PTEP 2020, 3, 033C01.
3. B. Krikler, Sensitivity and background estimates for Phase-II of the COMET experiment, Ph.D. Thesis, Imperial College London (2016).
4. W. Bertl et al., Eur. Phys. J. C 47, 337 (2006).
5. E. Oset, H. C. Chiang, T. S. Kosmas, A. Faessler, and J. D. Vergados, 13th Int. Conf. Particles and Nuclei (PANIC 93), p. 271 (1993).
6. D. Tomono et al., Proc. 2017 Int. Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact17), p. 111 (2018).
7. H. Sakamoto, Simulation Studies for the CDC for COMET Phase-I, COMET internal note No. 34 (2013).
8. S. Movchan, Nucl. Instrum. Meth. A 604, 307 (2009).
9. A. Volkov, P. Evtoukhovich, M. Kravchenko, Y. Kuno, S. Mihara, H. Nishiguchi, A. Pavlov, Z. Tsamalaidze // Properties of straw tubes for the tracking detector of the COMET experiment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1004, 11 July 2021, 165242, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165242>
10. А. Д. Волков, М. Д. Кравченко, А. В. Павлов. Устройство для исследования свойств строу трубки координатного детектора частиц. Патент № 2691770.
11. Mendelson A. Plasticity: Theory and Application. New York: Macmillan, 1968
12. Birger I.A., Mavlyutov R.R., Resistance of Materials. Moskow: Nauka, 1986
13. <http://www.detectors.saint-gobain.com/>
14. C. Pepin, et.al. Properties of LYSO and recent LSO scintillators for phoswich PET detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, No. 3, (2004) pp. 789-795.
15. Weber S, Christ D, Kurzeja M et al. (2003) Comparison of LuYAP, LSO, and BGO as scintillators for high resolution PET detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci. 50: 1370–1372.
16. Carelht W.E. vanEijk. Inorganic scintillators in medical imaging detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 509 (2003) 17-25.
17. Cordelli M. et al., Test of a LYSO matrix with an electron beam between 100 and 500 MeV for KLOE-2 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 617 (2010) 109–112.
18. C. Fabjan, F. Gianotti. Calorimetry for particle physics. Published in Rev.Mod.Phys. 75 (2003) 1243-1286.
19. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Y. Kuno et al. Spatial and temporal evolution of scintillation light in LYSO electromagnetic calorimeter for non - paraxial electromagnetic showers. //Nonlinear Phenomena in Complex. V. 19, No 4 (2016). Pp. 345.
20. Hans-Christian Schultz-Coulon. The Physics of Particle Detectors. Lecture & Journal Club (SS 2011). Kirchhoff-Institut für Physik. http://www.kip.uni-heidelberg.de/~coulon/Lectures/Detectors/Free_PDFs/Lecture9.pdf

21. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/High_energy_PMT_TPMZ0003E.pdf
22. <https://www.caen.it/sections/digitizer-families/>
23. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Measurement of LYSO crystals. Comet Technical Note 107_V1.2014.
24. V. Kalinnikov, E. Velicheva. Investigation of LYSO and GSO crystals and simulation of the calorimeter for the COMET experiment. // Phys. Part. Nucl. Lett. 11 (2014) 3, 259-268.
25. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Yusuke Uozumi, Comparison of the Scintillation Properties of Long LYSO:Ce Crystals from Different Manufacturers. //Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 457–468).
26. В. Калинин, Е. Величева, З. Цамалаидзе, А. Лобко, О. Мисевич, Исследование методов улучшения однородности светосбора в кристаллах для электромагнитного калориметра эксперимента «КОМЕТ»// Сб.: Аспекты сцинтилляционной техники. (под редакцией А.В. Гектина) – Харьков: “ИСМА”, 2017. С.21-41.
27. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Measurement of the Electromagnetic Calorimeter Prototype using Cosmic Muons // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 225–234. © Pleiades Publishing, Ltd., 2022.
28. V. Kalinnikov, Velicheva and A. Rozhdestvensky, “Measurement of the LYSO:Ce and LYSO:Ce,Ca scintillator response for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment” / Physics of Particles and Nuclei Letters, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 995–1001.
29. <https://pdf.directindustry.com/pdf/hamamatsu/si-apd/13622-597330.html>
30. V. Kalinnikov, E. Velicheva, The simulation of the COMET straw tracker. Comet Technical Note 36_V1_2013.
31. Kou Oishi, Development of Electromagnetic Calorimeter Using LYSO Crystals for the COMET Experiment at J-PARC, Published in: PoS EPS-HEP2017 (2018) 800.

2.3. Предполагаемый срок выполнения

2025 – 2029

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛЯП, ЛФВЭ, ЛТФ, ЛИТ

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты					
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)					

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Имп. коледж	Англия	Лондон	Учида Йоши + 6 чел.	Совместные работы

Рутерф. Лаб.			Кларк Д. + 4 чел.	
ИФ НАНБ	Беларусь	Минск	Шелковый Д.В. + 3 чел. Орлович В, Грабчиков А, Ходасевич И.	Совместные работы
БГУ	Беларусь	Минск	Анищик В.М. + 5 чел.	Совместные работы
ИЯИ, БГУ	Беларусь	Минск	Лобко А., Мисевич О.	Совместные работы
Техн. Унив	Германия	Дрезден	Зубер К. + 4 чел.	Совместные работы
ИФВЭ-ТГУ	Грузия	Тбилиси	Девидзе Г. + 4 чел.	Совместные работы
ГТУ	Грузия	Тбилиси	Ломидзе Д. + 6 чел.	Совместные работы
УГ	Грузия	Тбилиси	Гогилидзе + 2 чел.	Совместные работы
ИЯФ МЭ	Казахстан	Алматы	Здоровец М.+3 чел.	Совместные работы
ИЯФ РАН	Россия	Новосибирск	Григорьев Д. + 6 чел.	Совместные работы
НГУ	Россия	Новосибирск	Бондар А. + 6 чел.	Совместные работы
CNRS-IN2P3	Франция	Париж	Капуста Ф. + 4 чел.	Совместные работы
Карлов Ун.	Чехия	Прага	Фингер М. + 4 чел.	Совместные работы
КЕК	Япония	Цукуба	Михара С. + 18 чел.	Совместные работы
Осака Унив.	Япония	Осака	Куно Ё. + 14 чел.	Совместные работы
Кюшу Унив.	Япония	Фукуока	Дж. Тожо + 8 чел.	Совместные работы

2.6. Организации-соисполнители (те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	11.3	5
2.	инженеры	3.1	
3.	специалисты		
4.	служащие		
5.	рабочие		
	Итого:	14.4	5

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	ФИО	Подраз деление	Должность	Сумма FTE
1	научные работники	Д. Азнабаев	ЛТФ	Научный сотрудник	0.2
2	научные работники	Д. Байгарашев	ЛФВЭ	Научный сотрудник	0.2
3	научные работники	Д. Чохели	ЛЯП	Ст. научный сотрудник	1.0
4	научные работники	Т.Л. Еник	ЛФВЭ	Ст. научный сотрудник	0.1
5	научные работники	Д. Годеридзе	ЛИТ	Мл. научный сотрудник	0.4
6	научные работники	П.Г. Евтухович	ЛЯП	Ст. научный сотрудник	1.0
7	научные работники	А. Иссадииков	ЛТФ	Ст. научный сотрудник	0.2

8	научные работники	В.А. Калинин	ЛЯП	Вед. научный сотрудник	1.0
9	научные работники	А. Хведелидзе	ЛИТ	Вед. научный сотрудник	0.4
10	научные работники	Г.А. Козлов	ЛТФ	Вед. научный сотрудник	0.2
11	научные работники	А.В. Павлов	ЛЯП	Мл. научный сотрудник	1.0
12	научные работники	Б.М. Сабиров	ЛЯП	Научный сотрудник	1.0
13	научные работники	А.В. Симоненко	ЛЯП	Ст. научный сотрудник	0.5
14	научные работники	В.В. Терещенко	ЛЯП	Рук. группы	0.1
15	научные работники	З. Цамалаидзе	ЛЯП	Рук. сектора	0.7
16	научные работники	Н. Цверава	ЛЯП	Мл. научный сотрудник	1.0
17	научные работники	И.И. Васильев	ЛЯП	Мл. научный сотрудник	0.3
18	научные работники	Е.П. Величева	ЛЯП	Ст. научный сотрудник	1.0
19	научные работники	А.Д. Волков	ЛЯП	Научный сотрудник	1.0
20	инженеры	И.Л. Евтухович	ЛЯП	Ст. инженер	0.9
21	инженеры	Е.С. Канева	ЛЯП	Инженер	1.0
22	инженеры	Х. Хубашвили	ЛЯП	Инженер	0.9
23	инженеры	А.Г. Самарцев	ЛЯП	Ст. инженер	0.3
24	специалисты				
25	рабочие				
	Итого:				14.4

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники		5
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	Итого:		5

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

980,000 долларов

Детализация приводится в отдельной форме.

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта

_____ / Цамалаидзе Звиад /

Дата представления проекта в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории 20 марта 2024 г., номер документа _____

Год начала проекта 2021 г.

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту 2015

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам					
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	
	Международное сотрудничество (МНТС)	600	120	120	120	120	120	
	Материалы	220	80	80	20	20	20	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	170	40	40	30	30	30	
	Пуско-наладочные работы							
	Услуги научно-исследовательских организаций							
	Приобретение программного обеспечения							
	Проектирование/строительство							
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)							
Необходимые ресурсы	Нормочас	Ресурсы						
		– сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,	1300	350	350	200	200	200
		– реактора,.....						
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	990000	240	240	170	170	170
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____ / Цамалаидзе Звиад /

Экономист Лаборатории _____ / _____ /

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП
УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА **СОМЕТ**
ШИФР ПРОЕКТА
ШИФР ТЕМЫ 02-2-1144-2021
ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА Цамалаидзе Звиад

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /
ПОДПРОЕКТА КИП

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ	_____	_____
	ФИО	ДАТА