Приложение 3.

Форма открытия (продления) Проекта / Инфраструктурного проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____ / _____ /

“____“ _____ 2026 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ (ПРОДЛЕНИЯ) ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА / ПРОЕКТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы (02-1-1096-2010)

1.2. Шифр проекта (02-1-1096-2-2017/2026)

1.3. Лаборатория ЛФВЭ

1.4. Научное направление Физика элементарных частиц и физика тяжелых ионов высоких энергий

1.5. Наименование проекта NA64

1.6. Руководитель(и) проекта Матвеев В.А., Пешехонов Д.В.

1.7. Заместитель(и) руководителя проекта

1.8. Научный руководитель проекта

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Эксперимент NA64 с фиксированной мишенью реализуемый на пучках SPS в ЦЕРН посвящен поискам новых частиц темного сектора (DS) с массами <1 GeV слабо взаимодействующих с лептонами и кварками стандартной модели (СМ). Концепция установки основана на использовании полностью герметичного детектора для поиска скрытых частиц, проявляющих себя как события с большой недостающей энергией (missing energy) в реакциях рассеянии электронов/позитронов, мюонов, и адронов на ядрах «активной мишени». Эта особенность является основным преимуществом проекта вследствие того, что вероятность регистрации сигнального события в NA64 пропорциональна квадрату константы связи в отличие от ее четвертой степени для вероятности обнаружения в установках типа «beam-dump». Это позволяет NA64 достигать высокой чувствительности при существенно меньшей статистике и низком уровне фона.

С момента своего утверждения в 2016 г. NA64 является пионерским экспериментом и

мировым лидером по поискам легкой темной материи (LDM). Получаемые результаты востребованы научным сообществом, а программа исследований актуальна и поддержана ЦЕРН. Чтобы полностью реализовать научный потенциал проекта, коллаборация NA64 планирует модернизацию экспериментальной установки во время длительной остановки LS3 в ЦЕРН, которое позволит дальнейший набор данных при более высоких интенсивностях пучков. Запланированная модернизация включает как обновление уже существующего экспериментального оборудования, так и создание нового для улучшения герметичности установки; возможности работы при большей интенсивности пучка благодаря более быстрой электронике и развитию трековых камер для магнитных спектрометров.

После остановки LS3 коллаборация NA64 планирует дальнейший набор данных с $\sim 10^{13}$ электронов, $\sim 10^{11}$ позитронов, $\sim 2\times 10^{13}$ мюонов, и $\sim 10^{11}$ адронов на мишени, что позволит существенно расширить область поиска как темной материи с возможностью ее обнаружения или исключения основных хорошо мотивированных ее моделей, так и других проявлений новой физики за пределами СМ.

2.2. Научное обоснование

Цель проекта: поиск легкой темной материи (LDM) и проявлений физики за пределами СМ на выведенных пучках ускорителей SPS и PS ЦЕРН.

Актуальность: несомненно, основной задачей физики частиц сегодня является объяснение происхождения и природы темной материя (DM) во Вселенной, которая несмотря на интенсивные поиски на LHC и в лабораторных экспериментах, до сих пор не обнаружена. Одним из наиболее популярных и мотивированных кандидатов на роль DM до недавнего времени были массивные слабо взаимодействующие частицы (WIMP). Отсутствие положительных результатов по их поиску стимулировало расширение дальнейших исследований. Так, сравнительно недавно, был предложен широкий класс моделей альтернативных кандидатов DM предполагающий существование «темных» (или скрытых) секторов (DS) во Вселенной, обеспечивающих естественную основу для объяснения происхождения и свойств DM. В этих моделях DM является частью скрытого сектора, состоящего из частиц, которые являются синглетами группы $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ Стандартной Модели (СМ), взаимодействующие с обычной материей через гравитацию и, потенциально, другие слабые силы.

Один из наиболее популярных сценариев предполагает существование нового (портального) взаимодействия между DS и видимым веществом, посредством обмена векторным бозоном A′, так называемым темным фотоном. Бозон A′ может быть легким, с массой $m_{A'}$ ~O(1) ГэВ, связанной со спонтанным нарушением симметрии $U(1)_D$, и взаимодействующим с частицами СМ через кинетическое смешивание с обычным фотоном, обычно параметризуемым величиной $\varepsilon<<1$. Удивительным является тот факт, что область предсказанных масс m_{DM} частиц DM, а также величин $m_{A'}$ и ε объясняющая реликтовую плотность DM лежит в области параметров доступных для обнаружения на современных ускорителях. Это послужило толчком для изменения стратегии и смещения фокуса ускорительных поисков темной материи с обычно выполняемых при высоких энергиях на эксперименты при более низких энергиях и высоких интенсивностях.

Сегодня NA64 – это лидирующий эксперимент с фиксированной мишенью по поиску

проявлений темного сектора в реакциях рассеяния электронов/позитронов, мюонов и адронов на ядрах активной мишени в комбинации с методикой регистрации событий с недостающей энергией.

Научная новизна проекта, методы и подходы, методики: проект NA64 предложил эффективную методику чувствительных поисков частиц скрытого сектора, основанную на использовании комбинации герметичного детектора с активной мишенью и регистрации событий с недостающей энергией**.**

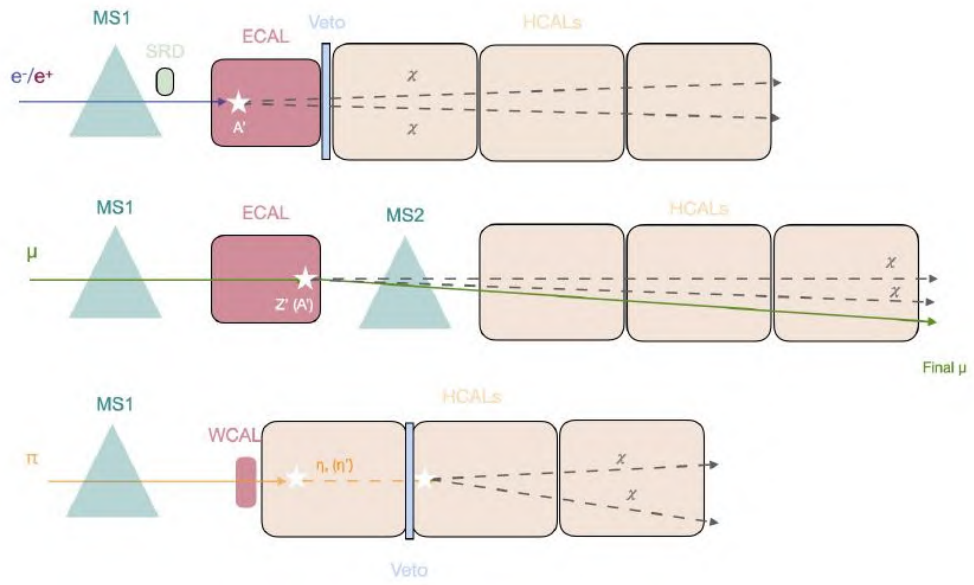

Рис. 1 Принципиальная схема установки NA64 для проведения исследований на пучках электронов, мюонов и адронов. Обозначения: MS1/2 – магнитный спектрометр; ECAL/WCAL – электромагнитный калориметр, используемый как активная мишень; SRD – детектор синхротронного излучения; HCAL – адронный калориметр; Veto – сцинтилляционный счетчик.

Методика поиска в эксперименте **NA64$_e$** на канале H4 SPS заключается в следующем: векторный бозон A′ может родиться в результате смешивания с фотоном тормозного излучения при рассеянии электронов на ядрах свинца активной мишени, в качестве которой используется Sc-Pb электромагнитный (e-m) калориметр (ECAL).

Реакция рождения A′, $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$, как правило будет происходить на первых нескольких радиационных длинах (X_0~1cm) мишени. Далее полагается, что A' распадается на невидимые частицы темной материи, которые проходят оставшуюся часть установки без взаимодействия. Факт возникновения и распада A' → invisible, при взаимодействиях e−Z, будет выглядеть как событие с единичным e-m ливнем в ECAL мишени и «нулевым» выделением энергии в HCAL (не превышающим возникающих от возможных источников фона). При этом энерговыделение в ECAL < ~ 50% от энергии пучка ~100 GeV.

Предполагается, что процесс рождения темного фотона и последующего распада A' → invisible будет происходить очень редко, на уровне $\leq 10^{-12}$ на один падающий электрон. Отсюда вытекают требования к дизайну и структуре экспериментальной установки. Один из основных источников фона связан с «низкоэнергетическим хвостом» в распределении энергии электронов в первичном пучке. Он возникает при взаимодействии электронов с пассивным веществом в пучке, таким, например, как входные окна каналов пучка,

остаточный газ и т.п. Другой источник появления таких электронов связан с распадами пионов или мюонов на лету, при транспортировке пучка в канале.

Для подавления этого фона в NA64 используется система мечения e^- высокой энергии, путем регистрации испускаемого ими синхротронного излучения (SR) в дипольном магните трекового спектрометра (см. Рис. 1). При этом электроны с более низкой энергией эффективно подавляются поскольку полная энергия фотонов SR ~ $E_{e^-}^3$. Ожидаемый консервативный вклад от различных источников фона для пучка с энергией 100 ГэВ составляет $<10^{-12}/e^-$.

Эксперимент **NA64μ** проводит поиск частиц DS в событиях с недостающей энергией на пучках 160 ГэВ мюонов канала M2 SPS в ЦЕРН. Ряд интересных моделей предсказывает существование частиц темного сектора, преимущественно слабо связанных со вторым и, возможно, третьим поколениями частиц Стандартной Модели. В дополнение к гравитации это новое очень слабое взаимодействие между видимым и темным секторами может быть объяснено либо скалярными (S_μ), либо U'(1) калибровочными бозонами Z_μ, взаимодействующими с обычными мюонами. В классе моделей L_μ - L_τ (разница между лептонными числами мюона и тау лептона) соответствующий Z_μ может быть легким и взаимодействовать с константами связи, лежащими в экспериментально доступной области. Основной модой распада Z_μ в установке **NA64μ** является распад Z_μ -> invisible на нейтрино, либо на легкие частицы темной материи.

Реакцией рождения Z_μ служит процесс тормозного излучения мюона на ядре: $\mu + Z \rightarrow \mu' + Z + Z_\mu$. Доля энергии первичного пучка уносится рассеянным мюоном, который регистрируется магнитным спектрометром, расположенным за активной мишенью ECAL (см. Рис. 1). Оставшаяся часть энергии первичного мюона уносится из установки частицами из распада Z_μ -> invisible. Таким образом, возникновение Z_μ, выглядит как событие с одиночным рассеянным мюоном с энергией в конечном состоянии меньше начальной, и отсутствием энерговыделения в детекторах HCAL установки (см. Рис. 1).

Основное отличие экспериментального подхода, используемого в NA64μ, от NA64e заключается в том, что оно требует прецизионного восстановления импульса налетающего и рассеянного мюона для измерения недостающей энергии в возможном рождении Z_μ (или A') и его последующем невидимом распаде. Поэтому основными компонентами установки NA64μ являются два магнитных спектрометра с развитой трековой системой и система герметичной калориметрии HCAL.

Основной задачей эксперимента **NA64h** является поиск частиц скрытого сектора взаимодействующих преимущественно с легкими кварками СМ в соответствии с предсказаниями ряда моделей с т.н. лептофобными взаимодействиями. Эксперимент использует методику регистрации событий с недостающей энергией как сигнатуру сигналов проявления физики за пределами СМ с использованием пучков пионов, каонов и протонов ускорителей PS и SPS CERN. Первые (proof-of-concept) результаты по поискам невидимых распадов нейтральных мезонов $\eta,\eta' \rightarrow$ invisible. рождаемых в реакции перезарядки 50 GeV π^- на веществе активной мишени, существенно улучшили существующие ограничения PDG и были опубликованы в Phys.Rev.Lett. (2024).

Вклад и обязательства группы ОИЯИ

В состав группы ОИЯИ входят со-руководитель С.Н. Гниненко и технический координатор

проекта В.А.Поляков. Существенный вклад в формирование научной программы эксперимента вносится сотрудниками ЛТФ под руководством В.А. Матвеева. Группа ОИЯИ отвечает за изготовление и работу трековых детекторов, изготовленных по технологии строу трубок, которые являются базовым элементом магнитных спектрометров. Совместно с институтами РФ ОИЯИ участвовал в изготовлении электромагнитных, veto-адронных, и адронных калориметров установки, в настоящее время группа ОИЯИ несет частичную ответственность за их функционирование. Сотрудники группы ОИЯИ активно участвуют в наборе, моделировании, обработке и анализе экспериментальных данных, а также публикациях полученных результатов.

Ожидаемые результаты, риски:

В настоящее время в эксперименте NA64 зарегистрировано 2.5×10^{12} e^-, $\sim2.4\times10^{10}$ e^+, 3.5×10^{11} μ, и $\sim1.4\times10^{10}$ π, K на мишени. В сеансе 2026 года предполагается увеличить статистику на $\sim 8\times10^{11}$ e^- на мишень. Согласно плану, модернизация ускорительного комплекса ЦЕРН (LS3) начнется во второй половине 2026 года, через два года, во второй половине 2028 года начнет работу PS, еще через год, в 2029 г. – SPS. В период отсутствия пучков коллаборация планирует провести модернизацию установок включающую:

- изготовление новых трековых строу детекторов размером 40×20 см^2 и электронику к ним совместно с коллегами ИЯФ Казахстана для установок $Na64_\mu$ и $NA64_e$;

- модернизацию электромагнитного калориметра для повышения его радиационной стойкости. Замену части сцинтилляторов, проведение исследования характеристик и выбор радиационно-стойкого WLS волокна (производство Калинин и/или Kuraray) и его замена;

- совместно с коллегами из Цюриха и Болоньи модернизацию адронного калориметра установки с целью улучшения идентификации мюонов, для чего планируется разделить адронные модули на две части по глубине и заменить ФЭУ на green sensitive, а также заменить WLS волокно;

- совместно с коллегами из Чили разработать и создать 4 двухкоординатных сцинтилляционных годоскопа с пространственным разрешением ~2-3 мм, рабочей зоной 60×60 см^2, считыванием на основе SiPM и изготовление электроники;

- совместно с коллегами из Чили разработать и создать годоскопическую мишень для реакций перезарядки пионов и каонов для поиска новых частиц на установке NA64h;

- создать и оснастить стенд для проверки строу детекторов и годоскопов на космике и на Нуклотроне;

- изготовить вольфрамовый/бериллиевый поглотитель-мишень для эксперимента с пучками ионов на Нуклотроне.

На пучках SPS планируется продолжить набор данных с целью получения статистики $\sim10^{13}$ e^-, $\sim10^{11}$ e^+ (40 и 60 ГэВ) и $\sim2\times10^{13}$ μ на мишень, что, согласно оценкам, позволит существенно расширить область поиска темной материи и проявлений новой физики за пределами СМ, с возможностью их обнаружения или исключения класса хорошо мотивированных ее моделей. В рамках подготовки программы $NA64_h$ в 2023-24 гг коллаборация провела тестовые сеансы на пучке пионов с энергией 50 ГэВ, зарегистрировав $\sim10^{10}$ частиц на мишень, в 2025 году прошел тестовый сеанс на канале T9 ускорителя PS в настоящее время коллаборация завершает работу по подготовке предложения по поиску

проявлений темного сектора и сопутствующих измерений на адронных пучках ускорителя PS после остановки для LS3.

Совместно с ведущими теоретиками из ИЯИ и ОИЯИ, сотрудники группы ОИЯИ изучают возможность использования высокоинтенсивных выведенных пучков ускорительного комплекса NICA, для проведения поисковых экспериментов при рассеянии пучков ксенона и висмута на вольфрамовой мишени, расширяющих возможности программы $NA64_h$ на PS. Эту часть научной программы мы рассматриваем в данный момент как «активность».

Основными рисками для успешной реализации планов коллаборации и группы ОИЯИ в проекте NA64 являются:

- изменение плановых сроков остановки ускорителей в рамках LS3 может повлиять на планы коллаборации по набору данных;

- действующие в отношении ОИЯИ со стороны ЦЕРН ограничения, касающиеся привлечения новых сотрудников, включая студентов и аспирантов; осуществления платежей, приобретения и доставки оборудования и электроники.

2.3. Предполагаемый срок выполнения

Коллаборация NA64 планирует проводить набор данных на пучках ускорителей ЦЕРН вплоть до остановки ускорителей, запланированной на 2034 год. В настоящее время просим продлить участие группы ОИЯИ в проекте сроком на 5 лет на период с 2027 по 2031 гг.

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛФВЭ, ЛТФ, ЛЯП, Дирекция ОИЯИ

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	180	200	230	260	300
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**
UTFSM UAB	Чили	Вальпарайзо Сантьяго	С.Кулешов + 8	Совместные работы
БУ	Германия	Бонн	Б.Кетцер + 2	Совместные работы
ИНФН	Италия	Генуя	А.Челентано+10	Совместные

		Падова Болонья	Д.Лукесси+4 С.Пасколи+3	работы
ETH	Швейцария	Цюрих	П. Кривелли + 4	Совместные работы
ИЯФ	Казахстан	Алмааты	С.Сахиев+3	Совместные работы
ИФИС	Испания	Валенсия	Л.Молина-Буэно + 6	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 (общее количество участников)

№№ п/п	**Категория работника**	**Основной персонал Сумма FTE**	**Ассоциированный персонал Сумма FTE**
1.	научные работники	6,1	
2.	инженеры		
3.	специалисты	0,2	
4.	служащие		
5.	рабочие		
Итого:		**6,3**	

№№ п/п	**Категория работников**	**ФИО**	**Подразделение**	**Должность**	**Сумма FTE**
1	научные работники	Матвеев В.А.	Дирекция Института	Научный руководитель ОИЯИ	0,1
2	научные работники	Пешехонов Д.В.	ЛФВЭ	Начальник отделения	0,7
3	научные работники	Кекелидзе Г.Д.	ЛФВЭ	Начальник сектора	0,3
4	научные работники	Герценбергер С.В.	ЛФВЭ	нс	0,5
5	научные работники	Иванов А.В.	ЛФВЭ	нс	0,5
6	научные работники	Поляков В.А.	ЛФВЭ	нс	0,5
7	научные работники	Гниненко С.Н.	ЛФВЭ	снс	0,5
8	научные работники	Кирсанов М.М.	ЛФВЭ	снс	0,8
9	научные работники	Щукин Д.А.	ЛФВЭ	мнс	1,0

10	научные работники	Жевлаков А.С.	ЛТФ	снс	0,3
11	научные работники	Фролов В.Н.	ЛЯП	нс	0,2
12	научные работники	Тлисова И.В.	ЛФВЭ	мнс	0,2
13	научные работники	Камбар Ы.	ЛФВЭ	мнс	0,5
14	рабочие	Жуков И.А.	ЛФВЭ	механик	0,2
	Итого				**6,3**

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ (общее количество участников)

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ (общее количество участников)

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

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

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

Детализация приводится в отдельной форме. **1150 тыс. долл.**

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков (общий объем).

Руководитель проекта _____/ Матвеев В.А.

Дата представления проекта в ДНОД 05.05.2026

Дата решения НТС Лаборатории 28.04.26, номер документа 2

Год начала проекта 2017

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту 2023

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	100	110	130	130	130
		Материалы	400	130	120	100	30	20
		Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	100	20	20	20	20	20
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций	50	10	10	10	10	10
		Приобретение программного обеспечения						
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		– сумма FTE,	31,5	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
		– ускорителя/установки,						
		– реактора,…..						
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*	1150	260	260	260	190	180
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта / Матвеев В.А. /

Экономист Лаборатории / Морозов В.В. /

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА _Эксперимент NA64__

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА ___NA64_____

ШИФР ПРОЕКТА _02-1-1096-2-2017/2026__

ШИФР ТЕМЫ __02-1-1096-2010___

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ(-ЕЙ) ПРОЕКТА __В.А. Матвеев, Д.В. Пешехонов___

СОГЛАСОВАНО:

	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА			
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА			
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР			
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ		Бутенко А.В	28.04.26
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ		Семин А.В.	04.05.26
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ		Чепурнов А.П.	28.04.26
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ		Кекелидзе В.Д.	20.04.26
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА		Матвеев В.А.	20.04.26

- подписывается в рамке после ПКК

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ _____ _____ _____

ПОДПИСЬ ФИО ДАТА

Приложение 4.
Форма отчета по Проекту / Инфраструктурному проекту

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____ Бутенко А.В.

"28" апреля **2026 г.**

ОТЧЕТ ПО ИНФРАСТРУКТУРНОМУ ПРОЕКТУ / ПРОЕКТУ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление Физика элементарных частиц и физика тяжелых ионов высоких энергий

1.2. Наименование проекта NA64

1.3. Шифр проекта (02-1-1096-2-2017/2026)

1.4. Шифр темы (02-1-1096-2010)

1.5. Фактический срок реализации проекта

1.6. Руководитель(ли) проекта В.А.Матвеев, Д.В.Пешехонов

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

NA64 является пионерским экспериментом с фиксированной мишенью по поиску легкой темной материи на пучках электронов [1], позитронов [2], мюонов [3] и адронов [4].

За истекший период с начала работы в 2016 г., он продемонстрировал возможность работать в практически бесфоновом режиме, а его вклад в поиски новой физики оценивается руководством ЦЕРН и научным сообществом как существенный, комплементарный и достойный дальнейшего продолжения. Главной особенностью и преимуществом проекта NA64 является эффективный метод поиска новых частиц скрытого сектора и другой новой физики, комбинирующий использование герметичного детектора и «активной мишени» с методикой регистрации событий с недостающей энергией. Вследствие этого, вероятность регистрации искомого сигнала существенно возрастает, поскольку сечение рождения новых частицы в мишени пропорционально квадрату константы связи, в отличие от установок работающих в традиционной моде «beam-dump», где чувствительность поиска пропорциональна ее четвертой степени. Это позволяет NA64 достигать высокой чувствительности при существенно меньшей статистике и низком уровне фона.

В настоящее время в эксперименте NA64 зарегистрировано 2×10^{12} e^-, ~2.4×10^{10} e^+, 3.5×10^{11} μ и ~1.4×10^{10} π- на мишени. В сеансе 2026 года предполагается увеличить статистику на ~ 8×10^{11} e^- на мишень. Согласно плану, модернизация ускорительного комплекса ЦЕРН (LS3) начнется во второй половине 2026 года, через два года, во второй половине 2028 года начнет работу PS, еще через год, в 2029 г. - SPS.

Коллаборация планирует провести модернизацию установки и продолжить набор данных с целью достижения статистики ~10^{13} e^-, ~10^{11} e^+ (при 40 и 60 ГэВ) и ~2×10^{13} μ на мишень, что, согласно оценкам, позволит существенно расширить область поиска темной материи и проявлений новой физики за пределами СМ, с возможностью их обнаружения или исключения многих мотивирующих моделей. В рамках подготовки программы NA64h в 2023-24 гг. коллаборация провела тестовые сеансы на пучке пионов с энергией 50 ГэВ, зарегистрировав ~10^{10} частиц на мишень, в 2025 году прошел тестовый сеанс на канале T9 ускорителя PS в настоящее время коллаборация завершает работу по подготовке предложения по поиску проявлений темного сектора на адронных пучках ускорителя PS после остановки на LS3.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования

Для проведения эксперимента по поиску LDM в эксперименте NA64e используется вторичный e^- пучок SPS. Энергия первичного пучка протонов SPS в 400 ГэВ позволяет получать электронные пучки в диапазоне энергий от 10 до 300 ГэВ с характерной интенсивностью от 10^5 до 10^7 электронов за сброс SPS. При этом примесь других заряженных частиц в пучке (чистота пучка) составляет менее 10^{-2}.

Эксперимент по поиску распада A′ → invisible (невидимая мода распада на частицы DM)

Предполагается, что бозон A' будет в основном распадаться на пару частиц темной материи $\chi\bar{\chi}$. Процесс рождения A' в реакции $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$, и последующий распад $A' \rightarrow$ invisible изображены на Рис. 1.

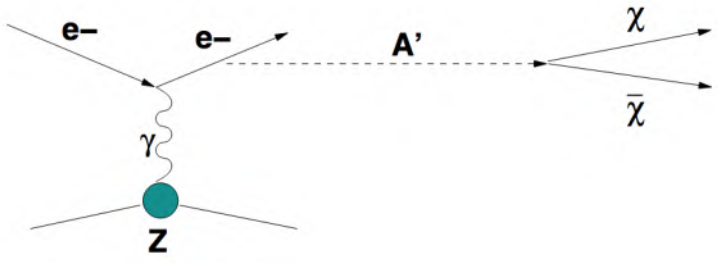

Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая рождение массивного бозона A' в реакции $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$ рассеяния электронов на ядре (A,Z) с последующим распадом A' на пару $\chi\bar{\chi}$.

Ожидается, что процесс рождения темного фотона и последующего распада A' → invisible является очень редким событием и будет происходить с частотой ≤10^{-12} на один падающий электрон пучка. Отсюда вытекают требования к дизайну и структуре экспериментальной установки (Рис.2).

Методика поиска: A′ может рождаться в результате смешивания с фотонами в процессе тормозного излучения, в рассеянии электронов на ядрах в ECAL. Реакция $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$, $A' \rightarrow$ invisible как правило будет происходить на первых нескольких радиационных длинах (X_0) детектора. Далее A' распадается на две частицы темной материи, которые проходят оставшуюся часть установки без взаимодействия. Доля f энергии первичного пучка $E_1 = f E_{e^-}$ выделится в активной мишени - ECAL. Остаточная энергия первичного электрона $E_2 = (1 - f) E_e$ уносится вторичными частицами из распада $A' \rightarrow$ invisible. Толщина ECAL составляет ~40 X_0 (рад. длин). Позади калориметра-мишени помещается адронный калориметр (HCAL), имеющий толщину ~15 − 20 λ_{int} (ядерных длин).

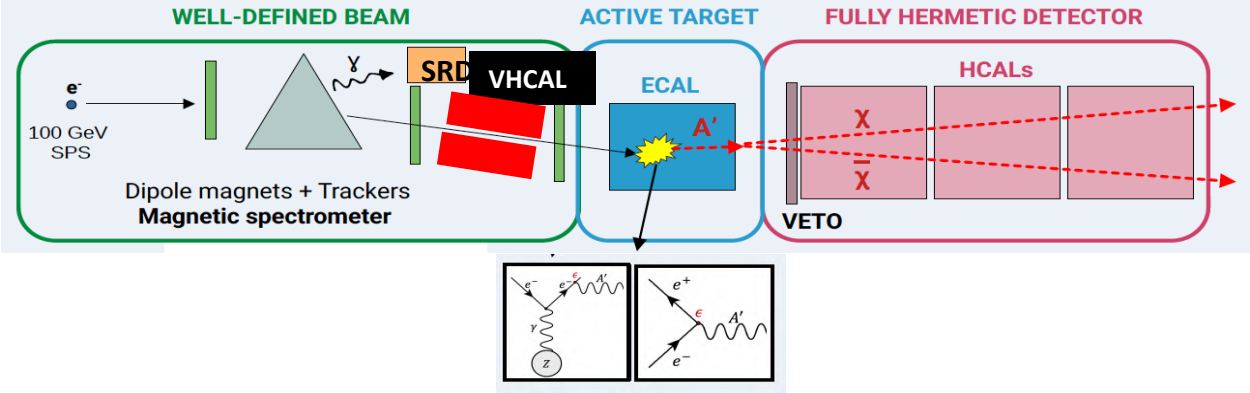

Рис. 2. Схема установки NA64e для поиска темных фотонов использующая метод недостающей энергии и активную мишень (ECAL). Часть установки до ECAL используется для измерения импульса и идентификации входящей частицы, HCAL обеспечивает герметичность установки, SRD – детектор синхротронного излучения, красным показан адронный вето калориметр, зеленым – трековые детекторы.

Факт возникновения распада A' → invisible, при взаимодействиях e−Z, будет выглядеть как событие с единичным e-m ливнем в ECAL и «нулевым» выделением энергии в остальной части детектора (не превышающим возникающих от возможных источников фона).

Один из основных источников фона связан с «низкоэнергетическим хвостом» в распределении энергии электронов в первичном пучке. Он возникает при взаимодействии электронов с пассивным веществом в пучке, таким, например, как входные окна каналов пучка, остаточный газ и т.п. Другой источник появления таких электронов связан с загрязнением пучка вследствие распадов пионов или мюонов при транспортировке пучка в канале.

Для подавления этого источника используется система мечения e^- высокой энергии, путем измерения испускаемого ими синхротронного излучения (SR) в дипольном магните. Электроны с низкой энергией могут быть эффективно отсеяны поскольку полная энергия SR фотонов ~ $E_{e^-}^3$. Ожидаемый консервативный вклад от различных источников фона для пучка с энергией 100 ГэВ составляет $<10^{-12}/ e^-$.

События-кандидаты на сигнал должны удовлетворять следующим критериям отбора:

- энергия электрона пучка соответствует требуемой (~100 ГэВ);

- начальная точка электромагнитного ливня в ECAL локализована в пределах нескольких первых радиационных длин X_0;

- поперечное и продольное развитие ливня в ECAL соответствуют форме электромагнитного ливня. Доля поглощенной энергии в ECAL $f < 0.5\ E_{e^-}$;

- отсутствует энерговыделение в HCAL;

- отсутствует сигнал в вето-детекторах.

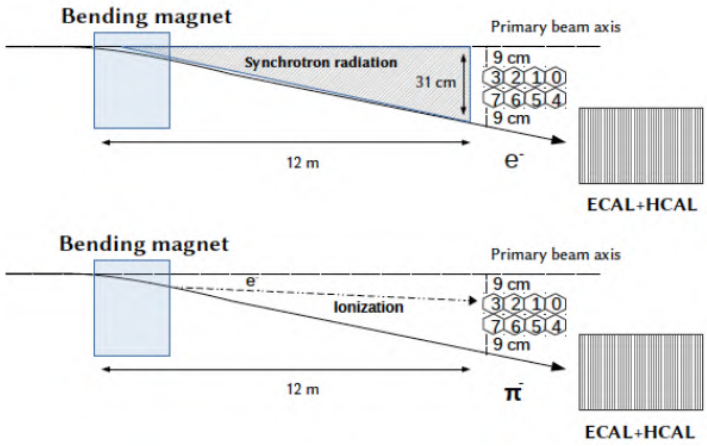

Рис. 3. Схема мечения электронов пучка за счет использования их синхротронного излучения в дипольном магните.

Адронный фон может быть вызван тем, что адроны ошибочно идентифицируются как электроны. Этот источник фона связан с наличием примеси пионов, протонов и т.д. в пучке электронов. Другим источником такого рода фона является возможное рождение и утечка адронов в мишени ECAL. Для устранения нейтральной и заряженной компонент адронного фона используются адронные вето калориметры и строу камеры расположенные в районе мишени-калориметра, и сцинтилляционная стенка расположенная перед HCAL. Ожидаемый консервативный вклад от различных источников фона для пучка с энергией 100 ГэВ составляет $<10^{-12}/\ e^-$.

Эксперимент по поиску распада $A' \rightarrow e^+e^-$

Схема экспериментальной установки для поиска видимого распада $A' \rightarrow e^+e^-$ представлена на Рис. 4.

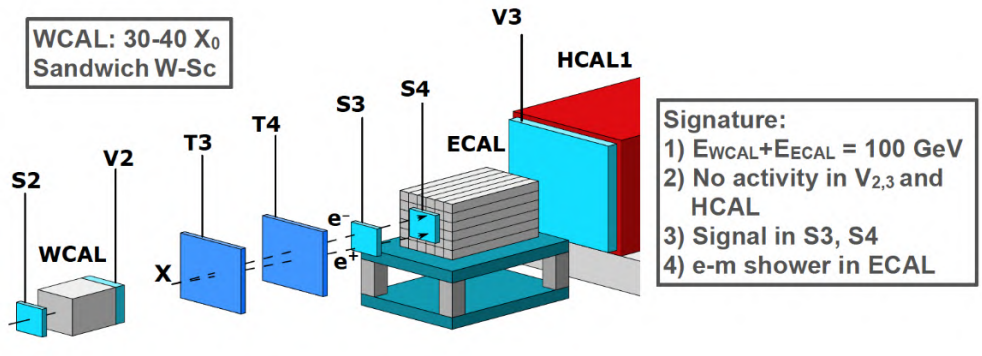

Рис. 4. Схематическое изображение модернизации установки для поиска темных фотонов в видимой моде распада. Поглощение энергии электронов пучка в калориметре WCAL сопровождается излучением A′ в реакции $eZ \rightarrow eZA'$ рассеяния электронов на ядрах из-за смешивания γ - A'. Часть энергии первичного пучка остается в WCAL, в то время как остальная часть энергии уносится A', который проходит через WCAL без взаимодействий

и распадается на e^+e^- пару, которая генерирует второй электромагнитный ливень в ECAL, приводящий к сигнатуре из двух ливней в детекторе. Суммарная энергия, поглощенная в WCAL+ECAL, равна энергии первичного электрона пучка.

В данной моде эксперимента WCAL является активной мишенью. Остаточная энергии первичных электронов $E_2 = (1 - f)E_{e-}$ уносится из WCAL" A' и поглощается в расположенном дальше по пучку ECAL вследствие распада A' на лету на e^+e^- пару (Рис. 4). Ожидаемый угол разлета Θ_{e+e-} между частицами пары e^+e^- слишком мал для возможности разделения двух e-m ливней в ECAL, поэтому регистрируется единый/суммарный электромагнитный ливень, пара электрон и позитрон может быть зарегистрирована трековыми детекторами. Факт распада $A' \rightarrow e^+e^-$, вызванного взаимодействием e^-Z, таким образом выглядит как появление события с двумя e-m-подобными ливнями в детекторе (Рис. 4) и регистрацией треков e^+e^- пары.

Эксперимент по поиску частиц темного сектора слабо взаимодействующих с мюонами

Эксперимент **NA64μ** проводит поиск DS в событиях с недостающей энергией на пучках мюонов высоких энергий SPS в ЦЕРН. Ряд моделей предсказывает существование частиц темного сектора, преимущественно слабо связанных со вторым и, возможно, третьим поколениями частиц Стандартной Модели. В дополнение к гравитации это новое очень слабое взаимодействие между видимым и темным секторами может быть объяснено либо скалярными (S_μ), либо U'(1) калибровочными бозонами Z_μ, взаимодействующими с обычными мюонами. В классе моделей $L_\mu - L_\tau$ с (разница лептонных чисел мюона и тау) соответствующий Z_μ может быть легким и взаимодействовать с параметрами в области экспериментально доступной для поиска. Установка **NA64μ** проводит поиск невидимых распадов Z_μ на нейтрино, либо на легкие частицы темной материи.

Частица Z_μ может образоваться в реакции рассеяния мюона на ядре: $\mu + Z \rightarrow \mu' + Z + Z_\mu$. Доля энергии первичного пучка уносится рассеянным мюоном, который регистрируется магнитным спектрометром, расположенным за активной мишенью. Оставшаяся часть энергии первичного мюона уносится за пределы установки, таким образом рождение Z_μ, выглядит как событие с одиночным рассеянным мюоном в конечном состоянии с энергией меньше начальной, и отсутствием энерговыделения в детекторах HCAL установки.

Основное отличие экспериментального подхода, используемого в NA64μ, от NA64e заключается в том, что оно требует восстановления импульса налетающего и рассеянного мюона для измерения недостающей энергии в возможном невидимом Z_μ (или A') распаде. Поэтому основными компонентами установки NA64μ являются два магнитных спектрометра с развитой трековой системой и система герметичной калориметрии HCAL.

Схема экспериментальной установки представлена на Рис.5.

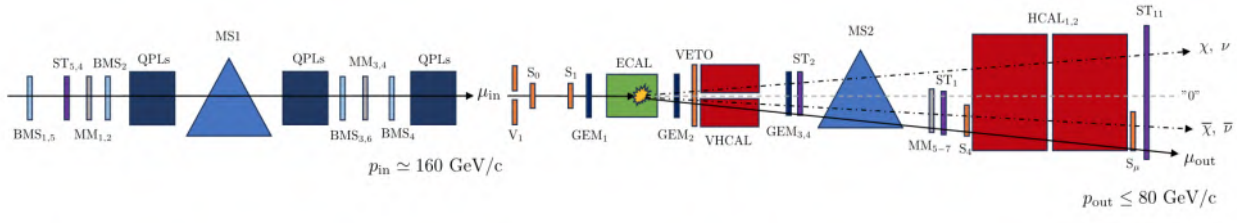

Рис. 5. Схематическое изображение установки NA64μ для поиска DM с помощью мюонного пучка высоких энергий на канале M2 в ЦЕРН.

В детекторе, представленном на Рис. 5 используются два магнитных спектрометра до (MS1) и после (MS2) мишени. Спектрометры нужны для независимого измерения импульса налетающего и рассеянного мюона, соответственно. Трековая система состоит из детекторов Micromegas, GEM и строу-камер, позволяющих восстанавливать и измерять импульсы налетающего и рассеянного мюонов. В качестве активной мишени используется электромагнитный калориметр (ECAL). Далее по пучку расположен вето-калориметр (VHCAL) и адронный калориметр (HCAL). Они служат для регистрации вторичных частиц, образующихся в результате взаимодействия мюонов с мишенью. HCAL состоит из нескольких модулей, каждый из которых имеет поперечную и продольную сегментацию. Для обеспечения герметичности толщина HCAL составляет ~ 30 λ_{int} (длин ядерного взаимодействия).

Метод экспериментального поиска: В первом спектрометре (MS1) определяется энергия налетающего мюона E_μ. Z_μ может образоваться в реакции $\mu + Z \rightarrow \mu' + Z + Z_\mu$, по всей длине мишени. Доля f энергии первичного пучка $E'_\mu = fE_\mu$ уносится рассеянным мюоном, который попадает во второй магнитный спектрометр (MS2), настроенный на эффективную регистрацию и восстановление импульса мюона $p'_\mu < p_\mu$ (Рис. 5). Оставшаяся часть энергии первичного мюона $(1-f)E_\mu$ уносится за пределы установки после распада Z_μ на нейтрино, либо на легкие частицы темной материи. В результате регистрируется событие с недостающей энергией $E_{miss} = E_\mu - E'_\mu$ и сигнатурой: появление на уровне выше ожидаемого фона события с рассеянным мюоном, с энергией меньше начальной, и отсутствие энерговыделения в детекторах установки, расположенных за мишенью.

Основной задачей эксперимента **NA64h** является поиск частиц скрытого сектора взаимодействующих преимущественно с легкими кварками СМ в соответствии с предсказаниями ряда моделей с т.н. лептофобными взаимодействиями. Эксперимент использует методику регистрации событий с недостающей энергией как сигнатуру сигналов проявления физики за пределами СМ с использованием пучков пионов, каонов и протонов ускорителей PS и SPS CERN. Первые (proof-of-concept) результаты по поискам невидимых распадов нейтральных мезонов $\eta,\eta' \rightarrow$ invisible. рождаемых в реакции перезарядки 50 GeV π^- на веществе активной мишени (Рис.6), существенно улучшили существующие ограничения PDG и были опубликованы в Phys. Rev. Lett. (2024)

Планируется осуществить далее эти поиски, а также поиски возможных распадов нейтральных мезонов, $K^0_{S,L}$ -> invisible, рождаемых в реакции перезарядки 40-50 GeV K^-.

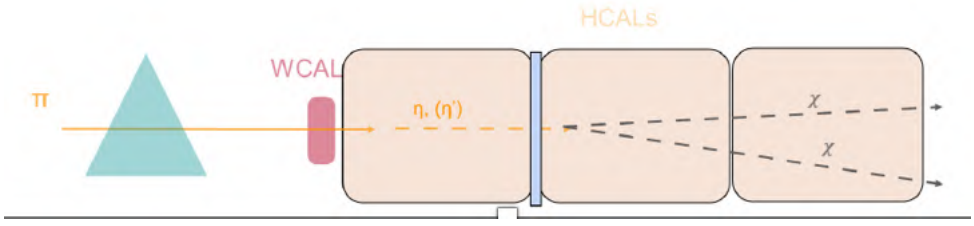

Рис. 6. Схема эксперимента на адронном пучке по поиску невидимого распада темного фотона.

2.2.2. Описание проведенных экспериментов (для экспериментальных проектов).

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

Детектор NA64

Одним из основных элементов трековой системы эксперимента NA64 являются строу камеры. Отличительной особенностью этого типа дрейфовых детекторов, технология которых была разработана в ОИЯИ, является малое количество пассивного вещества в рабочей зоне, что чрезвычайно важно в прецизионных экспериментах по поиску редких и сверх-редких процессов. Группой ОИЯИ было изготовлено 12 двуслойных строу камер с рабочей зоной 200x200 мм^2 и 7 камер размером 1200x600 мм^2 из трубок диаметром 6 мм. Эти трековые детекторы используются в магнитных спектрометрах установок NA64e и NA64μ и в качестве вето детекторов установки NA64e.

Совместно с коллегами из НИЦ Курчатовский институт (Протвино) и ИЯИ РАН были изготовлены и являются в настоящее время ответственностью ОИЯИ:

- два электромагнитных калориметра ECAL, 40X_0, 150×(1.5мм Pb+1,5мм Sc), размером 200×240×490мм^3 (5×6) и 200×480×490мм^3 (5×12 ячеек);

- три вето адронных калориметра, каждый длиной 5,0λ, 30×(25мм Cu + 2мм Sc), размером 500×500×950 мм, с центральным отверстием 60×120 мм;

- для мишени в видимой моде 16-ти см вольфрамовый калориметр WCAL (30X_0);

- четыре адронных калориметра, каждый длиной 7,5λ, 48×(25мм Fe + 4мм Sc), ~600×1200 мм^2;

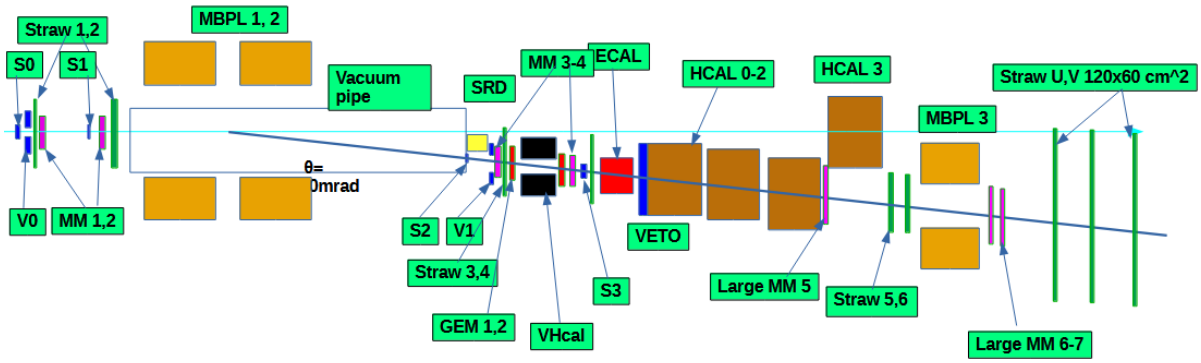

Рис 7. Схема установки NA64e.

Набор данных NA64

В 2024-25 годах состоялось два сеанса набора данных на установке NA64e. В период с 24 апреля по 19 июня 2024 г. на электронном канале ускорителя SPS было зарегистрировано 5,2×10^{11} eot при энергии пучка электронов 100 ГэВ и 2,3×10^{10} pot на пучке e^+ с энергией 70 ГэВ.

Использование пучка позитронов позволяет использовать канал резонансной аннигиляции рождения LDM, когда позитрон пучка аннигилирует с электроном атома и происходит следующая цепочка $e^+e^- \rightarrow A' \rightarrow \chi\chi$ [5]. Благодаря резонансной природе в области $M_{A'}{}^2=2m_e E_{e+}$ вероятность процесса существенно возрастает.

Интенсивность пучка при наборе данных составляла 6-6,5×10^6 электронов на сброс. В ходе сеанса была протестирована новая быстрая электроника, было продемонстрировано, что установка способна работать без потери эффективности при интенсивности 1,0-1,2×10^7 электронов на сброс.

В 2025 году на электронном канале ускорителя SPS H4 было зарегистрировано 5,9×10^{11} eot при энергии пучка электронов 100 ГэВ, 3,24×10^9 pot и 6,13×10^9 pot на пучке e^+ с энергией 45 и 40 ГэВ, соответственно. Герметичность установки была улучшена за счет установки дополнительных адронных вето калориметров. Кроме того, все калориметры установки были оснащены новой быстрой электроникой (АДС - 250 МГц, 14 бит), что позволило повысить интенсивность пучка при наборе данных более чем на 20%, до 8-10×10^6 электронов на сброс. Полная статистика, набранная коллаборацией на пучках e^{+-} с начала набора данных, составила 2,5×10^{12} частиц, сброшенных на мишень.

В 2024 году состоялся сеанс набора данных на пучке мюонов с энергией 160 ГэВ ускорителя SPS. В рамках программы по поиску частиц темного сектора, преимущественно связанных со вторым и, возможно, третьим поколениями частиц Стандартной Модели. В дополнение к гравитации это новое очень слабое взаимодействие между видимым и темным секторами может быть объяснено U'(1) калибровочными бозонами Z_μ, взаимодействующими с обычными мюонами. В классе моделей L_μ - L_τ соответствующий Z_μ может быть легким и взаимодействовать в экспериментально доступной области. Установка **NA64$_\mu$** проводит поиск распадов Z_μ на нейтрино, либо на легкие частицы темной материи. В ходе этого сеанса было зарегистрировано ~2,5×10^{11} mot (мюонов, сброшенных на мишень). Полная статистика составила ~3,5×10^{11} mot. Проведение сеансов на мюонном канале в 2025-26 годы не проводилось.

В 2025 году был проведен тестовый двухнедельный сеанс на канале T9 ускорителя PS, задачей которого являлось изучение возможности поиска темной материи на пучках адронов. В ходе сеанса изучались фоновые условия на пучках положительных адронов с импульсом 10 и 15 ГэВ и отрицательных с импульсом 8 и 15 ГэВ. Было набрано около 50 миллионов пионов на мишень при энергии пучка 15 ГэВ в процессе перезарядки $\pi^- p \to n\eta(\eta', \rho, \omega)$ как возможного процесса для поиска «невидимого» распада нейтрального мезона на пару частиц темной материи.

В настоящее время в эксперименте NA64 зарегистрировано 2.5×10^{12} e^-, ~2.4×10^{10} e^+ и 3.5×10^{11} μ на мишень. Анализ данных продолжается, обработанная коллаборацией статистика позволила получить и опубликовать следующие основные результаты:

Полученные результаты

NA64e

NA64e установил наилучшее ограничение на вероятность кинетического смешивания (ϵ) для массы темного фотона менее 350 МэВ. Обработанные данные позволили установить ограничение исключающее существование скалярной и Майорановской DM при $\alpha_D \leq 0.1$ и $m_{A'} > 3m\chi$ в области параметров $0.001 \leq m\chi \leq 0.1$ ГэВ (Рис.8), α_D-константа связи χ-A′.

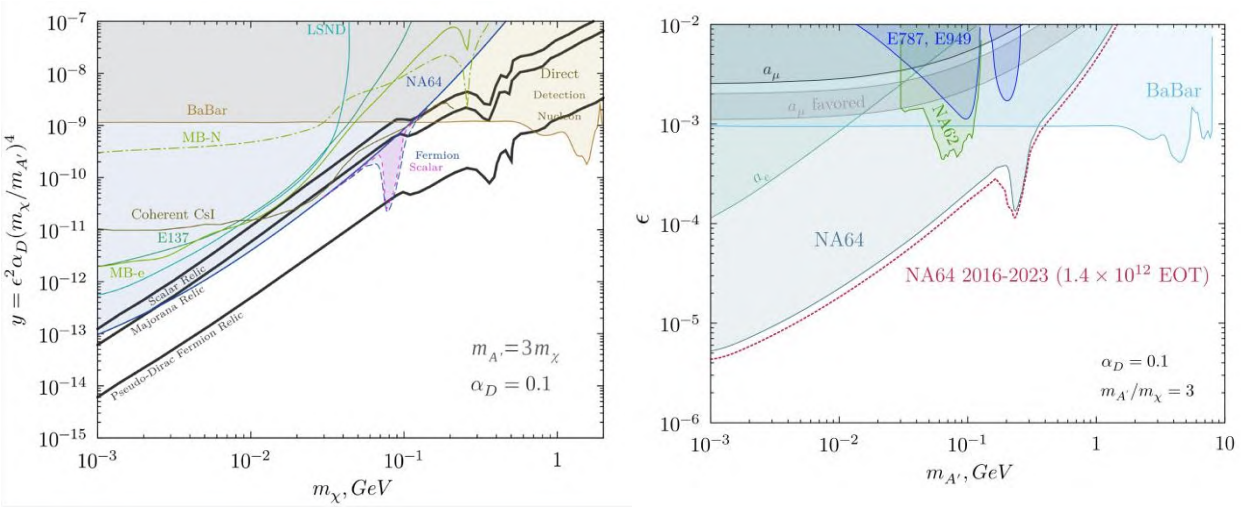

Рис.8. Ограничения, установленные в эксперименте NA64 на невидимый распад A′, для тормозного и резонансного каналов рождения (справа) и на легкую темную материю (LDM) (слева).

Следует отметить, что полученные ограничения являются на сегодняшний день лучшими в мире по поиску легкой темной материи.

Другие результаты NA64e по поискам новой физики.

- Данные, полученные на электронном пучке, позволили проверить гипотезу существования скалярных и псевдоскалярных аксионоподобных частиц (ALP), рождающихся в реакции Примакова $e^- Z \rightarrow a \rightarrow \gamma\gamma$. Данные NA64 закрыли область между данными, полученными в beam dump экспериментах и на коллайдерах и также часть области классических аксионов (полоса желтого цвета), см Рис.9.

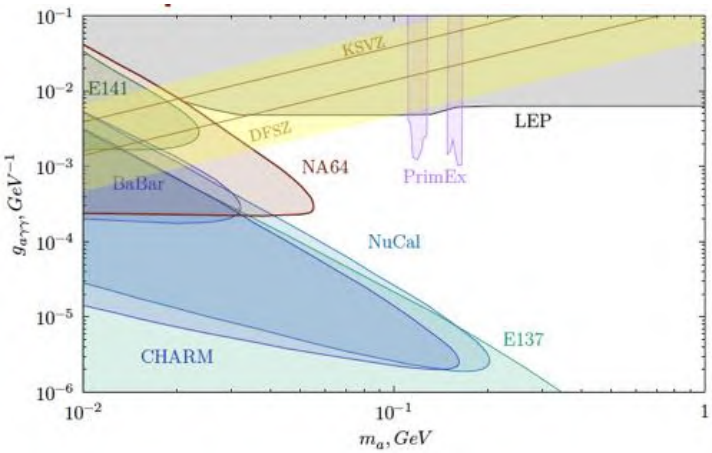

Рис. 9. Ограничения NA64 на константу связи ALP с фотонами.

- На основе статистики, набранной в 2021 году, объединенной с данными 2016-2018 гг ($3{,}2\times10^{11}$ EOT), был проведен поиск нового Z' калибровочного бозона, связанного с (не)нарушенной B–L симметрией в области массы кэВ-ГэВ. Событий кандидатов обнаружено не было, анализ позволил получить новые ограничения на константу связи Z′-е. Для диапазона масс $0.3 < m_{Z'} < 100$ МэВ эти пределы являются наиболее строгими из всех, полученных ранее на основе данных в экспериментах по нейтрино-электронному рассеянию (Рис. 4). Данные также указывают на отсутствие фона на уровне 10^{-12}.

- Другая модель, исследуемая в настоящее время, основана на существовании легкого Z'-бозона, взаимодействующего только со 2-м и третьим поколениями лептонов. Этот гипотетический бозон связан с электроном через вершинные поправки КЭД, и его существование могло бы объяснить как аномалию $(g - 2)_\mu$, так и реликтовую DM. Такой Z' может рождаться с помощью механизма темного тормозного излучения, $e^- N \rightarrow e^- N Z'$, или в резонансной аннигиляции вторичными позитронами из ливня. Используя статистику за 2016-2018 гг., изучался этот сценарий в области, связанной с аномалией $(g - 2)_\mu$, до $m_{Z'} \sim 1$ МэВ. Такой легкий Z' может быть связан с мюонами, и поэтому его поиск также является одной из физических целей NA64μ, расширения NA64 с использованием высокоэнергетического мюонного пучка.

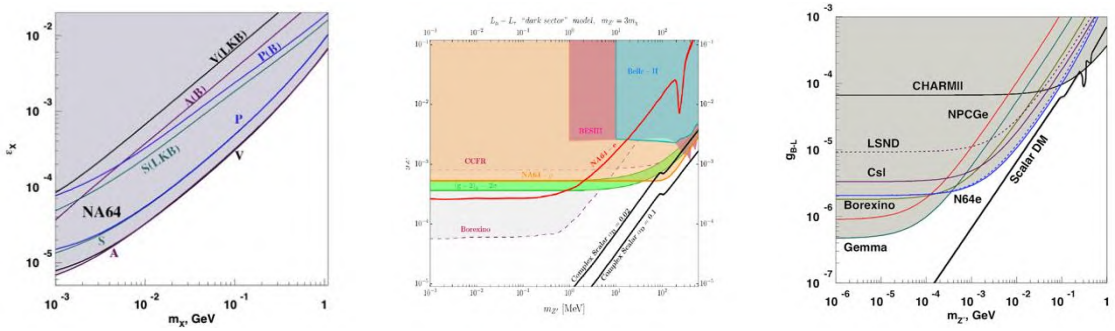

Рис. 10. Слева: Пределы NA64 для обобщенного X-бозона: скалярного (S), векторного (V), псевдоскалярного (P) и аксиального векторного (A) случаев. В центре: результаты NA64e по исключению области существования для $L_\mu - L_\tau$ (красная линия), полученные на статистике 2016-2018 гг. для моделей, где Z' может распадаться на частицы DM. Справа: результаты NA64e по исключению области существования для B-L Z'-бозона.

- Один из новых результатов, опубликованных в 2025 году коллаборацией, основанный на анализе позитронных данных, позволил исключить существование темного фотона в области масс $165 < m_{A'} < 220$ МэВ, для вероятности смешивания ε ниже $2{,}5 \times 10^{-4}$ константы $\alpha_D = 0{,}1$.

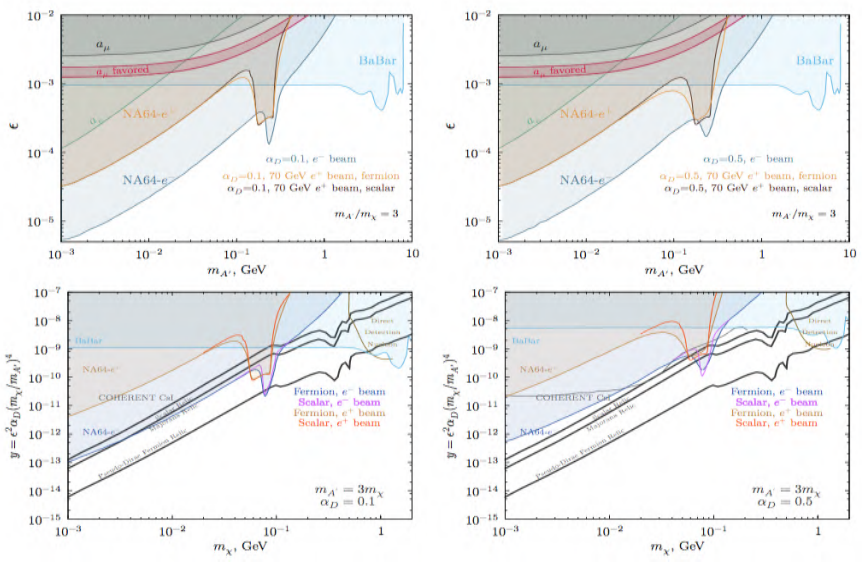

Рис.11. Ограничения, полученные NA64 на данных по рассеянию пучка позитрона с энергией 70 ГэВ. Верх (низ): ограничения — коричневые и оранжевые кривые - в $[m_{A'}, \varepsilon]$ ($[m_\chi, \alpha_D]$) плоскости, для $\alpha_D = 0.1$ (слева) и $\alpha_D = 0.5$ (справа), соответственно. Остальные

кривые и области показывают ограничения от NA64 на электронах (голубой и фиолетовый), COHERENT (серый), и BaBar (светло голубой). На нижних плотах черная линия показывает ограничения на наблюдение реликтовой темной материи в различных моделях.

NA64μ

Программа NA64μ была начата в 2021 году с двух пилотных сеансов на канале M2 на уникальном мюонном пучке 160 ГэВ/с ЦЕРН. Его интенсивность достигает $2x10^8$ мюонов на спил, что на порядок превышает интенсивность электронного пучка и позволяет набрать большой объем данных увеличив чувствительность и расширив область поиска редких процессов дополняя исследования с e^{+-} на канале H4. Искомые частицы могут быть получены в реакции $\mu N \rightarrow \mu NX$ при рассеянии мюонов на активной мишени с их последующим распадом $X \rightarrow$ invisible. Первый сеанс, проведенный в 2022 году, имел целью продемонстрировать правильность предлагаемой концепции экспериментальной установки и оптимизировать ее для поиска Z' предполагающих наличие преимущественно слабо связанных со вторым и, возможно, третьим поколениями частиц Стандартной Модели с массой менее ГэВ. Было зарегистрировано $\sim 2x10^{10}$ μ на мишени, фон в сигнальном боксе был оценен как 0.07 +- 0.03. Основным источником фона являлась недостаточная реконструкция момента рассеянного мюона. Результаты анализа приведены на Рис.12. Ограничения получены в двух моделях распада Z' на нейтрино: минимальной и т.н. «vanilla». Полученные ограничения исключают $m_{Z'} \gtrsim 40$ МэВ и константу связи $g_{Z'} \sim 6 \times 10^{-4}$. Тем не менее, остается возможность распада Z′ на частицы темной материи. NA64μ может исследовать часть пространства параметров (m_χ, y), где $y = (g_\chi g_{Z'})^2 (m_\chi/m_{Z'})^4$. Для $m_{Z'} = 3m_\chi$ и $m_\chi \sim 40$ МэВ наши данные ограничивают параметр y областью $y \sim 6 \times 10^{-12}$.

На Рис.13 представлены результаты анализа данных NA64μ дополняющие программу по поиску темного фотона на пучках электронов. Текущие ограничения не сопоставимы с достигнутыми в электронных экспериментах, но они показывают возможность проведения поиска в области масс выше 100 МэВ после LS3. Это первые результаты по данной программе, полученные на пучках мюонов высоких энергий, они опубликованы в Phys. Rev. Lett., а также были рекомендованы для публикации в Physics Magazine of the American Physical Society (APS).

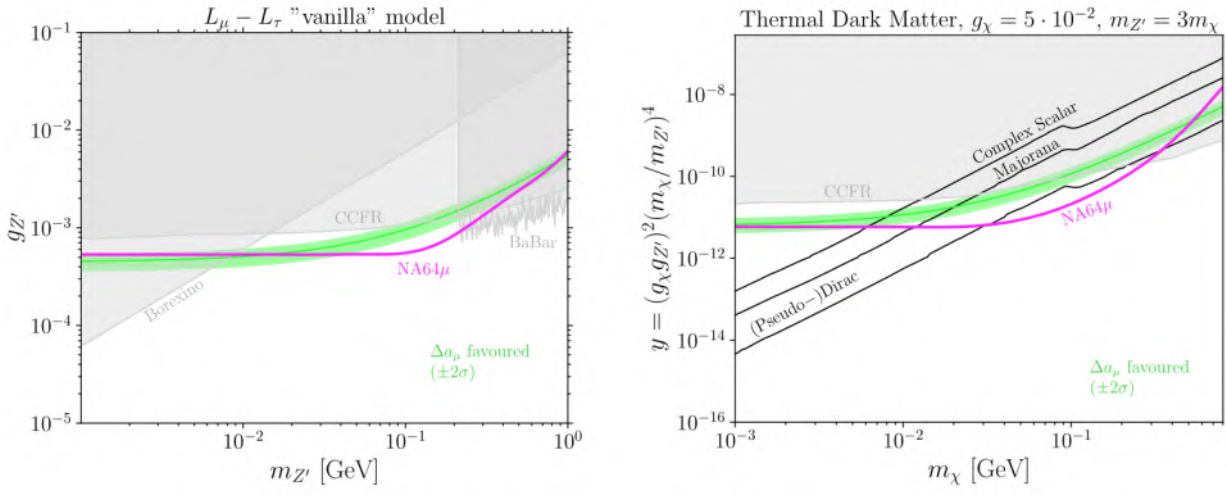

Рис.12. Слева: NA64μ 90% C.L. ограничения на $g_{Z'}$ как функцию $m_{Z'}$, в «vanilla» $L_\mu - L_\tau$ модели. Зеленым показана 2σ область возможного вклада Z' в $(g-2)_\mu$. Также показаны

ограничения, установленные BABAR и нейтринными экспериментами BOREXINO и CCFR. Справа: The 90% C.L. ограничения, полученные NA64μ в пространстве параметров (m_χ, y) на термальную темную в модели $U(1)_{L\mu-L\tau}$ при $m_{Z'} = 3m_\chi$ и $g_\chi = 5\times10^{-2}$ для 2×10^{10} mot.

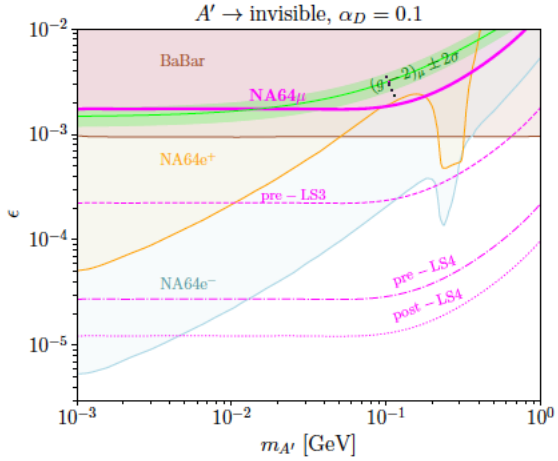

Рис.13. Ограничения, полученные NA64 на электронах и мюонах и планы по их улучшению после LS3.

NA64h

В эксперименте NA64h на SPS ЦЕРН были получены первые результаты по проверки концепции поиска темного сектора преимущественно связанного с кварками СМ с помощью невидимых распадов псевдоскалярных η и η′ -мезонов.

Новый метод использует реакцию перезарядки π- при энергии 50 ГэВ на ядрах активной мишени в качестве источника нейтральных мезонов. Невидимые распады η, η′ → invisible если они существуют, будут иметь необычную сигнатуру - полное исчезновения энергии входящего пиона в детекторе. Никаких свидетельств таких событий обнаружено не было для выборки данных ~ 2.9×10^9 пионов на мишени, полученной в течении однодневного тестового сеанса. Это позволило NA64h установить строгое ограничение на относительные вероятности распадов Br(η′→invisible) < $2{,}1\times10^{-4}$, улучшив текущее ограничение эксперимента BESIII в ~3 раза. NA64h также установил ограничение на Br(η→invisible) < $1{,}1\times10^{-4}$ сравнимое с существующим. Это первые результаты по адронной программе NA64 полученные на пучках пионов высоких энергий, они опубликованы в Phys. Rev. Lett.

Эти результаты также демонстрируют значительный потенциал подхода NA64h и дают четкое руководство о том, как повысить чувствительность к физики темного сектора в будущих поисках невидимых распадов нейтральных мезонов.

Следует отметить, что особый интерес здесь представляют поиски в каонном секторе.

Литература:

[1] Yu. M. Andreev et al. Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN. Phys. Rev.

Lett., 131(16):161801, 2023.

[2] Yu. M. Andreev et al. Probing light dark matter with positron beams at NA64. Phys.

Rev. D, 109(3): L031103, 2024.

[3] Yu. M. Andreev et al. First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam. Phys. Rev. Lett., 132(21):211803, 2024.

[4] Yu. M. Andreev et al. Dark-Sector Search via Pion-Produced η and η' Mesons Decaying Invisibly in the NA64h Detector. Phys. Rev. Lett., 133(12):121803, 2024.

[5] L. Marsicano, M. Battaglieri, M. Bondi', C. D. R. Carvajal, A. Celentano, M. De Napoli, R. De Vita, E. Nardi, M. Raggi, and P. Valente. Dark photon production through positron annihilation in beam-dump experiments. Phys. Rev. D, 98(1):015031, 2018.

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту (список библиографических ссылок).

1. Searching for Light Dark Matter and Dark Sectors with the NA64 experiment at the CERN SPS, NA64 Collaboration, (May 20, 2025) e-Print: 2505.14291 [HEP-EX]

2. High efficiency veto hadron calorimeter in the NA64 experiment at CERN, NA64 Collaboration, Published in: *Nucl.Instrum.Meth.A* 1081 (2026) 170830

3. Proof of principle for a light dark matter search with low-energy positron beams at NA64, NA64 Collaboration, Published in: *JHEP* 06 (2025) 256

4. Shedding light on dark sectors with high-energy muons at the NA64 experiment at the CERN SPS, NA64 Collaboration, Published in: *Phys.Rev.D* 110 (2024) 11, 112015

5. Dark-Sector Search via Pion-Produced η and η′ Mesons Decaying Invisibly in the NA64h Detector, NA64 Collaboration, Published in: *Phys.Rev.Lett.* 133 (2024) 12, 121803

6. First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam, NA64 Collaboration, Published in: *Phys.Rev.Lett.* 132 (2024) 21, 211803

7. Probing light dark matter with positron beams at NA64, NA64 Collaboration, Published in: *Phys.Rev.D* 109 (2024) 3, L031103

8. Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN, NA64 Collaboration, Published in: *Phys.Rev.Lett.* 131 (2023) 16, 161801

9. Search for a light Z′ in the Lμ-Lτ scenario with the NA64-e experiment at CERN, NA64 Collaboration, Published in: *Phys.Rev.D* 106 (2022) 3, 032015

10. Addendum to the Proposal P348: Search for dark sector particles weakly coupled to muon with NA64 μ , NA64 Collaboration (Oct 13, 2018)

11. Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode, NA64 Collaboration, (Oct 2, 2017) Published in: *Phys.Rev.D* 97 (2018) 7, 072002

12. Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS, NA64 Collaboration, Oct 10, 2016) Published in: *Phys.Rev.Lett.* 118 (2017) 1, 011802

13. Search for a Hypothetical 16.7 MeV Gauge Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN, NA64 Collaboration, (Mar 21, 2018) Published in: *Phys.Rev.Lett.* 120 (2018) 23, 231802

14. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+e−e+e− pairs in the NA64 experiment at the CERN SPS, NA64 Collaboration, (Apr 27, 2021) Published in: *Phys.Rev.D* 104 (2021) 11, L111102

15. Constraints on New Physics in Electron g−2g−2 from a Search for Invisible Decays of a Scalar, Pseudoscalar, Vector, and Axial Vector, NA64 Collaboration, (Feb 3, 2021) Published in: *Phys.Rev.Lett.* 126 (2021) 21, 211802

16. Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS. 2013, S. Andreas, P. Crivelli, et al.

17. B. B. Oberhauser et al., "Development of the fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments," Comput. Phys. Commun. 300 (2024), 109199 doi:10.1016/j.cpc.2024.109199 [arXiv:2401.12573 [hep-ph]].

18. S. N. Gninenko, D. V. Kirpichnikov, S. Kuleshov, V. E. Lyubovitskij and A. S. Zhevlakov, "Test of the vector portal with dark fermions in the charge-exchange reactions in the NA64 experiment at CERN SPS," Phys. Rev. D 109 (2024) no.7, 075021 doi:10.1103/PhysRevD.109.075021 [arXiv:2312.01703 [hep-ph]].

19. S. N. Gninenko, N. V. Krasnikov and V. A. Matveev, "Search for $K_{S,L}$ oscillations and invisible decays into the dark sector at NA64," Natural Sci. Rev. 1 (2024), 5 doi:10.54546/NaturalSciRev.100105 [arXiv:2501.09772 [hep-ph]].

20. S. N. Gninenko, N. V. Krasnikov and V. A. Matveev, "Probing light dark matter with NA64 at CERN," Int. J. Mod. Phys. A 39 (2024) no.34, 2445006 doi:10.1142/S0217751X24450064

2.2.5. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).

2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).

2.2.7. Патентная деятельность (при наличии)

2.3. Статус и стадия (TDR, CDR, ongoing project) реализации проекта
(включая процент реализации заявленных этапов по проекту) *(если применимо))*

2.4. Результаты сопутствующей деятельности

2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

2.4.3. Награды и премии.

2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризационная деятельность).

3. Международное научно-техническое сотрудничество. Фактически участвующие страны, институты и организации

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета) (общее количество участников)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	4,8	
2.	инженеры	1,5	
3.	специалисты	0,2	
	Итого:	**6,5**	

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			**Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах**	**Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов**				
				1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
		Международное сотрудничество (МНТС)						
		Материалы						
		Оборудование и услуги сторонних организаций						
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения						
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые Нормо-час		Ресурсы						
		– Сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,						
		– реактора						
Источники финансирования:	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*						

	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

4.3. Другие ресурсы

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)					

5. Заключение

6. Предлагаемые рецензенты

Сергей Владимирович Шматов, доктор физико-математических наук, ОИЯИ.

Руководитель темы

_____ / Кекелидзе В.Д. /

“20“ апреля 2026 г.

Руководитель проекта

_____ / Матвеев В.А. /

“20“ апреля 2026 г.

Экономист Лаборатории

_____ / Морозов В.В. /

“27“ апреля 2026 г.