УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____ Бутенко А.В.

"02" 04 **2026 г.**

ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ

«Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (NA61/SHINE - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment)»

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

1.2. Наименование проекта

Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (NA61/SHINE - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment)

1.3. Шифр проекта

02-1-1087-1-2012/2026

1.4. Шифр темы

02-1-1087-2009 Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительных комплексах Нуклотрон-М/NICA ОИЯИ и SPS ЦЕРН

1.5. Фактический срок (отчётный период) реализации проекта: 2025 г.

1.6. Руководитель проекта: Малахов А.И.

1.7. Заместители руководителя проекта: Дмитриев А.В., Зайцев А.А.

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

NA61/SHINE - это многоцелевой адронный спектрометр с фиксированной мишенью на ускорителе SPS в ЦЕРНе. Исследовательская программа эксперимента включает изучение сильных взаимодействий, а также прецизионные измерения в физике нейтрино и космических лучей, используя ускоренные пучки адронов и ядер (от p+p до Pb+Pb) в диапазоне энергий $5 < \sqrt{s_{NN}} < 16.8/17.3$ GeV. Проект ориентирован на поиск критической точки второго порядка на фазовой диаграмме квантовой хромодинамики, в том числе через выявление немонотонного поведения характерных наблюдаемых, таких как флуктуации поперечного импульса и множественности, поиск немонотонного поведения наблюдаемых, таких как флуктуации поперечного импульса и множественности, сигнал интермитенси и т.д., вблизи стадии кинетического замораживания. Важным направлением программы является также изучение свойств начала деконфайнмента, включая поиск характерных структур типа «horn», «kink», «step» и «dale» в столкновениях лёгких ядер. В последние годы экспериментальная программа была расширена за счёт исследований столкновений тяжёлых ядер Pb+Pb, в рамках которых проводится изучение процессов рождения открытого чарма и коллективных эффектов в горячей и плотной ядерной материи.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования

Экспериментальная установка NA61/SHINE представляет собой адронный спектрометр большого аксептанса, расположенный в северной экспериментальной зоне NA CERN-SPS на линии H2. Схематическое изображение модернизированной установки NA61/SHINE представлено на рис. 1.

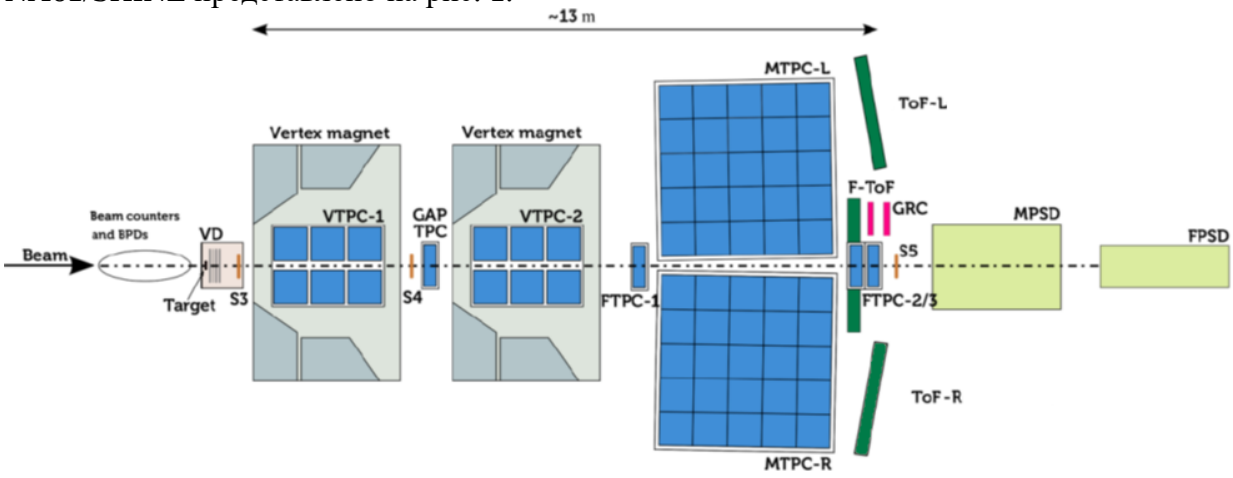


Рис. 1. Схематическое изображение установки NA61/SHINE после проведенной модернизации.

Экспериментальная установка NA61/SHINE включает в себя следующие детекторные системы:

TPC. Четыре большие по объему времяпроекционные камеры (TPC) являются основными компонентами системы детектирования заряженных частиц. Две из них называются вершинными TPC (VTPC) и расположены за мишенью внутри сверхпроводящих магнитов, обеспечивая точное измерение импульса благодаря искривлению треков в магнитном поле. Магниты обладают максимальной суммарной изгибающей способностью 9 Тм. Магнитное поле можно масштабировать пропорционально импульсу пучка, чтобы максимизировать прием фазового пространства при всех импульсах. Основные камеры TPC (MTPC) расположены симметрично относительно линии пучка, за магнитами и служат для точного восстановления траекторий частиц, вылетающих под малыми углами. Малые TPC (GAP-TPC и FTPC-1, 2, 3) расположены непосредственно на линии пучка. TPC заполнены смесями газов $Ar:CO_2$ в пропорциях 90:10 для VTPC и GAP-TPC и 95:5 для MTPC.

ToF. В ходе модернизации 2019-2022 гг. была создана новая система представляющая собой двуплечевой детектор (ToF-L + ToF-R) на базе MRPC с высоким временным разрешением. Стоит отметить, что разработка, создание и ввод в эксплуатацию 1728+1728 канальной ToF системы обеспечиваются группой ОИЯИ. Особенность дизайна системы заключается в использовании аналогового накамерного усилителя и системы сбора данных на основе модуля DRS4. В результате этой работы создана принципиально новая концепция времяпролетного детектора MRPC, сочетающая в себе эффективность регистрации частиц при интенсивностях до 2 кГц/см^2, временное разрешение лучше 52 пс и координатное разрешение в плоскости детектора лучше 5 мм. В 2026 планируется завершение работ по изготовлению второго плеча (ToF-R) установки. Для возможности совместного использования детектора с новым трекером (LAST) рассматривается переход на новый тип считывающей электроники на базе модуля picoTDC.

PSD. Передний адронный калориметр (PSD) измеряет поток энергии вблизи направления пучка, который в ядро-ядерных столкновениях в основном определяется

числом спектаторных (не участвовавших во взаимодействии) нуклонов снаряда и, таким образом, связан со степенью центральности столкновения.

VD. Вершинный детектор (VD) установки NA61/SHINE предназначен для высокоточного измерения первичных и вторичных вершин взаимодействия и используется для исследования рождения частиц открытого чарма в ядро-ядерных столкновениях. Детектор расположен между мишенью и первой вершинной времяпроекционной камерой и работает в слабом магнитном поле, регистрируя треки заряженных частиц непосредственно вблизи точки взаимодействия. Он состоит из четырёх станций кремниевых пиксельных сенсоров типа MIMOSA-26AHR, размещённых на расстояниях 5, 10, 15 и 20 см от мишени, что позволяет точно реконструировать траектории частиц. Каждый сенсор имеет высокое пространственное разрешение порядка 4.5 мкм благодаря малому размеру пикселя (~18.4 мкм), что обеспечивает точное определение координат вершин распада короткоживущих частиц. Высокая точность реконструкции вершин позволяет эффективно выделять вторичные вершины распадов D-мезонов и тем самым изучать процессы рождения чарм-кварков в тяжёлоионных столкновениях.

Beam counters. Набор пучковых детекторов обеспечивает идентификацию частиц пучка и высокоточное измерение их траекторий Первый детектор - S1 и расположен перед мишенью. Он оснащен четырьмя фотоумножителями (ФУ), которые напрямую соединены со сцинтиллятором. Второй счетчик пучка S2 имеет только один ФУ. Два вето-сцинтилляционных детектора V0 (круглой формы с центральным отверстием) и V1 (квадратной формы, также с центральным отверстием). Для исключения взаимодействия гало пучка установлен дополнительный вето детектор V0. Положение падающего пучка частиц в плоскости x–y измеряется с помощью трех детекторов положения пучка (BPD), установленных перед мишенью вдоль линии пучка. BPD, используемые в NA61/SHINE, представляют собой пропорциональные камеры, заполненные газовой смесью $Ar:CO^2$ 85:15 с активной площадью 48 × 48 мм². Две ортогональные плоскости датчиков, изготовленные из вольфрамовых проволок диаметром 15 мкм с шагом 2 мм, расположены между тремя катодными плоскостями, состоящими из алюминированного майлара толщиной 25 мкм. Внешние катодные плоскости имеют полосы с шагом 2 мм, соединенные с электроникой считывания. Каждый BPD измеряет положение выбранной по триггеру частицы пучка независимо в двух ортогональных направлениях, используя две плоскости ортогональных полос.

2.2.2. Описание проведенных экспериментов в отчетном периоде.

Конец 2024 г.

В конце 2024 года коллаборацией NA61/SHINE собраны данные для изучения ядерного расщепления космических лучей в Галактике. Для этого пучок ^{208}Pb от SPS был фрагментирован на мишени T2 линии пучка H2, а вторичные ядра с жесткостью 25 ГВ были направлены в сторону экспериментальной установки. В общей сложности было зарегистрировано 46 миллионов событий для ядер от Li до Si. Это измерение охватывает широкий спектр снарядов, имеющих отношение к изучению галактических космических лучей. Взаимодействия были зарегистрированы с графитовой мишенью, полиэтиленовой мишенью и пустой мишенью. На основе этого набора данных будет возможно определить сечения взаимодействия ядра и протона, имеющие отношение к взаимодействиям космических лучей в межзвездной среде.

2025 г.

В июне 2025 года было выделено три недели работы на пучке для сбора данных с использованием протонов на прототипе мишени LBNF с более низкой плотностью, чтобы изучить зависимость потока нейтрино от плотности мишени. Время работы на пучке было сокращено до двух с половиной недель из-за планового отключения установки EHN1 в

последние три дня. В течение периода набора данных работали все камеры TPC, включая трекер длинной мишени (LTT) и фронтальный времяпролетный детектор (ToF-F). Это критически важные детекторы для измерений в физике нейтрино. Около двух недель проводились измерения взаимодействий протонов на сегментированной углеродной мишени при 120 ГэВ/с с мишенью LBNF. Было зарегистрировано около 140 миллионов взаимодействий протонов (прототип LBNF мишени).

Работа с пучком ^{16}O проводилась в течение 10 дней, с конца июня по начало июля 2025 года. Основной задачей в ходе этого цикла было получение данных о взаимодействиях кислорода с кислородом (O+O) при импульсе 150 АГэВ/с. Эти измерения проводились с использованием водной мишени, при этом вероятность взаимодействия поддерживалась на уровне приблизительно 6%. За время сеанса было успешно зарегистрировано приблизительно 42 миллиона взаимодействий O+O. Кроме того, несколько часов было выделено на сбор данных о взаимодействиях кислород-углерод (O+C) и кислород-полиэтилен (O+CH_2). Эти дополнительные измерения, включающие в общей сложности около 4 миллионов событий, будут использованы для исследований сечений фрагментации.

В конце 2025 года проведен набор данных по взаимодействию протонов с энергией 300 ГэВ на жидководородной мишени. Суммарная статистика событий pp составила порядка 360 млн взаимодействий.

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.
В соответствии с тематическим планом:

Нарушение изоспиновой симметрии в AA столкновениях.

В рассматриваемый период была опубликована самая неожиданная на сегодняшний день находка коллаборации NA61/SHINE - наблюдение большого нарушения изоспиновой (ароматической) симметрии между u- и d-кварками при образовании каонов в столкновениях Ar+Sc. Статья [1] была опубликована в журнале Nature Communications в марте 2025 года. Хронологически наблюдению в данных Ar+Sc предшествовала первая находка из программы космических лучей NA61/SHINE, в которой сообщалось о неожиданном избытке заряженных каонов по сравнению с нейтральными, образующимися в реакциях π^- + C при $\sqrt{s}$ = 17.3 и 25.7 ГэВ. Хотя этот результат противоречит теоретическим моделям, его трудно интерпретировать с точки зрения изоспиновой симметрии, поскольку снаряд $\pi^-(\bar{u}\ d)$ имеет ненулевую третью компоненту изоспина ($I_z = -1$). С другой стороны, для сталкивающихся зарядово-симметричных ядер (N = Z) точная изоспиновая симметрия подразумевает

$$R_K = \frac{\langle K^+ \rangle + \langle K^- \rangle}{2\,\langle K_S^0 \rangle} = 1$$

для средних выходов образующихся заряженных и нейтральных каонов (второе равенство не учитывает небольшой эффект нарушения CP-симметрии). Центральная реакция Ar+Sc при $\sqrt{s_{NN}}$ = 11.9 ГэВ, изученная в рамках программы сильных взаимодействий, выявляет избыток заряженных каонов в 18.4 ± 6.1 % в средней быстроте (рис. 1). Этот избыток соответствует 4.2 ± 1.6 дополнительным заряженным каонам, образующимся на одно центральное событие Ar+Sc. Компиляция результатов по выходам K^+, K^- и K^0_S, опубликованных в других экспериментах, демонстрирует согласованность с результатом NA61/SHINE в широком диапазоне энергий, но со значительно большими неопределенностями. Наблюдаемый эффект остается необъясненным теоретическими моделями. Группой ОИЯИ было предложено описание этого отношения в рамках подхода BMLZ. На Рис. 2 представлены предварительные расчеты в сравнении с экспериментальными данными [2].

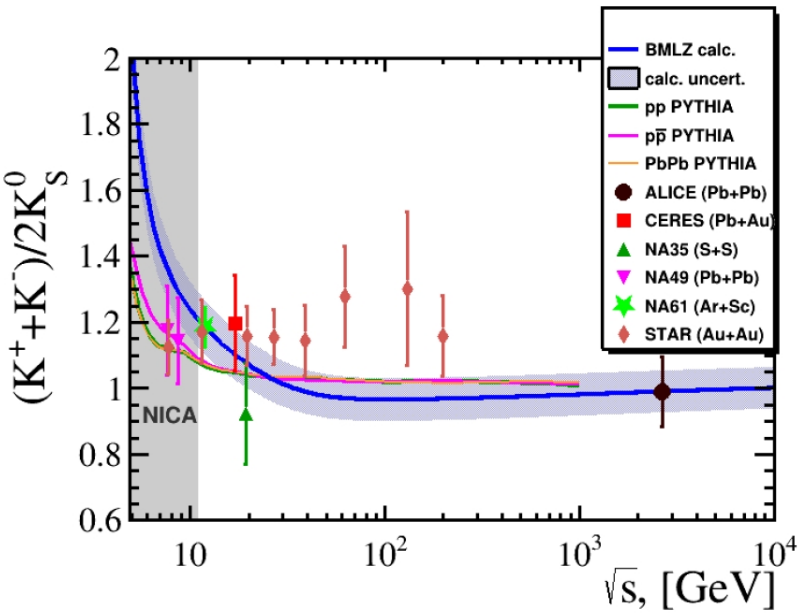


Рис. 2. Отношение $R_K = (\sigma K^+ + \sigma K^-)/2\sigma K^0_S$, как функция $\sqrt{s}$, рассчитанное в рамках подхода BMLZ (синяя линия) и модели Лунда (зеленый-pp, фиолетовый-pp^-, желтый-$PbPb$).

В недавно полученных данных по XeLa при $\sqrt{s}$ = 16.8 ГэВ получено первое прямое измерение $D^0 + \overline{D^0}$ в A+A при энергиях SPS [10]. Данные были измерены с малым аксептансом, прототипом вершинного детектора, и имели довольно небольшую статистику для данного анализа. Это позволило провести только недифференциальные измерения в полном фазовом пространстве, что сделало аксептанс и поправку на эффективность зависимыми от модели. Для оценки поправки были использованы три различные модели, что дало три различных результата, показанных на рис. 3, справа. Как видно из графика, даже при относительно больших неопределенностях эти результаты накладывают сильные ограничения и различают существующие модели рождения адронов.

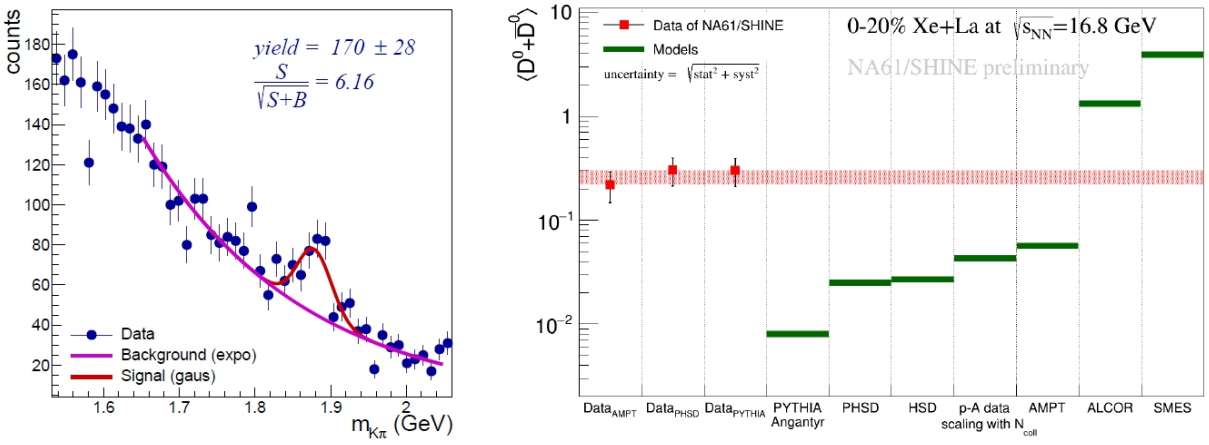


Рис. 3. Предварительные результаты NA61/SHINE по выходу $D^0 + \overline{D^0}$, измеренному в наиболее центральные столкновения Xe+La при $\sqrt{s}$= 16.8 ГэВ. Слева: спектр инвариантной массы, использованный для извлечения исходного значения выхода. Справа: выход, скорректированный на аксептанс и эффективность с тремя различными моделями, в

сравнении с модельными предсказаниями. Красная полоса указывает на неопределенность, связанную с зависимостью поправки от модели.

В 2025 г. введено в эксплуатацию на установке NA61/SHINE второе (правое) плечо времяпролетного детектора с высоким временным разрешением (50 пс). Детектор разработан и создан в ОИЯИ. К началу набора экспериментальных данных (ноябрь 2025 года) по взаимодействию протонного пучка с энергией 300 ГэВ с жидководородной мишенью двухплечевая времяпролетная система на базе MRPC детекторов полностью введена в эксплуатацию, обеспечивая полный аксептанс установки NA61 (рис. 4).

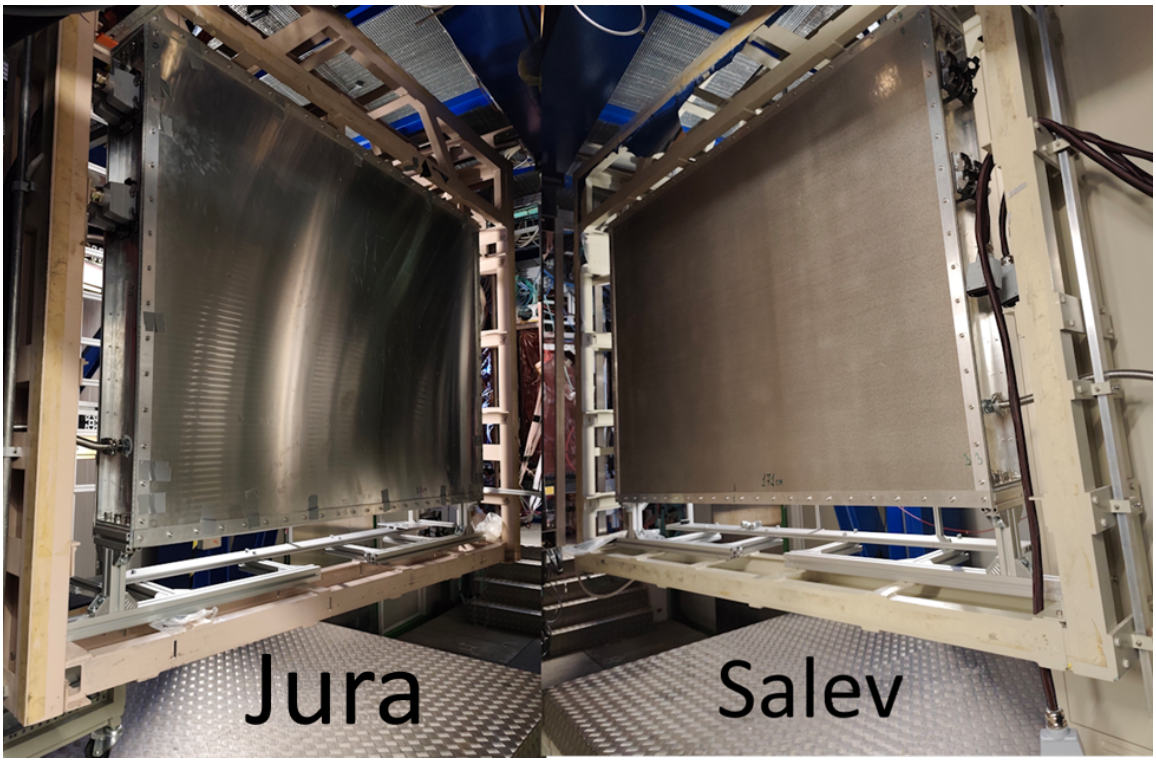


Рис. 4. Изображения правой и левой стенок (Jura и Salev) времяпролетной системы на базе MRPC в экспериментальной зоне установки NA61/SHINE.

Для проведения новых измерений протон-протонных корреляций и дифференциальных сечений образования дейтронов, антидейтронов и антипротонов в p+p взаимодействиях при 300 ГэВ/с была разработана и введена в эксплуатацию новая жидководородная мишень (LHT). Группа сотрудников ОИЯИ принимала принципиальное участие в реализации данного проекта. LHT представляет собой криогенную систему замкнутого типа (Рис. 5). В её основе лежит криостат с фазовым сепаратором, обеспечивающий сжижение водорода и его подачу в мишенную ячейку из майлара диаметром 4 см и длиной 20 см, расположенную непосредственно на линии пучка. Для минимизации теплопритоков мишень и фазовый сепаратор размещены в изоляционном вакууме, создаваемом двухступенчатой системой откачки. Рабочие параметры системы, включая давление, температуру и уровень жидкого водорода, непрерывно контролируются датчиками и системой автоматического управления на базе PLC. Конструкция мишени и реализованные процедуры эксплуатации обеспечивают как безопасную работу установки, так и возможность быстрого переключения между жидким и газообразным режимами мишени, что важно для оценки фоновых вкладов.

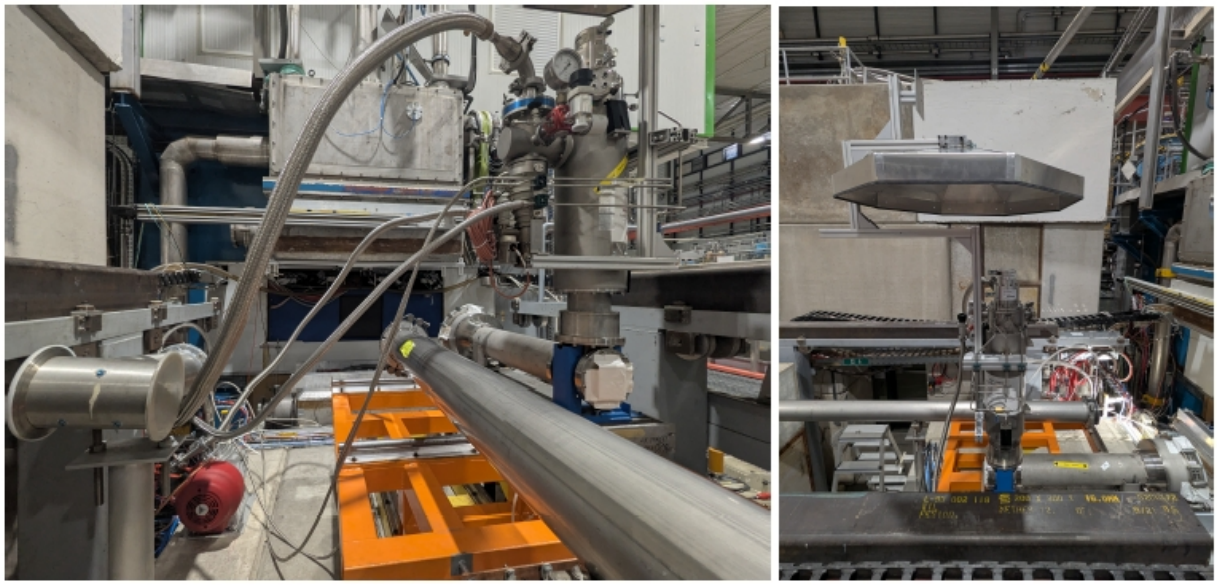


Рис. 5. Местоположение LHT (слева). На правом изображении фотография защитной крыши для сбора потенциальной утечки водорода.

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту.

1. The NA61/SHINE Collaboration. Evidence of isospin-symmetry violation in high-energy collisions of atomic nuclei. Nat Commun. 2025. 16. P. 2849 https://doi.org/10.1038/s41467-025-57234-6
2. A.V. Guskov, G.I. Lykasov, A.I. Malakhov and A.A. Zaitsev. K-meson production and isospin-symmetry in $\boldsymbol{pp}$ and $\boldsymbol{AA}$collisions. PoS QCDEX2025 2025 p.18.
3. The NA61/SHINE Collaboration. Proposal from the NA61/SHINE Collaboration for update of European Strategy for Particle Physics arXiv:2507.08602 / EPJ Web Conf. 316 (2025)
4. The NA61/SHINE Collaboration., Giacosa, F., Gorenstein, M. et al. Evidence of isospin-symmetry violation in high-energy collisions of atomic nuclei. Nat Commun 16, 2849 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-57234-6
5. NA61/SHINE Collaboration. Multiplicity and net-electric charge fluctuations in central Ar+Sc interactions at 13A, 19A, 30A, 40A, 75A, and 150A beam momenta measured by NA61/SHINE at the CERN SPS. Eur. Phys. J. C 85, 918 (2025). https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14621-z
6. Lykasov G.I., Malakhov A.I., Zaitsev A.A. Production of charged kaons in $ArSc$ collisions // Eur. Phys. J. A. 2024. Vol. 60. P. 239. https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01452-x
7. Malakhov A.I., Zaitsev A.A., Kolesnikova E.A., Lykasov G.I. Investigation of Relativistic Nuclear Collisions in the Four-Velocity Space // Physics of Particles and Nuclei. 2024. Vol. 55, No. 4. pp. 768–772. https://doi.org/10.1134/S1063779624700151
8. Malakhov A.I., Zaitsev A.A., Lykasov G.I. New Results of the Study of Relativistic Nuclear Interactions in the Space of Four-Dimensional Velocities // Physics of Particles and Nuclei. 2025. Vol. 56, No. 3. pp. 891–898. https://doi.org/10.1134/S1063779624702472
9. G. I. Lykasov, A. I. Malakhov, M. A. Malyshev, A. V. Lipatov and A. A. Zaitsev. Gluon Distribution in Nucleon and Its Application to Analysis of ep DIS, pp and AA Collisions

at High Energies and Mid-Rapidity //Phys. Part. Nuclei. 2024. Vol. **55**. pp. 941-949. https://doi.org/10.1134/S1063779624700631

10. Merzlaya A. First D^0+ $\overline{D^0}$ measurement in nucleus-nucleus collisions at SPS energies with NA61/SHINE //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2025. – Т. 316. – С. 04004.

2.3. Статус и стадия реализации проекта

Продолжающийся проект, стадия набора экспериментальных данных и их анализа. Модернизация существующей установки.

3. Международное научно-техническое сотрудничество

Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**
Institute of Physics and Technology of Mongolian Academy of Sciences	Монголия	Улан-Батор	B.Baatar, Ts. Baatar, M.Sovd, N. Khishigbuyan, B. Otgongerel, M. Urangua	Протокол
Sofia University “St. Kliment Ohridski”	Болгария	София	M. Bogomilov, D. Kolev, S. Ilieva, R. Tsenov	Протокол
The American College	Индия	Мадураи	N. Marimuthu, S. Sanila	Протокол

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**	**Ассоциированныйперсонал Сумма FTE**
1.	научные работники	3.8	
2.	инженеры	1.4	
3.	специалисты		
Итого:		**5.2**	

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
				2025	2 год	3 год	4 год	5 год
		Международное сотрудничество (МНТС)	91	91				
		Материалы	39	39				
		Оборудование и услуги сторонних организаций	169	169				
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций	36	36				
		Приобретение программного обеспечения						
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		– Сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,						
		– реактора						
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*	335	335				
	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

На текущем этапе установка NA61/SHINE функционирует стабильно и эффективно, регулярно проводится набор данных в запланированных режимах, ведётся активный анализ результатов, по итогам которого публикуются научные статьи в ведущих международных изданиях. Полученные к настоящему времени результаты отличаются высоким качеством, соответствуют современному мировому уровню экспериментальной ядерной физики и подтверждают конкурентоспособность эксперимента NA61/SHINE. В целом достигнутые научные результаты адекватны объёму затраченных ресурсов и обосновывают целесообразность продолжения участия в проекте.

6. Предлагаемые рецензенты

А.А. Балдин (ЛФВЭ ОИЯИ)

Руководитель темы

_____ / Малахов А.И. /

“ 02 “ 04 2026 г.

Руководитель проекта

_____ / Малахов А.И. /

“ 02 “ 04 2026 г.

Экономист Лаборатории

_____ / Панкратова Е.О

“ 02 “ 04 2026 г.