

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Запуск коллайдера NICA и формирование в нём первых пучков тяжёлых ионов

А.В. Бутенко, В.А. Лебедев, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников

Обсуждаются результаты сеанса №1 на ускорительном комплексе NICA, включающие в себя работы по формированию пучков и модернизации оборудования инжекционного комплекса, технологический запуск систем Коллайдера и его инженерной инфраструктуры, включая запуск масштабной системы криогенного обеспечения комплекса, технические детали первого пучкового сеанса на коллайдере NICA и оптимизацию циркуляции пучков ядер ксенона, достигнутые интенсивности и другие измеренные характеристики пучков в Коллайдере. Первая циркуляция пучка ядер ксенона в нижнем кольце Коллайдера была получена 11 января 2026 г., 12 февраля была достигнута одновременная циркуляция встречных пучков ядер ксенона в кольцах Коллайдера, в ходе которой была обеспечена одинаковая частота обращения сгустков частиц в каждом из его колец и синхронизация их прохождения в точке встречи в области детектора MPD.

Ключевые слова: ионный Коллайдер, сверхпроводящие магниты, пучки тяжёлых ядер

PACS numbers: 25.75. – q, 29.20.db

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.03.040109>

Содержание

1. Введение (383).
 2. Формирование первых пучков тяжёлых ионов в коллайдере NICA (383).
 3. Заключение (387).
- Список литературы (387).

1. Введение

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна Московской области) в 2006 г. обсуждался проект экспериментов с тяжёлыми ионами, бомбардирующими неподвижную мишень с энергией столкновений в системе центра масс 5–10 ГэВ/нуклон [1]. Немного позднее появился проект NICA [2, 3] этих же экспериментов, но уже как со сталкивающимися пучками тяжёлых ионов, так и с пучками, выведенными на мишень.

Представлены результаты успешного первого пучкового сеанса с ионами ксенона на комплексе NICA, проведённого в 2025–2026 гг. Комплекс NICA [1–5] сооружён в ОИЯИ (Дубна), его главная цель — обеспечение ионными пучками экспериментальных исследований горячей и плотной сильно взаимодействующей барионной материи и спиновой физики. Физическая программа сосредоточена на поиске возможных проявлений фазовых

переходов и критических явлений в энергетической области, где образуется возбуждённая барионная материя с максимально достижимой плотностью. Коллайдер NICA [5, 6] будет обеспечивать столкновения тяжёлых ионов в энергетическом диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 4–11$ ГэВ со средней светимостью $L = 1 \times 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для ядер $^{197}\text{Au}^{79+}$ и столкновения поляризованных протонов в энергетическом диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 12–27$ ГэВ со светимостью $L \geq 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

2. Формирование первых пучков тяжёлых ионов в коллайдере NICA

5 марта 2025 года в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ был дан старт сеансу №1 на ускорительном комплексе коллайдера NICA. Запуск состоялся на полях сессии Комитета полномочных представителей государств-членов ОИЯИ в присутствии представителей 20 стран-участниц, ассоциированных членов и партнёров ОИЯИ. Ускорительный комплекс NICA [6, 7] включает: электронно-струнный источник тяжёлых ионов Крион-6Т, источник поляризованных ионов SPI, линейный ускоритель тяжёлых ионов (ЛУТИ), линейный ускоритель ЛУ-20, сверхпроводящий синхротрон — Бустер, сверхпроводящий синхротрон — Нуклотрон, два сверхпроводящих кольца коллайдера NICA с двумя точками встречи, каналы транспортировки пучков между линейными ускорителями, синхротронами и Коллайдером, установки и каналы для прикладных исследований.

Целями работ на начальном этапе сеанса были: дальнейшее развитие инжекционного комплекса NICA, направленное на формирование пучков тяжёлых ионов для их инжекции в Коллайдер; технологический запуск систем

А.В. Бутенко, В.А. Лебедев, Е.М. Сыресин^(*), Г.В. Трубников

Объединённый институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: ^(*)esyresin@jinr.ru

Статья поступила 5 марта 2026 г.

Коллайдера и проверка их комплексной работоспособности до получения в нём пучков тяжёлых ионов.

Для увеличения интенсивности пучка, инжектированного в Коллайдер, в 2025 г. в Бустере было реализовано накопление ионов на энергии инжекции с помощью системы электронного охлаждения [8–10]. Ионы из источника инжектируются в линейный ускоритель ЛУТИ, где ускоряются до энергии 3,2 МэВ/нуклон, а затем из него инжектируются в Бустер с частотой 5–10 Гц. При десятицикловогой инжекции было продемонстрировано увеличение интенсивности накопленного в Бустере пучка в семь раз [10]. Для перевода пучков тяжёлых ионов в Коллайдер из Нуклотрона в последнем была установлена система быстрого вывода, включающая в себя септум-магнит Ламбертсона и быстрый кикерный магнит. Первые пучки ионов ксенона были выведены в канал транспортировки пучка в ноябре 2025 г.

Создание ускорительного комплекса NICA вызвало необходимость модернизации его криогенной инфраструктуры. Мощность криогенного комплекса при температуре 4,5 К была увеличена с 4 до 10 кВт. Крупнейший в России комплекс по производству жидкого гелия дополнен специально разработанной установкой сжижения гелия производительностью 1000 л ч⁻¹. С введением в строй компрессорной станции в сентябре 2025 г. начато захлаживание магнитов Коллайдера до гелиевых температур, и в октябре обеспечена работа криогенных систем одновременно для трёх ускорителей: Бустера, Нуклотрона и коллайдера NICA.

Для коллайдера NICA разработаны двухпертурные сверхпроводящие (СП) магниты, в которых вакуумные камеры двух колец разделены по вертикали одна над другой. Магниты в арках имеют общие ядра, но их конструкция позволяет независимо регулировать поле в каждом из колец. Сведение и разведение пучков осуществляется в вертикальной плоскости. Пройдя участок сведения, сгустки ядер верхнего и нижнего колец движутся вдоль общей прямолинейной осевой траектории навстречу друг другу. Фокусировка пучка в месте встречи осуществляется общими однопертурными линзами, обеспечивающими фокусировку обоих пучков в точке взаимодействия. Магнитная структура обеспечивает столкновения в двух точках взаимодействия, расположенных в прямолинейных промежутках на противоположных сторонах Коллайдера.

Для производства и тестирования сверхпроводящих магнитов в ЛФВЭ ОИЯИ создана специализированная фабрика. В целом для Бустера, коллайдера NICA и немецкого ускорителя синхротрона SIS100 проекта FAIR (Дармштадт, Германия) будет изготовлено и испытано 428 структурных и 304 корректирующих СП-магнитов.

Монтаж криомагнитной системы западной половины коллайдера NICA был завершён в сентябре 2025 г., после чего было начато захлаживание до 4,5 К магнитов колец западной половины и начаты вакуумные и криогенные испытания криомагнитной системы Коллайдера. Монтаж криомагнитной системы и секций инжекций восточной половины Коллайдера был завершён в середине ноября 2025 г. (рис. 1).

По окончании этой работы было осуществлено захлаживание до температуры жидкого гелия (4,5 К) восточной половины обоих колец коллайдера NICA. В середине декабря была проверена и отлажена система защиты и эвакуации энергии, запасённой в магнитном поле, которую при срыве сверхпроводимости необходимо вывести

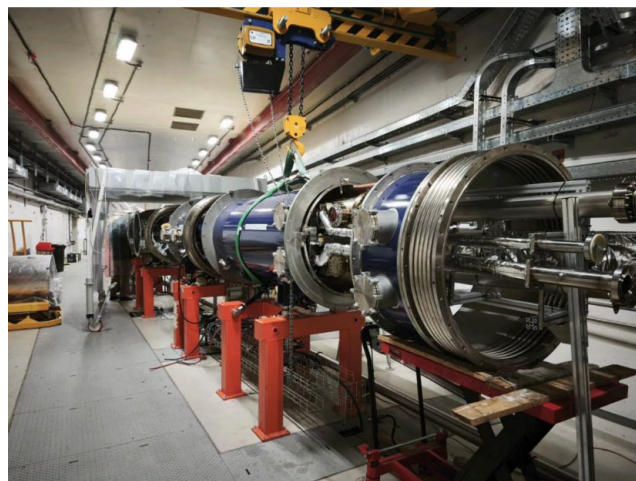


Рис. 1. Монтаж последнего магнита коллайдера NICA.

из магнитной системы. В магнитную систему был заведён ток 5 кА, соответствующий ведущему магнитному полю 0,86 Тл. Также в это время был закончен монтаж основного оборудования северной ветки каналов транспортировки пучков из Нуклотрона в нижнее кольцо Коллайдера. Это позволило осуществить первую инжекцию пучка ядер ксенона в нижнее кольцо 18 декабря 2025 г. Пучок из канала транспортировки (рис. 2) с помощью элементов системы инжекции был введён в высоковакуумную камеру Коллайдера и зарегистрирован на ближайшем датчике положения пучка в кольце.

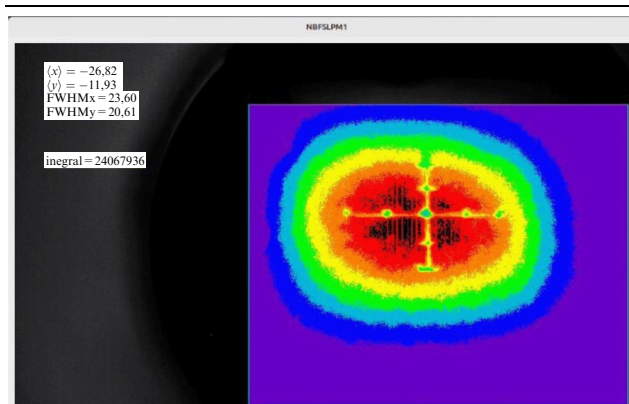


Рис. 2. Профиль пучка ядер ксенона на выходе канала транспортировки пучка из Нуклотрона в Коллайдер.

Процесс захлаживания западной арки Коллайдера до температуры 4,5 К продолжался до 24 декабря 2025 г. К концу декабря были завершены работы по тестированию системы защиты и эвакуации энергии всего Коллайдера. 30 декабря 2025 г. ток 5 кА был заведён во все магнитные элементы верхнего и нижнего колец Коллайдера, а индукция ведущего магнитного поля достигла величины 0,86 Тл. Максимальный ток, заведённый в магниты западной половины нижнего полукольца Коллайдера, составил 5,6 кА, а для верхнего полукольца — 8,9 кА, что соответствует магнитному полю в верхнем полукольце 0,97 Тл и, соответственно, в нижнем полукольце — 1,55 Тл. Максимальный ток, заведённый в магниты восточных полуколец, был одинаков для верхнего и нижнего полукольца и составил 6,5 кА, а магнитное поле в них было равно 1,1 Тл.

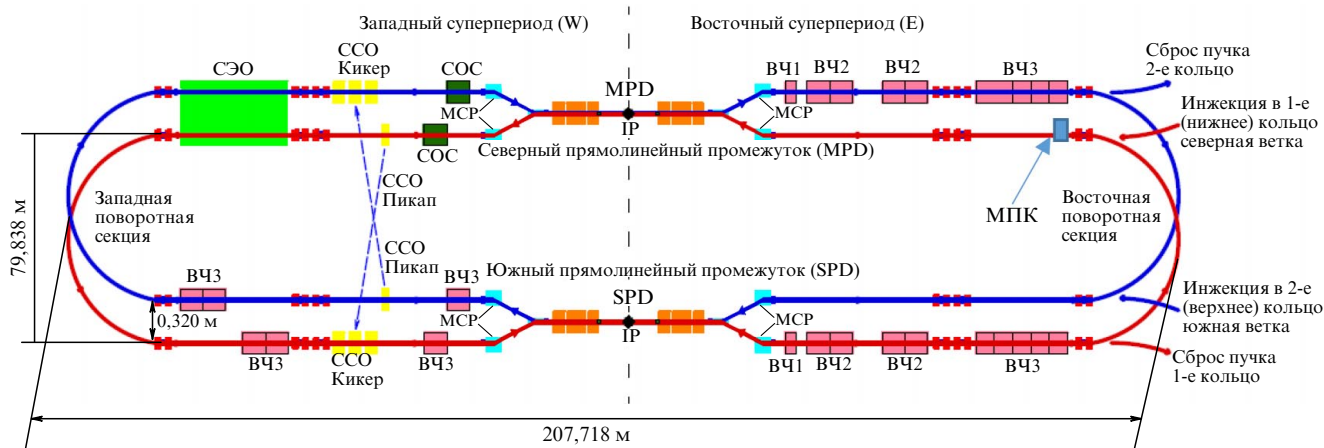


Рис. 3. Траектории пучков ядер ксенона в верхнем (синяя кривая) и нижнем (красная кривая) кольцах коллайдера NICA, в состав которого в конечной конфигурации войдёт следующее оборудование [4, 6]: ВЧ1 — барьерная высоко-частотная (ВЧ) станция [6], ВЧ2 и ВЧ3 — гармонические ВЧ резонаторы [6], MPD — многоцелевой детектор [4], СОС — система обратной связи [6], ССО — система стохастического охлаждения [9], СЭО — система электронного охлаждения [9], SPD — детектор для спиновой физики [11], IP — точки встречи пучков, оранжевые прямоугольники — криогенные секции со сверхпроводящими линзами, восемь голубых прямоугольников — вертикальные магниты сведения и разведения (МСР) пучков, расположенные симметрично относительно точек IP, синий прямоугольник со стрелкой — малогабаритная МПК.

В ходе сеанса также было получено проектное значение поля 0,57 Тл в сверхпроводящем соленоиде MPD детектора Коллайдера диаметром около 7 м и длиной около 9 м. При вдвое меньшем значении магнитного поля совместно с Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) было проведено измерение карты магнитного поля в этом соленоиде, в ходе которого была продемонстрирована проектная относительная однородность поля (менее 5×10^{-4}).

Работы по проведке первого оборота пучков ядер ксенона в нижнем кольце Коллайдера начались 4 января 2026 г. Кинетическая энергия ионов определялась готовностью систем Коллайдера, и была выбрана величина 1,76 ГэВ/нуклон. Основные сложности были связаны с сильными наводками на датчики положения пучка из-за работы импульсных магнитов системы инжекции. После прохождения инжектированного пучка через два сверхпроводящих дипольных магнита восточной арки кольца Коллайдера (рис. 3) и влёта в "тёплую" прямолинейную секцию не удалось детектировать положение пучка с помощью пикапов — его штатных мониторов, и было найдено оригинальное решение. Короткий участок ионпровода тёплого прямолинейного промежутка был сдвинут в горизонтальной плоскости примерно на 5 см от оси. Это было возможно благодаря длинным тарельчатым сильфонам на входе и выходе этого участка.

В результате появилась возможность установить малогабаритную многопроволочную пропорциональную камеру (МПК) на пути пучка без механической разборки вакуумного объёма, а пучок при этом проходил сквозь стенку повернутого участка камеры с эффективной толщиной около 7 мм. Это позволило осуществить поэтапную проводку пучка через несколько прямолинейных тёплых и криогенных участков Коллайдера, расположенных между МПК и криогенной секцией с вертикальными магнитами сведения-разведения пучков в области встречи детектора MPD (см. рис. 3).

Наличие в Коллайдере вертикальных магнитов потребовало дополнительных усилий по сравнению с обычными синхротронами по транспортировке пучка через

область встречи. С помощью нескольких корректоров пучок удалось довести через прямолинейные промежутки СОС и СЭО до западной арки. Далее пучок успешно прошёл через её регулярную часть, а затем через прямолинейные секции ВЧ3 и ССО, секцию встречи пучков в области SPD, тёплые секции с ВЧ1- и ВЧ2-резонаторами, криогенную секцию со сверхпроводящими линзами, ВЧ3-секцию и, в итоге, через восточную арку (см. рис. 3).

При этом настройки системы сведения-разведения пучков в районе второй точки встречи в области детектора SPD были симметричными. В итоге, 11 января 2026 г. были получены первые обороты, а затем и устойчивая циркуляция пучка ионов ксенона в нижнем кольце Коллайдера, а 21 января 2026 г. была получена циркуляция сгустка, сгруппированного с помощью резонаторов ВЧ2-системы.

Время жизни сгруппированного пучка на начальном этапе циркуляции составила около 10 мин, что объясняется потерей частиц с большими начальными синхротронными амплитудами из-за фазового шума ВЧ-системы. По мере выбывания из циркуляции ионов с большими синхротронными амплитудами время жизни, определяемое вакуумными потерями, увеличилось до 1 ч. Позднее время циркуляции пучка продолжительностью около 1 ч было также независимо подтверждено в ходе измерений Шоттки сигнала с детектора дробового шума, установленного в нижнем кольце Коллайдера.

Средняя плотность остаточного газа определялась по данным анализа скорости замедления пучка из-за его ионизационных потерь в отсутствие ВЧ. Насколько можно судить в настоящее время, величина вакуума близка к проектному значению (рис. 4), а основной механизм потерь, представленных в правой части рис. 4, связан с многократным рассеянием на остаточном газе, эффект которого был увеличен малым поперечным акцептансом, определяемым большими искажениями орбиты. Количество ядер циркулирующего пучка ионов ксенона в Бустере составляло 6×10^7 , в Нуклотроне перед выводом пучка — около $2,5 \times 10^7$, а количество ядер, инжектированных в Коллайдер, после первого оборота не превышало 2×10^6 . С помощью обработки сигналов мониторов положения пучка в Коллайдере были изме-

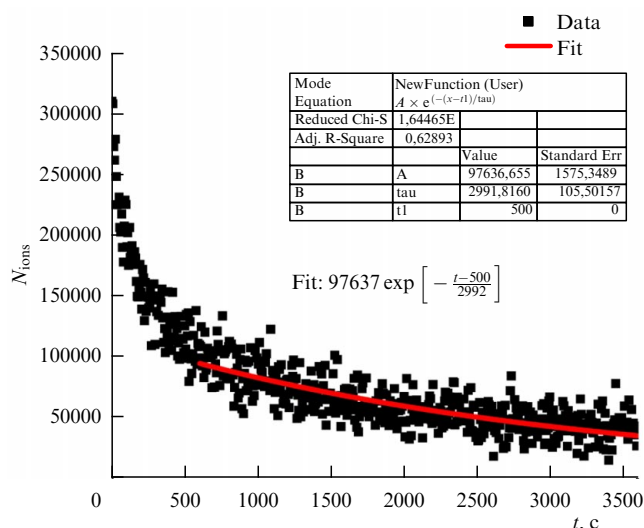


Рис. 4. Зависимость от времени интенсивности циркулирующего пучка ядер ксенона в нижнем кольце коллайдера NICA; чёрные квадраты — число циркулирующих ядер, красная кривая — аппроксимация уменьшения числа циркулирующих ядер с их временем жизни 2992 с.

рены его орбита и дробные части бетатронных частот $v_x = 0,41$, $v_y = 0,478$, также определена частота синхротронных колебаний $v_s = 340,72$ Гц.

Инжекция пучка в верхнее кольцо из южной ветки канала транспортировки Нуклотрон–Коллайдер проведена 14 января 2026 г. Циркуляция пучка в верхнем кольце Коллайдера была получена 22 января 2026 г. Детальные исследования с циркулирующим сгруппированным пучком в верхнем кольце проведены 12 февраля 2026 г. На начальном этапе время жизни пучка в этом кольце также составило около 10 мин, а начальная интенсивность инжектированного в него пучка ядер ксенона была равна 3×10^6 . Из измерений сигналов мониторов положения пучка получена траектория его центра тяжести, на основе которой вычислены дробные части бетатронных частот $v_x = 0,189$, $v_y = 0,139$.

После успешной работы с одиночными пучками, инжектированными в верхнее или нижнее кольцо Коллайдера (и наблюдения стабильной циркуляции в течение де-

сятков минут в каждом) в ночь на 12 февраля 2026 г. на ускорительном комплексе NICA преодолён важный рубеж: впервые была достигнута одновременная циркуляция встречных пучков ядер ксенона в кольцах Коллайдера (рис. 5). На данном этапе специалисты ЛФВЭ ОИЯИ сначала проинжектировали ядра ксенона в верхнее кольцо Коллайдера. После ввода пучка в Коллайдер они отключили в нём систему инжекции, что обеспечило циркуляцию пучка в нём в течение времени около десяти минут. В это время каждые шесть секунд осуществлялась новая инжекция ядер пучка ксенона в нижнее кольцо Коллайдера. В результате в обоих кольцах Коллайдера была реализована одновременная циркуляция встречных пучков.

При этом с относительной точностью была обеспечена одинаковая частота обращения сгустков частиц в каждом из колец коллайдера NICA и синхронизация их прохождения сквозь друг друга в точке встречи в области детектора MPD (рис. 6). Получение режима циркуляции встречных пучков свидетельствует о корректной и синхронной работе сложнейших инженерных систем всего комплекса.

Это достижение открывает путь к получению проектных параметров столкновений и подтверждает соответствие характеристик всех основных систем Коллайдера техническим требованиям. Теперь физики и инженеры переходят к следующей стадии, необходимой для начала физических экспериментов. В планах на будущее: измерение и коррекция орбиты и пучковой оптики колец, работа над повышением интенсивности пучков и, наконец, регистрация первых результатов столкновений сгустков частиц в точке встречи с помощью детектора MPD.

Планы по дальнейшему повышению интенсивности циркулирующих пучков в Коллайдере прежде всего связаны с реализацией схемы накопления ионов с помощью прямоугольных ВЧ-барьеров. В марте 2026 г. сотрудники ИЯФ СО РАН и ОИЯИ планируют завершить работу над созданием электроники управления и программного обеспечения для источников питания барьерных ВЧ-станций. Уменьшение продольных размеров сталкивающихся сгустков и повышение светимости при их столкновениях планируется осуществить за счёт добавления к существующим четырём гармоническим ВЧ2-резонаторам ещё четырёх дополнительных ВЧ2-резо-

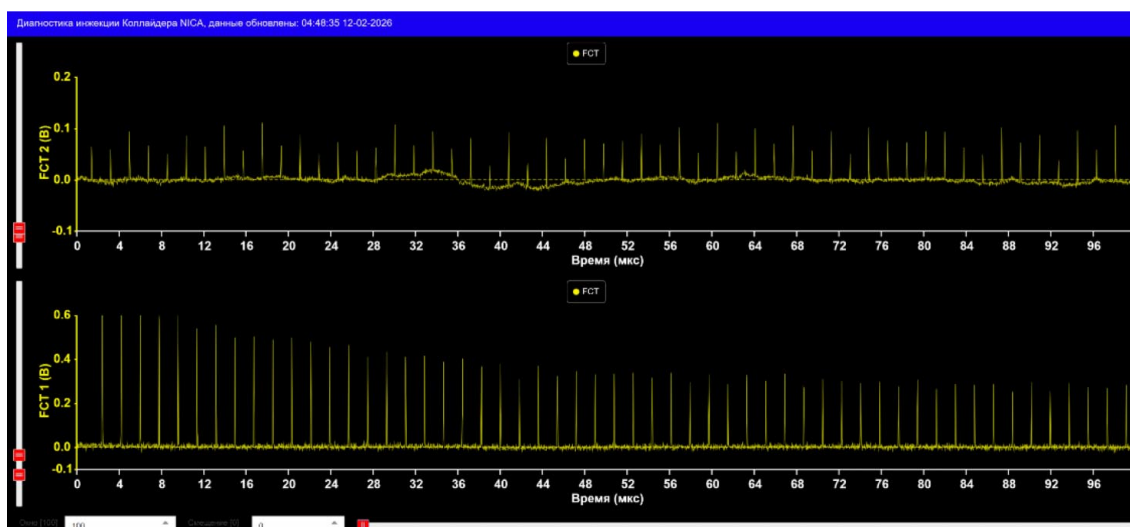


Рис. 5. Сигналы трансформаторов тока верхнего и нижнего колец Коллайдера, возникающие при одновременной циркуляции в них встречных пучков ядер ксенона.

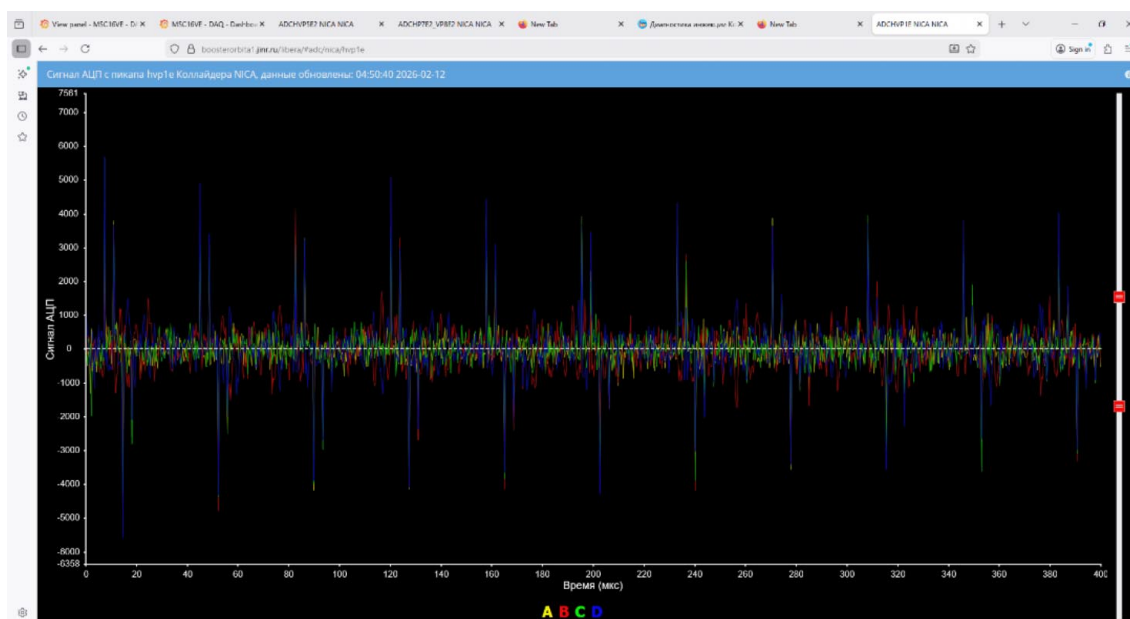


Рис. 6. Сигналы датчиков положения пучков в точке встречи в области детектора MPD от двух пучков ядер ксенона при их прохождении друг сквозь друга.

торов. Работы по запуску дополнительных четырёх ВЧ2-резонаторов сотрудниками ОИЯИ и ИЯФ СО РАН планируется начать в мае 2026 г.

3. Заключение

В последующем пучковом сеансе, планируемом на осень 2026 г., коллайдер NICA должен будет обеспечить столкновения ядер $^{124}\text{Xe}^{54+}$ с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}7$ ГэВ при средней светимости сталкивающихся пучков $L = 10^{24}\text{--}10^{25}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. Перед планируемым сеансом детектор MPD должен будет устанавливаться в своё рабочее положение для регистрации событий от сталкивающихся пучков ядер ксенона. Ожидается, что при средней светимости 10^{25} см $^{-2}$ с $^{-1}$ частота событий в MPD должна составить около 50 Гц. При этих параметрах пучков и детектора могут быть набраны 100 млн событий примерно за три месяца работы комплекса NICA.

Будущее покажет, насколько значимым будет вклад Коллайдера в мировую науку, но сейчас уже можно с уверенностью сказать, что программа NICA выводит ОИЯИ в число мировых лидеров в ускорительных и детекторных технологиях.

Commissioning of Collider NICA and formation of first heavy ion beams

A.V. Butenko, V.A. Lebedev, E.M. Syresin^(*), G.V. Trubnikov

Joint Institute for Nuclear Researches, Joliot Curie 6, 141980 Dubna, Russian Federation
E-mail: ^(*)esyresin@jinr.ru

This paper discusses the results of Run N 1 of the NICA Accelerator Complex, including beam formation and injection complex equipment upgrades, the technological launch of the Collider systems and its engineering infrastructure, including the launch of the large-scale cryogenic system of the accelerator complex, the technical details of the first beam run at the NICA Collider, and the optimization of xenon beam circulation, as well as the achieved intensities and other measured beam characteristics in the Collider. The first circulation of a xenon beam in the Collider's lower ring was achieved on January 11, 2026. On February 12, simultaneous circulation of colliding xenon beams in the Collider rings was achieved, ensuring the same frequency of particle bunch circulation in each of the Collider rings and synchronization of their passage at the collision point in the MPD detector region.

Keywords: ion collider, superconducting magnets, heavy ion beams

PACS numbers: 25.75.-q, 29.20.db

Bibliography — 11 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk 196 (4) 383–387 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.03.040109>

Список литературы

1. Sissakian A N, Sorin A S, Toneev V D "QCD matter: A search for a mixed quark-hadron phase", nucl-th/0608032
2. Trubnikov G et al., in *Particle Accelerator. Proc. of the 11th European Conf., EPAC 2008, Genoa, Italy, June 23–27, 2008* (Eds I Andrian, C Petit-Jean-Genaz) (Geneva: CERN, 2008) p. 2581
3. Trubnikov G et al., in *Proc. of the 21st Russian Particle Accelerators Conf., RuPAC 2008, 28 September–3 October 2008, Zvenigorod* (Eds M V Kuzin, E E Shirikova, A V Philippov) (Dubna: JINR, 2008) p. 82
4. Агапов Н Н и др. *УФН* 186 405 (2016); Agapov N N et al. *Phys. Usp.* 59 383 (2016)
5. Матвеев В А *УФН* 194 1250 (2024); Matveev V A *Phys. Usp.* 67 1180 (2024)
6. Аверичев А С и др., в сб. *Технический проект ускорительного комплекса NICA Т. 1* (Под общ. ред. И Н Мешкова, Г В Трубникова) (Дубна: ОИЯИ, 2015) с. 17
7. Бутенко А В и др. *УФН* 193 206 (2023); Butenko A V et al. *Phys. Usp.* 66 195 (2023)
8. Брызгунов М И и др. *УФН* 195 101 (2025); Bryzgunov M I et al. *Phys. Usp.* 68 94 (2025)
9. Syresin E et al. *Chinese Phys. C* 49 074003 (2025)
10. Брызгунов М И и др., в сб. *Двадцать девятая международная конф. Российская конф. по ускорителям заряженных частиц RuPAC'2025. Сборник тезисов международной конф., Санкт-Петербург, 15–19 сентября 2025 г.* (СПб.: АО Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 2025) с. 36
11. Abazov V et al. (SPD Collab.) "Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA" *Natural Sci. Rev.* 1 (1) 1 (2024) DOI:10.54546/NaturalSciRev.100101

Received 5 March 2026

Physics – Uspekhi 69 (4) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2026.03.040109>