

Деятельность Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина в 2022 году была сосредоточена на создании, развитии и вводе в эксплуатацию отдельных узлов ускорительного комплекса «Нуклотрон-NICA» и экспериментальных установок MPD, BM@N и SPD. Также продолжались эксперименты и на внешних ускорителях.

Основные результаты в реализации проекта Nuclotron-NICA

В период со 2 января по 1 апреля 2022 года был проведен *третий цикл пусконаладочных работ* на ускорительном комплексе с ускорением ионов углерода, генерируемых на лазерном источнике.

Были последовательно выполнены следующие работы:

- настроен цикл ускорения в Бустере, включающий адиабатический захват в режим ускорения (на 5-й кратности), перегруппировку на 1-й кратности при 65 МэВ/н и ускорение до энергии 263 МэВ/н; достигнутая интенсивность ускоренного пучка составила 3×10^9 ионов $^{12}\text{C}^{4+}$;
- осуществлен однооборотный вывод пучка из Бустера, настроен канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон, включая обдирку ионов C^{4+} в C^{6+} ;
- запущены вновь установленные на Нуклотроне магнит Ламбертсона и кикер системы инъекции из Бустера;
- инжестированный из Бустера в Нуклотрон пучок адиабатически захвачен в режим ускорения на 5-й кратности и ускорен до энергии 2,8 ГэВ/н; достигнутая эффективность проводки пучка от линейного ускорителя до выхода из Нуклотрона составила примерно 25%;
- реализован стабильный режим медленного вывода с длительностью растяжки 6 с;
- запущены новые системы питания, диагностики и управления канала транспортировки пучка в зону эксперимента BM@N;
- обеспечена стабильная работа комплекса на эксперимент SRC в течение 24 суток.

20 сентября 2022 года стартовал *четвертый цикл пусконаладочных работ* с ускорением пучков ионов Ar и Xe, генерируемых на источнике KRION-6T. В ходе сеанса выполнены следующие работы:

- источник KRION-6T совместно с ускорителем NILAc оптимизирован для производства и ускорения ионов Ar и Xe в разных зарядовых состояниях;
- проведено тестирование оборудования станции для прикладных исследований электронных компонентов СОЧИ пучками ионов Ar^{12+} ; в ионном пучке диаметром

100 мм на микросхеме размером 20×20 мм было достигнуто распределение дозы с неоднородностью менее 10%. При облучении микросхемы XC6SLX16 сечение одно-событийного эффекта (single event effects - SEE) составило $1,9 \times 10^{-2} \text{ см}^{-2}$ при флюенсе $3,5 \times 10^4$ ионов/см²;

- Бустер настроен на ускорение ионов Ar^{12+} , а затем и $^{142}\text{Xe}^{28+}$; осуществлена динамическая коррекция орбиты в течение всего цикла ускорения; достигнутая интенсивность ускоренного пучка $^{142}\text{Xe}^{28+}$ составила примерно 2×10^7 частиц;
- последовательно испытаны две перезарядные мишени из меди и титана, канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон оптимизирован для проводки полностью ободранных ионов Xe^{54+} ;
- получена циркуляция пучка в Нуклотроне;
- пучок ускорен на 4-й кратности ускоряющего ВЧ напряжения до энергии примерно 4 ГэВ/н, интенсивность ускоренного пучка $^{142}\text{Xe}^{54+}$ составила до 1×10^7 частиц;
- реализован медленный вывод пучка с длительностью растяжки до 2 секунд (Рис. 1);
- осуществлено облучение фотоэмульсий по программе проекта Беккерель;
- проведена калибровка новых устройств диагностики и произведен монтаж вакуумной системы канала выведенного пучка;
- пучок доведен в зону установки VM@N, интенсивность пучка по триггерам VM@N составила до 5×10^5 частиц, что удовлетворяет требованиям эксперимента.

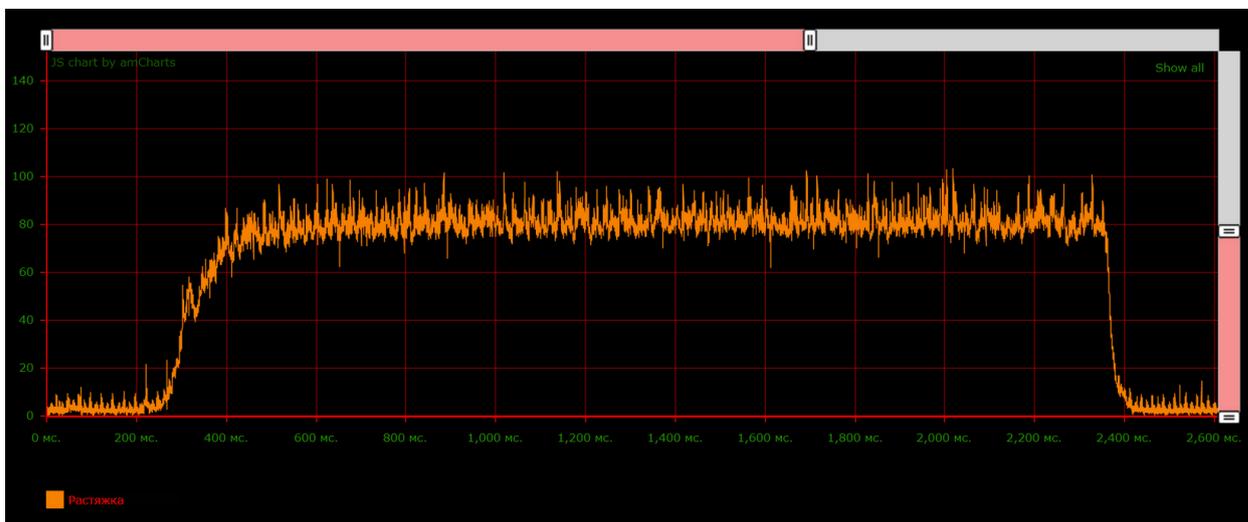


Рис.1. Растяжка выведенного пучка $^{142}\text{Xe}^{54+}$.

Проведены эксперименты по электронному охлаждению пучка $^{142}\text{Xe}^{28+}$ в Бустере на энергии инъекции. В настоящее время осуществляют оптимизацию режима медленного вывода и подготовку к исследованиям по программе VM@N.

Изготовление оборудования каналов транспортировки из Нуклотрона в Коллайдер осуществляется французской фирмой SigmaPhi. Оборудование большинства подсистем

изготовлено, частично поставлено в ОИЯИ, частично находится на хранении в SigmaPhi. Исключением являются часть источников питания, профилометры из сцинтилляционного волокна, системы контроля и управления оборудованием каналов. Активно ведутся переговоры об их поставке.



Рис. 1. Дипольные магниты, установленные в арке туннеля коллайдера.

Все дипольные магниты арок коллайдера установлены и отъюстированы в туннеле (Рис. 2), изготовление и тестирование остальных элементов криомагнитной системы в завершающей стадии. Монтажные работы приостановлены до сдачи инженерной инфраструктуры здания (Рис. 3), расположенной в ключевых помещениях.

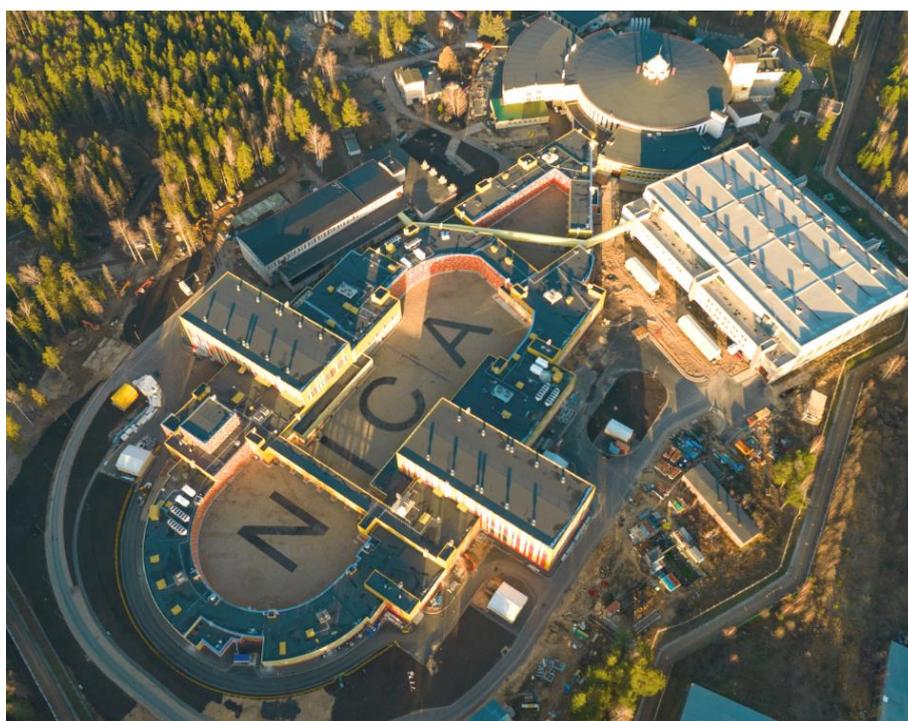


Рис. 2. Ускорительный комплекс NICA.

Продолжена реконструкция Измерительного павильона для прикладных исследований. Для координации деятельности в рамках коллаборации *ARIADNA* создан Комитет по прикладным исследованиям и инновациям на комплексе NICA (Applied Research and Innovation Committee – NICA ARIC), в состав которого вошли признанные на мировой арене ученые по направлениям исследований, соответствующим назначению создаваемых каналов и облучательных станций. В задачи NICA ARIC входит содействие выработке научно-технической политики реализации прикладных исследований на каналах ARIADNA и экспертная оценка предложений пользователей о проведении экспериментов. Изготовлены и испытаны установки для проведения прикладных исследований ИСКРА и СИМБО.

Ожидаемые результаты по проекту Nuclotron-NICA в 2023 году:

- выполнение плановых задач по проекту Нуклотрон-М/NICA: сборка и тестирование основных подсистем, развитие систем диагностики пучка, повышение интенсивности пучка источника поляризованных частиц SPI и источника тяжелых ионов KRION, доведение параметров ЛУТИ до проектных.
- работы по проектированию и изготовлению прототипа криомодуля СП резонаторов для линейного ускорителя протонов; разработка нового линейного ускорителя протонов и дейтронов LILAC;
- ввод в эксплуатацию кольца Бустера и его подсистем, проведение сеансов на инжекционном комплексе проекта NICA в составе ЛУТИ + Бустер + Нуклотрон и доведение его параметров до проектных; развитие и модернизация инженерной инфраструктуры комплекса;
- создание элементов перевода пучка из Нуклотрона в коллайдер: устройств системы вывода из Нуклотрона и системы инжекции в кольца коллайдера;
- завершение строительных работ для размещения элементов и систем коллайдера NICA;
- завершение изготовления и испытания регулярных элементов магнитной системы коллайдера;
- начало серии технологических испытаний всех подсистем коллайдера, подготовка к тестовому запуску и пусконаладочным работам на комплексе NICA;
- запуск новой криогенно-компрессорной станции и комплекса криогенных установок в корп. 1б;
- завершение реконструкции Измерительного павильона для прикладных исследований;

- изготовление и монтаж оборудования каналов для прикладных исследований, станций для облучения электронных компонентов и биологических объектов длиннопробежными ионами ИСКРА и СИМБО;
- формирование предложений по дальнейшему развитию каналов и облучательных станций для прикладных исследований; подготовка программы первых экспериментов на станциях для облучения электронных компонентов и биологических объектов.

Основные результаты, полученные в 2022 году, были опубликованы в работах [1-13].

Проект MPD

Ключевым элементом установки MPD является крупногабаритный **соленоидальный сверхпроводящий магнит**. Для запуска его в работу при $T = 4,5$ К и начала магнитных измерений предполагается выполнить большой цикл работ, включая испытания на прочность и герметичность, электрические тесты, сборку и испытания криогенной системы, а также сборку и подключение водяного охлаждения систем электропитания соленоида. Испытания соленоида предполагают проверку вакуумного объема соленоида, контура азотного теплового экрана, а также контура циркуляции жидкого гелия на прочность и герметичность. Для их проведения был изготовлен испытательный стенд, адаптирована под испытания вакуумная система соленоида (Рис. 4), разработана программа автоматического управления вакуумной системой, предотвращающей выход их строя оборудования или разгерметизацию соленоида в процессе испытаний.



Рис. 4. Испытания и наладка вакуумной системы соленоида.

В ходе испытаний была обнаружена и устранена течь контура азотного экрана в месте пайки медного трубопровода. В это же время специалисты сектора инженерной поддержки MPD совместно с представителями ASG проверили работоспособность разъемов для управляющих и информационных сигналов системы контроля и управления.

Были проверены датчики температуры и датчики напряжения, проверено на целостность около 450 кабелей. Ведется подготовка к измерению карты магнитного поля соленоида.

На основе информации о подключениях от всех детекторных групп (FFD, ECal, TOF, TPC) создается система управления и контроля подсистемами детекторов MPD, которая будет расположена на специальной платформе вблизи соленоида. Разработан и изготовлен стенд в натуральную величину (Рис. 5), который представляет из себя сектор, состоящий из трех балок магнитопровода и расположенными над ними элементами соленоида и силового каркаса.

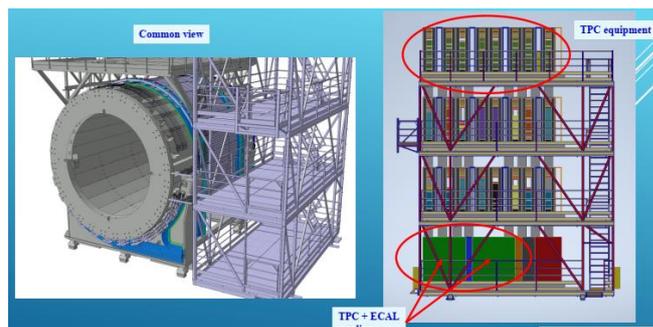


Рис. 5. Слева: стенд для прокладки коммуникаций детектора MPD; справа: электронная платформа.

Стенд позволяет смоделировать положение любого из окон магнитопровода за счет подвижной конструкции силового каркаса, что предоставляет возможность оценить заполняемые кабелями и трубами объемы в требуемой зоне, а также удобство выполнения механических манипуляций при их прокладке и зафиксировать полученные результаты для дальнейшего использования непосредственно на установке MPD.

Завершено изготовление корпуса **TPC**, идет проверка его герметичности. Изготовлено и протестировано 24 серийных РОС камер и 4 запасных. Газовая система TPC передана в опытную эксплуатацию с тестовым объемом. Изготовлена и хранится в тестовом режиме система лазерной калибровки на основе 2-х UV лазеров. Приобретены все панели термостабилизации и радиаторы для электроники системы охлаждения TPC+ECAL. Изготовлено 537 карт системы считывания, ведется тестирование карт и прототипа контроллера. Для системы низковольтного и высоковольтного питания получено 13 крейтов EASY3000 (CAEN), закуплено 6 км LV кабелей с сечением 120 мм² и 50 мм² и HV кабель, заключен контракт на поставку 60 модулей CAEN. Оснастка для монтажа TPC в установку MPD будет изготовлена и поставлена в ОИЯИ в первой половине 2023 г. Монтаж TPC в MPD планируется осуществить в сентябре 2023 г. с дальнейшим проведением его юстировки и тестирования в составе MPD.

В 2022 году продолжалась сборка детекторов MRPC и модулей *TOF MPD*. Еще ранее была произведена вся считывающая и питающая электроника и закуплены все материалы для сборки детекторов и модулей TOF. Производство и тестирование детекторов было полностью завершено. На конец 2022 года изготовлено 320 детекторов при необходимых 280. Собрано 25 из 28 модулей TOF. Производство и тестирование дополнительных модулей на стенде будет продолжено в 2023 году. Завершение сборки планируется к апрелю 2023 года. До начала установки в MPD модули TOF хранятся в специальных стеллажах, обеспечивающих их безопасное хранение (Рис. 6).



Рис. 6. Модули времяпролетной системы детектора MPD.

В 2022 году было завершено производство оборудования интеграции модулей TOF в MPD. Рельсы для установки модулей TOF также изготовлены и установлены на силовой каркас. Сборка оборудования газоснабжения и распределения газовой смеси для времяпролетной системы TOF уже ведется в экспериментальном зале MPD в здании 17. Полностью автоматизированная газовая система TOF с рециркуляцией и очисткой газовой смеси является очень сложной сервисной подсистемой. Планируется, что основное оборудование системы газоснабжения будет готово к установке на свою рабочую позицию в начале 2023 года.

В текущем году было закончено производство первой партии модулей *электромагнитного калориметра ECal*, ответственность за которую лежит на ОИЯИ. Всего произведено 800 модулей, по 16 башен в каждом. Создан стенд для тестирования электроники считывания световых сигналов с башен модулей. Все имеющиеся 600 плат протестированы и определена рабочая точка по напряжению для каждого детектора света SiPM. Создан участок для предварительной проверки и калибровки модулей с использованием космических мюонов с расчетом возможности одновременного

тестирования 32 модулей. Это обеспечит непрерывность работы участка склейки модулей в кластеры (Рис. 7). Было проверено 800 модулей, из них 20 было отправлено на реставрацию (по разным причинам) и возвращены на тестирование и далее на участок склейки кластеров; ни один модуль не был отбракован. Ведется постоянный анализ калибровочных данных, исследуется разброс калибровочных коэффициентов. Проводится сравнение калибровочных коэффициентов для разных типов модулей и модулей от разных производителей (Рис. 8).



Рис. 7. Протестированные модули ECal.

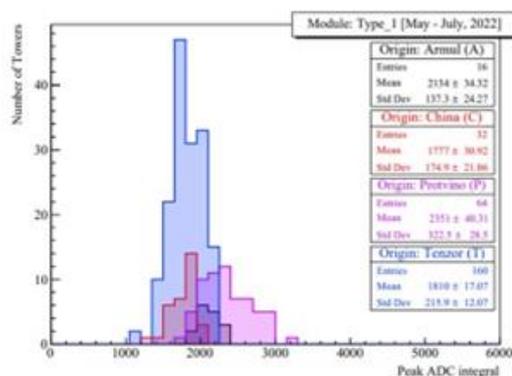


Рис. 8. Распределение максимумов пика энерговыделения от космических мюонов в канале калориметра для модулей разных производителей.

Создан участок склейки модулей в кластеры по 16 штук. Разработаны стапели для склейки модулей с максимальной точностью. Две бригады в сжатые сроки произвели склейку всех имеющихся 800 модулей, из которых собрано 50 кластеров (рис. 9). Стапель для окончательной сборки полусекторов был доработан и оснащен вспомогательными механизмами, проведена его геодезическая юстировка. Начата тестовая сборка корзин полусекторов и смонтированы 4 корзины модулей калориметра (рис. 10).



Рис. 9. Собранные кластеры, готовые к установке в корзины полусекторов ECal.

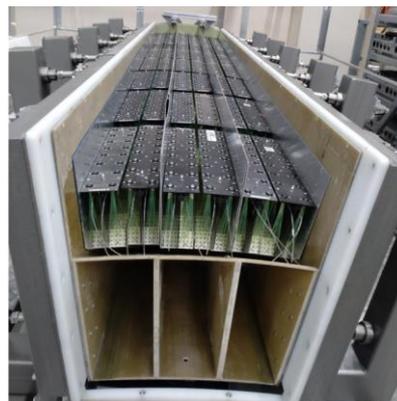


Рис. 10. Собранная корзина полусектора ECal.

В 2022 г. были получены две партии модулей, произведенных в Китае, из трех запланированных. В ближайшее время планируется получить все 800 модулей, изготовление которых является ответственностью Китая. Начавшаяся проверка модулей

показывает их хорошее качество; калибровочные коэффициенты идентичны с модулями, произведенными в России. Сейчас ведутся подготовительные работы для начала производства новой партии модулей в России с тем, чтобы к моменту сборки MPD иметь собранными 37 полусекторов, что составит 75% всего калориметра. Проводятся испытания системы воздушного охлаждения электроники в кластерах. С использованием разработанной системы мониторинга ведутся проверки стабильности работы калориметра на уровне кластеров. К установке в MPD планируется подготовить как минимум 33 корзины (66% от полного количества); предпринимаются усилия для увеличения количества готовых к установке корзин до 41.

Коллаборация MPD, объединяющая усилия более 450 участников из 10 стран, в 2022 году опубликовала обширный обзор, представляющий статус и физические результаты, ожидаемые на начальном этапе эксперимента [14].

Эксперимент BM@N

Целью эксперимента BM@N является исследование динамики реакций и изучение свойств адронов в плотной ядерной материи, изучение околопорогового рождения странных гиперонов и поиск гиперядер во взаимодействиях выведенных пучков ионов Нуклотрона с фиксированными мишенями. В 2022 г. проводился анализ экспериментальных данных, зарегистрированных во взаимодействиях ионов аргона с кинетической энергией 3,2 А ГэВ на ядрах Al, Cu, Sn, Pb на Нуклотроне. По данным центральной и внешней трековых систем и время-пролетной системы были идентифицированы заряженные π^+ , K^+ мезоны, а также протоны и легкие ядерные осколки He^3 , d/He^4 , t . Рисунки 11 и 12 иллюстрируют результаты, представленные в статье [15], подготовленной по результатам исследования рождения π^+ и K^+ мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях.

Реализация программы BM@N по исследованию взаимодействий тяжелых ядер началась в 2022 году с эксперимента в пучке ионов Xe с кинетической энергией до 3,9 А ГэВ. Планируется набрать статистику до $2 \cdot 10^9$ взаимодействий Xe с мишенью CsI. Регистрация взаимодействий Xe+CsI завершится в 2023 г., затем будет проведен анализ полученных экспериментальных данных.

Полученные в 2022 году участниками BM@N результаты опубликованы в [15-18].

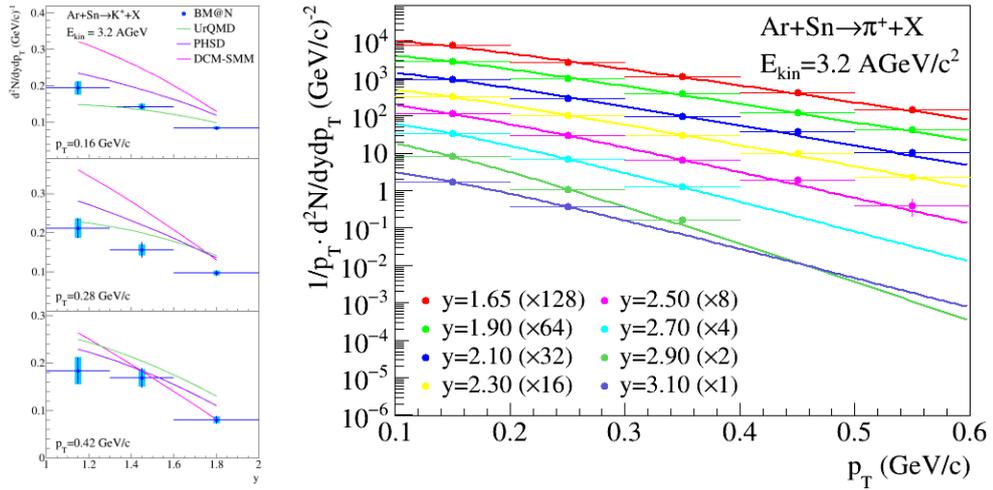


Рис. 11. Слева: спектры по быстрой K^+ мезонов, образующихся во взаимодействиях $Ar+Sn$ в разных интервалах поперечного импульса. Предсказания моделей $DCM-SMM$, $UrQMD$ и $PHSD$ показаны цветными линиями. Справа: инвариантные спектры по поперечному импульсу π^+ -мезонов в разных интервалах по их быстрой.

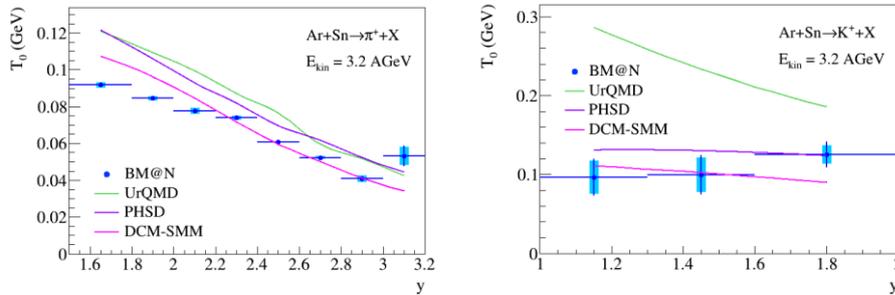


Рис. 12. Зависимость от быстрой обратного наклона T_0 инвариантных p_T -спектров π^+ -мезонов (слева) и K^+ -мезонов (справа), образующихся во взаимодействиях $Ar+Sn$. Предсказания моделей $DCM-SMM$, $UrQMD$ и $PHSD$ показаны цветными линиями.

Детекторы полной конфигурации $BM@N$ для работы в пучках тяжелых ионов были разработаны и установлены в установку (Рис. 13). В состав установки $BM@N$ входят следующие компоненты: кремниевые трековые детекторы пучка, плоскости передних кремниевых трековых детекторов ($FwdSi$), трековые станции, состоящие из детекторов GEM , две стенки время-пролетных детекторов ($ToF-400$ и $ToF-700$), средние и большая катодные стриповые камеры (CSC) и дрейфовые камеры внешней трековой системы, передний адронный калориметр (ZDC), передний адронный годоскоп и стенка сцинтилляционных детекторов перед ZDC , система триггерных детекторов (баррельный детектор, кремниевый детектор множественности, передний триггерный детектор, детекторы пучка), мишенная станция, вакуумный ионопровод до мишени и вакуумный ионопровод из углепластика внутри трековой системы $BM@N$, триггерная система и система сбора данных. Установленные компоненты ионопровода и центральной трековой системы представлены на Рис. 14. Общий вид экспериментальной зоны $BM@N$ представлен на Рис. 15.

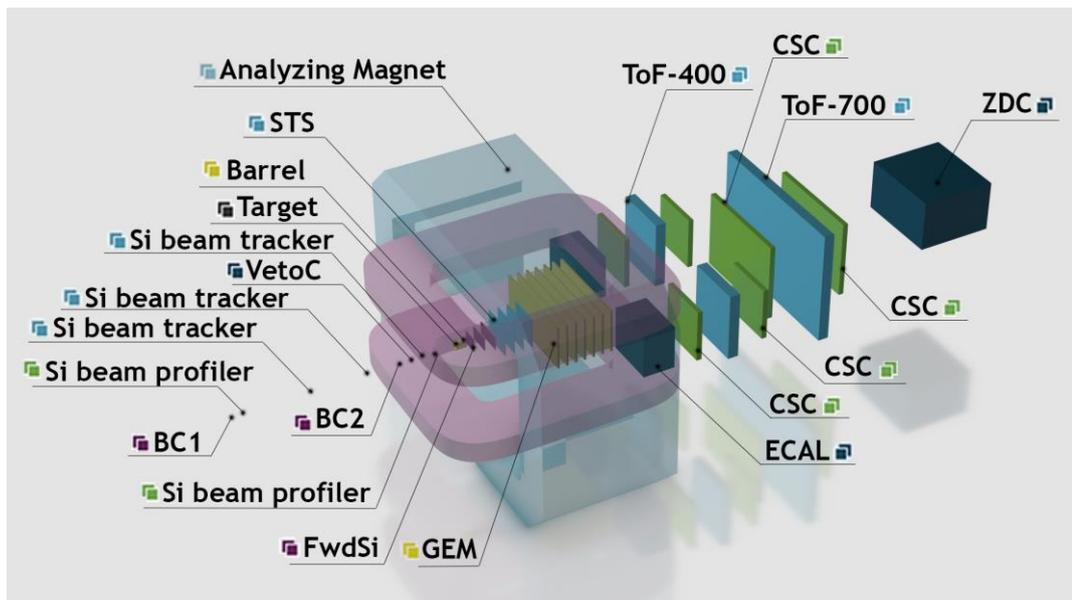


Рис. 13. Полная конфигурация детекторов BM@N для реализации программы исследований в пучках тяжелых ионов.



Рис. 14. Установленные компоненты пучковой трубы и центральной трековой системы, состоящей из кремниевых стриповых детекторов и детекторов GEM.

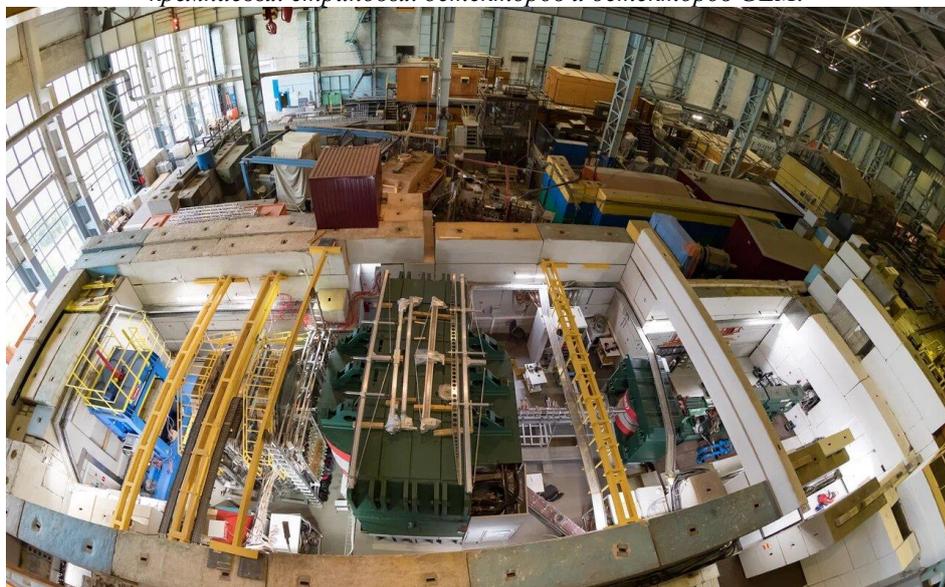


Рис. 15. Общий вид экспериментальной зоны BM@N (осень 2022).

Была исследована возможность реконструкции в эксперименте BM@N гиперонов, образующихся во взаимодействиях Xe+CsI при кинетической энергии пучка 3,9 А ГэВ. На Рис. 16 показаны сигналы Λ и Ξ^- гиперонов, реконструированные с помощью центральной трековой системы BM@N.

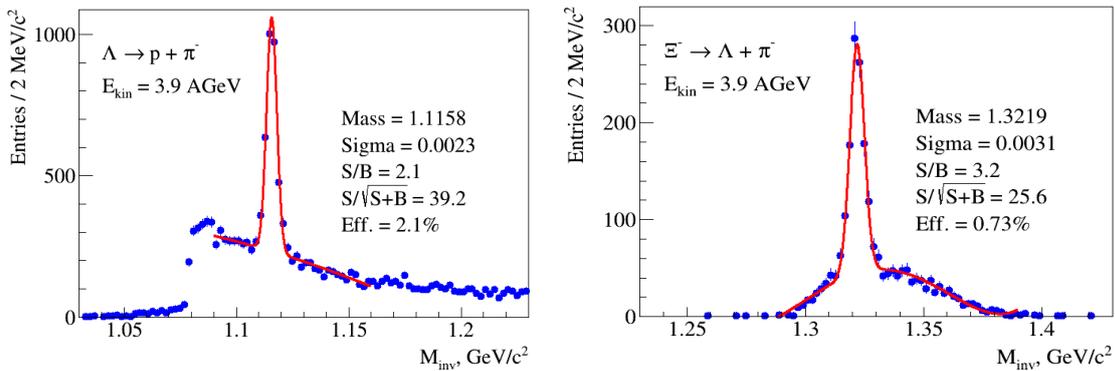


Рис. 16. Спектры инвариантных масс, показывающие сигналы от Λ (слева) и Ξ гиперонов (справа), реконструированных в центральной трековой системе $BM@N$.

Проект SRC

В рамках программы SRC проводятся исследования короткодействующих двухнуклонных корреляций нуклонов, находящихся в течение короткого времени в непосредственной близости друг от друга внутри ядра. Изучаются кинематические особенности процессов выбивания из ядра пары скоррелированных нуклонов. Выведенные ядерные пучки Нуклотрона и водородная мишень позволяют проводить такие эксперименты в обратной кинематике, когда нуклоны выбиваются из ускоренного ядра, налетающего на покоящийся протон, при этом энергии вторичных частиц позволяют восстановить полную кинематику реакции.

В марте 2022 года международная коллаборация SRC при помощи спектрометра $BM@N$ провела эксперимент на пучке ^{12}C с импульсом 3,75 ГэВ/с/нуклон, что стало продолжением успешного пилотного эксперимента 2018 года. Ожидается существенное увеличение статистики полезных событий, получение абсолютных сечений для изучения структуры ядра углерода-12 и идентификации короткодействующих корреляционных пар. Для этого конфигурация установки была значительно изменена (Рис. 17).

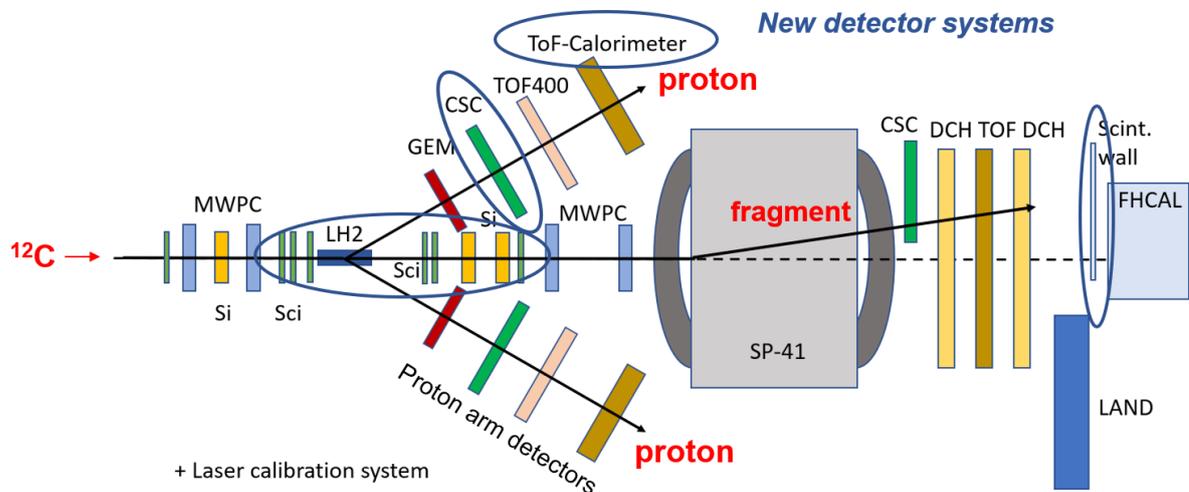


Рис. 17. Конфигурация детекторов эксперимента SRC на установке $BM@N$ в сеансе 2022 года.

Добавленные компоненты включают в себя новую криогенную водородную мишень, стартовые счетчики с улучшенным временным разрешением, расширенный набор детекторов быстрых фрагментов, а также катодно-стриповые камеры и время-пролетные калориметры в двух-плечевом спектрометре (Рис. 18).



Рис. 18. Компоненты подсистем эксперимента на разных этапах сборки установки: слева – времяпролетный калориметр вместе с TOF-400 и катодно-стриповой камерой, справа – криогенная водородная мишень.

В сеансе 2022 года было набрано 185 миллионов событий, что почти в пять раз превышает статистику пилотного сеанса. В настоящее время проводится анализ набранных данных [19, 20]. Проведенный сеанс завершил запланированную программу SRC в рамках эксперимента BM@N. По завершении измерений детекторные системы, созданные коллаборацией SRC, были перенесены на канал эксперимента Гипер-НИС. В 2023 году планируется завершить анализ набранных экспериментальных данных и продолжить подготовку проекта дальнейшей реализации программы SRC на установке Гипер-НИС.

Проект SPD

Главным достижением 2022 года явилось завершение разработки технического проекта SPD. Он основан на результатах, полученных в ходе создания и изучения свойств прототипов элементов детекторов и подсистем SPD. Наиболее значительным изменением в конструкции установки SPD по сравнению с концептуальным дизайн-проектом является замена магнитной системы на классическое расположение соленоидального магнита для детекторов этого типа. Ожидается, что проект SPD будет реализован в два этапа: на первом этапе будет создана базовая конфигурация для измерений с поляризованными пучками протонов и дейтронов при низких энергиях столкновения и светимостях значительно ниже номинальных ($10^{32} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$). Он будет включать мюонную систему, трекер на базе строу детекторов, центральный детектор на основе камер Micromegas, калориметры нулевого угла и детекторы столкновения пучков (BBC). Полная

конфигурация с кремниевым вершинным детектором, системой измерения времени полета, электромагнитным калориметром и аэрогелевым детектором, необходимыми для выполнения основной задачи SPD - изучения поляризованной глюонной структуры нуклонов - будет построена на втором этапе. Технический проект SPD будет представлен на сессии Программно-консультативного комитета по физике частиц в январе 2023 г.

Группа *мюонного детектора* провела большую методологическую работу по созданию прототипов для испытаний на тестовом пучке Нуклотрона и для технологических целей. Завершена сборка и настройка прототипа рабочей системы с полным количеством детекторов MDT (68 шт.) и аналоговой электроникой на базе плат ADB-32 для 1344 каналов считывания. К прототипу планируется подключить также цифровые блоки MFDM-192 для связи с системой сбора данных. Продолжалась работа по оптимизации аналоговой электроники для считывания проводных и полосовых сигналов, совместно с ОАО «Интеграл» (Минск) была изготовлена пробная партия усилителей Ampl-8.52 и Ampl-8.11R.

Проведена техническая разработка основных направлений *криогенной системы* SPD. Для гелиевой системы были рассчитаны два типа криогенных установок - охлаждение и сжижение - из-за двух возможных конструкций сверхпроводящей обмотки детектора. Все криогенные и теплые трубопроводы проложены, готовится документация для утверждения маршрута. Общий дизайн опережает план работ по криогенной системе SPD.

Геометрия и компоновка *электромагнитного калориметра* оптимизированы для размещения внутри криостата соленоида. Были изготовлены и испытаны с космическими мюонами 16 модулей, состоящих из 64 ячеек с размерами 55×55 мм² и 180 слоев чередующейся структуры (0,5 мм Pb + 1,5 мм сцинтиллятор).

Продолжается работа по выбору концепции для считывающей электроники *строу-трекера* SPD: изучаются существующие микросхемы (VMM3/3a и TIGER) и в тесном сотрудничестве с Минском, МИФИ и Зеленоградом разрабатываются новые ASIC, максимально отвечающие требованиям к считывающей электронике строу-трекера SPD.

Первый этап моделирования методом Монте-Карло для проекта TDR *BBC* был выполнен для p+p столкновений при 10 ГэВ и 27 ГэВ, начато моделирование p+d и d+d столкновений. На тестовом канале проведены испытания прототипов сцинтилляционных счетчиков с FEE на базе ToT, DANSS, FERS5200 и NINO. Прототипы, разработанные мексиканскими и чилийскими группами, были протестированы с космическими мюонами. Новая конструкция детектора BBC на базе МКП для SPD была разработана для того, чтобы избежать развития радиочастотных нестабильностей в циркулирующих пучках

коллайдера NICA. Дизайн был одобрен командой ускорителя. Моделирование доказало его применимость для циркулирующих пучков коллайдера NICA. Прототипы детекторов на основе МКП для SPD были протестированы на пучках Нуклотрона и электронных пучках линейного ускорителя LINAC-200.

В рамках создания прототипа *кремниевого вершинного детектора* на основе DSSD были измерены статические характеристики (I-V) и (C-V) крупногабаритных силиконовых детекторов 63×93 мм², разработанных по контракту между ОИЯИ и ЗНТЗ (Зеленоград). Разработана концепция центрального трекера на базе Micromegas для первого этапа запуска SPD, и начаты испытания прототипов.

Аппаратные и логические интерфейсы между *бестриггерной потоковой DAQ* и интерфейсной электроникой мюонной системы были полностью формализованы. Ведутся работы по созданию прототипа FFE-карты для мюонной системы и концентратора первого уровня. Совместно с СПбПУ было разработано техническое задание на использование протокола White Rabbit PTP в системе синхронизации детекторов SPD. Ведется работа над возможностью создания специализированных микросхем для интерфейсной электроники (ASIC) в России и Беларуси. Соответствующие соглашения уже подписаны.

Разработан прототип пакета онлайн-фильтров и прототип автономного *программного обеспечения*, основанного на пакете GAUDI. Ведется работа по созданию модели детектора с использованием пакета GeoModel. Создан прототип распределенной вычислительной системы SPD на основе PANDA и RUCIO. На базе ОИЯИ, СПбГУ и ПИЯФ в течение следующего года планируется развить до полнофункционального инструмента автономное программное обеспечение на основе GAUDI.

Первый этап разработки *тестовой зоны* SPD завершен. Создана инфраструктура для тестирования детекторов, включая экспериментальную комнату и газовую систему, необходимую для работы детекторов. Полным ходом идет процесс подписания Меморандума о взаимопонимании с 32 институтами, участвующими в коллаборации SPD. В течение 2022 года участники группы SPD ОИЯИ выступили с 18 докладами на международных конференциях, 8 работ были опубликованы или направлены в журналы.

Проект DSS

В 2022 г. в рамках проекта DSS были выполнены работы по восстановлению работоспособности внутренней мишени Нуклотрона и аппаратуры проекта DSS. Получены экспериментальные данные для 3-х частичных корреляций в C+C, C+Al, C+Ag и C+W столкновениях на внутренней мишени. Выполнена подготовка к измерениям на пучках Xe и Kr на внутренней мишени Нуклотрона.

Результаты анализа экспериментальных данных по угловым зависимостям дейтронных анализирующих способностей A_y , A_{yy} и A_{xx} упругого дейтрон-протонного рассеяния при энергии дейтрона 1300 МэВ, интерпретация данных в рамках модели многократного рассеяния с учетом возбуждения дельта-изобары в промежуточном состоянии, исследование угловых зависимостей анализирующей способности A_y реакции квази-упругого протон-протонного рассеяния при энергиях 200-650 МэВ/нуклон докладывались на международных конференциях LXXII-Nucleus2022, ICPPA-2022 и AYSS-2022.

Участие в экспериментах на внешних ускорителях

ALICE

Главные усилия группы ОИЯИ в анализе данных и в физическом моделировании в эксперименте ALICE на LHC были сконцентрированы на изучении фемтоскопических (включая трехмерные) корреляций пар каонов и π -мезонов, исследовании рождения векторных мезонов в ультра-периферических Pb+Pb столкновениях и на развитии теоретической модели образования адронов в p+p и Pb+Pb столкновениях [21-24]. В частности, получено предварительное указание на увеличение размеров источников излучения каонов для более центральных событий и меньших поперечных импульсов пар. В событиях с когерентным фоторождением четырех пионов ($\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$) в ультрапериферических Pb+Pb соударениях при энергии 5,02 ТэВ в с.д.м. изучено проявление интерференционных эффектов в спектре их инвариантной массы. Был завершен анализ фемтоскопических корреляций пар K^+K^- для Pb+Pb столкновений при 2,76 ТэВ в рамках модели FSI с использованием свободных параметров для $f_0(980)$, получены радиусы источников излучения каонов при различных импульсах пар, значения массы и ширины мезона. Продолжалось развитие трехкомпонентной модели с описанием импульсных спектров адронов, отношений их выходов и потоков частиц, образующихся в p+p, Xe+Xe и Pb+Pb столкновениях при различных энергиях LHC.

В связи с предстоящей реконструкцией детекторов ALICE решалась задача замены фотодетекторов и последующей электроники для улучшения временного разрешения электромагнитного калориметра PHOS без ухудшения его энергетического разрешения. Разработан фотодетектор, который имеет временное разрешение для фотонов с энергосодержанием в кристалле 1 ГэВ около 140 пс, что в 15 раз улучшает настоящее значение. В дальнейшем планируется создание рабочего варианта электроники, согласование с новой системой сбора данных ALICE, оценка стоимости модернизации

всего спектрометра PHOS и решение вопросов финансирования и организации работы по модернизации.

CMS

Физиками ОИЯИ в эксперименте CMS проведен анализ данных сеанса LHC, проходившего в 2015-2018 гг. на встречных пучках протонов при энергии 13 ТэВ. В объединенном канале рождения пары струй и пары лептонов установлены пределы (на уровне статистической достоверности 95% CL) на массы частиц-кандидатов на роль частиц темной материи (ТМ) M_{DM} и частицы-переносчика взаимодействия с темным сектором M_{med} (Рис. 19). Рассмотрен случай упрощенного сценария ТМ с одной дираковской частицей ТМ ($g_{DM}=1,0$) для псевдовекторного и векторного переносчика, соответственно в сценариях лептофильных ($g_q=g_l=0,1$) и лептофобных ($g_q=0,1$ и $g_l=0,01$) констант связи.

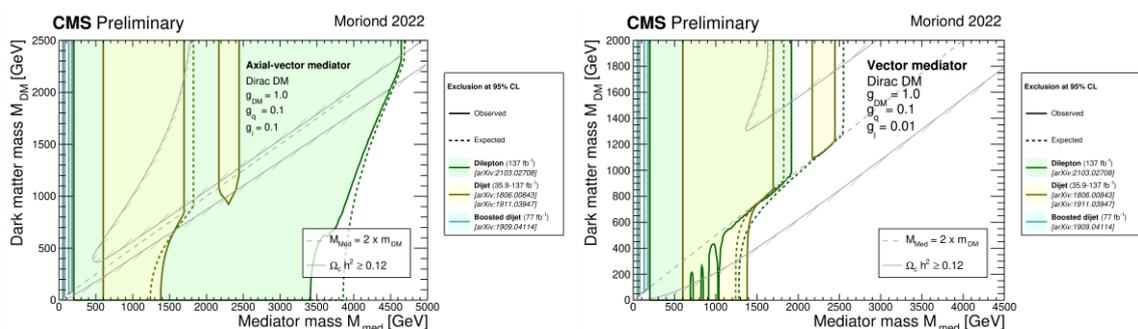


Рис. 19. Пределы (95% C.L.) на массы частиц-кандидатов на роль частиц темной материи M_{DM} и частицы-переносчика взаимодействия с темным сектором M_{med} . Закрашенная область соответствует закрытым значениям масс для псевдовекторного (слева) и векторного (справа) переносчика. Результаты получены на данных 2015-2018 гг. в объединенном канале рождения пары струй и пары лептонов.

Группа ОИЯИ принимает активное участие в модернизации установки CMS для работы в условиях высокой светимости HL-LHC – в создании калориметра высокой гранулярности (HGCal) и модернизации передней мюонной станции ME1/1. В рамках выполнения обязательств ОИЯИ, разработано и изготовлено два прототипа системы охлаждения HGCal, которые планируется испытать на специальном стенде в ЦЕРН. С участием сотрудников ОИЯИ проведены исследования характеристик катодно-стриповых камер (КСК) на установке GIF++ в ЦЕРН.

Грид-инфраструктура ОИЯИ для CMS, представленная центром уровня Tier-1 и центром уровня Tier-2, активно использовалась для моделирования, обработки и хранения данных эксперимента CMS. Система обработки данных Tier-1, увеличенная до 18656 ядер, обеспечила производительность в 1497365,628 kHS06 за 2022 год. В 2022 году обработано более 274 миллионов событий, что составляет 19% от общего числа

обработанных событий и 21% от общего числа задач, выполненных на всех Tier-1 центрах для эксперимента CMS.

В 2022 г. физики ОИЯИ внесли определяющий вклад в подготовку 22 научных работ и одного патента, сделано 38 докладов на различных конференциях [25-30].

NA61

Программа научно-исследовательских работ эксперимента NA61/SHINE включает несколько направлений, одним из которых является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи в релятивистских ядро-ядерных столкновениях при энергиях SPS путем сканирования фазовой диаграммы как по температуре, так и по барионному химическому потенциалу. В окрестности критической точки система нестабильна и должна испытывать флуктуации. Характерные признаки можно было бы увидеть в флуктуациях множественности заряженных частиц [31].

Примером флуктуационного зонда может служить величина:

$$\Sigma(N_F, N_B) = (\langle N_F \rangle \omega(N_B) + \langle N_B \rangle \omega(N_F) - 2(\langle N_F N_B \rangle - \langle N_F \rangle \langle N_B \rangle)) / (\langle N_F \rangle + \langle N_B \rangle).$$

Она характеризует функцию расстояния между прямым (F) и обратным (B) интервалами псевдобыстрот, где N_F и N_B - соответствующие множественности и $\omega(N_{F,B}) = \langle N_{F,B}^2 \rangle - \langle N_{F,B} \rangle^2 / \langle N_{F,B} \rangle$ (рис. 20).

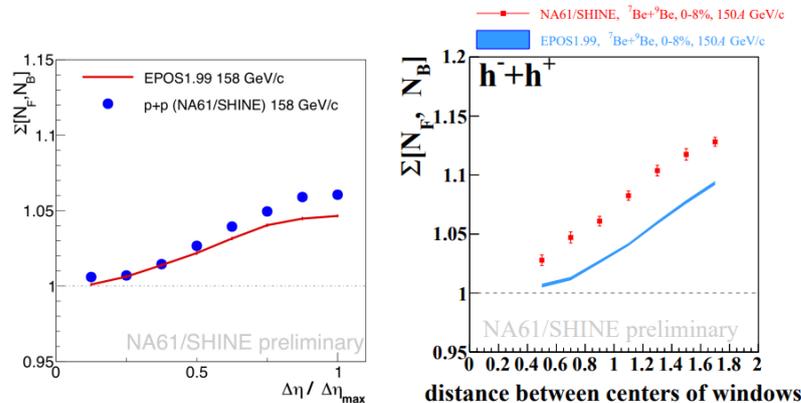


Рис. 20. $\Sigma(N_F, N_B)$ как функция расстояния между прямыми (F) и обратными (B) интервалами псевдобыстрот в неупругих реакциях p+p (слева) и 8% центральных столкновениях Be+Be (справа) при импульсе пучка 158 ГэВ/с и 150А ГэВ/с, соответственно. Точки представляют экспериментальные данные для всех заряженных частиц, линии показывают результаты EPOS1.99 при акцептансе NA61/SHINE.

Изменение значения акцептанса псевдобыстрот для $\Sigma(N_F, N_B)$ соответствует сканированию барионного химического потенциала μ_B на стадии вымораживания. Разработанный подход означает, что $\Sigma(N_F, N_B)$ должно быть равно 1 для распределений Пуассона N_F и N_B в модели независимых источников и 0 для отсутствия флуктуаций $N_F - N_B$. Результаты анализа p+p и Be+Be данных не показывают какого-либо немонотонного поведения. Изучение данных по отрицательно заряженным частицам и суммарным зарядом в p+p взаимодействиях также не выявляет какого-либо

существенного разрыва, которого можно было бы ожидать, если бы система приближалась к критической точке.

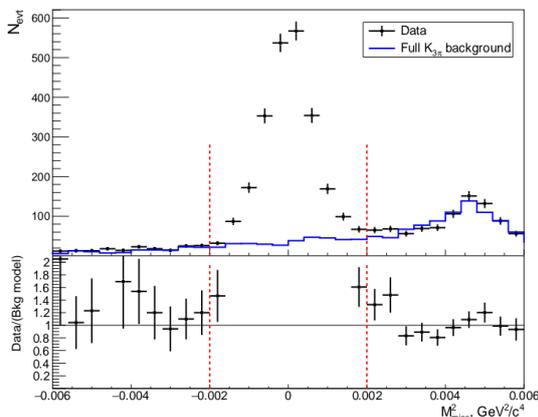
В настоящее время анализ накопленных данных NA61/SHINE с другими ядрами и энергиями продолжается, опубликовано 8 научных работ. В частности, показано удовлетворительное описание данных NA61/SHINE в рамках модифицированного автомодельного подхода для отношений выходов K^+/π^+ и K^-/π^- как функции \sqrt{s} в столкновениях $Be+Be$ как функции \sqrt{s} . Показано сходство этих распределений с наблюдаемыми для $p+p$ столкновений в широком диапазоне начальных энергий [32].

NA62

Эксперимент NA62 на SPS в ЦЕРН посвящен изучению очень редкого распада заряженного каона на заряженный пион, нейтрино и антинейтрино. Помимо участия в разработке, производстве, калибровке и поддержке работы магнитного спектрометра NA62, разработке программного обеспечения для моделирования и реконструкции событий, группа ОИЯИ проводит анализ экспериментальных данных NA48/2 и NA62. В 2022 году сотрудники представили 7 докладов на международных конференциях.

Был проанализирован набор данных, набранный в эксперименте NA62 на SPS ЦЕРН в 2017-2018 гг. и включающий $2,8 \times 10^4$ кандидатов в распады $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ с пренебрежимо малым фоном [33]. Измеренная модельно-независимая вероятность распада составляет $(9,15 \pm 0,08) \times 10^{-8}$, что в три раза точнее предыдущих измерений.

Предварительные результаты поиска редкого распада $K_{\mu 4}^{00}$, никогда ранее не наблюдавшегося, были представлены на международных конференциях [34, 35]. Из 2437 обнаруженных кандидатов в сигналы с отношением сигнала к фону около 6 (Рис. 21) с высокой точностью определена вероятность распада: в области квадрата дилептонной массы выше $0,03 \text{ ГэВ}^2/c^4$ вероятность оказалась равной $BR(K_{\mu 4}^{00}, S_1 > 0,03) = (0,65 \pm 0,03) \times 10^{-6}$. Результат $BR(K_{\mu 4}^{00}) = (3,4 \pm 0,2) \times 10^{-6}$ для полного фазового



пространства зависящий от экстраполяции модели распада, находится в разумном согласии с предсказанием форм-фактора R из однопетлевого приближения киральной теории возмущений.

Рис. 21. Полученное в эксперименте NA48/2 распределение недостающих для событий сигнала $K_{\mu 4}^{00}$, с результатами фитирования фона.

В 2023 г. будет выполнен анализ данных NA62, собранных в 2014-2022 годах, для изучения следующих распадов: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$,

$K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^+ e^- e^+ \gamma$. Будут опубликованы окончательные результаты измерений распадов $K_{e3}\gamma$ и $K_{\mu 4}^{00}$, планируется провести поиск сигнатур легкого сголдстино.

NA64

Группа ОИЯИ в эксперименте NA64 на SPS отвечает за координатные трековые детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок, принимает участие в развитии математического обеспечения для онлайн-мониторинга и сбора данных, в моделировании, реконструкции и анализе экспериментальных данных по поиску «темного» фотона и иных проявлений «темной» материи.

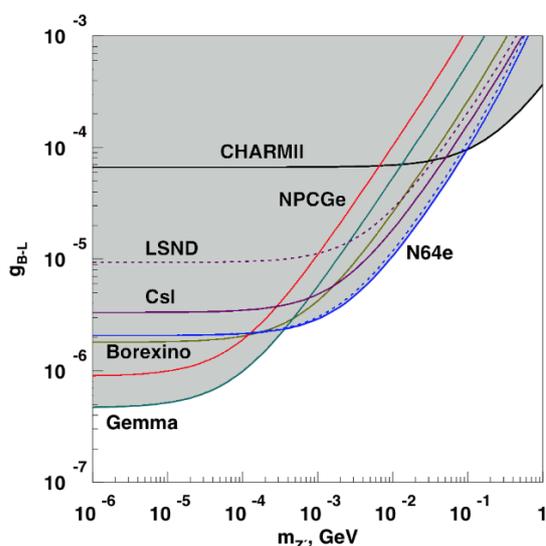


Рис. 22. Результат NA64 по исключению (90% C.L.) области существования Z' в модели нарушения $B-L$ симметрии в зависимости от константы связи g_{B-L} и массы $m_{Z'}$ в сравнении с результатами нейтринных экспериментов TEXONO, GEMMA (реактор), BOREXINO (солнечные нейтрино), LSND и CHARM II (ускорительные эксперименты).

В 2022 году было проведено два сеанса набора данных – на мюонном и на электронном пучках. Продолжается анализ полученных и ранее зарегистрированных данных [36-38]. Кроме поиска легкой темной материи и ее медиатора – темного

фотона, данные NA64 позволяют проверять целый ряд моделей расширения СМ в области масс кэВ-ГэВ, включающих слабо-взаимодействующие короткоживущие частицы (A' , Z' , Axion Like Particles, и др.). На основе $3,4 \cdot 10^{11}$ eot, зарегистрированных в сеансах 2016 - 2021 гг., был проведен поиск легкого Z' бозона, возникающего в моделях расширения СМ, связанных с нарушением барион-лептонной симметрии. За генерацию Z' отвечает механизм «темного» тормозного излучения в реакции рассеяния 100 ГэВ электронов на ядерной мишени с последующим распадом Z' на два нейтрино. Недостающая энергия может быть измерена установкой NA64. Результат проведенного анализа на 90% уровне достоверности исключил данный механизм образования Z' бозона в диапазоне масс от 1 кэВ до 1 ГэВ, существенно дополнив ранее имеющиеся ограничения, полученные в серии нейтринных экспериментов (Рис. 22).

COMPASS

Группа ОИЯИ в эксперименте COMPASS на SPS в CERN участвовала в сеансе с мюонным пучком с импульсов 160 ГэВ/с, рассеивавшимся на поперечно поляризованной ${}^6\text{LiD}$ мишени, обеспечивая стабильную работу системы идентификации рассеянного мюона MW1 и адронного калориметра HCAL1. Полученные данные позволят завершить работу по изучению вкладов кварков в поперечную спиновую структуру нуклона. Были получены предварительные результаты для продольной двойной спиновой асимметрии в эксклюзивном рождении ρ^0 -мезона с использованием протонных и дейтронных данных COMPASS, а также для константы связи $F_{3\pi}$ в эксклюзивной реакции $\pi^- A \rightarrow \pi^- \pi^0 A$.

В текущем году сотрудники сделали 2 доклада на международных конференциях и опубликовали две работы [39, 40].

STAR

В 2022 году состоялся первый сеанс с поперечно-поляризованными протонами с энергией 510 ГэВ по программе Cold QCD. Новые возможности установки STAR после ее модернизации позволили провести измерения в области псевдобыстот $-1,5 < \eta < 1,5$ (mid-rapidity) и $2,8 < \eta < 4,2$ (forward rapidity), соответствующей диапазону по переменной Бьеркена $0,005 < x < 0,5$. Это позволит изучить распределения Сиверса, трансверсити, функции фрагментации Коллинса в ранее недоступных областях и расширить программу по анализу асимметрий рождения W^\pm и Z^0 бозонов.

Выполнен анализ экспериментальных данных, полученных на установке STAR в программах энергетического сканирования BES-I и BES-II:

— Проведен анализ фемтоскопических корреляций тождественных пионов в Au+Au столкновениях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 3,0$ и $3,2$ ГэВ/нуклон в программе «Fixed-Target» (FXT).

— Изучены флуктуации нет-протонов при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ в Au+Au столкновениях для поиска критической точки. Измерены протонные кумулянты

высокого порядка [41]. Полученное отношение C_4/C_2 при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ воспроизводится адронной транспортной моделью (UrQMD). Это означает доминирование адронных взаимодействий при этой энергии, следовательно, область возможного существования критической точки относится к более высоким энергиям.

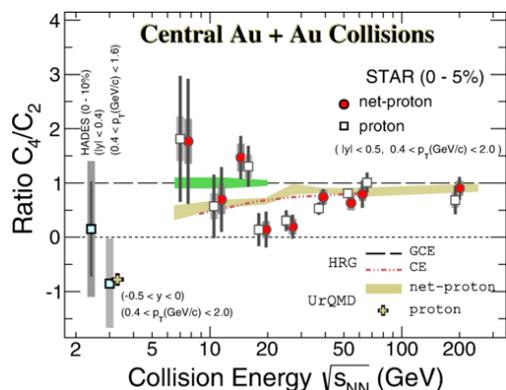


Рис. 23. Отношение протонных кумулянтов C_4/C_2 при разных энергиях.

HADES и CBM

В рамках проекта HADES продолжались работы по модификации OPER модели для моделирования процессов $p+p \rightarrow p\pi^+\pi^-$ и $n+p \rightarrow n\pi^+\pi^-$ при энергиях 3,0-4,5 ГэВ, велась разработка программного обеспечения для кинематического анализа реакций.

Был создан экспериментальный стенд на базе модуля TRB3 для работы с FE электроникой для чтения информации с SiPM и МРПК. Выполнено тестирование 16-канальной платы с SiPM считыванием для калориметрии CBM. Направлена в печать статья с результатами оптимизации защиты фотоумножителей RICH детектора. Для мюонной системы CBM подготовлены два прототипа строу-детектора $50 \times 50 \text{ см}^2$ с электроникой считывания на базе микросхемы AST1-1.

События

Девятое по счету трехдневное совещание коллаборации MPD прошло в Дубне в гибридном формате в апреле 2022 года. Общее число участников из 10 стран превысило 150 человек, из которых 60 присутствовали в зале заседаний. Было представлено 40 докладов по всем аспектам работы коллаборации: текущее состояние и график создания установки MPD, развитие компьютерной инфраструктуры, тестирование и запуск центрального сверхпроводящего магнита, создание внутреннего трекера, центральных и передних детекторных систем. Подробно обсуждались проблемы, связанные с введением международных санкций и других ограничений. В.Г.

Рябов был избран в должности и.о. руководителя коллаборации.

Десятое коллаборационное совещание MPD состоялось в ЛФВЭ в ноябре 2022 года. Более половины из 157 зарегистрированных участников мероприятия смогли принять в нем участие в очном порядке, заслушав 35 докладов. В центре внимания были работы по подготовке соленоида к охлаждению по временной схеме, намеченной на начало 2023 года, после чего будут проведены измерения карты магнитного поля и можно будет приступить к монтажу детекторных подсистем. По результатам работы пяти физических групп была опубликована первая коллаборационная статья в EPL. В настоящее время в состав коллаборации MPD входит около 500 специалистов из 34 институтов из 10 стран.

В сентябре 2022 года в ЛФВЭ состоялось девятое совещание коллаборации BM@N. В совещании приняли участие около 130 участников коллаборации из 10 институтов России, Болгарии и Израиля. При этом более 100 сотрудников участвовали в

совещании очно. В программе совещания было 30 докладов и обсуждение планов подготовки к сеансу по изучению взаимодействия ядер мишени CsI с пучком ионов ксенона. На совещании также обсуждалась программа предстоящих физических исследований, готовность алгоритмов восстановления взаимодействия и программного обеспечения эксперимента к приему и мониторингу большого объема данных.

В октябре сотрудничество SPD провело совещание в гибридном формате в ОИЯИ. Эта встреча была третьей для SPD, но впервые члены коллаборации из разных институтов получили возможность встретиться лично. В мероприятии приняли участие около 140 человек, более 70 из которых присутствовали лично. В Дубну приехали ученые из 12 научных центров России, Армении и Беларуси. Коллеги из Италии, Франции, Сербии, Чехии и Китая приняли участие в совещании дистанционно.

Список литературы

1. N. Khodzhbagiyan, V. Kekelidze, A. Merkuriev et.al., “Quadrupole Superconducting Model for Update of the Nuclotron Synchrotron”, IEEE transactions on applied superconductivity: a publication of the IEEE Superconductivity Committee, 32, 6, 1-4, 2022.
2. O. Anchugov, D. Shvedov, V. Kiselev et.al., “A Kicker Magnet for Beam Extraction from the Booster into the Booster–Nuclotron Beamline of the NICA Complex”, Instruments and Experimental Techniques, 65, 3, 474-481, 2022.
3. N. Khodzhbagiyan, A. Kotova, G. Kuznetsov et.al., “Solenoid for Spin Physics Detector at NICA from the Nuclotron-Type Superconducting Cable”, Physics of Particles and Nuclei Letters, 19, 4, 2022.
4. О. С. Козлов, С. А. Костромин, С. А. Мельников и др., «Актуальные задачи исследования динамики пучка в коллайдере NICA», Физика элементарных частиц и атомного ядра, 53, 5, 1220 - 1273, 2022.
5. А. В. Алфеев, И. Л. Гурьева, В. Н. Емельяненко, В. А. Михайлов, Ю. А. Цветкова, «Геодезический контроль структурных магнитов ускорительного комплекса ЛФВЭ ОИЯИ», Письма в ЭЧАЯ, 20, 4, 2022.
6. Г. А. Филатов, А. А. Сливин, Е. М. Сыресин и др., «Прогресс в создании новых каналов для прикладных исследований комплекса NICA», Письма в ЭЧАЯ, 19, 5, 412 - 417, 2022.
7. А. А. Сливин, А. В. Агапов, А. В. Бутенко и др., «Сооружение станций для прикладных исследований на ускорительном комплексе NICA», Письма в ЭЧАЯ, 19, 5, 421 - 425, 2022.
8. А. А. Котова, Д. Н. Никифоров, Г. Г. Ходжибагиян, «Термодинамические характеристики дублетов квадрупольных магнитов бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA», Письма в ЭЧАЯ, 19, 6, 643 - 650, 2022.
9. G. Filatov, A. Slivin, A. Agapov et.al., “Beam lines and stations for applied research based on ion beams extracted from Nuclotron”, Proceedings of the IPAC2022, Bangkok, Thailand, 2673-5490, 2022.
10. E. Syresin, A. Butenko, S. Kostromin et.al., “Challenges of low energy hadron colliders”, Proceedings of the IPAC2022, Bangkok, Thailand, 2022.
11. A. Slivin, A. Agapov, A. Baldin et.al., “Commissioning of the SOCHI applied station beam and beam transfer line at the NICA accelerator complex”, Proceedings of the IPAC2022, Bangkok, Thailand, 2673-5490, 2022.

12. E. Syresin, O. Brovko, A. Butenko et.al., “NICA ion collider and plans of its first operations”, Proceedings of the IPAC2022, Bangkok, Thailand, 2022.
13. E. Syresin, A. Butenko, S. Kostromin et.al., “Conception of high intensity polarized proton beam formation in NICA collider”, Proceedings of the IPAC2022, Bangkok, Thailand, 2673-5490, 2022.
14. MPD Collaboration, “Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA”, Eur.Phys.J.A 58 (2022) 7, 140.
15. S. Merts (BM@N Collaboration), “Studies of dense baryonic matter with the BM@N experiment at the Nuclotron”, Nucleus-2022, Moscow State University, 07.11.2022.
16. M. Mamaev (BM@N Collaboration), “The Baryonic Matter@Nuclotron Experiment: upgrade and physics program overview”, 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022).
17. D. Baranov et al., “Feasibility studies of strangeness production in heavy-ion interactions at the BM@N experiment using Monte Carlo simulations”, Phys.Scripta, 97 (2022) 8, 084003.
18. F. Guber et al., “Study of the Spectator Matter in Heavy Ion Collisions at the BM@N Experiment”, Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 626-630.
19. T. Atovullaaev et al., “Magnetic shielding for the PMTs at the two-arm spectrometer for the SRC project at BM@N”, Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 4, 408-411.
20. A. Driuk, S. Merts and S. Nemnyugin, “Global Tracking in the BM@N Experiment”, Phys. Part. Nuclei (2022) 53, 552–555.
21. G. Romanenko (ALICE Collaboration), “Identical charged kaons femtoscopic analysis in PbPb collisions at 5.02 TeV in ALICE”, Nucleus-2022, Moscow State University, 07.11.2022.
22. V. Pozdnyakov (ALICE Collaboration), “Photoproduction of vector mesons in ultra-peripheral heavy-ion collision with ALICE”, 56th Rencontres de Moriond 2022, France.
23. V. Pozdnyakov (ALICE Collaboration), “Recent results on ultra-peripheral heavy ion collisions with ALICE at the LHC”, 14th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2022), Orlando, Florida, USA, 2022.
24. ALICE Collaboration, “ $K_s^0 K_s^0$ and $K_s^0 K_s^+$ femtосcopy in pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ and 13 TeV”, Phys. Lett. B833 (2022) 137335.
25. CMS Exotica Summary plots for 13 TeV data Moriond2022, https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/SummaryPlotsEXO13TeV#DM_summary_plots.
26. D. Barducci et al., "Search for a $\mu^+\mu^-+b$ -jet event excess at the dimuon mass of 28 GeV in pp collisions at 13 TeV using full Run II dataset", Analysis Note AN-21-089, CERN, 2021, version of Nov. 2022.
27. В.А. Зыкунов, «Эффекты электромагнитных радиационных поправок в процессе рождения лептонных пар при фотон-фотонном слиянии на LHC», ЯФ 85 № 5 (2022) 366–380.
28. S. Shmatov, “Searches for New Physics with the CMS Experiment at the LHC”, International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, July 18–21, 2022, Dubna.
29. M. Savina, “Dark Matter Search at the LHC”, International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, July 18–21, 2022, Dubna.
30. A. Lanyov, “Physics with Dimuons in the CMS Experiment at the LHC”, The Workshop “The Physics of the Dimuons at the LHC” (DIMUONS2022), June 23-24, 2022, Dubna.
31. D. Prokhorova (NA61/SHINE Collaboration), “Fluctuations and Correlations Study at NA61/SHINE”, Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement, Vol. 14 (2021) No 3.
32. G. Lykasov, A. Malakhov and A. Zaitsev, “Ratio of kaon-to-pion production cross-sections in BeBe collisions as a function of \sqrt{s} .”, Eur. Phys. J. A 58, 112 (2022).
33. E. Cortina Gil et al. (NA62 collaboration), “A measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ decay”, JHEP 11 (2022) 011.

34. D. Madigozhin (NA48/2 Collaboration), “Precise measurement of the Decay $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ “, XLI International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2022), Italy, Bologna.
35. A. Korotkova (NA48/2 Collaboration), “First measurement of the $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ ($K^{00}_{\mu 4}$) decay”, 56th Recontres de Moriond, 2022, La Thuile AO, Italy.
36. NA64 Collaboration, “Search for a New B-L Z' Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN”, Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 16, 161801, e-Print: 2207.09979 [hep-ex]
37. NA64 Collaboration, “Search for a light Z' in the L_μ - L_τ scenario with the NA64-e experiment at CERN”, Phys.Rev.D 106 (2022) 3, 032015; e-Print: 2206.03101 [hep-ex]5.
38. NA64 Collaboration, “Leptonic scalar portal: Origin of muon g-2 anomaly and dark matter?”, Phys.Rev.D 106 (2022) 1, 1; e-Print: 2202.04410 [hep-ph].
39. COMPASS Collaboration, “Probing transversity by measuring Λ polarisation in SIDIS”, Phys.Letter B824 (2022) 136834.
40. COMPASS Collaboration, “The exotic meson $\pi_1(1600)$ with $JPC = 1^{-+}$ and its decay into $\rho(770)\pi$ ”, Phys.Rev. D105 (2022) 1, 012005.
41. STAR Collaboration, “Measurements of Proton High-Order Cumulants in $\sqrt{s_{NN}}=3$ GeV Au+Au Collisions and Implications for the QCD Critical Point”, Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 202303