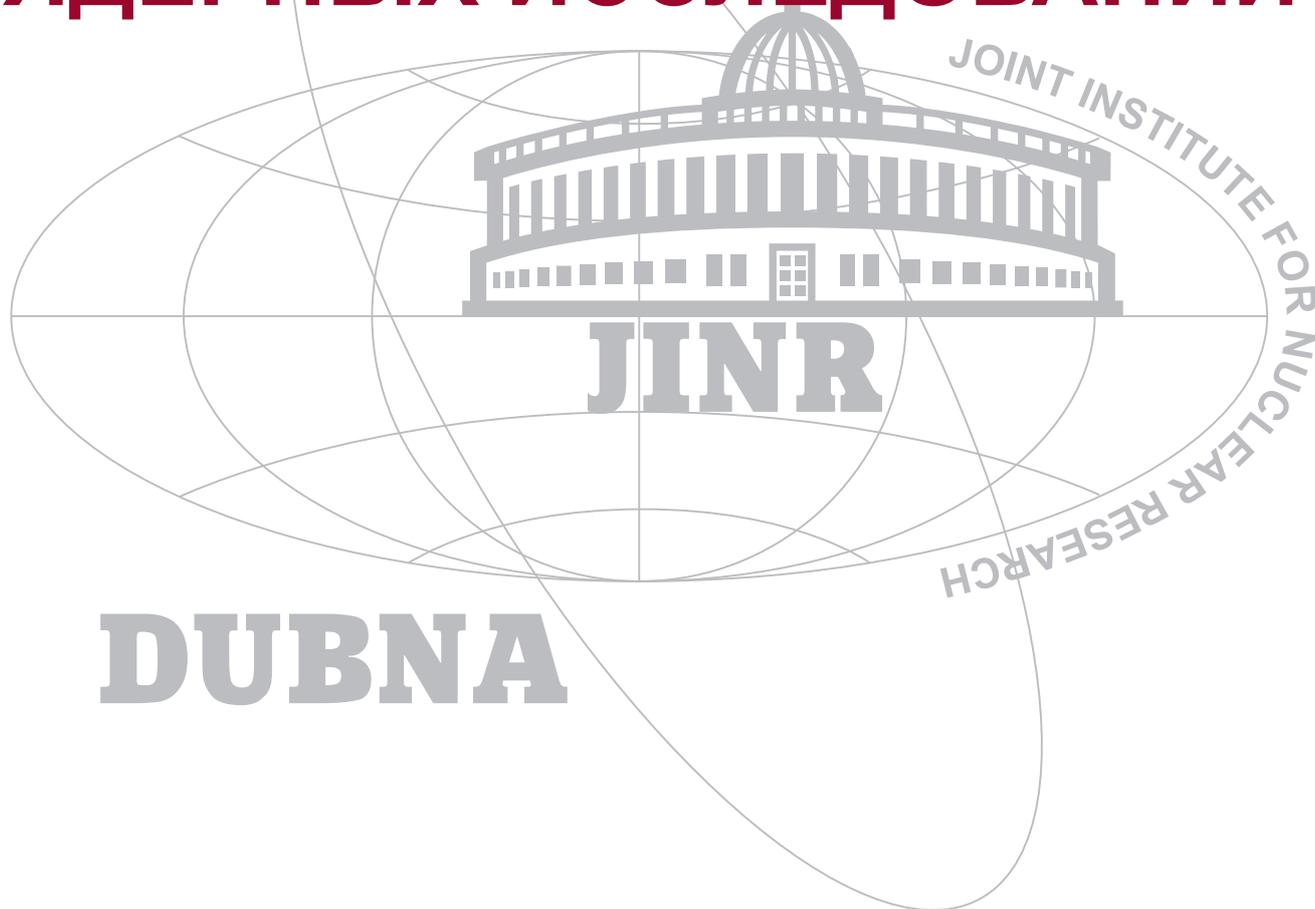


2021

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ





ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ИМ. В. И. ВЕКслера и А. М. БАЛДИНА

Деятельность Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина в 2021 г. была сосредоточена на создании, развитии и вводе в эксплуатацию отдельных узлов уско-

рительного комплекса «Нуклотрон–NICA» и экспериментальных установок MPD, VM@N и SPD. Продолжались эксперименты и на внешних ускорителях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В СОЗДАНИИ КОМПЛЕКСА NICA

Проект «Нуклотрон–NICA»

Бустер и каналы транспортировки пучка.

В сентябре 2021 г. системы бустерного синхротрона — одного из узловых элементов ускорительного комплекса тяжелых ионов NICA — были выведены на проектные параметры. В ходе сеанса в кольце бустера пучок ионов железа впервые ускорен до проектной энергии 578 МэВ/нуклон (рис. 1) [1]. В сеансе был также осуществлен полноценный запуск оборудования системы электронного охлаждения бустера и впервые в России получено электронное охлаждение пучка тяжелых ионов. Эксперимент по охлаждению пучка проведен с ионами $^{56}\text{Fe}^{14+}$ при энергии инжекции 3,2 МэВ/нуклон.

Важным итогом сеанса явилось успешное завершение совместных работ специалистов ОИЯИ и ИЯФ СО РАН по созданию систем вывода пучка из бустера и канала транспортировки пучка в нуклотрон. После настройки магнитной системы канала и испытания системы управления оборудованием успешно запущен уникальный ударный магнит для вывода пучка из бустера с рекордным уровнем магнитного поля 2 кГс. Запущена система «бампа» (локального смещения замкнутой орбиты для быстрого вывода пучка из бустера), и получен вывод пучков двух сортов ионов — гелия и железа — при энергии 240 МэВ/нуклон с дальнейшей транспортировкой по каналу, на конечном участке которого пучки

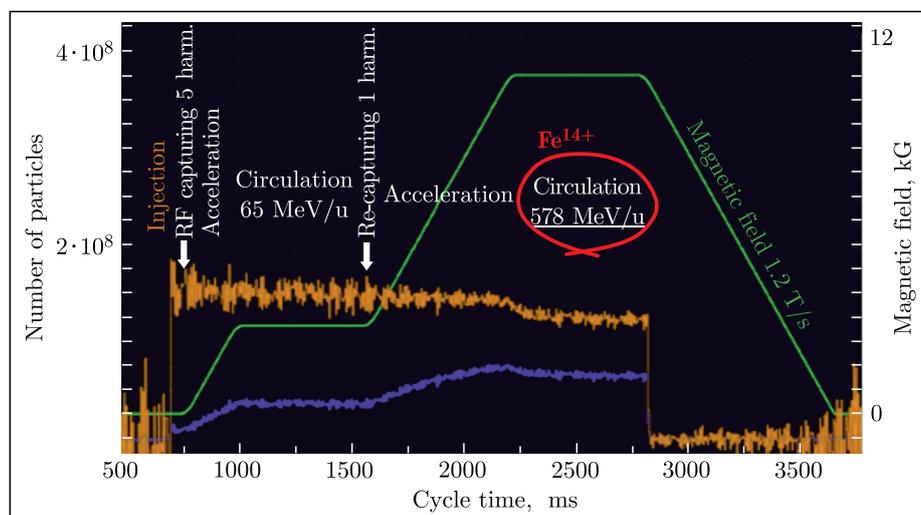


Рис. 1. Сигнал с датчика тока пучка в бустере

ионов были детектированы датчиками тока и положения пучка, а также получены снимки профилей пучка с люминофорного экрана (рис. 2).



Рис. 2. Пучок ионов $^{56}\text{Fe}^{14+}$ на люминофорном экране в конце канала транспортировки пучков бустер-нуклотрон

Завершается монтаж новой системы инжекции пучка в нуклотрон и создание тяжелоионной цепочки, которая в дальнейшем будет основной при работе с коллайдером NICA и физической установкой VM@N. В январе 2022 г. планируется провести первый сеанс работы с полным циклом ускорения на комплексе NICA.

Активно развивается инфраструктура для проведения прикладных и радиобиологических исследований в рамках коллаборации ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advance Development at NICA iAcility). Уже создан канал транспортировки пучка ионов из линейного ускорителя ЛУТИ к станции SOCHI (Station of CHip Irradiation), предназначенной для облучения микросхем. В декабре 2021 г. был проведен первый цикл пусконаладочных работ по настройке магнитной системы канала, пучок был проведен до станции SOCHI, где был зарегистрирован несколькими детекторами. В 2022 г. ожидается завершение монтажа оборудования трех станций для прикладных исследований и их тестирования.

Коллайдер. Коллайдерный комплекс NICA размещается в здании №17. Статус готовности здания на конец 2021 г. выглядит следующим образом: полностью (на 100 %) выполнены работы по устройству свайного поля, конструкциям железобетона, устройству силовых полов, монтажу металлических конструкций, земляным работам и устройству временных дорог, возведению перегородок из кирпича и пеноблока, устройству пристенного дренажа здания, выносу сетей водопровода из-под пятна дороги; в стадии завершения находятся работы по устройству кровли (93 %), фасадов (94 %), отделке (84 %), инженерным системам (28 %), устройству бытовой и ливневой канализации (92 %), монтажу тепловых пунктов (75 %), внутренних дверей (40 %) и благоустройству (82 %).

Изменение сроков завершения строительных работ обусловлено в первую очередь существенным (на 50 %) увеличением объемов строительства уже на стадии реализации проекта. Пандемия корона-

вируса также сказалась на сроках исполнения контрактов.

В 2021 г. продолжалось производство и тестирование оборудования подсистем коллайдера. На участке сборки и испытания сверхпроводящих магнитов уже изготовлено и протестировано 100 % дипольных и 65 % квадрупольных магнитов коллайдера.

Продолжались работы по реконструкции электросетей. Получено разрешение на эксплуатацию 11 модернизированных подстанций 6 кВ общей мощностью до 33,6 МВт.

Криогенный комплекс. На центральной компрессорной станции в корпусе 1Б смонтировано новое криогенное оборудование: гелиевый ожижитель производительностью более 1000 л/ч, гелиевый рефрижератор для охлаждения бустера на 2000 Вт при температуре 4,5 К, четыре блока очистки сжатого гелия, азотный ожижитель на 1300 кг/ч и реконденсатор паров азота от экранов бустера производительностью 500 кг/ч.

Крупномасштабное криогенное оборудование, расположенное вне зданий, полностью готово к работе: контейнер жидкого гелия емкостью 40 м³, газгольдеры объемом по 1000 м³ для газообразного гелия и азота.

В целом на конец 2021 г. объем выполненных работ по созданию проектной конфигурации комплекса «Нуклотрон–NICA» составляет около 85 %.

Проект MPD

Формирование коллаборации MPD было в целом завершено в 2020 г. Сейчас в ней сотрудничают 42 организации из 12 стран и свыше 500 участников. Проведено восемь коллаборационных совещаний, на которых обсуждался и координировался ход работ по исполнению проекта. В специальном павильоне в основном здании №17 комплекса NICA, где будет расположен детектор MPD, уже начался монтаж поступающего оборудования, параллельно идет монтаж инженерных коммуникаций.

Сверхпроводящий соленоид MPD. В конце декабря 2020 г. магнитопровод соленоида был полностью собран в зале MPD. Контрольные измерения показали высокое качество сборки, необходимое для получения однородного магнитного поля в детекторе. Отклонения большинства измеренных геометрических размеров и параметров находились в пределах 0–200 мкм при длине магнитопровода 8970 мм и диаметре 6670 мм. В июле 2021 г. соленоид был установлен в яме. Измерение положения яма и соленоида после установки показало, что смещения осей не превышают допустимых 2 мм.

Моделирование магнитного поля специалистами ASG на основе реального положения магнита показало удовлетворительные результаты без необходимости дальнейшей юстировки соленоида относительно яма. Сейчас магнитопровод собран до 13-й балки. Дальнейшая сборка яма предполагает установку опорных колец и сборку до 28-й последней балки.

В сентябре 2021 г. успешно проведен первый цикл прочностных испытаний соленоида, по результатам которых был сделан вывод о герметичности контуров при давлении 10 бар для азота и 25 бар для гелия. В настоящее время соленоид подготовлен к вакуумным испытаниям. Большая часть оборудования криогенной инфраструктуры MPD уже заказана.

Времяпроекционная камера (TPC) является основным трековым детектором установки MPD, предназначенным для реконструкции треков заряженных частиц и их идентификации по dE/dx для событий с большой множественностью. Он состоит из четырех цилиндров (C1–C4), изготовленных российской промышленностью из композитных материалов, что обеспечивает достаточную продольную прочность цилиндров (прогиб по центру не более 100 мкм) и небольшое количество вещества на пути частиц ($0,4 \text{ г/см}^2$). Все четыре цилиндра соединены между собой двумя алюминиевыми фланцами.

Камеры считывания данных (ROC) для стартовой версии MPD базируются на многопроводных пропорциональных камерах со считыванием сигналов с катодных площадок (pads readout). Полное число каналов считывания для TPC — 95232. Все серийные камеры ROC в количестве 24 штук изготовлены и испытаны.

Газовая система разработана с учетом опыта создания газовых систем для TPC экспериментов STAR и PHENIX в BNL, США. Система состоит из двух контуров (внешнего и внутреннего) и работает как замкнутый контур с рециркуляцией рабочей газовой смеси через TPC по внутреннему контуру, содержащему систему очистки.

Система охлаждения служит для стабилизации температуры газа внутри объема TPC в пределах $0,5^\circ\text{C}$. В системе используются 180 датчиков Pt1000, размещенных на корпусе детектора и обеспечивающих измерение температуры с точностью до $0,1^\circ\text{C}$. Термопанели для системы термостабилизации TPC поставлены в ОИЯИ. Электроника для системы охлаждения TPC изготовлена и испытывается.

Электроника считывания (FEE) и система считывания данных TPC базируются на специализированных ASIC, FPGA и микросхемах для высокоскоростных линий связи. Каждая из 62 карт (FEC) имеет 64 канала регистрации и отдельный двунаправленный интерфейс связи со своим контроллером (2,5 Гбит/с). FEC работают параллельно, обеспечивая общую пропускную способность до 100 Гбит/с. Каждая FEC имеет две специализированные микросхемы ASIC «SAMPA» (всего их 1488), разработанные группой электроники USP Brazil совместно с ЦЕРН для модернизации эксперимента ALICE и выполненные по радиационно стойкой технологии (TID ~ 100 крад). Использование микросхем SAMPA на FEC-картах позволило значительно уменьшить их геометрический размер и радиационную длину ($X/X_0 \sim 3\%$). FPGA Altera Cyclon-5, используемая для чтения данных с двух

микросхем SAMPA, является коммерческой микросхемой. С учетом радиационной уязвимости FPGA данного класса к SEE (Single Event Error) в МИФИ разрабатывается радиационно стойкий ASIC (65 nm CMOS process) для ее замены в будущем. Заявленная разработчиком суммарная ионизационная доза составит ~ 100 Мрад. Прототип FPGA сдан в производство (Eurogractice) в ноябре 2020 г.

Сборка и инфраструктура TPC. В начале 2022 г. планируется завершить изготовление серийной электроники считывания, установить ROC-камеры в TPC и протестировать TPC на космических лучах. В марте 2022 г. запланирована перевозка TPC в экспериментальный зал MPD, далее — установка TPC в MPD, юстировка и завершающий этап — тестирование установки MPD на космических лучах, начиная с августа 2022 г.

Времяпролетная система (TOF) является базовой системой идентификации заряженных адронов в MPD. В начальной конфигурации TOF будет представлена как цилиндр длиной около 6 м и диаметром 3 м, собранный из 28 модулей. Помимо самих модулей, каждый из которых имеет 10 субдетекторов на основе многозачерных резистивных плоских камер (МРПК), TOF включает в себя и сервисные подсистемы. Система TOF должна быть введена в эксплуатацию в начале 2022 г.

Многозачерные резистивные плоские камеры (МРПК). Каждый модуль TOF состоит из 10 идентичных МРПК с 24 каналами считывания. Окончательный вариант МРПК изготовлен из коммерческого флоат-стекла толщиной 280 мкм. Он имеет 15 газовых промежутков шириной 200 мкм и обеспечивает временное разрешение 50 пс. Производство 280 МРПК будет завершено в июне, а 28 модулей TOF будут готовы к декабрю 2022 г. Испытания модулей TOF продолжаются с начала 2020 г. на космических лучах на разработанном для этой цели тестовом стенде.

Система считывания и сбора данных для систем MPD TOF и FFD разработана на базе времяцифрового преобразователя VME64x VXS TDC72VHLv4 с микросхемой HPTDC. Он используется для оцифровки LVDS-сигналов с временем дискретизации 24,4 пс. TDC72VHLv4 обеспечивает возможность точной временной синхронизации с использованием технологии White Rabbit с другими устройствами. Общее количество TDC, необходимое для MPD TOF, составляет 196 (14 модулей на каждый из 14 крейтов VME). Все крейты VME были куплены и доставлены в ОИЯИ. Модули TDC72VHLv4 изготовлены в нужном объеме, проведено тестирование и калибровка считывающей электроники.

Электромагнитный калориметр (ECal) предназначен для идентификации частиц, измерения потока фотонов и реконструкции некоторых распадов с участием фотонов. Крупногабаритный (длиной 6 м и диаметром 4,5 м) цилиндрический электромагнитный калориметр перекрывает центральную область

ных расстояниях [4]. Продолжается разработка и изготовление детекторов для полной конфигурации BM@N [5] (рис. 5). Статус создания основных компонентов для программы тяжелых ионов следующий:

- трековые детекторы и профилометры пучка Silicon Beam Tracker изготовлены, их монтаж и ввод в эксплуатацию планируются весной 2022 г.;

- изготовлены передние кремниевые детекторы FwdSi для центральной трековой системы; детекторы уже использовались в сеансах на пучках C, Ag, Kp; их монтаж и ввод в эксплуатацию будет завершен весной 2022 г.;

- система кремниевых детекторов большой апертуры STS для центральной трековой системы разрабатывается совместно в институтах России (ОИЯИ, МГУ) и Германии (GSI/FAIR, Тюбинген); планируется разработка и установка двух пилотных станций STS (из четырех) для физического сеанса BM@N в 2023 г.;

- ввод в эксплуатацию полной конфигурации STS планируется после 2023 г.;

- детекторы GEM для центральной трековой системы произведены в ЦЕРН с участием сотрудников BM@N и уже протестированы; их монтаж и ввод в эксплуатацию будет проведен весной 2022 г.; реализуется контракт на производство быстрой электроники считывания (чипы VMM3a) (вклад Германии);

- детекторы триггера и стартового сигнала TO для системы времени пролета будут готовы к весне 2022 г., к началу монтажа и ввода в эксплуатацию;

- четыре катодные стриповые камеры CSC внешней трековой системы для экстраполяции треков в систему ToF-400 готовы, первую большую камеру CSC для экстраполяции треков в систему ToF-700 планируется изготовить весной 2022 г., вторую камеру — в конце 2022 г.;

- углепластиковая вакуумная труба внутри BM@N и мишенная станция будут изготовлены и испытаны к весне 2022 г.;

- алюминиевая вакуумная труба перед мишенью и детекторные боксы готовы;

- новый передний адронный калориметр ZDC уже установлен в BM@N, годоскоп перед калориметром планируется установить весной 2022 г.

Реализация программы BM@N по физике пучков тяжелых ионов начнется в апреле–мае 2022 г. с пучком ионов Xe кинетической энергии до $3,9 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}$. За 800 ч сеанса будет набрана статистика до $2 \cdot 10^9$ взаимодействий Xe с мишенью CsI. Весной 2023 г. выполнение физической программы будет продолжено с более тяжелыми ионами с целью набора статистики до $2 \cdot 10^9$ взаимодействий (Au + Au или Bi + Bi).

Проект SPD

В январе 2021 г. на заседании Программно-консультативного комитета по физике частиц был представлен концептуальный проект Spin Physics Detector, а вскоре был сформирован DAC SPD и проведены несколько детальных обсуждений проекта с целью подготовки TDR. Достигнут значительный прогресс в формировании международной коллаборации, интерес к участию в которой проявили более 300 ученых из 32 институтов 14 стран. Были созданы и начали свою работу EB, TB и другие структуры. Принята конституция коллаборации, готовятся MoU, проведено 2 коллаборационных совещания. Активно ведется разработка физической программы будущего эксперимента [6–9].

Подготовлен первый вариант технического проекта детектора (рис. 6), в котором рассмотрены две опции соленоидальной магнитной системы SPD, основанные на технологиях, развиваемых в ЛФВЭ ОИЯИ и ИЯФ (Новосибирск).

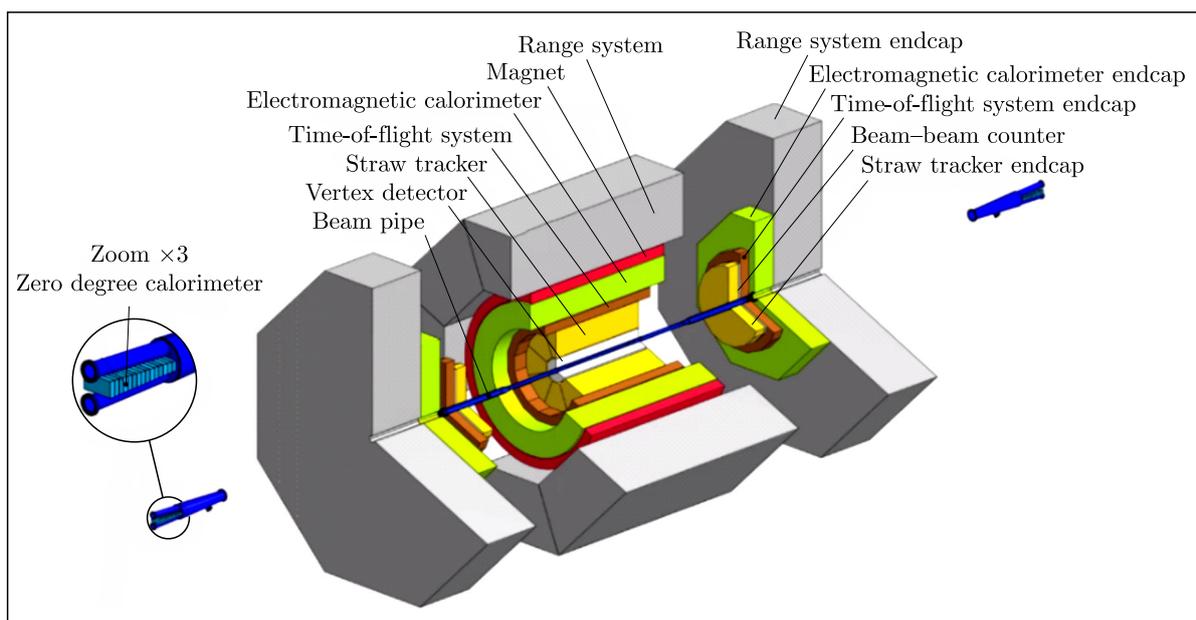


Рис. 6. Обновленная конфигурация детектора SPD

Идет создание прототипа мюонной системы для тестовых пучков нуклотрона: изготовлены около 100 детекторов мини-дрейфовых трубок, подготовлена аналоговая электроника, разработана и изготовлена новая цифровая электроника. Общее количество каналов считывания информации полностью укомплектованного прототипа равно 1300.

Доработан дизайн электромагнитного калориметра с учетом изменений в магнитной системе SPD. Создан и испытан на стенде с космическими лучами новый прототип модуля калориметра. Изготовлен прототип DSSD сенсора для вершинного детектора, в котором используется 6" FZ-Si подложка с чувствительной областью 93×63 мм. Запланировано проведение серии испытаний с его применением.

В рамках R&D по созданию трековой системы координатные строу-детекторы, а также электроника были подготовлены и испытаны в тестовой зоне SPD. Ведутся переговоры с группой из Saclay (Франция) об их участии в создании камер Microegas, которые предназначены для вершинного детектора на втором этапе эксперимента.

В 2021 г. совместно с ИТЭФ были испытаны сцинтилляционные прототипы для подпроекта SPD BBC (beam-beam counter) с двумя видами регистрирующей электроники: с функцией TOT и разработанной для эксперимента DANSS.

В ходе создания тестовой зоны SPD разработаны и изготовлены 2 мишенные станции для размещения мишеней и детекторов в общем вакуумном объеме канала выведенного пучка, созданы 2 экспериментальных домика, ведутся работы по созданию детектирующей и метрологической аппаратуры для низкоэнергетичного и высокоэнергетичного каналов.

Разрабатывается новая концепция бестриггерной/поточковой системы сбора данных. Прорабатывается возможность разработки специализированной электроники на основе FPGA/ASIC и использования коммерчески доступных, промышленных сетевых решений.

В течение 2021 г. проводилась разработка методов онлайн-фильтрации событий, алгоритмов быстрой онлайн-реконструкции событий, моделирования и оффлайн-обработки данных (как на этапе проектирования установки, так и при проведении эксперимента).

Изучение поляризационных явлений и спиновых эффектов на ускорительном комплексе «Нуклотрон-М»

В рамках работ по развитию инфраструктуры спиновых исследований на нуклотроне и других комплексах был заключен и выполнен договор с НТЛ «Заряд» (Новосибирск) по разработке системы управления поляризацией протонов в коллайдере NICA для двух конфигураций режима спиновой прозрачности, а также договор с МФТИ (Долгопрудный) о постановке эксперимента по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) протонов в коллайдере NICA в режиме спиновой прозрач-

ности. Проведено согласование магнитной структуры соленоидов и коллайдера, выполнены расчеты мощности резонатора, разработана система управления поляризацией протонов [10] и компенсации ошибок, проведено численное моделирование спиновой динамики протонов.

Продолжается проработка концепции сверхпроводящего соленоида с постоянным магнитным полем до 6 Тл и длиной 1 м, который позволит реализовать режим работы коллайдера с поляризованным пучком протонов с энергией до 1,6 ГэВ. В 2022 г. совместно с НТЛ «Заряд» и МФТИ планируется разработка спинового навигатора для управления поляризацией протонов во всем диапазоне энергий коллайдера на целых спиновых резонансах с учетом синхротронной модуляции энергии [11], будут выполнены работы по оптимизации параметров оптики коллайдера NICA для максимального усиления ЭДМ-сигнала, начнется разработка 3D-навигатора на базе существующих корректирующих магнитных элементов коллайдера.

В проекте **АЛПОМ-2** был проведен анализ ранее накопленного на поляризованном нейтронном пучке материала по реакции перезарядки $dp \rightarrow (pp)n$ при $1,75 \text{ А} \cdot \text{ГэВ}/\text{с}$ на спектрометре СТРЕЛА [12]. План группы по продолжению эксперимента был поддержан ПКК по физике частиц, он обеспечит лидерство ОИЯИ в области поляриметрического оборудования и исследований. Завершаются работы по оснащению установки АЛПОМ-2 новыми дрейфовыми камерами и широкоапертурным адронным калориметром.

Подготовлено предложение нового проекта «Search for Polarized Phenomena at Nuclotron (**SPPN**)», основанного на полученных ранее результатах по поиску высокоимпульсной асимптотики спиновых наблюдаемых связанной np -пары и исследованию свободной L-поляризованной np -пары в измерениях $\Delta\sigma_{L,T}(np)$. В этой программе предлагаются также новые актуальные исследования спиновой структуры np -взаимодействий. Реализация проекта SPPN потребует оснащения поляризованной протонной мишени криостатом и ВТСП-магнитами для поворота спинов протонов мишени из горизонтального состояния (L) в вертикальное (T), и создания вершинного детектора.

В рамках проекта **DSS** получены [7, 13] угловые зависимости дейтронных анализирующих способностей A_y , A_{yy} и A_{xx} упругого dp -рассеяния при энергиях дейтронов в интервале 400–1300 МэВ на внутренней мишени и угловые зависимости A_y реакции квазиупругого pp -рассеяния при энергиях 200–650 МэВ/нуклон.

Завершается модернизация и настройка спектрометра **HyperNIS** для поиска гиперядер (${}^6_{\Lambda}\text{H}$). Успешно идет работа по созданию более эффективной программы трекинга и определения импульса частиц. В рамках совместного проекта с экспериментом Short Range Correlations (SRC) ведутся расчеты и поиск оптимальных технических решений для размещения соответствующих детекторов.

УЧАСТИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ВНЕШНИХ УСКОРИТЕЛЯХ

Эксперименты на Большом адронном коллайдере

ALICE. Главные усилия группы ОИЯИ в анализе данных и физическом моделировании были сконцентрированы на изучении фемтоскопических корреляций и рождении векторных мезонов в ультрапериферических Pb–Pb-столкновениях [14, 15]. Кроме того, сотрудники продолжали участвовать в поддержании и развитии GRID–ALICE анализа в ОИЯИ.

В ходе 1D- и 3D-анализов фемтоскопических корреляций пар тождественных заряженных каонов в Pb–Pb-взаимодействиях при с.ц.м. энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ были исследованы зависимости радиусов источников излучения каонов от множественности событий и поперечных импульсов пар. Впервые показано (рис. 7), что время эмиссии каонов уменьшается в три раза в периферических взаимодействиях по сравнению с центральными.

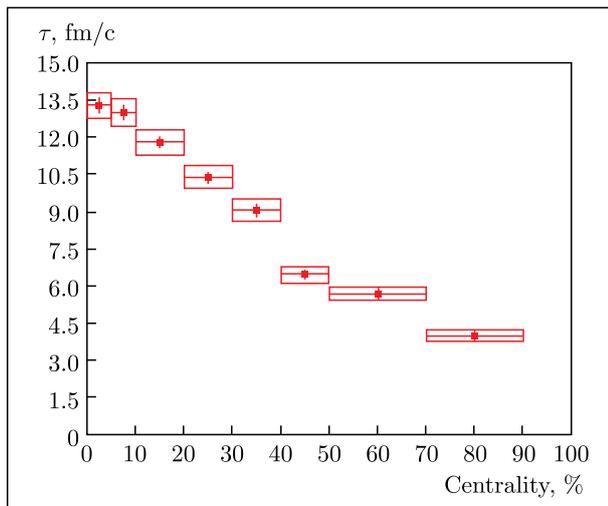


Рис. 7. Время излучения каонов при разной степени центральности

Продолжался анализ событий с когерентным фоторождением только четырех пионов ($\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$) в ультрапериферических Pb–Pb-соударениях при 5,02 ТэВ. Предварительные результаты показывают, что наилучшее описание спектра инвариантной массы четырех пионов получается с использованием двух функций Брейта–Вигнера и учетом интерференции между ними. При этом резонансные состояния имеют массы, близкие к табличным, $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$.

Опубликованы результаты описания трехкомпонентной модели спектров поперечных импульсов и отношений выходов адронов, образующихся в pp- и Pb–Pb-столкновениях при различных энергиях LHC [16].

ATLAS. После завершения обработки данных Run-2 для поиска и измерения свойств бозона Хиггса, распадающегося на пару *b*-кварков при ассоциированном рождении с электрослабыми векторными бозонами *V* (*W* или *Z*), был начат комбинированный анализ, объединяющий $VH(\rightarrow bb)$ процесс, где продукты распада бозона Хиггса реконструируются как две отдельные струи или одна струя большого радиуса, и $VH(\rightarrow cc)$ процесс с распадом бозона Хиггса на *c*-кварки.

Проводилась настройка параметров генератора Монте-Карло MadGraph для процессов $tt + 0, 1, 2$ струи в первом порядке теории возмущений в КХД с использованием генераторов MadGraph5_aMC@NLO + Pythia8 и схемы сшивки FxFx для энергии pp-столкновений 13 ТэВ: энергетического масштаба сшивки μ_Q , константы сильной связи α_S , а также параметров, описывающих партонные ливни в номинальной модели A14. Полученные результаты согласуются с данными экспериментов ATLAS и CMS, а также с предсказаниями генераторов Powheg + Pythia8.

CMS. На полной статистике Run-2 LHC в 140 fb^{-1} группой ОИЯИ проводился поиск сигналов за рамками Стандартной модели (СМ) и проверка ее предсказаний [17–21]. В результате получены наиболее сильные в настоящее время ограничения на массы гипотетических частиц и другие параметры сценариев новой физики. Так, в канале с парой лептонов установлены верхние пределы на отношение сечений рождения новых резонансов со спином 1 и спином 2 к сечению рождения калибровочного бозона СМ Z^0 . Полученные результаты интерпретированы в контексте моделей расширенного калибровочного сектора СМ — последовательной калибровочной модели (SSM) и одной из моделей Великого объединения (ТВО), обусловленной теорией струн (ψ -модель). Нижние пределы на массы новых калибровочных бозонов составили 5,15 (4,56) ТэВ/ c^2 для модели Z'_{SSM} ($Z'\psi$) (рис. 8). В рамках ряда моделей новой физики наблюдаемые верхние пределы на сечения резонансов со спином 1 были преобразованы в пределы на обобщенные константы связи Z' с кварками первого поколения. Массы возбужденных гравитонных состояний со спином 2 модели дополнительных измерений Рэндалл–Сандрума ограничены значениями 2,47–4,78 ТэВ/ c^2 в зависимости от константы связи модели $k/M_{Pl} = 0,01–0,1$.

В рамках упрощенной модели темной материи получены пределы на массы дираковских частиц темной материи m_{DM} и переносчика взаимодействия m_{Med} со спином 1. Масса переносчика огра-

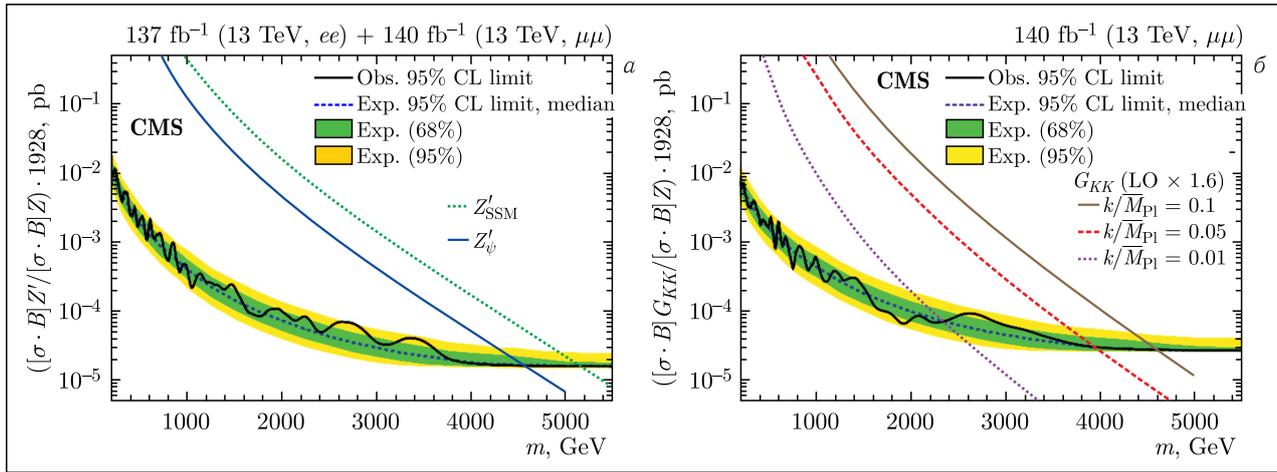


Рис. 8. Модельно-независимый верхний предел (95%-й уровень достоверности) на сечение рождения пар лептонов (черная сплошная линия), нормированное на сечение рождения Z^0 -бозона, для случая резонансов со спином 1 (а) и спином 2 (б). Также приведены теоретические предсказания для сечений рождения новых калибровочных бозонов (модели SSM и Z'_ψ) и KK -состояния гравитона для разных констант связи сценария многомерной гравитации RS1

ничена снизу значением 1,92 (4,64) ТэВ/ c^2 в случае векторного (аксиально-векторного) переносчика с малым (большим) значением константы связи с лептонами. При $m_{DM} = 0$ массовые пределы составляют 1,04 (3,41) ТэВ/ c^2 .

В 2021 г. группа ОИЯИ участвовала в испытаниях CSC на тестовом пучке на установке GIF++ в ЦЕРН. Тесты проводились на выведенном мюонном пучке H4 SPS с гамма-источником GIF++ Cs137 интенсивностью 12 ТБк. Изучались особенности работы камер в условиях высокого фона и с газовыми смесями с различным содержанием CF4. Был подготовлен и одобрен проект «Модернизация детектора CMS» для работы в условиях высокой светимости HL-LHC. Главные задачи проекта состоят в создании калориметра высокой гранулярности (HGCAL) и модернизации передней мюонной станции ME1/1. Начато производство панелей охлаждения HGCAL, а в 2022 г. будет продолжено создание системы тестирования активных элементов HGCAL.

Эксперименты на протонном синхротроне в ЦЕРН

COMPASS. Группа ОИЯИ внесла существенный вклад в подготовку установки и набор данных по программе измерений полуинклюзивных процессов с использованием поляризованной дейтериевой мишени и пучка мюонов с энергией 190 ГэВ, включая поддержку адронного калориметра, системы координатных детекторов, а также DAQ.

При анализе данных проводилось исследование поперечности путем измерения поляризации Λ -гиперонов, образующихся в процессах полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния от поперечно-поляризованных протонов [22]. В пределах экспериментальных неопределенностей не найдено существенного отклонения измеренной величины поперечности от нуля. При изучении спин-экзотической амплитуды $J^{PC} = 1^{-+}$ при однократной

дифракционной диссоциации пионов 190 ГэВ/ c на $\pi^- \pi^- \pi^+$ с использованием водородной мишени [23] была подтверждена амплитуда $\pi_1(1600) \rightarrow \rho(770)$, которая влияет на нерезонансную амплитуду 1^{-+} . Полученные результаты согласуются с основными предположениями изобарной модели для $J_{PC} = 1^{-+}$ амплитуд.

NA61/SHINE. На установке NA61/SHINE были выполнены измерения двойных дифференциальных спектров и средней множественности $\Xi(1530)^0$ и анти- $\Xi(1530)^0$ резонансов, рожденных в неупругих pp -взаимодействиях [24] на SPS в ЦЕРН при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 17,3$ ГэВ. Отношение $\Xi(1530)^0$ /анти- $\Xi(1530)^0$ в центральной области быстрот оказалось равным $0,54 \pm 0,07 \pm 0,08$. Теоретические расчеты в рамках EPOS дают близкие значения, но есть расхождение при сравнении с предсказаниями URQMD и адрон-резонансной газовой модели в канонической формулировке.

Группа ОИЯИ ответственна за модернизацию времяпролетной системы установки на основе многоазорной резистивной плоской камеры (МРПК) с аналоговым считыванием, разработанной в ЛФВЭ. В 2021 г. было завершено массовое производство МРПК [25]. Совместно с коллегами из ФИАН были проведены испытания МРПК, показавшие временное разрешение $(51,0 \pm 0,9)$ пс, что удовлетворяет требованиям эксперимента.

NA62 (NA48/2). Эксперимент NA62 в ЦЕРН посвящен изучению очень редкого распада заряженного каона на заряженный пион, нейтрино и антинейтрино. В рамках этого эксперимента группы ОИЯИ и ЦЕРН совместно несут ответственность за работу магнитного спектрометра NA62 и за разработку всего программного обеспечения.

Поиски распада $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+$, нарушающего лептонное число, и распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+$ и $\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+$, нарушающих сохранение лептонного аромата, были выполнены [26] с использованием дан-

ных, собранных в эксперименте 2017–2018 гг. Получены верхние пределы их вероятностей с доверительной вероятностью 90%: $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+) < 4,2 \cdot 10^{-11}$, $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+) < 6,6 \cdot 10^{-11}$ и $\text{Br}(\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+) < 3,2 \cdot 10^{-10}$. Результаты улучшены на порядок по сравнению с предыдущими для этих мод распада.

Предварительные результаты анализа распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$, основанные на данных NA62, были доложены на конференции [27]. Готовится публикация.

В 2022 г. будет выполняться анализ данных, собранных в 2014–2021 гг., для изучения следующих распадов: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^+ e^- e^+ \gamma$. Будет выполнена работа по поиску сигнатур легкого сгледстино. Строу-детектор спектрометра NA62 будет обслуживаться группой ОИЯИ во время следующего сеанса набора данных NA62. Калибровки модулей строу и всего детектора, система DAQ, а также моделирование и анализ экспериментальных данных будут улучшены.

NA64. Группа ОИЯИ, участвующая в эксперименте NA64, отвечает за разработку, создание и эксплуатацию координатных трековых детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок, принимает участие в создании математического обеспечения для их онлайн-мониторинга, моделирования и реконструкции, а также в реконструкции и анализе экспериментальных данных по поиску темного фотона. К сеансу 2021 г. установка была существенно модернизирована при поддержке целевого гранта Российской Федерации и финансовом участии ОИЯИ. Строу-детекторы с рабочей зоной 20×20 см, одни из основных элементов трековой системы, были оснащены новой электроникой, что позволило существенно снизить шумы, уменьшить пороги и повысить их эффективность. Для мюонной программы в ОИЯИ были изготовлены семь новых дрейфовых строу-камер размером 60×120 см.

В двух сеансах 2021 г. было набрано $\sim 7 \cdot 10^{10}$ событий для поиска рождения темного фотона A'

в невидимой моде распада при энергии пучка электронов 100 ГэВ [28] и $6 \cdot 10^9$ событий по программе поиска темного Z' -бозона, возможного кандидата для объяснения $(g-2)_\mu$ -аномалии [29], ведется их обработка и анализ. Группой ОИЯИ были введены в эксплуатацию две новые станции строу-детекторов большого размера, работающих совместно с адронными калориметрами.

Эксперименты на коллайдере RHIC

Участие ОИЯИ в проекте STAR нацелено на изучение свойств ядерной материи при экстремальных плотностях и температурах и фазовых переходов при столкновениях тяжелых ионов в широком диапазоне значений энергии на коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC). В программу исследований также входит изучение структурных функций кварков и глюонов при столкновениях продольно- и поперечно-поляризованных протонов.

В 2021 г. был проведен заключительный сеанс по программе BES II сканирования энергии в диапазоне 3–200 ГэВ. Это дает возможность изучать фазовую диаграмму ядерной материи в широком диапазоне температур $T_{\text{ch}} = 60\text{--}160$ МэВ и барионных плотностей $\mu_B = 25\text{--}720$ МэВ. В центральных Au + Au-соударениях было обнаружено немонотонное изменение величины произведения коэффициента эксцесса и дисперсии распределения числа «чистых» протонов с изменением энергии столкновения со значимостью $3,1\sigma$ [30].

Впервые измеренная в центральных Au + Au-столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ поляризация Ξ - и Ω -гиперонов [31] находится в разумном согласии с многофазной транспортной моделью (АМРТ). Продолжались исследования спиновых эффектов и структурных функций партонов (PDF). Хотя PDF стали более точными, все еще существуют кинематические области, в которых требуется больше данных: через измерение отношения сечений рождения векторных бозонов W^+/W^- были установлены ограничения на PDF для морских кварков d^-/u^- [32].

СОБЫТИЯ

15 января состоялось третье заседание комитета по анализу затрат и графика исполнения работ по проекту «Комплекс NICA», сформированного по решению Комитета полномочных представителей правительств стран-участниц ОИЯИ. Комитет отметил впечатляющий прогресс в реализации проекта в сложившихся сложных условиях мировой пандемии COVID-19, в частности ввод в эксплуатацию бустера, установку элементов магнита MPD, создание комплекса энергоподстанций, прогресс в создании новой криогенно-компрессорной станции.

19–20 апреля в Дубне состоялось 7-е коллаборационное совещание VM@N. Было представлено свыше 40 докладов, обсуждался ход работ по созданию детекторов и планы модернизации установки.

21–23 апреля в смешанном режиме было проведено 7-е коллаборационное совещание MPD. В нем приняли участие более 190 ведущих ученых, студентов и инженеров со всего мира — от Китая до Мексики. За три дня пленарных заседаний было представлено почти 50 докладов, посвященных созданию детекторных систем MPD и физическим анализам.

15–16 сентября в ЛФВЭ состоялся Международный круглый стол по прикладным исследованиям и инновациям на комплексе NICA, в котором приняли участие около 300 исследователей из 19 стран. Был принят меморандум круглого стола. В нем участники мероприятия отметили существенный интерес научного сообщества к вопросам организации прикладных исследований на выведенных пучках комплекса NICA и выразили свое мнение по ряду стратегических вопросов о дальнейшем развитии работ. Для последующей проработки обозначенных инициатив руководством проекта NICA сформирован экспертный комитет по прикладным исследованиям и инновациям на каналах ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advanced Developments at NICA fAcility).

3–8 октября в Дубне проходило 8-е рабочее совещание коллаборации BM@N, которое собрало

около ста участников из ведущих научных центров, представивших 40 докладов.

12–14 октября состоялось 8-е коллаборационное совещание МРД, проходившее в режиме видеоконференции и собравшее более 150 онлайн- и офлайн-участников из 15 стран.

16–17 ноября состоялось 4-е заседание комитета по анализу затрат и графика исполнения работ по проекту «Комплекс NICA», отметившего существенные достижения в запуске бустера, завершении строительных работ и создании криогенных систем. Комитет также предложил пересмотреть сроки и перенести запуск базовой конфигурации комплекса на конец 2023 г.

19 ноября на 7-м заседании наблюдательного совета проекта NICA были согласованы новые сроки реализации проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Butenko A. et al.* The NICA Complex Injection Facility // Proc. of the 27th Russ. Particle Accel. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021; JACoW Publ.
2. *Guber F. for the BM@N Collab.* Measurements of Centrality in Nucleus–Nucleus Collisions at the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 571–577.
3. *Kapishin M. et al.* Production of Hyperons, Strange Mesons and Search for Hypernuclei in Interactions of Carbon, Argon and Krypton Beams in the BM@N Experiment (Contribution to RFBR Grants for NICA) // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 710–719.
4. *Patsyuk M. et al. (BM@N Collab.)*. Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam // Nature Phys. 2021. V. 17. P. 693–699; 2102.02626 [nucl-ex].
5. *Zinchenko A. et al.* Performance Evaluation of the Upgraded BM@N Setup for Strangeness Production Studies // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 725–729.
6. *Arbuzov A. et al.* On the Physics Potential to Study the Gluon Content of Proton and Deuteron at NICA SPD // Prog. Part. Nucl. Phys. 2021. V. 119. P. 103858; hep-ex/201115005.
7. *Абрамов В.В. и др.* Возможные исследования на начальной стадии работы коллайдера NICA с поляризованными и неполяризованными пучками протонов и дейтронов // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, вып. 6. С. 1392–1529.
8. *Alexakhin V. et al.* On the Study of Antiprotons Yield in Hadronic Collisions at NICA SPD // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18. P. 196–201.
9. *Guskov A. for the SPD Collab.* Spin Physics Detector Project at JINR // PANIC21 Proc.; hep-ex/2110.08930.
10. *Filatov Yu. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Derbenev Y. S., Morozov V. S., Butenko A. V., Syresin E. M., Tsyplakov E. D.* Polarization Control in Spin-Transparent Hadron Colliders by Weak-Field Navigators Involving Lattice Enhancement Effect // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81, No. 11. P. 986.
11. *Filatov Yu. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Vorobyov V. V., Vinogradov S. V., Tsyplakov E. D., Kovalenko A. D., Butenko A. V., Derbenev Ya. S., Morozov V. S.* Hadron Polarization Control at Integer Spin Resonances in Synchrotrons Using a Spin Navigator // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24, No. 6. P. 061001.
12. *Basilev S. N. et al.* Charge Exchange $dp \rightarrow (pp)n$ Reaction Study at 1.75A GeV/c by the STRELA Spectrometer // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57, No. 4. P. 133.
13. *Volkov I. S. et al.* Analyzing Power in Quasi-Elastic Proton–Proton Scattering at 500 and 650 MeV/nucleon // Proc. of the XXIV Intern. Sci. Conf. of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020), Dubna, Nov. 9–13, 2020. AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377. P. 030020.
14. *ALICE Collab.* Coherent ρ^0 Photoproduction in Ultra-Peripheral Xe–Xe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV; arXiv:2101.02581. 2021.
15. *ALICE Collab.* Kaon–Proton Strong Interaction at Low Relative Momentum via Femtoscopy in Pb–Pb Collisions at the LHC // Phys. Lett. B. 2021. V. 822. P. 136708.
16. *Grigoryan S.* A Three Component Model for Hadron p_T -Spectra in pp and Pb–Pb Collisions at the LHC; arXiv:2109.07888. 2021
17. *CMS Collab.* Search for Resonant and Nonresonant New Phenomena in High Mass Dilepton Final States at 13 TeV // JHEP. 2021. V. 07. P. 208.
18. *Zhizhin I. A., Lanyov A. V., Shmatov S. V.* Search for Heavy Neutral Gauge Bosons in the Dilepton Channel in the CMS Experiment at the LHC // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 10. P. 1–5.
19. *Zhizhin I. A., Lanyov A. V., Shmatov S. V.* Searches for New Physics in the Dilepton Channel with the

- CMS Detector at the Large Hadron Collider // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 2. P. 184–189 (Yad. Fiz. 2021. V. 84, No. 2. P. 143–148).
20. *Lanyov A. V., Shmatov S. V., Zhizhin I. A.* Search for a High-Mass Dark Matter Mediator Decaying to Dilepton Final State in the CMS Experiment at the LHC // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377. P. 030009.
 21. *Savina M. V., Seitova D.* Program of Searches with the CMS Detector for Signals from Multidimensional Low-Energy Gravity at the Large Hadron Collider // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 2. P. 190–196 (Yad. Fiz. 2021. V. 84, No. 2. P. 149–155).
 22. *COMPASS Collab.* Probing Transversity by Measuring Λ Polarization in SIDIS. CERN-EP/2021-072; hep-ex/2104/13585.
 23. *COMPASS Collab.* The Exotic Meson $\pi_1(1600)$ with $J^{PC} = 1^{-+}$ and Its Decay into $\rho(770)\pi^{-}$. CERN-EP-2021-162; hep-ex/2108.01744.
 24. *Acharya A. et al.* Measurements of $\Xi(1530)^0$ and Anti- $\Xi(1530)^0$ Production in Proton-Proton Interactions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV in the NA61/SHINE Experiment // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81, No. 10. P. 911.
 25. *Tefelski D. et al.* NA61/SHINE Detector Upgrade // Acta Phys. Polon. Suppl. 2021. V. 4, No. 3. P. 579–582.
 26. *NA62 Collab.* Search for Lepton Number and Flavor Violation in K^+ and π^0 Decays // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127, No. 13. P. 131802.
 27. *Madigozhin D.* New Measurement of Radiative Decays at the NA62 Experiment at CERN // The XXVIII Intern. Conf. on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 2021), Shanghai, China, Aug. 23–28, 2021 (virtual).
 28. *Andreev Yu. M. et al.* Improved Exclusion Limit for Light Dark Matter from e^+e^- Annihilation in NA64 // Phys. Rev. D. 2021. V. 104, No. 9. P. L091701; 2108.04195 [hep-ex].
 29. *Cazzdniga C. et al.* Probing the Explanation of the Muon ($g-2$) Anomaly and Thermal Light Dark Matter with the Semi-Visible Dark Photon Channel. 2107.02021 [hep-ex].
 30. *STAR Collab.* Net-Proton Number Fluctuations and the QCD Critical Point // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. P. 92301.
 31. *STAR Collab.* Global Polarization of X, Ξ and Ω Hyperons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126, No. 16. P. 162301.
 32. *STAR Collab.* Measurements of W and Z/γ^* Cross Sections and Their Ratios in $p + p$ Collisions at RHIC // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 012001.