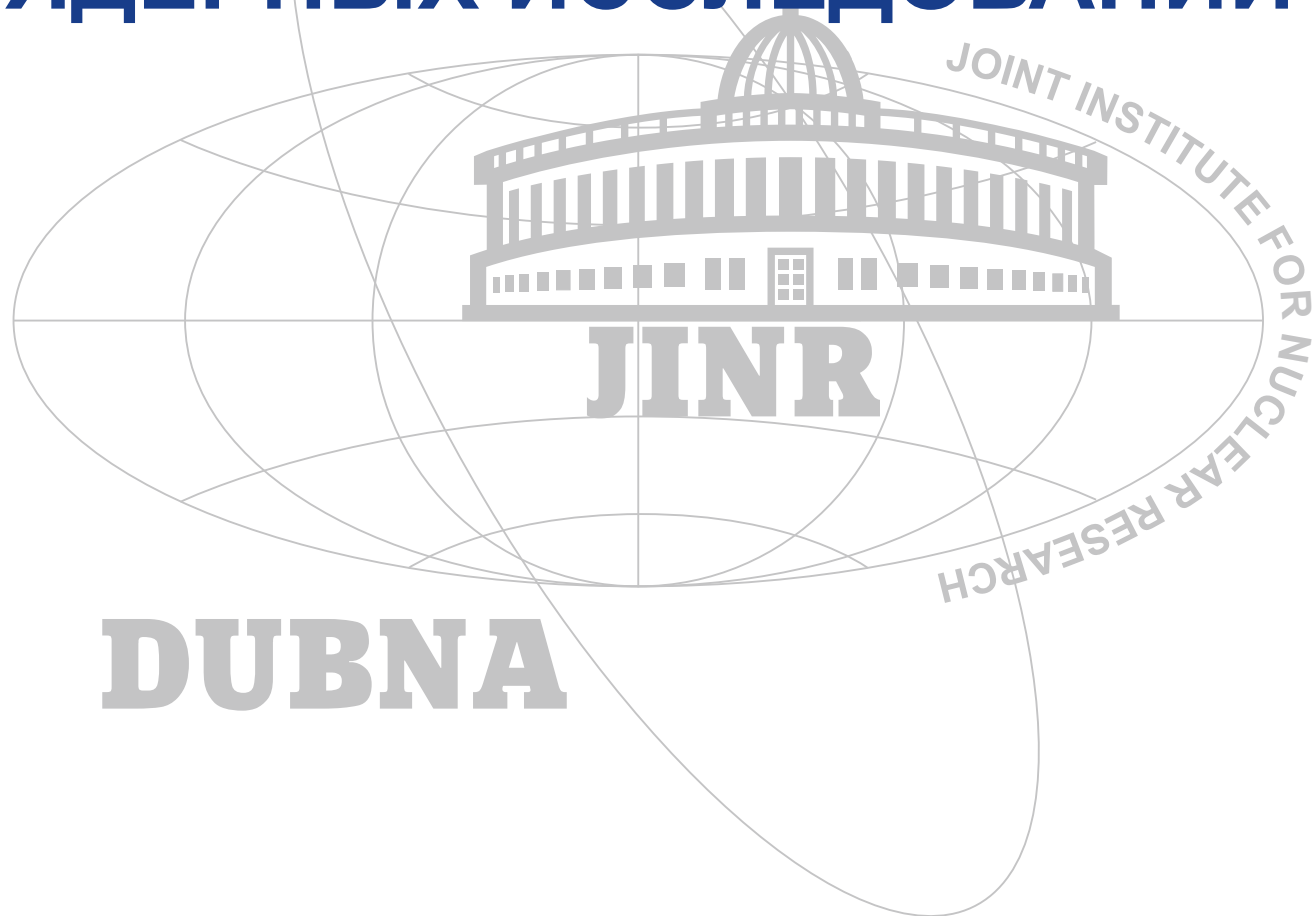


2020

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



DUBNA



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 2020 г. была сосредоточена на создании, развитии и вводе в эксплуатацию отдель-

ных узлов ускорительного комплекса «Нуклотрон–NICA» и экспериментальных установок MPD, BM@N и SPD. Продолжались эксперименты и на внешних ускорителях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА NICA

Проект «Нуклотрон–NICA». Бустер и каналы транспортировки пучка. 20 ноября 2020 г. Председатель Правительства РФ М. В. Мишустин произвел технологический пуск одного из основных блоков мегасайенс-проекта «Нуклотрон–NICA» — сверхпроводящего бустерного синхротрона (бустера). К этому моменту была завершена сборка магнитно-криостатной системы бустера, все подсистемы установлены в штатное положение и протестированы, система электропитания магнитов протестирована и настроена при работе на эквивалентную нагрузку, создана, настроена и испытана линия транспортировки пучка NICA–бустер. К концу года на бустере были проведены пусконаладочные работы и натурные измерения, основной задачей которых являлось тестирование и настройка всех систем при работе с пучком ионов He^{1+} . Работа с пучком началась 19 декабря согласно утвержденному расписанию.

В ходе сеанса были последовательно выполнены следующие работы:

- завершены сборка и тестирование вакуумной системы;

- запущена АСУ бустера, введена в эксплуатацию система мониторинга, предназначенная для наблюдения за процессом криостатирования, магнитно-криостатная система охлаждена до температуры 4,5 К;

- настроена и введена в эксплуатацию система детектирования переходов в нормально проводящую фазу, протестирована система эвакуации энергии, настроены циклозадающая система и система электропитания магнитов бустера;

- настроены ускоритель тяжелых ионов NICA и канал транспортировки пучка из NICA в бустер, выведены на проектные параметры устройства системы инжекции;

- осуществлена инжекция пучка на «стол» магнитного поля, соответствующий энергии инжекции, получен циркулирующий пучок He^{1+} ;

- последовательно протестированы основные системы диагностики циркулирующего пучка, система коррекции замкнутой орбиты, обеспечена интенсивность циркулирующего пучка, близкая к проектной;

- настроена высокочастотная система, протестирован режим адиабатического захвата пучка в режим ускорения, обеспечено ускорение ионов до энергии 100 МэВ/нуклон;

- включена и протестирована система электронного охлаждения;

- системы питания магнитов, криогенная и магнитно-криостатная системы были проверены при работе в цикле магнитного поля с проектными параметрами.

Режим циркуляции пучка был получен без включения системы коррекции ошибок маг-

нитного поля, при этом отклонения орбиты пучка от номинального положения в горизонтальной плоскости не превышали ± 15 мм (несколько больше в вертикальной плоскости). Это является прямым подтверждением того, что качество изготовления и сборки элементов системы соответствует проектным требованиям. В ходе сеанса магнитно-криостатная система стабильно отработала с циклом магнитного поля около 400 ч.

Использование системы коррекции орбиты совместно с настройкой канала транспортировки пучка из NILAc в бустер и настройкой устройств системы инжекции позволило достичь интенсивности пучка на уровне $7 \cdot 10^{10}$ циркулирующих ионов He^{1+} (рис. 1), что по току эквивалентно 10^9 ионов Au^{31+} .

Характерное время жизни ионов из-за рекомбинации с молекулами и атомами остаточного газа составило примерно 1,9 с (рис. 1). С учетом сечений процессов перезарядки эта величина соответствует давлению остаточного газа в пучковых камерах на уровне $(3-6) \times 10^{-8}$ Па, что находится в хорошем согласии с показаниями вакуумметров и соответствует проектному значению при стартовой конфигурации системы откачки.

В течение трех смен проводились работы по тестированию системы электронного охлаждения (СЭО). При энергии инжекции с помощью дипольных магнитов СЭО и корректирующих магнитов бустера была скорректирована орбита циркулирующего пучка при по-

ле соленоида секции охлаждения до 0,07 Тл. При этом поле был обеспечен стабильный режим рекуперации энергии электронного пучка с током электронов до 150 мА. Эффект взаимодействия электронного и циркулирующего ионного пучков наблюдался с помощью ионизационного профилометра. Было надежно зафиксировано уменьшение времени жизни ионов из-за рекомбинации с электронами в секции охлаждения, зависящее от энергии электронов. Оптимальная энергия электронов (потенциал катода электронной пушки) лежит в интервале 1,74–1,82 кэВ, что соответствует расчетному значению.

В завершение сеанса было проведено комплексное тестирование систем питания магнитов, криогенной и магнитно-криостатной системы при работе в цикле магнитного поля с максимальными устойчиво достигаемыми параметрами. В результате был настроен цикл с двумя «столами» на участке растущего поля, соответствующими энергии инжекции и энергии электронного охлаждения, на верхнем «столе» достигнуто поле 1,8 Тл, на участках роста и уменьшения поля обеспечен темп изменения поля 1,2 Тл/с (рис. 2), что полностью соответствует проектным параметрам цикла.

Все задачи сеанса выполнены в полном объеме. По всем системам бустера получена необходимая информация для их дальнейшего развития в ходе подготовки к сеансу по ускорению тяжелых ионов.

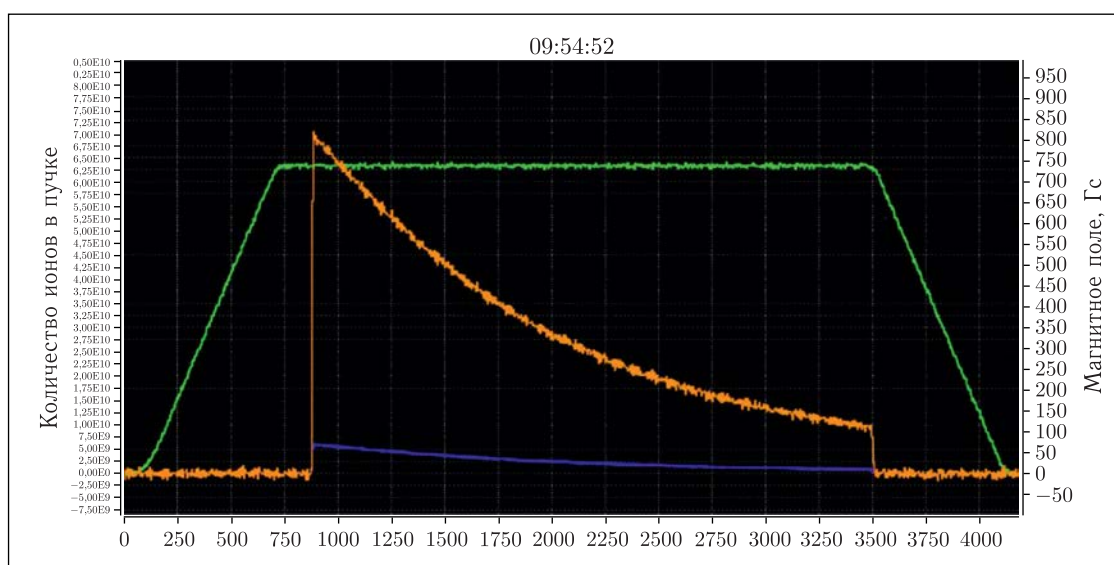


Рис. 1. Результаты измерения интенсивности циркулирующего пучка с помощью параметрического трансформатора тока (ПТТ) при оптимальной настройке всех систем. Зеленая кривая — величина магнитного поля в гауссах, синяя — сигнал ПТТ, оранжевая — количество циркулирующих частиц. Время по горизонтальной оси — в миллисекундах

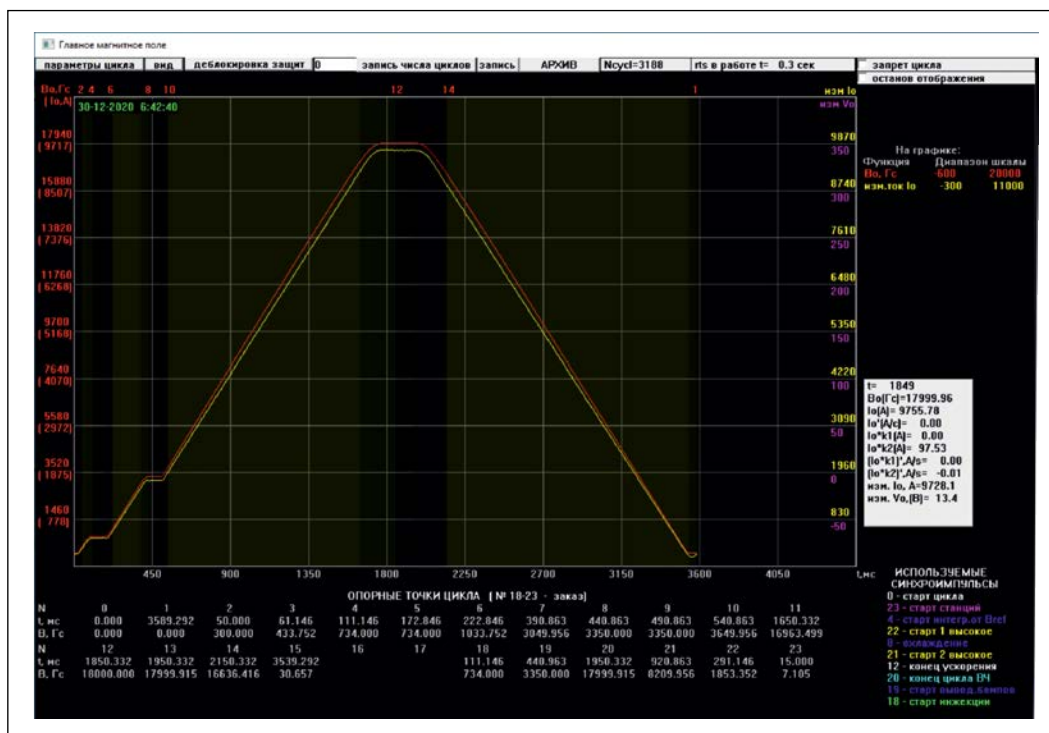


Рис. 2. Проектный цикл магнитного поля

Коллайдер. Коллайдерный комплекс NICA размещается в здании №17. Статус готовности здания на конец 2020 г. выглядит следующим образом:

- устройство свайного поля — 100 %;
- конструкции железобетона — 99 %;
- монтаж металлических конструкций — 99 %;
- монтаж фасадов — 47 %;
- устройство кровли — 70 %;
- земляные работы и устройство временных дорог — 98 %;
- возведение перегородок из кирпичей и пеноблоков — 63 %;
- устройство силовых полов — 70 %;
- отделочные работы — 28 %;
- устройство пристенного дренажа здания — 100 %;
- вынос сетей водопровода из-под пятна дороги — 90 %;
- устройство бытовой и ливневой канализаций — 15 %;
- монтаж индивидуальных тепловых пунктов — 20 %.

В соответствии с графиком работ срок сдачи корпуса №17 — декабрь 2021 г. Данные сроки обусловлены в первую очередь существенным (на 50 %) увеличением объемов строительства уже на стадии реализации про-

екта. Пандемия коронавируса также сказалась на сроках исполнения контрактов.

Общий вид строительной площадки показан на рис. 3. В 2020 г. продолжались производство и тестирование оборудования подсистем коллайдера. На участке сборки и испытания сверхпроводящих магнитов уже изготовлено и протестировано 80 % дипольных и 10 % квадрупольных магнитов коллайдера.

Продолжались работы по модернизации электросетей. В настоящее время получено разрешение на эксплуатацию пяти 6-кВ высокотехнологичных подстанций общей мощностью до 25 МВт.



Рис. 3. Общий вид строительной площадки ускорительного комплекса (ноябрь 2020 г.)

Криогенный комплекс. Новая криогенно-компрессорная станция, для установки которой возводится отдельное здание, является одним из ключевых элементов модернизированного криогенного комплекса для NICA. Строительные работы идут в высоком темпе и должны быть завершены к середине 2021 г. Введен в строй новый гелиевый рефрижератор РСГ-2000/4,5 мощностью 2 кВт.

В целом на конец 2020 г. объем выполненных работ по созданию проектной конфигурации комплекса «Нуклотрон–NICA» составляет около 70%.

Проект MPD. В 2020 г. было завершено формирование коллаборации MPD, которая объединила свыше 500 специалистов из 39 институтов и 11 стран. Проведены шесть коллаборационных совещаний, на которых обсуждался ход работ по исполнению проекта. Продолжается работа по согласованию меморандумов о понимании, закрепляющих в документе права и обязательства участвующих институтов по созданию установки, в том числе по вкладам в общий фонд MPD.

Детектор MPD будет установлен в специальном павильоне в основном здании №17 комплекса NICA. Работы в павильоне в основном завершены, и в нем уже начался монтаж поступающего оборудования. Параллельно этим работам идет монтаж электрических сетей (1,2 МВ) и их разводка, системы вентиляции, водяного охлаждения и отопления, создается техническая документация на разводку газовых линий для детекторов MPD и криогенных магистралей (газообразного и жидкого азота и гелия) для соленоида, установлены серверные домики.

Соленоидальный магнит. В июле 2020 г. основные детали ярма магнита (28 балок и 2

опорных кольца) прибыли в Дубну из Чехии после контрольной сборки на заводе-изготовителе НМ Vitkovice. В кратчайшие сроки 13 плит и опорные кольца были собраны с той же высокой точностью, что и на заводе: отклонения большинства измеренных геометрических размеров от контрольных параметров не превышали 0,2 мм, в редких исключениях доходили до 0,5 мм, и это при длине магнитопровода 8970 мм и диаметре 6670 мм. После длительных согласований с экспертами из итальянской фирмы ASG Superconductors, отвечающей за качество магнитного поля в детекторе MPD, было получено «добро» на продолжение сборки, и 25 декабря 2020 г. последняя 28-я плита была установлена. Финальные измерения геометрии магнитопровода вновь показали высокую точность изготовления плит и опорных колец и их сборки в единое целое (рис. 4).

В ноябре 2020 г. успешно завершилась сложная логистическая операция по транспортировке изготовленного в ASG Superconductors сверхпроводящего соленоидального магнита MPD. Морским и речным путем ценный груз был доставлен в Дубну и размещен в павильоне MPD. В 2021 г. будет произведена частичная разборка магнитопровода до уровня 13 плит, установлен соленоид и заново полностью собран магнитопровод общей массой около 900 т. После подключения необходимых коммуникаций будет проведено захолаживание соленоида. До конца апреля планируется охладить соленоид до температуры жидкого азота, а к сентябрю 2021 г. — до температуры жидкого гелия. После этого будет установлена измерительная станция с 32 датчиками Холла для измерения однородности магнитного поля. Для получения требуемой однородности поля

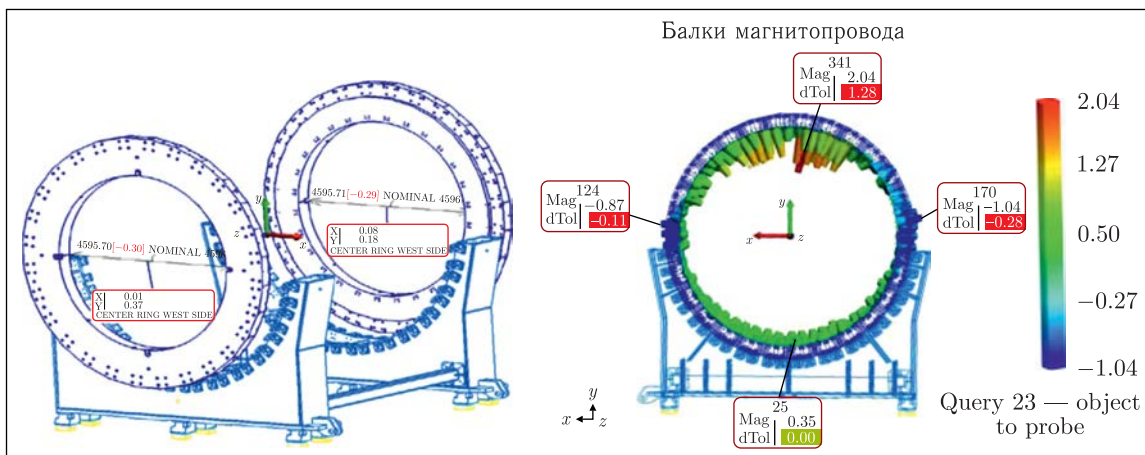


Рис. 4. Результаты измерений на заключительном этапе «28 плит в сборке». Все отклонения — в миллиметрах

$3 \cdot 10^{-4}$ планируется проводить подстройку токов в корректирующих катушках. После каждой коррекции необходимо будет промерять трехмерную карту поля. В конце 2021 г. начнется монтаж детекторов MPD.

Времяпроекционная камера (TPC). TPC является основным трековым детектором в эксперименте MPD. В 2020 г. был склеен внешний цилиндр TPC, состоящий из оболочек C3–C4, диаметром около 2,8 м и длиной 3,4 м, на оболочке C4 завершены работы по монтажу механической структуры для крепления термозкранов. Основные элементы TPC, такие как высоковольтный электрод, фланцы, стержни и др. элементы, готовы для сборки, закончено изготовление всех 24 считывающих камер детектора, все они протестированы. Газовая система для TPC готова. В ОИЯИ поставлены специальные ультрафиолетовые лазеры и система распределения лазерного луча на малом радиусе, начаты закупки блоков для низковольтной и высоковольтной систем TPC, разработанных в САЕН. Система охлаждения, система медленного контроля, DAQ, оснастка для монтажа TPC в установку MPD находятся в разработке. Сборка TPC будет завершена в начале 2021 г., затем будет проведено тестирование детектора на космических лучах.

Времяпролетная система (ToF). ToF MPD основана на многозачерных резистивных плоских камерах (mRPC), 40% mRPC уже произведены. Продолжается сборка модулей ToF и их испытания на космических лучах. Все оборудование испытательного стенда соответствует той системе, которая будет использоваться в MPD. Производится часть сборочного и монтажного оборудования. В настоящее время разрабатывается основное устройство для перемещения и регулировки модулей

ToF внутри MPD. Закупка устройств и компонентов подсистем практически завершена. Газовая система ToF уже работает на испытательном стенде.

Передний калориметр (FHCAL). Каждое из двух плеч переднего детектора MPD включает 44 модуля размером $150 \times 150 \times 1100$ см, представляющих собой перемежающиеся 42 слоя свинца и скнтиллятора, собранных в 7 продольных сегментов. Модули FHCAL и электроника считывания готовы к работе и проходят тестирование на космических лучах. Дизайн подвижной платформы для размещения FHCAL завершен, объявлен тендер на ее производство.

Электромагнитный калориметр (ECAL). Уникальность и сложность ECAL заключается в проекционной геометрии детектирующих модулей. На двух линиях (в Протвино и на «Тензоре» в Дубне) в России работы по производству модулей электромагнитного калориметра идут по плану. Четвертая часть всех модулей должна быть произведена в Китае. В 2020 г. правительством КНР было открыто финансирование для создания модулей, которые будут производиться несколькими университетами Китая во главе с Университетом Цинхуа. Вся инфраструктура для массового производства уже подготовлена, и работы начались. Центральная часть ECAL состоит из 38 400 «башен» с поперечным сечением 4×4 см, склейка из 16 «башен» образует один модуль. В настоящее время произведено 300 модулей. Этого достаточно для создания трех секторов ECAL. К середине 2021 г. в РФ будут изготовлены модули для еще трех секторов, а коллеги из КНР планируют изготовить 8 секторов к концу 2021 г.

Основные этапы монтажа. Основные этапы сборки MPD описаны в таблице.

Этап сборки	Срок
Подготовка к включению соленоидального магнита (криогеника, электропитание и др.)	Январь–сентябрь 2021 г.
Измерения магнитного поля	Октябрь–ноябрь 2021 г.
Подготовка к монтажу детекторных подсистем	Декабрь 2021 г.
Монтаж ToF, TPC, платформы с электроникой, кабелей	Январь–июнь 2022 г.
Монтаж пучковой трубы, FHCAL, системы для тестов на космических лучах	Июль 2022 г.
Испытания установки на космических лучах	Июль–декабрь 2022 г.
Сдача в эксплуатацию	Декабрь 2022 г.
Работа на пучке	Март 2023 г.

Моделирование Монте-Карло и анализ данных. Подготовка к физическому анализу осуществляется в пяти рабочих группах по физике проекта MPD. В последние месяцы на суперкомпьютере «Говорун» в ЛИТ ОИЯИ были выполнены крупномасштабные моделирования методом Монте-Карло, каждое включало по несколько миллионов событий. Выработана процедура валидации данных Монте-Карло. Специальный вычислительный кластер NICA в ЛФВЭ также регулярно используется членами коллаборации MPD для анализа этих данных и оценки характеристик установки MPD. Это позволило подготовить несколько десятков научных докладов от коллаборации MPD на международные научные конференции 2020 г.

Эксперимент BM@N. Коллаборация BM@N включает 250 физиков и инженеров из 20 институтов и 10 стран. Целью эксперимента является исследование динамики реакций и изучение свойств адронов в плотной ядерной материи, изучение рождения странных гиперонов около порога и поиск гиперядер во взаимодействиях выведенных пучков нуклотрона с фиксированными мишенями. В рамках проекта также ведется исследование структуры ядер на малых межнуклонных расстояниях.

Анализ данных. В 2020 г. был выполнен анализ экспериментальных данных, зарегистрированных во взаимодействиях ядер аргона с кинетической энергией 3,2 А·ГэВ на ядрах мишеней Al, Cu, Sn и Pb. В указанных взаимодействиях выделен сигнал

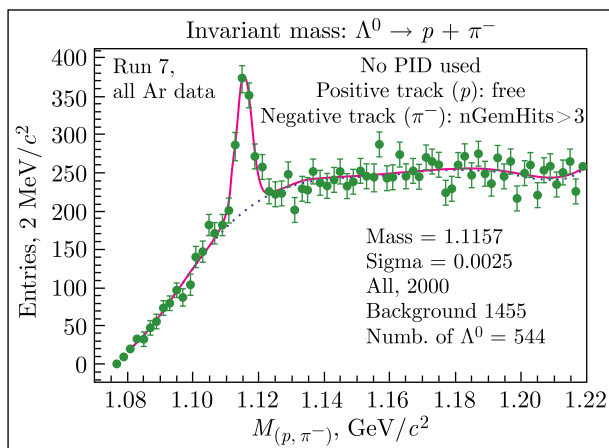


Рис. 5. Сигнал Λ -гиперонов в спектре эффективных масс пар (p, π^-) во взаимодействиях пучка аргона с энергией 3,2 А·ГэВ с различными мишенями

Λ -гиперонов в спектре эффективных масс (p, π^-) -пар (рис. 5).

По данным центральной и внешней трековых систем и времяпролетной системы идентифицированы заряженные π^+ -, K^+ -мезоны, а также протоны и легкие ядерные фрагменты: ${}^3\text{He}$, $d/{}^4\text{He}$ (рис. 6). Проводится анализ выходов данных частиц в зависимости от кинематических переменных.

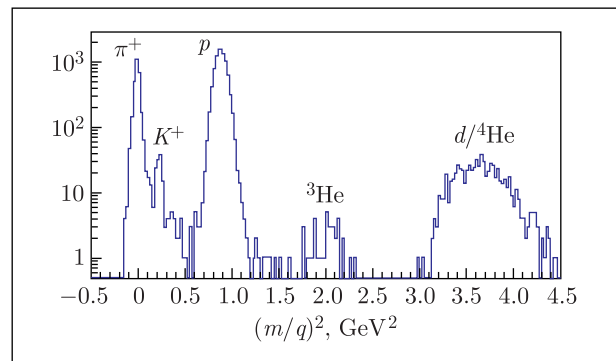


Рис. 6. Идентификация π^+ , K^+ , p , ${}^3\text{He}$ и $d/{}^4\text{He}$ времяпролетной системой ToF-700 во взаимодействиях ядер Ar с энергией 3,2 А·ГэВ с разными мишенями: распределение идентифицированных частиц по квадрату массы, нормированной на заряд

По программе изучения нуклонных корреляций выполнен полный анализ данных в исследуемых взаимодействиях ядер углерода с жидководородной мишенью. По результатам исследования подготовлена статья «The Transparent Nucleus: Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam», принятая к публикации в журнал Nature Physics. В рамках исследования был измерен квазиупругий эксклюзивный процесс ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow 2p + {}^{11}\text{B}$ с регистрацией всех продуктов реакции (рис. 7) и идентифицированы события рассеяния протонов на коррелированных нуклонных парах в ядре углерода в реакциях типа ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow 2p + {}^{10}\text{B}/{}^{10}\text{Be} + (n/p)$.

Статус экспериментальной установки.

По программе развития установки для исследования взаимодействий тяжелых ядер разрабатывались детекторы для полной конфигурации BM@N (рис. 8). Выполнены тесты на космических мюонах семи детекторов GEM с размером чувствительной области 163×39 см, изготовлена электроника считывания данных детекторов на основе чипов фирмы IDEAS (Норвегия).

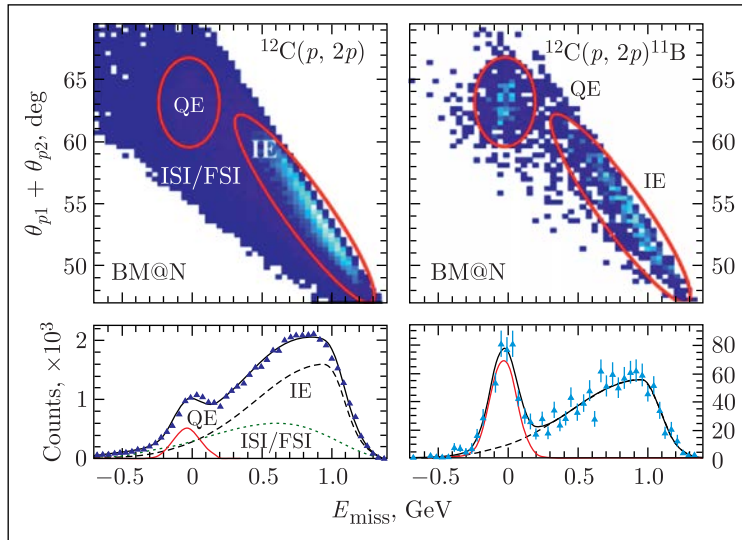


Рис. 7. Квазиупругие события (QE), выделенные по корреляции между недостающей энергией E_{miss} в системе покоя ^{12}C и углом между двумя рассеянными протонами в лабораторной системе. Также показан вклад фоновых событий неупругих взаимодействий (IE) и вторичных взаимодействий в начальном и конечном состояниях (ISI, FSI)

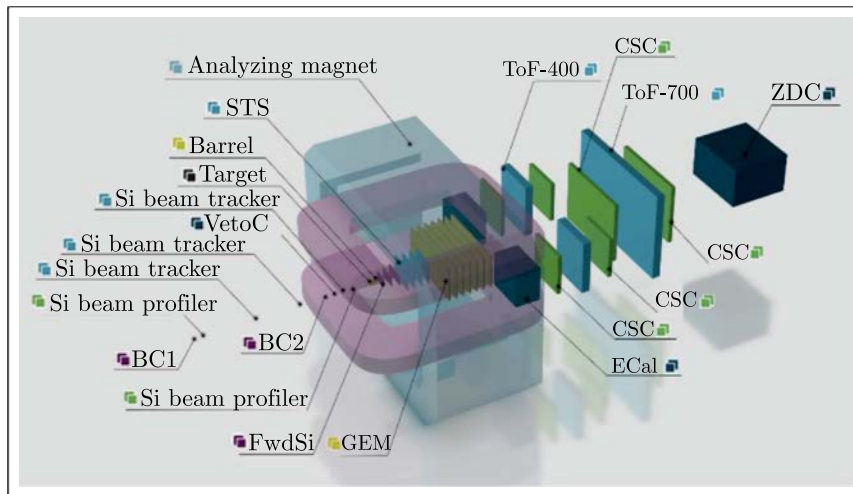


Рис. 8. Полная конфигурация детекторов BM@N для исследования взаимодействий тяжелых ядер

Разработана конструкция и изготовлены кремниевые микроstriповые детекторы для трех плоскостей передних трековых детекторов FwdSi, которые будут установлены сразу после мишени; изготавливается электроника считывания на основе чипов фирмы IDEAS.

Изготовлены кремниевые детекторы для трех пучковых трековых детекторов (Si beam tracker) и двух профилометров пучка ионов (Si beam profiler), которые будут установлены до мишени для измерения траектории пучка и его фокусировки на мишень; разработана конструкция детекторов, изготавливается электроника считывания; на основе азимутальных кремниевых сегментов изготавливается триггерный детектор.

Совместно с сотрудниками коллаборации CBM разрабатывается широкоапертурная трековая система, состоящая из четырех плоскостей микроstriповых кремниевых детекторов STS; разрабатывается быстрая электроника считывания и приема данных для этих детекторов; проведено моделирование гибридной трековой системы на основе FwdSi/STS- и GEM-детекторов для определения эффективности регистрации каскадных распадов гиперонов и гиперядер во взаимодействиях тяжелых ядер.

В дополнение к одной уже работающей изготовлены три катодные стриповые камеры CSC размером 113×107 см для регистрации треков для времяпролетной системы ToF-400;

разработана конструкция двух больших катодных камер CSC размером 219×145 см для времяпролетной системы ToF-700. Разрабатывается перспективная быстрая электроника считывания для детекторов GEM, CSC на основе чипов VMM3a для работы в пучках ионов большой интенсивности (2 МГц).

Изготовлен и установлен вакуумный ионопровод в экспериментальной зоне BM@N до мишени; изготавливается вакуумный ионопровод из тонкого углепластика внутри установки от мишени до адронного калориметра ZDC для подавления взаимодействий тяжелых ионов с воздухом; изготовлена вакуумная мишенная станция с несколькими мишенями.

В дополнение к калориметру FHCAL для измерения центральности взаимодействий изготовлен кварцевый годоскоп для регистрации ядерных фрагментов в области пучков тяжелых ионов большой интенсивности.

В 2021 г. намечается возобновить исследование в эксперименте BM@N и поздней осенью планируется эксперимент по программе исследований корреляций нуклонов на малых расстояниях с использованием пучка ионов углерода.

Проект SPD. В 2020 г. подготовлен концептуальный проект CDR SPD для рассмотрения на ПКК по физике частиц, удовлетворяющий требованиям обновленной физической программы и внешних условий. Ожидаемые характеристики установки оценены с использованием методов моделирования Монте-Карло.

Созданы и испытаны следующие прототипы детекторов.

Разработан 16-слойный прототип мюонной системы SPD, выполнены электромагнитные расчеты для магнитной системы. Разработан прототип координатного модуля вершинного детектора размером 63×63 мм, основанный на использовании двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов и плоского полиимидного кабеля. Проведены испытания прототипов гетерогенного калориметра на космических лучах. Проведены первые тестирования с радиоактивным источником платы считывания VMM3a для прототипа строу-трекера. Успешно испытан прототип детектора на основе микроканальных пластин для внутренней части BBC (Beam-Beam Counter) SPD в условиях сверхглубокого вакуума до 10^{-10} Па. Протестирована первая версия прототипа регистрирующей электроники с опцией Time-over-Threshold (ToT), пред-

назначенная для внешней сцинтилляционной части BBC.

Создан стенд miniSPD для совместного облучения различных детекторов SPD космическими мюонами, который используется также для тестов и отладки систем сбора данных, медленного контроля, газораспределения, низковольтного и высоковольтного питания. Для 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 низкоэнергетического канала, выполняется моделирование для высокоэнергетического канала.

Проведены 3 дистанционных рабочих совещания протоколлораии SPD для подготовки CDR и формирования физической программы, подготовлен проект конституции SPD, продолжается формирование коллаборации.

Проект ALPOM-2. Задачей исследования в рамках реализации проекта ALPOM-2 было нахождение анализирующей способности в инклюзивном рассеянии нуклонов. Три новых подхода в развитии поляриметрии — включение калориметра для отбора высокоэнергетических нуклонов в конечном состоянии, использование реакции перезарядки и замена богатой водородом легкой мишени более тяжелыми ядрами — открывают путь к более простым и эффективным измерениям поляризации нуклонов в области ГэВ-ных энергий.

На рис. 9 приведена анализирующая способность в зависимости от поперечного им-

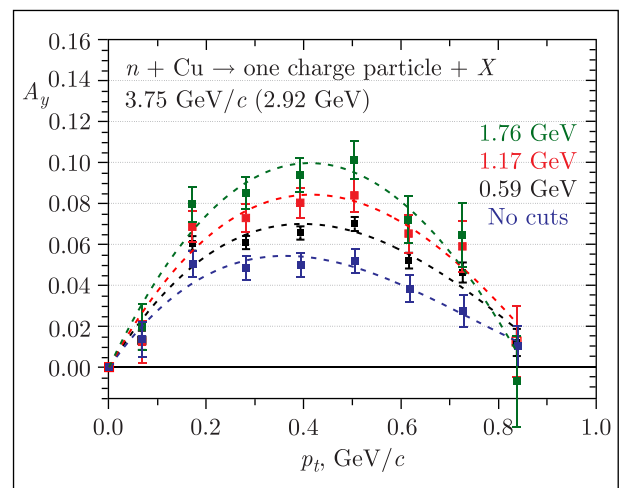


Рис. 9. Анализирующая способность A_y в зависимости от поперечного импульса p_t

пульса и разных порогов энерговыделения в адронном калориметре. Видно, что анализирующая способность растет (примерно в 2 раза) при подавлении частиц с низким энерговыделением. Полученные данные и их интерпре-

тация [1] были высоко оценены в Лаборатории Джефферсона (США), где на этой основе на комплексе СЕВАФ в JLAB был одобрен эксперимент по измерению отношения электромагнитных формфакторов нейтрона.

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. Кроме того, сотрудники продолжали участвовать в поддержании и развитии анализа GRID-ALICE в ОИЯИ.

Скорректирован и завершен анализ фемтоскопических корреляций пар K^+K^- для Pb–Pb-столкновений при 2,76 ТэВ [2], сделанный в рамках модели FSI с использованием нового дубненского фита с традиционными параметрами для вкладов состояний $a_0(980)$ (Martin, Achasov) и свободных параметров для $f_0(980)$. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с предсказаниями модели: значения массы и ширины мезона $f_0(980)$, $M = (990 \pm 20) \text{ МэВ}/c^2$ и $\Gamma = (39,7 \pm 7,94(\text{стат.}) \pm 11,8(\text{сист.})) \text{ МэВ}/c^2$, соответствуют табличным (PDG) данным. Эти результаты были доложены группой ОИЯИ на конференции ICPPA-2020, готовится публикация.

Результаты анализа фемтоскопических корреляций для пар тождественных заряжен-

ных каонов в Pb–Pb-взаимодействиях при 5,02 ТэВ сравнивались с предсказаниями гидродинамической модели EPOS. На рис. 10 показаны радиусы источников излучения каонов, R_{inv} , в зависимости от поперечных импульсов пар, k_T , и центральности событий. Сплошные и пунктирные линии — предсказания модели с перерасеянием частиц в конечном состоянии и без перерасеяния соответственно. Видно, что механизм перерасеяния частиц важен для правильного описания экспериментальных данных. Результаты были также представлены группой ОИЯИ на ICPPA-2020 [3].

Новые результаты анализа фемтоскопических корреляций пар тождественных заряженных пионов и каонов в pp -взаимодействиях при 13 ТэВ были получены отдельно для сферичных ($S_T > 0,7$) и струйных ($S_T < 0,3$) событий (S_T — поперечная сферичность). Основной результат — уменьшение радиусов источников излучения частиц с ростом k_T не только в струйных, но и в сферичных событиях, что указывает на нетривиальное коллективное поведение частиц, ожидаемое только для ядро-ядерных столкновений при возможном образовании кварк-глюонной плазмы.

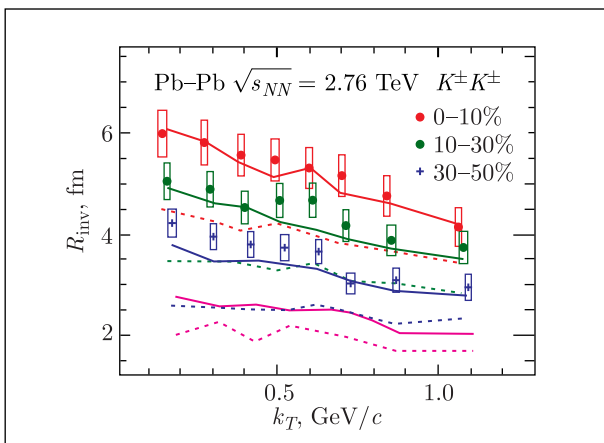


Рис. 10. Радиусы источников излучения пар заряженных каонов в зависимости от поперечного импульса пар. Линии — предсказания модели EPOS

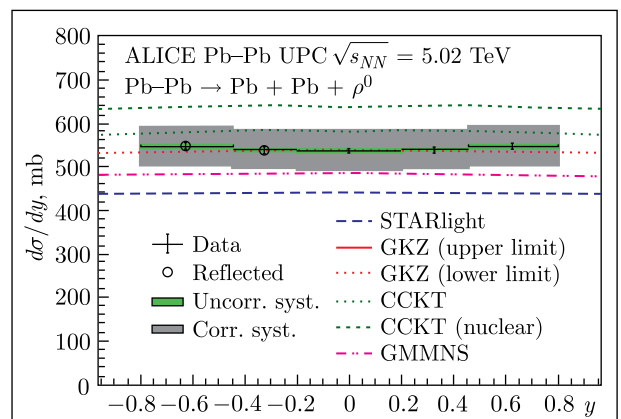


Рис. 11. Сравнение дифференциальных сечений (по скорости) когерентного рождения ρ^0 -мезонов с предсказаниями различных моделей

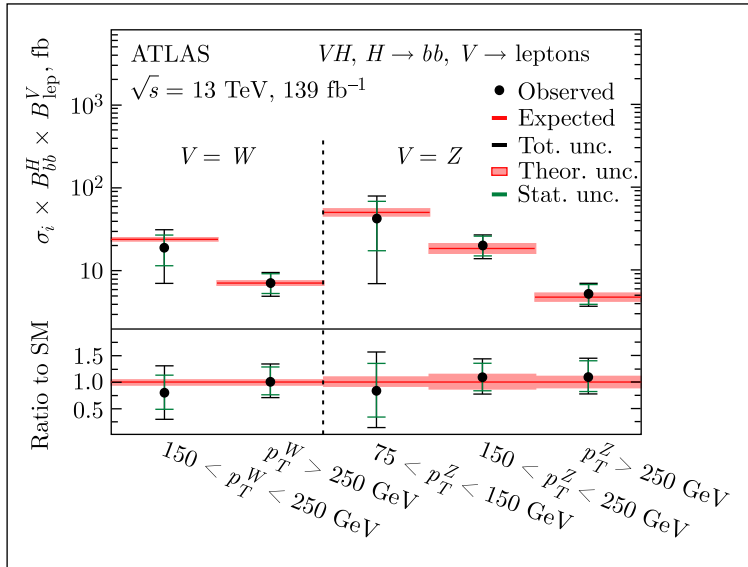


Рис. 12. Измеренное сечение $VH(bb)$, $V \rightarrow$ лептоны

Завершен анализ когерентного рождения ρ^0 -мезонов в ультрапериферических Pb–Pb-соударениях при 5,02 ТэВ. Определены дифференциальные сечения их рождения, и сделаны сравнения с предсказаниями моделей (рис. 11). Кроме того, проведены первые измерения когерентного фоторождения объекта, подобного резонансному состоянию с массой около $1700 \text{ МэВ}/c^2$. Эти результаты были доложены на ICHEP-2020 в Праге и опубликованы в JHEP [4].

Группа ОИЯИ продолжала активные исследования в рамках проекта модернизации электромагнитного калориметра PHOS ALICE с целью выбора оптимального фотоприемника и электроники считывания.

ATLAS. На статистике, соответствующей интегральной светимости 139 фб^{-1} , на LHC при $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ было продолжено изучение процесса ассоциативного рождения бозона Хиггса с W - или Z -бозоном и его распадом на пару b -кварков, и наблюдается значимость сигнала в каналах с W - или Z -бозоном 4,0 и 5,3 стандартных отклонений при ожидаемых значениях 4,1 и 5,1 соответственно. Сечение ассоциированного рождения бозона Хиггса измерено как функция поперечного импульса калибровочного бозона (рис. 12) [5]. Все измерения поперечного сечения соответствуют ожиданиям Стандартной модели, а общие неопределенности варьируются от 30% в области больших поперечных импульсов калибровочного бозона до 85% в областях малых значений импульсов. Также установлены ограничения на параметры эффективного

лагранжиана, чувствительного к модификации процессов WH и ZH , а также к распаду бозона Хиггса на b -кварки.

Совместно с коллегами из ЛНФ проведены радиационные испытания быстродействующих дифференциальных усилителей, продемонстрировавшие стабильную работу до величины нейтронного флюенса $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

CMS. Исследования, проводимые группой ОИЯИ в эксперименте CMS в 2020 г., были направлены на поиск сигналов новой физики в канале с парой лептонов и множественным рождением жестких частиц, проверку предсказаний расширенных калибровочных моделей с нарушением и без нарушения лептонного числа (LFV), сценариев с

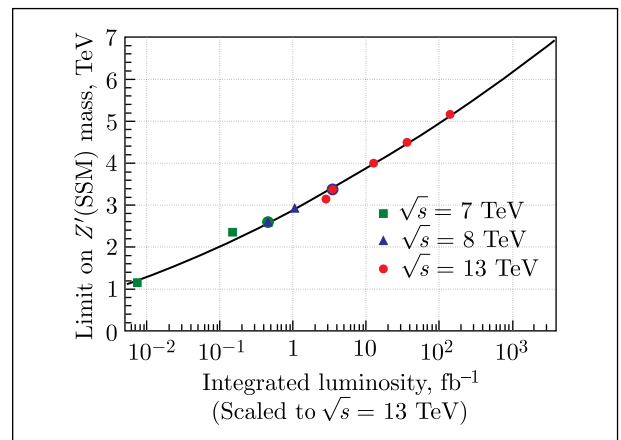


Рис. 13. Наблюдаемые при энергиях в с. д. м. 7, 8 и 13 ТэВ массовые пределы для гипотетического калибровочного бозона Z' в модели SSM в зависимости от интегральной светимости

дополнительными пространственными измерениями, с расширенным хиггсовским сектором, а также на проверку упрощенных описаний взаимодействий темной материи (ТМ) с обычной материей СМ. Прецизионные тесты Стандартной модели проводились в канале с парой мюонов, а также в процессах инклюзивного рождения струй.

В канале с парой лептонов сделаны предсказания (рис. 13) на массовые пределы нового тяжелого бозона Z' (резонанс со спином 1 в модели SSM) расширенного калибровочного сектора СМ, которые могут быть достигнуты при работе LHC в режиме высокой светимости (1000–3000 fb^{-1}) с учетом последних данных CMS [6]. Для модели SSM продемонстрировано наступление кинематического предела в районе 7 $\text{TэВ}/c^2$ при энергии 13 TэВ , что соответствует 7–8 $\text{TэВ}/c^2$ при 14 TэВ .

Проведен обобщающий анализ результатов и перспектив поиска сигналов многомерной гравитации в условиях ограниченной энергии LHC (14 TэВ) [7]. Продемонстрировано, что LHC достиг своего порога в наблюдении возможных сигналов квазиклассических многомерных черных дыр RS- и ADD-типа. Однако существует и по-прежнему остается окно возможностей для так называемых квантовых черных дыр (КЧД) с характерной экспериментальной сигнатурой с нарушением аромата ($e\mu/e\tau/\mu\tau$). Полученные ограничения на минимально допустимые значения массы КЧД составляют от 3,6 до 5,6 $\text{TэВ}/c^2$ в зависимости от модели и числа дополнительных измерений n (рис. 14).

В канале с парой противоположно заряженных лептонов проведен экспериментальный поиск переносчика взаимодействия между полями СМ и сектором темной материи. В отсутствие значимого превышения сигнала над ожидаемым фоном СМ в рамках упрощенной модели ТМ (с одной дираковской частицей ТМ и одним переносчиком) установлены верхние пределы на массы частиц ТМ и аксиально-векторного и векторного переносчиков [8, 9].

В рамках программы 2-й фазы модернизации CMS физики ОИЯИ участвовали в переоборудовании электроники и системы охлаждения CSC мюонной станции ME1/1. Проводились тесты собранных камер на космических лучах. Была введена в эксплуатацию модернизированная система регистрирующей электроники центральных адронных калориметров (HCAL), базирующейся на кремниевых фотоумножителях (SiPM). Разработана и проверена на прототипе модуля высокогранулярного торцевого калориметра (HGCAL) новая методика сборки активных сцинтилляционных элементов. Проводились исследования радиационной стойкости компонентов и оптимизации конфигурации этого калориметра.

В 2021 г. на полной статистике LHC планируется продолжить исследования, направленные на поиск новой физики и измерение характеристик процесса Дрелла–Яна. Планируется завершить измерение асимметрии «вперед-назад» и угловых коэффициентов, а также создать прототип автоматизированной системы контроля качества данных.

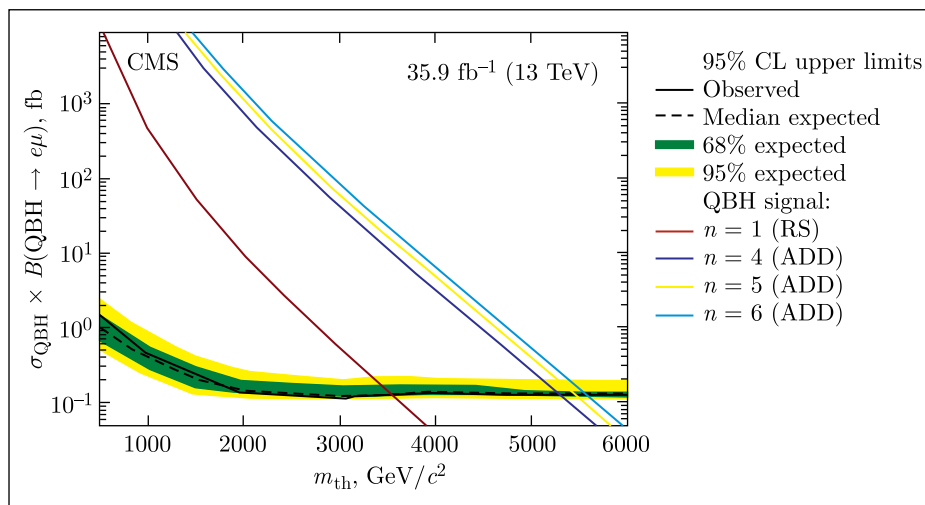


Рис. 14. Верхние пределы на сечение рождения КЧД с распадом в конечное состояние $e\mu$ в зависимости от порогового значения массы КЧД. Показаны предсказания для моделей многомерных КЧД для нескольких выборов числа дополнительных измерений: $n = 1$ (RS) и $n = 4, 5, 6$ (ADD)

Эксперименты на протонном синхротроне в ЦЕРН. COMPASS. Измерение процессов с рождением адронов в полуинклюзивных реакциях глубоконеупругого рассеяния (SIDIS) лептонов на неполяризованных нуклонах позволяет получить информацию о собственном поперечном импульсе кварков в нуклоне и о функции Бора–Малдерса путем измерения азимутальных модуляций сечений этих реакций. Эти модуляции были недавно измерены в эксперименте HERMES в DESY на протонных и дейтронных мишенях, а также в эксперименте COMPASS с использованием мюонного пучка ЦЕРН SPS и мишени ${}^6\text{LiD}$ [10]. В обоих случаях амплитуды модуляций $\cos\varphi_h$ и $\cos 2\varphi_h$ (рис. 15) демонстрируют сильные кинематические зависимости как для положительных, так и для отрицательных заряженных адронов. С некоторых пор было известно, что измеренные адронные конечные состояния в этих экспериментах получают вклад в SIDIS от эксклюзивных дифракционных процессов с рождением векторных мезонов, что особенно важно при больших значениях z , доли энергии виртуального фотона, переносимой адроном.

В предыдущих измерениях азимутальной асимметрии этот вклад не учитывался, по-

скольку не было известно, что он может искажать азимутальные модуляции. В настоящее время разработан метод оценки вклада эксклюзивных реакций в азимутальные асимметрии. Вычитание этого вклада приводит к лучшему пониманию кинематических эффектов, а оставшаяся ненулевая модуляция $\cos 2\varphi_h$ дает указание на ненулевой эффект функции Бора–Малдерса.

Проведено измерение матричных элементов спиновой плотности (SDMEs) в процессах жесткого эксклюзивного рождения ω -мезонов с использованием поляризованных μ^+ - и μ^- -пучков 160 ГэВ/с, падающих на жидкую водородную мишень [11]. Измерение охватывает диапазон инвариантных масс конечного адронного состояния $5,0 \text{ (ГэВ/с)}^2 < W < 17,0 \text{ (ГэВ/с)}^2$ со средней кинематикой $Q^2 = 2,1 \text{ (ГэВ/с)}^2$, $W = 7,6 \text{ (ГэВ/с)}^2$ и $p_T^h = 0,16 \text{ (ГэВ/с)}^2$. Измеренные ненулевые SDMEs для переходов поперечно-поляризованных виртуальных фотонов в продольно-поляризованные векторные мезоны ($\gamma_T^* \rightarrow V_L$) указывают на нарушение сохранения спиральности s -канала. Наблюдается значительный вклад переходов неестественного четного обмена (UPE), который уменьшается с увеличением W . Получен-

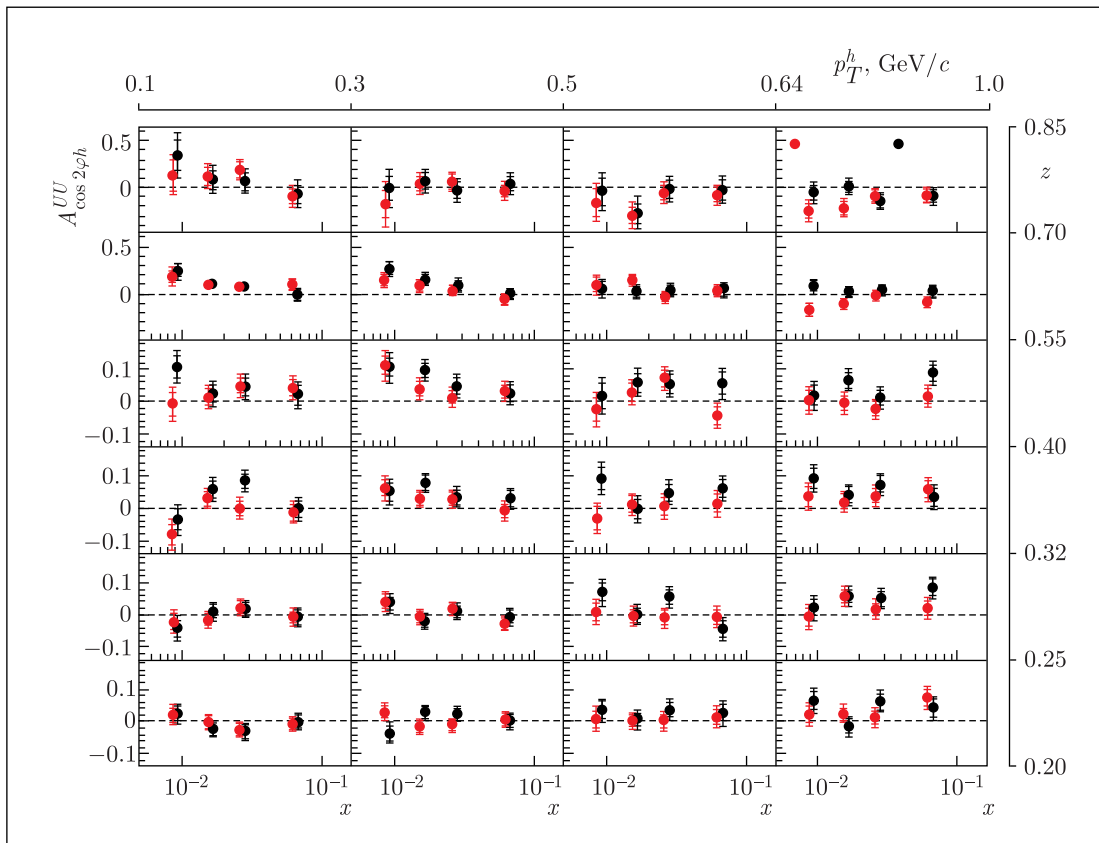


Рис. 15. Полуинклюзивные асимметрии $A_{\cos 2\varphi_h}^{UU}$, полученные на ${}^6\text{LiD}$ -мишени

ные результаты позволяют модельно-зависимым образом оценить вклад переходов UPE и оценить роль спирально-зависимых обобщенных партонных распределений в процессах эксклюзивного рождения ω -мезона.

NA61/SHINE. Основная цель эксперимента NA61 — изучение особенностей, характерных для начала деконфайнмента и образования файербола, а также поиск критической точки. Поиск критической точки сильновзаимодействующей материи ведется в эксперименте NA61/SHINE путем сканирования фазовой диаграммы как по температуре, так и по барионному химическому потенциалу, что достигается как проведением измерений при различных энергиях, так и в исследованиях зависимостей от размеров сталкивающихся систем. Изучались динамические свойства энергетической зависимости отношения выхода каонов к пионам и наклоны спектров каонов по поперечной массе, хорошо известных как «step»- и «horn»-структуры. В столкновениях Pb+Pb такие структуры возникают при образовании смешанной фазы адронного газа (HG) и кварк-глюонной плазмы (QGP). Обнаружена быстрая смена «horn» в энергетической зависимости K/π в центральных столкновениях Pb+Pb и Au+Au, что интерпретируется как проявление деконфайнмента в ядерных взаимодействиях — переход от HG к QGP. Эксперимент NA61/SHINE дополнил эти данные новыми измерениями в реакциях $p+p$, Be+Be и Ag+Sc, которые показали, что энергетическая зависимость параметра наклона в $p+p$ -взаимодействиях имеет форму плато «step»; данные по Be+Be-столкновениям близки к результатам для $p+p$ -взаимодействий, а данные по взаимодействиям Ag+Sc проявляют зависимость от энергии столкновения, качественно аналогичную данным в реакции $p+p$, но плато находится на значительно более высоком уровне. Результаты для $p+p$ -взаимодействий могут свидетельствовать о проявлении деконфайнмента в малых системах.

В связи с планами увеличения более чем в 10 раз интенсивности пучка ионов свинца в ЦЕРН начата модернизация практически всех детекторных систем этой установки. Сотрудники ОИЯИ осуществляют модернизацию времяпролетной системы (ToF) на базе многозачорных резистивных камер (MRPC) со считывающими стрипами, созданных для эксперимента NA61 на основе разработок, проведенных в ЛФВЭ для проекта NICA.

NA62 (NA48/2). Эксперимент NA62 в ЦЕРН посвящен изучению очень редкого распада заряженного каона на заряженный пион, нейтрино и антинейтрино. В эксперименте получен новый результат в изучении распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, основанный на данных, зарегистрированных в 2018 г. Достигнута чувствительность к одиночному событию на уровне $1,11 \cdot 10^{-11}$, что соответствует ожидаемому в рамках Стандартной модели 7,6 событиям. Экспериментально обнаружены 17 кандидатов в события сигнала при ожидаемом уровне фона 5,3 события. Вместе с тремя событиями, обнаруженными ранее коллаборацией NA62 в данных 2016 и 2017 гг., это приводит к самому точному измерению относительной вероятности распада: $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11,0_{-3,5}^{+4,0} \pm 0,3_{\text{сист.}}) \times 10^{-11}$, что находится в согласии с ожиданиями Стандартной модели $(8,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-11}$. NA62 возобновит регистрацию данных после длительной остановки ЛHC с целью достижения первоначально планируемой точности порядка 10%.

Получены новые результаты анализа, меняющего флейвор распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ [12]. Предварительно измеренные параметры формфактора имеют величины $a = -0,592 \pm 0,015$, $b = -0,699 \pm 0,058$, а относительная вероятность распада $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-) = (9,27 \pm 0,11) \cdot 10^{-8}$. Достигнутая точность эксперимента NA62 существенно улучшает имеющиеся мировые данные по этому распаду.

Группа ОИЯИ также активно участвует в обслуживании и развитии установки; ведется наладка производства строу-трубок малого диаметра и моделирование эффективности регистрации треков частиц.

NA64. В отчетный период в эксперименте NA64, отмеченном в 2019 г. дирекцией ЦЕРН в числе наиболее интересных и многообещающих с научной точки зрения проектов, были полностью обработаны и опубликованы данные по поиску сигнала рождения и распада темного фотона A' , набранные в сеансах 2016–2018 гг. на электронном пучке ускорителя SPS ЦЕРН. Суммарная статистика составила $\sim 4 \cdot 10^{11}$ событий. Кандидатов на сигнал, отвечающий сигнатуре темного фотона, не обнаружено.

Группа ОИЯИ отвечает, в частности, за разработку и создание координатных детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок. Институтом были приняты обязательства по изготовлению, оборудованию электроникой

и введению в эксплуатацию 7 новых двуслойных камер из 6-мм строу-трубок размером 600×1200 мм. В 2020 г. изготовлены все камеры, ведутся работы по их оснастке электроникой и тестированию.

Эксперименты на коллайдере RHIC. Сотрудники ЛФВЭ принимают активное участие в эксперименте STAR в Брукхейвене по изучению соударений релятивистских тяжелых ионов. Из малости измеренной относительной разности масс гипертритона и антигипертритона, равной $(1,1 \pm 1,0 \text{ (стат.)} \pm 0,5 \text{ (сист.)}) \times 10^{-4}$, сделан вывод об отсутствии нарушений СРТ-симметрии [13]. Важнейшим научным приоритетом коллаборации STAR является программа сканирования по энергии — Beam Energy Scan II. Цель программы — поиск сигнатур фазовых переходов и критической точки в ядерной материи. Выполнены запланированные измерения при пяти значениях энергии коллайдера (7,7, 9,1, 11,5, 14,6 и 19,6 ГэВ). В 2021 г. предлагается дополнительно провести измерения при шестом значении энергии 16,7 ГэВ. Получены указания о том, что энергетическая зависимость «net-baryon» флуктуаций, возможно, претерпевает значительные изменения. Анализ данных продолжается с привлечением различных моделей. При изучении плоскости события получено ненулевое значение ν_1 для оценки величины прямого потока в Au+Au-столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ.

В рамках подготовки спиновой программы на ускорительном комплексе NICA сотрудники группы разрабатывают прототип ZDC-калориметра на основе кристаллов галлий-гадо-

линиевого граната и абсорберов на основе композиционных сплавов W/Cu. В 2021 г. планируется осуществить сборку прототипа и тестирование на пучке. Кроме того, разработаны и изготовлены 4 детектора для поляриметра на основе GaGG-кристаллов диаметром 52 мм и длиной 50 мм для установки на выходе линейного ускорителя ЛУ-20.

Эксперименты на установках в GSI. HADES. Основной целью эксперимента HADES является изучение свойств плотной адронной материи, создаваемой в соударениях тяжелых ионов. Группой ОИЯИ была выполнена работа по интерпретации полученных на HADES данных по рождению e^+e^- -пар в пион-нуклонном взаимодействии. Проводится модификация OPER-модели для моделирования процессов $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-$ и $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ при энергиях 3,5 и 4,5 ГэВ. Сотрудники также участвовали в техническом обслуживании многопроволочных дрейфовых камер и в работах по замене регистрирующей электроники.

СВМ. Эксперимент СВМ будет одним из основных на создаваемом коллайдере FAIR. В 2020 г. группой ОИЯИ были выполнены расчеты магнита для мюонной опции установки СВМ. Получена оценка сил, действующих на катушки сверхпроводящего магнита и на мюонный детектор. Для мюонной системы СВМ изготовлена пробная партия FEE на базе микросхемы AST1-1 для прототипа строу-детектора размером 50×50 см, проведены радиационные тесты прототипа. Изготовлена 16-канальная плата с SiPM-считыванием для адронного калориметра и выполнено ее тестирование.

СОБЫТИЯ

20–21 апреля в Дубне состоялось 5-е коллаборационное совещание VM@N. Было представлено свыше 40 докладов, обсуждались недавние результаты по взаимодействиям ядер углерода и аргона с фиксированными мишенями.

23–24 апреля в режиме видеоконференции проводилось 5-е коллаборационное совещание MPD. Было представлено 27 докладов, посвященных созданию детекторных систем MPD и результатам физических анализов.

26 августа делегация ОИЯИ приняла участие в торжественном открытии года китайско-российского научно-технического и инновационного сотрудничества, мероприятия в рамках которого будут проводиться в 2021 г.

В ходе мероприятия было подписано соглашение между Министерством науки и технологий Китайской Народной Республики и Объединенным институтом ядерных исследований об участии КНР в строительстве и эксплуатации ускорительного комплекса NICA.

15–16 сентября состоялось второе заседание комитета по анализу затрат и графика исполнения работ по проекту «Нуклотрон–NICA», сформированного по решению Комитета полномочных представителей правительств стран-участниц ОИЯИ. Комитет отметил значительный прогресс в реализации проекта NICA со времени его последнего заседания в феврале и поздравил команду и руководство с их достижениями. Комитет осо-

бенно отметил прогресс в строительстве (зал MPD почти завершен и скоро будет готов для магнитных испытаний), а также завершение монтажа бустера и начало комплексного пусконаладочного процесса.

20–23 октября в ЛФВЭ прошла международная конференция «Гранты РФФИ для NICA», на которой держатели грантов доложили о результатах исследований в течение первых двух лет своей работы по грантам. Помимо этого первый день работы был насыщен обзорными лекциями ведущих теоретиков, презентациями лидеров проекта NICA, экспериментов MPD, BM@N,

SPD, докладами участников экспериментов на комплексах FAIR, LHC и RHIC. Программа конференции доступна по ссылке <https://indico.jinr.ru/event/1469>.

26–27 октября в Дубне проходило 6-е рабочее совещание коллаборации BM@N. Часть докладов была представлена очно, часть — в режиме видеоконференции. Из 40 докладов более 25 были прочитаны молодыми сотрудниками на параллельных секциях.

28–30 октября состоялось 6-е коллаборационное совещание MPD, проходившее в режиме видеоконференции со 151 участником, было заслушано 40 докладов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Basilev S. et al.* Measurement of Neutron and Proton Analyzing Powers on C, CH, CH₂ and Cu Targets in the Momentum Region 3–4.2 GeV/c // *Eur. Phys. J. A.* 2020. V. 56. P. 26.
2. *Mikhaylov K. (on behalf of the ALICE Collab.)*. K^+K^- Correlations in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV by ALICE at the LHC // 5th Intern. Conf. on Particle Physics and Astrophysics “ICPPA-2020”, Moscow, Oct. 5–9, 2020.
3. *Rogochaya E., Batyunya B., Malinina L., Mikhaylov K., Romanenko G., Verner K.* Pion and Kaon Femtoscopy in Pb–Pb Collisions at 2.76 TeV in Comparison with EPOS 3 Model Prediction // 5th Intern. Conf. on Particle Physics and Astrophysics “ICPPA-2020”, Moscow, Oct. 5–9, 2020.
4. *Pozdnyakov V. (on behalf of the ALICE Collab.)*. Vector Meson Photoproduction in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at the LHC with ALICE // 40th Intern. Conf. on High Energy Physics “ICHEP 2020”, Prague, July 28 – Aug. 6; *ALICE Collab.* Coherent ρ^0 Photoproduction in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // *JHEP.* 2020. V. 06. P. 035.
5. *ATLAS Collab.* Measurements of WH and ZH Production in the $H \rightarrow bb$ Decay Channel in pp Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector. arXiv:2007.02873v1; *Eur. Phys. J. C.* (submitted).
6. *Зарубин А. В., Ланёв А. В., Савина М. В., Шматов С. В.* Физика с тяжелыми димьюнами // *Очерки по современной физике частиц* / Под общ. ред. В. А. Матвеева, И. А. Голутвина. Дубна: ОИЯИ, 2020. С. 290–317.
7. *Савина М. В., Сеитова Д.* Программа эксперимента CMS по поиску сигналов многомерной низкоэнергетической гравитации на ускорителе LHC // *ЯФ.* 2021. Т. 84, № 2. С. 149–155.
8. *Жижин И. А., Ланёв А. В., Шматов С. В.* Поиск новой физики в дилептонном канале в эксперименте CMS на LHC // Там же. С. 143–148.
9. *Жижин И. А., Ланёв А. В., Шматов С. В.* Поиск тяжелых нейтральных калибровочных бозонов в дилептонном канале в эксперименте CMS на LHC // *Ядерная физика и инжиниринг* (в печати).
10. *COMPASS Collab.* Contribution of Exclusive Diffractive Processes to the Measured Azimuthal Asymmetries in SIDIS // *Nucl. Phys. B.* 2020. V. 956. P. 115039.
11. *COMPASS Collab.* Spin Density Matrix Elements in Exclusive ω Meson Muoproduction. CERN-EP-2020-169; *Eur. Phys. J. C.* (submitted).
12. *Madigozhin D.* New Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ Decay at NA62 // 9th Intern. Conf. on New Frontiers in Physics “ICNFP 2020”, Kolimvry, Crete, Greece, Sept. 4 – Oct. 2. 2020.
13. *STAR Collab.* Measurement of the Mass Difference and the Binding Energy of the Hypertriton and Antihypertriton // *Nature Phys.* 2020. V. 16. P. 409.