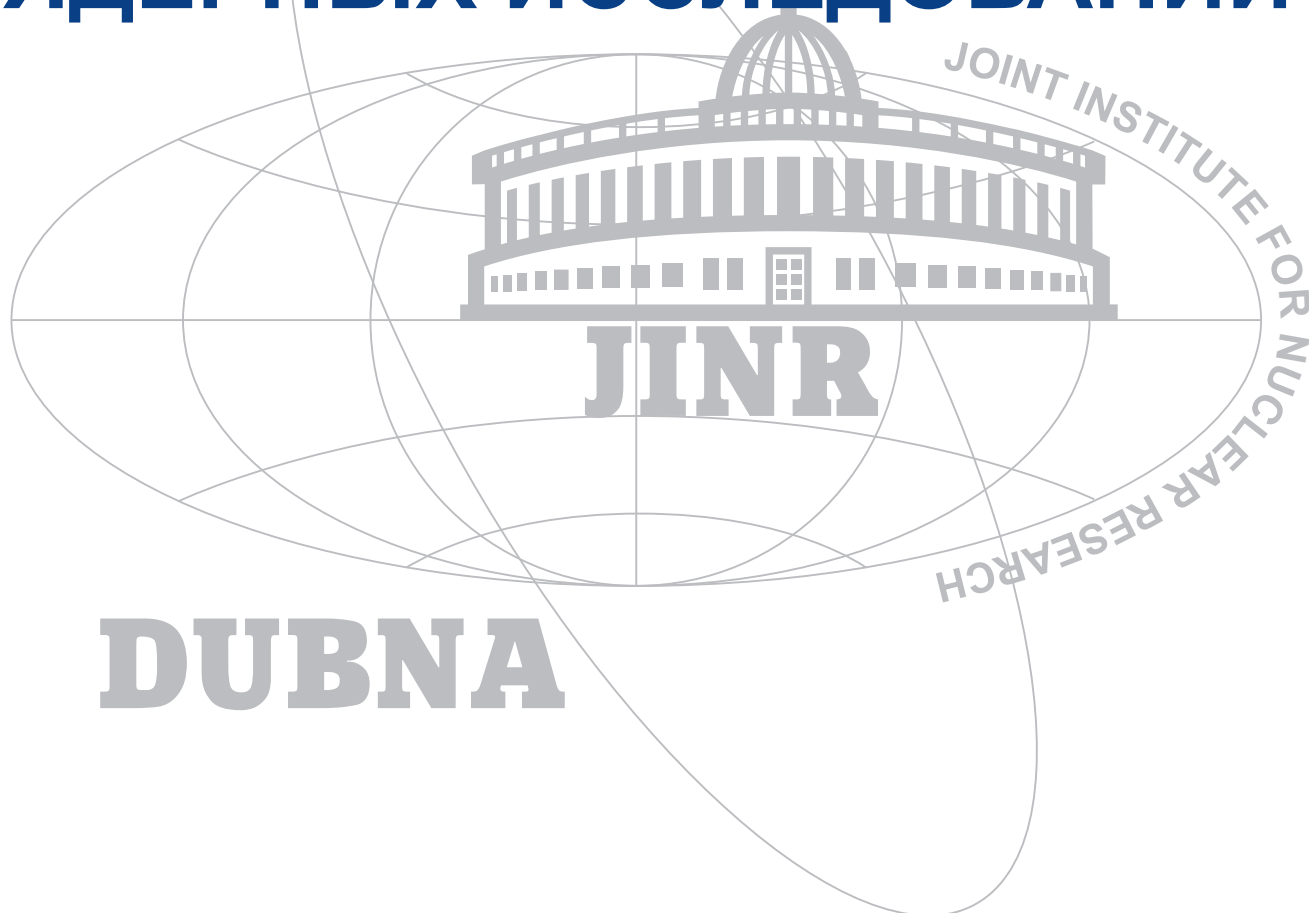


2018

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 2018 г. была сосредоточена на создании и дальнейшем развитии комплекса NICA (проектов «Нуклотрон–

NICA», MPD, BM@N и SPD), на участии в текущих исследованиях на нуклотроне и в экспериментах, проводимых в ускорительных центрах мирового класса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА NICA

Развитие ускорительного комплекса ЛФВЭ в 2018 г. было направлено на дальнейшее создание систем и элементов комплекса NICA.

С февраля по апрель на выведенных пучках ионов $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$ и $^{78}\text{Kr}^{26+}$ был проведен 55-й сеанс работы одного из базовых элементов будущего комплекса NICA — сверхпроводящего синхротрона нуклотрон [1].

В ходе сеанса:

- впервые реализован режим бесструктурного медленного вывода ускоренного пучка из сверхпроводящего синхротрона с использованием ВЧ-шума для повышения качества и однородности пучка (рис. 1);

- новый источник многозарядных ионов KRION 6T, необходимый для реализации программы тяжелых ионов комплекса NICA, продемонстрировал стабильную и надежную работу;

- впервые в России ускорены и выведены из кольца ионы криптона с энергией 3,1 ГэВ/нуклон и продемонстрирована возможность стабильной работы нуклотрона с полем на уровне 18 кГс.

Проект «Нуклотрон–NICA»

Строительные работы

В 2018 г. завершены работы и подготовлены к установке оборудования западное полукольцо коллайдера и здание системы электронного охлаждения бустера. Продолжались работы по строительству восточного полукольца. Ход работ по созданию павильона MPD соответствует плану-графику, предполагающему доставку и установку магнита MPD в конце 2019 г. Построено около 80 % железобетонных конструкций павильона SPD, всего в 2018 г. создано около 500 т железобетонных конструкций.

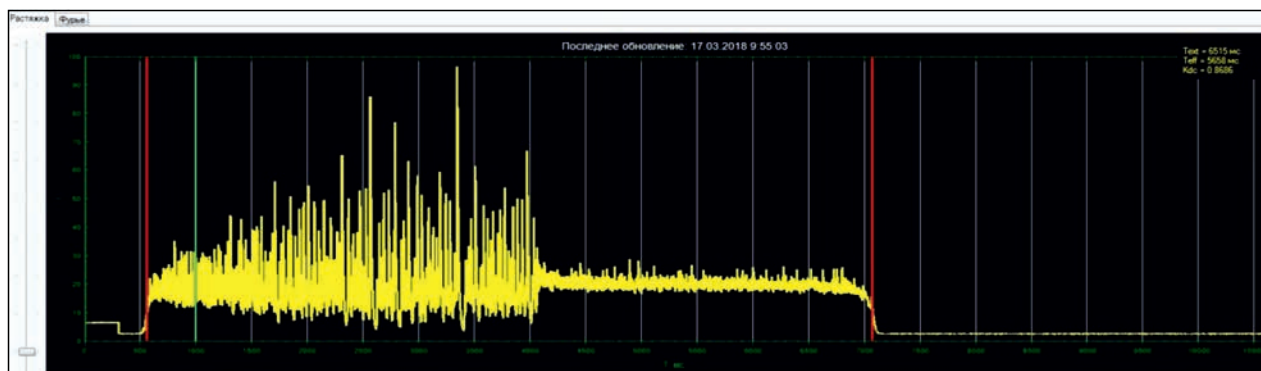


Рис. 1. Левая часть спектра — перед включением кикера, правая — после него

Бустер

В 2018 г. завершено производство и сертификация магнитов бустерного синхротрона. В сентябре 2018 г. начата сборка магнитной системы бустера. Установлены дипольные магниты в двух из четырех квадрантах ускорителя. Работы идут в соответствии с графиком, пусконаладочные работы на пучке и ввод в эксплуатацию бустера намечены на конец 2019 г.

Практически завершены работы по строительству канала транспортировки пучка от линейного ускорителя тяжелых ионов в бустер.

В завершающей стадии находится проектирование канала транспортировки пучка из бустера в нуклотрон, проводимое совместно с ИЯФ СО РАН. Начато производство оборудования.

Коллайдер

В рамках контракта с компанией «Сигма-Фи» (Франция) в 2018 г. выполнено проектирование каналов транспортировки пучков из нуклотрона в кольца коллайдера, начато производство оборудования.

На завершающей стадии находится изготовление двух ВЧ-станций системы, отвечающей за инжекцию пучка в коллайдер. Начато производство оборудования электронного охлаждения и ВЧ-станций коллайдера. Изготовлено и успешно испытано пять дипольных магнитов коллайдера и 20 ярм для дипольных магнитов коллайдера. Успешно протестирован предсерийный образец структурного магнита коллайдера, начато серийное производство.

Вычислительная инфраструктура NICA

Работа по созданию вычислительной инфраструктуры комплекса NICA ведется в тесном сотрудничестве с ЛИТ ОИЯИ. В рамках этой деятельности создана и вводится в эксплуатацию высокоскоростная сеть (400 Гбит/с) между ЛИТ и ЛФВЭ, в лаборатории введен в эксплуатацию новый компьютерный кластер с дисковым пространством 4 ПБ и 4000 процессорных ядер.

Установка MPD

Магнит MPD

Работы по созданию сверхпроводящего магнита многоцелевого детектора идут по графику в рамках заключенного с ASG Superconducting Company (Генуя, Италия) и Vitkovice HM (Чехия) контракта. В 2018 г. в Vitkovice HM была успешно проведена контрольная сборка ярма магнита; изготовлен и испытан криостат магнита MPD; изготовлены все три модуля сверхпроводящей катушки, ведется ее сборка; изготовлен и подготовлен к установке азотный экран; готова к доставке в ОИЯИ система питания сверхпроводящих магнитов.

В рамках сотрудничества с ЦЕРН изготовлена и будет доставлена в 2019 г. из ЦЕРН в ОИЯИ измерительная машина для точного измерения карты магнитного поля в зоне времяпроекционной камеры ($8 \cdot 10^3$ точек в объеме диаметром 814 мм и длиной 3400 мм по оси магнита).

Времяпроекционная камера (TPC)

TPC является основным элементом трековой системы и системы идентификации частиц MPD. В 2018 г. выполнены следующие работы по ее созданию: подготовлена и полностью оборудована чистая комната для сборки TPC; изготовлены, доставлены в ОИЯИ и готовы к сборке все основные элементы корпуса детектора; изготовлен высоковольтный электрод TPC; продолжились работы над считывающей электроникой — в 2018 г. успешно протестирована пилотная система, включающая 512 каналов read-out электроники TPC на базе чипа SAMPA; в коллаборации с группой из БГУ (Минск) разработана система низковольтного питания; изготовлены два лазера для системы внутренней калибровки TPC; начаты работы по вводу в эксплуатацию газовой системы TPC.

Времяпролетная система (ToF)

В 2018 г. было начато массовое производство детекторов времяпролетной системы MPD. Завершено изготовление корпусов детекторов и электроники; велось изготовление и сборка детекторов; группой из Варшавского технологического университета (Польша) в 2018 г. изготовлено большинство компонентов газовой системы ToF.

Быстрый передний детектор (FFD)

В 2018 г. в рамках создания FFD достигнуты следующие результаты:

- подготовлен проект размещения детектора и фронтальной электроники вокруг канала пучка;
- разработана система высоковольтного электропитания на базе модулей Wiener и Iseg;
- разработаны и прототипированы электроника FFD и триггерная система;
- собран стенд для испытаний модулей FFD на мюонах (космика);
- завершены работы по проектированию системы для лазерной юстировки, начато ее испытание.

Электромагнитный калориметр

Создаваемый в рамках эксперимента MPD электромагнитный калориметр типа «шашлык» с проекционной геометрией является уникальным высокотехнологичным проектом. Он состоит из более чем 40 тысяч модулей, которые требуется изготовить и собрать в единую цилиндрическую систему, после чего откалибровать и ввести в эксплуатацию. Проект реализуется совместно с Университетом Цинхуа (Пекин). В 2018 г. в рамках его реализации выполнены следующие работы:

- налажено производство всех компонентов электромагнитного калориметра, в том числе на двух предприятиях изготовлена почти половина сцинтилляционных (из 107) и опорных (из 3×104) пластин. Также на двух предприятиях был размещен заказ на изготовление 10 млн свинцовых пластин;

- организованы два участка сборки модулей калориметра (в ИФВЭ и на заводе «Тензор»). На них в 2019 г. запланирована работа по сборке модулей в рамках квоты ОИЯИ — 25 %. Для сборки модулей по квоте Китая (75 %) организован первый участок сборки в Пекине. Однако вопрос финансирования работ до сих пор не решен;

- успешно испытаны первые образцы модулей, произведенные в ОИЯИ, Пекине и ИФВЭ;

- продолжено проектирование силовой конструкции MPD (г. Хотьково). Первая партия будет изготовлена к концу 2019 г.

Установка BM@N

Установка BM@N постоянно пополняется новым оборудованием. В 2018 г. центральная трековая система была оснащена тремя передними стриповыми Si-детекторами и шестью детекторами GEM площадью 163×45 см. Во время набора данных использовались различные времяпролетные системы, электромагнитный и адронный калориметры, внешний трекер, включающий дрейфовые камеры и катодную стриповую камеру, детектор для регистрации нейтронов, детекторы мониторинга пучка и триггерные детекторы.

Физическая программа BM@N была расширена проектом «Изучение короткодействующих корреляций» (SRC). Международная коллаборация, в которую входят представители ОИЯИ, России, США, Франции, Германии и Израиля, подготовила требуемую конфигурацию установки к работе и успешно провела первый набор данных в ходе 55-го сеанса нуклотрона. С 3 по 17 марта было набрано почти 20 ТБ (8 млн событий) данных на пучках углерода, сбрасываемых на жидководородную мишень с энергией 4 ГэВ. Ведется анализ данных.

После сеанса по программе SRC оборудование было модифицировано в соответствии с требованиями программы тяжелых ионов BM@N, и сеанс был продолжен на пучках аргона и криптона с кинетической энергией 3,2 и 2,3 (2,9) ГэВ соответственно. Набились данные по неупругому взаимодействию пучков ионов с ядерными мишенями (Al, Cu, Sn, Pb) с целью изучения реакций с рождением гиперонов, странных мезонов, фрагментов легких ядер и мультигамма-состояний. Полученная статистика составила 200 млн событий. Идет анализ данных [2].

Общие события MPD и BM@N

В апреле и октябре 2018 г. были проведены рабочие совещания по формированию коллабораций BM@N и MPD.

Обсуждения и выступления на первом совещании были сосредоточены вокруг трех основных тем:

- текущий статус подготовки экспериментов BM@N и MPD, планы на будущее, включая все подсистемы, моделирование, ожидаемые параметры детекторов и готовность к анализу данных;

- текущий статус и план-график создания комплекса NICA, ожидаемые параметры;

- процедуры принятия уставов коллабораций, а также формирование руководящих органов коллабораций.

Второе совещание было посвящено обсуждению текущего состояния и планов работ по экспериментам MPD и BM@N и официальным выборам руководящих органов коллабораций. М. Капшин избран официальным руководителем BM@N, А. Максимчук — техническим координатором эксперимента, А. Кисель — официальным руководителем эксперимента MPD, В. Головатюк — его техническим координатором. В коллаборацию BM@N вошло 216 участников, представляющих 17 институтов из 10 стран; в коллаборацию MPD — 436 участников от 26 институтов из 10 стран.

В 2018 г. подписан протокол к Соглашению о сотрудничестве между Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН) и Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ) о разработке и предоставлении ЦЕРН монолитных пиксельных детекторов, фронтальной электроники TPC и других элементов эксперимента MPD установки NICA в ОИЯИ.

Кремниевый вершинный детектор

В 2018 г. продолжались работы над проектированием широкоапертурной кремниевой трековой системы для планируемой глубокой модернизации установки BM@N.

Полностью отлажена технологическая линия сборки модулей для КТС на макетах, и начаты работы над сборкой рабочих модулей.

В декабре 2018 г. проведен тестовый сеанс на выведенном пучке электронов с энергией 100 МэВ на линейном ускорителе ЛИНАК-200 (ЛЯП ОИЯИ). В ходе сеанса протестирована работа считывающей электроники для кремниевой трековой системы эксперимента MPD. Установка состояла из двух тестовых станций с двусторонними микростриповыми кремниевыми сенсорами размером $1,5 \times 1,5$ см. Толщина сенсоров — 300 мкм, ширина стрипов — 58 мкм, угол между стрипами — 90° . Считывание и обработка сигнала происходила с использованием микросхем STSXYTER v.2.0 и последующих блоков AFCK и FLIB на базе FPGA-модулей. В ходе сеанса набрано ~ 200 Гб данных для энергий электронов от 50 до 100 МэВ. На основании полученных данных планируется исследовать следующие параметры: размеры кластера в зависимости от энергии, эффективность сбора заряда, соотношение сигнал/шум.

Сеанс проводился совместно с группой из СПбГУ (руководитель — В. Жеребчевский), которая вела изучение монокристаллических активных пиксельных сенсоров ALPIDE. Данные сенсоры будут использоваться при создании внутреннего трекера установки NICA-MPD.

В рамках проекта создания внутренней трековой системы MPD-ITS проведено эскизное проектирование трекера (рис. 2). Предложен сценарий установки тонкостенного бериллиевого ионопровода и сопутствующих устройств в зоне ТРС.

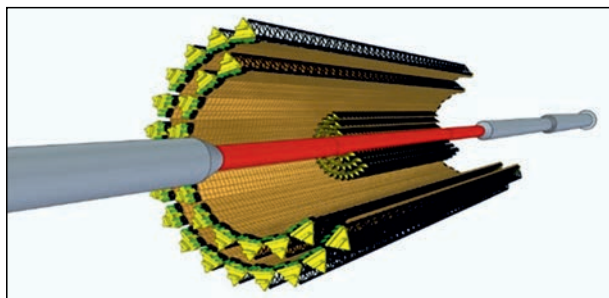


Рис. 2. 3D-изображение пятислойного трекера для MPD в «оптимальном» варианте

Установка SPD

Предлагаемый вариант детектора SPD, ориентированный на научную программу, представленную в Письме о намерениях (LoI), был поддержан ПКК по физике частиц в 2014 г. и должен иметь:

- геометрический аксептанс, близкий к 4π ;
- высокоточный (~ 50 мкм) и быстрый вершинный детектор;
- высокоточный (~ 100 мкм) и быстрый трекер;
- хорошие возможности идентификации частиц;
- эффективную систему мюонного диапазона;
- хороший электромагнитный калориметр;
- малое количество вещества в трековой системе;
- триггер и систему сбора данных, работающие при высоких нагрузках и светимости $10^{32} \text{ (см} \cdot \text{с)}^{-1}$;
- модульность и доступ к элементам детектора, дающие возможность для реконфигурации установки и ее модернизации.

В 2018 г. подготовлен и представлен на утверждение 50-й сессией ПКК официальный проект «Разработка концептуального и технического проектов для установки SPD на коллайдере NICA» [3].

ЭКСПЕРИМЕНТЫ, ПРОВОДИМЫЕ НА НУКЛОТРОНЕ

FASA

В 2018 г. коллаборацией изучались спектры кинетических энергий фрагментов промежуточной массы ($2 < Z < 20$), полученные при взаимодей-

ствии d (4,4 ГэВ) + Au [4]. Пример спектров кинетических энергий фрагментов бора и неона представлен на рис. 3. Видна сильная разница между экспериментальными данными и расчетом, выполненным

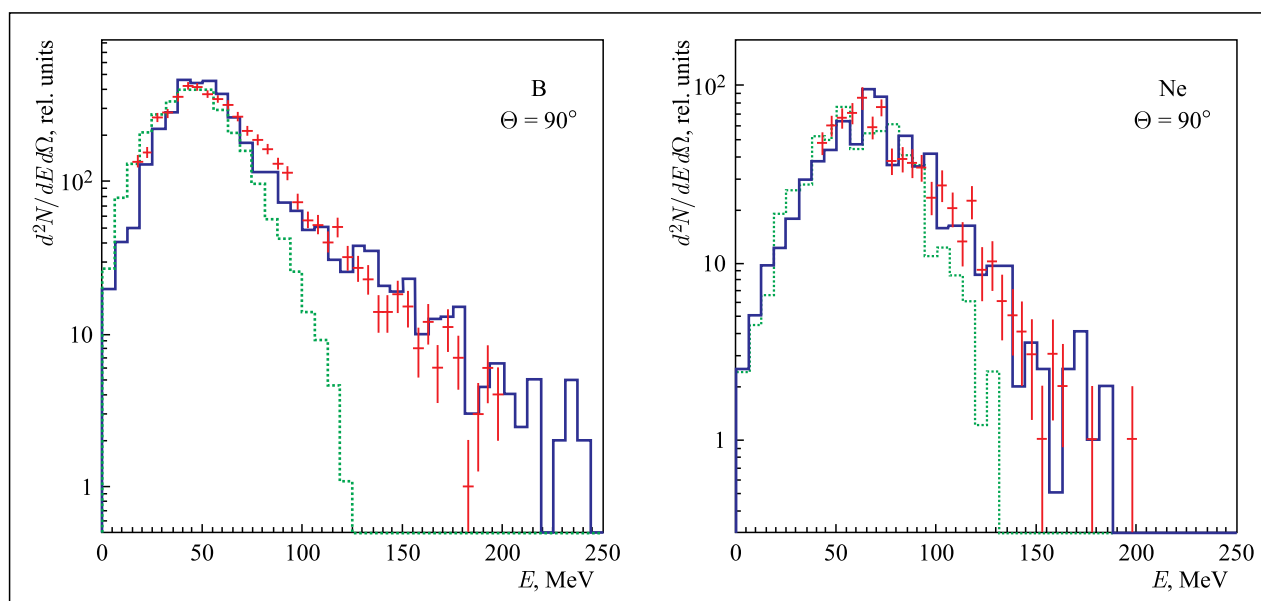


Рис. 3. Спектры кинетических энергий фрагментов бора и неона, полученные в реакции d (4,4 ГэВ) + Au под углом $\Theta = 90^\circ$. Точки — экспериментальные данные, сплошные линии (синие) — расчеты INC + SMM с радиальным потоком $V_{\text{flow}}^0 = 0,15 c$ (c — скорость света) для фрагментов бора и $V_{\text{flow}}^0 = 0,08 c$ для фрагментов неона. Точечные линии (зеленые) — расчет INC + SMM без радиального потока

в рамках внутриядерного каскада (INC) и статистической модели мультифрагментации (SMM) без потока. Было предположено, что жесткая часть спектра обусловлена радиальным расширением системы. SMM определяет координаты R_Z и импульсы фрагментов с зарядом Z для объема формирования системы с радиусом R_{sys} . Для описания экспериментальных данных каждой частице в объеме формирования была добавлена радиальная скорость. Предполагалось гомогенное радиальное расширение, в котором скорость потока линейно зависит от расстояния фрагмента до центра масс распадающейся системы. Скорость $V_{\text{flow}}(Z)$ частицы с зарядом Z , расположенной на радиусе R_Z , принималась следующим образом:

$$V_{\text{flow}}(Z) = V_{\text{flow}}^0 R_Z / R_{\text{sys}},$$

где V_{flow}^0 — радиальная скорость на поверхности системы. Значение V_{flow}^0 бралось таким, чтобы описать экспериментальные спектры кинетических энергий фрагментов. Получено хорошее согласие

экспериментальных и расчетных спектров кинетических энергий при наличии в расчетах радиального потока.

DSS

В рамках проекта DSS в 2018 г. осуществлено следующее:

- в ходе 55-го сеанса нуклотрона полностью введен в эксплуатацию модернизированный вариант экспериментальной установки на внутреннем пучке для измерения короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций при взаимодействии легких ядер;
- проведен анализ экспериментальных данных по угловой зависимости упругого сечения рассеяния $d-p$ при энергиях дейтронов 1000, 1300 и 1800 МэВ, полученных на внутренней мишени;
- выполнен анализ экспериментальных данных по угловым зависимостям анализирующих мощностей дейтронов A_x , A_y и A_{xx} для упругого рассеяния $d-p$ при энергиях дейтронов 400, 700, 800 и 1000 МэВ, полученных на внутренней мишени [5].

УЧАСТИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ДРУГИХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

Эксперименты на Большом адронном коллайдере

ALICE

На рис. 4 представлены новые результаты по фемтоскопическим корреляциям пар K^+K^- для Pb–Pb-столкновений при 2,76 ТэВ на пару нуклонов вместе с результатами нового фита, предложенного

группой из Дубны (рис. 4, а) в рамках модели FSI с использованием параметров: традиционных для $a_0(980)$ (Martin, Achasov) и свободных для $f_0(980)$ -состояний [6]. Видно, что согласие данных и модели заметно лучше, чем для фита с традиционными параметрами (рис. 4, б). Получено новое значение ширины f_0 ($7,0 \pm 2,2$ МэВ) из «дубненского» фита, которое согласуется с результатом коллаборации BES3 ($9,5 \pm 1,1$ МэВ).

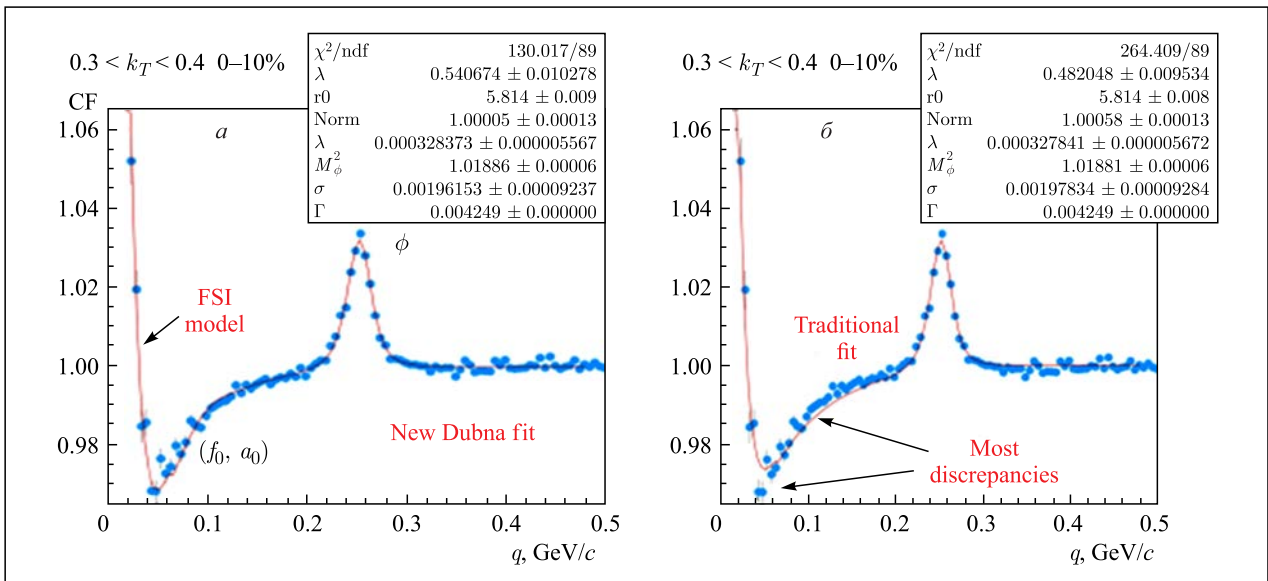


Рис. 4. Фемтоскопические корреляционные функции K^+K^- -пар для Pb–Pb при 2,76 ТэВ

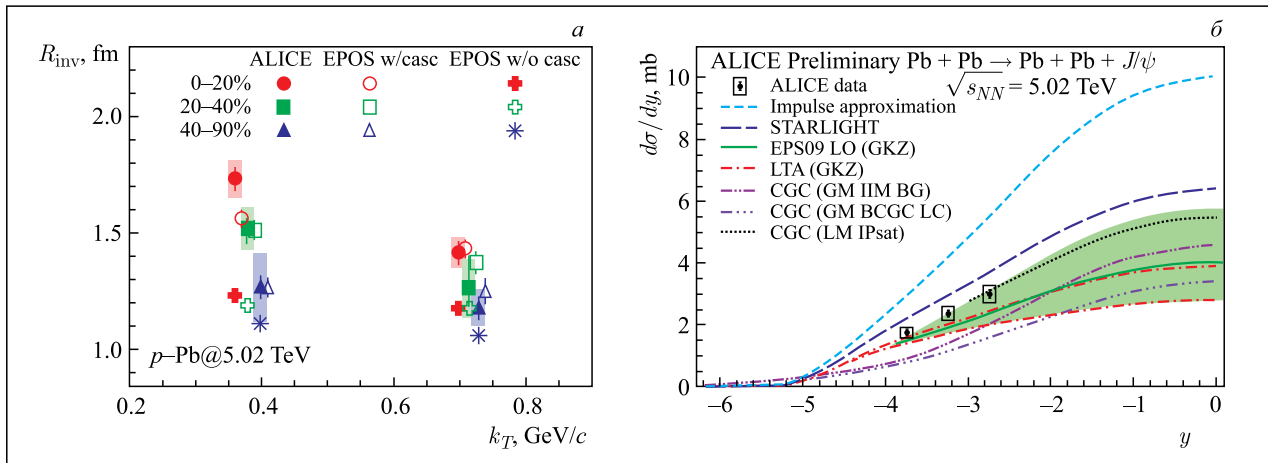


Рис. 5. а) 1D-радиусы источника для $K^{\text{ch}}K^{\text{ch}}$ -пар в зависимости от поперечного импульса пары. б) Дифференциальное сечение относительно скорости рождения J/ψ в сравнении с различными предсказаниями модели

Получены новые результаты сравнения фемтоскопических данных ALICE для Pb–Pb-столкновений при 5,02 ТэВ с результатами модели EPOS-3 [7]. Рис. 5, а показывает, что экспериментальные и модельные радиусы хорошо согласуются при равных центральных с учетом каскадного перерасеяния адронов.

При участии группы ОИЯИ получены новые данные по рождению J/ψ в Pb–Pb ультрапериферических столкновениях при 5,02 ТэВ. Дифференциальные сечения показаны на рис. 5, б вместе с теоретическими предсказаниями при различных вкладах глюонного экранирования в ядре.

На тестовом пучке электронов ускорителей PS и SPS в ЦЕРН проводилась проверка модулей электромагнитного калориметра PHOS ALICE в диапазоне энергий 1–160 ГэВ. Данное исследование направлено на оптимизацию выбора при модернизации фотоприемников и считывающей электроники. Целью модернизации является обеспечение работы калориметра при комнатной температуре без ухудшения энергетического разрешения и с улучшением временного разрешения. В настоящее время PHOS работает при температуре -25°C и имеет разрешение по времени пролета $\sigma_t = 3\text{--}4$ нс. Ряд испытаний, проведенных на пучках электронов в ЦЕРН с различными SiPM, показал, что при температуре работы $T = +18^\circ\text{C}$ возможно достижение временного разрешения, превышающего 500 пс.

ATLAS

В 2018 г. работа велась по нескольким направлениям, включая анализ экспериментальных данных, моделирование новых процессов с частицами SUSY, участие в модернизации детектора ATLAS для работы в условиях повышенной светимости Большого адронного коллайдера и КХД-анализ данных по глубоконеупругому рассеянию.

Физики ОИЯИ внесли существенный вклад в анализ данных по обнаружению распада бозона Хиггса на пару b -кварков, о котором доложено на международной конференции ICHEP2018 в Сеуле. Этот результат отмечен в пресс-релизе ЦЕРН, в сообщениях коллаборации ATLAS и во многих публикациях в научных центрах (включая ОИЯИ) как наиболее значимый из полученных в эксперименте ATLAS в 2018 г. [8, 9].

Проанализированы экспериментальные данные ATLAS, полученные в протон-протонных столкновениях в Run-2 при энергии центра масс 13 ТэВ за период 2015–2017 гг., соответствующие интегральной светимости $79,8 \text{ fb}^{-1}$. Обнаружено превышение событий над ожидаемым фоном с наблюдаемым значением 4,9 стандартных отклонений при ожидаемой величине $4,3\sigma$. Для $m_H = 125$ ГэВ сила сигнала, т. е. отношение величины измеряемого сигнала к ожидаемому в Стандартной модели (СМ), $\mu = 1,06 \pm 0,16(\text{стат.}) + 0,21 - 0,19(\text{сист.})$. Соответствующий спектр инвариантных масс двух b -струй показан на рис. 6.

ATLAS подтвердил наблюдение всех четырех основных каналов рождения бозона Хиггса, двух — в 2018 г. Эти наблюдения знаменуют собой новую веху в изучении бозона Хиггса — переход эксперимента ATLAS от наблюдений к точным измерениям его свойств. Прецизионный анализ характеристик процесса в канале рождения VH также очень важен для поиска явлений за пределами Стандартной модели.

CMS

В 2018 г. группа ОИЯИ в эксперименте CMS принимала участие в наборе, обработке и анализе данных второго сеанса LHC (Run 2), проходящих на встречных пучках протонов при энергии 13 ТэВ в с.ц.м. при светимостях $2,32 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. На рис. 7 представлен результат поиска новых

Рис. 6. Распределение по массе для двух b -струй m_{bb} в экспериментальных данных после удаления всех фоновых событий за исключением двухбозонных WZ - и ZZ -процессов, полученных с помощью анализа $dijet$ -массы. Вклады от всех лептонных каналов, определенных областей поперечных импульсов, p_T^V и категорий событий с разным числом струй просуммированы и взвешены соответственно отношению S/B , где S — это величина полного отфитированного сигнала и B — полный отфитированный фон в каждом наборе событий. Ожидаемый вклад от ассоциативного WH - и ZH -рождения бозона Хиггса с массой 125 ГэВ умножен на величину значимости сигнала ($\mu = 1,06$). Разброс в величинах полной статистической и систематической неопределенности представлен на рисунке заштрихованной областью

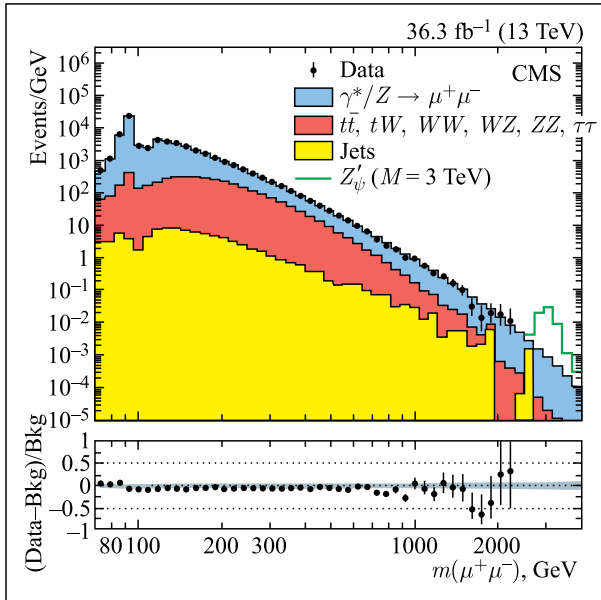
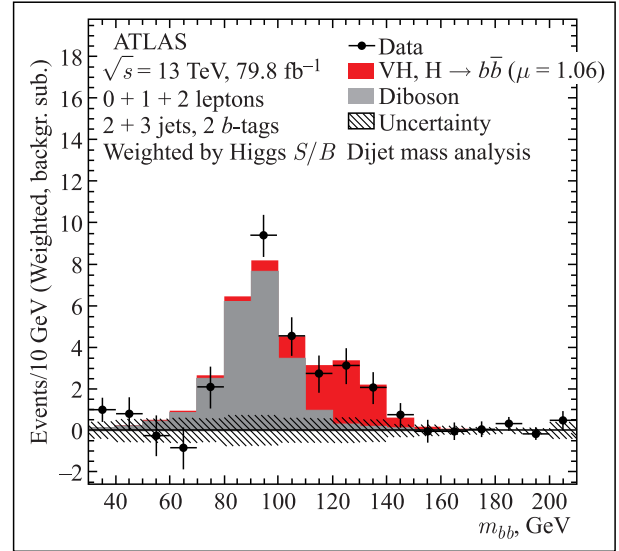


Рис. 7. Спектр инвариантных масс событий с парами мюонов. Использованы данные 2016 г. при энергии 13 ТэВ. Точки с панелями ошибок представляют наблюдаемый промежуток, гистограммы — предсказания для сравнения с процессами СМ

нейтральных резонансов (как со спином 1, так и со спином 2) по их ожидаемому распаду на пару мюонов. Установлен модельно-независимый верхний предел (с 95 %-м уровнем статистической достоверности) на сечения этих процессов, а также определены массовые пределы для гипотетических резонансов (рис. 8). Новые массовые пределы (95 % C.L.) составляют 4,5 и 3,7 ТэВ для последовательной стандартной модели (SSM) и ψ -модели E_6 GUT соответственно. Моделью RS (Рэндалл–Сандрум) с соединением $c = 0,01-0,1$ исключаются массы меньше 2,00–4,01 ТэВ; для упрощенной модели темной мате-

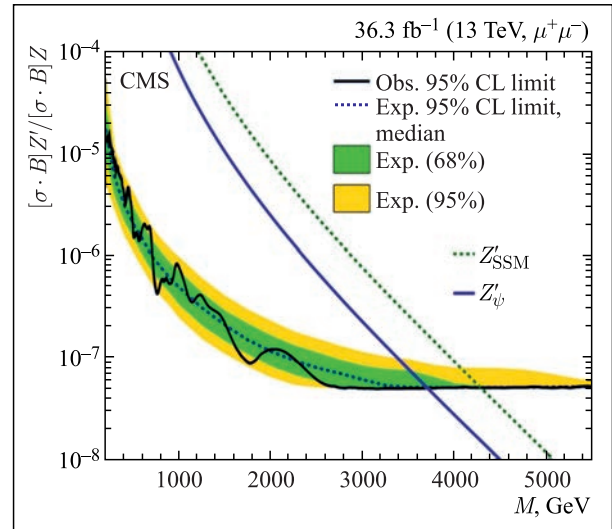


Рис. 8. Полученные верхние пределы при 95 % C.L. произведения сечения образования и брэнчинга для резонанса со спином 1 относительно аналогичного произведения для Z -бозона для канала с парами мюонов. Затененные полосы соответствуют 68 и 95 %-м квантилям для ожидаемых пределов. Для сравнения приведены теоретические предсказания для резонансов spin-1 в моделях $Z'SSM$ и $Z'\psi$

рии с обменом частицей-медиатором в s -канале для энергий ниже 1,8 и 4 ТэВ масса медиатора исключается для векторных и аксиально-векторных констант связи [10]. Кроме того, получены данные по зависимости импульсного разрешения мюонов от импульса с использованием двух мюонных треков, образованных космическими мюонами [11].

Завершен анализ событий с большой множественностью жестких физических объектов (лептонов, фотонов и струй с поперечным импульсом $p_T > 50$ ГэВ/ c), зарегистрированных во время начального набора данных Run 2 ($L_{int} = 35,9$ фб $^{-1}$).

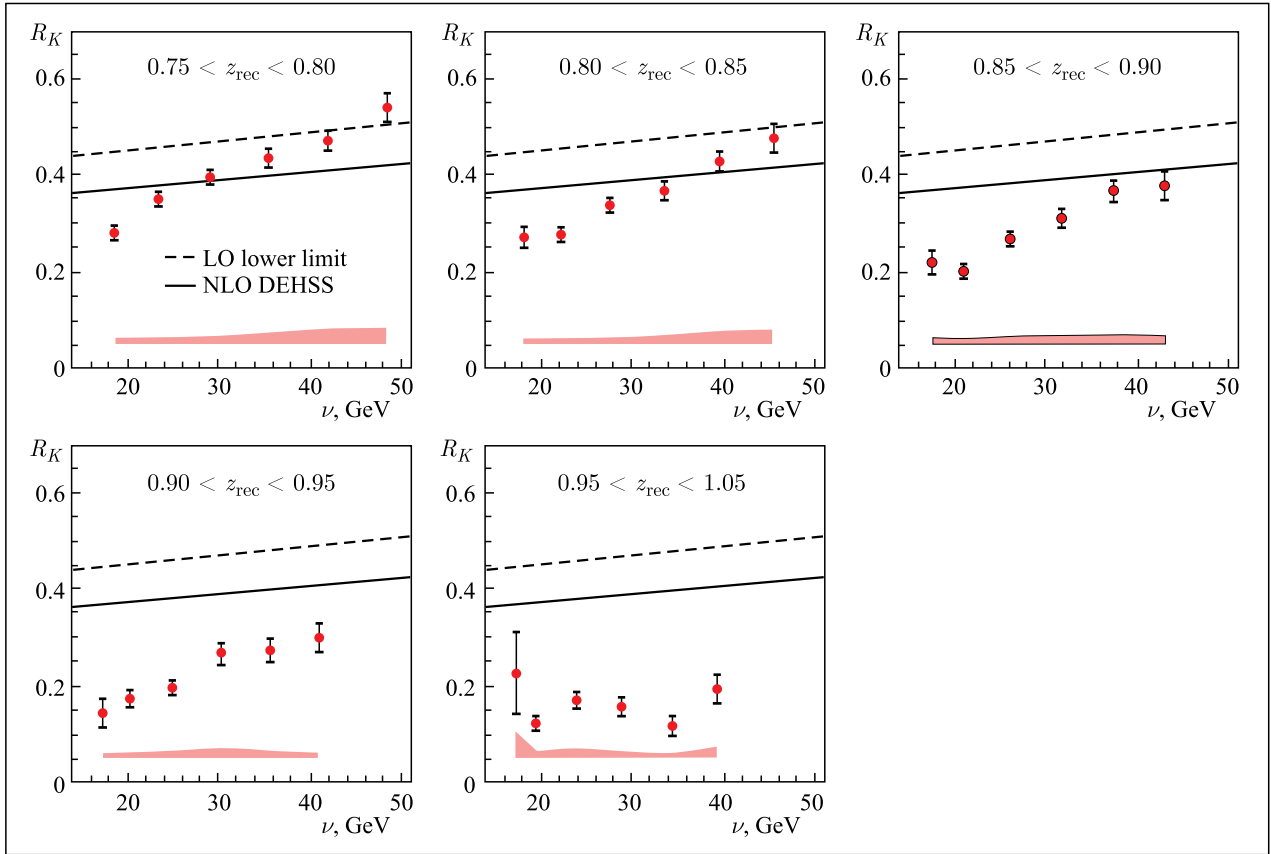


Рис. 9. Отношение множественностей K^- к K^+ в зависимости от ν в бинах по z , для первого бина по x . Предсказания КХД показаны сплошной и прерывистой линиями

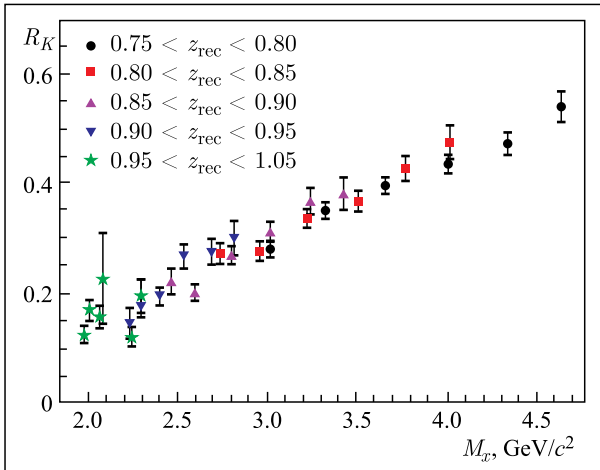


Рис. 10. Отношения множественностей K^-/K^+ , представленные как функция x

Впервые измерены (95 % C.L.) модельно-независимые пределы на сечения рождения жестких частиц с множественностью до $N \geq 11$ в области значений полной поперечной энергии в событии S_T от 1,5 до 8,0 ТэВ, где S_T — скалярная сумма поперечных энергий всех реконструируемых объектов в событии. Наблюдаемые пределы хорошо соответствуют ожидаемым внутри коридора ошибок $\pm(1-2)$

среднеквадратичным отклонениям. Значения минимальной массы микроскопической черной дыры составляют 7,2–10,2 ТэВ/ c^2 в зависимости от различных механизмов образования и эволюции черной дыры.

Эксперименты на протонном суперсинхротроне ЦЕРН

COMPASS

В 2018 г. в эксперименте COMPASS выполнен дополнительный набор данных по программе измерений процессов Дрелла–Яна с использованием поляризованной водородной мишени и пучка пионов с энергией 160 ГэВ.

Впервые в глубоконеупругом рассеянии измерено отношение множественности K^- к K^+ для каонов при больших значениях z — доли энергии виртуального фотона [12]. Данные получены коллаборацией COMPASS на пучке мюонов с энергией 160 ГэВ и изоскалярной мишени ${}^6\text{LiD}$. Каоны идентифицировались в диапазоне импульсов от 12 до 40 ГэВ/ c , что отвечает диапазону по переменной Бьеркена x $0,01 < x < 0,40$. Изучена z -зависимость отношения множественности для значений $z > 0,75$ (рис. 9, 10). Для значений $z > 0,8$ результаты противоречат

предсказаниям, полученным с использованием формализма пертурбативной квантовой хромодинамики в следующем за ведущим порядке КХД. Это может означать, что факторизация сечения и/или универсальность функций фрагментации каонов нарушается. Эти исследования показывают, что в рамках этого формализма может потребоваться дополнительная коррекция, учитывающая фазовое пространство, доступное для адронизации.

В эксперименте COMPASS впервые выполнено измерение эксклюзивной реакции рождения мюонов в однофотонном обмене с использованием поляризованных мюонных пучков μ^+ и μ^- с энергией 160 ГэВ и жидководородной мишени. Получены зависимости значения усредненного сечения процесса глубоко-неупругого виртуального комптоновского рассеяния μ^+ и μ^- от квадрата переданного четырехимпульса t протону мишени. Наклон Bt -зависимости был аппроксимирован экспоненциальной функцией для диапазона t от 0,1 до 2 (ГэВ/с) 2 . Этот результат может быть преобразован в средний размер поперечного распределения партонов в протоне, при среднем значении виртуальности фотона $\langle Q^2 \rangle = 1,8$ (ГэВ/с) 2 и среднем значении переменной Бьеркена $\langle x_{Bj} \rangle = 0,056$ [13].

NA61/SHINE

В эксперименте NA61/SHINE обнаружено предварительное указание на существование критической точки в ядерной материи (рис. 11). Ожидается, что изучаемый сигнал для протонов увеличивается вблизи критической точки. В критической точке ожидается локальная степенная зависимость флуктуаций. Предварительные результаты анализа данных столкновений Be + Be и Ar + Sc могут быть первым возможным свидетельством наблюдения критической точки в Ar + Sc, в то время как в данных для Be + Be нет сигнала.

NA62

На основе данных NA62, набранных в 2015 г., проведен поиск рождения тяжелых нейтральных лептонов в распадах K^+ [14]. Были установлены верхние ограничения на этот процесс в диапазоне 10^{-7} – 10^{-6} для квадрата матричных элементов смешивания $|U_{e4}|^2$ и $|U_{\mu 4}|^2$ и масс тяжелых нейтрино в диапазоне 170–448 МэВ/с 2 и 250–373 МэВ/с 2 соответственно.

В 2018 г. опубликована заключительная работа по анализу полулептонных распадов K_{e3} и $K_{\mu 3}$,

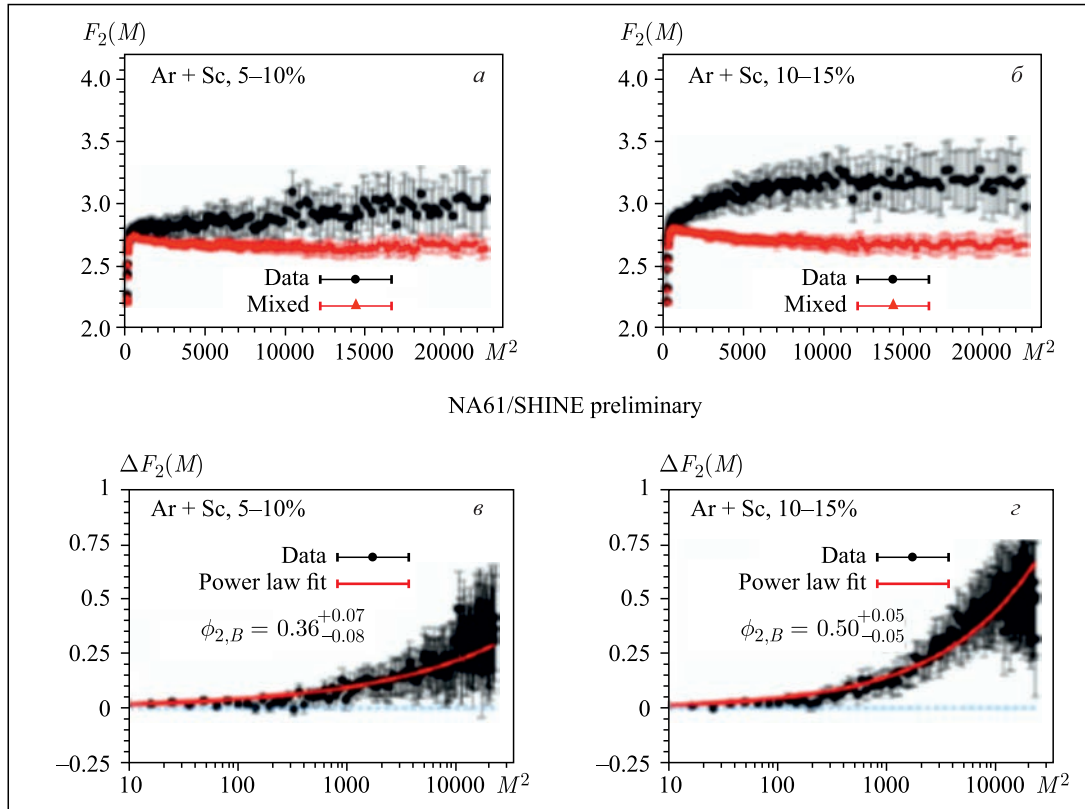


Рис. 11. а, б) Факториальные моменты $F_2(M)$ идентифицированных протонов в столкновениях Ar + Sc при 150A ГэВ/с для данных (черный) и смешанных (красный) событий. в, г) Факториальный момент $\Delta F_2(M)$ с вычетом фона, демонстрирующий степенную зависимость, предсказанную для систем, находящихся вблизи критической точки. Это может быть первым свидетельством сигнала критической точки в NA61/SHINE

основанная на данных эксперимента NA48/2 [15]. Представлено измерение формфакторов полулептонных распадов заряженных каонов, основанных на $4,4 \cdot 10^6$ K_{e3} -распадах и $2,3 \cdot 10^6$ $K_{\mu 3}$ -распадах, собранных в 2004 г. в эксперименте NA48/2. Точность полученных результатов превышает точность результатов предыдущих измерений. Также представлен результат суммы измерений в обоих полулептонных модах.

Опубликована заключительная статья по результатам анализа не наблюдавшегося ранее редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ [16]. Результаты основаны на $1,7 \cdot 10^{11}$ K_{ch} -распадах заряженных каонов, зарегистрированных в 2003–2004 гг. Исследование отобранных 4919 кандидатов с фоном на уровне 4,9 % позволило определить парциальную ширину распада $BR = (4,24 \pm 0,14) \cdot 10^{-6}$. Изучение кинематического пространства распада показывает наличие вклада, зависящего от структуры каона, который находится в соответствии с предсказаниями, основанными на киральной теории возмущений. Также приводится оценка нескольких асимметрий, связанных с возможным нарушением P - и CP -четностей.

Опубликован первый результат NA62 по поиску распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на основе небольшой статистики, записанной в 2016 г. (соответствующей $1,21 \times 10^{11}$ распадов K^+) [17] (рис. 12). Чувствительность обнаружения одного события при данной статистике равна $3,15 \cdot 10^{-10}$, что соответствует 0,267 событий по предсказанию Стандартной модели. Зарегистрирован один сигнал — кандидат при ожидаемом фоне 0,152 события.

Проводится анализ данных эксперимента NA48/2 по исследованию редкого распада $K_{\mu 4}^{00}$, который никогда не наблюдался ранее. Полученная первая оценка величины парциальной ширины распада согласуется с имеющимся теоретическим предсказанием киральной теории возмущений.

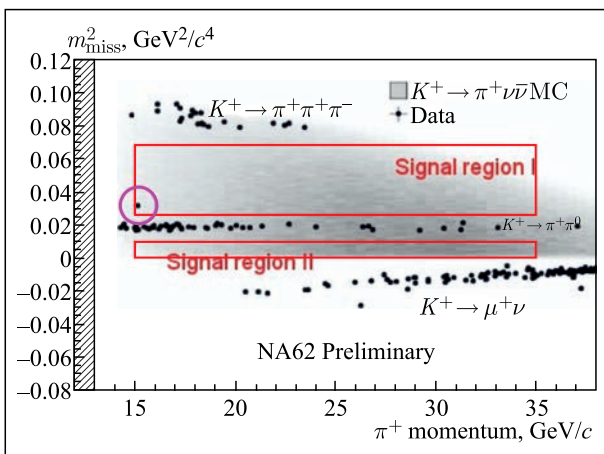


Рис. 12. Первый результат NA62 по поиску распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ на основе небольшой выборки данных, собранных в 2016 г. (соответствует $1,21 \cdot 10^{11}$ распадов K^+)

NA64

Основной задачей эксперимента NA64 является поиск физики за пределами СМ, а именно поиск легкого темного фотона (A') и других проявлений темного сектора.

В 2018 г. в ходе двух сеансов на канале SPS ЦЕРН, тестового (апрель) и сеанса по набору данных, проведенного в период мая–июня, были проверены и успешно отработали 6 станций строудетекторов (12 двуслойных камер размером 200×200 мм). Сотрудники ОИЯИ принимали участие в монтаже и демонтаже оборудования, сопровождении трековых строудетекторов в качестве экспертов, в сменах по набору данных и в онлайн-анализе набираемых данных. В ходе сеанса набрано $2 \cdot 10^{11}$ событий в невидимой и $3 \cdot 10^{10}$ в видимой модах, идет анализ данных.

В 2018 г. коллаборацией завершился анализ, и опубликованы данные 2016 и 2017 гг. по поиску сигнала в невидимой моде распада темного фотона A' . Их суммарная статистика составила $\sim 10^{11}$ событий, кандидатов на сигнал, отвечающий сигнатуре темного фотона, не обнаружено [18].

Сеанс 2017 г. частично был посвящен поиску гипотетического бозона — темного фотона A' с массой 16,7 МэВ, существование которого могло бы объяснить результат по аномальному рождению $e^+ e^-$ -пар в распаде возбужденного состояния $^8\text{Be}^*$ в ста-

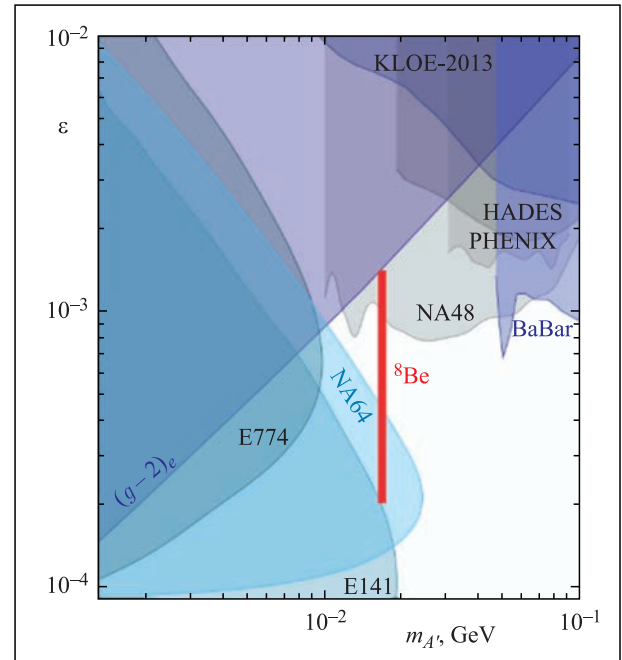


Рис. 13. 90%-е исключения С. Л. в плоскости $(m_{A'}, \epsilon)$ эксперимента NA64 (выделено синим). Для массы 16,7 МэВ исключенная область NA64 составляет $1,3 \cdot 10^{-4} < \epsilon < 4,2 \cdot 10^{-4}$. Допустимый диапазон ϵ , объясняющий аномалию $^8\text{Be}^*$, показан красным. Даны ограничения, налагаемые в других экспериментах

бильное, полученное в эксперименте АТОМКИ. Набрано $5,4 \cdot 10^{10}$ событий, гипотетический бозон не был обнаружен. Полученные данные позволили существенно увеличить ограничение на вероятность его рождения, дополнив результаты других исследовательских групп [19] (рис. 13).

В 2018 г. эксперименту в ЦЕРН была выделена постоянная экспериментальная зона на канале Н4, начаты подготовительные работы по ее обустройству.

Эксперименты на релятивистском коллайдере тяжелых ионов BNL

STAR

В 2018 г. эксперимент STAR сообщил о новом физическом явлении, предсказанном группой ОИЯИ.

• Для изучения кирального магнитного эффекта проведен сеанс и набрана статистика на изобарных ядрах Zr-96 и Ru-96 при энергии 200 ГэВ.

• Ранее (в 2017 г.) была обнаружена глобальная поляризация лямбда в интервале энергии 10–60 ГэВ. В 2018 г. опубликованы новые данные о наличии глобальной поляризации Λ и Λ' при максимальной энергии на RHIC 200 ГэВ. Особенная область научных интересов дубненской группы в эксперименте STAR — это исследование глобальной поляризации в области энергий NICA в коллайдерной моде и соответствующее измерение с фиксированной мишенью в эксперименте STAR.

• Одним из новых результатов является изучение корреляционной функции антипротонов. Это прямые измерения антинуклонных взаимодействий. На международной конференции «Кварковая материя QM18» были представлены новые результаты по pp и $p\bar{p}$ при энергии 39 ГэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorenko A. *et al.* Status of the Nuclotron // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia, 2018. P. 49–51.
2. Baranov D., Kapishin M., Kulish E., Maksymchuk A., Mamontova T., Pokatashkin G., Ruffanov I., Vasendina V., Zinchenko A. First Results from BM@N Technical Run with Deuteron Beam // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 2(214). P. 136.
3. Команда SPD, концептуальное и техническое проектирование детектора спиновой физики (SPD) на коллайдере NICA, октябрь 2018 г. <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=665>.
4. Авдеев С. П., Карч В., Киракосян В. В., Рукояткин П. А., Стегайлов В. И., Ошлер Х., Ботвина А. С. Продолжительность тепловой мультифрагментации в ^4He (4 ГэВ) + Au-столкновениях // Вестн. Рос. акад. наук. Физика. 2018. Вып. 82, № 6. С. 711.
5. Janek M. *et al.* Calibration Procedure of the $\Delta E - E$ Detectors for dp Breakup Investigation at Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15. P. 76.
6. Acharya S. *et al.* (ALICE Collab.). Azimuthally Differential Pion Femtoscopy Relative to the Third Harmonic Event Plane in Pb–Pb Collisions at $(s_{NN})^{1/2} = 2.78$ TeV // Phys. Lett. B. 2018. V. 785. P. 320–331.
7. Acharya S. *et al.* (ALICE Collab.). Inclusive J/ψ Production in Xe–Xe Collisions at $(s_{NN})^{1/2} = 5.02$ TeV // Phys. Lett. B. 2018. V. 785. P. 419–428.
8. The ATLAS Collab. Observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ Decays and VH Production with the ATLAS Detector // Phys. Lett. B. 2018. V. 786. P. 59; DOI:10.1016/j.physletb.2018.09.013.
9. The ATLAS Collab. Observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ Decays and VH Production with the ATLAS Detector. ATLAS CONF Note: ATLAS-CONF-2018-036; <https://cds.cern.ch/record/2630338/files/ATLAS-CONF-2018-036.pdf>.
10. Sirunyan A. M. *et al.* (CMS Collab.). Search for High-Mass Resonances in Dilepton Final States in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // JHEP. 2018. V. 1806. P. 120; arXiv:1803.06292.
11. Abbiendi G. *et al.* Performance of High- p_T Muons Collected with CMS at 13 TeV during Proton–Proton Collisions. CMS AN-2018/008.
12. COMPASS Collab. K^- over K^+ Multiplicity Ratio for Kaons Produced in DIS with a Large Fraction of the Virtual-Photon Energy // Phys. Lett. B. 2018. V. 786. P. 390.
13. COMPASS Collab. Transverse Extension of Partons in the Proton Probed by Deeply Virtual Compton Scattering. CERN-EP/2018-016, submitted to PLB.
14. Cortina Gil E. *et al.* (NA62 Collab.). Search for Heavy Neutral Lepton Production in K^+ Decays // Phys. Lett. B. 2018. V. 778. P. 137.
15. Batley J. R. *et al.* (NA48/2 Collab.). Measurement of the Form Factors of Charged Kaon Semileptonic Decays // JHEP. 2018. V. 1810. P. 150.
16. Batley J. R. *et al.* (NA48/2 Collab.). First Observation and Study of the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ Decay. arXiv:1809.02873 [hep-ex]; Phys. Lett. B (submitted).
17. Cortina Gil E. *et al.* (NA62 Collab.). First Search for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ Using the Decay-in-Flight Technique. CERN-EP-2018-314.
18. Banerjee D. *et al.* (NA64 Collab.). Search for Vector Mediator of Dark Matter Production in Invisible Decay Mode // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 072002.
19. Banerjee D. *et al.* (NA64 Collab.). Search for a New $X(16.7)$ Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 231802.