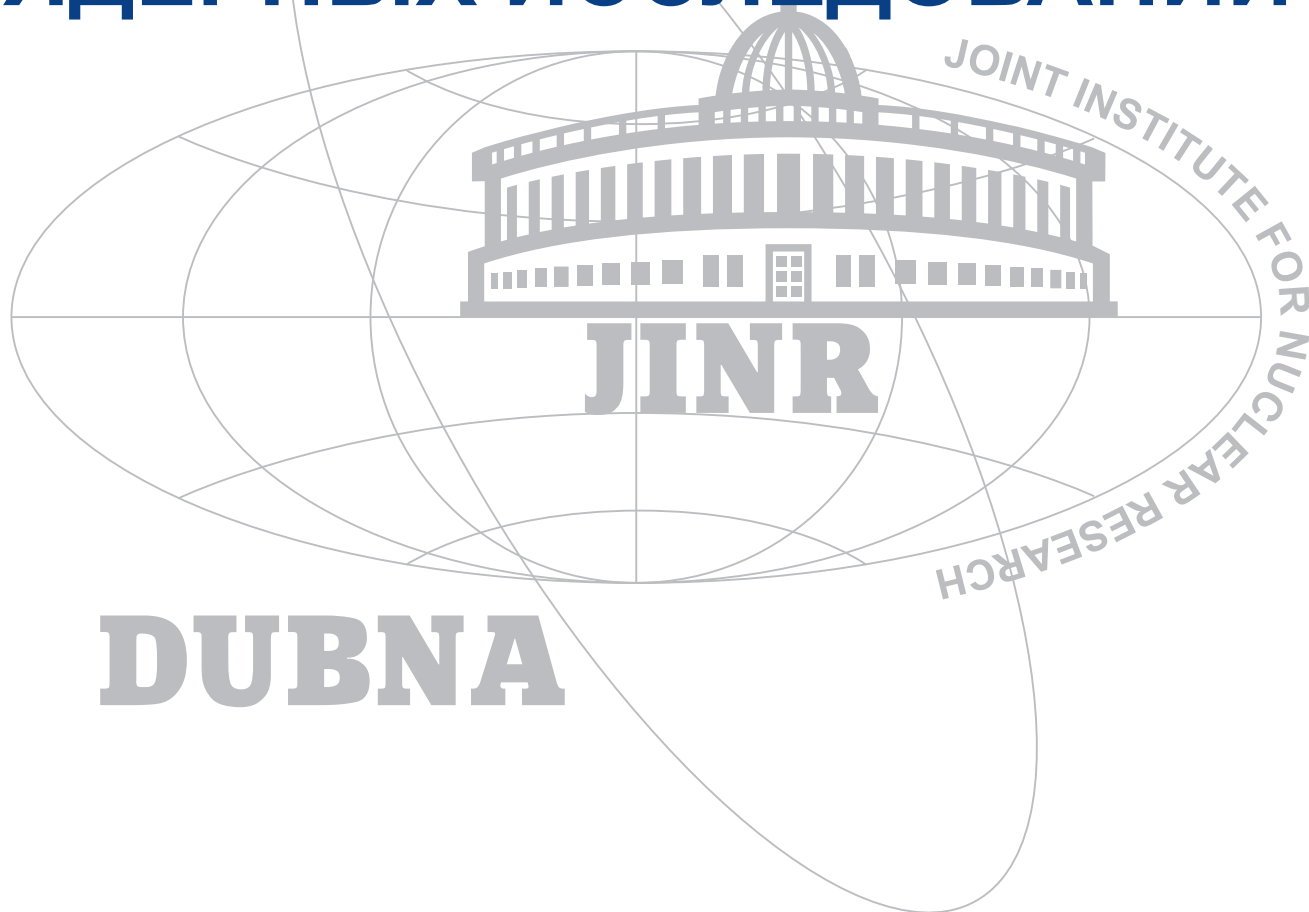


2019

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 2019 г. была сосредоточена на создании и дальнейшем развитии комплекса NICA (проектов «Нуклотрон–NICA»,

MPD, BM@N и SPD), на участии в экспериментах, проводимых в ускорительных центрах мирового класса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА NICA

Проект «Нуклотрон–NICA»

Бустер и каналы транспортировки пучка

В 2019 г. основные усилия ускорительного отделения были направлены на монтаж и ввод в эксплуатацию бустерного синхротрона. Одним из ключевых элементов вводимого в эксплуатацию ускорителя является канал транспортировки пучка HPLac-Booster, который должен доставить ионы от источника с минимальными потерями. В июле были смонтированы все элементы канала, ввод в эксплуатацию состоялся в декабре.

В 2019 г. был завершен монтаж криомагнитной системы бустерного синхротрона. 23 декабря состоялся официальный запуск бустера и начаты испытания его подсистем, включающие следующие этапы:

- настройка системы питания и тестирование системы эвакуации энергии;
- проверка вакуумной системы;
- тестирование термометрии и криогенной системы.

Данные испытания должны быть завершены в мае 2020 г., после чего тесты будут продолжены в режиме работы с пучками ионов.

В 2019 г. были завершены работы по подготовке канала транспортировки пучка из бустера в нуклотрон, началась поставка в ОИЯИ необходимого оборудования. Монтаж и ввод в эксплуатацию канала будут завершены в течение 2020 г.

Коллайдер

Статус готовности оборудования канала транспортировки нуклотрон–коллайдер представлен в табл. 1.

Сроки ввода в эксплуатацию канала транспортировки пучка из нуклотрона и колец коллайдера коррелируются с выполнением строительных работ. Статус завершенности строительных работ на конец 2019 г.:

- сваи — 100 %;
- силовые бетонные конструкции — более 90 %;
- установка металлических конструкций — более 75 %;
- фасады — 10 %;
- крыши — 30 %;
- земляные работы и временные дороги — 90 %.

Общая задержка составляет около года. Ее основной причиной являются существенные изменения в проекте, внесенные уже в процессе его реализации, которые привели к увеличению площади зданий с 20 до 30 тыс. м². Это, в свою очередь, привело к увеличению площадки, что требует установки свай, силовых бетонных и металлоконструкций, стен, крыш и работ под установку инженерного оборудования для вентиляции, охлаждения и питания.

Начало монтажа дипольных магнитов коллайдера и ускоряющей станции в 1-й арке кольца, а также оборудования канала транспортировки пучка нуклотрон–коллайдер планируется начать в 3-м квартале 2020 г.

Таблица 1

Подсистема	Готовность, %	Поставка
Магниты	95	Март 2020 г.
Вакуумные камеры и диагностика	70	Июнь 2020 г.
Источники питания	10	Август 2020 г.

В 2019 г. продолжалось производство и тестирование оборудования подсистем коллайдера. На линии монтажа и тестирования сверхпроводящих магнитов было изготовлено и протестировано около 35 % дипольных и 10 % квадрупольных магнитов коллайдера. Работы по изготовлению элементов подсистем ведутся в соответствии с графиком. Детальная информация о работах, выполненных в 2019 г., представлена в официальном отчете, доступном по ссылке: http://nucloweb.jinr.ru/nica/MAC/20Jan16_Rpt_to_MAC.pdf.

Криогенный комплекс

В состав комплекса NICA входят три сверхпроводящих ускорителя, для работы которых требуется существенное увеличение мощности существующего криогенного комплекса — с 4 до 10 кВт при температуре 4,5 К. Одним из ключевых элементов модернизированного комплекса является новая компрессорная станция, для установки которой возводится новое здание. Несмотря на возражения экспертов, контракт на выполнение работ по созданию данного здания был заключен с компанией «Стройтехинвест», не имеющей опыта создания промышленных конструкций, что привело к переносу сроков сдачи объекта с февраля на сентябрь 2020 г.

Модернизация криогенного комплекса по другим направлениям ведется в соответствии с планами. Было изготовлено и введено в эксплуатацию в 2019 г. следующее оборудование:

- 1000-м³ гелиевый газгольдер;
- 40-м³ резервуар для жидкого гелия;
- 1000-л/ч гелиевый ожижитель;
- 2-кВт сателлитный рефрижератор;
- 1300-кг/ч азотный ожижитель;
- 500-кг/ч азотный реконденсер;
- два 6600-Нм³/ч гелиевых винтовых компрессора;
- три 10740-Нм³/ч азотных турбокомпрессора;
- пять 20-Нм³ азотных ресиверов.

Компьютерная инфраструктура

Компьютерный кластер ЛФВЭ является одним из четырех компонентов распределенной компьютерной инфраструктуры проекта NICA. Он построен по

модульному принципу и состоит из восьми стоек, коммуникационного оборудования, систем охлаждения и питания, противопожарной системы.

Кластер введен в эксплуатацию в октябре 2019 г. в следующей конфигурации: 3500 ядер и 2 диска емкостью 3,5 ПБ. В ближайшее время она будет расширена до 5000 CPU-ядер и 2 × 5 ПБ дисковой памяти. Скорость передачи данных внутри кластера составляет 200 Гб/с, он подсоединен к сети лаборатории со скоростью передачи 100 Гб/с.

Пользовательская инфраструктура

В 2019 г. был одобрен проект пользовательского инновационного центра NICA, подготовленный генеральным подрядчиком — компанией «Агера». Ожидается, что требуемый для прохождения госэкспертизы пакет документов будет собран к сентябрю 2020 г.

Проект MPD

В 1-м квартале планируется завершение строительных работ по созданию павильона для установки MPD и начало работ по монтажу магнита установки. Обмотка магнита MPD доставлена в Дубну, его криостат и сверхпроводящие обмотки готовы к холодным тестам.

Времяпроекционная камера

Времяпроекционная камера (TPC) является ключевым трековым детектором в эксперименте MPD. Все механические элементы детектора и механизмы, необходимые для его монтажа в MPD, изготовлены. В 2019 г. также изготовлены 10 из 24 считывающих камер детектора, начато тестирование электроники. Статус работ представлен в табл. 2.

Времяпролетная система

В 2019 г. были приобретены все необходимые материалы и компоненты для детекторов. Собрано 25 % камер mRPC, остальные будут изготовлены до конца октября 2020 г., собранные сегменты проходят тесты на космических лучах.

Передний калориметр FHCAL

Передний детектор MPD состоит из двух плеч, расположенных на расстоянии 3,2 м от точки взаимодействия пучков. Каждое плечо включает сборку из 45 калориметрических модулей. Все модули

Таблица 2

Подсистема	Срок
Завершение тестов FE Cards v1.0	Февраль 2019 г.
Доставка в Дубну 4500 чипов SAMPA V4 (все)	Июнь 2019 г.
Монтаж 32 изготовленных (version 2.1) FE Cards (1/2ROC)	Июль 2019 г.
Тест ROC оборудованной FE Cards	Август–декабрь 2019 г.
Производство и тестирование FE Cards для 1-й ROC	Декабрь 2019 г. – апрель 2020 г.
Оснастка и тестирование ROC 2, 3, 4	Май 2020 г.
Производство FE Cards для 5–14 ROC камер (всего готово 14)	Июль 2020 г.
Производство FE Cards оставшихся 10 ROC (всего готово 24)	Август 2020 г.

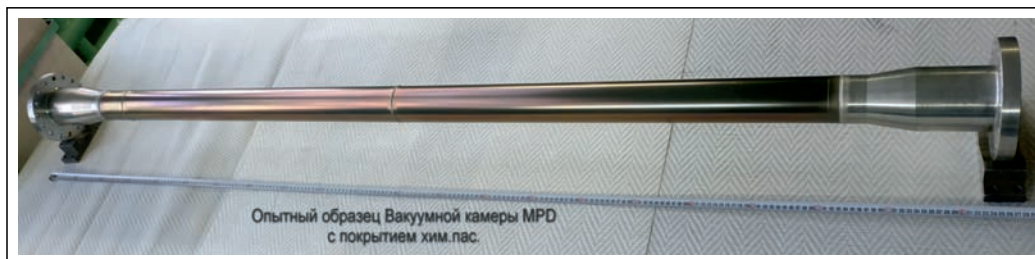


Рис. 1. Прототип пучковой трубы MPD

изготовлены и проходят тестирование на космике. В конце 2019 г. было завершено производство электроники детекторов Front-End Cards (FE Cards). В настоящее время разрабатывается дизайн платформы для установки FHCaI.

Электромагнитный калориметр ECal

В 2019 г. на двух линиях, расположенных в России, было начато производство модулей электромагнитного калориметра установки. Начало производства модулей в Китае ожидается в ближайшее время. Доставка в ОИЯИ первой партии готовых модулей планируется в 3-м квартале 2020 г.

Пучковая труба

Пучковая труба установки состоит из трех частей: центральной, изготовленной из бериллия, и двух торцевых, изготовленных из алюминия (рис. 1).

В 2019 г., после завершения тестов, был подписан контракт на изготовление двух бериллиевых труб с внутренним диаметром 62 мм, ожидается подписание контракта на изготовление алюминиевых частей.

Основные этапы монтажа MPD

Основные этапы сборки MPD описаны в табл. 3.

Монте-Карло моделирование и анализ данных

Коллаборацией сформированы пять рабочих групп по следующим направлениям анализа:

- глобальные наблюдаемые;
- спектры и выходы легких ароматов и гиперядра;
- корреляции и флуктуации;
- электромагнитные пробники;
- тяжелые ароматы.

Начата работа по подготовке затребованного Ученым советом ОИЯИ документа «First physics at MPD».

В 2019 г. коллаборация предоставила отчет о ходе создания установки MPD и проработке физической программы на международных конференциях «Кварковая материя 2019», «Странность в кварковой материи 2019» и ряде международных рабочих совещаний.

Эксперимент BM@N

Анализ данных

Установка BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) — первый эксперимент, уже реализуемый на ускорительном комплексе нуклотрон–NICA. Научная программа BM@N включает в себя исследования плотной ядерной материи на выведенных пучках тяжелых ионов при энергиях, промежуточных между создаваемыми ускорителями SIS-18 и NICA/FAIR. Первый сеанс по набору экспериментальных данных на различных ядерных мишенях проводился на пучках углерода.

В 2019 г. проведен физический анализ зарегистрированных экспериментальных данных по рождению Λ -гиперонов при энергиях углеродного пучка 3,5, 4 и 4,5 ГэВ на C-, Al-, Cu- и Pb-мишенях. Полученные результаты по сечениям и выходу Λ -гиперонов были сравнены с предсказаниями теоретических моделей DCM-QGSM, UrQMD и данными других экспериментов (рис. 2).

Статус экспериментальной установки

В 2019 г. коллаборация BM@N продолжала подготовку установки к проведению сеансов на пучках

Таблица 3

Этап сборки	Срок
Готовность павильона MPD к доставке и монтажу ядра магнита	Апрель 2020 г.
Монтаж ядра магнита	Май–июнь 2020 г.
Транспортировка соленоида от компании-изготовителя ASG (Италия)	Июнь 2020 г.
Прибытие соленоида в ОИЯИ	Июль 2020 г.
Монтаж ядра и соленоида	Август 2020 г.
Подготовка к включению соленоида (криогеника, питание и пр.)	Сентябрь 2020 г.
Измерение карты магнитного поля внутри магнита	Ноябрь 2020 г.
Подготовка к монтажу детекторных подсистем	Декабрь 2020 г.
Монтаж детекторов, платформы с электроникой, кабелей	Январь–апрель 2021 г.
Пусконаладочные работы	Май 2021 г.
Начало тестирования установки на космических лучах	Июнь 2021 г.

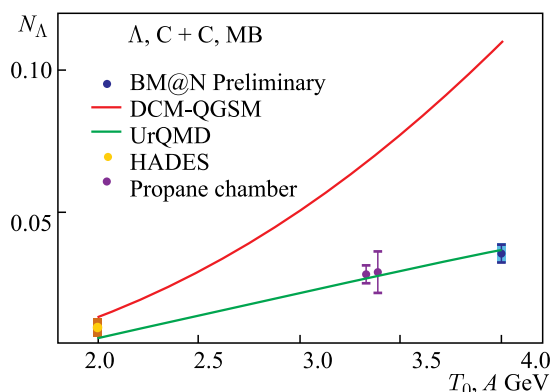


Рис. 2. Выход Λ -гиперонов в эксперименте BM@N. Сравнение с предсказаниями моделей и результатами других экспериментов

тяжелых ионов, наращивая детекторные подсистемы. В том числе:

- В сотрудничестве с ЦЕРН проведены работы по созданию, монтажу и тестированию гибридного центрального трекера на базе GEM-детекторов с размером чувствительной зоны 163×39 см и трех станций передних кремниевых микростриповых детекторов. Эта конфигурация будет использоваться при нагрузках порядка нескольких единиц на 10^5 . Считывающая электроника трекера частично построена на использовании чипа IDEAS (Норвегия).

- Для работы при нагрузках порядка нескольких единиц на 10^6 , ожидаемых в 2022 г., в сотрудничестве с коллаборацией CBM разработаны (планируется создание четырех станций) широкоапертурные кремниевые микростриповые детекторы STS. Технический проект (TDR) был одобрен в декабре 2019 г.

УЧАСТИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ВНЕШНИХ УСКОРИТЕЛЯХ

Эксперименты на Большом адронном коллайдере

ALICE

В 2019 г. завершен анализ фемтоскопических корреляций для пар тождественно заряженных каонов в p -Pb-столкновениях при 5,02 ТэВ (на пару нуклонов). На рис. 3 приведены полученные при фитировании радиусы источников излучения пар K^+K^- в сравнении с радиусами, данные по которым опубликованы ранее, для пар тождественных заряженных каонов в зависимости от поперечного импульса пары и центральности взаимодействий. Видно хорошее согласие радиусов для обоих типов пар.

Такой тип корреляций впервые был изучен при столкновениях протонов с ядрами. Сравнение поведения радиусов источников излучения с полученными ранее для pp - и Pb-Pb-столкновений показало, что радиусы источника в p -Pb-взаимодействиях ближе к радиусам в pp -, чем в Pb-Pb-соударениях. Это указывает на ослабленное влияние коллектив-

- Внешняя трековая система установки включает три катодные стриповые камеры (CSC) размером 113×107 см для регистрации треков вблизи расположения ToF (камеры изготавливаются) и две большие (219×145 см) CSC-камеры, расположенные вдали от ToF (разрабатываются).

- Изготовлен и введен в эксплуатацию адронный калориметр установки (FHCAL), основанный на модулях, разработанных для экспериментов MPD и CBM.

Также была изготовлена и установлена вакуумная пучковая труба, располагающаяся до мишени. Разработана станция мишени, оперирующая с несколькими мишенями, размещенными в вакууме.

Проект SPD

В рамках проекта SPD в 2019 г. выполнены следующие работы:

- на ПКК по физике частиц была представлена 1-я версия концептуального проекта установки SPD;

- рассмотрены несколько вариантов магнитной системы установки: гибридная (тороид в центре и две катушки Гельмгольца по краям), шесть катушек Гельмгольца с различными конфигурациями включения тока и соленоид;

- разработана 1-я версия трекинга SPD на основе фильтра Кальмана, проведено моделирование и получено достигаемое импульсное разрешение для различных вариантов магнитного поля;

- проведено моделирование процессов Дрелла-Яна, рождения чармония и прямых фотонов;

- начато формирование коллаборации, создана комиссия по подготовке конституции SPD.

ных эффектов в p -Pb-взаимодействиях и противоречит предсказаниям ряда моделей [1].

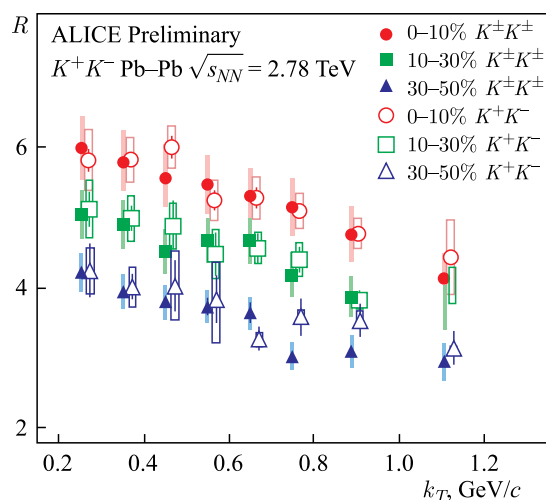


Рис. 3. Радиусы источников излучения пар K^+K^- и пар тождественных заряженных каонов в зависимости от поперечного импульса пары и центральности взаимодействий

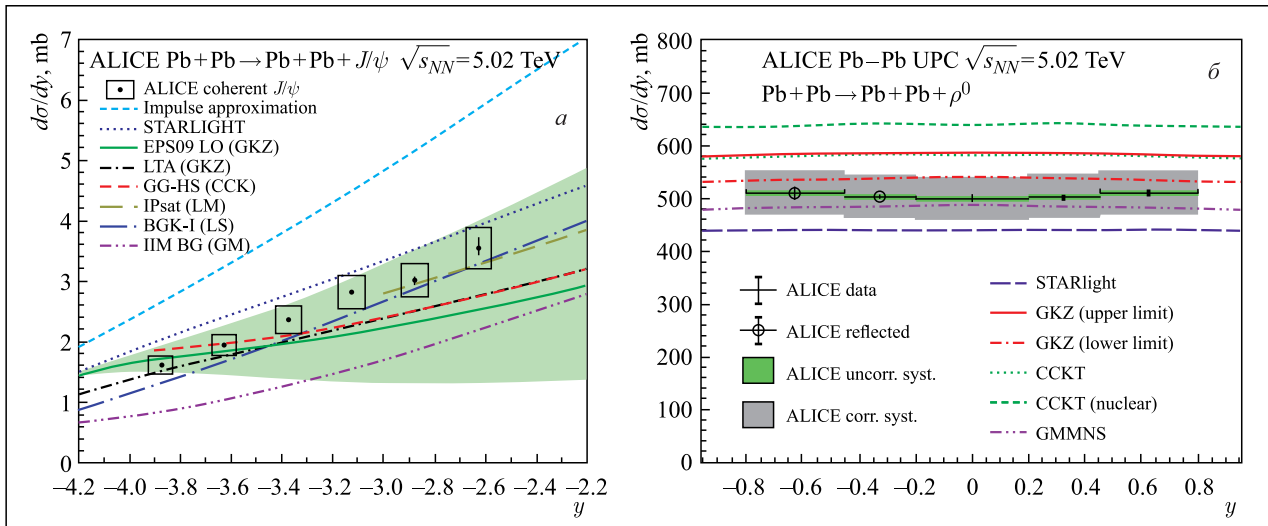


Рис. 4. Сравнение дифференциальных сечений когерентного рождения J/Ψ (а) и ρ^0 (б) с предсказаниями различных моделей

В 2019 г. завершен анализ когерентного рождения J/Ψ и ρ^0 -мезонов в ультрапериферических Рb–Рb-соударениях (на пару нуклонов) при 5,02 ТэВ. Определены их дифференциальные сечения рождения, и сделано сравнение с предсказаниями моделей (рис. 4). Показано наилучшее согласие с моделями в предположении умеренного влияния механизма затенения глюонов. Кроме того, проведены первые измерения когерентного фоторождения ω -мезона и объекта, подобного резонансному состоянию, с массой примерно $1700 \text{ МэВ}/c^2$ [2].

ATLAS

В 2019 г. сотрудники ЛФВЭ, участвующие в проекте, продолжали работу по нескольким направлениям, включая анализ экспериментальных данных, моделирование нового процесса с частицами SUSY, модернизацию детектора ATLAS для работы в условиях повышенной светимости Большого адронного коллайдера и КХД-анализ данных по глубоконеупругому рассеянию.

Сечение процесса ассоциированного рождения бозона Хиггса, распадающегося на пару b -кварков, и электрослабого калибровочного бозона W или Z , распадающегося на лептоны, было измерено в нескольких интервалах поперечного импульса калибровочного бозона. Измерения проводились в определенных интервалах кинематических переменных и анализировались в рамках так называемого упрощенного шаблона. Результаты были получены при энергии pp -взаимодействий 13 ТэВ в с.ц.м. и интегральной светимости $79,8 \text{ фб}^{-1}$ и зарегистрированы детектором ATLAS на Большом адронном коллайдере. Обнаружено, что все измеренные сечения согласуются с предсказаниями Стандартной модели, также установлены ограничения на параметры эффективного лагранжиана, чувствительного к модификациям бозонных связей Хиггса с электрослабыми калибровочными бозонами (рис. 5).

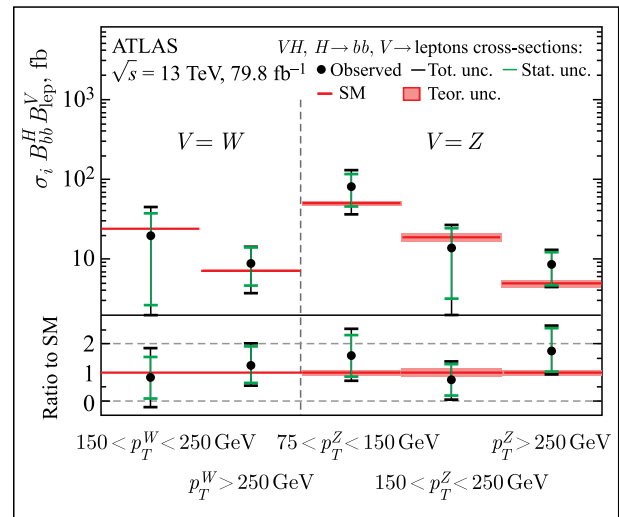


Рис. 5. Измеренные значения сечения процесса VH ($V \rightarrow$ лептоны) с учетом мод распада H и V

Работы по модернизации детектора ATLAS включали проведение сеанса облучения оптоволоконных разъемов на реакторе ИБР-2 для исследования радиационной стойкости материалов с целью выяснения возможности их использования в детекторе ATLAS при работе на коллайдере HL-LHC. Разработан радиационно стойкий аналоговый формирователь сигналов для торцевого адронного калориметра установки ATLAS, и создан стенд для измерения характеристик прототипов, а в будущем и интегральных схем и их сертификации. Электрические характеристики прототипа были измерены на созданном стенде, полученные данные практически полностью совпали с ожидаемыми. Разработанная схема формирователя была использована при разработке прототипа твердотельной микросхемы. После изготовления ее характеристики будут изучены на созданном стенде.

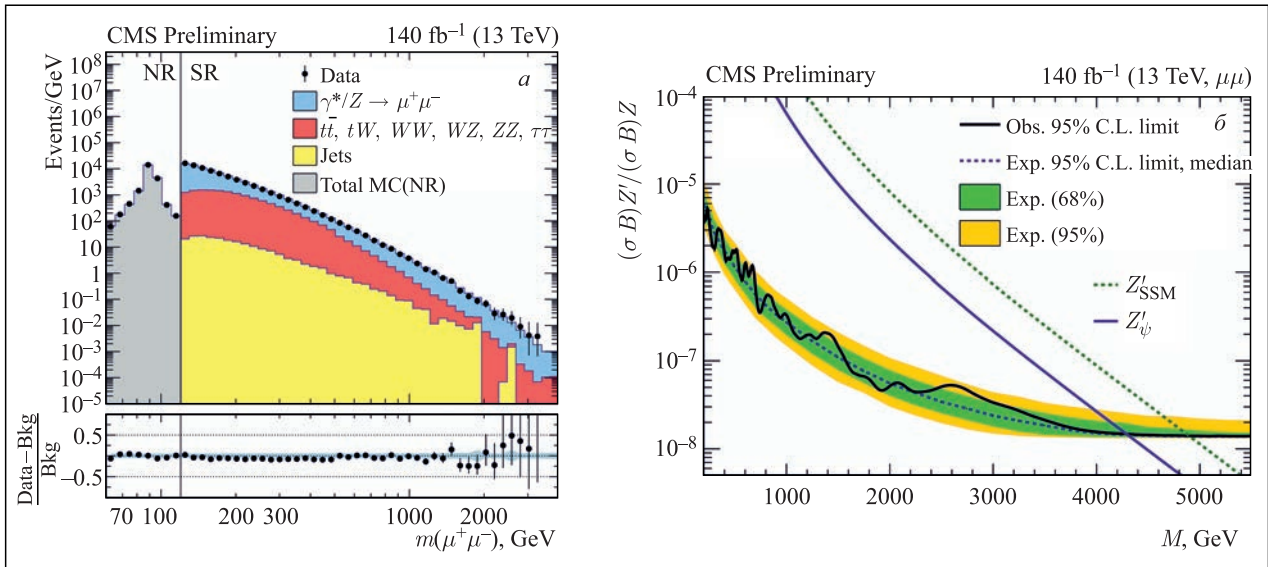


Рис. 6. а) Распределение по инвариантной массе событий рождения пар мюонов при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [3]. Гистограммами показан вклад различных процессов СМ. б) Модельно-независимый верхний предел (95%-й уровень достоверности) на сечение рождения пар мюонов (черная сплошная линия), нормированное на сечение рождения Z^0 -бозона, для случая резонансов со спином 1 [3]. Закрашенные области вокруг пунктирной линии соответствуют стандартным отклонениям ожидаемого предела 68 и 95%. Приведены теоретические предсказания сечений рождения новых калибровочных бозонов в моделях Z'_{SSM} и Z'_ψ

CMS

В 2019 г. группа ОИЯИ в эксперименте CMS принимала участие в обработке и анализе данных сеанса LHC, проходившего в 2015–2018 гг. на встречных пучках протонов при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и светимости до $2,14 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (LHC Run 2).

Проведен экспериментальный поиск нейтральных резонансов как со спином 1, так и со спином 2 по их ожидаемому распаду на пару мюонов (рис. 6, а) [3]. Не наблюдается никаких существенных отклонений от прогнозов Стандартной модели (СМ) по отношению к ожиданиям от фонов СМ. В отсутствие значимого превышения сигнала над ожидаемым фоном СМ установлен модельно-независимый верхний предел (95%-й уровень достоверности) на сечения этих процессов (см., например, рис. 6, б) [3].

Измерения дифференциального сечения для процесса Дрелла–Яна основаны на данных pp -столкновений при энергии 13 ТэВ в с.ц.м. Результаты хорошо согласуются с результатами предыдущих измерений при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ и с данными исследований угловых характеристик мюонов, образующихся в данном процессе [4, 5].

В рамках программы первой фазы модернизации CMS была проведена замена регистрирующей электроники центральных адронных калориметров. Группа ОИЯИ создала испытательный стенд для длительных испытаний системы считывающей электроники с использованием кремниевого фотоумножителя SiPM для центральных адронных калориметров. Полностью подготовлена инфраструктура испыта-

тельного стенда, включая систему водяного охлаждения модулей, систему низкого питания, систему подачи напряжения смещения на SiPM, систему оптоволоконной коммуникации регистрирующей электроники с крейтами систем отбора данных и триггера, контроля и записи тестовых данных. Новая система регистрирующей электроники была установлена на детектор CMS: заменены 144 считывающих модуля, 36 калибровочных модулей и 72 модуля контроля и управления регистрирующей электроникой.

В рамках программы второй фазы модернизации CMS физики ОИЯИ участвовали в переоборудовании электроники CSC-камер на мюонных станциях ME1/1, ME2/1, ME3/1 и ME4/1: разработаны и изготовлены 120 новых плат распределения и контроля низкого напряжения для CSC-камер (LVDB-5), проведена разработка и изготовление автоматизированного стенда для настройки плат LVDB-5, изготовлено 120 кабелей референсного напряжения. В общей сложности 180 камер были извлечены из CMS, перемещены в наземную лабораторию, оснащены новой электроникой, протестированы и, наконец, установлены на место. Для камер ME1/1 изготовлены 72 новых контура охлаждения.

Эксперименты на протонном суперсинхротроне в ЦЕРН

COMPASS

В 2019 г. в эксперименте COMPASS был продолжен анализ данных, собранных в 2002–2018 гг.

Коллаборация COMPASS выполнила наиболее полное фитирование резонансной модели $\pi^- \pi^- \pi^+$ -состояний, используя результаты ранее опубликован-

ного частичного волнового анализа (PWA) большого набора данных событий дифракционной диссоциации от реакции отдачи $\pi^- + p \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ + p$ с пучком пионов 190 ГэВ/с [6]. Результаты PWA подвергают резонансно-модельной подгонке с использованием амплитуд Брейта–Вигнера для одновременного описания подмножества 14 выбранных волн с использованием 11 изовекторных светомезонных состояний. Впервые определена зависимость t' -фаз от амплитуд продуцирования и подтверждено, что механизм рождения через померонный обмен является общим для всех резонансов.

Поперечные спиновые асимметрии, измеренные в полуинклюзивных реакциях лепторождения адронов, при взвешивании с поперечным импульсом адрона P_T позволяют извлекать важные функции распределения, зависящие от поперечного импульса [7]. Полученные результаты сравниваются со стандартными невзвешенными асимметриями Сиверса и используются для выделения первых поперечных моментов распределений Сиверса для кварков u и d .

Коллаборацией COMPASS были опубликованы результаты по измерению жесткого эксклюзивного рождения π^0 -мезонов в реакциях мюонов на протоне с использованием 160-ГэВ/с поляризованных μ^+ - и μ^- -пучков SPS в ЦЕРН, падающих на жидководородную мишень. По среднему значению измеренных сечений μ^+ и μ^- определяется сечение взаимодействия протона с виртуальным фотоном как функция квадрата переданного 4-импульса между начальным и конечным состоянием протона в диапазоне $0,08 < |t| < 0,64$ (ГэВ/с)². Эти результаты являются важным вкладом в моделирование обобщенных партонных распределений. В контексте феноменологической модели Голоскокова–Кролла статистически значимый вклад поперечной интерференции представляет собой четкое экспериментальное доказательство киральной нечетности обобщенного партонного распределения \bar{E}_T .

NA61/SHINE

В 2019 г. деятельность коллаборации NA61 была сосредоточена на программе обновления детектора для работы в следующий период (post-LS2) и физическом анализе данных, набранных до 2019 г.

Самые последние результаты относятся к свойствам образованных частиц, а также к событийным флуктуациям в протон-протонных взаимодействиях, $\text{Be} + \text{Be}$ и $\text{Ar} + \text{Sc}$ при энергиях пучков 19/20, 30, 40, 75/80 и 158 АГэВ.

На рис. 7 показано текущее состояние хорошо известных «step»- и «horn»-структур. В столкновениях $\text{Pb} + \text{Pb}$ такие структуры были предсказаны за счет образования смешанной фазы адронного газа (HG) и кварк-глюонной плазмы (QGP). Обнаружена быстрая смена «horn» в энергетической зависимости K/π в центральных столкновениях $\text{Pb} + \text{Pb}$ и $\text{Au} + \text{Au}$, что интерпретируется как обусловленное началом декон-

файнмента в ядерных взаимодействиях. Коллаборация NA61 дополнила эти данные новыми измерениями в реакциях $p + p$, $\text{Be} + \text{Be}$ и $\text{Ar} + \text{Sc}$, которые проявляют неожиданные и очень интересные особенности, а именно:

- энергетическая зависимость имеет плато, подобное наблюдаемому в $p + p$ -взаимодействиях;

- данные в столкновениях $\text{Be} + \text{Be}$ близки к результатам во взаимодействиях $p + p$;

- данные по взаимодействиям $\text{Ar} + \text{Sc}$ показывают зависимость от энергии столкновения, качественно аналогичную данным реакции $p + p$, но плато находится на значительно более высоком уровне.

Результаты для $p + p$ -взаимодействий, полученные в эксперименте NA61, были рассмотрены как указание на возможность проявления деконфайнмента в малых системах.

Удивительно, что в данных $\text{Ar} + \text{Sc}$ нет указания на структуру «horn».

NA62 (NA48/2)

В 2019 г. был продолжен анализ экспериментальных данных NA48/2 и NA62.

Опубликован первый результат NA62 по поиску распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$, основанный на небольшой выборке данных, накопленных в сеансе 2016 г. (что соответствует $1,21 \cdot 10^{11}$ распадам K^+) [8] (рис. 8). Чувствительность к одному событию составляет $3,15 \times 10^{-10}$, что соответствует 0,267 события СМ. Наблюдается один сигнал-кандидат, в то время как ожидаемый фон составляет 0,152 события. Это соответствует верхнему пределу $14 \cdot 10^{-10}$ для парциальной ширины распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ при 95%-м уровне достоверности. Анализ данных, накопленных в 2017 г., привел к отбору еще двух кандидатов $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$. При общем ожидаемом фоне $1,65 \pm 0,31$ события выбранные три кандидата приводят к верхнему пределу парциальной ширины распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ $18,5 \cdot 10^{-10}$ на 90%-м уровне достоверности.

Опубликована заключительная статья по результатам анализа редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ в NA48/2 [9]. Полученные результаты основаны на $1,7 \cdot 10^{11}$ распадах заряженных каонов, зарегистрированных в 2003–2004 гг. Выборка из 4919 кандидатов с фоном величиной 4,9% позволяет определить парциальную ширину распада: $\text{BR} = (4,24 \pm 0,14) \cdot 10^{-6}$. Исследование кинематической области дает доказательства наличия структурно зависимого вклада в соответствии с предсказаниями, основанными на киральной теории возмущений. Также оценены несколько асимметрий, связанных с возможным нарушением P- и CP-четностей.

Опубликованы результаты поиска распадов π^0 на фотон и невидимый массивный темный фотон в эксперименте NA62 [10]. Из $4,12 \cdot 10^8$ меченых π^0 -мезонов сигнал не наблюдается. В предположении взаимодействия кинетического смешивания установлены пределы на связь темного фотона

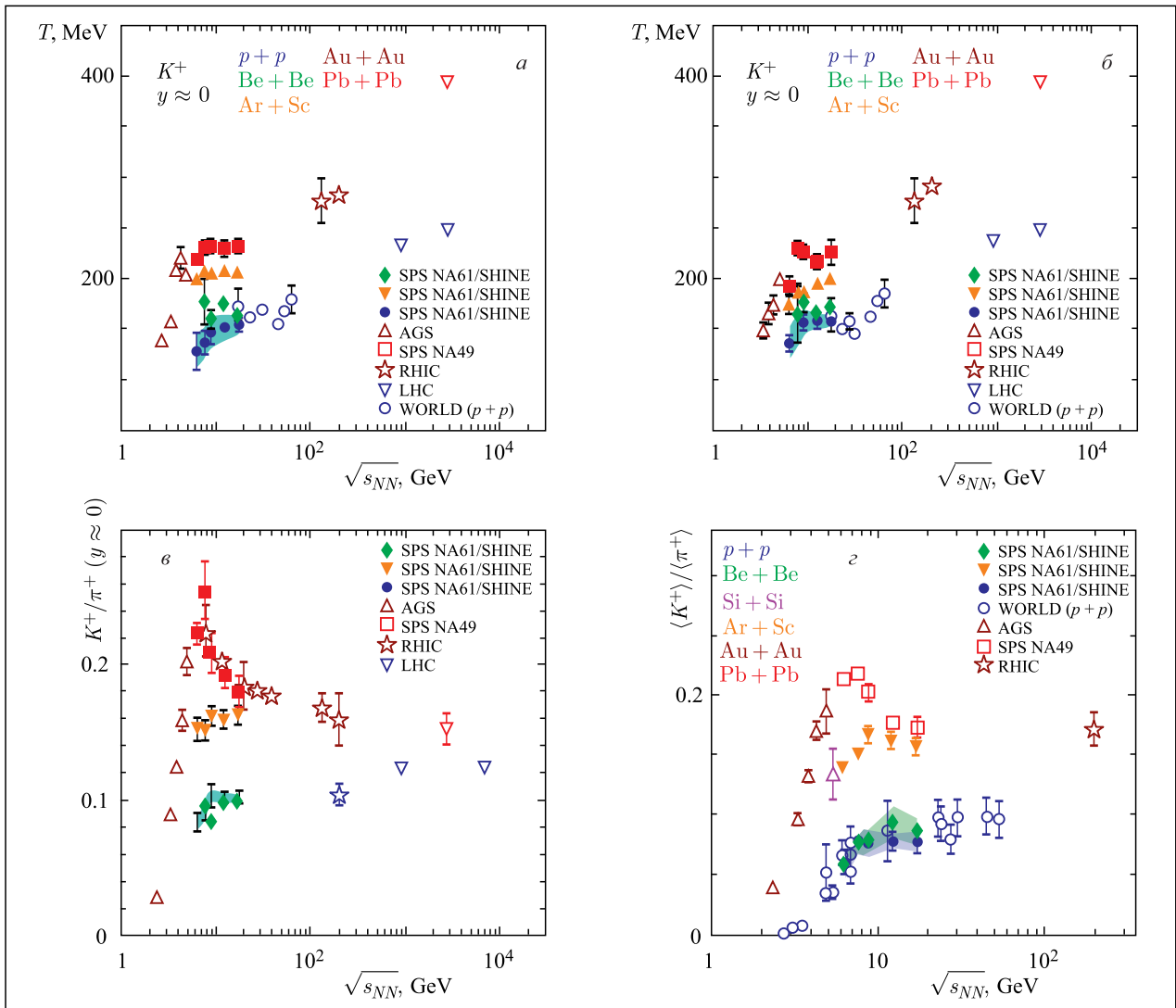


Рис. 7. Параметр наклона спектров поперечных масс в центральной области быстрой для K^+ - и K^- -мезонов в зависимости от энергии столкновения $p+p$, $Be+Be$, $Ar+Sc$ и $Pb+Pb/Au+Au$ (а, б); отношение K^+/π^+ в центральной области быстрой и $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ в полном фазовом пространстве 4π как функция энергии столкновения $p+p$, $Be+Be$, $Ar+Sc$ и $Pb+Pb/Au+Au$ (в, г)

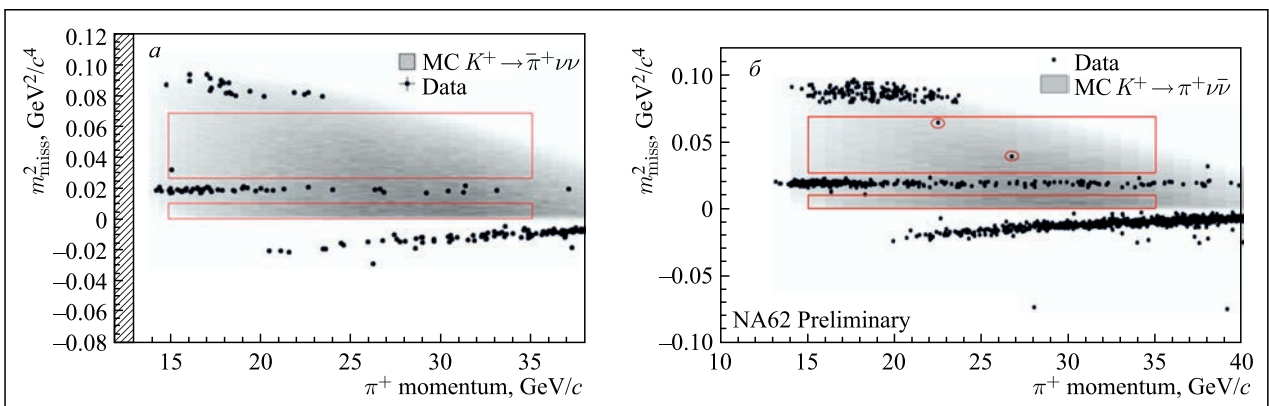


Рис. 8. а) Один кандидат на распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, выявленный в области сигнала (красные прямоугольники) в результате слепого анализа данных, собранных NA62 в 2016 г. б) Два кандидата на распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, обнаруженные в области сигнала NA62 (красные прямоугольники) после слепого анализа данных, собранных в 2017 г.

с обычным фотоном в зависимости от массы темного фотона, что улучшило результаты предыдущих исследований в диапазоне масс 60–110 МэВ/ c^2 . Данные результаты интерпретируются в терминах верхнего предела парциальной ширины электрослабого распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\nu\nu$, что улучшило существовавший ранее предел более чем на три порядка.

На основе экспериментальных данных NA62 проведен новый поиск двойных безнейтринных распадов каонов $K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$ и $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ с лучшим в мире уровнем точности [11]. Эти распады нарушают сохранение лептонного числа, и их обнаружение может выявить майорановскую природу нейтрино, которая предполагает модификацию СМ. Ожидаемый фон в области сигнала равен $0,16 \pm 0,03$ и $0,91 \pm 0,41$, а число наблюдаемых событий — 0 и 1 соответственно. Это приводит к верхним пределам для парциальных ширин $2,2 \cdot 10^{-10}$ и $4,2 \cdot 10^{-11}$ с 90%-м уровнем достоверности соответственно. Полученный результат повышает точность мировых данных о возможном несохранении лептонного числа. Анализ данных 2018 г. в дальнейшем улучшит точность и этих результатов.

NA64

Группа ОИЯИ участвовала в анализе данных сеансов, проведенных в 2016–2018 гг., и продолжила работу по созданию новых камер на основе стробоскопов для модернизации спектрометра.

Поиск частиц темной материи с массой менее 1 ГэВ и ее медиатора — нового векторного бозона A' , темного фотона, в событиях с недостающей энергией был проведен на основе данных, зарегистрированных в сеансах 2016–2018 гг. с общей статистикой $2,84 \cdot 10^{11}$ электронов на мишени. Кандидатов найдено не было. Результаты опубликованы в «Physical Review Letters» [12] и отмечены редколлегией как «предложение редактора» (рис. 9).

Проведен комбинированный анализ данных ($8,4 \times 10^{10}$ е.о.т.), зарегистрированных в 2017 и 2018 гг. в эксперименте по прямому поиску нового гипотетического X -бозона (16,7 МэВ), который мог бы объяснить аномальный выход e^+e^- -пар, наблюдаемый при распадах возбужденного ядра ${}^8\text{Be}^*$ («бериллиевая аномалия»). X -бозон может быть рожден в реакции тормозного излучения $e^-Z \rightarrow e^-ZX$ пучком электронов высокой энергии, падающим на активную мишень, и наблюдаться через его последующий распад на e^+e^- -пару. Никаких свидетельств таких распадов найдено не было. Проведенный анализ позволяет установить новые пределы на параметр ε_e связи $X-e^-$, за исключением диапазона $1,2 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_e < 6,8 \cdot 10^{-4}$ [13] (рис. 10).

Эксперимент NA64 отмечен вице-директором ЦЕРН Э.Элсенем в обзоре 2019 г.: «... Из большого разнообразия экспериментов с фиксированной мишенью я выбрал NA62 и NA64 как наиболее

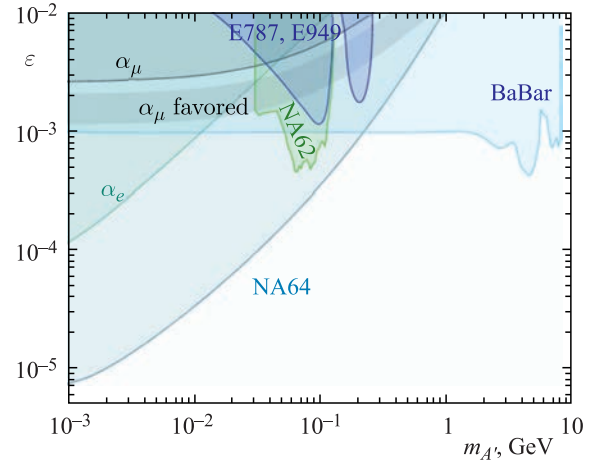


Рис. 9. Область исключения NA64 с 90%-м уровнем достоверности в плоскости $(m_{A'}, \varepsilon)$. Показаны ограничения E787 и E949, BaBar и недавние данные эксперимента NA62, а также предпочтительная область параметра α_μ

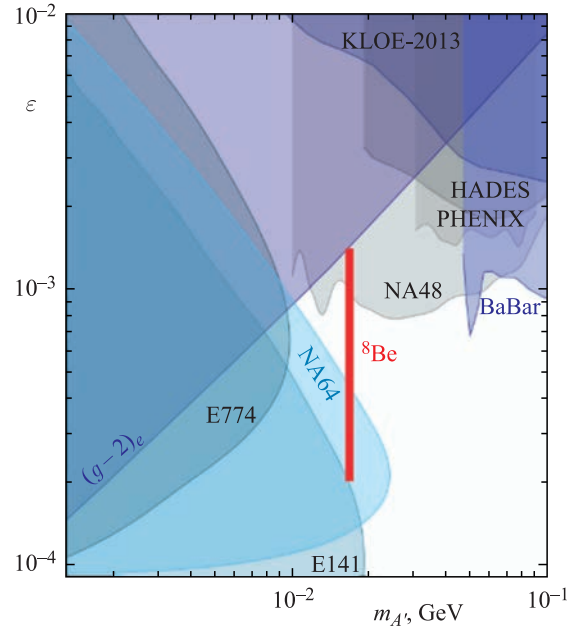


Рис. 10. Области исключения с 90%-м уровнем достоверности в плоскости $(m_X; \varepsilon)$ эксперимента NA64 (синяя область). Для массы 16,7 МэВ область взаимодействия $X-e^-$, исключенная NA64, составляет $1,2 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_e < 6,8 \cdot 10^{-4}$. Показан полный допустимый диапазон параметра ε_e $2,0 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_e < 1,4 \cdot 10^{-3}$, потенциально объясняющий аномалию ${}^8\text{Be}^*$ (красная область), а также ограничения, установленные экспериментами E774, E141, BaBar, KLOE, HADES, PHENIX, NA48, и границы из аномального магнитного момента электрона $(g-2)_e$

показательные с точки зрения потенциала для открытия новой физики на SPS. Анализ данных, собранных в течение 2016–2018 гг. с электронами, позволил NA64 достичь рекордной чувствительности для параметров легкой темной материи, а также значительно продвинулся в поиске других новых слабозадействующих частиц».

СОБЫТИЯ

16–17 апреля состоялось 3-е коллаборационное совещание по экспериментам MPD и BM@N комплекса NICA.

4–8 июня в ЛФВЭ прошел международный семинар «SPD на NICA-2019».

11 октября в Мексике было подписано соглашение о сотрудничестве:

- с Национальным автономным университетом Мексики;
- с Институтом ядерных наук;
- с Автономным университетом Пуэбла;
- с Центром перспективных исследований;
- с Университетом Колимы;
- с Автономным университетом Синалоа.

14–15 октября состоялось 4-е коллаборационное совещание по эксперименту BM@N комплекса NICA.

21–25 октября в Варшавском технологическом университете состоялось 4-е коллаборационное совещание по эксперименту MPD, в ходе которого членами коллаборации MPD были выбраны пять польских научных центров:

- Университет им. Яна Кохановского;
- Национальный центр ядерных исследований (NCBJ);
- Вроцлавский университет;
- Варшавский технологический университет;
- Варшавский университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acharya S. et al. (ALICE Collab.). One-Dimensional Charged Kaon Femtoscopy in p -Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. P. 024002.
2. Acharya S. et al. (ALICE Collab.). Coherent J/ψ Photoproduction at Forward Rapidity in Ultra-peripheral Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Lett. B. 2019. V. 798. P. 134926.
3. Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.). Search for a Narrow Resonance in High-Mass Dilepton Final States in Proton-Proton Collisions Using 140 fb^{-1} of Data at 13 TeV. CMS-PAS-EXO-19-019.
4. Gorbunov I., Lanev A., Shalaev V., Shmatov S. Study of Drell-Yan Process with the Compact Muon Solenoid Experiment at the Large Hadron Collider // J. Belarus. State Univ. Phys. 2019. V. 2. P. 16–25.
5. Zykunov V. A. Final-State Two-Loop Radiative Corrections to the Drell-Yan Process at the LHC in the Soft-Photon Approximation // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 183–190.
6. Aghasyan M. et al. (COMPASS Collab.). Light Isovector Resonances in $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ p$ at 190 GeV/c // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 092003; CERN-EP/2018-021; hep-ex/1802.05913.
7. Alexeev M. G. et al. (COMPASS Collab.). Measurement of P_T -Weighted Sivers Asymmetries in Lepton-production of Hadrons // Nucl. Phys. B. 2019. V. 940. P. 34; CERN-EP/2018-242; hep-ex/1809.02936.
8. Cortina Gil E. et al. (NA62 Collab.). First Search for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ Using the Decay-in-Flight Technique // Phys. Lett. B. 2019. V. 791. P. 156–166.
9. Batley J. R. et al. (NA48/2 Collab.). First Observation and Study of the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ Decay // Phys. Lett. B. 2019. V. 788. P. 552–561.
10. Cortina Gil E. et al. (NA62 Collab.). Search for Production of an Invisible Dark Photon in π^0 Decays // JHEP. 2019. V. 1905. P. 182.
11. Cortina Gil E. et al. (NA62 Collab.). Searches for Lepton Number Violating K^+ Decays // Phys. Lett. B. 2019. V. 797. P. 134794.
12. Banerjee D. et al. (NA64 Collab.). Dark Matter Search in Missing Energy Events with NA64 // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123. P. 121801.
13. Banerjee D. et al. (NA64 Collab.). Improved Limits on a Hypothetical $X(16.7)$ Boson and a Dark Photon Decaying into $e^+ e^-$ Pairs. CERN-EP-2019-284; arXiv:1912.11389v1 [hep-ex]. 2019.