

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

РАЗВИТИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОИЯИ

Основной задачей ЛФВЭ является проведение исследований по физике частиц и физике тяжелых ионов высоких энергий на установках ОИЯИ и (в рамках международного сотрудничества) в крупнейших

ускорительных центрах мира. Успешная реализация этой задачи предполагает модернизацию существующего ускорителя нуклотрона и создание на его базе нового ускорительного комплекса NICA.

НУКЛОТРОН-М

Нуклотрон является базовой установкой ОИЯИ в физике тяжелых ионов высоких энергий. Его модернизация была начата в 2007 г. в рамках проекта «Нуклотрон-М». Она включает полное обновление криогенной системы, замену системы электропитания и защиты, улучшение вакуума, доработку источника ионов «Крион-2» для возможности генерации им тяжелых ионов, обновление системы инжекции, развитие диагностических систем и минимизацию потерь на всех стадиях формирования и ускорения пучка. Кроме того, в рамках ускорительного комплекса NICA необходимо создать новый источник ионов «Крион-6Т», линак для инжекции тяжелых ионов и источник поляризованных частиц.

В 2009 г. большинство работ были выполнены на 70–80 %. Полностью проект «Нуклотрон-М» должен быть завершен в конце 2010 г.

Основные результаты по модернизации подсистем ускорительного комплекса, полученные в 2009 г.

1. Модернизация криогенной системы. Замена и обновление криогенного оборудования ускорительного комплекса полностью завершена. Полностью обновлены и заменены все низкотемпературные агрегаты КГУ-1600/4.5, очиститель жидкого гелия МО-800, масляные сепараторы и другое оборудование. Новая система прошла испытания и успешно работала в 39-м сеансе нуклотрона. Срок службы

оборудования и его качество предполагают его использование в проекте NICA.

2. Модернизация вакуумной системы. Полностью завершены два этапа модернизации вакуума: улучшение качества вакуума в кольце и создание системы автоматического контроля вакуумного оборудования кольца ускорителя.

До модернизации средняя величина вакуума в кольце составляла $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Значение вакуума, измеренное в 38-м сеансе (июнь 2008 г.), составило $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ Торр.

Создана автоматизированная система контроля и управления вакуумным оборудованием. Она позволяет управлять оборудованием, измерять текущие параметры, проводить аварийное отключение. Система создана совместно с чешской компанией (Вакуум Прага, Фотон). В ходе 40-го сеанса работы нуклотрона система была испытана и введена в действие.

3. Модернизация системы электропитания. Работы по модернизации системы электропитания не завершены. Они включают изменение схемы системы питания, создание новых кабельных каналов, систем защиты и ключей эвакуации энергии. В 39-м сеансе была успешно испытана система питания и защиты при магнитном поле 1,5 Тл, оборудование готово к испытанию при номинальном значении магнитного поля.

Совместно с представителями Института электротехнических исследований (Словакия) начаты ра-

боты по системе питания оборудования для коррекции орбиты. Элементы оборудования были протестированы на криогенном стенде и на кольце в ходе 40-го сеанса нуклотрона.

Модернизация системы питания электростатического септума завершается. Она предполагает возможность работы при напряжении 200 кВ, что позволит довести энергию пучков нуклотрона до проектной. 3 января 2010 г. система была успешно опробована при напряжении до 220 кВ.

4. Линак. Завершена модернизация ЛУ-20. Выполнены следующие работы:

- отъюстированы все 59 дрейфовых трубок;
- смонтирована новая система питания корректоров магнитов;
- введена новая система синхронизации для всех каналов линака. В итоге ток пучка дейтронов от лазерного источника составил > 5 мкА (ранее было ~ 3 мкА).

5. Источник тяжелых ионов «Крион». В 2009 г. на источнике «Крион», работающем на принципе «электронная струна», проведено четыре сеанса при

величине поля 3 Тл с целью оптимизации его параметров для получения в 2010 г. тяжелых ионов.

В октябре 2009 г. были получены ионы $^{124}\text{Xe}^{+41}$, $^{124}\text{Xe}^{+42}$, $^{124}\text{Xe}^{+43}$ и $^{124}\text{Xe}^{+44}$. Ионы $^{124}\text{Xe}^{+42}$ получены с интенсивностью $3 \cdot 10^7$ частиц в импульсе.

Продолжаются работы по созданию соленоида на 6 Тл, сконструированы вакуумный и криогенный сосуды для источника «Крион 6Тл».

6. Создание источника поляризованных дейтронов. Данная работа ведется в тесном сотрудничестве в ИЯИ (Троицк). Создана техническая документация, первые элементы должны быть созданы в 2010 г.

7. Развитие инфраструктуры. В 2009 г. обновлена система водяного охлаждения: линии охлаждения кольца нуклотрона и электропитания криогенного оборудования оснащены самоочищающимися фильтрами. В ходе весеннего половодья проведены успешные испытания нового оборудования.

В течение года проведен большой объем инженерных и ремонтных работ на территории площадки ЛФВЭ.

NICA/MPD

Целью проекта NICA является создание и запуск в ОИЯИ нового ускорительного комплекса для проведения исследований на переднем крае науки, изучения свойств горячей и плотной адронной материи и поиск так называемой смешанной фазы такой материи, смеси кварк-глюонного и адронного состояний, а также поиск фазового перехода.

В 2009 г. была подготовлена и представлена для экспертной оценки ПКК 1-я версия технического проекта [1].

Проект коллайдера базируется на двух тесловых магнитах, используемых на нуклотроне, предусматривается две точки пересечения пучков для проведения исследований по физике тяжелых ионов на установке MPD (многофункциональный детектор) и с поляризованными пучками на установке SPD.

В январе 2010 г. на 32-й сессии ПКК по физике частиц экспертный комитет (МАС) подтвердил реализацию проекта NICA и настоятельно поддержал его реализацию.

Работы по созданию основных элементов комплекса NICA продолжаются.

ИРЕН, ЛУЭ-200

Сотрудники ускорительного отделения ЛФВЭ выполнили свои обязательства и запустили линейный ускоритель электронов ЛУЭ-200 — ключевой

Многофункциональный детектор MPD предназначен для исследования горячей и плотной барионной материи в столкновениях тяжелых ионов в диапазоне $A = 1-197$ при энергии в с.ц.м. до $\sqrt{S_{NN}} = 11$ ГэВ (для Au^{79+}) для обнаружения возможного формирования так называемой смешанной фазы, а также P- и CP-нарушения в сильном взаимодействии.

В 2009 г. по проекту MPD были подготовлены два технических документа:

- в мае 2009 г. — 1-я версия концептуального проекта MPD CDR [2];
- в июне 2009 г. — 1-я версия «Белой книги», представляющей физическую программу проекта NICA.

Активно ведутся работы по разработке и созданию детекторов и подсистем MPD.

В сентябре в ОИЯИ был проведен 4-й круглый стол, посвященный обсуждению физической программы NICA и необходимых параметров экспериментальной установки.

элемент импульсного источника нейтронов ИРЕН, являющегося новой базовой установкой ОИЯИ для проведения исследований по ядерной физике.

Сотрудники ЛФВЭ внесли существенный вклад в успешный запуск экспериментальных установок **ALICE**, **ATLAS** и **CMS**. На рис. 1 приведен пример события, зарегистрированного в ходе осеннего сеанса на LHC.

На завершённом этапе участие ОИЯИ в проекте **ALICE** заключалось

- в конструировании дипольного магнита и создании его ярма;
- в производстве кристаллов вольфрамата свинца для фотонного спектрометра;
- в создании 125 дрейфовых камер для детектора переходного излучения.

По результатам первого сеанса при энергии 900 ГэВ коллаборацией подготовлена и направлена в «European Physics Journal» публикация.

В проекте **ATLAS** сотрудники ЛФВЭ отвечали за создание

- 34 строу-колес (3072 каналов в каждом) для трековой системы переходного излучения (TRT);

- 40 %-го жидкоаргонного end-сар калориметра.

В проекте **CMS** сотрудники ЛФВЭ отвечали за создание и запуск

- end-сар адронного калориметра (HE);
- 1-й передней мюонной станции (ME1/1).

Кроме того, ОИЯИ принимал участие в создании end-сар pre-shower (ES).

Сотрудники ускорительного отделения ЛФВЭ внесли существенный вклад в запуск ускорителя.

Была создана и введена в эксплуатацию система подавления поперечных колебаний пучка [3] в диапазоне частот от 3 кГц до 20 МГц. Система мониторинга пучка, использовавшаяся при запуске ускорителя, также была создана сотрудниками ЛФВЭ.

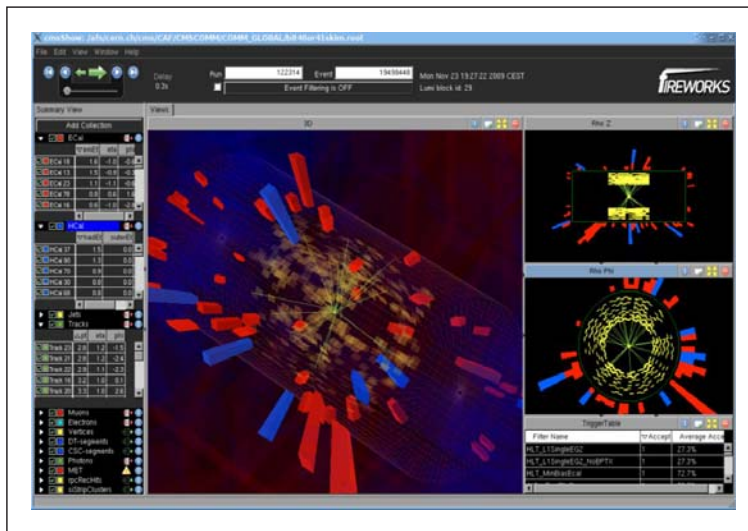


Рис. 1. Пример события в pp -столкновении при энергии 450 ГэВ на установке CMS

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Работа в коллаборации **COMPASS** в 2009 г. велась по двум основным направлениям:

- набор данных в сеансе с адронными пучками;
- анализ данных, полученных на мюонном пучке в 2002–2007 гг. и на адронных пучках в 2008 г.

Главные полученные результаты.

1. В анализе 420 000 событий, набранных в интервале переданного 4-импульса $0,1-1 \text{ ГэВ}^2$, проведен парциально-волновой анализ процесса дифракции π^- в конечное состояние $\pi^-\pi^-\pi^+$ [4]. С ре-

кордной статистикой подтверждены хорошо известные резонансы $a_1(1260)$, $a_2(1320)$ и $\pi_2(1670)$. Данные указывают на существование резонанса с экзотическими квантовыми числами $J^{PC} = 1^{-+}$ при 1,66 ГэВ, распадающегося на $\rho\pi$. Эта волна извлечена из разности массово-зависимых волн $J^{PC} = 2^{-+}$ и 1^{++} . Результат фита дает значение массы резонанса $1660 \pm 10_{-64}^{+0}$ МэВ и его ширину $269 \pm 21_{-64}^{+42}$ МэВ (рис. 2, 3).

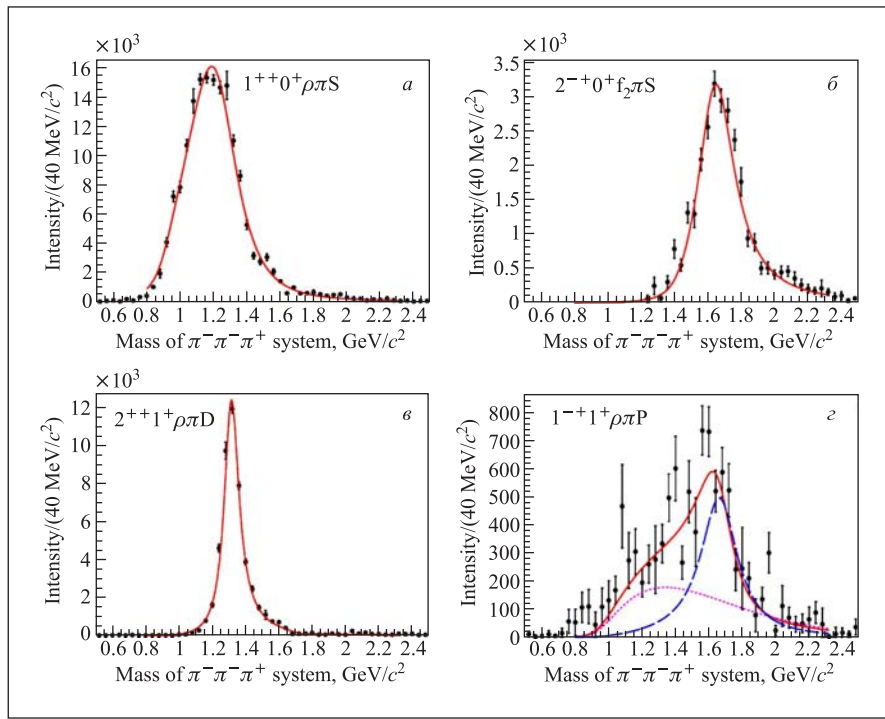


Рис. 2. Интенсивность основных волн $1^{++}0^{++}\rho\pi S$ (а), $2^{-+}0^{+}f_2\rho\pi S$ (б) и $2^{++}1^{+}\rho\pi D$ (в) и экзотической волны $1^{-+}1^{+}\rho\pi P$ (г). Сплошными линиями показан результат массово-зависимого фита

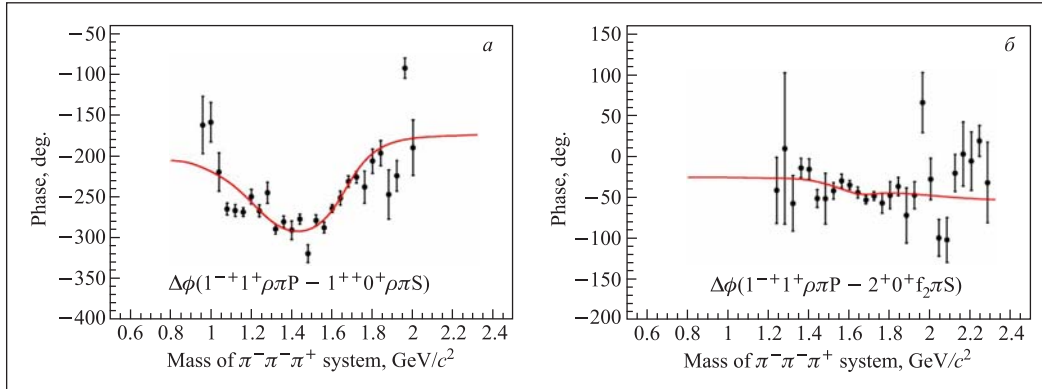


Рис. 3. Фазовая разность экзотической волны $1^{-+}\rho\pi P$ от $1^{++}0^{++}\rho\pi S$ (а) и $2^{-+}0^{+}f_2\rho\pi S$ (б) волн

2. В 2009 г. коллаборация COMPASS представила полученные в лидирующем порядке распределения валентных, $\Delta u_v + \Delta d_v$, не странных морских, $\Delta \bar{u}_v + \Delta \bar{d}_v$, и странных кварков, Δs (в предположении равенства $\Delta \bar{s}$) [5]. Они были извлечены из анализа инклюзивной $A_{1,d}^{\pi^+}$ и полуинклюзивных асимметрий $A_{1,d}^{\pi^-}$, $A_{1,d}^{K^+}$, $A_{1,d}^{K^-}$, измеренных в глубоководном рассеянии поляризованных мюонов на дейтронной мишени. Данные получены в кинематическом интервале $Q^2 > 1 \text{ ГэВ}^2$ и $0,004 < x < 0,3$. Распределение легких кварков находится в хорошем согласии с результатами предыдущих измерений (рис. 4). Распределение $\Delta s(x)$ сравнимо с нулем во всем интервале, что противоречит фиту данных, полученному в лидирующем и следующем порядке КХД.

3. Получен результат по переносу продольной поляризации от μ в Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гипероны, получены функции фрагментации (ФФ) $D_{LL}^{\Lambda(\bar{\Lambda})}$ в процессе ГНР на неполяризованной изоскалярной мишени [6]. Величина переданной Λ и $\bar{\Lambda}$ поляризации в так называемой current fragmentation области имеет различную зависимость от x и x_F . Зависимость функции D_{LL}^{Λ} от x и x_F близка к нулю, тогда как зависимость $D_{LL}^{\bar{\Lambda}}$ имеет тенденцию расти с x_F , достигая величины 0,4–0,5. Средние значения ФФ составляют $D_{LL}^{\Lambda} = -0,012 \pm 0,047 \pm 0,024$ и $D_{LL}^{\bar{\Lambda}} = 0,249 \pm 0,056 \pm 0,049$ (рис. 5).

Коллаборация NA48 вела работу по подготовке нового эксперимента NA62 на SPS в ЦЕРН, нацеленного на изучение сверхредкого распада ка-

она на пион и два нейтрино. Обязательства ОИЯИ в рамках этой программы заключаются в создании строу-детектора для работы в условиях высокого вакуума и обладающего высоким пространственным разрешением. Основные усилия сотруд-

ничества **NA48/NA62** в 2009 г. были сконцентрированы

- на R&D строу-детекторе;
- на анализе данных, набранных в эксперименте NA48.

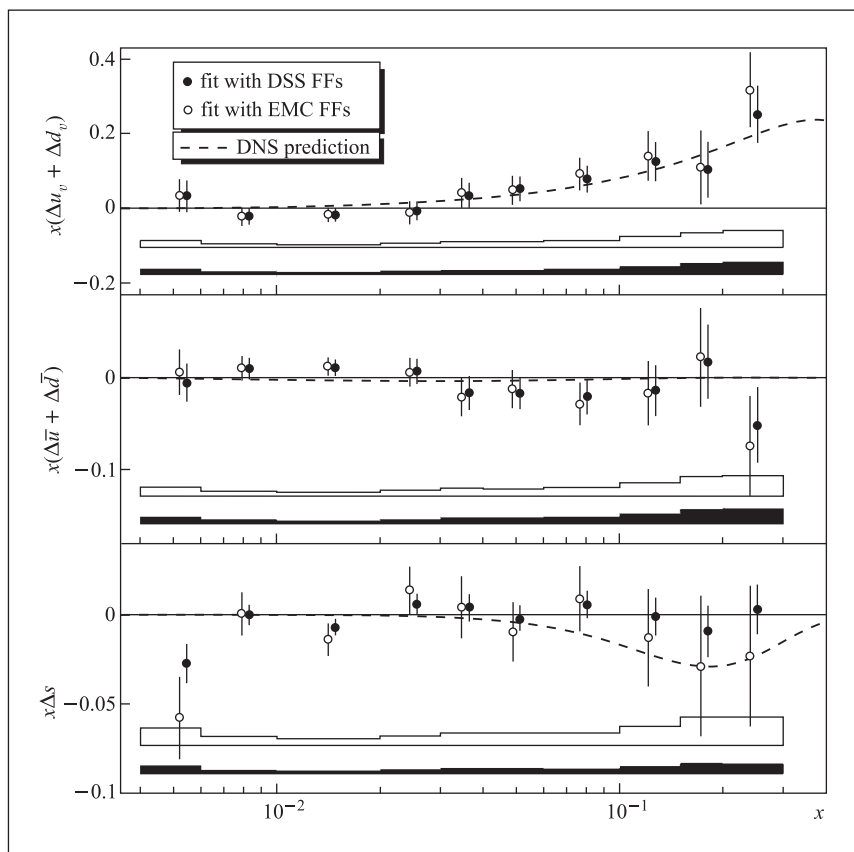


Рис. 4. Функции партонных распределений при $Q^2 = 3 \text{ ГэВ}^2$ в зависимости от x , полученные с двумя типами функций фрагментации

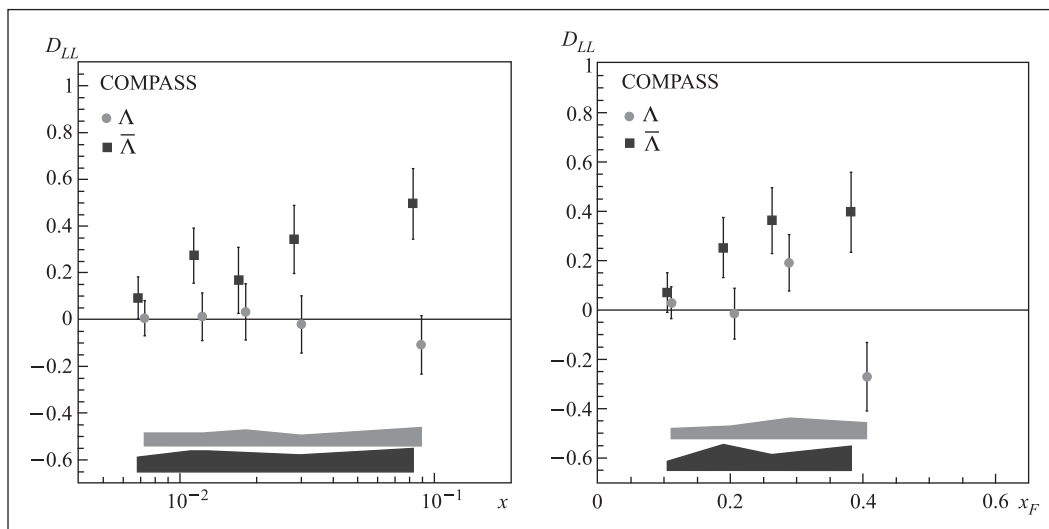


Рис. 5. Зависимость передачи продольной поляризации в Λ и $\bar{\Lambda}$ в зависимости от x и x_F . Заштрихованные полосы показывают систематическую ошибку

Главные полученные результаты.

1. Получены предварительные результаты по проверке лептонной универсальности [7, 8]. Отношение вероятностей распадов $P_K = \Gamma(K^\pm \rightarrow \varepsilon^\pm \nu) / \Gamma(K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu)$, рассчитанное в стандартной модели с очень высокой точностью ($R_K^{\text{SM}} = (2,477 \pm 0,001) \cdot 10^{-5}$), было измерено с рекордной точностью, не уступающей расчетной: $R_K^{\text{SM}} = (2,500 \pm 0,0016) \cdot 10^{-5}$. Мировые данные по измерению R_K показаны на рис. 6 вместе с предварительными данными NA62.

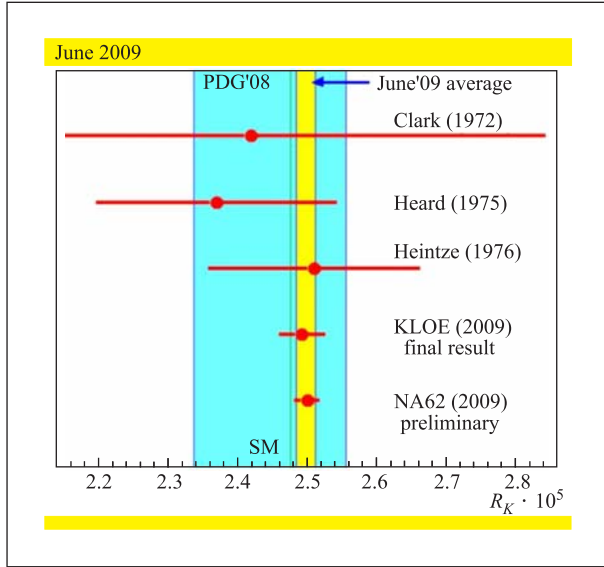


Рис. 6. Мировые данные по измерению R_K

2. Были проанализированы данные 2007–2008 гг., полученные при измерениях разрешения и эффективности прототипов строу-детектора [9] с различной электроникой. Хорошее пространственное разрешение (< 100 мкм, рис. 7) получено в области ра-

диуса более 0,5 мм; эффективность ($> 99\%$) получена, начиная с расстояния 0,2 мм от стенок строу.

3. Набрано более 100 млн триггеров для выбора оптимальной газовой смеси, электроники, изучения проблемы старения, шумов, эффективности и разрешения в зависимости от загрузки. Анализ данных не окончен.

4. Ведется работа по разработке дизайна полномасштабного строу-детектора и его интеграции в установку NA62.

Результаты, полученные на основе данных, записанных в 2003–2004 гг. в эксперименте NA48/2:

- 7253 кандидата в распады $K^\pm \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ с фоном 1,0 % были зарегистрированы экспериментом NA48/2 на SPS в ЦЕРН, что позволило выполнить точное измерение свойств распада. Относительная вероятность распада в полной кинематической области оказалась $BR = (3,11 \pm 0,12) \cdot 10^{-7}$, неопределенность измерения включает также модельную зависимость. Формфактор $W(z)$, где $z = (M_{ee}/M_K)^2$, был параметризован на основе нескольких моделей. Изучена возможная CP-нарушающая асимметрия распадов K^+ и K^- , для нее установлен консервативный верхний предел $2,1 \cdot 10^{-2}$ на 90 %-м уровне достоверности.

- Проведен анализ явления «острия» (cusp) дилиц-плота распада $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^\pm e^\pm \nu$ и новое измерение K_{e4} распада $K^\pm \rightarrow \pi^+ \pi^- e^\pm \nu$. Получено наиболее точное измерение величины длины пион-пионного рассеяния (рис. 8).

Сотрудники ОИЯИ, участвующие в эксперименте STAR на RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL), решали следующие задачи.

1. Исследование процесса рождения мягких фотонов в области энергий 35–160 МэВ в Au+Au- и $d+$ Au-столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ. Наибольший выход фотонов обнаружен в области энергии 60–160 МэВ, что противоречит модели HIJING.

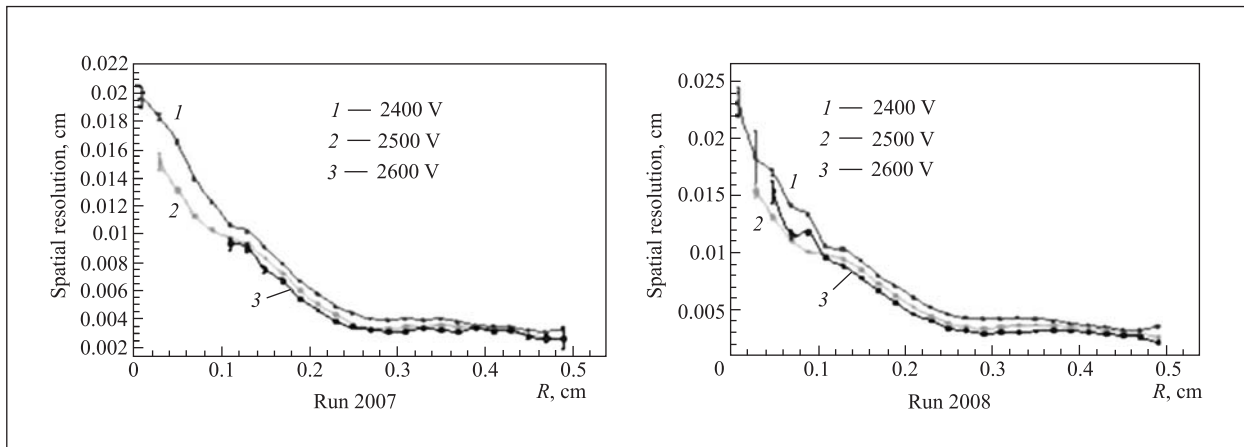


Рис. 7. Пространственное разрешение строу при различном высоком напряжении в зависимости от радиуса

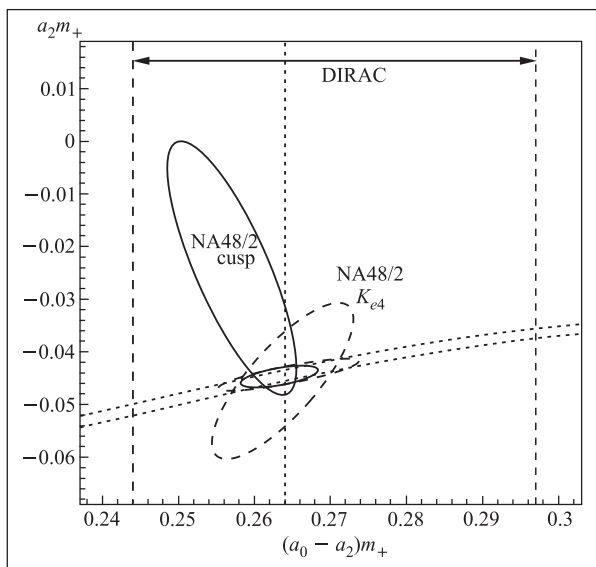


Рис. 8. Эллипсы, соответствующие доверительному уровню в 68 % окончательных результатов по изменению пионных длин рассеяния (малый эллипс со сплошной линией: фит с ограничением из ChPT; большой эллипс со сплошной линией: фит с $a_0 - a_2$ и a_2 в качестве независимых параметров) и из распадов K_{e4} (малый эллипс со штриховой линией: фит с ограничением из ChPT; большой эллипс со штриховой линией: фит $a_0 - a_2$ и a_2 в качестве независимых параметров). Вертикальные линии: центральное значение из эксперимента DIRAC (пунктирная линия) и пределы ошибок (штриховая линия). Теоретически разрешенная в ChPT область показана пунктирными кривыми

2. Изучение влияния деформации ядер ^{197}Au и ^{238}U на эллиптические потоки в Au + Au- и U + U-столкновениях. Было обнаружено, что при деформации ядер ^{197}Au увеличивается средняя эксцентрисность

ИННОВАЦИИ

В 2009 г. созданы различные системы для дистанционного неразрушающего анализа запрещенных веществ, основанных на методе меченых нейтронов (ММН).

Основное преимущество ММН состоит в его чувствительности к элементному составу скрытого вещества, а не к контрасту плотности вещества, как в обычных рентгеновских интроскопах.

ММН предоставляет возможность определения временной информации, которая может быть использована для выбора событий в определенный временной интервал, в результате чего существенно понижается фон. Показано, что использование (альфа-гамма)-совпадений уменьшает отношение сигнал/фон более чем в 200 раз, что позволяет определять малые количества взрывчатого вещества.

Быстрые 14-МэВ нейтроны хорошо использовать для идентификации скрытых объектов из-за их высокой проникающей способности. Они особенно

удобны для того, чтобы проверять средние (багаж) и крупногабаритные (грузовой контейнер) объекты.

В 2009 г. велась работа по следующим проектам.

1. Стационарная система для обследования крупногабаритных грузов. Создан макет системы, исследованы ее характеристики.

2. Мобильная система для обследования машин. Созданы стенды для тестирования альфа-детекторов, электроники сбора данных и гамма-детекторов.

Получены следующие патенты РФ.

1. № 2008129146 «Устройство для идентификации скрытых веществ» — патент на полезную модель.

2. № 2008141464 «Переносное устройство для идентификации скрытых веществ» — патент на изобретение.

3. Исследования фемтоскопии, корреляций и их влияние на динамику процессов рождения частиц в различных генераторах Монте-Карло [11–15].

4. Приложение wavelet анализа для изучения многочастичных корреляций в рождении вторичных частиц в столкновении ультррелятивистских ионов высоких энергий. Показано, как использовать получаемые wavelet спектры в условиях ограниченной эффективности детекторов.

5. Предварительный анализ данных по выходу странных адронов в столкновении Au+Au при 9,2 ГэВ.

6. Анализ распределений адронных спектров по поперечному моменту в рамках модели z -скейлинга.

7. Детальная проверка z -скейлинга на данных по рождению адронов в pp - и $p\bar{p}$ -столкновениях и сравнение предсказаний pQCD и z -скейлинга на асимптотику рождения струй [16–18].

Сотрудники ОИЯИ, участвующие в эксперименте HADES, выполнили в 2009 г. следующее.

- Проведен анализ упругого dp -рассеяния при больших поперечных импульсах dp при 1,25 ГэВ с целью изучения короткодействующих корреляций в дейтроне. Начат анализ по рождению одиночных π и их пар в np -взаимодействиях при 1,25 ГэВ.

- Выполнен теоретический анализ рождения пар электронов в реакциях dp и πp при энергии HADES.

- Проведена модернизация двух плоскостей дрейфовых камер и фронт-энд электроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA). Technical Design Report. Dubna, 2009.
2. The MultiPurpose Detector (MPD) to study Heavy Ion Collisions at NICA. Conceptual Design Report. Dubna, 2009.
3. *Zhabitsky V. M., Höfle W.* LHC Transverse Feedback System: First Results of Commissioning // JINR News. 2009. № 2. P.11–14.
4. *COMPASS Collab.* Observation of a $J^{PC}=1^{-+}$ Exotic Resonance in Diffractive Dissociation of 190 GeV/c π^{-} into $\pi^{-}\pi^{-}\pi^{+}$ // PRL (submitted); CERN-PH-EP/2009-018.
5. *COMPASS Collab.* Flavour Separation of Helicity Distributions from Deep Inelastic Muon-Deuteron Scattering // PLB. 2009. V. 680. P. 217–224.
6. *COMPASS Collab.* Measurement of the Longitudinal Spin Transfer to Λ and Λ -bar Hyperons in Polarized Muon DIS // EPJC. 2009. V. 64. P. 171–179.
7. *Goudzovski E.* Measurement of the FCNC Decays $K^{\pm} \rightarrow \pi^{+} \lambda^{+} \lambda^{-}$ from NA48 // KAON-09, KEK, Tsukuba, Japan, 9–12 June 2009.
8. *Goudzovski E.* Lepton Universality Test with Leptonic Kaon Decays at NA62 // KAON-09. KEK, Tsukuba, Japan, 9–12 June 2009.
9. *Movchan S.* Straw Tracker Prototype for the Precise Measurement of the Very Rare Decay $K^{+} \rightarrow \pi^{+} \nu \bar{\nu}$ (NA62 experiment at SPS CERN) // Nucl. Inst. Meth. F. 2009. V. 604. P. 307–309.
10. *Abelev B. I. et al. (STAR Collab.).* Energy and System Size Dependence of Phi Meson Production in Cu+Cu and Au+Au Collisions // Phys. Lett. B. 2009. V. 673. P. 183–191.
11. *Abelev B. I. et al. (STAR Collab.).* Pion Interferometry in Au+Au and Cu+Cu Collisions at $s(NN)^{1/2} = 62,4$ and 200 GeV // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 024905.
12. *Abelev B. I. et al. (STAR Collab.).* Observation of Charge-Dependent Azimuthal Correlations and Possible Local Strong Parity Violation in Heavy Ion Collisions. nucl-ex/0909.1717.
13. *Зулькарнеев Р.* Препринт ОИЯИ P2-2009-135. Дубна, 2009.
14. *Filip P. et al.* Initial Eccentricity in Deformed Au-197+Au-197 and U-238+U-238 Collisions at $s(NN)^{1/2} = 200$ GeV at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 054903.
15. *Lednický R.* Finite-Size Effects on Two-Particle Production in Continuous And Discrete Spectrum // Phys. Part. Nucl. V. 40. 2009. P. 307–352.
16. *Shahaliev E. I. et al.* Can We Define the Centrality in High-Energy Nuclear Collisions within the Random Matrix Theory. Universal Academy Press, Inc. Japan, 2009 (to be published).
17. *Vokál S., Orlova G. I., Lehocká S.* Azimuthal Structures of Produced particles in Heavy-Ion Interactions // Phys. At. Nucl. 2009. V. 72, No. 2. P. 237–242.
18. *Tokarev M., Zborovsky I.* New Properties of z -scaling: Flavor Independence and Saturation at Low z // Int. J. Mod. Phys. 2009. V. 24. P. 1417–1442.
19. *Быстрицкий В. М. и др.* Стационарный досмотровый комплекс ДВиН-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 6(155). С. 831.