



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

В 2013 г. основные усилия сотрудников ЛФВЭ были направлены на реализацию и дальнейшее развитие проекта NICA («Нуклотрон-NICA», MPD

и BM@N) и участие в совместных исследованиях, проводимых в ведущих ускорительных центрах мира.

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В РАЗВИТИИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Развитие ускорительного комплекса ЛФВЭ в 2013 г. было направлено на изготовление систем и элементов вновь создаваемых ускорительных установок комплекса NICA.

В 2013 г. проведено два сеанса нуклотрона общей продолжительностью 2000 ч. Намеченная программа физических исследований, на которую было выделено около 60 % пучкового времени, выполнена практически полностью. В ходе «ускорительных» смен сеансов выполнялись работы, направленные на расширение возможностей существующего ускорительного комплекса при проведении текущей программы физических исследований по тестированию оборудования и режимов работы вновь создаваемых установок комплекса NICA — бустера и коллайдера.

Проект «Нуклотрон-NICA»

Из наиболее заметных достижений, полученных в ходе сеансов, можно отметить следующие:

— введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов в нормальнопроводящую фазу магнитов нуклотрона [1];

— в ходе 48-го сеанса введен в опытную эксплуатацию новый источник легких ионов на основе современного твердотельного лазера Nd-YAG;

— продолжались работы по поэтапному повышению энергии ионов. В ходе 47-го сеанса был осуществлен вывод пучка дейтронов для экспериментов по программе физических исследований с энергией 4,8 ГэВ/нуклон. В 48-м сеансе эксперименты с ядрами углерода проводились при энергии 5,15 ГэВ/нуклон. В конце сеанса поле дипольных магнитов было поднято до максимальной величины — 2 Тл, что позволило ускорить углеродный пучок до энергии 5,7 ГэВ/нуклон;

— более чем на порядок снижены пульсации поля на «столе», продемонстрирована возможность получения коэффициента постоянного тока при медленном выводе порядка 90 %, а также самого медленного вывода при длительности растяжки до 20 с;

— введен в опытную эксплуатацию экспериментальный сегмент АСУ ускорительного комплекса NICA на основе программного комплекса Tango;

— проведено тестирование элементов ускоряющей системы и устройств диагностики, предназначенных для бустера комплекса NICA;

— в 47-м сеансе впервые в России реализовано стохастическое охлаждение продольной степени сво-

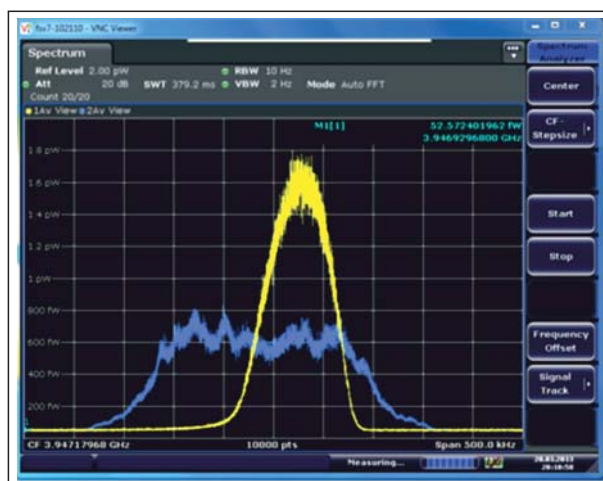


Рис. 1. Спектр продольного дробового шума пучка на 3048-й гармонике частоты обращения. Нижняя кривая (голубая) — сразу после инжекции, желтая кривая — после 8 мин охлаждения. Энергия дейтронов 3 ГэВ/нуклон, интенсивность пучка 10^9 частиц

боды распушенного пучка дейтронов методом гребчатого фильтра (рис. 1). В 48-м сеансе работы по охлаждению были продолжены на ядрах углерода — выполнено охлаждение как распушенного, так и сгруппированного пучков.

NICA

2013 г. был решающим с точки зрения создания комплекса. Успешно пройдена государственная экспертиза; впервые был объявлен международный тендер на строительство; начались работы по подготовке площадки под строительство коллайдера и зданий экспериментальных установок комплекса NICA.

В создании элементов новых ускорительных установок комплекса NICA были достигнуты следующие основные результаты.

- Начато тестирование нового источника поляризованных частиц.

- В апреле–марте 2013 г. был проведен первый сеанс на новом источнике многозарядных тяжелых ионов КРИОН-6Т, а с августа работы на источнике проводятся практически в непрерывном режиме. Продемонстрирована генерация пучков золота в зарядовом состоянии $30^+–32^+$, требуемом для инъекции в бустер, на уровне 50 % от проектной величины. Ведется подготовка источника для проведения сеанса с ускорением тяжелых ионов на нуклотроне.

- В 2013 г. фирмой «Bevatech» изготовлены и подготовлены к введению в эксплуатацию секции тяжелоионного линейного ускорителя NPLac. Начало поставки оборудования в ОИЯИ ожидается в мае 2014 г. Подготовлен проект реконструкции здания ЭГ-5, предназначенного для размещения NPLac, начаты ремонтные работы.

- Для размещения магнитооптической структуры, систем и оборудования бустера планируется капитальный ремонт здания № 1. Подготовлены исходные данные для технического задания, и объявлен тендер на разработку проекта ремонта.

- В ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера завершается изготовление ускоряющих станций бустера, проведена контрольная сборка, и начато тестирование. Для

тестирования станций в ОИЯИ отремонтировано помещение для экспериментального стенда.

- Активно проводились работы по подготовке к серийному производству магнитов бустера. Выполнен ремонт здания № 217, к которому проложены необходимые коммуникационные линии от криогенного комплекса ЛФВЭ.

- Создан участок по производству сверхпроводящих обмоток. Изготовлен в Словакии, доставлен в ОИЯИ и протестирован источник тока до 15 кА, предназначенный для тестирования магнитов. Изготовленный в Германии сателлитный рефрижератор, доставлен в ОИЯИ и подготовлен к вводу в эксплуатацию. Совместно с GSI разработана система измерения магнитных полей. Начало серийного производства магнитов бустера намечено на первую половину 2014 г.

ИЛС

Основные результаты, полученные группой ОИЯИ в 2013 г.

Тестовый стенд для создания Linac-200. Готовится физический запуск второй станции ускорителя электронов с энергией 50 МэВ. Ускоренный пучок электронов с энергией ~ 18 МэВ был проведен через ондулятор. Зафиксировано излучение инфракрасного диапазона с длиной волны ~ 14 мкм и мощностью ~ 30 мВт. Введена в эксплуатацию система диагностики энергии и фазовых характеристик электронного пучка ускорителя. Модернизирована система охлаждения и термостатирования первой станции ускорителя. Ведутся пусконаладочные работы прототипа лазера на свободных электронах (FEL).

Стенд для создания фотоинжектора ускорителя прямого действия (DC). Осуществлен физический запуск прототипа фотоинжектора линейного электронного ускорителя с «прозрачным» фотокатодом. Концепция такого фотоинжектора впервые предложена в ОИЯИ. При использовании пикосекундного лазера ($\tau_{\text{имп}} = 75$ пс, $E_{\text{имп}} = 1$ мДж) из «прозрачного» фотокатода в виде металлической сетки микронных размеров получен заряд 1,2 нКл ($I \sim 16$ А).

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

CMS

Основные усилия группы ОИЯИ в физической программе CMS были сосредоточены на изучении процессов с рождением пар мюонов и многоструйных событий для проверки предсказаний Стандартной модели (СМ) и поиске новой физики за ее пределами.

Был исследован спектр мюонных пар в широком интервале значений инвариантной массы, на осно-

вании полученных результатов определена асимметрия вылета мюонов «вперед-назад» и дифференциальное сечение рождения мюонных пар в процессе Дрелла–Яна в диапазоне инвариантных масс от 15 до 1500 ГэВ. Измеренные значения находятся в хорошем согласии с NNLO-предсказаниями СМ.

Комбинированный анализ рождения мюонных и электронных пар позволил исключить на 95 %-м уровне достоверности существование новых ней-

тральных калибровочных бозонов массой менее 2950 ГэВ расширенного калибровочного сектора с константами связи СМ (Z_{SSM}), а для калибровочной модели, обусловленной суперструнной теорией (Z_ψ), — массой менее 2600 ГэВ. Получены массовые ограничения для RS1-гравитона. Они составили 2390 ГэВ для константы связи $c = 0,10$ и 2030 ГэВ для $c = 0,05$.

На данных 2012 г. выполнен анализ многоструйных событий по поиску микроскопических квазиклассических и квантовых черных дыр на масштабе ТэВ. Полученные значения минимальной массы микроскопической черной дыры составляют от 4,7 до 6,3 ТэВ в зависимости от механизма образования и эволюции черной дыры для значений фундаментального многомерного планковского масштаба $M_D \leq 5$ ТэВ.

Продолжалось изучение свойств бозона Хиггса. В канале его распада на два нейтральных калибровочных бозона с их дальнейшим распадом на четыре лептона уточнена масса бозона Хиггса, которая составила $m_H = 125,8 \pm 0,5$ (стат.) $\pm 0,2$ (сист.) ГэВ. Значение массы, полученное в результате комбинированного анализа каналов распада на пару фотонов и четыре лептона, составило $m_H = 125,7 \pm 0,3$ (стат.) $\pm 0,3$ (сист.) ГэВ [2]. Анализ угловых распределений продуктов распада бозона Хиггса позво-

лил исключить практически все состояния со спином и четностью, не соответствующие бозону Хиггса СМ.

ALICE

Группа ОИЯИ, участвующая в эксперименте ALICE, вовлечена в анализ корреляций Бозе–Эйнштейна. В 2013 г. с установки ALICE набирались данные с триггером «minimum bias» ($6 \cdot 10^7$ соб.) в столкновениях p –Pb при 5,02 ТэВ. Получены первые результаты анализа фемтоскопических корреляций для пар заряженных каонов (рис. 2). Проведен дополнительный анализ чистоты селекции заряженных каонов в столкновениях Pb–Pb при энергии 2,76 ТэВ, и получены новые результаты для величины R_{inv} , а также по регистрации распада $\phi \rightarrow K^+ K^-$ [3].

ATLAS

Группа ЛФБЭ в эксперименте ATLAS принимает участие в работах по анализу данных, в том числе по поиску бозона Хиггса в совместном рождении с W -бозоном и последующем распаде на пару b -кварков, и в модернизации установки.

В 2013 г. продолжались работы по улучшению критериев отбора событий и выбору оптимального набора переменных для подавления вклада фоновых процессов. Полученные результаты представлялись на заседаниях рабочей группы. Совместно проведенный анализ с использованием многопараметри-

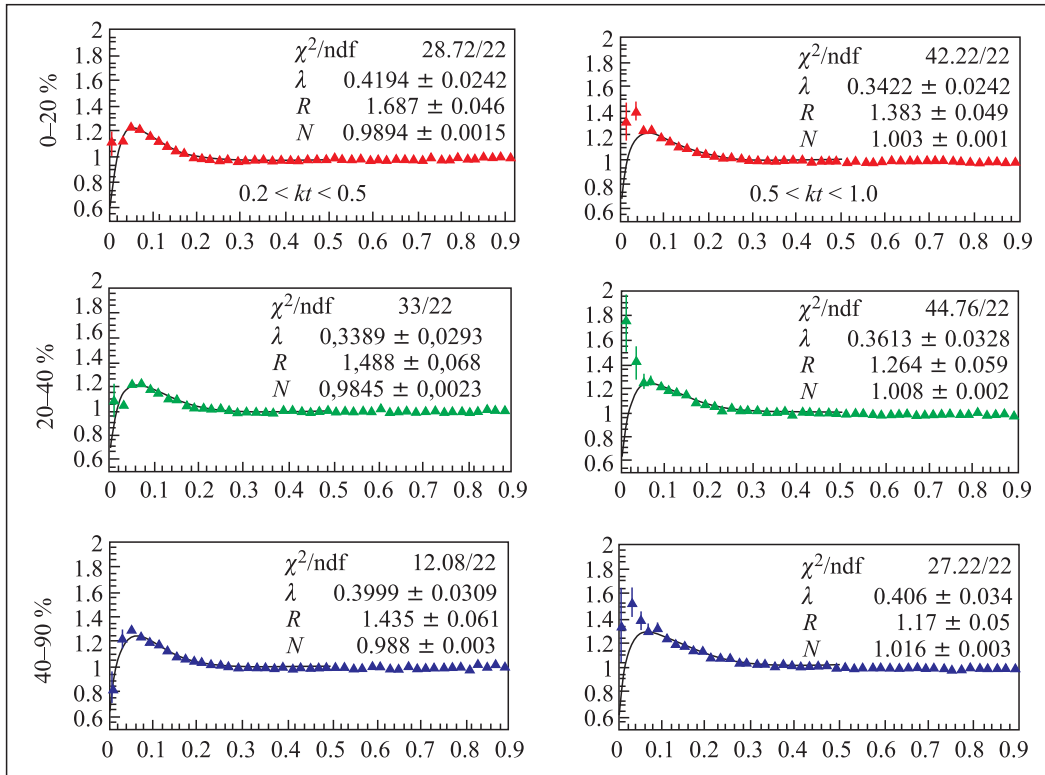


Рис. 2. Функции корреляции в зависимости от величины R_{inv} для пар заряженных каонов, полученные в столкновениях p –Pb при 5,02 ТэВ при различных поперечных импульсах пар и центральных событиях 0–20 %, 20–40 %, 40–90 %. Кривые являются результатом фитирования

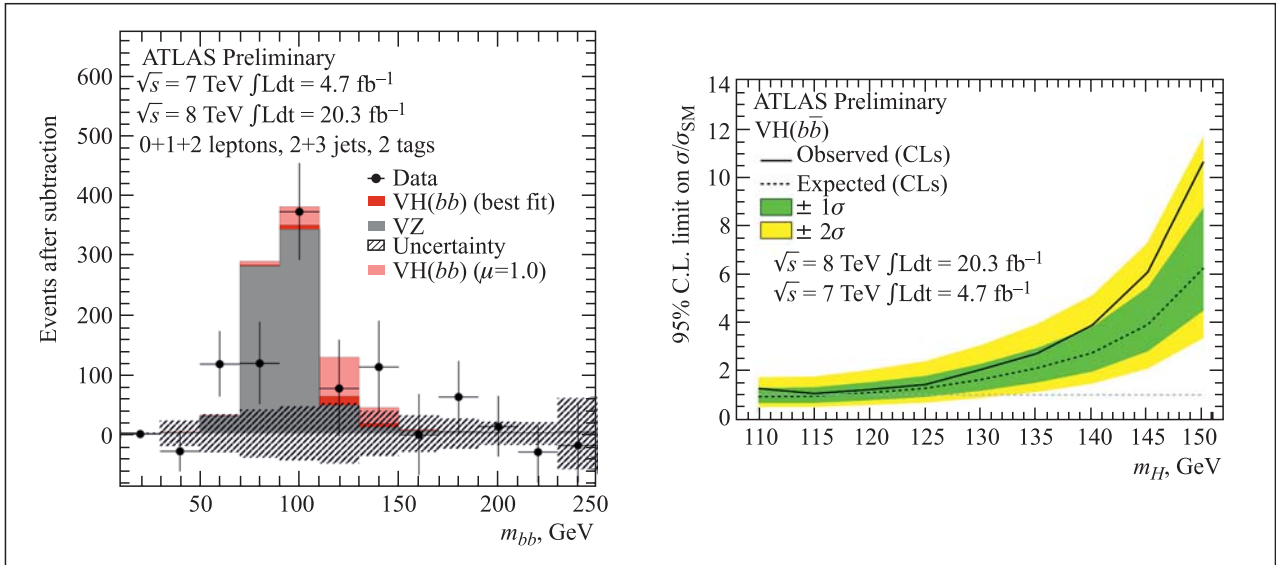


Рис. 3. Инвариантная масса двух b -струй (слева) и верхний предел на сечение совместного рождения бозона Хиггса с W - и Z -бозонами с 95 %-м уровнем достоверности (справа)

ческого обрезания экспериментальных данных на полной статистике не привел пока к обнаружению достоверного превышения сигнала над фоном, как это видно из распределения по инвариантной массе двух b -струй, показанного на рис. 3, где уже вычтен вклад всех фоновых процессов, кроме рождения дибозонов.

Верхний предел, полученный для величины сечения образования бозона Хиггса в этом процессе, в 1,4 раза превышает вычисленную в рамках в СМ. Данные результаты были представлены на международных конференциях и опубликованы в [4].

Проведено моделирование характеристик жидкоаргонового адронного торцевого калориметра (НЕС) ATLAS с учетом деградации электроники считывания калориметра при наборе полной интегральной светимости 3000 fb^{-1} . В качестве исходных параметров были использованы экспериментальные данные, полученные при радиационных испытаниях электроники в пучках протонов (Цюрих) и нейтронов (Дубна и Ржеж). Ухудшение коэффициента усиления предусилителя и искажение его линейности были параметризованы в зависимости от полученной радиационной нагрузки, которая зависит от положения электронной платы в криостате установки ATLAS. Было проведено полное моделирование Монте-Карло (GEANT-4) двухструйных событий с учетом и без учета ожидаемой деградации предусилителей.

Полученные результаты показывают, что радиационные повреждения предусилителей приводят к заметным искажениям калориметрической информации и для работы на HL-LHC требуется замена front-end электроники.

Эксперименты NA62 и NA48/2

Эксперимент NA62 посвящен изучению сверхредких распадов заряженных каонов на заряженный пион и два нейтрино. ОИЯИ, совместно с ЦЕРН, отвечает за НИОКР и изготовление трековых детекторов на основе строу-трубок, способных работать с высоким пространственным разрешением в вакууме, а также за разработку программного обеспечения для моделирования и реконструкции событий. Кроме того, группа ОИЯИ продолжает анализ данных экспериментов NA48/2 и специального набора данных NA62 2007–2008 гг.

Основные результаты, полученные в 2013 г.

1. Закончено производство строу-трубок в ЛФВЭ ОИЯИ. В общей сложности было изготовлено более 6500 таких трубок. Продолжается их проверка на избыточное давление. Около 15% строу-трубок полностью протестированы и доставлены в ЦЕРН.

2. Работы по сборке, тестированию и доставке в ЦЕРН модулей камер проводятся в соответствии с графиком.

3. Продолжаются испытания на космических лучах прототипа, состоящего из 64 строу-трубок. Измеряется пространственное разрешение, и изучается новая считывающая электроника. Продолжается анализ экспериментальных данных 2012 г., полученных на этом прототипе при его работе в вакууме.

Группа ОИЯИ продолжает участие в анализе данных эксперимента NA48/2.

При определяющем вкладе физиков ОИЯИ впервые экспериментально наблюдался новый канал распада $K^\pm \rightarrow p^0 p^\pm e^+ e^-$. Предварительные данные по измерению величины вероятности распада (branching ratio) совпадают с теоретическим предсказанием,

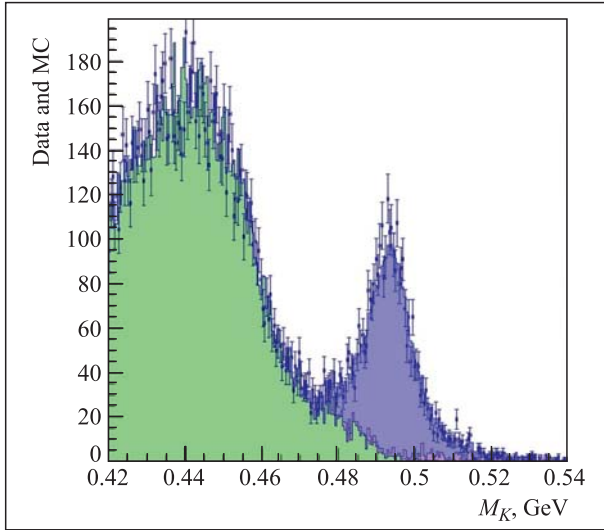


Рис. 4. Первое наблюдение распада каона на $\pi^0\pi^\pm e^+e^-$

полученным в рамках СМ. Анализ данных продолжается (рис. 4).

Измерена ширина, и изучены динамические свойства редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$. Набранная статистика является наибольшей в мире и составляет 149 кандидатов с фоном на уровне 10%. Вероятность распада во всей кинематической области, вычисленная в киральной пертурбативной теории, составляет $\text{Br} = (0,910 \pm 0,075) \cdot 10^{-6}$.

Серия работ экспериментов NA48/2 и NA62, посвященных высокоточной проверке лептонной универсальности в распадах заряженных каонов, номинирована на премию ОИЯИ 2013 г. На статистике 2007–2008 гг., равной 150 000 реконструированных распадов $K^\pm \rightarrow e^\pm \nu$ и фоне 11%, получена величина $R_K = \Gamma(K_{e2})/\Gamma(K_{\mu 2})$, составившая $R_K = (2,488 \pm 0,010) \cdot 10^{-5}$, что находится в согласии со СМ.

Высокоточные измерения параметров этих распадов позволяют как проводить проверку СМ и поиск новой физики, так и существенно улучшать пертурбативную киральную модель [5].

COMPASS

В 2013 г. группа ОИЯИ была занята подготовкой установки к измерениям процесса Дрелла–Яна, запланированным на 2014–2015 гг., и к изучению обобщенных партонных распределений (GPD), которые будут проводиться в 2016 г. Обязательства ОИЯИ в коллаборации состоят в создании основной части нового электромагнитного калориметра (ECAL0).

Группа ОИЯИ активно участвует в анализе данных. В 2013 г. COMPASS представил результаты по измерению величины поляризации глюонов в канале с рождением очарованных частиц [6] (рис. 5). Эти результаты были получены в рассеянии поляризованных мюонов с энергией 160 ГэВ на продольно поля-

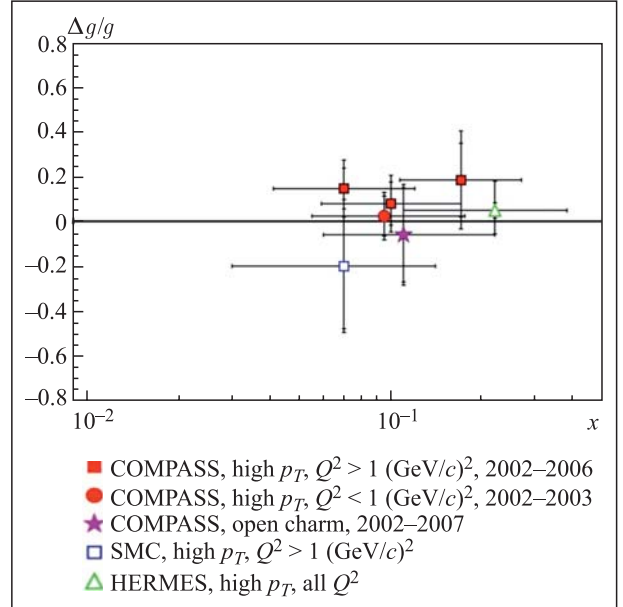


Рис. 5. Сводка измерений поляризации глюонов по каналу с рождением очарованных частиц (звездочка) и с рождением адронов с большими поперечными импульсами (все остальные точки)

ризованных протонной и дейтронной мишенях. Данные набирались в 2002–2007 гг.

В лидирующем порядке КХД вычислена средняя поляризация глюонов $\langle \Delta g/g \rangle_{\text{LO}} = -0,06 \pm 0,21$ (стат.) $\pm 0,08$ (сист.) при $\langle \mu^2 \rangle \sim 13$ ГэВ² и средней доле импульса, переносимого глюонами, $\langle x \rangle \sim 0,11$. Впервые поляризация глюонов была рассчитана в следующем за лидирующим порядке КХД $\langle \Delta g/g \rangle_{\text{NLO}} = -0,13 \pm 0,15$ (стат.) $\pm 0,15$ (сист.) на масштабе $\langle \mu^2 \rangle \sim 13$ ГэВ² и $\langle x \rangle \sim 0,20$.

При активном участии группы ОИЯИ был выполнен анализ данных по рождению Λ -, $\Sigma(1385)$ - и $\Xi(1321)$ -гиперонов в глубоконеупругом рассеянии (ГНР) мюонов на ⁶LiD-мишени. Измерены относительные выходы $\Xi(1385)^{+-}$, $\Sigma(1385)^{-}$, анти- $\Sigma(1385)^{-}$, анти- $\Sigma(1385)^{+-}$, $\Xi(1321)^{-}$ и анти- $\Xi(1321)^{+-}$ -гиперонов, распадающихся с рождением Λ (анти- Λ). Относительный выход тяжелых гиперонов и антигиперонов составил 3,8% и 5,6% при систематической неопределенности около 10%. Полученные результаты были использованы для настройки параметров генераторов программы моделирования LEPTO.

Была измерена множественность рождения заряженных адронов в ГНР на ⁶LiD-мишени в зависимости от переменных x_{Bj} , Q^2 , W^2 и переменных, характеризующих конечное состояние адрона, p_T и z .

STAR

Группа ОИЯИ в эксперименте STAR на RHIC активно участвовала в программе энергетического сканирования в столкновениях Au + Au при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 7,7, 11,5, 19,6, 27, 39$ ГэВ. Набранная статистика достаточна для поиска сигнатуры фазовых

переходов в ядерной материи и локализации критической точки. Была обнаружена зависимость R_{CP} , эллиптических потоков для мезонов, барионов и их античастиц, отношения выхода частиц в столкновениях Au + Au от поперечного момента и энергии столкновений [7].

Данные обработаны, получены предварительные результаты по спектрам заряженных адронов в Au + Au-столкновениях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 7,7, 11,5, 19,6, 27, 39$ ГэВ и больших поперечных импульсах.

Продолжается участие в поляризационной программе эксперимента STAR. Измерены двухспиновые асимметрии рождения струй и одиночные продольные и поперечные асимметрии, позволяющие извлекать спин-зависимые распределения кварков (валентных и морских) и глюонов. Ведется анализ данных.

Эксперимент NA61

Группа ОИЯИ, принимающая участие в эксперименте NA61/SHINE, занята систематическими исследованиями в широкой области ядро-ядерных реакций в столкновениях ядер Pb + Pb, а также в реакциях с ядрами среднего размера (Xe и Ar) и с легкими ядрами (Be). В период с декабря 2012 г. по март 2013 г. в NA61/SHINE осуществлялась регистрация данных в столкновениях Be + Be, завершающая сканирование по энергии, начатое в 2011 г. [8].

Получены первые предварительные результаты анализа столкновений ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$, а также оконча-

тельные и предварительные результаты анализа реакции $p + p$. Получены предварительные результаты по анализу реакций $p + p$ и $p + C$ (Long target) при 31 ГэВ/с, необходимые для нейтринного эксперимента T2K. Продолжается анализ данных по программе космических лучей.

Коллаборация NA49 занята исследованиями в широкой области реакций с участием адронов на ускорителе SPS в ЦЕРН. Основная цель эксперимента — изучение адронной материи при высоких температурах и больших плотностях для поиска начала деконфайнмента кварков и глюонов и предсказанной в QCD критической точки в сильно взаимодействующей материи.

Корреляционный анализ данных по рассеянию Si + Si при энергии пучка 158 ГэВ/нуклон указывает на превышение модельным параметром intermittency протона ϕ_2 величины, предсказываемой КХД для фазового перехода (рис. 6). Проверка данного результата требует дополнительного сканирования по энергии.

Эксперименты, проведенные во время сеансов нуклотрона в 2013 г.

В 47-м и 48-м сеансах нуклотрона около 60 % пучкового времени было использовано для проведения физических экспериментов и тестов детекторов на пучках. Ниже представлены наиболее интересные из полученных результатов.

«Фаза-3»

В рамках эксперимента проведено измерение полной временной шкалы многотельного развала ядер: он происходит через 120 фм/с после соударения пучка дейтронов с мишенью Au. Таким образом, впервые измерено время расширения горячего ядра [9].

Проект «Энергия и трансмутация». В 2012–2013 гг. на установке «Квинта», содержащей 512 кг природного урана, изучались спектральные характеристики нейтронов, генерируемых дейтронным пучком.

Для измерения спектральных зависимостей нейтронов использовались полупроводниковые пробойные детекторы с пороговыми конвертерами в диапазоне энергий падающих дейтронов 1–8 ГэВ.

Были получены зависимости поведения высокоэнергетической части спектра ($E_n > 20$ МэВ) от энергии налетающих дейтронов. Эксперименты показали, что:

- в подкритической установке с массой урана 512 кг и радиусом 12 см процесс деления развивается эффективно; полученное значение коэффициента усиления составило 2,5 и является постоянным в широком диапазоне энергии 1–8 ГэВ (рис. 7);
- полная утечка нейтронов с энергией $E_n > 20$ МэВ составила 80 %;

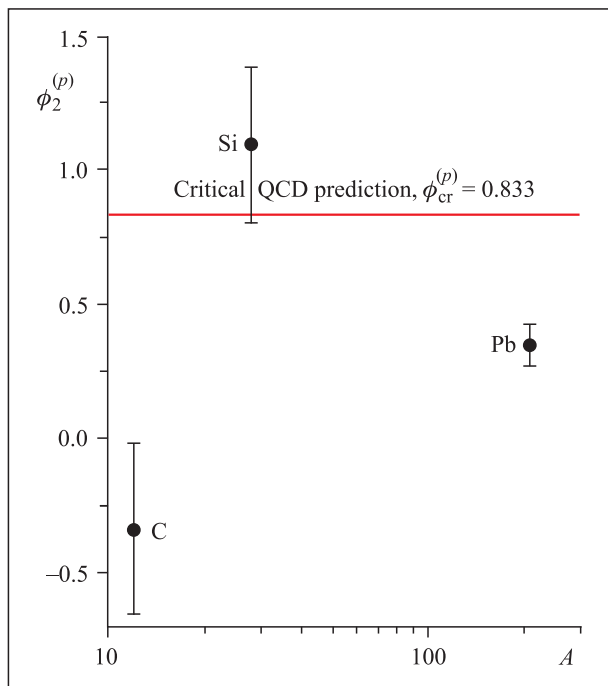


Рис. 6. Полученные данные по рассеянию Si + Si при энергии 158 ГэВ/нуклон указывают на превышение параметром intermittency протона ϕ_2 величины, предсказываемой КХД

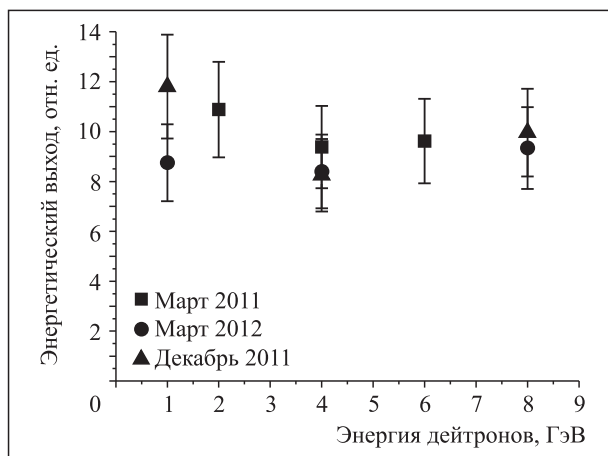


Рис. 7. Коэффициент усиления мощности в зависимости от энергии в единицах деления на 1 дейтрон и на 1 ГэВ (сеансы 2011–2013 гг.)

- с увеличением энергии дейтронов доля утечки быстрых нейтронов с энергией $E_n > 20$ МэВ также возрастает на величину от 6 до 12 %.

Были изучены скорость трансмутации радиоактивных изотопов ^{237}Np и ее зависимость от энергии налетающих частиц. Продемонстрировано увеличение скорости реакции с ростом энергии дейтронов. Этот результат указывает на то, что с увеличением энергии частиц эффективность трансмутации растет.

Проект DSS. В эксперименте DSS, проводимом на внутренней мишени нуклотрона, осуществлялся набор данных по угловой зависимости поперечного сечения упругого дейтрон-протонного рассеяния при энергии дейтронов 1300, 1500 и 2000 МэВ.

Были получены новые экспериментальные данные по реакции фрагментации дейтронов с регистрацией двух протонов для различных кинематических конфигураций при исходных энергиях дейтронов 300, 400 и 500 МэВ. Предварительные результаты были представлены на международных конференциях HS2013 и EFB22.

Данные по тензору анализирующих мощностей A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} для реакции $dd \rightarrow tp$ были получены при дейтронной энергии 200 МэВ [10].

Эксперименты, находящиеся в стадии подготовки

Проект VM@N. Проект VM@N — это эксперимент с фиксированной мишенью, являющийся первой стадией проекта NICA. В 2013 г. для подготовки проекта VM@N:

- очищена экспериментальная зона, определены ее границы, подготовлена «control room». Дипольный магнит установлен на номинальную позицию и испытан при 80 % от рабочего тока;
- начаты работы по исследованию и проектированию теплых резистивных камер для времяпролет-

ной системы детектора VM@N. Для области высоких загрузок (~ 4 кГп/см²) предлагается использовать 12-зазорные «теплые» камеры с внутренним стеклом толщиной 0,5 мм, газовым зазором 220 мкм и 32 стрипами размером 10×160 мм. Ожидается временное разрешение в ~ 65 пс и эффективность > 94 %. Рабочая температура — 45 °С. Для области низких загрузок предлагается использовать 10-зазорные камеры с внутренним стеклом толщиной 0,7 мм, газовым зазором 300 мкм и 16 стрипами размером 18×580 мм, количество камер — 36. Эти камеры будут иметь временное разрешение < 60 пс и эффективность ~ 98 % и смогут работать при комнатной температуре. Исследуется возможность использования резистивных камер, изготовленных из малорезистивного стекла, для диапазона высоких загрузок;

- предложен и сейчас находится на стадии рассмотрения вариант внутреннего детектора на базе GEM-технологии. В ходе предварительного моделирования такого детектора продемонстрирована его способность восстанавливать гипероны. Прототип трехслойного GEM-детектора размером 10×10 см (структура: X-, Y-стрипы 250×250 шт. с шагом 400 мкм) был изготовлен в мастерских ЦЕРН и будет протестирован во время следующего сеанса нуклотрона;

- прототип модуля «Zero degree calorimeter» успешно прошел тесты на пучке и космических лучах с различными фотоумножителями и высоковольтными делителями. Подготовлен технический проект опоры калориметра. Его изготовит НКМЗ (Краматорск, Украина). 50 % стоимости заказа (65 тыс. долл.) перечислено в декабре 2013 г. Срок доставки — октябрь 2014 г.;

- начаты работы по запуску элементов внешнего трекера;

- в октябре 2013 г. три корпуса для сцинтилляционного оптоволоконного годоскопа размером 12×12 см доставлены из г. Дечин (Чехия). Два детектора находятся в стадии подготовки;

- два черенковских детектора изготовлены и подготовлены к испытаниям.

Прогресс с подсистемами MPD

За последнее время был достигнут существенный прогресс в создании времяпроекционной камеры (TPC), изготовлении модулей электромагнитного калориметра ECAL, завершении НИОКР по времяпролетной системе (TOF) и подготовке технического проекта TOF.

Была проведена большая работа по подготовке технического проекта MPD, обсуждавшейся на последнем совещании консультативного комитета по MPD. Технический проект TOF-системы детектора MPD будет представлен в июне 2014 г.

Следующие результаты были достигнуты в развитии подсистем детектора.

Магнит MPD. ОИЯИ и ООО «НПП Невамагнит» (Санкт-Петербург) завершена подготовка технического проекта соленоида MPD. Техническая документация успешно прошла международную экспертизу, возглавляемую Т.Тейлором (ЦЕРН), который отметил высокий профессионализм и превосходное качество исполнения. Следующая стадия, запланированная на 2014 г., — объявление тендера и начало производства.

TPC. В 2013 г. было завершено проектирование, создание и тестирование прототипов элементов TPC (камер электроники считывания, front-end электроники, лазера, газовой системы, системы охлаждения). Начато изготовление камер электроники считывания и элементов TPC.

ECAL. В 2013 г. ОИЯИ и Институт сцинтилляционных материалов (Харьков, Украина) создали производственную линию для изготовления модулей калориметра. Была проверена технология производства трапециевидного модуля ECAL. Разработана процедура сертификации световодов MAPD. Организовано производство элементов фотодетектора. Была изучена возможность массового производства модулей ECAL. Проведены первые испытания работы ECAL с помощью пучков частиц и космических лучей.

Во время тестов в декабре была исследована работа двух модулей ECAL с разными световодами; протестирована считывающая электроника ECAL (усилители и ADC); проведено энергетическое сканирование на пучке электронов ($E_e = 1,6$ ГэВ).

TOF. Основные результаты, достигнутые в 2013 г.:

- оптимизирована геометрия системы TOF и ее модуля;
- модернизирован тестовый пучковый канал ну-клотрона;

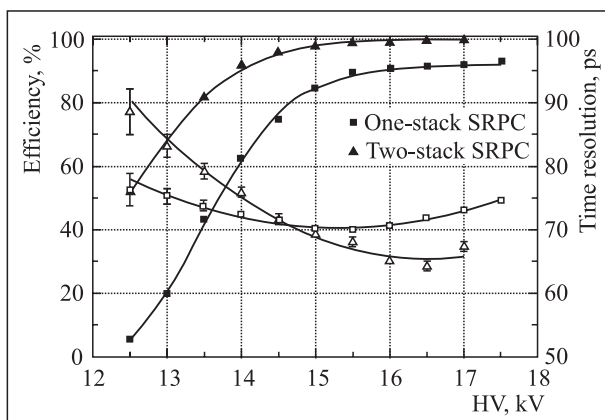


Рис. 8. Временное разрешение (\square , \triangle) и эффективность (\blacksquare , \blacktriangle) многослойной резистивной пропорциональной камеры (SRPC) TOF-детектора MPD со стриповым считыванием. Результаты тестов на ну-клотроне 2013 г.

- изучены характеристики камер — эффективность, быстродействие, временное разрешение (рис. 8);

- подготовлен технический проект TOF;
- полностью оборудованы аппаратурой для тестовых измерений и анализа данных экспериментальная зона и «control room».

Строу-трубки. В 2013 г. были выполнены следующие работы:

- закончены разработка и производство внешнего кольца прототипа строу-колеса;
- проведена разработка, и начато производство двух гибких 24-канальных материнских плат (MB);
- выполнена сборка фрагмента внешнего газового коллектора для одной MB;
- проведено изучение линейности строу-трубок длиной 60 см.

FFD. Основные результаты, достигнутые в 2013 г.

- Закуплен полный комплект ФЭУ фирмы «Photonis» для модулей FFD.
- Разработана механическая конструкция модулей FFD.
- В соответствии с договором, заключенным с Радиевым институтом (Санкт-Петербург), созданы и испытаны модули с электроникой.
- Изготовлен полный комплект кварцевых радиаторов для модулей детектора.
- Спроектирована система временной калибровки каналов FFD с помощью пикосекундного лазера, и закуплены основные ее элементы.
- Разработаны, изготовлены и испытаны прототипы системы низковольтного питания и приема LVDS-сигналов с электроники модулей детектора.
- Совместно с группой TOF-детектора проведено исследование характеристик изготовленных FFD-модулей на пучке дейтронов ну-клотрона (сеансы в марте и декабре 2013 г.).

Группа моделирования для MPD

В 2013 г. выполнен большой объем работ по моделированию подсистем MPD и различных реакций. Было существенно модернизировано программное обеспечение, в частности: подготовлена и внесена реалистичная карта магнитного поля установки; развернута система распределенного хранения и обработки данных на компьютерных кластерах ЛФВЭ и ЛИТ; разработан, протестирован и включен в математическое обеспечение новый алгоритм поиска кластеров на пэдовой плоскости TPC.

Инновации

Исследования и разработки с использованием трубок строу. Детекторы на базе тонкостенных дрейфовых трубок обладают рядом преимуществ:

они прозрачны с точки зрения количества материала по пучку, имеют хорошие пространственно-временные характеристики и относительно низкую цену. Один из их недостатков — это не слишком высокое пространственное разрешение в сравнении с micropattern газовыми детекторами (σ таких детекторов выше 100 мкм).

В 2013 г. были проведены НИОКР, которые показали, что для газовой смеси ArCO_2 (80/20) при давлении в диапазоне $\sim 3\text{--}4$ бар возможна работа строу в переходном режиме — от режима ограниченной пропорциональности (насыщения) к сильно-токовому режиму. В ходе исследований было показано, что пространственное разрешение строу в таком режиме работы детектора может быть улучшено вплоть до ~ 40 мкм [11].

Для изучения возможности длительной работы строу в переходном режиме был проведен тест на радиационную стойкость на рентгеновском стенде.

После ~ 2600 ч облучения средний заряд на 1 см длины строу составил 4,2 Кл. Ухудшения энергетического разрешения не наблюдалось.

Таким образом, изучение переходного режима от низкотокowego к сильно-токовому режиму для строу с газовым наполнением ArCO_2 при давлении от 3 бар показало возможность высокоточной регистрации заряженных частиц. Также было продемонстрировано, что переходный режим стабилен и не переходит в стримерный режим в испытуемом диапазоне давления; анод толщиной 30 мкм и менее имеет высокую радиационную стойкость.

Двухфазный и трехфазный бессепарационные расходомеры для нефтедобычи. В ЛФВЭ на принципе работы двухфазных криогенных расходомеров был создан двухфазный расходомер для нефтедобычи типа «нефть–пластовая вода». Он представляет собой комбинацию гамма-плотномера (ГП) на базе Cs^{137} -источника и сужающего устройства. Этот расходомер был испытан на полигоне «нефть–газ–соленая вода» фирмы TUV SUD NEL (Глазго, Шотландия). Результаты испытаний показали [12], что такой расходомер удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 8.615-2005 по определению объемных и массовых расходов сырой нефти в диапазоне обводненностей $0 < w < 95\%$. Такие измерительные устройства в РФ не производятся.

Полученный опыт позволил создать трехфазный четырехкомпонентный бессепарационный расходомер для смесей «нефть–газ–пластовая вода». Он представляет собой объединение спектрометрического гамма-плотномера и комбинированного сужающего устройства. Характеристики этого трехфазного расходомера, в котором устранены недостатки, свойственные корреляционным расходомерам, исследованы на Государственном эталоне единицы массового расхода газообразных смесей ГЭТ-195-2011 (ВНИИР, Казань) в ноябре 2013 г. Предварительный анализ результатов подтвердил работоспособность расходомера, однозначность его характеристик и их воспроизводимость во всех диапазонах заданных параметров газообразных смесей «имитатор нефти–вода», «имитатор нефти–газ» и «вода–газ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov E. V. et al. The Quench Detection System for Superconducting Elements of Nuclotron Acceleration Complex // Phys. Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 4(181). P. 603–612.
2. Chatrchayn S. et al. (CMS Collab.). Combination of Standard Model Higgs Boson Searches and Measurements of the Properties of the New Boson with a Mass Near 125 GeV. CMS-PAS-HIG-13-005. Geneva: CERN, 2013.
3. Abelev B. et al. Two and Three-Pion Quantum Statistics Correlations in Pb–Pb Collisions at 2.76 TeV at the LHC. arXiv: 1310.7808. 2013.
4. ATLAS Collab. Search for the bb Decay of the Standard Model Higgs Boson in Associated $(W/Z)H$ Production with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2013-079. 2013.
5. Batley J. R. et al. (NA48/1 Collab.). A New Measurement of the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$ Decay at the NA48/2 Experiment. CERN-PH-EP-2013-197. 2013.
6. COMPASS Collab. // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. P. 052018.
7. Adamczyk L. et al. (STAR Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 142301.
8. Anticic T. et al. (NA49 Collab.) // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 024902;
9. Baatar B. et al. (NA48 Collab.) // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2364.
10. Karnaukhov V. A. (FAZA-3 Collab.). Properties of Hot Nuclei Produced in Collisions of Light Relativistic Ions with Heavy Targets // Phys. At. Nucl. 2014. V. 77, No. 12. P. 129 (in press).
11. Kurilkin A. K. et al. Angular Distributions of the Vector A_y and Tensor A_{yy}, A_{xx}, A_{xz} Analyzing Powers in the $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$ Reaction at 200 MeV // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 051001(R).
12. Davkov V. I. et al. Spatial Resolution of Thin-Walled High-Pressure Drift Tubes // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 634. P. 5.
13. Какорин И. Д., Филиппов Ю. П. Двухфазный расходомер на базе сужающего устройства и гамма-плотномера для смесей нефти и пластовой воды // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 33–38.