

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

В 2005 г. научная программа исследований Лаборатории высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина (ЛВЭ), как и в предыдущие годы, была сконцентрирована на изучении взаимодействия релятивистских ядер в области энергий от нескольких сотен МэВ до нескольких ТэВ/нуклон с целью обнаружения кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, поиска асимптотических закономерностей ядерной материи в соударениях высокой энергии, а также на изучении спиновой структуры легчайших ядер [1–4]. Эти исследования проводились на различных пучках, полученных на ускорительном комплексе ЛВЭ, а также на ускорителях ЦЕРН, Брукхейвенской национальной лаборатории, GSI и других научных центров. В настоящее время на ускорительном комплексе нуклотрон Лаборатории высоких энергий можно проводить в широком диапазоне исследования в области энергий несколько ГэВ/нуклон, при которых имеет место переход от влияния нуклонной структуры ядра к асимптотическому поведению в ядерных взаимодействиях. Программа исследований, в частности, предусматривает: получение новой информации о свойствах процессов множественного рождения частиц в столкновениях различных ядер; изучение свойств сильновзаимодействующей материи при экстремальной плотности энергии и в переходной области от адронной материи к кварк-глюонной плазме.

Лаборатория имеет широкое международное сотрудничество с ЦЕРН, научными центрами стран-участниц ОИЯИ, а также со многими физическими центрами России, США, Германии, Франции, Японии и других стран.

В Лаборатории высоких энергий в 2005 г. были получены новые результаты в разработке и испытании сверхпроводящих магнитов и кабелей, предназначенных для SIS100 на GSI, а также для будущего бустера нуклотрона. Полученные данные

также могут быть полезными для будущего коллайдера LHC.

Суммарное время работы нуклотрона в 2005 г. составило 2008 ч.

Коллаборация «Дельта–Сигма»

В рамках научной программы исследований проекта «Дельта–Сигма» были получены предварительные результаты по измерению энергетической зависимости отношения $R_{dp} = d\sigma/d\Omega(nd)/d\sigma/d\Omega(np)$ дифференциального сечения квазиупругой np -перезарядки в лабораторной системе координат на связанном в дейтроне протоне и дифференциального сечения упругой np -перезарядки на свободном протоне.

Предварительные результаты измерений представлены на рис. 1. Полученные результаты были доложены на международном рабочем совещании [5].

Экспериментальные данные получены с помощью установки «Дельта–Сигма» на пучке нейтронов, получаемых при развале ускоренных на нуклотроне релятивистских дейтронов высокой интенсивности.

Наблюдаемая R_{dp} , измеряемая при взаимодействии пучка неполяризованных нейтронов с криогенными H₂- и D₂-мишенями, в рамках определенного теоретического подхода может быть связана со спинзависимыми np -амплитудами, и комплект R_{dp} -данных позволит избежать неоднозначности при восстановлении этих амплитуд. Самая простая зависимость R_{dp} от np -амплитуд получается в импульсном приближении. Однако, как видно из рис. 1, формализм импульсного приближения, использованный для выражения R_{dp} через известные из фазового анализа np -амплитуды (сплошная линия и кружки рядом с ней), в данном случае неприемлем. Сейчас в коллаборации проводится анализ данных в рамках другой теоретической модели.

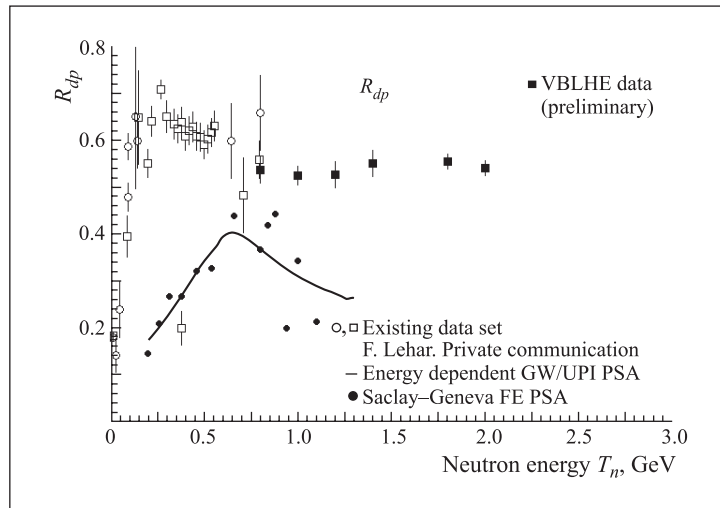


Рис. 1. Энергетическая зависимость отношения R_{dp} для процесса упругой $np \rightarrow pn$ перезарядки под углом 0° в лабораторной системе координат

В декабрьском 2005 г. сеансе нуклотрона с помощью установки «Дельта-Сигма» набрана достаточная статистика для определения величины R_{dp} при энергиях нейтронного пучка 0,8, 1,4 и 1,7 ГэВ. Ведется обработка и анализ накопленной информации.

Программой проекта «Дельта-Сигма» предусматривается получение в области энергий 1–4 ГэВ набора данных по поляризационным np -наблюдаемым (разностей полных np -сечений с параллельными и антипараллельными направлениями спинов взаимодействующих частиц для продольной (L) и поперечной (T) ориентаций спинов $\Delta\sigma_{L,T}(np)$ и коэффициентов спиновых корреляций $A_{00kk}(np)$ и $A_{00nn}(np)$), достаточного для прямого восстановления реальных и мнимых частей спинзависимых амплитуд упругого np -рассеяния вперед. Первый набор данных по энергозависимости поляризационной np -наблюдаемой $\Delta\sigma_L(np)$ получен ранее с использованием продольно-поляризованного пучка нейтронов от синхрофазотрона ЛВЭ и большой поляризованной протонной мишени. Продолжение измерений с поляризованной мишенью ожидается на пучках поляризованных нейтронов от нуклотрона, при введении в строй нового сильноточного источника поляризованных дейтронов.

Коллаборация LNS-pHe3

Первые эксперименты при энергии налетающего дейтрона до 270 МэВ были проведены в RIKEN (Япония) под руководством В. П. Ладыгина от ЛВЭ. Результаты этого эксперимента по измерению поляризационных характеристик реакции $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ были опубликованы в 2005 г. [6].

Измерения были проведены с высокой точностью, и они очень важны для построения теории трехнуклонных сил (рис. 2).

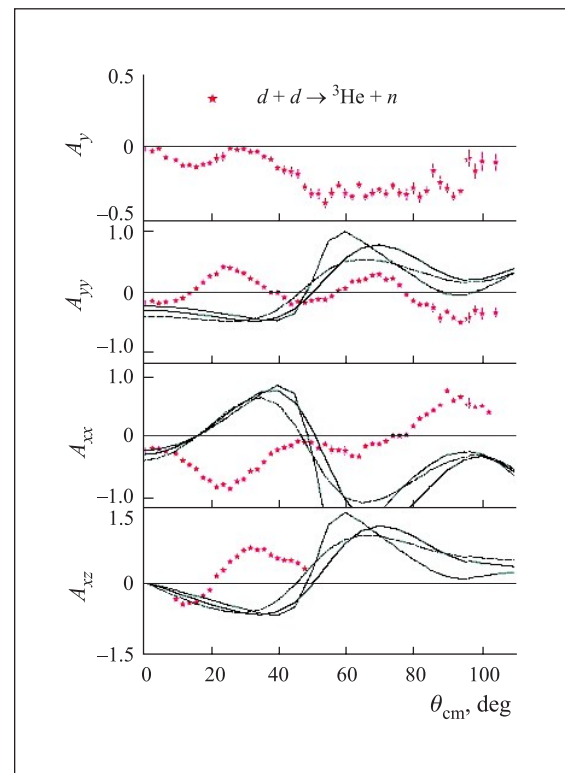


Рис. 2. Угловые зависимости анализирующей способности пучка дейтронов в реакции $(d, {}^3\text{He})n$ при энергии 270 МэВ

Летом 2005 г. на пучке ускоренных поляризованных дейтронов нуклотрона был проведен длительный сеанс. В этом сеансе были проведены методические облучения новой модификации установки LNS на внутреннем пучке нуклотрона и начат набор первых экспериментальных данных. На рис. 3 приведена схема установки.

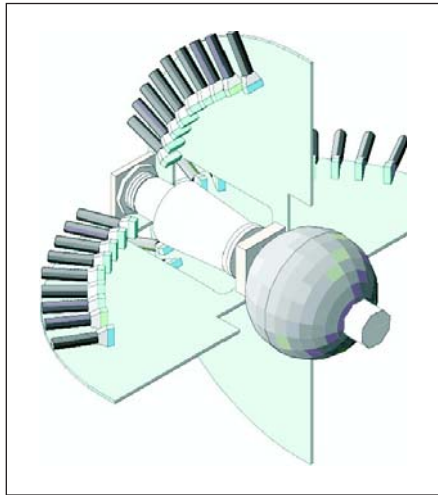


Рис. 3. Новая модификация установки на внутреннем пучке нуклотрона. Используются 36 сцинтилляционных счетчиков, расположенных в четырех плоскостях

Экспериментальные данные по угловой зависимости упругого рассеяния dp получены при энергии дейтронов 270, 880 и 2000 МэВ. Данные при 270 МэВ были отобраны для сравнения с данными RIKEN, полученными ранее при той же энергии в Японии. Результаты сравнения представлены на рис. 4. Видно, что результаты Дубны и RIKEN находятся в хорошем согласии.

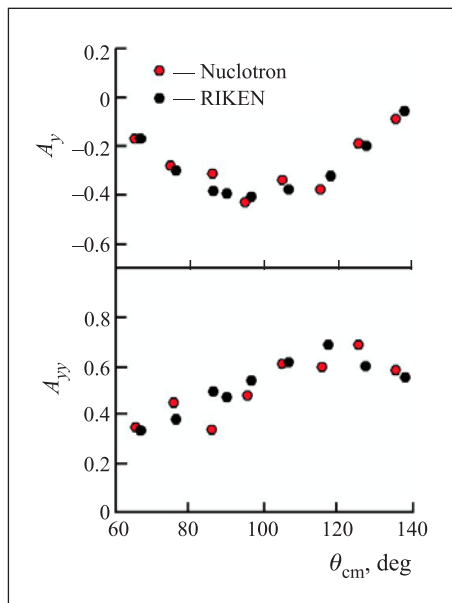


Рис. 4. Упругое рассеяние dp в области эффекта «расхождение Сагары» (Sagara discrepancy effect) при энергии пучка дейтронов 270 МэВ (предварительные данные)

Получены также предварительные результаты обработки данных при энергии пучка дейтронов 880 МэВ. В настоящее время идет обработка данных при 2 ГэВ. Результаты при энергии 880 МэВ представлены на рис. 5.

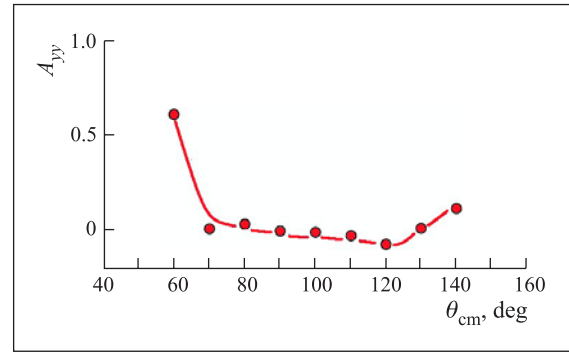


Рис. 5. Упругое рассеяние dp в области эффекта «расхождение Сагары» при энергии пучка дейтронов 880 МэВ (предварительные данные)

В настоящее время на нуклотроне измерена поляризация внутреннего и внешнего пучков (рис. 6). Видно, что эти измерения находятся в хорошем согласии.

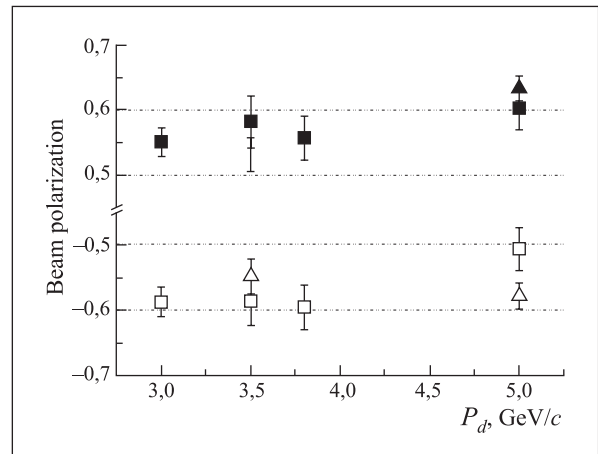


Рис. 6. Поляризация пучка дейтронов, измеренная с помощью внутреннего (квадраты) и внешнего (ALPOM) (треугольники) поляриметров

Ряд других результатов, полученных по программе поляризационных экспериментов, приведен в опубликованных работах [7–10].

Коллаборация BECQUEREL

Периферические столкновения ядер, протекающие при начальной энергии свыше 1 А · ГэВ, составляют особый тип ядерных взаимодействий, в которых развал первичных ядер инициируется электромагнитным и дифракционным взаимодействиями, а также соударениями нуклонов при малом перекрытии плотностей этих ядер. Ядерные эмульсии, облученные в пучках релятивистских ядер, позволяют получить информацию о заряженных продуктах таких столкновений, которая уникальна по детальности наблюдения треков частиц и точности их пространственной метрологии. Степень диссоциации ядра может достигать его полного разрушения на отдельные

нуклоны и легчайшие ядра, т.е. ядра ${}^2,3\text{H}$ и ${}^3,4\text{He}$. Относительная интенсивность их образования позволяет выявить значимость различных кластерных степеней свободы. Метрология таких событий весьма трудоемка и требует высокой квалификации. Тем не менее такие события имеют несомненный научный интерес, и поэтому их накопление продолжается сотрудничеством BECQUEREL. Детальное изучение ансамблей ядерных фрагментов позволяет приступить к поиску сложных квазистационарных состояний фрагментов. В ядерном масштабе расстояний и возбуждений они могут иметь свойства, которые делают их аналогичными разреженным квантовым газам атомной физики при ультрахолодных температурах. Доказательство существования таких систем может иметь важные применения в вопросах ядерной астрофизики. В этом отношении струи фрагментов являются микроскопической моделью звездных сред.

Зарядовая топология релятивистской фрагментации ядер N, O, Ne, Mg и Si при периферических взаимодействиях описана в работе [11]. Особенность нарастания возбуждения в этой группе ядер состоит в росте множественности ядер He и H при уменьшении заряда единственного фрагмента с $Z > 3$. В легких ядрах канал парного расщепления практически подавлен. Распад возбужденных состояний в изотопах Be, B и C имеет отчетливо выраженный кластерный характер. При преодолении массовых порогов реакции их диссоциация происходит через образование нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$ в основном и возбужденных состояниях. Среди каналов реакции доминируют трехчастичные распады на ядра He и H. Фрагменты с $Z > 3$ значительной роли не играют. Как важное приложение этот вывод влияет на вопросы физики космических лучей, связанные с распространенностью элементов в области Li–Be «щели». В настоящее время не находят решения фундаментальная проблема усиленной распространенности элементов Li, Be и B в космических лучах галактического происхождения по сравнению с их распространенностью в веществе Солнечной системы. Представленная картина указывает на то, что главная цепочка последовательных расщеплений ядер при распространении ядер в межзвездном газе H и He обходит образование этих ядер Li, Be и B. Это обстоятельство только усиливает интерес к по-

иску источников происхождения указанной группы ядер, в особенности изотопов ${}^{6,7}\text{Li}$.

На фотографии (рис. 7) представлено событие трехчастичного развала ядра ${}^{10}\text{B}$ в реакции перезарядки без рождения заряженного мезона. Его зарядовая топология может быть однозначно интерпретирована как ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2{}^3\text{He} + {}^4\text{He}$. Из-за более глубокой перегруппировки нуклонов, ведущей к формированию кластера ${}^3\text{He}$, в этом событии должен был быть преодолен существенно более высокий порог в 18 МэВ. Таким образом, происходит заселение сильновозбужденного состояния в зеркально-симметричном ядре ${}^{10}\text{C}$. Это событие указывает на возможность протекания в звездных средах, состоящих из смеси изотопов ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, обратного процесса $2{}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{10}\text{C}$, аналогичного 3α -процессу $3{}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$. Процесс слияния $2{}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ ведет к большему энергетическому выходу, а его следом в мире стабильных ядер становится образование ядра ${}^{10}\text{B}$ как конечного продукта.

Изучение диссоциации ядра ${}^9\text{Be}$ на две α -частицы позволяет восстановить их резонансные состояния без комбинаторного фона. Благодаря низкому энергетическому порогу этот процесс доминирует над каналом ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} + 2n$, который схож по виду треков. Отделение нейтрона от ядра ${}^9\text{Be}$ может вести к образованию нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$ с распадом через основное состояние 0^+ , а также первое и второе возбужденные состояния. По наблюдаемости этих состояний в спектре возбуждений Q , т.е. инвариантной массы пары релятивистских α -частиц за вычетом их масс, может быть проверена обоснованность оценки энергии возбуждения на основе только угловых измерений.

На нуклотроне эмульсии были облучены во вторичном пучке ядер ${}^9\text{Be}$ с энергией $1,2 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}$, сформированном на основе реакции фрагментации ядер ${}^{10}\text{B}$. К настоящему времени в облученном материале были найдены 160 звезд с парой релятивистских ядер He. Направления их треков находятся в пределах переднего углового конуса с раствором примерно 3° . Для 70 событий уже выполнены измерения углов вылета, что позволяет представить спектр их энергий возбуждения Q (рис. 8). Первый пик распределения на рисунке отвечает распаду ядра ${}^8\text{Be}$ из основного состояния 0^+ . Эта часть спектра представлена в десятикратно увеличенном масштабе на вставке рис. 8.

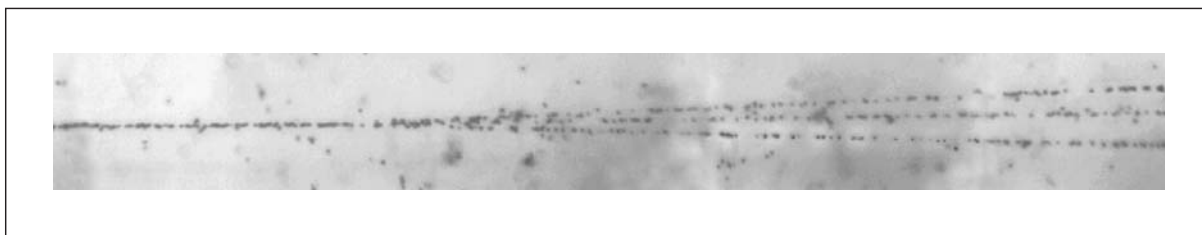


Рис. 7. Реконструированный образ диссоциации ядра ${}^{10}\text{B}$ с энергией $1 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}$ на три ядра He в эмульсии («белая» звезда)

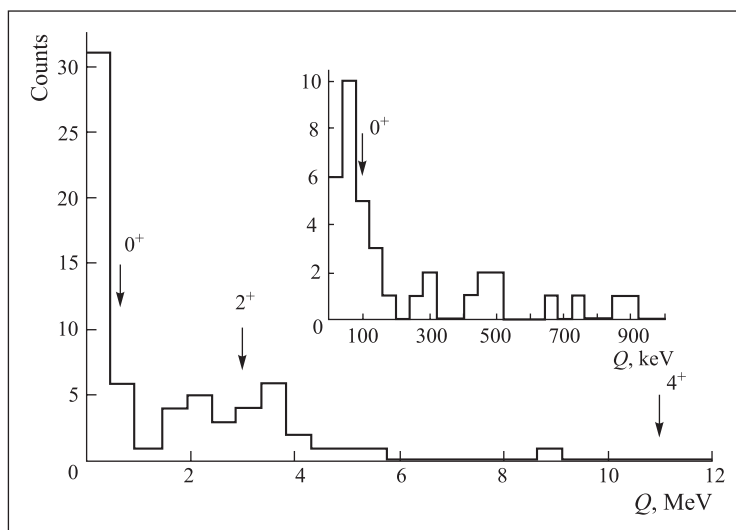


Рис. 8. Распределение пар α -частиц по переменной $Q_{2\alpha}$ для моды фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha + X$. На вставке: часть распределения, увеличенная между 0–1000 кэВ

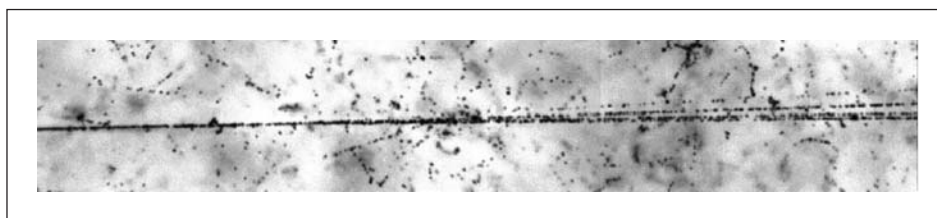


Рис. 9. Реконструированный образ диссоциации ядра ${}^{14}\text{N}$ с энергией 2,1 А·ГэВ на ядро Н и три ядра He в эмульсии («белая» звезда)

На ней видно хорошее совпадение центра распределения с энергией распада основного состояния ${}^8\text{Be}$. Ширина пика позволяет определить разрешение метода в этой области спектра — около 30 кэВ. Положение центра и форма второго пика не противоречат значениям энергии и ширины уровня 2^+ . Таким образом, в системе из двух релятивистских α -частиц находят отражение два известных резонанса.

Можно сравнить эти возбуждения с возбуждением более сложных систем α -частиц. Сравнение будет выполнено для событий типа «белая» звезда, т. е. не содержащих фрагментов ядра мишени и рожденных мезонов. В таких событиях происходит наиболее «деликатное» возбуждение фрагментирующего ядра. Возбуждение системы определяет средние значения поперечных импульсов α -частиц. Получены средние значения поперечных импульсов α -частиц для ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha(P_t^*) \approx 103$, для ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha(P_t^*) \approx 121$ и ${}^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha(P_t^*) \approx 200$ МэВ/с. По этим величинам четко просматривается тенденция нарастания среднего импульса α -частиц с ростом их множественности, а значит, и суммарного кулоновского взаимодействия возникающих α -кластеров.

Эмульсионным сотрудничеством накапливается статистика взаимодействий ядер ${}^{14}\text{N}$ с энергией

2,1 А·ГэВ в эмульсии для изучения струй ${}^{14}\text{N}^* \rightarrow d(p)\alpha\alpha\alpha$ в переднем конусе около 1° . Главная задача — ускоренный поиск «белых» звезд, сечения которых составляют несколько процентов неупругого. Пример такой звезды представлен на рис. 9. Имеется указание на лидирующую роль зарядовой конфигурации $2 + 2 + 2 + 1$.

Обнаружение параметрического рентгеновского излучения умеренно релятивистских ядер в кристаллах

В экспериментах на пучках нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ в совместной работе сотрудников ОИЯИ, Института физико-технических проблем (Дубна), НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете, Московского государственного института электронной техники (Зеленоград) впервые наблюдалось параметрическое рентгеновское излучение при взаимодействии умеренно релятивистских ядер с кристаллами [12]. Измерения выполнены с кристаллами кремния и графита на пучках протонов с энергией 5 ГэВ и ядер углерода с энергией 2,2 ГэВ/нуклон. Для регистрации рентгеновских фотонов использовался полупроводниковый кремниевый спектрометр с высоким энергетическим разрешением. В спектрах излучения зарегистрированы

максимумы, положения которых зависят от угла ориентации кристалла и соответствуют теоретическим значениям для линий параметрического излучения. Таким образом, получено первое экспериментальное подтверждение существования параметрического излучения в кристаллах для тяжелых частиц — релятивистских ядер.

Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) быстрых заряженных частиц в кристаллах возникает в результате дифракции поля виртуальных фотонов быстрой заряженной частицы на кристаллографических плоскостях. Поскольку параметрическое излучение возникает при равномерном и прямолинейном движении частицы в кристалле и выход его слабо зависит от величины релятивистского фак-

тора частиц γ , то естественно было предполагать возможность его наблюдения также для тяжелых заряженных частиц — релятивистских ядер. Кроме того, так как выход параметрического излучения пропорционален квадрату заряда частицы, то ядра с зарядом $Z > 1$ должны генерировать в кристалле более интенсивное излучение, чем электроны.

Отметим, что интенсивность излучений, связанных с изменением скорости частиц — тормозного излучения в среде и магнитотормозного излучения, имеет сильную зависимость от величины γ . Поэтому, в отличие от легких электронов, для протонов и ядер с энергиями, достижимыми на нуклотроне, тормозное и магнитотормозное излучения практически отсутствуют.

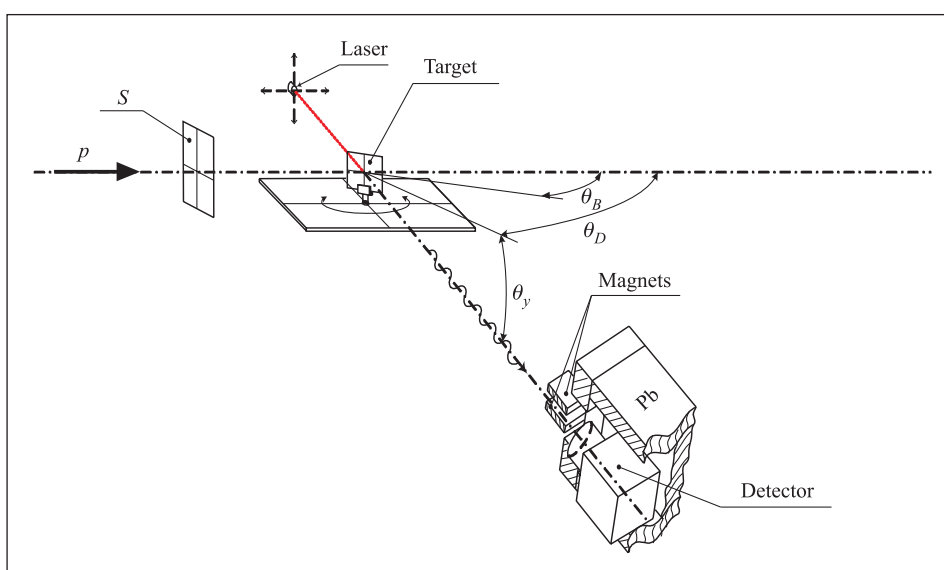


Рис. 10. Схема эксперимента: S — ионизационный монитор пучка; θ_B — угол наклона кристалла к пучку; θ_D и θ_y — углы детектирования

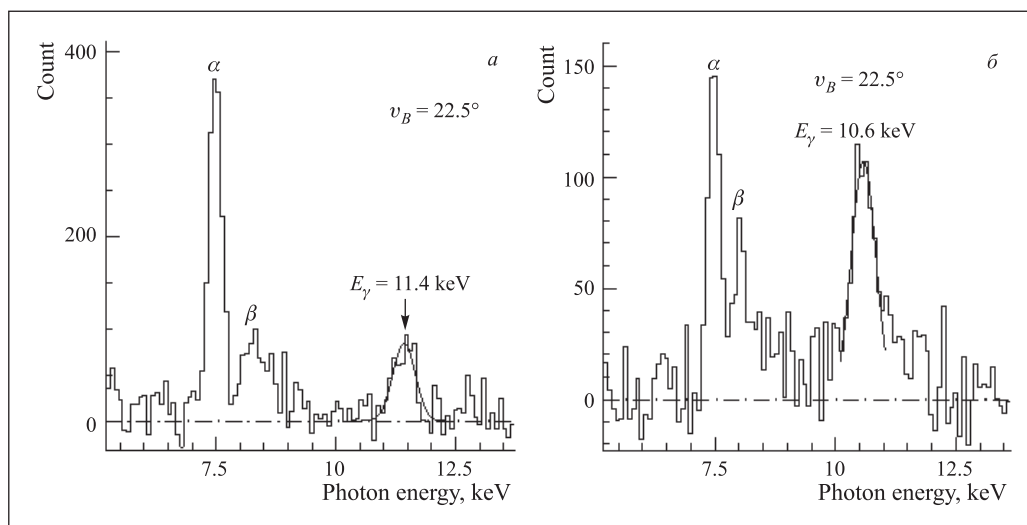


Рис. 11. Спектры излучения, зарегистрированные детектором, при облучении кристалла (001) кремния пучком протонов с энергией 5 ГэВ (а) и пучком ядер углерода с энергией 2,2 ГэВ/нуклон (б)

Схема эксперимента представлена на рис. 10. Пучок ускоренных и выведенных из нуклотрона частиц падал на мишень из тонкого кристалла кремния. Кристалл был наклонен к оси пучка на угол θ_B . Большие грани кристалла были параллельны (001) плоскостям. Использовалась схема Брэгга, в которой детектор размещается под углом θ_D , близким углу дифракции на (001) плоскостях — $2\theta_B$.

Спектры рентгеновского излучения при взаимодействии протонов с энергией 5 ГэВ и ядер углерода с энергией 2,2 ГэВ/нуклон с кристаллом кремния представлены на рис. 11. Максимумы α и β образованы фотонами паразитного характеристического излучения атомов никеля корпуса детектора, возбуждаемых вторичными частицами. Максимумы, обозначенные γ , образованы за счет фотонов параметрического излучения.

Угловая плотность параметрического излучения для наклона кристалла под углом $\theta_B = 22,5^\circ$ составила $2,25 \cdot 10^{-6}$ и $9,76 \cdot 10^{-5}$ фотон/(частица \cdot ср) для протонов и ядер углерода соответственно. Плотность излучения значительно выше для ядер углерода, что качественно подтверждает зарядовую зависимость выхода излучения.

Обнаружение в экспериментах на пучках нуклотрона параметрического излучения релятивистских ядер в кристалле открывает перспективы использования этого эффекта для диагностики ядерных пучков на других ускорителях высоких энергий. Одним из существенных достоинств является то, что фотоны ПРИ испускаются под большими углами к пучку. Для минимизации воздействия на пучок кристаллическая мишень может быть сделана очень тонкой — менее 100 мкм.

Интересным и важным является экспериментальное исследование зависимости выхода параметрического излучения и его характеристик от заряда ядер, их энергии и параметров кристалла. С этой целью эксперименты на нуклотроне будут продолжены.

Коллаборация «Дельта-2»

В 2005 г. были проведены измерения на установке «Дельта-2» на внутренней мишени нуклотрона и обработка ранее полученных экспериментальных данных.

Цель измерений — проверка результатов, полученных в 2004 г., по изучению резонансной структуры в реакциях образования π -мезонов при энергии пучка 340–350 МэВ/нуклон. В марте 2005 г. измерен выход π -мезонов во взаимодействии на нуклотроне пучка дейтронов с серебряной мишенью при 73° . Предварительные данные этих измерений подтверждают результаты сеанса 2004 г. о наличии резонансной структуры в распределении выхода π -мезонов в зависимости от кинетической энергии налетающего пучка (рис. 12).

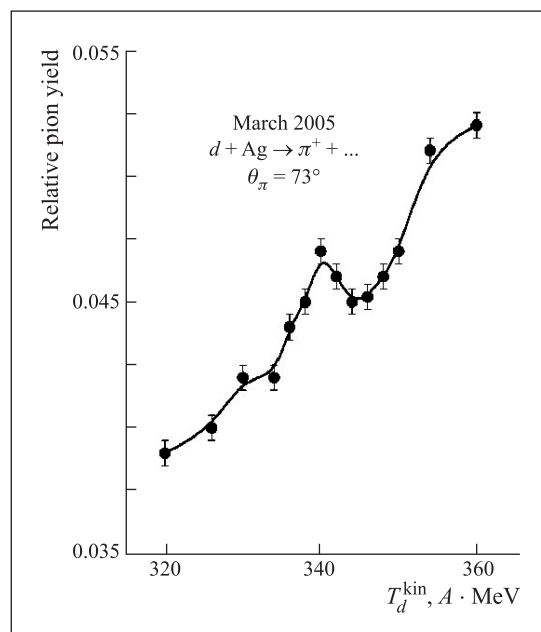


Рис. 12. Относительный выход пионов в $d + \text{Ag}$ -реакции в зависимости от кинетической энергии пучка

Коллаборация МАРУСЯ

Были проведены измерения на пучках ядер углерода с одинаковой энергией 2,2 ГэВ/нуклон с использованием мишени Cu малых размеров (4×4 мм). Образованные в результате взаимодействия частицы (π, K, p) с импульсами 500 и 1500 МэВ/с регистрировались под углами 3° с угловым разбросом $1\text{--}2^\circ$. Основная методическая цель измерений состояла в настройке и изучении режимов работы магнитооптического спектрометра на основе метода фокальных коэффициентов с использованием нового годоскопического детектора, расположенного в непосредственной близости от мишени.

В процессе измерений сделаны экспериментальные оценки возможности регистрации и идентификации двух частиц из одного события, имеющих близкие импульсы и летящие под одним углом (в пределах захвата магнитооптического спектрометра $2\text{--}3^\circ$). Измерения показали возможность регистрации таких событий с достаточной статистической обеспеченностью (до 100 соб./ч) для изучения спектра эффективных масс состояний, распадающихся по каналам ($\pi K, \pi p, K p, pp, \pi \pi$). Особое внимание было уделено реакции $A + A \rightarrow K^+ p$ в области эффективных масс 1500 МэВ в связи с интересом к изучению возможных состояний, именуемых пен-такварками.

Престижная международная награда «Brightness Award»

В 2005 г. престижная международная награда была присуждена группе сотрудников лаборатории

под руководством Е. Д. Донца за цикл работ «Источник высокозарядных ионов на основе электронной струны». Эта награда учреждена международным сообществом исследователей, занимающихся физикой и технологией получения ионов и ионных источников, и присуждается раз в два года.

Работа группы Е. Д. Донца характеризуется как прорыв в физике ионов. Было подчеркнуто, что авторы не только открыли явление «электронная струна», но и дали теоретические предпосылки для экспериментальной проверки и практической реализации на нуклотроне.

Предложение по поиску состояния «смешанная фаза»

В ОИЯИ 7–9 июля 2005 г. состоялось рабочее совещание, на котором обсуждалась организация работ по поиску состояния «смешанная фаза» сильновзаимодействующей материи на нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ. Идея поиска была предложена профессором А. Н. Сисакином. Расчеты при энергии $5 A \cdot \text{ГэВ}$, проведенные профессором В. Д. Тонеевым и др., показали возможность наблюдения состояния «смешанная фаза» на нуклотроне (рис. 13).

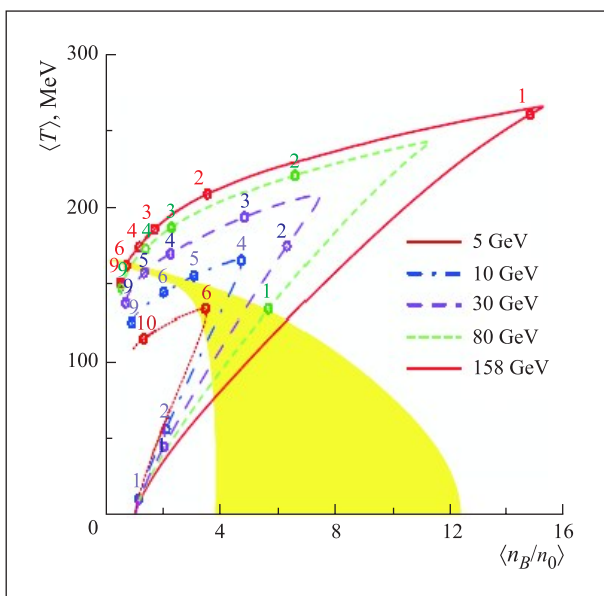


Рис. 13. Расчеты при энергии $5 A \cdot \text{ГэВ}$, проведенные профессором В. Д. Тонеевым и др.

В настоящее время в Лаборатории теоретической физики и Лаборатории физики высоких энергий идет подготовка нового проекта по наблюдению и изучению состояния «смешанная фаза» сильновзаимодействующей материи на нуклотроне.

Коллаборация PHENIX

Группа физиков ЛВЭ под руководством А. Г. Литвиненко активно участвует в физических сеансах на

установке PHENIX (RHIC, BNL). Для получения экспериментальной информации используется система аэрогелиевых черенковских счетчиков, созданных совместно с японскими коллегами. Получены очень интересные данные по анизотропному параметру v_2 (рис. 14), гашению струй (рис. 15), J/Ψ -подавлению (рис. 16) и прямым фотонам (рис. 17) [13–22].

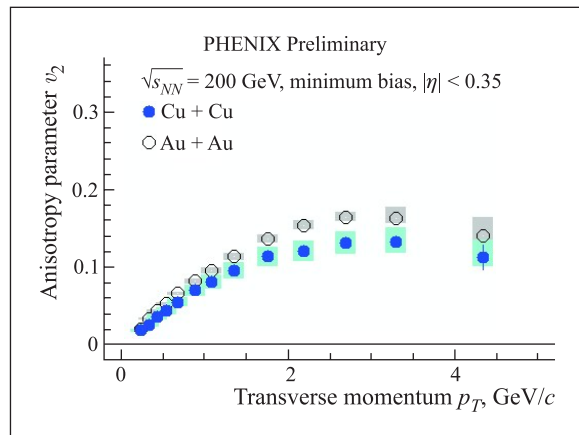


Рис. 14. Эллиптический поток v_2 в зависимости от поперечного импульса p_T . На основе этой информации оценен параметр термализации $\tau_{\text{therm}} \sim 0,6–1,0$ фм при плотности $\varepsilon \sim 15–25 \text{ ГэВ/фм}^3$ ($\varepsilon_{\text{norm}} \sim 0,16 \text{ ГэВ/фм}^3$)

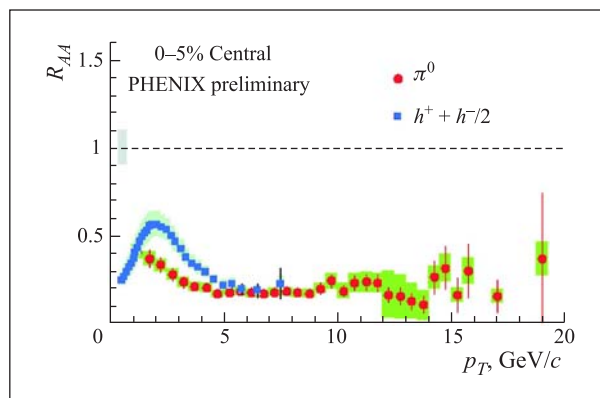


Рис. 15. Гашение струй. Подавление выхода нейтральных пионов и заряженных адронов с большими значениями p_T в центральных столкновениях Au + Au наблюдается до 20 ГэВ/с. R_{AA} — коэффициент ядерной модификации (отношение измеренных инвариантных выходов AA-к инвариантным выходам NN-взаимодействий)

На основании данных, представленных на рис. 15, можно сделать следующие выводы:

- наблюдается сильное подавление ($R_{AA} = 0,2!$) вплоть до 20 ГэВ/с;
- взаимодействующее вещество исключительно непрозрачное;
- полученные данные позволяют оценить нижнюю границу исходной плотности глюонов.

Наблюдалось J/Ψ -подавление во взаимодействиях разных ядер при 62 и 200 $A \cdot \text{ГэВ}$ в центральных AA-соударениях (рис. 16). Для этих соударений коэффициент подавления около 3.

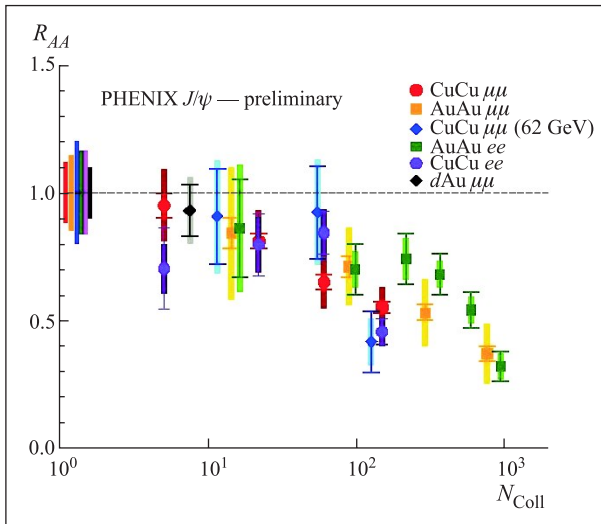


Рис. 16. Подавление J/Ψ в соударениях различных ядер. Коэффициент подавления в центральной области ~ 3

Следующим этапом работы группы ЛВЭ в коллаборации PHENIX является участие в создании калориметра NCC (Nose Cone Calorimeter) (рис. 18). Он необходим для изучения спин-протонной структуры и CGC (Color Glass Condensate). Прототип калориметра готов к испытаниям на пучке. Этот прототип изготовлен в Дубне сотрудниками МГУ и дубненской группой коллаборации PHENIX (рис. 19).

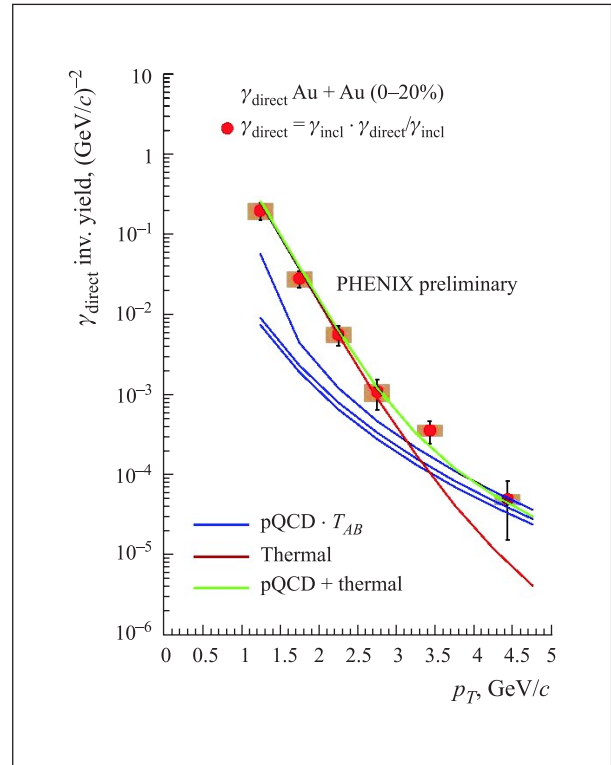


Рис. 17. Зависимость прямого инвариантного выхода фотонов от p_T . Наилучшее согласие получается в рамках квантовой хромодинамики с учетом термализации

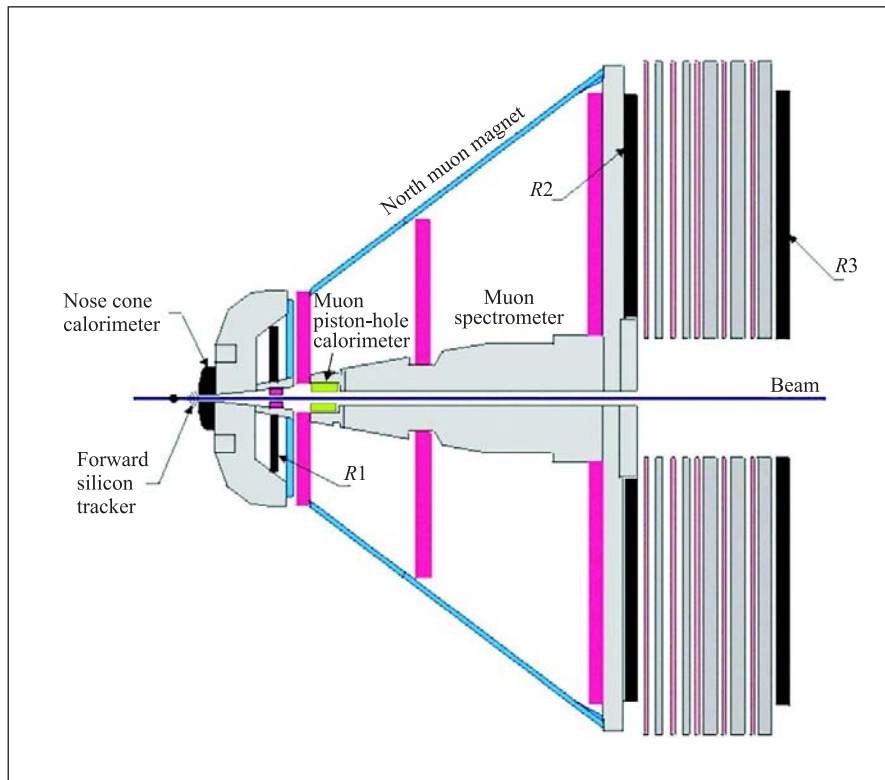


Рис. 18. Схема калориметра для установки PHENIX. Калориметр состоит из вольфрамовых пластин и полупроводниковых детекторов

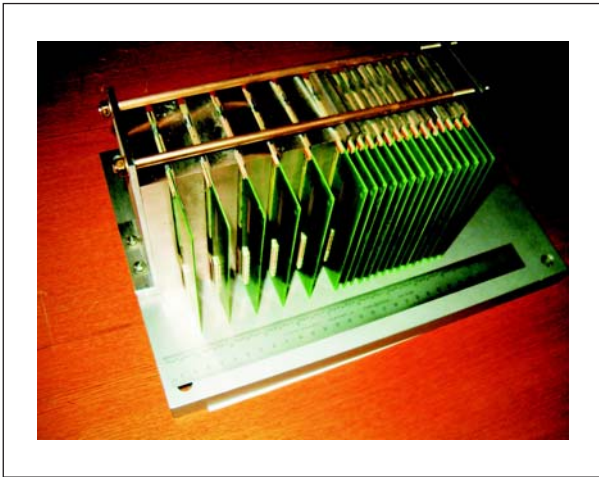


Рис. 19. Прототип калориметра NCC для установки PHENIX

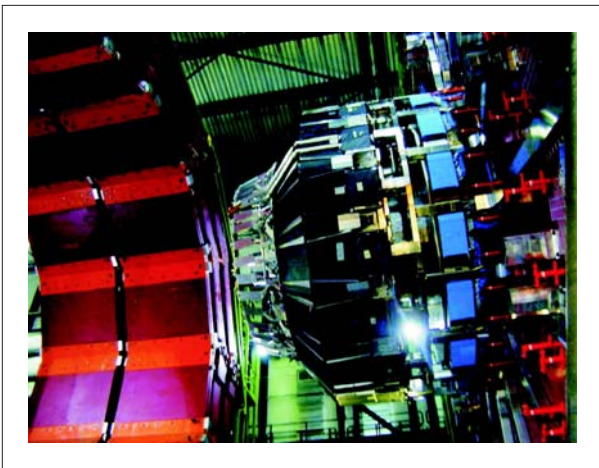


Рис. 20. Общий вид адронного калориметра с установленной считывающей системой для CMS

Группа физиков лаборатории под руководством профессора Ю. А. Панебратцева активно участвует в

работах коллаборации **STAR** (BNL, США) [23–26]. Также ЛВЭ принимает участие в подготовке установки **ALICE** (ЦЕРН) и формировании программы будущих физических исследований на ней.

Выполнен большой объем работ на установке **CMS** группой под руководством профессора В. А. Смирнова. Были проведены комплексные испытания считывающей системы перед установкой на адронном калориметре. В 2005 г. считывающая система была установлена на детекторе (рис. 20). После установки проведен ряд испытаний считывающей системы.

Прикладные исследования

В течение 2005 г. проводился анализ γ -спектрометрической информации из экспериментов по экспонированию мишеней ^{239}Pu в потоке вторичных нейтронов установки «Gamma-2» (протяженная свинцовая мишень 50 см в длину и 8 см в диаметре с парафиновым замедлителем), облучаемых протонами нуклотрона с энергией 1 ГэВ. В спектрах было идентифицировано более 30 продуктов деления (рис. 21), и работа по определению удельных скоростей реакций продолжается.

Продолжены работы по идентификации продуктов реакций, вызванных протонами с энергией 1 ГэВ в тонких мишенях ^{232}Th , проводится определение сечений соответствующих реакций.

С целью совершенствования экспериментальной базы новая электроядерная установка «Gamma-2 MD», включающая в себя свинцовую мишень 8 см в диаметре и длиной 60 см, окруженную замедлителем из реакторного графита, была доставлена для совместных экспериментов из Объединенного института ядерных и энергетических исследований «Сосны» в Минске. Специальные транспортные устройства для новой установки созданы в Лаборатории высоких энергий, установка «Gamma-2 MD» размещена в фокусе F3 экспериментального зала нуклотрона (рис. 22).

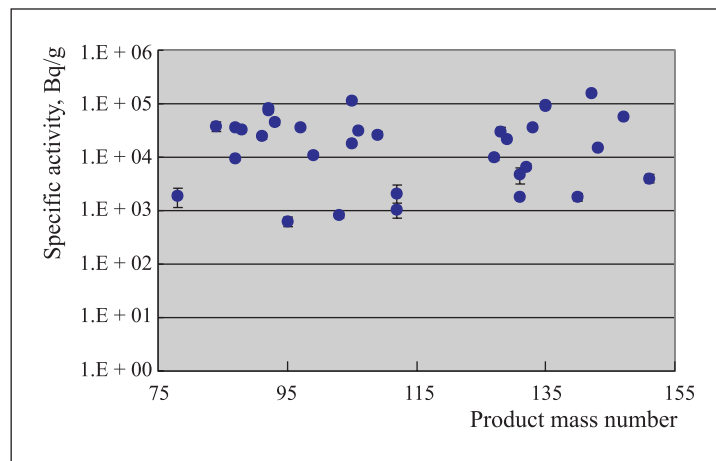


Рис. 21. Удельные активности продуктов деления в мишени ^{239}Pu , облученной протонами с энергией 1 ГэВ

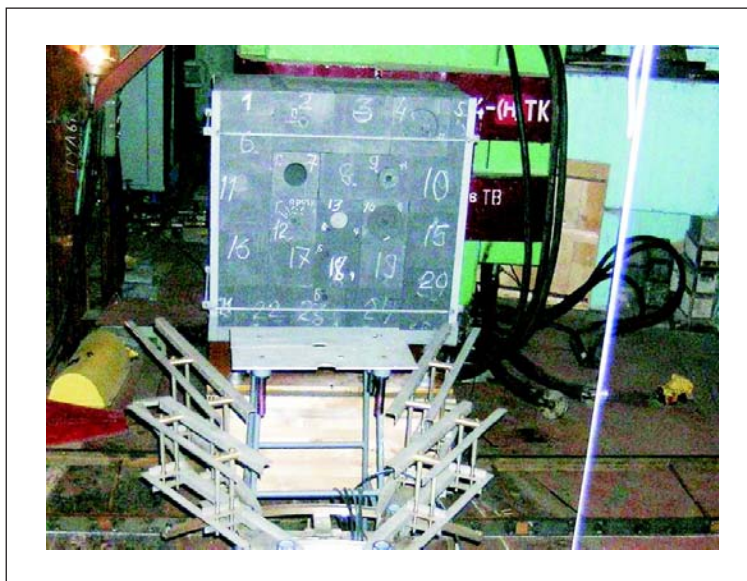


Рис. 22. Установка «Gamma-2 MD»

Однофотонный томограф (микроСПЕКТ) с улучшенным разрешением на NaI(Tl)-сцинтиляторе, использующий точечный коллиматор, был изготовлен и протестирован на небольших животных. Прибор позволяет измерять глубину взаимодействия в толстом кристалле сцинтилятора с помощью координатно-чувствительного ФЭУ, регистрирующего зависящие от глубины профили сцинтилляционного света. Такое измерение устраняет ошибку параллакса, которая ухудшает высокое пространственное разрешение, требуемое для сканирования небольших животных. Эта новая методика трехмерной регистрации γ -лучей была применена в однофотонном томографе микроСПЕКТ и проверена на источнике ^{57}Co и препарате $^{98m}\text{Tc-MDP}$, введенном в ткани мыши [41].

Интерпретация экспериментальных данных

Экспериментальные данные, полученные на двухметровой пропановой пузырьковой камере ОИЯИ, были использованы для изучения влияния центральности соударений на спектры Λ -гиперонов и мезонов в SS -взаимодействиях при импульсе $4,2 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}/c$. В качестве меры центральности соударения была выбрана множественность протонов-участников с импульсом больше $300 \text{ МэВ}/c$. Представлены также характеристики π -мезонов и протонов, сопровождающих рождение странных частиц. Проведено сравнение экспериментальных данных с предсказаниями модифицированной версии модели FRITIOF. Показано, что странные частицы рождаются преимущественно в центральных и околоцентральных взаимодействиях. Средние кинематические характеристики Λ -мезонов не зависят от центральности соударений. В то же время средний поперечный импульс и средний угол вылета Λ -гиперонов слабо растут с увеличе-

нием центральности соударений. С увеличением центральности уменьшается анизотропия угловых распределений и Λ -гиперонов, и K_s^0 -мезонов в с.ц.м. NN -соударений. Средний поперечный импульс K_s^0 -мезонов превышает средний поперечный импульс π -мезонов примерно в 1,6 раза [42].

Сотрудниками лаборатории предложено обобщение z -скейлинга, установленного ранее для инклюзивного рождения заряженных адронов с большими поперечными импульсами и струй в протон-(анти)протонных столкновениях. Построена скейлинговая функция, описывающая оба класса событий в широком диапазоне энергий столкновения и плотностей множественности заряженных частиц, исследованных коллаборациями UA1, E735 и CDF. Определены аномальные фрактальные размерности сталкивающихся и рожденных объектов и параметры, характеризующие среду, ассоциированную с рождением адрона и струи. Полученные результаты для высоких плотностей множественности подтверждают ранее установленные свойства z -скейлинга для «minimum bias»-событий. Новые данные о поведении спектров заряженных адронов в протон-протонных взаимодействиях в зависимости от плотности множественности в центральной области, полученные коллаборацией STAR, дают дополнительное подтверждение установленной закономерности. Представляет интерес дальнейшая экспериментальная проверка свойств z -скейлинга и его использование для поиска новых явлений при рождении частиц с большими поперечными импульсами и в событиях с высокой множественностью на ускорителях У-70, тэватрон, RHIC и LHC [49].

В работе [55] представлена новая физическая программа исследований, реализация которой направлена на решение фундаментальных вопросов о при-

роде кумулятивного эффекта и огромных расхождений поляризационных эффектов с предсказаниями наивной кварковой модели в области больших p_T .

Предлагается провести детальные исследования в области максимальных p_T в полуэксклюзивной (и эксклюзивной) постановке экспериментов для выяснения природы кумулятивных процессов и других эффектов (загадки цветовой прозрачности ядер и поляризации). Эти исследования дадут возможность получить доказательство существования в ядрах короткодействующих нуклонных корреляций или флуктонов (кроме того, возможно исследовать также особенности строения флуктонов и нуклонов в ядрах).

Показано, что в области энергий, достижимых на нуклотроне, накопилось множество фундаментальных проблем, так что даже небольшой объем новых данных позволит сделать решающий шаг в их решении.

Некоторые другие результаты, выполненные в Лаборатории высоких энергий, представлены в работах [27–40, 43–48, 50–54].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malakhov A. I.* Investigations in Veksler and Baldin Laboratory of High Energies // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVII Intern Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 27 – Oct. 2, 2004 / Ed. A. N. Sissakian, V. V. Burov, A. I. Malakhov. Dubna, 2005. V. II. P. 319–338.
2. *Malakhov A. I.* Investigations of hadron structure at the Nuclotron // Proc. of Intern. Conf. «Very High Multiplicity Physics»; Selected Papers of the Intern. Conf. «Hadron Structure 2004», Smolenice Castle, Slovakia, Aug. 30 – Sept. 3, 2004. Dubna, 2005. P. 254–291.
3. *Malakhov A. I.* Investigations of hadron structure at the Nuclotron // Proc. of the Intern. Conf. «Hadron Structure 2004», Smolenice Castle, Slovak Republic, Aug. 30 – Sept. 3, 2004 / Ed. S. Dubnicka et al. Kosice, 2005. P. 111–122.
4. *Malakhov A. I.* Polarization investigations at the Nuclotron // Czech. J. Phys. 2005. V. 55. P. A65–74.
5. *Sharov V. I. et al.* // XIth Workshop on High Energy Spin Physics «SPIN-2005», Dubna, Sept. 27 – Oct. 1, 2005.
6. *Janek M. et al.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20. P. 646.
7. *Ладыгин В. П. и др.* Тензорная анализирующая способность T_{20} в реакциях $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ при энергиях 140, 200 и 270 МэВ под нулевым углом. Препринт ОИЯИ Р1-2005-57. Дубна, 2005; ЯФ (направлено).
8. *Uesaka T. et al.* Proposal on the measurements of $d-p$ elastic scattering analyzing powers at 0.3–2.0 GeV at internal target station of the Nuclotron. JINR Preprint E1-2005-64. Dubna, 2005; Part. Nucl., Lett. 2006. V. 3, No. 5(134).
9. *Azhgirey L. S. et al.* Measurement of the extracted deuteron beam vector polarization at the Nuclotron // Part. Nucl., Lett. 2005. V. 2, No. 2(125). P. 91–99.
10. *Azhgirey L. S. et al.* Measurement of analyzing powers for the reaction $p \uparrow + \text{CH}_2$ at $p_p = 1.75\text{--}5.3$ GeV/c // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 538. P. 431–441.
11. *Андреева Н. П. и др.* Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер // ЯФ. 2005. Т. 68, № 3. С. 484–494.
12. *Волков В. И. и др.* Обнаружение параметрического рентгеновского излучения умеренно релятивистских протонов в кристаллах. Препринт ОИЯИ Р1-2005-11. Дубна, 2005; Письма в ЖЭТФ (направлено).
13. *Adler S. S. et al.* Midrapidity direct-photon production in $p+p$ collisions at $\sqrt{S} = 200$ GeV // Phys. Rev. D. 2005. V. 71. P. 071102(R).
14. *Adler S. S. et al.* Saturation of azimuthal anisotropy in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 62\text{--}200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 232302.
15. *Adler S. S. et al.* Centrality dependence of direct photon production in $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions // Ibid. P. 232301.
16. *Adler S. S. et al.* Measurement of single electron event anisotropy in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 024901.
17. *Adler S. S. et al.* Nuclear modification factors for hadrons at forward and backward rapidities in deuteron-gold collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 082302.
18. *Adler S. S. et al.* Centrality dependence of charm production from a measurement of single electrons in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Ibid. P. 082301.
19. *Adler S. S. et al.* Jet structure of baryon excess in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 051902(R).
20. *Adcox K. et al.* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 184–283.
21. *Adler S. S. et al.* Production of Φ mesons at midrapidity in $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions at relativistic energies // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 014903.
22. *Adler S. S. et al.* Deuteron and antideuteron production in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 122302.
23. *Adams J. et al.* Multistrange baryon elliptic flow in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Ibid. V. 95. P. 122301.
24. *Adams J. et al.* Multiplicity and pseudorapidity distributions of photons in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 62.4$ GeV // Ibid. P. 062301.
25. *Adams J. et al.* Distributions of charged hadrons associated with high transverse momentum particles in pp and Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Ibid. P. 152301.
26. *Adams J. et al.* Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 102–183.
27. *Alt C. et al. (NA49 collab.).* System size and centrality dependence of the balance function in a collisions at $\sqrt{s} = 17.2$ GeV // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 034903.
28. *Alt C. et al. (NA49 collab.).* Omega- and (anti)Omega+ production in central Pb + Pb collisions at 40 A · GeV and 158 A · GeV // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 192301.

29. Alt C. et al. (NA49 collab.). System size dependence of strangeness production in nucleus–nucleus collisions at $\sqrt{s} = 17.2$ GeV // Ibid. P. 052301.
30. Artemov A. S. et al. Control of the beam-internal target interaction at the Nuclotron by means of light radiation // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 538. P. 8–16.
31. Троян Ю. А. и др. Поиск и исследование барионных резонансов со странностью $S = +1$ в системе nK^+ в реакции $np \rightarrow npK^+K^-$ при импульсе налетающих нейтронов $P_n = (5,20 \pm 0,12)$ ГэВ/c // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, №1(124). С. 36–48.
32. Aslanyan P. Zh. Observation of $S = +1$ narrow resonances in the system $K_s^0 p$ // Nucl. Phys. A. 2005. V. 755. P. 375c–378c.
33. Karachuk J., Shimanskiy S. S. Spin as an additional tool for QGP investigations // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 27–Oct. 2, 2004 / Ed. A. N. Sissakian, V. V. Burov, A. I. Malakhov. Dubna, 2005. V. I. P. 375.
34. Karnaukhov V. A. et al. Spinodal decomposition, nuclear fog and two characteristic volumes in thermal multifragmentation // Nucl. Phys. A. 2005. V. 749. P. 65c–72c.
35. Vokal S., Lehocka S., Orlova G. I. Azimuthal structures of particles produced in heavy ion interactions. JINR Preprint E1-2005-66. Dubna, 2005.
36. Westmeier W. et al. Transmutation experiments on ^{129}I , ^{139}La , and ^{237}Np using the Nuclotron accelerator // Radiochim. Acta. 2005. V. 93. P. 65–73.
37. Adam J. et al. Measurement of the neutron fluence on the spallation source at Dubna // Kerntechnik. 2005. Bd. 70, Nr. 3. S. 127–132.
38. Krasa A. et al. Neutron production in spallation reactions of 0.9 and 1.5 protons on a thick lead target. Comparison between experimental data and Monte-Carlo simulations. JINR Preprint E1-2005-46. Dubna, 2005.
39. Барашенков В. С. и др. Мишени электроядерных установок // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, №4(127). С. 66.
40. Aslanyan P. Zh., Emelyzenko V. N., Rikhvitzkaya G. G. Exotic narrow resonance searches in the system ΛK_s^0 in $p + \text{propane}$ collisions at 10 GeV/c. JINR Preprint E1-2005-149. Dubna, 2005.
41. Tsyganov E. et al. Combining different modalities for 3D imaging of biological objects. JINR Commun. E19-2005-112. Dubna, 2005.
42. Баатар Б. и др. Характеристики CC -взаимодействий при импульсе 4,2 ГэВ/c на нуклон с рождением Л-гиперонов и K^0 -мезонов в зависимости от степени центральности соударения ядер. Препринт ОИЯИ P1-2005-82. Дубна, 2005; ЯФ (направлено).
43. Westmeier W. et al. Transmutation experiments using the Nuclotron // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 27 – Oct. 2, 2004 / Ed. A. N. Sissakian, V. V. Burov, A. I. Malakhov. Dubna, 2005. V. I. P. 379–382.
44. Афанасьев С. В., Дряблов Д. К. Метод реконструкции физического события на установке СКАН // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, №2(125). С. 82–90.
45. Illarionov A. Yu., Lykasov G. I. Charmonium dissociation by pion and ρ meson // Там же. №5(128). С. 105–110.
46. Kukulín V. I., Shikhaliev M. A. Dibarions in hadronic physics and nuclear structure // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 27 – Oct. 2, 2004 / Ed. A. N. Sissakian, V. V. Burov, A. I. Malakhov. Dubna, 2005. V. II. P. 45–55.
47. Космачев О. С. Спин как кинематическое проявление релятивизма. Препринт ОИЯИ P2-2005-6. Дубна, 2005; J. Phys. G (направлено).
48. Балабелян А. Р. и др. Исследование реакций расщепления на ^{120}Sn и реакций (d, xn) , (d, pxn) , (p, xn) и (p, pxn) на обогащенных изотопах олова // ЯФ. 2005. Т. 68, №2. С. 195–200.
49. Zborovsky I., Tokarev M. Generalized z -scaling for charged hadron and jets. JINR Preprint E2-2005-76. Dubna, 2005; Part. Nucl., Lett. (submitted).
50. Юревич В. И. и др. Изучение эмиссии нейтронов при взаимодействии ядер ^1H , ^2H , ^4H , ^{12}C с энергией 1–2 А·ГэВ с ядрами свинца. Препринт ОИЯИ P1-2005-73. Дубна, 2005; ЯФ (направлено).
51. Юревич В. И. и др. Образование нейтронов при взаимодействии релятивистских протонов и дейтронов со свинцовыми мишенями. Препринт ОИЯИ P1-2005-79. Дубна, 2005; Письма в ЭЧАЯ (направлено).
52. Tokarev M. V. et al. Z -scaling and inclusive particle production in pp collisions at high p_T . JINR Preprint E2-2005-4. Dubna, 2005.
53. Ladygina N. B., Shebeko A. V. Deuteron-proton charge exchange reaction at small transfer momentum // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 27 – Oct. 2, 2004 / Ed. A. N. Sissakian, V. V. Burov, A. I. Malakhov. Dubna, 2005. V. II. P. 214–215.
54. Glagolev V. The polarized charge-exchange reaction $d \uparrow + p \rightarrow (pp)^1 s_0 + n$ // Ibid. P. 192–201.
55. Shimanskiy S. S. Cumulative processes. nucl-ex/0604014.