

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

В 2003 г. деятельность Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина, как и в предыдущие годы, была сконцентрирована на исследованиях взаимодействий релятивистских ядер в области энергий от нескольких сотен МэВ до нескольких ТэВ на 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, 2]. В экспериментах этого направления были использованы пучки, полученные на ускорительном комплексе ЛВЭ, а также на ускорителях ЦЕРН, BNL, GSI и других научных центров. В настоящее время на ускорительном комплексе Лаборатории высоких энергий можно проводить широкий диапазон иссле-

дований в области энергий несколько ГэВ на 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 сильно взаимодействующей материи при экстремальной плотности энергии и в переходной области от адронной материи к кварк-глюонной плазме.

Лаборатория осуществляет широкое международное сотрудничество — с ЦЕРН, научными центрами стран-участниц ОИЯИ, а также США, Германии, Японии, Индии, Египта и других стран.

## РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЛВЭ

Нуклотрон является базовой установкой ОИЯИ. Он обеспечивает физические группы пучками протонов, поляризованных дейтронов (а также нейтронов и протонов) и многозарядных ионов в области энергий до 6 А·ГэВ на нуклон. Общее время работы нуклотрона в 2003 г. составило 2113 ч.

Параметры пучков частиц на нуклотроне, имеющиеся в настоящее время и планируемые на 2006 г., представлены в таблице [3, 4].

В течение нескольких последних лет в Лаборатории высоких энергий ведутся экспериментальные и теоретические исследования так называемого отра-

Параметры выведенных пучков на нуклотроне

Частица	Интенсивность, частиц/цикл		Частица	Интенсивность, частиц/цикл	
	2003 г.	2006 г.		2003 г.	2006 г.
$p$	$1 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$^{16}\text{O}$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$
$d$	$5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$	$^{24}\text{Mg}$	$1 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
$^4\text{He}$	$3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$^{40}\text{Ar}$	$3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^8$
$^7\text{Li}$	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$^{56}\text{Fe}$	$1,2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^7$
$^{10}\text{B}$	$2,3 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$^{84}\text{Kr}$	—	$5 \cdot 10^6$
$^{12}\text{C}$	$2 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{10}$	$^{131}\text{Xe}$	—	$1 \cdot 10^6$
$^{14}\text{N}$	$1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$d \uparrow$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$

жательного режима работы криогенных электронно-лучевых ионизаторов [5]. Отражательный режим реализуется за счет применения в криогенном ионизаторе электронной пушки и отражателя электронов, специально сконструированных таким образом, что электроны после прохождения через ионизатор не высаживаются на коллектор, а отражаются в направлении эмиттера, при приближении к которому вновь отражаются за счет перекачки части продольной скорости в поперечную. Таким образом, в пространстве дрейфа ионизатора происходит накопление электронов. Накопленные электроны подобно электронам пучка также могут быть использованы для получения высокозарядных ионов.

Интерес к исследованиям отражательного режима связан в первую очередь с тем, что его применение может в сотни раз уменьшить мощности электронных пучков, необходимых для производства ионов, которые в обычном, пучковом режиме могут достигать многих сотен киловатт, что далеко не всегда может быть реализовано на практике.

Криогенный ионизатор «Крион-2» в струнном режиме в 2002 и 2003 гг. применялся в сеансах работы нуклотрона и показывал высокую эффективность ионизации, надежность и стабильность в работе в автоматическом режиме, обеспечивая весьма высокую импульсную интенсивность пучков высокозарядных ионов для инъекции в линейный ускоритель.

Стабильность интенсивности ионного пучка на выходе источника составляла 95 %. Более детальное описание криогенного ионизатора «Крион-2» представлено в работе [6].

Новый источник дал возможность получить пучки ионов  $N^{6+}$ ,  $N^{7+}$ ,  $Ar^{16+}$ ,  $Fe^{24+}$ . Величина ионных токов на выходе «Крион-2» составляла соответственно 300, 350, 200 и 150 мкА. Характерные времена удержания ионов в электронной струне следующие: 40 мс для  $N^{6+}$ , 120 мс для  $N^{7+}$ , 300 мс для  $Ar^{16+}$  и 1100 мс для  $Fe^{24+}$ . Эффективная плотность электронного тока в струне была оценена и равнялась приблизительно 150–200 А/см<sup>2</sup>. Длительность импульса ионов из источника составляла около 8 мкс, что соответствует одному инжекционному витку в кольце нуклотрона. На рис. 1 показан пример взаимодействия иона  $^{56}Fe$  с кинетической энергией  $E_{kin} = 1$  А·ГэВ с ядром эмульсии.

В 2003 г. был достигнут существенный прогресс в усовершенствовании системы медленного вывода пучка. Введены в строй системы обратного питания, отвечающие за стабилизацию интенсивности выведенного пучка и его временную структуру. Колебания интенсивности подавляются системой обратного питания [3]. В декабрьском сеансе 2003 г. получена длительность вывода пучка ускоренных дейтронов с энергией 2 ГэВ из кольца нуклотрона более 10 с (рис. 2).

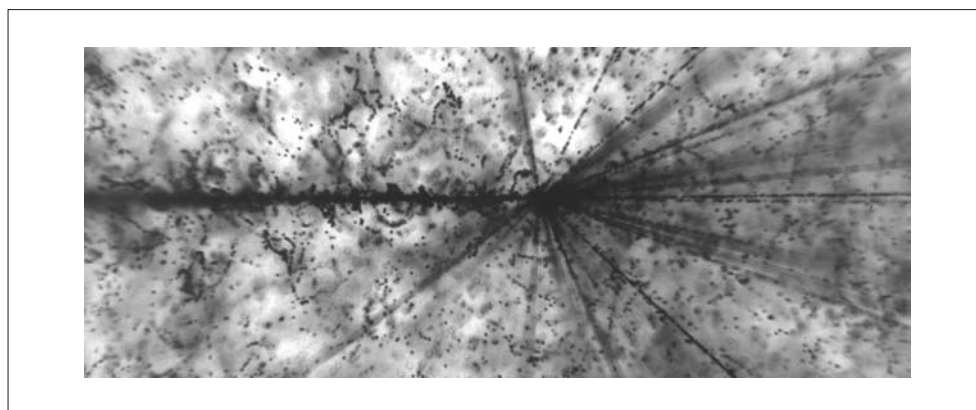


Рис. 1. Взаимодействие иона  $^{56}Fe$  при  $E_{kin} = 1$  А·ГэВ с ядром фотоэмульсии

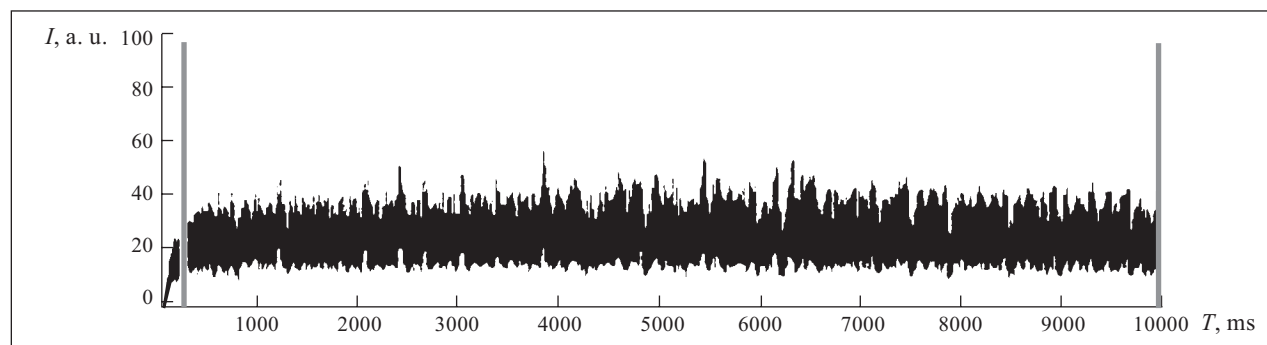


Рис. 2. Длительность растяжки выведенного пучка

## НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ЛВЭ

В 2003 г. на внутреннем и выведенном пучках нуклотрона были продолжены исследования, ведущиеся научными коллективами из различных стран, а также был проведен анализ ранее полученных данных. Ниже приведены некоторые результаты исследований.

### Эксперимент PIKASO

Сильная зависимость тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  от поперечного импульса при фрагментации тензорных поляризованных дейтронов с энергией 9 ГэВ в кумулятивные пионы была установлена в результате анализа данных эксперимента

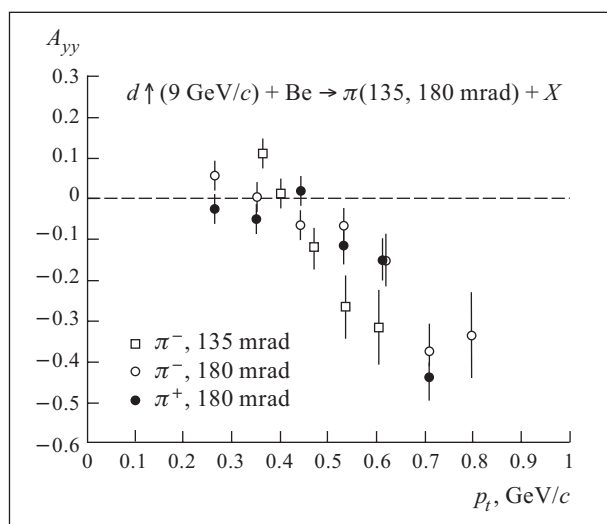


Рис. 3. Тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  в зависимости от  $p_t$  для тензорных поляризованных дейтронов с энергией 9 ГэВ

PIKASO (см. рис. 3). Данные были получены во время последнего сеанса на синхрофазотроне. При увеличении поперечного импульса пиона от 0,4 до 0,8 ГэВ/с тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  падает от 0 до -0,4. Стартовая точка падения  $A_{yy}(p_t)$  соответствует кумулятивной переменной  $X_c = 1$ , что является началом кумулятивного режима. Изменение  $A_{yy}(p_t)$  является линейным при двух углах пионной эмиссии 135 и 180 мрад.

### Эксперимент «Стрела»

Целью эксперимента «Стрела» является изучение зависящей от спина компоненты амплитуды нуклонного рассеяния в зарядово-обменном процессе  $np \rightarrow pn$  с использованием выведенного из нуклотрона дейтронного пучка. При нулевой передаче импульса дифференциальное сечение реакции  $dp \rightarrow (pp)n$  определяется спин-флиповой частью амплитуды зарядово-обменного процесса  $np \rightarrow pn$ .

В июньском сеансе на нуклотроне с помощью установки «Стрела» проведен эксперимент, в котором использовались пучки дейтронов с импульсами 3,5 и 4,0 ГэВ/с (см. рис. 4, а). Выведенный пучок дейтронов взаимодействовал с жидководородной мишенью Т, а первичные дейтроны отделялись от вторичных частиц анализирующим магнитом М. Поток пучка дейтронов измерялся с помощью ионизационной камеры ИС. Сцинтилляционные счетчики  $S_1$  и  $S_2$  использовались для определения углового ( $\sim 0,2$  град) и импульсного ( $\sim 10\%$ ) аксептанса и для формирования триггера события. С целью регистрации одно- и двухпротонных событий использовались дрейфовые трубки  $DT_1$ – $DT_4$  и многопроводные пропорциональные камеры  $PC_1$ ,  $PC_2$ . Черенковский счетчик с кварцевым излучателем служил для подавления выхода пионов. Схема регистрации событий с двумя протонами представлена на рис. 4, б.

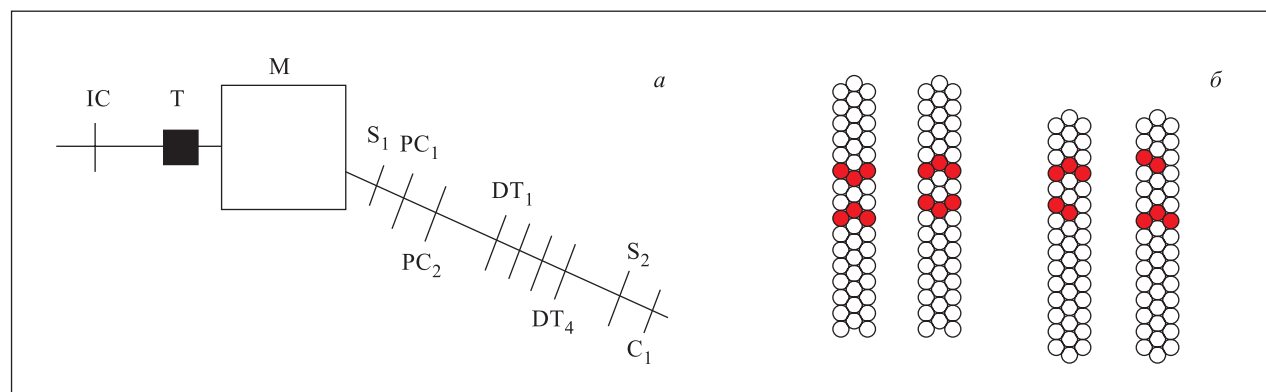


Рис. 4. а) Схема установки «Стрела». б) Пример событий с двумя протонами в дрейфовых трубках

## Проект BECQUEREL

Проект BECQUEREL (Beryllium (Boron) Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation) ориентирован на облучение фотоэмульсии легкими стабильными и радиоактивными ядрами с энергией порядка нескольких ГэВ/нуклон в пучках нуклотрона [7, 8]. Наблюдение фрагментации легких релятивистских ядер открывает новые возможности исследования сильновозбужденных ядерных состояний вблизи порогов многочастичных распадов. Интерес к таким состояниям мотивируется предсказаниями их свойств как свободно связанных систем с пространственным расширением, значительно превосходящим размеры фрагментов. Естественными компонентами таких состояний являются легчайшие ядра, не имеющие возбужденных состояний ниже порогов распада частиц, т.е. дейтроны, тритоны, ядра  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ .  $^3\text{He}$ -кластеризация проявляется в распадах легких нейтронодефицитных ядер. Цель исследования — прояснить роль  $^3\text{He}$ -кластеризации в предстоящих облучениях с использованием  $^7\text{Be}$  ( $^4,^3\text{He}-^3\text{He}$ ),  $^8\text{B}$  ( $^{1,2}\text{H}-^4,^3\text{He}-^3\text{He}$ ),  $^9\text{Be}$  ( $^4\text{He}-$

$^4\text{He}$ ),  $^9\text{C}$  ( $^3\text{He}-^3\text{He}-^3\text{He}$ ),  $^{10}\text{C}$  ( $^3\text{He}-^3\text{He}-^4\text{He}$ ) и  $^{11}\text{C}$  ( $^3\text{He}-^4\text{He}-^4\text{He}$ ).

Вторичный пучок, содержащий значительную часть ядер  $^7\text{Be}$  с энергией 1,23 А·ГэВ, был сформирован во время сеанса на нуклотроне путем отбора продуктов перезарядки первичных ядер  $^7\text{Li}$  с помощью канала транспортировки пучка. Проводилось облучение эмульсионных стопок. Ядра  $^7\text{Be}$  удобны для выбора магнитной оптики благодаря максимальной величине отношения заряда к весу. Это обстоятельство позволяет проводить наиболее полное наблюдение конечных фрагментов. Путем визуального сканирования треков были найдены 22 распада входящих ядер на гелиевые фрагменты без других сопровождающих треков. Примеры событий приведены на рис. 5. Изотопы гелия были идентифицированы по их полному импульсу, полученному из данных измерений многократного рассеяния. Это позволяет заключить, что доминирующая доля этих распадов связана с когерентной диссоциацией  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  и только 3–4 распада — с  $^3\text{He} + ^3\text{He} + n$ . Итак, можно сделать вывод, что  $^3\text{He}$ -кластеризация проявляется в распадах возбужденных релятивистских ядер  $^7\text{Be}$ .

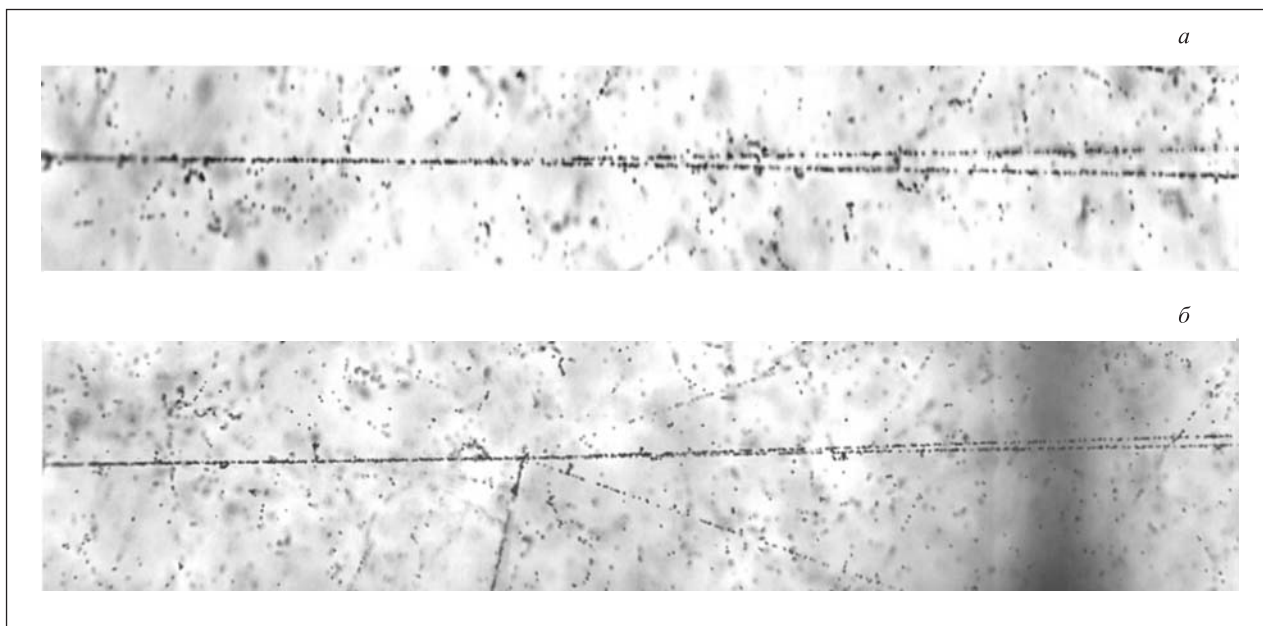


Рис. 5. Примеры периферической диссоциации ядер  $^7\text{Be}$  с энергией 1,23 А·ГэВ на пары ядер He: а) диссоциация без возбуждения ядра-мишени и без рождения заряженных мезонов; б) диссоциация, сопровождаемая рождением фрагмента мишени и мезонной пары

## Проект МАРУСЯ

Цель исследований на установке МАРУСЯ состоит в изучении редких подпороговых кумулятивных процессов и рождения антиматерии с учетом поляризации сталкивающихся объектов, извлечении событий по степени центральности и плоскости реакции на основе дополнительного измерения множественности и идентификации ядерных фрагментов,

не участвующих во взаимодействии. Исследование таких процессов возможно только с применением магнитооптических спектрометров, имеющих высокий акцептанс и высокую селективность вторичных частиц. Магнитооптический спектрометр МАРУСЯ введен в строй в 2002 г.

Были проанализированы новые экспериментальные данные по односпиновым анализирующим спо-

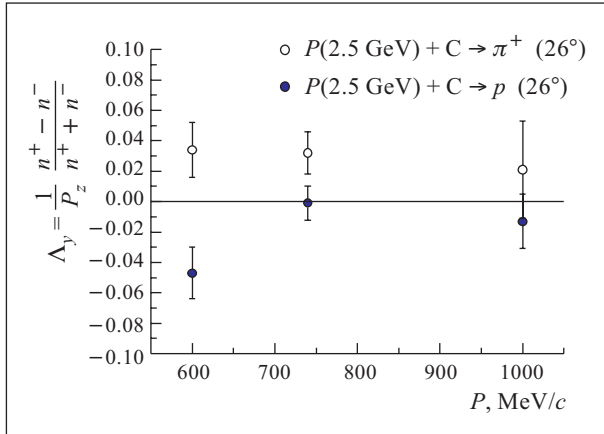


Рис. 6. Анализирующая способность для векторного поляризованного пучка

способностям при рождении  $\pi^+$ ,  $p$ ,  $d$  во взаимодействиях поляризованных протонов с энергией 3,3 ГэВ/с и тензорных поляризованных дейтронов с

энергией 5 ГэВ/с с углеродной мишенью на пучках синхрофазотрона. На рис. 6 приводятся основные результаты этих исследований.

Анализирующие способности в инклюзивных спектрах  $p$  и  $d$  при взаимодействии поляризованного протонного (3,3 ГэВ/с) и дейтронного (5,0 ГэВ/с) пучков с ядрами углерода измерены в импульсном интервале зарегистрированных частиц 0,6–1,2 ГэВ/с под углом  $26^\circ$ . Показано, что существующие интенсивности поляризованных пучков нуклотрона достаточны для планируемых исследований на установке МАРУСЯ.

В декабре 2003 г. на нуклотроне начато экспериментальное исследование рождения антиматерии. Получены первые данные по рождению антипротонов и  $K^-$  в реакциях  $p + \text{Pb}$ ,  $p + \text{Al}$ . Вторичные пучки, полученные на магнитооптическом спектрометре МАРУСЯ, обеспечивают экспериментальные условия для развития и испытания детекторов новых типов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДРУГИХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

### Эксперимент PHENIX

Специалисты ОИЯИ участвуют в этом проекте на всех стадиях. В 2003 г. с использованием пучков нуклотрона были проведены два тестовых испытания изготовленной части аэрогелевого детектора. Контейнеры для этой детекторной системы были разработаны и изготовлены в Опытном производстве ОИЯИ и поставлены в Брукхейвенскую национальную лабораторию. Детекторная система, состоящая из 80 аэрогелевых счетчиков, была собрана, установлена и испытана на западном плече установки PHENIX в 2003 г. (рис. 7). Весь аэрогелевый детектор площадью  $4 \text{ м}^2$  будет состоять из 160 индивидуальных черенковских счетчиков с аэрогелевыми радиаторами.

Аэрогелевый детектор предназначен для изучения событий с большими  $p_t$  с целью исследования эффекта гашения струй. Он проявляется в виде сильного подавления высокоимпульсной части в спектре передачи импульса для центральных  $\text{Au} + \text{Au}$ -соударений. Это подавление интерпретируется как результат больших потерь энергии в кварк-глюонной плазме в центральных столкновениях при энергиях RHIC [11]. Величина этого эффекта существенно различается для различного сорта частиц. Аэрогелевый детектор может дать дополнительную информацию для выяснения природы указанного эффекта, а

также свойств образующейся в столкновениях кварк-глюонной плазмы, если она существует. Последние результаты, полученные коллаборацией PHENIX с участием физиков ЛВЭ, опубликованы в работах [9–11].

### Эксперимент NA-49

*Наблюдение новых экзотических барионных резонансных состояний.* Результаты поиска резонансных состояний в спектрах инвариантных масс каналов  $\Xi^- \pi^-$ ,  $\Xi^- \pi^+$ ,  $\Xi^+ \pi^-$ ,  $\Xi^+ \pi^+$  в протон-протонных соударениях при  $\sqrt{s} = 17,2$  ГэВ представлены в [12]. Приведено свидетельство существования узкого  $\Xi^- \pi^-$  барионного резонанса с массой  $(1,862 \pm 0,002)$  ГэВ/с и шириной, меньшей разрешения детектора  $\sim 0,018$  ГэВ/с (рис. 8). Обнаруженный эффект превышает  $4,0\sigma$ . Это состояние является кандидатом на гипотетическое экзотическое  $\Xi^- \bar{\Xi}^- (3/2)$  барионное состояние с  $S = -2$ ,  $I = 3/2$  и кварковым составом  $(dsds\bar{u})$ . При той же массе наблюдается пик в  $\Xi^- \pi^+$ -спектре, который является кандидатом в члены  $\Xi^0 (3/2)$  этого изоспинового квартета с кварковым составом  $(dsus\bar{d})$ . Соответствующий антибарионный спектр также указывает на усиление при том же значении инвариантной массы.

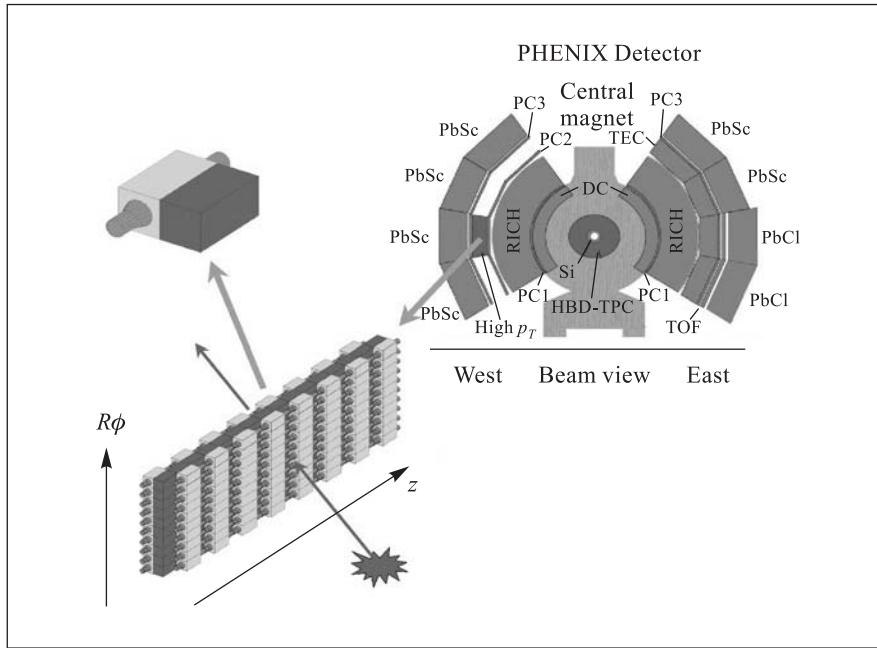


Рис. 7. Расположение аэрогелевой системы на установке PHENIX

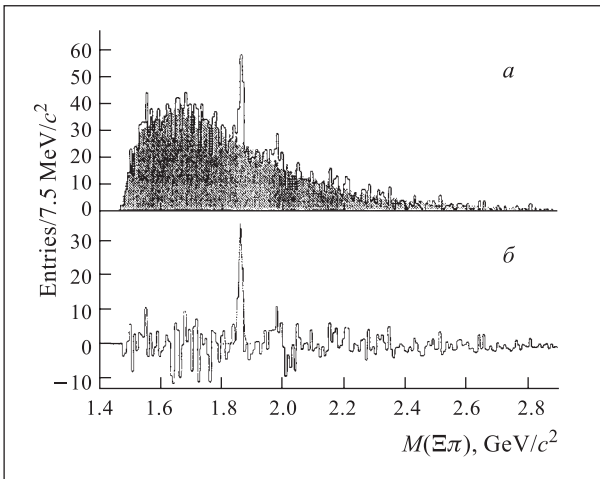


Рис. 8. *а)* Спектры суммы инвариантных масс  $\Xi^- \pi^-$ ,  $\Xi^- \pi^+$ ,  $\Xi^+ \pi^-$ ,  $\Xi^+ \pi^+$ . Заштрихованная гистограмма — фон, полученный путем перешивления событий. *б)* Спектр суммы инвариантных масс после вычитания фона. Сплошная линия — гауссова аппроксимация пика

*Наблюдение фазового перехода при деконфайнменте.* Группа специалистов из ЛВЭ отвечает за измерение и анализ спектров заряженных каонов и спектров протонов и дейтронов в Pb + Pb-соударениях при энергиях 20 и 30 А·ГэВ, а также за завершение программы сканирования по энергии (при энергиях пучка 20, 30, 40, 80 и 158 А·ГэВ).

Получены следующие основные результаты анализа спектров. Число рожденных пионов при нормировке на число нуклонов, участвующих в соударении, возрастает с ростом энергии и в  $pp$ -, и в

$NN$ -реакциях. Однако скорость возрастания числа рожденных пионов в  $NN$ -реакции становится выше в области энергии SPS, а затем стабилизируется при энергиях RHIC (рис. 9, *а*). Наиболее драматичный эффект наблюдается в энергетической зависимости отношения  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  средних множественностей  $K^+$ - и  $\pi^+$ -мезонов, рожденных в центральных Pb + Pb-соударениях (рис. 9, *б*). Третий важный результат состоит в том, что температура  $K^+$ -мезонов в центральных Pb + Pb-соударениях при энергиях SPS является постоянной (рис. 9, *в*).

На основании этих результатов можно предположить, что фазовый переход при деконфайнменте существует и что в Pb + Pb-соударениях он начинает проявляться в области энергий SPS.

Самые последние результаты, полученные коллаборацией NA-49 с участием физиков ЛВЭ, опубликованы в работах [12–15].

### Эксперимент NA-45

Завершена обработка данных 31 млн событий соударений Pb + Au при энергии 158 А·ГэВ. Проведенный анализ прогнуположно направленных корреляций заряженных адронов и пионов с большим  $p_t$ , учитывающий направленный поток ( $v_2$ ) и НВТ-коррекции, указывает на значительный вклад компоненты ненаправленного потока, происходящей, возможно, из полужестких процессов (см. рис. 10).

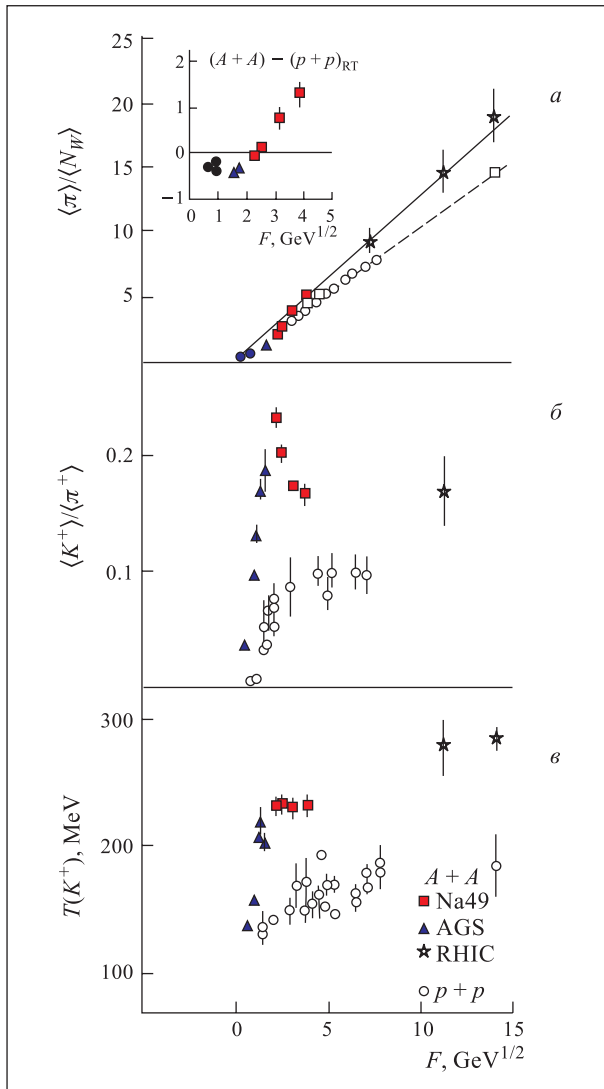


Рис. 9. Зависимость от энергии соударения скоростей рождения различных адронов, измеренных в центральных Pb + Pb- и Au + Au-соударениях (темные символы) по сравнению с результатами, полученными для реакций  $p+p$  (светлые кружки). Изменения в области энергий SPS (темные квадраты) предполагают начало фазового перехода деконфайнмента.  $F = \sqrt{S_{NN} - 2m_0}^{3/4} / (\sqrt{S_{NN}})^{1/4} \approx \sqrt{S_{NN}}$ , где  $m$  — масса нуклона

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На материалах, полученных с помощью двухмерной пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ, проведен анализ  $\pi^-$ -мезонных спектров в СС- и СТ-взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон в переменных светового фронта. При высоких энергиях различные динамические механизмы дают вклад

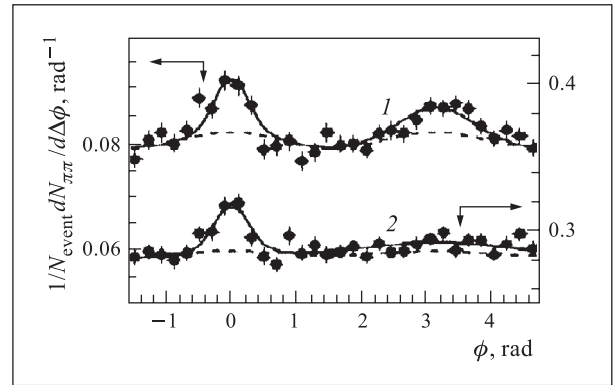


Рис. 10. Распределения угла разлета пары пионов при  $p_t > 1,2$  ГэВ/с для первого выделенного диапазона центральности (24–30 %) (1), для четвертого выделенного диапазона центральности (11–15 %) (2). Применялись условия отбора  $\Delta\phi \geq 20$  мрад и поправки на потери эффективности узких пар. Сплошная линия — гауссова аппроксимация к полужестким компонентам, связанным с модулированным потоком, фон показан пунктирной линией

Анализ зависящего от центральности НВТ при различных значениях энергии показывает, что происходит термальное охлаждение в виде образования пионов при постоянном среднем свободном пробеге  $\lambda_f \sim 1,0$  фм, что означает существенную непрозрачность источника пионов. Эти исследования исключительно интересны в настоящее время, поскольку RHIC претендует на открытие явления гашения струи в области применимости pQCD.

## Проект LNS

Получены финальные данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$  и  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  под углом  $0^\circ$  при энергиях 140, 200 и 270 МэВ. Получены предварительные данные по тензорной  $A_{yy}$  и векторной  $A_y$  анализирующим способностям реакций  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ ,  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  и  $dd \rightarrow pX$  при энергии 270 МэВ. Результаты представлены на конференциях [18, 19].

ший импульс и резко анизотропное угловое распределение в с.ц.м.). При проведении исследований в рамках этого подхода встает проблема разделения указанных компонент. Использование переменных светового фронта дает такую возможность:

$$\xi^{\pm} = \pm \frac{E + |P_z|}{\sqrt{s}} \text{ и } \zeta^{\pm} = \ln |\xi^{\pm}|,$$

здесь  $E$  и  $P_z$  — энергия и  $z$ -компонента импульса частицы.

Было проанализировано 9500 «полуцентральных» СС-событий и 1620 СТА-событий, в таких событиях насчитывалось соответственно 20477  $\pi^-$ -мезонов и 11318  $\pi^{\pm}$ -мезонов.

Угловые распределения пионов в области  $|\zeta^{\pm}| > |\tilde{\zeta}^{\pm}|$  близки к изотропным, в то время как распределения пионов в области  $|\zeta^{\pm}| < |\tilde{\zeta}^{\pm}|$  резко ани-

тропные. Наклоны  $p_t^2$ -распределений пионов также сильно различаются в двух рассматриваемых областях. Пионы из области  $|\zeta^{\pm}| > |\tilde{\zeta}^{\pm}|$  имеют небольшие импульсы (до 0,5 ГэВ/с) в отличие от пионов из области  $|\zeta^{\pm}| < |\tilde{\zeta}^{\pm}|$ .

Таким образом, величины  $\zeta^{\pm}$  могут служить границами двух областей с существенно различными характеристиками пионов.

Характеристики пионов, полученные в области  $|\zeta^{\pm}| > |\tilde{\zeta}^{\pm}|$ , позволяют предположить наличие термального равновесия в этой области. Сравнение этих характеристик с предсказаниями статистической модели дало возможность получить температуры  $T = (80 \pm 10)$  МэВ для  $\pi^-$  из СС-взаимодействий и  $T = (62 \pm 3)$  МэВ для  $\pi^-$  из СТА-взаимодействий [17].

## ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2003 г. был проведен анализ трех сеансов облучения установки «Гамма-2» на протонных пучках нуклотрона и измерения радиоактивных образцов с установки. Установка включала в себя свинцовую мишень диаметром 8 см и длиной 20 см, окруженную парафиновым замедлителем толщиной 6 см. Первые два сеанса облучения были завершающими для вышеуказанной геометрии, и, третий, декабрьский сеанс проводился уже с мишенью длиной 40 см. Итогом анализа полученных результатов явились надежные данные о скоростях трансмутации таких радиотоксичных компонентов отработанного ядерного топлива, каковыми являются  $^{129}\text{I}$  и  $^{237}\text{Np}$ , а также кос-

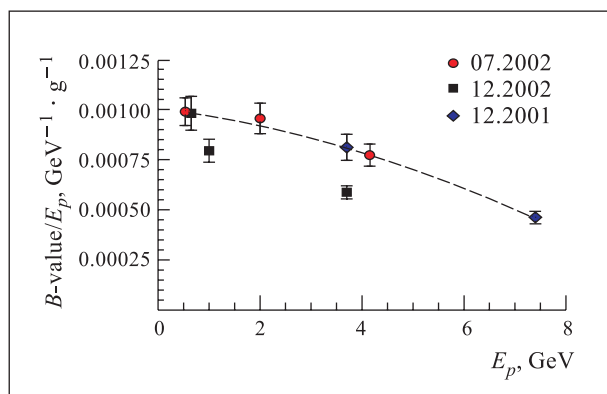


Рис. 11. Эффективность трансмутации ( $B/E_p$ ) в реакции  $^{237}\text{Np}(n, \gamma)^{238}\text{Np}$  при различных энергиях протонов. Широко используемый параметр  $B$  определен как число трансмутировавших ядер на массу образца (в граммах) и на один протон

венная оценка потока нейтронов при помощи радиоактивного индикатора  $^{139}\text{La}$ . Энергетический диапазон составил  $0,5 \leq E_p \leq 4,15$  ГэВ (см. рис. 11).

Впервые в ходе работ по проекту в 2003 г. был апробирован метод пороговых реакций для восстановления спектра нейтронов. Набор активационных образцов (например,  $^{209}\text{Bi}$ ) размещался на поверхности парафинового замедлителя установки «Гамма-2» и облучался в потоке вторичных нейтронов. Затем гамма-лучи, сопровождающие распад образовавшихся продуктов реакции, например ( $n, xn$ ), измерялись методом гамма-спектроскопии, и рассчитывались соответствующие скорости реакций (R-факторы). На их основе восстанавливались спектры нейтронов высоких энергий (до 200 МэВ). Обнаружено, что полученные спектры нейтронов не находятся в согласии с имеющимися теоретическими моделями, а также со спектрами нейтронов, полученными другими методами, использующими в качестве опорного модельный спектр (см. рис. 12).

В декабрьском сеансе было проведено облучение установки «Гамма-2» при энергиях 1, 1,5 и 2 ГэВ, причем длина мишени и замедлителя была увеличена до 50 см.

В качестве самостоятельной задачи было проведено облучение образца  $^{232}\text{Th}$  на прямом протонном пучке с энергией 1 ГэВ, и затем на протяжении четырех месяцев проводились измерения гамма-активности с использованием HPGe-детектора высокого разрешения. Такие данные представляют большой интерес для исследования процесса ядерной фрагментации и развития ядерных моделей и



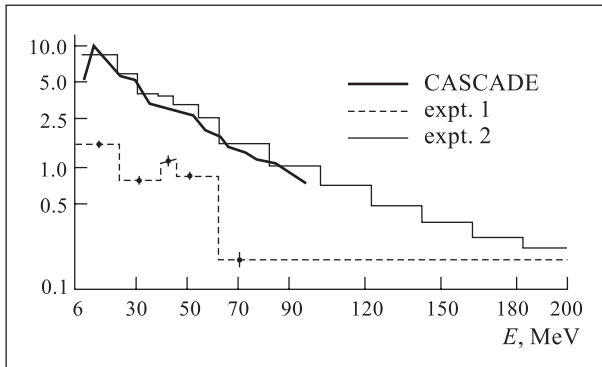


Рис. 12. Спектры нейтронов на поверхности парафинового замедлителя установки «Гамма-2», полученные экспериментально и рассчитанные теоретически. Здесь «expt. 1» обозначает наши эксперимент и метод; «expt. 2» — наше измерение, использующее другой метод восстановления спектров; CASCADE — расчет, выполненный профессором В. С. Барашенковым

программ. Кроме того, выбор  $^{232}\text{Th}$  в качестве объекта исследования продиктован возможностью его использования в качестве компонента мишени ускорительно-бланкетных систем будущего.

В ходе работ по теме был освоен активационный метод с использованием высокочистого германиевого детектора с разрешением 2 кэВ и эффективностью 15%. Его кристалл имеет следующие параметры: диаметр 60,5 мм, длина 33 мм. Спектры анализировались с использованием компьютерных кодов Artes, GAMMAW и DEIMOS. Данная методика является сравнительно новой для ЛВЭ.

Была также развита методика твердотельных трековых детекторов и их автоматического сканирования.

Все физические и методические результаты регулярно докладываются на конференциях и публикуются в научной печати. В рамках темы осуществляется широкое международное сотрудничество.

Некоторые другие результаты, полученные сотрудниками Лаборатории высоких энергий, приведены в работах [20–25].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malakhov A. I. Selected Problems of Relativistic Nuclear Physics and Multiple Particle Production // Proc. of the XXXII Intern. Symp. on Multiparticle Dynamics, Alushta, Ukraine, Sept. 7–13, 2002. Singapore, 2003. P. 348–352.

2. Malakhov A. I. Selected Problems of Relativistic Nuclear Physics // Proc. of Intern. Conf. «Hadron Structure-2002», Herlany, Slovak Republic, Sept. 23–27, 2002. Kosice, 2003. P. 188–203.
3. Kovalenko A. D., Butenko A. V. The Nuclotron — New Superconducting Ion Synchrotron at JINR // Proc. of the Second Intern. COSPAR Colloquium «Radiation Safety for Manned Mission to Mars», Dubna, Russia, Sept. 28 – Oct. 02, 2003.
4. Аганов Н. Н., Коваленко А. Д., Малахов А. И. // АЭ. 2002. Т. 93, вып. 6. С. 479–485.
5. Donets E. D. et al. // Rev. Sci. Instr. 2002. V. 71. P. 679.
6. Donets E. D. et al. // 18th Intern. Conf. on Ion Sources, Dubna, Russia, Sept., 2003 (in press).
7. Bradnova V. et al. Nuclear Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation // Few-Body Syst. Suppl. 2003. V. 14. P. 241–244.
8. Adamovich M. I. et al. Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Processes // Part. Nucl., Lett. 2003. No. 2[117]. P. 29–33.
9. Adler S. S. et al. Absence of Suppression in Particle Production at Large Transverse Momentum in  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV  $d + \text{Au}$  Collisions // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 072303.
10. Adler S. S. et al. Scaling Properties of Proton and Anti-Proton Production in  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV Au + Au Collisions // Ibid. P. 172301.
11. Adler S. S. et al. Suppressed  $\pi^0$  Production at Large Transverse Momentum in Central Au + Au Collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV // Ibid. P. 072301.
12. Alt C. et al. (NA49 Collab.). Observation of an Exotic  $S = -2$  and  $Q = -2$  Barion Resonance in Proton-Proton Collisions at the CERN-SPS. hep-ex/0310014; Phys. Rev. Lett. (submitted).
13. Afanasiev S. V. et al. (NA49 Collab.). Bose–Einstein Correlations of Charged Kaons in Central Pb + Pb Collisions at  $E_{\text{beam}} = 158$  GeV per Nucleon // Phys. Lett. B. 2003. V. 557. P. 157–166.
14. van Leeuwen M. et al. (NA49 Collab.). Recent Results on Spectra and Yields from NA49 // Nucl. Phys. A. 2003. V. 715. P. 161c–170c.
15. Hohe C. et al. (NA49 Collab.). System Size Dependence of Strangeness Production at 158 A-GeV // Ibid. P. 474c–477c.
16. The Programme of the Scientific Research and Development of Joint Institute for Nuclear Research for the Years 2003–2009. Dubna, 2003.
17. Chkhaidze L. V. et al. JINR Preprint E1-2003-67. Dubna, 2003.
18. Ladygin V. P. et al. Energy Dependence of the Tensor Analyzing Power  $T_{20}$  in the  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$  and  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  Reactions // Proc. of SPIN'03 Int. Workshop, Dubna, Sept. 16–20, 2003 (in press).

19. Janek M. *et al.* Tensor  $A_{yy}$  and Vector  $A_y$  Analyzing Powers for  $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$  and  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$  Reactions at 270 MeV // *Ibid.*
20. Космачев О.С. Ковариантная формулировка волнового уравнения для дублета массивных нейтральных лептонов. Препринт ОИЯИ Р4-2003-127. Дубна, 2003; *J. Phys. A* (направлено).
21. Голохвастов А.И. Независимое рождение  $\pi^-$ -мезонов в  $pp$ -взаимодействиях. Препринт ОИЯИ Р2-2003-52. Дубна, 2003.
22. Azhgirey L. S. *et al.* Intermediate-Energy Polarimeter for the Measurement of the Deuteron and Proton Beam Polarization at the JINR Synchrophasotron // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 497. P. 340–349.
23. Afanasiev S. *et al.* // *Nucl. Phys. A*. 2003. V. 721. P. 645–648.
24. Azhgirey L. S. *et al.* Measurement of the Differential Cross-Section, Vector and Tensor Analyzing Powers of the 4.5-GeV/c Deuteron Breakup on  ${}^9\text{Be}$  with the Proton Emission at 80 mrad // *Phys. At. Nucl.* 2003. V. 66. P. 690; *Yad. Fiz.* 2003. V. 66. P. 719.
25. Afanasiev S. *et al.* Fragmentation of Polarized Deuteron into High Momentum Mesons as Source of Spin Information of Deuteron Core Structure // *Proc. of the 16th Intern. Conf. on Part. and Nucl. (PANIC'02)*, Osaka, Japan, Sep. 30 – Oct. 4, 2002; *Nucl. Phys. A*. 2003. V. 721. P. 645.