

ЛАБОРАТОРИЯ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ
ИМ. Н.Н.БОГОЛЮБОВА

ЛАБОРАТОРИЯ
ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
ИМ. В.П.ДЖЕЛЕГОВА

ЛАБОРАТОРИЯ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ОИЯИ

2000

ЛАБОРАТОРИЯ
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
ИМ. Г.Н.ФЛЕРОВА

ЛАБОРАТОРИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ
НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ
ИМ. И.М.ФРАНКА

ЛАБОРАТОРИЯ
ФИЗИКИ
ЧАСТИЦ

ОТДЕЛЕНИЕ
РАДИАЦИОННЫХ
И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

УЧЕБНО-
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ

ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Основу научной программы ЛВЭ в настоящее время составляют исследования взаимодействий релятивистских ядер в энергетической области от нескольких сотен МэВ до нескольких ТэВ на нуклон с целью поиска проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, асимптотических законов для ядерной материи и изучение спиновой структуры легчайших ядер. Эксперименты в этом направлении проводятся с использованием ускорительного комплекса синхрофазотрон–нуклотрон, а также на ускорителях в ЦЕРН (SPS, LHC), в Брукхейвенской национальной

лаборатории (RHIC), в GSI (SIS) в Дармштадте и на накопительном кольце CELSIUS в Упсале.

В последнее время программа исследований переходит в большей степени на нуклотрон, а синхрофазотрон используется практически только для исследований с поляризованным дейтронным пучком. Нуклотрон создан на основе уникальной технологии сверхпроводящих магнитных систем, которые были предложены и исследованы в лаборатории [1]. В ближайшем будущем планируется получить поляризованный пучок на нуклотроне.

РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

До 1999 г. для физических экспериментов, проводимых на нуклотроне, использовался только внутренний пучок. В конце 1999 г. получен выведенный пучок нуклотрона с помощью системы медленного вывода пучка, созданной на основе сверхпроводящих элементов. В настоящее время начаты первые эксперименты на выведенном пучке нуклотрона.

На нуклотроне проведена модернизация схемы криогенных гелиевых установок КГУ-1600/4,5. Предварительное охлаждение потока сжатого гелия посредством жидкого азота заменено адиабатическим расширением в дополнительно установленных турбодетандерах. В результате первых испытаний в 18 сеансе работы нуклотрона, проходившем с 16 ноября по 10 декабря 2000 г. вместо планируемого при обычной схеме работы расхода жидкого азота в объеме 357 т было израсходовано 236 т (см. рис. 1). При дальнейшей доводке системы экономия жидкого азота удвоится.

Проведенная модернизация не только существенно уменьшила стоимость работы ускорителя, но и сняла ограничения по длительности сеансов из-за дефицита жидкого азота: его расход на нужды нуклотрона перестал превосходить производительность азотного цеха ОГЭ. Общее время работы сверхпроводящего ускорителя в 2000 г. составило 949 часов.

Продолжительность работы синхрофазотрона — 384 часа. Затраты компенсировались потребителями пучков. Основным условием работы синхрофазотрона является привлечение средств заинтересованных пользователей. Это прежде всего потребители пучков поляризованных дейтронов. По-прежнему имеется большой интерес к традиционным пучкам легких релятивистских ядер.

В первых сеансах работы нуклотрона с выведенным пучком для физических исследований были использованы две основные экспериментальные установки «Стрела» и СКАН-2. Одновременно продолжают эксперименты на внутреннем пучке нуклотрона.

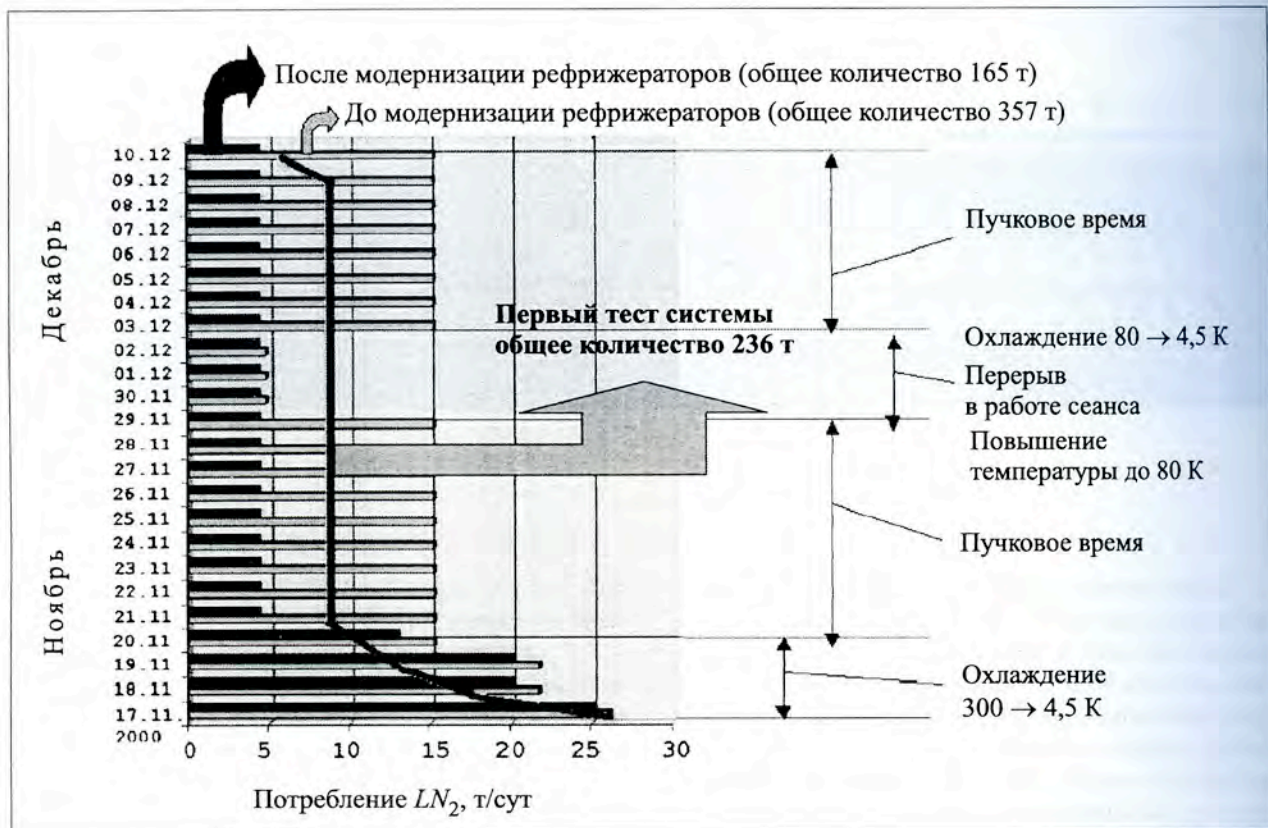


Рис. 1. Планируемый расход жидкого азота при обычной схеме работы и при экономичной схеме в 18-м сеансе работы нуклотрона

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЫВЕДЕННОМ ПУЧКЕ НУКЛОТРОНА

Эксперимент «Стрела» (руководители Глаголев В.В. и Пискунов Н.М.). Спектрометр «Стрела», включающий жидководородную мишень, анализирующий магнит и линейку из девяти сцинтилляционных и черенковских счетчиков, был подготовлен к работе на выведенном пучке нуклотрона. Проведены два сеанса облучения в марте и декабре 2000 г. Основной задачей является изучение зарядово-обменных процессов в реакции $dp \rightarrow (pp)n$ с целью определения вклада спин-зависящей части амплитуды элементарной np -перезарядки при импульсах дейтрона 3–4 ГэВ/с. Из-за больших размеров пучка в первых сеансах не удалось использовать водородную мишень и вся работа была проведена с мишенью из полиэтилена. Установка была выставлена на направление протонов стриппинга под углом нуль градусов с импульсом 1,75 ГэВ/с, что составляет половину импульса выведенных из ускорителя дейтронов для этого эксперимента.

Магнитный спектрометр «Стрела» с небольшим угловым акцептансом ($0,5^\circ$) позволяет при изменении тока в анализирующем магните настроиться на максимум кривой стриппинга. На рис. 2 приведено рас-

пределение по амплитудам сигналов с одного из черенковских счетчиков. Видно, что даже с одного черенковского счетчика при амплитудном разрешении 18,4 % можно выделить события с двумя протонами на уровне $3 \cdot 10^{-3}$. В спектрометре «Стрела» используется пять таких счетчиков.

Во втором сеансе работы установка также экспонировалась в пучке ядер углерода с импульсом 1,75 ГэВ/с/нуклон. На рис. 3 приведено двумерное распределение амплитуд с двух черенковских счетчиков. Получено хорошее разделение фрагментов по зарядам. Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность использования спектрометра «Стрела» для более широкого круга физических задач.

Установка **СКАН-2** (руководитель Афанасьев С.В.) предназначена для изучения длины формирования протона в реакции $d + A_T \rightarrow p_1(0^\circ) + p_2(0^\circ) + X$. Также в сеансах нуклотрона в 2000 г. с выведенным пучком дейтронов на установке СКАН-2 была получена экспериментальная информация, которая в настоящее время находится в процессе анализа.

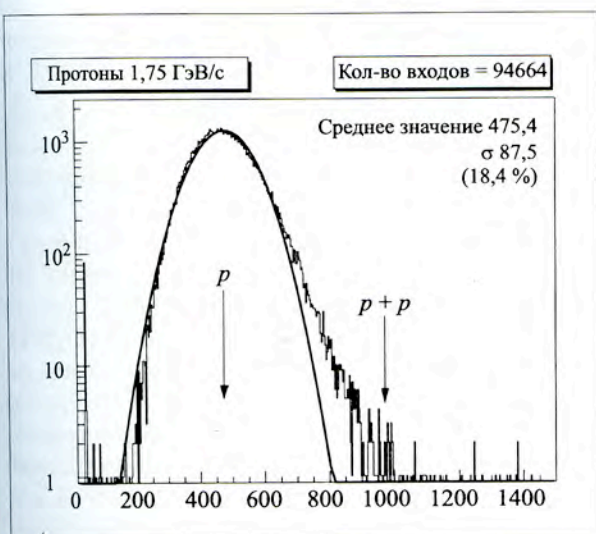


Рис. 2. Распределение по амплитудам сигналов с одного из черенковских счетчиков

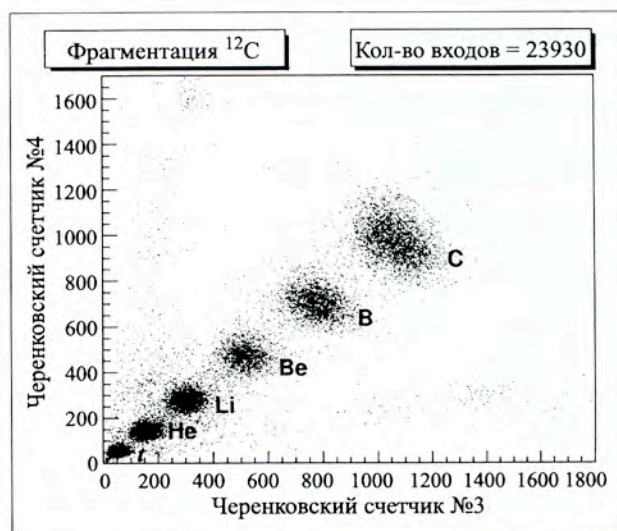


Рис. 3. Двумерное распределение амплитуд с двух черенковских счетчиков

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВНУТРЕННЕМ ПУЧКЕ НУКЛОТРОНА

В процессе исследования находится фрагментация мишени в два кумулятивных протона с помощью установки **СКАН-1** (руководитель Афанасьев С.В.) на внутреннем пучке нуклотрона. Целью эксперимента является измерение поперечного размера области ядро-ядерных взаимодействий. Используется метод измерения корреляций кумулятивных протонов, испущенных при малых относительных импульсах. Корреляции протонов, испущенных в угловом интервале $106-112^\circ$ в лабораторной системе, изучаются в реакциях $dC \rightarrow p + p + X$ и $dCu \rightarrow p + p + X$ ($p_d = 2 A$ ГэВ). В результате этих измерений были получены приблизительно одинаковые радиусы для dC - и dCu -взаимодействий: $r_{dC} = 3,0^{+0,5}_{-0,4}$ фм и $r_{dCu} = 2,6^{+0,8}_{-0,7}$ фм. Эти исследования будут продолжены для другого набора падающих частиц и мишеней.

Группа коллаборации **МАРУСЯ** (руководитель Балдин А.А.) начала исследования выхода вторичных фрагментов в результате взаимодействия внутреннего пучка нуклотрона с тяжелыми мишенями, используя тонкий полупроводниковый детектор. Эта группа получила хорошее разделение вторичных фрагментов

(рис. 4). Данные находятся в процессе анализа и будут использованы для изучения эффекта полного разрушения ядер, так как энергии вторичных фрагментов очень низкие.

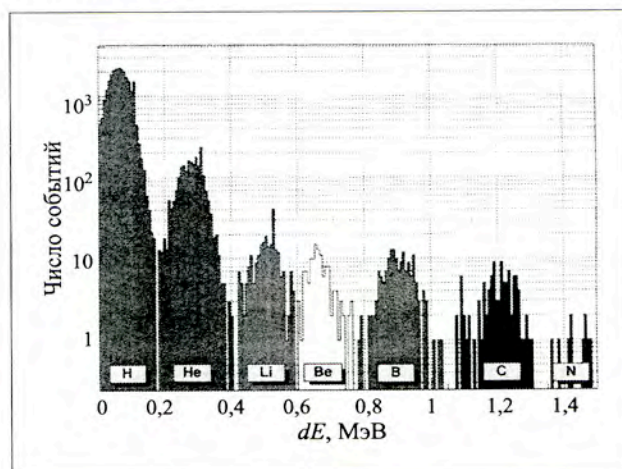


Рис. 4. Разделение вторичных фрагментов с очень низкими энергиями в области от 2 до 25 МэВ в dAu -взаимодействии при энергии дейтронов 1,044 ГэВ

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ЛВЭ

Проект «Сфера». Многие свойства атомных ядер можно описать в рамках нуклонной модели. Ясно также, что нуклонная модель имеет ограниченную область применимости. Проявлений нуклон-

ных степеней свободы естественно ожидать для конфигураций ядра, когда нуклоны разделены расстояниями, сравнимыми с их размерами. В теоретическом плане вопрос описания состояния двух нукло-

нов на малых расстояниях связан с такими до конца не решенными вопросами, как проблема конфайнмента (КХД больших расстояний) и описания связанных состояний частиц с релятивистскими импульсами (малым расстояниям отвечают большие импульсы). При этом дейтрон как самое простое ядро («атом водорода» для ядерной физики) представляет особый интерес. Из-за нетривиальной спиновой структуры дейтрона (примесь D -волны) эксперименты с поляризованными дейтронами предоставляют большие возможности по изучению указанных эффектов. Нуклонная модель дейтрона дает широкий спектр предсказаний для реакций с поляризованными дейтронами. В качестве примера можно привести данные по изучению тензорной анализирующей способности T_{20} для реакции развала тензорно-поляризованных дейтронов $D \uparrow + A_t = p + X$. В экспериментах, проведенных в Сакле и Дубне, было показано, что T_{20} имеет заметную величину и описывается расчетами в импульсном приближении до внутренних импульсов $k \leq 0,2-0,3$ ГэВ/с. Однако к настоящему времени нет расчетов в рамках нуклонной модели, описывающих данные по T_{20} во всей измеренной области.

Отклонения экспериментальных данных от расчетов могут быть связаны с проявлением ненуклонных степеней свободы для малых расстояний ($k = 0,5$ ГэВ/с соответствует расстоянию $l = 0,4$ фм). В таком случае естественно в качестве пробника использовать адроны с отличным от протона кварковым содержанием. Это один из аргументов в пользу проведения на пучке поляризованных дейтронов ЛВЭ ОИЯИ (имеющих самую высокую в мире энергию) измерений по изучению поляризационных наблюдае-

мых для реакции фрагментации тензорно-поляризованных дейтронов в пионы $D \uparrow + A_t = \pi(0^\circ) + X$. В проведении этих измерений принимали участие физики из Болгарии, Японии и некоторых институтов России. Результаты для тензорной анализирующей способности T_{20} [2, 3] представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что T_{20} имеет малую, по сравнению с предсказаниями нуклонной модели, величину [4]. Для таких процессов ненулевая величина T_{20} связана с анизотропией волновой функции дейтрона (ДВФ). В рамках нуклонной модели невозможно понять, почему D -волна (в некоторых моделях и P -волна) не проявляет себя, как это происходит в реакции развала дейтрона. Следует отметить, что роль перерассеяний для пионов заметно меньше, чем для протонов, хотя бы из-за меньшей величины пион-нуклонного сечения, по сравнению с нуклон-нуклонным.

Для прояснения механизма реакции в сеансе 2000 г. коллаборацией были проведены измерения тензорной анализирующей способности A_{yy} для реакции фрагментации дейтронов в кумулятивные пионы под углами, не равными нулю градусам. Физический смысл A_{yy} близок к физическому смыслу T_{20} (для нулевых углов имеется равенство $A_{yy} = -\sqrt{2}T_{20}$). Предварительные данные (полученные в on-line) показаны на рис. 6. Видно, что A_{yy} имеет заметную величину, связанную (как отмечалось выше) с анизотропной частью ДВФ. Однако данные не следуют предсказаниям (другой знак) нуклонной модели. Следует отметить, что дополнительные к импульсному приближению механизмы (вроде перерассеяний), если они играют какую-то роль, скорее всего, должны привести к уменьшению абсолютной величины A_{yy} .

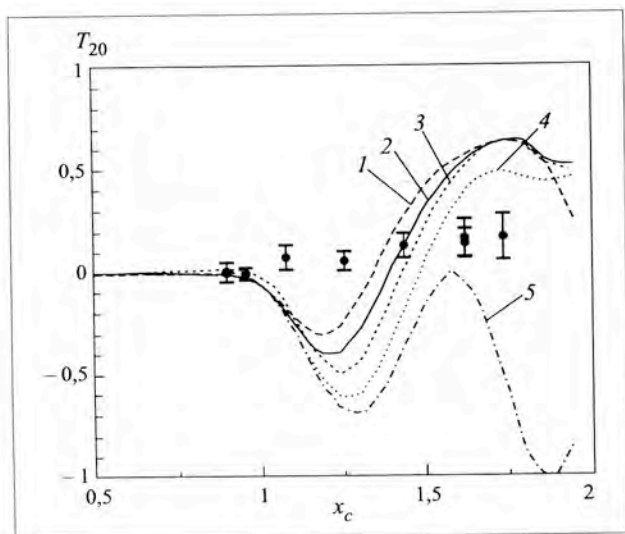


Рис. 5. Тензорная анализирующая способность T_{20} для реакции фрагментации дейтронов в пионы [2, 3]. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными при импульсе налетающего протона $P_p = 4,45$ ГэВ/с. 1 — ДВФ; 2 — Париж; 3 — $\rho_{NN} = 1$; 4 — Бонн (полный); 5 — Бонн (релят.)

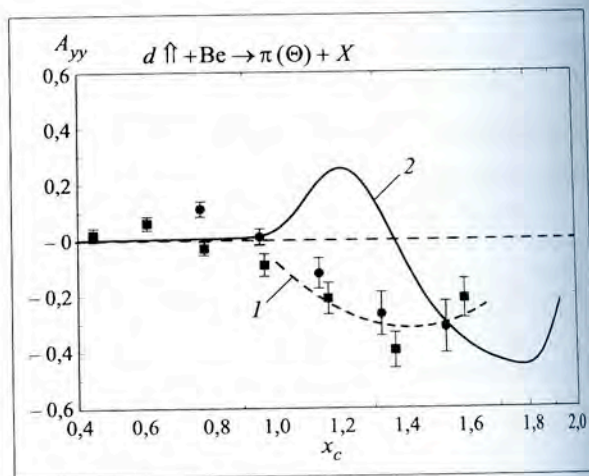


Рис. 6. Тензорная анализирующая способность A_{yy} для реакции фрагментации дейтронов в пионы под углами, не равными 0° (предварительные результаты). 1 — аппроксимация экспериментальных данных квадратичной зависимостью; 2 — вычисления в импульсном приближении [4]; ■ — 180 мрад; • — 135 мрад

Если рассматривать данные для T_{20} (рис. 5), полученные под нулевыми углами, и данные для A_{yy} (рис. 6), полученные под углами, не равными нулю градусов, возникают следующие вопросы: почему T_{20} имеет малую величину, как это должно быть для почти изотропного источника пионов, и в то же время A_{yy} имеет большую абсолютную величину, как это должно быть для сильно изотропного источника? Почему знак A_{yy} противоположен предсказаниям, полученным в рамках нуклонной модели?

В качестве очевидного ответа можно заключить, что для таких больших внутренних импульсов ($k \geq 0,5$ ГэВ/с) следует учитывать ненуклонные степени свободы. Другими словами, для описания структуры кора дейтрона нужны более совершенные модели дейтрона, учитывающие внутреннюю структуру составляющих его нуклонов (типа кварковой кластерной модели с учетом спина).

Кроме того, для понимания ненуклонной структуры необходимо получить информацию для аналогичных наблюдаемых при фрагментации дейтронов в адроны с отличными от пиона квантовыми числами. В этом отношении особенно интересны K^- -мезоны, состоящие из валентных кварков, не входящих в состав валентных кварков ядра. В методических измерениях было показано, что регистрация K^- -мезонов возможна на имеющейся установке, но для измерений с требуемыми точностями необходимо проведение более длительных (около месяца) сеансов с поляризованными пучками на ускорительном комплексе ЛВЭ.

Эксперимент МГУ-«Сфера». На синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ начат эксперимент по изучению рассеяния поляризованных протонов на внутриядерных нуклонах. Это работа выполняется в рамках экспериментальной программы «Лидирующие частицы» физиками НИИ ядерной физики Московского государственного университета и ЛВЭ ОИЯИ. Основная задача эксперимента состоит в измерении подавления анализирующей способности при рассеянии на внутриядерных нуклонах по сравнению со свободными. Это позволит осуществить критическую проверку описания адрон-ядерного взаимодействия в рамках РИА-модели, которая предсказывает значительные спиновые эффекты в исследуемом явлении, и получить новую информацию о кластеризации нуклонов. Кроме того, эти измерения необходимы в методическом отношении для конструирования и оптимизации углеродных поляриметров, работающих в области энергий порядка нескольких ГэВ.

Для формирования пучка поляризованных протонов используется методика стриппинга поляризованных дейтронов, развитая в 1992–1995 гг. на экспериментальной установке СМС МГУ. Поляризация пучка постоянно контролируется дополнительным пучковым поляриметром. Во время первого сеанса была измерена анализирующая способность в реакции

$d \uparrow + C \rightarrow p_L + X$ (включая контрольное измерение на водороде (полиэтиленовая мишень)) для двух значений начальной энергии и ряда значений импульса лидирующего протона. Полученные данные были представлены на Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2000).

Целью проекта «Фаза» является исследование механизма «ядерной тепловой мультифрагментации», вызываемой легкими релятивистскими пионами. В работах коллаборации «Фаза» в 1994 г. было впервые доказано, что этот процесс является новым многотельным типом распада очень горячих ядер, а не последовательным независимым испарением частиц. Это было сделано путем тонких измерений угловых корреляций для фрагментов промежуточной массы (ФПМ, $2 < Z < 20$). В 2000 г. упор сделан на изучение энергетических спектров ФПМ, так как они отражают геометрию и динамику (расширение) источника фрагментов. Путем сравнения данных, полученных для соударений протонов, ^4He и ^{12}C с Au, показано, что с увеличением массы бомбардирующей частицы наблюдается переход от чисто статистического процесса к более сложному, с проявлением коллективного потока. Анализ коллективной компоненты кинетической энергии ФПМ дает информацию о пространственном распределении фрагментов в системе.

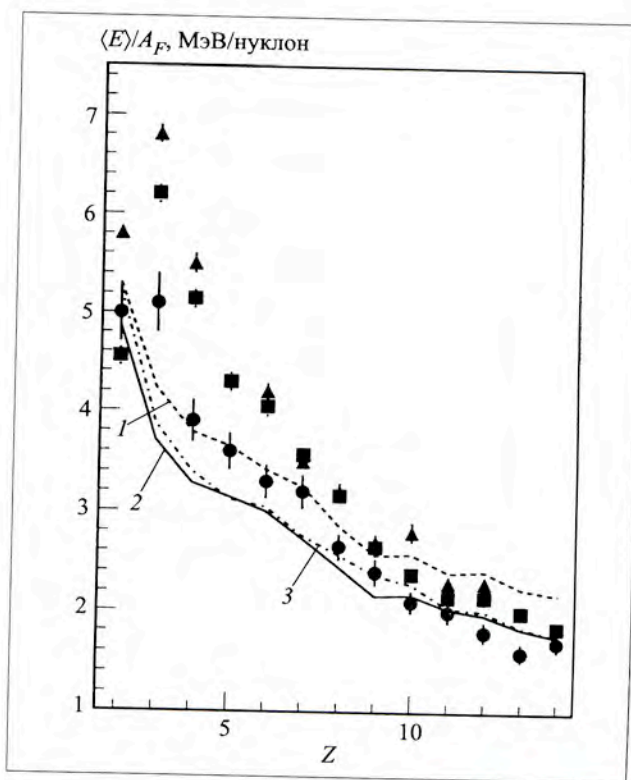


Рис. 7. Средние кинетические энергии на нуклон для фрагментов с зарядом Z , измеренные под углом $\theta = 89^\circ$ для соударений p (8,1 ГэВ) + Au (1, ●), ^4He (14,6 ГэВ) + Au (2, ■) и ^{12}C (22,4 ГэВ) + Au (3, ▲). Линии получены с помощью комбинированной модели INC* + CMM в предположении отсутствия коллективного потока

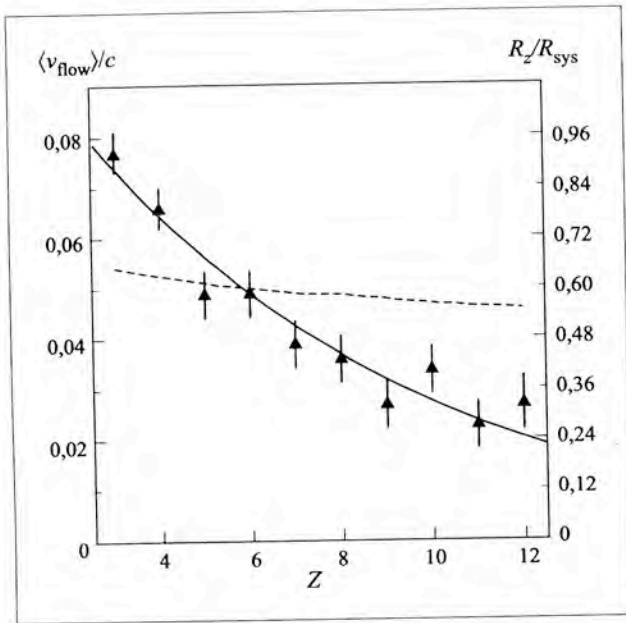


Рис. 8. Экспериментальные значения средней скорости потока фрагментов с зарядом Z (\blacktriangle) для соударений $^{12}\text{C} + \text{Au}$ (левая шкала). Правая шкала — средние относительные радиальные координаты фрагментов, полученные в предположении линейного радиального профиля скорости расширения системы. Пунктирная линия — средние радиальные координаты фрагментов, предсказываемые СММ

Эксперименты выполнены с использованием 4п-установки «Фаза» на пучке синхрофазотрона ОИЯИ. Рис. 7 показывает величины средних энергий на нуклон для фрагментов, возникающих в соударениях p (8,1 ГэВ), ^4He (14,6 ГэВ) и ^{12}C (22,4 ГэВ) с Au. Расчетные значения $\langle E \rangle / A_{\text{MF}}$ (линии) получены с помощью комбинированной модели, включающей эмпирически модифицированный внутриядерный каскад (INC*) и статистическую модель мультифрагментации (СММ) [5]. Для протонного пучка измеренные энергии близки к расчетным значениям, но данные

для пучков ^4He и ^{12}C заметно превышают как расчетные величины, так и полученные для p -Au-соударений. Это превышение связано с радиальным коллективным потоком, вызванным тепловым давлением в системе (спектатор мишени), которая оказывается более горячей в случае более тяжелых бомбардирующих частиц. Величина потока находится как разница измеренной энергии ФПМ и рассчитанной в модели без какого-либо потока (см. рис. 7) [5, 6]. Для соударений C с Au энергия потока уменьшается с ростом Z фрагмента от ~ 2 МэВ/нуклон для Be до $\sim 0,4$ МэВ/нуклон для Ne.

Соответствующие значения средних скоростей потока для различных фрагментов представлены на рис. 8. Правая шкала дает средние относительные радиальные координаты фрагментов. Они получены в предположении «самоподобного» радиального расширения, когда локальная скорость линейно зависит от расстояния частицы до центра масс системы. Пунктирная линия показывает средние радиальные координаты фрагментов согласно СММ. Наблюдается значительное отклонение данных от предсказаний СММ, что может быть вызвано тем, что модель предполагает равномерное распределение плотности и, следовательно, практически одинаковую вероятность образования фрагментов в любой доступной точке системы в момент развала. Из данных следует, что это не так: более тяжелые фрагменты преимущественно образуются ближе к центру системы.

Проведенные исследования указывают на то, что несмотря на общий успех СММ описание условий в момент развала системы слишком упрощено. Исследование энергетических спектров фрагментов является эффективным способом получения информации о конфигурации и динамике ядерной системы в момент развала. В этом аспекте следует рассматривать и работу [7], посвященную изучению корреляции между формой энергетического спектра фрагментов и их множественностью.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Предложено обобщение корректного KNO-скейлинга, позволяющее описать распределения по множественности как π^+ , так и π^- -мезонов в разных нуклон-нуклонных и неаннигиляционных антинуклон-нуклонных взаимодействиях с одной и той же скейлинговой функцией $\Psi(z)$ и зависимостью масштабного параметра от энергии. Другой функцией $\Psi(z)$ описываются распределения по множественности в разных антинуклон-нуклонных реакциях аннигиляции. Наклон энергетической зависимости масштабного параметра в этом случае примерно в 1,5 раза больше, чем для нуклон-нуклонных взаимодействий [8].

Было продолжено исследование квантово-механического эффекта Ааронова–Бома при дифракции заряженных частиц на тороидальном соленоиде, внутри которого сосредоточено магнитное поле [9]. Интегральное и дифференциальное сечения упругого рассеяния зависят от магнитного потока внутри соленоида даже при наличии кольцеобразного «черного» экрана, не пропускающего заряженные частицы в область локализации магнитного поля. В эйкональном приближении и в рамках унитарной модели рассеяния с резким скачком парциальных амплитуд получены соотношения, описывающие транспортное сечение упругого рассеяния заряженных частиц на

тороидальном соленоиде. Транспортное сечение рассеяния пропорционально средней передаче продольного импульса рассеянной частице и может быть выражено через оператор силы. Показано, что при отсутствии экрана транспортное сечение рассеяния на тороидальном соленоиде действительно определяется только той частью падающего пучка, которая пересекает внутреннюю область тороидального соленоида, где напряженность магнитного поля, а следовательно, и сила Лоренца не равны нулю. В то же время транспортное сечение рассеяния заряженных частиц на тороидальном соленоиде, закрытом кольцеобразным «черным» экраном, не зависит от магнитного потока внутри соленоида и совпадает с транспортным сечением дифракции на самом экране. При этом вклад от рассеяния на отверстиях в экране, зависящий от магнитного потока, полностью компенсируется вкладом интерференции амплитуд рассеяния на отверстиях и на «черном» экране.

Проведен анализ экспериментальных данных адронных резонансов в системах, распадающихся на обычные и странные частицы (руководитель Троян Ю.А.). Показано, что ни в каких системах не выполняется закон квадратичной зависимости спина резонанса от его массы. Сконструирован феноменологический потенциал, с помощью которого удалось найти универсальную зависимость спина резонанса от его массы для всех исследованных резонансов, содержащих u -, d - и s -кварки. Также исследована зависимость спинов от масс астрофизических объектов (астероиды, планеты, звезды, галактики). Сделано сравнение полученных расчетов с результатами Мурадяна Р.М.

На 45388 событиях реакции $np \rightarrow n\pi^+\pi^-$, выделенной в np -взаимодействиях при $P_n = (5,20 \pm 0,16)$ ГэВ/с в одноструйной водородной пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ, произведены поиск и исследования резонансов в системе $\pi^+\pi^-$. При использовании критериев $\cos \Theta_p^* > 0$ и $|X_{\pi^+\pi^-}^*| \leq 0,5$ выделено девять особенностей при массах (350 ± 11) , (405 ± 10) , (505 ± 8) , (609 ± 5) , (665 ± 11) , (754 ± 4) , (878 ± 10) , (1155 ± 11) и (1235 ± 23) МэВ/с² (см. рис. 9). Превышение над фоном составляет 2,3, 4,8,

4,1, 2,5, 2,9, 7,8, 2,2, 4,9 и 4,7 стандартных отклонений соответственно. Экспериментальные ширины резонансов меняются в пределах от 16 до 43 МэВ/с², что сравнимо с экспериментальным разрешением по массам. Сравнение со спектром эффективных масс $\pi^+\pi^-$ комбинаций из реакции $np \rightarrow n\pi^+\pi^-$ показывает, что соответствующие особенности в этом спектре отсутствуют. Поэтому найденным особенностям в спектре масс $\pi^+\pi^-$ надо приписать значение изотопиче-

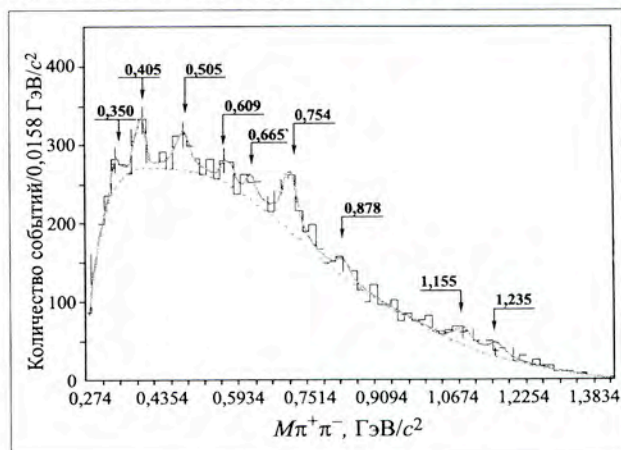


Рис. 9. Распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$. Количество отобранных событий 11299

ского спина $I = 0$. Оценка спина произведена для наиболее статистически обеспеченных резонансов при массах 405, 505 и 754 МэВ/с². Для $M_R = 754$ МэВ/с² с высокой степенью достоверности $J = 0$; для $M_R = 405$ и $M_R = 505$ МэВ/с² наиболее вероятное значение $J = 0$. Таким образом, можно утверждать, что обнаружено по крайней мере три состояния с квантовыми числами σ_0 мезона $0^+(0^{++})$ при массах 405, 505 и 754 МэВ/с² [10]. Предварительные данные о резонансе с массой, равной 754 МэВ/с², опубликованные в 1998 г., включены в «Eur. Phys. Jour. C» 2000. V. 15. P. 1 (Particle Data Group).

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2000 г. продолжались работы по проектированию ускорителя для электроядерного реактора. Разработана общая концептуальная схема, включающая:

- десять изохронных инжекторных циклотронов с многодуантной системой, обеспечивающей режим ускорения с разделенными орбитами (МД ЦРО); каждый циклотрон обеспечивает ускорение протонов с током 10 мА до энергии 30 МэВ;

- один бустерный ЦРО со сверхпроводящей (СП) 10-уровневой магнитной системой и двенадцатью теплыми высокочастотными резонаторами, доускоряющий десять инжектированных пучков до энергии 300 МэВ;
- один основной ЦРО с подобной СП магнитной системой и 44 ВЧ-резонаторами, сообщающий пучкам конечную энергию 1 ГэВ;

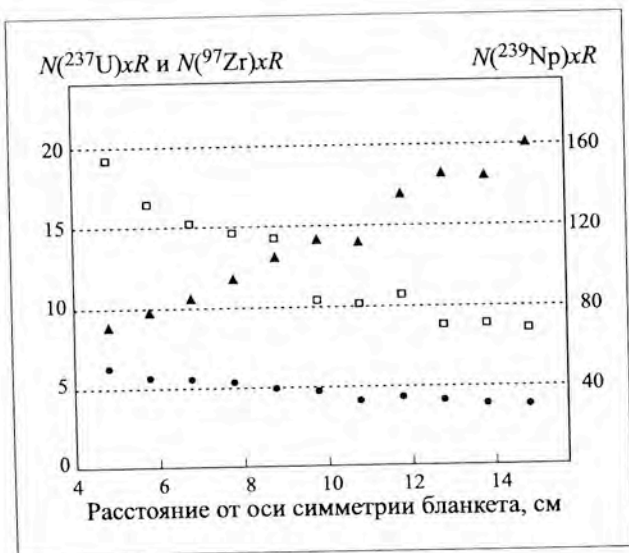


Рис. 10. Пространственное распределение относительных выходов (n, f) -, (n, γ) - и $(n, 2n)$ -реакций в активационных детекторах из естественного урана, размещенных по радиусу модели U/Pb-сборки. Значения по оси ординат приведены в произвольных единицах. \blacktriangle — $^{239}\text{Np}-^{238}\text{U}(n, \gamma)$, $E_\gamma = 277,6$ кэВ; \square — $^{237}\text{U}-^{238}\text{U}(n, 2n)$, $E_\gamma = 208,0$ кэВ; \bullet — $^{97}\text{Zr}-^{238}\text{U}(n, f)$, $E_\gamma = 743,3$ кэВ

— десять СП-каналов транспортировки ускоренных пучков в активную зону реактора.

В работе [11] даны основные параметры ускорительного комплекса для получения протонного пучка с энергий 1 ГэВ и током 100 мА. Описано сопряжение с реактором тепловой мощностью 3 ГВт. Обсуждаются связанные с проектом проблемы и проектные параметры.

«Энергия плюс трансмутация». На протонном пучке синхрофазотрона при энергии 1,5 ГэВ проведены эксперименты по облучению свинцовой мише-

СОТРУДНИЧЕСТВО С ДРУГИМИ УСКОРИТЕЛЬНЫМИ ЦЕНТРАМИ

В последнее время совместные работы проводились в ЦЕРН в экспериментах NA45 (CERES), NA49, WA98, EMU0, работающих на ядерных пучках SPS. Значительный вклад был сделан в эти установки различными детекторами. Эксперименты ALICE и CMS на LHC дадут новую интересную информацию, и физики ЛВЭ активно участвуют в подготовке этих экспериментов.

Некоторые результаты экспериментов NA45, NA49, WA98 наряду с результатами других экспериментов на пучке свинца в ЦЕРН были интерпретированы как сигналы от кварк-глюонной плазмы.

Соруководителем коллаборации WASA на ускорителе CELSIUS в Упсале избран Морозов Б.А., и его

ни-конвертора и двухсекционного уранового бланкета с применением активационной и трековой томографии и термометрической калориметрии [12]. Определены парциальные интегралы деления ядер урана с помощью оригинальной методики-интегратора деления урана. Использование комбинации кадмиевых экранов и радиаторов (обедненных или обогащенных изотопами ^{235}U) с твердотельными трековыми детекторами позволяет провести раздельное определение числа делений нейтронами из различных энергетических областей. Анализ полученных данных указывает на основной вклад быстрых нейтронов в процесс деления ядер ^{238}U . Этот вывод хорошо согласуется с результатом, который получен в работе [13], относительно выбора положений, оптимальных для размещения образцов при изучении сечений трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики тепловыми и резонансными нейтронами. Были исследованы относительные вклады тепловых, резонансных и быстрых нейтронов в процесс деления естественного урана в объеме бланкета.

Проведено компьютерное моделирование основных характеристик U/Pb-сборки (эффективный коэффициент размножения нейтронов, спектр нейтронов, коэффициент усиления мощности) гибридной электродерной установки «Энергия плюс трансмутация».

Из обработки гамма-спектров активационных детекторов из естественного урана, экспонировавшихся в составе U/Pb-сборки, определена радиальная зависимость выходов (n, f) -, (n, γ) - и $(n, 2n)$ -реакций на ядре ^{238}U . Примеры таких зависимостей показаны на рис. 10. Массовые распределения осколков деления и продуктов, образовавшихся в реакции радиационного захвата, позволяют получить сведения о мощности энерговыделения в бланкете из урана естественного изотопного состава [13].

группа из ЛВЭ активно участвует в этом эксперименте.

В течение 2001–2003 гг. мы планируем продолжить участие в этих экспериментах за исключением проекта WA98, который закончился к настоящему времени.

Коллаборацией NA45 (CERES) (руководитель от ЛВЭ Панебратцев Ю.А.) будут продолжены работы со свинцовым пучком для получения большей статистики по рождению ω - и ϕ -мезонов.

Планируется продолжить деятельность в коллаборации STAR (руководитель от ОИЯИ Панебратцев Ю.А.) на RHIC (BNL), которая получила первые экспериментальные данные в этом году.

Первоочередные задачи программы эксперимента NA49 (руководитель от ЛВЭ Мелкумов Г.Л.) следующие:

- получение большей статистики для Pb + Pb-столкновений при энергии 158 А ГэВ, что необходимо для редких процессов;
- изучение Pb + Pb-столкновений при более низких энергиях (40 и 80 А ГэВ) для того, чтобы установить энергетическую зависимость сигналов от QGP;
- исследование столкновений более легких ионов (C + C, Si + Si и Ag + Ag) для понимания того, как свойства материи зависят от размеров сталкивающихся объектов.

Для эксперимента ALICE (руководитель от ОИЯИ Водопьянов А.С.) будет спроектирован и создан теплый дипольный магнит мюонного плеча спектрометра в ОИЯИ при поддержке ЦЕРН. Наши физики также участвуют в развитии программного обеспечения эксперимента ALICE и моделировании.

Для разрабатываемого детектора TRD/ALICE создан макет (40 × 40 см) проекционной дрейфовой камеры со считыванием информации со «стриппового» катода с помощью быстрых (50 мГц) FADS. Начаты исследования различных газовых смесей для оптимизации работы детектора на пучке.

Получены первые результаты совместного эксперимента ОИЯИ–RIKEN по исследованию спиновой структуры ${}^3\text{He}$ на малых расстояниях. Основной целью совместного эксперимента R308n(OA) ОИЯИ–Япония, принятого программным комитетом RIKEN в декабре 1999 г., является изучение спиновой структуры ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) на расстояниях, недостижимых на настоящий момент, с использованием электромагнитных пробников посредством измерения угловых зависимостей тензорных анализирующих способностей A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} в реакциях $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$.

Данные поляризационные наблюдаемые величины чувствительны к спиновому распределению нейтрона (протона) в ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) на малых расстояниях в рамках приближения однонуклонного обмена [14, 15]. Предсказания поведения тензорных анализирующих способностей A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} при начальной энергии дейтрона 270 МэВ для различных волновых функций трехнуклонного связанного состояния показаны на рис. 11 [16]. Наблюдается сильная чувствительность данных поляризационных наблюдаемых к использованной волновой функции трехнуклонной связанной системы, в особенности при малых углах испускания.

Так как ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ являются зеркальными образами относительно зарядовой симметрии, то отличие в их наблюдаемых может быть интерпретировано в терминах нарушения зарядовой симметрии. Измерение тензорных анализирующих способностей, которые в первом порядке не чувствительны к кулонов-

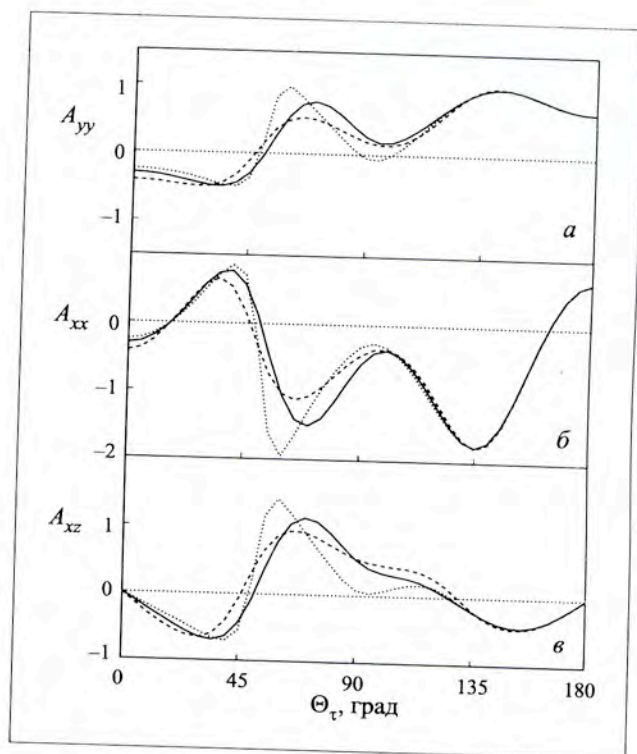


Рис. 11. Тензорные анализирующие способности A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} в реакции $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ при 140 МэВ (а), 200 МэВ (б) и 270 МэВ (в) соответственно. Сплошная, штриховая и точечная линии — результаты вычислений в рамках однонуклонного обмена с использованием различных волновых функций ${}^3\text{He}$

ским коррекциям, в реакциях $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$, особенно при больших импульсах, могло бы обеспечить дополнительную информацию о природе нарушения зарядовой симметрии.

Коллаборация ЛВЭ–RIKEN провела измерение тензорных A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} и векторной A_y анализирующих способностей на пучке поляризованных дейтронов циклотрона RIKEN на спектрометре SMART с 26 ноября по 11 декабря 2000 г. Данные наблюдаемые были измерены со статистической погрешностью $\pm 0,02$ при энергиях 200 и 270 МэВ во всем угловом диапазоне для реакции $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$. Тот же самый набор анализирующих способностей был получен для канала $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ при энергии 270 МэВ между углами 0 и 120° в системе центра масс. Такая высокая точность экспериментальных данных позволит дискриминировать различные модели трехнуклонного связанного состояния до внутреннего импульса нуклона ≈ 600 МэВ/с.

Эти исследования могут быть в будущем продолжены, используя пучок поляризованных дейтронов ускорительного комплекса ЛВЭ [17].

Для эксперимента HADES (руководитель от ЛВЭ Заневский Ю.В.) было сделано следующее:

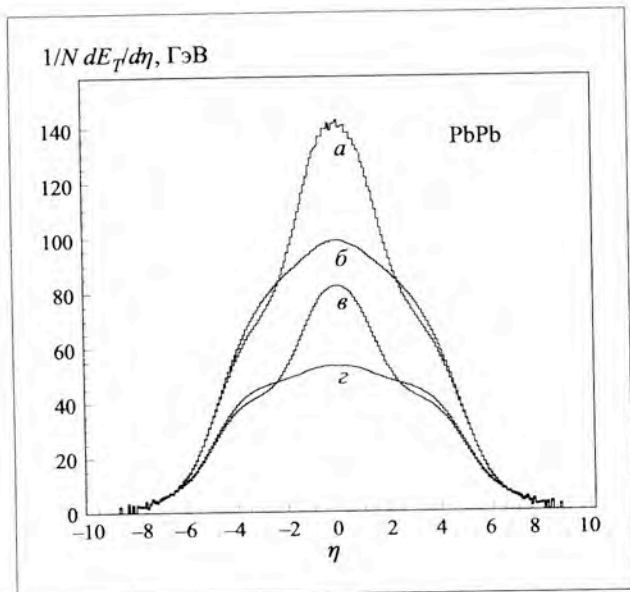


Рис. 12. Распределение полной поперечной энергии dE_T в ГэВ по псевдобыстроте η для 10000 событий PbPb-взаимодействия при энергии в с.ц.м. 5,5 ТэВ/нуклон. Сверху вниз: нет экранирования, учтен эффект гашения струй (а); эффекты среды полностью игнорируются (б); учтены и эффект экранирования, и эффект гашения струй (в); экранирование учтено, нет потерь в ядерной среде (г)

- Созданы и исследованы в лабораторных условиях семь модулей дрейфовых камер с малым количеством вещества. Шесть таких модулей собраны в полном комплекте с электроникой считывания информации и установлены внутри сверхпроводящего магнита спектрометра HADES. Камеры испытывались в составе установки HADES в эксперименте при взаимодействии C + C (1,5 А ГэВ) в ноябре 2000 г. Полученные результаты обрабатываются.
- После изготовления в промышленности около 30 тыс. каналов аналоговой электроники дрейфовых камер (16-канальные усилители-дискриминаторы), разработанных в ЛВЭ ОИЯИ, 14 тыс. каналов было отлажено и установлено на дрейфовые

КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ

В 2000 г. с участием ЛВЭ было организовано несколько научных конференций.

16–18 мая в Дубне проведено рабочее совещание, посвященное изучению структуры легких экзотических ядер с использованием метода ядерных эмульсий. Были обсуждены и перспективы облучения на ускорительном комплексе ЛВЭ — формирование пучков протоноизбыточных изотопов бора, углерода. Основной вопрос — существование протонного гало в ядрах для ядер вблизи границы протонной стабиль-

ности. Эта задача особенно привлекательна для эмульсионной методики вследствие лучшей наблюдаемости этих взаимодействий при рекордном пространственном разрешении. Можно предполагать, что классическая эмульсионная методика позволит начать новую главу исследований по структуре ядра уже на пучках нуклотрона.

- Разработан алгоритм и написана программа быстрой оценки эффективности дрейфовых камер, позволяющая следить за работой камер и считывающей электроники во время сеанса облучения установки. Программа использовалась для анализа экспериментальных данных, полученных в 2000 г. Разработан алгоритм и написана первая версия программы поиска кандидатов в треки в дрейфовых камерах, расположенных за магнитом спектрометра HADES. Программа опробована на экспериментальных данных, полученных в ноябре 2000 г.

В рамках участия Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в физической программе экспериментов с тяжелыми ионами коллаборации CMS (компактный мюонный соленоид) на большом адронном коллайдере (LHC) было проведено исследование глобальных характеристик ядро-ядерных взаимодействий при ультрарелятивистских энергиях. Основные результаты включены в проект научно-технического обоснования исследований на пучках тяжелых ионов коллаборации CMS и в материалы рабочего совещания по программе экспериментов с тяжелыми ионами коллаборации, проходившего в Гатчине (ПИЯФ).

Наши предложения по исследованию динамики ядро-ядерных взаимодействий включают в себя следующие основные аспекты:

- наблюдение и изучение эффектов гашения струй и партонного экранирования (в области малых x , $x \approx 10^{-4}, 10^{-5}$) при столкновении ядер с помощью глобальных наблюдаемых (полной поперечной энергии и зарядовой множественности) (рис. 12) [18–20];
- изучение зависимости этих эффектов от прицельного параметра [18];
- использование глобальных наблюдаемых для оценки начальных условий ядро-ядерных взаимодействий на ранних стадиях [18, 20].

Совещание собрало опытейших специалистов по эмульсионной методике. Были обсуждены планы по исследованию взаимодействия тяжелых ядер на

нуклотроне и в других центрах. Таким образом, экспериментальный метод, зародившийся сто лет назад одновременно с открытием радиоактивности А.Беккерелем, продолжает работать на перспективные исследования по физике ядра.

С 11 по 14 июня в Петербургском институте ядерной физики (Гатчина) состоялось рабочее совещание сотрудничества CMS по развитию программы исследований на пучках сталкивающихся тяжелых ионов при ультррелятивистских энергиях большого адронного коллайдера ЦЕРН (LHC).

Согласно теоретическим представлениям, картина множественного рождения частиц при столкновении ядер на LHC будет в доминирующей степени описываться на языке взаимодействия кварков и глюонов, которое приводит к рождению мини-струи (minijets). Такие адронные струи необязательно различимы в угловом анализе, однако сечение их рождения можно оценить в рамках квантовой хромодинамики. Рост энергии столкновения на LHC несомненно приведет также и к доминирующей роли партонов с малыми долями импульса нуклонов. По существу, ядерная физика при ультррелятивистских энергиях превратится в физику адронных столкновений с ядерным «ароматом». Возможные эффекты излучения и перераспределения кварков и глюонов в образующейся ядерной среде, их экранировка в ядерной материи могут привести к ярким эффектам, недостижимым при энергиях существующих ускорителей.

Совещание в ПИЯФ стало уже пятым по счету. Предыдущие проводились в Лионе (1996), Дубне (1997), ЦЕРН (1998, 1999). Программа совещания включала в себя следующие вопросы:

- прогресс в понимании процессов образования кварк-глюонной плазмы и перспектив физики тяжелых ионов при ультррелятивистских энергиях; развитие теоретических концепций и программных генераторов;
- последние экспериментальные достижения в этой области, в том числе результаты на пучках ядер свинца в суперпротонном синхротроне ЦЕРН, статус релятивистского коллайдера тяжелых ионов и экспериментов в Брукхейвенской национальной лаборатории, статус LHC как ядерного коллайдера, обзор проекта ALICE как специализированного эксперимента по поиску кварк-глюонной плазмы;
- физическая программа экспериментов с тяжелыми ионами сотрудничества CMS, учитывающая особенности спектрометра — измерение глобальных характеристик столкновений ядер (поток частиц), изучение кварк-глюонной плазмы с помощью так называемых жестких пробников: кваркониев, димюонов, струй. Кроме того, рассматривалась физика протон-ядерных столкновений, физика электромагнитных и дифракционных взаимодействий ядер;

- состояние дел по подготовке эксперимента CMS, прежде всего аспекты, имеющие особенное значение для проведения экспериментов с тяжелыми ионами: трековая система, калориметрия, мюонный детектор, триггер и система сбора данных, развитие программного обеспечения.

Совещание собрало 65 участников стран-участниц ОИЯИ, Франции, Италии, США. Оно прошло на высоком научном и организационном уровне и дало новый импульс разработке проблем первоочередных исследований на LHC. Его проведение было поддержано руководством сотрудничества CMS, Российским центром фундаментальных исследований, дирекциями ОИЯИ и ПИЯФ, завода «Красный выборжец».

С 26 июня по 1 июля в Словакии (Стара Лесна) прошло традиционное рабочее совещание «Релятивистская ядерная физика: от солен МЭВ до ТЭВ». Совещание было организовано ОИЯИ и Физическим институтом Словацкой академии наук и посвящено прогрессу исследований в области релятивистской ядерной физики. ФИ САН внес значительный вклад в успех первых экспериментов на внутренней мишени нуклотрона. Успешный вывод пучка из нуклотрона сделал актуальным рассмотрение на этом совещании перспектив совместных исследований и решение практических вопросов проведения новых экспериментов. Был дан подробный обзор физической программы исследований на нуклотроне и развития ускорительного комплекса. Среди новых предложений, рассмотренных на совещании, перспективы исследований по структуре экзотических ядер на релятивистских пучках. В рамках обсуждения участия физиков ЛВЭ в экспериментах по ядро-ядерным соударениям были представлены результаты эксперимента NA49 в ЦЕРН по рождению легких ядер и антиядер и перспективы изучения глобальных характеристик реакций на LHC (коллаборация CMS). Участники совещания из США и Франции дали обзор первых физических результатов, полученных на ускорителях SEBAF и RHIC.

XV международный семинар по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» проходил в Дубне 25–29 сентября.

История этих семинаров началась в 1969 г. Первый семинар состоялся как одно из ряда относительно небольших мероприятий Отделения ядерной физики Академии наук СССР, инициированных в 60-е годы академиком М.А.Марковым. Целью этих мероприятий, известных как Марковские семинары, было обсуждение последних достижений и наиболее актуальных задач по конкретной выбранной тематике достаточно узким, но авторитетным научным коллективом. Основу семинаров составляли обзорные доклады ведущих физиков — теоретиков и экспериментаторов, в том числе приглашенных из-за рубежа.

Именно с одного из таких семинаров стартовала 30 лет назад серия дубненских конференций (с неофициальным названием «Балдинская осень»), которые проводятся с тех пор регулярно с двухлетней периодичностью. Нынешняя конференция — уже 15-я по счету. За свою историю она приобрела известность как авторитетная конференция по физике сильных взаимодействий, прежде всего по актуальным проблемам квантовой хромодинамики и соударений ядер при релятивистских энергиях. Можно с уверенностью утверждать, что релятивистская ядерная физика превратилась в одно из основных направлений научного будущего ОИЯИ.

На этот раз конференция «переехала» из Лаборатории теоретической физики в конференц-зал экспериментальной лаборатории. Теперь теоретики смогли поближе познакомиться с практическими возможно-

стями экспериментаторов, включая и организационные. Площадка Лаборатории высоких энергий имеет немало зданий, которые мы можем считать историческими для ОИЯИ. Лаборатория теоретической физики начинала свою работу в 1958 г. именно здесь.

На 15-м семинаре был сделан 131 доклад, в том числе представлены доклады о первых результатах экспериментов на выведенном пучке из ускорителя сверхпроводящего типа — нуклотрона. Впервые были доложены и результаты, полученные на только что запущенном коллайдере тяжелых ионов RHIC в США.

Кроме сотрудников ОИЯИ в семинаре принимали участие специалисты из Армении, Болгарии, Бразилии, Германии, Грузии, Ирана, Монголии, Польши, России, Словакии, США, Тайваня, Узбекистана, Франции, Чехии, Югославии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovalenko A.D. // *Proc. of the Intern. Symposium «The 50th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle», Dubna–Moscow, July 12–15, 1994 / Ed. A.M. Baldin et al. Dubna, 1996. P. 44–55.*
2. Afanasiev S. et al. // *Nucl. Phys. A. 1997. V. 625. P. 817.*
3. Afanasiev S. et al. // *Phys. Lett. B. 1998. V. 445. P. 14.*
4. Illarionov A. Yu., Litvinenko A.G., Lykasov G.I. Will be published in *Proc. of Intern. Workshop «Spin and Symmetry», Pragma, 2000.*
5. Avdeyev S.P. et al. *Multifragmentation of Gold Nuclei by Light Relativistic Ions—Thermal Break-up Versus Dynamic Disintegration: JINR Preprint E1-2000-152, Dubna, 2000; Yad. Fyz. (in press).*
6. Avdeyev S.P. et al. *Collective Flow in Multifragmentation Induced by Relativistic Helium and Carbon Ions // Particles and Nuclei, Letters. 2000. No. 2[99]. P. 62–69.*
7. Avdeyev S.P. et al. *Variation of the Coulomb Repulsion in Multifragmentation // Particles and Nuclei, Letters. 2000. No. 2[99]. P. 70–77.*
8. Голохвастов А.И. Препринт ОИЯИ P4-2000-48. Дубна, 2000 (направлено в «ЯФ»).
9. Любошиц В.В., Любошиц В.Л. Препринт ОИЯИ P4-2000-48. Дубна, 2000 (направлено в «ЖЭТФ»).
10. Troyan Yu.A. et al. *The Search and Study of the Resonances in the System of $\pi^+\pi^-$ -Mesons from the Reaction $np \rightarrow n\pi^+\pi^-$ at $P_n = 5.20$ GeV // Particles and Nuclei, Letters. 2000. No. 6[103]. P. 25–33.*
11. Шелаев И.А. и др. Ускоритель и реактор // Письма в ЭЧАЯ. 2000. № 6[103]. С. 70–85.
12. Кривоустов М.И. и др. Препринт ОИЯИ P1-2000-168. Дубна, 2000 (направлено в «Kern-technik»).
13. Брандт Р. и др. Сообщение ОИЯИ P1-99-117. Дубна, 1999.
14. Ladygin V.P., Ladygina N.B. // *Phys. Atom. Nucl. 1996. V. 59. P. 789.*
15. Ladygin V.P., Ladygina N.B. // *Nuovo Cim. A. 1999. V. 112. P. 855.*
16. Ladygin V.P. et al. // *Particles and Nuclei, Letters. 2000. No. 3[100]. P. 74.*
17. Ladygin V.P., Ladygina N.B. // *JINR Rapid Commun. 1995. No. 4[72]. P. 19.*
18. Savina M.V. et al. *Manifestation of the Jet Quenching and Parton Shadowing Effects in Global Characteristics of Nucleus-Nucleus Collisions in Ultrarelativistic Domain // Proc. of 5th CMS Heavy Ion Meeting, Gatchina, June 11–14, 2000.*
19. Zarubin P.I. et al. *Global Energy Flows in Heavy Ion Collisions in CMS // Proc. of 5th CMS Heavy Ion Meeting, Gatchina, June 11–14, 2000.*
20. Zarubin P.I., Savina M.V., Shmatov S.V. *An Influence of a Parton Shadowing on Global Observables: JINR Preprint P2-2000-112. Dubna, 2000 (submitted to «Yad. Fyz.»).*