

В этих экспериментах впервые были получены данные о нарушении C -инвариантности в распадах нейтральных каонов, установлена справедливость правила $\Delta I = 1/2$ для лептонных распадов каонов, проверено важнейшее следствие CP -инвариантности о совпадении масс покоя частиц и античастиц. Кроме того, было установлено, что гравитационные массы нейтральных каонов и антикаонов совпадают с точностью $10^{-15}\%$.

Анализируя снимки, полученные с помощью 50-сантиметровой ксеноновой пузырьковой камеры, группой физиков ЛВЭ, возглавляемой З.Стругальским и И.В.Чувило, совместно с физиками ИТЭФ была впервые надежно определена величина параметра нарушения CP -четности (т.е. отношение вероятности распада долгоживущих каонов на два нейтральных пиона к вероятности аналогичного распада нейтральных короткоживущих каонов). Эта величина равна $(2,02 \pm 0,23) \cdot 10^{-3}$.

Успеху в получении этого результата способствовала разработка и создание оригинального метода определения энергии гамма-квантов по суммарному пробегу электронов и позитронов в образованных гамма-квантами ливнях. Используя этот метод, оказалось возможным в системе из нескольких гамма-квантов надежно выделить все гамма-кванты, возникшие от распада нейтрального пиона.

Впервые явление радиационного распада положительных каонов, распадающихся на положительный пион, нейтральный пион и гамма-квант, наблюдалось в 50-сантиметровой ксеноновой пузырьковой камере, облученной положительными каонами с импульсом 470 МэВ/с.

Группой физиков ЛВЭ (руководители И.В.Чувило и Э.М.Мальцев) на этом же материале изучались свойства трех частичных распадов положительных каонов. Установлено, что эти свойства соответствуют векторному варианту универсальной четырехфермионной теории слабого взаимодействия.

В ЛВЭ первые эксперименты по изучению рассеяния частиц на электронах были начаты В.Г.Гришиным и Э.Кистеневым с помощью 24-литровой пропановой пузырьковой камеры, облученной отрицательными пионами с импульсом 4 ГэВ/с.

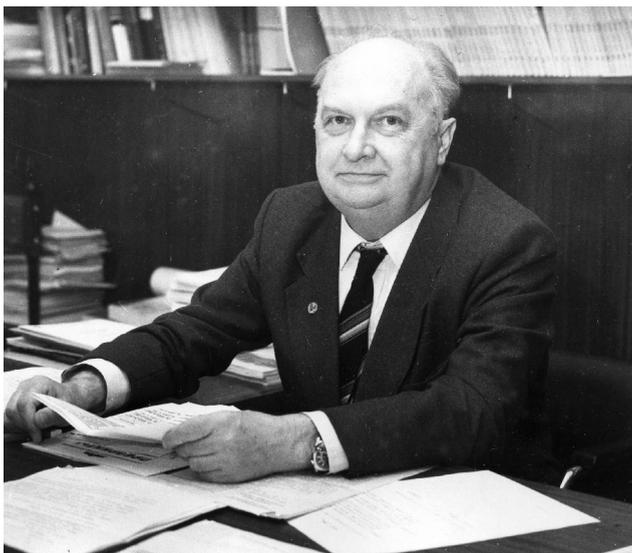
Результаты эксперимента установили, что величина дифференциального сечения пион-электронного рассеяния при указанной энергии хорошо согласуется с теоретическими расчетами для рассеяния на точечном электроне, при этом оценка размеров пиона дает значение $\leq 6,6 \cdot 10^{-13}$ см.

Этот эксперимент позже нашел свое продолжение в большом цикле исследований электромагнитных размеров пионов и каонов на ускорительных комплексах ИФВЭ (Протвино) и ФНАЛ (Батавия).

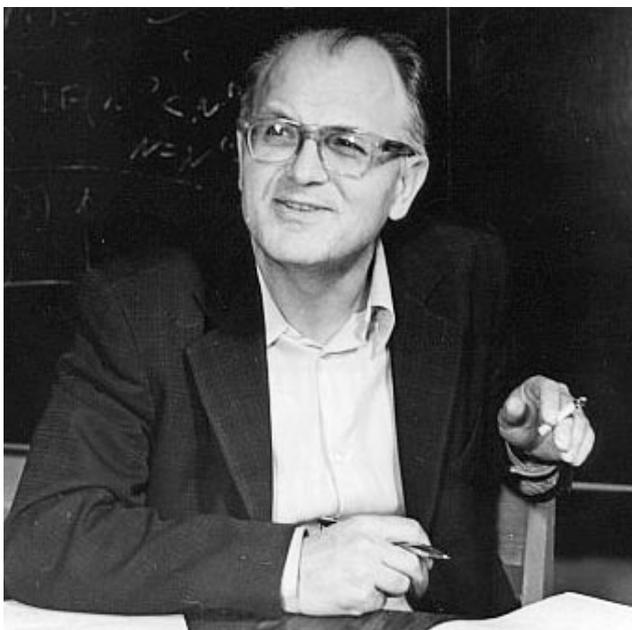
3. Релятивистская ядерная физика

Исследования, проводимые в последнее время в ЛВЭ, главным образом относятся к области релятивистской ядерной физики.

Говоря о развитии нового научного направления — релятивистской ядерной физике в ЛВЭ, следует отметить, что оно стало возможным благодаря наличию мощной экспериментальной базы лаборатории и накопленному опыту с момента ее создания. К моменту зарождения релятивистской ядерной физики в начале 70-х годов сотруд-



Академик А.М.Балдин



В.С.Ставинский

никами ЛВЭ был выполнен большой объем экспериментальных работ, сделана масса открытий и получено много интересных результатов мирового уровня

Академик А.М.Балдин, будучи директором ЛВЭ с 1968 года по 1997 год, а затем научным руководителем лаборатории, возглавил создание нового направления — релятивистской ядерной физики (РЯФ).

В его статье «Масштабная инвариантность адронных столкновений и возможность получения пучков частиц высоких энергий при релятивистском ускорении многозарядных ионов»¹ была высказана новая идея о возможности существования в ядрах коллективных эффектов, которые (при ускорении тяжелых ядер) могут быть использованы для получения вторичных пучков частиц с энергией, превышающей энергию ускоренных ядер в расчете на один нуклон.

Для проверки этой идеи на синхрофазотроне ЛВЭ были ускорены дейтроны и поставлен эксперимент по поиску коллективного эффекта в ядрах, который получил название «ядерный кумулятивный эффект». Эксперимент был выполнен группой под руководством В.С.Ставинского. Результа-

¹ Балдин А.М. Краткие сообщения по физике. ФИАН, 1971. С. 35.

ты по экспериментальному открытию ядерного кумулятивного эффекта были опубликованы в 1973 году¹.

Суть кумулятивного эффекта состоит в том, что группа нуклонов N_I из ядра I с атомным номером A_I может взаимодействовать с группой нуклонов N_{II} из ядра II с атомным номером A_{II} . Область, в которой N_I или N_{II} превышают единицу, является кумулятивной областью, запрещенной для однонуклонных взаимодействий.

В данном эксперименте было измерено отношение дифференциальных сечений выхода пионов в переднем направлении α под действием дейтронов и протонов на медной мишени в зависимости от переменной $x = p_\pi/p_\pi^{\max}$. Здесь p_π – импульс пионов, а p_π^{\max} – максимальное значение импульса пионов. Отношение дифференциальных сечений оказалось примерно равным 0,06 и практически не зависящим от x , что можно было объяснить только на основе кумулятивного эффекта. Теоретические расчеты с учетом ферми-движения нуклонов в ядре и различных предположений в рамках однонуклонных механизмов в ядре не описывали эффекта.

За первым экспериментом по обнаружению кумулятивного эффекта последовало его детальное исследование в Дубне и в других центрах, таких как Беркли (США, группа Л.Шредера), ИТЭФ (Москва, группа Г.А.Лексина), ИФВЭ (Протвино, группа Л.С.Золина из ЛВЭ) и др.²

Исследования кумулятивных явлений также были продолжены в Беркли Л.Шредером³. На приведенном рис. 2 видна закономерность выхода характеристик кумулятив-

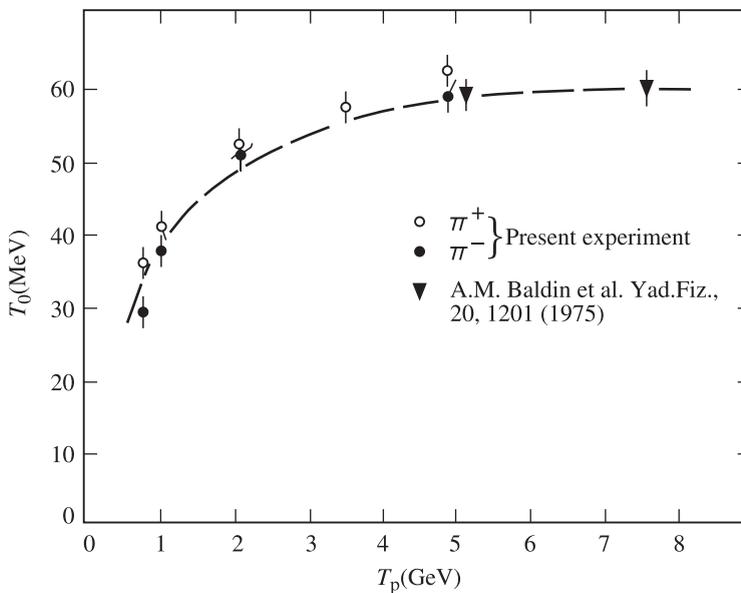


Рис. 2. Зависимость параметра T_0 для пионов под углом 180° для p -Cu столкновений от энергии налетающих протонов T_p ($E d^3 \sigma / dp^3 \sim e^{(-T_p/T_0)}$)

¹ Балдин А.М., Герасимов С.Б. и др. // ЯФ. 1973. Т. 18, вып. 1. С. 79.

² Беляев И.М., Гаврищук О.П., Золин Л.С., Переседов В.Ф. // ЯФ. 1993. Т. 56. С. 135.

³ Schroeder L.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. No. 24. P. 1787.

ного эффекта на асимптотический режим в районе энергий 4–5 ГэВ. Такое поведение говорит о том, что в этой области энергий в ядерной материи начинают проявляться коллективные эффекты (или многокварковые состояния), то есть имеет место реализация перехода от нуклонных степеней свободы к кварк-глюонным.

В дальнейшем релятивистская ядерная физика развилась в самостоятельное научное направление и стала одной из важнейших частей в научно-исследовательских программах крупнейших мировых ускорительных центров.

Большой вклад в работы ЛВЭ по релятивистской ядерной физике внесли следующие ученые: С.В.Афанасьев, А.М.Балдин, А.А.Балдин, Е.Бартке, Ц.Баатар, В.К.Бондарев, В.В.Глаголев, Н.Гиордэнеску, Ш.Гмуца, А.И.Голохвастов, Л.Б.Голованов, И.М.Граменицкий, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, П.И.Зарубин, Ю.В.Заневский, Л.С.Солин, В.А.Карнаухов, Е.Н.Кладнищкая, В.А.Краснов, А.А.Кузнецов, Б.А.Кулаков, Б.Кюн, В.П.Ладыгин, Р.М.Лебедев, Ф.Легар, А.Г.Литвиненко, Ю.Лукстиньш, А.И.Малахов, Г.Мартинска, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин, Г.Л.Мелкумов, В.А.Никитин, П.В.Номоконов, Н.Нургожин, Э.О.Оконов, Ю.А.Панебратцев, В.Пенев, Н.М.Пискунов, М.И.Подгорецкий, И.А.Савин, И.С.Сайтов, Б.Словински, М.И.Соловьев, В.С.Ставинский, Е.А.Строковский, И.М.Ситник, Л.Н.Струнов, З.Стругальский, К.Д.Толстов, Ю.А.Троян, М.Н.Хачатурян, С.А.Хорозов, И.Цаков, Э.Н.Цыганов, Д.Чултэм, М.Д.Шафранов, М.Г.Шафранова, В.И.Шаров и многие другие.

В настоящее время физические исследования в области релятивистской ядерной физики в ЛВЭ в основном проводятся по трем направлениям: исследование кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, изучение асимптотических законов и исследование спиновой структуры легких ядер¹.

Совместно с группой сотрудников, работающих на двухметровой пропановой пузырьковой камере ЛВЭ, академик А.М.Балдин² предложил изучать столкновения релятивистских ядер в пространстве четырехмерных скоростей. В этом подходе впервые использовались инвариантные, безразмерные и измеримые переменные b_{ik} , являющиеся квадратом разности четырехскоростей между любыми частицами, участвующими во взаимодействии:

$$b_{ik} = -(u_i - u_k)^2,$$

где u_i и u_k – четырехмерные скорости частиц.

С помощью этой переменной оказалось возможным предложить удобную и наглядную классификацию ядерных взаимодействий:

область $0 \leq b_{ik} \leq 10^{-2}$ соответствует классической ядерной физике, когда нуклоны можно рассматривать как элементарные частицы;

если $b_{ik} \sim 1$, то начинают возбуждаться внутренние адронные степени свободы (переходная область);

в случае $b_{ik} \geq 1$ преобладают внутренние степени свободы и взаимодействие необходимо рассматривать на кварк-глюонном уровне.

¹ Baldin A.M., Malakhov A.I., and Sissakian A.N. // Physics of Particles and Nuclei. 2001. V. 32, Suppl.1. P. S4–S30.

² Baldin A.M. and Didenko L.A. // Fortschr. Phys. 1990. V. 38. No. 4. P. 261–332.

Итогом многолетних исследований кумулятивного эффекта явилось обнаружение кварк-протонной структурной функции ядра

$$G(x) = \exp(-x/\langle x \rangle),$$

характеризующей распределение кварков в ядрах. Здесь x — кумулятивное число, а $\langle x \rangle \sim 0,14$ характеризует размер мультикварковой системы, из которой излучаются кумулятивные частицы.

В пространстве четырехскоростей А.М.Балдиным был введен принцип ослабления корреляций (ПОК). ПОК был впервые предложен академиком Н.Н.Боголюбовым в статистической физике как универсальное свойство распределений для частиц в обычном пространстве-времени. Принцип основан на интуитивном представлении о том, что корреляции между удаленными частями макроскопической системы практически исчезают и распределение факторизуется (распадается на независимые множители). В соответствии с ПОК Боголюбова корреляции между системами ослабевают с увеличением расстояния между ними в обычном пространстве-времени. Согласно ПОК Балдина, корреляции между системами ослабевают с увеличением расстояния в четырехмерном пространстве скоростей, что соответствует малым расстояниям в обычном пространстве. В связи с этим ПОК Балдина как бы противоположен ПОК Боголюбова.

Таким образом, если мы имеем группу частиц α и группу частиц β в пространстве четырехскоростей, то при удалении этих групп друг от друга, то есть при $b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty$, распределение W , характеризующее систему, примет вид

$$W(b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty) = W_{\alpha} W_{\beta},$$

где W_{α} и W_{β} — распределения, характеризующие системы α и β .

Для случая взаимодействия двух релятивистских ядер $I + II \rightarrow 1 + \dots$ полагаем $\alpha = I$ и $\beta = II$. Тогда можно записать инвариантное сечение взаимодействия ядер в виде

$$d^2\sigma/db_{II1} dx_1 \sim F_I F_{II}(b_{II1}, x_1),$$

где $b_{II1} = -(u_{II} - u_1)^2$, x_1 — кумулятивная переменная.

Отсюда видно, что свойства структурной функции $F_{II}(b_{II1}, x_1)$ не зависят от параметров налетающего ядра.

Это свойство позволило детально исследовать кумулятивный эффект, ускоряя, например, протоны (что сделать гораздо легче, чем ускорять ядра) и изучая кварк-партонную структурную функцию ядра-мишени путем регистрации вторичных частиц в задней полусфере. Это явление использовал В.С.Ставинский с сотрудниками для детального изучения структурных функций ядер в интенсивных потоках протонов синхрофазотрона ЛВЭ.

Экспериментально ПОК был впервые подтвержден в опытах группы сотрудничества двухметровой пропановой пузырьковой камеры. ПОК позволил ввести понятие изолированной системы и, тем самым, понятие струй в пространстве четырехскоростей¹.

¹ Балдин А.М. и др. Кластеризация в пространстве четырехмерных относительных скоростей и инвариантные распределения адронных струй // ЯФ. 1988. Т. 48, вып. 4(10). С. 995–1004.

Было дано инвариантное определение адронных струй в отличие от традиционных неинвариантных подходов.

Релятивистски-инвариантные переменные b_{ik} были также использованы для определения областей образования струй.

Можно определить квадрат четырехскорости частицы k относительно оси струи:

$$b_k = -(V - u_k)^2.$$

Распределения пионов по четырехскоростям относительно оси струи b_k в адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях при высоких энергиях оказались универсальными. Они не зависят в широких пределах ни от энергии взаимодействия, ни от типа фрагментирующей системы.

Использование А.М.Балдиным принципов симметрии позволило ему ввести параметр подобия Π для ядерных взаимодействий $\Pi = \min\{1/2[(u_1 N_I + u_2 N_{II})^2]^{1/2}\}$, где N_I и N_{II} – кумулятивные числа для ядер I и II, а u_1 и u_2 – четырехскорости этих ядер.

Оказалось, что инвариантные сечения выхода инклюзивных частиц различного типа при взаимодействии ядер с атомными номерами A_I и A_{II} описываются универсальной закономерностью в широком диапазоне энергий и атомных номеров сталкивающихся ядер:

$$Ed^3\sigma/dp^3 = C_1 A_I^{\alpha(N_I)} A_{II}^{\alpha(N_{II})} \exp(-\Pi/C_2),$$

где $\alpha(N_I) = 1/3 + N_I/3$, $\alpha(N_{II}) = 1/3 + N_{II}/3$, а $C_1 = 1,9 \cdot 10^4$ мб ГэВ⁻²ср⁻¹ и $C_2 = 0,125 \pm 0,002$.

А.М.Балдин нашел аналитическое выражение для параметра Π для центральной области быстрот инклюзивной частицы¹. Это позволило ему предсказать, например, отношение выходов античастиц и частиц в зависимости от энергии, в том числе и в асимптотической области (рис. 3).

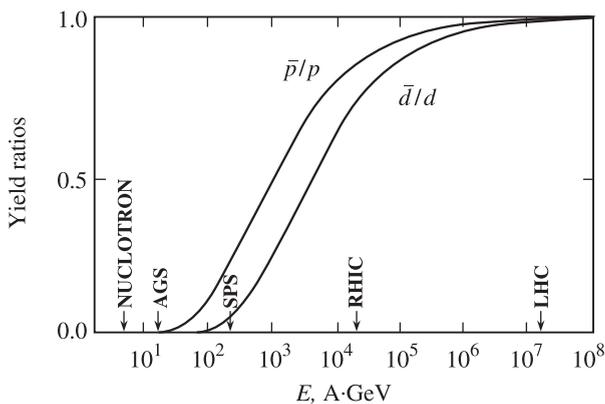


Рис. 3. Отношения выходов антипротонов к протонам и антидейтронов к дейтронам в зависимости от энергии в лабораторной системе координат

¹ Baldin A.M., Malakhov A.I. // JINR Rapid Communications. 1998. No. 1 (87). P. 5–12.

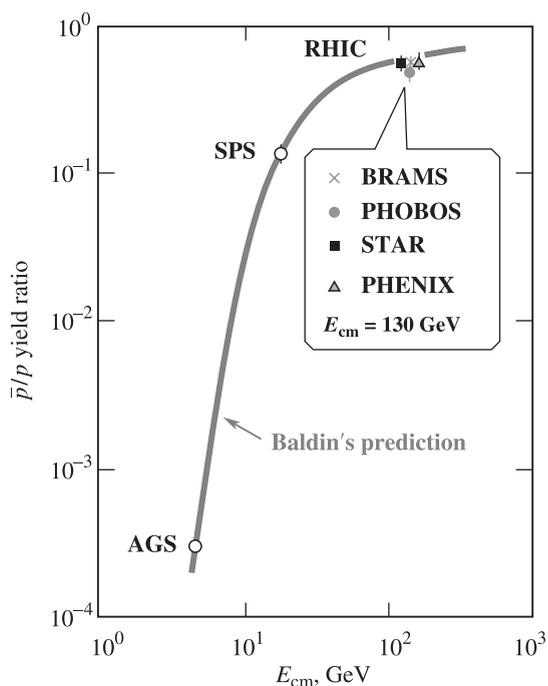
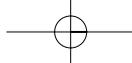


Рис. 4. Отношение выходов анти-протонов к выходам протонов в зависимости от энергии в системе центра масс. Значками отмечены экспериментальные данные. Кривая – предсказания, полученные с помощью метода Балдина

Эти предсказания довольно хорошо подтверждаются экспериментальными данными вплоть до последних предварительных данных, полученных на недавно запущенном в США коллайдере релятивистских тяжелых ионов RHIC (рис. 4).

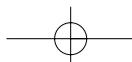
Другое направление исследований связано с получением поляризованного дейтронного пучка на синхрофазотроне. Благодаря энтузиазму группы Ю.К.Пилипенко ЛВЭ обладает уникальным источником поляризованных дейтронов.

Дейтрон представляет собой сложное образование, включающее S – состояние с нулевым орбитальным моментом нуклонов и D – состояние с орбитальным моментом нуклонов $L = 2$. Исследование взаимодействий поляризованных дейтронов крайне важно для понимания природы спина.

В данной статье невозможно рассказать обо всех результатах, полученных в лаборатории в области исследования поляризационных явлений в релятивистской ядерной физике. Поэтому далее будут упомянуты только некоторые результаты, касающиеся исследований с пучками поляризованных дейтронов и нейтронов.

На рис. 5 приведена сводка данных экспериментов по фрагментации (слева) и упругому рассеянию «назад» (справа) поляризованных и неполяризованных дейтронов.

Данные представлены в зависимости от относительного импульса нуклонов в дейтроне, вычисленного согласно правилам релятивистской квантовой механики. Для сравнения показаны предсказания теоретических моделей, не учитывающих кварковую структуру нуклонов дейтрона. На верхней шкале правого рисунка отложена эквивалентная кинетическая энергия протонов, если бы эта реакция исследовалась в рассеянии ускоренных протонов покоящимися дейтронами. Результаты, представ-



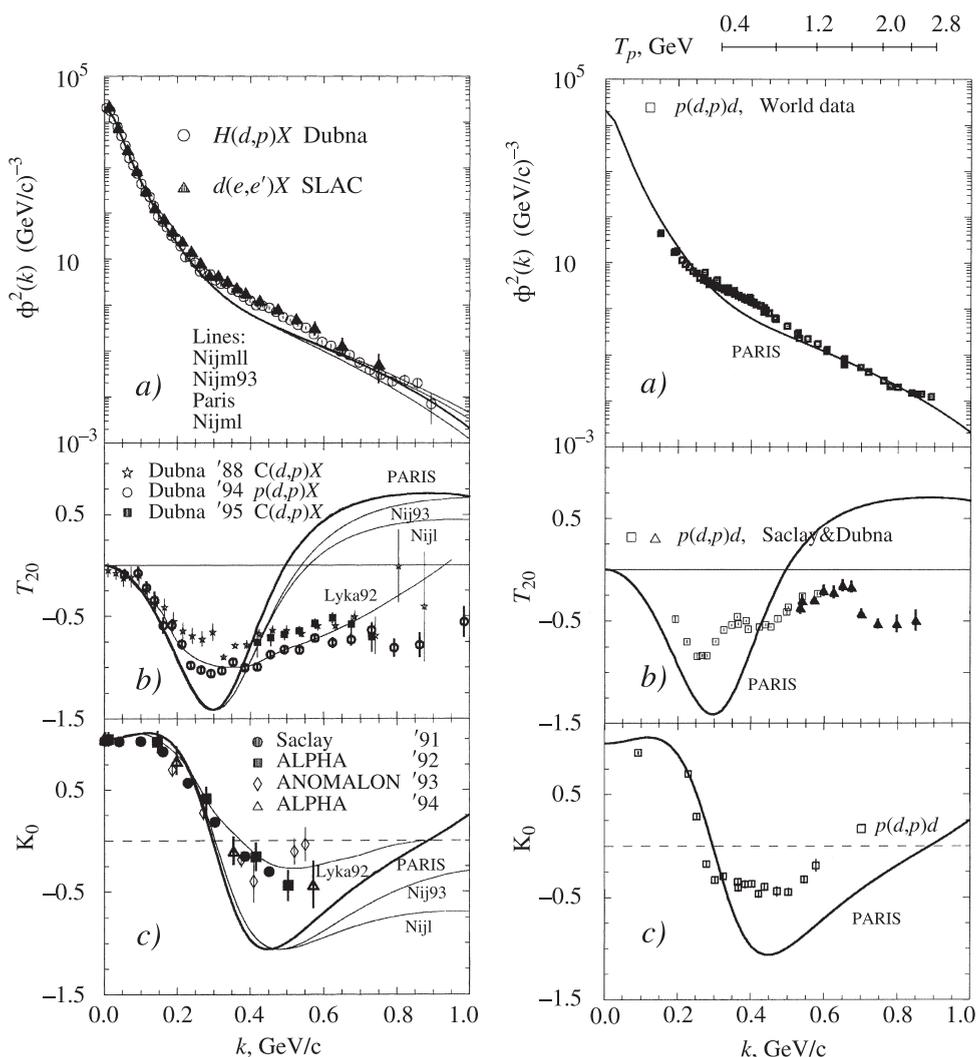


Рис. 5. Сводка данных экспериментов по фрагментации (слева) и упругому рассеянию «назад» (справа) поляризованных и неполяризованных дейтронов

ленные на среднем и нижнем графиках правого рисунка, получены сотрудничеством АЛЬФА в Дубне (синхрофазотрон) и Сакле (Сатурн-2).

Начиная с момента осуществления медленного вывода поляризованных дейтронов, на установке АЛЬФА была начата программа исследования поляризационных явлений в реакциях фрагментации дейтрона с вылетом фрагментов «вперед» адронными мишенями и в упругом рассеянии дейтронов протонами «назад» в системе центра масс (Л.Н.Струнов, Е.А.Строковский, И.М.Ситник, Н.М.Пискунов). Эта программа продолжалась почти 20 лет. Результаты, полученные в ее рамках, заложили

основу для сотрудничества между ЛВЭ и Лабораторией ядерных исследований в Сакле, Лабораторией имени Т.Джефферсона в США, Центром ядерных исследований в RIKEN (Япония). В результате были выполнены прецизионные измерения поляризационных характеристик этих реакций и обнаружены новые, неизвестные ранее, закономерности, свидетельствующие о проявлении эффектов кварковой структуры нуклонов в дейтроне. Неполная сводка полученных данных представлена на рис. 5, где показаны как результаты измерений эмпирической плотности вероятности (EMD) распределения протонов в дейтроне по импульсам (полученные с неполяризованным дейтронным пучком, см. верхние графики рис. 5), так и результаты измерений тензорной анализирующей способности (средние графики) и коэффициента передачи векторной поляризации дейтрона протону (фрагменту дейтрона или протону отдачи — в зависимости от типа реакции; нижние графики). Эти данные до сих пор являются «крепким орешком» для теории, требуя построения непротиворечивого теоретического описания релятивистских составных систем.

Дальнейшее развитие исследований поляризационных явлений в реакциях с поляризованными дейтронами пошло в направлении их изучения в реакциях рождения частиц. Наряду с экспериментами по неупругому рассеянию с регистрацией дейтрона (реакция (d, d')) проводились опыты с регистрацией кумулятивных мезонов. В частности, здесь остановимся только на последнем эксперименте на установке СФЕРА, который объединил в себе исследования кумулятивных и поляризационных явлений. Эти исследования предложены Л.С.Золиным и А.Г.Литвиненко. Были выполнены исследования тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции взаимодействия поляризованных дейтронов с ядрами с вылетом пионов под различными углами в кумулятивной области (рис. 6). Данные представляют исключительно большой интерес, так как существующие теоретические модели не только не описывают ход зависимости, но и предсказывают противоположный знак эффекта по сравнению с наблюдаемым в эксперименте.

Важно продолжить эти измерения для другого типа частиц, например каонов, в состав которых входят кварки, отсутствующие в исходных объектах. Эти исследования будут проводиться в рамках нового проекта 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 PIKASO. При увеличении импульса пиона от 0,4 до 0,8 ГэВ/с тензорная анализирующая способность A_{yy} падает от нуля 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 в 135 и 180 мрад.

Недавно опубликованы последние данные, полученные на установке ДЕЛЬТА-СИГМА (руководители Л.Н.Струнов и В.И.Шаров). Получены новые результаты для np спин-зависимой разницы полных сечений $\Delta\sigma_L(np)$ в зависимости от кинетической энергии поляризованного нейтронного пучка (рис. 7). Квазимонохроматический пучок нейтронов получался из ускоренных и выведенных векторно поляризованных дейтронов синхрофазотрона. Нейтроны проходили через большую поляризованную протонную мишень. Величины $\Delta\sigma_L(np)$ измерялись как разность между np полными сечениями для параллельных и антипараллельных поляризаций пучка и мишени,

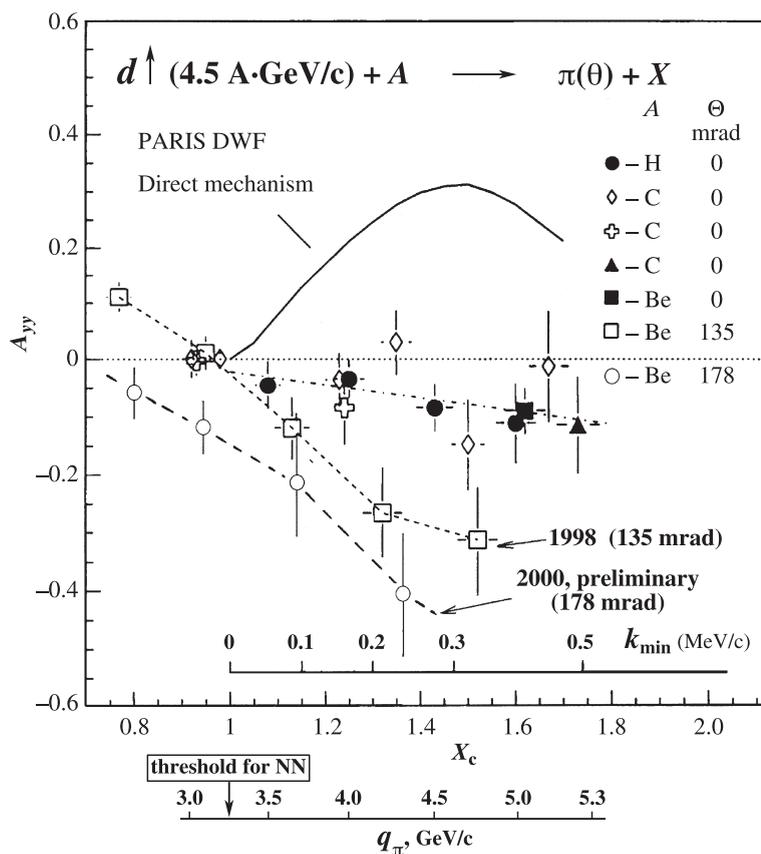


Рис. 6. Зависимость тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции $d \uparrow + A \rightarrow \pi(\theta) + X$ от кумулятивной переменной для различных углов вылета пионов

ориентированных вдоль импульса пучка. Наблюдается быстрый спад $\Delta\sigma_L(np)$ с ростом энергии выше 1,1 ГэВ. Для того, чтобы завершить эти исследования, планируется измерить энергетическую зависимость $\Delta\sigma_T(np)$ с поперечной поляризацией пучка нейтронов и протонов мишени. Эти эксперименты будут продолжены на нуклотроне.

В начале 80-х годов на синхрофазотроне были начаты исследования нового типа возбуждений ядерной материи, когда в ядерную материю «закачивается» большая по ядерным масштабам энергия – несколько сотен МэВ. Это так называемые «дельта-изобарные» возбуждения. Эксперименты были проведены на установке АЛЬФА в зарядово-обменной реакции (${}^3\text{He}, t$) под руководством Е.А.Строковского и Л.Н.Струнова, независимо и одновременно с аналогичными опытами в Сакле. Впервые было обнаружено существенное влияние ядерной среды на свойства возбуждаемых в ней нуклонных резонансов, что проявляется в видимом сдвиге положения ядерного дельта-изобарного пика относительно положения дельта-пика в реакции с протонной мишенью (рис. 8) (в некотором смысле это явление можно назвать ядерным аналогом эффекта Мёссбауэра). Были изучены зависимости этого эффекта от энергии пучка,

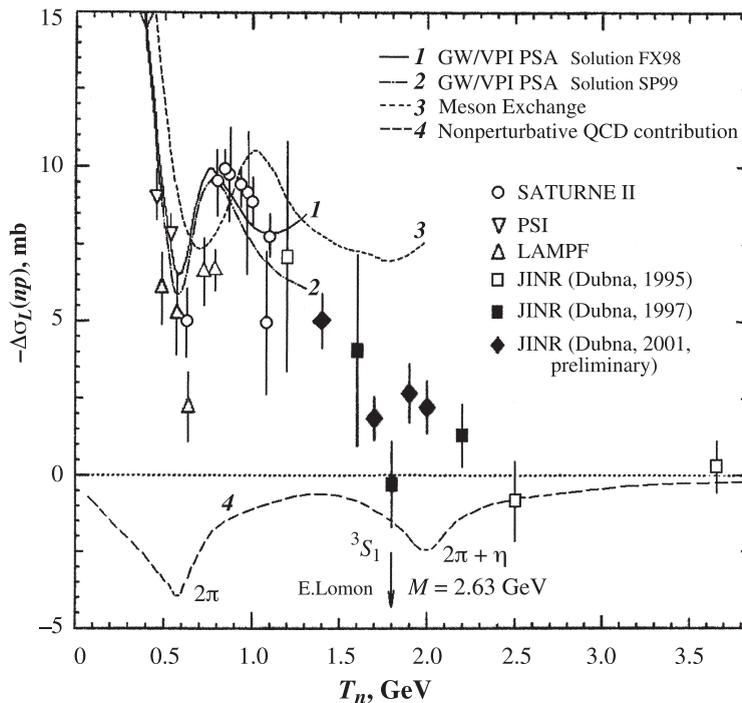


Рис. 7. Зависимость $\Delta\sigma_L(np)$ от кинетической энергии поляризованного нейтронного пучка

углов рассеяния, атомного номера мишени. Позже, под влиянием полученных в этих опытах результатов, аналогичные исследования были выполнены другими группами в ЛВЭ (коллорабация ГИБС) и в других центрах (ПИЯФ, Сакле, КЕК), в том числе с использованием поляризованных пучков. В настоящее время эта тематика — изменение свойств адронов в ядерной среде — активно развивается как теоретиками, так и экспериментаторами других исследовательских центров.

Интересные результаты были получены на синхрофазотроне коллаборацией ГИБС под руководством Ю.Лукстиныша, в частности — по исследованию образования гиперядер, изучению возбуждения дельта-изобар в ядре, полным сечениям ядроядерных взаимодействий. Весьма интересен также результат по наблюдению расширения объема, из которого излучаются узкие пионные пары в Mg-Mg-взаимодействиях.

М.И.Подгорецкий предложил метод измерения скорости (и размеров) источника интерференционным методом. Этот метод позволяет получить прямое экспериментальное доказательство нестационарности объема генерации пионов. Доказательство было впервые получено на установке ГИБС в ЛВЭ для центральных Mg-Mg-взаимодействий при 4,4 ГэВ/с М.Х.Аникиной, А.И.Голохвастовым и С.А.Хорозовым. Пионы из различных областей кинематического спектра испускаются различными элементами источника, движущимися относительно друг друга. На рис. 9, получившем название GIBS plot, представлены корреляция быстрот элементов объема Y_{source} ,

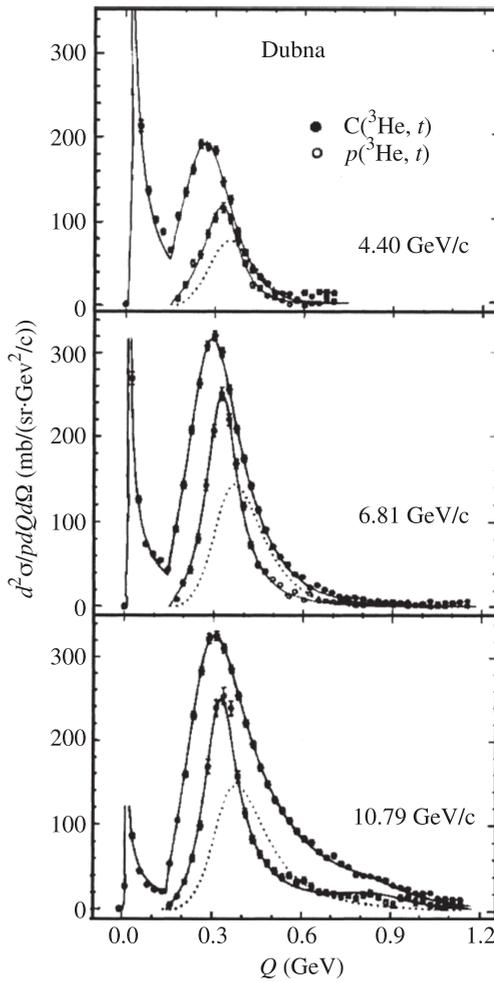


Рис. 8. Зависимость инвариантного сечения перезарядки ядер гелия-3 в тритоны от переданной мишени энергии Q . Верхние линии проведены через данные (точки) для перезарядки на ядре. Нижние сплошные линии проведены через данные для протонной мишени. Пунктирные линии соответствуют ожидаемому дельта-пику при перезарядке на квазисвободном нуклоне ядра-мишени с учетом его фермиевского движения в ядре. Данные «очищены» от эффектов инструментального разрешения

излучающего пионы, и быстрот пионных пар Y_{subset} в продольном и поперечном направлении относительно оси реакции в системе покоя Mg-Mg. Для случая стационарного источника корреляции между этими быстротами должны отсутствовать. Позднее аналогичная картинка была получена коллаборацией NA49 в ЦЕРН на ускорителе SPS в столкновениях ядер свинца при энергии 158 ГэВ на нуклон.

Сотрудничество ГИБС планирует продолжить исследования на нуклотроне зарядово-обменной реакции ($t, {}^3\text{He}$) на углероде и магнии, используя пучок трития с импульсом от 2,2 до 3,0 А·ГэВ/с. Также планируется участниками сотрудничества изучать рождение гиперядер с импульсом в несколько ГэВ/с. Это возможно в связи с тем, что гиперядра распадаются на расстояниях 20–30 см от точки рождения. Таким образом, будут исследоваться гиперядерные взаимодействия с различными поглотителями. В случае гипертритона метод позволяет оценить энергию связи Λ .

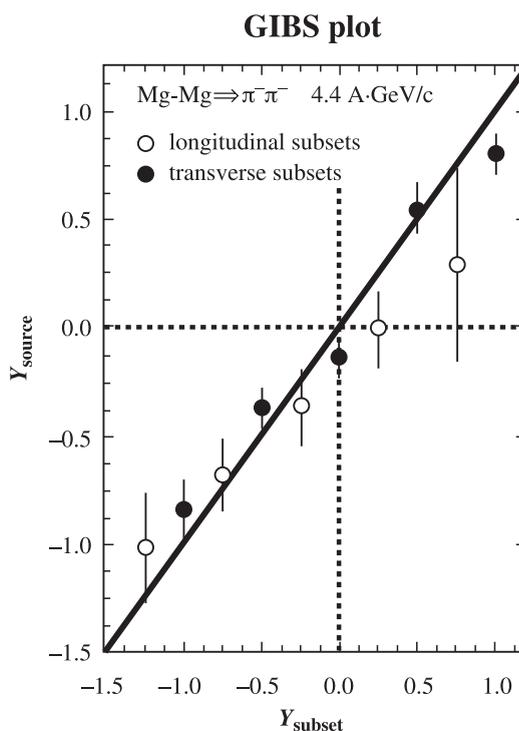


Рис. 9. Корреляция быстрот элементов объема Y_{source} , излучающего пионы, и быстрот пионных пар Y_{subset} в продольном и поперечном направлении относительно оси реакции в системе покоя Mg-Mg

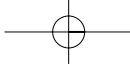
На ускорительном комплексе ЛВЭ работают установки из других лабораторий ОИЯИ и научных центров. Одним из таких примеров является установка Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ФАЗА (руководитель В.А.Карнаухов). Целью проекта ФАЗА является исследование механизма ядерной мультифрагментации, которая имеет место в ядро-ядерных взаимодействиях при промежуточных и высоких энергиях.

Ряд экспериментов уже был проведен с пучками протонов и альфа-частиц синхрофазотрона на 4π -спектрометре ФАЗА. Были получены следующие главные результаты: «холодный» спектрометр мишени расширяется перед испусканием фрагментов. Плотность при этом составляет примерно $1/3$ нормальной плотности. Этот эффект можно интерпретировать как наблюдение фазового перехода в ядерной материи типа газ–жидкость.

Программа исследований сотрудничества ФАЗА на нуклотроне направлена на дальнейшее изучение механизма тепловой мультифрагментации в ядро-ядерных столкновениях.

Это многотельный тип распада горячих ядер, взрывоподобный процесс, сопровождающийся множественной эмиссией фрагментов промежуточной массы (ФПМ, $2 < Z < 20$). Горячие ядра образуются как спектрометры мишени в соударениях легких релятивистских ионов с тяжелыми ядрами.

Доказано, что тепловая мультифрагментация является новым ядерным фазовым переходом (I рода) «жидкость–туман», происходящим при $T_f = 5-7$ МэВ. Горячее ядро, расширяясь за счет теплового давления, попадает в область фазовой неустойчиво-



сти (спинодальная область). В результате флуктуаций плотности гомогенная ядерная система распадается на ансамбль, состоящий из капелек и ядерного газа (нуклоны). Это — «ядерный туман», который разлетается под действием кулоновских сил и регистрируется как мультифрагментация.

Значение фазового перехода «жидкость—туман» для ядерной физики очевидно, хотя, возможно, он и не столь «фундаментален», как переход ядерной материи в кварк-глюонную плазму. Но зато он заведомо существует. Более того, получаемые при его исследовании данные полезны для понимания динамики сверхновых звезд.

Другой тип ядерного фазового перехода (уже II рода), «жидкость—газ», ожидается при более высокой температуре. Вершиной спинодальной области является особая точка — критическая температура T_c фазового перехода «жидкость—газ». В критической точке жидкая и газовая фазы становятся идентичными, граница раздела между ними исчезает, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_s(T)$ обращается в нуль. При $T > T_c$ существует только газовая фаза.

Из условия наилучшего согласия эксперимента с модельными предсказаниями найдено, что критическая температура для ядерного фазового перехода «жидкость—газ» $T_c = (17 \pm 2)$ МэВ.

Другим примером успешного сотрудничества с российскими институтами является работа на установке ДЕЛЬТА Института ядерных исследований (Троицк) (руководители В.А.Краснов и А.Б.Курепин). На этой установке были, в частности, получены первые данные на внутренней мишени нуклотрона по рождению K^+ -мезонов. В настоящее время установка готова также для работы на выведенном пучке нуклотрона.

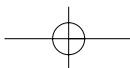
Начались исследования на выведенных пучках нуклотрона на установке МАРУСЯ (руководитель А.А.Балдин), предназначенной для исследований «переходного режима» в ядерной материи от нуклонных степеней свободы к кварк-глюонным.

Новизна предлагаемого исследования состоит в изучении редких подпороговых кумулятивных процессов и рождении антиматерии с учетом поляризации сталкивающихся объектов и степени центральности на основе дополнительного измерения множественности и идентификации ядерных фрагментов, не участвующих во взаимодействии. Исследование таких процессов возможно только с применением магнитооптических спектрометров, имеющих большой аксептанс и высокую селективность вторичных частиц. Магнитооптический спектрометр МАРУСЯ введен в строй в 2002 году.

Были проанализированы новые экспериментальные данные по односпиновым анализирующим способностям при рождении π^+ , 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.

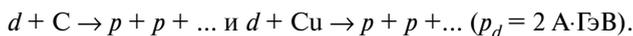
Группа коллаборации МАРУСЯ также провела исследования выхода вторичных фрагментов в результате взаимодействия внутреннего пучка нуклотрона с тяжелыми мишенями, используя тонкий полупроводниковый детектор. Эта группа получила хорошее разделение вторичных фрагментов с очень низкими энергиями в области от 2 до 25 МэВ в $d+Au$ взаимодействии при энергии дейтронов 1,044 ГэВ. Эти данные необходимы для изучения эффекта полного разрушения ядер, открытого ранее в ЛВЭ группой К.Д.Толстова.

В декабре 2003 года получены первые экспериментальные данные по рождению антипротонов и K^- -мезонов в реакциях $p+Pb$, $p+Al$. Вторичные пучки, полученные



на магнитооптическом спектрометре МАРУСЯ, обеспечивают экспериментальные условия для развития и испытания детекторов новых типов.

Продолжаются исследования на внутреннем пучке нуклотрона. В частности, проводится исследование процессов фрагментация ядер мишени в два кумулятивных протона с помощью установки СКАН-1 (руководитель С.В.Афанасьев) на внутреннем пучке нуклотрона. Изучаются корреляционные функции кумулятивных протонов, испущенных с малым относительным импульсом q для $d + C$ и $d + Cu$ реакций. 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 между $106-112^\circ$ в лабораторной системе, изучаются в реакциях



В результате этих измерений были получены приблизительно одинаковые радиусы для dC и dCu взаимодействий: $r_{dC} = 3,0 \pm 0,4^{0,5} \text{ fm}$ и $r_{dCu} = 2,6 \pm 0,7^{0,8} \text{ fm}$. Эти исследования продолжены для других налетающих частиц и мишеней.

Активно проводятся исследования на выведенном пучке нуклотрона в рамках проекта СТРЕЛА (руководители В.В.Глаголев и Н.М.Пискунов). 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 $np \rightarrow pn$.

Планируется измерить сечение рождения двух протонов при малом переданном импульсе в dp взаимодействиях в области импульсов дейтронов от 3,0 ГэВ/с до 4,0 ГэВ/с. Существует возможность получения информации относительно амплитуды элементарной зарядово-обменной реакции $np \rightarrow pn$ с помощью зарядово-обменного процесса $dp \rightarrow (pp)n$ из экспериментов с неполяризованными дейтронами. Простейшее описание этих двух реакций в рамках импульсного приближения заключается в рассмотрении двух процессов: а) $np \rightarrow pn$ зарядово-обменный процесс и б) $dp \rightarrow (pp)n$ реакция, т. е. зарядовый обмен на простейшем ядре – дейтроне. В первом случае (а) обе спиновых ориентации разрешены, в то время как во втором случае (б) при малом угле рассеяния (два протона движутся в переднем направлении с малым относительным импульсом) реакция может проходить, только если спин у рассеянного протона переворачивается (в соответствии с принципом Паули). При нулевом переданном импульсе дифференциальное сечение реакции $dp \rightarrow (pp)n$ определяется частью амплитуды с переворотом спина зарядово-обменного процесса $np \rightarrow pn$.

Большой интерес представляют исследования экзотических ядер, проводимых совместно с ФИАН под руководством П.И.Зарубина в рамках проекта БЕККЕРЕЛЬ (BECQUEREL – BEryllium (Boron) Clustering QUEst in RELativistic Multifragmentation).

Этот проект ориентирован на облучение фотоэмульсий легкими стабильными и радиоактивными ядрами с энергией порядка нескольких ГэВ на нуклон в пучках нуклотрона. Планируется облучать ядерные эмульсии пучками различных релятивист-

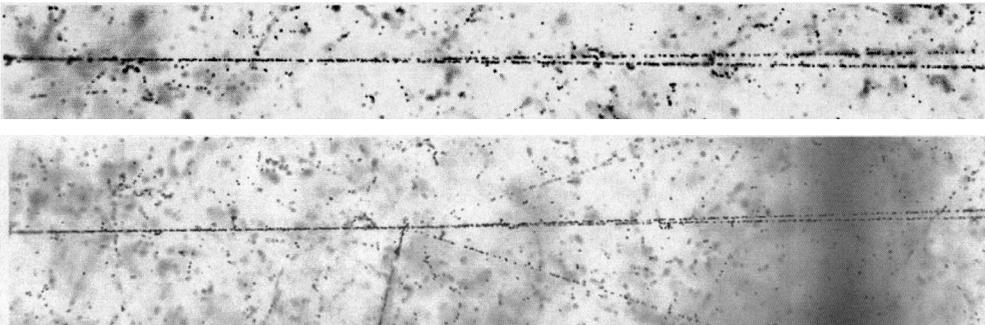


Рис. 10. Примеры периферической диссоциации ядер ${}^7\text{Be}$

ских ядер. Исследовательская программа концентрируется на детальном изучении фрагментации легких радиоактивных и стабильных ядер. Ожидаемые результаты позволят ответить на некоторые вопросы кластерной структуры легких ядер. Особый интерес представляют облучения вторичными пучками радиоактивных ядер He, Be, B,

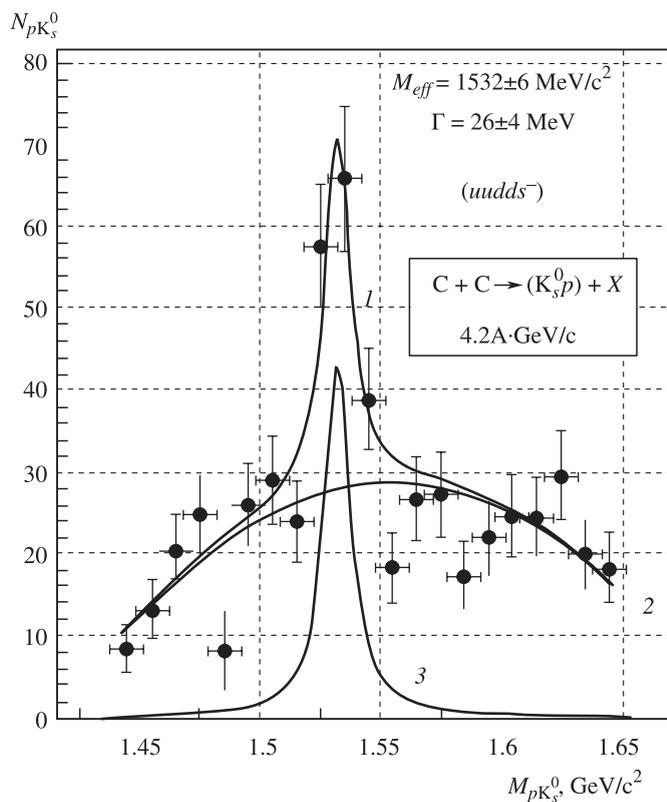


Рис. 11. Спектр эффективных масс системы (pK_s^0) в реакции $C + C \rightarrow (K_s^0 p) + X$ при импульсе $4,2 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}/c^2$ в области θ^+ -резонанса

С и N. Наличие экзотических пучков в ЛВЭ и автоматического сканирующего микроскопа в ФИАН делает эти исследования весьма перспективными.

Цель исследования — прояснить роль ^3He кластеризации в предстоящих облучениях с использованием ^7Be ($^4,^3\text{He}-^3\text{He}$), ^8B ($^1,^2\text{H}-^4,^3\text{He}-^3\text{He}$), ^9Be ($^4\text{He}-^4\text{He}$), ^9C ($^3\text{He}-^3\text{He}$), ^{10}C ($^3\text{He}-^3\text{He}-^4\text{He}$), ^{11}C ($^3\text{He}-^4\text{He}-^4\text{He}$).

На рис. 10 можно видеть примеры периферической диссоциации ядер ^7Be с энергией 1,23 А·ГэВ на пары ядер He (верхнее фото: диссоциация без возбуждения ядра мишени и без рождения заряженных мезонов; нижнее фото: диссоциация, сопровождаемая рождением фрагмента мишени и мезонной пары).

Вторичный пучок, содержащий значительную часть ядер ^7Be с энергией 1,23 А·ГэВ, был сформирован во время сеанса на нуклотроне путем отбора продуктов перезарядки первичных ядер ^7Li с помощью канала транспортировки пучка. Проводилось облучение эмульсионных стопок. Ядра ^7Be 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. 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 $^3\text{He} + ^3\text{He} + n$. Можно заключить, что ^3He кластеризация проявляется в распадах возбужденных релятивистских ядер ^7Be .

Совсем недавно группой сотрудников ЛВЭ и монгольских физиков ИФТ (Улан-Батор) были заново проанализированы экспериментальные материалы с двухметровой пропановой пузырьковой камеры с целью поиска экзотических многокварковых резонансных состояний в СС-взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон. В результате анализа было установлено, что в спектре эффективных масс системы (pK_S^0) наблюдается образование резонансов при значениях масс 1535 ± 2 ; 1739 ± 3 и 1911 ± 2 МэВ/ c^2 с шириной, равной разрешению по массе. На рис.11 в качестве иллюстрации приводится изображение спектра эффективных масс в области резонанса с массой 1530 МэВ/ c^2 .

4. Эксперименты ЛВЭ на ускорителе ИФВЭ

Лаборатория высоких энергий проводит исследования не только на своей ускорительной базе.

В октябре 1967 года в ИФВЭ фактически на первых оборотах пучка нового ускорителя объединенная группа физиков ОИЯИ–ИФВЭ уже приступила к исследованию упругого рассеяния протонов на протонах на малые углы.

Группой, возглавляемой В.А.Свиридовым (а впоследствии — В.А.Никитиным), была проведена существенная модернизация экспериментальной установки. Ядерные фотоэмульсии были заменены на полупроводниковые детекторы (Ю.К.Акимов, Л.С.Золин и др.), а тонкая пленочная мишень — на струйную газовую водородную мишень, созданную в ЛВЭ группой специалистов под руководством Ю.К.Пилипенко.