

УДК 539.1

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В ЛАБОРАТОРИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ИМЕНИ В. И. ВЕКслера И А. М. БАЛДИНА

А. И. Малахов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Дан обзор исследований, проводимых Лабораторией высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ, Дубна, в области релятивистской ядерной физики. Описываются некоторые текущие и будущие эксперименты на ускорительном комплексе синхрофазотрон–нуклотрон.

Investigations in the area of relativistic nuclear physics carried out at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, JINR, Dubna, are reviewed. Some current and future experiments at the Synchrophasotron–Nuclotron accelerator complex are described.

Говоря о развитии нового научного направления — релятивистской ядерной физики в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, следует отметить, что оно стало возможным благодаря наличию мощной экспериментальной базы лаборатории и накопленному опыту с момента ее создания в 1953 г.

Прежде всего, это наличие крупнейшего для своего времени ускорителя синхрофазотрона на десять миллиардов электронвольт, за создание которого В. И. Векслер, Ф. А. Водопьянов, Д. В. Ефремов, Л. П. Зиновьев, А. А. Коломенский, Е. Г. Комар, А. Л. Минц, Н. А. Моносзон, В. А. Петухов, М. С. Рабинович, С. М. Рубчинский и А. М. Столов получили высшую государственную награду — Ленинскую премию за 1959 г.

Существенным оказалось также наличие современных экспериментальных установок и богатого опыта работы на них. К моменту зарождения релятивистской ядерной физики сотрудниками ЛВЭ был выполнен большой объем экспериментальных работ, сделана масса открытий и получено много интересных результатов мирового уровня. Об этом подробно рассказано в докладе А. А. Кузнецова, опубликованном в настоящем сборнике.

Исследования, проводимые в последнее время в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, главным образом лежат в области релятивистской ядерной физики, основы которой были заложены Александром Михайловичем Балдиным в начале 70-х гг. В статье «Масштабная инвариантность адронных столкновений и возможность получения пучков частиц высоких энергий при релятивистском ускорении многозарядных ионов» (Краткие сообщ. по физике. 1971. № 1) А. М. Балдиным была высказана и обоснована мысль 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 [1].

В конце 1960-х гг. на синхрофазотроне ЛВЭ были ускорены дейтроны и, затем, был поставлен эксперимент по поиску коллективного эффекта в ядрах, который получил название ядерный кумулятивный эффект. Эксперимент был выполнен группой под

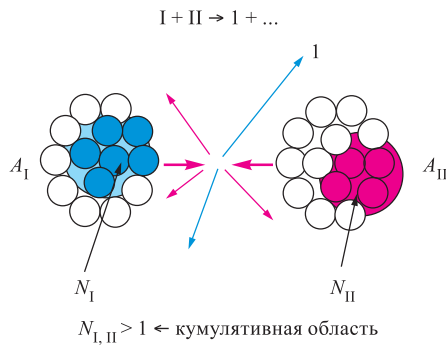


Рис. 1. Схематическое изображение ядерного кумулятивного эффекта. Два ядра с атомными номерами A_I и A_{II} взаимодействуют между собой и рождают инклюзивную частицу 1. Для правильного воспроизведения кинематических параметров частицы 1 необходимо предположить, что N_I нуклонов из ядра I взаимодействует с N_{II} нуклонами из ядра II

руководством В. С. Ставинского. Результаты по экспериментальному открытию ядерного кумулятивного эффекта были опубликованы в 1973 г. в работе [2].

Наивная картина ядерного кумулятивного эффекта представлена на рис. 1. Суть этого 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.

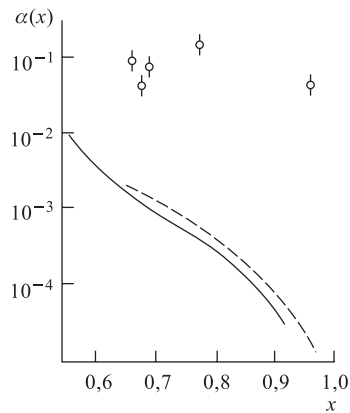


Рис. 2. Сравнение экспериментальных значений параметра α с расчетами. Точками представлены экспериментальные данные, штриховой кривой — результаты расчетов с использованием волновой функции дейтрона с кором (импульс дейтрона 10 ГэВ/с), сплошной — без кора

На рис. 2 представлены результаты упомянутого выше эксперимента, в котором был открыт кумулятивный эффект. Измерялось 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 (кривые на рис. 2).

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. [3–5].

А. М. Балдиным был организован международный семинар по проблемам физики высоких энергий («Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика»), проходящий регулярно в Дубне раз в два года уже более 30 лет [6].

В ЛВЭ постоянно уделялось большое внимание развитию ускорительного комплекса. Со временем синхрофазотрон превратился в ускоритель релятивистских ядер, ускоряющий ядра вплоть до ядер серы. Кроме того, были ускорены поляризованные дейтроны до рекордных энергий 4,5 ГэВ на нуклон. На синхрофазотроне до сих пор имеются рекордные по энергии пучки поляризованных дейтронов.

Для более успешной реализации программы исследований по релятивистской ядерной физике А. М. Балдиным с коллегами была выдвинута идея создания сверхпроводящего специализированного ускорителя релятивистских ядер нуклотрона, который был создан в крайне тяжелых экономических условиях и введен в строй в 1993 г.

Современный ускорительный комплекс ЛВЭ синхрофазотрон–нуклотрон обязан своим становлением огромной работе, проделанной учеными, инженерами и рабочими лаборатории. Среди них, прежде всего, необходимо отметить таких как С. А. Аверичев, Н. Н. Агапов, В. И. Батин, О. И. Бровка, В. П. Заболотин, Л. П. Зиновьев, М. А. Воеводин, В. И. Волков, Е. Д. Донец, И. Б. Иссинский, А. С. Исаев, В. Н. Карпинский, А. Д. Кириллов, А. Д. Коваленко, В. Ф. Кокшаров, Б. К. Курятников, В. И. Липченко, Л. Г. Макаров, Е. А. Матюшевский, В. А. Мончинский, А. И. Михайлов, В. А. Михайлов, И. Я. Нефедьев, П. И. Никитаев, С. А. Новиков, Б. Д. Омельченко, Ю. И. Паршаков, Ю. К. Пилипенко, С. В. Романов, П. А. Рукояткин, И. Н. Семенюшкин, А. А. Смирнов, Ю. И. Тятюшкин, Г. Г. Ходжибагян, А. П. Царенков, К. В. Чехлов, С. В. Федук, В. И. Шарапов, И. А. Шелаев и многих других.

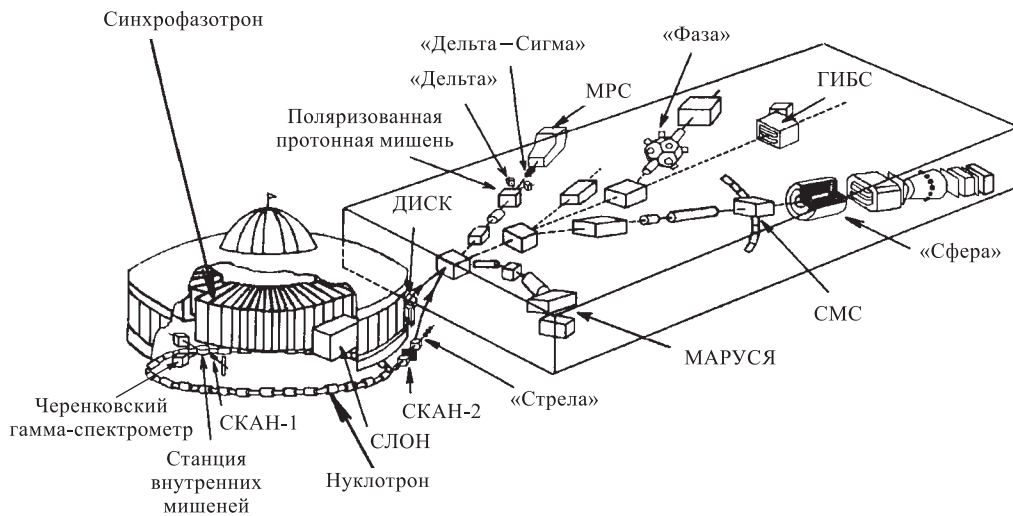


Рис. 3. Схема ускорительного комплекса синхрофазотрон–нуклотрон Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

Схема ускорительного комплекса ЛВЭ синхрофазотрон–нуклотрон представлена на рис. 3. Развитие ускорительного комплекса во времени отражает рис. 4. На этом рисунке по горизонтальной оси отложено время в годах, а по вертикальной оси отмечается какое-либо новое качество, приобретаемое ускорительным комплексом (в условных единицах).

Общий вид синхрофазотрона (вес магнита 36 тыс. т) и нуклотрона (вес магнитной системы 80 т) представлен на фото 1. На фото показан момент установки последнего элемента системы медленного вывода на основе сверхпроводящих магнитных элементов (первая в мире сверхпроводящая система медленного вывода пучка) в кольцо нуклотрона.

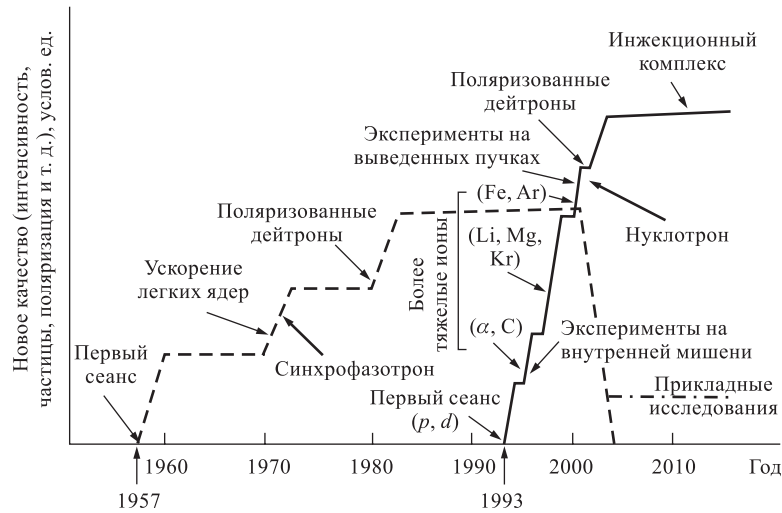


Рис. 4. Развитие ускорительного комплекса ЛВЭ во времени. По вертикальной оси откладывается какое-либо новое качество в условных единицах

В конце 1999 г. под руководством А. Д. Коваленко, И. Б. Иссинского и Е. А. Матюшевского было завершено создание системы медленного вывода и получен выведенный пучок частиц из нуклотрона.

В период создания нуклотрона, будучи в то время директором ОИЯИ, Н. Н. Боголюбов внимательно следил за ходом работ (фото 2). Н. Н. Боголюбов является автором теории сверхпроводимости, и сверхпроводящая квантовая система нуклотрона протяженностью в четверть километра вызывала у него огромный интерес.

Н. Н. Боголюбов поддерживал также развитие А. М. Балдиным в ОИЯИ релятивистской ядерной физики. В своем докладе, прочитанном на общем собрании Академии наук СССР 18 марта 1985 г., Н. Н. Боголюбов остановился на главной проблеме изучения кварков в ядрах и отметил, что в Дубне в 1971 г. по инициативе А. М. Балдина зародилась новая область исследований — релятивистская ядерная физика на стыке физики ядра и физики элементарных частиц (рис. 5) [7].

Исследование кумулятивных явлений, в частности, было продолжено Л. Шредером в Беркли. Рис. 6 взят из его работы, где он ссылается на данные Дубны [3]. На этом рисунке видна закономерность выхода характеристик кумулятивного эффекта на асимптотический режим в районе энергий 4–5 ГэВ. Это говорит о том, что в этой области энергий начинает проявляться кварк-глюонное строение ядерной материи, т. е. происходит переход от нуклонных к кварк-глюонным степеням свободы.



Фото 1. Синхрофазотрон и нуклотрон Лаборатории
высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований



Фото 2. Академики Н. Н. Боголюбов (справа) и А. М. Балдин осматривают магнитную систему нуклотрона

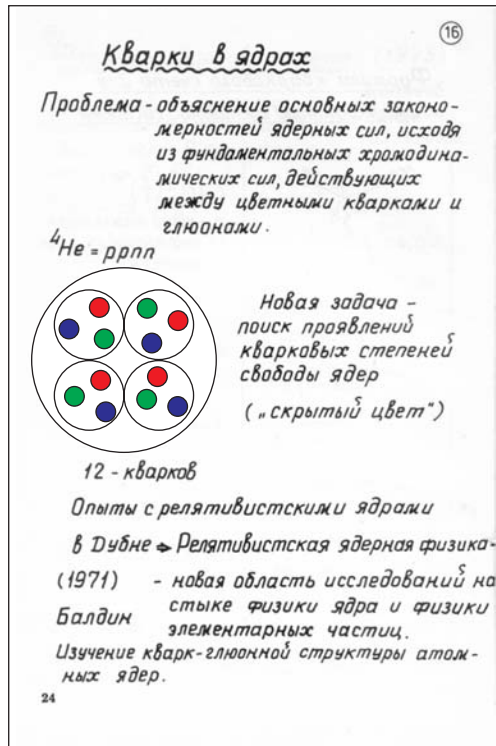
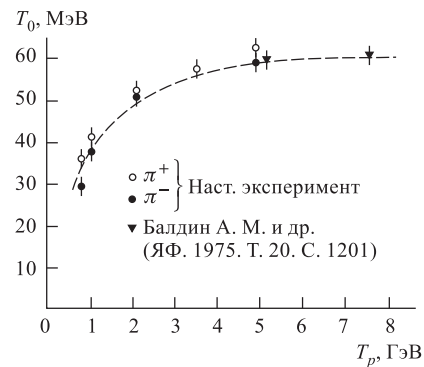


Рис. 5. Фрагмент из доклада Н. Н. Боголюбова [7]

Рис. 6. Зависимость параметра T_0 для пионов под углом 180° для p -Cu-столкновений от энергии налетающих протонов T . Сечение образования пионов представлено в виде $E d^3\sigma/dp^3 = C \exp(-T/T_0)$, где T — кинетическая энергия пионов в л. с. к. [3]



Под руководством А. М. Балдина релятивистская ядерная физика развивалась в самостоятельное направление. Большой вклад в работы ЛВЭ по релятивистской ядерной физике внесли ученые: С. В. Афанасьев, А. А. Балдин, Е. Бартке, Ц. Баатар, В. К. Бондарев, Л. А. Диденко, В. В. Глаголев, Н. Гиордэнеску, Ш. Гмуца, А. И. Голохвастов, Л. Б. Голованов, И. М. Граменицкий, В. Г. Гришин, П. И. Зарубин, Ю. В. Заневский, Л. С. Золин, В. А. Карнауков, Е. Н. Кладницкая, В. А. Краснов, А. А. Кузнецов, Б. А. Кулаков, Б. Кюн,

В. П. Ладыгин, Ф. Легар, А. Г. Литвиненко, Ю. Лукстиньш, Г. Мартинска, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин, Г. Л. Мелкумов, В. А. Никитин, Н. Нургожин, Э. О. Оконов, Ю. А. Панебратцев, В. Н. Пенев, Н. М. Пискунов, М. И. Подгорецкий, И. А. Савин, И. С. Сайтов, Б. Словински, М. И. Соловьев, В. С. Ставинский, 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. Это исследование кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, изучение асимптотических законов и исследование спиновой структуры легких ядер [8].

А. М. Балдин предложил изучать столкновения релятивистских ядер в пространстве четырехмерных скоростей [9]. В этом подходе он ввел инвариантные, безразмерные и измеримые переменные b_{ik} , являющиеся квадратом разности четырехскоростей между любыми частицами, участвующими во взаимодействии:

$$b_{ik} = -(u_i - u_k)^2, \quad (1)$$

где u_i и u_k — четырехмерные импульсы частиц.

С помощью этой переменной оказалось возможным дать 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.

Совокупность экспериментальных данных по кумулятивному эффекту дала возможность представить сечения взаимодействия ядер в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma(A_I A_{II} \rightarrow h_1 + \dots) &\sim A_I^n A_{II}^m(x) \exp(-x/\langle x \rangle), \\ b_{I1} > b_{I,II} &\gg 1, \quad 0,5 \leq x \leq 3,3, \\ m(x) &= 2/3 + x \quad (0,5 \leq x \leq 1), \quad m(x) = 1 \quad (x > 1), \end{aligned} \quad (2)$$

где A_I и A_{II} — атомные номера сталкивающихся ядер; h_1 — инклюзивный адрон, а x — кумулятивное число (эффективное число нуклонов, участвующих во взаимодействии).

Оказалось, что $\langle x \rangle \approx 0,14$ и характеризует размер мультикварковой системы, из которой излучаются кумулятивные частицы.

Кумулятивный эффект соответствует области $x > 1$.

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

$$G(x) = \exp(-x/\langle x \rangle), \quad (3)$$

характеризующей распределение кварков в ядрах.

В пространстве четырехскоростей А. М. Балдиным был введен принцип ослабления корреляций (ПОК). ПОК был впервые предложен 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, т. е. при $b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty$, распределение W , характеризующее систему, примет вид

$$W(b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty) = W_\alpha W_\beta, \quad (4)$$

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

$$d^2\sigma/db_{II1}dx_1 \sim F_I F_{II}(b_{II1}, x_1), \quad (5)$$

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

Таким образом, 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-партоновую 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.

ПОК позволил ввести понятие изолированной системы и тем самым понятие струй в пространстве четырехскоростей. Было дано инвариантное определение адронных струй в отличие от традиционных неинвариантных подходов. Струей в четырехмерном пространстве скоростей можно назвать группу адронов с относительно малыми b_{ik} . Ось струи определяется как следующий единичный четырехвектор:

$$V = \Sigma\{u_i/[(\Sigma u_i)^2]^{1/2}\}, \quad V_0^2 - \mathbf{V}^2 = 1, \quad (6)$$

где суммирование производится по всем частицам, принадлежащим к выбранной группе.

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

Можно определить квадрат четырехскорости частицы k относительно оси струи:

$$b_k = -(V - u_k)^2. \quad (7)$$

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 (рис. 7).

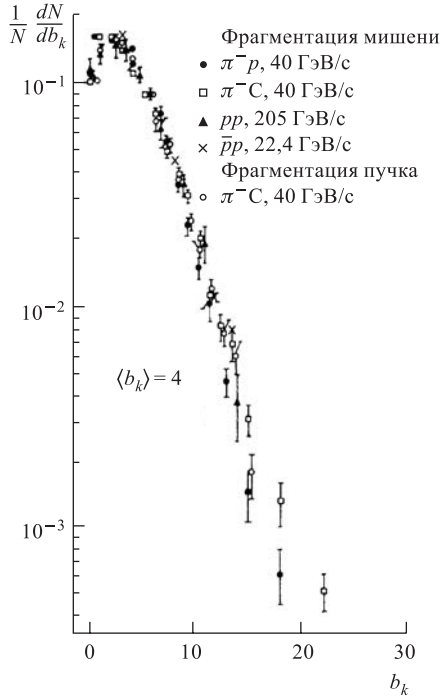


Рис. 7. Распределение вторичных пионов, рожденных в различных адрон-адронных и адрон-ядерных реакциях в области импульсов пучка 22,4–205 ГэВ/с, по переменной b_k

ных, полученных на недавно запущенном в США коллайдере релятивистских тяжелых ионов RHIC (рис. 9).

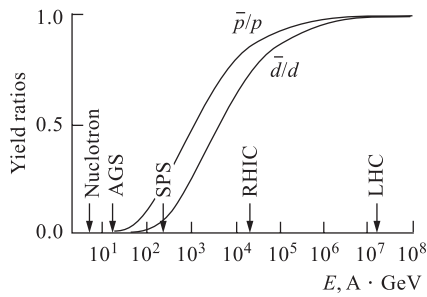


Рис. 8. Предсказания отношений выходов антипротонов к выходам протонов и отношений выходов антидейтронов к выходам дейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях в зависимости от энергии столкновения в л. с. к. с использованием формулы (9)

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

Использование А. М. Балдиным принципов симметрии позволило ему ввести параметр подобия Π для ядерных взаимодействий.

$$\Pi = \min \{1/2[(u_1 N_I + u_2 N_{II})^2]^{1/2}\}, \quad (8)$$

где N_I и N_{II} — кумулятивные числа для ядер I и II, а u_I и u_{II} — 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:

$$Ed^3\sigma/d\mathbf{p} = C_1 A_I^{\alpha(N_I)} A_{II}^{\alpha(N_{II})} \exp(-\Pi/C_2), \quad (9)$$

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⁻² · с³ · ср⁻¹ и $C_2 = 0,125 \pm 0,002$.

Используя закон сохранения четырехимпульса, А. М. Балдин нашел аналитическое выражение для параметра Π для центральной области быстрой инклюзивной частицы [10]. Это позволило ему предсказать, например, отношение выходов античастиц и частиц в зависимости от энергии, в том числе и в асимптотической области (рис. 8). Эти предсказания довольно хорошо подтверждаются экспериментальными данными вплоть до последних предварительных дан-

Дейтрон представляет собой сложное образование, включающее S -состояние с нулевым орбитальным моментом нуклонов и D -состояние с орбитальным моментом нуклонов $L = 2$ (рис. 10). Исследование взаимодействий поляризованных дейтронов крайне важно для понимания природы спина.

В одном докладе невозможно рассказать о всех результатах, полученных в лаборатории. Поэтому далее будут упомянуты лишь некоторые результаты последних лет.

В частности, здесь остановимся только на самом последнем эксперименте на установке СФЕРА, который объединил в себе исследования кумулятивных и поляризационных явлений. Эти исследования были 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. 11). Данные представляют крайне большой интерес, так как существующие теоретические модели не только не описывают ход зависимостей, но и предсказывают противоположный знак эффекта по сравнению с наблюдаемым в эксперименте. Интересно 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.

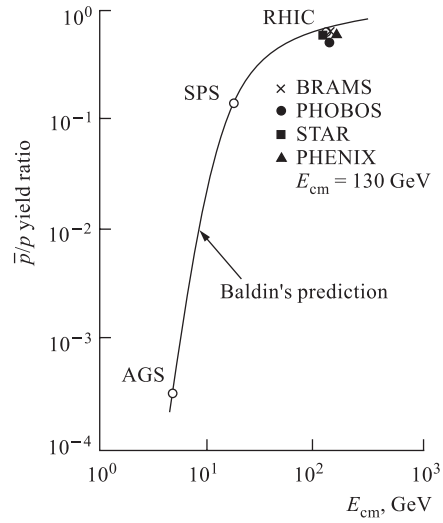
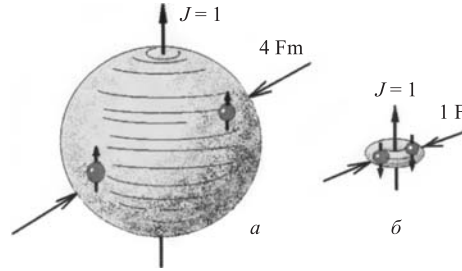


Рис. 9. Сравнение предсказаний, сделанных с использованием параметра подобия Π , с экспериментальными данными, полученными на RHIC

Рис. 10. Структура дейтрона. Дейтрон представляет из себя смесь двух состояний (S и D). *а*) S -состояние с нулевым орбитальным моментом нуклонов $L = 0$; *б*) D -состояние с орбитальным моментом нуклонов $L = 2$



Недавно были 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 $\Delta\sigma_L(np)$ при кинетической энергии поляризованного нейтронного пучка 1,59; 1,79 и 2,20 ГэВ (рис. 12). 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 полными np -сече-

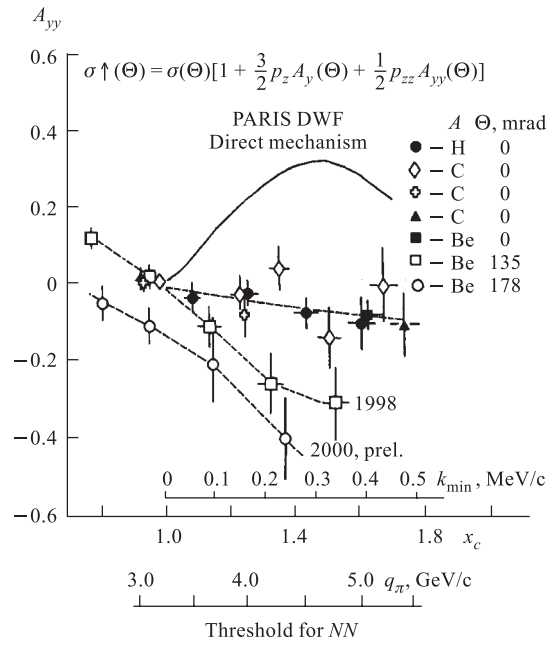


Рис. 11. Зависимость тензорной анализирующей способности A_{yy} от кумулятивного числа x_c для реакции $d \uparrow + A \rightarrow \pi^- (\theta = 0; 135; 178 \text{ мрад}) + \dots$

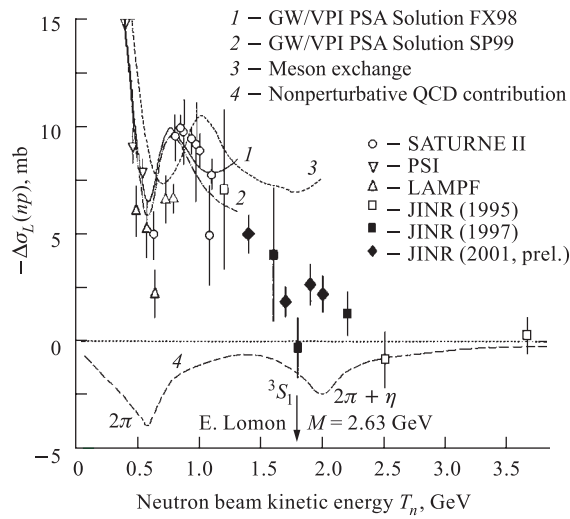


Рис. 12. Энергетическая зависимость $\Delta\sigma_L(np)$

ниями для параллельных и антипараллельных поляризаций пучка и мишени, ориентированных вдоль импульса пучка. Был наблюден 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.

Установка ГИБС является магнитным спектрометром на основе стримерной камеры с размерами $1,9 \times 0,8 \times 0,6$ м. На синхрофазотроне под руководством Ю. Лукстиньша были получены интересные результаты коллаборацией ГИБС, в частности по исследованию образования гиперъядер, изучению возбуждения дельта-изобар в ядре. 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. Это 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 друг относительно друга. На рис. 13, получившем название GIBS plot, представлена 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. Для случая стационарного источника корреляции между этими быстротами должны отсутствовать. Позднее аналогичная картинка была получена коллаборацией NA-49 в ЦЕРН на ускорителе SPS в столкновениях ядер свинца при энергии 158 ГэВ на нуклон.

Коллаборация ГИБС планирует исследовать на нуклотроне зарядово-обменную реакцию ($t, {}^3\text{He}$) на углероде и магнии, используя пучок трития с импульсом от 2,2 до 3,0 А · ГэВ/с.

В другом эксперименте будет изучаться рождение гиперъядер с импульсом в несколько ГэВ/с. Это возможно в связи с тем, что гиперъядра распадаются на расстояниях 20–30 см от точки рождения. Таким образом, будут исследоваться гиперъядерные взаимодействия с различными поглотителями. В случае гипертритона метод позволяет оценить энергию связи Λ .

На ускорительном комплексе ЛВЭ работают установки из других лабораторий ОИЯИ и научных центров. Примером такой установки является установка Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзержепова «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.

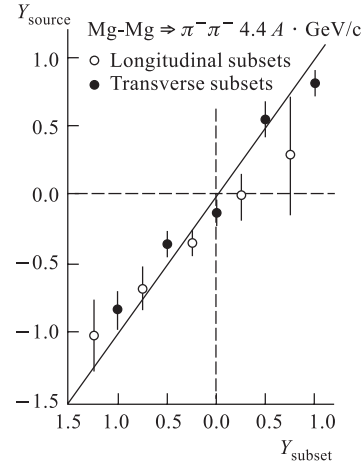


Рис. 13. Корреляция быстрот элементов объема Y_{source} , излучающего пионы, и быстрот пионных пар Y_{subset} (в продольном и поперечном направлениях) относительно оси реакции в системе покоя Mg–Mg

Ряд экспериментов был проведен с пучками протонов и α -частиц синхротрона на 4 π -спектрометре «Фаза». Получен главный результат: холодный спектатор 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 коллаборации «Фаза» на нуклотроне направлена на дальнейшее исследование механизма испускания фрагментов в несимметричных ядро-ядерных столкновениях. Наиболее важными ожидаемыми результатами будут:

- новые данные по зависимости времени распада системы от энергии возбуждения и массы налетающего ядра;
- данные по эволюции механизма распада от чисто термальной мультифрагментации к более сложной с ростом массы налетающего ядра.

Примером успешного сотрудничества с российскими институтами является работа на установке «Дельта» Института ядерных исследований (г. 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.

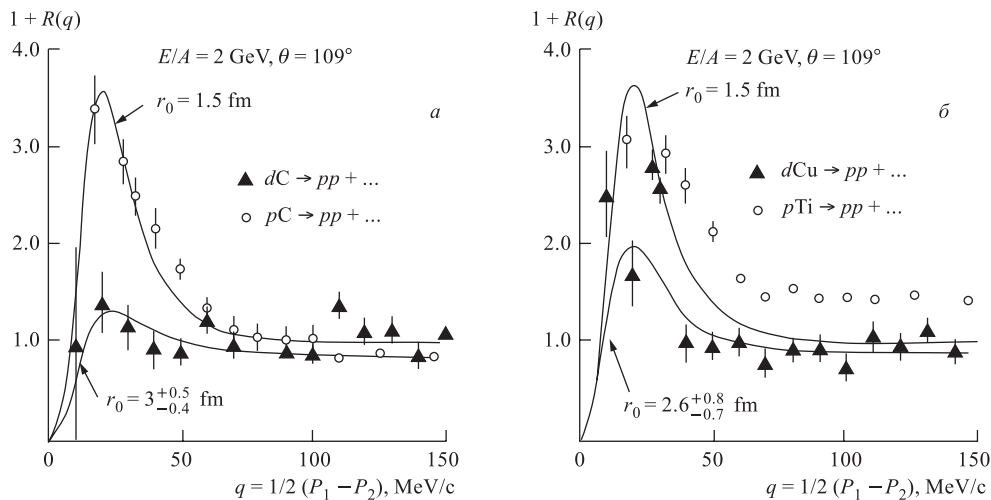
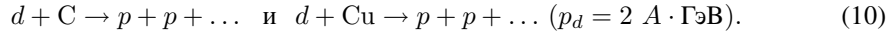


Рис. 14. Корреляционные функции кумулятивных протонов, испущенных с малым относительным импульсом q для dC - (а) и dCu -реакций (б)

Продолжаются исследования на внутреннем пучке нуклотрона. В частности, проводится исследование процессов фрагментации ядер мишени в два кумулятивных протона с помощью установки СКАН-1 (руководитель С. В. Афанасьев) на внутреннем пучке нуклотрона. На рис. 14 приведены корреляционные функции кумулятивных протонов, испущенных с малым относительным импульсом q для dC - и dCu -реакций. Целью экспе-

римента 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 $d\text{Cu}$ -взаимодействий: $r_{dC} = 3,0 \pm_{0,4}^{0,5}$ фм и $r_{d\text{Cu}} = 2,6 \pm_{0,7}^{0,8}$ фм. Эти исследования продолжены для других налетающих частиц и мишеней.

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 $d + \text{Au}$ -взаимодействии при энергии дейтронов 1,044 ГэВ.

Эти данные необходимы для изучения эффекта полного разрушения ядер, открытого ранее в ЛВЭ группой К. Д. Толстова.

Активно проводятся исследования на выведенном пучке нуклотрона в рамках проекта СТРЕЛА (руководители В. В. Глаголев и Н. М. Пискунов). Изучается спиново-зависимая часть нуклонной амплитуды рассеяния в $np \rightarrow pn$ зарядово-обменном процессе на выведенном пучке дейтронов. Планируется измерить сечение рождения двух протонов при малом переданном импульсе в dp -взаимодействиях в области импульсов дейтронов от 3,0 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 спиновые 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 представляет исследование экзотических ядер, проводимое совместно с ФИАН под руководством П. И. Зарубина в рамках проекта BECQUEREL. Планируется облучать ядерные эмульсии пучками различных релятивистских ядер. Исследовательская программа концентрируется на детальном изучении фрагментации легких радиоактивных и стабильных ядер. Ожидаемые результаты позволят ответить на некоторые вопросы кластерной структуры легких ядер. На рис. 15 представлено событие диссоциации ядра ^{24}Mg в эмульсии на пять ядер ^4He и ядро ^3He . Особый интерес представляют облучения вторичными пучками радиоактивных ядер He, Be, B, C и N. Наличие экзотических пучков в ЛВЭ и автоматического сканирующего микроскопа в ФИАН делает эти исследования весьма перспективными.

Проводимые в ЛВЭ фундаментальные исследования в области релятивистской ядерной физики дают возможность решать важные прикладные задачи. Приведем далеко не полный перечень прикладных направлений, развиваемых в ЛВЭ:

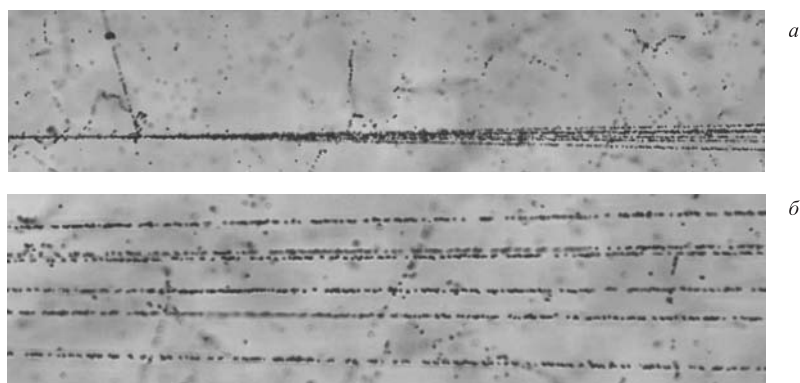


Рис. 15. Событие диссоциации ядра ^{24}Mg на пять ядер ^4He (а) и ядро ^3He в ядерной эмульсии (б)

- радиобиология и космическая медицина;
- влияние ядерных пучков на компоненты микроэлектроники;
- изучение трансмутации радиоактивных отходов;
- вопросы электроядерного метода генерации энергии (управление ядерным реактором с помощью пучков заряженных частиц);
- использование ядерных пучков для раковой терапии.

ЛВЭ не замыкается только на исследованиях на своей ускорительной базе. Активно участвуют группы из лаборатории в исследованиях на пучках ядер свинца с энергией 158 ГэВ на нуклон в ЦЕРН на ускорителе SPS в коллаборациях NA-45 (руководитель Ю. А. Панебратцев), NA-49 (руководитель Г. Л. Мелкумов). Сигналы, полученные в этих экспериментах, были интерпретированы как указание на существование нового состояния материи (кварк-глюонная плазма).

Ряд сотрудников лаборатории принимает активное участие в проектах ALICE (руководитель А. С. Водопьянов) и CMS (руководитель А. И. Малахов) для коллайдера LHC, создаваемого в ЦЕРН.

Группа Ю. А. Панебратцева активно участвует в эксперименте STAR, а группа А. Г. Литвиненко — в эксперименте PHENIX на недавно запущенном в США ядерном коллайдере RHIC.

Довольно активное участие принимает группа Ю. В. Заневского в эксперименте NADES в GSI (Германия). Для этого эксперимента специалисты группы изготовили систему уникальных дрейфовых камер.

В настоящее время началось плодотворное сотрудничество ЛВЭ с GSI по участию в работах по новому проекту Международного ускорительного центра для исследований с ионами и антипротонами.

В работах ЛВЭ активно участвуют ученые практически из всех стран-участниц ОИЯИ, а также из ряда других стран, таких как Австралия, Германия, Греция, США, Франция, Япония.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдин А. М. // Краткие сообщ. ФИАН. 1971. № 1. С. 35.
2. Балдин А. М. и др. // ЯФ. 1973. Т. 18, вып. 1. С. 79.
3. Schroeder L. S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43, No. 24. P. 1787.
4. Boyarinov S. et al. // Proc. of the XII Intern. Seminar on High Energy Physics Problems / Eds. A. M. Baldin, V. V. Burov. Dubna, 1997. P. 352–358.
5. Беляев И. М. и др. // ЯФ. 1993. Т. 56. С. 135.
6. Proc. of the XIV Intern. Seminar on High Energy Physics Problems / Eds. A. M. Baldin, V. V. Burov. 2000.
7. Боголюбов Н. Н. Сообщение ОИЯИ Д2-85-206. Дубна, 1985.
8. Baldin A. M., Malakhov A. I., Sissakian A. N. // Phys. Part. Nucl. 2001. V. 32, Suppl. 1. P. S4–S30.
9. Baldin A. M., Didenko L. A. // Fortschr. Phys. 1990. V. 38, No. 4. P. 261–332.
10. Baldin A. M., Malakhov A. I. // JINR Rapid Commun. 1998. No. 1[87]. P. 5–12.