

Линейный ускоритель электронов на энергию 50 МэВ, после модернизации — на 100 МэВ (ЛУЭ-100) ЛФЯР.

уникальная установка мирового уровня [16]. Ее основу составлял магнитный спектрометр с "магическим углом" с собственным разрешением $\sim 10^{-4}$ и стабильностью $\sim 10^{-5}$. Пучок электронов на мишень подавался оригинальной трехмагнитной системой формирования, обеспечивающей разрешение по энергии электронов 10^{-3} . Общее разрешение установки составило $\sim 2 \times 10^{-3}$. Из экспериментов по рассеянию электронов были определены распределение заряда на ядре ^{12}C , параметры основного и низколежащих возбужденных состояний ядра ^{27}Al .

Вторая система формирования пучка создавалась и настраивалась для экспериментов с γ -квантами от аннигиляции позитронов. В частности, на ней было измерено сечение реакции $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$ в области энергий 12–25 МэВ [17].

В ЛФЯР активно велись актуальные теоретические работы (Б.А. Тулупов, Р.А. Эрамжян). После Л.Е. Лазаревой заведующим ЛФЯР по 1998 г. стал Р.А. Эрамжян, затем — В.Г. Недорезов. Ускорители С-3 и ЛУЭ-100 закончили работу в начале 90-х годов.

Выросшая из лаборатории ускорителей и фотоядерных реакций В.И. Векслера ЛФЯР по количеству и качеству научных результатов стала одной из ведущих лабораторий мира по исследованию электромагнитных взаимодействий ядер в области энергий, получаемых на ускорителях С-3, ЛУЭ-100, частично С-25. Многие из работ ЛФЯР получили международное признание и стали классическими.

Список литературы

1. Вавилов С И *УФН* **28** 1 (1946)
2. *Материалы Мемориального кабинета В.И. Векслера* (М.: ЛФЯР ИЯИ РАН)
3. *Воспоминания о В.И. Векслере* (Отв. ред. М А Марков, А Н Горбунов) (М.: Наука, 1987)
4. Ратнер Б С, Препринт № 1108 (М.: ИЯИ, 2003); Болотовский Б М, Ратнер Б С, Препринт № 1177 (М.: ИЯИ, 2007)
5. "Отчет по установке, ФИАН им. П.Н. Лебедева, лаборатория В.И. Векслера (1949)" *Труды ФИАН* **19** 98 (1963)
6. Ратнер Б С *Атомная энергия* **34** 499 (1973)
7. Долбилкин Б С, Запечалов В А, Корин В И, Николаев Ф А *ЖЭТФ* **44** 866 (1963)
8. Ратнер Б С *ЖЭТФ* **46** 1480 (1964); *ЯФ* **21** 1147 (1975)
9. Вербицкий С С, Лапик А М, Ратнер Б С, Щитов В П *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **48** 1023 (1984); Ратнер Б С *Изв. РАН Сер. физ.* **62** 1726 (1999)
10. Долбилкин Б С, Корин В И, Лазарева Л Е, Николаев Ф А *Письма в ЖЭТФ* **1** (5) 47 (1965); Долбилкин Б С *Труды ФИАН* **36** 18 (1966)
11. Dolbilkin B S, Korin V I, Lazareva L E, Nikolaev F A, Zapevalov V A *Nucl. Phys.* **72** 137 (1965)
12. Долбилкин Б С, Исаков А И, Корин В И, Лазарева Л Е, Николаев Ф А *ЯФ* **8** 1080 (1968)
13. Гуревич Г М, Лазарева Л Е, Мазур В М, Солодухов Г В *Письма в ЖЭТФ* **23** 411 (1976)
14. Gurevich G M, Lazareva L E, Mazur V M, Soloduchov G V, Tulupov V A *Nucl. Phys. A* **273** 326 (1976)
15. Корецкая И С, Кузнецов В П, Лазарева Л Е, Недорезов В Г, Никитина Н В *ЯФ* **30** 910 (1979)
16. Batjunin A V, Dolbilkin B S, Kondratiev R L, Lisin V P *Proc. Sendai Conf. Electro- and Photoexcitations. Suppl. Res. Rep. Lab. Nucl. Sci. Jpn* **10** 313 (1977)
17. Джилавян Л З, Кучер Н П *ЯФ* **30** 294 (1979)

PACS number: 29.20.Lq

Исследования на Синхрофазотроне

В.А. Никитин

1. Введение

Выдающийся советский ученый В.И. Векслер имел блестящий талант ученого и организатора. В сложные послевоенные годы он возглавил смелый проект создания самого большого в то время ускорителя — Синхрофазотрона. На Синхрофазотроне был сделан ряд фундаментальных открытий и выполнены пионерские исследования в физике высоких энергий: изучены распадные свойства К-мезонов и векторных мезонов, измерены полные и дифференциальные сечения взаимодействия пионов, протонов и К-мезонов с протонами, получены пучки ядер, в том числе поляризованных дейтронов, заложены основы релятивистской ядерной физики и др. Исследования на Синхрофазотроне создали основу для широкого международного сотрудничества ученых. Развитие техники эксперимента привело к прогрессу в смежных областях науки и прикладных исследованиях.

2. Нестареющее наследство В.И. Векслера

В этом году (2007 г.) научная общественность отмечает 100-летие со дня рождения выдающегося советского

ученого Владимира Иосифовича Векслера. Физикам всего мира он известен как автор одного из крупнейших открытий XX века — принципа автофазировки, который лежит в основе работы всех ныне действующих циклических ускорителей релятивистских частиц. В сложные послевоенные годы В.И. Векслер возглавил чрезвычайно смелый проект создания в Дубне самого большого в то время ускорителя — Синхрофазотрона (СФ). Проект готовился в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева. Он был утвержден директором ФИАНа Д.В. Скобельцыным в январе 1951 г. Руководителями проекта были назначены В.И. Векслер, А.П. Комар, М.А. Марков, В.А. Петухов, М.С. Рабинович, А.А. Коломенский, К.И. Блинов. Физическую программу исследований подготовили в 1952 г. М.А. Марков, И.В. Чувило, В.И. Гольданский, А.А. Коломенский, А.Н. Горбунов, А.Е. Чудаков. В ней формулируются задачи исследования множественного рождения частиц в протон-протонных столкновениях, измерения упругих и полных сечений взаимодействия π -мезонов с протонами, поиск новых частиц, в частности антипротонов. Указывается на возможность образования ядерной материи, состоящей из пионов. В марте 1957 г. на СФ был получен пучок протонов с рекордной энергией 10 ГэВ. Лаборатория высоких энергий, возглавляемая В.И. Векслером, вошла в состав Объединенного института ядерных исследований и стала основой для широкого международного сотрудничества ученых. Пуск СФ вызвал широкий резонанс в мире и был признан выдающимся достижением науки. Пресса писала об этой машине как о "восьмом чуде света". Нильс Бор, посетивший ОИЯИ в 1961 г., произнес емкую и точную фразу: "Чтобы задумать и построить такое сооружение, нужна была очень большая смелость".

На СФ был сделан ряд фундаментальных открытий в физике высоких энергий, а развитие техники эксперимента привело к прогрессу в смежных областях науки и прикладных исследованиях. В.И. Векслер имел блестящий талант ученого и организатора. Его нестарееющее наследство включает труды по физике ускорителей и экспериментальной физике. Он был основателем и лидером школы инженеров и ученых, которые продолжают развивать его идеи во многих лабораториях мира [1].



Слева направо: Н. Бор, И.Е. Тамм и В.И. Векслер в Дубне (1961 г.).

3. Первые обороты пучка ускорителя

Коллектив (будущей) Лаборатории высоких энергий в Дубне формировался с 1953–1955 гг. В это же время начались методические разработки. Сразу после получения пучка протонов с энергией 10 ГэВ стартовала программа физических исследований. Назовем лишь некоторые наиболее значимые работы, выполненные в начальный период (1957–1965 гг.) и приведем также имена их основных исполнителей. Почти все эти работы имели успешное продолжение на ускорителе У-70 в ИФВЭ и других ускорителях при более высокой энергии.

В.И. Векслер, И.Н. Семеновский, А.Б. Кузнецов — создание пучка антипротонов методом высокочастотной сепарации [2].

А.Л. Любимов, Л.Н. Струнов — создание меченого пучка антипротонов и регистрация антигиперонов в камере Вильсона.

А.Л. Любимов — измерение полного и дифференциального сечения p -рассеяния [3].

А.С. Вовенко, Б.А. Кулаков, М.Ф. Лихачев, Ю.А. Матуленко, И.А. Савин, В.С. Ставинский — разработка газовых черенковских счетчиков [4].

Э.О. Оконов, Д. Нягу, В.А. Русаков — исследование распадов K^0 -мезонов — поиск эффекта антигравитации K^0 -мезона [5]. Наблюдение регенерации $K_2^0 \rightarrow K_1^0$ и проверка теоремы Померанчука [6].

М.И. Соловьев, Г.М. Сташков, Н.М. Вирясов, Р.М. Лебедев — создание пузырьковых камер и программа исследований на них [7].

М.И. Подгорецкий, К.Д. Толстов, В.В. Глаголев, И.М. Граменицкий, В.И. Любимов, В.А. Никитин, М.Г. Шафранова — облучение эмульсий и широкая программа исследований на них [8].

В.И. Мороз, М.Н. Хачатурян, И.В. Чувило — формирование нейтронного пучка и измерение полных сечений p -взаимодействия.

М.Н. Хачатурян, А.М. Балдин, М.А. Азимов — создание черенковского γ -спектрометра и наблюдение распада векторных мезонов на e^+e^- -пары [9].

В.А. Свиридов, В.А. Никитин, Л.Н. Струнов — упругое рассеяние частиц на малые углы [10].

К.Д. Толстов, В.А. Никитин, Л.С. Золин, Ю.К. Пилипенко — создание сверхзвуковой струйной газовой мишени [11].

4. Исследования с пузырьковыми камерами

В 1950–1960-е годы важным инструментом наблюдения взаимодействия частиц были пузырьковые камеры. Пузырьковая камера имеет ряд замечательных достоинств: возможность заполнения камеры различными веществами (водород, пропан, ксенон и др.), которые служат мишенью и чувствительной средой, большой объем регистрации частиц — до нескольких кубических метров, высокая точность измерения координат точек на треках ~ 200 мкм, возможность регистрации γ -квантов (особенно в ксеноновой камере), наблюдение картины взаимодействия в полном телесном угле 4π и др. В период 1955–1970 гг. в ЛВЭ ОИЯИ был создан ряд газовых и пузырьковых камер: камеры Вильсона (газообразный водород, гелий, аргон) с размером по пучку 40 см, 50 см, 1 м; пропановые пузырьковые камеры (24 л, 2 м); ксеноновая пузырьковая камера (50 см);



Водородная пузырьковая камера 2 м на сборочном стенде.

водородные пузырьковые камеры (40 см, 1 м, 2 м); водородная камера (2 м) с дейтериевой мишенью [7].

Перечислим кратко некоторые результаты исследований на пузырьковых камерах. Работы выполнены на СФ при энергии пучков 3 – 10 ГэВ и на ускорителе ИФВЭ У-70 при энергии протонов 70 ГэВ и пионов 40 ГэВ [12].

Обнаружена инерция барионного заряда: в событиях pp - и $p\pi$ -взаимодействия с множественностью пионов $n_\pi \leq 4$ угловое распределение барионов в с.ц.м. резко анизотропно. Для pp -взаимодействия барионы образуют два конуса: вперед и назад. Эти частицы были названы лидирующими, так как их импульсы заметно больше среднего импульса частиц в данном событии. В событиях $p\pi$ -столкновения барионы образуют только один конус — назад. В событиях с $n_\pi \geq 8$ наблюдается угловая изотропия. Для конусов вперед-назад введено понятие области фрагментации мишени и пучка. Остальная часть события названа областью пионизации. Позже ее стали также называть центральной областью.

Измерены импульсные корреляции тождественных и нетождественных частиц. Определены пространственно-

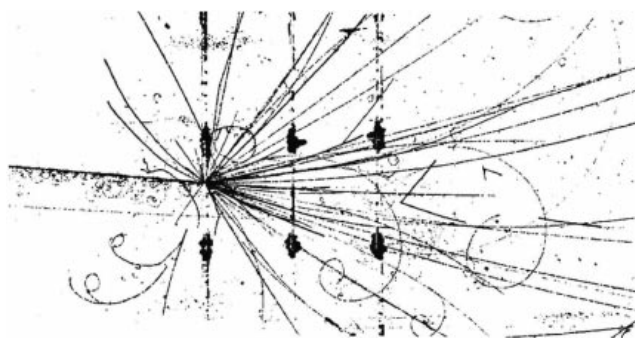


Рис. 1. Событие $ST\pi$ -взаимодействия при энергии пучкового ядра С 4,5 А ГэВ. Снимок сделан в пропановой камере размером 2 м с танталовыми пластинами в качестве мишеней.

временные размеры области взаимодействия. Совокупность данных качественно согласуется с мультипериферической моделью множественного рождения частиц.

Получен обширный материал по ядро-ядерным взаимодействиям: dC , CC , $ST\pi$ и др. Эти данные сохраняют актуальность и служат для развития теоретических моделей AA -столкновений. Характерное событие AA -взаимодействия показано на рис. 1.

Получены характеристики рождения странных частиц, антипротонов и антигиперонов. Обнаружено множественное рождение странных частиц. Открыты резонансы $f(980) \rightarrow 2K$, $f(600) \rightarrow 2\pi$ (σ -мезон) [13, 14].

В пропановой камере объемом 24 л в 1960 г. впервые наблюдали событие образования антигиперона $\bar{\Sigma}^-$. В силу уникальности оно заслуживает особого упоминания. Камера облучалась пучком π^- -мезонов с энергией 7 ГэВ. На рисунке 2 показана фотография этого события и ее расшифровка. Интересно также отметить, что при этом наблюдаются четыре странные частицы. Это первое экспериментальное свидетельство множественного рождения странных частиц [16].

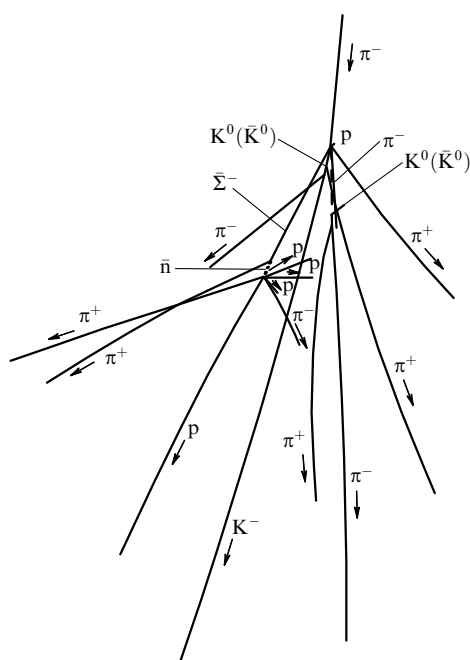
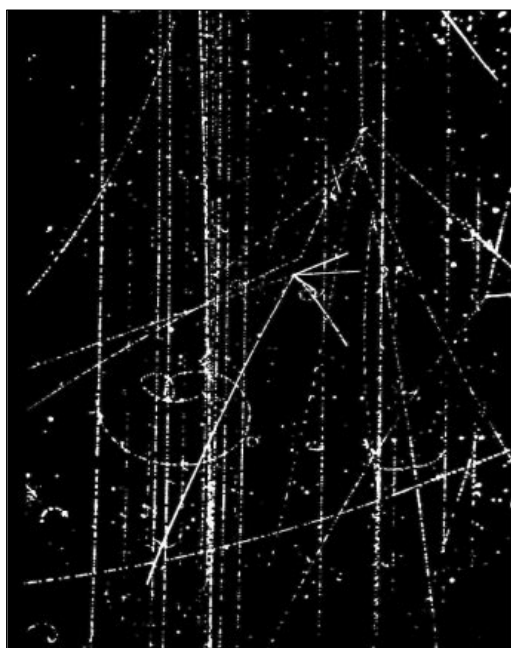


Рис. 2. Фотография события рождения антигиперона $\bar{\Sigma}^-$ и ее расшифровка.

5. Исследование кумулятивных процессов

Анализ экспериментальных данных о взаимодействии лептонов, протонов и ядер с протонами и ядрами, полученных в начале 1970-х годов, привел к идее масштабной инвариантности неупругих процессов. Этот термин означает подобие спектров вторичных адронов для разных энергий первичных частиц. Еще это называют автомодельностью (самоподобием) или скейлингом. В квантовой теории поля под автомодельностью понимается независимость асимптотической формы амплитуд процессов при большой энергии и большом переданном импульсе от размерных параметров, включая массы частиц. Зависимость от безразмерных (масштабированных) импульсных переменных называется масштабной инвариантностью. По-видимому, впервые этот закон предложил Дж.Д. Бьеркен в 1968 г. применительно к глубоконеупругому рассеянию электронов на протонах [17]. Эксперимент подтвердил теоретическое предсказание: дифференциальное сечение ер-рассеяния $e + p \rightarrow e' + X$ в области $E_e \gg m$ и $Q^2 \gg m^2$ не зависит ни от энергии первичного электрона E_e , ни от четырехимпульса $Q^2 = -q^2$, переданного электроном системе вторичных адронов X . Сечение зависит только от масштабной переменной $x_B = Q^2/2mv$. Здесь $v = E_e - E'_e$ — энергия, переданная электроном протону, m — масса протона; знаменатель в этом выражении можно назвать масштабным параметром или параметром подобия. Позже оказалось, что скейлинг Бьеркена слабо, но нарушается, т.е. сечение логарифмически зависит от Q^2 . Этот слабый, но существенный эффект в настоящее время понят в рамках квантовой хромодинамики, и далее мы его не обсуждаем. В глубоконеупругом рассеянии электрон предположительно взаимодействует с некой частью протона — партоном. Физический смысл переменной x_B — это доля импульса протона, который несет данный партон. Очевидно, для ер-столкновения x_B изменяется в пределах 0–1. В случае столкновения с ядром предполагается, что электрон может передавать импульс группе нуклонов (точнее — партону, принадлежащему компактной группе нуклонов). И тогда допустима область $x_B \geq 1$, о чем и пойдет речь ниже.

Анализ экспериментальных данных показал, что для представления сечения инклюзивного процесса $A + B \rightarrow c + X$ (наблюдается только одна частица c) удобно ввести масштабную безразмерную переменную $x = p_c/p_{c,\max}$, где в знаменателе в качестве масштабного параметра стоит максимально возможный по кинематике импульс частицы c . Тогда сечение $d\sigma/dp_c(s, p_c) = f(x)$ оказывается универсальной функцией $f(x)$, не зависящей от энергии \sqrt{s} . В 1971 г. А.М. Балдин высказал гипотезу [18] о том, что сечения типа $f(x)$ при взаимодействии релятивистских адронов определяются локальными свойствами адронной материи, а не геометрическими характеристиками объектов A, B (например, формфакторами). При этом критерием "релятивизма" считается условие $E_{A,B,c} \gg \varepsilon$, где ε — характерная энергия связи частиц в объектах A, B . Таким образом, возникает задача релятивистского описания возбужденной адронной материи и протяженных составных объектов. Началась эра релятивистской ядерной физики. В настоящее время круг этих проблем широко обсуждается как задача поиска кварк-глюонной плазмы. Однако при поиске плазмы в эксперименте нельзя ограничиться

инклюзивным подходом. Плазма может проявить себя в коллективном поведении большого числа частиц. Поэтому в каждом событии необходимо регистрировать частицы в широком угловом интервале, близком к 4π .

Одно из ярких явлений в круге этих проблем — кумулятивный эффект, когда при столкновении релятивистских ядер энергия инклюзивной частицы превышает энергию, приходящуюся на один нуклон, или точнее, когда в импульсном пространстве частица выходит за границу, разрешенную кинематикой столкновения пары нуклонов. Описать кумулятивные процессы можно, используя механизм возбуждения группы из N нуклонов $N^* \rightarrow c + N$. Число нуклонов N зависит от ядра (A или B), а вероятность $P_N(N)$ ассоциации N определяется модельным способом, например вычислять ее по биномиальному закону. Тогда сечение в общем виде есть

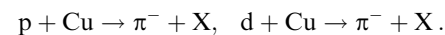
$$E \frac{d\sigma}{dp} = \sum_{N_{\min}}^A P_N(N) f_N(x_N). \quad (1)$$

Минимальное число нуклонов в ассоциации определяется кинематическим соотношением

$$N_{\min} \approx E_c - P_c \frac{\cos \theta_c}{m} \approx Q,$$

где θ_c — угол между импульсами частицы c и фрагментирующего ядра. Величина N_{\min} также обозначается как Q и называется кумулятивным числом.

Первая экспериментальная проверка гипотезы кумулятивного эффекта выполнена группой В.С. Ставинского [15, 18] в 1971 г. на пучках протонов и дейтронов, ускоренных на СФ до импульса 10 ГэВ/с. При этом импульс одного нуклона в дейтроне составлял около 5 ГэВ/с. Изменялись сечения инклюзивных реакций



Оказалось, что импульсный спектр пионов во второй реакции простирается значительно выше границы, разрешенной кинематикой взаимодействия только пары нуклонов. Было измерено также отношение сечений приведенных реакций $\sigma(d\text{Cu})/\sigma(p\text{Cu})$ для значений масштабной переменной $x = p_\pi/p_{\pi,\max}$ в интервале $0,5 \leq x \leq 1$ при $p_\perp \approx 0$ и при разных энергиях дейтрона. Данные представлены на рис. 3. Сплошной кривой показана аналитическая аппроксимация данных по нуклон-нуклонному взаимодействию. Точки — выход пионов в реакции $d\text{Cu}$, увеличенный в 20 раз (для сравнения). Как видим, сечения реакций $d\text{Cu}$ и $p\text{Cu}$ подобны, что свидетельствует о справедливости масштабной инвариантности в кинематической области, где рождение пионов возможно только при совместном действии пары нуклонов в дейтроне. Рисунок 3б иллюстрирует поведение вероятности кумулятивного процесса — величины P_2 из уравнения (1). Оценку величины P_2 можно сделать как вероятность нахождения двух нуклонов в дейтроне в некотором объеме радиусом $r \approx 0,7$ фм, характерным для мезонообразования: $P_2 = (r/r_D)^3 \approx 5 \times 10^{-2}$. Здесь r_D — радиус дейтрона, вычисляемый из его волновой функции. Кривые на этом рисунке соответствуют расчету P_2 в импульсном приближении, результаты которого расходятся с экспериментальными данными на несколько порядков. Таким

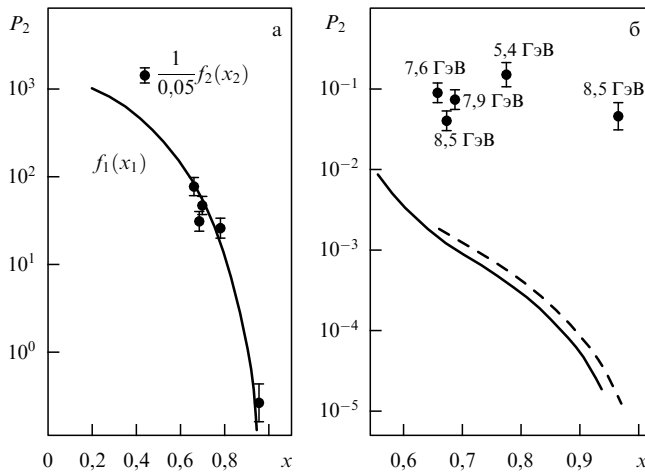


Рис. 3. (а) Сравнение выходов пионов в реакциях pCu (сплошная кривая) (f_1) и dCu (•) (f_2). (б) Вероятность кумулятивного процесса P_2 в уравнении (1). Кривые показывают расчет P_2 в импульсном приближении.

образом, показано существование кумулятивного эффекта и соответствие его величины гипотезе масштабной инвариантности и достаточно простой модели совместного действия двух нуклонов.

Авторы работы [15] измерили эмиссию протонов под углом 137° из фрагментирующего ядра углерода в реакции pC при энергии протонов в интервале 1–6 ГэВ. Спектр протонов показан на рис. 4. Стрелками показаны импульсы, которые в соответствии с кинематикой должен иметь протон, квазиупруго рассеянный на нуклонных кластерах типа d, t, α . Наглядно видно присутствие в спектре кумулятивной области $p_b \geq 400$ МэВ/с. Однако никаких особенностей типа пиков в спектре не обнаруживается. Это еще раз демонстрирует партонный характер изучаемых процессов: действуют не нуклоны, а партоны, несущие значительную часть импульса группы из нескольких нуклонов. Роль нуклонных кластеров также ярко проявляется в реакциях подпорогового рождения части. Например, порог образования антипротона на

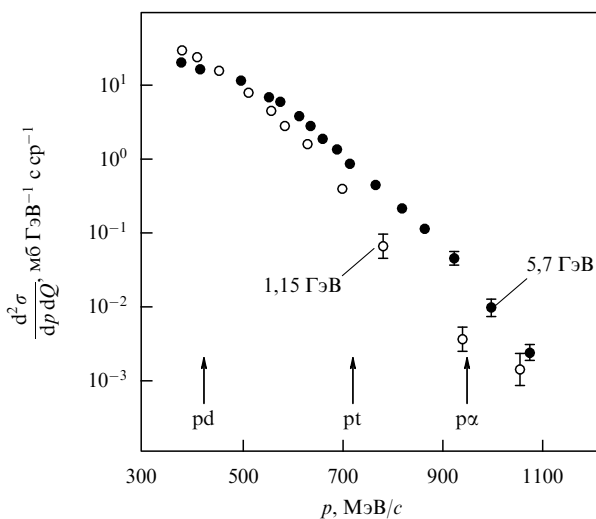


Рис. 4. Спектр протонов в реакции $p + C \rightarrow p + X$. Стрелки показывают положения ожидаемых квазиупругих максимумов.

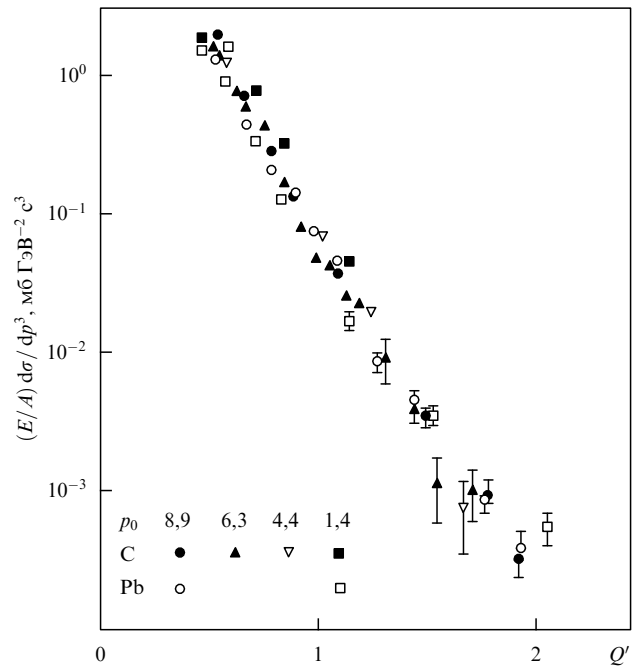


Рис. 5. Зависимость сечения образования пионов от кумулятивного числа Q . Фрагментируют ядра С и Pb.

нуклоне составляет 6,6 ГэВ. Однако эксперимент обнаруживает антипротоны существенно ниже порога при энергии 3,9 ГэВ.

Анализ обширного экспериментального материала позволил установить ряд важных закономерностей кумулятивных процессов. Зависимость сечения от атомных номеров фрагментирующего ядра A_f , ядра пучка A_b и кумулятивного числа Q дается формулой

$$E \frac{d\sigma}{dp} = CA_f^n A_b^{1/3} \exp\left(-\frac{Q}{Q_0}\right).$$

Зависимость сечения от Q показана на рис. 5.

В случае эмиссии пионов параметр $n \approx 0,8$ в области энергии пионов $T_\pi \leq 200$ МэВ. В области $T_\pi \geq 300$ МэВ он стремится к постоянной величине $\approx 1,08$. Смена режима говорит о включении в процесс кумуляции ядра в целом. Совсем другой характер зависимости сечения от атомного номера ядра-мишени наблюдается при образовании фрагментов p, d, t. Показатель n принимает соответственно значения $4/3, 5/3$ и 2 (!). Энергетический спектр кумулятивных частиц хорошо представляется экспонентой

$$E \frac{d\sigma}{dp} = C \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right).$$

Характерные значения параметра T_0 представлены на рис. 6 как функции импульса пучкового протона. Опять следует отметить выход процесса на скейлинговый режим при импульсе пучка $p_b \geq 4$ ГэВ/с.

6. Исследование упругого рассеяния частиц на малые углы

В 1960-е годы волнующей и широко обсуждаемой проблемой была асимптотика адронных взаимодействий: как ведут себя полные сечения и амплитуды бинарных

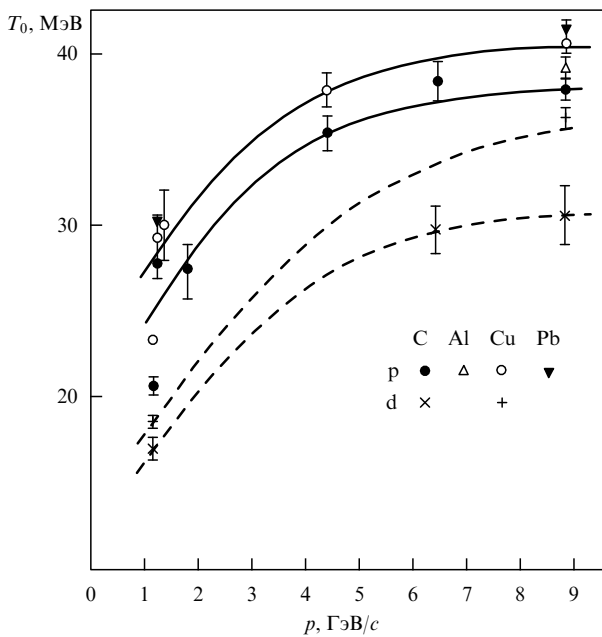


Рис. 6. Эффективная температура, характеризующая эмиссию кумулятивных протонов и дейтронов из разных фрагментирующих ядер в реакциях pA.

процессов при $E \rightarrow \infty$? Простейшее и потому наиболее привлекательное предположение основывалось на оптической модели: полные сечения $\sigma_{\text{tot}} \sim 2\pi r^2$ и наклон дифракционного конуса $b = r^2/2$, $d\sigma/dt \sim \exp(bt)$ стремятся к постоянному значению, поскольку адрон, как протяженный объект, представляет собой поглощающую (серую или черную) сферу с постоянным радиусом r , который много больше длины волны ($r \gg \lambda$, $\lambda = h/p$). Соответственно, действительная часть амплитуды упругого рассеяния, обусловленная в оптике не дифракцией, а коэффициентом преломления, стремится к нулю: $\rho(E) = \text{Re } A/\text{Im } A \rightarrow 0$. Знание параметра ρ позволяет проверить дисперсионные соотношения, которые связывают действительную и мнимую части амплитуды упругого рассеяния частиц. Они выведены на основе основных аксиом квантовой теории поля: причинности, унитарности, лоренц-инвариантности и спектральности. Исследование рассеяния протона на дейтроне дает информацию о формфакторе дейтрона и амплитуде протон-нейтронного рассеяния в частности, ее действительную часть. Данные о ней практически невозможно получить другими методами.

В начале 1960-х годов была сформулирована концепция полюсов Редже, которая претендовала стать главным элементом теории сильных взаимодействий. При достаточно высокой энергии согласно реджистике в бинарные процессы и в полные сечения главный вклад дает один полюс — померон:

$$\frac{d\sigma(s, t)}{dt} = f(t) \left(\frac{s}{s_0} \right)^{2\alpha(t)-2}, \quad \alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' t, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{tot}}(s) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\alpha(0)-1},$$

$$b(s) = b_0 + 2\alpha' \ln \left(\frac{s}{s_0} \right), \quad \rho \approx 0.$$

Предсказательная сила модели (2) невелика, так как она содержит произвольную функцию $f(t)$ и два важных параметра $\alpha(0)$ и α' , которые определяют тип асимптотики. При $\alpha(0) \leq 1$ имеем асимптотику с убывающими или постоянными полными сечениями, при $\alpha > 1$ сечения полиномиально растут, и, чтобы избежать противоречия с теоремой Фруассара, необходимо значительно усложнить модель (1) путем учета перерасеяний померона (выполнить унитаризацию амплитуды померона). Если $\alpha' = 0$, то имеем аналог классической оптики с $b = \text{const}$. Если $\alpha' > 0$, то во всех дифракционных процессах присутствует универсальный логарифмический рост b -параметра (и радиуса области взаимодействия).

Таким образом, перед экспериментаторами встала задача проверить соотношения (2) и определить, по крайней мере, три важных параметра $\alpha(0)$, α' и ρ . Оценки показывают, что измерения необходимо проводить с высокой точностью (2–3% в дифференциальном сечении) и во всем доступном интервале энергии $E > 1$ ГэВ.

Исследования упругого рассеяния пионов и протонов на протонах и легких ядрах начались в ОИЯИ буквально на первых оборотах пучка СФ. Вначале применялась ядерная эмульсия, которая дала лишь общие характеристики, что объясняется трудоемкостью набора статистики. В начале 1960-х годов группы под руководством В.А. Свиридова и Л.Н. Струнова предложили две новые методики, которые оказались весьма эффективными. Для наблюдения рассеяния пионов использовалась камера Вильсона, заполненная газообразным водородом. Новость состояла в разработке специального режима действия камеры с пониженной чувствительностью. Релятивистские частицы с минимальной ионизацией при этом не были видны, поэтому через камеру стало возможным пропускать до 10^4 частиц в одном цикле ускорителя. Это на три порядка выше общепринятого значения интенсивности для таких камер. При этом медленные и сильно ионизирующие протоны отдачи от упругого рассеяния регистрировались в газе с высокой эффективностью. Новый режим позволил фиксировать события упругого рассеяния с рекордно малым переданным импульсом и получать большую статистику. В результате был измерен параметр ρ для πp - и πHe -рассеяния. Данные приведены на рис. 7 и 8 [19].

В 1961 г. на внутреннем пучке СФ была создана установка, в которой реализован метод многократного прохождения ускоряемого пучка через тонкую мишень. Применялась пленочная мишень толщиной $\sim 0,5$ мкм [10]. В 1967 г. с учетом опыта, полученного на СФ, была создана установка на внутреннем пучке ускорителя У-70 ИФВЭ. Она включала принципиально важный и новый элемент — газовую сверхзвуковую струйную водородную мишень с плотностью $\sim 10^{-7}$ г см $^{-3}$ [20]. Позже аналогичные мишени были применены на ускорителях ФНАЛа, ЦЕРНа и во многих других лабораториях. Исследование со струйной мишенью планируется на ЛНС в ЦЕРНе.

Отметим, по крайней мере, три отличительные особенности метода тонкой внутренней мишени.

1. Возможность прецизионного измерения энергии и угла эмиссии медленной частицы отдачи. В наших работах с помощью полупроводниковых детекторов регистрировались протоны и дейтроны с минимальной энергией 0,4 МэВ.

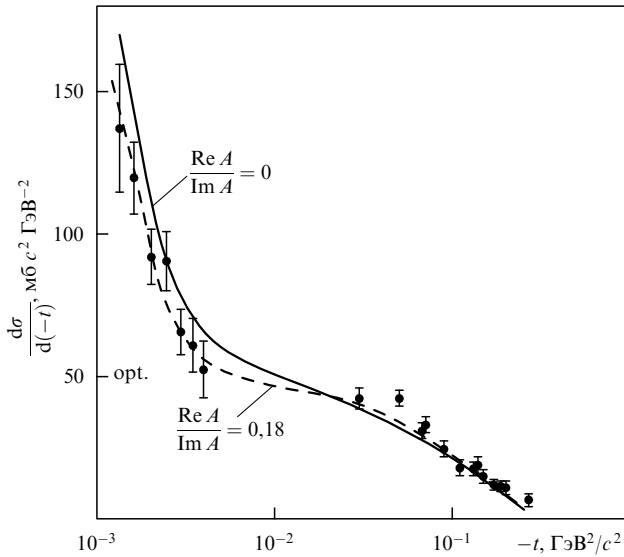


Рис. 7. Дифференциальное сечение упругого πp -рассеяния в области кулон-ядерной интерференции.

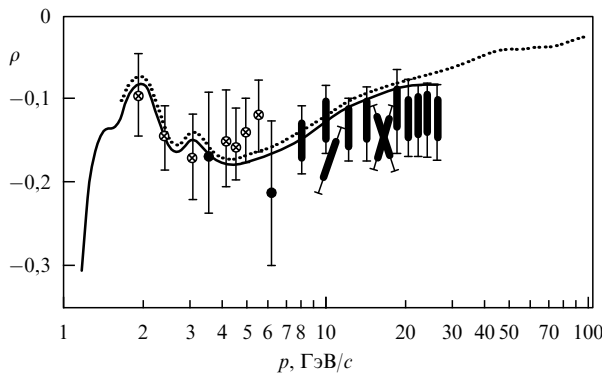


Рис. 8. Параметр ρ упругого πp -рассеяния как функция импульса пучка π^- . Точки \odot — данные, полученные на СФ.

2. Возможность сканирования всего диапазона энергии ускорителя и работы при этом параллельно с другими экспериментами.

3. Отсутствие выведенного пучка, что удешевляет установку и позволяет приступить к физическим измерениям сразу после запуска ускорителя.

С помощью методики тонкой внутренней мишени на СФ было изучено упругое рассеяние протонов на протонах и дейтронах [11, 21].

К середине 1969 г. в дискуссии о типе асимптотики адронных процессов ясность не была достигнута. Данные об упругом pp -рассеянии, полученные в ОИЯИ в интервале энергии 2–10 ГэВ, указывали на сужение дифракционного конуса. Но в области столь малой энергии применение формул типа (2) неправомерно. Данные БНЛА и ЦЕРНа в диапазоне энергии 15–24 ГэВ указывали на выполаживание функций $\sigma_{\text{tot}}, b(E)$. Но невысокая точность измерений и малый интервал энергии не позволяли сделать убедительный вывод.

Оригинальный метод исследования и широкий интервал энергии, достигнутый на самом крупном (в 1968–1972 гг.) ускорителе У-70, дали возможность ответить на поставленный вопрос. Объединенная группа ОИЯИ–ИФВЭ приступила к исследованию упругого рассеяния

протонов в 1968 г. фактически на первых оборотах пучка нового ускорителя ИФВЭ на энергию 70 ГэВ. Первое сообщение о результатах, полученных на У-70 по параметру b , было сделано летом 1969 г. на конференции в Лунде. Эксперимент однозначно свидетельствовал о логарифмическом росте функции $b(E)$. Параметр наклона траектории эффективного полюса Померанчука оказался отличным от нуля: $\alpha' = 0,47 \pm 0,09$ [22]. Выражение "эффективный полюс" отражает приближенный характер формул (2). Попытки сформулировать более точную и полную концепцию полюсов Редже продолжают до сих пор.

На рисунке 9 дана компиляция наиболее точных данных (на 1973 г.) по параметру наклона $b_{pp}(E)$. На рисунке 10 показан пример дифференциального сечения упругого pp -рассеяния. Характерная точность измерения в каждой точке по t составляет 2%. Хорошо видна область кулоновского рассеяния (и кулон-ядерной интерференции) и область дифракционного конуса $|t| \geq 0,01 \text{ ГэВ}^2/c^2$. Измерение дифференциального сечения в области предельно малых значений $|t| \geq 0,0007 \text{ ГэВ}^2/c^2$ (кинетическая энергия протона отдачи $T_{\text{kin}} \approx 0,4 \text{ МэВ}$) выполнено с целью измерения ρ -параметра [23]: $d\sigma/dt = |i \text{Im } A + \text{Re } A + A_c|^2$, $\rho = \text{Re } A / \text{Im } A$. Знание функции $\rho(E)$ необходимо для проверки и развития ряда важных направлений теории сильных взаимодействий: дисперсионных соотношений, аксиоматической теории поля, теории комплексных моментов и др.

На рисунке 11 дана компиляция наиболее точных данных по ρ -параметру (на 1973 г.). Данные хорошо согласуются с расчетом по дисперсионному соотношению.

Кривые, показанные на рис. 11, вычислены по дисперсионному соотношению в следующих предположениях о поведении полных сечений:

- I. $\sigma_{\text{tot}, pp}$ и $\sigma_{\text{tot}, \bar{p}p} \sim 0,5 \ln^2(s/122)$;
- II. $\sigma_{\text{tot}} = \text{const} = 38 \text{ мб}$ в области $E > 120 \text{ ГэВ}$;
- III. $\sigma_{\text{tot}} = \text{const} = 42,2 \text{ мб}$ в области $E > 2000 \text{ ГэВ}$.

Во всех случаях предполагается выполнение теоремы Померанчука, т.е.

$$\lim_{E \rightarrow \infty} (\sigma_{\text{tot}, pp} - \sigma_{\text{tot}, \bar{p}p}) = 0.$$

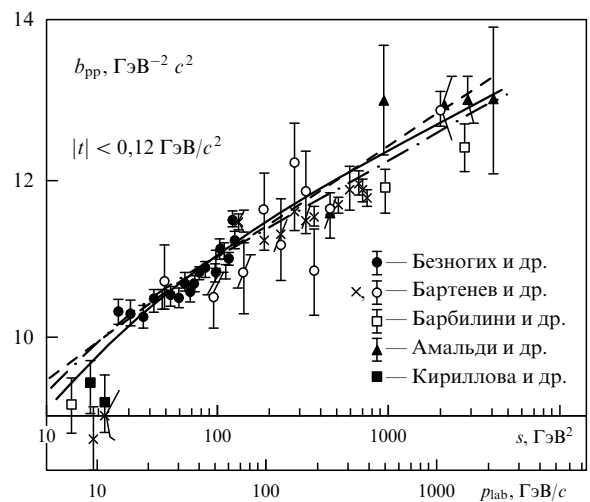


Рис. 9. Компиляция данных по параметру наклона дифракционного конуса pp -рассеяния. Данные ОИЯИ–ИФВЭ.

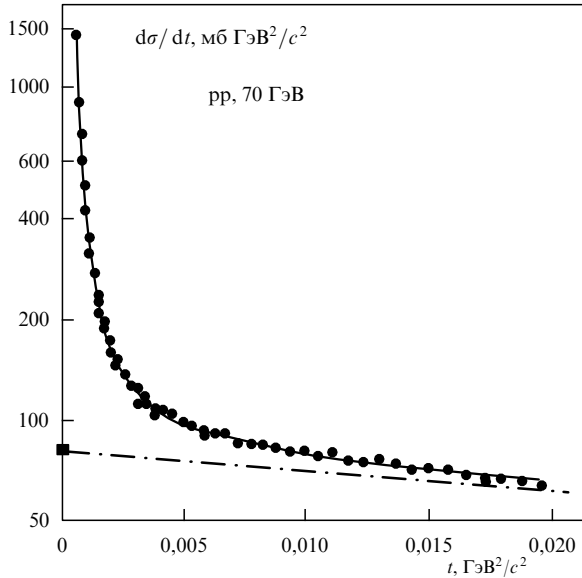


Рис. 10. Пример дифференциального сечения упругого pp-рассеяния в области кулон-ядерной интерференции.

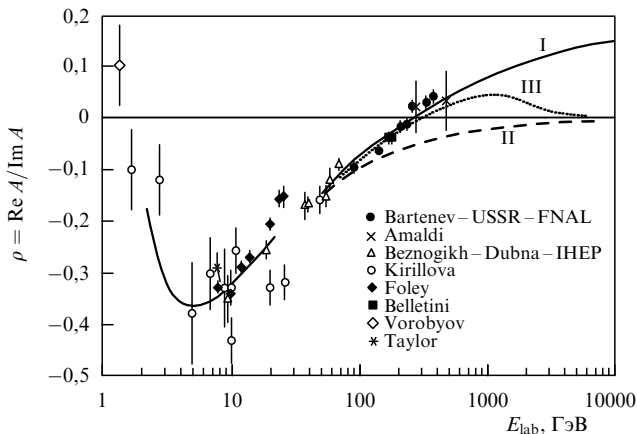


Рис. 11. Компильция данных по ρ -параметру упругого pp-рассеяния. Данные ОИЯИ – ИФВЭ. Кривые — различные варианты расчета по дисперсионному соотношению.

Модель (2) требует универсального поведения функций $b_{ab}(E)$ при достаточно высокой энергии. Здесь a и b — любая пара адронов. Экспериментальные данные о рассеянии p, π, K, \bar{p} на протонах находятся в соответствии с этим ожиданием. Все процессы контролируются одним параметром α' (значение которого зависит от конкретной реализации модели и от интервала энергии). Однако есть одно исключение из закономерности (2). Речь идет об упругом pd - и pHe^4 -рассеянии. Эксперименты были выполнены на ускорителях ОИЯИ [24], ИФВЭ [25] и ФНАЛа [26, 27] с применением методики тонкой внутренней мишени [20, 21]. Ситуация иллюстрируется рис. 12, где приведена энергетическая зависимость параметров $b_{pp}(E)$, $b_{pd}(E)$ и $b_{pHe}(E)$. В интервале энергии 2–70 ГэВ функции $b(E) = b_0 + b_1 \ln E$, $b_1 = 2\alpha'$ для pp , pd , pHe имеют одинаковый наклон: $b_{1,pp} = 0,96 \pm 0,18$, $b_{1,pd} = 1,15 \pm 0,24$, $b_{1,pHe} \approx b_{1,pd}$. Но в области 50–400 ГэВ они расходятся, явно нарушая универсальность (2): $b_{1,pp} = 0,56 \pm 0,05$, $b_{1,pd} = 0,94 \pm 0,04$, $b_{1,pHe} = 1,13 \pm 0,04$. (Значения b приведены в единицах

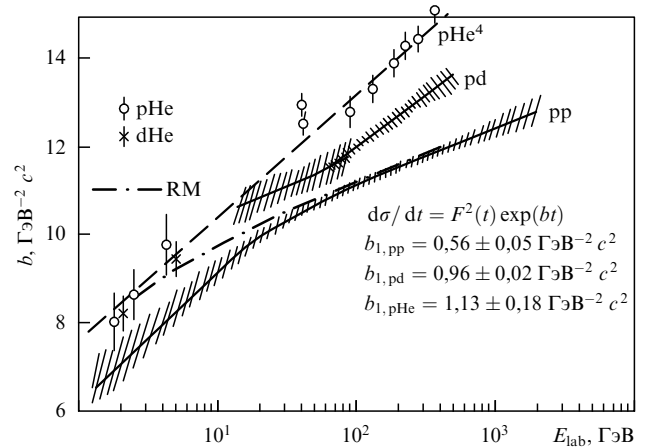


Рис. 12. Компильция данных по параметру b дифракционного конуса pp -, pd - и pHe -рассеяния. Демонстрируется неуниверсальное поведение функций $b_{pA}(E)$ в области $E > 50$ ГэВ.

ГэВ $^{-2}$ c 2 .) В работе [9] эта проблема рассматривается для pd -взаимодействия. Отмечено, что эффективный параметр α'_{pA} в рассеянии на ядрах модифицируется за счет энергетической зависимости эффекта взаимной экранировки нуклонов (глауберовская поправка к полному и дифференциальному сечению). Но количественное согласие с экспериментом не достигнуто. В работе [29] выполнен наиболее полный анализ упругого pHe -рассеяния с учетом упругого и неупругого перерассеяния первичной частицы в ядре. Но наблюдаемая энергетическая зависимость $b_{1,pHe}(E)$ не получается. Проблема остается открытой. Можно лишь высказать предположение, что померон, распространяясь в ядерной материи (в модифицированном КХД-вакууме), значительно меняет свои свойства.

Исследования, выполненные на У-70 в конце 1960-х годов сразу после запуска ускорителя, сыграли важную роль в формировании концепции померона и определении его свойств. В настоящее время время этот объект продолжает играть важную роль в описании динамики мягких и полужестких адронных процессов, включая неупругую дифракцию. Померон приобрел статус почти реального адрона. В экспериментах по глубоконеупругому рассеянию лептонов делаются попытки определить его структурную функцию в терминах кварков и глюонов.

Тематика упругого рассеяния адронов утратила былую актуальность. Однако anomalous поведение параметров наклона дифракционных конусов рассеяния протонов на легких ядрах остается загадкой. Поэтому представляется актуальным дальнейшее прецизионное исследование упругого pA -рассеяния в области энергии выше 50 ГэВ. Важно выполнить измерения на пучках протонов и антипротонов. Это, в частности, даст возможность выделить эффект оддерона — объекта, который построен из нечетного числа глюонов. С теоретической точки зрения оддерон столь же необходим, как и померон. Но о его существовании почти ничего неизвестно. Это связано с отсутствием точных данных о дифракционном взаимодействии антипротонов. На внутренней пучке ускорителей ЦЕРНа и ФНАЛа можно выполнить названные исследования, используя методику, развитую на СФ и У-70.

7. Формирование пучков заряженных частиц с помощью изогнутого кристалла

Возможность поворота пучка заряженных частиц за счет каналирования в изогнутом кристалле была теоретически показана Э.Н. Цыгановым в 1976 г. [30] и вскоре этот удивительный эффект наблюдали на выведенном пучке протонов СФ [31]. Явление каналирования частиц в кристалле было известно ранее. Оно состоит в локализации движения положительно заряженной частицы между кристаллическими плоскостями за счет электростатического поля, создаваемого ионами вблизи плоскостей. Если угол между траекторией и плоскостью достаточно мал, то частица отражается от плоскостей и движется между ними. Предельный угол каналирования составляет $\theta = \sqrt{2U/pv}$, где U — глубина межплоскостной потенциальной ямы, p — импульс и v — скорость частицы. Траектория отрицательно заряженной частицы локализуется около одной плоскости или оси кристалла. Э.Н. Цыганов обратил внимание на совсем не очевидную возможность реализовать каналирование в механически изогнутом кристалле. Это приводит к повороту пучка частиц, захваченных в процесс каналирования. В первом же эксперименте на СФ пучок протонов с импульсом 8,5 ГэВ был отклонен на угол 26 мрад кристаллом кремния с длиной около 5 мм. Оказалось, что отклоняющая способность кристалла эквивалентна магниту с напряженностью поля 60 Тл! Пионерская работа, выполненная на СФ, открыла новое направление в технике эксперимента: вывод пучка из ускорителя, формирование пучков вторичных частиц, создание принципиально новых фокусирующих элементов, измерение эмитанса пучков, измерение магнитного момента короткоживущих частиц [32]. Впервые вывод пучка из ускорителя был осуществлен на СФ. Схема вывода дана на рис. 13. Эта техника также апробирована на SPS в ЦЕРНе и на Теватроне во ФНАЛе. На ускорителе У-70 в ИФВЭ с помощью изогнутых кристаллов сформировано не-

сколько выведенных пучков протонов с энергией до 70 ГэВ.

8. Заключение

В заключение отметим, что наиболее значимые методические и физические исследования на СФ были высоко оценены и удостоены премий государственного уровня. Приведем фамилии лауреатов этих премий и названия работ, за которые они их получили.

1959 г. В.И. Векслер (ОИЯИ), Ф.А. Водопьянов, Д.В. Ефремов, Л.П. Зиновьев (ОИЯИ), А.А. Коломенский, Е.Г. Комар, А.Л. Минц, Н.А. Монозон, В.А. Пектухов (ОИЯИ), М.С. Рабинович, С.М. Рубчинский, А.М. Столов — создание Синхрофазотрона на 10 ГэВ.

1983 г. Ю.К. Акимов, В.А. Никитин, Б.А. Морозов, Ю.К. Пилипенко, Л.С. Золин, С.В. Мухин, М.Г. Шафранова, В.А. Копылов-Свиридов, А.А. Кузнецов (ОИЯИ), А.А. Воробьев (ЛИЯФ), Е.Л. Фейнберг (ФИАН), В.А. Царев (ФИАН) — дифракционное рассеяние протонов при высокой энергии.

1985 г. Г.П. Жуков, И.Ф. Колшаков, А.Н. Синаев и др. — разработка и массовое производство на основе международного стандарта КАМАК системы автоматизации научных и научно-технических исследований.

1986 г. Ю.В. Заневский и др. — разработка и применение ядерно-физических методов и аппаратуры для исследований в молекулярной биологии.

1986 г. Н.Н. Говорун, В.П. Шириков и др. — разработка и внедрение программных средств в инженерные расчеты и проектирование сложных технических систем на ЭВМ.

1988 г. А.М. Балдин, П.Н. Боголюбов, В.А. Матвеев, Р.М. Мурадян, А.Н. Тавхелидзе — открытие нового квантового числа — цвета и установление динамических закономерностей в кварковой структуре элементарных частиц.

1992 г. В.С. Алфеев, З.В. Борисовская и др. — разработка и создание экономических сверхпроводящих магнитов для ускорителей высоких энергий.

1996 г. М.Д. Бавижев, В.И. Котов (ИФВЭ), А.И. Смирнов (ПИЯФ), А.М. Таратин, Э.Н. Цыганов (ОИЯИ) и др. — разработка новых методов управления пучками частиц с помощью изогнутых кристаллов.

Список литературы

1. Владимир Иосифович Векслер (Ред.-сост. М Г Шафранова) (Дубна: ОИЯИ, 2003)
2. Вагин В А, Векслер В И и др., в сб. *Международная конф. по ускорителям, Дубна, 1963* (М.: Атомиздат, 1964) с. 788; Volodin V D et al., in *Proc. of the Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, Cambridge, Mass., 1967* (ORNL-AIC-1, No. 49, Ed. F T Howard) (Oak Ridge, Tenn.: Oak Ridge National Laboratory, 1967) p. A160
3. Золин Л С и др. *УФН* **117** 119 (1975)
4. Вовенко А С и др. *УФН* **81** 453 (1963); Денисов С П, в сб. *Труды Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970* (ОИЯИ, Издания, Д-5805) Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1971) Гл. 8, с. 453
5. Оконов Э, Подгорещкий М, Хрусталев О *ЖЭТФ* **42** 770 (1962); Нягу Д и др., Препринт Р-2325 (Дубна: ОИЯИ, 1965)
6. Савин И А *ЭЧАЯ* **8** 28 (1977)
7. Александров Ю А и др. *Пузырьковые камеры* (Под ред. Н Б Делоне) (М.: Госатомиздат, 1963); Balandin M P et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **20** 110 (1963); Никитин С Я и др., в сб. *Труды*

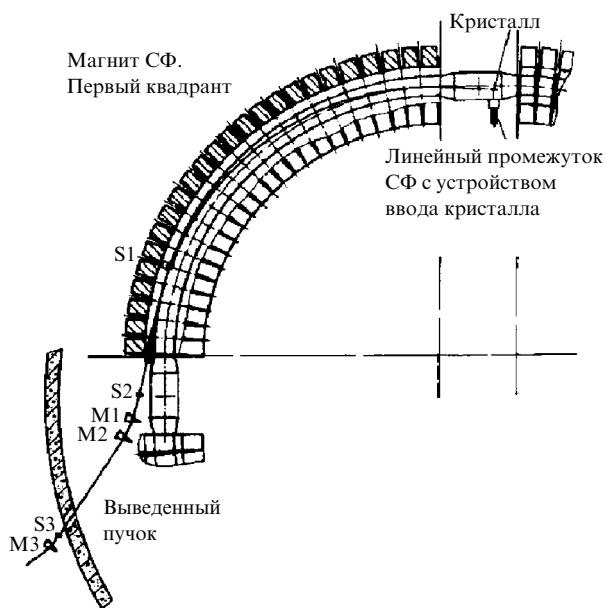


Рис. 13. Схема вывода пучка протонов из СФ с помощью изогнутого кристалла кремния. $M_{1,2,3}$ — магниты; $S_{1,2,3}$ — сцинтилляционные счетчики.

- Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970 (ОИЯИ, Издания Д-5805) Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1971) Гл. 13, с. 615*
8. Глаголев В В, Толстов К Д *ЭЧАЯ* 3 (1) 65 (1972)
 9. Пантуев В С, Хачатурян М Н, Чувило И В *ПТЭ* (1) 19 (1960); Азимов М А и др. *ЯФ* 3 515 (1967)
 10. Никитин В А и др. *ПТЭ* (6) 18 (1963)
 11. Золин Л С, Никитин В А, Пилипенко Ю К, Препринт Р-13-3425 (Дубна: ОИЯИ, 1967); Zolin L S, Nikitin V A, Pilipenko Y K *Cryogenics* 8 143 (1968); Ekström C *Nucl. Instrum. Meth. A* 362 1 (1995); Bartenev V et al. *Adv. Cryog. Eng.* 18 460 (1973)
 12. Векслер В И, в сб. *Материалы 9-й Международной конф. по физике высоких энергий, Киев, 15–25 июля 1959 (М.: Изд-во АН СССР, 1961)*
 13. Гришин В Г *ЭЧАЯ* 7 595 (1976); 10 608 (1979)
 14. "Сотрудничество пропановой камеры ОИЯИ" *ЯФ* 22 5 (1975)
 15. Баюков Ю Д и др. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 30 521 (1966); Ставинский В С *ЭЧАЯ* 10 949 (1979)
 16. Ван Ган-чан и др. *ЖЭТФ* 38 1356 (1960)
 17. Бьеркен Дж Д, Дрелл С.Д. *Релятивистская квантовая теория (М.: Наука, 1978)*
 18. Балдин А М, Балдин А А *ЭЧАЯ* 29 576 (1998)
 19. Никитин В А и др. *ЯФ* 1 183 (1965); Nomofilov A A et al. *Phys. Lett.* 22 350 (1966)
 20. Бартенев В Д и др., в сб. *Труды Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970 (ОИЯИ, Издания, Д-5805) (Дубна: ОИЯИ, 1971) с. 16*
 21. Никитин В А *ЭЧАЯ* 1 (1) 6 (1970); 10 581 (1979); Шафранова М Г *ЭЧАЯ* 5 645 (1974)
 22. Безногих Г Г и др. *ЯФ* 10 1212 (1969)
 23. Бартенев В Д и др. *ЯФ* 16 96 (1972)
 24. Далхажав Н и др. *ЯФ* 8 342 (1968)
 25. Бартенев В Д и др. *ЯФ* 15 1174 (1972)
 26. Akimov Y et al. *Phys. Rev. D* 12 3399 (1975)
 27. Vujak A et al. *Phys. Rev. D* 23 1895 (1981)
 28. Азимов Я И и др. *Письма в ЖЭТФ* 23 131 (1976)
 29. Dakhno L G, Nikolaev N N *Nucl. Phys. A* 436 653 (1985)
 30. Tsyganov E N, Fermilab TM-682, TM-684 (Batavia, 1976)
 31. Elishev A F et al. *Phys. Lett. B* 88 387 (1979)
 32. Moller S P, CERN-94-05 (1994) p. 1

PACS number: 29.20 Lq

От синхрофазотрона к Нуклотрону

А.Д. Коваленко

1. Введение.

Принцип автофазировки — "гордиев узел разрублен!"

Мне выпала честь представлять ученых-ускорительщиков, инженерно-технический состав и всех сотрудников Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, созданной выдающимся ученым, внесшим огромный вклад в мировую науку, в международное сотрудничество ученых, В.И. Векслером, на торжественной сессии, посвященной 100-летию со дня его рождения. Для людей моего поколения, т.е. родившихся на полвека позже Владимира Иосифовича и вовлеченных судьбой в процесс создания ускорителей, получения и использования пучков заряженных частиц высоких энергий, его имя, конечно, в первую очередь ассоциируется с открытием принципа автофазировки. Мне кажется, что наиболее точно атмосфера, предшествовавшая этому, отражена в воспоминаниях

Е.Л. Фейнберга в статье "Вавилов и вавиловский ФИАН", выдержку из которой не могу не процитировать:

"...В конце 30-х годов не меньше, чем теперь, было ясно, что ядерная физика нуждается в ускорителях частиц на большие энергии. ...Сергей Иванович (Вавилов — Авт.) понимал, что серьезная ядерная физика невозможна без крупного ускорителя. И вот в 1940 г. принимается смелое решение: создается "циклотронная бригада" с заданием изучить вопрос о сооружении циклотрона с диаметром полюсов в несколько метров и приступить к его проектированию. ... В циклотронную бригаду вошла все та же "зеленая" молодежь — Векслер, Вернов, Грошев, Черенков и я (т.е. Е.Л.Фейнберг — Авт.). Изучение вопроса шло интенсивно, споры по поводу возможных вариантов были горячими, но все лишь для того, чтобы снова и снова убеждаться в невероятной трудности задачи. Однако все было круто изменено, когда в феврале 1944 г. В.И. Векслер, все годы, чем бы он одновременно ни занимался, неустанно размышлявший над проблемой ускорения, буквально разрубил гордиев узел: он обнаружил, что можно переключиться через релятивистский барьер. Открытая им возможность создания ускорителей совершенно нового класса повернула всю мировую технику ускорителей на другой путь"¹.

В анналах же мировой истории науки открытие возможности преодоления релятивистского барьера при резонансном ускорении заряженных частиц, т.е. открытие принципа автофазировки вошло как: "The discovery of phase stability principle" by V.I. Veksler and E.McMillan.

Открытие принципа автофазировки сняло принципиальное ограничение на получение в лабораторных условиях пучков заряженных частиц *сколь угодно высоких энергий*. Действительно, сравнивая энергию протонов (≈ 100 МэВ), достигнутую на циклотронах — циклических резонансных ускорителях "довекслеровского периода", с ожидаемой в ЦЕРНе после запуска Большого Адронного Коллайдера ЛНС (7 000 000 МэВ), можно сказать, что с позиций ускорительщиков того времени это были уже практически "*недостижимо высокие энергии*", а если учесть, что в коллайдерном режиме энергия сталкивающихся протонов в системе их центра масс достигнет $E_{ц.м} = 14$ ТэВ, т.е. эквивалентная энергия налетающего на неподвижную мишень протона соответствует примерно 5×10^7 МэВ, — то тем более. В последние годы неоднократно высказывается мнение, что ЛНС — это последний адронный коллайдер, построенный на Земле. Я не думаю, что это так. Наиболее широко и интенсивно обсуждаемый сейчас проект следующего за ЛНС ускорительного комплекса — это международный электрон-позитронный коллайдер ILC (International Linear Collider) на энергию 2×500 ГэВ, создание которого поддерживается мировым сообществом, работающим в области физики частиц. Активную позицию занимают в этом вопросе ученые России и ОИЯИ, предложившие использовать район Дубны для размещения такого комплекса. Но вполне уместно в связи с юбилеем Векслера поставить вопрос: "А есть ли разумный, реализуемый в принципе, верхний предел энергии "рукотворного" ускорителя протонов?" Фантазия автора

¹ Фейнберг Е.Л. *Эпоха и личность. Физики. Очерки и воспоминания.* 2-е изд. (М.: Физматлит, 2003) с. 233.