

## УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ АНТИПРОТОНОВ НА ${}^4\text{He}$ ПРИ 600 МэВ/с

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Д.Б.Понтекорво,  
А.М.Рождественский, М.Г.Сапожников, В.И.Третьяк,  
И.В.Фаломкин  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ф.Балестра, С.Боссоласко, М.П.Бусса, Л.Буссо,  
А.Грассо, Д.Панциери, Г.Пираджино, Ф.Тоселло,  
Л.Ферреро, Е.Фиорамонти  
Институт общей физики им. А.Авогадро,  
Туринский университет, секция ИНФН в Турине, Италия

Р.Барбиери, Д.Бендишоли, А.Зенони, А.Ротонди,  
П.Сальвини  
Факультет ядерной физики и теории, Университет Павии,  
секция ИНФН в Павии, Италия

К.Гуаральдо, А.Маджиора  
Национальная лаборатория ИНФН во Фраскати, Италия

Э.Лоди-Риццини  
Факультет промышленной автоматики,  
Университет Брешии, секция ИНФН в Павии, Италия

К.Миклебост, Й.М.Олсен, А.Хаатуфт, А.Халштейнслид,  
Физический факультет, Университет Бергена, Норвегия

Ф.О.Брейвик, С.О.Соренсен, Т.Якобсен  
Физический факультет, Университет Осло, Норвегия

На установке со струйной камерой в магнитном поле измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния антипротонов на  ${}^4\text{He}$  при импульсе 607,7 МэВ/с. Получены сечение упругого рассеяния  $\sigma_{el} = (119,9 \pm 2,5)$  мб и полное сечение взаимодействия  $\sigma_{tot} = (359,1 \pm 5,6)$  мб. Проведено сравнение измеренных дифференциальных сечений с расчетами по модели Глаубера.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

### Antiproton- ${}^4\text{He}$ Elastic Scattering at 600 MeV/c

Yu.A.Batusov et al.

Differential cross sections of  $\bar{p}$ - ${}^4\text{He}$  elastic scattering have been measured at 607.7 MeV/c with a streamer chamber in a magnetic field. Elastic cross section  $\sigma_{el} = (119.9 \pm 2.5)$  mb and total cross section  $\sigma_{tot} = (359.1 \pm 5.6)$  mb have been obtained. Comparison

of measured differential cross sections to Glauber model calculations has been made.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

## Введение

Прецизионные эксперименты по  $\bar{p}A$ -упругому рассеянию стали возможны лишь в последнее время в связи с работой LEAR (CERN) — источника антипротонов высокой интенсивности. Ранее были выполнены эксперименты по упругому рассеянию на средних и тяжелых ядрах ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ) при 300 и 600 МэВ/с<sup>1/2</sup>. Изучение взаимодействий антипротонов с легкими ядрами (дейтерий, гелий) предоставляет, в частности, возможность определения параметров амплитуды антипротон-нейтронного взаимодействия, которые наименее известны в настоящее время. В работе<sup>2/</sup> приводились данные по упругому рассеянию антипротонов на дейтерии.

В настоящей работе приводятся результаты, полученные на LEAR в эксперименте PS-179 (CERN), по упругому рассеянию антипротонов на ядрах  $^4\text{He}$  при 607,7 МэВ/с (кинетическая энергия 179,6 МэВ).

## Описание экспериментальной установки

Эксперимент выполнялся на установке, состоящей из стримерной камеры в магнитном поле (0,8 Тл) и системы сцинтилляционных счетчиков, предназначенных для мониторингирования пучка и запуска установки. Подробно экспериментальная установка описана в работе<sup>3/</sup>. Камера с внутренними размерами

90x70x18 см<sup>3</sup>, наполненная гелием-4 при атмосферном давлении, являлась одновременно и мишенью, и детектором. Пучок антипротонов с импульсом 607,7 МэВ/с от ускорителя LEAR был монохроматичным ( $\Delta p/p \approx 10^{-3}$ ) и не со-

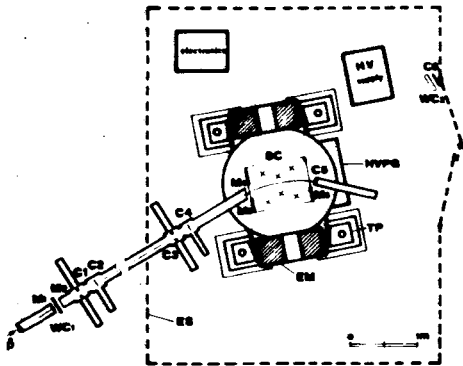


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

держал примесей посторонних частиц. Диаметр пучка составлял 1 см. Малая плотность газа в камере позволяла регистрировать низкоэнергетичные частицы. В нашей камере даже при рассеянии антипротонов на малые углы ядра отдачи имеют достаточную длину пробега для их регистрации и измерений. Например, при рассеянии антипротонов на угол  $3^\circ$  ядро отдачи гелия имеет пробег 1см, при этом энергия ядра отдачи составляет 0,5 МэВ.

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Сигналом для запуска установки и фотографирования объема камеры служило наличие сигналов совпадения от счетчиков С2, С4 и сигналов антисовпадения от счетчиков С1, С3, С5. Другими словами, запуск осуществлялся, если антипротон входил в камеру, но не попадал в счетчик С5 на выходе из камеры. Причиной этого могло быть взаимодействие антипротона с ядром гелия в камере.

### Измерение дифференциальных сечений упругого рассеяния

С целью регистрации событий упругого рассеяния было просмотрено примерно  $10^5$  кадров на 12 экспонированных фотопленках. Для обеспечения высокой эффективности регистрации событий в камере мы выделили чувствительную область в центре камеры длиной 54 см по направлению пучка. В выбранном чувствительном объеме камеры было обнаружено  $\approx 3500$  двухлучевых событий, являющихся кандидатами во взаимодействия упругого рассеяния.

Эффективность просмотра определялась по результатам двухкратного просмотра двух пленок (около 700 двухлучевых событий). Эффективность обнаружения двухлучевого события составила 92%. Эта эффективность не является стопроцентной в основном из-за трудностей регистрации событий, лежащих в плоскости, близкой к вертикальной, поскольку наш детектор регистрирует события почти в полном телесном угле, то есть постановка эксперимента близка к  $4\pi$ -геометрии.

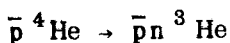
Обнаруженные события прошли измерения на полуавтоматическом устройстве ПУОС, из них успешно — 92%, оставшиеся не удалось измерить по причине недостаточно высокого качества изображения (плохо видна вершина взаимодействия, бледный след и т.п.).

Пространственная реконструкция измеренных событий выполнялась с помощью программы геометрической реконструкции HYDRA<sup>4/</sup>. Подробно вопросы, связанные с обработкой событий, рассмотрены в работе<sup>5/</sup>. Удовлетворительное описание кинематических характеристик события достигается при использовании четырех входных параметров, задающих ошибки изме-

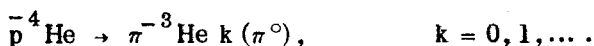
рения. Значения для этих входных параметров получены на основе результатов многократных измерений набора событий. Наилучшие значения входных параметров выбирались так, чтобы средние значения вычисленных на их основе ошибок реконструируемых величин были равны среднеквадратичным отклонениям при повторных измерениях этих величин. Получены следующие входные ошибки: на координату вершины — 0,05 см, на координату точки остановки — 0,17 см, на координату точки трека — 0,14 см, на длину трека — 0,70 см.

Процедуру геометрической реконструкции прошли 89% событий. Остальные события попали в условия плохой стереоскопичности изображения или трудновыполнимых измерений (например, велик глубинный угол ядра отдачи).

Среди двухлучевых событий, кроме случаев упругого рассеяния, присутствуют в качестве фона события безаннигиляционного развала:



и аннигиляции с рождением одного  $\pi^-$ -мезона и нескольких нейтральных пионов:

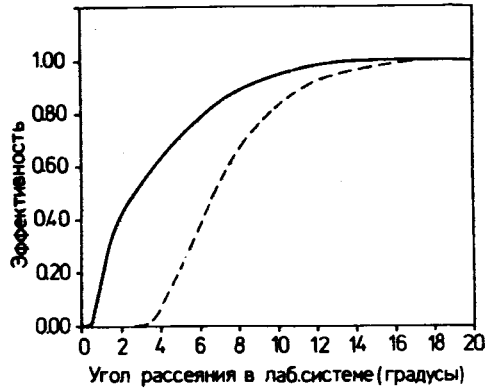


Для выделения событий упругого рассеяния мы сравнивали измеренные значения импульсов и углов вторичных частиц в каждом событии с соответствующими значениями, вычисленными для упругого рассеяния антипротонов с импульсом 607,7 МэВ/с на измеренный угол рассеяния отрицательно заряженной частицы. При отборе событий использовались следующие критерии:

- 1) Угловые корреляции — соответствие угла вылета ядра отдачи ожидаемому значению.
- 2) Компланарность. Поскольку события упругого рассеяния компланарны, вычисленное значение угла компланарности должно быть равно нулю.
- 3) Соответствие длины пробега ядра отдачи вычисленному значению. Этот критерий применялся для ядер отдачи, остановившихся в камере. Если ядро не остановилось в камере, то сравнивался с ожидаемым его измеренный импульс.
- 4) Соответствие импульса рассеянного антипротона расчетному значению.

Событие считалось упругим, если по всем критериям измеренные значения соответствовали ожидаемым в пределах трех ошибок измерения. Самым мощным среди применявшихся критериев оказался первый — учет угловых корреляций. В результате использования всех этих критериев 2345 событий приняты как упругие.

Рис.2. Эффективность регистрации событий в зависимости от угла рассеяния антипротонов.



Для оценки фона от неупругого двухлучевого рассеяния было проведено моделирование реакций развала и аннигиляции. Результаты моделирования показывают, что примесь от неупругого рассеяния среди событий упругого рассеяния не превышает 0,5%.

При рассеянии на угол меньше  $20^\circ$  часть антипротонов попадала в счетчик С5, в результате чего событие не регистрировалось. Зависимость эффективности регистрации, обусловленной наличием антисовпадательного счетчика С5, от угла рассеяния приведена на рис.2. Часть экспериментальных данных получена с использованием антисовпадательного счетчика С5 диаметром 8 см (77% событий). Этому случаю соответствует сплошная кривая на рис.2. Остальные события получены с использованием счетчика диаметром 13 см. Штриховая кривая на рис.2 соответствует диаметру 13 см.

При вычислении сечения потери событий, обусловленные срабатыванием счетчика С5, учитывались введением для каждого события веса, равного обратной величине эффективности его регистрации.

Для вычисления сечения брались события с эффективностью регистрации не ниже 50%. Поэтому из набора данных, полученных с использованием счетчика С5 диаметром 8 (13) см, брались события рассеяния в системе центра масс на угол больше чем  $4(10)^\circ$ .

### Анализ экспериментальных данных

На рис.3 приведены полученные дифференциальные сечения упругого рассеяния антипротонов. Сплошной линией показаны результаты расчета по модели Глаубера, выполненного так же, как в работе <sup>16/</sup>. Из этого рисунка видно, что расчет качественно неплохо описывает поведение дифференциального сечения.

Для определения величины интегрального сечения упругого антипротон-ядерного рассеяния дифференциальное сечение в уг-

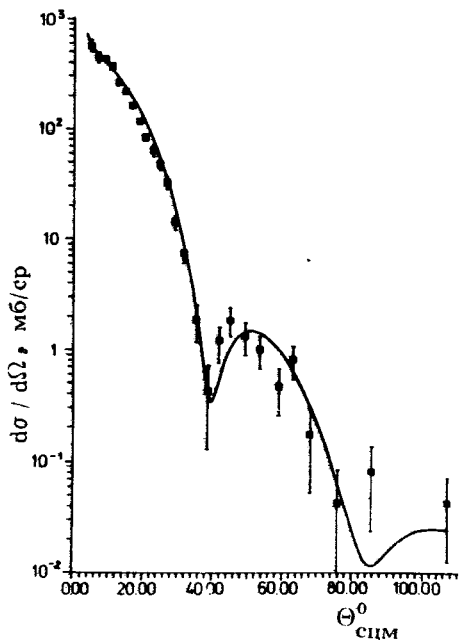


Рис.3. Распределение дифференциальных сечений упругого рассеяния антипротонов на  ${}^4\text{He}$  при 607,7 МэВ/с по углу рассеяния в системе центра масс. Кривая — расчет по оптической модели.

ловом интервале от 4 до 80° аппроксимировалось следующим выражением

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F_{\text{Cul.}}(\theta) + F_{\text{nucl.}}(\theta)|^2,$$

где ядерная амплитуда параметризовалась обычным образом:

$$F_{\text{nucl.}}(\theta) = \sigma_{\text{tot}} \cdot k \cdot (i + \rho) \cdot \exp(-B \cdot t/2) \cdot (1 - t/t_0) \cdot 4\pi.$$

Здесь  $t = |2k^2(1 - \cos\theta)|$ ,  $k$  — импульс в системе центра масс,  $\rho = \text{Re} F_{\text{nucl.}}(0) / \text{Im} F_{\text{nucl.}}(0)$ . Наличие дополнительного множителя  $(1 - t/t_0)$  призвано учитывать осцилляцию дифференциального сечения.

Кулоновская амплитуда  $F_{\text{Cul.}}(\theta)$  вычислялась с учетом конечных размеров ядра  ${}^4\text{He}$  и антипротона способом, описанным в работе [7].

Таким образом, параметрами фита были величины  $\sigma_{\text{tot}}$ ,  $B$ ,  $\rho$  и два параметра нуля амплитуды  $t_0$ , которые связаны с положением минимума в дифференциальном сечении ( $\text{Re} t_0$ ) и величиной дифференциального сечения в минимуме ( $\text{Im} t_0$ ).

В результате фитирования определено положение минимума в дифференциальном сечении упругого рассеяния  $\theta_{\text{min}} = (38,1 \pm \pm 0,5)^\circ$ .

Величина интегрального сечения упругого рассеяния вычислялась интегрированием квадрата ядерной амплитуды рассеяния  $F_{\text{nucl.}}(\theta)$  в пределах от 0 до 180°. В результате получено следующее значение

$$\sigma_{\text{el}} = (119,9 \pm 2,5) \text{ мб.}$$

Ошибка приводится статистическая. Зная значение полного сечения неупругих реакций  $\sigma_{\text{R}} = (239,2 \pm 5,0)$  мб, которое было опре-

делено в предыдущей нашей работе <sup>8/</sup>, получаем величину полного сечения:

$$\sigma_{tot} = (359,1 \pm 5,6) \text{ мб.}$$

Фитирование дифференциального сечения упругого рассеяния в угловом интервале от  $4^\circ$  до  $22^\circ$  тем же выражением, что и прежде, но без множителя  $(1 - t/t_0)$  в ядерной амплитуде  $F_{nuc1}$ , позволяет определить при фиксированном значении  $\sigma_{tot} = 359,1$  мб величину наклона дифференциального спектра при рассеянии вперед —  $B$  и отношение реальной части амплитуды рассеяния в нуле к мнимой —  $\rho$ . Угловым интервал был ограничен для того, чтобы поведение сечения наиболее соответствовало экспоненциальной зависимости. Получены следующие результаты:

$$B = (66,1 \pm 3,3) (\text{ГэВ/с})^{-2},$$

$$\rho = 0,40 \pm 0,07.$$

При этом по 9 точкам суммарное значение  $\chi^2$  равнялось 1,6.

На рис.4 приведена зависимость сечения упругого рассеяния от квадрата переданного импульса  $t$ . Для сравнения на этом рисунке показаны также спектры упругого рассеяния других частиц на  ${}^4\text{He}$  при близких значениях кинетической энергии. Кружками обозначены данные по рассеянию протонов с кинетической энергией  $T = 200$  МэВ <sup>9/</sup>. Данные по рассеянию  $\pi^-$ -мезонов при  $T = 174$  МэВ из работы <sup>10/</sup> обозначены треугольниками.

Из рис.4 видно, что дифференциальные сечения протонов и антипротонов заметно отличаются друг от друга. Они имеют различные наклоны. Кроме того, протонный спектр

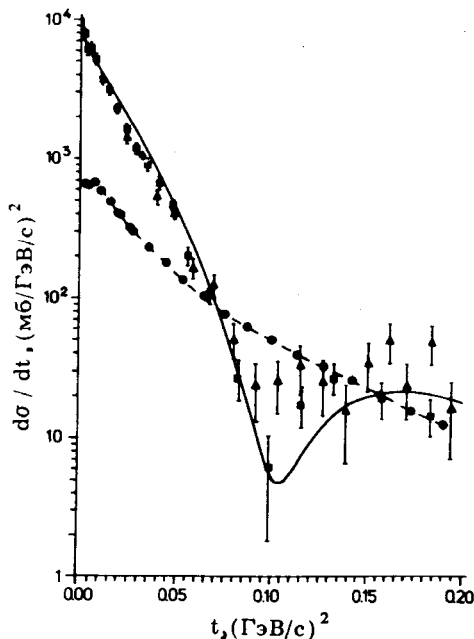


Рис.4. Дифференциальные сечения упругого рассеяния на  ${}^4\text{He}$ :  $\blacksquare$  — антипротонов при кинетической энергии  $T = 180$  МэВ,  $\bullet$  — протонов при  $T = 200$  МэВ (работа <sup>9/</sup>),  $\blacktriangle$  —  $\pi^-$ -мезонов при  $T = 174$  МэВ (работа <sup>10/</sup>).

не имеет дифракционного характера, присущего антипротонному.

В то же время пионные данные практически совпадают с антипротонными. Они характеризуются тем же наклоном и имеют минимум при том же значении переданного импульса. Этот несколько неожиданный результат является отражением того факта, что в области  $\Delta$ -резонанса сечение неупругого взаимодействия  $\pi^-$ -мезонов имеет максимум и по величине близко к сечению неупругого взаимодействия антипротонов.

### Заключение

Измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния антипротонов на ядрах  ${}^4\text{He}$  при 607,7 МэВ/с в интервале углов от 4 до  $110^\circ$  в системе центра масс. Полученные результаты удовлетворительно описываются расчетами, выполненными на основе модели Глаубера. Анализ данных позволил определить упругое и полное сечение  $\bar{p}^4\text{He}$ -рассеяния:  $\sigma_{el} = (119,9 \pm 2,5)$  мб,  $\sigma_{tot} = (359,1 \pm 5,6)$  мб, а также положение минимума  $\theta_{min} = (38,1 \pm 0,5)^\circ$ , величину параметра  $\rho = 0,40 \pm 0,07$  и наклон в дифференциальном сечении рассеяния вперед  $B = (66,1 \pm 3,3) (\text{ГэВ/с})^{-2}$ .

Авторы благодарны В.П.Джелепову за полезные обсуждения, В.В.Богдановой, Л.А.Василенко, Г.А.Кульковой и М.Н.Шелаевой за большую работу по просмотру и измерениям.

### Литература

1. Garreta D. et al. — Phys.Lett., 1984, 135B, p.266.  
Garreta D. et al. — Phys.Lett., 1984, 149B, p.64.  
Bruge G. et al. — Phys.Lett., 1986, 169B, p.14.
2. Bruge G. et al. — Phys.Rev. C, 1988, v.37, No.3, p.1345.
3. Balestra F. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1985, A243, p.30.
4. Bock R.K., Zoll J. CERN/D.Ph.II/PROG 74-4, 1974, Geneva.
5. Balestra F. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, A275, p.114.
6. Bendiscioli G. et al. — Nucl.Phys., 1987, A469, p.669.
7. Das K.M., Deo B.B. — Phys.Rev., 1982, C26, p.211.
8. Balestra F. et al. — Phys.Lett. B, 1987, v.194, p.343.
9. Moss G.A. et al. TRI-PP-19-35, TRI-UAE-5021, 1979.
10. Albu M. et al. LNF-82/27(R), 1982, Frascati.

Рукопись поступила 30 ноября 1988 года.