



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Э.Н. Цыганов

Д-882

К ВОПРОСУ ОБ УПРУГОМ РАССЕЯНИИ
ПРОТОНА НА ПРОТОНЕ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

ЖСЭТФ, 1962, т. 42, в. 6, с. 1456-1460.

Э.Н. Цыганов

Д-882

К ВОПРОСУ ОБ УПРУГОМ РАССЕЯНИИ
ПРОТОНА НА ПРОТОНЕ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Направлено в ЖЭТФ

Объединенный инсти-
тут ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1341/2 ч.

1. С помощью ядерных фотоэмульсий методикой, использованной в работах ^{/1-4/}, изучалось упругое рассеяние протона на протоне при энергии 5,2 Бэв на малые углы. Фотоэмульсионная камера, составленная из слоев эмульсии типа НИКФИ-Р, размером $10 \times 10 \times 2 \text{ см}^3$, была облучена внутренним пучком синхрофазотрона ОИЯИ протонами с энергией 5,2 Бэв, поток первичных частиц был направлен перпендикулярно плоскости фотоэмульсионных слоев. Поиск событий упругого рассеяния проводился по площади; увеличение микроскопа составляло 630X; использовался иммерсионный объектив. Регистрировались все события, вызванные пучковыми протонами, с числом лучей меньшим или равным двум. Для улучшения надежности результатов и увеличения эффективности нахождения событий просмотр дублировался. Всего было найдено 722 события, визуально похожих на акты упругого рассеяния. После пересмотра событий многие из них были сразу отброшены как явно не удовлетворяющие критериям упругого рассеяния, 235 событий были подвергнуты тщательным измерениям. Точность измерения угла рассеяния составляла $\sim 3'$, направления медленного протона /прото-на отдачи/ $\sim 1,5^\circ$. Методика измерений подробно описана в ^{/1/}. В результате измерений было отобрано 113 случаев упругого рассеяния при энергии 5,2 Бэв /энергия первичного пучка была уточнена с помощью кинематики отобранных событий/.

Интенсивность пучка первичных частиц составляла $4,88 \pm 0,10 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Кинематические измерения событий показали, что в первичном пучке имеется примесь протонов меньшей энергии. Методом, описанным в ^{/4/}, было определено, что эта примесь составляет $0,37 \pm 0,10 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Просмотр проводился таким образом, чтобы обеспечить высокую эффективность регистрации событий упругого рассеяния в интересующей области малых углов рассеяния. Известно /см. например ^{/5/}/, что если эффективность нахождения событий неодинакова, то истинное число событий, определенное по результатам двукратного просмотра, занижено. Эта систематическая ошибка будет малой, если эффективности регистрации различных событий высоки, хотя и неодинаковы, так как в этом случае различие в эффективностях не может быть значительным. Поэтому на части площади, где эффективность нахождения по ряду причин оказалась не очень высокой, проводился третий независимый про-

смотр, и при вычислении истинного числа событий два худшие просмотра объединялись. В интервале углов рассеяния $4,5^\circ - 10,5^\circ$ в системе центра масс эффективность нахождения в результате двух первых просмотров равнялась 0,84, в результате трех просмотров - 0,96. При этом оказалось, что истинное число событий в этом угловом интервале, вычисленное по результатам трехкратного просмотра, приблизительно на 9% больше, чем вычисленное по результатам двукратного просмотра. Это расхождение характеризует возможную систематическую погрешность в аналогичных экспериментах при не очень высоких эффективностях регистрации событий / ~ 0,85/. Рабочие эффективности регистрации по интервалам составляли в настоящей работе 0,95 - 0,99; можно надеяться при этом, что указанная систематическая погрешность была пренебрежимо малой.

При нахождении истинного числа событий случаи, расположенные менее чем на 20μ от стекла и поверхности /в непроявленной эмульсии/, выбрасывались из анализа. Был рассмотрен также вопрос об эффективности регистрации событий, находящихся под маркировочными линиями. Оказалось, что число таких событий составляет $6,2 \pm 2,0\%$ полного числа событий, в то же время маркировка занимает 6,5% всей площади. Этот результат свидетельствует о несущественности систематических пропусков событий из-за наличия маркировки.

Статистические флуктуации эффективности и истинного числа событий вычислялись по формулам, приведенным в работе /6/. Пусть N_1 - число событий данного типа, найденных при первом просмотре, N_2 - число событий, найденных при втором просмотре, и N_{12} - число событий, найденных как при первом, так и втором просмотрах /"совпадения"/. Тогда, если события данного типа равноценны по эффективности регистрации, для определения истинного числа событий N и эффективности нахождения ϵ можно использовать выражения:

$$N = \frac{N_1 N_2}{N_{12}}$$

$$\epsilon = \frac{N_{12}}{N_1} + \frac{N_{12}}{N_2} - \frac{N_{12}^2}{N_1 N_2}$$

Для флуктуаций величин N и ϵ в /6/ получены выражения:

$$\sqrt{(\Delta N)^2} = \sqrt{\frac{(N_1 - N_{12})(N_2 - N_{12})}{N_1 N_2 N_{12}} + \frac{1}{N}}$$

$$\sqrt{(\Delta\epsilon)^2} = \sqrt{N_{12}^2 [a^2 + b^2 + (a+b)^2 c - 2(a+b)(a^2 + b^2)]},$$

где $a = \frac{1 - \epsilon_1}{N_1}$, $b = \frac{1 - \epsilon_2}{N_2}$, $c = \frac{1 - \epsilon_1 \epsilon_2}{N_{12}}$.

Эффективности нахождения для различных интервалов углов рассеяния в настоящем эксперименте приведены в таблице 1.

Содержание атомов водорода в 1 см³ эмульсии бралось по данным НИКФИ^{17/}, что составляет $2,95 \pm 0,23 \cdot 10^{22}$ см⁻³.

Полученное дифференциальное сечение приведено в таблице 1. Вследствие того, что эффективность регистрации событий для углов, больших 10,5° в системе центра масс, существенно падает, данные по дифференциальному сечению в этой области углов не приводятся. Сечение упругого рассеяния в интервале углов 1,8° - 10,5° в системе центра масс при энергии 5,2 Бэв получено равным $5,2 \pm 0,5$ мбн.

Т а б л и ц а 1.

θ с.п.м.	1,8° - 4,5°	4,5° - 6,5°	6,5° - 8,5°	8,5° - 10,5°
Эффективность регистрации	0,977 \pm 0,019	0,992 \pm 0,014	0,934 \pm 0,034	0,956 \pm 0,026
Дифференциальное сечение, мбн/стер.	78,1 \pm 17,0	57,0 \pm 13,0	50,7 \pm 11,0	35,9 \pm 7,7

Данные по дифференциальным сечениям, полученным в настоящей работе, сравнивались с результатами работ^{18/} и^{19/}, в которых изучалось упругое pp рассеяние при энергии 6,2 Бэв. Для этого данные наносились на график $\frac{1}{k^2} \frac{d\sigma}{d\Omega}(P)$ в зависимости от поперечного импульса P . В работе^{14/} показано, что для малых поперечных импульсов различие в величине $\frac{1}{k^2} \frac{d\sigma}{d\Omega}$ для разных энергий /2-9 Бэв/ мало. Данные настоящей работы удовлетворительно согласуются с результатами работы^{19/}, где дифференциальное сечение измерено примерно в той же области поперечных импульсов.

В работе ^{/8/} для точки при угле $7,6^\circ$ в с.д.м. получено значительно заниженное значение дифференциального сечения. Возможно, что это связано с трудностями регистрации актов рассеяния на малый угол использованной в ^{/8/} методикой. По результатам работ ^{/8/} и ^{/9/} и настоящей работы полное сечение упругого pp -взаимодействия при энергии 6,2 Бэв получается равным около $19,7 \pm 1,0$ мбн.

2. Рассматривался вопрос о применимости при описании упругого взаимодействия в области энергий 5-8 Бэв приближения, в котором фазы рассеяния считаются чисто мнимыми и пренебрегается зависимостью взаимодействия от спина. Для этого проводился расчет по оптической модели, включающей кулоновское взаимодействие ^{/3/}, с чисто мнимым и не зависящим от спина потенциалом взаимодействия. Зависимость потенциала взаимодействия от расстояния была взята гауссовской. Методом наименьших квадратов вычислялись параметры модели /величина потенциала и его среднеквадратичный радиус/, наилучшим образом удовлетворяющие экспериментальным данным, и вычислялось полное сечение pp -взаимодействия. Оно получилось равным $44,5 \pm 6,2$ мбн по данным настоящей работы и $46,4 \pm 2,5$ мбн - по данным работы ^{/9/}. Экспериментально измеренное полное сечение pp -взаимодействия равно $42,0 \pm 1,0$ мбн ^{/14/, /15/}. Сравнение вычисленных и измеренных полных сечений показывает, что результаты настоящей работы и работы ^{/9/} не противоречат результатам ^{/3/} и ^{/4/}, из которых следует, что при описании pp -взаимодействия при энергиях 2,8 и 8,5 Бэв нельзя пренебрегать реальной частью амплитуды рассеяния и ее зависимостью от спинового состояния.

3. Сравнение данных по упругому взаимодействию показывает ^{/4/}, что в области энергий, порядка нескольких Бэв, значения дифференциального сечения, отложенные на графике $\frac{1}{k^2} \frac{d\sigma}{d\Omega}(P)$, не ложатся на одну кривую. Для всех данных, начиная с энергии 2,24 Бэв ^{/8/} и кончая 8,5 Бэв ^{/3/}, наблюдается систематическое уменьшение величины $\frac{1}{k^2} \frac{d\sigma}{d\Omega}$ для всех P с ростом энергии /см. рис. 1/. Это различие невелико в области малых энергий /как уже отмечалось, это подтверждается результатами настоящей работы и работы ^{/9/}, в области же 800-800 Мэв/с величины $\frac{1}{k^2} \frac{d\sigma}{d\Omega}$ различаются приблизительно в 5 раз.

Имеющиеся данные, в частности, позволяют утверждать, что средний поперечный импульс в упругом $p-p$ - взаимодействии уменьшается с энергией. Это должно определенным образом отразиться на размере области взаимодействия. Нами был произведен расчет среднеквадратичного радиуса протон-протонного взаимодействия для различных энергий по данным работ ^{/3,4,8,9,10,12/}. Расчет проводился в квазиклассическом приближении, аналогично ^{/11,3,4/}. Выбирался комплексный потенциал взаимодействия, не зависящий от спинов, гауссовской формы. Из этого потенциала вычислялись фазы протон-протонного рассеяния и рассчитывались величины дифференциального сечения упругого взаимодействия и полное сечение. Методом наименьших квадратов подбирались параметры потенциала, наилучшим образом удовлетворяющего экспериментальным данным. Полное сечение $p-p$ - взаимодействия бралось из работ ^{/13-16/}. При обработке данных ^{/3/} наряду с использованием всех экспериментальных значений был сосчитан вариант с выбрасыванием значений дифференциального сечения при углах $15,5^\circ$, $17,5^\circ$, $19,5^\circ$ в системе центра масс, методическая надежность которых, возможно, несколько ниже остальных точек. При этом значение среднеквадратичного радиуса и величина его ошибки практически не изменяются. Среднеквадратичный радиус протон-протонного взаимодействия для различных энергий, полученный на основании проделанных расчетов, приводится в таблице 2. В таблице 2 приведены также уточненные данные по сечению упругого взаимодействия при энергии 6,2 и 2,85 Бэв. Из таблицы 2 видно/см. также рис. 2/, что в рамках использованной модели среднеквадратичный радиус протон-протонного взаимодействия увеличивается с ростом энергии. Этот вывод, по-видимому, не зависит от использованной модели. Качественно это можно видеть /если принять, что вещественная часть амплитуды рассеяния существенно меньше мнимой/ из того, что сечение упругого рассеяния в рассматриваемой области энергий довольно быстро падает, в то время как полное сечение $p-p$ - взаимо-

Т а б л и ц а 2.

2,24	-	/8/	$0,69 \pm 0,02$
2,85	$18,0 \pm 0,8^{x/}$	/4/ и /10/	$0,70 \pm 0,03$
3,0	-	/12/	$0,75 \pm 0,11$
4,40	-	/8/	$0,84 \pm 0,04$
6,20	$9,7 \pm 1,0$	/8/, /9/ и настоящая работа	$0,91 \pm 0,04$
8,5	$8,7 \pm 0,4$	/3/	$1,20 \pm 0,05$

^{x/} Цифра $/18,0 \pm 0,8/$ мбн получена объединением данных работ /4/ и /10/.

действия остается практически постоянным. Увеличение радиуса взаимодействия и уменьшения сечения упругого рассеяния с энергией, по-видимому, свидетельствует об уменьшении вклада мезонного обмена по сравнению с обменом, допустим, двумя мезонами при рассеянии нуклонов.

Нужно отметить, что если в области больших энергий энергетическое поведение сечений полного и упругого $p-p$ -взаимодействия аналогично имеющемуся при 2-9 Бэв, то возможно, что асимптотическое поведение амплитуды рассеяния такое, как это следует из работы Грибова^{/17/}.

4. Был проведен анализ данных по упругому $p-p$ -взаимодействию при энергии 8,5 Бэв^{/3/} с целью выбора радиальной зависимости оптического потенциала, наилучшим образом удовлетворяющего экспериментальным данным. Для этого выбирался чисто мнимый потенциал вида:

$$W(r) = \begin{cases} W_0, & 0 \leq r \leq r_{01} \\ W_0 \exp \left[-\frac{(r - r_{01})^2}{2r_{02}^2} \right], & r > r_{01} \end{cases}$$

В случае $r_{01} = 0$ выбранный потенциал имеет чисто гауссовскую форму, в случае $r_{02} = 0$ это однородная сфера, в промежуточных случаях - однородная сфера с гауссовским размывом края. По формулам оптической модели, включающей кулоновское взаимодействие /аналогично^{/3/}/, подсчитывалось дифференциальное сечение упругого рассеяния. Методом наименьших квадратов выбирались параметры модели, наилучшим образом удовлетворяющие экспериментальным данным. По выбранным параметрам подсчитывались полное сечение и среднеквадратичный радиус взаимодействия.

Лучше всего экспериментальным данным удовлетворяет вариант $r_{02} = 0$ / $r_{01} = 0,653$ ферми/, то есть чисто гауссовский потенциал. При этом сумма отклонений $\chi^2 = 7,63$ при $\overline{\chi^2} = 7$ ($\overline{\chi^2} = n - m$, где n - число экспериментальных точек, m - число незафиксированных параметров модели). Если зафиксировать r_{02} равным 0,6, 0,8, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1, 0 ферми, то r_{01} подбирается равным 0,192, 0,479, 0,715, 0,933, 1,085, 1,397 ферми. При этом χ^2 равно, соответственно, 8,47, 9,55, 11,85, 11,71, 12,22,

10,55, 11,37. Из этих данных можно сделать вывод о том, что согласие экспериментальных данных с потенциалом в виде однородной сферы приблизительно на две статистические ошибки хуже, чем с чисто гауссовской формой потенциала.

Нужно отметить, что при сделанных предположениях среднеквадратичный радиус взаимодействия в пределах ошибок оказывается не зависящим от модели и равным $1.10 \pm 0,05$ ферми. Полное сечение $p-p$ взаимодействия, рассчитанное по наилучшим параметрам для различных моделей, оказывается практически одним и тем же и для однородной сферы равно $47,04 \pm 1,24$ мбн, для гауссовского распределения $45,40 \pm 1,49$ мбн.

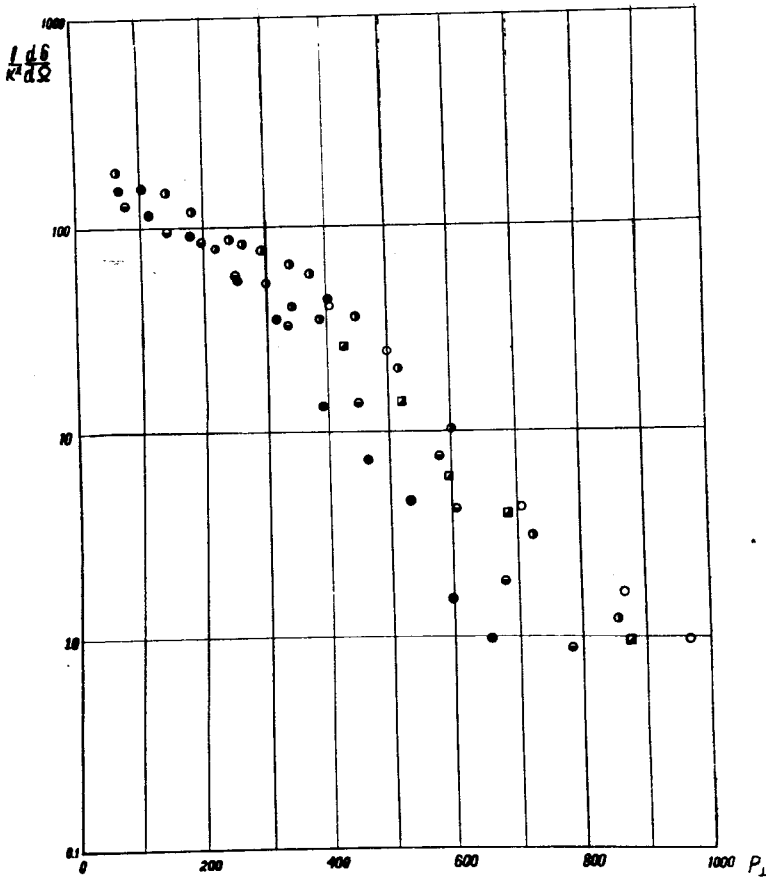
В заключение автор выражает благодарность коллективу лаборантов, принимавших участие в просмотре эмульсионной камеры, Т.Ф. Грабовской за помощь в измерениях, И.Н. Силину и Е.А. Логиновой за проведенные численные расчеты на электронно-счетной машине, В.И. Огиевскому за ценные замечания.

Л и т е р а т у р а

1. В.Б. Любимов, П.К. Марков, Э.Н. Цыганов, Чжан Пу-ин, М.Г. Шафранова. ЖЭТФ, 37, 910, 1959.
2. П.К. Марков, Э.Н. Цыганов, М.Г. Шафранова, Б.А. Шахбазян. ЖЭТФ, 38, 1471, 1960.
3. До Ин Себ, Л.Ф. Кириллова, П.К. Марков, Л.Г. Попова, И.Н. Силин, Э.Н. Цыганов, М.Г. Шафранова, Б.А. Шахбазян, А.А. Юлдашев, ЖЭТФ /в печати/ препринт ОИЯИ Р-754.
ЖЭТФ /в печати/; препринт ОИЯИ Р-754.
4. С.А. Азимов, До Ин Себ, Л.Ф. Кириллова, Э.М. Хабибуллина, Э.Н. Цыганов, М.Г. Шафранова, Б.А. Шахбазян, А.А. Юлдашев. ЖЭТФ /в печати/; препринт ОИЯИ Р-797.
5. C.J.Waddington. Nuovo Cimento, 19, Suppl., N. 1, 37, 1961.
6. М.И. Подгорецкий, Э.Н. Цыганов. Препринт ОИЯИ /в печати/.
7. М.Ф. Родичева, ЖНиПФиКи и, 5, 144, 1960.
8. B.Cork, W.Wenzel, C.W.Causey. Phys. Rev. 107, 859 (1957).
9. А.И. Златева, Д.Т. Кюркчиева, П.К. Марков, Х.М. Чернев. Доклад на конференции по физике высоких энергий, София 1961 г.
10. G.Smith, H.Courant, E.Fowler, H.Kraybill, J.Sandweiss and H.Taft. Proceedings of the 1960 Annual International Conference on High Energy at Rochester, p. 203.

11. И.Н. Силин, Б.А. Шахбазян. Препринт ОИЯИ, Д-616, 1960.
12. W.M.Preston et al. Phys.Rev, 118, 579 (1960).
13. M.J.Longo, J.A.Helland, W.N.Hess, B.J.Moyer, V.Perez-Mendez.
Phys. Rev. Letters, 3, 568 (1959).
14. G. von Dardel, D.H.Frish, R.Mermod, R.H.Milburn, P.A.Piroque, M.Vivargent, G.Weber and K.Winter.
Phys. Rev. Letters, 5, 333 (1960).
15. S.J.Lindenbaum, W.A.Lowe, J.A.Niederer, S.Ozaki, J.J.Russell and L.C.L.Yuan.
Phys. Rev. Letters, 7, 185 (1961).
16. A.Asmore, G.Cocconi, A.N.Diddens and Wetherell.
Phys. Rev. Letters 5, 576 (1960).
17. В.П. Грибов. ЖЭТФ, 41, 667, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 января 1962 года.

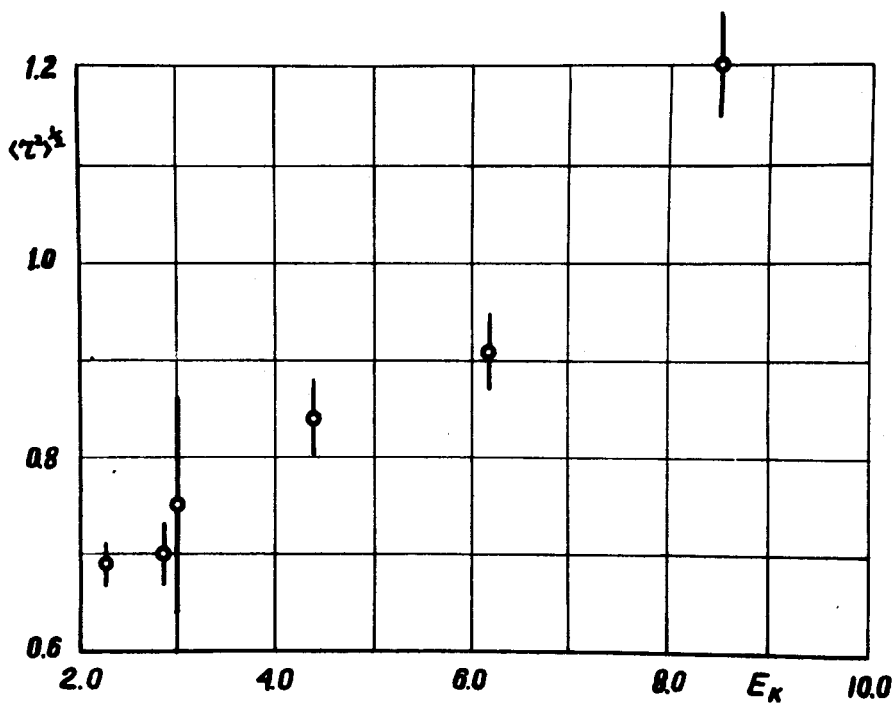


Р и с. 1. Данные по дифференциальному сечению упругого pp -взаимодействия^{[3,4][8,9,10]}, отложенные на графике

$$\frac{1}{k^2} \frac{d\sigma}{d\Omega} (P_{\perp}), \text{ где } k \text{ - волновое число в с.п.м.,}$$

P_{\perp} поперечный импульс.

- - 2,24 БэВ
- ⊙ - 2,8 и 2,85 БэВ
- - 4,40 БэВ
- - 6,20 БэВ
- - 8,5 БэВ



Р и с. 2. Зависимость среднеквадратичного радиуса p - p -взаимодействия от энергии. По оси абсцисс отложена кинетическая энергия налетающего протона в лабораторной системе в Бэв, по оси ординат - среднеквадратичный радиус в ферми.