

X-29  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

---

М.Н. Хачатурян

1862

ПОЛНЫЕ СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ  
С НУКЛОНАМИ И ЯДРАМИ  
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ ОТ 2,6 ДО 8,3 ГЭВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук

И.В. Чувило

Д у б н а 1964

М.Н. Хачатурян

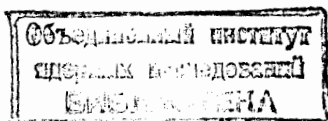
1882

ПОЛНЫЕ СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ  
С НУКЛОНАМИ И ЯДРАМИ  
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ ОТ 2,6 ДО 8,3 ГЭВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук

И.В. Чувило



Д у б н а 1984

Знание полных сечений взаимодействия элементарных частиц с нуклонами и ядрами имеет фундаментальное значение для понимания структуры элементарных частиц и природы сил взаимодействия между ними.

Развитие ускорительной техники за последние годы дало возможность получить значительную информацию по полным сечениям взаимодействия  $\pi$ -мезонов,  $K$ -мезонов и протонов с протонами в широком диапазоне энергий. Имеющиеся до последнего времени работы по эффективным сечениям взаимодействия нейтронов с нуклонами и ядрами в основном относятся к области энергий порядка сотен миллионов электрон-вольт<sup>1,2,3/</sup>. Очевидно, что указанные работы не могли дать сколько-нибудь полной картины поведения эффективных сечений взаимодействия нейтронов с нуклонами и ядрами в области высоких энергий и тем более дать возможность провести какое-либо сравнение с данными по эффективным сечениям взаимодействия между другими элементарными частицами. Возникающие здесь вопросы представляют интерес в связи с проверкой различных теоретических гипотез об асимптотическом поведении сечений в области высоких энергий и др. Целью реферируемой диссертации было восполнить пробел по полным сечениям взаимодействия нейтронов с нуклонами и ядрами в интервале энергий от 2,6 до 8,3 Гэв и осветить ряд вопросов, на которые современная теория не может дать сколько-нибудь удовлетворительного ответа. К наиболее важным из них относятся вопросы, связанные с определением абсолютных значений полных сечений взаимодействия нейтронов с протонами и, следовательно, разностей соответствующих сечений взаимодействия нейтронов с протонами и протонов с протонами, характер поведения полных сечений взаимодействия нейтронов с протонами в указанном интервале энергий, абсолютные величины поправок на экранирование нейтрона протоном в ядре дейтрона при высоких энергиях, полные и неупругие сечения взаимодействия нейтронов с различными ядрами и др.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на XI международной конференции по физике частиц высоких энергий и опубликованы в работах<sup>4-11/</sup>. Описанные в диссертации исследования были выполнены на выведенном под углом  $0^\circ$  пучке нейтронов, генерируемых протонами на бериллиевой мишени, внутри вакуумной камеры синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий.

Диссертация состоит из четырех глав. В первой главе излагается описание опыта по формированию пучка нейтронов, измерению его состава и интенсивности.

В этой же главе дается описание детектора нейтронов. Детекция нейтронов вы-

соких энергий представляет собой сложную экспериментальную задачу. В настоящей диссертации для детекции нейтронов с энергией в несколько миллиардов электронвольт впервые используется черенковский гамма-спектрометр полного поглощения из свинцового стекла размерами 50x50x50 см<sup>3</sup>. В тех взаимодействиях, в которых энергия налетающего нейтрона полностью передается  $\pi^0$ -мезонам, число черенковских фотонов, излученных частицами электронно-фотонного ливня, должно быть пропорционально энергии налетающей частицы. Для определения энергетических порогов гамма-спектрометра и оценки средних эффективных энергий нейтронов спектрометр был прокалиброван на пучке моноэнергетических электронов в интервале энергий 0,5 - 3,0 Гэв.

Для оценки средней эффективной энергии нейтронов под углом 0°, образующихся при взаимодействии протонов, энергия которых равна 3,3; 4,6; 6,5; 7,9 и 9,5 Гэв с бериллиевой мишенью используется спектр нейтронов, полученный для протонов с энергией 6,2; 2,2 и 9,0 Гэв<sup>/12,13/</sup>. Численным интегрированием кривых были найдены средние эффективные энергии  $E_{эф}$ , граничные значения эффективных спектров  $E_{min}$  и  $E_{max}$  и величины полуширины кривых на полувисоте  $\delta$ .

Эти данные приводятся в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

$E_p$ , Гэв	3,3	4,6	6,5	7,9	9,5
$E_{эф}$ , Гэв	2,6	3,9	5,5	6,9	8,3
$E_{min}$ , Гэв	1,8	2,9	4,2	5,5	6,7
$E_{max}$ , Гэв	3,3	4,6	6,5	7,9	9,5
$E_{п}$ , Гэв	2,2	3,4	4,9	6,2	7,6
$\delta$ , Гэв	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,75$	$\pm 0,85$

Во второй главе описываются измерения полных сечений взаимодействия нейтронов с эффективной энергией 2,6; 3,9; 5,5; 6,9 и 8,3 Гэв с протонами: геометрия и постановка опыта, методика измерений и обработка данных, поправки и возможные систематические ошибки.

Полные сечения взаимодействия нейтронов с протонами измерялись разностным методом по ослаблению пучка нейтронов в мишенях из полиэтилена и углерода. Гео-

метрия опыта, которая определялась расстоянием между мишенью и конвертором, удовлетворяла условиям "хорошей геометрии" ( $\theta/2 = 0,228^\circ$ ).

Полученные в эксперименте величины полных сечений взаимодействия нейтронов с протонами приведены в таблице 2. Указанные в таблице ошибки являются статистическими.

Т а б л и ц а 2

Энергия нейтронов Гэв	2,6	3,9	5,5	6,9	8,3
$\sigma_t$ , мб	38,1	43,4	41,2	39,3	40,8
$\Delta\sigma$ , мб	$\pm 2,6$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 1,7$	$\pm 1,9$

Экспериментальные данные по полным сечениям взаимодействия нейтронов с протонами приведены на рис. 1. Для сравнения на том же рисунке приведены данные по полным сечениям взаимодействия протонов с протонами. Из рис. 1 видно, что полное сечение  $\sigma_t(p_p)$  в интервале энергий от 1,4 до 8,3 Гэв изменяется мало, а в интервале энергий от 5,5 до 8,3 Гэв полные сечения  $p_p$  и  $p_p$  взаимодействий в пределах экспериментальных ошибок совпадают. По-видимому,  $\sigma_{pp} = \sigma_{pp}$  и при более высоких энергиях взаимодействующих нуклонов. Используя изотопическую инвариантность, можно получить следующее выражение для сечения нуклон-нуклонного взаимодействия в состоянии с  $T = 0$ :  $\sigma(T=0) = 2\sigma_{np} - \sigma_{pp}$ . Найденные таким способом сечения  $\sigma(T=0)$  и  $\sigma(T=1)$  в зависимости от энергии взаимодействующих нуклонов приведены на рис. 2. Приведенные данные указывают на то, что при энергиях, превышающих 6 Гэв, сечения нуклон-нуклонного взаимодействия в пределах ошибок эксперимента не зависят от величины изотопического спина нуклон-нуклонной системы.

В работе<sup>/14/</sup> Удгаонкаром были получены соотношения, которые позволяют получить выражения, определяющие зависимость  $\sigma_t(p_p)$  от энергии в предасимптотической области. Ограничиваясь вкладами вакуумного, квазивакуумного  $\omega$  и  $\rho$ -полюсов,  $\sigma_t(p_p)$  можно представить в виде<sup>/15/</sup>

$$\sigma(p_p) = \frac{kE + \ell E^2 - nE^\omega + tE^\rho}{(E^2 - M^2)^{1/2}}$$

где  $E$  - полная энергия нейтрона в л.с.к.;  $M$  - масса нуклона;  $k$ ,  $\ell$ ,  $n$  и  $t$  - значения квазивакуумной,  $\omega$  и  $\rho$  траекторий при  $t=0$ ;  $k$ ,  $\ell$ ,  $n$  и  $t$  - функции вычетов соответствующих полюсов.

Т а б л и ц а 3

$E_{np}$ , ГэВ	2,6	3,9	5,5	6,9	8,3
$\sigma$ , мб	43,0	41,6	40,0	39,8	39,3

Сравнивая табл. 2 и 3, можно видеть, что экспериментально измеренные и вычисленные на основании полюсов Редже величины сечений в интервале энергий 3,9 - 8,3 ГэВ довольно хорошо согласуются друг с другом.

В третьей главе описываются измерения полных сечений взаимодействия нейтронов с нейтронами. Измерения производились разностным методом с помощью мишеней из обычной и тяжелой воды в условиях "хорошей геометрии" ( $\theta/2 = 0,228^\circ$ ). Полученные из эксперимента величины полных сечений взаимодействия нейтронов с нейтронами при средней эффективной энергии 5,5 и 8,3 ГэВ приведены в табл. 4. Указанные ошибки являются статистическими. В величины сечений не включена поправка на экранировку нейтрона протоном в дейтроне.

Т а б л и ц а 4

$\sigma(nn)$			$\sigma(pp)$		
$E$ , ГэВ	5,5	8,3	$E$ , ГэВ	5,0	9,0
$\sigma_t$ , мб	34,8	31,5	$\sigma_t$ , мб	42	40
$\Delta\sigma$ , мб	$\pm 1,6$	$\pm 1,7$	$\Delta\sigma$ , мб	$\pm 1$	$\pm 1$

Величину поправки на экранирование можно оценить из известных экспериментальных величин для  $\sigma_{pp}$  и  $\sigma'_{nn}$ , измеренных при одной и той же энергии. Здесь  $\sigma'$  - сечение взаимодействия нейтронов с нейтронами без учета поправки на экранирование в дейтроне.

Из условия зарядовой симметрии ядерных сил (если пренебречь электромагнитными взаимодействиями) следует, что  $\sigma_{pp}$  должно быть равно  $\sigma'_{nn}$ . Отсюда получаем:

$$\delta\sigma = \sigma_{pp} - \sigma'_{nn} = \sigma_{nn} - \sigma'_{nn}$$

Предполагая, что в интервале энергий от 5,5 до 8,3 ГэВ  $\delta\sigma = \text{const}$  для среднего значения  $\delta\sigma$  имеем:

$$\delta\sigma = (7,8 \pm 2) \text{ мб.}$$

Используя измеренные в настоящей работе величины  $\sigma'_{nn}$  и  $\sigma_{np}$  при одной и той

же энергии, можно определить полные сечения взаимодействия нейтронов с дейтронами. Воспользовавшись данными таблиц 2 и 4, получаем:

$$\sigma(nd) = (76,0 \pm 2,4) \text{ мб}$$

$$\sigma(n\bar{d}) = (71,6 \pm 2,5) \text{ мб}$$

соответственно для нейтронов с эффективной энергией 5,5 и 8,3 ГэВ. Эти данные в пределах экспериментальных ошибок совпадают с  $\sigma(pd)$  (соответственно 78 и 76 мб).

В четвертой главе описываются измерения полных и неупругих сечений взаимодействия нейтронов с ядрами. Сечение  $\sigma(\theta)$ , измеренное для угла  $\theta$ , можно связать с сечением поглощения и сечением упругого рассеяния  $\sigma_d$  с помощью соотношения:

$$\sigma(\theta) = \sigma_r + [1 - F(\theta)] \sigma_d = \sigma_r + F'(\theta) \sigma_d.$$

В эксперименте измеряются полное сечение  $\sigma_t$ , сечение поглощения  $\sigma_r$  и  $\sigma(\theta)$  для нескольких значений угла  $\theta$ . Зная  $\sigma(\theta)$  для различных углов  $\theta$  и вычислив соответствующие значения  $F(\theta)$ , можно определить  $\sigma_r$  и  $\sigma_d$ , где  $\sigma_d$  - сечение дифракционного рассеяния. Вычисленные описанным выше путем  $\sigma_t$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_d$  и их ошибки для ядер C, Al, Cu, Sn и Pb приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

Элемент	$\sigma_t$ , мб	$\sigma_r$ , мб	$\sigma_d$ , мб
Pb	$2833 \pm 98$	$1692 \pm 22$	$1141 \pm 101$
Sn	$1966 \pm 83$	$1353 \pm 48$	$613 \pm 96$
Cu	$1408 \pm 72$	$624 \pm 35$	$784 \pm 79$
Al	$612 \pm 30$	$396 \pm 17$	$216 \pm 34$
C	$336 \pm 12$	$188 \pm 6$	$148 \pm 13$

В этой же главе проведен анализ экспериментальных данных на основании оптической модели. Получены следующие величины для средних значений параметров оптической модели и радиусов ядер:

$$K = (0,48 \pm 0,03) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$$

$$K_1 = (0,12 \pm 0,04) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$$

$$r_0 = (1,26 \pm 0,02) \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Константа  $k_1$  связана также с величиной ядерного потенциала  $V$ . Из релятивистского соотношения

$$k_1 = \frac{\bar{V}}{hc\beta}$$

получаем  $\bar{V} = 24 \pm 8 \text{ МэВ.}$

В той же главе проведен анализ экспериментальных данных по сечениям взаимодействия нейтронов с ядрами на основе обобщенной дифракционной модели, развитой Глессгольдом и Грайдером в работе /16/. В этой модели для описания взаимодействия нейтронов с ядрами используются четыре параметра. В случае постоянной фазы этими параметрами являются:

1.  $L (\gg 1)$  - число парциальных волн, испытывающих сильное поглощение.
2.  $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$  - непрозрачность для малых значений  $\ell$ , где  $\ell$  - угловой момент.
3.  $2\Delta (1 \leq \Delta \leq L)$  - интервал значений  $\ell$ , в котором  $\beta$  изменяется от  $\beta$  до 0.
4.  $\alpha$  - фаза расходящейся волны.

Рассматривая экспериментальные данные по рассеянию нейтронов ядрами в интервале энергий от 300 Мэв до 8,3 Гэв, можно видеть, что полные сечения взаимодействия нейтронов с ядрами в указанном интервале энергий изменяются довольно сильно. Последнее можно объяснить изменением одного из 3-х параметров, а именно  $\beta$ . Величины  $\beta$ , вычисленные на основании экспериментальных данных, приведены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6

Е, Гэв	0,30	0,70	1,40	5,0	8,3
Pb	0,97	0,99	1,00	0,94	0,98
Cu	0,93	0,97	0,99	0,94	0,99
Al	0,88	0,95	0,97	0,93	0,94
C	0,82	0,89	0,94	0,89	0,93

На рис. 3 приведены экспериментальные величины эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами углерода, алюминия, меди и свинца в интервале энергий от 0,3 до 8,3 Гэв. Кривые для полных сечений взаимодействия (сплошная кривая) и для неупругих сечений взаимодействия (штрихованная кривая) нейтронов с ядрами представляют собой теоретические кривые. При вычислениях были использованы данные таблицы 6 и следующие значения параметров обобщенной дифракционной модели:

$$L = 1,26 \cdot 10^{-13} \cdot k \cdot A^{1/3} \text{ см}; \quad \Delta = 0,61 \cdot 10^{-13} \cdot k \cdot \text{см} \quad \text{и} \quad \alpha = 0.$$

### Краткие выводы

1. В настоящей работе показано, что полное сечение взаимодействия нейтронов с протонами в интервале энергий от 2,6 до 8,3 Гэв практически постоянно.
2. Отличие между сечениями  $\sigma_i(\text{np})$  и  $\sigma_i(\text{pp})$  при энергиях 5,5; 6,9 и 8,3 Гэв находится в пределах экспериментальных ошибок.
3. Анализ поведения полных сечений  $\sigma_i(\text{np})$ ,  $\sigma_i(\text{pp})$  и  $\sigma_i(\bar{\text{p}}\bar{\text{p}})$  показывает, что  $\sigma_i(\text{pp})$  и  $\sigma_i(\bar{\text{p}}\bar{\text{p}})$  приближаются к асимптотическому значению, равному  $\sigma_A = 40$  мб сверху, в то время как  $\sigma_i(\text{np})$  стремится к асимптотическому значению снизу.
- Указанное поведение было предсказано Удгаонкаром /14/.
4. При энергиях, превышающих 5,5 Гэв, взаимодействие не зависит от изотопического состояния NN-системы.
5. Получены величины полных сечений взаимодействия нейтронов с нейтронами при энергии 5,5 и 8,3 Гэв. Определено среднее значение поправки на экранирование нейтрона протоном в дейтроне, равное  $7,8 \pm 2$  мб.
6. Из известных  $\sigma'_{\text{nn}}$  и  $\sigma'_{\text{np}}$ , измеренных в настоящей работе при энергии 5,5 Гэв и 8,3 Гэв, определены полные сечения взаимодействия нейтронов с дейтронами,  $\sigma(\text{nd})$  в пределах экспериментальных ошибок совпадают с  $\sigma(\text{pd})$ .

7. Измерены полные и неупругие сечения взаимодействия нейтронов с энергией 8,3 Гэв с ядрами углерода, алюминия, меди, олова и свинца. Полученные данные указывают на то, что полные сечения взаимодействия нейтронов с ядрами достигают максимума при энергии 1,4 Гэв и имеют почти постоянное значение в интервале энергий по 5 до 8,3 Гэв. Неупругие сечения взаимодействия нейтронов с ядрами в интервале энергий от 0,3 до 8,3 Гэв слабо зависят от энергии.

8. Получены средние значения параметров оптической модели:

$$K = (0,48 \pm 0,03) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$$

$$K_1 = (0,12 \pm 0,04) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$$

и средняя величина ядерного потенциала  $\bar{V} = 24 \pm 8$  Мэв.

9. Дан анализ экспериментальных данных по рассеянию нейтронов на ядрах на основе обобщенной дифракционной модели. Найдены значения параметра непрозрачности  $\beta = 1 - \eta(\ell)$  для пяти ядер. Определены радиусы ядер, равные  $L = Rk = \frac{1}{5} A^{1/3} k \cdot 10^{-13}$ . Из анализа данных для  $t_0$  получена величина, равная  $t_0 = (1,26 \pm 0,02) \cdot 10^{-13}$  см.

Л и т е р а т у р а

1. T. Coor, D.Hill, W.F.Hbrnyak, L.W.Smith and G.Snow. Phys. Rev., 98, 1369 (1955).
2. I.H.Atkinson, W.N.Hess, V.Perez-Mendez and R.Wallace. Phys. Rev., 123 1850 (1951)
3. J.Friedes et al., Bull. Am. Phys. Soc., 9, 94 (1964).
4. Л. Ождяни, В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян, И.В. Чувило, ЖЭТФ 42, 392 (1962).
5. В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян, ЖЭТФ 42, 809 (1962).
6. М.Н. Хачатурян, В.С. Пантуев, ЖЭТФ 44, 1411 (1963).
7. M.Khachaturian, V.Pantuev. Phys. Lett., 7, 80 (1963).
8. Г. Кокколи. Доклад на Международной конференции по физике высоких энергий в Женеве, стр. 883 (1962).
9. М.Н. Хачатурян, В.С. Пантуев. ПТЭ 6, 29 (1963).
10. Л. Ождяни, В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян. ПТЭ 2, 173 (1961).
11. В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян, И.В. Чувило. Препринт ОИЯИ, Р-1725 (1964).
12. F.Holmquist, UCRL-8559 (1958).
13. F.Fowler et al. Phys. Rev., 95, 1026 (1954).
14. M.Ugaonkar. Phys. Rev. Lett., 8, 142 (1962).
15. В.И. Никаноров, ЖЭТФ 44, 2184 (1963).
16. A.Glassgold and K.Greider. Phys. Rev. Lett., 2, 169 (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 октября 1964 г.

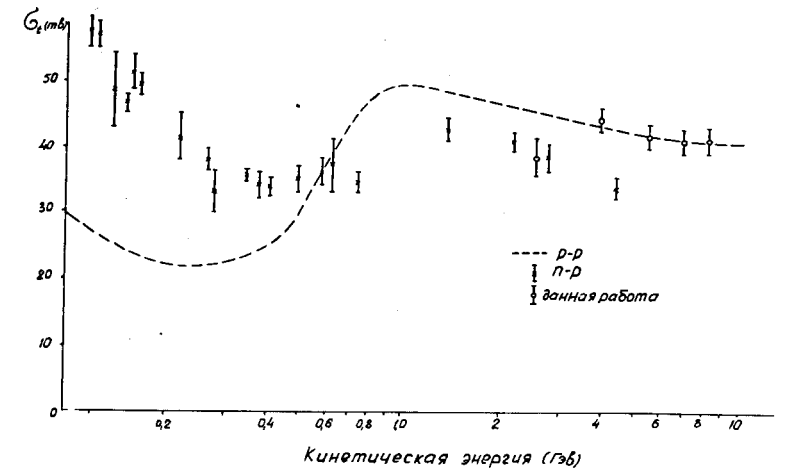


Рис. 1.

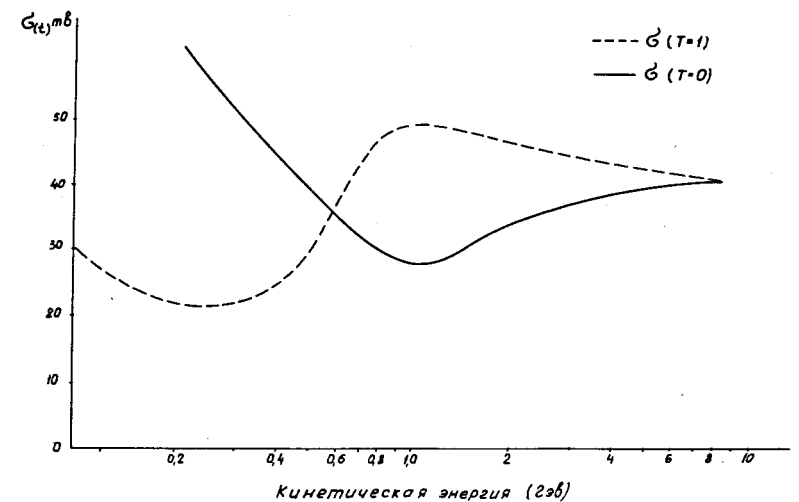


Рис. 2.

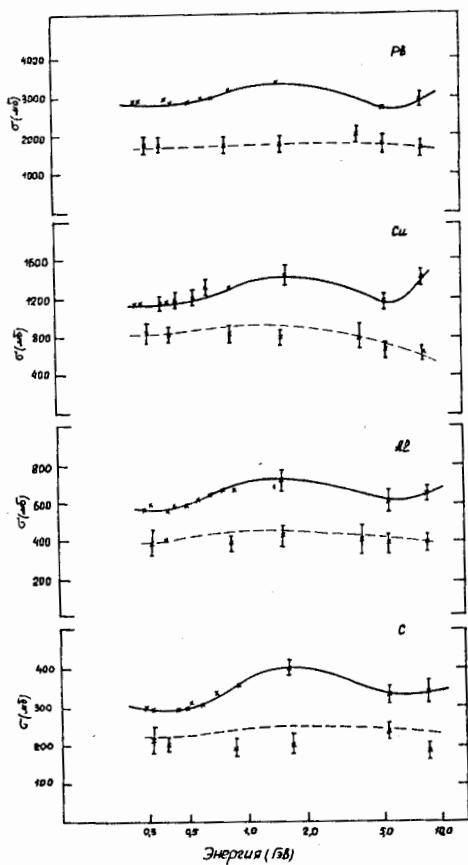


Рис. 3.