

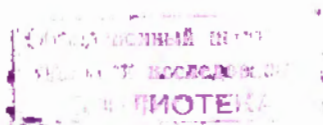
Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, В.Г.Иванов,  
Ю.В.Катышев, Е.Н.Кладническая, Л.А.Кулюкина,  
Нгуен Дин Ты, А.В.Никитин, С.З.Отвиновский,  
М.И.Соловьев, Р.Сосновский, М.Д.Шафранов

ИССЛЕДОВАНИЕ  
УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
С ИМПУЛЬСОМ 6,8 БЭВ/С НА ПРОТОНАХ  
С ПОМОЩЬЮ ПРОПАНОВОЙ  
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ

*ЖСЭТФ, 1960, т38, в2, с 426-431.*

Ван Ган-чан, Ван Цу-изен, Дин Да-цао, В.Г.Иванов<sup>x/</sup>,  
Ю.В.Катышев<sup>x/</sup>, Е.Н.Кладницкая, Л.А.Кулюкина<sup>xx/</sup>,  
Нгуен Дин Ты, А.В.Никитин, С.З.Отвиновский,  
М.И.Соловьев, Р.Сосновский<sup>xxx/</sup>, М.Д.Шафранов

ИССЛЕДОВАНИЕ  
УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ П<sup>+</sup>-МЕЗОНОВ  
С ИМПУЛЬСОМ 8,8 БЭВ/С НА ПРОТОНАХ  
С ПОМОЩЬЮ ПРОПАНОВОЙ  
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ



- 
- x/ Лаборатория ядерных проблем.  
xx/ Лаборатория теоретической физики.  
xxx/ Институт ядерных исследований, Варшава.

А н н о т а ц и я

Изучалось упругое рассеяние  $\pi^-$ -мезонов с импульсом  $6,8 \frac{\text{БэВ}}{\text{С}}$  на протонах в пропановой пузырьковой камере. Получены полное и дифференциальное сечения упругого рассеяния на основе 213 случаев взаимодействия, а также оценено полное сечение  $\pi^- - p$  взаимодействия:

$$\sigma_{\text{упр}}(\theta' > 6^\circ) = 3,75^{+0,25}_{-0,55} \text{ мб} ; \quad \sigma_t = 30 \pm 5 \text{ мб} .$$

Найдено, что упругое рассеяние в пределах ошибок эксперимента согласуется с моделью протона в виде однородной сферы с резкими границами:

$$R = 1,05 \cdot 10^{-13} \text{ см} ,$$

$$K = 0,71 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1} ,$$

$$k_1 = 0 .$$

Рассеяние  $\pi^-$ -мезонов на протонах при больших энергиях, когда длина волны де-Бройля много меньше эффективной области взаимодействия, может дать хорошую информацию о структуре протонов. В данной работе для исследования упругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов с импульсом  $6,8 \frac{\text{БэВ}}{\text{с}}$  на протонах, длина волны  $\lambda = 0,112 \times 10^{-13}$  см, применялась 24-литровая пузырьковая пропановая камера <sup>1</sup>, помещавшаяся в магнитном поле 13700 эрстед.

На рисунке 1 показано расположение камеры и другого оборудования в пучке  $\pi^-$ -мезонов <sup>2</sup>. По 112 пучковым трекам, измеренным в камере, было получено импульсное распределение  $\pi^-$ -мезонов, оно приведено на рисунке 2. Среднее значение импульса равно  $6,8 \pm 0,6 \frac{\text{БэВ}}{\text{с}}$ .

### Обработка и результаты измерений

Просмотр полученных камерных снимков производился на стереолупе дважды разными просмотрщиками. Всего было просмотрено около 3500 кадров. Из всех двухлучевых звезд было отобрано 550 случаев, напоминающих упругое и квазиупругое рассеяние. Координаты точек взаимодействия и треков на обоих стереокадрах измерялись на измерительных микроскопах.

Результаты этих измерений обрабатывались электронно-счетной машиной, которая выдавала пространственные координаты треков, величину пробега протона отдачи /при остановках/, угол рассеяния  $\pi^-$ -мезона  $\theta_\pi$ , угол протона отдачи  $\theta_p$ , азимутальные углы  $\pi^-$ -мезона и протона отдачи  $\varphi_\pi$  и  $\varphi_p$ . Ошибка в углах  $\theta_\pi$  и  $\theta_p$  была определена на основании двух независимых измерений 80 случаев. Найдено, что среднеквадратичная ошибка  $\Delta\theta_\pi$  равна  $26'$ , а  $\Delta\theta_p = 1^\circ 14'$ . Поправка на кривизну треков вводилась, хотя она не превышала  $20'$ .

Случаи упругого / $\pi^-$ -p / - рассеяния идентифицировались по следующим критериям:

1. Компланарность. За меру компланарности был выбран угол между плоскостью, образованной падающим и рассеянным мезоном, и плоскостью, образованной падающим мезоном и протоном отдачи. Этот угол равен модулю разности азимутальных углов:  $\Delta\varphi = |\varphi_p - \varphi_\pi|$ . Компланарными счита-

лись случаи, для которых  $\Delta \varphi$  не превышала двойной среднеквадратичной ошибки. Распределение всех 550 случаев по параметру компланарности приведено на рис. 3.

2. Угловая корреляция. Около корреляционной кривой  $\theta_{\pi} = f(\theta_p)$  для импульса  $\pi^{-}$ -мезона 6,8 Бэв/с выделялась область, определяемая двойной среднеквадратичной ошибкой. Случаи упругого рассеяния должны находиться в этой области. На рис. 4 показано распределение всех случаев по отклонению от корреляционной кривой. За меру отклонения принята двойная среднеквадратичная ошибка  $\Delta \theta$ .

3. Пробег протона отдачи /при остановке/. Этот критерий использован приблизительно в 30% случаев.

Из всех измеренных и обработанных 550 случаев было отобрано 218 случаев, признанных упругими. Распределение этих 218 случаев упругого  $\pi^{-}$ -рассеяния по длине камеры приведено на рис. 5. В качестве эффективной области взята центральная часть камеры длиной 43 см. Общая длина камеры 55 см. В эффективной области находятся 213 случаев из 218. Распределение этих 213 случаев по азимутальному углу протона отдачи приведено на рис. 6.

В 113 случаях протон отдачи летит вверх, в 100 - вниз; в 115 случаях - влево, в 98 - вправо. Так как распределение по азимутальному углу протона отдачи изотропно, поправки на потери в области, близкой к  $\varphi_p = \pm 90^{\circ}$ , не вводились.

Оценка доли квазиупругих случаев в полном числе случаев упругого рассеяния производилась из распределения всех случаев по отклонению от корреляционной кривой. Эта доля оказалась равной приблизительно 6%.

Для получения величины сечений упругого взаимодействия дважды на всех кадрах считалось число пучковых  $\pi^{-}$ -мезонных треков, проходящих через эффективную область камеры, и число звезд, вызываемых пучковыми  $\pi^{-}$ -мезонами. С учетом примеси  $\mu^{-}$ -мезонов, которая оценивалась как  $5 \pm 2\%$ , найдено, что полная длина следов  $\pi^{-}$ -мезонов составляет  $1,15 \cdot 10^6$  см. По 201 случаю найдено, что  $\sigma_{упр}(\theta'_{\pi} > 6^{\circ}) = 3,75^{+0,25}_{-0,55}$  мб, через  $\theta'_{\pi}$  обозначен угол рассеяния  $\pi^{-}$ -мезона в системе центра масс.

Была произведена оценка полного сечения  $\pi^- - p$  - взаимодействия. Для этого считалось число звезд, содержащих четное число лучей, из которых не больше одного черного следа  $N_1$ , и число звезд с нечетным числом релятивистских лучей и без черного следа  $N_2$ . В предположении, что при данной энергии справедливо равенство  $\sigma_t(\pi^- + p) = \sigma_t(\pi^- + n)$ , находим, что число звезд, вызываемых  $\pi^-$ -мезонами на свободных протонах, равно  $N_1 - N_2$ . Найденная величина  $N_1 - N_2$  приводит к сечению  $\sigma_t(\pi^- + p) = 30 \pm 5$  мб.

Расчет по оптической модели

Нами был проведен анализ рассеяния  $\pi^-$ -мезонов на протонах на основе оптической модели. В качестве модели протона использовалась однородная сфера<sup>3</sup>. В предположении, что упругое рассеяние носит чисто дифракционный характер /  $\sigma_{упр} = \sigma_d$  / имеем следующие соотношения, выражающие полное сечение неупругих процессов  $\sigma_i$  и дифракционное сечение  $\sigma_d$  через параметры оптической модели:

$$\sigma_i = \pi R^2 \left\{ 1 - \frac{1 - (1+2B) \exp(-2B)}{2B^2} \right\}, \quad /1/$$

$$\sigma_d = \sigma_d(K, k_1=0) \left\{ 1 + 4 \left( \frac{k_1}{K} \right)^2 \left[ 1 - \frac{1}{18} B^2 + \dots \right] \right\}, \quad /2/$$

где

$$\sigma_d(K, k_1=0) = \frac{\pi R^2}{4B^2} \left\{ 4B^2 - 14 - 2(1+2B) \exp(-2B) + 16 \exp(-B)(1+B) \right\},$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = |f(\theta)|^2, \quad /3/$$

$$f(\theta) = i k_0 \int_0^R [1 - e^{(-K+2ik_1)\rho}] J(k_0 \rho \sin \theta) \rho d\rho,$$

$$B = KR, \quad \lambda = \sqrt{R^2 - \rho^2},$$

$f(\theta)$  - амплитуда рассеяния,  $\theta$  - угол рассеяния,  $k_0$  - волновое число падающего пиона,  $k_1$  - изменение действительной части волнового числа,  $K$  - коэффициент поглощения нуклона,  $R$  - радиус сферы.

Были проведены расчеты кривых  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)$  при различных значениях  $\sigma_d, \sigma_i, R$ . Из сравнения расчетных данных с экспериментальным угловым распределением получено, что лучше всего экспериментальные данные могут быть описаны моделью протона со следующими параметрами:

$$R = 1,05 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

$$K = 0,71 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$$

$$k_1 = 0$$

$$\sigma_d = 5,5 \text{ мб}$$

$$\sigma_i = 21,0 \text{ мб.}$$

На рисунке 7 представлено дифференциальное сечение  $\pi^- - p$  рассеяния при  $6,8 \pm 0,6$  Бэв/с. На рисунке 8 представлена зависимость  $\lambda^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$  от  $\frac{\sin \theta \pi'}{\lambda}$  для  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 1,43 Бэв/с,  $\lambda = 0,272 \cdot 10^{-13} \text{ см}^4$  и 6,8 Бэв/с  $\lambda = 0,112 \cdot 10^{-13} \text{ см}$  /настоящая работа/.

Из рисунка 8 следует, что несмотря на большое различие по энергии, связь между величинами  $\lambda^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$  и  $\frac{\sin \theta \pi'}{\lambda}$  выражается одной кривой. Очевидно, что физический смысл этого результата состоит в постоянстве среднего значения поперечного импульса, передаваемого при упругом рассеянии, следовательно, в рассматриваемой области энергий эффективный параметр удара, определяющий величину сечения взаимодействия пионов с нуклонами мало зависит от энергии, поэтому  $R, K$  и  $k_1$  мало изменяются с энергией. Об этом свидетельствует и сравнение с другими экспериментальными данными /таблица 1/. Небольшую разницу, наблюдаемую в области малых значений  $\frac{\sin \theta \pi'}{\lambda}$ , по-видимому, можно объяснить тем, что при импульсах 1,4 Бэв/с амплитуда рассеяния имеет небольшую реальную часть, при наших же энергиях амплитуда рассеяния чисто мнимая.

В заключение авторы выражают большую благодарность академику В.И.Векслеру, И.В.Чувилу за обсуждения; Н.А.Смирнову, Е.К.Курятникову,

Ю.И.Макарову, М.А.Самарину за помощь в проведении эксперимента,  
Л.Я.Ивановой и К.Н.Радиной за помощь в проведении измерений.

Рукопись поступила в издательский отдел 25 августа 1959 года.

Л и т е р а т у р а

1. Ван Ган-чан, М.И.Соловьев, Ю.Н.Шкобин. ПТЭ, № 1, 41 /1959/.
2. Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, В.Г.Иванов, Е.Н.Кладницкая, Нгуен Дин Ты  
И.С.Сайтов, М.И.Соловьев, М.Д.Шафранов. Отчет ЛВЭ ОИЯИ 1959 г.
3. Fernbach, Serber and Taylor, Phys.Rev. 75, 1382 (1948).
4. M.Chretien, J.Leitner, N.P.Samios, M.Schwartz and  
J.Steinberger, Phys.Rev., 108, 383 (1957).
5. J.Leitner (unpublished) see ref. 7.
6. L.M.Eisberg, W.B.Fowler, R.M.Lea, W.D.Shephard, R.P.Shutt  
et al, Phys.Rev., 97, 797 (1955).
7. W.D.Walker, Phys.Rev., 108, 872 (1957).
8. G.Maenchen, W.B.Fowler, W.M.Powell and R.W.Wright  
Phys.Rev., 108, 850 (1957).



Т а б л и ц а I

$E_{\pi}$ БЭВ	$\sigma_d$ мв	$\sigma_t$ мв	$R \cdot 10^{13}$ см	$K \cdot 10^{-13}$ см <sup>-1</sup>	$k_1$	$\frac{\sigma_i}{\pi R^2}$
1,3 <sup>5</sup>	7,4 $\pm$ 1,0	26,4 $\pm$ 2,2	1,08 $\pm$ 0,06			
1,4 <sup>6</sup>	7,0 $\pm$ 1,0	34 $\pm$ 3	1,18 $\pm$ 0,10	0,67	$\approx 0$	0,61 $\pm$ 0,10
1,4 <sup>4</sup>	10,1 $\pm$ 0,8	30 $\pm$ 3	1,08 $\pm$ 0,06			
4,5 <sup>7</sup>	6,0 $\pm$ 1,5	28 $\pm$ 2,6	0,90 $\pm$ 0,15			
5 <sup>8</sup>	4,7 $\pm$ 1,0	22,5 $\pm$ 2,4	0,90 $\pm$ 0,15	1,02	$\approx 0$	0,6 $\pm$ 0,2
6,8	5,5 $\pm$ 0,5	30 $\pm$ 5 /оценка/	1,05 $\pm$ 0,05	0,71	$\approx 0$	0,61

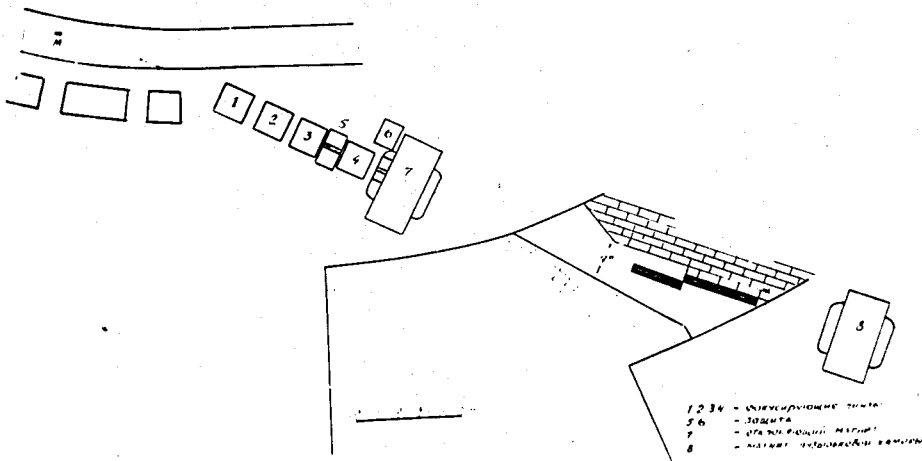


Рис. 1. Размещение оборудования в  $\pi^-$ -мезонном пучке. 1-4-линзы жесткой фокусировки. 5, 6 - защита. 7 - отклоняющий магнит, 8-магнит, в котором находится камера. М - мишень из бериллия в камере ускорителя.

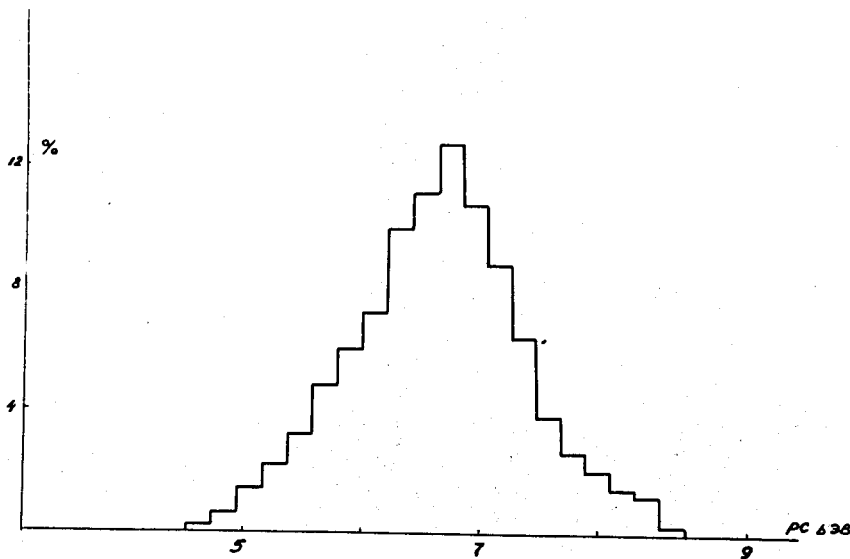


Рис. 2. Относительный спектр  $\pi^-$ -мезонов, полученный из измерений импульсов 112 пучковых треков в камере /  $\bar{p}$  =  $6,8 \pm 0,6$  Бэв/с/.

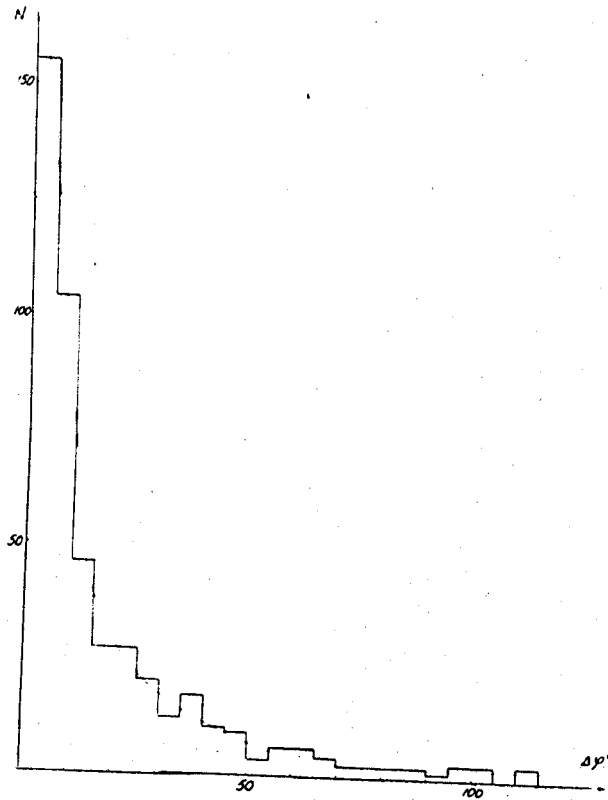


Рис. 3. Распределение числа обработанных случаев по параметру компланарности  $\Delta\varphi$ . Пунктирная гистограмма относится к случаям, идентифицированным по всем критериям как упругое рассеяние; штрихпунктирная - к случаям неупругого рассеяния; сплошная - ко всем 550 случаям.

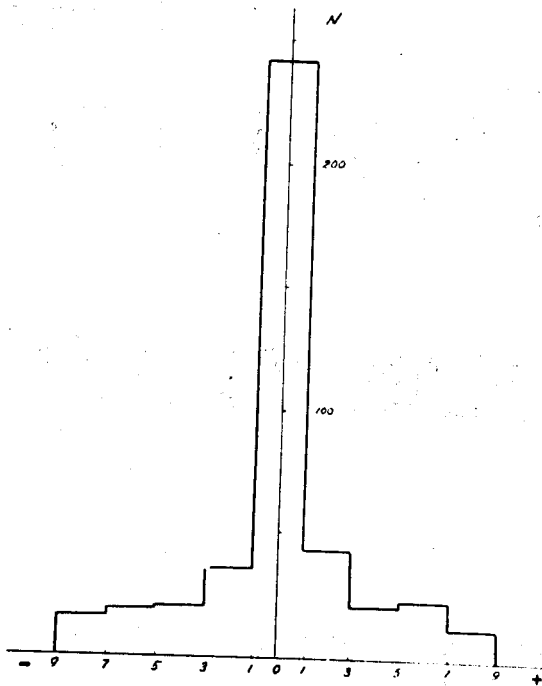


Рис. 4. Распределение числа двухлучевых звезд по отклонению от угловой корреляционной кривой. Одно деление шкалы абсцисс соответствует двойной среднеквадратичной ошибке.

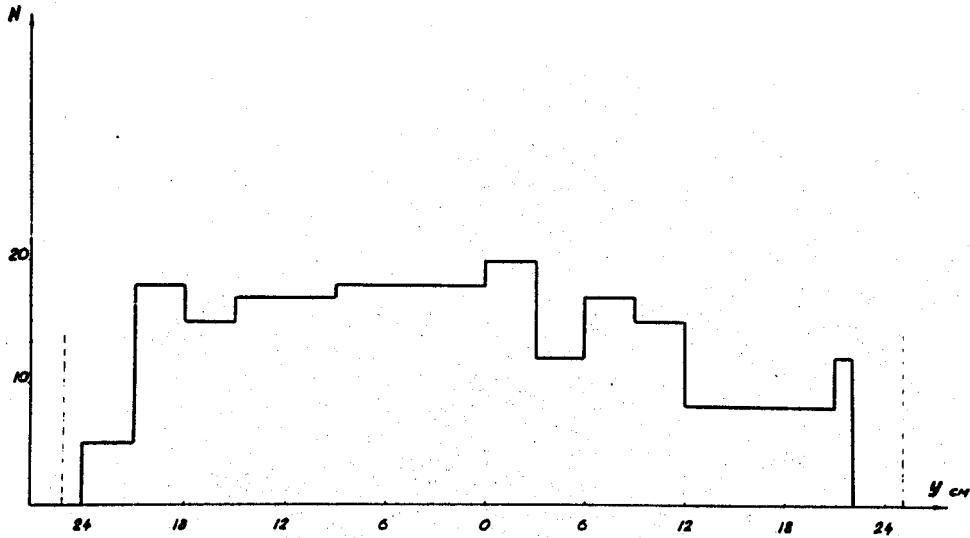


Рис. 5. Распределение 218 случаев упругого  $\pi^- - p$  -рассеяния по длине камеры. Нуль относится к центру камеры.

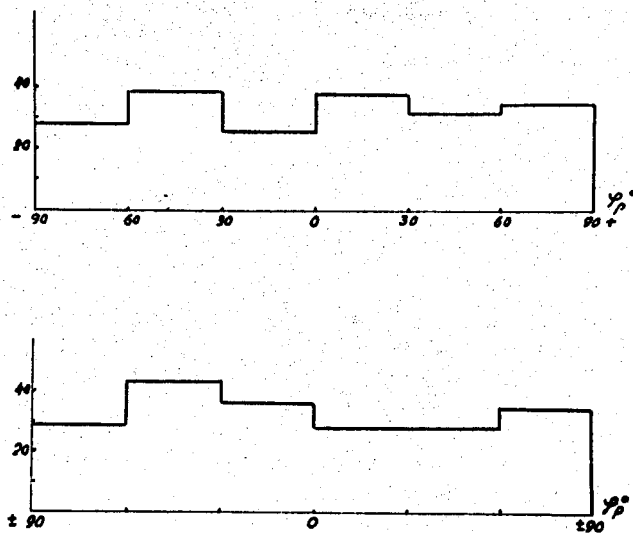


Рис. 6. Распределение 218 случаев упругого  $\pi^- - p$  -рассеяния, отобранных для анализа по азимутальному углу протона отдачи  $\varphi_p$ . На верхней гистограмме показано распределение вверх-вниз, а на нижней влево-вправо.

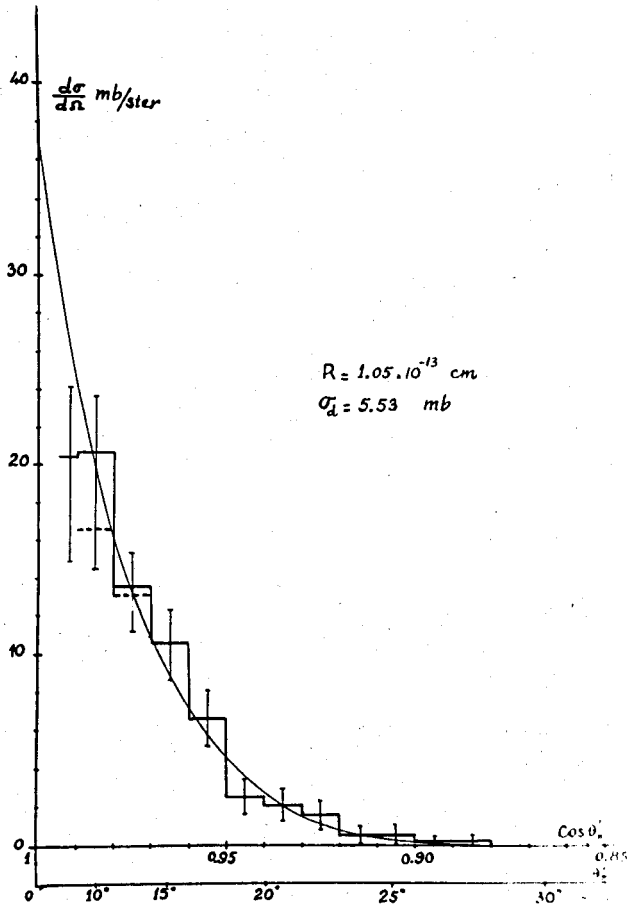


Рис. 7. Дифференциальное сечение упругого  $\pi^- - p$  рассеяния со средним импульсом  $\pi^-$ -мезонов  $6,8 \pm 0,6$  Бэв/с, построенное по 213 случаям. В угловом интервале  $\cos \theta_{\pi} > 0,97$  добавлено 23 случая, которые могут быть идентифицированы как упругое рассеяние по величине пробега протона отдачи и некомпланарность которых не превышает тройной ошибки. Эти 23 случая показаны пунктиром. Ошибки всюду статистические.

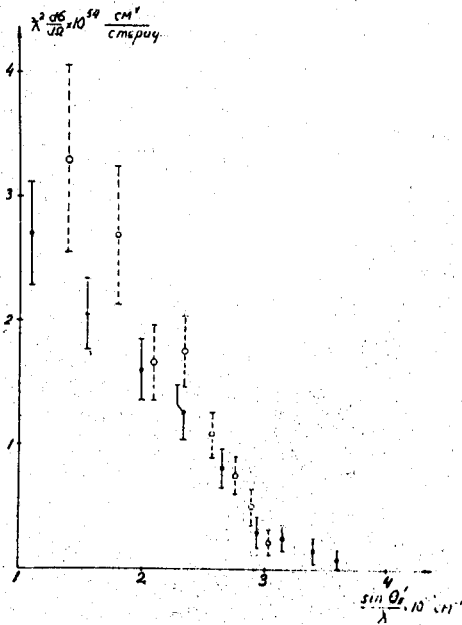


Рис. 8. Зависимость  $\lambda^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$

от  $\frac{\sin \theta'}{\lambda}$

$\bar{P}_\pi = 1,43$  Бэв/с  
 $\bar{P}_\pi = 6,8$  Бэв/с

$\lambda = 0,272 \cdot 10^{-13}$  см / работа 4/  
 $\lambda = 0,112 \cdot 10^{-13}$  см / данная работа/