

6  
B-55  
745



Т.Вишки, И.М.Граменицкий, Э.Корбел, А.А.Номофилов,  
М.И.Подгорецкий, Л.Роб, В.Н.Стрельцов, Д.Тувдэндорж,  
М.С.Хвастунов

P-745

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
ПРОТОНОВ С НУКЛОНАМИ  
ПРИ ЭНЕРГИИ 9 БЭВ

*ЖЭТФ, 1961, т.41, в.4, с. 1069-1075.*

Дубна 1961 год

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Т.Вишки, И.М.Граменицкий, З.Корбел, А.А.Номофилов,  
М.И.Подгорецкий, Л.Роб, В.Н.Стрельцов, Д.Тувдэндорж,  
М.С.Хвастунов

P-745

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
ПРОТОНОВ С НУКЛОНАМИ  
ПРИ ЭНЕРГИИ 9 БЭВ<sup>х)</sup>

Направлено в ЖЭТФ

---

х) Некоторые результаты этой работы изложены в докладе  
В.И.Векслера на 10-й международной конференции по физике высоких  
энергий в Рочестере в 1960 г. /17/.

Объединенный инстит  
ядерных иссле  
БИБЛИОТЕКА

1127/2 мр.

### А н н о т а ц и я

Рассмотрен вопрос о зависимости от множественности угловых и энергетических характеристик вторичных частиц, образующихся в результате столкновений протонов с нуклонами при энергии 9 Бэв. Проведено сравнение с результатами расчетов, выполненных по одномезонной схеме.

*The problem has been treated of the dependence of angular and energy characteristics, on the multiplicity of secondary particles produced in proton-nucleon collisions at an energy of 9 BeV. The comparison with the results of the calculations performed by the one-meson scheme has been made.*

В работах <sup>1/</sup> и <sup>2/</sup> (см. также <sup>3/</sup>) были описаны общие свойства взаимодействий протон-нуклон ( $p-N$  - взаимодействия) при энергии 9 Бэв. Остались, однако, невыясненными важные детали, касающиеся зависимости угловых и энергетических характеристик от множественности и асимметрии углового распределения вторичных протонов в системе центра инерции (с.ц.и.) для  $p-N$  - взаимодействий. Цель настоящей работы состояла в изучении этих вопросов, а также в общем уточнении результатов, которого мы надеялись достичь путем увеличения статистики и улучшения методики (более жесткий отбор событий, увеличение точности измерения ионизации, измерения знаков заряда вторичных частиц).

В эмульсионной стопке, составленной из слоев эмульсии НИКФИ тип "Р", облученной внутренним пучком протонов с энергией 9 Бэв на синхрофазотроне ОИЯИ, проводился просмотр вдоль следов первичных протонов ускоренным методом, описанным в работе <sup>4/</sup>. Всего было просмотрено около 3 км следа и найдено около 8000 взаимодействий. Средний свободный пробег для взаимодействия оказался равным  $35,9 \pm 0,4$  см. Среди найденных взаимодействий выделялись случаи, удовлетворяющие критериям соударений протонов со свободными и квазисвободными нуклонами, использованным в работах <sup>1,2/</sup>. Всего было отобрано около 900 событий такого типа. Для того, чтобы получить наиболее чистый материал по взаимодействиям протон-нуклон, особое внимание обращалось на отсутствие сгустка в центре события, который мог быть вызван очень медленным ядром отдачи, либо медленным электроном. Поэтому для измерений было отобрано 425 "чистых" случаев, из них 251 - с четным числом вторичных заряженных лучей ( $p-p$ -взаимодействия) и 174 - с нечетным числом лучей ( $p-n$  - взаимодействия).

Идентификация быстрых вторичных частиц проводилась по измерению многократного рассеяния и плотности ионизации. Использовались кривые зависимости плотности ионизации от величины  $\rho\beta$  для  $\pi$ -мезонов и протонов, рассчитанные в работе <sup>5/</sup>. Эти кривые вместе с экспериментальными точками приведены на рис. 1. Кроме того определялся знак заряда вторичных частиц по отклонению в магнитном поле синхрофазотрона <sup>x)</sup>. С помощью процедуры, описанной в <sup>6/</sup>, определялась величина  $\chi_n = \frac{\theta_{изм}}{\theta_n \sqrt{t}}$ , где  $\theta_{изм}$  - фактическое изменение угла частицы на длине  $t$  и  $\theta_n$  - средний квадратичный угол многократного

<sup>x)</sup> Во время облучения стопка находилась в магнитном поле синхрофазотрона с напряженностью 12000 эрстед.

рассеяния на той же длине. При этом длина следов была не менее 8 см. Для проверки метода измерялась величина  $\tau_{\pm}$  на следах положительных частиц (частицы из двухлучевых событий в  $p$ - $p$ -взаимодействиях и частицы, идентифицированные как протоны по измерению ионизации и рассеяния). Из 90 положительных частиц в 14 случаях значение  $\tau_{\pm}$  было отрицательным, т.е. неправильное определение знака, вызванное влиянием многократного рассеяния, имело место в  $(16 \pm 4)\%$  случаев. Анализировались также трехлучевые события из  $p$ - $n$ -взаимодействий. В этом случае отношение числа положительных к числу отрицательных частиц должно быть 2:1. Фактически наблюдалось 57 частиц, имеющих положительное значение  $\tau_{\pm}$  и 28 - отрицательное значение  $\tau_{\pm}$ , т.е. отношение числа положительных частиц к числу отрицательных равно  $2,0 \pm 0,47$ .

На основании проверки можно сделать вывод, что определение знака заряда частицы при длине следа более 8 см является правильным в  $(80-85)\%$  случаев.

Измерения и идентификация быстрых частиц проводились из следов, имеющих угол  $\gamma$  с плоскостью эмульсии меньший или равный  $5^{\circ}$ . Поэтому для получения угловых и импульсных распределений и средних значений различных величин были введены геометрические поправки, учитывающие число частиц, имеющих при данном пространственном угле  $\theta$ , угол  $\gamma$  больший  $5^{\circ}$ . При вычислении статистических ошибок в этих условиях использовались результаты работы <sup>/7/</sup>.

Как уже отмечалось в работе <sup>/2/</sup>, непосредственная идентификация по ионизации и рассеянию для частиц, имеющих значения  $pA$  в интервале  $(1,5-2,5)B\bar{v}/c$  (область "пересечения"  $\pi$ -мезонной и протонной кривых), практически невозможна. Там же были приведены некоторые косвенные аргументы в пользу того, что большая часть частиц, попавших в эту область, является  $\pi$ -мезонами. В дополнение к изложенному можно привести также следующее соображение. Естественно считать, что отношение полного числа  $\pi$ -мезонов к числу заряженных в  $p$ - $p$ -взаимодействиях должно быть близко к 1,5. Это отношение, вычисленное из значения коэффициента неупругости в предположении, что все частицы в области "пересечения" - протоны, оказалось равным  $2,41 \pm 0,35$ . Таким образом, предположение о том, что все частицы в области "пересечения" являются протонами следует считать исключенным.

Для того, чтобы оценить долю протонов среди этих частиц, можно воспользоваться результатами непосредственной идентификации вторичных положительных

частиц в интервале импульсов (2,3-2,9) Бэв, полученными с помощью электроники при изучении взаимодействий протонов с энергий 9 Бэв с ядрами бериллия. Было показано, что среди вторичных частиц указанного импульса, вылетающих под углом  $0^\circ - 2^\circ$ , отношение числа протонов к числу  $\pi^+$ -мезонов равно  $\sim 1^x$ ). Если считать, что это справедливо во всей области "пересечения", то для р-р-взаимодействий получается отношение  $n_{\pi^+}/n_{p^+} = 1,40 \pm 0,23^{xx}$ ). Следует отметить, что ряд других характеристик р-р-взаимодействия, в частности, естественное требование симметрии угловых распределений  $\pi^-$ -мезонов и протонов в с.ц.и. также не противоречит сделанному предположению, которое в дальнейшем используется нами при обработке всех экспериментальных результатов.

При анализе р-р-взаимодействий большой интерес представляет сравнение различных характеристик вторичных частиц при разной множественности. В таблице 1 приведены средние значения импульса в с.ц.и. и поперечного импульса протонов и  $\pi^-$ -мезонов из р-р-взаимодействий.

Т а б л и ц а 1

Множественность	Протоны		$\pi^-$ -мезоны	
	$P_c$ (Мэв/с)	$P_\perp$ (Мэв/с)	$P_c$ (Мэв/с)	$P_\perp$ (Мэв/с)
2	$1280 \pm 80$	$368 \pm 36$	$662 \pm 78$	$414 \pm 72$
4	$1010 \pm 50$	$439 \pm 37$	$393 \pm 30$	$260 \pm 28$
6-8	$920 \pm 70$	$549 \pm 71$	$442 \pm 43$	$365 \pm 45$

Из данных, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод о сравнительно слабой зависимости средних характеристик от числа заряженных частиц  $^{xxx)}$ .

x) Авторы благодарят М.Ф.Лихачева, В.С.Ставинского, Цой Юйнь-чэня и Чжан Най-сяня, сообщивших приведенные результаты.

xx) При вычислении все отрицательные частицы из области "пересечения" считались  $\pi^-$ -мезонами, каждая положительная частица считалась с весом 1/2 протон и с весом 1/2  $\pi^+$ -мезоном.

xxx) Коэффициент неупругости и доля энергии, теряемая протоном в л.с. на образование  $\pi^-$ -мезонов, для всех р-р-взаимодействий равны  $0,56 \pm 0,08$  и  $0,40 \pm 0,05$ . Эти данные совпадают в пределах ошибок с результатами работы /2/.

Угловое распределение протонов в с.п.и. для  $p$ - $p$ -взаимодействий (рис.2), резко анизотропное для малой множественности, при переходе к  $n = 6-8$  становится близким к изотропному.

На рис. 3 приведены суммарные угловые распределения протонов и  $\pi$ -мезонов в с.п.и. для  $p$ - $p$ -взаимодействий. Из графиков видно, что угловое распределение  $\pi$ -мезонов значительно шире.

Используя данные, приведенные в таблице 1, легко подсчитать полное число мезонов в зависимости от множественности. В таблице 11 приведены результаты такого расчета вместе с данными о числе протонов на одно взаимодействие.

Т а б л и ц а 11

Множественность	2	4	6-8
Полное число мезонов	$2,0 \pm 0,26$	$4,16 \pm 0,34$	$4,12 \pm 0,44$
Число заряженных мезонов	$0,96 \pm 0,16$	$2,72 \pm 0,18$	$5,04 \pm 0,26$
Число нейтральных мезонов	$1,04 \pm 0,30$	$1,44 \pm 0,38$	-
Число протонов	$1,04 \pm 0,18$	$1,28 \pm 0,18$	$1,32 \pm 0,26$

Можно видеть, что полное число мезонов несколько увеличивается с увеличением числа заряженных частиц. При большой множественности ( $n = 6-8$ ) нейтральные мезоны практически отсутствуют.

Суммарно для всех  $p$ - $p$ -взаимодействий среднее число протонов,  $\pi^+$ -мезонов и  $\pi^0$ -мезонов равно  $1,18 \pm 0,10$ ,  $2,24 \pm 0,14$ ,  $0,90 \pm 0,30$ , соответственно.

Аналогичный анализ был проведен для  $p$ - $n$ -взаимодействий.

В таблице 111 приведены средние значения импульса в с.п.и. и поперечного импульса при разной множественности.

Т а б л и ц а 111

Множественность	Протоны		$\pi$ - мезоны	
	$P_C$ (Мэв/с)	$P_A$ (Мэв/с)	$P_C$ (Мэв/с)	$P_A$ (Мэв/с)
3	1010 $\pm$ 40	355 $\pm$ 43	428 $\pm$ 39	252 $\pm$ 33
5	918 $\pm$ 70	441 $\pm$ 45	437 $\pm$ 41	291 $\pm$ 39
7 - 9	813 $\pm$ 80	543 $\pm$ 75	420 $\pm$ 90	228 $\pm$ 25

Так же, как и в случае  $p$ - $p$ -взаимодействий, зависимость средних характеристик вторичных частиц от множественности сравнительно слабая. Средние числа протонов, заряженных и нейтральных  $\pi$ -мезонов на одно  $p$ - $n$ -взаимодействие, равны  $1,11 \pm 0,10$ ,  $2,82 \pm 0,21$  и  $1,61 \pm 0,49$ , соответственно<sup>х)</sup>.

Угловое распределение протонов в с.п.и., приведенное на рис. 4, асимметрично, в согласии с результатами прежних работ<sup>/1,2,3/</sup> (см. также<sup>/9,10/</sup>),

Как было показано в работе<sup>/12/</sup>, для  $p$ - $n$ -взаимодействий угловое распределение заряженных  $\pi$ -мезонов должно быть симметрично в с.п.и. Наблюдаемое угловое распределение  $\pi$ -мезонов (рис.4) не противоречит этому утверждению: разность в числе  $\pi$ -мезонов, летящих в переднюю и заднюю полусферы, равна  $73 \pm 50$ .

Проведенный анализ показывает, что  $p$ - $N$ -взаимодействия обладают следующими характерными особенностями:

- 1) В  $p$ - $N$ -взаимодействиях на образование  $\pi$ -мезонов в среднем идет сравнительно малая доля первичной энергии протона ( $\sim 40\%$ ).
- 2) Угловое распределение протонов в  $p$ - $p$ -взаимодействиях резко анизотропно в с.п.и., причем степень анизотропии уменьшается с увеличением множественности.
- 3) Угловое распределение  $\pi$ -мезонов в с.п.и. значительно шире, чем для протонов.

<sup>х)</sup> Следует отметить, что приведенные числа относятся только к случаям  $p$ - $n$ -взаимодействий с числом вторичных лучей  $n > 1$ . Для всех  $p$ - $n$ -взаимодействий среднее число протонов на 1 акт должно быть равно 1 (см. /8/). При нашей выборке среднее число протонов должно быть несколько больше единицы.



4) Средние характеристики вторичных частиц ( $\bar{A}, \bar{Z}, \bar{N}_p, \bar{N}_n$ ) сравнительно слабо меняются с изменением множественности.

5) В угловом распределении протонов для  $p-N$  - взаимодействий наблюдается заметная асимметрия.

В настоящее время не существует сколько-нибудь последовательной теории, которая могла бы дать полную картину  $p-N$  - взаимодействия. Статистическая теория множественного образования частиц хорошо описывает только некоторые характеристики взаимодействия, например, распределение по множественности, (см. /12/, /13/). С другой стороны, угловые распределения вторичных частиц не могут быть объяснены в рамках статистической теории. Существенно, что статистическая теория в принципе не рассматривает вопрос о структуре взаимодействующих частиц, в то время как даже самые грубые модельные представления способны привести к довольно интересным выводам. Если, например, считать, что нуклон состоит из "мезонного облака", окружающего центральный "кern" /14/, то следует ожидать наличия двух типов соударений - "центральных" и "периферических". Это разделение имеет, конечно, условный характер. Естественно ожидать, что при переходе от малой множественности к большой относительная роль "центральных" столкновений увеличивается. Это согласуется с экспериментальными данными, свидетельствующими о некотором изменении импульсных и угловых характеристик вторичных нуклонов (см. таблицы I и III и рис. 2). С другой стороны, известно, что число заряженных вторичных частиц не является достаточно чувствительным параметром для отделения "центральных" столкновения от "периферических" (см. /15/). Можно думать, что более подходящим критерием является величина потерь энергии. Если условно считать, что "чисто центральные" соударения характеризуются очень большими потерями энергии, то следует заключить, что число таких соударений невелико, ибо среди всех  $p-N$  - взаимодействий, имеющих два вторичных протона, лишь в  $\sim 8\%$  случаев оба протона в с.ц.и. были испущены в одну сторону.

"Периферическими" соударениями, по-видимому, естественно считать такие, в которых нуклон отдачи получает малую энергию. Для их описания можно попытаться использовать одномезонную схему в полюсном приближении /15/, /16/. Расчет показывает, что сечение неупругого  $p-N$  взаимодействия равно  $\sim 18 mb$ , т.е. составляет существенную часть от соответствующей экспериментальной вели-

чины, равной, по данным работ /17/ и /18/, примерно  $30 \text{ mb}$ . Поэтому представляет интерес провести сравнение экспериментальных данных, относящихся ко всему статистическому материалу, с расчетными. На рис. 5 приведены экспериментальное и теоретическое распределения поперечных импульсов протонов для  $p$ - $p$ -взаимодействий, а на рис. 3 и рис. 6 – угловое распределение  $\pi$ -мезонов в с.ц.и. и энергетическое распределение нуклонов отдачи в л.системе. В таблице 1У приведены теоретические и экспериментальные распределения по числу заряженных частиц для  $p$ - $p$  и  $p$ - $n$ -взаимодействий.

Т а б л и ц а 1У

p-p-взаимодействия

$n$	2	4	6	8	$\bar{n}_{pp}$
Эксп.	$44,8 \pm 4,2$	$42,2 \pm 4,1$	$10,6 \pm 2,1$	$2,4 \pm 0,6$	$3,42 \pm 0,10$
Теор.	35	58	6,0	0,1	3,46

p-n-взаимодействий

$n$	1	3	5	7	9	$\bar{n}_{pn}$
Эксп.	$29,9 \pm 4,2$	$46,0 \pm 5,1$	$16,1 \pm 3,1$	$7,5 \pm 2,1$	$0,6 \pm 0,6$	$3,06 \pm 0,14$
Теор.	18,4	65,2	15,7	0,7	-	2,96

Для  $p$ - $n$  взаимодействий была вычислена величина  $\Delta = \frac{n_{\Delta n} - n_{\Delta n-1}}{N}$  (где  $N$  – число взаимодействий), характеризующая степень асимметрии углового распределения в с.ц.и. В таблице У приведены значения  $\Delta$  для разной множественности<sup>х)</sup>.

Т а б л и ц а У

$n$	1	3	5	7 - 9
$\Delta$ эксп.	-	$+0,55 \pm 0,09$	$0,0 \pm 0,21$	$-0,64 \pm 0,64$
$\Delta$ теор.	+0,43	+0,61	-0,03	-0,68

<sup>х)</sup> Экспериментальное значение  $\Delta$  для случаев  $n = 1$  не приводится, так как при  $n = 1$  рассматривались случаи, имеющие  $\theta_{\Delta} \geq 5^\circ$ .

Сравнение экспериментальных данных с расчетами, выполненными по одномезонной схеме, указывает на их качественное согласие. Количественного согласия ожидать трудно, поскольку кроме одномезонных взаимодействий существенную роль могут играть более сложные схемы.

Авторы благодарят В.И.Векслера, И.М.Дремина, Д.С.Чернавского за ценные обсуждения, коллектив синхрофазотрона за помощь при облучении эмульсии, группу химической обработки, проводившую проявление стопки. Авторы особенно благодарны коллективу лаборантов, который провел трудоемкую работу по просмотру и измерениям.

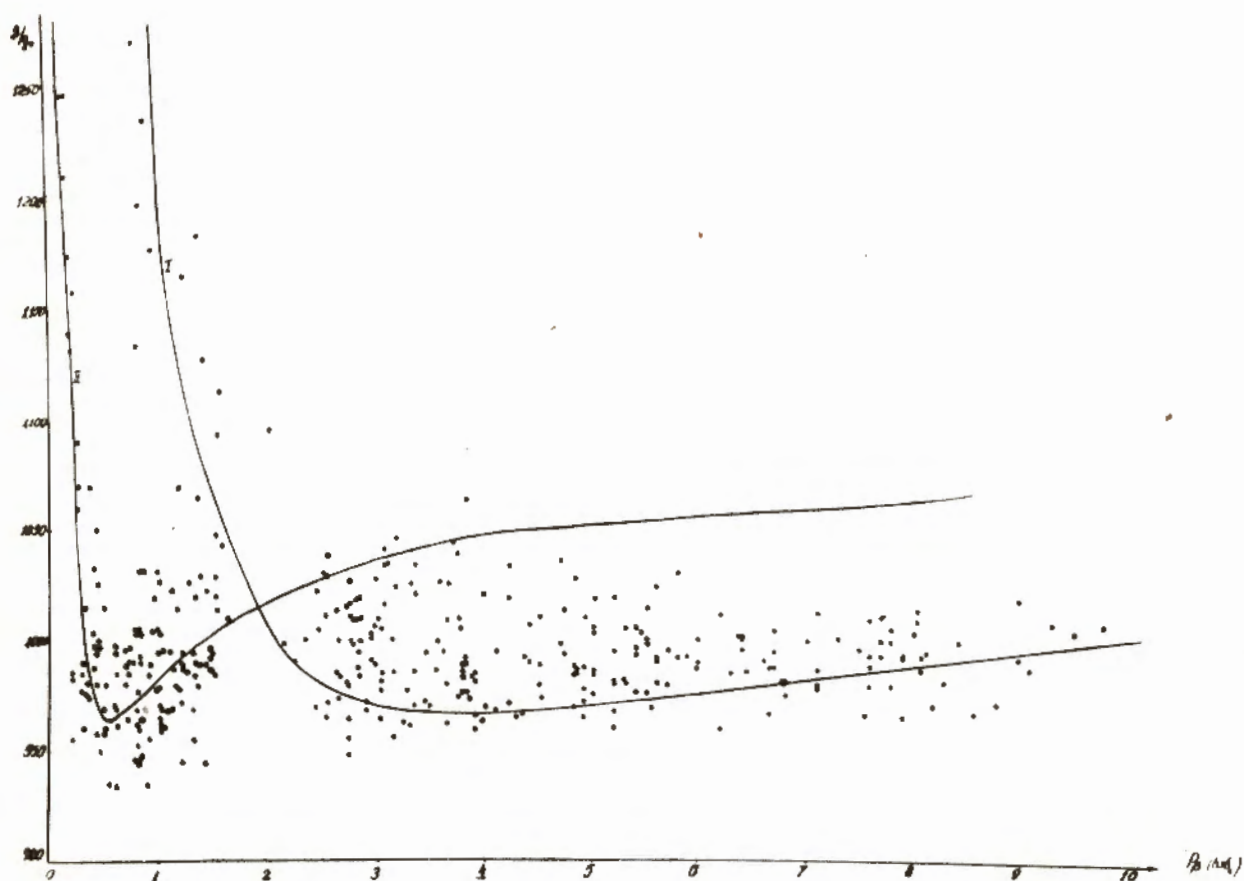


Рис. 1. Зависимость относительной плотности сгустков  $g/g$  от величины  $\rho\rho$

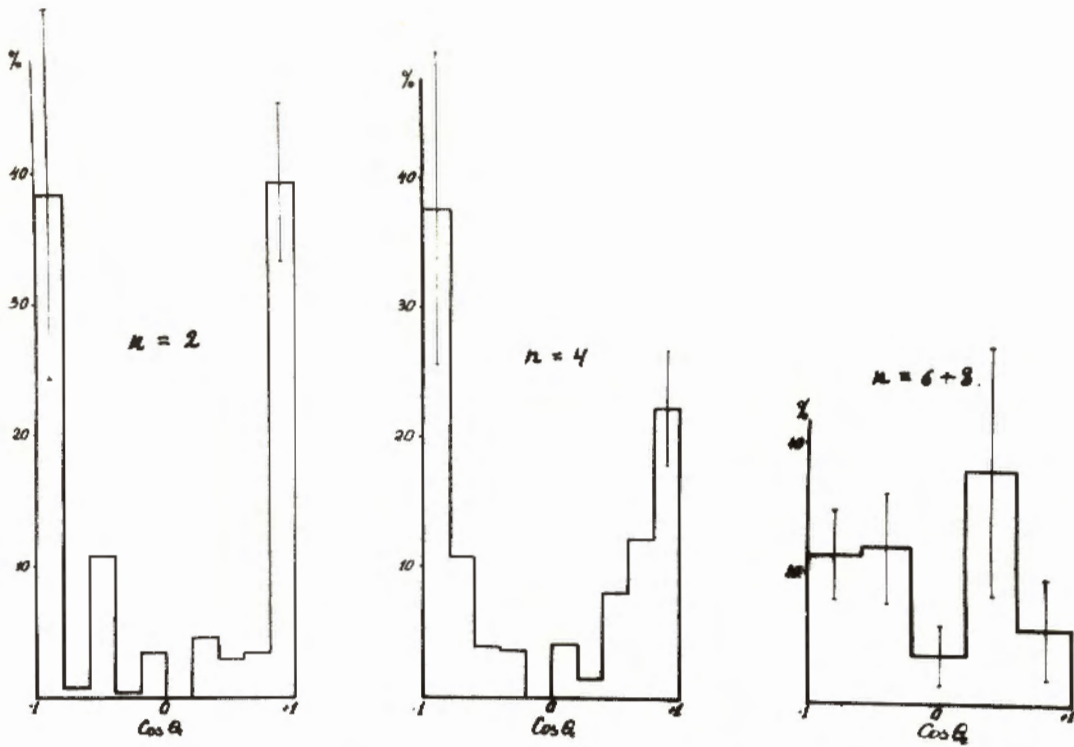


Рис. 2. Угловое распределение протонов в с.ц.и. для разной множественности в р-р-взаимодействиях.

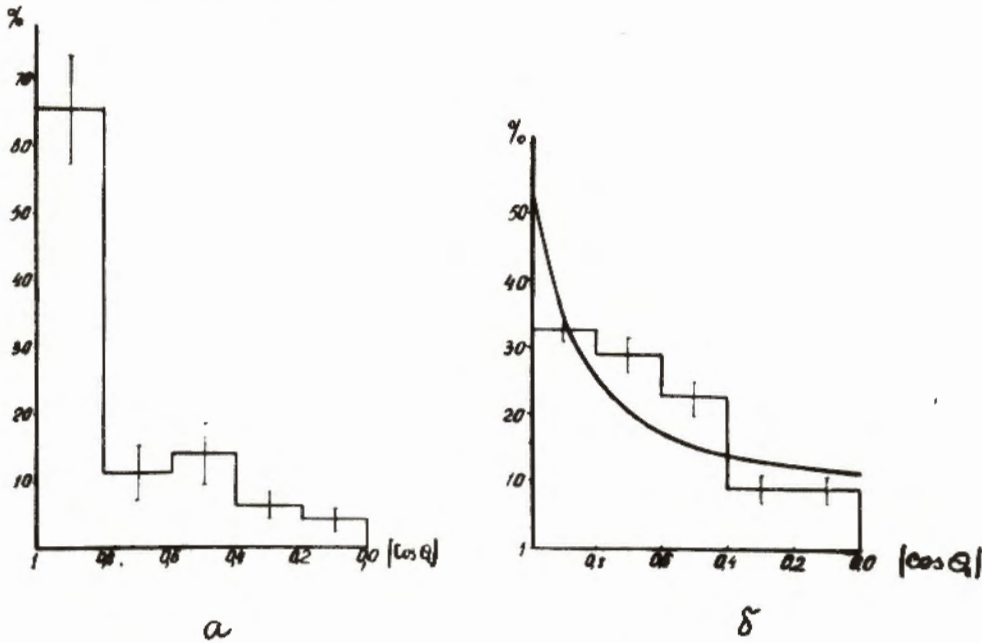


Рис. 3. Угловое распределение протонов ( а ) и  $\pi$ -мезонов ( б ) в с.ц.и. из р-р-взаимодействий. Плавная кривая на рис. ( б ) - результат расчета по одномезонной схеме.

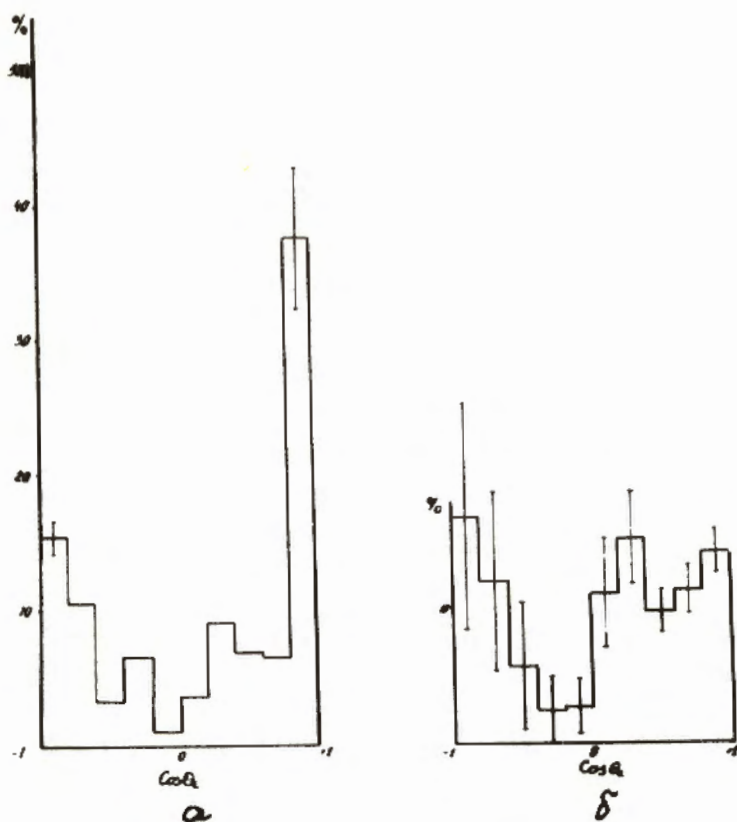


Рис. 4. Угловое распределение протонов (а) и  $\pi$ -мезонов (б) в с.ц.м. из  $p$ - $p$ -взаимодействий.

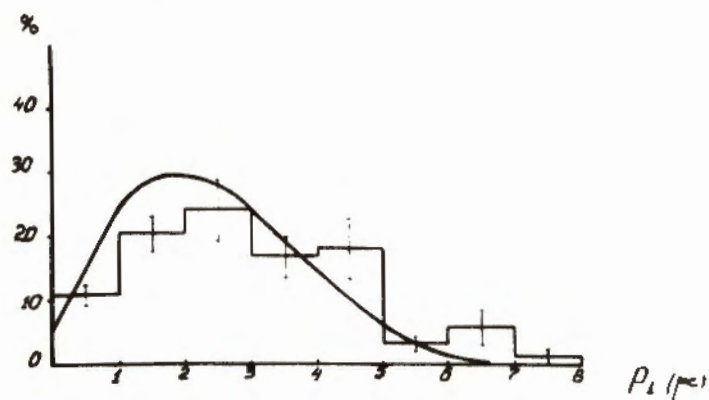


Рис. 5. Распределение поперечных импульсов протонов из  $p$ - $p$ -взаимодействий. Плавная кривая - результат расчета по одномезонной схеме.

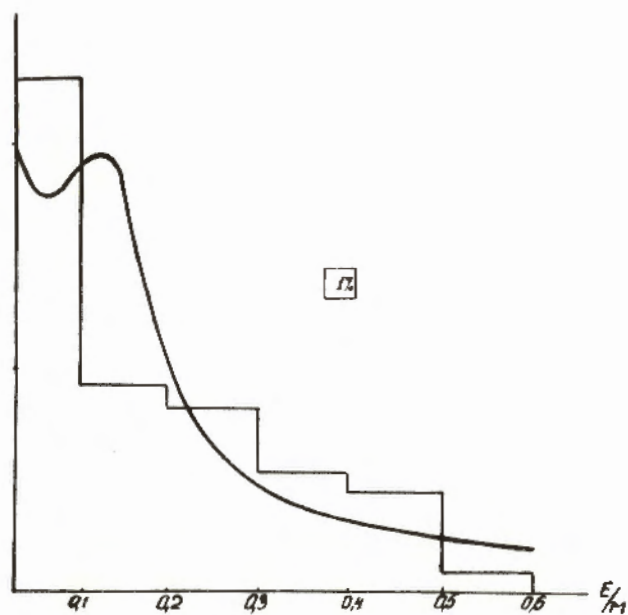


Рис. 6. Энергетическое распределение нуклонов отдачи из  $r$ - $r$ -взаимодействий.  
Плавная кривая - результат расчета по одномезонной схеме.

Л и т е р а т у р а

1. Н.П.Богачев, С.А.Бунятов, И.М.Граменицкий, В.Б.Любимов, Ю.П.Мерехов, М.И.Подгорецкий, В.М.Сидоров, Д.Гувлэндорж. ЖЭТФ, 37, 1225 (1959).
2. Ван Шу-фень, Т.Вишки, И.М.Граменицкий, В.Г.Гришин, Н.Далхажав, Р.М.Лебедев, А.А.Номофилов, М.И.Подгорецкий, В.Н.Стрельцов. ЖЭТФ, 39, 957 (1960).
3. Н.П.Богачев, С.А.Бунятов, Ю.П.Мерехов, В.Н.Сидоров, В.А.Ярба. ЖЭТФ, 38, 1348 (1960).
4. Б.П.Банник, М.И.Подгорецкий. ПТЭ, 3, 36 (1960).
5. W.H.Vatkas, D.M.Young. UCRL- 2579 (1954).
6. И.М.Граменицкий, З.Корбел, Л.Роб. ПТЭ № 1, 42 (1961).
7. Т.Вишки, И.М.Граменицкий, М.И.Подгорецкий. Препринт ОИЯИ Р-636 (1960).
8. М.С.Хвастунов. Препринт ОИЯИ (в печати).
9. W.B.Fowler, R.P.Shutt, A.M.Thorndike, W.L.Whittemore, J.D.Garrison, T.W.Morris. Phys.Rev., 95, 1026 (1954).
10. F.N.Holmquist. UCRL - 8559 (1958).
11. В.Г.Гришин, В.А.Никитин, М.И.Подгорецкий. Препринт ОИЯИ Р-480 (1960).
12. С.З.Беленький, В.М.Максименко, А.И.Никишов, И.Л.Розенталь. УФН, 62, 1 (1957).
13. В.С.Барашенков, В.А.Беляков, Э.Г.Бубелев, Ван Шу-фень, В.М.Мальцев, Тен Гын, К.Д.Толстов. Nucl.Phys., 9, 74 (1958).
14. Д.И.Блохинцев. CERN Symposium, 2, 155 (1956).
15. И.М.Граменицкий, И.М.Дремин, В.М.Максименко, Д.С.Чернавский. Препринт ФИАН А-25 (1960). ЖЭТФ (в печати).
16. И.М.Дремин, Д.С.Чернавский. ЖЭТФ, 38, 229 (1960).
17. В.И.Векслер. Proc. Ann. Conf. High Energy Phys. Roch. p. 91 (1960).
18. A.Achmore, G.Cocconi, A.N.Diddens, A.M.Wetherell. Phys.Rev.Lett., 5, 576 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 мая 1961 года.