

С 346.48

Б-219

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2461



Э.Баля, О.Баля, В.А.Беляков, Е.Н.Кладницкая,  
Е.С.Кузнецова, И.Курелару, А.Михул, М.Сабэу

НЕУПРУГИЕ  $\pi^-$ р ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ЭНЕРГИИ 7,5 ГЭВ

Часть 1.

События с медленным протоном

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1965

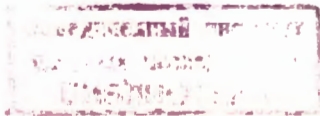
3827/2 48

Э.Баля, О.Баля, В.А.Беляков, Е.Н.Кладницкая,  
Е.С.Кузнецова, И.Курелару, А.Махул, М.Сабэу

НЕУПРУГИЕ  $\pi^-p$  ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ЭНЕРГИИ 7,5 ГЭВ

Часть 1.

События с медленным протоном



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

г. Дубна

В.А. Беляков, Е.Н. Кладницкая, И. Курелару, Е.С. Кузнецова

ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

Лаборатория высоких энергий

г. Бухарест

Э. Баля, О. Баля, А. Михул, М. Сабэу

2481

НЕУПРУГИЕ  $n\bar{p}$  ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ЭНЕРГИИ 7,5 ГЭВ

Часть 1.

События с медленным протоном

### Отбор событий

В работе использовались снимки, полученные с помощью 24-х литровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ<sup>/1/</sup>, помещенной в магнитное поле 13,7 кэ. Было просмотрено около 18 000 фотографий. Изучались реакции  $\pi^- + p \rightarrow p + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0$ ,  $n = 0, 1, 2 \dots$  Для измерений отбирали события, в которых один из положительных следов имел повышенную ионизацию по сравнению с ионизацией на следе первичного  $\pi^-$ -мезона. Измерения проводились на обычных и полуавтоматических микроскопах<sup>/2/</sup>. Для анализа были отобраны события, удовлетворяющие следующим критериям:

- 1) Суммарный заряд вторичных частиц равен нулю.
- 2) В звезде отсутствуют "блоб" и короткие черные следы, характерные для расщепления ядра углерода.
- 3) Квадрат недостающей массы<sup>х)</sup> положителен в пределах однократной среднеквадратичной ошибки ( $\Delta M_x^2 = 0,2 \text{ Гэв}^2$ ).
- 4) Масса мишени меньше  $1,1 \text{ Гэв}^{\text{хх}}$ .
- 5) Событие произошло в эффективном объеме камеры.
- 6) Импульс протона в лаб. системе не больше  $700 \text{ Мэв/с}$ . Таких событий оказалось 145.

---

х) Величина недостающей массы определялась<sup>/3/</sup> как

$$M_x^2 = (E_0 - \sum E_i)^2 - (\vec{P}_0 - \sum \vec{P}_i)^2;$$

где  $E_0$ ,  $\vec{P}_0$  - полная энергия и импульс частиц до взаимодействия;  $E_i$ ,  $\vec{P}_i$  - полная энергия и импульс  $i$ -ой вторичной заряженной частицы. Для взаимодействий со свободным протоном величина  $M_x^2$  всегда положительна.

хх) Масса мишени определялась по формуле:

$$M_t = \sum (E_i - P_i \cos \theta_i)$$

где  $\theta_i$  - угол вылета вторичной частицы в л.с.

В выбранном эффективном объеме протоны с импульсом от  $150^{xx)}$  до 700 Мэв/с надежно идентифицировались по остановкам и ионизации, все другие заряженные частицы считались  $\pi^-$ -мезонами, так как вероятность образования К-мезонов мала  $^{14)}$ . Данные о  $\pi^0$ -мезонах получены по  $\gamma$ -квантам, конвертировавшим на  $e^+e^-$  пары в рабочем объеме камеры.

### Экспериментальные результаты

Одной из характерных особенностей периферических взаимодействий является малость величины четырехмерного импульса  $\Delta$ , переданного барionу, поэтому отбирались события с медленным протоном. Для них оценено сечение, которое оказалось равным  $1,4 \pm 0,1$  мб. Распределение по импульсу протонов в лаб. системе показано на рис. 1<sup>xx)</sup>. Оно имеет максимум в области 0,2-0,5 Гэв/с. Для исследуемого класса периферических взаимодействий изучались импульсные и угловые распределения протонов и  $\pi^-$ -мезонов в с.д.м.  $\pi^-p$ . Импульсные распределения показаны на рис. 2. Подавляющее большинство протонов (85%) имеет импульс более 1 Гэв/с,  $\bar{P}_p^* = 1,33 \pm 0,02$  Гэв/с. Заряженные  $\pi^-$ -мезоны имеют в основном импульсы до 1 Гэв/с, причем спектр  $\pi^-$ -мезонов более жесткий. Это нашло свое отражение и в средних значениях импульсов  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов:

$$\bar{P}_{\pi^-}^* = 0,57 \pm 0,02 \text{ Гэв/с}$$

$$\bar{P}_{\pi^+}^* = 0,48 \pm 0,02 \text{ Гэв/с}.$$

Угловые распределения протонов,  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов показаны на рис. 3. Можно видеть, что почти половина протонов вылетает под углом меньше  $8^\circ$  к направлению движения протона до взаимодействия с  $\pi^-$ -мезоном, т.е. протон сохраняет направление своего движения. Обрезание углового распределения ( $\cos \theta_p^* < -0,9$ ) обусловлено критериями отбора периферических взаимодействий. Угловое распределение  $\pi^-$ -мезонов резко асимметрично с преимущественным вылетом  $\pi^-$ -мезонов в переднюю полусферу  $\frac{n_{\pi^-}}{n_{\pi^+}} = 3,71 \pm 0,46$ . Угловое распределение  $\pi^-$ -мезонов можно представить себе как суперпозицию углового распределения первичных  $\pi^-$ -мезонов, сохраняющих направление своего движения, и углового распределения  $\pi^-$ -мезонов, рождающихся в реакции, которое может быть близко к изотропному. Угловое распределение  $\pi^+$ -мезонов менее асимметрично  $\frac{n_{\pi^+}}{n_{\pi^-}} = 2,52 \pm 0,38$ , и в нем нет резкого пика при малых углах вылета  $\pi^+$ -мезонов.

x) Протоны с импульсом меньше 150 Мэв/с в пропановой камере не видны.

xx) Пунктирной линией везде отмечены распределения для событий с  $M_x^2 > 0$ .

На рис. 4-6 представлены двумерные распределения частиц по поперечному ( $P^\perp$ ) и по продольному ( $P^{*||}$ ) импульсам в с.д.м.  $\pi^-p$ . Поперечные импульсы протонов и  $\pi^-$ -мезонов малы и для большинства частиц не превышают 600 Мэв/с, т.е. гораздо меньше поперечных импульсов, допустимых фазовым объемом.

Средние значения поперечных импульсов  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов совпадают между собой. Средний поперечный импульс протонов меньше  $P^\perp$  для  $\pi^-$ -мезонов:

$$\overline{P_p^\perp} = 0,244 \pm 0,014 \text{ Гэв/с}; \quad \overline{P_{\pi^-}^\perp} = 0,311 \pm 0,012 \text{ Гэв/с},$$

$$\overline{P_{\pi^+}^\perp} = 0,286 \pm 0,016 \text{ Гэв/с}.$$

Распределения пионов по продольному импульсу в с.д.м. асимметричны: большая часть пионов имеет положительные значения  $P^{*||}$ . В сторону положительных значений  $P^{*||}$  распределения простираются вплоть до максимальных величин  $P^{*||}$ , в то время как со стороны отрицательных значений  $P^{*||}$  распределения обрываются при  $P^{*||} = -0,6$  Гэв/с.

Это означает, что в переднюю полусферу в с.д.м. вылетают более быстрые пионы, чем в заднюю. Из рис. 5-6 видно, что имеет место корреляция между  $P^\perp$  и  $P^{*||}$  для пионов: поперечные импульсы в среднем меньше при малых продольных импульсах. Эта корреляция<sup>х)</sup> лучше видна на рис. 7, где отложены поперечные импульсы пионов, усредненные по интервалам продольных импульсов. Для получения примерно одинаковой относительной ошибки интервалы по  $P^{*||}$  подбирались так, чтобы в них попадало приблизительно равное число частиц.

Для той части  $\pi^-$ -мезонов и протонов, которые вылетают в с.д.м. назад, определено отношение средних продольных импульсов

$$\frac{\overline{P^{*||}(\pi^+)}}{\overline{P^{*||}(p)}} = \frac{-0,164 \pm 0,014 \text{ Гэв/с}}{-1,267 \pm 0,017 \text{ Гэв/с}} = 0,13 \pm 0,01 \approx \frac{m_\pi}{M_p}.$$

Оно оказалось равным отношению масс пиона и протона, т.е. продольные лоренц-факторы этих частиц в с.д.м. близки.

При просмотре событий с медленным протоном найдено 25 электрон-позитронных пар, принадлежащих этим событиям. После поправки на эффективность конверсии  $\gamma$ -квантов получено 275  $e^+e^-$ -пар<sup>хх)</sup>. При сравнении экспериментального спектра

х) Для  $\pi^+$ -мезонов вероятность совпадения с прямой линией равна 0,04% и для  $\pi^-$ -мезонов - 0,02% (оценено по методу  $\chi^2$ ).

хх) Поправки определены по всем  $\gamma$ -квантам, сопровождавшим все 4-лучевые звезды.

$\gamma$  -квантов с импульсным спектром, рассчитанным по спектру  $\pi^0$  -мезонов в предположении, что  $P_{\pi^0} = \frac{P_{\pi^+} + P_{\pi^-}}{2}$ , обнаружен недостаток  $\gamma$  -квантов в интервале до 50 Мэв/с. С поправкой на потерянные медленные  $\gamma$  -кванты число  $e^+e^-$  пар стало равным 353. Среднее число  $\pi^0$  -мезонов на одно периферическое взаимодействие равно

$$\bar{n}_{\pi^0} = 1,2 \pm 0,2 .$$

Среднее число  $\pi^0$  -мезонов определялось также по среднему недостающему продольному импульсу<sup>5/</sup> в лаб. системе, в предположении, что недостающей частицей является  $\pi^0$  -мезон. Для этого были вычислены средние продольные импульсы заряженных частиц. Они оказались равными:

$$\bar{P}_p^{\Pi} = 0,287 \pm 0,017 \text{ Гэв/с}; \quad \bar{P}_{\pi^+}^{\Pi} = 1,411 \pm 0,147 \text{ Гэв/с};$$

$$\bar{P}_{\pi^-}^{\Pi} = 1,862 \pm 0,123 \text{ Гэв/с}.$$

Если предположить, что средний продольный импульс  $\pi^0$  -мезонов равен полусумме средних продольных импульсов заряженных  $\pi$  -мезонов, а именно  $\bar{P}_{\pi^0}^{\Pi} = 1,636 \pm 0,2 \text{ Гэв/с}$ , то  $\bar{n}_{\pi^0} = 1,3 \pm 0,4$ , что согласуется с числом  $\pi^0$  -мезонов, определенным по числу  $\gamma$  -квантов.

Таким образом, предположение о величине среднего продольного импульса  $\pi^0$  -мезонов оказывается оправданным. При изучении образования резонансных состояний в периферических взаимодействиях были построены распределения по эффективным массам для заряженных частиц.

Распределения по эффективным массам систем протон-пион приведены на рис. 8. В распределении  $M_{p\pi^+}$  имеется пик в интервале 1,1 - 1,3 Гэв, который соответствует нуклонной изобаре  $N^*$  (1238). В качестве фонового распределения взято распределение по  $M_{p\pi^-}$ , поскольку в нем нет узкого пика в этом интервале. Распределение по  $M_{p\pi^-}$  нормировалось на распределение по  $M_{p\pi^+}$  по области  $M_{p\pi^+} > 1,4 \text{ Гэв}$ . Из сравнения распределений по  $M_{p\pi^+}$  и  $M_{p\pi^-}$  можно заключить, что события с образованием  $N^*$  (1238) составляют не менее 13% от изучаемых нами периферических взаимодействий.

В распределении по  $M_{\pi^+\pi^-}$  (рис. 9) не обнаружено пиков, соответствующих известным двухпионным резонансам. Не обнаружено статистически обеспеченных пиков и в распределениях по  $M_{\pi^+\pi^+}$ ,  $M_{\pi^+\pi^-\pi^-}$ ,  $M_{p\pi^+\pi^-}$ ,  $M_{p\pi^-\pi^-}$ .

Распределение по  $M_{p\pi^+\pi^-\pi^-}$  (рис. 10) показывает, что  $\pi^0$  -мезоны уносят значительную долю энергии в с.п.м. реакции, и, таким образом, играют существенную роль в процессе мезообразования<sup>х)</sup>.

х) Оценки показывают, что  $\pi^0$  -мезоны образуются в 70% событий.

## Обсуждение результатов

1. Импульсные и угловые распределения вторичных протонов в изучаемой группе событий свидетельствуют о том, что протоны мало изменяют импульс и направление своего движения до взаимодействия в с.ц.м.

Больше половины  $\pi^-$ -мезонов также имеют тенденцию к сохранению направления своего движения до взаимодействия в с.ц.м.

2. Для всех вторичных частиц характерна малая величина поперечного импульса. Средний поперечный импульс протонов несколько меньше средних поперечных импульсов пионов. Это говорит о том, что протоны в рассматриваемом типе взаимодействий возбуждаются слабо.

3. Корреляция между поперечным и продольным импульсами пионов в с.ц.м. и корреляция продольных импульсов протонов и пионов, летящих назад в с.ц.м., могут служить указанием на определенный механизм взаимодействия  $\pi^-$ -мезонов с протонами, в частности, на образование частиц через два промежуточных состояния<sup>х)</sup>. Отметим, что корреляция продольных и поперечных импульсов частиц обсуждалась ранее в связи с таким же механизмом множественного образования пионов в работе<sup>/8/</sup>, а также в работе<sup>/7/</sup>.

4. Мы применили кинематические критерии, вытекающие из модели периферических взаимодействий (диаграммы 1-3, рис. 11), для обнаружения нуклонных ( $p\pi^+$ ) и мезонных ( $\pi^+\pi^-$ ) резонансных состояний в группах частиц, соответствующих нижней и верхней вершинам.

Для событий, в которых  $\pi^+$ -мезон летит назад в с.ц.м., построено распределение по  $M_{p\pi^+}$  (рис. 12). Это распределение указывает на образование нуклонной изобары  $N^*$  (1238). Доля событий с  $M_{p\pi^+}$  в интервале 1,1-1,3 Гэв составляет 21% всех событий. Вклад фоновых значений масс  $M_{p\pi^+}$  невелик.

Были отобраны события, в которых  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезоны вылетают вперед в с.ц.м., и построено для них распределение по  $M_{\pi^+\pi^-}$ . Пиков, соответствующих  $\rho^0$ - и  $f^0$ -мезонам, не обнаружено.

5. Сравнение экспериментальных данных для двух<sup>/8/</sup> и четырехлучевых звезд при одной энергии первичного пучка показывает, что доля периферических взаимодействий уменьшается с увеличением числа заряженных частиц в звезде. Так, в четырехлучевых событиях группа событий с  $P_p < 700$  Мэв/с составляет 17%, а в двухлучевых - 40%. Периферический характер взаимодействий в событиях с  $n_s = 4$  выражен менее резко: слабее выражена асимметрия угловых распределений, менее жесткие импульсные спектры частиц в с.ц.м. (см. таблицу 1).

х) На этот факт наше внимание обратил Э.Г. Бубелев.



6. Сравнение экспериментальных данных для четырехлучевых событий при разных энергиях налетающего  $\pi^-$ -мезона <sup>/3,9/</sup> показывает, что с увеличением импульса первичных  $\pi^-$ -мезонов возрастает асимметрия угловых распределений  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов, импульсные спектры вторичных частиц становятся более жесткими. Средние значения импульсов и коэффициентов асимметрии для протонов и  $\pi^-$ -мезонов приведены в таблице II.

Для получения более детального представления о механизме образования мезонов в изучавшейся реакции нужно привлекать информацию о  $\pi^0$ -мезонах.

В заключение авторы выражают благодарность В.И.Векслеру, Х.Хулубею, М.И.Подгорецкому и Э.Г.Бубелеву за обсуждения и ценные замечания; М.И.Соловьеву, В.Н.Пеневу, Н.М.Вирысову за помощь в работе и обсуждения, сотрудникам Вычислительного центра - Е.П.Жидкову, Н.Н.Говоруноу, Н.Ф.Марковой, Г.И.Тентюковой за составление и обсуждение ряда программ для электронно-счетной машины, группе лаборантов за просмотр и измерения событий.

Т а б л и ц а 1

$n_s$	$\frac{\pi^+}{\pi^-}$	$\pi^-$	$\overline{P^*}$
			(Гэв/с)
	$\pi^-$		p
2	$8,7 \pm 1,0$	$0,93 \pm 0,03$	$1,44 \pm 0,02$
4	$3,71 \pm 0,46$	$0,57 \pm 0,02$	$1,33 \pm 0,02$

Таблица II

	6,1 Гэв/с /8/				6,8 Гэв/с /3/				7,5 Гэв/с				18,1 Гэв/с /8/			
	$\overline{p^*}$	$\overline{p^\perp}$	$\overline{p^{*  }}$	$\frac{\overline{\eta}}{\overline{n}}$	$\overline{p^*}$	$\overline{p^\perp}$	$\overline{p^{*  }}$	$\frac{\overline{\eta}}{\overline{n}}$	$\overline{p^*}$	$\overline{p^\perp}$	$\overline{p^{*  }}$	$\frac{\overline{\eta}}{\overline{n}}$	$\overline{p^*}$	$\overline{p^\perp}$	$\overline{p^{*  }}$	$\frac{\overline{\eta}}{\overline{n}}$
$p$									1330 $\pm$ 16	+244 $\pm$ 14	-1287 $\pm$ 16					
$\pi^-$	567 $\pm$ 35	301 $\pm$ 19		2,05 $\pm$ 0,42		360 $\pm$ 40		3,48 $\pm$ 0,88	561 $\pm$ 18	311 $\pm$ 12	333 $\pm$ 17	3,71 $\pm$ 0,48	958 $\pm$ 78	375 $\pm$ 28		4,55 $\pm$ 1,18
$\pi^+$	454 $\pm$ 43	271	127 $\pm$ +58	1,19 $\pm$ 0,32					458 $\pm$ 23	286 $\pm$ 18	242 $\pm$ 30	2,52 $\pm$ 0,38	779 $\pm$ 85	348	380 $\pm$ 113	2,84 $\pm$ 0,83

## 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. В.А.Алмазов, И.А.Голутвин, В.Д.Иякин и др. Препринт ОИЯИ 1352, Дубна 1963.
3. Д.К.Копылова, В.Б.Любимов, М.И.Подгорецкий, Х.Рузаев, З.Трка. ЖЭТФ т. 44, в. 5. 1963 .
4. В.С.Барашенков, И.Патера. Препринт ОИЯИ Р-1163, Дубна 1962.
5. N.Nulubei, C.Besliu, T.Besliu et al. Preprint JFA Bucharest he/ 50 1963
6. M.Bardadin, L.Michejda, S.Otwinowski, R.Sosnowski, Report no. 511/VI Warsaw 1964.
7. N.Biswas, J.Derado, N.Schmitz, W.Shepard. Phys. Rev., 134, B901 (1964).
8. C.Besliu. Report at the International Conference on High Energy Physics (Dubna, 1964).
9. G.Bellini, E.Florini, A.Herz, P.Negri, S.Ratti. Nuovo Cimento, vol. XXVII, 816 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 ноября 1965 г.

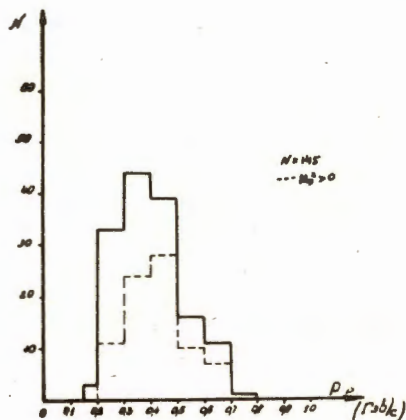


Рис. 1. Импульсное распределение протонов в лаб. системе. Пунктиром обозначены события с  $N_x^2 > 0$

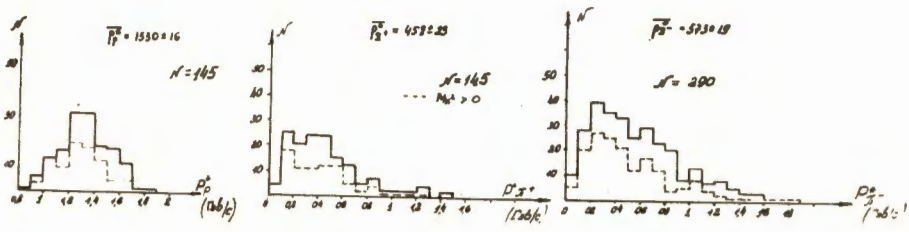


Рис. 2. Импульсные распределения: а) протонов, б)  $\pi^+$ -мезонов, в)  $\pi^-$ -мезонов в С.Ц.М.  $\pi^-$  р.

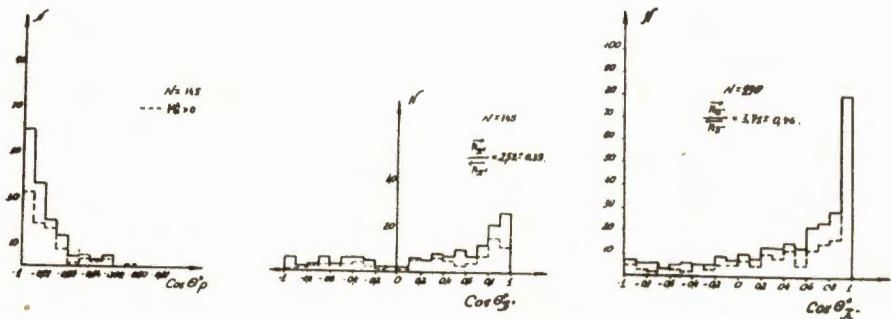


Рис. 3. Угловые распределения: а) протонов, б)  $\pi^+$ -мезонов, в)  $\pi^-$ -мезонов в С.Ц.М.

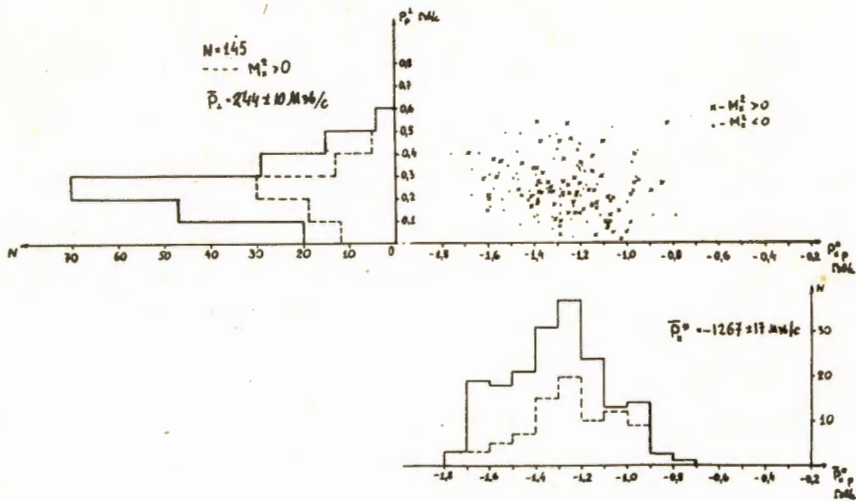


Рис. 4. Распределение протонов по поперечному и продольному импульсам в с.ц.м.

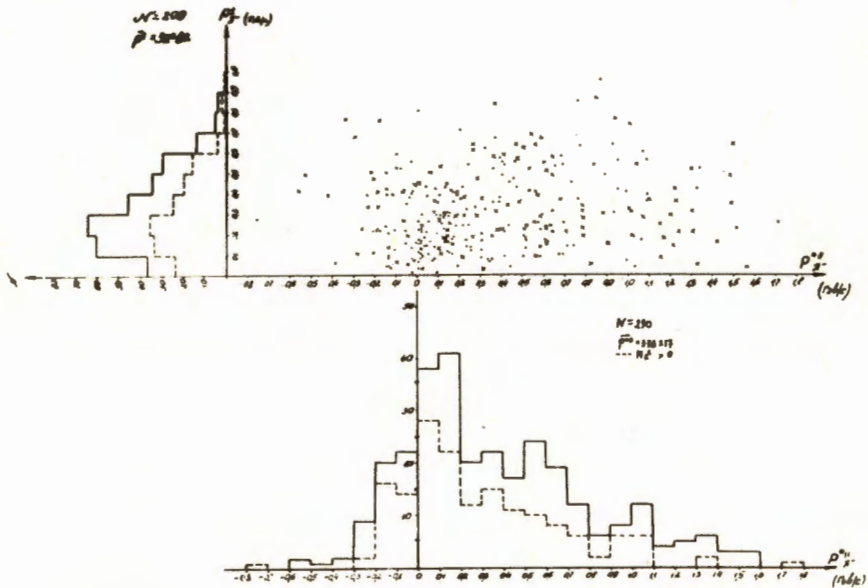


Рис. 5. Распределение  $\pi^-$ -мезонов по поперечному и продольному импульсам в с.ц.м.

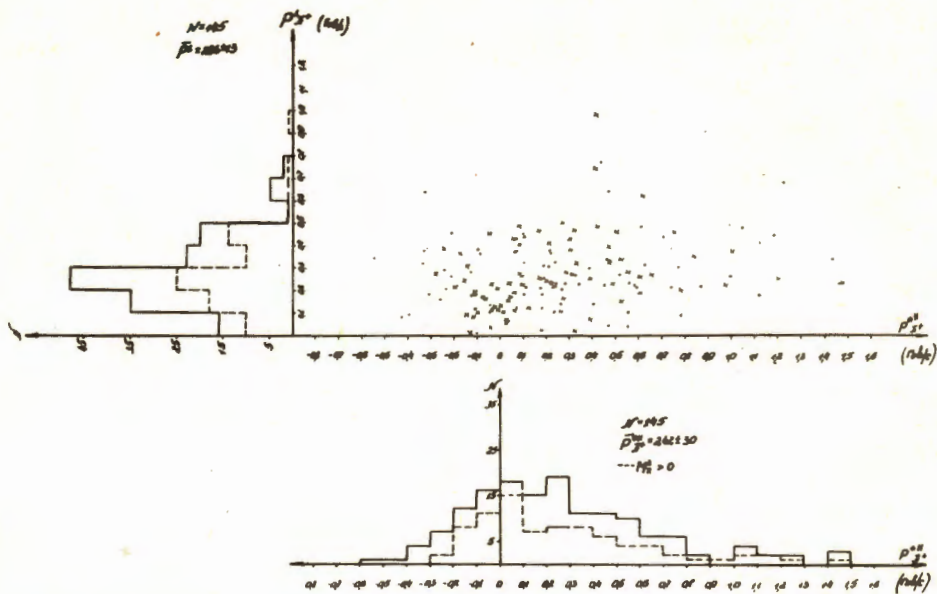


Рис. 6. Распределение  $\pi^+$ -мезонов по поперечному и продольному импульсам в с.д.м.

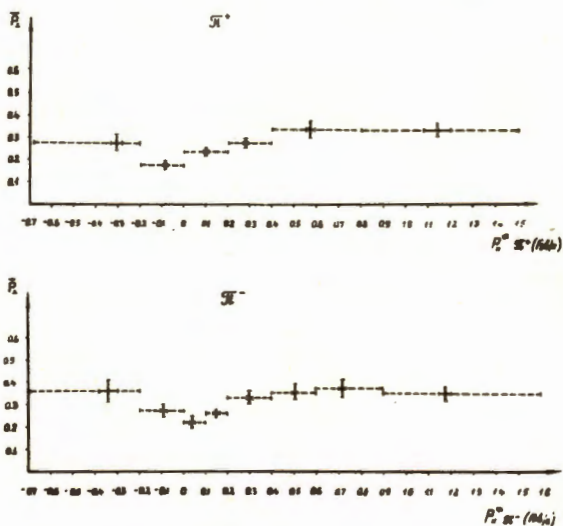


Рис. 7. Зависимость  $P_{T^*}$  от  $P_{L^*}$  для  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов. Пунктиром указаны интервалы по  $P_{L^*}$ .

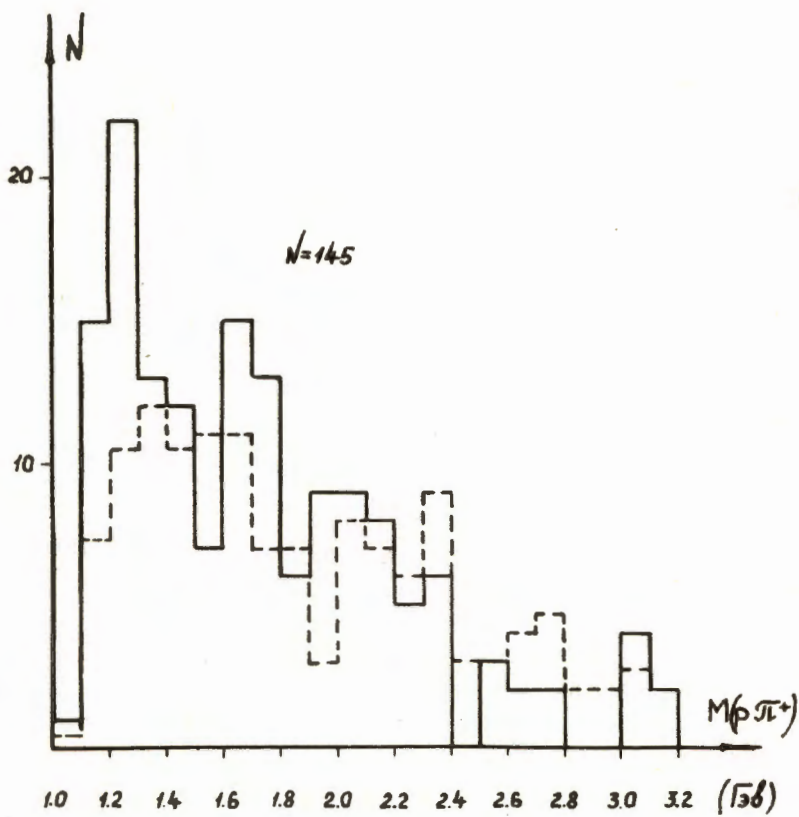


Рис. 8. Распределение по эффективным массам систем  $p\pi^+$ . Пунктирная линия соответствует распределению  $M_{p\pi^-}$ , которое нормировано на интервал  $> 1,4$  Гэв распределения  $M_{p\pi^+}$ .

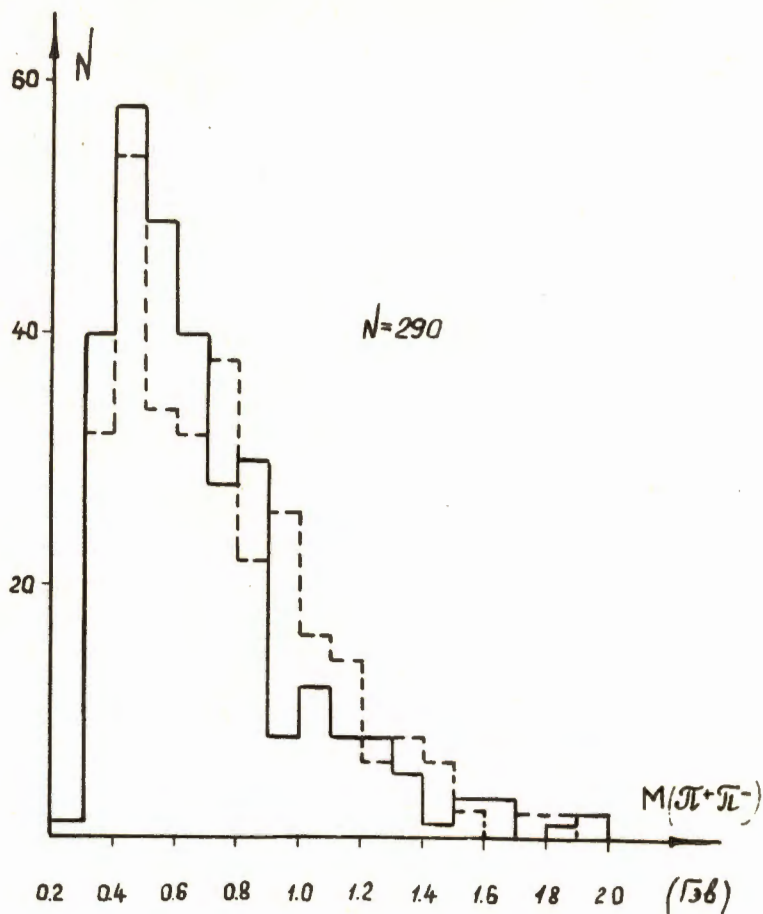


Рис. 9. Распределение по эффективным массам пион-пионных систем. Сплошная линия - распределение по  $M_{\pi^+\pi^-}$ . Пунктирная линия - распределение по  $M_{\pi^-\pi^-}$ , нормированное на одинаковую площадь с распределением  $M_{\pi^+\pi^-}$ .



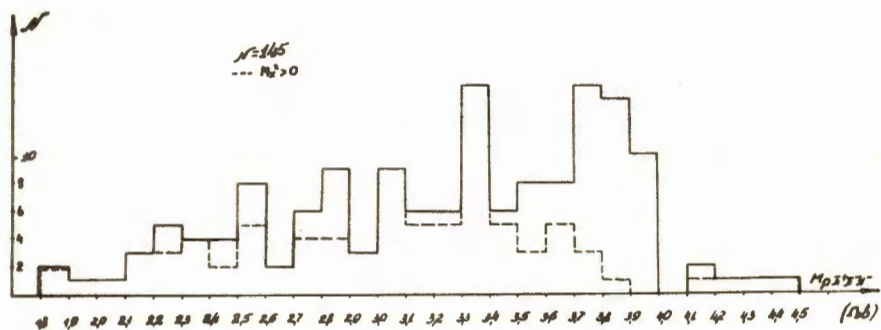


Рис. 10. Распределение по эффективным массам всех заряженных частиц в звезде  $p\pi^+\pi^-$ .

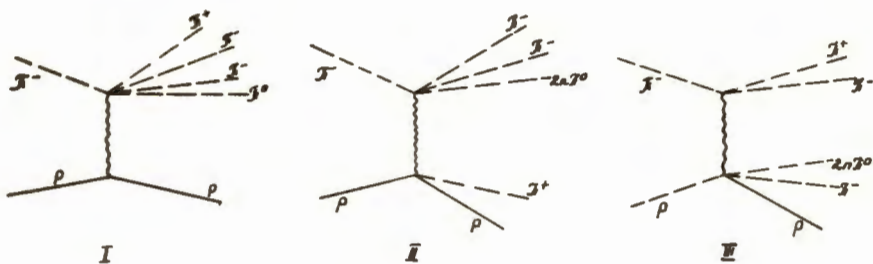


Рис. 11. Одномезонные диаграммы.

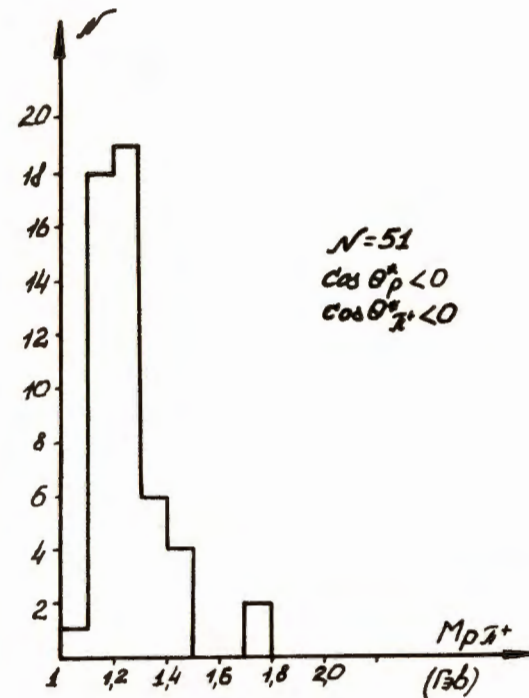


Рис. 12. Распределение по эффективным массам  $p\pi^+$  для событий с  $\cos \theta_{\pi^+}^* < 0$ .