

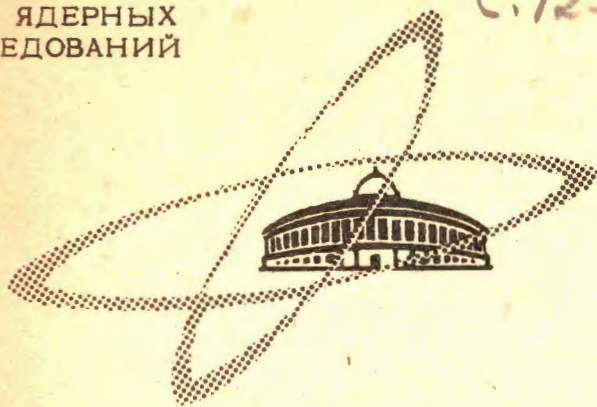
Б-219

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ЯФ, 1967, т. 5, в. 6,  
с. 1237-1238

P 1 - 2963



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

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

ЧАСТЬ III

4-ЛУЧЕВЫЕ СОБЫТИЯ С НЕЙТРОНАМИ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1966

P 1 - 2963

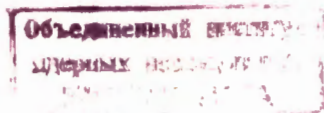
Е. Баля, О. Баля, В.А. Беляков, Е.Н. Кладницкая,  
Е.С. Кузнецова, А. Михул, М. Сабзу

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

ЧАСТЬ III

4-ЛУЧЕВЫЕ СОБЫТИЯ С НЕЙТРОНАМИ

4610/3 чр.



Настоящая работа выполнена совместно  
сотрудниками следующих институтов:

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Лаборатория высоких энергий

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

ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ФИЗИКИ (БУХАРЕСТ)  
Лаборатория высоких энергий

Е. Баля, О. Баля, А. Михул, М. Сабэу

## В в е д е н и е

Настоящая работа является частью общего исследования четырехлучевых  $\pi^-p$  взаимодействий при энергии 7,5 Гэв, проведенного на фотографиях с пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ<sup>/1/</sup>. Предварительные результаты этого исследования сообщались на Международных конференциях в Кракове<sup>/2/</sup> и в Дубне<sup>/3/</sup>. События с протонами проанализированы в двух предыдущих публикациях<sup>/4,5/</sup>. Цель настоящей работы — анализ 524 событий, соответствующих реакциям типа

$$\pi^-p \rightarrow n\pi^+\pi^-\pi^-\pi^0 \quad (m=0,1\dots), \quad (1)$$

Просмотр, измерение, расчет и отбор событий описаны в работах<sup>/4,5/</sup>. Отметим, что среди отобранных событий есть небольшая (<10%) примесь событий от реакций

$$\pi^-p \rightarrow n\pi^+\pi^-\pi^0 \quad (m \geq 0), \quad (2)$$

так как все частицы с импульсом больше 2,5 Гэв/с в лаб. системе считались пионами на основе результатов работ<sup>/6-8/</sup>. Примерно 13% событий по реакциям (1) попали в группу событий с протонами (2)<sup>/5/</sup>. Сечение реакций (1) при 7,5 Гэв равно  $3,7 \pm 0,3$  мб<sup>/5/</sup>.

## Экспериментальные результаты

### 1. Угловые и импульсные распределения пионов.

Угловые распределения  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов показаны на рис. 1. Угловое распределение  $\pi^-$ -мезонов асимметрично и характеризуется отношением

$$\frac{n_{\pi^-}^{\rightarrow}}{n_{\pi^-}^{\leftarrow}} = 1,20 \pm 0,07$$

Угловое распределение  $\pi^+$ -мезонов близко к симметричному

$$\frac{n_{\pi^+}^{\rightarrow}}{n_{\pi^+}^{\leftarrow}} = 0,92 \pm 0,06.$$

В области  $0,8 < \text{Cov}^* < 1,0$  наблюдаются подъемы как в распределении  $\pi^-$ , так и в распределении  $\pi^+$ -мезонов.

Импульсные распределения  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов идентичны (рис. 2), средние значения равны соответственно

$$\begin{aligned} \bar{P}^* \pi^+ &= 481 \pm 10 \text{ Мэв/с} \\ \bar{P}^* \pi^- &= 475 \pm 10 \text{ Мэв/с} \end{aligned}$$

На рис. 3 и 4 приведены двумерные распределения по  $P_{\perp} - P_{\parallel}^*$  для  $\pi^-$ -мезонов. Большинство  $\pi^-$ -мезонов имеет поперечный импульс меньше 0,8 Гэв/с. Средние поперечные импульсы для них равны  $\bar{P}_{\perp} \pi^+ = 328 \pm 8$  Гэв/с,  $\bar{P}_{\perp} \pi^- = 332 \pm 7$  Гэв/с.

Продольные импульсы мезонов в с.ц.м. реакции невелики и для большинства событий они лежат в области  $\pm 300$  Мэв/с (рис. 3,4). Наблюдается заметная корреляция между поперечным и продольным импульсами пионов. Пионы с малыми и очень большими продольными импульсами имеют поперечные импульсы в среднем меньшие, чем пионы с продольными импульсами в интервале 0,3 + 0,8 Гэв/с. Это более наглядно видно на рис. 5, где показаны средние поперечные импульсы пионов для различных интервалов продольных импульсов в с.ц.м.<sup>х)</sup> Подобная корреляция наблюдалась нами для вторичных частиц в реакциях с протонами<sup>4,5/</sup>.

Уменьшение поперечных импульсов частиц при приближении их продольных импульсов к максимально возможным в с.ц.м. следует из закона сохранения импульса. Значительное уменьшение  $\bar{P}_{\perp}^*$  при малых  $P_{\parallel}^*$  не может быть объяснено по фазовому объему и служит указанием в пользу образования частиц через два промежуточных возбужденных состояния. Сравнение экспериментальных данных, полученных при изучении  $\pi^-p$  взаимодействий (реакции 1) в интервале импульсов от 4 до 10 Гэв/с показывает, что имеется ряд общих характеристик этих взаимодействий. Сюда следует отнести асимметрию угловых распределений  $\pi^-$ -мезонов, симметрию угловых распределений  $\pi^+$ -мезонов, общий характер импульсных распределений вторичных частиц. Для вторичных частиц характерны в среднем малые величины поперечных импульсов (меньше допустимых фазовый объем). Имеющиеся данные по средним значениям характеристик  $\pi^-$ -мезонов при импульсах 4 и 10 Гэв/с и данные настоящей работы суммированы в таблице 1. Видно, что с увеличением импульса первичных  $\pi^-$ -мезонов асимметрия угловых распределений  $\pi^-$ -мезонов возрастает, а угловые распределения  $\pi^+$ -мезонов остаются симметричными.

<sup>х/</sup> Вероятность совпадения полученного распределения с прямой линией меньше 0,01% (по критерию  $\chi^2$ ).

### Эффективные массы

Изучалось образование резонансных состояний в реакциях (1). Для этого были рассчитаны эффективные массы всех комбинаций из четырех заряженных частиц.

Распределение по эффективным массам пар  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов показано на рис. 6а. Пиков, соответствующих  $\rho^0$  и  $f^0$ -мезонам, не наблюдается. Расхождение с фоновой кривой наблюдается в области малых значений масс (0,3-0,6 Гэв), что может быть следствием образования  $\omega^0$ -мезонов или других резонансных состояний. Фоновая кривая получена следующим образом.

Парциальные сечения реакций

$$\pi^- p \rightarrow \pi \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \quad (1a)$$

и

$$\pi^- p \rightarrow \pi \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- + \pi \pi^0 \quad m \geq 1 \quad (1b)$$

найлены путем интерполяции сечений этих реакций при 4 Гэв/с<sup>10/</sup> к сечениям при 10 Гэв/с<sup>10/</sup>.

Кроме того, мы воспользовались данными работы<sup>11/</sup> по изучению  $\pi^- p$  взаимодействий при 6,1 Гэв/с. Авторы<sup>11/</sup> нашли, что число событий по реакции (1a) близко к числу событий по реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- + \pi^0$  (1b') (100 и 81 соответственно). При нашей энергии 7,5 Гэв мы считали, что сечения реакций 1a и 1b' одинаковы, а сечение реакций

$$\pi^- p \rightarrow \pi \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- + 3\pi^0 \quad (1b'')$$

пренебрежимо мало по сравнению с сечениями реакций 1b' и 1b''. Сечение реакций с двумя  $\pi^0$ -мезонами (1b'') принималось равным разности между сечениями реакций 1b и 1b'. В итоге мы имели вклады от реакций 1a, 1b', и 1b'', соответственно, 38%, 38% и 24%. Спектр эффективных масс  $M_{\pi^+ \pi^-}$  был исследован более подробно для событий, у которых  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезоны летят вперед в с.ц.м. и один из  $\pi^-$ -мезонов имеет импульс > 3 Гэв/с в л.с. Исходя из периферического механизма образования  $\rho^0$ -мезонов<sup>12/</sup>, следует ожидать появления  $\rho^-$ -мезонного пика именно в этой группе событий. Спектр  $M_{\pi^+ \pi^-}$  для событий с  $\cos \theta_{\pi^+}^* > 0$  и  $\cos \theta_{\pi^-}^* > 0$  и  $P_{\pi^\pm} > 3,0$  Гэв/с в л.с. показан на рис. 6в. Явно выделяется пик, соответствующий  $\rho^0$ -мезону (0,6-0,9 Гэв). Фоновая кривая получена по методу Монте-Карло. События с  $\rho^0$ -мезоном составляют 14% выделенной группы событий и  $\approx$  3% всех реакций с нейтронами.

Не исключено, что выход экспериментального распределения  $M_{\pi^+ \pi^-}$  за фоновую кривую в районе 1,0-1,4 Гэв (рис. 6в) обусловлен образованием  $\chi_1^0$ -мезона, для которого раньше наблюдалась 4-пионная мода распада<sup>13/</sup>, и  $f_0$ -мезона.

<sup>x/</sup> Название  $\chi^-$ -мезон заимствовано из обзора M. Roos<sup>18/</sup>.



На рис. 7 приведено суммарное распределение по эффективным массам  $M_{\pi^+\pi^-\pi^-}$  и  $M_{\pi^-\pi^-\pi^+}$ . Наблюдается расхождение между экспериментальным распределением и фоновой<sup>х)</sup> кривой в области меньших значений эффективных масс.

Трудно сказать что-либо о рождении  $A_1$  и  $A_2$ -мезонов по суммарному распределению. Так как преимущественной модой распада  $A_1$  и  $A_2$ -мезонов является распад на  $\pi$  и  $\rho$ -мезоны, мы построили спектр  $M_{\pi^+\pi^-\pi^-}$  мезонов для событий, у которых по крайней мере одно значение  $M_{\pi^+\pi^-}$  попадает в полосу  $\rho^0$ -мезона (заштрихованная часть рис. 7). В этом распределении видны пики, соответствующие  $A_1$  и  $A_2$ -мезонам, но вклад их мал.

Спектр эффективных масс  $M_{4\pi}$  показан на рис. 8а. Видны отклонения от фоновой кривой в области до 1,7 Гэв, причем можно различить два пика, один в интервале 1,2-1,4 Гэв, другой - в области 1,5-1,7 Гэв. Пик в системе  $M_{4\pi}$  (1,2-1,4) наблюдался нами раньше для событий с рождением  $\Lambda^0$ -гиперонов и К-мезонов при энергиях 7-8 Гэв<sup>14,15/</sup>. В качестве возможных объяснений этого пика выдвигались следующие:

- 1) образование резонанса с  $M_{4\pi} = 1340$  Мэв и  $\Gamma/2 = 70$  Мэв;
- 2) результат совместного рождения  $\rho$  и  $\omega$ -мезонов;
- 3) следствие рождения более высокого резонанса в системе пяти мезонов.

Исследование спектров эффективных масс  $(\pi^+\pi^-)$ -мезонов для событий с  $1,2 \text{ Гэв} < M_{4\pi} < 1,4 \text{ Гэв}$  показало, что имеется максимум в области 400-800 Мэв и не наблюдается максимума в области  $\rho^0$ -мезона. В связи с этим можно сказать, что пик в области 1,2-1,4 Гэв (рис. 8а) не связан с образованием  $\rho^0$ -мезона. Это либо самостоятельный резонанс, либо отражение какого-либо резонанса с участием  $\pi^0$ -мезона. В пользу последнего предположения говорит тот факт, что в группе событий, обогащенной событиями без  $\pi^0$ -мезонов (реакция 1а), не наблюдается пика в районе 1,2-1,4 Гэв (см. заштрихованную часть рис. 8а). Подобная ситуация имеет место в четырехлучевых звездах с нейтронами при энергии 8,1 Гэв<sup>11/</sup>. Пик в области 1,5-1,7 Гэв может быть связан с резонансом в системе 4-пионов. Указания на образование резонанса с  $M_{4\pi} = 1,7$  Гэв имеются в работах<sup>11,17/</sup>.

Кроме общего исследования всех четырехлучевых событий с нейтронами, дополнительно изучалась группа событий, обогащенная событиями без  $\pi^0$ -мезонов. В эту группу вошли случаи с  $0,8 < \Lambda_m < 1,2$  Гэв, где  $\Lambda_m$  - недостающая масса. Таких событий оказалось 114 или 22% от общего числа событий по реакции (1).

Угловые и импульсные распределения вторичных частиц в с.ц.м. для выбранной группы событий показаны на рис. 9. Видно, что в угловом распределении  $\pi^-$ -мезонов

х/ Фоновая кривая получена так же как и на рис. 8а.

(рис. 9в) наблюдается большая асимметрия, чем в угловом распределении  $\pi^-$ -мезонов для всех событий по реакциям (1) ( $\frac{n_{\pi^-}}{n_{\pi^+}} = 1,30 \pm 0,10$ ). Резко асимметрично угловое распределение нейтронов в с.ц.м. ( $\frac{n_n}{n_{\pi^-}} = 0,31 \pm 0,07$ ). В распределении по  $M_{\pi^+\pi^-}$  (рис. 10с) наблюдается пик в области  $\rho^0$ -мезона. Над фоновой кривой находится 20% комбинаций  $M_{\pi^+\pi^-}$  от числа событий без  $\pi^0$ -мезона. В распределении по  $M_{3\pi}$  есть указание на образование  $A_2$  резонанса (рис. 8в). Пиков в интервале №1,2-1,4 и 1,5-1,7 Гэв нет в распределении по  $M_{4\pi}$  (см. заштрихованную часть на рис. 8а). В небольшом числе случаев реакции 1а (<20%) образуется нуклонная изобара  $N_{33}^*$  (рис. 10а, в). Таким образом, в реакциях с нейтронами образуются  $\rho^0$ -мезоны (~3%), возможно  $\chi_1$ ,  $f^0$ ,  $A_1$  и  $A_2$ -мезоны, но вклады их малы. Представляет интерес дальнейшее изучение спектров  $M_{4\pi}$ , в частности, интервалов масс 1,2-1,4 Гэв и 1,5-1,7 Гэв, где, возможно, проявляются многопиконные резонансы.

Наблюдавшиеся в реакциях  $\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\pi^- + \pi\pi^0$  ( $m \geq 0$ ) асимметрия угловых распределений  $\pi^-$ -мезонов и нейтронов, корреляция между поперечными и продольными импульсами вторичных частиц в с.ц.м., расхождение между экспериментальными и фазовыми распределениями эффективных масс служат указанием на образование вторичных частиц через промежуточные возбужденные состояния. Подобная ситуация наблюдалась нами для событий с протонами.

В заключение авторы выражают благодарность Э.Г. Бубелеву, М.И. Соловьеву, Н.М. Вирясову, И. Курелару, В.Н. Пеневу, Т. Понта за помощь в работе и обсуждения, сотрудникам Вычислительного центра Е.П. Жидкову, Н.Н. Говоруноу, Н.Ф. Марковой, Г.Н. Тентюковой за обсуждение и составление программ для электронно-вычислительной машины, группе лаборантов за просмотр и измерения событий.

Румынские соавторы благодарят проф. Х. Хулубея за оказанную помощь и обсуждение работы.

#### 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. E. Balea. IX Konferencia Fiziki vysokich Energii, Krasov, 1963. Nucleonica 9 N 4-5 (1964).
3. Е.Н. Кладницкая Труды XIII Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне, 1964 г. стр. 469.
4. Е.Баля, О. Баля, В.А. Беяков, Е.Н. Кладницкая Е.С.Кузнецова, И. Курелару, А. Михул, М. Сабэу. Препринт ОИЯИ Р-2461, Дубна, 1965.
5. Е. Баля, О. Баля, В.А. Беяков, Е.Н. Кладницкая, Е.С. Кузнецова, А. Михул, М. Сабэу. Препринт ОИЯИ Р-2773, Дубна 1966.
6. В.А. Беяков, Ван Шу-фень, В.В. Глаголев, Н. Далхажав, Р.М. Лебедев, Н.Н. Мельникова, В.А. Никитин, В. Петржилка, В.А. Свиридов, М.Сук, К.Д. Толстов. ЖЭТФ, 39, 837 (1960).
7. K. Lanius Proc. of the 1962 Intern. Conf. on High Energy Physics at CERN, p 617.



8. M. Deutschnan, R. Krichel, R. Speth, H. Weber, W. Woischnig, C. Grote, J. Klugow, A. Meyer, S. Nowak, S. Brandt, V. T. Coccoeni, O. Czyzewski, T. Danysz, P. Dalpiaz.  
Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне, 1984 г.  
стр. 508.
9. Aachen - Birmingham - Bonn - Hamburg - London (I.C.) - Munchen Collaboration  
Nuovo Cim .31 485 (1964) .
10. N. N. Biswas, I. Derado, M. Schmitz, W. D. Shepard . Ph. Rev. 134 B 901 (1964) .
11. G. Bellini, M. D. Corato, F. Dulmio, E. Florini .Nuovo Cim .40 A 948 (1965) .
12. C. Alff, D. Colley, N. Gelfand, V. Nauenberg, D. Riller, I. Steinberger, T. H. Tan, H. Brugger, P. Kramer, R. Plano . Proc. of the 1962 Intern. Conf. on High Energy Physics at CERN, p 50 .
13. Nguyen - Huu Xuong, G. R. Lynch .Nuovo Cim .25 923 (1962); Ph. Rev. 128 1849 (1962) .
14. V. A. Belyakov, Wang Yuhg - chang et al .Proc. of the 1962 Intern. Conf. on High Energy Physics at CERN. p 336. Препринт ОИЯИ Р-1019, Дубна 1982 г.
15. В.А. Беляков, В.И. Векслер, Н.М. Вирясов, Е.Н. Кладническая, Г.И. Копылова, А. Михул, В.Н. Певнев, Е.С. Соколова, М.И. Соловьев. Препринт ОИЯИ Р-508, Дубна 1984
16. M. Roos .Rev. Mod. Phys. 35 314 (1963) .
17. W. J. Keman, D. E. Lyon, and H. B. Cranley .Phys. Rev. Lett. 15, 803 (1965) .

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 октября 1986 г.

Т а б л и ц а 1

Импульс (Гэв/с)	4	7,5	10
Число случаев	738	519	304
$\sigma$ (мб)	$2,57 \pm 0,09$	$3,7 \pm 0,3$	$3,30 \pm 0,19$
$P^* \pi^+$ (Мэв/с)	$361 \pm 5$	$481 \pm 10$	$496 \pm 12$
$P^* \pi^-$ (Мэв/с)	$358 \pm 5$	$475 \pm 10$	$556 \pm 15$
$P_{\perp} \pi^+$ (Мэв/с)	$273 \pm 9$	$328 \pm 8$	$350 \pm 10$
$P_{\perp} \pi^-$ (Мэв/с)	$272 \pm 8$	$332 \pm 7$	$376 \pm 10$
$\vec{n}_{\pi^+} / \vec{n}_{\pi^-}$	$1,21 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,06$	$1,11 \pm 0,09$
$\vec{n}_{\pi^+}^- / \vec{n}_{\pi^-}$	$1,09 \pm 0,06$	$1,20 \pm 0,07$	$1,42 \pm 0,12$

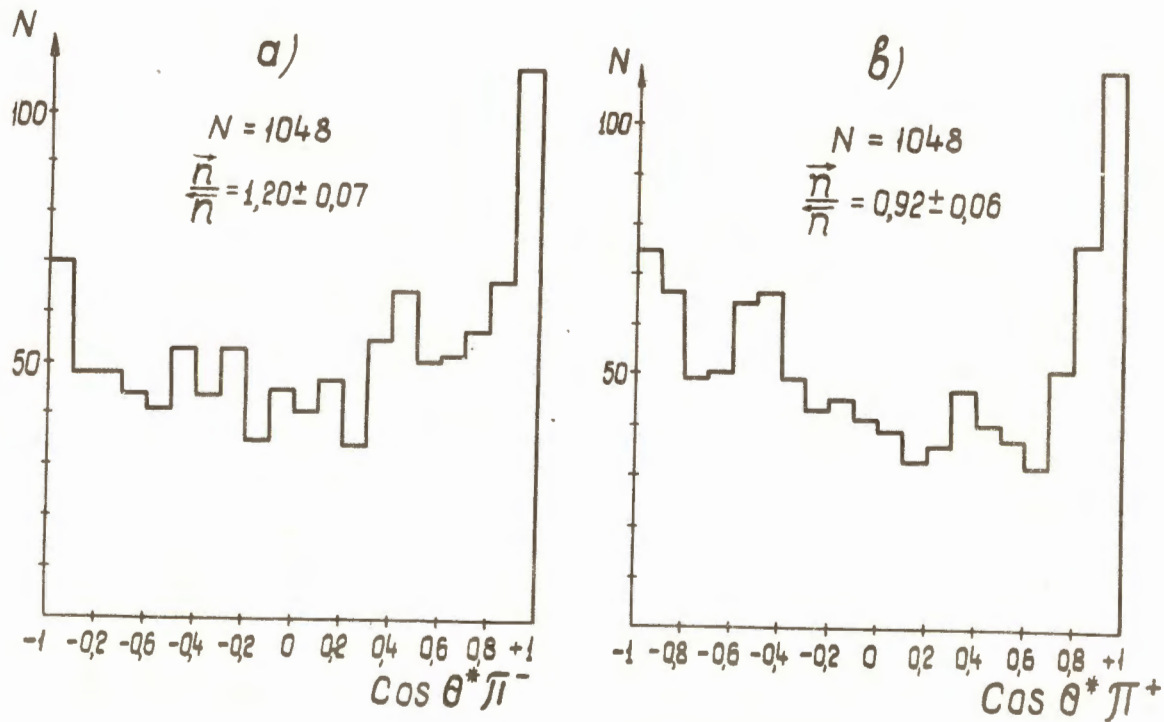


Рис. 1. Угловые распределения пионов в с.ц.м. а)  $\pi^-$ -мезонов, б)  $\pi^+$ -мезонов.

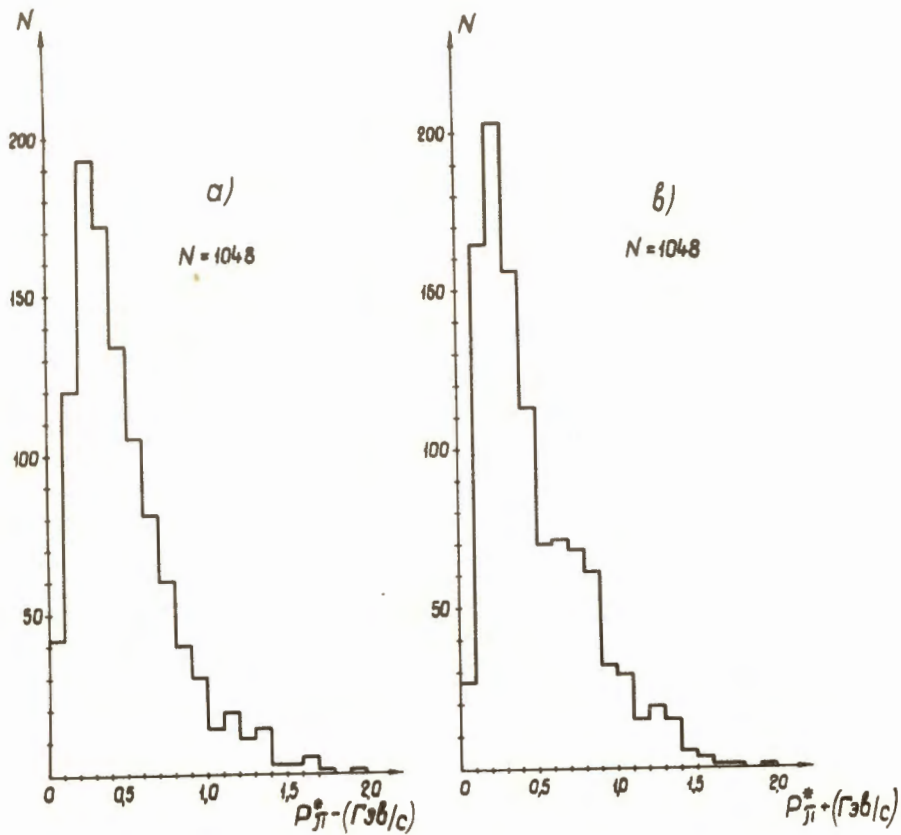


Рис. 2. Импульсные распределения пионов в с.ц.м. а)  $\pi^-$ -мезонов, в)  $\pi^+$ -мезонов.

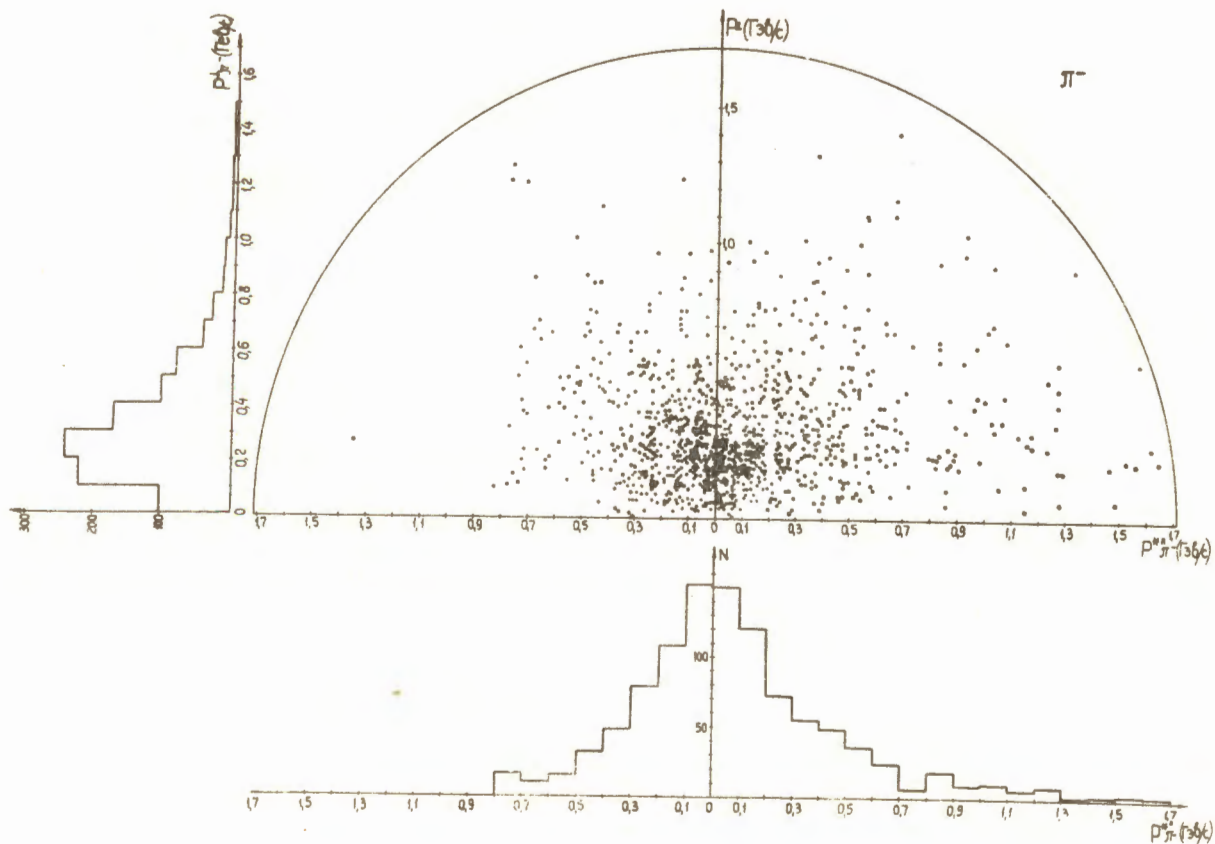


Рис. 3.  $P_{\perp} - P_{\parallel}$  распределение для  $\pi^-$ -мезонов.

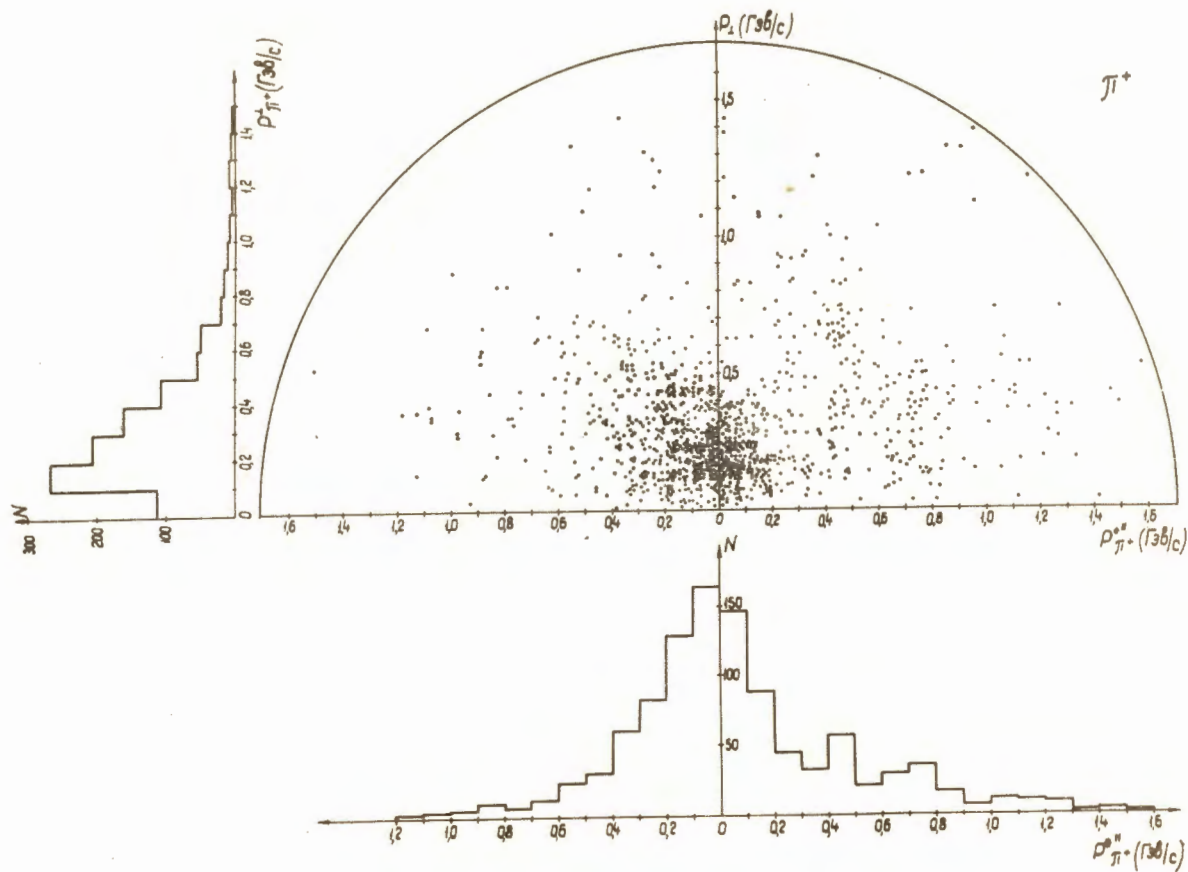


Рис. 4.  $P_{\perp} - P_{\parallel}^*$  распределение для  $\pi^+$ -мезонов.



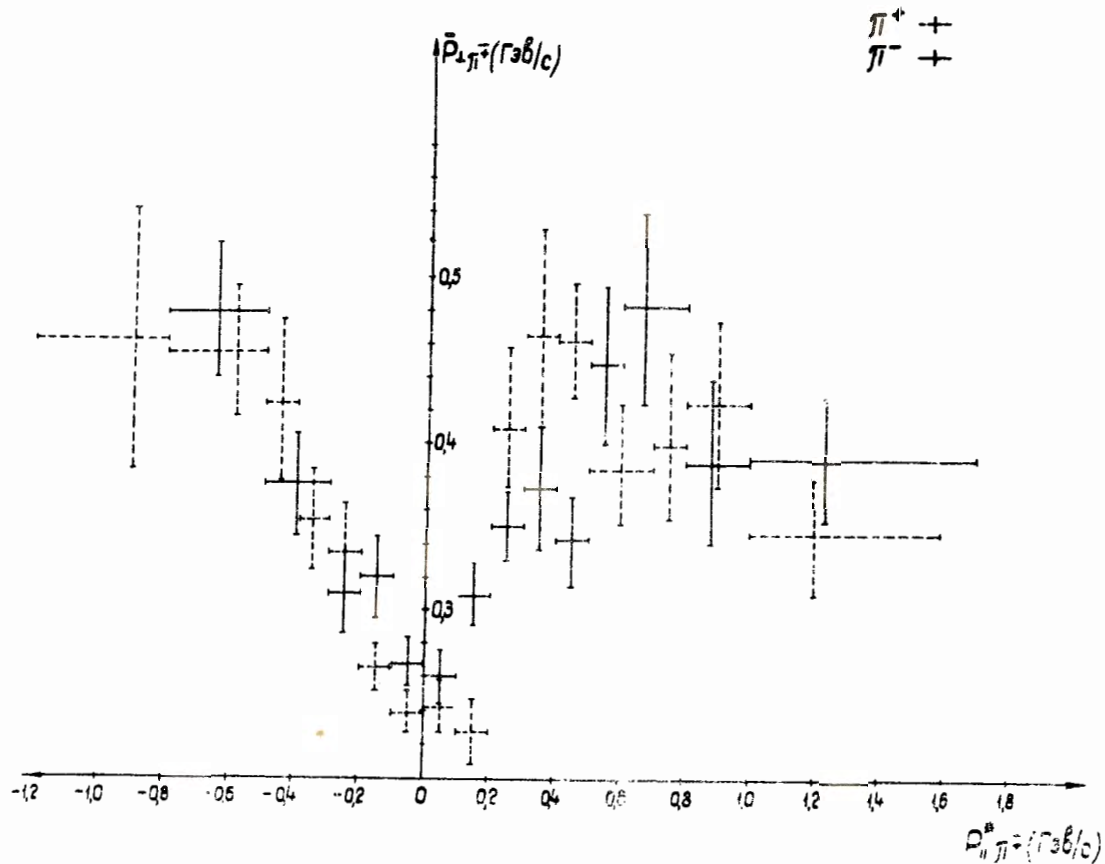


Рис. 5. Зависимость средних поперечных импульсов  $\pi^-$  и  $\pi^+$ -мезонов от продольных импульсов пионов в с.л.м.

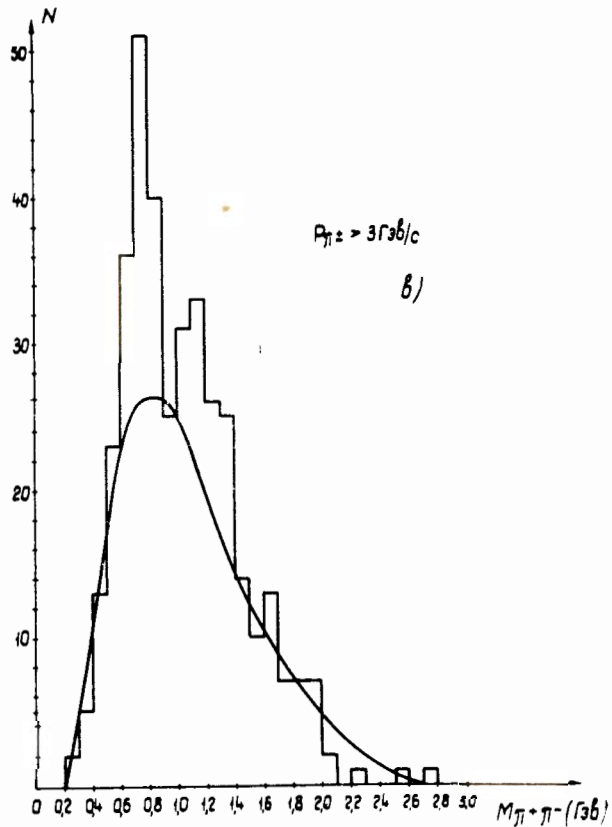
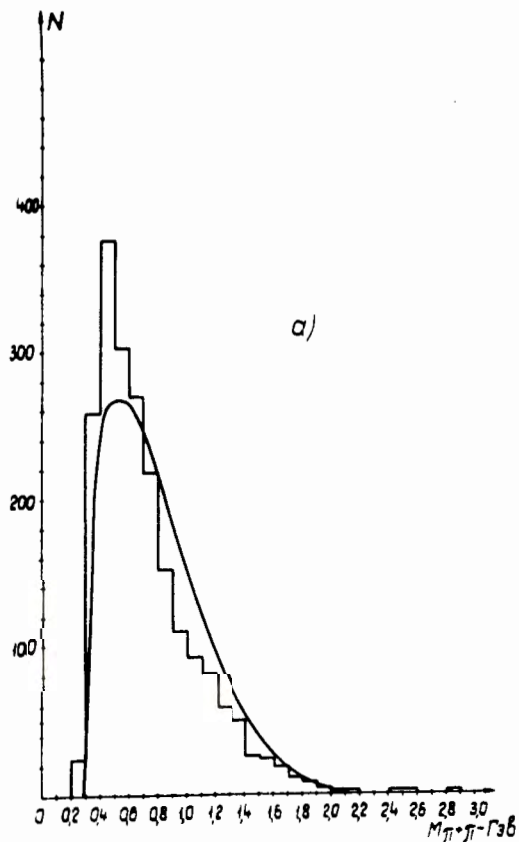


Рис.6. Распределения по эффективным массам  $M_{\pi^+\pi^-}$ , а) по  $M_{\pi^+\pi^-}$  для всех реакций с нейтронами. О фоновой кривой см. текст, б) по  $M_{\pi^+\pi^-}$  для событий с  $P_{\pi^+}$  или  $P_{\pi^-} > 3$  Гэв/с. Фоновая кривая получена по методу Монте-Карло, и нормирована по области  $M_{\pi^+\pi^-} > 1,4$  Гэв.

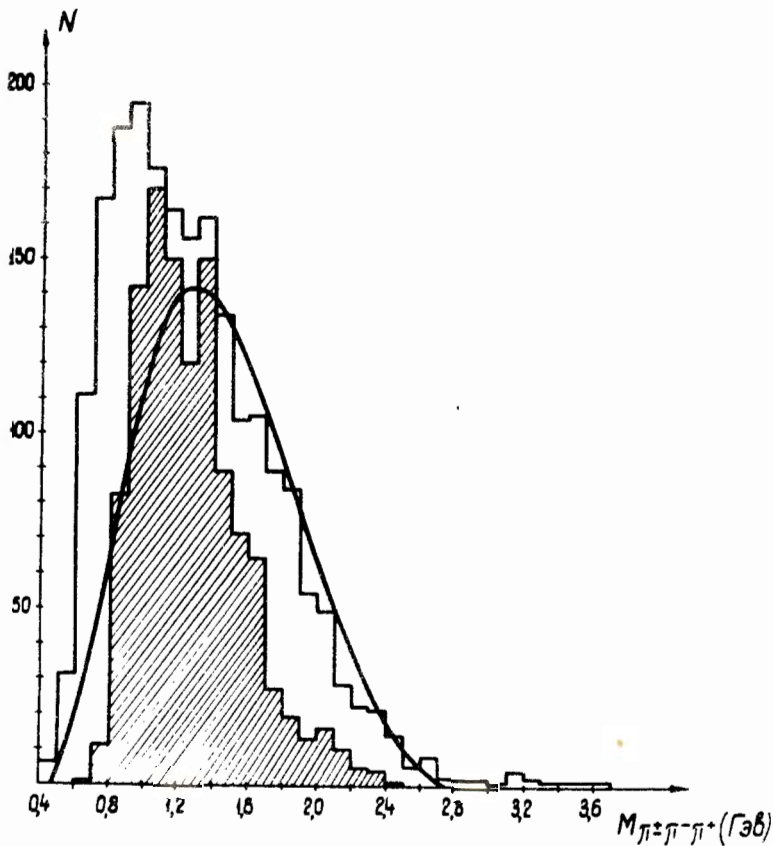


Рис. 7. Распределение по  $M_{\pi^+\pi^-\pi^0}$  для всех событий с нейтронами. Заштриховано распределение по  $M_{\pi^+\pi^-\pi^0}$  для событий, у которых  $0,6 \text{ ГэВ} < M_{\pi^+\pi^-\pi^0} < 0,9 \text{ ГэВ}$ . Фоновая кривая нормирована по области  $M_{\pi^+\pi^-\pi^0} > 1,4 \text{ ГэВ}$ . О фоновой кривой см. текст.

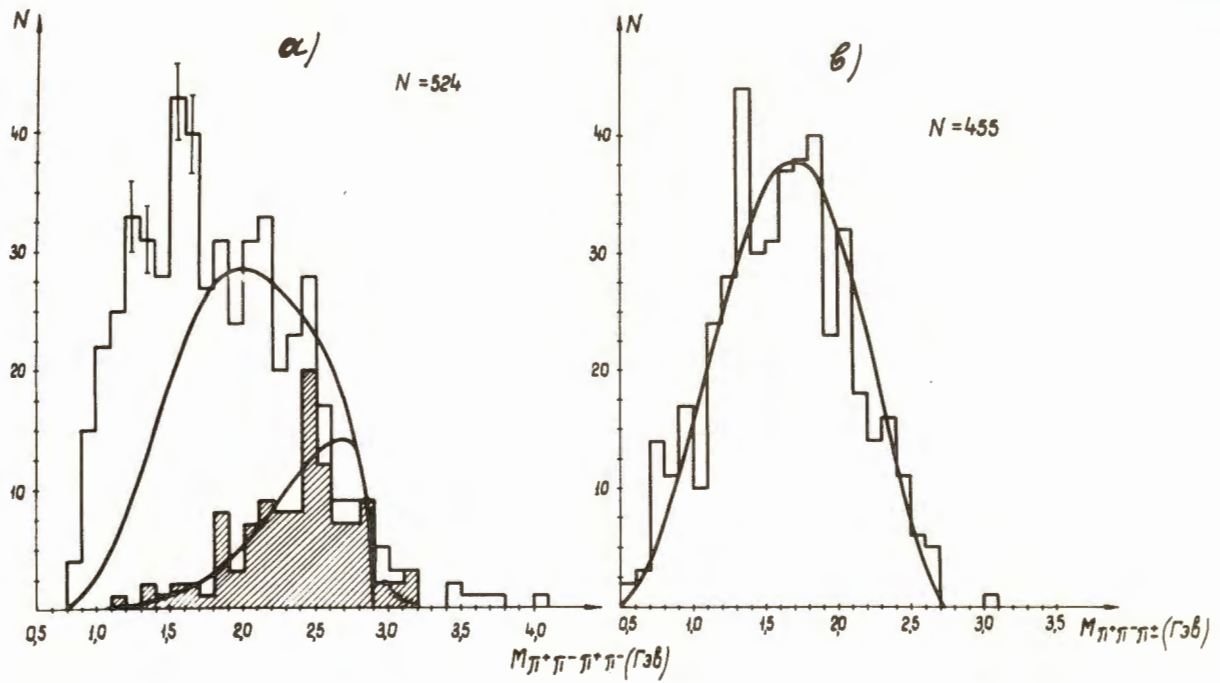


Рис. 8. а) Распределение по  $M_{4\pi}$ . Фоновая кривая нормирована по области  $M_{4\pi} > 1,7$  Гэв. Заштриховано распределение по  $M_{4\pi}$  для группы событий без  $\pi^0$ -мезонов. На него нормирована фазовая кривая  $M_{4\pi}$  для реакции  $\pi^-p \rightarrow \pi\pi^+\pi^+\pi^-$ .

в) Распределение по  $M_{3\pi}$  для группы событий без  $\pi^0$ -мезонов. На него нормирована фазовая кривая  $M_{3\pi}$  для реакции  $\pi^-p \rightarrow \pi\pi^+\pi^+\pi^-$ .

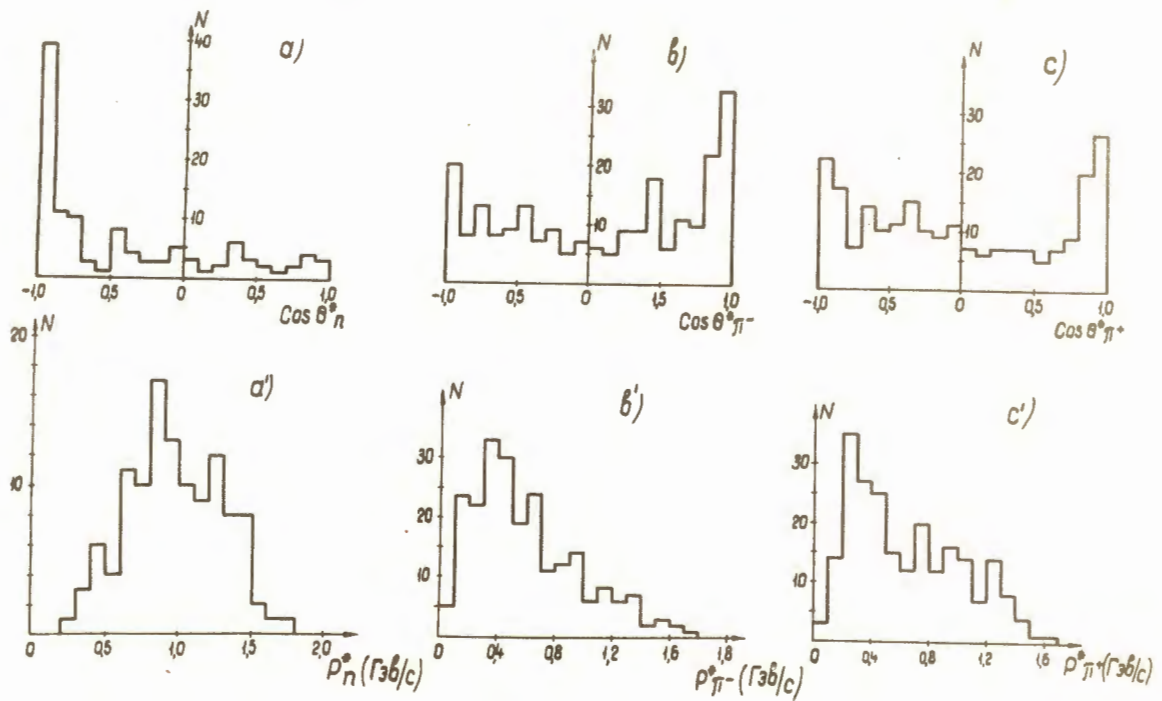


Рис. 9. Угловые и импульсные распределения частиц для группы событий без  $\pi^0$ -мезонов а) и а') нейтронов; в) и в')  $\pi^-$ -мезонов; с) и с')  $\pi^+$ -мезонов.

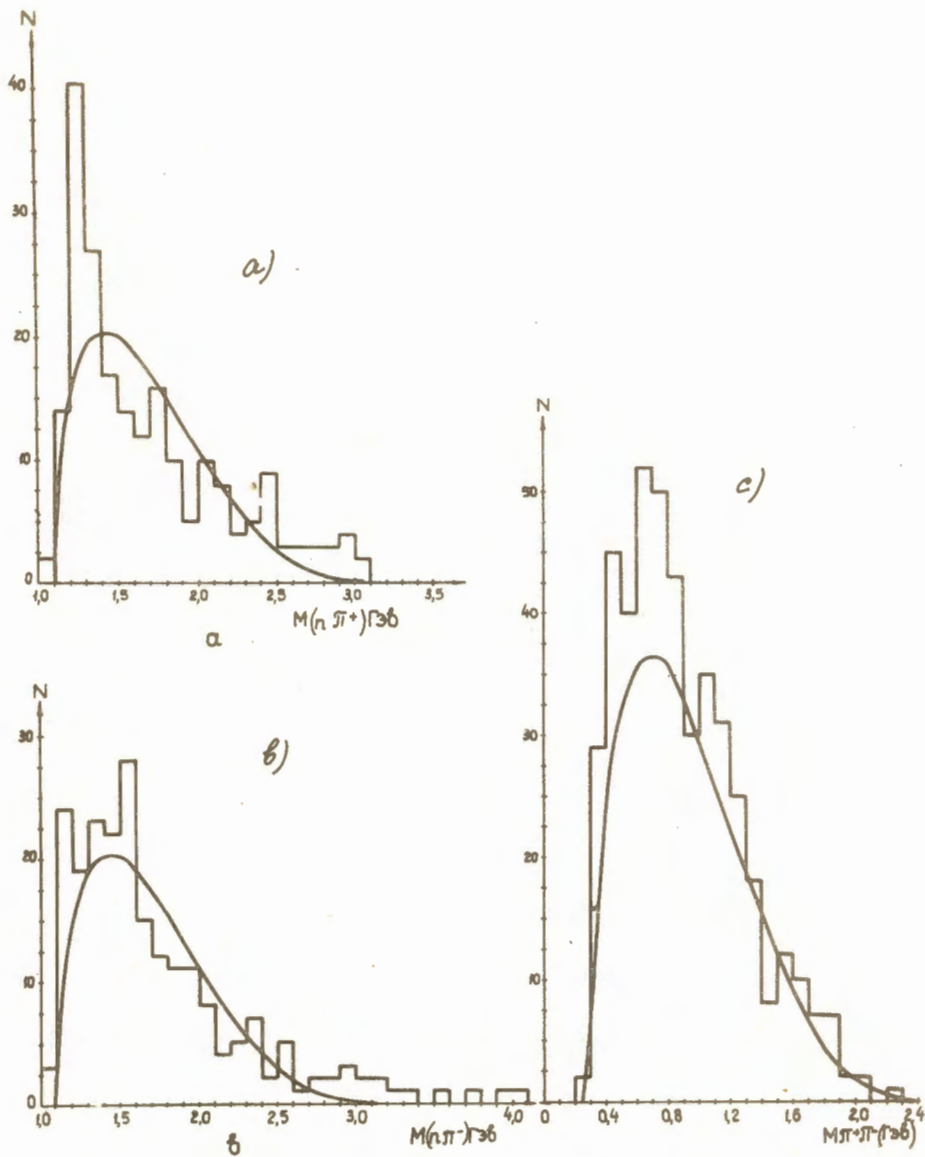


Рис. 10. Распределение по эффективным массам а)  $M_{\pi\pi^+}$ , в)  $M_{\pi\pi^-}$ , с)  $M_{\pi^+\pi^-}$  для группы событий без  $\pi^0$ -мезонов. Фазовые кривые для  $M_{\pi\pi}$  нормированы по области  $M_{\pi\pi} > 1,4$  Гэв. На рис. 10с фазовая кривая нормирована по всей области, кроме  $0,6 \text{ Гэв} < M_{\pi^+\pi^-} < 0,9 \text{ Гэв}$ .