

С 346

Б-287

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

3249

Ю.А. Батусов

ДВОЙНАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА  $\pi$ -МЕЗОНОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
кандидат физико-математических наук

В.М. Сидоров

Дубна 1967

3249

Ю.А. Батусов

ДВОЙНАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА  $\pi$ -МЕЗОНОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
кандидат физико-математических наук

В.М. Сидоров

4434 БР.

Исследование свойств  $\pi$ -мезонов и их взаимодействий с нуклонами и сложными ядрами может внести значительный вклад в познание природы ядерных сил. Можно указать ряд направлений в исследовании взаимодействия  $\pi$ -мезонов с ядрами, для которых  $\pi$ -мезоны являются единственным ядерным зондом, позволяющим изучить внутреннюю структуру ядерной материи. Одним из таких направлений является изучение реакций двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов на ядрах. Такая возможность превращения частицы в античастицу для  $\pi$ -мезонов допускается при энергиях меньших, чем порог мезообразования. Вследствие этого при взаимодействии с ядрами положительный мезон может превращаться в отрицательный или наоборот. В таких процессах заряд ядра также может изменяться на две единицы. Исследование переходов с  $\Delta T_z = \pm 2$  в ядрах является важным при изучении структуры ядер, их аналоговых состояний с большим избытком нейтронов или протонов и, возможно, парных корреляций нуклонов одинакового знака в ядрах. Исследования такого рода невозможно проводить с частицами другого сорта.

Работы, включенные в диссертацию, были начаты в 1962 г., главным образом, для получения экспериментальных сведений о двойной перезарядке  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии, а также и на отдельных, вполне определенных ядрах в интервале энергий первичных  $\pi$ -мезонов от нуля до порога мезообразования.

К началу наших работ сведения о таких реакциях полностью отсутствовали, а теоретические исследования этих реакций носили лишь качественный характер.

Диссертация написана на основе экспериментов, выполненных на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в течение 1962-1967 г.г. Результаты работ по изучению процессов двойной перезарядки положительных и отрицательных  $\pi$ -мезонов на различных ядрах опубликованы в печати /1-7/ и

доклаживались на международных конференциях по физике высоких энергий.

Диссертация состоит из пяти глав, объединенных в две части. В первой части (главы I и II) диссертации дан краткий обзор теоретических работ, посвященных двойной перезарядке  $\pi$ -мезонов, и теоретические оценки процесса, выполненные по каскадной модели. Во второй части (главы III, IV и V) описана методика экспериментальных исследований, изложены результаты измерений полных сечений на ядрах в фотоэмульсии и на отдельных ядрах, а также угловых и энергетических распределений вторичных  $\pi$ -мезонов. Обсуждаются лучевые распределения "звезд", возникающих в эмульсии в результате двойной перезарядки.

Ниже кратко излагается содержание диссертации.

## Теоретические исследования процессов двойной перезарядки $\pi$ - мезонов

### I.

В настоящее время двойную перезарядку  $\pi$ -мезонов на ядрах в литературе рассматривают либо в предположении, что этот процесс происходит на коррелированных комплексах нуклонов внутри ядра (это может быть пара нуклонов, часть ядра, например, "a-кластер", или все ядро), либо считают, что двойная перезарядка происходит путем последовательных взаимодействий  $\pi$ -мезона с нуклонами в ядре.

Теоретические работы, посвященные исследованию процессов двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов на различных ядрах, можно условно разделить по энергии первичных мезонов на область малых (0-40 МэВ) и область высоких (от 40 до нескольких сотен МэВ) энергий.

В области низких энергий расчеты процесса двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов основаны или на построении оптического потенциала<sup>/8,9/</sup>, или на использовании теории возмущения<sup>/10/</sup> (причем в расчете учитывается только одна диаграмма, дающая наибольший вклад).

Характерной чертой всех работ, посвященных теоретическому рассмотрению процесса двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов на ядрах в области высоких энергий, является применение импульсного приближения. Отличие же одного расчета от другого состоит в основном в различном описании пион-нуклонного взаимодействия и в различном учете возбуждения конечного ядра /11-13/.

Недостатком всех теоретических работ, посвященных двойной перезарядке  $\pi$ -мезонов на ядрах как при высокой энергии, так и при низкой, является то, что в них не рассматриваются эффекты искажения волновой функции падающего  $\pi$ -мезона и не учитывается возможность поглощения перезарядившегося пиона внутри ядра-мишени.

Одной из моделей, учитывающей недостатки предыдущих теоретических работ, является каскадная модель взаимодействия  $\pi$ -мезонов с ядром /8/, по которой были выполнены расчеты полных и дифференциальных сечений двойной перезарядки на ядрах в фотоэмульсии и на отдельных ядрах.

## II.

Двойная перезарядка  $\pi$ -мезона на ядре в каскадной модели рассматривалась нами как процесс последовательных перезарядок на отдельных нуклонах ядра по схеме:



В простейшем случае в качестве модели ядра принималась сфера с радиусом  $R = r_0 \Lambda^{1/3}$ , заполненная с равномерной плотностью ферми-газом взаимодействующих нуклонов. Распределение по импульсам внутри ядра принималось гауссовским. Потенциал ядра для нуклона рассматривался в виде прямоугольной ямы, глубиной в  $\epsilon_F = 30$  Мэв, а соответствующая глубина потенциальной ямы для  $\pi$ -мезона принималась равной  $V_{\pi} = 25$  Мэв. Для нуклонов, участвующих в элементарном акте, считалось обязательным выполнение принципа Паули. Для  $\pi^{\pm}$ -мезонов, покидающих ядро, кроме обычного обрезания по энергии, обусловленного глубиной соответствующей потенциальной ямы, учитывалась возможность отражения их от кулоновского барьера на границе ядра.

Методом случайных испытаний судьба  $\pi$ -мезона прослеживалась до выхода его из ядра. Принимались во внимание все возможные каналы взаимодействия  $\pi$ -мезонов с нуклонами внутри ядра. Расчеты проведены с учетом релятивистской кинематики. Такой расчет позволил вычислять полные сечения двойной перезарядки при различных энергиях первичных  $\pi$ -мезонов, получить зависимость сечения от атомного номера ядра и рассчитать энергетические и угловые распределения вторичных мезонов на определенных ядрах. Вычисления были выполнены при кинетических энергиях  $\pi$ -мезонов в интервале от 50 до 300 Мэв. Результаты приведены на рис. 1-3, 5, 6.

Эксперименты по исследованию реакции двойной перезарядки  
 $\pi$ -мезонов

I.

С целью поиска двойной перезарядки  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов были проведены эксперименты на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Эмульсионные камеры были облучены в пучках  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов с энергией 80 Мэв. При этой энергии  $\pi$ -мезоны противоположного знака по отношению к первичному, могут образоваться только в процессе двойной перезарядки. Поэтому для поиска событий в камерах, облученных  $\pi^+$ -мезонами, регистрировались остановки  $\pi^-$ -мезонов, а при облучении отрицательными  $\pi$ -мезонами -  $\pi^+$ -мезоны. Следы заряженных мезонов продолжались затем в эмульсионной камере до выхода их из "звезд", образованных в эмульсии. Отбирались "звезды", имеющие первичный след.

Эти эксперименты позволили зарегистрировать процесс двойной перезарядки положительных и отрицательных  $\pi$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии. (В первых экспериментах был зарегистрирован 31 случай двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов и 27 случаев двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов).

При дальнейших исследованиях были измерены величины полных сечений двойной перезарядки в интервале энергий 0-176 Мэв и исследованы угловые и энергетические распределения вторичных  $\pi$ -мезонов. Было проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Дальнейшие исследования процессов двойной перезарядки  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии проводились в эмульсионных камерах, облученных в пучках  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов с энергиями 50 Мэв, 87 Мэв, 144 Мэв и 176 Мэв. В них было зарегистрировано 1115 случаев двойной перезарядки

$\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии:

$$622 \text{ случая типа } \pi^+ + A \rightarrow \pi^- + A' \dots \quad (1)$$

$$\text{и } 493 \text{ случая типа } \pi^- + A \rightarrow \pi^+ + A' + \dots \quad (2)$$

Полные сечения приведены в таблице 1.

По экспериментальным результатам было установлено, что для реакции (1) в интервале энергий 40–140 Мэв изменение полного сечения с энергией хорошо описывается простейшей эмпирической зависимостью  $\sigma = CE^2$ , а для реакции (2) в интервале 40–176 Мэв (так же, как и в интервале 40–140 Мэв)  $-\sigma = CE^2 + DE^3$ .

Результаты вычислений полных сечений, выполненные по каскадной модели, в сравнении с экспериментальными результатами представлены на рис. 1. Теоретически рассчитанные величины сечений удовлетворительно объясняют возрастание полного сечения с энергией и абсолютную величину сечений.

Энергетические распределения вторичных  $\pi^-$ -мезонов представлены на рис. 2. Они указывают на то, что при двойной перезарядке  $\pi^-$ -мезон теряет в ядре значительную часть кинетической энергии. Этот результат можно объяснить, предполагая, что реакция протекает в две стадии по схеме (1).

Угловые распределения  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов представлены на рис. 3. Они близки к изотропным. В диссертации отмечено, что угловые распределения, полученные на опыте, не удается согласовать с результатами расчета по каскадной модели.

На рис. 4 представлены распределения случаев по числу лучей. Характерной особенностью ядерных расщеплений, возникающих при двойной перезарядке  $\pi^-$ -мезонов в фотоэмульсии, является образование "звезд" с малым числом лучей, поскольку в этом процессе два протона превращаются в два нейтрона. В противоположность этому при двойной перезарядке положительных мезонов возникают два протона, вследствие чего образуется примерно на два луча больше, чем при двойной перезарядке  $\pi^-$ -мезонов.

Т а б л и ц а I

Процесс $\pi^+ + A \rightarrow \pi^- + A' + \dots$ (1)	E (МэВ)	44,0 $\pm$ 8,0	59,3 $\pm$ 8,0	73,0 $\pm$ 8,0	87,6 $\pm$ 8,0	104,0 $\pm$ 8,0	118,5 $\pm$ 8,0	132,6 $\pm$ 8,0	
	$\sigma$ (мб)	0,06 $\pm$ 0,03	0,18 $\pm$ 0,05	0,28 $\pm$ 0,06	0,48 $\pm$ 0,11	0,91 $\pm$ 0,21	1,06 $\pm$ 0,25	1,51 $\pm$ 0,34	
Процесс $\pi^- + A \rightarrow \pi^+ + A' + \dots$ (2)	E (МэВ)	51,7 $\pm$ <sup>3,3</sup> <sub>-11,7</sub>	62,9 $\pm$ <sup>7,1</sup> <sub>-7,9</sub>	79,1 $\pm$ <sup>5,9</sup> <sub>-9,1</sub>	99,5 $\pm$ <sup>15,5</sup> <sub>-14,5</sub>	122,6 $\pm$ <sup>12,4</sup> <sub>-12,6</sub>	138,9 $\pm$ <sup>6,1</sup> <sub>-8,9</sub>	152,0 $\pm$ <sup>8,0</sup> <sub>-7,0</sub>	168,0 $\pm$ 8,0
	$\sigma$ (мб)	0,02 $\pm$ 0,01	0,08 $\pm$ 0,02	0,13 $\pm$ 0,03	0,25 $\pm$ 0,05	0,42 $\pm$ 0,08	0,50 $\pm$ 0,14	0,73 $\pm$ 0,19	0,84 $\pm$ 0,21



В работах /4,6/ было получено, что примерно 80% всех событий двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов в фотоэмульсии обусловлены взаимодействием с тяжелыми ядрами. Из лучевых распределений зарегистрированных событий следует, что, по крайней мере, 54% случаев двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов могут быть строго отнесены к перезарядке на тяжелых ядрах серебра и брома.

### III

С целью измерения полных сечений двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов на ядрах Be, C, Al, Zn, Cd и Pb была проведена серия специальных экспериментов:

1. С камерами из эмульсионных слоев, переложенных пластинками Be или Pb.
2. С камерами, помещенными между двумя блоками из углерода.
3. С камерами, установленными в центре кольцевых мишеней.

Результаты этих экспериментов представлены на рис. 5 и 6 и в таблицах II и III.

Т а б л и ц а II

Полные сечения реакции двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов с энергией 80 Мэв на ядрах

Постановка опыта	Ядро	Полные сечения в мб
№ 1. (Камера с металлическими пластинками)	Be <sup>9</sup>	0,10 ± 0,03
	Pb <sup>208</sup>	4,4 ± 1,3
№ 3 (Кольцевые мишени)	C <sup>12</sup>	0,01 <sup>+1,16</sup> -0,01
	Al <sup>27</sup>	0,9 ± 0,3
	Zn <sup>64</sup>	0,9 ± 0,9
	Cd <sup>114</sup>	0,6 <sup>+1,0</sup> -0,6
	Pb <sup>208</sup>	3,5 ± 2,0

### Т а б л и ц а III

Полные сечения реакции двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов с энергией 140 Мэв на ядрах

Постановка опыта	Ядро	Полные сечения, мб
№ 1 (Камера с металлическими пластинками)	Be <sup>9</sup>	0,14 ± 0,04
	Pb <sup>208</sup>	0,82 ± 0,39
№ 2 (Мишень - углеродные блоки)	C <sup>12</sup>	0,14 ± 0,09

Наблюдается возрастание полного сечения двойной перезарядки  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов с увеличением атомного номера ядра, что находится в согласии с расчетами по каскадной модели.

#### IV .

В заключении диссертации кратко сформулированы основные результаты и выводы:

1. Обнаружены процессы двойной перезарядки положительных и отрицательных мезонов на ядрах в фотоэмульсии.

2. Зарегистрировано 1115 случаев реакции двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии в интервале энергий (0-176) Мэв:

622 случая типа



и 493 случая типа



3. Измерены полные сечения реакции (1) при семи значениях энергии в интервале (40-144) Мэв и полные сечения реакции (2) для восьми энергетических интервалов при первичной энергии (40-176) Мэв.

4. Измерены полные сечения двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов с энергией 80 Мэв на ядрах Ве, Al, Zn, Cd и Pb и  $\pi^-$ -мезонов с энергией 140 Мэв на ядрах Ве, С и Pb.

5. Из результатов измерений полных сечений двойной перезарядки  $\pi^+$  - и  $\pi^-$ -мезонов получено, что:

а) возрастание величины полного сечения с ростом энергии первичных мезонов от 40 до 176 Мэв наблюдается как для  $\pi^+$ , так и для  $\pi^-$ -мезонов;

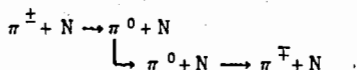
б) сечение двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии во всем исследуемом интервале энергий остается ниже, чем сечение двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов;

в) полное сечение двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов в интервале энергий 0-40 Мэв не превышает значения  $10^{-28}$  см<sup>2</sup>;

г) сечение двойной перезарядки положительных и отрицательных  $\pi^-$ -мезонов возрастает с увеличением атомного номера ядра.

6. Исследованы энергетические и угловые распределения вторичных  $\pi^+$  - и  $\pi^-$ -мезонов от двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии и измерены распределения "звезд" по числу лучей.

7. Проведены расчеты методом Монте-Карло в предположении, что двойная перезарядка  $\pi^-$ -мезонов происходит в две стадии по схеме:



Такие расчеты удовлетворительно объясняют возрастание полных сечений с энергией и с атомным номером ядра, абсолютную величину сечений, энергетические распределения вторичных мезонов и разницу в сечениях двойной перезарядки  $\pi^+$  - и  $\pi^-$ -мезонов.

Из сравнения с экспериментом показано, что угловые распределения не согласуются с предсказаниями каскадной модели.

Материал, положенный в основу диссертации, опубликован в работах /1-7/.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЖЭТФ 46, 817 (1964).
2. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Мальцев, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Международная конференция по физике высоких энергий. Атомиздат (1964), стр. 64-66.

3. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ, 1, 383 (1965).
4. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ, 3, 309 (1966).
5. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Г. Ионице, Е. Лозняну, В. Михул, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Препринт ОИЯИ Р-2806, Дубна 1966.
  
6. Ю.А. Батусов, В.Н. Кочкин, В.М. Мальцев. Препринт ОИЯИ Р2-3004, Дубна 1966.
7. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Препринт ОИЯИ, Р1-3248, Дубна 1967.
8. A.K. Kerman, R. Logan. Bull. Am. Phys. Soc. 9, 627 (1964).
9. D.S. Koltun, A. Reitan Phys. Rev., 139, В1372 (1965).
10. T. Kohmura. Prog. Theor. Phys., 33, 480 (1965); 34, 963 (1965).
11. P.G. Parsons, J.S. Trefil, S.D. Drell Phys. Rev. 138, В847 (1965).
12. F. Becker, Z. Maric. Nuov. Cim. 3f, 1395 (1965).
13. S. Barshay, G. Brown. Phys. Lett. 16, 165 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 марта 1967 г.

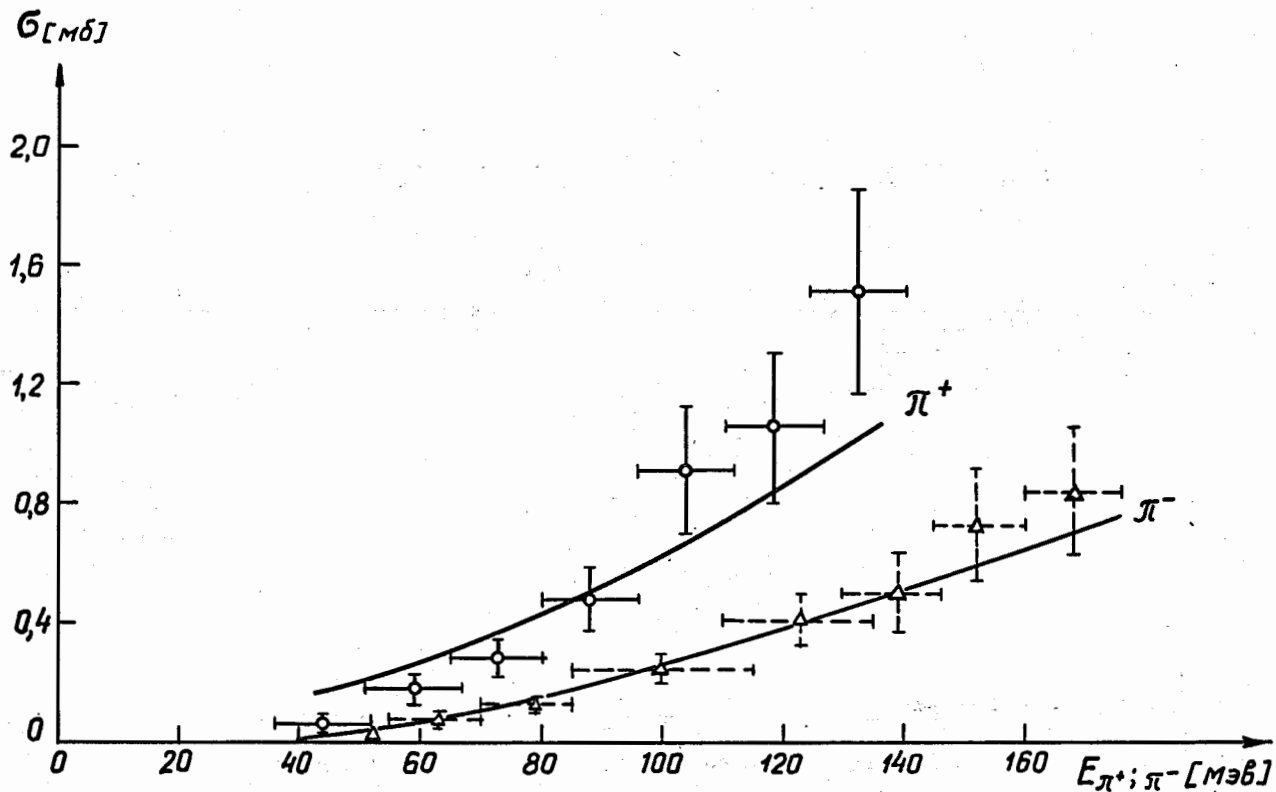


Рис. 1. Полные сечения двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов  $\circ$ ,  $\triangle$  - экспериментальные результаты. Плавные кривые - результаты расчета по каскадной модели.

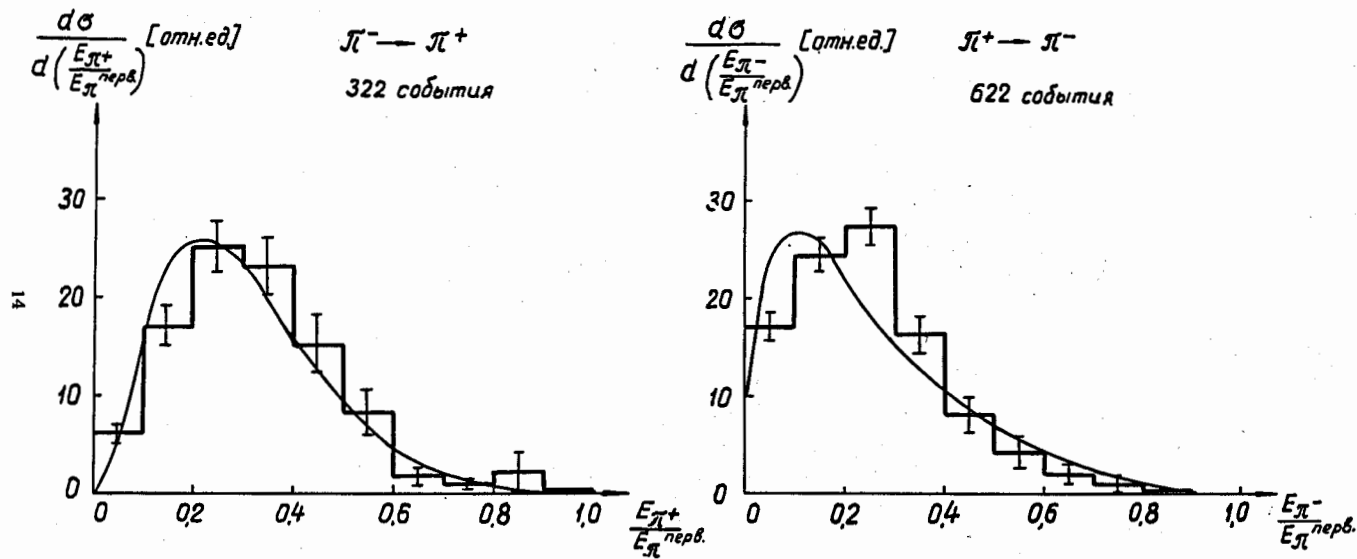


Рис. 2. Энергетические распределения вторичных мезонов от двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии. Гистограммы - эксперимент. Плавные кривые - расчет по каскадной модели.

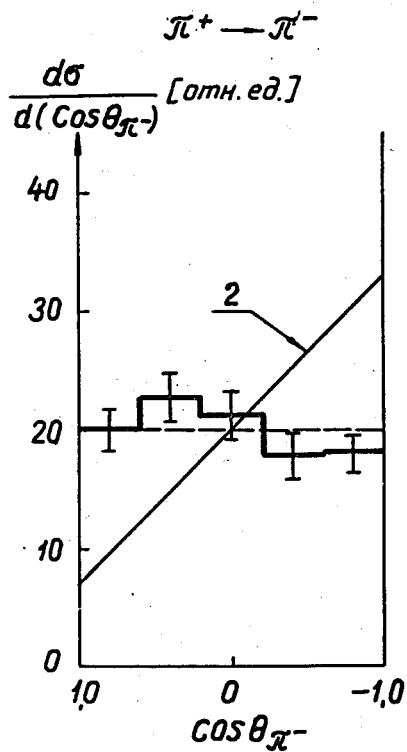
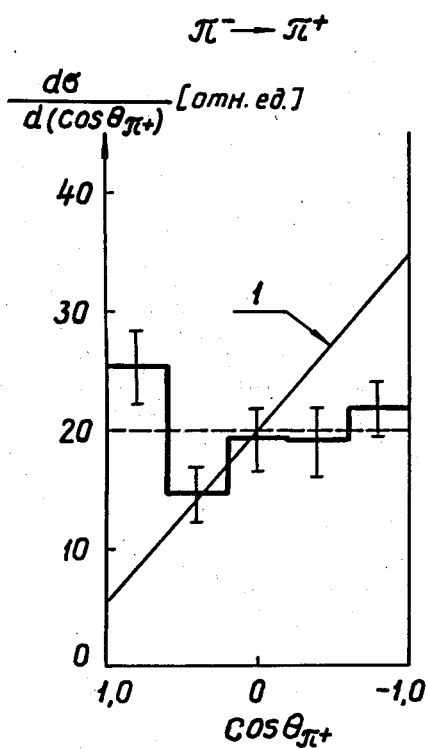


Рис. 3. Угловые распределения вторичных мезонов от двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов на ядрах в фотоэмульсии. Гистограммы - эксперимент. Кривые 1 и 2 - расчет по каскадной модели.

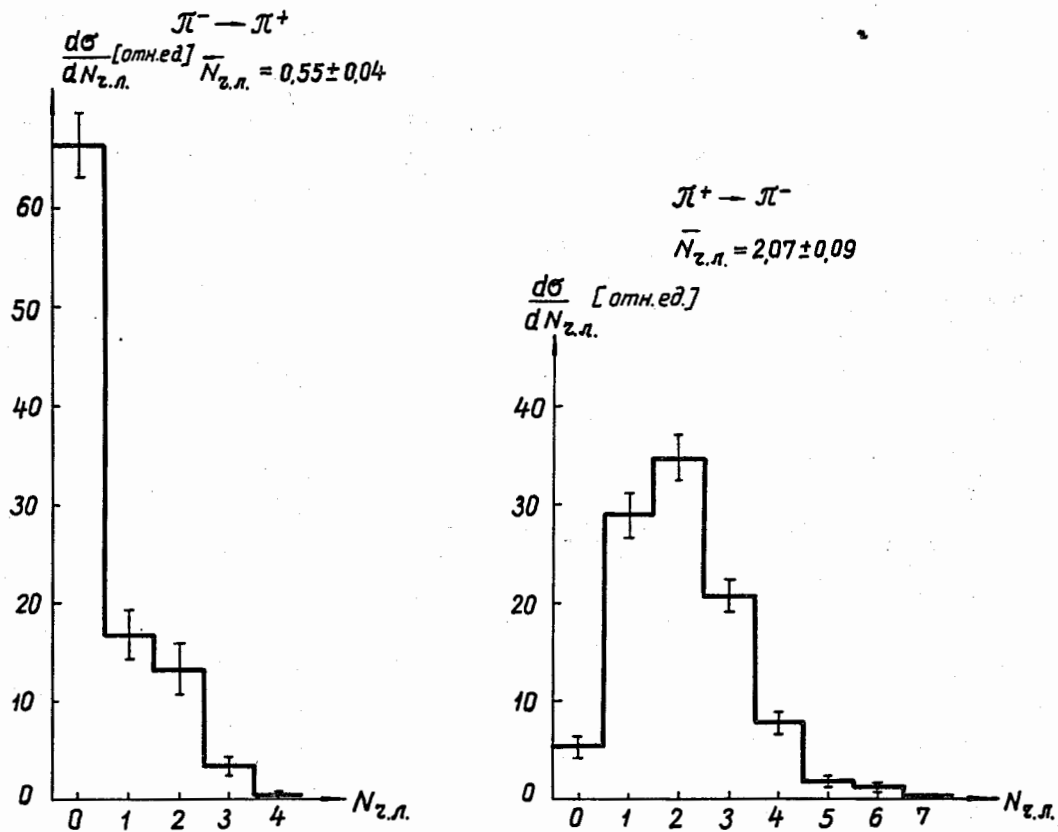


Рис. 4. Распределение событий двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов по числу лучей.



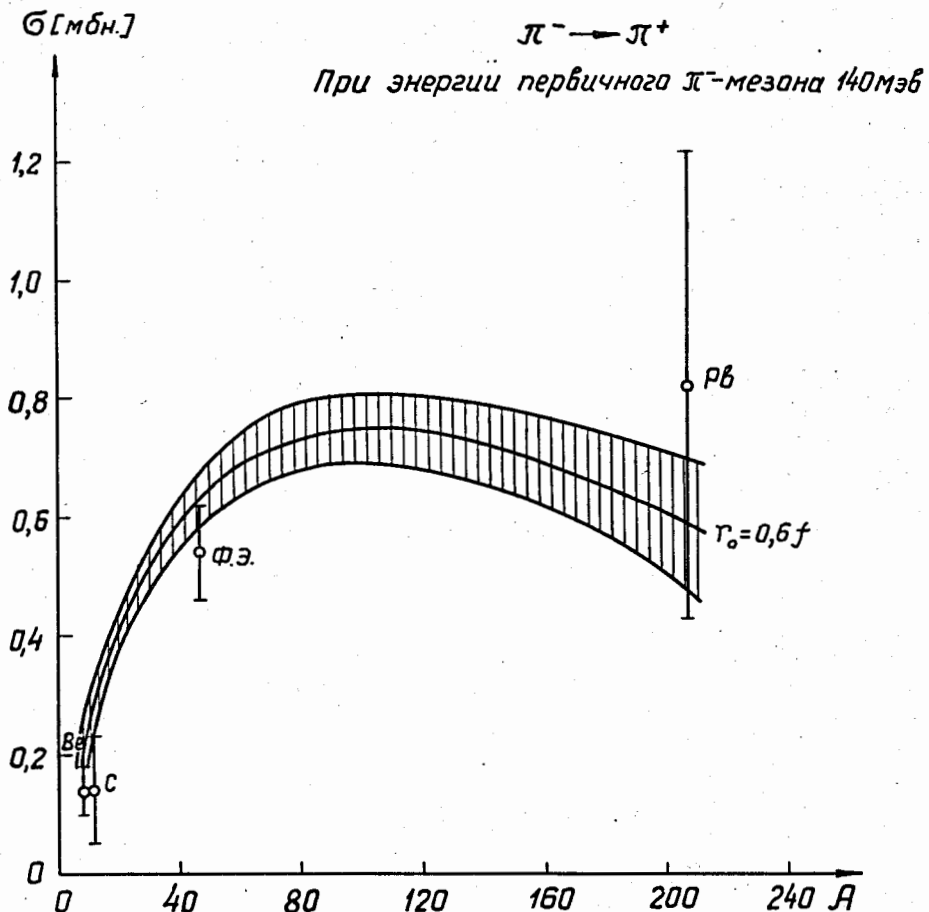


Рис. 5. Зависимость полного сечения двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов с энергией 140 МэВ от атомного номера ядра; кривая - результат расчетов, выполненных методом Монте-Карло по каскадной модели. (Штриховкой показан коридор ошибок).

$$\pi^+ \rightarrow \pi^-$$

при энергии первичного  $\pi^+$ -мезона 80 МэВ

$\sigma$  [мб]

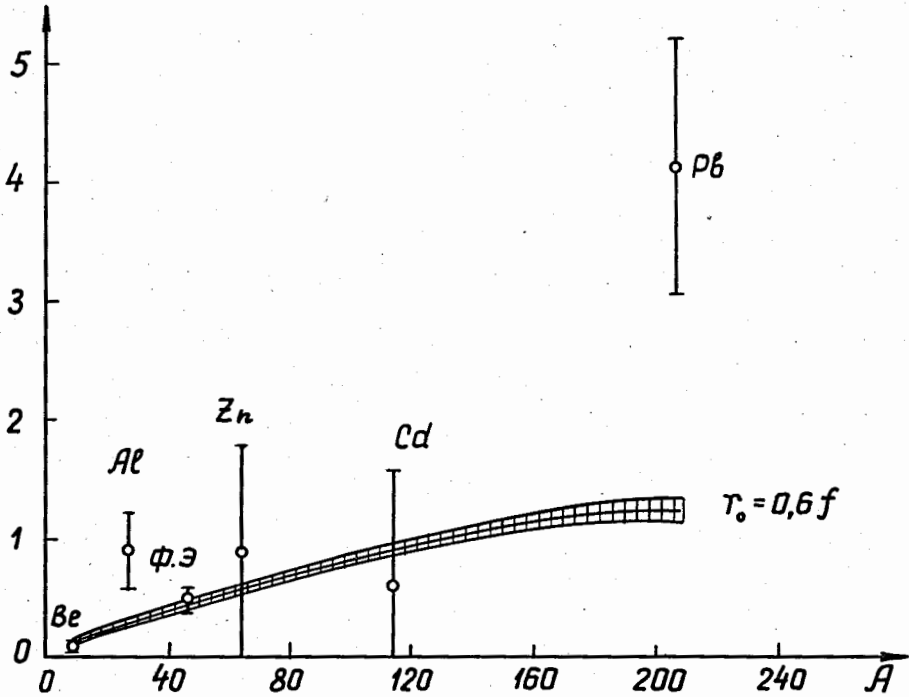


Рис. 6. Зависимость полного сечения двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов с энергией 80 МэВ от атомного номера ядра; кривая-результат расчетов, выполненных методом Монте-Карло по каскадной модели. (Штриховкой показан коридор ошибок).