

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗ46.46

A-613

Р1 - 8793

4/11/75

2781/2-75

Н.С.Амаглобели, Ю.А.Будагов, В.Б.Виноградов,  
А.Г.Володько, В.П.Джелепов, Ю.Дубински,  
Ю.Ф.Ломакин, Г.Мартинска, В.С.Румянцев,  
Р.Г.Салуквадзе, Н.А.Усманова, В.Б.Флягин,  
Ю.Н.Харжеев, Б.Г.Чиладзе, Л.Шандор, Ш.С.Шошиашвили

ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВЫЕ  $\pi^-$  -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
С ОБРАЗОВАНИЕМ  $\pi^0$  -МЕЗОНОВ ПРИ 5 ГЭВ/С

II.Определение сечений статистическим методом;  
изучение характеристик процессов  
с испусканием протона и нейтрона

1975

Н.С.Амаглобели,<sup>1</sup> Ю.А.Будагов, В.Б.Виноградов,  
 А.Г.Володько, В.П.Джелелов, Ю.Дубински,<sup>2</sup>  
 Ю.Ф.Ломакин, Г.Мартинска,<sup>3</sup> В.С.Румянцев,<sup>4</sup>  
 Р.Г.Салуквадзе,<sup>1</sup> Н.А.Усманова,<sup>1</sup> В.Б.Флягин,  
 Ю.Н.Харжеев, Б.Г.Чиладзе,<sup>1</sup> Л.Шандор, Ш.С.Шошиашвили<sup>1</sup>

## ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВЫЕ $\pi^-$ p -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОБРАЗОВАНИЕМ $\pi^0$ -МЕЗОНОВ ПРИ 5 ГЭВ/С

II. Определение сечений статистическим методом;  
 изучение характеристик процессов  
 с испусканием протона и нейтрона

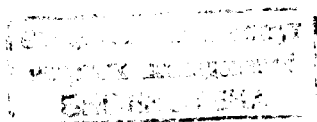
<sup>1</sup> Тбилисский государственный университет.

<sup>2</sup> Институт экспериментальной физики САН, Кошице (ЧССР).

<sup>3</sup> Университет им. П.Й.Шафарика, Кошице (ЧССР).

<sup>4</sup> Институт физики АН БССР, Минск.

<sup>5</sup> Физико-технический институт АН УзбССР, Ташкент.



### Введение

В нашей предыдущей работе /1/ на основе анализа четырехлучевых событий с двумя и тремя  $\gamma$ -квантами, зарегистрированными в метровой пропановой пузырьковой камере ОИЯИ, были определены парциальные сечения процессов

$$\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^- + m \pi^0 \quad /1/$$

$$\text{и} \quad \pi^- p \rightarrow n \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- + m \pi^0 \quad (m \geq 0) \quad /2/$$

при 5 ГэВ/с методом кинематической идентификации событий. Методические вопросы этого исследования опубликованы в работе /2/.

Экспериментальные условия, характеризуемые средней погрешностью измерения импульса  $\frac{\Delta p}{p} = 10\%$  и

средней эффективностью регистрации  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов в процессах /1/ и /2/  $\epsilon_{\gamma} \approx 15\%$ , не позволяют идентифицировать события в смысле их принадлежности к определенному каналу реакции. Тем не менее, используя результаты визуальной идентификации вторичных заряженных частиц и кинематического анализа событий, можно эффективно разделить события с образованием протона и нейтрона в конечном состоянии.

Для этой цели применялась следующая процедура. К процессу /2/ были отнесены события с визуально идентифицированными двумя  $\pi^+$ -мезонами, а также те визуально неразделенные события, которые либо однозначно удовлетворяют гипотезе  $\pi^- p \rightarrow n \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$  либо по величине квадрата недостающей массы не могут быть отнесены к процессу /1/. Оставшиеся события были отнесены к процессу /1/.

В результате применения перечисленных критериев к процессам /1/ и /2/ было отнесено 341 и 181 событие, соответственно. Примесь событий от реакций /2/ среди событий, отнесенных к реакциям /1/ и наоборот/ при использовании указанной процедуры разделения по нашим оценкам не превышает 7%.

В данной работе представлены результаты анализа событий процессов /1/ и /2/ в отдельности.

#### *Определение парциальных сечений статистическим методом*

Для определения сечений каналов реакций с образованием нескольких нейтральных частиц в ряде работ /см., напр., /3 - 6 / / применялся статистический метод. В этом случае неизвестные сечения определяются путем аппроксимации методом наименьших квадратов совокупности экспериментальных распределений линейной комбинацией расчетных. Вклад расчетного распределения, соответствующего данному каналу реакции, в суммарное распределение пропорционален сечению и эффективности регистрации событий данного канала реакции. Подробное описание метода, а также программы, разработанной для определения сечений указанным методом, приведено в работе /7/. С целью более достоверного определения парциальных сечений процессов /1/ и /2/ в данной работе, наряду с методом кинематической идентификации, применялся статистический метод.

При выборе величин, распределения которых используются в процессе определения сечений, оказалось, что наиболее подходящими являются спектры эффективных масс (М) и спектры квадратов недостающих масс ( $MM^2$ ) различных комбинаций вторичных частиц\*. Расчетные рас-

пределения, а также эффективности регистрации событий каналов реакций /1/ и /2/ с различной множественностью  $\pi^0$ -мезонов были получены путем моделирования этих реакций методом Монте-Карло /2/.

Для определения сечений каналов реакций /1/ были использованы распределения величин  $M(p\pi\pi\gamma)$ ,  $M(p\pi\pi\pi\gamma)$ ,  $M(p\pi\pi\gamma)$ ,  $MM^2(\pi\gamma\gamma)$ ,  $MM^2(\pi\pi\pi\gamma)$ ,  $MM^2(\pi\pi\gamma)$  и  $MM^2(\pi\pi\gamma\gamma)$ . В расчетных распределениях учитывалось образование резонанса  $\Delta^{++}$  (1236) /см. следующий параграф/. При этом оказалось, что используемые распределения практически не чувствительны к отражению этого резонанса.

При учете в процессе аппроксимации каналов реакций /1/ с  $m = 1, \dots, 5$  оказалось, что сечение реакции с  $m = 5$  мало и определяется с большой погрешностью /  $\sigma = 5 \pm 10$  мкб/. Поэтому в дальнейшем вклад указанного канала пренебрегали; полученное решение характеризуется значением  $\chi^2_{\min} = 115$  при 131 степени свободы.

Для реакций /2/ использовались распределения величин  $M(\pi\pi\gamma)$ ,  $M(\pi\pi\pi\gamma\gamma)$ ,  $MM^2(\pi\pi\pi\gamma)$ ,  $MM^2(\pi\pi\gamma\gamma)$  и  $MM^2(\pi\pi\pi\gamma\gamma)$ . При учете каналов реакций с  $m = 1, \dots, 4$  в результате аппроксимации было получено значение  $\chi^2_{\min} = 79$  при 77 степенях свободы.

На рис. 1 показаны некоторые из экспериментальных распределений, использованных для определения парциальных сечений процессов /1/ и /2/. На них наложены суммарные расчетные кривые, найденные в результате аппроксимации. Внизу на рисунке показаны расчетные распределения для каналов реакций с различной множественностью  $\pi^0$ -мезонов.

Парциальные сечения процессов /1/ и /2/, определенные с помощью статистического метода, представлены в табл. 1. Они нормированы на суммарные сечения процессов /1/ и /2/, измеренные при 5 ГэВ/с с помощью метровой водородной камеры ЛВЭ ОИЯИ /8/. Приведенные в таблице погрешности учитывают, кроме статистической, погрешность измерения суммарного сечения, а также неточность определения эффективностей регистрации событий исследуемых каналов реакций. В правой части таблицы показаны для сравнения результаты определения сечений методом кинематической идентификации /1/.

\*Распределения используемых величин должны, с одной стороны, заметно менять форму с изменением числа  $\pi^0$ -мезонов в конечном состоянии, и, с другой, быть малочувствительными к модельным представлениям, использованным при вычислении расчетных распределений.

Таблица 1

КОНЕЧНОЕ СОСТОЯНИЕ		СЕЧЕНИЕ, мб	
		СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД	МЕТОД КИНЕМАТ. ИДЕНТ.
$p\pi^+\pi^-\pi^- +$	$\pi^0$	$1.910 \pm 0.180$	$1.84 \pm 0.22$
	$2\pi^0$	$1.165 \pm 0.120$	$1.17 \pm 0.23$
	$3\pi^0$	$0.700 \pm 0.060$	$0.78 \pm 0.14$
	$4\pi^0$	$0.095 \pm 0.015$	$0.08 \pm 0.05$
$n\pi^+\pi^-\pi^- +$	$\pi^0$	$1.330 \pm 0.140$	$1.21 \pm 0.17$
	$2\pi^0$	$0.685 \pm 0.100$	$0.76 \pm 0.19$
	$3\pi^0$	$0.155 \pm 0.020$	$0.21 \pm 0.06$
	$4\pi^0$	$0.010 \pm 0.005$	—

## Спектры эффективных масс

Распределения по эффективной массе ( $M$ ) двухчастичных комбинаций для событий с протоном в конечном состоянии представлены на рис. 2. Анализ спектра  $M(p\pi^+)$  /рис. 2а/ показал, что имеет место заметное образование резонанса  $\Delta^{++}(1236)$ . Экспериментальный спектр аппроксимировался суммой фоновой кривой и кривой Брейта-Вигнера в форме, предложенной Джексоном<sup>/9/</sup>. Фоновая кривая является линейной комбинацией расчетных распределений, соответствующих каналам реакций /1/ с различной множественностью  $\pi^0$ -мезонов, полученных методом Монте-Карло<sup>/2/</sup>. Расчетные распределения были сложены с учетом величин сечений и эффективностей регистрации событий отдельных каналов реакций в данных экспериментальных условиях. В результате аппроксимации была получена доля образования резонанса  $\Delta^{++}(1236)$  в процессе /1/, равная  $20 \pm 6\%$ . На рисунке сплошной кривой показана суммарная кривая, пунктиром - вклад фона.

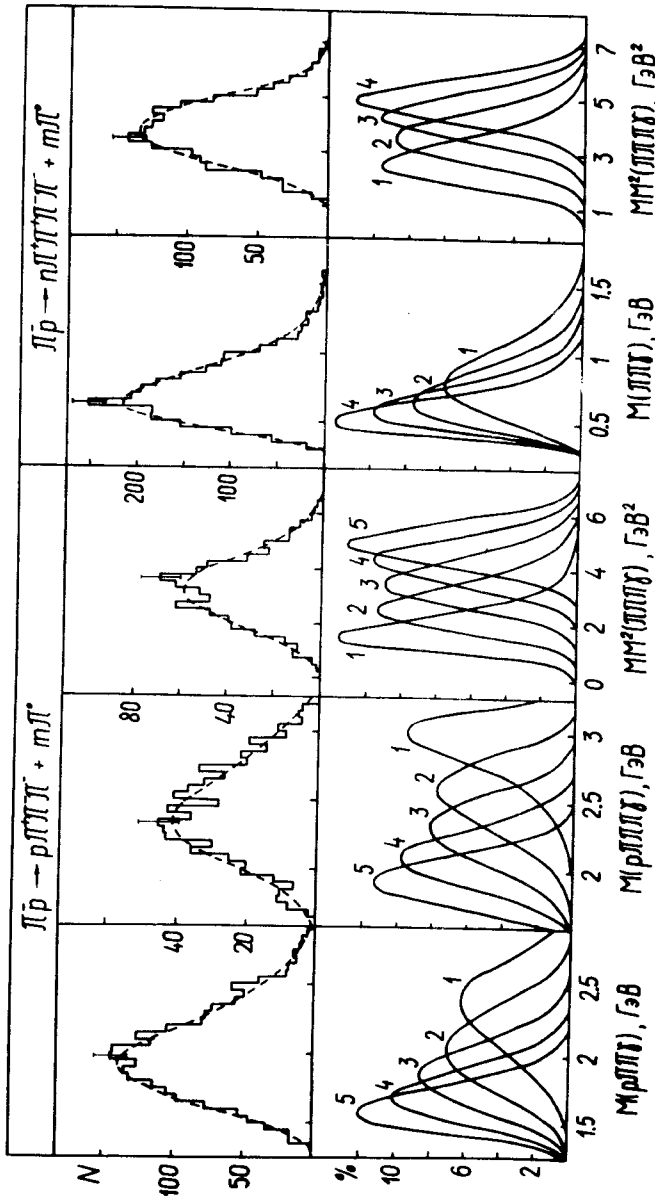


Рис. 1. Типичные распределения эффективных масс ( $M$ ) и квадрантов недостающих масс ( $MM^2$ ), использованные для определения сечений статистическим методом. На экспериментальные распределения нанесены суммарные подогранные кривые. В нижней части - соответствующие расчетные распределения для реакций с различной множественностью  $\pi^0$ -мезонов. Множественность указана цифрами у кривых.

На рис. 2б,в показаны распределения  $M(\rho\pi^-)$  и  $M(\pi^+\pi^-)$ . Заметного выхода резонансов  $\Delta^0(1236)$  и  $\rho^0$  не наблюдается. Фоновые кривые для распределений на рис. 2б - 2д построены аналогично тому, как это сделано для спектра  $M(\rho\pi^+)$ , учтено также отражение резонанса  $\Delta^{++}(1236)$ .

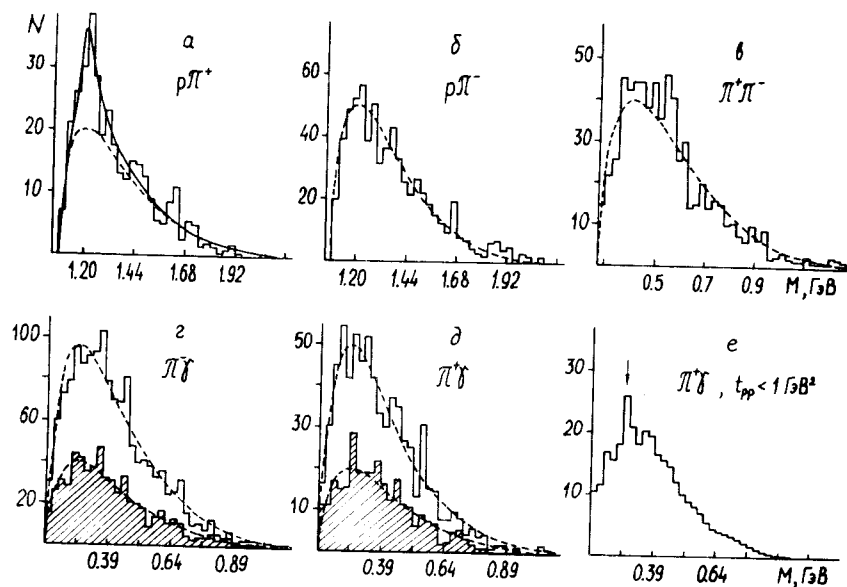


Рис. 2. Распределения эффективной массы ( $M$ ) комбинаций а/ -  $\rho\pi^+$ , б/ -  $\rho\pi^-$ , в/ -  $\pi^+\pi^-$ , г/ -  $\pi^-\gamma$ , д/ -  $\pi^+\gamma$  для событий с образованием протона. Заштрихованные распределения соответствуют событиям с переданным импульсом  $t_{pp} < 1 \text{ ГэВ}^2$  е/ - гауссограмма  $M(\pi^+\gamma)$  для событий с  $t_{pp} < 1 \text{ ГэВ}^2$ .

Были построены также спектры  $M(\pi^+\gamma\gamma)$ ,  $M(\pi^-\gamma\gamma)$ ,  $M(\pi^+\pi^-\gamma\gamma)$  для случаев, когда  $M(\gamma\gamma)$  находится в области массы  $\pi^0$ -мезона. Заметного образования резонансов  $\rho^\pm$ ,  $\omega$  также не наблюдается.

В работе<sup>/10/</sup> было получено указание на возможное существование нового мезона с массой  $270 \text{ МэВ}$ , рас-

падающегося на  $\pi$ -мезон и  $\gamma$ -квант. Распределения  $M(\pi^-\gamma)$  и  $M(\pi^+\gamma)$  для событий с протоном показаны на рис. 2г и 2д.

Превышения событий над фоновой кривой в области массы  $270 \text{ МэВ}$  не видно. Заштрихованные распределения соответствуют событиям с ограниченным переданным импульсом от мишени протону  $t_{pp} < 1 \text{ ГэВ}^2$ . Для этих событий в спектре  $M(\pi^+\gamma)$  наблюдается некоторое превышение над фоновой кривой в области массы  $270 \text{ МэВ}$ . Ввиду больших флуктуаций в данном распределении была построена гауссограмма /рис. 2е/. Превышение событий в области  $270 \text{ МэВ}$  сохраняется. Однако определенных выводов относительно существования состояния  $\pi\gamma(270)$  из-за недостаточной статистики сделать нельзя.

В событиях с образованием нейтрона в конечном состоянии заметного выхода резонансов не наблюдается. На рис. 3 представлены распределения  $M(\pi^+\pi^-)$ ,  $M(\pi^-\gamma)$  и  $M(\pi^+\gamma)$ . Они все хорошо описываются фоновыми кривыми, соответствующими реакциям /2/.

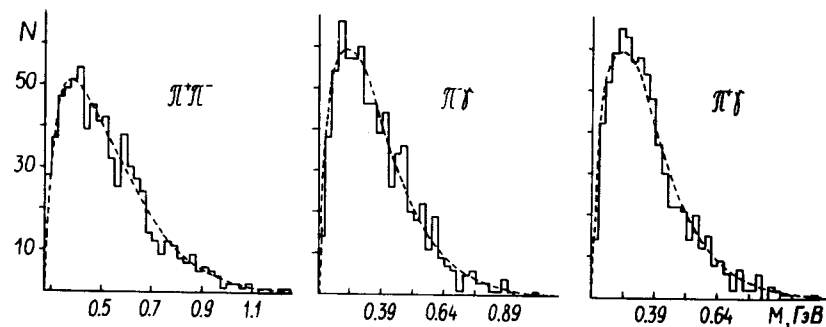


Рис. 3. Распределения эффективной массы ( $M$ ) комбинаций  $\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^-\gamma$  и  $\pi^+\gamma$  для событий с образованием нейтрона.

#### Угловые и импульсные распределения

Получены импульсные и угловые распределения заряженных вторичных частиц в процессах /1/ и /2/. На рис. 4 показаны распределения продольного импульса  $p_{\parallel}^*$ , по-

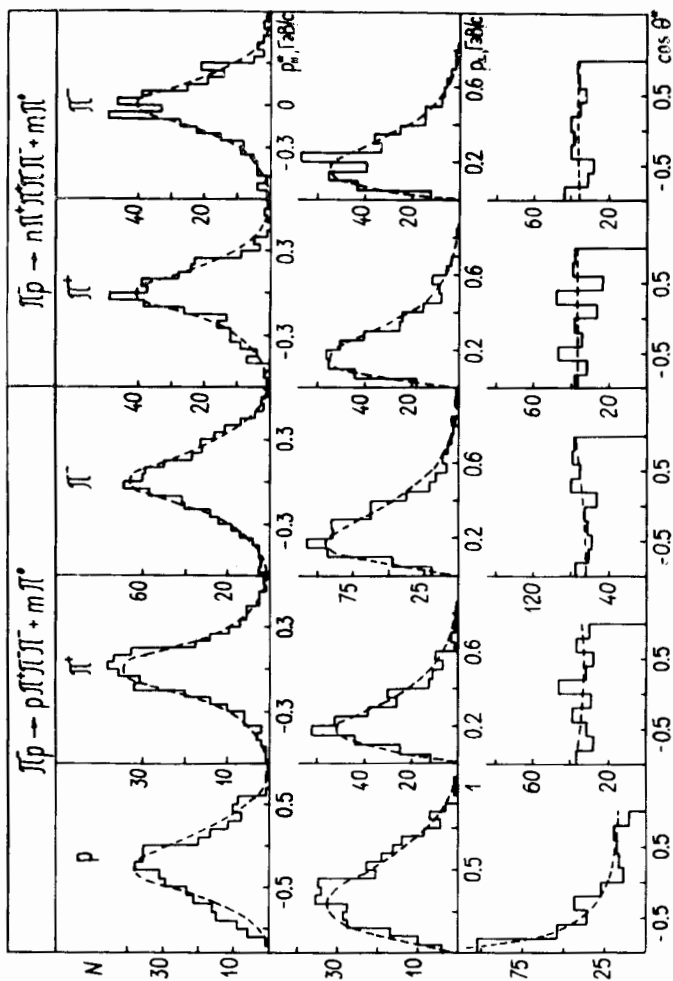


Рис. 4. Распределения заряженных вторичных частиц в процессах /1/ и /2/ по продольному ( $p_{||}^*$ ) и поперечному ( $p_{\perp}^*$ ) импульсам и по косинусу угла вылета ( $\cos \theta^*$ ) в с.ц.м. Кривые - предсказания феноменологической квазидвухчастичной анизотропной модели.

перечного импульса  $p_{\perp}$  и косинуса угла вылета  $\cos \theta^*$  в системе центра масс.

В табл. 2 представлены средние значения модуля импульса в с.ц.м.  $\langle p^* \rangle$  и поперечного импульса  $\langle p_{\perp} \rangle$ , а также коэффициенты асимметрии  $k = (\vec{n} - \hat{n}) / (\vec{n} + \hat{n})$ . Здесь  $\vec{n}(\hat{n})$  - число частиц, летящих в с.ц.м. вперед /назад/.

Таблица 2

ПРОЦЕСС	ЧАСТИЦА	$\langle p^* \rangle$ , МэВ/с		$\langle p_{\perp} \rangle$ , МэВ/с		k	
		ЭКСП.	МОДЕЛЬ	ЭКСП.	МОДЕЛЬ	ЭКСП.	МОДЕЛЬ
(1)	$p$	$599 \pm 13$	547	$397 \pm 11$	376	$-0.54 \pm 0.05$	-0.42
	$\pi^+$	$323 \pm 9$	336	$255 \pm 8$	264	$0.03 \pm 0.05$	-0.02
	$\pi^-$	$358 \pm 7$	353	$270 \pm 6$	277	$0.05 \pm 0.04$	0.04
(2)	$\pi^+$	$307 \pm 9$	312	$238 \pm 8$	245	$-0.04 \pm 0.05$	0.01
	$\pi^-$	$314 \pm 9$	312	$245 \pm 8$	245	$0.01 \pm 0.05$	0.01

Экспериментальные данные сравниваются с предсказаниями феноменологической квазидвухчастичной анизотропной /ФКА/ модели. В этой модели /см., напр., /11/ предполагается, что матричный элемент процесса  $\pi N \rightarrow N + m\pi$  определяется в основном углом вылета бариона в с.ц.м.

Предсказания модели получены путем моделирования событий с учетом особенностей эксперимента /2/. В случае процесса /1/ в расчетах учтено образование резонанса  $\Delta^{++}$  (1236) в 20% случаев. Предсказания модели на рисунке показаны пунктирными кривыми.

### Обсуждение результатов

1. Парциальные сечения процессов /1/ и /2/ были определены двумя методами - методом кинематической идентификации /1/ и статистическим методом. Как видно из табл. 1, оба метода дают согласующиеся результаты. Окончательные значения парциальных сечений, получен-

ные усреднением результатов применения обеих методик, приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$		$\pi^- p \rightarrow n \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$	
$m$	СЕЧЕНИЕ, МБ	$m$	СЕЧЕНИЕ, МБ
1	$1.890 \pm 0.160$	1	$1.300 \pm 0.130$
2	$1.170 \pm 0.120$	2	$0.710 \pm 0.090$
3	$0.715 \pm 0.060$	3	$0.160 \pm 0.020$
4	$0.095 \pm 0.015$	4	$0.010 \pm 0.005$

Значение сечения реакции  $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$  хорошо совпадает со значением  $1,94 \pm 0,04$  мб, измеренным при  $5 \text{ ГэВ/с}$  с помощью водородной камеры <sup>/8/</sup>. Это свидетельствует о корректности применения используемых нами методик.

2. Сечения реакций  $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^- + (2, 3, 4) \pi^0$  определены впервые.

3. Парциальные сечения процесса /2/ были оценены ранее при  $2,1 \text{ ГэВ/с}$  <sup>/3/</sup> и определялись при  $4 \text{ ГэВ/с}$  <sup>/4/</sup>. Данные этих работ для реакций с образованием одного и двух  $\pi^0$ -мезонов вместе с результатами настоящей работы показаны на рис. 5а. Кривые представляют предсказание эмпирической модели, предложенной в работе <sup>/12/</sup>. Зависимость сечения реакции от импульса налетающей частицы в этой модели имеет вид

$$\sigma \approx \frac{p_1^{-n}}{p_1^* \sqrt{s}} R,$$

где  $p_1(p_1^*)$  - импульс налетающей частицы в лабораторной системе /с.д.м./,  $\sqrt{s}$  - полная энергия сталкивающихся частиц в с.д.м.,  $R$  - фазовый объем.

Показатель степени  $n$ , который связан с механизмом реакции <sup>/13/</sup>, взят равным  $5/6$  для реакции с образованием  $1/2/\pi^0$ -мезонов, что соответствует средним значениям  $n$  для данных множественностей вторичных час-

тиц <sup>/12/</sup>. Из рис. 5а видно, что отношение сечений реакций с образованием двух и трех нейтральных частиц при  $4$  и  $5 \text{ ГэВ/с}$  находится в согласии с общей закономерностью, установленной на основе анализа данных о реакциях с образованием не более одной нейтральной частицы. Сечение реакции с тремя  $\pi^0$ -мезонами, значением которого при  $4 \text{ ГэВ/с}$  пренебрегали <sup>/4/</sup>, достигает при  $5 \text{ ГэВ/с}$  заметной величины.

На рис. 5б показана зависимость парциальных сечений процессов /1/ и /2/ от числа образуемых  $\pi^0$ -мезонов в сравнении с предсказаниями статистической модели <sup>/14/</sup>. Из рисунка видно, что модель качественно правильно описывает данную зависимость. В случае процесса /2/ согласие лучше, чем для процесса /1/, что, по-видимому, связано с отсутствием образования резонансов в процессе /2/.

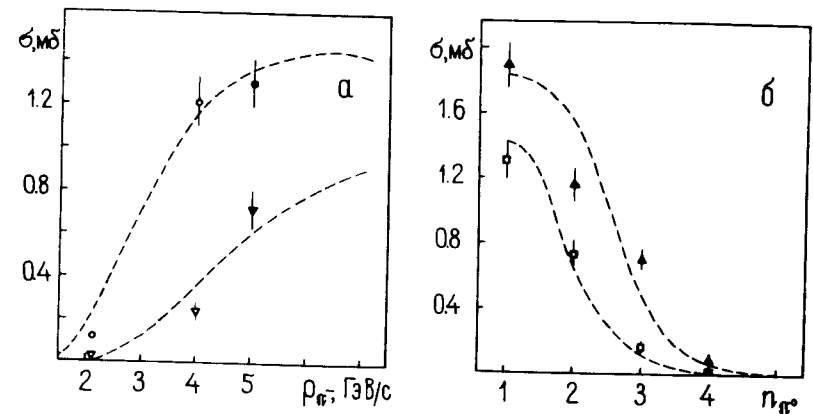


Рис. 5. а/ Зависимость сечения реакций  $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$  (o) и  $\pi^- p \rightarrow n \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0 \pi^0$  (v) от импульса налетающей  $\pi^-$ -мезона. Кривые - предсказания эмпирической модели. б/ Зависимость парциальных сечений процессов /1/ -  $\Delta$  и /2/ -  $\square$  от числа  $\pi^0$ -мезонов в конечном состоянии. Кривые - предсказания статистической модели.

5. На основе наших данных и данных работы <sup>/8/</sup> можно вычислить среднее число  $\pi^0$ -мезонов, образовавшихся



в одном не странном четырехлучевом взаимодействии. Оно равно  $\langle n_{\pi^0} \rangle = 1,10 \pm 0,04$ .

6. Результаты анализа спектров эффективных масс находятся в согласии с результатами работ при 4 ГэВ/с<sup>15/</sup> и 8 ГэВ/с<sup>16/</sup>. В процессе /2/ заметного выхода резонансов не наблюдается; в процессе /1/ наблюдается только образование резонанса  $\Delta^{++}(1236)$ . Сравнение полученной нами доли образования  $\Delta^{++}(1236)$   $20 \pm 6\%$  со значением  $18 \pm 2\%$ , полученным в работе /8/ для реакции  $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$  свидетельствует о заметном выходе резонанса  $\Delta^{++}(1236)$  и в реакциях с образованием нескольких  $\pi^0$ -мезонов.

7. Угловые и импульсные распределения заряженных вторичных частиц в процессах /1/ и /2/, как видно из рис. 4 и табл. 2, хорошо описываются в рамках простой ФКА модели. При этом для процесса /1/ учитывалось образование  $\Delta^{++}(1236)$ , что позволило описать наблюдаемое на опыте различие в импульсных и угловых распределениях  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов. Некоторое расхождение предсказаний модели с распределением  $p_{\parallel}^*$  и со значением  $\langle p^* \rangle$  для протона может быть обусловлено возможной концентрацией оставшейся среди отобранных событий процесса /1/ примеси взаимодействий первичного  $\pi^-$ -мезона с ядром углерода в области больших отрицательных значений  $p_{\parallel}^*$ .

В заключение отметим, что применение двух различных методик позволило достаточно надежно определить парциальные сечения процессов /1/ и /2/. Сравнение данных, полученных в настоящей работе, с данными других авторов, также свидетельствует о корректности использованного подхода.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить сотрудников синхрофазотрона ЛВЭ за содействие в облучении камеры, сотрудников ЛВТА за измерение событий и обработку данных на ЭВМ, а также лаборантов группы метровой пропановой камеры за просмотр событий и техническую помощь.

1. Н.С.Амаглобели и др. Сообщение ОИЯИ, P1-8699, Дубна, 1975.
2. А.Г.Володько и др. Сообщение ОИЯИ, 1-8514, Дубна, 1975.
3. J.H.Boyd et al. Phys.Rev., 166, 1458 /1968/.
4. В.Г.Гришин и др. ЯФ, 11, 1242 /1970/.
5. Ю.А.Будагов и др. ЯФ, 12, 1222 /1970/.
6. Ю.А.Будагов и др. ЯФ, 15, 1165 /1972/.
7. Ш.Валкар и др. Сообщение ОИЯИ, 13-6140, Дубна, 1971.
8. H.Böttcher et al. Rev.Roum.Phys., 19, 81 /1974/.
9. J.D.Jackson. Nuovo Cimento, 34, 1644 /1964/.
10. Ю.А.Будагов и др. ЯФ, 14, 1201 /1971/.
11. В.Г.Гришин и др. ЯФ, 14, 1071 /1971/.
12. T.Hofmohl, A.Wroblewski. Phys.Lett., 31B, 391 /1970/.
13. J.H.Hansen, W.Kittel, D.R.O.Morrison. Nucl.Phys., B25, 605 /1971/.
14. С.З.Беленький и др. УФН, 62, 1 /1957/.
15. L.Bondár et al. Nuovo Cimento, 31, 485 /1964/.
16. A.R.Dzierba et al. Phys.Rev., D2, 2544 /1970/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 апреля 1975 года.