

0-927

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



3103 / 2-76

9/III-76

P1 - 9692

Л.С.Охрименко, Я.Плюта, Б.Словинский,  
З.Стругальский

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ,  
ИСПУСКАЕМЫХ В  $\pi^-$ He - ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ПРИ 3,5 ГЭВ/С

1976

P1 - 9692

Л.С.Охрименко, Я.Плюта, Б.Словинский,  
З.Стругальский

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ,  
ИСПУСКАЕМЫХ В  $\pi^+ \text{He}$  - ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ПРИ 3,5 ГЭВ/С

*Направлено в ЯФ*

Настоящая работа является продолжением ранее начатых нами исследований характеристик протонов промежуточных кинетических энергий,  $E_k = 30 \div 150 \text{ МэВ}$ , эмиттируемых во взаимодействиях быстрых пионов с ядрами ксенона /1,2/. Эти характеристики, в частности энергетические и угловые распределения, а также множественность эмиссии, содержат полезную информацию о механизме реакции и свойствах ядерной материи /1-4/.

Данная статья содержит результаты анализа энергетических спектров протонов с  $E_k = 30 \div 200 \text{ МэВ}$ , испускаемых в реакции



$k = 1 \div 14$ , при  $3,5 \text{ ГэВ/с}$ . Работа выполнена при использовании снимков со 180-литровой ксеноновой пузырьковой камеры ИТЭФ /далее в тексте КПК/.

### 1. Метод исследования

В результате просмотра 200 тыс. снимков с КПК, облученной в пучке  $\pi^-$ -мезонов с импульсом  $3,5 \text{ ГэВ/с}$ , было отобрано 567 событий  $\pi^- \text{Xe}$ -взаимодействий, в которых наблюдалось произвольное число  $n$  гамма-квантов и один след заряженной частицы, остановившейся в камере и идентифицированной нами как протон. Эти события в дальнейшем обозначены как



$n = 0 \div 12$ . Кроме этого, был использован ранее полученный нами экспериментальный материал, состоящий

из событий  $\pi^- \text{Xe}$ -взаимодействий при 3,5 ГэВ/с, сопровождающихся эмиссией произвольного числа  $k$  протонов, а также других частиц, регистрируемых в КПК <sup>/1/</sup>. В дальнейшем эти события отмечены следующим образом:



$k=1 \div 14$ . Числа событий взаимодействий,  $N(k)$ , значения эффективных сечений  $\sigma(k)$  каналов реакций /1/ и /2/, сопровождающихся эмиссией  $k$  протонов, а также соответствующие значения средней множественности  $\langle n_p(k) \rangle$  эмиссии протонов с кинетической энергией  $E_k = 30 \div 200$  МэВ приведены в табл. 1. Значения эффективных сечений определялись согласно соотношению

$$\sigma(k) = \frac{N(k)}{N_1} \cdot \sigma_{\text{in}}^{\text{tot}}, \quad /3/$$

где  $N_1 = 1544$  - полное число событий взаимодействий типа /2/ с  $k=0 \div 14$ ,  $\sigma_{\text{in}}^{\text{tot}}$  - полное эффективное сечение всех неупругих реакций  $\sigma_{\text{in}}^{\text{tot}}(\pi^- + \text{Xe}$  при 3,3 ГэВ/с) =  $(1365 \pm 20)$  мб <sup>/5/</sup>.

Таблица 1

Числа  $N(k)$  событий  $\pi^- + \text{Xe}$  взаимодействий при 3,5 ГэВ/с, сопровождающихся эмиссией  $k$  протонов с  $E_k \geq 21$  МэВ,  $\sigma(k)$  - эффективное сечение канала реакции с данным значением  $k$ .  $\langle n_p(k) \rangle$  - средняя частота эмиссии протонов с энергией  $E_k = 30-200$  МэВ

Реакция	$k$	$N(k)$	$\sigma(k)$ , мб	$\langle n_p(k) \rangle$
$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow k p + \dots$	1+3	664	588 $\pm$ 46	1,89 $\pm$ 0,12
	4+6	381	338 $\pm$ 31	4,97 $\pm$ 0,36
	7+14	124	110 $\pm$ 15	8,06 $\pm$ 0,82
$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow p + n + \dots$ ( $n = 1 \div 14$ )	1	567	31 $\pm$ 4	0,95 $\pm$ 0,06

Минимальная длина следа вторичной заряженной частицы равняется 5 мм, что соответствует значению кинетической энергии протонов  $\sim 21$  МэВ. Использованная нами КПК является детектором типа  $4\pi$  для протонов с энергией, не превышающей 200 МэВ. Среди вторичных заряженных частиц имеется примесь  $\pi^-$ -мезонов, не превосходящая  $2 \div 3\%$ , а также дейтронов и более тяжелых частиц, составляющая примерно 10% всех зарегистрированных нами вторичных заряженных частиц, оставшихся в камере <sup>/6/</sup>.

Во всех отобранных событиях взаимодействий /1/ и /2/ измерялись длины пробегов и углы эмиссии вторичных протонов <sup>/7/</sup>. Каждому измеренному следу протона приписывался статистический вес, учитывающий эффективность регистрации коротких следов, расположенных вблизи направления оптических осей объективов фотоаппаратов. Для протонов с энергией  $E_k \approx 30$  МэВ значение этого статистического веса равнялось примерно 1,25 и приближалось к единице при  $E_k \approx 70$  МэВ. Были введены также статистические веса, учитывающие вторичные взаимодействия протонов. Их значение составляло 1 при  $E_k \approx 30$  МэВ и  $\sim 1,27$  при  $E_k \approx 200$  МэВ. Среднее значение полного статистического веса следов протонов с энергией  $E_k = 30 \div 200$  МэВ равняется 1,1. Более подробно методические вопросы, связанные с регистрацией и измерением характеристик вторичных заряженных частиц в КПК, описаны нами ранее <sup>/1/</sup>.

## 2. Экспериментальные результаты

Ниже приведены энергетические спектры протонов из реакций /1/ и /2/ в зависимости от множественности их эмиссии, определяемой числом  $k$ , и от углов эмиссии,  $\varphi$ , в лабораторной системе отсчета /лаб./-. Как и ранее <sup>/2/</sup> /-, зависимость от  $k$  выражена через релятивистски-инвариантную функцию

$$\rho(E_k) = \frac{1}{\langle n_p(k) \rangle \cdot \sigma(k) \cdot p} \frac{d^2 \sigma}{dE_k d\Omega} = \frac{1}{p \cdot \Delta E_k \cdot \Delta \Omega} \times$$

$$\times \frac{W_p(E_k, \Delta \Omega, k)}{W_p(k)} [\Gamma \Delta V^{-2} c p^{-1}], \quad /4/$$

где  $\Delta \Omega = 2\pi$ ,  $\Delta E_k = 20 \text{ МэВ}$ ,  $p$  - импульс протона в лаб.,  
 $W_p(E_k, \Delta \Omega, k)$  - сумма статистических весов протонов  
с  $E_k \in E_k \pm \Delta E_k$ , испускаемых в реакции /1/ или /2/,

$W_p(k)$  - суммарный статистический вес всех зарегистрированных протонов в реакции с данным значением  $k$ .  
Зависимость от угла эмиссии имеет вид:

$$\rho^*(E_k) = \frac{1}{\langle n_p(\cos \theta_p) \rangle \cdot \sigma_{in}^{tot} \cdot p} \frac{d^2 \sigma}{dE_k d\Omega} =$$

$$= \frac{1}{p \cdot \Delta E_k \cdot \Delta \Omega} \cdot \frac{W_p(E_k, \cos \theta_p)}{W_p(\cos \theta_p)} [\Gamma \Delta V^{-2} c p^{-1}], \quad /5/$$

где  $\Delta \Omega = 0,4\pi$ ,  $W_p(E_k, \cos \theta_p)$  - сумма статистических весов протонов с  $E_k \in E_k \pm \Delta E_k$ , эмиттируемых под углом  $\theta_p$ , так, что  $\cos \theta_p \in \cos \theta_p \pm \Delta \cos \theta_p$ ,  $\Delta \cos \theta_p = 0,2$  во всех просуммированных по числу  $k$   $\pi$ - $\text{Xe}$ -взаимодействиях.

### 2.1. Зависимость энергетических спектров протонов от множественности их эмиссии

На рис. 1 представлены значения  $\rho(E_k)$ , соответствующие протонам, эмиттируемым назад в различных по числу  $k$  классах  $\pi$ - $\text{Xe}$ -взаимодействий. Аналогичные распределения для протонов, испускаемых вперед, приведены на рис. 2. Численные значения  $\rho(E_k)$  даны в табл. 2.

Таблица 2

Значения функции  $\rho(E_k)$ , определенной формулой (4), для протонов с кинетической энергией  $E_k$ , эмиттируемых в разных по числу  $k$   $\pi$ - $\text{Xe}$  взаимодействиях,  $\theta_p$  - угол эмиссии протонов в лаб.

$\cos \theta_p$	$E_k$ (МэВ)	$k$	30+50	50+70	70+90	90+110	110+130	130+150	150+170	170+190
$\leq 0$	1		2,04±0,45	1,38±0,32	1,05±0,26	0,86±0,22	0,54±0,20	0,34±0,13	0,14±0,09	0,16±0,09
	1+3		3,34±0,34	1,39±0,19	0,74±0,12	0,50±0,11	0,33±0,08	0,28±0,07	0,16±0,06	0,12±0,04
	4+6		3,10±0,25	1,38±0,15	0,86±0,11	0,59±0,09	0,42±0,07	0,37±0,07	0,18±0,05	0,08±0,03
	7+14		3,30±0,35	1,84±0,23	0,71±0,14	0,70±0,14	0,40±0,09	0,24±0,07	0,14±0,06	0,10±0,04
	1+14		3,22±0,14	1,49±0,09	0,79±0,06	0,59±0,05	0,39±0,04	0,31±0,04	0,16±0,03	0,09±0,02
$> 0$	1		2,92±0,43	2,47±0,35	1,82±0,30	0,98±0,20	1,07±0,21	0,71±0,14	0,68±0,14	0,56±0,13
	1+3		4,68±0,44	2,58±0,30	1,66±0,24	1,35±0,20	0,96±0,15	0,81±0,12	0,57±0,09	0,35±0,08
	4+6		4,88±0,35	3,06±0,26	1,89±0,19	1,33±0,15	0,95±0,11	0,58±0,08	0,59±0,08	0,35±0,06
	7+14		4,82±0,48	2,84±0,32	1,98±0,29	1,39±0,24	0,84±0,15	0,59±0,14	0,76±0,13	0,34±0,09
	1+14		4,70±0,23	2,85±0,16	1,82±0,12	1,34±0,10	0,92±0,08	0,65±0,07	0,63±0,06	0,35±0,05

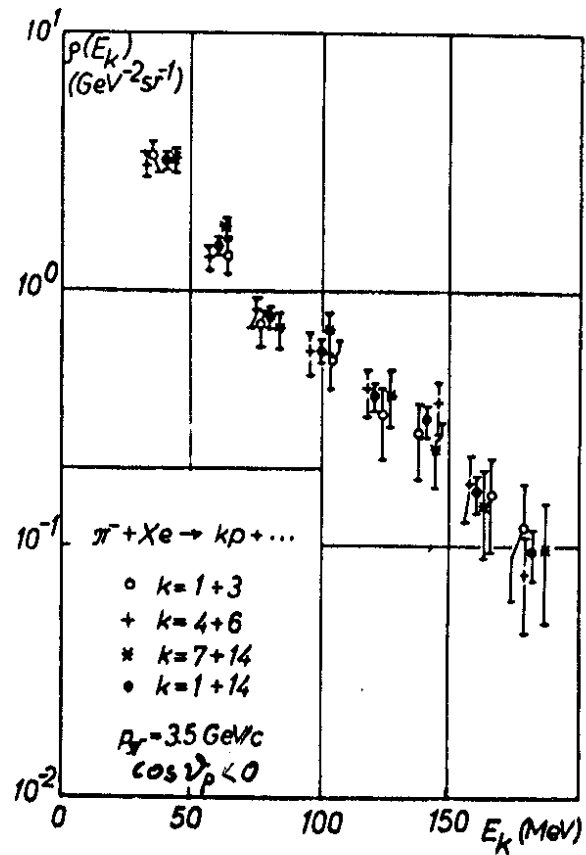


Рис. 1. Значения функции  $\rho(E_k)$ , определенной формулой /4/, для протонов, эмиттируемых назад в разных по числу  $k$  взаимодействиях  $\pi^-$ -Xe при 3,5 ГэВ/с.

Экспериментально полученная зависимость  $\rho(E_k)$  аппроксимировалась в интервале  $E_k = 30 \div 200$  МэВ экспоненциальной функцией

$$\rho(E_k) = a \cdot \exp(-E_k / \epsilon_0). \quad /6/$$

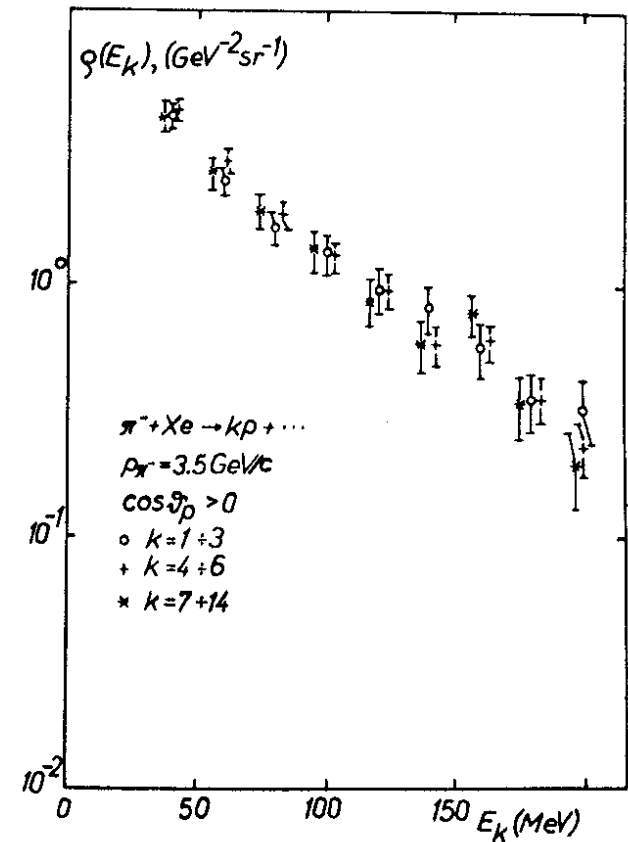


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для протонов, эмиттируемых вперед.

Значения параметров  $a$  и  $\epsilon_0$ , а также относящиеся к ним значения  $\chi^2 / n_{DF}$  /  $n_{DF}$  - число степеней свободы/ содержатся в табл. 3. В этой таблице помещены также значения  $a$ ,  $\epsilon_0$  и  $\chi^2 / n_{DF}$  для функции /6/, описывающей экспериментальные данные в интервале  $E_k = 50 \div 200$  МэВ. Видно, что в этом случае получается значительно более хорошее согласие.

Таблица 3

Значения параметров  $a$  и  $\epsilon_0$  функции (6), описывающей энергетические спектры протонов из реакции  $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \text{kp} + \dots$  при 3,5 ГэВ/с,  $k=1+14$ ,  $\Delta E$  - величина интервала энергий протонов, по которому производилось фитирование,  $\theta_p$  - угол эмиссии протона в лаб.

$\cos \theta_p$	$E_k$ (МэВ)	$k$	$a$ (ГэВ <sup>-2</sup> стер <sup>-1</sup> )	$E_0$ (МэВ)	$\chi^2/n_{st}$
$\leq 0$	30+200	1	4,61±1,08	52,2±7,1	1,8/6
		1+3	7,53±1,41	38,3±3,5	11,2/6
		4+6	6,73±0,84	42,0±2,7	13,1/6
		7+14	8,73±1,50	37,5±3,1	7,5/6
		1+14	7,61±0,65	39,6±1,2	33,7/6
$\leq 0$	50+200	1	4,99±1,60	50,5±7,3	1,7/6
		1+3	4,27±1,02	48,4±5,7	1,8/5
		4+6	4,76±0,89	48,3±4,4	4,6/5
		7+14	6,57±1,70	41,8±4,7	5,5/5
		1+14	5,02±0,53	46,9±2,4	7,6/5
$> 0$	30+200	1	4,84±0,79	76,7±9,2	4,7/6
		1+3	7,63±0,88	59,7±4,0	7,0/6
		4+6	9,67±0,83	52,2±2,3	7,6/6
		7±14	9,08±1,03	53,7±3,2	9,6/6
		1+14	8,77±0,49	54,2±1,4	16,5/6
$> 0$	50+200	1	4,72±0,98	77,9±10,9	4,7/5
		1+3	6,02±0,94	66,7±5,8	1,0/5
		4+6	8,44±1,03	55,3±3,3	4,9/5
		7+14	8,28±1,01	55,7±2,8	8,1/5
		1+14	7,45±0,59	58,0±2,1	9,8/5

Таблица 4

Значения функции  $\rho^*(E_k)$ , определенной формулой (5), для протонов с кинетической энергией  $E_k$ , эммитируемых в разных интервалах углов  $\theta_p$  в  $\pi^- \text{Xe}$  взаимодействиях типа (2) при 3,5 ГэВ/с.  $\langle n_p(\cos \theta_p) \rangle$  - средние значения частоты эмиссии протонов с  $E_k = 30+200$  МэВ.

$\cos \theta_p$	$E_k$ МэВ	30+50	50+70	70+90	90+110	110+130	130+150	150+170	170+190
-1,0±0,3	0,15±0,01	9,35±1,25	4,01±0,70	2,06±0,40	1,54±0,40	0,93±0,36	0,97±0,32	0,47±0,28	0,28±0,17
-0,8±0,6	0,15±0,01	10,95±1,15	5,66±0,75	2,53±0,45	2,25±0,41	0,96±0,25	0,68±0,18	0,36±0,14	0,31±0,12
-0,6±0,4	0,15±0,01	10,85±1,15	3,78±0,60	2,16±0,40	2,05±0,38	1,02±0,28	1,37±0,31	0,66±0,17	0,14±0,09
-0,4±0,2	0,18±0,01	9,37±1,05	5,41±0,63	2,11±0,38	1,69±0,33	1,25±0,25	0,74±0,19	0,54±0,15	0,61±0,17
-0,2±0	0,23±0,01	10,08±1,00	4,80±0,62	3,06±0,40	1,61±0,33	1,52±0,28	0,82±0,22	0,43±0,17	0,20±0,10
0	0,27±0,01	9,28±1,00	4,83±0,67	2,78±0,47	2,03±0,39	0,96±0,25	0,75±0,22	0,72±0,21	0,28±0,13
0,2±0,4	0,30±0,01	7,58±0,88	4,77±0,62	2,36±0,44	2,36±0,39	1,17±0,28	0,49±0,17	1,26±0,27	0,46±0,16
0,4±0,6	0,35±0,02	7,58±0,80	3,98±0,53	2,84±0,42	1,67±0,31	1,42±0,27	0,96±0,22	0,88±0,20	0,74±0,19
0,6±0,8	0,43±0,02	5,40±0,60	4,13±0,48	2,76±0,36	2,14±0,31	1,76±0,26	1,04±0,21	0,84±0,16	0,59±0,15
0,8±1,0	0,49±0,02	6,21±0,62	3,67±0,43	2,44±0,30	1,76±0,27	1,32±0,12	1,25±0,22	0,92±0,17	0,44±0,12

## 2.2. Зависимость энергетических распределений протонов от углов их эмиссии

На рис. 3,4 приведены значения функции  $\rho^*(E_k)$  для протонов с  $E_k = 30 \div 200$  МэВ, эмиттируемых в десяти интервалах косинуса углов эмиссии во всех исследуемых  $\pi^-$ -Xe - взаимодействиях. Численные данные представлены в табл. 4. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимировалась функцией /6/. Значения параметров  $a$  и  $\epsilon_0$ , а также соответствующих им отно-

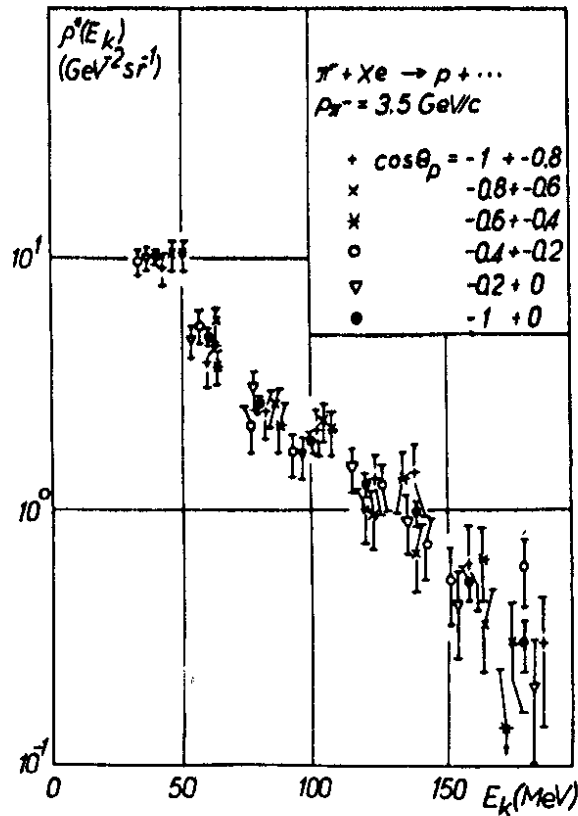


Рис. 3. Значения функции  $\rho^*(E_k)$ , определенной формулой /5/, для протонов, испускаемых под разными углами  $\Theta_p$  в реакции  $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow k p + \dots$ ,  $k=1 \div 14$  при 3,5 ГэВ.

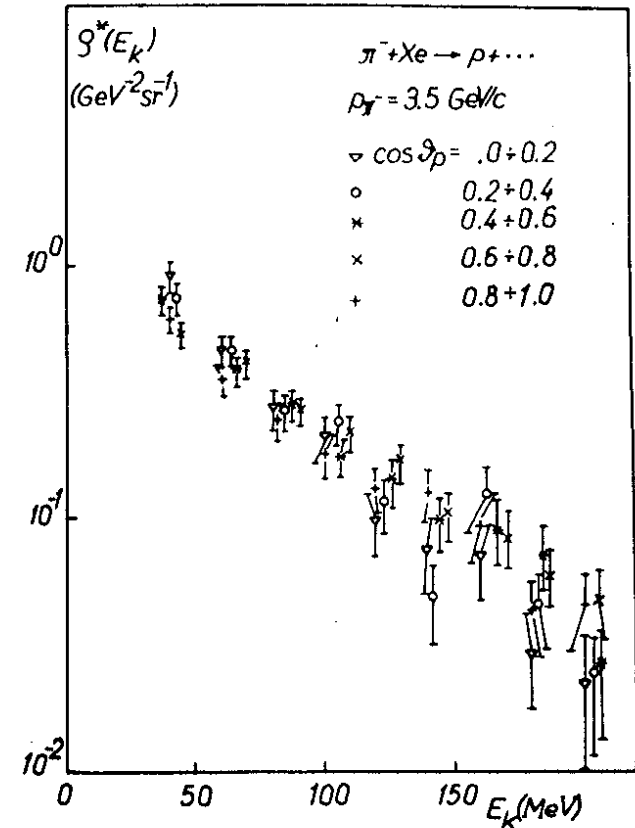


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для интервала углов эмиссии  $\Theta_p < 90^\circ$ .

шений  $\chi^2 / \nu_{\text{ДФ}}$  для двух интервалов энергий протонов,  $E_k = 30 \div 200$  МэВ и  $E_k = 50 \div 200$  МэВ, даны в табл. 5.

## 3. Обсуждение экспериментальных данных и выводы

На основании результатов проведенного анализа энергетических спектров протонов, испускаемых в  $\pi^-$ -Xe - взаимодействиях при 3,5 ГэВ/с, можно сделать следующие выводы.



Таблица 5

Значения параметров  $a$  и  $\epsilon_0$  функции (6), описывающей энергетические спектры протонов, испускаемых в разных интервалах углов эмиссии  $\theta_p$ , в  $\pi^+ \text{Xe}$  взаимодействиях при 3,5 ГэВ/с;  $\Delta E$  — интервал кинетических энергий протонов, по которому проводилось фигурование.

$\cos \theta_p$	$\Delta E = 30 \div 200 \text{ МэВ}$			$\Delta E = 50 \div 200 \text{ МэВ}$		
	$a (\text{ГэВ}^{-2} \text{ср}^{-1})$	$\epsilon_0 (\text{МэВ})$	$\chi^2/\text{н.д.ф.}$	$a (\text{ГэВ}^{-2} \text{ср}^{-1})$	$\epsilon_0 (\text{МэВ})$	$\chi^2/\text{н.д.ф.}$
-1,0±0,8	22,0±5,3	37,8±4,6	6,2/6	14,2±3,1	46,8±5,9	3,02/5
-0,8±0,6	30,8±4,9	35,7±2,6	5,1/6	24,2±5,8	38,8±3,8	3,46/5
-0,6±0,4	22,3±4,1	39,1±3,5	22,2/6	13,6±3,1	47,3±4,8	10,9/5
-0,4±0,2	21,9±3,5	40,7±3,5	14,1/6	14,1±3,3	48,9±5,4	6,8/5
-0,2±0	25,9±3,8	38,5±2,7	6,6/6	19,9±3,9	42,4±3,7	3,7/5
0 ± 0,2	22,0±3,6	41,1±3,1	4,3/6	18,0±3,9	44,3±4,1	2,8/5
0,2±0,4	17,3±2,7	45,9±3,6	13,9/6	15,7±3,5	47,7±5,1	13,2/5
0,4±0,6	13,1±1,9	54,2±4,3	9,7/6	10,1±1,9	61,1±6,1	5,3/5
0,6±0,8	10,7±1,1	61,0±3,5	5,6/7	11,2±1,5	60,6±4,1	3,9/6
0,8±1,0	9,7±0,7	68,0±4,5	12,6/7	7,8±1,1	75,6±6,4	4,6/6

1. Энергетические распределения протонов удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальной зависимостью /5/, особенно в интервале кинетических энергий  $E_k = 50 \div 100 \text{ МэВ}$ .

2. Параметр наклона в экспоненте /5/ проявляет тенденцию к увеличению при возрастании числа  $k$  вторичных протонов, эмиттируемых во взаимодействии, в случае эмиссии протонов как в заднюю, так и в переднюю полусферу.

3. Не наблюдается зависимости  $\epsilon_0$  от угла эмиссии для протонов, испускаемых назад, в то время как  $\epsilon_0$  заметно растет при уменьшении угла эмиссии протонов в переднюю полусферу.

Аналогичные выводы были нами сделаны при исследовании эмиссии протонов в  $\pi^+ \text{Xe}$  взаимодействиях при 2,34 ГэВ/с<sup>2</sup>. Следует, однако, отметить, что полученные тогда значения параметра наклона в среднем примерно на 20% ниже, чем в данной работе. К систематическому уменьшению величины  $\epsilon_0$  может привести неучет статистических весов протонов /в нашей предыдущей работе<sup>1,2</sup>/ функции  $\rho(E_k)$  и  $\rho^*(E_k)$  определялись через числа протонов/. Соответствующий анализ, выполненный в данной работе, показал, что этот эффект приводит к занижению значений  $\epsilon_0$ , не превосходящему 10%. Следовательно, некоторое увеличение параметра наклона  $\epsilon_0$  с ростом энергии  $\pi$ -мезонов, сталкивающихся с ядрами ксенона, можно объяснить тем, что явление ядерного скейлинга начинается при больших энергиях для средних и тяжелых ядер, чем для легких. Такому выводу не противоречит наблюдаемое увеличение средней множественности эмиссии вторичных частиц промежуточных и испарительных энергий /в ядерной фотозумльсии это так называемые  $h$ - и  $g$ -частицы/, испускаемых во взаимодействиях адронов с энергией 1÷3 ГэВ со средними и тяжелыми ядрами. В столкновениях с легкими ядрами, а также при большей энергии взаимодействия средняя множественность этих частиц практически постоянна.

Литература

1. Б.Словинский, З.Стругальский. Препринт ОИЯИ, P1-5592, Дубна, 1971; Б.Словинский, Б.Среднява, З.Стругальский. ЯФ, 23, вып. 2, 387/1976/; Я.Плюта, З.Стругальский. Препринт ОИЯИ, P1-7399, Дубна, 1973; Препринт ОИЯИ, P1-7730, Дубна, 1974.
2. Б.Словинский, З.Стругальский. Препринт ОИЯИ, P1-9614, Дубна, 1976.
3. А.М.Балдин, Краткие сообщения по физике АН СССР, ФИАН, 1, 36 /1971/; В книге: *High-Energy Physics and Nuclear Structure - 1975 (Santa Fe and Los Alamos), New York, 1975, p.621.*
4. Б.Словинский, Б.Среднява, З.Стругальский. Препринт ОИЯИ, P1-9350, Дубна, 1975; Препринт ОИЯИ, P1-9413, Дубна, 1975.
5. И.М.Воробьев, Г.С.Веселовский, Л.С.Новиков, Н.Н.Шишов. ЯФ, 17, 551 /1973/.
6. С.Пауэль, П.Фаулер, Д.Перкинс. Исследование элементарных частиц фотоэмульсионным методом. ИЛ, М., 1962; В.С.Барашенков, В.Д.Тонеев. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972; Ю.Д.Баяков и др. ЯФ, 18, 1246 /1973/.
7. Б.Словинский, А.Томашевич. Препринт ОИЯИ, P10-7358, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 апреля 1976 года.