

EF

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1618/2-81

30/III-81

1-80-810

Б.Словинский, Э.Мулас

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ,
ИСПУСКАЕМЫХ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

$p + \text{Xe} \rightarrow p + \dots$ ПРИ 2,34 ГэВ/с

И $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow p + \dots$ ПРИ 9 ГэВ/с

Направлено в ЯФ

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы множественного образования частиц в столкновениях быстрых адронов с атомными ядрами представляют значительный интерес как с точки зрения изучения механизма взаимодействия, так и порою весьма неожиданных свойств ядерной материи /см., например, '1' /. Несмотря на относительно большое количество накопленной экспериментальной информации, далеко не всегда можно ее считать достаточно полной и исчерпывающей. В частности, мало экспериментальных данных, касающихся протонов, испускаемых в полном интервале углов эмиссии, а также зависимости их от множественности. Кроме того, представляет интерес вопрос о систематизации эмпирической информации в виде модельного описания феноменологического типа.

В настоящей работе приведены результаты исследования энергетических спектров протонов /ЭСП/, испускаемых в реакции



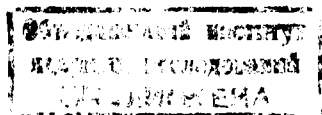
при 2,34 ГэВ/с ($k=1 \div 9$) и



при 9 ГэВ/с ($k=1 \div 17$) Экспериментальные данные получены при помощи 26-литровой ксеноновой пузырьковой камеры ОИЯИ /КПК/.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В результате просмотра 2 тысяч стереоснимков с КПК, облученной в пучке протонов с импульсом 2,34 ГэВ/с, было выбрано 508 событий типа /1/. При просмотре 15 тысяч стереоснимков КПК, облученной π^- -мезонами с импульсом 9 ГэВ/с, было отобрано 1637 событий типа /2/. Во всех выбранных событиях определялось число следов протонов с энергией $E_k \geq 30$ МэВ, останавливающихся в камере. Это означает, что верхнее значение энергии протонов $E_{k \max}$ было равно 150 \div 210 МэВ, в зависимости от угла эмиссии θ_p в лабораторной системе отсчета /л.с./, причем для $\cos \theta_p = -0,2 \div 0,2$ $E_{k \max} = 150$ МэВ, для $|\cos \theta_p| = 0,6 \div 1$ $E_{k \max} = 210$ МэВ. Нижнее значение энергии $E_k = 30$ МэВ выбрано из таких соображений, чтобы, во-первых, среди исследуемых протонов был минимальный фон от ядерно-испарительного процесса и, во-вторых, чтобы аппаратурный эффект, обусловленный взаим-



ным наложением коротких следов в проекции снимков, был пренебрежимо мал.

Во всех выбранных при просмотре случаях взаимодействия /1/ и /2/ измерялись длины пробега протонов и углы их эмиссии. По длинам пробега определялась, согласно /2/, кинетическая энергия протонов E_k . В случае реакции /1/ было измерено таким образом 1308 следов протонов; для реакции /2/ аналогичное число равно 4510.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ЭСП ОТ МНОЖЕСТВЕННОСТИ

Для описания зависимости энергетических спектров протонов, испускаемых в реакциях /1/ и /2/, от их числа k применяется, как и ранее /3/, величина

$$\rho(E_k) = \frac{1}{p \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta E} \cdot \frac{N_p(E_k, \Delta\Omega, k)}{N_p(k)} / \text{ГэВ}^{-2} \text{ ср}^{-1} / , \quad /3/$$

где p - импульс протона /в л.с./; $\Delta\Omega = 2\pi$; $\Delta E_k = 20$ МэВ; $N_p(E_k, \Delta\Omega, k)$ - число протонов с энергией E_k /в л.с./ в дан-

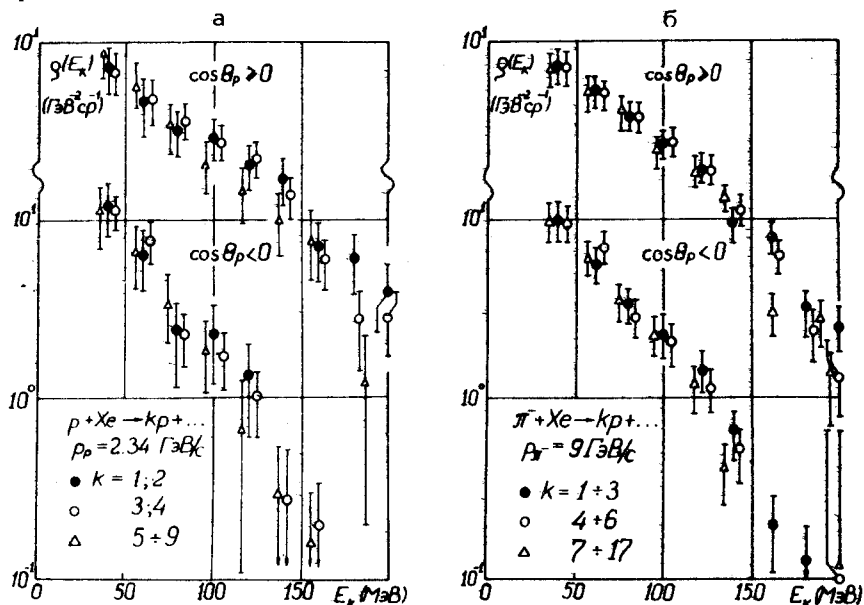


Рис.1. Зависимость величины $\rho(E_k)$, определенной на основе /3/, от кинематической энергии E_k протонов, испускаемых назад ($\cos\theta_p < 0$) и вперед ($\cos\theta_p \geq 0$) в л.с. во взаимодействиях $p + \text{Xe} \rightarrow kp + \dots$ при 2,34 ГэВ/с /а/ и $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow kp + \dots$ при 9 ГэВ/с /б/ при различных значениях числа k .

Таблица 1

Значения температуры $\epsilon_0(k)$, определенной в соотношении /5/, от числа k протонов, испускаемых назад ($\cos\theta_p < 0$) и вперед ($\cos\theta_p \geq 0$) в л.с. в реакциях /1/ и /2/

Реакция	K	$\cos\theta_p$	$\epsilon_0(K)$ /МэВ/	χ^2/n
$p + \text{Xe} \rightarrow kp + \dots$ 2 ГэВ/с	1+2	≥ 0	$72,3 \pm 19,4$	1,3/2
		< 0	$43,2 \pm 19,8$	0,9/2
	3+4	≥ 0	$65,1 \pm 12,1$	0,5/2
		< 0	$30,7 \pm 7,8$	2,2/2
	5+9	≥ 0	$44,8 \pm 7,9$	0,3/2
		< 0	$30,8 \pm 12,4$	1,2/2
1+9	≥ 0	$64,0 \pm 11,2$	0,1/2	
	< 0	$31,7 \pm 4,7$	1,6/2	
$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow kp + \dots$ 9 ГэВ/с	1+3	≥ 0	$62,7 \pm 10,2$	0,5/2
		< 0	$42,4 \pm 7,5$	0,2/2
	4+6	≥ 0	$62,7 \pm 7,9$	0,4/2
		< 0	$36,5 \pm 5,2$	1,3/2
	7+17	≥ 0	$57,9 \pm 8,8$	0,5/2
		< 0	$38,6 \pm 6,0$	0,2/2
	1+17	≥ 0	$59,8 \pm 8,9$	0,2/2
		< 0	$41,2 \pm 5,3$	0,7/2

χ^2/n - значения тестовой статистики χ^2_n при n степенях свободы. Интервал значений энергии протонов, в котором производилось фитирование экспериментальных данных формулой /5/, $E_k = /50 \div 130/$ МэВ.

ном интервале ΔE_k ; $N_p(k)$ - число всех протонов с $E_k \geq 30$ МэВ. Эта величина следующим образом связана с релятивистским инвариантным эффективным сечением /РИЭС/ $E_t \cdot \frac{d^3\sigma}{dp^3}$ / E_t - полная энергия в л.с./:

$$\rho(E_k) = \frac{1}{\sigma(k) < n_p(k) >} \cdot E_t \int \frac{d^3\sigma}{dp^3} d\Omega , \quad /4/$$

где $\sigma(k)$ - эффективное сечение взаимодействия /1/ и /2/; $< n_p(k) >$ - среднее значение числа испускаемых протонов с $E_k \geq 30$ МэВ в этих взаимодействиях.

На рис.1а,б показаны полученные значения величины $\rho(E_k)$ при различных числах k протонов, испускаемых вперед: $\cos\theta_p \geq 0$, и назад: $\cos\theta_p < 0$ /в л.с./, в реакциях /1/ и /2/ соответственно. Эти значения можно описать, как и ранее /3/, зависимостью

$$\rho(E_k) = a \cdot \exp(-E_k / \epsilon_0(k)). \quad /5/$$

Здесь a и $\epsilon_0(k)$ - параметры, получаемые путем статистической подгонки.

Зависимость параметра $\epsilon_0(k)$, часто называемого температурой, от числа k протонов, испускаемых назад ($\cos\theta_p < 0$) и вперед ($\cos\theta_p \geq 0$) в реакциях /1/ и /2/, иллюстрируют графически рисунки 2а ($\cos\theta_p < 0$) и 2б ($\cos\theta_p \geq 0$). Соответствующие численные данные помещены в табл.1. На рис.2а показаны также

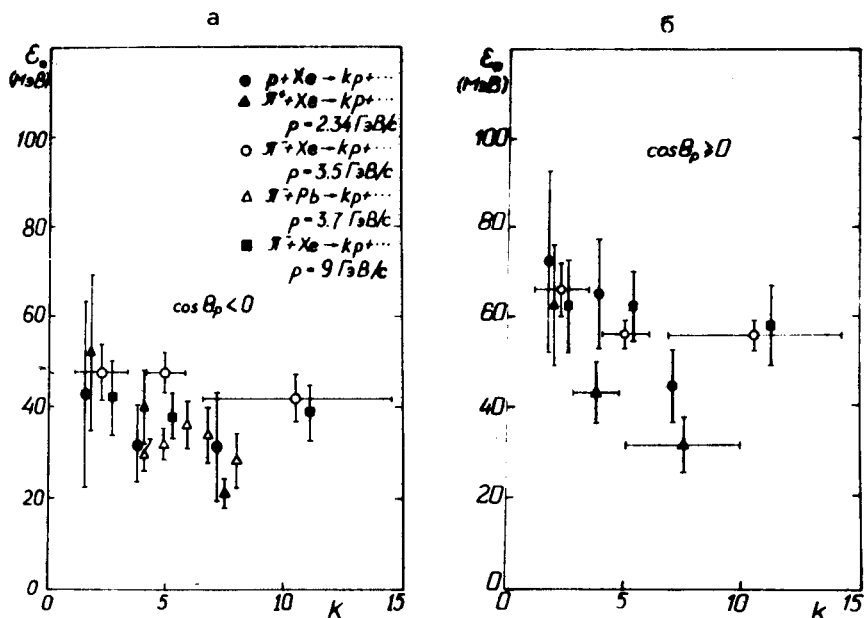


Рис.2. Зависимость параметра ϵ_0 функции /5/ от числа k протонов с энергией $E_k = 150 \div 130$ МэВ, испускаемых назад, $\cos\theta_p < 0$ /а/, и вперед, $\cos\theta_p \geq 0$ /б/, в реакциях $p + Xe \rightarrow kp + \dots$ при 2,34 ГэВ/с и $\pi^- + Xe \rightarrow kp + \dots$ при 9 ГэВ/с. Приведены также результаты, относящиеся к протонам из реакций: $\pi^+ + Xe$ при 2,34 ГэВ/с /3/, $\pi^- + Xe$ при 3,5 ГэВ/с /3/ и $\pi^- + Pb$ при 3,7 ГэВ/с /4/.

экспериментальные данные, полученные при исследовании реакции $\pi^- + Pb \rightarrow kp + \dots$ при 3,7 ГэВ/с /4/, а также $\pi^+ + Xe \rightarrow kp + \dots$ при 2,34 ГэВ/с и $\pi^- + Xe \rightarrow kp + \dots$ при 3,5 ГэВ/с /3/. Следует подчеркнуть, что приведенные результаты получены при фитировании зависимости от E_k величины $\rho(E_k)$, определенной на основе /3/, в интервале $E_k = 150 \div 130$ МэВ, что позволяет более адекватно сравнивать их с аналогичными результатами других авторов /см., например, /5,6/ /.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРОТОНОВ ОТ УГЛОВ ЭМИССИИ

Зависимость ЭСП от углов θ_p эмиссии протонов в л.с. представлена в виде функции /3/

$$\rho^*(E_k) = \frac{1}{p \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta E_k} \cdot \frac{N_p(E_k, \cos\theta_p)}{N_p(\cos\theta_p)} / \text{ГэВ}^{-2} \text{ ср}^{-1} /, \quad /6/$$

где $N_p(E_k, \cos\theta_p)$ - число протонов с энергией E_k , заключенной в данном интервале ΔE_k , и косинусом угла эмиссии в интервале $\Delta \cos\theta_p = 0,4$ для реакции /1/ и $\Delta \cos\theta_p = 0,2$ в случае реакции /2/; $N_p(\cos\theta_p) = \sum_{E_k} N_p(E_k, \cos\theta_p)$. Эта функция следующим образом связана с РИЭС:

$$\rho^*(E_k) = \frac{1}{\sigma_{in} \langle n_p(\cos\theta_p) \rangle} \cdot E_t \int \frac{d^3\sigma}{dp^3} d\Omega, \quad /7/$$

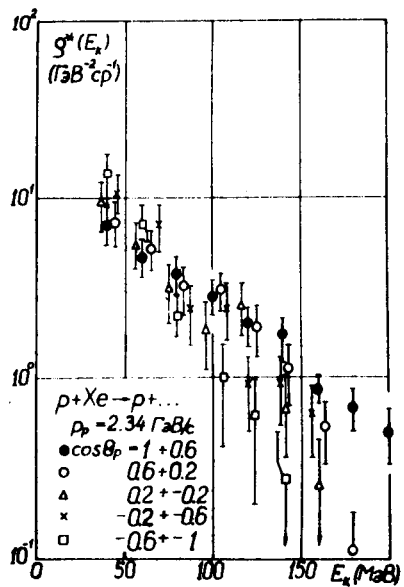
где $\langle n_p(\cos\theta_p) \rangle$ - среднее значение частоты эмиссии протонов с $E_k \geq 30$ МэВ, для которых $\cos\theta_p \leq \Delta \cos\theta_p$; σ_{in} - полное сечение неупругих взаимодействий протонов и π^- -мезонов с ядрами ксенона соответственно для реакции /1/ и /2/.

Измеренные значения величины $\rho^*(E_k)$ показаны на рис.3а-в для реакции /1/ и /2/. Эти значения также оказалось возможным описать при помощи простой модели:

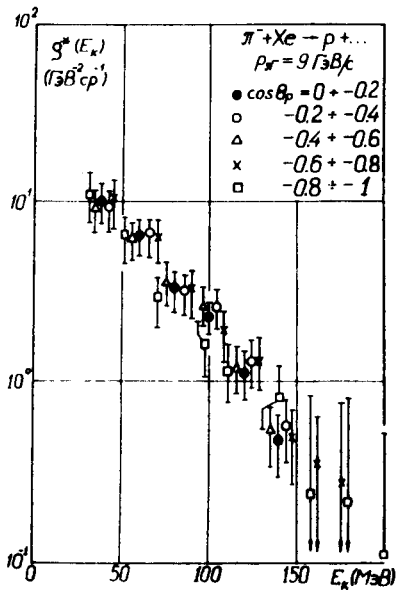
$$\rho^*(E_k) = a^* \cdot \exp(-E_k / \epsilon_0^*(\theta)), \quad /8/$$

где a^* и $\epsilon_0^*(\theta)$ - параметры, определяемые при фитировании экспериментальных данных.

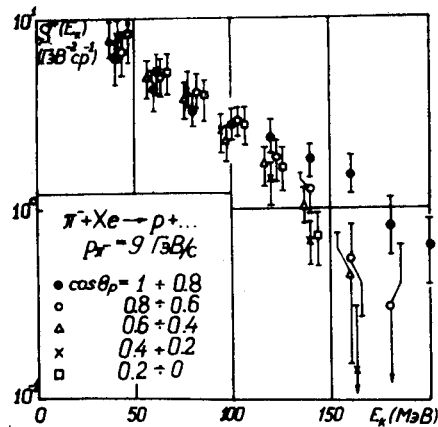
В результате проведенного статистического анализа получены численные значения температуры $\epsilon_0^*(\theta)$, соответствующие различным угловым интервалам $\Delta \cos\theta_p$ протонов, испускаемых во взаимодействиях /1/ и /2/. Они приведены на рис.4 и в табл.2,3. На рис.4 нанесены также аналогичные данные, относящиеся к реакциям: $\pi^+ + Xe$ при 2,34 ГэВ/с /3/, $\pi^- + Xe$ при 3,5 ГэВ/с /3/ и $\pi^- + C$ при 5 ГэВ/с /7/.



а



б



в

Рис.3. Зависимость величины $\overline{\rho^*(E_k)}$, определенной на основе /8/, от кинетической энергии E_k протонов, испускаемых в различных интервалах углов θ_p эмиссии протонов, в реакциях: $p + Xe \rightarrow p + \dots$ при 2,34 ГэВ/с /а/; $\pi^- + Xe \rightarrow p + \dots$ при 9 ГэВ/с и углах θ_p эмиссии протонов, для которых $\cos \theta_p < 0$ /б/; $\pi^- + Xe \rightarrow p + \dots$ при 9 ГэВ/с и углах θ_p эмиссии протонов, для которых $\cos \theta_p \geq 0$ /в/.

Рис.4. Зависимость параметра ϵ_0 функции /8/, описывающей энергетические спектры протонов из реакций $p + Xe$ при 2,34 ГэВ/с и $\pi^- + Xe$ при 9 ГэВ/с, от угла θ_p эмиссии протонов в л.с. Энергетические интервалы, по которым определялись значения ϵ_0 , указаны в табл.2,3.

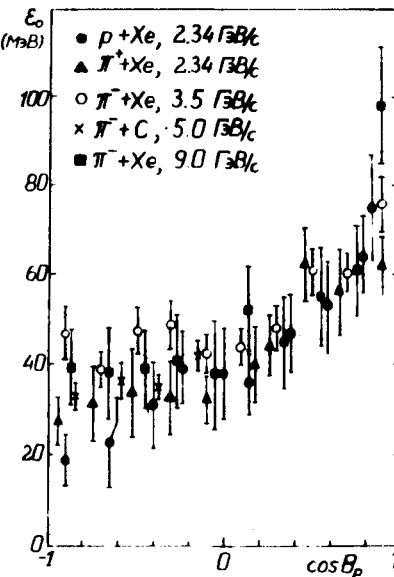


Таблица 2

Значения температуры $\epsilon_0^*(\theta)$, определенной формулой /8/, соответствующие различным угловым интервалам $\Delta \cos \theta_p$ протонов, испускаемых в реакции /1/ и имеющих энергию в интервале ΔE_k

$\Delta \cos \theta_p$	$\Delta E_k / \text{МэВ/}$	$E_0^*(\theta_p) / \text{МэВ/}$	χ_n^2/n
1+0,8	50+150	75,8 \pm 11,8	0,8/3
0,8+0,6	50+130	63,9 \pm 7,9	0,2/2
0,6+0,4	50+130	53,1 \pm 10,8	0,6/2
0,4+0,2	50+130	47,1 \pm 8,5	0,7/2
0,2+0	50+110	36,0 \pm 6,0	0,2/1
0+-0,2	50+110	37,6 \pm 9,7	0,3/1
-0,2+-0,4	50+130	39,3 \pm 7,6	0,2/2
-0,4+-0,6	50+130	30,5 \pm 9,8	1,0/2
-0,6+-0,8	50+130	23,0 \pm 9,2	0,1/2
-0,8+-1	50+150	18,8 \pm 5,1	1,1/3

χ_n^2/n - значения тестовой статистики χ_n^2 при n степенях свободы.

Таблица 3

Значения температуры $\epsilon_0^*(\theta)$, определенной формулой /8/, соответствующие различным угловым интервалам $\Delta \cos \theta_p$ протонов, испускаемых в реакции /2/ и имеющих энергию в интервале ΔE_k

$\Delta \cos \theta_p$	ΔE_k /МэВ/	$\epsilon_0^*(\theta_p)$ /МэВ/	χ^2/n
1±0,8	50±150	98,4±12,8	0,2/3
0,8±0,6	50±130	60,4±9,7	0,5/2
0,6±0,4	50±130	55,0±10,8	0,3/2
0,4±0,2	50±130	44,7±9,8	0,8/2
0,2±0	50±110	53,0±9,2	0,3/1
0± -0,2	50±110	38,5±12,0	0,3/1
-0,2± -0,4	50±130	41,1±9,7	0,9/2
-0,4± -0,6	50±130	38,9±8,6	0,6/2
-0,6± -0,8	50±130	37,8±9,9	0,4/2
-0,8± -1	50±150	38,9±8,2	1,0/3

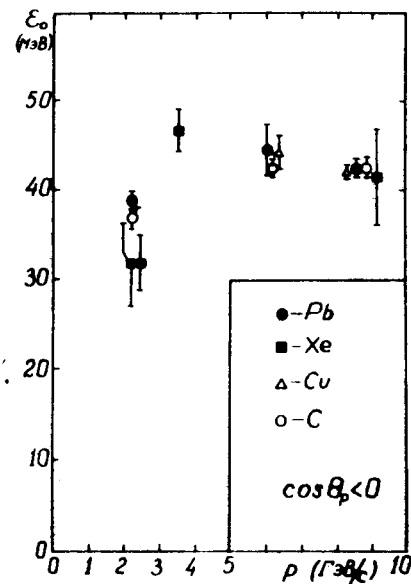
χ^2/n - значения тестовой статистики χ^2_n при n степенях свободы.

Данные настоящей работы касаются интервала кинетической энергии протонов $E_k > 50$ МэВ, согласно упомянутым выше соображениям. Верхнее значение этого интервала указано в табл.2,3.

5. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭСП ОТ ЭНЕРГИИ

В рамках феноменологического описания экспериментальных данных, касающихся энергетических спектров протонов, испускаемых в заднюю полусферу в столкновениях быстрых адронов с атомными ядрами, представляет интерес зависимость температуры ϵ_0' от энергии первичного адрона, инициирующего реакцию. Такая зависимость, вытекающая из данных, полученных в настоящей работе, а также из более ранних результатов /3/, показана на рис.5. При этом параметр ϵ_0' усреднен по всем значениям числа k протонов с энергией $E_k = 50 \pm 130$ МэВ, испускаемых в заднюю полусферу ($\cos \theta_p < 0$) в л.с. На этом же рисунке нанесены значения ϵ_0' , относящиеся к протонам, испускаемым под углом $\theta_p = 162^\circ$ /в л.с./ из ядер С, Сu и Рb, облученных протонами

Рис.5. Зависимость параметра ϵ_0' функции $\sim \exp(-E_k/\epsilon_0')$, описывающей энергетические спектры протонов, испускаемых в заднюю полусферу /в л.с./, в реакциях $p + Xe \rightarrow p + \dots$ при 2,34 ГэВ/с и $\pi^- + Xe \rightarrow p + \dots$ при 9 ГэВ/с, от импульса p адрона, инициирующего взаимодействие.



с импульсом 2,2; 6 и 8,5 ГэВ/с /6/. Можно заметить, что при достигнутой точности экспериментальных данных величина ϵ_0' не зависит от импульса p адрона, вызывающего взаимодействие, по крайней мере для $p \geq 3,5$ ГэВ/с. Нельзя также говорить о зависимости ϵ_0' ни от ядра-мишени в широком интервале изменения массового числа (С, Сu, Хе, Рb), ни от природы первичного адрона / π^\pm -мезоны, протоны/.

6. ВЫВОДЫ

Полученные в настоящей работе результаты исследования энергетических спектров протонов, испускаемых во взаимодействиях $p + Xe \rightarrow kp + \dots$ при 2,34 ГэВ/с и $\pi^- + Xe \rightarrow kp + \dots$ при 9 ГэВ/с, а также аналогичные результаты других работ /3,6,7/, дают основание сделать следующие заключения:

1. Энергетические спектры протонов удовлетворительно описываются простой феноменологической формулой:

$$E_t \frac{d^3\sigma}{dp^3} = a \cdot \exp(-E_k/\epsilon_0'), \quad /9/$$

независимо от угла их эмиссии /в л.с./.

2. Параметр ϵ_0' не зависит от числа k протонов, испускаемых в заднюю полусферу /в л.с./, начиная с энергии первичного пиона ~ 3 ГэВ.

3. Параметр ϵ_0' , определяющий наклон энергетических спектров протонов, излучаемых в заднюю полусферу в л.с., независимо

от множественности их эмиссии, не меняется с изменением энергии налетающих адронов, начиная с ~ 3 ГэВ. Сопоставление наших данных с результатами других работ ^{/3,6,7/} позволяет обобщить этот вывод следующим образом: не наблюдается зависимости параметра ϵ'_0 ни от ядра-мишени, ни от вида адрона, инициирующего реакцию.

В заключение целесообразно отметить, что обнаруженный факт существования единого описания энергетических спектров протонов, испускаемых во взаимодействиях /1/ и /2/, независимо от множественности и в особенности угла их эмиссии, а также от ядра-мишени, вида и энергии адрона, вызывающего взаимодействие, указывает на то, что экспоненциальный спад инвариантных сечений /9/ нельзя считать отличительным признаком какого-то выделенного класса ядерных реакций ^{/1/}. Для выявления взаимодействия такого рода необходимо, по-видимому, использовать методы многомерного корреляционного анализа с привлечением более полной экспериментальной информации об этих процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянов В.К., Титов А.И. ЭЧАЯ, 1979, 10, вып.4, с.815; Ставинский В.С. ЭЧАЯ, 1979, 10, вып.5, с.949; Лексин Т.А. В кн.: Элементарные частицы. Третья школа физики ИТЭФ, вып.2. Атомиздат, М., 1975, с.5-17.
2. Мулас Э. и др. ОИЯИ, 10-80-612, Дубна, 1980.
3. Словинский Б., Стругальский З. ОИЯИ, P1-9614, Дубна, 1976; Охрименко Л.С. и др. ОИЯИ, P1-9692, Дубна, 1976; ОИЯИ, P1-9806, Дубна, 1976.
4. Арефьев А.В. и др. Препринт ИТЭФ-189, М., 1975.
5. Slowinski B. Rep. of the Inst. of Phys., Warsaw Technical University, No.17, Warsaw, 1977.
6. Бургов Н.А. и др. ЯФ, 1979, 30, вып.3/9/, с.721.
7. Будагов Ю.А. и др. ОИЯИ, P1-8977, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 декабря 1980 года.