

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3339/83

24/6-83

P1-83-201

Э.Мулас, Б.Словинский\*

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ  
ПРОТОНОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ  
И БЫСТРЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ,  
ИСПУСКАЕМЫХ  
В СТОЛКНОВЕНИЯХ  $\pi$ -МЕЗОНОВ И ПРОТОНОВ  
С АТОМНЫМИ ЯДРАМИ  
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 1,6-10,5 ГэВ

---

\* Институт физики Варшавского технического университета



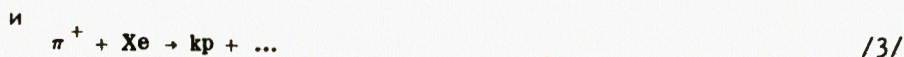
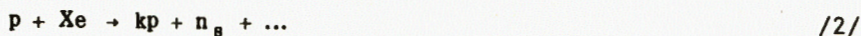
## I. ВВЕДЕНИЕ

Множественность вторичных частиц, образованных в адрон-ядерных взаимодействиях, является простейшей экспериментально определяемой характеристикой этих взаимодействий, которая содержит ценную информацию о механизме образования частиц. Существует ряд формул, полученных при различных предположениях о процессе взаимодействия, которые претендуют на описание распределений по множественности вторичных релятивистских частиц, в особенности в области энергий, близких к асимптотической /см., например,<sup>1-3//</sup>. В значительно меньшей степени изучен в этом отношении интервал промежуточных энергий сталкивающихся частиц /  $\geq 1$  ГэВ/. Относительно немного данных имеется также о распределении по множественности протонов, испускаемых в реакциях типа



при энергии  $\geq 1$  ГэВ и энергиях вторичных протонов, превышающих некое значение, условно называемое испарительным барьером /  $\geq 30$  МэВ/. Вместе с тем взаимодействия типа /1/ вызывают постоянный интерес как в экспериментальном, так и в теоретическом отношении, в частности с точки зрения выяснения коллективных свойств ядерной материи /см., например,<sup>4/ /</sup>.

В настоящей работе приведены результаты анализа распределений по числу  $k$  вторичных протонов, числу  $N_3$  вторичных заряженных частиц и  $n_g$  - быстрых вторичных заряженных частиц /  $\beta > 0,37/$ , испускаемых во взаимодействиях



при 2,34 ГэВ/с,



при 5 ГэВ/с,



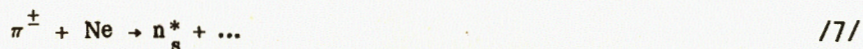
при 9 ГэВ/с. Энергия  $E$  протонов заключена в интервале  $E = /50 - 150/$  МэВ в случае реакции /2/ и  $E = /30-150/$  МэВ для реакций /3/ и /5/. Частицы, отнесенные к числу  $n_g$ , - это в основном



заряженные пионы и протоны с энергией  $E > 150$  МэВ. Нами использованы также данные, относящиеся к реакции



при 4 ГэВ/с <sup>/5/</sup> и реакции



при 10,5 ГэВ/с <sup>/8/</sup>. Здесь  $\pi_s^*$  - заряженные релятивистские частицы, в основном  $\pi^-$ -мезоны с  $\beta > 0,7$ .

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В качестве исходного эмпирического материала были использованы снимки с 26-литровой ксеноновой пузырьковой камеры ОИЯИ /КПК/, облученной в пучках протонов с импульсом 2,34 ГэВ/с %,  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 5 и 9 ГэВ/с. При просмотре снимков отбирались события типа /2/, /4/ и /5/, причем к числу  $k$  вторичных протонов относились все следы заряженных частиц, останавливающихся в камере без видимого признака вторичного взаимодействия или распада /например,  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ /. Длина этих следов была заключена в интервале значений  $R = /8,2 \div 132/$  мм. Следовательно, кинетическая энергия протонов заключена в интервале значений  $E = /50-150/$  МэВ в случае реакции /2/. Для взаимодействий /5/ этот интервал равен  $E = /30 \div 150/$  МэВ. Такие протоны КПК регистрирует в пределах полного угла эмиссии. Доля более тяжелых частиц /дейтроны, ядра трития,  $\alpha$ -частицы/ не превышает 10%.

## III. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ЧИСЛУ ПРОТОНОВ

На рис.1 и 2 приведены распределения по числу  $k$  протонов, испускаемых во взаимодействиях /2/ и /5/ соответственно. Там же представлены результаты расчета по каскадно-испарительной модели /КИМ/ <sup>/7/</sup>. Можно сделать вывод, что на уровне значимости 0,1 результаты КИМ не противоречат экспериментальным данным. Кроме того, были проанализированы следующие гипотезы:

$$W(k) = A \cdot \exp(-k/\lambda), \quad /8/$$

\*В действительности из-за ионизационных потерь пучковых частиц внутри камеры, составляющих в среднем 150 МэВ, этот импульс соответственно меньше: 2,2 ГэВ/с.

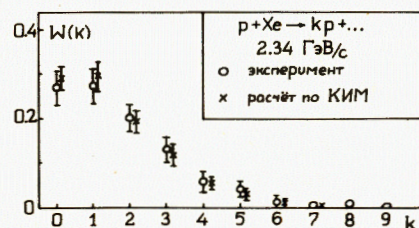


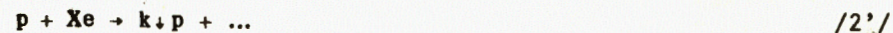
Рис.1. Распределение числа  $k$  протонов с энергией  $E = /50 - 150/$  МэВ, испускаемых во взаимодействиях  $p + \text{Xe} \rightarrow kp + \dots$  при 2,34 ГэВ/с. Крестиками нанесены соответствующие данные, полученные по КИМ <sup>/7/</sup>.

$$W(k) = A \cdot \exp(-k^2/2\lambda^2), \quad /9/$$

$$W(k) = A \cdot k \cdot \exp(-k^2/2\lambda^2), \quad /10/$$

где параметр  $\lambda$  определяется при статистическом оценивании,  $A$  - коэффициент пропорциональности. Оказалось, что наиболее предпочтительной для всего интервала чисел  $k$ , т.е.  $k \geq 0$ , является гипотеза /9/. Следует, однако, подчеркнуть, что если исключить события с  $k = 0$  и  $k = 1$ , которые соответствуют в основном так называемым квазисвободным взаимодействиям <sup>/8/</sup>, то гипотезы /8-10/ становятся неразличимыми для полученной нами выборки экспериментальных данных. Можно также отметить, что согласно оценкам, выполненным по КИМ, доля протонов с энергией  $E > 150$  МэВ, испускаемых во взаимодействиях /2/ и /5/, составляет 11% и 21% соответственно и добавление этих протонов практически не меняет вида распределения  $W(k)$ .

Представляет интерес распределение числа  $k$ , протонов, вылетающих в заднюю полусферу в лабораторной системе отсчета /лаб./ в изученных нами взаимодействиях /см., например, <sup>/4/</sup> /:



при 2,34 ГэВ/с,  $E = /50-150/$  МэВ,



при 9 ГэВ/с,  $E = /30-150/$  МэВ.

Соответствующие распределения приведены на рис.3. Следует при этом добавить, что в рассматриваемых энергетических интервалах

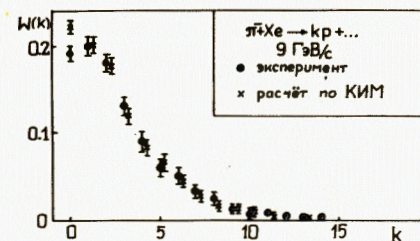


Рис.2. То же, что на рис.1, но для реакции  $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow kp + \dots$  при 9 ГэВ/с. Энергия протонов  $E = /30-150/$  МэВ.



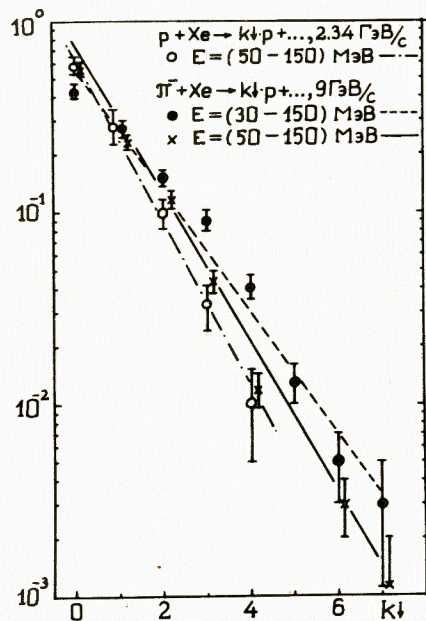


Рис.3. Распределение числа  $k_+$  протонов, испускаемых назад в лаб. в реакциях  $p + Xe \rightarrow k_+ p + \dots$  при 2,34 ГэВ/с и  $\pi^- + Xe \rightarrow k_+ p + \dots$  при 9 ГэВ/с. Прямыми линиями изображены соответствующие значения аппроксимирующей функции /11/.

содержится 97% протонов из реакции /2'/ и 96% - из реакции /5'/\*. На этом же рисунке показано распределение по числу протонов, испущенных назад в лаб. в реакции /5'/, энергетический интервал которых совпадает с соответствующим энергетическим интервалом протонов из реакции /2'/\*. Можно видеть, что эти спектры не различаются значительно между собой и удовлетворительно описываются функцией

$$W(k_+) = A \cdot \exp(-k_+ / \lambda).$$

/11/

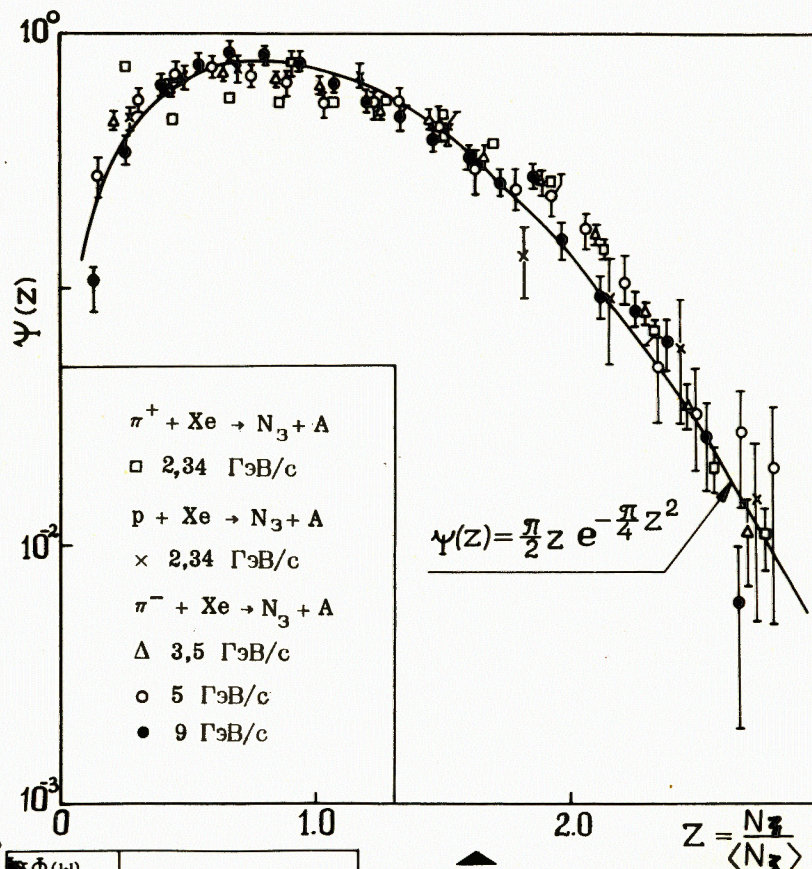
Здесь параметр  $\lambda$  определяется при статистическом анализе экспериментальных данных. Численные значения для этого параметра и соответствующие им значения тестовой статистики  $\chi_n^2/n$  даны в табл.1.

Таблица 1

Значения параметра  $\lambda$  функции /11/, описывающей распределение по числу  $k_+$  протонов с энергией  $E$ , испускаемых во взаимодействиях /2/ и /5/ в заднюю полусферу в лабораторной системе отсчета

Реакция	$\lambda$	$\chi_n^2/n$
$pXe \rightarrow k_+ p + \dots$ $E = /50-150/ \text{ МэВ}$	$1,03 \pm 0,06$	2,0/4
$\pi^- Xe \rightarrow k_+ p + \dots$ $E = /30-150/ \text{ МэВ}$	$1,39 \pm 0,17$	12,4/7
$E = /50-150/ \text{ МэВ}$	$1,11 \pm 0,09$	10,2/6

\*/ Соответствующие оценки получены по КИМ.



$$\Psi(z) = \frac{\pi}{2} z e^{-\frac{\pi}{4} z^2}$$

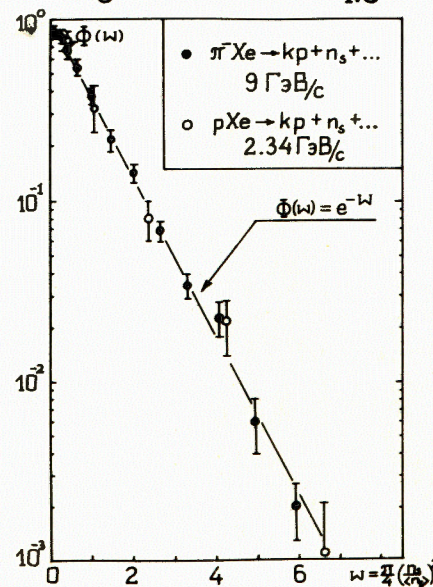


Рис.4. Распределения по числу  $N_3$  вторичных заряженных частиц, испускаемых во взаимодействиях протонов и  $\pi^\pm$ -мезонов с ядрами ксенона в интервале импульсов 2,34-9 ГэВ/с. Кривая рассчитана по формуле КНО /12/.

Рис.5. Распределения по числу  $\beta$  быстрых  $/\beta > 0,37/$  заряженных частиц, образованных во взаимодействиях  $pXe$  при 2,34 ГэВ/с и  $\pi^- Xe$  при 9 ГэВ/с. Прямая рассчитана по формуле КНО /13/.



#### IV. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ЧИСЛУ $N_3$ И $n_s$

Известно, что распределения по числу вторичных релятивистских частиц, испускаемых во взаимодействиях быстрых адронов, в том числе и релятивистских атомных ядер, удовлетворительно описываются функцией КНО<sup>1/</sup> и ее модификациями /например, <sup>12/</sup> /.

На рис.4 показаны распределения по числу  $N_3$  всех вторичных заряженных частиц, испускаемых в реакциях /2/-/5/. Там же приведены значения функции КНО:

$$\psi(z) = \frac{\pi z}{2} \exp\left(-\frac{\pi}{4} z^2\right), \quad /12/$$

где  $z = N_3 / \langle N_3 \rangle$ ,  $\langle N_3 \rangle$  - среднее значение  $N_3$ . Можно заметить, что функция /12/ качественно отображает полученные экспериментальные данные. Однако выполненный статистический анализ показал, что гипотезу /12/ следует отклонить на уровне значимости 0,2.

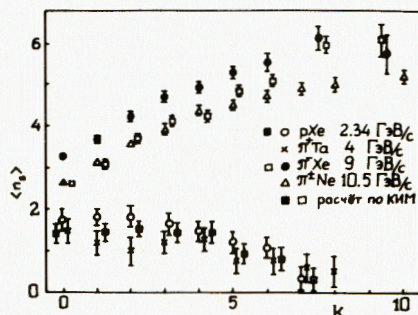
На рис.5 показано распределение по числу  $n_s$  быстрых  $/\beta > 0,37/$  заряженных частиц, испускаемых в реакциях /2/ и /5/. Там же приведены значения функции /12/, линейризованной к полулогарифмическому масштабу <sup>12/</sup>:

$$\Phi(W) = \exp(-W), \quad /13/$$

где  $W = \frac{\pi}{4} \left(\frac{n_s}{\langle n_s \rangle}\right)^2$ ,  $\langle n_s \rangle$  - среднее значение  $n_s$ . Следует заключить, что на уровне значимости 0,05, во-первых, экспериментальные данные, касающиеся взаимодействий /2/ и /5/, не различаются между собой и, во-вторых, функция /13/ удовлетворительно описывает эмпирические распределения.

Рис.6. Зависимость между средним числом  $\langle n_s \rangle$  быстрых  $/\beta > 0,37/$  заряженных частиц и числом  $k$  вторичных протонов, испускаемых во взаимодействиях  $p\text{Xe}$  при 2,34 ГэВ/с - (O) и  $\pi^- \text{Xe}$  при 9 ГэВ/с - (●). (■) и (□) - результаты соответствующих расчетов по КИМ<sup>7/</sup>. (x) и (Δ) -

зависимость между средним числом  $\langle n_s^* \rangle$  релятивистских  $/\beta > 0,7/$  заряженных частиц и числом протонов, испускаемых в реакциях  $\pi^+ \text{Ta}$  при 4 ГэВ/с <sup>5/</sup> и  $\pi^\pm \text{Ne}$  при 10,5 ГэВ/с <sup>6/</sup> соответственно.



#### V. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ $\langle n_s \rangle$ И $k$

На рис.6 показана зависимость между средним значением  $\langle n_s \rangle$  числа быстрых заряженных частиц, испускаемых в реакциях /2/ и /5/, от числа  $k$  протонов, сопровождающих эти взаимодействия. Там же приведены соответствующие данные, касающиеся среднего числа  $\langle n_s^* \rangle$  релятивистских заряженных частиц, образованных в реакциях /6/ и /7/. Так как доля протонов, имеющих скорость в интервале  $\beta = 0,37-0,7$ , равна в среднем  $\sim 0,6\%$ , то численные значения  $\langle n_s \rangle$  для взаимодействий /5/ должны быть в среднем больше на эту величину, чем аналогичные данные, относящиеся к реакции /7/, т.е.  $\langle n_s \rangle = \langle n_s^* \rangle + 0,6$ . Можно сделать вывод, что зависимость  $\langle n_s \rangle$  ( $\langle n_s^* \rangle$ ) от  $k$  для реакций /5/ и /7/, протекающих на различных ядерных мишенях, но при близких значениях энергий первичных пионов, имеет один и тот же характер. Такой же вывод можно сделать и при сравнении зависимости  $\langle n_s \rangle$  ( $\langle n_s^* \rangle$ ) от  $k$  для реакций /2/ и /6/.

На рис.6 приведены также результаты расчета зависимости  $\langle n_s \rangle$  от  $k$ , выполненного по КИМ для реакций /2/ и /5/. Следует заключить, что на уровне значимости 0,3 КИМ не противоречит экспериментальным данным.

Если учесть, что число  $k$  соответствует в среднем числу внутриядерных столкновений/см., например, <sup>9/</sup> /, а  $\langle n_s \rangle$  /или  $\langle n_s^* \rangle$ / есть среднее число быстрых частиц, образованных в процессе взаимодействия, то слабая зависимость  $\langle n_s \rangle / \langle n_s^* \rangle$  от  $k$  указывает на то, что быстрые частицы возникают в основном в первом столкновении внутри ядерной мишени. Такой механизм особенно четко прослеживается в интервале энергий первичных частиц  $\leq 4$  ГэВ, где величина  $\langle n_s \rangle / \langle n_s^* \rangle$  остается приблизительно постоянной в интервале значений  $k = 0 \div 4$ , в то время как при  $k \geq 5$  убывает в результате поглощения частиц в ядре. При больших же значениях энергий первичных пионов наблюдается некоторый рост  $\langle n_s \rangle / \langle n_s^* \rangle$  за счет вторичных взаимодействий внутри ядра. Следует подчеркнуть, что такая картина взаимодействия практически не зависит от массы ядра-мишени, по крайней мере в изученном интервале значений числа  $k$ . Можно ожидать, что при больших  $k$  поглощение образованных быстрых /или релятивистских/ частиц для более тяжелых ядер будет более существенным, чем для легких. Эту тенденцию можно заметить на примере экспериментально полученной зависимости  $\langle n_s \rangle$  от  $k$  при  $k > 6$  в случае реакции /5/, приведенной в сравнении с аналогичными данными, относящимися к реакции /7/.

\*/ Оценка получена по КИМ.



## VI. ВЫВОДЫ

Полученные нами экспериментальные результаты, касающиеся эмиссии протонов промежуточных энергий и быстрых заряженных частиц в реакциях /2/-/5/, можно суммировать следующим образом:

1. Распределения по числу  $k$  протонов - рис.1 и 2 - удовлетворительно отображает функция /9/. Однако в интервале значений  $k \geq 2$ , в котором преобладают многократные внутриядерные столкновения, все три рассмотренные гипотезы /8/-/10/ практически неразличимы при достигнутой статистической точности.

2. Распределение по числу  $k$  протонов, испущенных в реакциях /2'/ и /5'/ в заднюю полусферу в лаб. /рис.3/, можно аппроксимировать экспоненциальной функцией /11/.

3. Распределение числа  $n_s$  быстрых заряженных частиц описывает функция КНО /рис.5/. Качественное согласие экспериментальных данных с функцией КНО имеется также и в случае распределения по числу  $N_3$  вторичных заряженных частиц /рис.4/.

4. Полученная нами зависимость среднего числа  $\langle n_s \rangle$  быстрых заряженных частиц /  $\beta > 0,37$  / от числа  $k$  протонов указывает на то, что быстрые частицы образуются в основном в первом акте столкновения первичного адрона в ядерной мишени. Сопоставление наших экспериментальных данных с результатами других работ /5,8/ может служить указанием на то, что такая картина взаимодействия справедлива как для легких (Ne), так и для тяжелых ядер (Ta).

5. Каскадно-испарительная модель в среднем правильно отображает изученные нами распределения по числу  $k$  и  $n_s$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Koba Z., Nielsen H.B., Olesen P. Nucl.Phys., 1972, v. B40, p. 317.
2. Buras A., Koba Z. Lett. Nuovo Cimento, 1973, v. 6, p. 629.
3. Азимов С.А. и др. В кн.: Взаимодействия частиц с ядрами при высоких энергиях. Ташкент, ФАН, 1981, с. 3.
4. Baldin A.M. In: Proc. of the 19th Intern. Conf. on High Energy Phys., Tokyo, 1978, Proc. Soc. of Japan, Tokyo, 1979, p. 455-464.
5. Nakamura et al. Nucl.Phys., 1981, v. A365, No.3, p. 457.
6. Yeager W.M. et al. Phys.Rev. D, 1977, v. 16, No.5, p. 1294.
7. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М., Атомиздат, 1972.
8. Словинский Б. ЯФ, 1974, т. 19, вып. 3, с. 495.
9. Nilsson G., Stenlund E. LUTP 80-9, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 марта 1983 года.

Мулас Э., Словинский Б.

P1-83-201

Распределения по множественности протонов промежуточных энергий и быстрых заряженных частиц, испускаемых в столкновениях  $\pi$ -мезонов и протонов с атомными ядрами в интервале энергий 1,6-10,5 ГэВ

Получены распределения по числу  $K$  протонов промежуточных энергий /  $E \geq 30$  МэВ /, числу  $n_s$  быстрых /  $\beta > 0,37$  / заряженных частиц, испускаемых во взаимодействиях протонов с импульсом 2,34 ГэВ/с и  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами ксенона. Приведена зависимость средней множественности  $\langle n_s \rangle$  от числа  $K$  вторичных протонов при различных значениях энергии первичного адрона. Экспериментальные данные сравниваются с результатами расчета, выполненного по каскадно-испарительной модели /КИМ/. Сделан вывод о том, что КИМ не противоречит полученным экспериментальным данным, а масштабная функция КНО хорошо описывает распределение по числу  $n_s$ . Зависимость  $\langle n_s(k) \rangle$  при различных импульсах первичного адрона указывает на то, что быстрые частицы возникают в основном при первом столкновении внутри ядра-мишени.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Mulas E., Słowinski B.

P1-83-201

Multiplicity Distributions of Protons with Intermediate Energies and of Fast Charged Particles Emitted in Interactions of  $\pi$ -Mesons and Protons with Atomic Nuclei in 1.6-10.5 GeV Energy Range

Multiplicity distributions of protons with intermediate energy ( $E \geq 30$  MeV) and multiplicity distribution of  $n_s$  fast charged particles with  $\beta > 0.37$ , emitted in interactions  $pXe$  at 2.34 GeV/c and  $\pi^-Xe$  at 9 GeV/c have been measured. The dependence of average multiplicity  $\langle n_s \rangle$  on the proton multiplicity and beam energy are presented. The obtained data are compared with corresponding results for nuclear cascade calculations and KNO scaling function. It has been pointed out that intranuclear cascade model does not contradict the experimental data and that the KNO formula satisfactorily described  $n_s$  multiplicity distribution of relativistic charged particles. The dependence of average multiplicity  $\langle n_s(k) \rangle$  on primary hadron energy suggests that relativistic particles  $n_s$  are essentially emitted at the first collision of hadron in the target-nucleus.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод авторов.