

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
4-СКОРОСТИ π^0 - и η^0 -МЕЗОНОВ, ОБРАЗОВАННЫХ
В π^- Xe -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ИМПУЛЬСЕ 3,5 ГэВ/с

Л.С.Охрименко, Б.Словински, А.Н.Ильина*

Выполнен анализ π^- Xe-взаимодействий при 3,5 ГэВ/с, в которых образуются π^0 - и η^0 -мезоны. Получены распределения этих частиц по продольной быстройте, а также по относительной 4-скорости $b_{ik} = -(\mathbf{p}_i/m_i - \mathbf{p}_k/m_k)^2$ в области фрагментации ядерной мишени (\mathbf{p}_i и \mathbf{p}_k — 4-импульсы частиц, m_i и m_k — их массы покоя). Спектры по b_{ik} удовлетворительно описываются экспоненциальной функцией $\sim \exp(-b_{ik}/B)$, причем параметр наклона B для π^0 -мезонов в интервале значений $b_{ik} \geq 5$ совпадает с аналогичным значением, определенным для заряженных пионов из π^- C-взаимодействий при 40 ГэВ/с. Источником экспериментальных данных являются снимки со 180-литровой ксеноновой пузырьковой камеры ИТЭФ (Москва).

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий и Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Relative Four-Velocity Distributions of π^0 and
 η^0 Mesons Produced in the Reaction π^- Xe at
3,5 GeV/c

L.S.Okhrimenko, B.Słowiński, A.N.Plyina*

The analysis of the π^- Xe interactions at 3,5 GeV/c in which single π^0 and η^0 mesons are produced has been made. Distributions of these particles in the longitudinal rapidity as well as the relative four velocity $b_{ik} = -(\mathbf{p}_i/m_i - \mathbf{p}_k/m_k)^2$ within the target-nucleus fragmentation region are obtained (here \mathbf{p} is the four momentum and m - the particle mass). b_{ik} spectra are described good enough by the exponential function, $\sim \exp(-b_{ik}/B)$, when the slope parameter B for π^0 mesons at $b_{ik} \geq 5$ coincides with the analogical value estimated for charged pions from the reactions πp and πC at 40 GeV/c. Pictures from the 180 l. xenon bubble chamber of ITEP (Moscow) have been used as a source of experimental data.

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

* Филиал Научно-исследовательского института ядерной физики, МГУ,
Дубна

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большее распространение получает подход к исследованию ядерных взаимодействий в релятивистской области, состоящий в использовании пространства относительных скоростей b_{jk} частиц (j, k), участвующих в реакции ^{1,2/}. Этот подход, обладающий очевидным методологическим удобством (величина b_{jk} релятивистски-инвариантна), находит все более глубокое теоретическое обоснование в рамках КХД и традиционной ядерной физики ^{2/}. Он имеет также практическое значение. В частности, указывается на возможность прояснить с его помощью весьма существенный вопрос о границах применимости описания ядерных процессов на структурном уровне адронов ^{2/}, предложены методика исследования процессов множественного образования частиц ^{3/} и релятивистски-инвариантный метод анализа струйного поведения вторичных частиц, рожденных при релятивистских энергиях. Поэтому экспериментальные данные по множественному образованию частиц в адрон (ядро)-ядерных взаимодействиях (см., например, ^{4/}) и даже по бинарным процессам в пион-протонных столкновениях стали представлять в виде распределений по b_{jk} и обнаруживать интересные закономерности ^{4,5/}. Однако большинство этих данных относится к заряженным частицам, рожденным главным образом в области предельной фрагментации, в которой прямые процессы играют основную роль (то есть влияние вторичных внутриядерных взаимодействий пренебрежимо мало).

В настоящей работе приведены результаты анализа экспериментальных данных, касающихся π^- -Xe-взаимодействий при 3,5 ГэВ/с, в которых образуются одиночные π^0 - и η^0 -мезоны и произвольное число N_3 заряженных частиц. Были изучены взаимодействия, которые можно представить в виде двух классов по N_3 :

$$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^0 + (N_3 < 2), \quad (1')$$

$$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow (\eta^0 \rightarrow 2\gamma) + (N_3 < 2) \quad (1'')$$

и

$$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^0 + (N_3 > 2), \quad (2')$$

$$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow (\eta^0 \rightarrow 2\gamma) + (N_3 > 2), \quad (2'')$$

первый из которых, (1') и (1''), состоит преимущественно из столкновений квазисвободного типа, в которых влияние ядерной мишени невелико ^{6/}. Изучены спектры по относительной 4-ско-

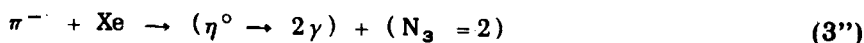
рости π° - и η° -мезонов из этих взаимодействий. В качестве исходного экспериментального материала использованы снимки со 180-литровой ксеноновой пузырьковой камеры (КПК) ИТЭФ (Москва), облученной в пучке π^{-} -мезонов с импульсом 3,5 ГэВ/с.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Было проанализировано 2134 события типа $(1') \div (2'')$, отобранных из 10278 ранее измеренных случаев $\pi^{-}\text{Xe}$ -взаимодействий, сопровождавшихся произвольным числом гамма-квантов и N_3 γ . В табл.1 приведены числа этих событий и эффективные сечения σ для каждого рассматриваемого канала реакции $(1')$ - $(2'')$, а также для взаимодействий



и



при этом же импульсе первичных π^{-} -мезонов.

Таблица 1

Информация об экспериментальном материале:
 N — число проанализированных $\pi^{-}\text{Xe}$ -взаимодействий при 3,5 ГэВ/с и σ — соответствующие им эффективные сечения

Реакция	N	σ (мб)
$(1')$	1114	$30,2 \pm 0,9$
$(1'')$	124	$5,0 \pm 0,4$
$(2')$	864	$338,2 \pm 11,5$
$(2'')$	32	$15,6 \pm 2,8$
$(3')^*$	-	$53,7 \pm 3,3$
$(3'')^*$	-	$4,5 \pm 1,0$

* Эти взаимодействия в данной работе не исследуются.

КПК ИТЭФ ^{/9/}, размеры которой равны 10x11x25,7 рад.ед³, позволяет регистрировать гамма-кванты с энергией более нескольких МэВ с вероятностью, практически достигающей 100%, в пределах полного телесного угла их эмиссии. Методика восстановления характеристик π^0 - и η^0 -мезонов по создаваемым ими в результате распада гамма-квантам описана в ^{/10/}. Метод определения энергии гамма-квантов по наблюдаемым электронно-фотонным ливням, вызванным этими гамма-квантами, изложен в ^{/11,12/}.

Ко вторичным заряженным частицам, причисляемым к N_3 , относятся в основном протоны с энергией более 20 МэВ в случае реакций (2') и (2''), а в реакциях (1') и (1'') — такие же протоны и заряженные пионы с энергией не менее 10 МэВ ^{/7/}.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПРОДОЛЬНОЙ БЫСТРОТЕ

На рис.1 приведено распределение по продольной скорости π^0 -мезонов из взаимодействий (1') и (2'). Там же стрелками

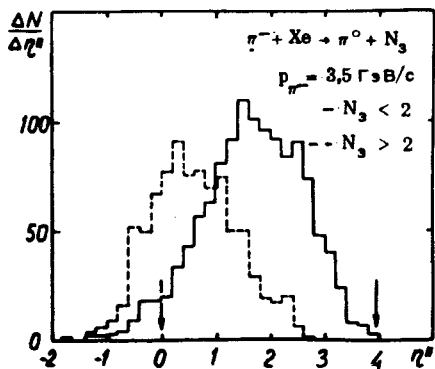


Рис.1. Распределения по продольной скорости η'' π^0 -мезонов из взаимодействий $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^0 + N_3$ при энергии 3,5 ГэВ/с. Стрелками указаны значения η'' , соответствующие ядру-мишени ($\eta''=0$) и пучку первичных π^- -мезонов ($\eta''=4$).

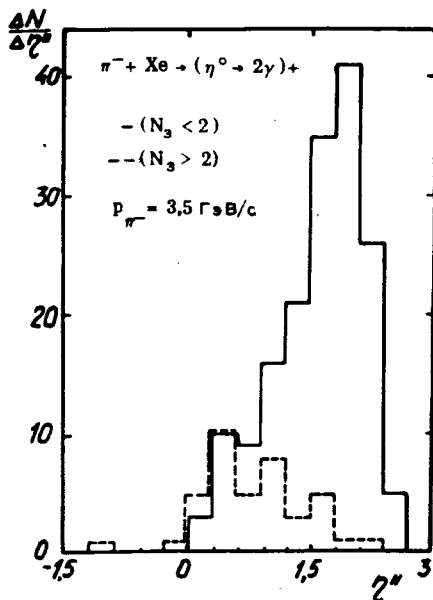


Рис.2. То же, что и на рис.1, но для η^0 -мезонов из взаимодействий $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \eta^0 + N_3$ при 3,5 ГэВ/с.

указаны значения η'' , соответствующие ядру-мишени ($\eta''_M = 0$) и падающим на нее π^- -мезонам ($\eta''_\pi = 4$). Можно отметить, что в столкновениях (2') нейтральные пионы рождаются преимущественно в области фрагментации ядра-мишени, в то время как π^0 -мезоны из реакции (1') занимают всю центральную по η'' область, причем положение максимума этого распределения $\eta''_{\max}(\pi^0)$ совпадает приблизительно со средним значением $\bar{\eta}'' = (\eta''_\pi - \eta''_M)/2$.

Аналогичные, как для π^0 -мезонов, спектры для η^0 -мезонов из реакций (1'') и (2'') показаны на рис.2. И здесь наблюдается та же тенденция, однако η'' -распределение η^0 -мезонов из реакции (2'') в большей степени смещено в сторону больших значений η'' , чем в случае π^0 -мезонов из взаимодействий (2').

4. ПРИЧИННАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ

Для того чтобы распределение по относительной 4-скорости b_{jk} частиц (j, k) не носило только формальный характер, необходимо установить причинную связь между рассматриваемыми частицами. Этот вопрос можно решить путем введения ограниченный для j-й вторичной частицы с помощью релятивистски-инвариантных переменных x_i и $x_t^{4,13/}$ (индекс i относится к налетающей частице, индекс t — к ядерной мишени):

$$x_i^j = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{(u_j u_t)}{(u_i u_t)}, \quad (4)$$

$$x_t^j = \frac{m_j}{m_t} \cdot \frac{(u_j u_i)}{(u_i u_t)}. \quad (5)$$

Здесь u и m — 4-скорость и масса покоя частиц. Установлено, в частности, что критерии отбора

$$x_t > 0,2 \text{ и } x_i < 0,2, \quad (6')$$

$$x_t < 0,2 \text{ и } x_i > 0,2 \quad (6'')$$

достаточно хорошо выделяют области фрагментации мишени и пучка^{4/}. Диаграммы рассеяния событий (1'), (2') и (1''), (2'') в переменных (x_i , x_t) показаны на рис.3÷4. Из этих распределений, а также из рис.1 и 2 вытекает, что критерии отбора по (x_i , x_t) целесообразно применить главным образом к событиям (2'). Спектр продольных быстрых π^0 -мезонов из взаимодействий

(2') в случае, когда выполнены условия (6'), представлен на рис.5. Можно видеть, что критерий (6') действительно выделяет выборку π^0 -мезонов, рожденных в области фрагментации мишени (область перекрытия составляет $\sim 4\%$). Следует при этом

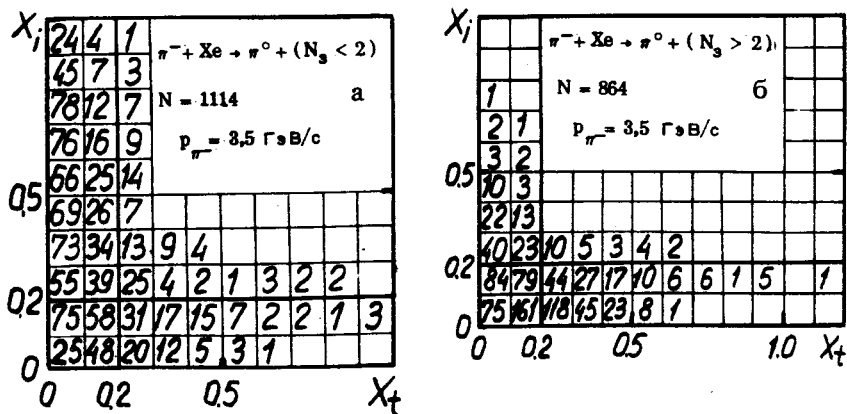


Рис.3. Диаграмма рассеяния π^0 -мезонов из реакций а) $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^- + (N_s < 2)$ и б) $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^- + (N_s > 2)$ при 3,5 ГэВ/с по переменным x_i (4) и x_t (5).

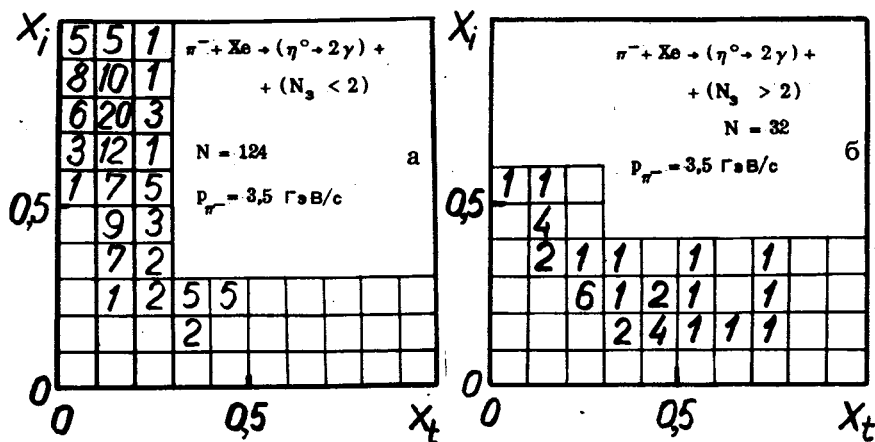
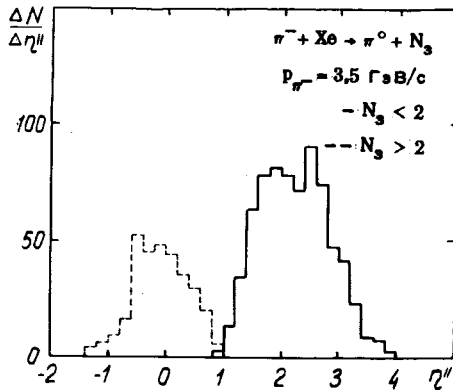


Рис.4. Диаграмма рассеяния для η^0 -мезонов из реакций а) $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^- + \eta^0 + (N_s < 2)$ и б) $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^- + \eta^0 + (N_s > 2)$ при 3,5 ГэВ/с.

Рис.5. Распределения по продольной быстрой η'' π^0 -мезонов из взаимодействий $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^0 + N_3$ при 3,5 ГэВ/с, но с учетом условий (6') и (6'') для $\pi^- \text{Xe}$ -взаимодействий с $N_3 > 2$ и $N_3 < 2$ соответственно.



отметить, что среднеквадратичное рассеяние продольных быстрот этих π^0 -мезонов удовлетворительно согласуется с ожидаемой шириной η'' -спектра, обусловленной фермиевским движением внутриядерных нуклонов ядра ксенона 141 . На этом же рис.5 нанесено распределение по η'' π^0 -мезонов из взаимодействий (1'), к которым применялись критерии (6''). Видно, что хотя и исключена область фрагментации мишени в этом случае, однако полученный спектр нельзя отнести к области фрагментации падающего пучка частиц, так как эта область представлена в исходном распределении (см.рис.1) лишь незначительной долей случаев. Отсюда вытекает, что одних только условий типа (6') и (6'') может оказаться недостаточно для установления однозначной причинной связи между частицами, участвующими в данной реакции.

Представляет интерес более подробное рассмотрение вопроса о достоверности выделения области фрагментации ядра-мишени с помощью двумерной диаграммы рассеяния событий (2') в переменных (x_t, η'') . Такая диаграмма показана на рис.6. Можно заметить, что при увеличении x_t диаграмма становится симметричной относительно значения $\eta'' = 0$ уже при $x_t \approx 0,2$ и при дальнейшем росте x_t эта симметрия сохраняется в пределах

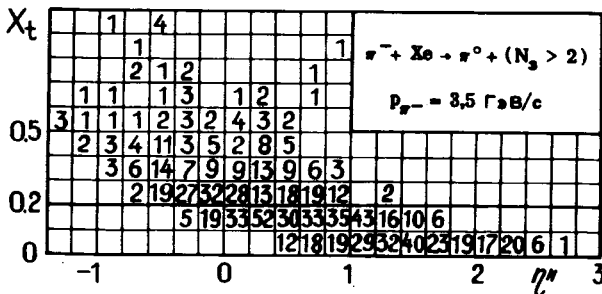


Рис.6. Диаграмма рассеяния событий $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^0 + (N_3 > 2)$ при 3,5 ГэВ/с по переменным (x_t, η'') .

статистической точности экспериментальных данных. Следовательно, подтверждается вывод о том, что условие $x_t \geq 0,2$ практически обеспечивает выделение области фрагментации ядерной мишени в рассматриваемой реакции.

5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ОТНОСИТЕЛЬНОЙ 4-СКОРОСТИ

На рис.7 приведена зависимость от $b_{t\pi^0}$ релятивистски-инвариантного сечения $1/\sigma_{in} F(b_{t\pi^0})^{1/13}$ образования π^0 -мезонов, рожденных во взаимодействиях (2') и удовлетворяющих условиям (6'). Там же дано аналогичное распределение, относящееся ко всем нейтральным пионам из этой реакции. Прямыми линиями представлены простейшие функции, аппроксимирующие все экспериментальные данные:

$$\frac{1}{\sigma_{in}} F(b_{t\pi^0}) \sim \exp(-b_{t\pi^0} / B), \quad (7)$$

где B — параметр наклона, определяемый при статическом описании исходных данных. Однако если иметь в виду изменение режима взаимодействия в районе $b_{t\pi^0} \approx 5$ (см., например, /1+4,13/), чему не противоречат наши экспериментальные результаты, то в случае взаимодействий (2') прямую линию можно провести лишь по двум последним точкам (штриховая линия на рис.6). Видно, что при этом наклоны экспонент (7) для событий (2') без критериев (6') и с этими критериями практически совпадают в области значений $b_{t\pi^0} \geq 5$.

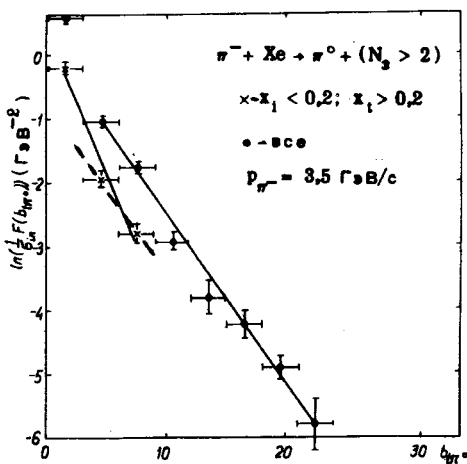


Рис.7. Зависимость от относительной 4-скорости $b_{t\pi^0}$ релятивистски-инвариантного эффективного сечения образования π^0 -мезонов во взаимодействиях $\pi^- + \text{He} \rightarrow \pi^0 + (N_3 > 2)$ при 3,5 ГэВ/с. Крестиками обозначено распределение π^0 -мезонов, удовлетворяющих условиям (6'), прямыми линиями — функции вида (7), описывающие экспериментальные данные. Штриховая линия проведена по двум точкам в интервале $b_{t\pi^0} \geq 5$. t обозначает ядерную мишень. Черные кружки соответствуют всем взаимодействиям.

Рис.8. То же, что на рис.7, но для π^0 -мезонов из взаимодействий $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \pi^0 + (N_3 < 2)$ при 3,5 ГэВ/с. i обозначает π^- -мезон, t — мишень.

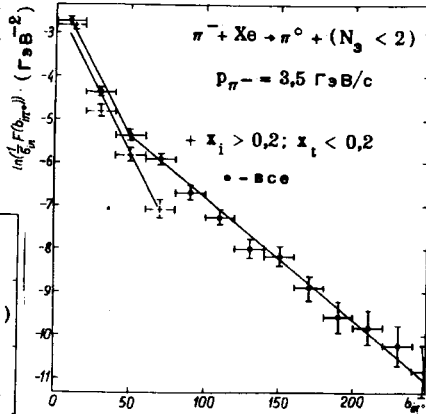
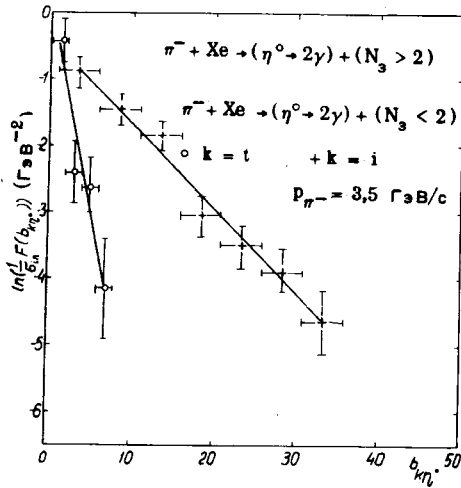


Рис.9. То же, что на рис.7, но для η^0 -мезонов из взаимодействий $\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \eta^0 + N_3$. i и t обозначают пучок первичных π^- -мезонов и ядерную мишень соответственно.

Распределения по относительной 4-скорости π^0 -мезонов из взаимодействий (1'), а также η^0 -мезонов из взаимодействий (1'') и (2''), приведенные на рис.8 и 9, носят главным образом качественный характер, так как из-за малости статистики к соответствующим выборкам событий нельзя применить критерий отбора (6') и (6''). Численные значения параметров наклона всех рассматриваемых спектров и интервалы значений относительной 4-скорости, по которым проводилось статистическое оценивание, даны в табл.2.

Следует отметить, что параметр наклона B в распределении (7) по относительной 4-скорости $b_{\pi^0 \text{Xe}}$ π^0 -мезонов, рожденных в области фрагментации ядра в $\pi^- \text{Xe}$ -взаимодействиях при 3,5 ГэВ/с, удовлетворительно согласуется с аналогичными данными, полученными для πp - и πC -взаимодействий при 40 ГэВ/с ^{4,13/}, если эти распределения сравнивать в интервале $b_{jk} \geq 5$ ^{1/}. Этот факт можно считать дополнительным подтверждением концепции универсальности, в данном представлении — процесса фрагментации на кварковом структурном уровне. Вместе с тем кажется преждевременным вывод о том, что в адрон-ядерных взаимодействиях при импульсах первичных частиц ≤ 10 ГэВ/с, вероятно, сказывается значительный вклад

Таблица 2

Численные значения параметров наклона B функций (7), аппроксимирующих релятивистски-инвариантные эффективные сечения образования π^0 - и η^0 -мезонов $1/\sigma_{in} F(b_{jk})$ во взаимодействиях (1'), (1''), (2'), (2''). Указаны интервалы значений b_{jk} , по которым проводилось статистическое оценивание экспериментальных данных, и информация о применяемых критериях отбора событий. p — вероятность фитирования

Реакция	Критерии	j, k	B	Интервал	p (%)
(2')	-	π^0, Xe	$4,0 \pm 0,1$	5-22	5
(2')	(6')	π^0, Xe	$2,3 \pm 0,2$	2-22	$< 0,01$
(2')	(6')	π^0, Xe	$3,9 \pm 0,2$	5-22	100
(1')	-	π^0, π^-	$34,5 \pm 1,5$	50-250	$< 0,01$
(1')	(6'')	π^0, π^-	$15,6 \pm 0,8$	30-60	5
(1'')	-	η^0, π^-	$8,3 \pm 0,7$	3-33	67
(2'')	-	η^0, Xe	$1,6 \pm 0,3$	1-8	25

вторичных внутриядерных процессов^{/4/}. В этой области энергий существенное значение имеет надежное установление причинной связи между рассматриваемыми частицами, участвующими в реакции.

В заключение можно сделать вывод, что релятивистски-инвариантные спектры π^0 - и η^0 -мезонов из π^-Xe -взаимодействий при 3,5 ГэВ/с в переменных относительной 4-скорости b_{jk} удовлетворительно описываются экспоненциальной функцией (7). При этом если надежно выделить область фрагментации ядра-мишени, то в интервале $b_{jk} \geq 5$ распределение π^0 -мезонов совпадает с распределениями заряженных пионов, рожденных в аналогичных условиях в других реакциях и при других значениях энергии. Это может свидетельствовать о проявлении универсальных свойств процесса фрагментации адронов на кварковом уровне^{/2/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. — ДАН СССР, 1975, т.222, с.1064.
2. Балдин А.М., Ставинский В.С. — В кн.: Научное сотрудничество социалистических стран в ядерной физике. М.: Энергоиздат, 1986, с.138.
3. Балдин А.М., Балдин А.А. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 17-86, Дубна: ОИЯИ, 1986, с.19.
4. Балдин А.М. и др. ОИЯИ, P1-85-820, Дубна, 1985.
5. Малахов А.И., Мелкумов Г.Л. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 19-86, Дубна: ОИЯИ, 1986, с.32.
6. Словинский Б. — ЯФ, 1974, т.19, с.595.
7. Охрименко Л.С. и др. — ЯФ, 1974, т.19, с.1262.
8. Охрименко Л.С. и др. ОИЯИ, P1-10389, Дубна, 1977.
9. Кузнецов Е.В. и др. — ПТЭ, 1970, № 2, с.56.
10. Словинский Б. ОИЯИ, 1-10932, Дубна, 1977.
11. Коновалова Л.П. и др. — ПТЭ, 1961, № 6, с.261.
12. Словинский Б. и др. ОИЯИ, P1-86-809, P1-86-810, P1-86-811, Дубна, 1986.
13. Балдин А.М., Диденко Л.А. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 3-84, Дубна: ОИЯИ, 1986, с.5.
14. Словинский Б., Томашевич А. — ЯФ, 1978, 27, с.1572.

Рукопись поступила 12 февраля 1987 года.