

С 346.76

С-482

30/x.72

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

3740/2-72

P1 - 6557



Б.Словинский, З.Стругальский

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

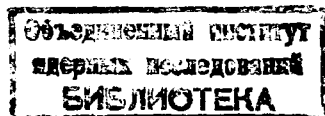
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
БЫСТРЫХ ПИОНОВ С ЯДРАМИ КСЕНОНА

1972

P1 - 6557

Б.Словинский, З.Стругальский

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
БЫСТРЫХ ПИОНОВ С ЯДРАМИ КСЕНОНА



Взаимодействия быстрых адронов с атомными ядрами ведут в преобладающем количестве случаев к появлению многих частиц в конечном состоянии. Разновидность сортов этих частиц и широкий диапазон значений, в котором могут оказаться их энергии и углы эмиссии, создают большие трудности при экспериментальном изучении этих процессов. Между тем взаимодействия адронов с энергией порядка 1 Гэв и выше с атомными ядрами, в особенности отличными от ядра атома водорода, могут быть ценным источником сведений о строении ядер, механизме ядерных реакций и физике элементарных частиц. Результаты соответствующих исследований очень важны и для других дисциплин, например, для астрофизики, а также в ряде практических приложений.

Одним из наиболее всесторонних и удобных детекторов ядерных взаимодействий при больших энергиях является ксеноновая пузырьковая камера. Ее основные преимущества, это, во-первых, относительно малая длина конверсии гамма-квантов (радиационная единица длины $T_{Xe} = 4,05 \pm 0,17$ см), позволяющая даже при небольших размерах камеры регистрировать гамма-кванты с энергией выше нескольких Мэв, с эффективностью близкой к 100%. Во-вторых, высокая степень химической однородности жидкости-наполнителя (примесь этилена к ксенону с целью га-

шения сцинтилляции не превышает 0,5% по весу) позволяет с вероятностью не менее чем 99% выделять случаи взаимодействия падающих частиц с ядрами ксенона. Наряду с этим имеется возможность достаточно точно измерять энергии гамма-квантов, а также идентифицировать π -мезоны, протоны и нейтральные странные частицы и измерять их энергии.

В настоящей работе приведены некоторые основные результаты, полученные при изучении реакций π -мезонов с ядрами ксенона при 2,34 Гэв/с, 5 Гэв/с и 9 Гэв/с. Эксперимент выполнен при помощи ксеноновой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ. Настоящая работа содержит сводку экспериментальных результатов исследований, а также краткий обзор ранее опубликованных работ /1-7/.

1. Эксперимент

В достигнутых нами экспериментальных условиях среднее значение эффективности регистрации гамма-квантов $\bar{\epsilon}_\gamma = 0,75$ и средняя величина ошибки в определении их энергии $\Delta E_\gamma / E_\gamma \leq 30\%$ практически независимы от энергии гамма-квантов в диапазоне выше нескольких Мэв.

По регистрируемым гамма-квантам вычислялись импульсы и углы эмиссии π^0 -мезонов. Среднее значение ошибки в определении импульса π^0 -мезонов равно 12%, точность определения косинусов углов их эмиссии - 0,03.

Имелась возможность зарегистрированные и останавливающиеся в камере π^+ -мезоны идентифицировать по продуктам их распада, а также идентифицировать протоны по ионизации и рассеянию. Интервал значений импульсов, в котором использованная нами камера являлась детектором типа 4 π , был: для π^+ -мезонов 50-150 Мэв/с; для протонов - 200-575 Мэв/с. Точность определения углов эмиссии следов заря-

женных частиц была не хуже 5° . Точность определения импульсов оказалась равной для π^+ -мезонов: 20% при 50 Мэв/с и около 5% при 150 Мэв/с, для протонов: 10% при 200 Мэв/с и около 1% при 575 Мэв/с.

Регистрируемые в ксеноновой пузырьковой камере гамма-кванты, π^0 -мезоны, π^+ -мезоны и протоны можно коррелировать в эффективные массы. При этом средние значения ошибок в определении эффективных масс пар этих частиц равны: $\Delta m_{\pi^+\pi^+} = 8$ Мэв, $\Delta m_{\pi^+p} = 7$ Мэв, $\Delta m_{pp} = 9$ Мэв, $\Delta m_{\gamma\pi^+} = 7$ Мэв, $\Delta m_{\gamma p} = 16$ Мэв, $\Delta m_{\pi^0\pi^+}/m_{\pi^0\pi^+} = 13\%$, $\Delta m_{\pi^0 p}/m_{\pi^0 p} = 6\%$.

Эффективность частично двухкратного просмотра стереоснимков была не ниже 95%.

2. Экспериментальный материал

Общая характеристика полученного экспериментального материала содержится в таблице 1. Во всех найденных при просмотре случаях взаимодействий были измерены энергии и углы эмиссии гамма-квантов. Соответствующие характеристики для π^+ -мезонов и протонов измерялись только во взаимодействиях $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 Гэв/с и $\pi^- - \text{Xe}$ при 9 Гэв/с (π^+ -мезоны), причем лишь в части случаев взаимодействий.

Таблица 1

Общая характеристика экспериментального материала

Реакция	Импульс Гэв/с	К-во просм. снимков	К-во выбр. случаев взаимодей.	К-во измеренных вторич. частиц		
				γ -кванты	π^+ -мезоны	протоны
$\pi^+ - \text{Xe}$	2,34	15.000	2.343	4468	434	1008
$\pi^- - \text{Xe}$	5	3.000	250	491	-	-
$\pi^- - \text{Xe}$	9	3.000	200	696	490	-

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Основное внимание в настоящей работе уделено изучению процессов образования π^0 -мезонов во взаимодействиях π -мезонов с ядрами ксенона, в особенности в реакциях π^+ -Xe при 2,34 Гэв/с. Изучались также свойства медленных π^+ -мезонов ($E_{\pi^+} = 10-70$ Мэв), возникающих во взаимодействиях π^- -Xe при 9 Гэв/с и π^+ -Xe при 2,34 Гэв/с. В последнем случае были исследованы дополнительно характеристики протонов и спектры эффективных масс пар частиц: гамма-квантов, π^0 -мезонов, медленных π^+ -мезонов и протонов.

При анализе π -Xe-взаимодействия нами применен подход, состоящий в делении этих взаимодействий на классы, в зависимости от числа N_z наблюдаемых вторичных заряженных частиц. Используя эту простую экспериментальную характеристику, мы имеем возможность изучить свойства вторичных частиц, эмитируемых во взаимодействиях с различной степенью участия в них ядра-мишени как целого.

Следовательно, имея в виду химическую однородность ядерной мишени, заполняющей камеру, можно исследовать механизм ядерных реакций.

Минимальная длина следов заряженных частиц, причисляемых к N_z , равна 2 мм, что соответствует импульсу протонов 160 Мэв/с и π^+ -мезонов - 40 Мэв/с.

А. Образование π^0 -мезонов

В таблице II приведены средние числа \bar{N}_{π^0} π^0 -мезонов, образованных во всех взаимодействиях π^+ -Xe при 2,34 Гэв/с в зависимости от числа N_z . Даны также аналогичные значения \bar{n}_{π^0} , относящиеся лишь к тем взаимодействиям, в которых образуется, по крайней мере, один π^0 -мезон.

Таблица 2

Средние числа π^0 -мезонов \bar{N}_{π^0} , образованных во всех $\pi^+ - \text{He}$ взаимодействиях при 2,34 Гэв/с в зависимости от числа $N_{\text{Э}}$ вторичных заряженных частиц. \bar{n}_{π^0} - среднее число π^0 -мезонов во взаимодействиях с π^0 -мезонами.

$N_{\text{Э}}$	3	4-6	7	Все
\bar{n}_{π^0}	$1,33 \pm 0,11$	$1,30 \pm 0,13$	$1,15 \pm 0,15$	$1,28 \pm 0,10$
\bar{N}_{π^0}	$0,50 \pm 0,04$	$0,63 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,02$

Вероятности образования различных кратностей π^0 -мезонов во взаимодействиях $\pi^+ - \text{He}$ при 2,34 Гэв/с представлены в таблице 3.

Таблица 3

Вероятности образования различных кратностей $N_{\pi^0} \pi^0$ -мезонов в классах событий с различными числами $N_{\text{Э}}$ вторичных заряженных частиц во взаимодействиях $\pi^+ - \text{He}$ при 2,34 Гэв/с.

N_{π^0}	$N_{\text{Э}} \geq 0$	≤ 3	4-6	≥ 7
1	$77,1 \pm 5,8\%$	$74,4 \pm 6,0$	$74,2 \pm 7,1$	$86,3 \pm 10,9$
2	$18,0 \pm 2,4$	$19,3 \pm 2,9$	$4,5 \pm 3,7$	$12,2 \pm 3,7$
3	$4,5 \pm 1,1$	$5,0 \pm 1,5$	$4,4 \pm 1,9$	$1,5 \pm 1,5$
4	$0,4 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,9$	0	0

В таблице 4 показаны средние значения полных импульсов \bar{P}_{π^0} , средние значения поперечных импульсов $\bar{P}_{\perp \pi^0}$, дисперсии $\langle P_{\perp \pi^0}^2 \rangle^{1/2}$

распределений по поперечным импульсам и значения отношения частоты эмиссии вперед-назад (F/B) π^0 -мезонов, образованных в трех, по числу N_3 , классах π^+ -He-взаимодействий при 2,34 Гэв/с, в которых образуются одиночные π^0 -мезоны. Даны также значения вероятностей P различных кратностей N_3 .

Таблица 4

Характеристики π^0 -мезонов, образованных во взаимодействиях π^+ -He при 2,34 Гэв/с, в которых рождается один π^0 -мезон. Обозначения в тексте.

N_3	≤ 3	4-6	≥ 7
P %	$35,8 \pm 2,5$	$34,8 \pm 2,5$	$29,4 \pm 2,7$
\bar{P}_{π^0} Мэв/с	677 ± 50	362 ± 40	228 ± 60
\bar{P}_{π^+} Мэв/с	250 ± 25	194 ± 15	158 ± 10
$\langle P_{\pi^+}^2 \rangle^{1/2}$ Мэв/с	160	140	100
F/B	$5,1 \pm 0,7$	$4,0 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,1$

Аналогичные данные, относящиеся к взаимодействиям π^+ -He при 2,34 Гэв/с, в которых рождаются два π^0 -мезона, сведены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики π^0 -мезонов, рождающихся по два во взаимодействиях π^+ -He при 2,34 Гэв/с. Обозначения в тексте.

N_3	≤ 2	3-6	≥ 7
P %	$25,0 \pm 2,8$	$45,6 \pm 2,5$	$29,4 \pm 2,7$
\bar{P}_{π^0} Мэв/с	615 ± 50	275 ± 40	196 ± 50

$\bar{P}_{\perp \pi^0}$	Мэв/с	230 \pm 30	174 \pm 25	146 \pm 20
$\langle \bar{P}_{\perp \pi^0}^2 \rangle$	$\frac{1}{2}$ Мэв/с	128	113	104
F/V		10 \pm 4	2,8 \pm 0,6	2,4 \pm 0,7

В таблице 6 приведены средние значения энергий \bar{E}_γ гамма-квантов и средние числа \bar{n}_{π^0} π^0 -мезонов, образованных в различных по числу N_3 классах π^- -Xe-взаимодействий при 5 и 9 Гэв. Даны также значения P вероятностей, с которыми исследуемые взаимодействия распределены по различным классам в зависимости от числа N_3 .

Таблица 6

Средние энергии гамма-квантов \bar{E}_γ и среднее число π^0 -мезонов \bar{n}_{π^0} , образованных в π^- -Xe-взаимодействиях при 5 и 9 Гэв/с.

Величина	Импульс π^- -мезона	$N_3 \leq 4$	5+9	≥ 10
P %	5 Гэв/с	27,2 \pm 3,2	39,6 \pm 4,0	33,6 \pm 3,4
	9 Гэв/с	27,2 \pm 3,7	44,6 \pm 4,6	28,5 \pm 3,7
\bar{E}_γ Мэв	5 Гэв/с	403 \pm 40	271 \pm 20	205 \pm 15
	9 Гэв/с	585 \pm 50	408 \pm 30	213 \pm 20
\bar{n}_{π^0}	5 Гэв/с	1,2 \pm 0,2	1,2 \pm 0,2	1,2 \pm 0,2
	9 Гэв/с	1,5 \pm 0,5	1,6 \pm 0,2	1,5 \pm 0,2

На основании представленных данных можно заключить, что среднее число π^0 -мезонов, образованных в π^- -Xe-взаимодействиях, медленно, примерно логарифмически возрастает с энергией взаимодействия. В случае взаимодействия π^+ -Xe при 2,34 Гэв/с замечается уменьшение средней множественности π^0 -мезонов в области больших значе-

ний N_{Σ} , в то время как этого не наблюдается в реакциях $\pi^- - \text{Xe}$ при 5 и 9 Гэв/с. Следует, однако, отметить, что вследствие небольшой статистики события сведения, касающиеся случаев взаимодействия $\pi^- - \text{Xe}$ с большими значениями N_{Σ} ($N_{\Sigma} = 15-24$), слишком скудны. Наблюдается также систематическое уменьшение средних значений импульсов π^0 -мезонов с возрастанием N_{Σ} . Во взаимодействиях $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 Гэв/с дополнительно обнаружено убывание при увеличении N_{Σ} средних значений поперечных импульсов, а также коэффициентов асимметрии эмиссии π^0 -мезонов.

Б. Угловые и импульсные распределения π^0 -мезонов

На рис. 1 приведены угловые распределения π^0 -мезонов, образованных в трех по числу N_{Σ} классах $\pi^+ - \text{Xe}$ -взаимодействий при 2,34 Гэв/с. Распределения трансформированы в постулированную систему центра масс $\pi^+ p$ при 2,34 Гэв/с. Отчетливо выделяется вид углового распределения π^0 -мезонов, сопровождающих взаимодействия $\pi^+ - \text{Xe}$ с минимальными значениями N_{Σ} ($N_{\Sigma} \leq 3$). Если сравнить это распределение с аналогичными распределениями π^+ -мезонов, испускаемых в неупругих двухлучевых взаимодействиях $\pi^+ p$ при 2,34 Гэв/с, и π^0 -мезонов, эмитируемых в четырехлучевых взаимодействиях $\pi^- - p$ при 2,7 Гэв/с, то можно заметить их общее сходство. Аналогичное сравнение, выполненное для случая взаимодействий $\pi^- - \text{Xe}$ при 5 и 9 Гэв/с, подтверждает выделенность класса взаимодействий с малой множественностью вторичных заряженных частиц и сходство соответствующих характеристик пионов из этих ядерных взаимодействий с характеристиками пионов излучаемых в пион-нуклонных взаимодействиях при той или близкой энергии взаимодействия.

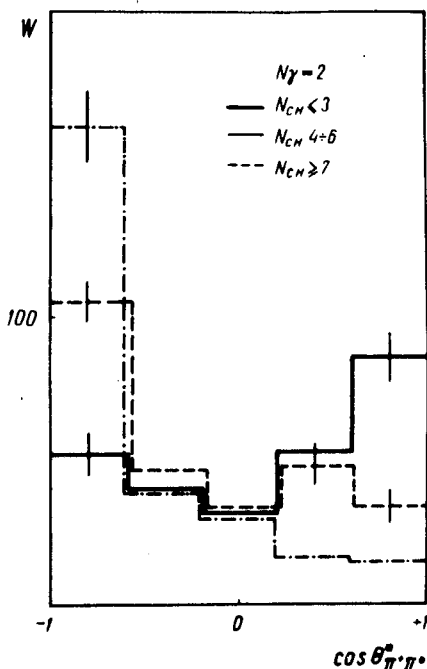


Рис. 1. Угловые распределения π^0 -мезонов образованных в трех классах π^+ -Xe взаимодействий с $N_\gamma = 2$: $N_{\text{сн}} \leq 3$, $N_{\text{сн}} = 4+6$, $N_{\text{сн}} \geq 7$ при 2,34 Гэв/с. Распределения представлены в постулированной системе центра масс π -нуклон.

Вывод о выделенности класса π -Xe-взаимодействий с небольшими значениями $N_{\text{сн}}$ и их сходство с π -нуклонным взаимодействиями при тех же энергиях подтверждает также анализ импульсных распределений π^0 -мезонов при 2,34, 5 и 9 Гэв/с.

Следует отметить, что среднее значение кратности заряженных частиц в классах взаимодействий π -Xe с малыми значениями $N_{\text{сн}}$ совпадает с соответствующей характеристикой в π -нуклонных взаимодействиях при тех же энергиях.

В. Образование медленных π^+ -мезонов

Исследование частоты генерации, угловых и импульсных распределений медленных π^+ -мезонов ($E_{\pi^+} = 10-70$ Мэв), образованных в $\pi^+ - \text{Xe}$ -взаимодействиях при 2,34 Гэв/с и $\pi^- - \text{Xe}$ -взаимодействиях при 9 Гэв/с, подтверждает вывод о выделенности класса взаимодействий $\pi - \text{Xes}$ малыми числами вторичных заряженных частиц.

Следует отметить, что в этом классе $\pi - \text{Xe}$ -взаимодействий только в небольшом количестве случаев наблюдается излучение более чем одного протона (например, в $\pi^+ - \text{Xe}$ -взаимодействиях при 2,34 Гэв/с, при $N_{\text{з}} \leq 3$ таких случаев 14%).

Г. Эмиссия протонов

Зависимость частоты эмиссии протонов от числа $N_{\text{з}}$ вторичных заряженных частиц, сопровождающих $\pi^+ - \text{Xe}$ -взаимодействия при 2,34 Гэв/с, показана на рис. 2. Средние значения импульсов и коэффициент асимметрии испускания вперед-назад этих протонов приведены в таблице 7.

Таблица 7

Характеристики протонов, излучаемых в $\pi^+ - \text{Xe}$ -взаимодействиях при 2,34 Гэв/с. \bar{P}_p - среднее значение импульсов протонов, F/V - коэффициент асимметрии испускания.

$N_{\text{з}}$	≤ 3	4-6	7-9	≥ 10
\bar{P}_p Мэв/с	360 ± 20	348 ± 17	350 ± 15	322 ± 20
F/V	$1,93 \pm 0,57$	$1,56 \pm 0,16$	$1,97 \pm$	$0,17$

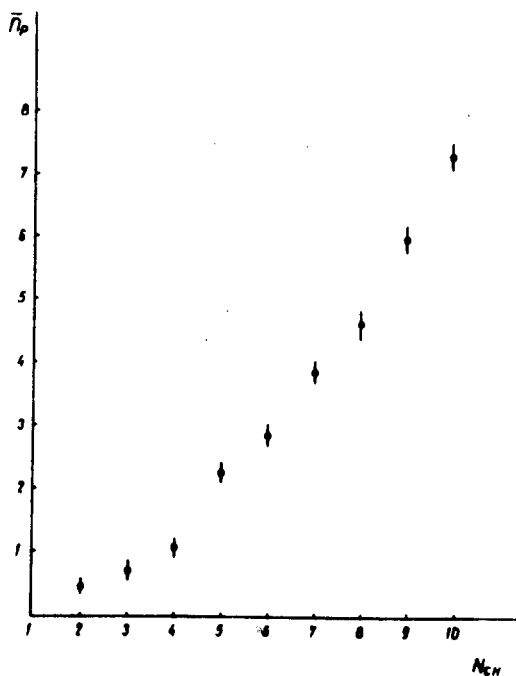


Рис. 2. Зависимость от $N_{\text{сн}}$ средней частоты эмиссии протонов с импульсами в диапазоне 200–575 Мэв/с, испускаемых в π^+ -Xe-взаимодействиях при 2,34 Гэв/с.

Среднее значение импульса, уносимого протонами, не зависит от N_{Σ} и соответствует кинетической энергии протонов близкой половине массы пиона. Вместе с тем частота эмиссии протонов сильно возрастает при увеличении N_{Σ} . Простейшее объяснение этого явления может состоять в предположении, что эмиссия нуклонов в рассматриваемых взаимодействиях происходит, главным образом, вследствие двухнуклонного поглощения медленных пионов внутри ядра. Такому предположению не противоречит невозрастание частоты эмиссии π^0 -мезонов при увеличении N_{Σ} (таблицы 2 и 6), а также существенное уменьшение их энергии с увеличением N_{Σ} (таблицы 4 и 6).

Д. Другие частицы

На основании результатов исследования спектров эффективных масс гамма-квантов, π^0 -мезонов, медленных π^+ -мезонов и протонов следует заключить, что образование резонансных состояний с участием этих частиц может относиться, главным образом, к классу π -He взаимодействий с минимальным числом N_{Σ} . На рис. 3 показано, в качестве примера, распределение эффективных масс комбинаций π^0 -медленный π^+ , образованных в π^+ -He взаимодействиях при 2,34 Гэв/с. Отдельно приведено соответствующее распределение, относящееся к классу π^+ -He взаимодействий с $N_{\Sigma} \leq 3$. В этом распределении можно заметить явное превышение над уровнем фона в области массы ρ^+ -мезонов. Вопрос об образовании резонансных систем в π -He взаимодействиях был изложен более подробно в /8/.

4. Краткие выводы

На основании проведенных исследований π -He взаимодействий при 2,34, 5 и 9 Гэв/с следует заключить, что:

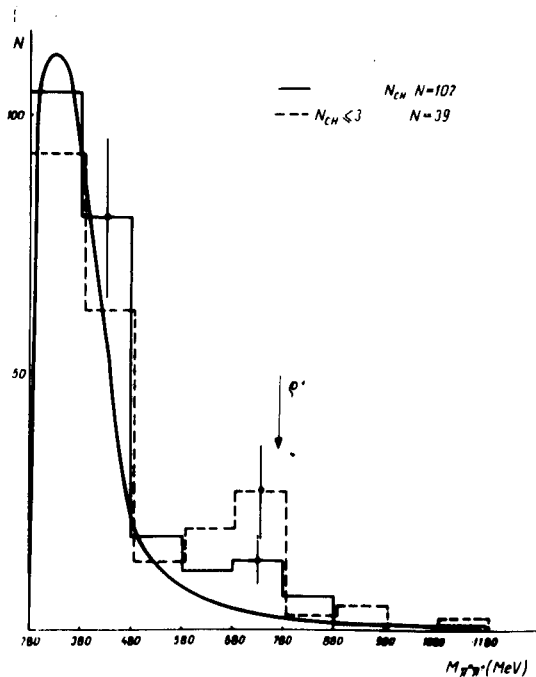


Рис. 3. Распределение по эффективным массам $M_{\pi^0 \pi^+}$ комбинаций пар π^0 -мезонов и медленных π^+ -мезонов, образованных в π^+ -He-взаимодействиях (гистограмма, нарисованная сплошной линией) и в π^+ -He-взаимодействиях с $N_{\Sigma} \leq 3$ (пунктир) при 2,34 Гэв/с. Сплошной кривой нанесено распределение случайных комбинаций $\pi^0 \pi^+$, рассчитанное по методу Монте-Карло.

1. Оказалось возможным достаточно полно провести анализ свойств π^0 -мезонов, образованных в этих взаимодействиях, во всем диапазоне импульсов π^0 -мезонов и углов эмиссии. Полученные данные относятся к четко определенной ядерной мишени-ядру ксенона, что делает их особенно полезными при сопоставлении с различными моделями взаимодействий.

2. Угловые и импульсные распределения π^0 -мезонов, а также их множественность указывают на выделенность класса π -Xe-взаимодействий с минимальными значениями числа N_3 вторичных заряженных частиц и сходство взаимодействий из этого класса, в смысле указанных характеристик, с π -нуклонными взаимодействиями при тех же или близких энергиях. Эти, так называемые, квазисвободные взаимодействия характеризуются тем же самым, в пределах ошибок, значением средней кратности вторичных заряженных частиц, что и в случае соответствующего элементарного акта.

3. Обнаружено, что достаточно надежным экспериментальным критерием квазиэлементарности взаимодействий, наблюдаемых в ксеноновой пузырьковой камере, является число N_3 вторичных заряженных частиц.

4. Образование резонансов с участием гамма-квантов, π^0 -и π^+ -мезонов происходит, главным образом, в квазисвободных взаимодействиях быстрых пионов с ядрами ксенона.

5. Доля квазисвободных взаимодействий в реакциях π -Xe составляет примерно 1/3 от полного сечения неупругих π -Xe-взаимодействий и не зависит, в пределах ошибок, от энергий пионов, вызвавших взаимодействие. Следует добавить, что тот же результат был получен нами расчетным путем, исходя из статистических соображений /6/.

Авторы благодарны профессору М.И. Соловьеву за постоянный интерес к работе.

1. Б. Словинский, З.С. Стругальский. ЯФ, 9, 142 (1969).
2. Б. Словинский, З.С. Стругальский. Препринт ОИЯИ, Р1-3822, Дубна, 1968.
3. М. Дашкевич, Б. Словинский, З.С. Стругальский. ЯФ, 5, 341 (1967).
4. Б. Словинский, З.С. Стругальский. Препринт ОИЯИ, Р1-5592, Дубна, 1971.
5. В. Гадомский, Б. Словинский, З.С. Стругальский. ЯФ, 7, 1246 (1967).
6. Б. Словинский. Диссертация. Варшавский университет, 1969.
7. Б. Словинский, З.С. Стругальский. Сообщение ОИЯИ, Р1-6188, 1971.
8. Б. Словинский, З.С. Стругальский. Сообщение ОИЯИ, Р1-6408, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июня 1972 года.