

C-482

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



C 346.4B
C-482

14/1-74

P1 - 7439

151/2-74

Б.Словинский, З.С.Стругальский

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИССИИ π^0 , π^+ МЕЗОНОВ
И ПРОТОНОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ π -МЕЗОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ЯДРАМИ КСЕНОНА

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P1 - 7439

Б.Словинский, З.С.Стругальский

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИССИИ π^0 , π^+ МЕЗОНОВ
И ПРОТОНОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ π -МЕЗОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ЯДРАМИ КСЕНОНА

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. ВВЕДЕНИЕ

Несколько лет назад мы указывали на возможность исследования процесса взаимодействия быстрых частиц с атомными ядрами с помощью характеристик π^0 -мезонов, рождаемых в этих взаимодействиях /1/. До этого времени, начиная с 1963 года, а также в течение нескольких последних лет были опубликованы статьи, в которых приводились некоторые фрагментарные результаты исследований на ксеноновой пузырьковой камере характеристик π^0 -мезонов, сопровождающих акты соударений быстрых π^\pm -мезонов с ядрами ксенона /2-8/.

В предлагаемой вниманию читателя настоящей работе приводятся важнейшие результаты многолетних исследований разных характеристик π^0 -мезонов. Приведены также некоторые сведения о характеристиках π^\pm -мезонов и протонов, излучаемых во взаимодействиях пионов с ядрами Хе.

2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использовалась 26-литровая ксеноновая пузырьковая камера Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, облученная в пучках мезонов синхрофазотрона.

При двойном просмотре одновременно обоих снимков стереопары отбирались взаимодействия частиц пучка, происходящие в определенной центральной области камеры. Для подробного дальнейшего анализа предназначались взаимодействия с 0,1,2,3 ... следами вторичных заряженных частиц, сопровождаемые некоторым числом $k = 0,1,2, \dots$ гамма-квантов.

Минимальная кинетическая энергия наблюдаемых протонов во взаимодействиях с небольшим, меньше 4, числом следов вторичных заряженных частиц составляет ~5 МэВ. Во взаимодействиях с большим числом этих следов эта величина больше и составляет 10 МэВ. π^+ -мезоны легко идентифицируются в камере по наблюдаемой характерной цепочке заряженных продуктов распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$. Большинство π^- -мезонов с энергиями свыше 10 МэВ может быть отличимо от протонов. Нижняя граница энергии гамма-квантов, наблюдаемых в камере с приблизительно постоянной эффективностью, составляет ~ 15 МэВ.

В каждом выбранном случае определялись координаты точки взаимодействия и точек конверсии гамма-квантов с точностями $\Delta X = \Delta Y = 0,1$ мм и $\Delta Z = 0,5$ мм, а также суммарные длины следов ливневых электронов в ливнях, инициированных гамма-квантами.

Точность определения угла $\Theta_{\gamma\gamma}$ между направлениями эмиссии любых двух гамма-квантов составляет 0,5 - 2°. Суммарные пробеги ливневых электронов измерялись с помощью специальных просмотрочно-измерительных столов многократно разными измерителями. По результатам этих измерений определялись энергии гамма-квантов согласно ранее разработанной методике [9-12]. При измерениях суммарного пробега ливневых электронов добавочно контролировалась правильность определения числа гамма-квантов, сопровождающих исследуемое взаимодействие, а также правильность отнесения события к данному классу, согласно установленным критериям. Оптимальная точность измерения энергии гамма-кванта близка к 12%. Подробный анализ проводился лишь в таких областях, в которых энергия каждого гамма-кванта могла быть определена с точностью не хуже 35%.

Вероятность регистрации в камере гамма-кванта, возникшего в определенной центральной области камеры, причем такого, энергия которого может быть определена с точностью не хуже 35%, составляет /80-95/% и в данном случае зависит от числа гамма-квантов. Средняя

вероятность регистрации всех наблюдаемых гамма-квантов равна 94%.

Имея сведения об энергиях гамма-квантов, E_{γ} , а также об их углах эмиссии, Θ_{γ} , можно определить эффективную массу, $M(k\gamma)$, комбинации некоторого числа k гамма-квантов. Гамма-кванты, используемые для определения $M(k\gamma)$, наблюдаются как излученные из точки взаимодействия мезона пучка в камере, поэтому $M(k\gamma)$ может быть определена согласно формуле

$$M^2(k\gamma) = \sum_{j>i}^k M_{ij}^2, \quad /1/$$

$$\text{где } M_{ij}^2 = 2E_i E_j (1 - \cos \Theta_{ij}),$$

независимо от того, возникли ли эти гамма-кванты непосредственно или в результате распада некоторой частицы X на π^0 - или η^0 -мезоны. Точность определения $M(k\gamma)$ зависит от точности определения энергии гамма-квантов и углов их эмиссии. Для случаев с $k=2$ оптимальная точность определения $M(2\gamma)$ достигает 10-12%, для случаев с $k=3$ - 8-10% и для случаев с $k=4$ - 7-8%. Средняя точность определения $M(k,\gamma)$ - /15-20/%.

Для всех наблюдаемых π^+ -мезонов в диапазоне импульсов от 50 до 150 МэВ/с, для всех протонов в диапазоне энергии от 15 до ~120 МэВ и практически для всех излучаемых π^0 -мезонов с импульсами во всем интервале встречаемых значений импульсов ксеноновая пузырьковая камера является детектором с геометрией типа 4π .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Общие сведения, касающиеся экспериментального материала, приведены в табл. 1. В нижеследующих параграфах даются подробные характеристики π^0 , π^+ -мезонов и протонов, испущенных в исследуемых взаимодействиях.

Таблица 1
Общие характеристики экспериментального материала

Реакция	Импульс ГэВ/с	Число фото	Число стобранных случаев	Число вторичных частиц		
				γ	π^+	ρ
$\pi^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{одна втор. след}$ ($+ \gamma \dots \gamma$)	2,34	50000	1362	3857	-	1362
$\pi^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{все втор. следы}$ ($+ \gamma \dots \gamma$)	2,34	15000	2343	4468	494	1008
$\pi^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{все втор. следы}$ ($+ \gamma \dots \gamma$)	5	3000	250	491	-	-
$\pi^- + \text{Xe} \rightarrow \text{все втор. следы}$ ($+ \gamma \dots \gamma$)	9	12000	1743	4753	490	-

3.1. Характеристики π^0 -мезонов

3.1.1. Генерация π^0 -мезонов

Исследования энергетических спектров гамма-квантов и распределений эффективных масс комбинаций пар гамма-квантов во всех взаимодействиях $\pi^+ - \text{Xe}$ при 5 и 9 ГэВ/с показали, что главным, почти исключительным, источником гамма-квантов являются π^0 -мезоны /4,5,13,14/.

Если, однако, среди исследуемых взаимодействий выделить такой класс событий, в котором число N вторичных заряженных продуктов мало, $N \leq 4$, то оказывается, что в спектре эффективных масс комбинаций пар гамма-квантов наблюдается, кроме пика от π^0 -мезонов, четко выделенный пик, соответствующий η^0 -частицам /4,7,13/. Выделение класса событий с $N \leq 4$ соответствует выделению класса событий, в которых реакции происходят на одиночных нуклонах на поверхности ядра /1,2,15/. Так, например, в событиях $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 ГэВ/с с одной вторичной заряженной частицей, т.е. в событиях типа $\pi^+ + n \rightarrow X + p \rightarrow \gamma + \gamma + p$, где X - любая частица, распадающаяся на два гамма-кванта, соотношение числа η^0 -мезонов, $N_{\eta^0 \rightarrow 2\gamma}$ к числу π^0 -мезонов, N_{π^0} , равно /13/:

$$\frac{N_{\eta^0 \rightarrow 2\gamma}}{N_{\pi^0}} = (24,2 + 2,7)\% \quad /3/$$

В нуль-лучевых $\pi^- - \text{Xe}$ событиях при 9 ГэВ/с, т.е. в событиях типа $\pi^- + p \rightarrow n + X \rightarrow n + \gamma + \gamma$, это соотношение следующее

$$\frac{N_{\eta^0 \rightarrow 2\gamma}}{N_{\pi^0}} \leq 14\% \quad /4/$$

В событиях с большим числом N значения этих соотношений заметно уменьшаются. Так, при 2,34 ГэВ/с в реакциях $\pi^+ - \text{Xe}$ с $N = 2$ соотношение /3/ составляет 9%/16/.

О других продуктах реакции $\pi - \text{Xe}$, распадающихся на π^0 -мезоны и гамма-кванты, можно сказать, что

они еще намного менее интенсивны и если они и присутствуют, то вносят незаметную долю в регистрируемые гамма-кванты и π^0 -мезоны. В спектрах эффективных масс комбинаций пар гамма-квантов в классе событий с $N > 4$ сигнала от η^0 не наблюдается ни при 2,34 ГэВ/с, ни при 9 ГэВ/с [4,5,14]. Из анализа спектра эффективных масс пар гамма-квантов во взаимодействия π^+ -Xe при 2,34 ГэВ/с следует, что в диапазоне значений масс 600-1300 МэВ не генерируются с сечениями больше 0,03 сечения рождения π^0 -мезонов какие-либо частицы, распадающиеся на два гамма-кванта.

3.1.2. Распределение π^0 -мезонов по кратностям

В таблице II дано распределение по числу π^0 -мезонов взаимодействий π^+ -Xe при 2,34 ГэВ/с и π^- -Xe при 9 ГэВ/с. В таблице III приведены средние кратности генерированных π^0 -мезонов во взаимодействиях с разным числом N наблюдаемых вторичных заряженных частиц.

3.1.3. Форма распределения π^0 -мезонов по кратностям

Форма распределения взаимодействий по кратностям π^0 -мезонов в классах этих взаимодействий с $N \geq 0$, $N \leq 3$, $N = 4-6$, $N \geq 7$ исследовалась подробно в реакциях π^+ -Xe при 2,34 ГэВ/с и в реакциях π^- -Xe при 9 ГэВ/с. Результаты приведены в таблицах IV и V.

Можно констатировать, что форма распределения взаимодействий по кратностям π^0 -мезонов практически не зависит от числа N . Форма распределения кратностей π^0 -мезонов в π^- -Xe реакциях при 9 ГэВ/с такая же, как форма распределения π^+ -мезонов, рожденных в π^-p -реакциях при 10 ГэВ/с [2].

3.1.4. Распределение π^0 -мезонов по импульсам

В π^- -Xe взаимодействиях при 5 и 9 ГэВ/с исследовались энергетические распределения гамма-квантов.

Во взаимодействиях π^+ -Xe при 2,34 ГэВ/с исследовались более подробно как энергетические спектры гамма-квантов, так и импульсные спектры π^0 -мезонов.

Средние энергии гамма-квантов в этих событиях

Таблица II
Распределение π^+ -Xe взаимодействий при 2,34 ГэВ/с и π^- -Xe взаимодействий при 9 ГэВ/с по числу рожденных π^0 -мезонов

N_{π^0}	2,34 ГэВ/с π^+ -Xe	9 ГэВ/с π^- -Xe
1	(77,1 ± 5,8) %	(45,5 ± 4,0) %
2	(18,0 ± 2,4) %	(36,5 ± 2,0) %
3	(4,5 ± 1,1) %	(10,1 ± 1,6) %
4	(0,4 ± 0,3) %	(7,4 ± 0,8) %
5	0	(0,5 ± 0,4) %

Таблица III
Средние кратности генерации π^0 -мезонов во взаимодействиях π^- -He при импульсах P_π 2,34 ГэВ/с, 5 ГэВ/с и 9 ГэВ/с с разными числами N_3 следов вторичных заряженных частиц

P_π / N_3	≤ 3	4 - 6	≥ 7	Все
2,34	0,50 \pm 0,04	0,63 \pm 0,04	0,39 \pm 0,03	0,51 \pm 0,02
5	1,2 \pm 0,2	1,2 \pm 0,2	1,2 \pm 0,2	1,2 \pm 0,2
9	1,5 \pm 0,2	1,6 \pm 0,3	1,4 \pm 0,2	1,5 \pm 0,2

даны в таблице VI. Существует зависимость между средней энергией E_γ гамма-квантов и средней энергией, \bar{E}_{π^0, π^0} -мезонов, являющихся источником этих гамма-квантов: $\bar{E}_{\pi^0} \sim 1,8\bar{E}_\gamma/17$.

Энергетические распределения гамма-квантов во взаимодействиях π^- -He с $N \leq 4$ при 5 и 9 ГэВ/с совпадают по форме с энергетическим спектром гамма-квантов во взаимодействиях π^- -мезонов с нуклонами π^- -N при 6,8 ГэВ/с /18/. Энергетические распределения гамма-квантов во взаимодействиях π^- -He с $N \geq 10$ при 5 и 9 ГэВ/с отличаются от соответствующего распределения во взаимодействиях с $N \leq 4$.

Во взаимодействиях π^+ -He при 2,34 ГэВ/с рассматривались отдельно события с одним π^0 -мезоном и отдельно события, в которых генерировалось два и более π^0 -мезона. Характеристики импульсов π^0 -мезонов в этих событиях приведены в таблицах VII и VIII.

3.1.5. Угловые распределения π^0 -мезонов

Распределения π^0 -мезонов по углам, а также распределения по углам потоков энергии, уносимой гамма-квантами во взаимодействиях π^+ -He при 2,34, 5 и 9 ГэВ/с рассматривались нами подробно в наших прежних работах /1,4,5/. Здесь приведены лишь соответствующие основные сведения.

При 2,34 ГэВ/с угловое распределение π^0 -мезонов в звездах с $N \leq 3$ имеет вид, типичный для π^+ -мезонов в реакциях π^- -мезонов с нуклонами. Оно резко отличается по форме от соответствующего распределения для случаев с $N \geq 4$. Угловое распределение во взаимодействиях с $N \geq 7$ в лабораторной системе координат близко к изотропному, и только лишь при небольших углах вылета π^- -мезонов, $\Theta_{\pi^+\pi^0} < 30^\circ$ наблюдается коллимация вперед.

Угловые распределения гамма-квантов в лабораторной системе координат во взаимодействиях π^- -He с $N \leq 4$ при 5 и 9 ГэВ/с имеют одинаковый вид и не отличаются по форме от соответствующих распределений гамма-квантов в π^- -нуклонных взаимодействиях при

Таблица VI
Средние энергии E_γ - гамма-квантов, сопровождающих π -X-взаимодействия при 5 и 9 ГэВ/с во взаимодействиях с разными N_3 .

N_3	P_π - ГэВ/с	Доля событий %	E_γ /МэВ/
≤ 4	{ 5	27,2 \pm 3,2	403 \pm 40
	{ 9	27,2 \pm 3,7	585 \pm 50
5+9	{ 5	39,6 \pm 4,0	271 \pm 20
	{ 9	44,6 \pm 4,6	408 \pm 30
	{ 5	33,6 \pm 3,4	205 \pm 15
≥ 10	{ 9	28,5 \pm 3,7	213 \pm 20

Таблица VII
Характеристики π^0 -мезонов во взаимодействиях $\pi^+ - X_e$ при 2,34 ГэВ/с с разными N_3 и с продукцией одного π^0 -мезона

Величина	N_3	≤ 3	4+6	≥ 7
\bar{P}_{π^0} МэВ/с		677 \pm 50	262 \pm 40	228 \pm 60
$\bar{P}_{\pi^{01}}$ МэВ/с		250 \pm 25	194 \pm 15	158 \pm 10
$\langle \Delta P_{\pi^{01}} \rangle$ МэВ/с		160	140	100

Обозначения: N_3 - число следов вторичных заряженных частиц во взаимодействиях; \bar{P}_{π^0} , $\bar{P}_{\pi^{01}}$ и $\langle \Delta P_{\pi^{01}} \rangle$ - средний импульс, средняя поперечная составляющая и дисперсия поперечной составляющей импульса π^0 -мезона.

Таблица VIII

Характеристики π^0 -мезонов во взаимодействиях $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 ГэВ/с с разными N_{π^0} и с продукцией не меньше двух π^0 -мезонов

Величина	N_{π^0}	≤ 2	3 + 6	≥ 7
\bar{P}_{π^0} МэВ/с		615±50	275±40	196±50
$\bar{P}_{\pi^0 1}$ МэВ/с		230 ±30	174±23	146±20
$\langle \Delta P_{\pi^0 1}^2 \rangle$ МэВ/с		128	113	104

Обозначения как в таблице VII.

Таблица IX

Распределение по импульсам π^+ и π^0 -мезонов из интервала импульсов 50 ± 150 МэВ/с во взаимодействиях $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 ГэВ/с с $N \geq 7$.

$\bar{P}_{\pi^0 1}$ МэВ/с	50+70	70+90	90+110	110+130	130+150
N_{π^+}	5±2	22±5	50±8	68±8	62±8
N_{π^0}	16±3	52±10	60±10	47±9	32±7

Таблица X
Частота /в мбн/ образования различных кратностей,
 π^+ и π^0 -мезонов во взаимодействиях π^+ -He при
импульсе пионов 2,34 ГэВ/с в зависимости от N_3

N_3 / π	≤ 3	4+6	≥ 7	Все N_3
I π^+	12,3±1,7	27,9±5,6	25,0±5,3	65,2±7,9
2 π^+	0,10±1,50	4,3±0,8	3,9±0,8	8,3±1,9
Все π^+	12,4±2,3	35,2±5,7	28,9±5,4	73,5±8,2
III 0	20,9±2,1	69,8±5,7	77,7±5,4	168,4±8,8
2II 0	11,8±1,5	18,5±2,5	4,7±1,0	35,0±3,1
3II 0	3,8±0,8	6,3±1,1	<1,3±1,3	10,1±1,4
Все II 0	36,5±2,7	94,6±6,5	82,4±5,5	213,5±8,6

Таблица XI
Распределение по классам взаимодействий с разными
 N_3 импульсов π^+ -мезонов, рожденных в π^+ -He взаимо-
действиях при 9 ГэВ/с

Величина	$N_3 \leq 4$	$5 \leq N_3 \leq 9$	$N_3 \geq 10$
\bar{P}_{π^+}	128±18	120±10	122±7
$\cos \theta_{\pi^+}$	0,44±0,12	0,06 ± 0,01	0,06±0,01

Таблица XII

Средние значения импульсов протонов из взаимодействий $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 ГэВ/с и соотношения частоты излучения вперед F, к частоте излучения назад, B.

N_{π}	≤ 3	4 + 6	7+9	≥ 10
\bar{p} МэВ/с	360 \pm 20	348 \pm 17	350 \pm 15	322 \pm 20
$\frac{F}{B}$	2,4 \pm 0,2	1,6 \pm 0,2	2,0 \pm 0,2	

Таблица XIII

Среднее число протонов \bar{n}_p в $\pi^+ - \text{Xe}$ взаимодействиях при 2,34 ГэВ/с в классах событий с разными N_{π}

N_{π}	\bar{n}_p
2	0,5 \pm 0,2
3	0,8 \pm 0,3
4	1,1 \pm 0,3
5	2,2 \pm 0,3
6	2,9 \pm 0,3
7	3,9 \pm 0,3
8	4,5 \pm 0,4
9	5,9 \pm 0,4
10	7,3 \pm 0,4

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью использованной нами методики все характеристики π^0 -мезонов, рожденных в исследуемых нами взаимодействиях высокоэнергичных π -мезонов с ядрами ксенона, могут быть получены для полного диапазона встречаемых значений импульсов π^0 -мезонов, начиная от нуля.

Во взаимодействиях с небольшим числом наблюдаемых вторичных заряженных продуктов реакций, $N \leq 4$, заметный процент среди источников гамма-квантов, со-

проводящих взаимодействия, составляют η^0 -частицы - 24% при 2,34 ГэВ/с и 10% при 9 ГэВ/с. Во взаимодействиях с $N > 4$ основным, почти исключительным, источником гамма-квантов являются π^0 -мезоны. Так как взаимодействия с небольшими N составляют лишь /25 30%/ всех взаимодействий π -ядро, то практически во всех π -Хе взаимодействиях, с любыми N , основным источником сопровождающих взаимодействия гамма-квантов являются π^0 -мезоны. Характеристики этих π^0 -мезонов можно использовать для исследования самого процесса взаимодействия, аналогично тому, как используется характеристики заряженных продуктов реакций.

Характеристики зарегистрированных со 100%-ной вероятностью и надежно идентифицированных π^+ -мезонов относятся лишь к диапазону значений импульсов этих мезонов /50-150/ МэВ/с.

Зависимость среднего числа протонов \bar{n}_p от N /таблица XIII / указывает на то, что основную долю среди наблюдаемых заряженных вторичных продуктов реакции составляют именно протоны.

Литература

1. М. Дашкевич, Б. Словинский, З. С. Стругальский. ЯФ, 5, 341 /1967/.
2. Z. Strugalski, T. Siemiarczuk. Phys. Lett., II, 170 (1964).
3. Б. Словинский, З. С. Стругальский. ЯФ, 9, 142 /1969/.
4. Б. Словинский, З. С. Стругальский. ОИЯИ, P1-4076, Дубна, 1968.
5. Б. Словинский, З. С. Стругальский. ОИЯИ, P1-6408, Дубна, 1972.
6. Б. Словинский, З. С. Стругальский. ОИЯИ, P1-5592, Дубна, 1971.
7. И. М. Граменицкий, Л. С. Охрименко, Б. Словинский, З. С. Стругальский. ЖЭТФ, 47, 801 /1964/.
8. Б. Словинский, З. С. Стругальский. ОИЯИ, P1-6557, Дубна, 1972.
9. З. С. Стругальский. ОИЯИ, 796, Дубна, 1961.
10. Л. П. Коновалова, Л. С. Охрименко, З. С. Стругальский. ПТЭ, 6, 26 /1961/.
11. O. Czyzewski, J. Danysz, Z. Strugalski. Acta Physica Polonica, 24, 509 (1963).

12. И. А. Ивановская, И. Т. Канарек, Л. С. Охрименко, Б. Словинский, З. С. Стругальский, И. В. Чувило, З. Яблонский. ПТЭ, 2, 39 /1968/.
13. Z. S. Strugalski, I. V. Chuvilo, Z. Jablonski, T. Kanarek, S. Krasnovsly, L. S. Okhrimenko, G. Pinter, B. Stowinski. JINR, E1-5349, Dubna, 1970.
14. O. Czyzewski, J. Danysz, J. Toskiewicz, J. Zaorska, B. Stowinski, Z. S. Strugalski. Nucleonika, 9, 155 (1964).
15. Z. S. Strugalski. Nuclear Physics, 87, 280 (1966).
16. Е. Богданович, И. А. Ивановская, Т. Канарек, З. И. Огрзевальский, Л. С. Охрименко, З. С. Стругальский. ОИЯИ, P1-6180, Дубна, 1972.
17. Г. Л. Баятян, И. М. Граменицкий, А. А. Номофилов, М. И. Подгорецкий, Э. С. Сажипчак. ЖЭТФ, 36, 690 /1969/.
18. В. Б. Любимов, Му-Цзунь, В. Н. Стрельцов. ОИЯИ, P-1624, Дубна, 1964.
19. Б. Словинский, З. С. Стругальский. ОИЯИ, P1-6188, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 августа 1973 года.