

26/41-7

C-482

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

2197/2-72

P1 - 6408



Б.Словинский, З.С.Стругальский

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЧАСТИЦ  
И РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ П-МЕЗОНОВ  
С ИМПУЛЬСАМИ 2,34; 5 И 9 ГЭВ/С  
С ЯДРАМИ КСЕНОНА

1972

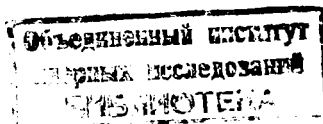
Б.Словинский, З.С.Стругальский

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЧАСТИЦ  
И РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  $\Pi$ -МЕЗОНОВ  
С ИМПУЛЬСАМИ 2,34; 5 И 9 ГЭВ/С  
С ЯДРАМИ КСЕНОНА

Доклад на конференции

"Ядерные реакции при высоких энергиях"

(Тбилиси, 19-22 июня 1972 г.)



## Введение

В течение нескольких лет физики Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, а также Варшавского университета, Института ядерных исследований в Варшаве и Центрального института физических исследований в Будапеште проводили изучение взаимодействий  $\pi$ -мезонов с ядрами ксенона. При этом применялась 26-литровая ксеноновая пузырьковая камера ЛВЭ ОИЯИ, которая была облучена в пучках  $\pi^+$ -мезонов 2,34 Гэв/с,  $\pi^-$ -мезонов 5 и 9 Гэв/с.

Результаты исследований публиковались в разных журналах и в виде сообщений ОИЯИ <sup>/1-19/</sup>. Они касались главным образом свойств распадов нейтральных бозонов, рожденных в определенных классах взаимодействий и распадающихся на  $\pi^0$ -мезоны и гамма-кванты, а также некоторых свойств  $\pi^+$ -мезонов и протонов, рожденных во всех  $\pi$ -Xe взаимодействиях. В исследованиях  $\pi$ -Xe взаимодействия в основном делились на классы по числу  $N_{\Sigma}$  вторичных заряженных частиц.

Совокупность информации, накопленной в результате применения методики, с помощью которой регистрируются  $\pi^0$ -мезоны с эффективностью, близкой 100%, рассматриваемая в целом, дает новые сведения, касающиеся разных аспектов процесса взаимодействия быстрых  $\pi$ -мезонов с ядрами.

В этой работе результаты будут рассмотрены с точки зрения генерации разных частиц и резонансных состояний в процессах соударения  $\pi$ -мезонов с ядрами ксенона.

## 1. Основные сведения о методике исследования

В отличие от большинства экспериментов, в которых обычно рассматриваются взаимодействия частиц с ядрами, имеющими относительно большие атомные номера, в проведенных нами исследованиях мишень составляла химически однородное вещество — жидкий ксенон — с атомным номером  $Z = 54$ , атомным весом  $A = 131$ . Обычно регистрировались гамма-кванты с энергиями больше 10 Мэв, что позволило регистрировать с почти 100%-ной эффективностью  $\pi$ -мезоны в диапазоне их импульсов от 0 до самых больших, встречающихся в исследуемых взаимодействиях, определяя при этом значения импульсов с точностью (10–20)%. Минимальная длина проекции на плоскость фотографирования наблюдаемых следов вторичных заряженных частиц составляет 2 мм, чему соответствует кинетическая энергия протонов 15 Мэв и пионов 8 Мэв. Практически в измерениях брались следы протонов в пределах длин от 5 до 150 мм, чему соответствуют импульсы от 200 Мэв/с до 575 Мэв/с. Измеряемые пробеги  $\pi^+$ -мезонов, регистрируемых в камере со 100%-ной эффективностью в полном телесном угле, находились в диапазоне 5–120 мм, соответствуя импульсам от 500 до 150 Мэв/с. Для всех  $\pi^+$ -мезонов и протонов в вышеупомянутых диапазонах значений импульсов камера является детектором типа  $4\pi$  при избранной в центре камеры области взаимодействий<sup>1/16/</sup>. Можно принять, что камера практически была детектором типа  $4\pi$  также и для всех регистрируемых  $\pi^0$ -мезонов.

Точность определения углов испускания гамма-квантов составляла  $(0,5-2)^\circ$ , ошибка в определении углов эмиссии заряженных частиц была не больше  $5^\circ$ . Погрешность определения длин следов заряженных частиц

не превышала 1 мм, что соответствует точности определения импульсов протонов ~ 10% при импульсе 200 Мэв/с и ~ 1% при импульсе 575 Мэв/с. Для  $\pi^+$ -мезонов при 50 Мэв/с ошибка в импульсе составляла примерно 20% и при 150 Мэв/с - примерно 2%. Точность определения энергий гамма-квантов составляла (12-35)%.

Более подробные сведения о методике исследований можно найти в опубликованных ранее работах <sup>1,2,6,8-16/</sup>.

## 2. Экспериментальные сведения

Результаты экспериментальных исследований  $\pi$ - $\text{Xe}$  взаимодействий с точки зрения образования частиц и резонансных состояний относятся главным образом к генерации  $\pi^0$ -мезонов и нейтральных систем, распадающихся на  $\pi^0$ -мезоны и гамма-кванты, к испусканию протонов,  $\pi^-$ -мезонов, а также систем  $\pi^+\pi^0$ ,  $p\bar{p}$ ,  $\pi^+\gamma$ ,  $p\gamma$ ,  $p\pi^0$ .

### 2.1 Генерация $\pi^0$ -мезонов и нейтральных систем, распадающихся на $\pi^0$ -мезоны и гамма-кванты

Исследования энергетических спектров гамма-квантов во всех взаимодействиях  $\pi^+-\text{Xe}$  при 2,34 Гэв/с и  $\pi^--\text{Xe}$  при 5 и 9 Гэв/с показали, что главными, почти исключительными источниками гамма-квантов являются  $\pi^0$ -мезоны <sup>3,4,9,10,16/</sup>. Однако, если выделить среди всех  $\pi-\text{Xe}$  взаимодействий события с небольшим числом  $N (\leq 4)$  вторичных заряженных частиц и для этих событий построить спектры эффективных масс комбинаций пар гамма-квантов, то кроме пика, соответствующего  $\pi^0$ -мезонам, заметен пик, происходящий от  $\eta^0$ -частицы <sup>3,4,9,10,16/</sup>. Других каких-либо нерегулярностей в спектре не наблюдается.

Аналогичный результат дает исследование спектров эффективных масс комбинаций пар гамма-квантов <sup>3,4,9,10,16/</sup>. Оказывается, что в событиях  $\pi^+-\text{Xe}$  с одной вторичной заряженной частицей - протоном соотношение числа  $\pi^0$ -мезонов  $N_{\pi^0}$  и  $\eta^0$ -частиц  $N_{\eta^0 \rightarrow 2\gamma}$  составляет <sup>16/</sup>

$$\frac{N_{\eta^0 \rightarrow 2\gamma}}{N_{\pi^0}} = (24,2 + 2,7) \% \quad , \quad (1)$$

а при 9 Гэв/с это соотношение в 0-лучевых событиях с 2 гамма-квантами следующее <sup>/4/</sup>:

$$\frac{N_{\eta \rightarrow 2\gamma}}{N_{\pi^0}} \leq 14\% \quad . \quad (2)$$

В спектрах эффективных масс комбинаций пар гамма-квантов для событий с  $N_{\Sigma} \geq 4$  сигнала от  $\eta^0$ -частицы не наблюдается ни при 2,34 Гэв/с, ни при 9 Гэв/с <sup>/3,9,10/</sup>.

Из анализа спектров эффективных масс <sup>/1/</sup> пар гамма-квантов следует, что в рассматриваемых взаимодействиях при 2,34 Гэв/с, в диапазоне значений масс 600-1300 Мэв, не генерируются с сечениями больше 0,03 сечения для  $\pi^0$ -мезонов какие-либо частицы, распадающиеся на 2 гамма-кванта <sup>/9,10,16/</sup>.

Как было показано, события с малыми числами вторичных заряженных частиц относятся в основном к взаимодействиям налетающих  $\pi^-$ -мезонов с нуклонами на периферии ядра ксенона <sup>/1,2,6,9,10/</sup>.

Приведем некоторые характеристики процесса генерации  $\pi^0$ -мезонов во взаимодействиях  $\pi^-$ -мезонов с ядрами ксенона. В табл. 1 дано распределение по числу  $N_{\pi^0}$   $\pi^0$ -мезонов во взаимодействиях при 2,34 и 9 Гэв/с.

В табл. 2 приведены зависимости средних кратностей  $\pi^0$ -мезонов  $n_{\pi^0}$  от числа вторичных заряженных частиц  $N_{\Sigma}$  в событиях при импульсе  $p_{\pi}$  2,34; 5,9 Гэв/с.

При 9 Гэв/с были, кроме этого, исследованы распределения кратностей  $\pi^0$ -мезонов более подробно. Оказалось, что:

1. Форма распределения кратностей  $\pi^0$ -мезонов не зависит от числа вторичных заряженных продуктов в звезде <sup>/1/</sup>;

Таблица 1

Распределение всех взаимодействий  $\pi - \text{He}$  при 2,34 и 9 Гэв/с по числу  $N_{\pi^0}$  генерированных  $\pi^0$ -мезонов

| $N_{\pi^0}$ | 2,34 Гэв/с          | 9 Гэв/с             |
|-------------|---------------------|---------------------|
|             | $\pi^+ - \text{He}$ | $\pi^- - \text{He}$ |
| 1           | (77,1 $\pm$ 5,8)%   | (45,5 $\pm$ 4,0)%   |
| 2           | (18,0 $\pm$ 2,4)%   | (36,5 $\pm$ 2,0)%   |
| 3           | (4,5 $\pm$ 1,1)%    | (10,1 $\pm$ 1,6)%   |
| 4           | (0,4 $\pm$ 0,3)%    | (7,4 $\pm$ 0,8)%    |
| 5           | 0                   | (0,5 $\pm$ 0,4)%    |

Таблица 2

Средняя кратность генерации  $\pi^0$ -мезонов в звездах с разными числами вторичных заряженных продуктов

| $p_{\pi}$<br>$N_{\pi}$ | $\leq 3$      | 4-6             | $\geq 7$        | Все             |
|------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                        | 2,34          | 0,50 $\pm$ 0,04 | 0,63 $\pm$ 0,04 | 0,39 $\pm$ 0,03 |
| 5,0                    | 1,2 $\pm$ 0,2 | 1,2 $\pm$ 0,2   | 1,2 $\pm$ 0,2   | 1,2 $\pm$ 0,2   |
| 9,0                    | 1,5 $\pm$ 0,2 | 1,6 $\pm$ 0,3   | 1,4 $\pm$ 0,2   | 1,5 $\pm$ 0,2   |

2. Форма распределения кратностей  $\pi^0$ -мезонов в границах около 5% ошибки такая же как формы распределений  $\pi^\pm$ -мезонов, генерированных в  $\pi^-p$  взаимодействиях при 10 Гэв/с<sup>1/</sup>. Форма распределения кратностей  $\pi^0$ -мезонов практически не зависит от числа вторичных заряженных частиц во взаимодействии и при 2,34 Гэв/с<sup>10/</sup>.

Распределения эффективных масс комбинаций 3 гамма-квантов ис- следовались систематически во всех  $\pi^+ - \text{Xe}$  взаимодействиях только с одним вторичным заряженным продуктом - протоном и с любым числом сопровождающих взаимодействия гамма-квантов. В 454 событиях с 3 гамма-квантами и в 564 событиях с 4 гамма-квантами и с любым числом вторичных заряженных частиц спектр эффективных масс комбинации по 3 гамма-кванта совпадает со спектром случайных комбинаций<sup>10/</sup>. Спектр обрывается на значениях масс около 900 Мэв.

В области эффективных масс, которая могла бы соответствовать  $\omega^0$ -частице, имеется лишь около 4% событий. В распределениях эффективных масс комбинаций по 3 гамма-кванта в однолучевых  $\pi^+ - \text{Xe}$  событиях наблюдается указание на присутствие  $\omega^0$  лишь в спектре для случаев с 3 гамма-квантами. Добавочная угловая и энергетическая селекция событий ведет к обнаружению случаев распада  $\omega^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$  /12,16/. Подсчёт показывает, что соотношение числа  $N_{\omega^0 \rightarrow \pi^0 \gamma}$  регистрируемых случаев  $\omega^0$  к общему числу  $N_{\pi^0}$   $\pi^0$ -мезонов, рождаемых в однолучевых событиях, следующее:

$$\frac{N_{\omega^0 \rightarrow \pi^0 \gamma}}{N_{\pi^0}} < 5\% . \quad (3)$$

Наблюдалось рождение  $\omega^0$  с последующим распадом на  $\pi^0 \gamma$  и во взаимодействиях  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 9 Гэв/с, с ядрами ксенона<sup>17/</sup>. При исследованиях события не разделялись на классы по числу заряженных продуктов реакции.



Исследования спектров эффективных масс комбинаций 4 гамма-квантов с целью поиска систем  $\pi^0 \pi^0$ ,  $\pi^0 \eta^0$  и  $\pi^0 \gamma \gamma$  велись во всех  $\pi^+ - \text{Xe}$  взаимодействиях при 2,34 Гэв/с и в классе этих взаимодействий с одним вторичным заряженным продуктом - протоном<sup>/10,16/</sup>. Более подробный анализ спектра эффективных масс был проведен лишь для ансамбля однолучевых событий<sup>/14-16/</sup>. В этом ансамбле можно различить три группы событий:

а) с двумя  $\pi^0$ -мезонами, б) с одним  $\pi^0$ -мезоном и двумя гамма-квантами, в) с одним  $\pi^0$ -мезоном и с одним  $\eta^0$ -мезоном. Небольшая доля событий  $\pi^0 \gamma \gamma$  может происходить от распада  $\eta^0 \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$ <sup>/15/</sup>, остальные происходят или от событий с большим числом гамма-квантов, или это прямо события  $\pi^0 \pi^0$ , в которых энергия по крайней мере одного гамма-кванта измерена по объективным обстоятельствам неточно. Событий  $\pi^0 \eta^0$  слишком мало, чтобы можно было что-либо сказать по поводу возможного существования связанной системы  $\pi^0 \eta^0$ . В распределении событий  $\pi^0 \pi^0$  по эффективным массам можно выделить две группы случаев после вычета фона случайных комбинаций<sup>/14,16/</sup>. Одна группа случаев соответствует известной частице  $f^0$ , распадающейся на два  $\pi^0$ -мезона. Вторая группа может указывать на присутствие связанных  $\pi^0 \pi^0$ -состояний с массой в районе 700 Мэв<sup>/14,16/</sup>. Относительная интенсивность генерации этой системы по отношению к интенсивности генерации  $\eta^0 \rightarrow 2\gamma$  равна<sup>/16/</sup>

$$\frac{N(\pi^0 \pi^0)}{N(\eta^0 \rightarrow 2\gamma)} = 0,25 \pm 0,08. \quad (4)$$

В однолучевых  $\pi^+ - \text{Xe}$ -событиях с пятью гамма-квантами при 2,34 Гэв/с 5 гамма-квантов получаются из событий с 6 гамма-квантами, в которых один из гамма-квантов зарегистрирован. Среди них можно, однако, выделить несколько случаев, которые можно интерпретировать как рождение  $\omega^0$ -частицы с последовательным распадом  $\omega^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ <sup>/12,16/</sup>.

Среди событий однолучевых  $\pi^+ - \text{Xe}$  взаимодействий при 2,34 Гэв/с с шестью гамма-квантами основную часть, примерно 70% случаев, можно отнести к генерации  $\eta^0$ -частицы с последующим распадом типа  $\eta^0 \rightarrow 3\pi^0$  /15,16/.

## 2.2. Испускание протонов

Среднее число протонов, в диапазоне регистрируемых энергий, в зависимости от числа заряженных частиц в звезде растёт пропорционально  $N_Z$  /17/. Спектр эффективных масс комбинации двух протонов построен для 1678 пар протон-протон и не имеет каких-либо нерегулярностей, хорошо совпадая с рассчитанным по методу Монте-Карло спектром случайных комбинаций /17/.

## 2.3. Замечания по поводу генерации $\pi^+\gamma$ , $\pi^+\pi^0$ , $\pi^0\rho$ , $\gamma\rho$ -систем

В  $\pi^+ - \text{Xe}$  взаимодействиях при 2,34 Гэв/с регистрировались также и вторичные  $\pi^+$ -мезоны по цепочке заряженных продуктов распада  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  в диапазоне импульсов 50-150 Мэв/с. Для этих  $\pi^+$ -мезонов и гамма-квантов или  $\pi^0$ -мезонов строились спектры соответствующих эффективных масс комбинаций  $\pi^+\gamma$ ,  $\pi^+\pi^0$  /17/. В распределении эффективных масс 102 случаев комбинаций  $\pi^+\pi^0$  наблюдается нерегулярность в области значения массы  $\rho^+$ -мезона. Нерегулярность отчётливее, если в этом наборе событий ограничиться лишь взаимодействиями с  $N_Z \leq 3$  /17/. Распределение 347 эффективных масс комбинаций  $\pi^+\gamma$  совпадает с распределением соответствующих случайных комбинаций /17/. Не наблюдается каких-либо статистически значимых нерегулярностей в спектре эффективных масс из 530 комбинаций гамма-квант-протон /17/.

### 3. Обсуждение экспериментальных данных

В проведенных исследованиях наиболее обстоятельно была изучена генерация в  $\pi$ - $\text{He}$  взаимодействиях нейтральных продуктов, распадающихся на  $\pi^0$ -мезоны и гамма-кванты, особенно при импульсе налетающих  $\pi^+$ -мезонов, равном 2,34 Гэв/с. Что касается других частиц и резонансных состояний, то полученную информацию о них необходимо трактовать лишь как некоторого рода указания к дальнейшим исследованиям и к набору нужной статистики.

Среди изученных в этой работе нейтральных продуктов реакций быстрых  $\pi$ -мезонов с ядрами  $\pi^0$ -мезоны составляют основную долю. Они, регистрируясь в полном диапазоне импульсов, начиная от нуля, и с эффективностью, близкой 100%, могут дать богатую информацию о самом механизме процесса взаимодействия  $\pi$ -мезонов с тяжелым ядром. Другие из нейтральных продуктов, распадающиеся на  $\pi^0$ -мезоны и гамма-кванты, обладают подобными с точки зрения методики их регистрации свойствами, однако они составляют весьма малую долю по сравнению с  $\pi^0$ -мезонами.

Оказалось, что наиболее легко обнаружить в спектрах эффективных масс комбинаций нескольких гамма-квантов сигналы от других, чем  $\pi^0$ -мезоны, продуктов, если исследовать эти спектры, ограничиваясь лишь случаями взаимодействий с малыми числами  $N_3$  вторичных заряженных частиц, чему соответствуют в основном так называемые квази-элементарные реакции <sup>/2, 11/</sup>. Имеются указания, что то же самое относится и к исследованиям конфигураций с заряженными частицами <sup>/17/</sup>.

Пока не удастся определить, является ли отсутствие случаев  $\eta^0 \rightarrow 2\gamma$  в событиях с большими  $N_3$  результатом интенсивного поглощения в ядре  $\eta^0$ -мезонов или просто результатом диссипации энергии при вовлечении в реакции не только периферийных нуклонов ядра <sup>/11/</sup>.

С помощью применяемой нами методики хорошо регистрируются протоны, причём в почти полном диапазоне их импульсов (свыше 200 Мэв/с<sup>174</sup>).

В заключение следует сделать более чёткий вывод методического характера. Для исследования взаимодействия быстрых  $\pi$ -мезонов с ядрами можно успешно использовать характеристики генерированных в этих взаимодействиях  $\pi^0$ -мезонов и протонов. Исследования целесообразно провести для ядер ксенона с помощью ксеноновых пузырьковых камер. Для других ядер можно применять другие камеры соответствующих размеров, наполненные тяжелыми жидкостями.

#### Литература

1. Z.S.Strugalski, T.Siemiarczuk. Phys.Lett., 11, 170 (1964).
2. Z.S.Strugalski, T.Siemiarczuk. Phys.Lett., 13, 347 (1964).
3. O.Czyzewski, J.Danysz, J.Loskiewicz, J.Zaorska, B.Slowinski, Z.S.Strugalski. Nukleonika, 9, 155 (1964).
4. М.И. Граменицкий, Л.С. Охрименко, Б. Словинский, З.С. Стругальский. ЖЭТФ, 47, 801 (1964).
5. Z.S.Strugalski. Nucl.Phys., 87, 280 (1966).
6. М. Дамкевич, Б. Словинский, З.С. Стругальский. Ядерная физика, 5, 341 (1967).
7. Т.И. Канарек, Е. Лоскевич, А.С. Мартынов, Б. Ничипорук, З.С. Стругальский, Г.Л. Семашко, Т. Семярчук, К. Эскрейс. Ядерная физика, 6, 786 (1967).
8. В. Гадомский, Б. Словинский, З.С. Стругальский. Ядерная физика, 7, 1246 (1938).
9. Б. Словинский, З.С. Стругальский. ОИЯИ, P1-3822, Дубна, 1968.
10. Б. Словинский, З.С. Стругальский. ОИЯИ, P1-4076, Дубна, 1968.
11. Б. Словинский. Диссертация. Варшавский университет, Варшава, 1969.
12. Z.S.Strugalski, I.V.Chuvilo, I.A.Ivanovskaya, T.Kanarek, L.S.Okhrimenko, T.Gemesy, S.Krasnovsky, G.Pinter. Phys.Lett., 29B, 532 (1969).

13. Z.S.Strugalski, I.V.Chuvilo, I.A.Ivanovskaya, T.Kanarek, L.S.Okhrimenko, T.Gemesy, S.Krasnovsky, G.Pinter. *Phys.Lett.*, 29B, 518 (1969).
14. Z.S.Strugalski, I.V.Chuvilo, I.A.Ivanovskaya, Z.Jablonski, T.Kanarek, S.Krasnovsky, L.S.Okhrimenko, G.Pinter, B.Slowinski. *Nucl.Phys.*, B24, 358 (1970).
15. Z.S.Strugalski, I.V.Chuvilo, T.Gemesy, I.A.Ivanovskaya, Z.Jablonski, T.Kanarek, S.Krasnovsky, L.Okhrimenko, G.Pinter. *Nucl.Phys.*, B27, 427 (1971).
16. Z.S.Strugalski, I.V.Chuvilo, Z.Jablonski, T.Kanarek, S.Krasnovsky, L.S.Okhrimenko, G.Pinter, B.Slowinski. *Report JINR, E1-5349, Dubna, 1970.*
17. Б. Словинский, З.С. Стругальский. ОИЯИ, P1 -5592, Дубна, 1971.
18. Е. Богданович, И.А. Ивановская, Т. Канарек, З.И. Огрзевальский, Л.С. Охрименко, Б. Словинский, З.С. Стругальский. ОИЯИ, P1-6190, Дубна, 1972.
19. Б. Словинский, З.С. Стругальский. ОИЯИ, P1-6188, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 апреля 1972 года.