

СЗ46.48

Г-859

30/x-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2381



ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.Г. Гришин, Э.П. Кистенев, Д.К. Копылова,  
А.Г. Кривенцова, Му Цзюнь, В.Д. Рябков,  
Л.В. Сильвестров

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ  $\pi^+p \rightarrow m\pi^0 + n$   
ПРИ ИМПУЛЬСЕ  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ 4 ГЭВ/С

1965

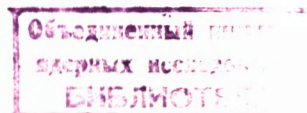
P-2361

3678/2 48-

В.Г. Гришин, Э.П. Кистенев, Д.К. Копылова,  
А.Г. Кривенцова, Му Цзюнь, В.Д. Рябцов,  
Л.В. Сильвестров

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ  $\pi^+p \rightarrow \pi\pi^0+n$   
ПРИ ИМПУЛЬСЕ  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ 4 ГЭВ/С

Направлено в журнал "Ядерная физика"



## § 1. Введение

В настоящее время хорошо изучены процессы образования заряженных  $\pi$ -мезонов и резонансов в  $\pi^+p$ -взаимодействиях при  $p \approx 4$  Гэв с помощью водородной пузырьковой камеры <sup>/1,2/</sup>. Представляется интересным при этой же энергии первичных  $\pi$ -мезонов исследовать свойства  $\pi^0$ -мезонов и радиационные распады резонансов, которые образуются в  $\pi^-p$ -взаимодействиях. Для этой цели обычно используются пузырьковые камеры, наполненные жидкостью более тяжелой, чем водород <sup>/3-10/</sup>. Лучшим прибором в этом смысле является большая пропановая камера, которая позволяет эффективно регистрировать  $\gamma$ -кванты и с хорошей точностью измерять их угловые и энергетические характеристики.

Нами изучались реакции

$$\pi^- + p \rightarrow \pi \pi^0 + n \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

т.е. так называемые нуль-лучевые события.

Относительно большая статистика случаев, сопровождающихся двумя и большим числом  $\gamma$ -квантов, зарегистрированных в камере, позволила хорошо выделить  $\pi^0$ -мезоны и получить их угловые и импульсные характеристики. Было измерено сечение перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на  $\pi^0$ -мезоны и оценено сечение образования  $\eta^0$ -мезонов.

## § 2. Методика эксперимента

Дважды просматривались снимки, полученные с помощью 24-литровой пропановой камеры ЛВЭ ОИЯИ, облученной в пучке  $\pi^-$ -мезонов с импульсом  $3,97 \pm 0,06$  Гэв/с <sup>/11/</sup>. Регистрировались нуль-лучевые события, сопровождающиеся  $\gamma$ -квантами, которые образовали электрон-позитронные пары ( $e^+e^-$ ) в эффективном объеме камеры (см. Приложение 1). Всего было просмотрено около 128 тысяч кадров. Эффективность двойного просмотра оказалась равной  $(88 \pm 2)\%$ . Распределение найденных событий по числу обнаруженных в них  $\gamma$ -квантов приведено в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Распределение нуль-лучевых событий по числу обнаруженных в них  $\gamma$ -квантов

$n_\gamma$	1	2	3	4	5	Пара Делитца + $\gamma$ -кв	Пара Делитца + $2\gamma$ -кв
№ (событий) $\approx 1200$	214	24	3	1	12	2	

Кроме того для определения сечения реакции



было дважды просмотрено около 9 тысяч кадров, на которых регистрировались все нуль-лучевые события. Эффективность двойного просмотра равна  $(85 \pm 1,5)\%$ .

Найденные случаи с  $n_\gamma > 2$  измерялись на полуавтоматах ЛВЭ ОИЯИ и обчислялись на электронно-счетной машине М-20. В программу обчета были введены поправки на радиационные и ионизационные потери электронов и позитронов в пропане<sup>/12/</sup>. Примесь  $\mu^-$ -мезонов и электронов в первичном пучке была определена в работе<sup>/13/</sup> и составляет  $(10 \pm 2)\%$ . Геометрические характеристики отобранных событий не показывают наличия какой-либо выборки при просмотре (см. Приложение II).

### § 3. Сечение образования нейтральных частиц в $\pi^- p$ -соударениях

В результате двойного просмотра около 9 тысяч стереоснимков было найдено 488 случаев нуль-лучевых событий без каких-либо видимых следов ядерного взаимодействия в точке исчезновения первичного  $\pi^-$ -мезона. Если все эти случаи отнести к взаимодействиям типа (2), то сечение этой реакции будет равно  $(3,8 \pm 0,3)$  мбн. В таблице II приведены данные об этом сечении при различных энергиях первичных  $\pi^-$ -мезонов.

В работах<sup>/9,10/</sup> сечение процесса (2) определялось так же, как и в настоящей работе, т.е. все случаи относились к событиям на водороде. Согласно данным, полученных при близких энергиях на водородной пузырьковой камере<sup>/18/</sup>, с данными работы<sup>/9/</sup> по сечению образования странных частиц свидетельствует о том, что примесь углеродных событий невелика. В связи с этим отметим большое сечение реакции (2) при  $p_s = 4$  Гэв -  $\sigma = 3,8 \pm 0,3$  мбн по сравнению с  $\sigma = 2,2 \pm 0,3$  мбн и  $\sigma = 1,70 \pm 0,17$  мбн при  $p_s = 2,8$  и 6.1 Гэв/с. Поэтому представляет интерес подробное изучение энергетической зависимости хода сечения образования частиц по различным каналам (в частности перезарядки) в области энергий 2-6 Гэв<sup>/19/</sup>.

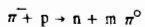
Т а б л и ц а П

Сечения образования нейтральных частиц в реакции (2)

Импульс $\pi^-$ -мезонов (Гэв/с)	Сечение реакции $\pi^- p \rightarrow$ нейтральные (мб)	Сечение образования нейтральных странных частиц в реакции (2) (мб)	Методика
1,6	$4,38 \pm 0,27^{/14/}$		Водородная мишень, счетчики
2,8	$2,2 \pm 0,3^{/3/}$		Пузырьковая камера с тяжелой жидкостью (вычислительная методика)
3,0		$0,56 \pm 0,06^{/17/}$	Водородная камера
4,0	$3,6 \pm 0,3^x)$		Пропановая камера
4,65		$0,44 \pm 0,05^{/18/}$	Водородная камера
6,1	$1,70 \pm 0,17^{/19/}$	$0,38 \pm 0,06^{/9/}$	Пузырьковая камера (86% пропан +14% фреон)
6,8	$1,6 \pm 0,2^{/10/}$		Пропановая камера
16	$0,45 \pm 0,2^{/15/}$		Водородная камера
18,1	$0,50 \pm 0,07^{/9/}$	$0,115 \pm 0,040^{/9/}$	Пузырьковая камера (86% - пропан, 14% фреон)

x) Этот эксперимент.

§ 4. Свойства  $\pi^0$ -мезонов и  $\gamma$ -квантов, образованных в реакциях



Распределение найденных событий с  $n_{\gamma} \geq 2$  по эффективным массам двух  $\gamma$ -квантов ( $M_{\gamma\gamma}$ ) представлено на рис. 1 (с учетом эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов). Плавная кривая - распределение величин  $M_{\gamma\gamma}$ , рассчитанных для  $\gamma$ -квантов, взятых из разных событий (фоновая кривая). Гистограмма и фоновые кривые нормированы на одинаковую площадь для части распределений, относящейся к  $M_{\gamma\gamma} \geq 285$  Мэв. На рис. 2 дано распределение по  $M_{\gamma\gamma}$  тех же событий, но без учета

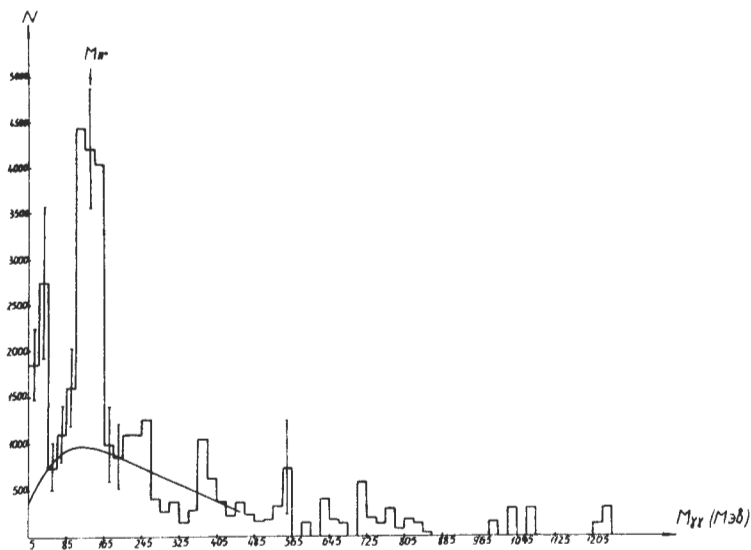


Рис. 1. Распределение случаев с  $n_{\gamma} > 2$  по  $M_{\gamma\gamma}$  с учетом эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов в камере. Плавная кривая - фоновые события.

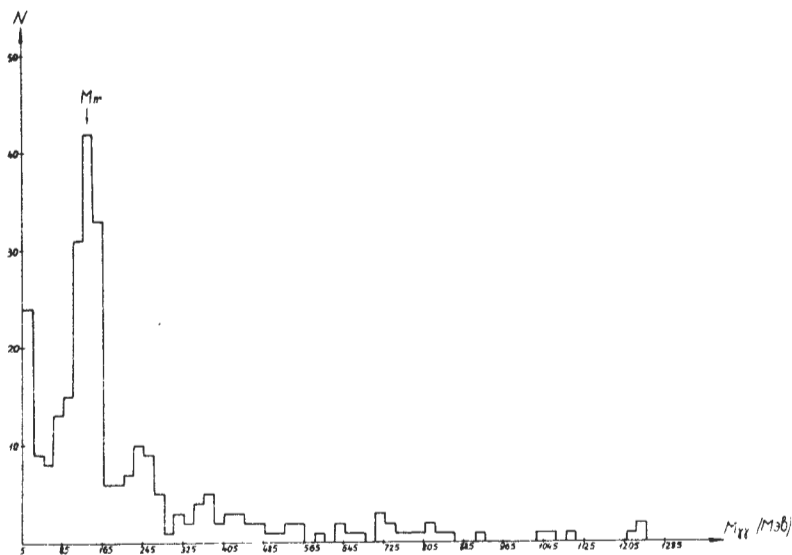


Рис. 2. Распределение случаев с  $n_{\gamma} > 2$  по  $M_{\gamma\gamma}$  без учета эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов в камере.

эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов. Пик в распределении по  $M_{\gamma\gamma}$  связан с  $\pi^0$ -мезонами:  $\bar{M}_{\pi^0} = 135 \pm 1,7$  Мэв и  $\frac{\Delta M_{\pi^0}}{M_{\pi^0}} = 12\%$ . Средняя эффективность регистрации  $\pi^0$ -мезона оказалась равной  $\epsilon(\pi^0) = (1,0 \pm 0,1)\%$ . Полное число  $\pi^0$ -мезонов после вычитания фоновых событий равно  $11950 \pm 1000$ .

Среднее число  $\pi^0$ -мезонов, образованных в реакции (2), на одно взаимодействие оказалось равным  $(1,6 \pm 0,2)$ . Если принять, что сечение образования странных частиц при  $p_s = 4$  Гэв равно  $0,5 \text{ мб}^{17,18/}$ , то среднее число  $\pi^0$ -мезонов на одно взаимодействие типа (1) равно  $(1,9 \pm 0,2)$ .

Угловые и импульсные распределения  $\pi^0$ -мезонов в лабораторной системе координат и в системе центра инерции приведены на рис. 3-6. Распределение  $\pi^0$ -мезонов по поперечным импульсам ( $p_{\perp}$ ) приведено на рис. 7 ( $\bar{p}_{\perp} = 294$  Мэв/с). Для практических целей иногда важно знать угловое и импульсное распределения  $\gamma$ -квантов в л.с. координат. Они приведены на рис. 8 и 9.

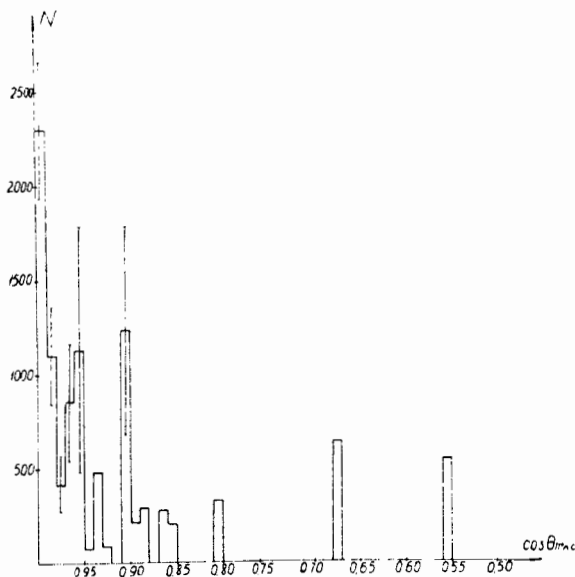


Рис. 3. Угловое распределение  $\pi^0$ -мезонов в л.с. координат.

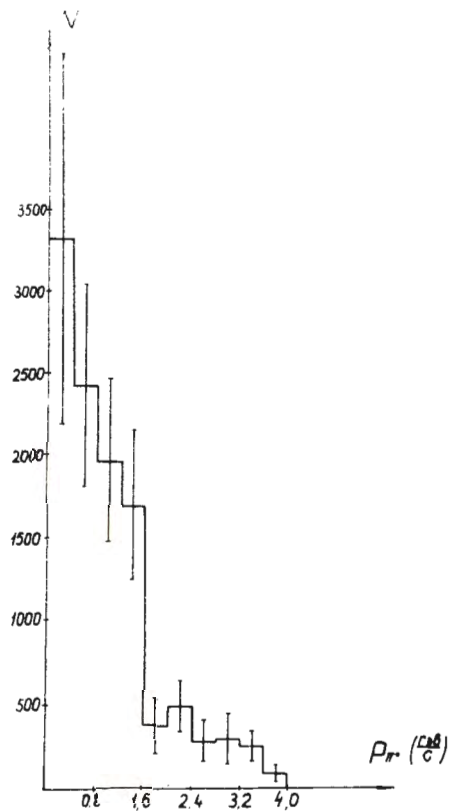


Рис. 4. Импульсное распределение  $\pi^0$ -мезонов в л.с. координат.

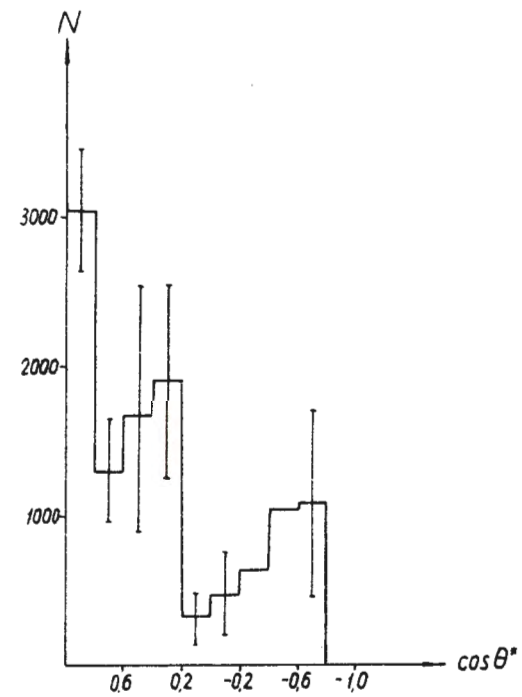


Рис. 5. Угловое распределение  $\pi^0$ -мезонов в с.п. инерции.



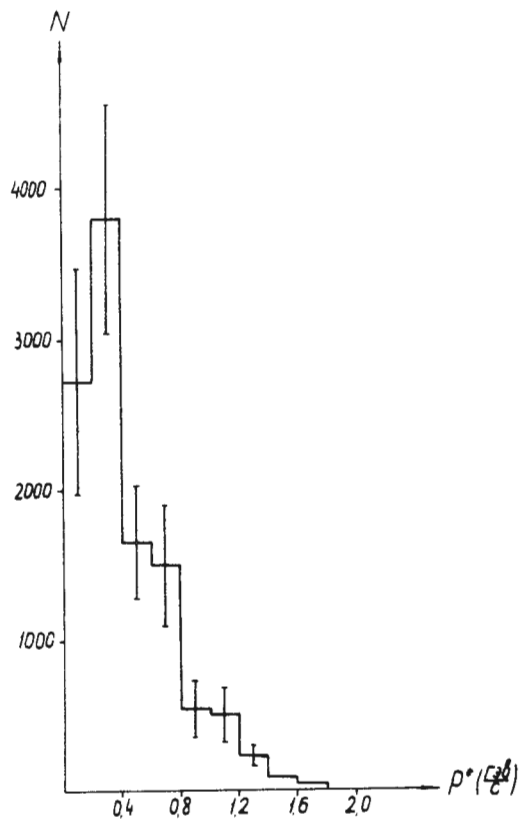


Рис. 6. Импульсное распределение  $\pi^0$ -мезонов в с.п. инерции.

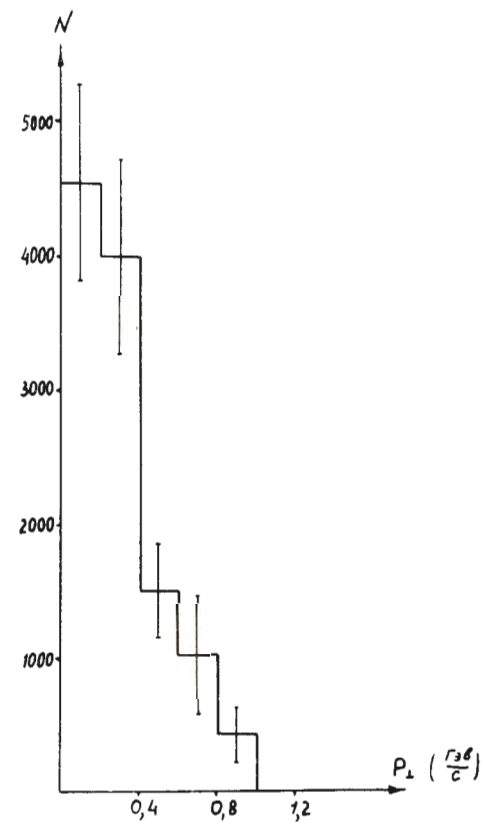


Рис. 7. Распределение  $\pi^0$ -мезонов по поперечным импульсам.

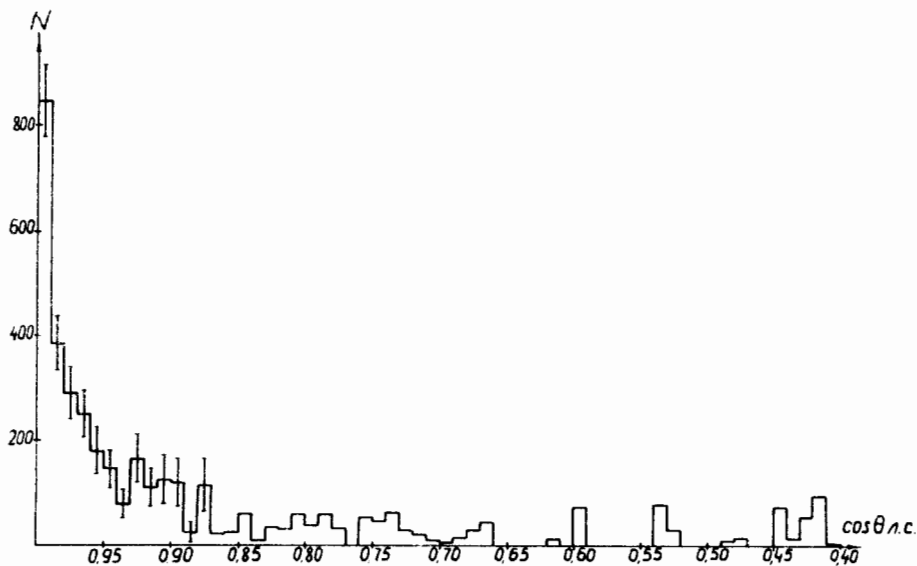


Рис. 8. Угловое распределение  $\gamma$ -квантов в л.с. координат.

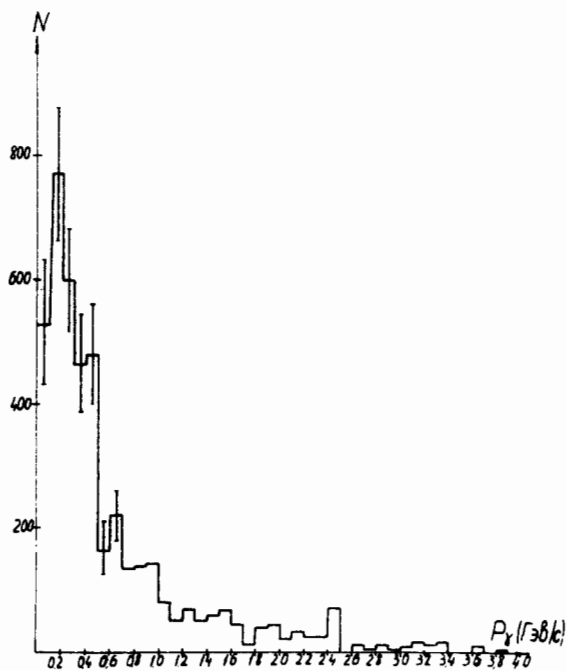


Рис. 9. Импульсное распределение  $\gamma$ -квантов в л.с. координат.

§ 5. Сечения реакций  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + p$  и  $\pi^- + p \rightarrow \eta^0 + p$  при  $p_s = 4$  Гэв

1. После просмотра и измерений было отобрано 214 событий с  $n_{\gamma} = 2$ . Часть из них связана с процессом

$$\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + p. \quad (3)$$

Сравнение импульсов и углов вылета выделенных  $\pi^0$ -мезонов с кинематикой реакции (3) (соотношение угол-импульс) показало, что 11 событий относятся к процессу перезарядки (3). Аналогичный результат был получен для событий с  $n_{\gamma} = 2$  и  $p_{2\gamma} \geq 3$  Гэв/с при вычислении отношения  $\frac{\theta_{\gamma\gamma}}{\theta_{\min}}$  в системе центра инерции. Здесь  $\theta_{\gamma\gamma}$  - угол между  $\gamma$ -квантами и  $\theta_{\min}$  - минимальный угол разлета  $\gamma$ -квантов в реакции (3)<sup>/5/</sup>.

Полное сечение перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на протонах с учетом эффективности регистрации  $\pi^0$ -мезонов равно  $0,17 \pm 0,06$  мб. Эта величина согласуется с данными работы<sup>/20/</sup>, выполненной с помощью черенковского  $\gamma$ -спектрометра ( $\sigma = 0,12 \pm 0,02$  мб).

Из наших данных можно оценить сечение реакции

$$\pi^- + p \rightarrow \eta^0 + p + \gamma + \gamma + p. \quad (4)$$

Всего было найдено 8 событий с  $n_{\gamma} = 2$ , имеющих  $M_{\gamma\gamma} = 500 - 600$  Мэв (область масс  $\eta$ -мезона с учетом ошибок измерений). Ни одно из них нельзя отнести к реакции (4) (по соотношению угол-импульс и  $\theta_{\gamma\gamma} / \theta_{\min}$ ). Отсюда можно оценить, что сечение реакции (4) составляет величину  $0,1 \pm 0,1$  мб (с учетом эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов). Таким образом, сечение реакции (4) равно или меньше сечения реакции (3) при  $p_s = 4$  Гэв. Это сравнение представляет интерес в связи с результатами работы<sup>/21/</sup>, где получено:  $\sigma_1(\gamma p \rightarrow \eta^0 p) = 80 \pm 10$  мб и  $\sigma_2(\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p) = 2 \pm 1,5$  мб примерно при той же полной энергии в системе центра инерции, что и для случая  $\pi^- p$ -взаимодействий при  $p_s = 4$  Гэв.

Авторы предполагают, что резонансный ход сечения фоторождения  $\eta$ -мезонов и большое сечение этого процесса по сравнению с фоторождением  $\pi^0$ -мезонов свидетельствуют о существовании нового резонанса - члена 27 - мультиплета с  $T = \frac{1}{2}$  и  $Y = +1$ . Действительно, в случае существования такого резонанса отношение сечений  $\sigma_1 / \sigma_2$  будет равно 27, что согласуется с экспериментом по фоторождению  $\eta$  и  $\pi^0$ -мезонов. Если этот резонанс доминирует в  $\pi^- p$ -взаимодействиях, то сечение реакции (4) должно быть много больше сечения реакции (3). Наши экспериментальные данные противоречат этим предположениям.

2. Нами также была оценена верхняя граница сечения перезарядки на углы, большие  $90^\circ$  в л.с. координат, которое представляет интерес с теоретической точки зрения<sup>/10/</sup>.

Эта оценка была сделана из углового распределения  $\pi^0$ -мезонов:

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow \pi^0 p, \theta \geq 90^\circ) \leq 0,05 \text{ мб.}$$

Нам приятно поблагодарить А.А.Кузнецова, В.Б.Любимова, В.И.Мороза, М.И.Подгоречского за ценные обсуждения нашей работы, а также лаборантов, участвовавших в просмотре, измерениях и обработке найденных событий.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

"Потери"  $\gamma$ -квантов при просмотре камерных фотографий.

В этом разделе мы рассмотрим возможные "потери"  $\gamma$ -квантов при просмотре стереоснимков, связанные с взаимодействием  $\gamma$ -квантов с веществом камеры (пропан).

Обычный просмотр камерных фотографий, имеющий своей целью поиск событий, сопровождающихся  $\gamma$ -квантами, которые образовали  $(e^+e^-)$  пару, заключается в следующем. На кадрах, где найдено событие, рассматриваются все электрон-позитронные пары, образованные  $\gamma$ -квантами в эффективном объеме камеры. С помощью специальной линейки определяется направление полета  $\gamma$ -кванта по касательным к трекам электрона и позитрона. Обычно для  $E_\gamma \geq 20$  Мэв в камере с магнитным полем треки электрона и позитрона вначале сливаются, а затем расходятся, так как угол между  $e^+$  и  $e^-$  мал. Поэтому направление полета  $\gamma$ -кванта, конвертировавшего в пару, определяется достаточно точно ( $\phi = \pm 3^\circ$ ). Если линия полета  $\gamma$ -кванта проходит через найденное событие (в нашем случае нуль-лучевая звезда), то  $\gamma$ -квант относится к данной звезде. В противном случае считается, что обнаруженный  $\gamma$ -квант не связан с событием и в дальнейшем не рассматривается. Однако два физических процесса: комптон-эффект и передача импульса ядру при образовании пары могут привести к отклонению суммарного импульса пары от первоначального направления движения  $\gamma$ -кванта, т.е. к "потере"  $\gamma$ -квантов при просмотре<sup>х)</sup>.

х) Фотоэффект для  $E_\gamma \geq 1$  Мэв несущественен. Однако, если нужно регистрировать  $\gamma$ -кванты с  $E_\gamma \ll 1$  Мэв, то, конечно, нужно регистрировать фото- и комптон-электроны, а не  $(e^+e^-)$ -пары. Доля таких  $\gamma$ -квантов при импульсе  $\pi$ -мезонов 4 Гэв/с значительно меньше 1%.

## 1. Комpton-эффект

Нами были оценены вероятности комптоновского рассеяния  $\gamma$ -кванта до образования  $e^+e^-$ -пары. Расчеты были проведены в предположении, что  $l_1 = l_2 = l$  (см. рис. 10). В таблице III даны результаты этих вычислений. Как видно из таблицы III, потеря  $\gamma$ -квантов из-за комpton-эффекта существенна для  $E_\gamma \leq 100$  Мэв

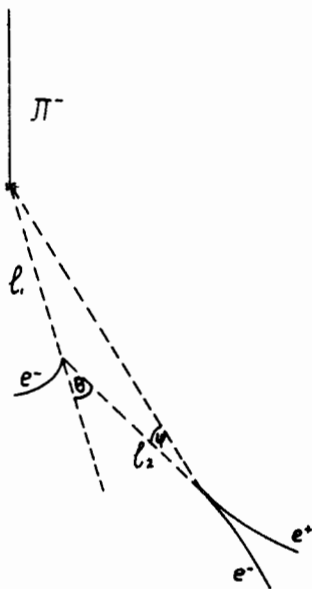


Рис. 10D Схематическое изображение события, когда  $\gamma$ -квант из звезды испытал комптоновское рассеяние на электроне и после этого образовал  $(e^+e^-)$ -пару.

и  $L = 2l = 240 - 100$  см, т.е. для больших пропановых камер. В нашем случае  $l = 10$  см, доля  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma \leq 50$  Мэв от полного числа  $\gamma$ -квантов составляет 1%, поэтому потери не будут превышать 0,04%, что несущественно. В том случае, когда комpton-эффект существенен, следует регистрировать не только  $(e^+e^-)$ -пару, но и комpton-электрон. В большинстве случаев комpton-электрон будет виден в камере ( $T_{e^-} \geq 2$  Мэв). Далее событие должно обрабатываться с учетом комpton-эффекта.

Т а б л и ц а Ш

Вероятность (в %) того, что суммарный импульс  $e^+e^-$ -пары будет иметь  $\phi \geq 3^\circ$   
(у кв. не "смотрит" в звезду)

$E_\gamma$ (Мэв) \ $l$ (см)	5	10	15	20	50	100
5	6,4	12,4	18	23,2	48,1	72,6
20	2,3	4,4	6,5	8,5	20,0	35,8
40	1,3	2,4	3,7	4,8	11,6	21,7
60	0,9	1,7	2,6	3,4	8,3	15,7
80	0,7	1,3	1,9	2,5	6,2	12,0
100	0,5	1,1	1,6	2,1	5,1	10,0

2. Эффект отдачи ядра

Этот эффект существенен при просмотре для  $E_\gamma < 20$  Мэв. Проведенные расчеты показали, что для  $E_\gamma = 5, 10, 15$  и  $25$  Мэв процент случаев, когда угол отклонения ( $e^+e^-$ )- пары от первоначального полета  $\gamma$ -квантов будет больше  $3^\circ$  соответственно меньше 80,40,17 и 5%. В нашей работе доля  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma < 25$  Мэв меньше 0,5%, поэтому этот эффект также несуществен.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Геометрические характеристики нуль-лучевых событий

Распределения найденных событий с  $n_\gamma > 2$  по направляющим косинусам приведены на рис. 11. На рис. 12 приведены распределения нуль-лучевых звезд по  $X, Y, Z$ -координатам, связанным с камерой. Распределение событий по  $Y$  (вдоль камеры) с учетом эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов должно быть приблизительно равномерным. Как видно из рисунка 126, это распределение мало отличается от равномерного. На рис. 13 приведено распределение  $\gamma$ -квантов из нуль-лучевых событий по азимутальному углу  $\phi$ . Оно имеет изотропный характер. Таким образом, эти распределения не показывают наличия какой-либо выборки при просмотре.

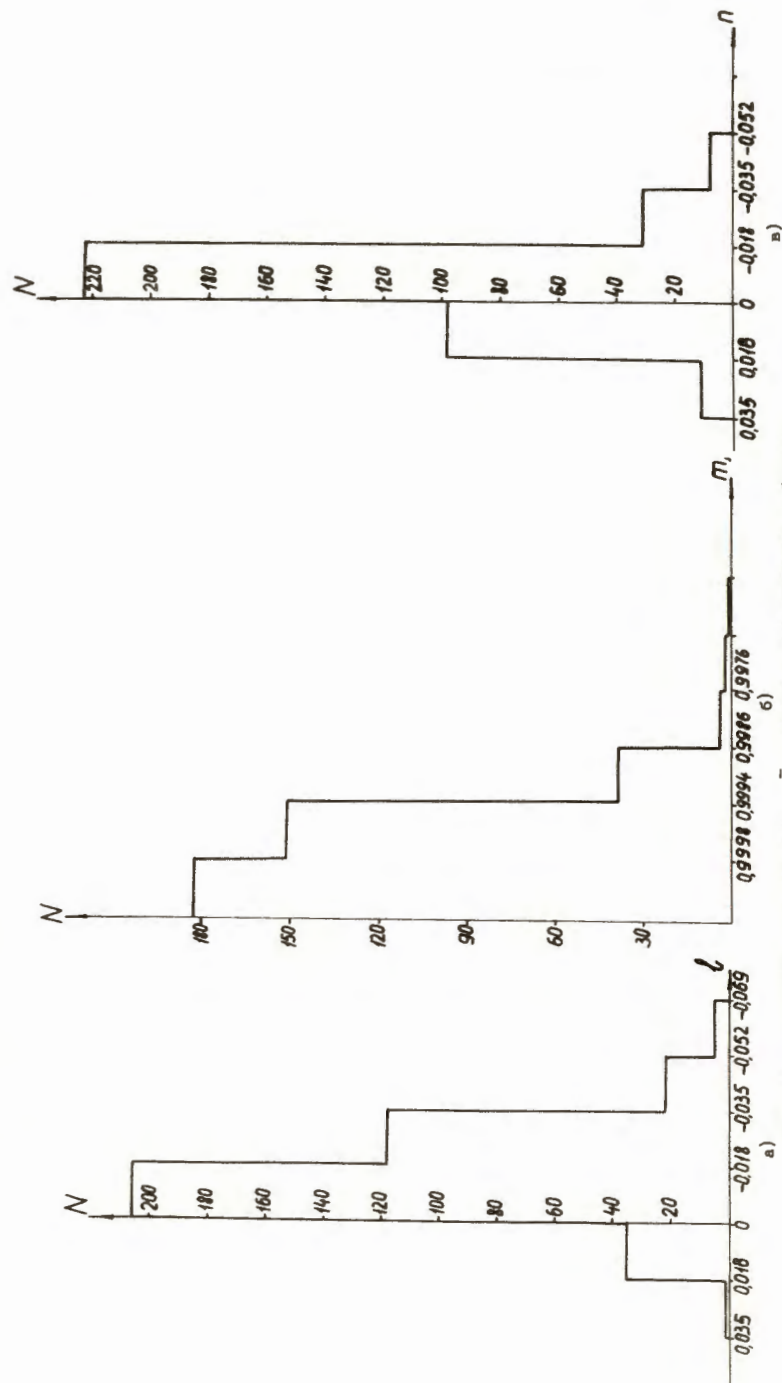


Рис. 11. Распределения первичных  $\pi^-$ -мезонов в нуль-лучевых событиях:  
а) по  $l = \cos \theta_{in}$ , б) по  $m = \cos \theta_{im}$ , в) по  $\phi = \theta_{in}$ ,  
где  $\theta_{in}$ ,  $\theta_{im}$  - углы между направлением движения  $\pi^-$ -мезона  
вблизи звезды и соответственно осями  $X, Y, Z$ , связанными с камерой.

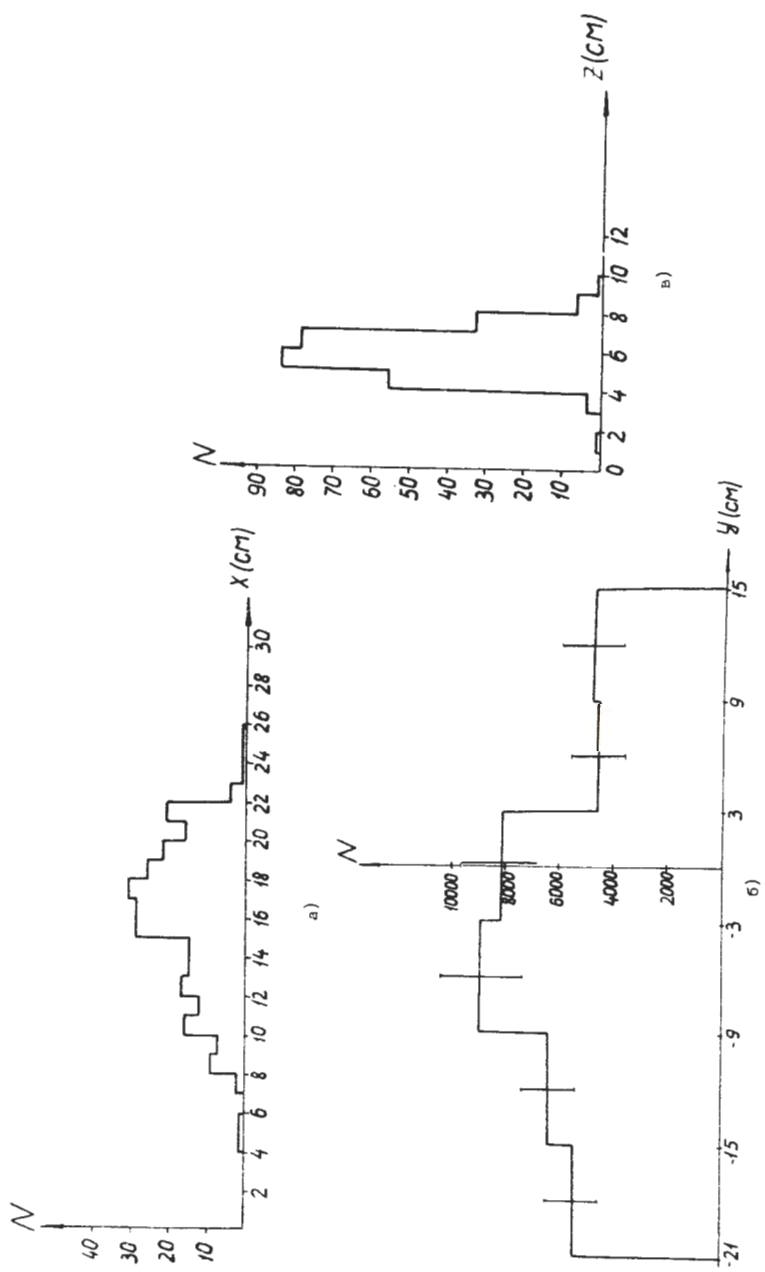


Рис. 12. Распределения нуль-лучевых событий: а) по X, б) по Y, в) по Z, X, Y, Z — с учетом эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов, в) по Z, X, Y, Z — координаты точки звезды в пространстве.

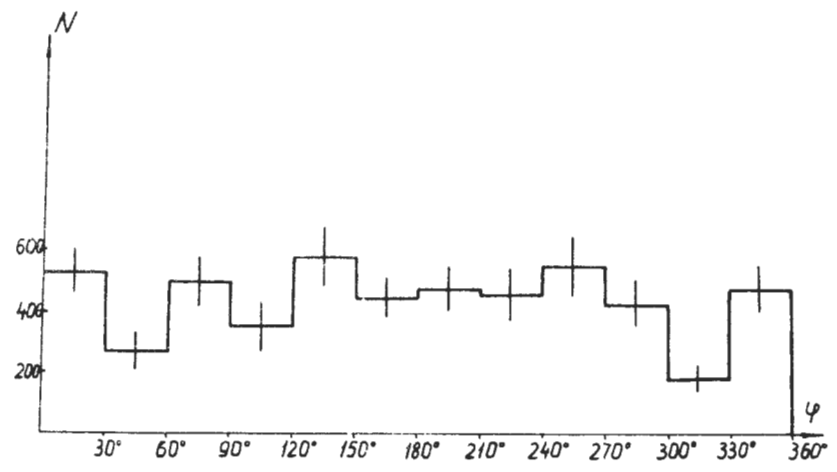


Рис. 13. Азимутальное распределение  $\gamma$ -квантов в нуль-лучевых событиях.

Л и т е р а т у р а

1. L.Bondar et al. Nuovo Cim. , XXXI, 729 (1964).
2. L.Bondar et al. Nuovo Cim., XXXI, 485 (1964).
3. Я.Я.Шаламов, В.А.Шебанов. ЖЭТФ, 39, 1232, 1960.
4. В.В.Бармин и др. ЖЭТФ, 45, 1879,(1963) .
5. В.В.Бармин и др. ЖЭТФ, 46, 142 (1964).
6. Z.S.Strugalski and T.Siemiatczuk. Phys. Lett., 11, 170 (1964).
7. В.Б.Любимов, Му Цзюнь, В.Н.Стрельцов. Препринт ОИЯИ Р-1624, Дубна 1964.
8. В.Б.Любимов, Му Цзюнь, С.И.Портнова, В.Н.Стрельцов. Препринт ОИЯИ Р-1629, Дубна 1964.
9. G.Bellini, E.Fiorini, A.Orkin-Lecourtois. Phys. Lett, 4, 164 (1963).
10. Р.А.Арипов, В.Г.Гришин, Л.В.Сильвестров, В.Н.Стрельцов. ЖЭТФ, 43, 394, 1962.
11. Ким Хи Ин, А.А.Кузнецов, В.В.Миллер. Препринт ОИЯИ 2082, Дубна 1965.
12. В.Г.Гришин, Э.П.Кистенев, Л.И.Лепилова, В.И.Мороз, Му Цзюнь. Препринт ОИЯИ, Р-2277, Дубна 1965.
13. В.Г.Гришин, Э.П.Кистенев, Му Цзюнь. Препринт ОИЯИ Р-2162, Дубна 1965.
14. J.C.Brisson et al. The Aix-Provence Conference on Elementary Particle, v. 1, 45 (1961).
15. S.J.Goldsock et al. Nuovo Cim., v. XXIII, 941 (1962).
16. P.Fleury et al. Int. Conf. (CERN), 597 (1962).
17. T.P.Wangler et al. Phys. Rev., 137, 2B, 414 (1965).
18. L.Bertanza et al. Phys. Rev., 130, 786 (1962).
19. M.A.Wahlig et al. Phys. Rev. Lett., 13, 103 (1964).
20. М.А.Азимов, В.С.Паптуев, Л.В.Сильвестров, М.Н.Хачатурян, И.В.Чувילו. ЖЯФ, 1, 145, 1965.
21. R.Alvarez et al. Phys. Rev. Lett, 12, 710 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 сентября 1965 г.