

С 346.58

М-215

ДФ, 1969, т. 10 № 6, с. 495-1200

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.



1 - 4426

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Э.И.Мальцев, Г.Д.Пестова, З.В.Солодовникова,
Н.Г.Фадеев, И.В.Чувило, Е.М.Лихачева,
В.М.Карнаухов, Р.Г.Салуквадзе, Д.И.Хубуа,
Ш.С.Шошиашвили, М.А.Дасаева, И.И.Тулиани

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА $K^+ \pi^+ \pi^0 \gamma$
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ π^+ -МЕЗОНА $T_{\pi^+}^+ < 55$ МЭВ

1969

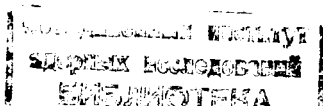
1 - 4426

Э.И.Мальцев, Г.Д.Пестова, З.В.Солодовникова,
Н.Г.Фадеев, И.В.Чувило, Е.М.Лихачева,
В.М.Карнаухов, Р.Г.Салуквадзе*, Д.И.Хубуа*,
Ш.С.Шошиашвили*, М.А.Дасаева*, И.И.Тулиани*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА $K^+ \pi^+ \pi^0 \gamma$
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ π^+ -МЕЗОНА $T_{\pi^+} < 55$ МЭВ

Направлено в ЯФ

* Тбилисский государственный университет



В распадах $K \rightarrow \pi\pi\gamma$ может существовать два механизма появления γ -кванта: внутреннее тормозное излучение и прямая эмиссия. Процесс внутреннего тормозного излучения хорошо известен ^{/1,2/}, его амплитуда пропорциональна $e \cdot G$, где e и G - константы электромагнитного и слабого взаимодействий. Так называемая прямая эмиссия - появление γ -кванта при переходе от начального K -состояния к конечному $\pi\pi$ -состоянию пока экспериментально не обнаружена. Однако с этим механизмом возникновения фотона связан ряд интересных проблем, поскольку при исследовании распадов $K \rightarrow \pi\pi\gamma$ с прямой эмиссией можно проводить прямые проверки следствий T - и CP -инвариантности ^{/3,4/}. Кроме того, для распада $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ имеет место своеобразная ситуация. Мы знаем, что переход $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ запрещен правилом $|\Delta T| = 1/2$. Если предположить, что он идет за счет электромагнитных взаимодействий с $|\Delta T| = 3/2$, то его амплитуда должна быть пропорциональна $G \cdot e^2$. В то же время, для процесса с прямой эмиссией запрета $|\Delta T| = 1/2$ нет, и амплитуда также пропорциональна $e \cdot G \cdot e = G \cdot e^2$. Таким образом, казалось бы, что в этом специальном случае амплитуды распадов

$$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma \quad (\text{прямая эмиссия})$$

могут быть даже одного порядка величины, в отличие от обычного тормозного излучения, где частота перехода $A \rightarrow B + C + \gamma$ составляет $\approx 1/137$ частоты процесса $A \rightarrow B + C$. Интересно, следовательно, экспе-

риментально проверить возможность существования "аномально" больших амплитуд прямой эмиссии в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$.

Можно ли получить ответ на этот вопрос при исследовании распадов $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$, $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ при $T_{\pi^+} > 55$ Мэв? Распады K_S^0 - и K_L^0 - мезонов на $\pi \pi \gamma$ не имеют ничего общего друг с другом. Первый из них может идти за счет внутреннего тормозного излучения, которое ничем не подавлено, и за счет прямых переходов электрической природы; в распаде $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ тормозное излучение подавлено из-за приблизительного сохранения СР, а прямые переходы могут быть лишь магнитного характера, которые, при прочих равных условиях, слабее возможных электрических переходов. Для распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ возможны все три вида механизма эмиссии фотона, причем при $T_{\pi^+} > 55$ Мэв доминирует тормозное излучение. То есть мы видим, что все эти процессы не очень удобны для поиска прямых переходов; в них либо искомым переход не может быть максимальным, либо присутствуют мешающие эффекты, которые могут завуалировать основной.

Кажется, наиболее удобным для этой цели /5/ является распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ при $T_{\pi^+} < 55$ Мэв, где амплитуда тормозного излучения резко уменьшается, а прямые электрические переходы, если они существуют, должны достигать своего максимума.

В связи с этим была предпринята попытка исследовать распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ при $T_{\pi^+} < 55$ Мэв с помощью ксеноновой пузырьковой камеры, обладающей высокой эффективностью к детектированию процессов с γ -квантами. Задача исследования формулировалась следующим образом: в выбранной области энергий π^+ -мезона надо провести поиск прямых переходов, амплитуда которых имела бы "аномально большую" величину, т.е., по крайней мере, $A_{\pi} \gg A_{\text{торм.изл.}}$.

1. Описание эксперимента

Ксеноновая пузырьковая камера /6/ облучалась сепарированным пучком медленных K^+ -мезонов ($p = 750$ Мэв/с). Загрузка составляла $0,8 K^+$ -распада на кадр. В данной работе приводятся результаты анали-

за первых 50 тысяч распадов, из которых было отобрано 88 кандидатов в переход $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$. Критерии отбора были следующие: 1) событие должно лежать в выделенном объеме камеры; 2) точки конверсии γ -квантов находятся не ближе чем на 5 мм от распадной вершины; 3) пробег вторичной заряженной частицы - больше 10 мм; 4) на кадре с отобраным событием отсутствуют другие вершины распадов в сфере с $\delta = 30$ мм вокруг данной точки распада.

Все снимки были просмотрены три раза; эффективность тройного просмотра составляла 96%. После трехкратного измерения каждого события с помощью специальной программы компоновался один рабочий слайд. Восстановление направления движения заряженной частицы проводилось путем применения метода максимального правдоподобия ¹⁷⁾ для учета многократного рассеяния в среде и измерительных ошибок. В качестве градуировочного распада был выбран процесс $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$, эффективность детектирования которого в выбранном рабочем объеме камеры равнялась 100%. Всего в этом объеме было найдено 885 ± 47 случаев распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$. Для расчетов использовалось значение относительной частоты данного распада, равное $5,54 \pm 0,04\%$. Для проверки методики обработки данных были осуществлены контрольные измерения относительных частот известных процессов. Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Относительные частоты, измеренные для проверки
методики анализа данных

Тип распада	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 + \pi^0$	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- + \gamma$	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 + \gamma$ при $T_{\pi^+} > 55$ Мэв
Данный эксперимент	$0,200 \pm 0,037$	$0,0180 \pm 0,0050$	$\leq 0,8 \cdot 10^{-4}$	$(2,7 \pm 2,7) \cdot 10^{-4}$
Мировые значения	$0,2084 \pm 0,0028$	$0,0168 \pm 0,0005$	$(10 \pm 4) \cdot 10^{-4}$	$(2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$

Как видно из таблицы 1, полученные значения величин относительных частот находятся в хорошем согласии с мировыми данными. Весь эксперимент был смоделирован в ряде программ в максимально возможном приближении к реальным условиям эксперимента.

Основными проблемами при решении нашей задачи являлись две:

а) смешивание γ -квантов, относящихся к разным распадам и б) присутствие фона, возникающего в результате распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ с одним не конвертировавшим в камере γ -квантом. Выбор малой загрузки K^+ -мезонами (0,8 распада на кадр), а также критериев отбора (нет на кадре другой вершины распада в сфере с $d = 30$ мм) и ограничения на максимальное расстояние конверсии γ -кванта ($L \leq 100$ мм) от точки распада, привели к значению величины вероятности смешивания $p \leq 3 \cdot 10^{-5}$. С целью отделения τ' -распадов была создана фит-программа для проверки событий на рабочую гипотезу. При восстановлении кинематики распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ по измеренным углам и энергии π^+ -мезона мы имеем два свободных уравнения связи $-f_1 = m_K - E_+ - \sum E_{\gamma_i}$ и $f_2 = m_\pi^2 - 2E_{\gamma_1} E_{\gamma_2} (1 - \cos \phi_{12})$, что позволяет построить функцию максимального правдоподобия в виде

$$L = \sum \left(\frac{x_i e^{-x_i}}{\sigma_i} \right)^2 + \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2,$$

где λ_1 и λ_2 - множители Лагранжа. Для ложной гипотезы - распада τ' без одного γ -кванта, мы не имеем свободных уравнений связи, что не дает возможности получить строгие критерии отбора. С помощью ≈ 650 моделированных случаев распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ и 1560 моделированных комбинаций τ' -распада, пропущенных через фит-программу, были выбраны граничные условия на величину χ^2 и степень выполнения уравнений связи $|f_1|$ и $|f_2|$.

На рис. 1 показано χ^2 -распределение 642 моделированных случаев распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ для всех значений $|f_1|$ и $|f_2|$. Сплошная кривая соответствует расчетному χ^2 -распределению для двух степеней свободы. Как видно из рисунка, согласие с расчетной кривой удовлетворительное, что указывает на правильность работы фит-программы. Совместное распределение величин $|f_1|$ и $|f_2|$ для рабочей гипотезы показано на рис. 2. В выбранную (после анализа аналогичного распределения для τ' -

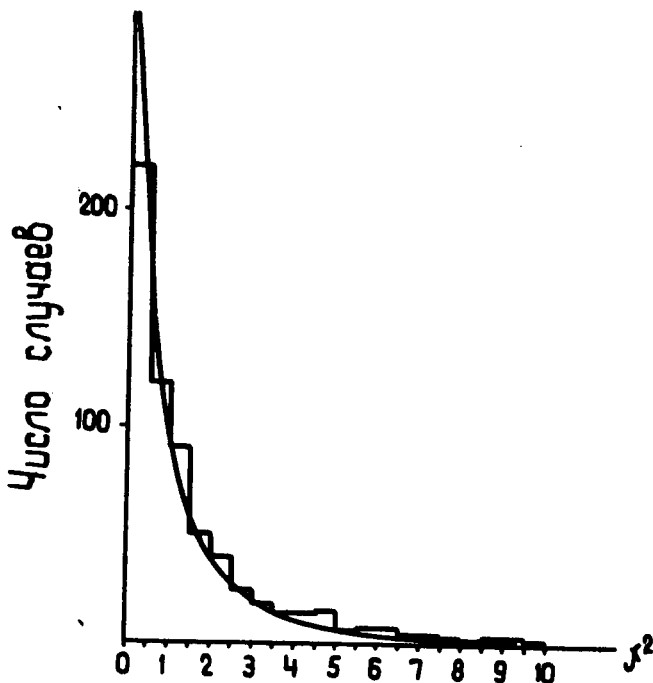


Рис.1. χ^2 -распределение 642 моделированных распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi \gamma$ без отбора по граничным условиям.

распадов) область значений $|f_1| \leq 0,002$ Гэв и $|f_2| \leq 0,0004$ Гэв² попадает 88% рабочих событий. Анализ χ^2 -распределения для оставшихся в этой области случаев $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ показал (рис. 3), что мы не внесли в данное распределение этим отбором никакого систематического сдвига. В область $\chi^2 < 5$ попадает 93,6% всех случаев, удовлетворяющих критериям по $|f_1|$ и $|f_2|$.

Распределение χ^2 для распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$, пропущенных через фит-программу, показано на рис. 4, а соответствующий график плотности точек $|f_1|$ и $|f_2|$ - на рис. 5. В выделенную область $|f_1| \leq 0,002$ и $|f_2| \leq 0,0004$ попадает 20,8% всех τ^+ -распадов, а при добавлении требования $\chi^2 < 5$ остается 8 событий, или 1,5% всех случаев. На рис. 5

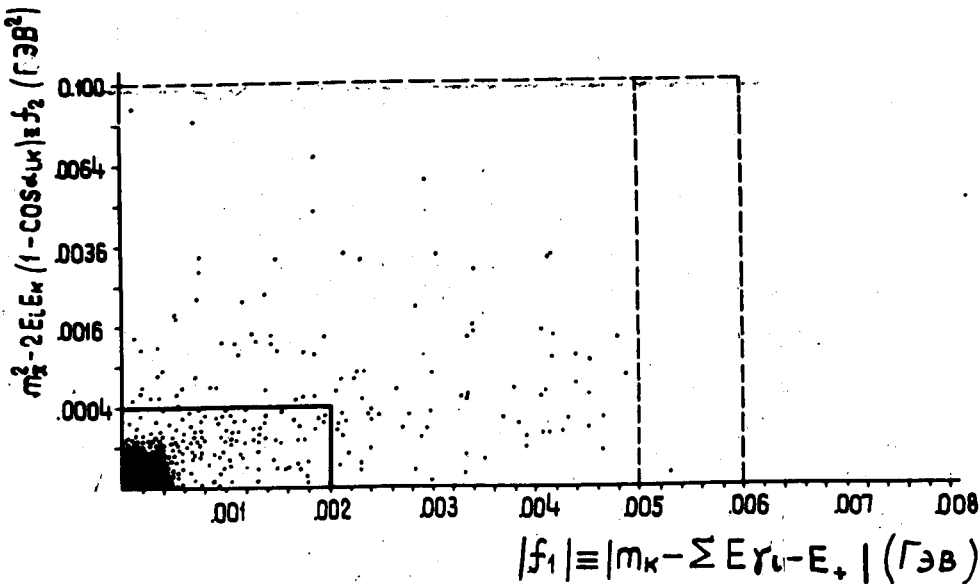


Рис.2. Совместная плотность точек $|f_1|$ и $|f_2|$, соответствующих точности выполнения уравнений связи $m_K - E_+ - \sum E_{l_i}$ и $m_K^2 - 2E_{l_1}E_{l_2}(1 - \cos\alpha_{12})$ после выхода из итераций в фит-программе. Контуром отмечена выбранная граничная область $|f_1| \leq 0,002$ и $|f_2| \leq 0,0004$, в которую попадает 68% всех событий (для распада $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$).

приведена также гистограмма χ^2 для случаев γ' из выделенной области.

С целью дополнительного контроля выводов, полученных в результате фитирования моделированных событий, мы построили соответствующее распределение по $|f_1|$, $|f_2|$ и χ^2 для реальных γ' -распадов. Распады были идентифицированы однозначно, поскольку для анализа выбирались события с 4 конвертировавшимися в камере γ -квантами. Искусственно убирая по-очереди каждый из γ -квантов, мы получили 96 комбинаций с тремя фотонами и пропустили их через фит-программу. Результат можно видеть на рис. 6, где черным кружком отмечено реальное событие (см. ниже) $\pi^+\pi^0\gamma$, а крестами - те случаи γ' -распадов, которые, удовлетворяя критериям отбора по $|f_1|$ и $|f_2|$, имели $\chi^2 < 5$.

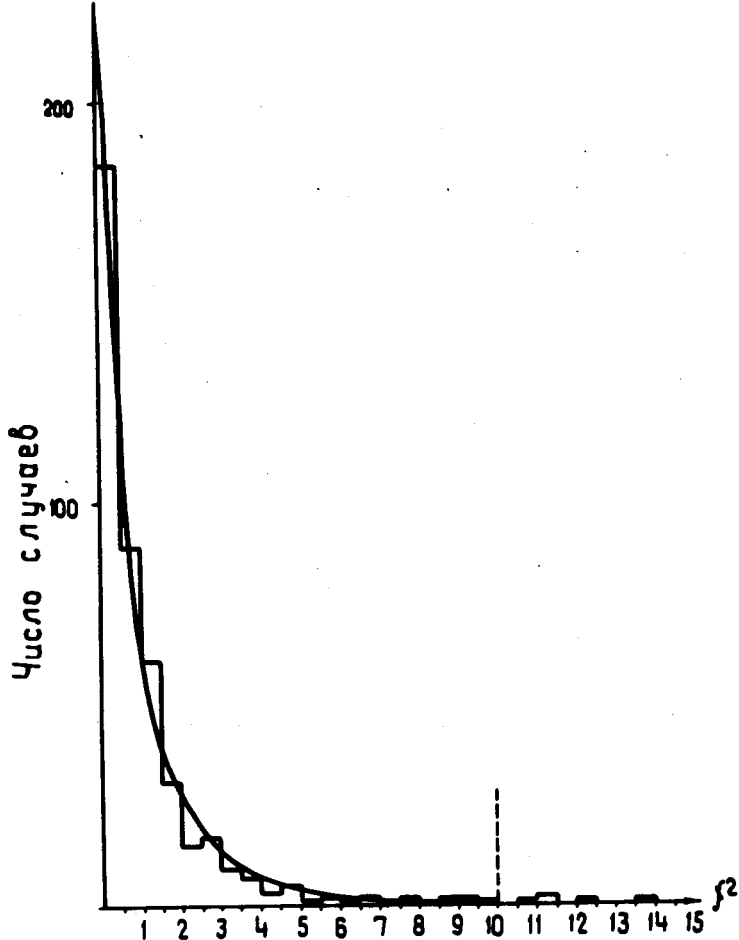


Рис.3. χ^2 -распределение для правильной гипотезы 436-моделированных распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$, оставшихся после прохождения критериев отбора $|f_1| \leq 0,002$ и $|f_2| \leq 0,0004$. При $\chi^2 < 5$ лежит 423 случая, или 93,6%.

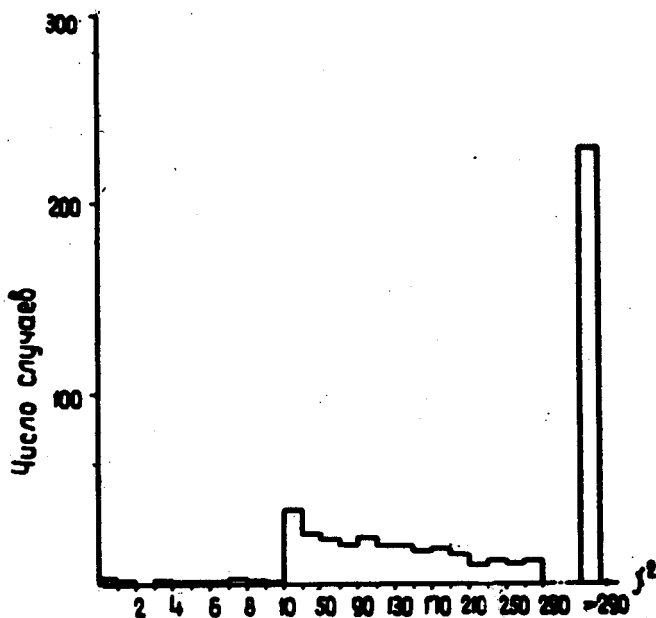


Рис.4. χ^2 -распределение 520-распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ с одним неконвертированным γ -квантом для всех трех комбинаций $\gamma_1 + \gamma_k$. При $\chi^2 < 10$ производился отсев по критериям $|f_1| \leq 0,002$ и $|f_2| \leq 0,0004$. В область $\chi^2 < 5$ попало 1,5% случаев (8 событий).

Таких событий оказалось 2 ($\approx 2\%$), что вполне согласуется с выводом, полученным при анализе моделированных 540 случаев ($\approx 1,5\%$).

Теперь, когда известны критерии отбора

$$|f_1| \leq 0,002 \text{ ГэВ}$$

$$|f_2| \leq 0,0004 \text{ ГэВ}^2$$

$$\chi^2_{\text{гран.}} = 5,$$

мы могли перейти к анализу кандидатов в распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ при $T_{\pi^+} < 55 \text{ МэВ}$.

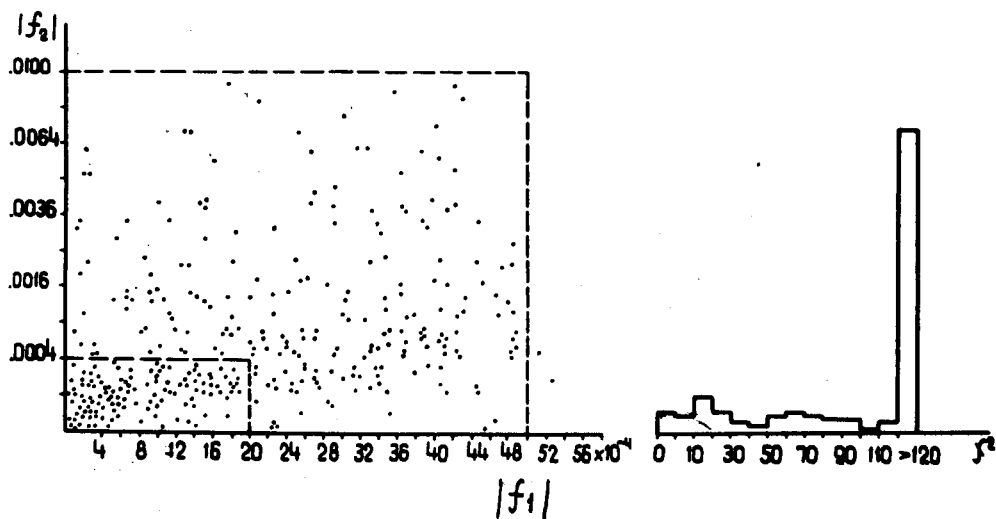


Рис.5. Совместная плотность точек $|f_1|$, $|f_2|$ и χ^2 -распределение для событий с $|f_1| < 0,002$ и $|f_2| \leq 0,0004$ для r' распада. В область $|f_1| \leq 0,002$, $|f_2| \leq 0,0004$ попадает 20,8% событий, $|f_1| \leq 0,005$, $|f_2| \leq 0,0004$ - 27,6%, $|f_1| \leq 0,005$, $|f_2| \leq 1$ - 53,7%. При $|f_1| \leq 0,002$, $|f_2| \leq 0,0004$ и $\chi^2 < 5$ остается 8 событий или 1,8% всех случаев r' . (График построен по части статистического материала).

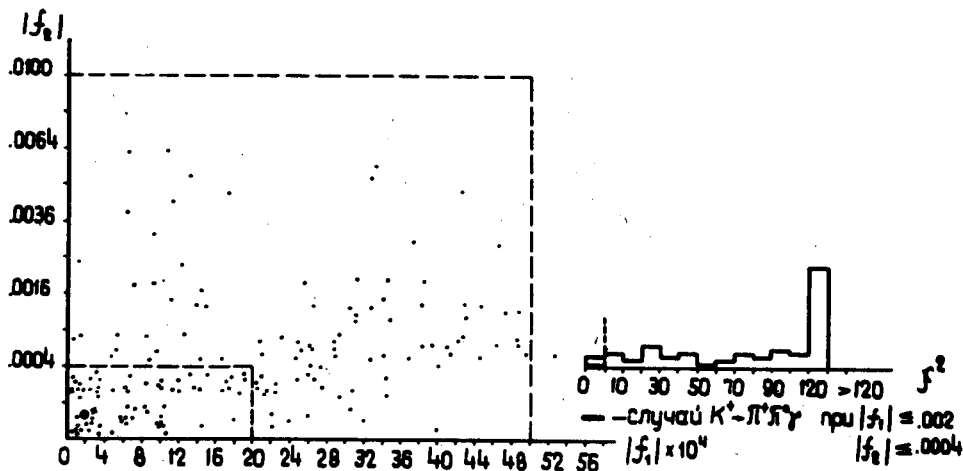


Рис.6. Совместная плотность точек $|f_1|$ и $|f_2|$ для реальных r' - распадов. \times - отмечены точки с $\chi^2 < 5$. \circ - случай, идентифицированный как распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$. В области $|f_1| \leq 0,002$ и $|f_2| \leq 0,0004$ находится 17,9% событий (для моделированных r' - 20,8%), при $|f_1| \leq 0,005$ и $|f_2| \leq 0,1$ - 48% всех событий (для моделированных r' - распадов 53%).

Было отобрано 88 событий с тремя γ -квантами и заряженной частицей, распадающейся в выделенном объеме камеры. Из них критериям отбора и требованиям на точность измерений удовлетворяло 51 событие. Большинство случаев было отброшено по критерию расстояния точки конверсии γ -кванта от вершины распада $l \geq 5$ мм. Все оставшиеся кандидаты были пропущены через фит-программу, после чего осталось одно событие, попадающее в выделенные граничные условия. Пересчет фона на число отобранных кандидатов приводит к величинам

$$\bar{n}_{r\gamma} = 0,785 \text{ при } |f_1| \leq 0,002, |f_2| \leq 0,0004 \text{ и } \chi^2 < 5,$$

$$\bar{n}_{\pi\pi\gamma} = 1$$

при эффективности камеры по отношению к процессу $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ при $T_{\pi^+} < 55$ Мэв $\eta = 29\%$.

Как видим, соотношение сигнал-фон 1:0,785 не дает возможности определить относительную частоту распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$. Однако, ориентируясь на 885 случаев градуировочного распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$, можно все же сделать вывод, что в данной области энергий π^+ -мезона не наблюдается большой величины амплитуды прямой эмиссии. (Напомним, что для $T_{\pi^+} < 55$ Мэв $\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma, \text{ торм. изл.}) / \Gamma(K^+ \rightarrow \text{ все}) \approx 5 \cdot 10^{-5}$. Если принять во внимание данные экспериментов по исследованию слабоэлектromагнитных распадов нейтральных каонов /8,9/,

$$K_L^0: \frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma, M1)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \text{ все})} \leq 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ с } 90\text{-процентным уровнем}$$

$$K_S^0 \quad |M \text{ прям. эмисс.} / |M \text{ торм. изл.}|^2 \leq 0,12 \text{ с } 80\text{-процентным доверительным уровнем,}$$

то становится ясно, что на данном уровне точности величины относительной частоты $\approx 10^{-4}$, пока не обнаружено заметных эффектов от прямых переходов.

В заключение мы пользуемся случаем, чтобы поблагодарить коллективы отделов синхрофазотрона и эксплуатации за предоставленную возможность получения экспериментального материала, а также сотрудников Лаборатории вычислительной техники и автоматизации за проведенные

измерения. Кроме того, мы благодарны В.С. Ваняшину, В.И. Морозу, Г.А. Ососкову, Э.О. Оконову и М.И. Подгорецкому за полученные консультации, а также В.Г. Гришину за помощь, оказанную при расчете тормозного излучения π - и μ -мезонов в ксеноне.

Л и т е р а т у р а

1. R.Dalitz. Phys. Rev., 99, 915 (1955).
2. G.D.Good. Phys. Rev., 113, 352 (1959).
3. D.Cline. Phys. Rev. Lett., 16, 367 (1968).
4. T.D.Lee, C.S.Wu. Annual. Rev. of Nucl. Science 16 (1966).
5. В.С. Ваняшин, Э.И. Мальцев, Г.Д. Пестова и др. Препринт ОИЯИ P1-3594 (1967).
6. T.J.Kanarik, E.I.Maltzev, T.Nagy et al. Intern. Conf. of High Energy Accel. and Instr. CERN 1959 p. 508.
7. В.Н. Карнаухов, В.И. Мороз, Н.Г. Фадеев, Ш.С. Шешиашвили. Препринт ОИЯИ 10-3635 (1967).
8. E.Bellotti, A.Pullia, M.Baldo-Ceolin et al. Nuovo Cim., 45A, 737 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 апреля 1969 года.