Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 12, с. 835 – 839

Исследование распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ в эксперименте ОКА

А. В. Артамонов[a], А. М. Горин[a], Е. М. Гущин[c], С. В. Донсков[a], Б. Ж. Залиханов[b], А. В. Инякин[a], Г. Д. Кекелидзе[b], В. Н. Колосов[a], А. К. Коноплянников[a], В. И. Кравцов[c], Ю. Г. Куденко[c,d,e], А. В. Кулик[c], В. Ф. Куршецов[a], В. А. Лишин[a], В. М. Лысан[a], М. В. Медынский[b], А. В. Охотников[a1)], В. Ф. Образцов[a], В. А. Поляков[b], В. И. Рыкалин[a], А. С. Садовский[a], В. Д. Самойленко[a], С. Р. Слабоспицкий[a], И. С. Тюрин[a], В. А. Уваров[a], А. П. Филин[a], С. Н. Филиппов[c], Г. В. Хаустов[a], С. А. Холоденко[f], А. А. Худяков[c], М. М. Шапкин[a], О. П. Ющенко[a]

[a] Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", 142281 Протвино, Россия

[b] Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

[c] Институт ядерных исследований РАН, 111731 Москва, Россия

[d] Московский физико-технический институт, 117303 Москва, Россия

[e] Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия

[f] Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", 119049 Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 апреля 2026 г.
После переработки 6 мая 2026 г.
Принята к публикации 7 мая 2026 г.

Эксперимент ОКА набрал значительную статистику распадов K^+-мезонов. Это позволило выделить около 2300 событий редкого распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ с энергией фотона в системе покоя каона $10\,\text{МэВ} < E^*_\gamma < 70\,\text{МэВ}$ и измерить бренчинг распада в указанной области $BR(3\pi\gamma) = (6.36 \pm 0.14_{\rm stat} \pm 0.3_{\rm syst}) \cdot 10^{-5}$. Получен также дифференциальный бренчинг по энергии E^*_γ. Произведено сравнение результатов с теоретическими предсказаниями, полученными в рамках киральной теории возмущений.

DOI: 10.7868/S3034576626060119

1. Введение. Распад $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ в настоящее время нельзя отнести к числу детально изученных процессов каонной физики. Несмотря на сравнительно давнюю историю теоретического интереса к данному каналу, объем экспериментальных исследований остается ограниченным по сравнению с другими радиационными распадами каонов.

Первое теоретическое рассмотрение указанного процесса было выполнено в 1955 г. Далитцем [1]. Экспериментальное исследование данного канала началось значительно позже. Лишь в 1965 г. удалось впервые получить оценку относительной вероятности (бренчинга) распада на основе анализа всего шести зарегистрированных событий [2]. В дальнейшем, в 1989 г., на основе семи наблюдаемых событий была получена уточненная оценка [3]. Именно результат 1989 г. приведен в таблицах Particle Data Group [4].

Среди более поздних теоретических исследований особого внимания заслуживает работа [5], в которой анализ распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ был выполнен в рамках киральной теории возмущений в порядке $O(p^4)$. В ней получены количественные оценки бренчинга в зависимости от энергии γ-кванта. Предсказания этой модели были частично проверены в эксперименте ОКА [6], в котором было зарегистрировано порядка 450 событий данного распада. Однако анализ проводился лишь в области $E^*_\gamma \geq 30\,\text{МэВ}$, что накладывает определенные ограничения на полноту сравнения с теоретическими предсказаниями.

Таким образом, несмотря на длительную историю изучения распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$, его экспериментальная статистика по-прежнему остается низкой. Это делает дальнейшие исследования актуальными с точки зрения проверки предсказаний киральной теории возмущений.

2. Эксперимент ОКА. ОКА (Опыты с КАонами) – это эксперимент, проводимый в НИЦ "Курчатовский Институт" – ИФВЭ на вторичном сепарированном пучке ускорителя У-70. Основная задача эксперимента – исследование редких распадов заряженных каонов. Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

1) e-mail: artem.okhotnikov@ihep.ru

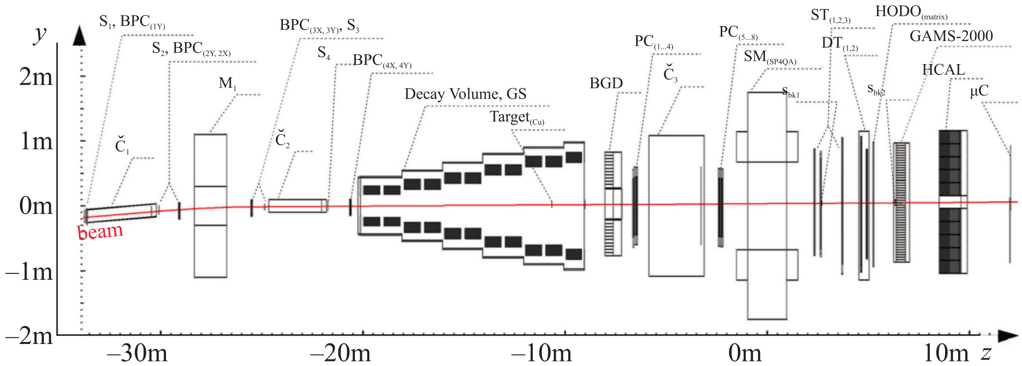

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема установки ОКА [7]

Установка состоит из пучкового спектрометра и спектрометра вторичных частиц, разделенных 11-метровым распадным объемом, заполненным гелием. Пучковая часть включает в себя магнит M1, черенковские и сцинтилляционные счетчики, служащие для идентификации каона, и пучковые пропорциональные камеры (BPC) для измерения его импульса. За ней следует охранная система вокруг распадного объема и боковой гамма-детектор (BGD) для детектирования фотонов, летящих под большим углом. Спектрометр вторичных частиц состоит из магнита СП-40, больших пропорциональных камер, дрейфовых трубок, электромагнитного калориметра (GAMS), адронного калориметра (HCAL) и мюонных счетчиков. В нем идентифицируются продукты распада каона, измеряются энергии фотонов и импульсы заряженных частиц. Более подробное описание установки приведено в [7].

3. Данные и процедура отбора.

3.1. Использованные данные. Поиск распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ (сигнальных событий) велся на данных, набранных коллаборацией ОКА в 2012 и 2013 гг. Импульс пучка был равен 17.7 ГэВ. Общее число каонов, пропущенных через установку, составило $3.4 \cdot 10^{10}$.

В анализе также использовались события, полученные методом Монте-Карло (МК). Генерация производилась с помощью программного пакета Geant3 [8]. Смоделированные события были пропущены через программу реконструкции установки ОКА.

При генерации сигнальных МК событий использовался вес, пропорциональный квадрату модуля матричного элемента ведущего порядка для распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$, полученного из [9].

Оценка фона проводилась с помощью выборки МК-событий наиболее значимых каналов распада заряженного каона: $\pi^+\pi^0$, $\pi^+\pi^0\pi^0$, $\pi^+\pi^-\pi^+$, $\pi^0\mu^+\nu_\mu$, $\pi^0 e^+\nu_e$, отнормированных в соответствии с их бренчингами. Веса для трехчастичных распадов вычислялись из данных, приведенных в PDG [4]. Распад необходим также для нормировки при расчете бренчинга сигнала.

3.2. Алгоритм отбора. Для выделения распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ применялись следующие условия отбора:

• Число вторичных треков равно 3. Их суммарный заряд равен +1.

• Вершина распада находится внутри распадного объема.

• Квадрат недостающей массы $M^2_{\text{miss}}(\pi^+) = (P_{K^+} - P_{\pi^+})^2 > 0.07$ ГэВ^2. Данное условие позволяет эффективно подавить фон от распада $K^+ \to \pi^+\pi^0$.

• Для каждого заряженного трека $E/p < 0.9$, где E – энергия ливня в гамма-детекторе, ассоциированного с треком. Условие исключает распады, имеющие среди вторичных треков электроны.

• Событие содержит ровно один γ-квант с энергией больше 0.5 ГэВ.

• Квадрат поперечного импульса системы (3π) менее 0.001 ГэВ^2.

• Отношение импульса системы $(3\pi\gamma)$ к импульсу пучкового каона находится в границах $0.95 < P_{3\pi\gamma}/P_{K^+} < 1.05$.

• Выполнено одно из двух условий:

– Инвариантная масса каждой из систем $(\pi\gamma)$ больше 0.17 ГэВ.

• или: – Инвариантная масса каждой из систем $(\pi\gamma)$ больше 0.15 ГэВ.

– Для э/м ливня $\chi^2 < 0.4$.

– Выполнены дополнительные условия на $\Delta P = |\mathbf{P}_{K^+}| - |\mathbf{P}_{3\pi\gamma}|$ и расстояния между вершиной ливня и точками пересечения треков с плоскостью калориметра $R = |\mathbf{R}_{\text{shower}} - \mathbf{R}_{\text{track}}|$.

Первым дополнительным условием стало ограничение на $\Delta P = |\mathbf{P}_{K^+}| - |\mathbf{P}_{3\pi\gamma}|$. На рисунке 2 показаны биплоты $(E^*, \Delta P)$, где E^* – энергия γ-кванта в системе покоя каона для $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ и основного фона $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$. Условие исключает область, ограниченную двумя перпендикулярными отрезками и овалом, проходящим через точки (10 МэВ, 0 ГэВ) и (30 МэВ, −1 ГэВ). Из рисунка 2 видно, что в данной области наблюдается максимальная концентрация событий фона, при этом сигнальных событий в ней достаточно мало.

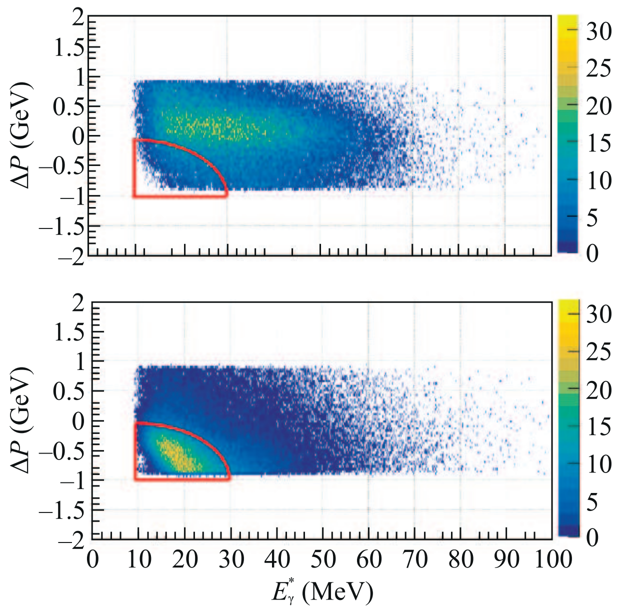

Рис. 2. (Цветной онлайн) Демонстрация работы условия отбора по $\Delta P = |\mathbf{P}_{K^+}| - |\mathbf{P}_{3\pi\gamma}|$. Вверху – для МК сигнала, внизу – для МК $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$. Вырезается область, в которой наблюдается наибольшая концентрация событий фона при небольшом числе событий сигнала

Второе условие отбора дополняет первое. На рисунке 3 показаны биплоты (E^*, R) для сигнала и основного фона. Исключается область, ограниченная ломаной линией, проведенной через точки (10 МэВ, 70 мм) и (25 МэВ, 30 мм).

Результат отборов представлен на рис. 4. Показано распределение экспериментальных и МК событий по инвариантной массе системы $3\pi\gamma$. Поскольку распад $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$ был существенно подавлен, МК событий фона после отбора было достаточно мало. Чтобы уменьшить влияние статистических флуктуаций, к его распределению был применен метод сглаживания гистограммы, входящий в пакет ROOT [10].

В данных виден пик с вершиной, соответствующей массе заряженного каона. Фон распределен в широком диапазоне и значительно подавлен. В результате фитирования данных суммой МК сигнала и фона получаем, что число событий в области сигнала

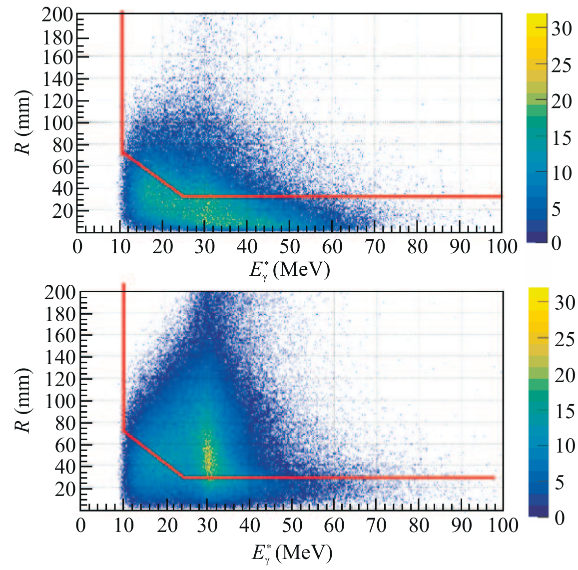

Рис. 3. (Цветной онлайн) Демонстрация работы условия отбора по расстоянию $R = |\mathbf{R}_{\text{shower}} - \mathbf{R}_{\text{track}}|$. Вверху – для МК сигнала, внизу – для МК $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$. Ломаная линия вырезает область, в которой наблюдается наибольшая концентрация событий фона при небольшом числе событий сигнала

(490–500 МэВ) равняется 2269. При этом достаточное число событий наблюдается во всем диапазоне энергии γ-кванта от 10 до 70 МэВ (см. рис. 5), что позволяет произвести сравнительный анализ полученных результатов с теоретическим предсказанием [5].

4. Вычисление бренчинга. Распад $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$ использовался для нормировки. При его выделении использовались четыре первых отбора для $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$, касающиеся заряженных частиц. Результирующее распределение по инвариантной массе 3π системы представлено на рис. 6. Число событий $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$ в сигнальной области (470–520 МэВ) равно $6.19 \cdot 10^6$. Данная выборка практически полностью состоит из событий распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$, процент фона не превышает 0.1 %. Расхождения экспериментальных и МК данных на хвостах распределения учитывались в расчетах систематической погрешности. Бренчинг считался отдельно для шести диапазонов в области 10 МэВ $< E^*_\gamma <$ 70 МэВ с шагом 10 МэВ. Монте-Карло события сигнала и фона из каждого диапазона $E_l < E^*_\gamma < E_r$, прошедшие отбор, нормировались на 1. Таким образом были получены распределения по инвариантной массе $f_{3\pi\gamma}(M_{\text{inv}})$ и $f_{3\pi}(M_{\text{inv}})$. С их помощью фитировалось распределение экспериментальных данных по формуле

$$f_{\text{exp}}(M_{\text{inv}}) = p_0 f_{3\pi\gamma}(M_{\text{inv}}) + p_1 f_{3\pi}(M_{\text{inv}}),$$

p_0 дает число событий сигнала, а p_1 – фона.

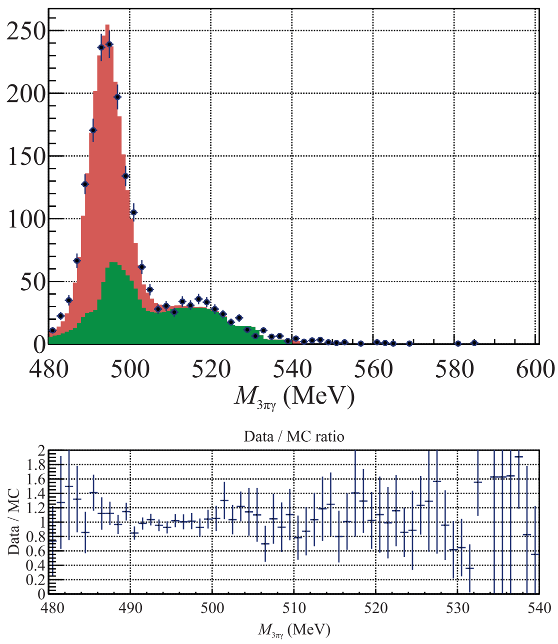

Рис. 4. (Цветной онлайн) Распределение событий по инвариантной массе системы $3\pi\gamma$ после прохождения отборов. Экспериментальные данные представлены точками с ошибками. Красное распреление – МК для $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$, зеленое – МК для фона. В нижней половине приведено отношение данных к МК

Для событий сигнала была посчитана эффективность регистрации и отбора $\epsilon_{3\pi\gamma}$. При вычислении весов событий использовался матричный элемент, приведенный в [9].

Для $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$ тоже была посчитана полная эффективность $\epsilon_{3\pi}$.

Имея эти величины, можно посчитать бренчинг:

$$BR(3\pi\gamma) = BR(3\pi)^* N_{3\pi\gamma}/N_{3\pi};$$

$$N_{3\pi\gamma} = p_0/\epsilon_{3\pi\gamma};$$

$$N_{3\pi} = N_1/\epsilon_{3\pi},$$

где N_1 – число экспериментальных событий 3π, прошедших все условия отбора, кроме тех, в которых используется γ.

Полученные значения бренчинга в исследуемом диапазоне, а также их сравнение с теоретическим предсказанием [5] показаны на рис. 7, а также в табл. 1. Полный бренчинг распада составил $BR(3\pi\gamma) = (6.36 \pm 0.14_{\text{stat}} \pm 0.28_{\text{syst}}) \cdot 10^{-5}$, $E^*_\gamma > 10$ МэВ. Систематическая ошибка оценивалась путем вариации критериев отбора и области фитирования данных. Их вклад в ошибку составил, соответственно, $0.22 \cdot 10^{-5}$ и $0.16 \cdot 10^{-5}$. Еще один возможный источник систематической ошибки – погрешность в значении $BR(3\pi)$, однако она составляет не более 0.5 %, поэтому ей можно пренебречь. Итоговая систематическая ошибка была посчитана путем вычисления квадратичной суммы всех источников и составила $0.28 \cdot 10^{-5}$.

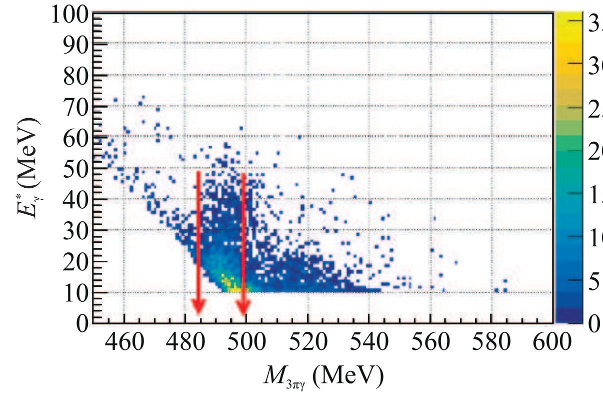

Рис. 5. (Цветной онлайн) Распределение экспериментальных данных на плоскости $(M_{3\pi\gamma}, E^*_\gamma)$ после прохождения отборов. Стрелками отмечена сигнальная область

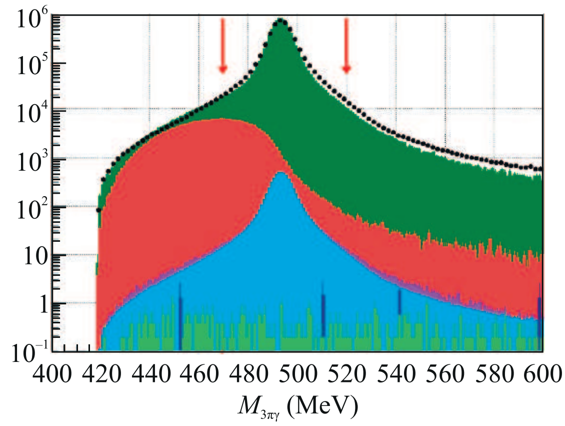

Рис. 6. (Цветной онлайн) Распределение событий по инвариантной массе $M(3\pi)$ после прохождения условий отбора. Масштаб по оси Y – логарифмический. Экспериментальные данные представлены точками. Цветами показаны (сверху вниз): Монте-Карло $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$, $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$, $K^+ \to \pi^+\pi^- e^+\mu_e$, $K^+ \to \pi^+\pi^-\mu^+\nu_\mu$, $K^+ \to \pi^+\pi^0$, $K^+ \to \pi^+\pi^0\pi_0$. Стрелками обозначена сигнальная область

Таблица 1. Значения дифференциального бренчинга в разных диапазонах энергии фотона в системе покоя каона. Приведены только статистические ошибки

E^*_γ, MeV	$BR(3\pi\gamma)$	Theory [5]
10–20	$(4.53 \pm 0.11) \cdot 10^{-5}$	$(4.35 \pm 0.04) \cdot 10^{-5}$
20–30	$(1.29 \pm 0.07) \cdot 10^{-5}$	$(1.43 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$
30–40	$(5.18 \pm 0.65) \cdot 10^{-6}$	$(4.93 \pm 0.05) \cdot 10^{-6}$
40–50	$(1.65 \pm 0.26) \cdot 10^{-6}$	$(1.44 \pm 0.01) \cdot 10^{-6}$
50–60	$(3.52 \pm 1.2) \cdot 10^{-7}$	$(2.69 \pm 0.03) \cdot 10^{-7}$
60–70	$(1.76 \pm 0.77) \cdot 10^{-8}$	$(1.36 \pm 0.02) \cdot 10^{-8}$

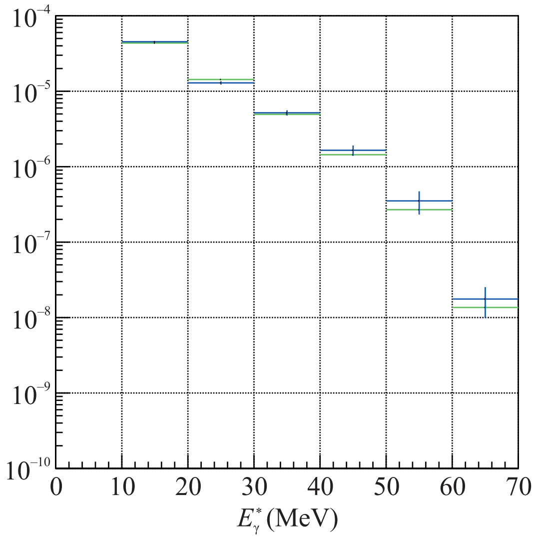

Рис. 7. (Цветной онлайн) Полученный дифференциальный бренчинг $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ для диапазона $10\,\text{МэВ} < E^*_\gamma < 70\,\text{МэВ}$ и сравнение с теоретическим предсказанием [5]. Экспериментальные значения показаны точками с ошибками

Теоретическое предсказание в рамках киральной теории возмущений составляет

$$BR(3\pi\gamma)_{\text{th}} = (6.46 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}, \quad E^*_\gamma > 10\,\text{МэВ}.$$

Видно хорошее совпадение эксперимента и теории как для полного, так и для дифференциального бренчинга.

5. Заключение. В работе проведено исследование редкого распада $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$. Выделено ~ 2300 событий этого распада, что в 5 раз больше, чем в предыдущей работе [6]. Измерена относительная вероятность распада для области $E^*_\gamma > 10\,\text{МэВ}$ и дифференциальное распределение вероятности для области $10\,\text{МэВ} < E^*_\gamma < 70\,\text{МэВ}$. Проведено сравнение с предсказаниями киральной теории возмущений в порядке $O(p^4)$. Показано хорошее согласие полученных результатов и теоретических предсказаний.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 22-12-00051-П.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. R. Dalitz, "τ-Meson Decay", Phys. Rev. **99**, 915 (1955); https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.99.915.
2. P. Stamer, T. Huetter, E. Koller, S. Taylor, and J. Grauman, "Observations of Radiative τ^+ Decays", Phys. Rev. **138**, B440 (1965); https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.138.B440.
3. V. V. Barmin, V. G. Barylov, G. V. Davidenko, V. S. Demidov, A. G. Dolgolenko, N. K. Zombkovskaya, A. G. Meshkovsky, G. S. Mirosidi, P. V. Rassushin., and T. A. Chistyakova, "Measurement of the $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$, "Decay Probability", Sov. J. Nucl. Phys. **50**, 421 (1989).
4. S. Navas, C. Amsler, T. Gutsche et al. (Collaboration), "Review of particle physics", Phys. Rev. D **110**, 030001 (2024).
5. G. D'Ambrosio, G. Ecker, G. Isidori, and H. Neufeld, "$K \to \pi\pi\pi\gamma$ in chiral perturbation theory", Z. Phys. C **76**, 301 (1997); https://doi.org/10.1007/s002880050554.
6. M. M. Shapkin, S. A. Akimenko, A. V. Artamonovet al. (OKA Collaboration), "Study of the decay $K^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ in the OKA experiment", Eur. Phys. J. C **79**, 296 (2019); https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6797-1.
7. A. S. Sadovsky, V. F. Kurshetsov, A. P. Filin et al. (OKA Collaboration), "Search for heavy neutrino in $K^+ \to \mu^+\nu_H$ decay", Eur. Phys. J. C **78**, 92 (2018); https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5566-x.
8. R. Brun, R. Hagelberg, M. Hansroul, and J. C. Lassalle, "Geant: Simulation Program for Particle Physics Experiments. User Guide and Reference Manual", URL: https://cds.cern.ch/record/118715 (1978).
9. J. Bijnens and F. Borg, "Isospin breaking in $K^+ \to 3\pi$ decays III: Bremsstrahlung and fit to experiment", Eur. Phys. J. C **40**, 383 (2005); https://doi.org/10.1140/epjc/s2005-02155-7.
10. R. Brun and F. Rademakers, "ROOT – An Object Oriented Data Analysis Framework", Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A **389**, 81 (1997).