

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

А. В. Артамонов<sup>a</sup>, А. М. Горин<sup>a</sup>, Е. М. Гуцин<sup>c</sup>, С. В. Донсков<sup>a</sup>, Б. Ж. Залиханов<sup>b</sup>, А. В. Инякин<sup>a</sup>, Г. Д. Кекелидзе<sup>b</sup>, В. Н. Колосов<sup>a</sup>, А. К. Конопляников<sup>a</sup>, В. И. Кравцов<sup>c</sup>, Ю. Г. Куденко<sup>c,d,e</sup>, А. В. Кулик<sup>c</sup>, В. Ф. Куршцецов<sup>a</sup>, В. А. Лишин<sup>a</sup>, В. М. Лысан<sup>a</sup>, М. В. Медынский<sup>b</sup>, А. В. Охотников<sup>a1)</sup>, В. Ф. Образцов<sup>a</sup>, В. А. Поляков<sup>b</sup>, В. И. Рыкалин<sup>a</sup>, А. С. Садовский<sup>a</sup>, В. Д. Самойленко<sup>a</sup>, С. Р. Слабоспицкий<sup>a</sup>, И. С. Тюрин<sup>a</sup>, В. А. Уваров<sup>a</sup>, А. П. Филлин<sup>a</sup>, С. Н. Филипов<sup>c</sup>, Г. В. Хаустов<sup>a</sup>, С. А. Холоденко<sup>f</sup>, А. А. Худяков<sup>c</sup>, М. М. Шапкин<sup>a</sup>, О. П. Ющенко<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт физики высоких энергий имени А. А. Логанова  
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, 142281 Протвино, Россия

<sup>b</sup>Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

<sup>c</sup>Институт ядерных исследований РАН, 111731 Москва, Россия

<sup>d</sup>Московский физико-технический институт, 117303 Москва, Россия

<sup>e</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия

<sup>f</sup>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  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  с энергией фотона в системе покоя каона  $10 \text{ МэВ} < E_\gamma^* < 70 \text{ МэВ}$  и измерить брэнчинг распада в указанной области  $BR(3\pi\gamma) = (6.36 \pm 0.14_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-5}$ . Получен также дифференциальный брэнчинг по энергии  $E_\gamma^*$ . Произведено сравнение результатов с теоретическими предсказаниями, полученными в рамках киральной теории возмущений.

DOI: 10.7868/S3034576626060119

**1. Введение.** Распад  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  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 (брэнчинга) 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  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  был выполнен

в рамках киральной теории возмущений в порядке  $O(p^4)$ . В ней получены количественные оценки брэнчинга в зависимости от энергии  $\gamma$ -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  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ , 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.

<sup>1)</sup>e-mail: artem.okhotnikov@ihep.ru

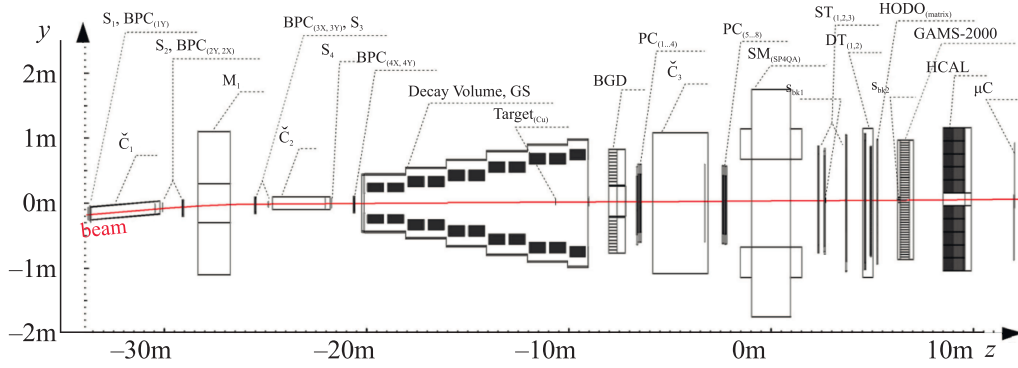


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема установки ОКА [7]

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 (ВРС) 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. Используемые данные.** Поиск распада  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  (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  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ , полученного из [9].

Оценка фона проводилась с помощью выборки МК-событий наиболее значимых каналов распада заряженного каона:  $\pi^+\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^0\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^-\pi^+$ ,  $\pi^0\mu^+\nu_\mu$ ,  $\pi^0e^+\nu_e$ , отнормированных в соответствии с их брэн-

чингами. Веса для трехчастичных распадов вычислялись из данных, приведенных в PDG [4]. Распад необходим также для нормировки при расчете брэнчинга сигнала.

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

- Число вторичных треков равно 3. Их суммарный заряд равен +1.
- Вершина распада находится внутри распадного объема.
- Квадрат недостающей массы  $M_{\text{miss}}^2(\pi^+) = (P_{K^+} - P_{\pi^+})^2 > 0.07 \text{ ГэВ}^2$ . Данное условие позволяет эффективно подавить фон от распада  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ .
- 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  $\gamma$ -квант с энергией больше 0.5 ГэВ.
- Квадрат поперечного импульса системы ( $3\pi$ ) менее  $0.001 \text{ ГэВ}^2$ .
- 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 пока-

заны биплоты  $(E^*, \Delta P)$ , где  $E^*$  – энергия  $\gamma$ -кванта в системе покоя каона для  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  и основного фона  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ . 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.

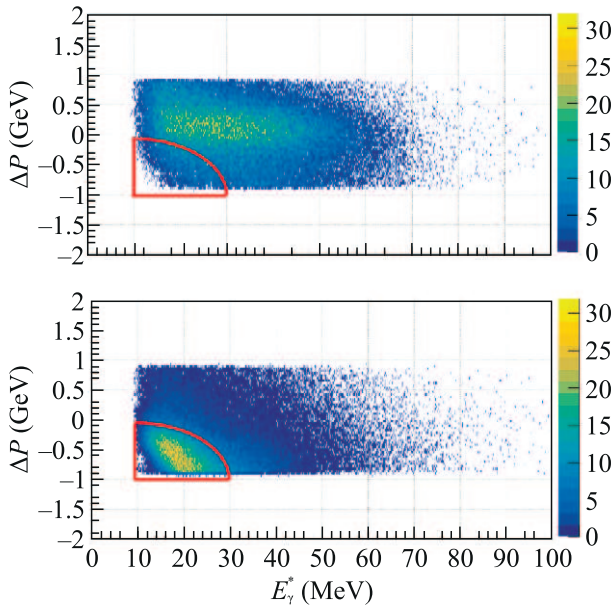


Рис. 2. (Цветной онлайн) Демонстрация работы условия отбора по  $\Delta P = |\mathbf{P}_{K^+}| - |\mathbf{P}_{3\pi\gamma}|$ . Вверху – для МК сигнала, внизу – для МК  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ . Вырезается область, в которой наблюдается наибольшая концентрация событий фона при небольшом числе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

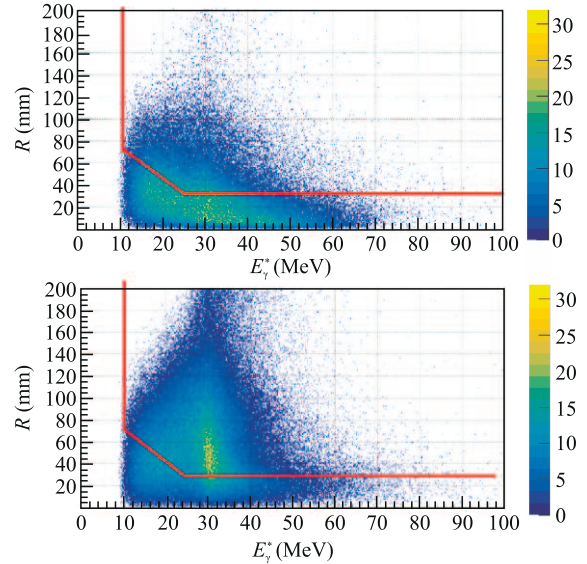


Рис. 3. (Цветной онлайн) Демонстрация работы условия отбора по расстоянию  $R = |\mathbf{R}_{\text{shower}} - \mathbf{R}_{\text{track}}|$ . Вверху – для МК сигнала, внизу – для МК  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ . Ломаная линия вырезает область, в которой наблюдается наибольшая концентрация событий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

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

**4. Вычисление брэнчинга.** Распад  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$  использовался для нормировки. При его выделении использовались четыре первых отбора для  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ , касающиеся заряженных частиц. Результирующее распределение по инвариантной массе  $3\pi$  системы представлено на рис. 6. Число событий  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$  в сигнальной области (470–520 МэВ) равно  $6.19 \cdot 10^6$ . Данная выборка практически полностью состоит из событий распада  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ , процент фона не превышает 0.1%. Расхождения экспериментальных и МК данных на хвостах распределения учитывались в расчетах систематической погрешности. Брэнчинг считался отдельно для шести диапазонов в области  $10 \text{ МэВ} < E_\gamma^* < 70 \text{ МэВ}$  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.

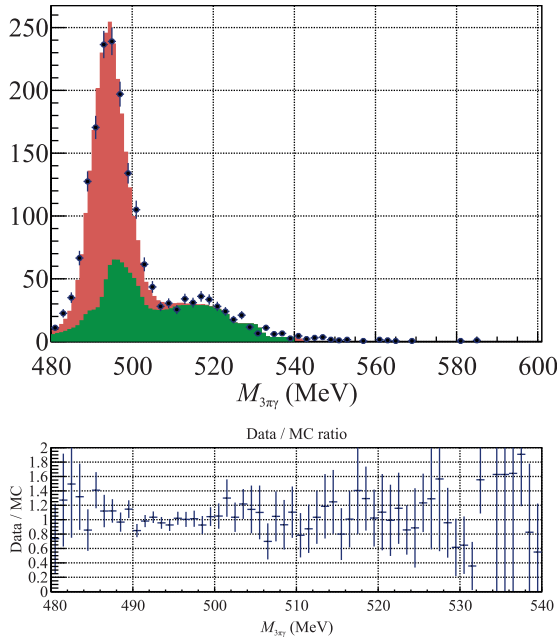


Рис. 4. (Цветной онлайн) Распределение событий по инвариантной массе системы  $3\pi\gamma$  после прохождения отборов. Экспериментальные данные представлены точками с ошибками. Красное распределение – МК для  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ , зеленое – МК для фона. В нижней половине приведено 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  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$  тоже была посчитана полная эффективность  $\epsilon_{3\pi}$ .

Имея эти величины, можно посчитать брэнчинг:

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

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

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

где  $N_1$  – число экспериментальных событий  $3\pi$ , прошедших все условия отбора, кроме тех, в которых используется  $\gamma$ .

Полученные значения брэнчинга в исследуемом диапазоне, а также их сравнение с теоретическим предсказанием [5] показаны на рис. 7, а также в табл. 1. Полный брэнчинг 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 состав-

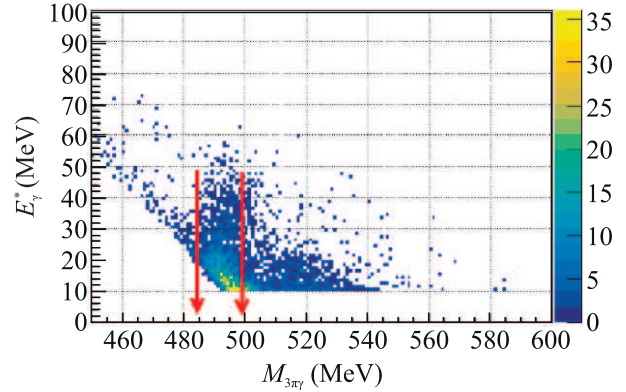


Рис. 5. (Цветной онлайн) Распределение экспериментальных данных на плоскости  $(M_{3\pi\gamma}, E_\gamma^*)$  после прохождения отборов. Стрелками отмечена сигнальная область

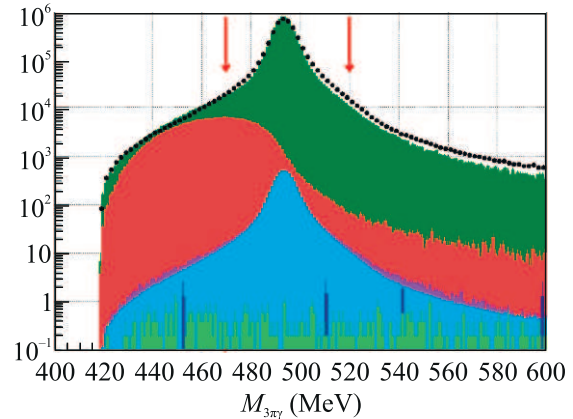


Рис. 6. (Цветной онлайн) Распределение событий по инвариантной массе  $M(3\pi)$  после прохождения условий отбора. Масштаб по оси  $Y$  – логарифмический. Экспериментальные данные представлены точками. Цветами показаны (сверху вниз): Монте-Карло  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ ,  $K^+ \rightarrow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

ляет не более 0.5%, поэтому ей можно пренебречь. Итоговая систематическая ошибка была посчитана путем вычисления квадратичной суммы всех источников и составила  $0.28 \cdot 10^{-5}$ .

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

$E_\gamma^*$ , 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	$(1.76 \pm 0.77) \cdot 10^{-8}$	$(1.36 \pm 0.02) \cdot 10^{-8}$

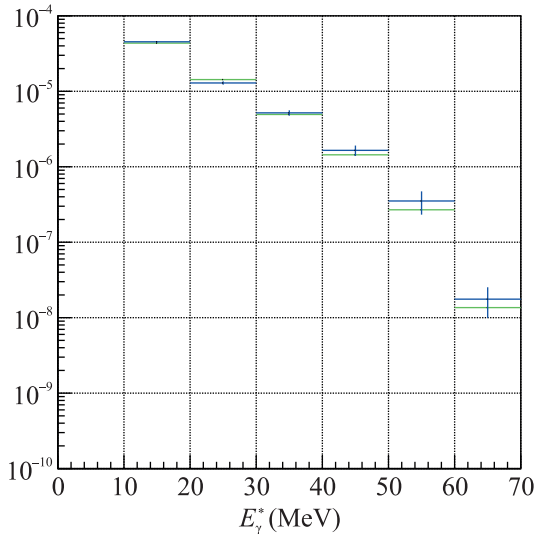


Рис. 7. (Цветной онлайн) Полученный дифференциальный брэнчинг  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  для диапазона  $10 \text{ МэВ} < E_\gamma^* < 70 \text{ МэВ}$  и сравнение с теоретическим предсказанием [5]. Экспериментальные значения показаны точками с ошибками

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 брэнчинга.

**5. Заключение.** В работе проведено исследование редкого распада  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ . Выделено  $\sim 2300$  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, “ $\tau$ -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  $\tau^+$  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  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ ”, “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, “ $K \rightarrow \pi\pi\pi\gamma$  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. Artamonov et al. (OKA Collaboration), “Study of the decay  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  in the OKA experiment”, Eur. Phys. J. C **79**, 296 (2019); <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6797-1>.
7. A. S. Sadvovskiy, V. F. Kurshetsov, A. P. Filin et al. (OKA Collaboration), “Search for heavy neutrino in  $K^+ \rightarrow \mu^+\nu_H$  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  $K^+ \rightarrow 3\pi$  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 AINENP’96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A **389**, 81 (1997).