

## АНАЛИЗ РЕДКОГО КАОННОГО РАСПАДА $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ NA62

*А. В. Охотников*<sup>1</sup>

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

Показан текущий прогресс в исследовании одного из редких распадов заряженного каона. Дан краткий обзор уже существующих исследований в данной области, и описаны достигнутые к настоящему времени результаты. Продемонстрирована работа процедуры обратной свертки для энергетического спектра фотонов, рожденных в распадах.

The current progress in the study of one of the rare decays of a charged kaon is shown. A brief literature review in this area is given, and the achieved results are described. The operation of the unfolding procedure for the energy spectrum of photons produced in decays is demonstrated.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

### ВВЕДЕНИЕ

Распад  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$  в настоящее время нельзя назвать хорошо изученным. Первые теоретические рассмотрение распада было сделано еще в 1955 г. Далитцем [1]. В работе автор обращает внимание на то, что образование  $\gamma$ -квантов в этом распаде обусловлено двумя различными механизмами. Первый из них — это внутреннее тормозное излучение, второй — структурное излучение. В работе подмечено, что второй процесс должен происходить с гораздо меньшей вероятностью, чем испускание тормозного гамма-кванта. Впервые измерить с хоть сколько-нибудь приемлемой точностью брэнчинг распада удалось в 1965 г. по 6 случаям распада [2], а затем в 1989 г. по 7 событиям результат удалось улучшить [3]. Теперь именно результат 1989 г. представлен в PDG [4] как действующий.

Говоря о более поздних работах, большой интерес привлечем к теоретическому исследованию Д'Амброзио [5], в котором распад рассмотрен в рамках киральной теории возмущений. Позже оно было частично проверено и подтверждено коллаборацией эксперимента ОКА. Используя современное экспериментальное оборудование, сотрудничество смогло зарегистрировать уже 450 событий [6], но только для распадов с  $E_\gamma^* \geq 30$  МэВ.

NA62 — это эксперимент, проводимый в ЦЕРН на выведенном пучке разгонного кольца SPS. Эксперимент сосредоточен на исследовании редких и сверхредких

---

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

распадов заряженных каонов. Основная его задача — исследование сверхредкого распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  для измерения элемента  $|V_{td}|$  матрицы СКМ с погрешностью не более 10%.

Предполагается, что эксперимент, набирающий данные на пучке с энергией в 75 ГэВ и интенсивностью  $3 \cdot 10^{12}$  протонов за сброс, способен зарегистрировать гораздо большее количество событий, что позволит значительно увеличить точность измерений и улучшить текущий результат.

### ОТБОР

При отборе событий использовался ряд критериев:

- триггер, настроенный на отбор многотрековых событий. Условие — не менее трех треков продуктов распада;
- ровно одна трехтрековая вершина распада;
- геометрический акцептанс в фотонном вето и в STRAW;
- суммарный заряд треков равен +1;
- для системы идентификации каонов Cedar: «уверенный» сигнал, т. е.  $N_{sectors} \geq 5$ ;
- вершина распада находится внутри распадного объема.

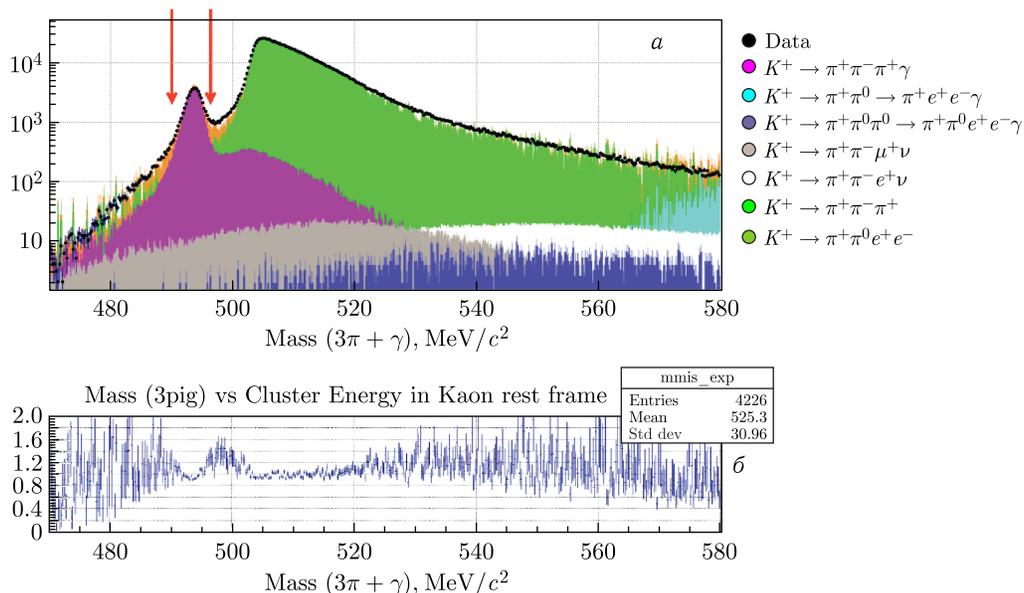


Рис. 1 (цветной в электронной версии). а) Распределение реконструированных событий по инвариантной массе продуктов распада. Точками отмечены данные, цветом — различные сгенерированные (MC) события. Все выборки отнормированы в соответствии с величиной брэнчинга, представленной в PDG [4]. Стрелками отмечен сигнальный регион. б) Отношение распределения экспериментальных данных к сгенерированным

А также для каждого кластера в основном калориметре установки (LКг):

- временное окно для регистрации ливня составляет 4 нс с момента регистрации каона в Cedar;
- энергия кластера не менее 2000 МэВ;
- расстояние до прямых, на которых лежат треки продуктов распада, не менее 20 см;
- разница суммарного импульса продуктов распада и зарегистрированного импульса пучкового каона не более 2 ГэВ;
- энергия кластера не менее 10 МэВ в системе покоя каона.

На рис. 1 представлены результаты отбора, проведенные на данных, полученных в период 2017–2018 г. На данные наложены офитированные результаты отбора сгенерированных МС-распадов. Были сгенерированы основные распады заряженно-го каона, имеющие в числе продуктов распада пион, а именно:  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 \rightarrow \pi^+e^+e^-\gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0e^+e^-$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^0e^+e^-\gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-e^+\nu$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\nu$ . Для нормировки использовался трехпионный распад  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$ , так как его вклад в фон является максимальным. В результате анализа было отобрано 52 943 события.

### ОБРАТНАЯ СВЕРТКА

Под обратной сверткой (в англоязычной литературе «unfolding») понимается процедура, позволяющая восстановить исходный сигнал после его регистрации прибором, имеющим определенное разрешение, а также после дальнейшей обработки. В данном исследовании эта процедура была применена с целью улучшить точность измерения дифференциального брэнчинга, особенно в области энергии  $\gamma$ -кванта 50–70 МэВ в системе покоя каона (рис. 2).

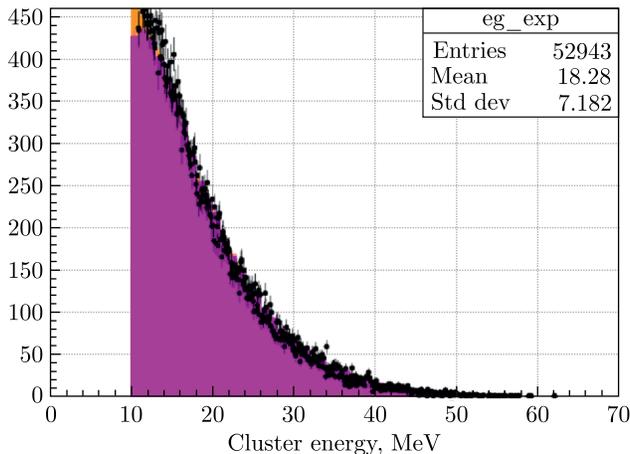


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Распределение событий в сигнальном регионе (см. рис. 1) по восстановленной энергии  $\gamma$ -кванта. Наложены экспериментальные данные и Монте-Карло. Цветовая схема идентична рис. 1

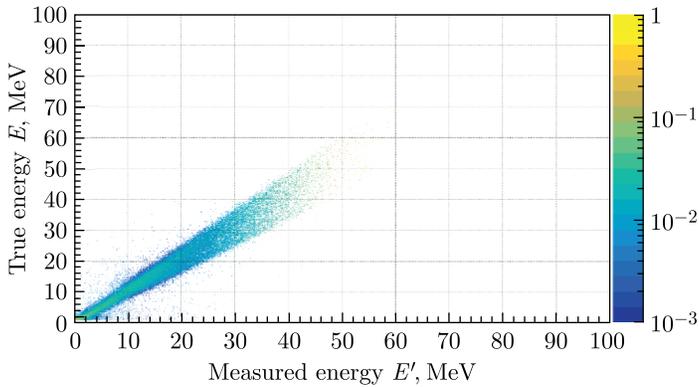


Рис. 3. Графическое представление матрицы миграции для значений энергии  $\gamma$ -кванта в системе покоя каона

Использован байесовский подход (Bayesian unfolding), описание которого приведено в работе [7]. На рис. 3 можно видеть графическое представление матрицы миграции, определяющей размазывание истинного энергетического распределения событий в ходе регистрации и анализа. Для ее получения использована выборка из  $10^7$  сгенерированных распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ , для которых имитировалось прохождение через компьютерную модель установки NA62 [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены достигнутые результаты по измерению параметров процесса  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  в эксперименте NA62. Разработана процедура обратной свертки для дифференциального брэнчинга. Работа по непосредственному измерению величины брэнчинга процесса продолжается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalitz R. H. Radiative  $\tau$ -Meson Decay // Phys. Rev. 1955. V. 99. P. 915–920; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.99.915>.
2. Stamer P., Huetter T., Koller E. L., Taylor S., Grauman J. Observations of Radiative  $\tau^+$  Decays // Phys. Rev. 1965. V. 138. P. B440–B441; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.138.B440>.
3. Barmin V. V., Barylov V. G., Davidenko G. V., Demidov V. S., Dolgolenko A. G., Zombkovskaya N. K., Meshkovskiy A. G., Mirosidi G. S., Rassushin P. V., Chistyakova T. A. Measurement of the  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$  Decay Probability // Sov. J. Nucl. Phys. 1989. V. 50. P. 421–423.
4. Workman R. L. et al. (Particle Data Group Collab.). Review of Particle Physics // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022. V. 2022. P. 083C01.
5. D'Ambrosio G., Ecker G., Isidori G., Neufeld H.  $K \rightarrow \pi\pi\pi\gamma$  in Chiral Perturbation Theory // Z. Phys. C. 1997. V. 76. P. 301–310.

6. *Shapkin M.M. et al. (OKA Collab.)*. Study of the Decay  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$  in the OKA Experiment // *Eur. Phys. J. C*. 2019. V. 79, No. 4. P. 296; <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6797-1>.
7. *D'Agostini G.* A Multidimensional Unfolding Method Based on Bayes' Theorem // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1995. V. 362, No. 2. P. 487–498; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890029500274X>.
8. *Agostinelli S. et al. (Geant4 Collab.)*. Geant4 — A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 506, No. 4. P. 250–303; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.

Получено 1 февраля 2024 г.