

# Анализ редкого каонного распада $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\gamma$ в эксперименте NA62

*А.В. Охотников*<sup>1</sup>

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логонова  
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 моменту 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. Впервые теоретическое рассмотрение распада было сделано еще в 1955 году 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, а другой — 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 году по 6 случаям распада [2], а затем в 1989 году по 7 событиям результат удалось улучшить [3]. В настоящий момент именно результат 89 года представлен в PDG [4] как действующий.

Говоря о более поздних работах, большой интерес представляет теоретическое исследование 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, размещенный в CERN на выведенном пучке разгонного кольца SPS. Эксперимент сосредоточен на исследовании редких и сверхредких распадов заряженных каонов. Основная задача эксперимента

---

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

26 — это исследование сверхредкого распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  с целью измерить  
27 элемент  $|V_{td}|$  матрицы СКМ с погрешностью не более 10%.

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

## 32 Отбор

33 При отборе событий использовался ряд критериев:

- 34 • Триггер, настроенный на отбор многотрековых событий. Условие  
35 - не менее трех треков продуктов распада.
- 36 • Ровно одна трехтрековая вершина распада.
- 37 • Геометрический акцептанс в фотонном вето и в STRAW.
- 38 • Суммарный заряд треков равен +1.
- 39 • Для системы идентификации каонов Cedar: «уверенный» сигнал,  
40 т.е.  $N_{sectors} \geq 5$ .
- 41 • Вершина распада находится внутри распадного объема.

42 А также для каждого кластера в основном калориметре установки  
43 (LKr):

- 44 • Временное окно для регистрации ливня составляет 4 нс с момента  
45 регистрации каона в Cedar.
- 46 • Энергия кластера не менее 2000 МэВ.
- 47 • Расстояние до прямых, на которых лежат треки продуктов распада  
48 не менее 20 см.
- 49 • Разница суммарного импульса продуктов распада и зарегистрированного  
50 импульса пучкового каона не более 2 ГэВ.
- 51 • Энергия кластера не менее 10 МэВ в системе покоя каона.

52 На Рис. 1 представлены результаты отбора, проведенные на данных,  
53 полученных в период 2017-2018 гг. На данные наложены отфитированные  
54 результаты отбора сгенерированных МС-распадов. Были сгенерированы  
55 основные распады заряженного каона, имеющие в числе продуктов распада  
56 пион, а именно:  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \rightarrow \pi^+ e^+ e^- \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 e^+ e^-$ ,  
57  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^0 e^+ e^- \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$ . Для  
58 нормировки использовался трехпионный распад  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ , так как  
59 его вклад в фон является максимальным. В результате анализа было  
60 отобрано 59943 событий.

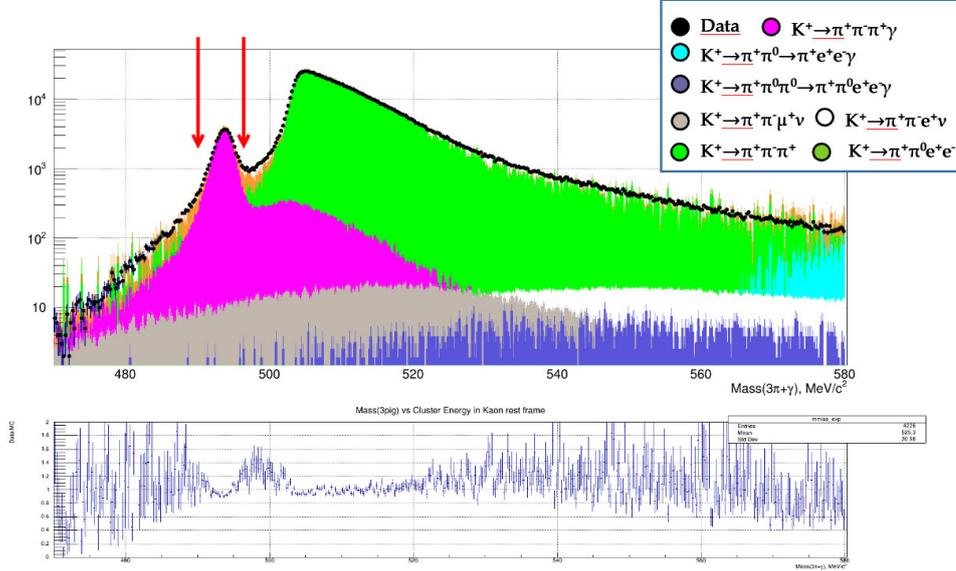


Fig. 1. Верх: распределение реконструированных событий по инвариантной массе продуктов распада. Точками отмечены данные, цветом — различные сгенерированные (MC) события. Все выборки были отнормированы в соответствии с величиной бренчинга, представленной в PDG [4]. Стрелками отмечен сигнальный регион. Низ: отношение распределения экспериментальных данных к сгенерированным.

61

### Обратная свертка

62 Под обратной сверткой (в англоязычной литературе "unfolding") понимается  
 63 процедура, позволяющая восстановить исходный сигнал после его регистрации  
 64 прибором, имеющим определенное разрешение, а также после дальнейшей  
 65 обработки. В данном исследовании эта процедура была применена с  
 66 целью улучшить точность измерения дифференциального бренчинга, особенно  
 67 в области энергии  $\gamma$ -кванта 50-70 МэВ в системе покоя каона (см. Рис. 2).

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

75

### Итоги

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

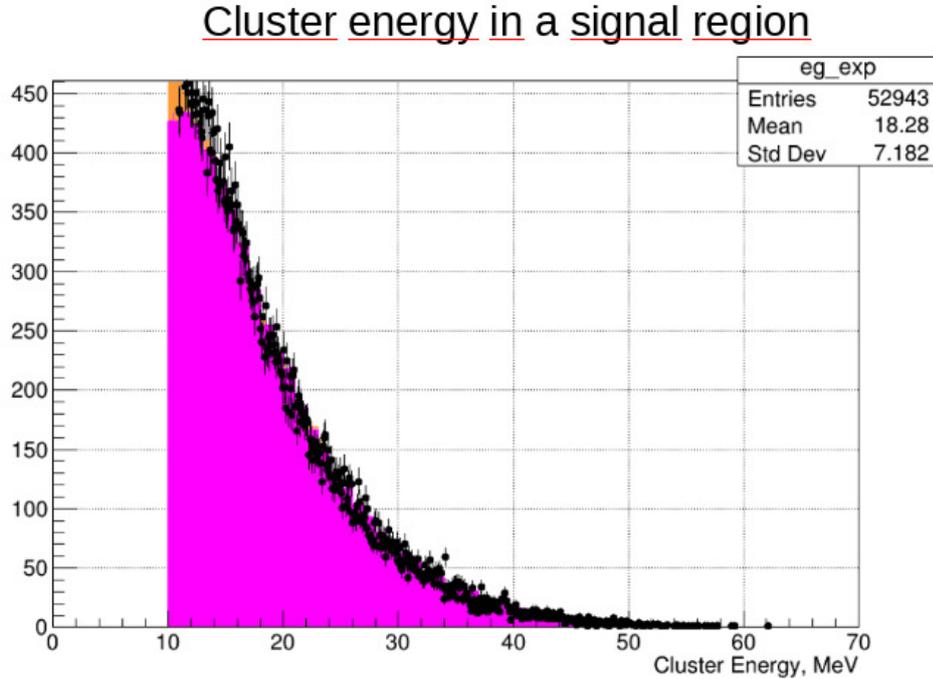


Fig. 2. Распределение событий в сигнальном регионе (см. Рис. 1) по восстановленной энергии  $\gamma$ -кванта. Наложены экспериментальные данные и Монте-Карло. Цветовая схема идентична Рис. 1.

80

## REFERENCES

- 81 1. *Dalitz R.H.* Radiative  $\tau$ -Meson Decay // Phys. Rev. —  
 82 1955. — Aug. — V. 99. — P. 915–920. — URL:  
 83 <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.99.915>.
- 84 2. *Stamer P., Huetter T., Koller E.L., Taylor S., Grauman J.* Observations  
 85 of Radiative  $\tau^+$  Decays // Phys. Rev. — 1965. — Apr. — V. 138. — P. B440–  
 86 B441. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.138.B440>.
- 87 3. *Barmin V.V., Barylov V.G., Davidenko G.V., Demidov V.S., Dolgolenko*  
 88 *A.G., Zombkovskaya N.K., Meshkovsky A.G., Mirosidi G.S., Rassushin*  
 89 *P.V., Chistyakova T.A.* Measurement of the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$   
 90 decay probability // Sov. J. Nucl. Phys. — 1989. — V. 50. — P. 421–423.
- 91 4. *Workman R.L. et al.* [Particle Data Group Collaboration] Review of Par-  
 92 ticle Physics // PTEP. — 2022. — V. 2022. — P. 083C01.
- 93 5. *D'Ambrosio G., Ecker G., Isidori G., Neufeld H.*  $K \rightarrow \pi \pi \pi \gamma$  in chiral  
 94 perturbation theory // Z Phys C - Particles and Fields. — 1997. — V. 76. —  
 95 P. 301–310.
- 96 6. *Shapkin M.M. et al.* [OKA Collaboration] Study of the decay  $K^+ \rightarrow$   
 97  $\pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$  in the OKA experiment // Eur. Phys. J. C. — 2019. — V. 79,  
 98 no. 4. — P. 296. — URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6797-1>.

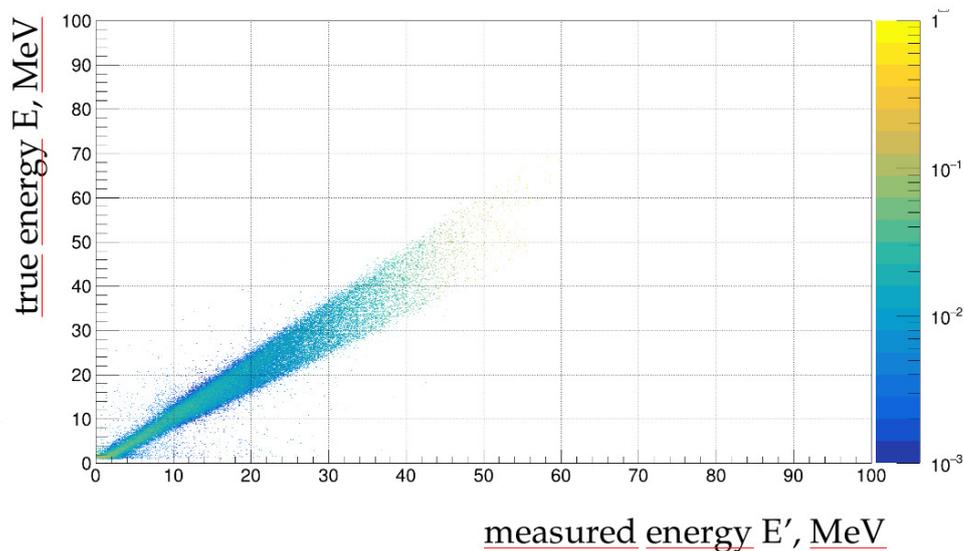


Fig. 3. Графическое представление матрицы миграции для значений энергии  $\gamma$ -кванта в системе покоя каона.

- 99 7. *D'Agostini G.* A multidimensional unfolding method based on  
 100 Bayes' theorem // Nuclear Instruments and Methods in Physics Re-  
 101 search Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated  
 102 Equipment. — 1995. — V. 362, no. 2. — P. 487–498. — URL:  
 103 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029500274X>.
- 104 8. *Agostinelli S. et al.* [Geant4 Collaboration] Geant4 — a simu-  
 105 lation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Re-  
 106 search Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated  
 107 Equipment. — 2003. — V. 506, no. 3. — P. 250–303. — URL:  
 108 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.