



Исследование распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ в экспериментах ОКА и NA62

Охотников Артем Витальевич
НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ
artem.okhotnikov@ihep.ru

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
Новосибирск 10-13.03.2026

1989

Бармин В.В. и др. Измерение вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ // ЯФ. 1989. Т. 50. С. 679

Barmin V.V et al. Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ decay probability. *Sov.J.Nucl.Phys.* 50 (1989) 421-423

$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma) = (1,04 \pm 0,31) \cdot 10^{-4}$, $E_\gamma^* \sim 5$ MeV

7 событий

PDG (2023):

$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma) = (1,04 \pm 0,31) \cdot 10^{-4}$,
 $E_\gamma^* > 5$ MeV
 (Barmin et al., 1989)

1997

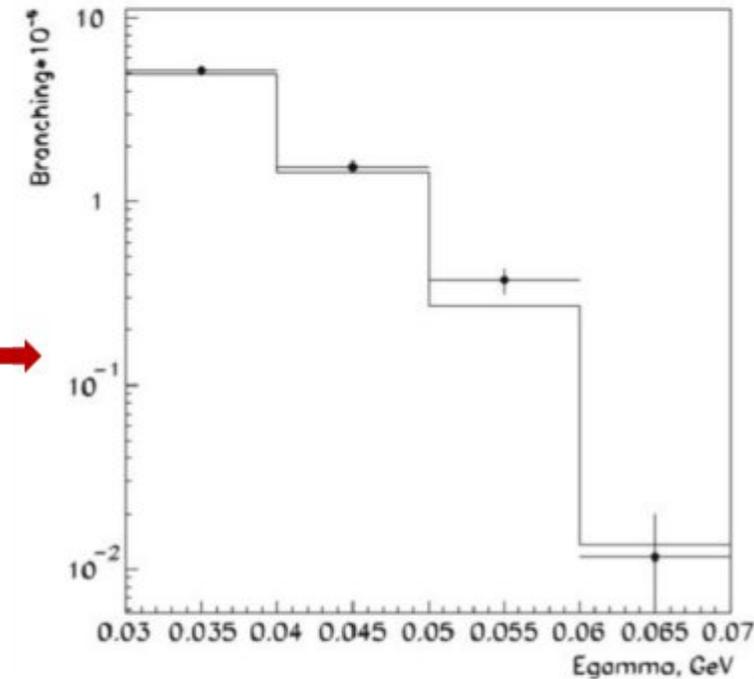
[1] D'Ambrosio, G., Ecker, G., Isidori, G. et al. $K \rightarrow \pi\pi\pi\gamma$ in chiral perturbation theory. *Z Phys C - Particles and Fields* **76**, 301-310 (1997).

<https://doi.org/10.1007/s002880050554>

E_γ, MeV	$\frac{\Gamma_{GB} - \Gamma_{Low}}{\Gamma}$	BR
10-20	$-1.7 \cdot 10^{-3}$	$(4.36 \pm 0.04) \cdot 10^{-5}$
20-30	$-4.8 \cdot 10^{-3}$	$(1.43 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$
30-40	$-9.2 \cdot 10^{-3}$	$(4.93 \pm 0.05) \cdot 10^{-6}$
40-50	$-1.5 \cdot 10^{-2}$	$(1.44 \pm 0.01) \cdot 10^{-6}$
50-60	$-2.1 \cdot 10^{-2}$	$(2.69 \pm 0.03) \cdot 10^{-7}$
60-70	$-2.8 \cdot 10^{-2}$	$(1.36 \pm 0.02) \cdot 10^{-8}$
10-70	$-3.4 \cdot 10^{-3}$	$(6.46 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$

$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma)_{theor.} = (4,36 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} E_\gamma^* > 10$ MeV

2019



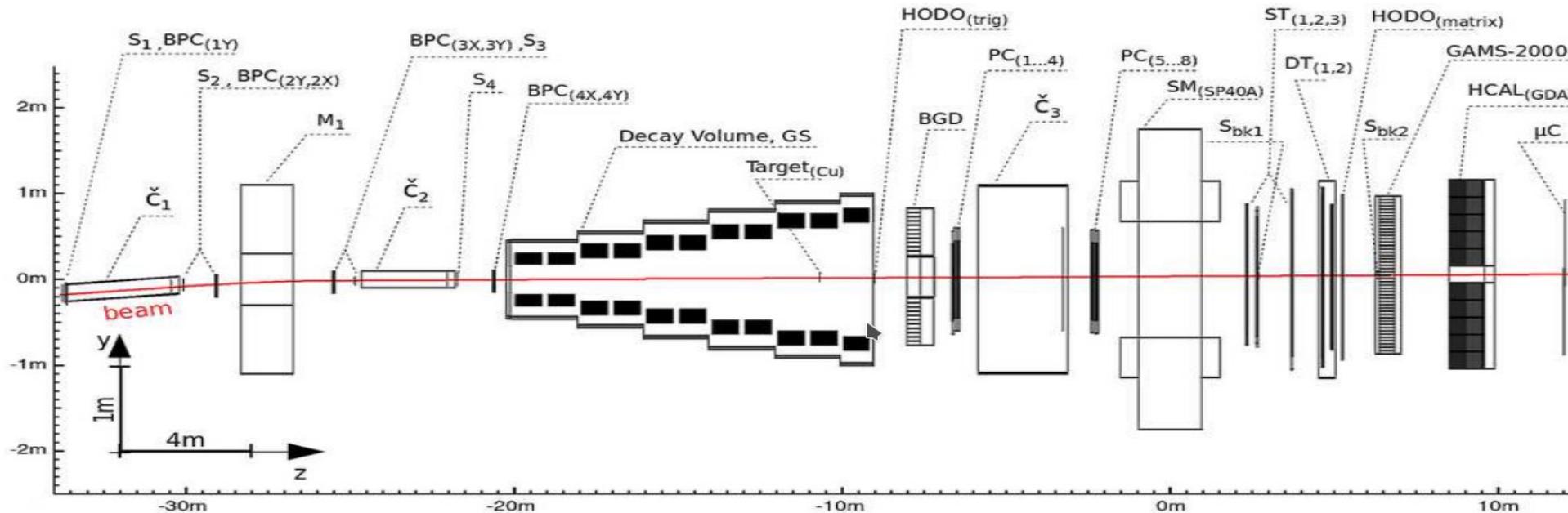
Shapkin, M.M. et al. Study of the decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ in the OKA experiment. *Eur. Phys. J. C* **79**, 296 (2019). 019-6797-1. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6797-1>

Chiral perturbation theory (ChPT):

В порядке $O(p^2)$ - распад определяется $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ (Γ_{low})
 В порядке $O(p^4)$ - значимый вклад нетривиальных амплитуд, в работе [1] разработан новый метод вычислений, «generalised bremsstrahlung», Γ_{GB}

$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma) = (0,71 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$, $E_\gamma^* > 30$ MeV

450 событий



- Расположен в НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ на вторичном сепарированном пучке ускорителя У-70
- Цель эксперимента - исследование редких распадов заряженных каонов
- Параметры пучка: $P \sim 18$ ГэВ; доля каонов в пучке до 20%
- Элементы триггера - пучковые сцинтилляционные(S1-4) и черенковские счетчики(C1, C2), beamkiller (BK). Триггер SummaGAMS ($E_{GAMS} > 2,5$ ГэВ) используется для подавления $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$.
- Трековая система - пропорциональные камеры, дрейфовые трубки
- Калориметрия - э/м калориметры GAMS, BGD, адронный калориметр HCAL
- Охранная система (DV, DODO)

Данные: ОКА 2012-2013 гг.
Событий: $N_{events} = 4,87 * 10^7$
(трехтрековые DST)

Сигнал: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$

Основной фон: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$
 $BR = 5,583 * 10^{-2}$

Вторичные фоны:

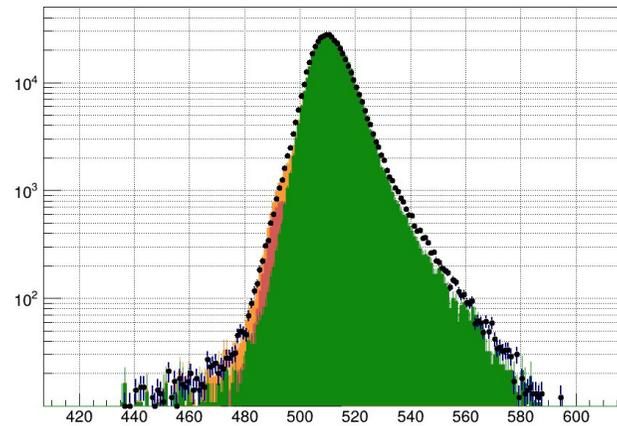
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$
 $BR = 1,760 * 10^{-2}$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \rightarrow \pi^+ e^+ e^- \gamma$
 $BR = 2,426 * 10^{-3}$

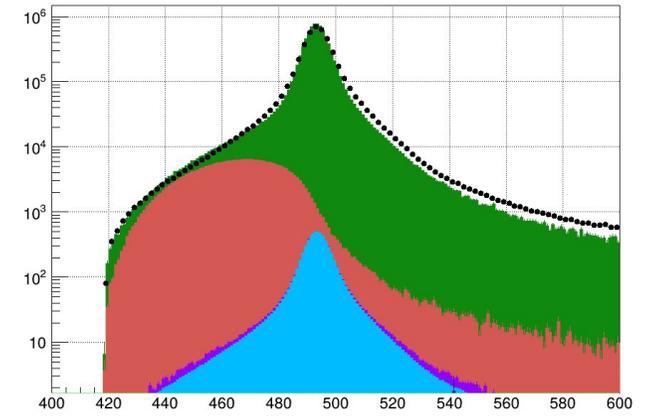
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$
 $BR = 4,247 * 10^{-5}$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$
 $BR = 1,4 * 10^{-5}$

- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \rightarrow \pi^+ e^+ e^- \gamma$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$
- Фон+сигнал
- Экспериментальные данные



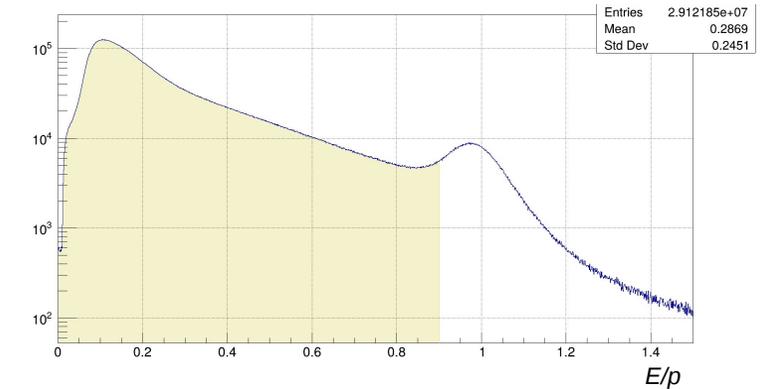
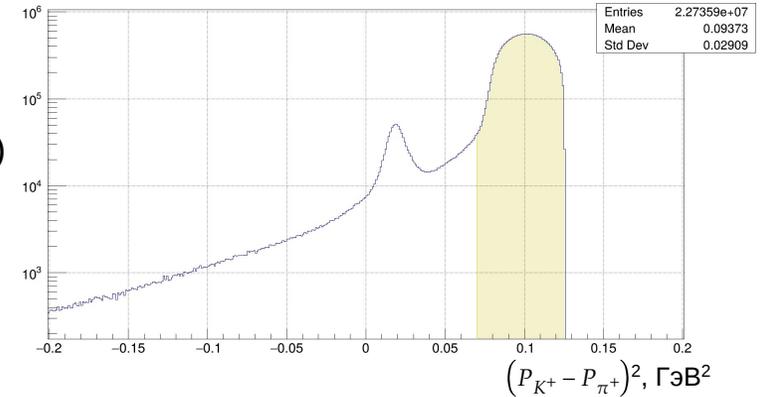
$M_{3\pi\gamma}$, МэВ



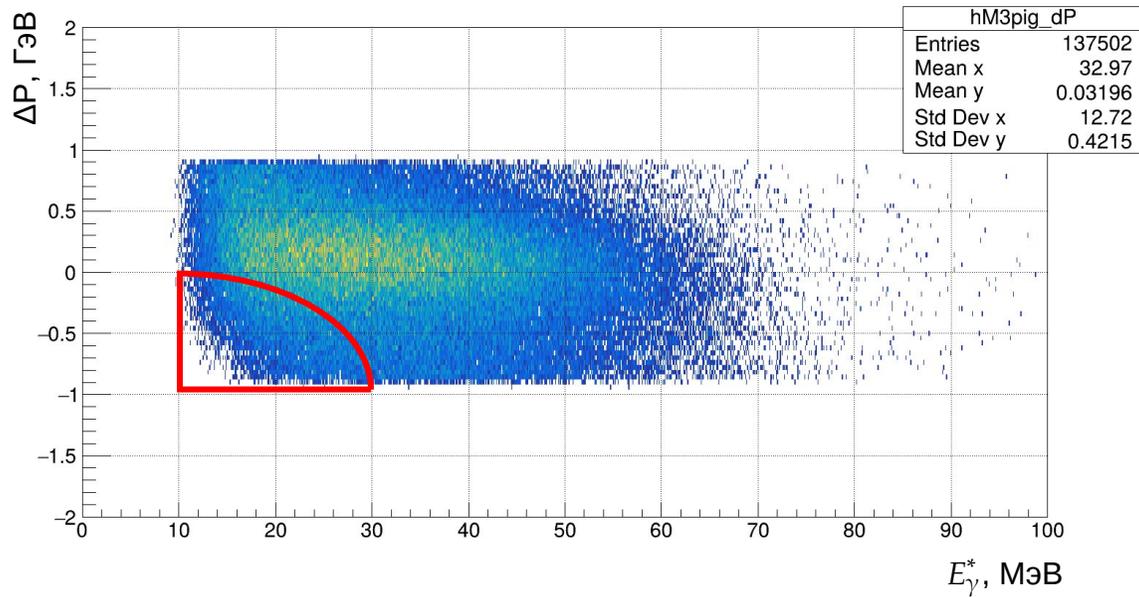
$M_{3\pi}$, МэВ

Распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ также используется при вычислении брэнчинга как нормировочный, потому что при его отборе используется тот же триггер и большинство условий отбора. Это позволяет снизить систематические ошибки

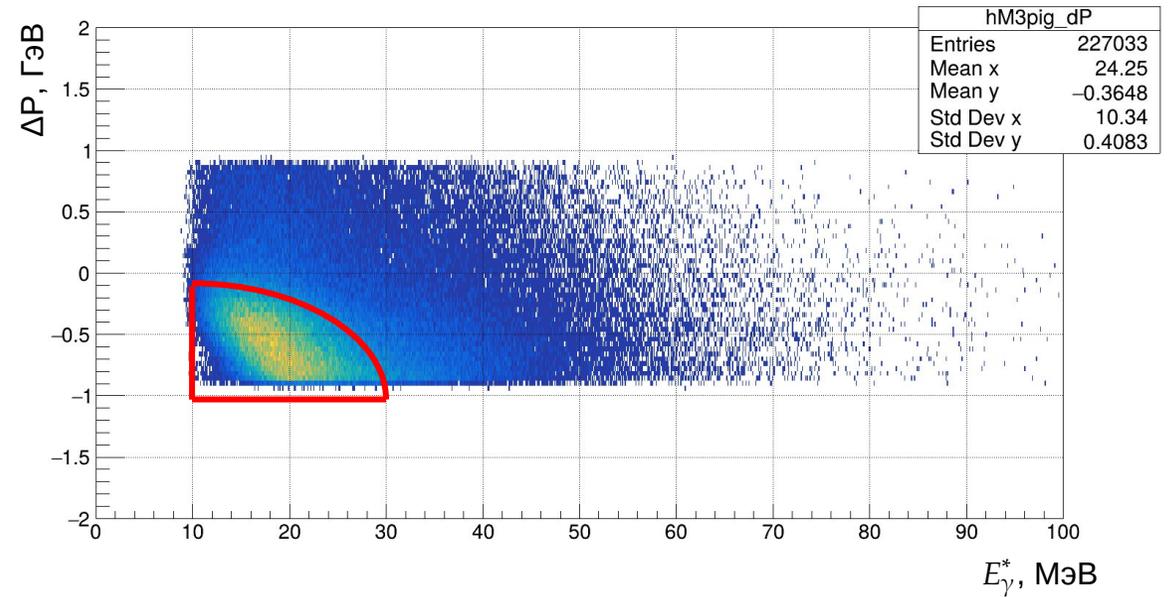
- Ровно три вторичных трека
- Распад произошел внутри распадного объема
- Суммарный заряд вторичных треков равен +1
- Для каждого «+» трека: $M_{miss}^2(\pi^+) = (P_{K^+} - P_{\pi^+})^2 > 0,07$ ГэВ (подавление $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \rightarrow \pi^+ e^+ e^- \gamma$)
- Ни один из треков не идентифицирован э/м калориметром как электрон ($E/p < 0,9$)
- Событие содержит ровно один фотон с энергией больше 0,5 ГэВ
- Квадрат поперечного импульса системы ($3\pi\gamma$) менее 0,001 ГэВ²
- Отношение импульса системы ($3\pi\gamma$) к импульсу пучкового каона находится в границах от 0,95 до 1,05
- **ЛИБО:**
 - Инвариантная масса каждой из систем ($\pi\gamma$) больше 0,17 ГэВ
- **ЛИБО:**
 - Инвариантная масса каждой из систем ($\pi\gamma$) больше 0,15 ГэВ
 - χ^2 э/м ливня меньше 0,4
 - Выполнены дополнительные условия на значения $\Delta P = |\vec{P}_{K^+}| - |\vec{P}_{3\pi\gamma}|$ и расстояния между вершиной ливня и точками пересечения заряженного трека с плоскостью калориметра $R = |\vec{R}_{shower} - \vec{R}_{track}|$ (см. далее)



$$\Delta P = |\vec{P}_{K^+}| - |\vec{P}_{3\pi\gamma}|$$



MC($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$)

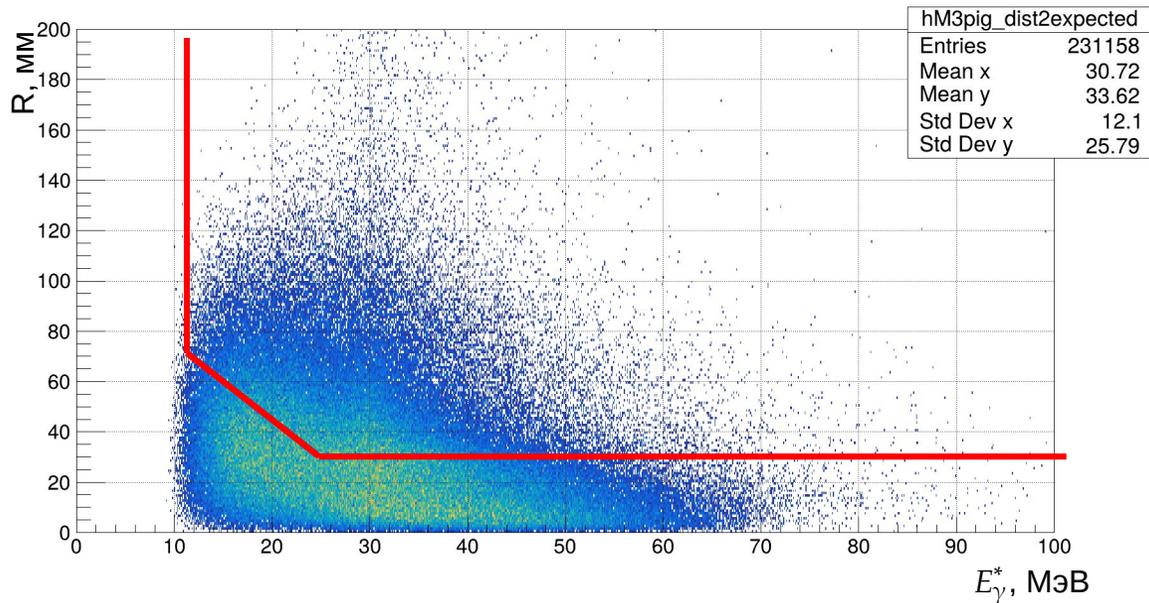


MC($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$)

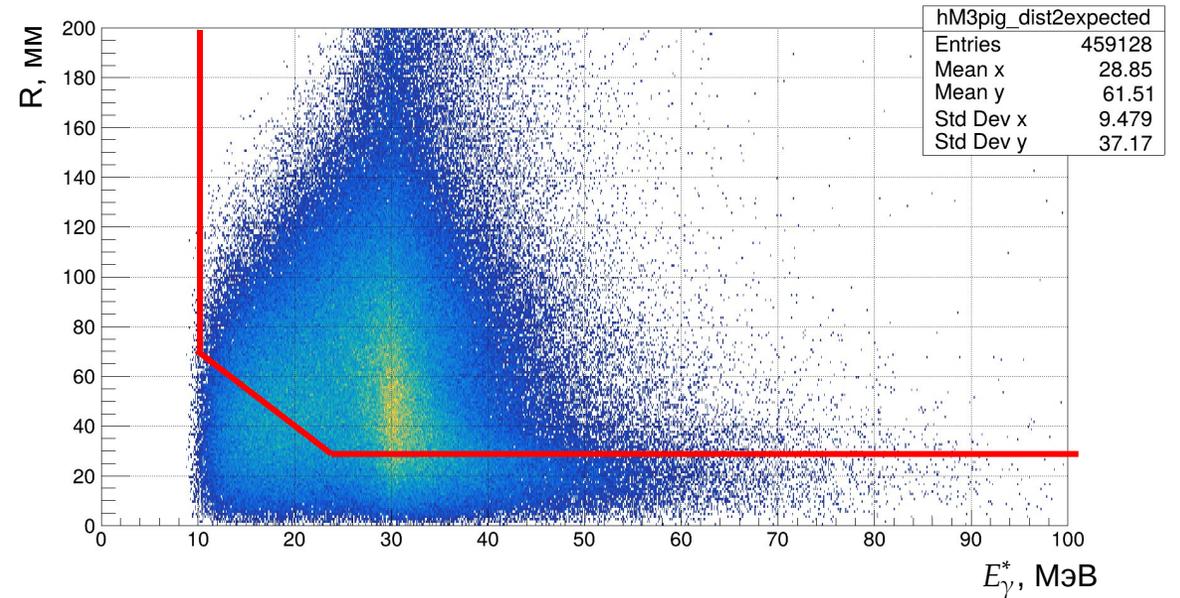
Отбор исключает область, содержащую наибольшее число фоновых событий

E_γ^* - энергия гамма-кванта в системе покоя каона

$$R = |\vec{R}_{shower} - \vec{R}_{track}|$$



MC($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$)

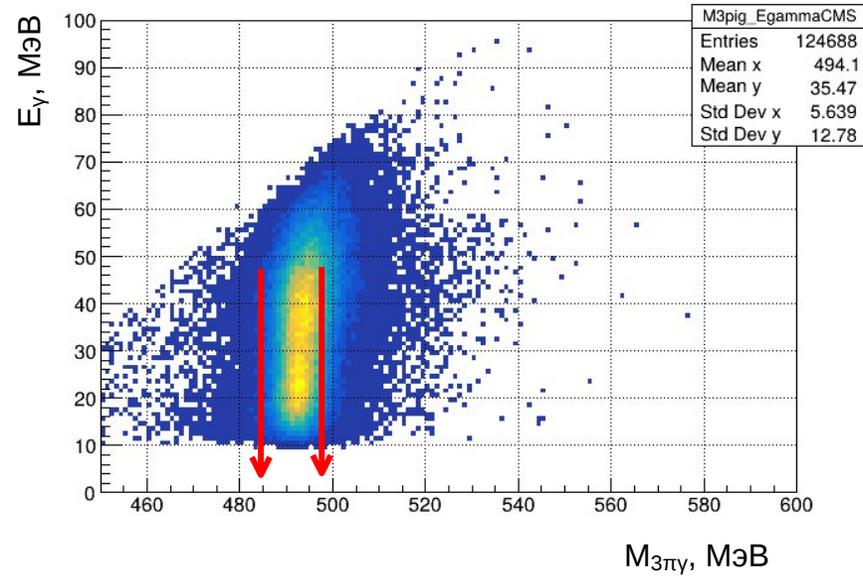


MC($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$)

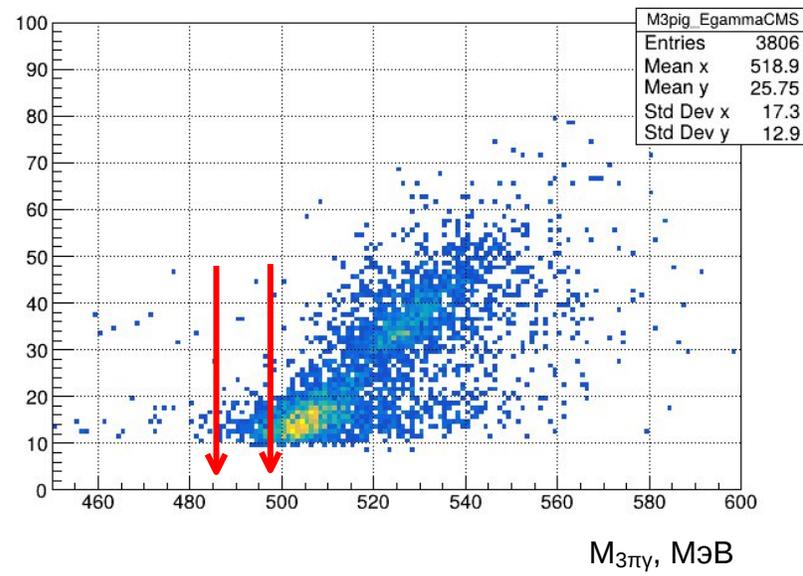
Отбор исключает область, содержащую наибольшее число фоновых событий

E_γ^* - энергия гамма-кванта в системе покоя каона

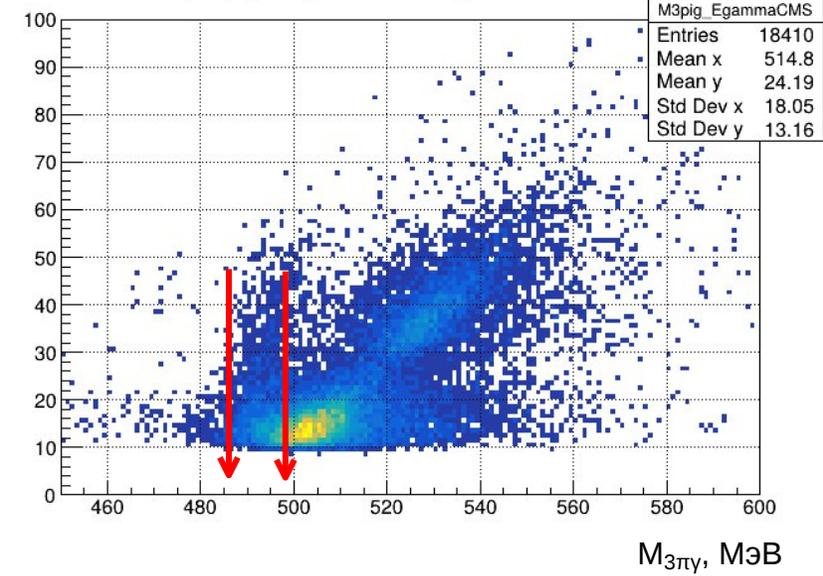
Результаты отбора



MC сигнала (K3pi0)
eff = 4,9%



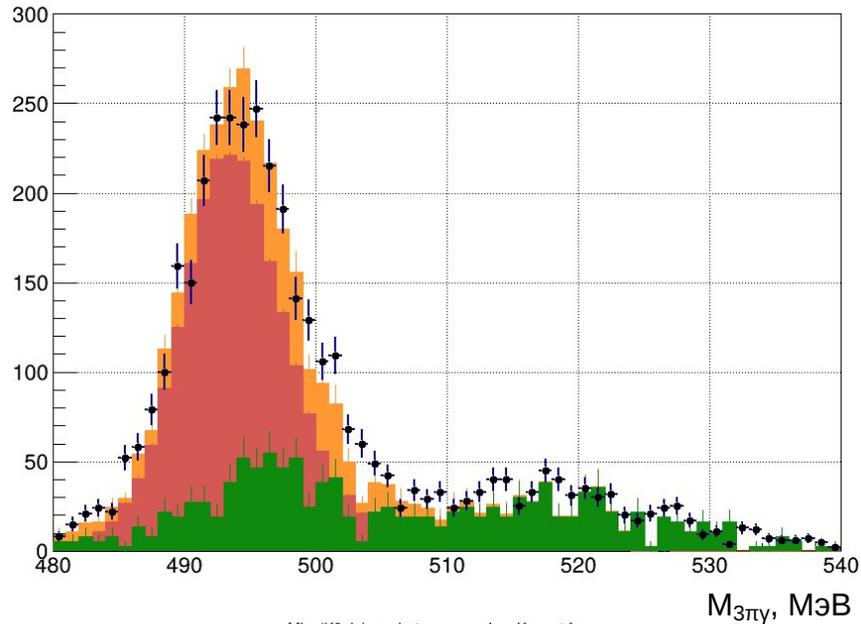
MC основного фона (K3pi)
eff = $1,48 \cdot 10^{-5}$



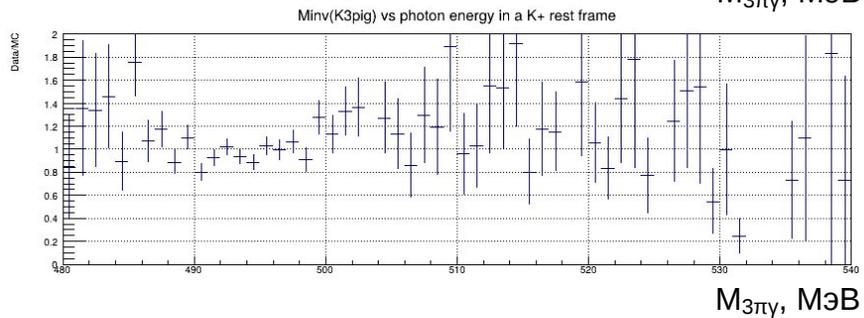
Отобранные данные

Область сигнала: $485 \text{ МэВ} < M_{3\pi_0} < 500 \text{ МэВ}$

Всего событий в области: **2269**



Диапазон, МэВ	Число событий	Процент фона
10-20	1518	12%
20-30	584	7,5%
30-40	229	4,2%
40-50	71	6,6%
50-60	22	<0,1%
60-70	3	<0.1%



● $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$
 ● $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$
 ● Фон+сигнал
 ● Экспериментальные данные

Вычисление брэнчинга

1. Оба МС ($K_{3\pi}$, $K_{3\pi\gamma}$) нормированы на 1, получены распределения $f_{3\pi\gamma}(m)$, $f_{3\pi}(m)$
2. Функция фитирования: $p_0 f_{3\pi\gamma}(m) + p_1 f_{3\pi}(m)$
3. Эффективность отбора:

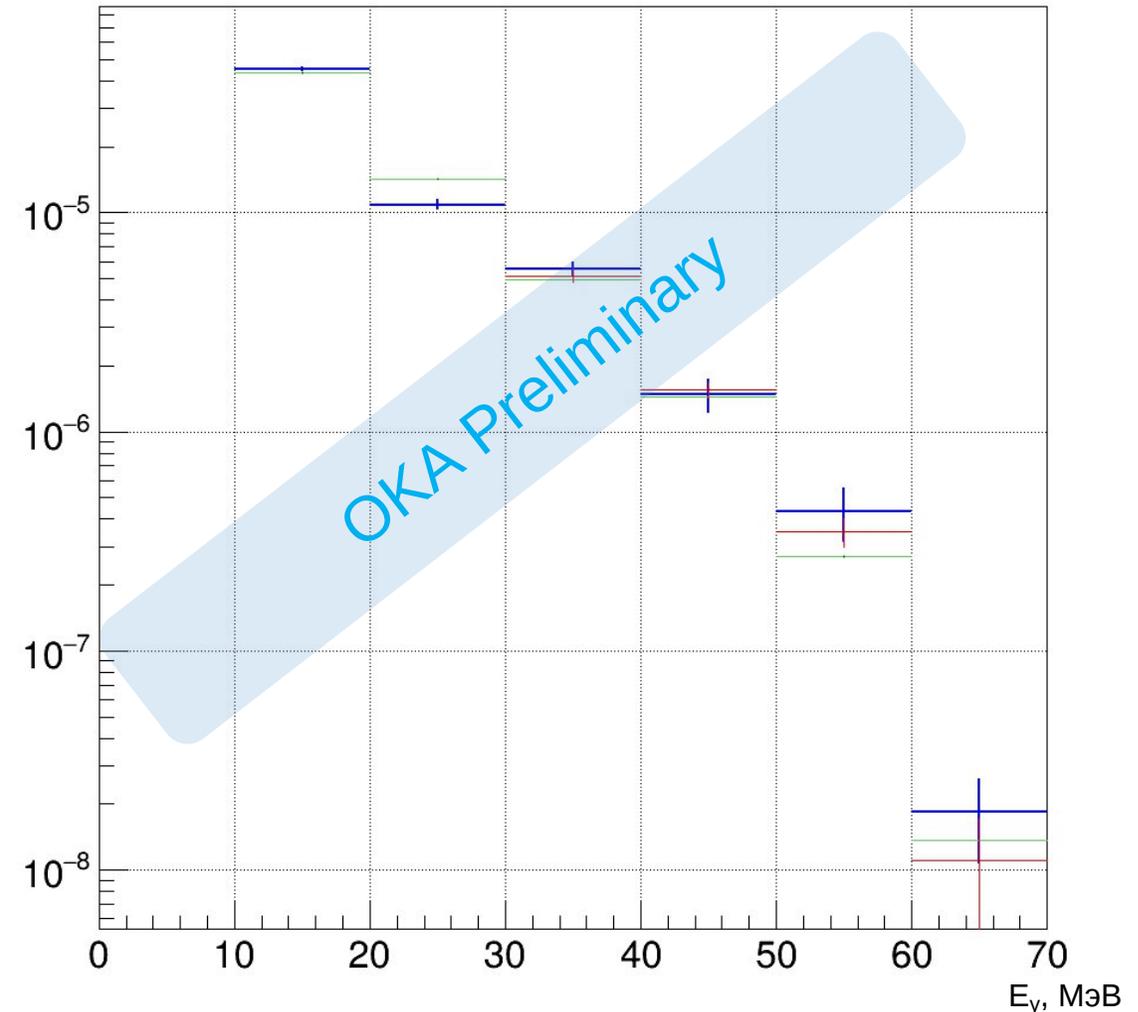
$$\text{eff}_{3\pi\gamma} = \frac{MC_{selected}}{MC_{init}}; (E_l < E_{\gamma true}^* < E_r)$$

4. Нормировка по $K_{3\pi}$:

$$\text{eff}_{3\pi} = \frac{MC (selected, no \gamma cuts)}{MC gen}$$

5. $N_{3\pi\gamma} = p_0 / \text{eff}_{3\pi\gamma}$
 $N_{3\pi} = N_{data\ selected, no \gamma\ cuts} / \text{eff}_{3\pi}$

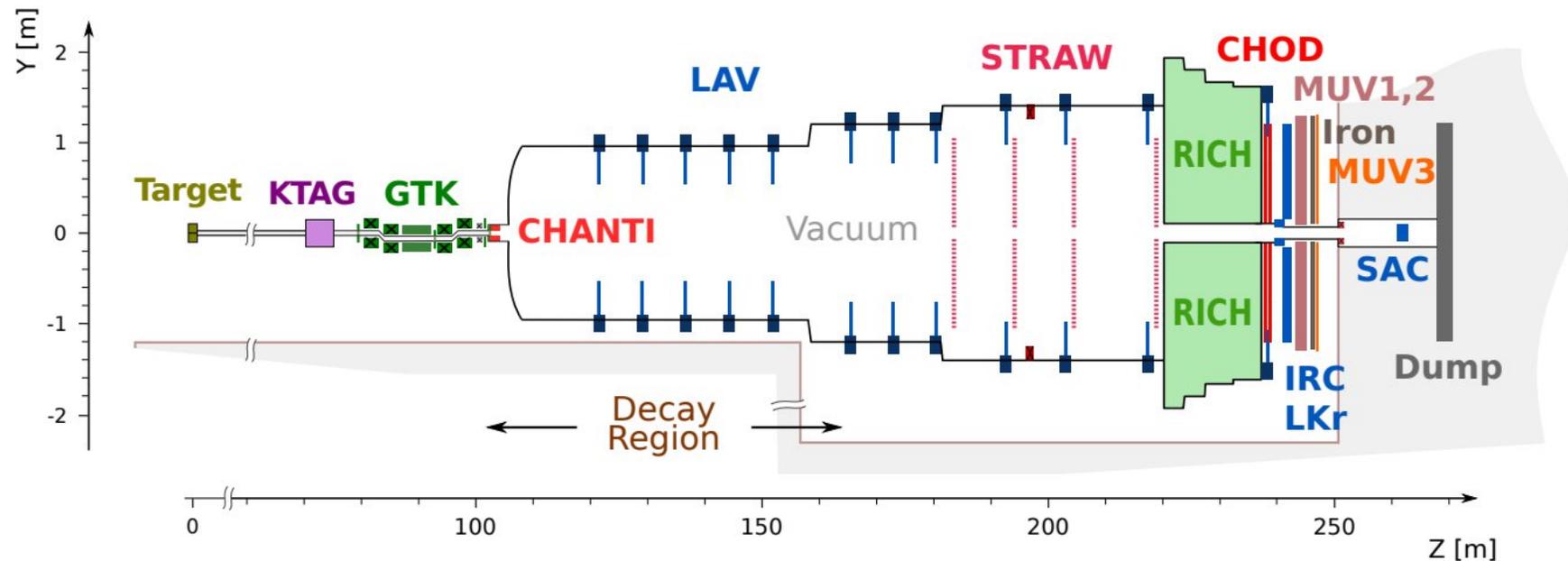
6. $BR(3\pi\gamma)_{E_i} = BR(3\pi) \cdot \frac{N_{3\pi\gamma}}{N_{3\pi}}$





Диапазон, МэВ	Теория	Результат*
10-20	$(4,36 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$	$(4,53 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$
20-30	$(1,43 \pm 0,01) \cdot 10^{-5}$	$(1,09 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
30-40	$(4,93 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$(5,52 \pm 0,42) \cdot 10^{-6}$
40-50	$(1,44 \pm 0,01) \cdot 10^{-6}$	$(1,48 \pm 0,26) \cdot 10^{-6}$
50-60	$(2,69 \pm 0,03) \cdot 10^{-7}$	$(4,33 \pm 1,2) \cdot 10^{-7}$
60-70	$(1,36 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$	$(2,91 \pm 0,77) \cdot 10^{-8}$
10-70	$(6,46 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$	$(6,36 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$

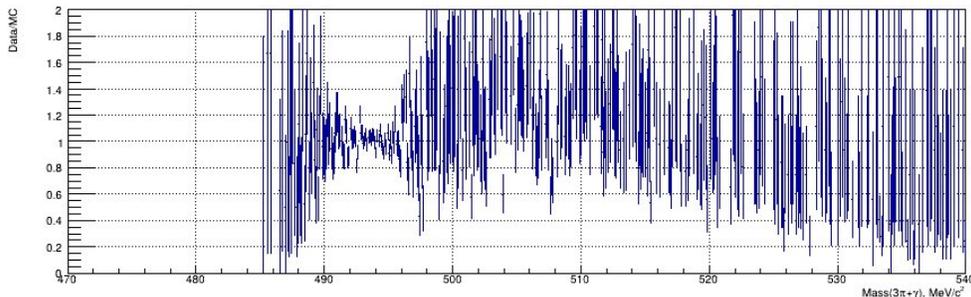
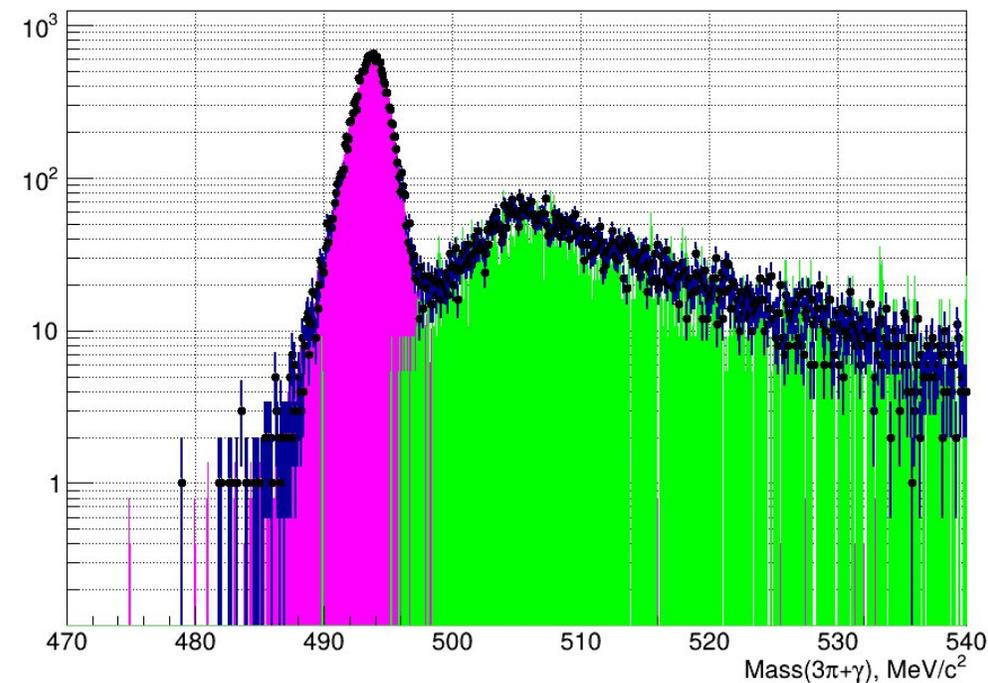
* Учтены только статистические погрешности



NA62

- Расположен в CERN (на вторичном сепарированном пучке SPS)
- Цель эксперимента - исследование сверхредкого распада $B(K^+ \rightarrow \pi \nu \nu)$
- Параметры пучка: $P = 75$ ГэВ; доля каонов в пучке $\sim 6\%$
- Элементы триггера: KTAG, (идентиф. каона), RICH, MUV (мюонное вето), STRAW, LKr (калориметр), LAV (фотонное вето), CHOD (годоскоп)
- Калориметры: CHANTI, LAV, SAV, SAC, LKr
- Трековая система: GTK, STRAW

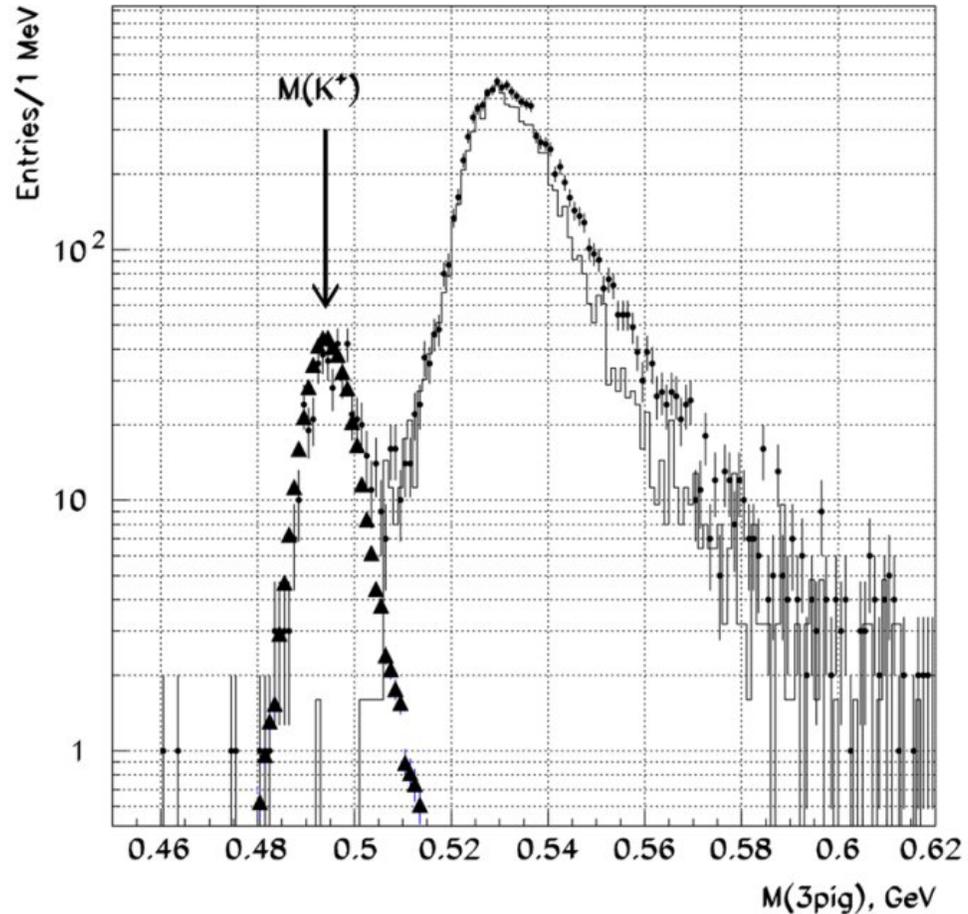
Число событий в области сигнала: **22545**



E_γ^* [MeV]	$\mathcal{B}_{NA62}(E_\gamma^*)$
10–20	$(4.22 \pm 0.05) \cdot 10^{-5}$
20–30	$(1.42 \pm 0.02) \cdot 10^{-5}$
30–40	$(4.86 \pm 0.09) \cdot 10^{-6}$
40–50	$(1.53 \pm 0.05) \cdot 10^{-6}$
50–60	$(2.80 \pm 0.31) \cdot 10^{-7}$
10–60	$(6.30 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$
30–60	$(6.66 \pm 0.10) \cdot 10^{-6}$

● $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$
● $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$
● Экспериментальные данные

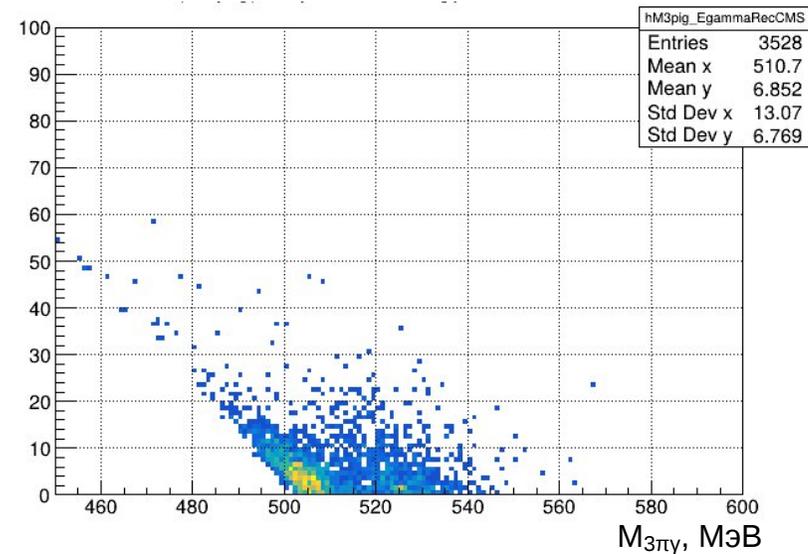
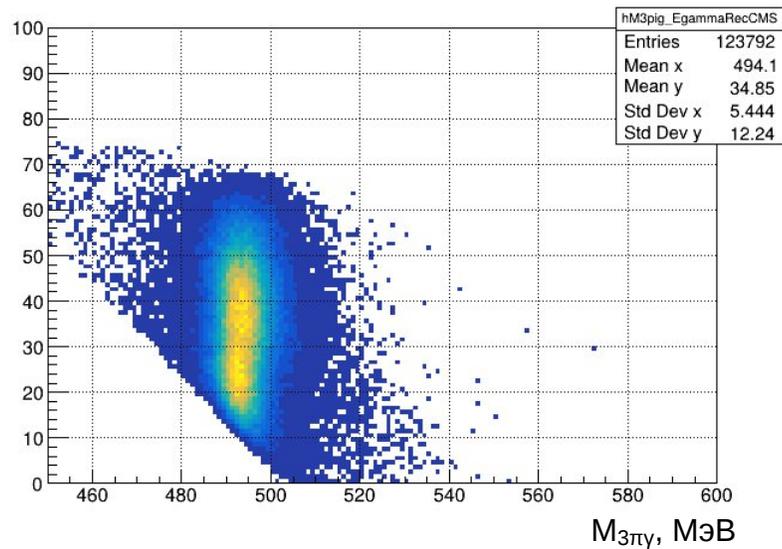
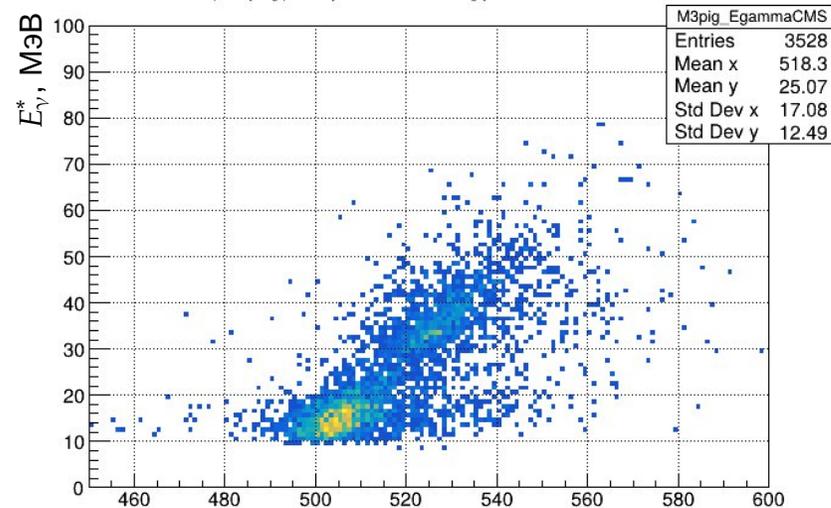
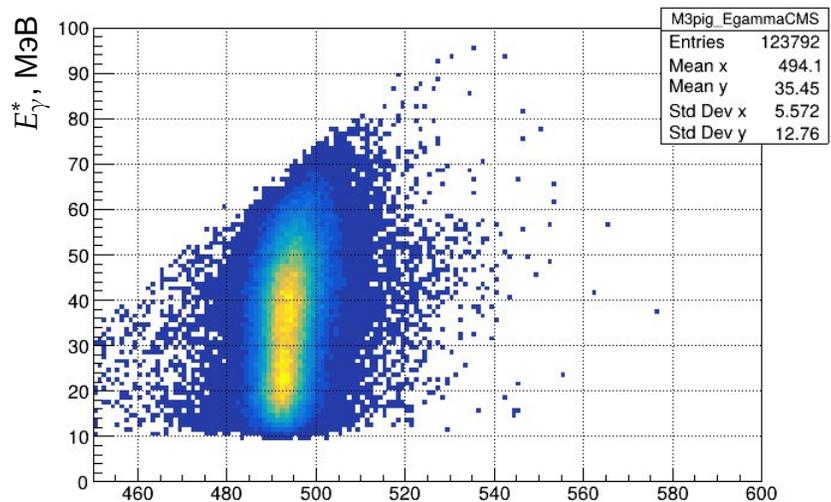
Спасибо за внимание!



Eur. Phys. J. C (2019) **79**: 296

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6797-1>

Fig. 4 The invariant mass distribution of the $3\pi\gamma$ system for the data (black circles), main sources of background (histogram) and the MC signal (black triangles)



MC($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$)

MC($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$)

