



## Новые результаты по распадам каонов в эксперименте ОКА

В.Ф. Образцов, ИФВЭ НИЦ "КИ"

эксперимент «ОКА» (ИФВЭ, ИЯИ РАН, ОИЯИ)

“ Физика частиц при средних и высоких энергиях”, Протвино,

02.06-05.06 2026

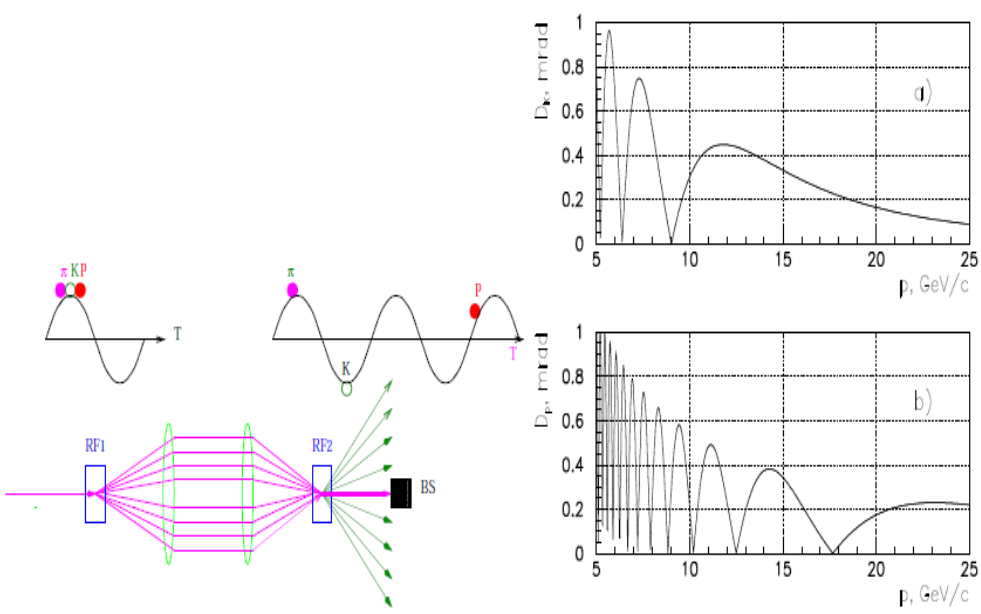
- ОКА пучок, детектор, данные
- Поиск темных фотонов в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}$
- Новое исследование распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$  проверка  $\chi$ РТ
- Новое исследование распада  $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0 \gamma$  в докладе А.В. Кулика



# ОКА: Эксперимент с ВЧ-сепарированным $K^\pm$ пучком на У-70 ИФВЭ-ИЯИ-ОИЯИ



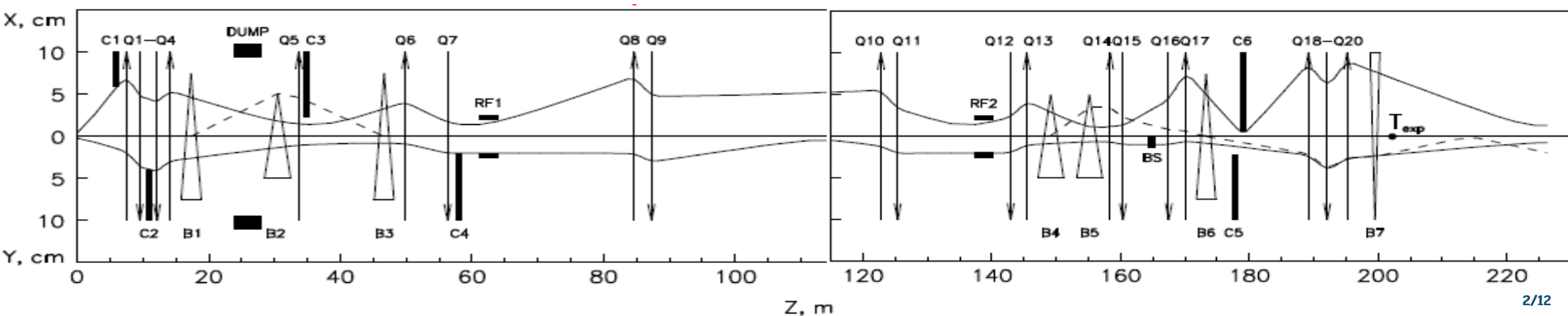
ВЧ- сепарация по схеме Панофского. Использует дефлекторы Карсруе-ЦЕРН.  
 В ИФВЭ создана криогенная система, обеспечивающая охлаждение резонаторов сверхтекучим Не.



Параметры сверхпроводящих дефлекторов

Рабочая частота,(S-band)	2865 MHz
Длина волны, $\lambda$	$\sim 10.5$ см
Длина дефлектора	2.74 м
Число ячеек/дефлектор	104
Среднее поле	$\sim 1(0.6)$ МВ/м
Рабочая температура	1.8 К

Импульс протонного пучка	50-60 ГэВ
Интенсивность p пучка	$7 \times 10^{12}$ ppp
Импульс вторичного пучка	12.5, 17.7 ГэВ
Длина канала	$\sim 200$ м
Интенсивность $K^+$ в конце канала	$\sim 0.4 \times 10^6$
$K^+$ в пучке	12.5 - 18 %







# Канал 21К, Установка «ОКА»



RF1 дефлектор в канале



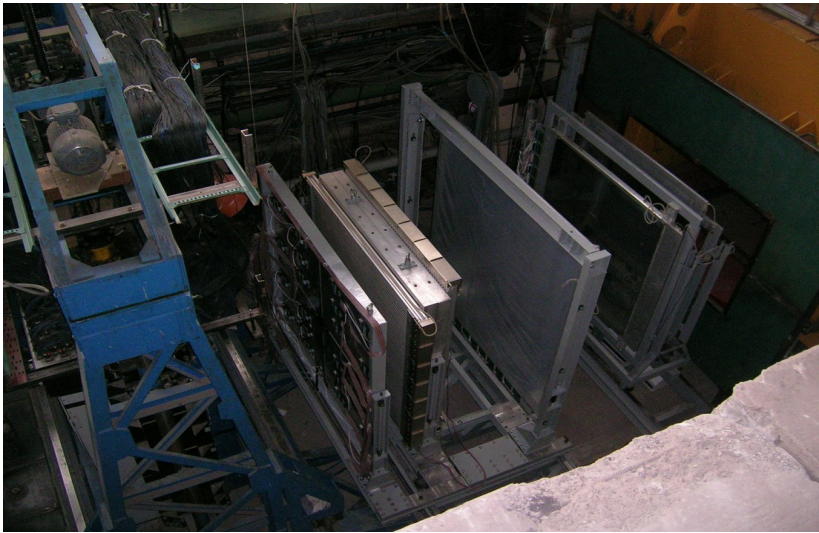
“Хвост” канала



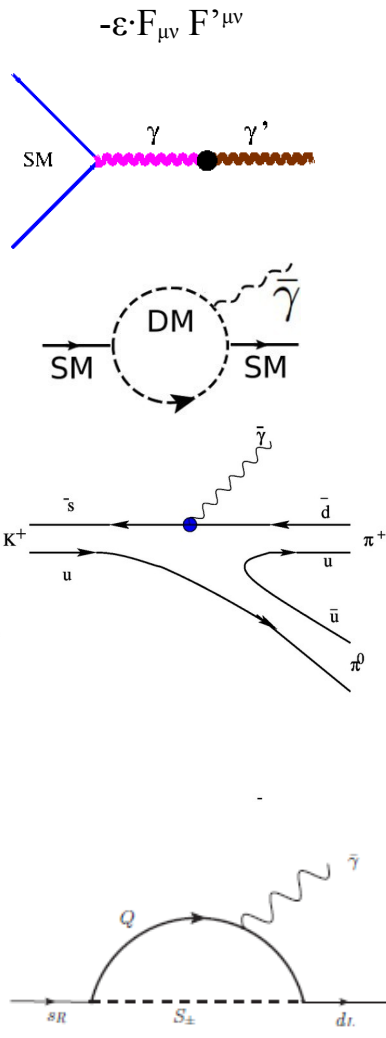
Охранная система распадного объема



Общий вид установки ОКА



Straw и ДТ камеры, матричный годоскоп, электромагнитный калориметр ГАМС-2000



## Мотивация

Астрономические наблюдения (Ф.Цвикки- 1933, В.Рубин-1970)  $\rightarrow$  Темная материя  $\rightarrow U(1)_D \rightarrow \gamma'$ . Если  $U(1)_D$  нарушена  $\gamma'$  имеет массу и смешивается с  $\gamma \sim \epsilon \cdot F_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} \rightarrow$  связь с SM током  $\sim \epsilon q$ , много экспериментов, ограничения на плоскости  $(m_{\gamma'}, \epsilon)$ .

Если  $U(1)_D$  не нарушена, связь с SM только через петли, экспериментов мало.

Перспективным является поиск  $\bar{\gamma}$  через связь с FCNC  $ds\bar{\gamma}$

Отсюда естественным образом приходим к распаду  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}$  другая возможность- распады гиперонов. Общий вид Лагранжиана:

$$L_{ds\bar{\gamma}} = -\bar{d}(C + \gamma_5 C_5)\sigma^{\mu\nu} s\bar{F}_{\mu\nu} + H.c., \quad [C] = M^{-1}$$

В рамках  $\chi$ РТ получается матричный элемент, который мы спользуем в МК:

$$|M_{K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}}|^2 = -64a_T^2/F_\pi^2 [m_{\pi^+}^2 (p_{\pi^0} p_\gamma)^2 + m_{\pi^0}^2 (p_{\pi^-} p_\gamma)^2 - 2(p_{\pi^-} p_{\pi^0})(p_{\pi^-} p_\gamma)(p_{\pi^0} p_\gamma)] (|C|^2 + |C_5|^2)$$

$a_T = 0.658 \text{ GeV}^{-1}$  вычисляется в КХД на решетках  $C, C_5 [\text{GeV}^{-1}]$

Есть конкретные модели с мессенджерами  $S_\pm$ , темными кварками  $Q$ . Параметры модели:

$$\Lambda, \xi = g_L g_R / 2, \alpha_D = e_D^2 / 4\pi, \quad \Delta M^{\text{exp}} = 3.484 \times 10^{-15} \text{ ГэВ}$$

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) \sim 1.3 \alpha_D \xi^2 / \Lambda^2 \quad \text{Модель также дает вклад в } \Delta M_K = 8.47 \times 10^{-13} \xi^2 / \Lambda^2$$

на  $\alpha_D, \Lambda$  есть ограничения из космологических данных  $\rightarrow \alpha_D \sim 0.1, \Lambda \sim 10 \text{ ТэВ} \rightarrow$

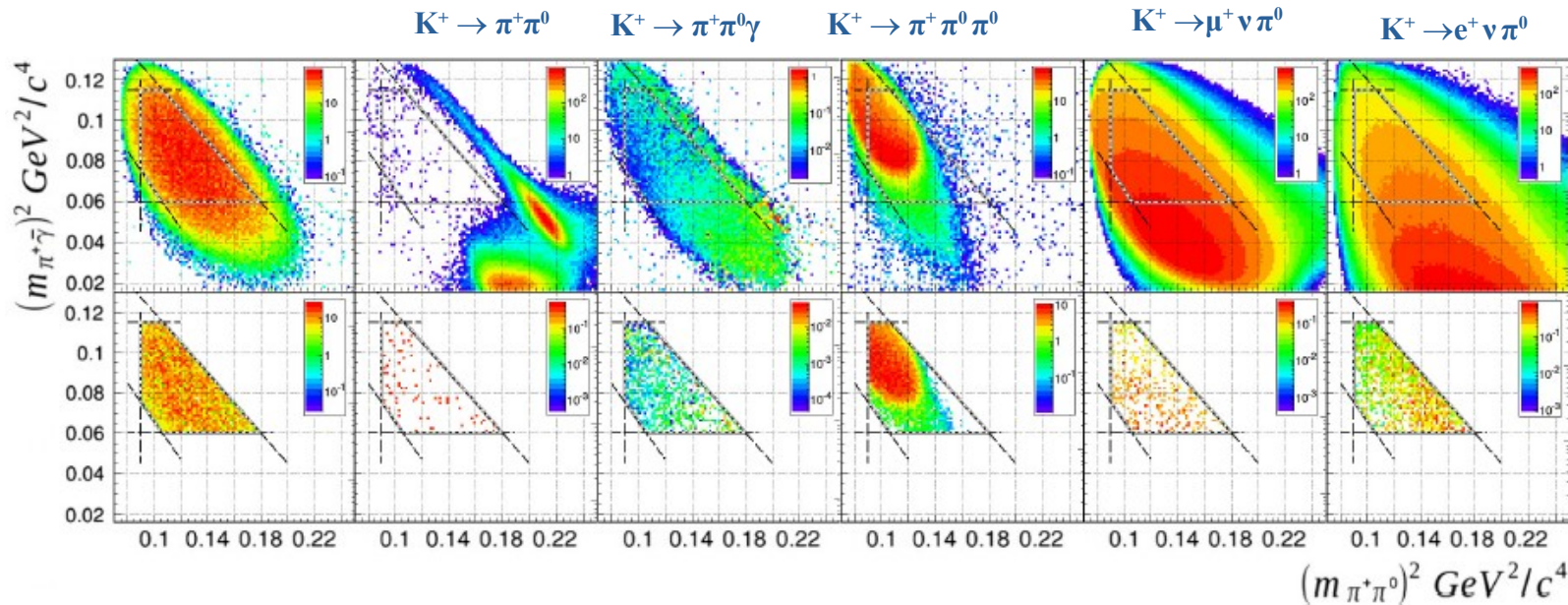
$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) < 1.6 \times 10^{-7}$$

## 1<sup>ая</sup> группа отборов – выделение $\pi^+\pi^0$

- Угол между  $K^+$  и вторичным треком  $\theta > 4$  мрад, вершина внутри DV,  $CDA < 1.25$  см,  $17.0 < p_{beam} < 18.6$  ГэВ
- Нет дополнительных сегментов трека после магнита SM
- Число ливней не ассоциированных с треком = 2;  $\pi^0$  - идентификация  $E_\gamma > 0.3$  GeV  $|m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0}| < 15$  MeV
- Если после этих отборов потребовать  $E_{mis} = E_{K^+} - E_{\pi^+} - E_{\pi^0} < 2.8$  GeV  $\sim 3 \times 10^7 K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$  (нормировка)

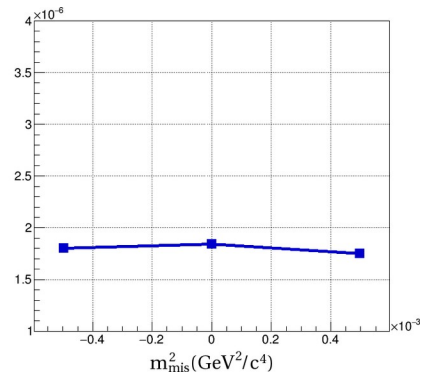
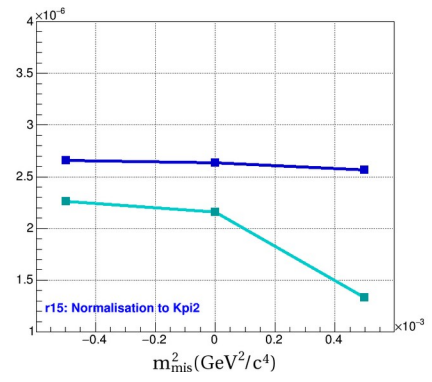
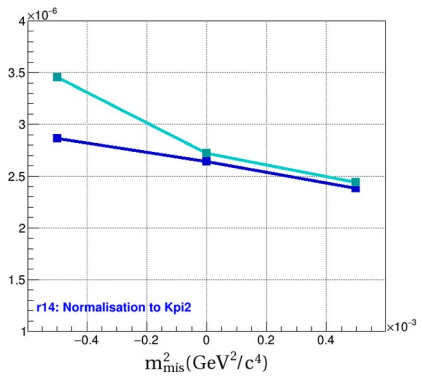
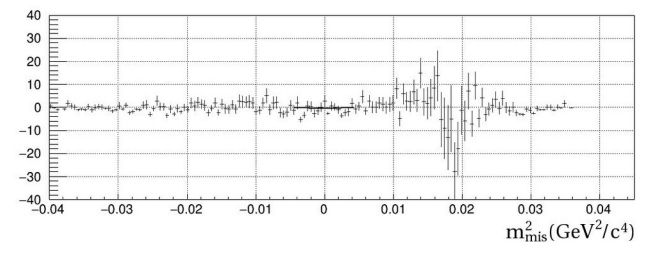
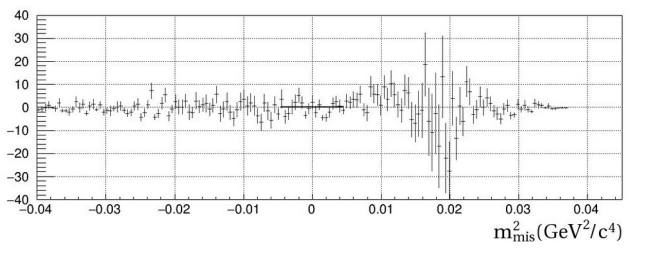
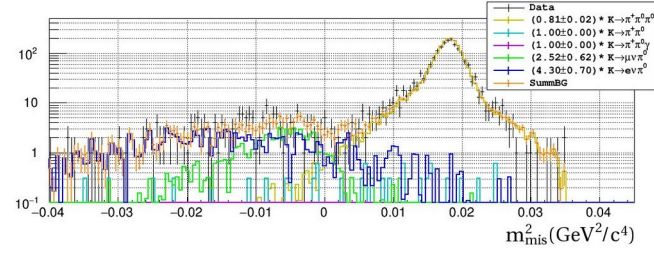
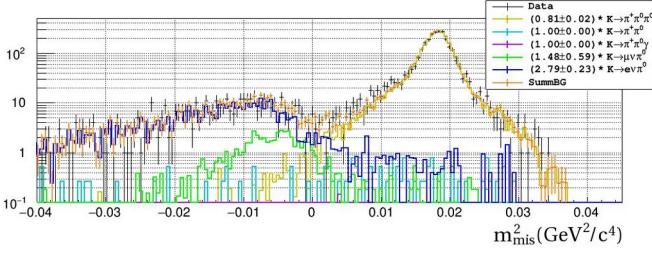
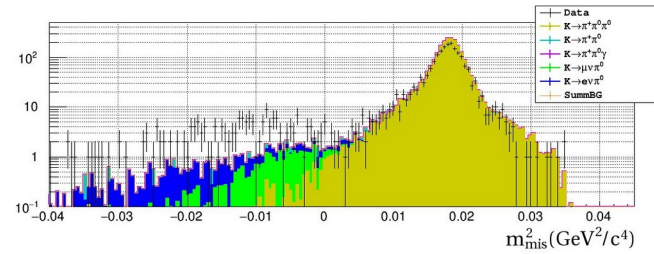
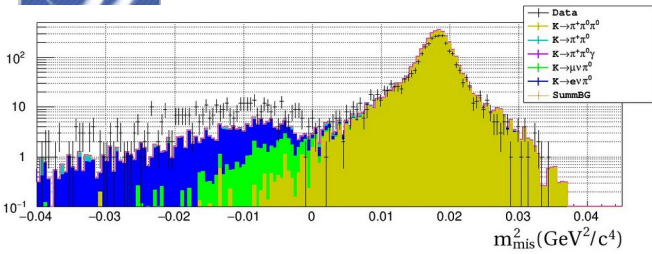
## 2<sup>ая</sup> группа отборов для подавления фонов

- $E_{mis} = E_{K^+} - E_{\pi^+} - E_{\pi^0} > 2.7$  GeV для подавления  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$
- Отбор по Далиц-плоту ( $m^2_{\pi^+\pi^0}$ ,  $m^2_{\pi^+\gamma}$ )
- Нет сигнала в  $\mu C$  для подавления  $K^+ \rightarrow \mu^+\nu\pi^0$
- $E/p \leq 0.65$  E- энергия ливня, асс. с треком, для подавления  $K^+ \rightarrow e^+\nu\pi^0$
- $\chi^2_{em} > 0.4$  качество фита кластера формой электромагнитного ливня
- $\Sigma E_{GS} < 100$  МэВ энергии в охранной системе,  $E_{BGD} < 200$  МэВ против  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$
- направление  $\vec{p}_{mis}$  пересекает аппертуру ГАМС





# Поиск $U(1)_D$ темного фотона в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}$



$$m_\gamma^2 = m_{\text{mis}}^2 = (p_{K^+} - p_{\pi^+} - p_{\pi^0})^2$$

ML-фит или Feldman-Cousins  
 $N_{UL} = \max(N_\gamma, 0) + 1.28 \cdot \sigma_{N_\gamma}$

	run14	run15
$\epsilon_{K\pi 2}$	3.1%	3.3%
$N_{K\pi 2}$	$4.1 \times 10^6$	$2.7 \times 10^6$
$\epsilon_\gamma$	0.67%	0.72%
$\sigma_\gamma, \text{GeV}^2$	$2.4 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) = \text{Br}(K\pi 2) \times (N_\gamma / \epsilon_\gamma) \times \epsilon_{K\pi 2} / N_{K\pi 2}$$

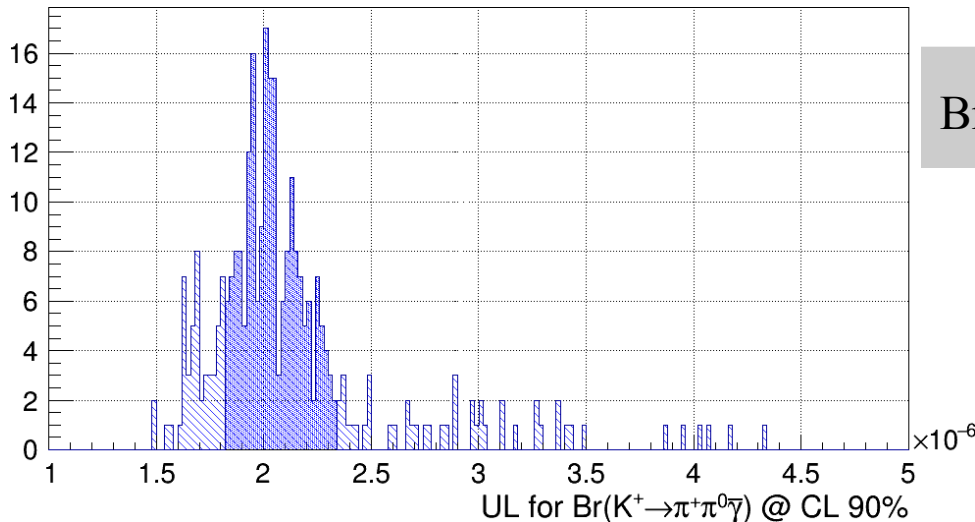
$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) < 1.8 \times 10^{-6}$  90% CL



## Учёт систематических ошибок

- Систематическая ошибка в  $\epsilon_\gamma \sim 5\%$
- Систематическая ошибка в отношении  $\epsilon_{K\pi^2} / N_{K\pi^2} \sim 3.5\%$
- Вариация брэнчинга при использовании нормировок на  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  и  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$  (с потерянными  $\pi^0$ , который детектируется по недостающей массе)  $\sim 11\%$
- Систематическая ошибка, связанная с отборами для подавления фона. Для оценки этой ошибки мы повторили 100 полных анализов, в которых параметры всех отборов одновременно менялись случайным образом в пределах  $\pm\sigma$  вокруг исходного значения (здесь  $\sigma$ - это или разрешение переменной, известное из МК, или  $\sim 15\%$  если оценка затруднена)

Наиболее вероятная величина распределения дает окончательный верхний предел, а систематическая ошибка оценивается путем отбрасывания 15% событий на хвостах



$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) < 2.0_{-0.3}^{+0.4} \text{ (сист.)} \times 10^{-6}$$



$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) < 2.0_{-0.3}^{+0.4} \text{ (сист.)} \times 10^{-6}$$

## Сравнение с другими экспериментами

Полученный верхний предел слабее, чем в теор. модели Phys. Rev. Lett. 119(3), 031801 (2017)

$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) < 1.6 \times 10^{-7}, \quad \text{но находится на уровне других эксп. данных:}$$

В работе Eur. Phys. J. C 80(9), 824 (2020) получена связь Br распадов каонов и гиперонов, идущих за

$$\text{счет } s \rightarrow d \bar{\gamma} \text{ с } L_{\text{dsy}} = -\bar{d}(\mathbf{C} + \gamma_5 \mathbf{C}_5) \sigma^{\mu\nu} s \bar{F}_{\mu\nu} : Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) = 1.12 \times 10^{10} (|\mathbf{C}|^2 + |\mathbf{C}_5|^2) \rightarrow$$

$$|\mathbf{C}|^2 + |\mathbf{C}_5|^2 < 1.7 \times 10^{-16} \text{ GeV}^{-2}$$

Предел на  $|\mathbf{C}|^2 + |\mathbf{C}_5|^2$  можно сравнить с результатами из других экспериментов:  $\Sigma^+ \rightarrow p \bar{\gamma}$ ,  $K_L \rightarrow \gamma \bar{\gamma}$  :

BESIII на VEPCII провела поиск  $\bar{\gamma}$  в распаде  $\Sigma^+ \rightarrow p + \text{invisible}$ .  $\sim 10^{10} J/\psi$ ,  $J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$  и получила

$$Br(\Sigma^+ \rightarrow p + \bar{\gamma}) < 3.8 \times 10^{-5} \rightarrow |\mathbf{C}|^2 + |\mathbf{C}_5|^2 < 2.1 \times 10^{-16} \text{ GeV}^{-2} \quad \text{Phys.Lett.B 852 (2024) 138614}$$

KOTO на нейтральном пучке JPARC провела поиск  $K_L \rightarrow \gamma \bar{\gamma}$  и получила  $Br(K_L \rightarrow \gamma \bar{\gamma}) < 3.47 \times 10^{-7}$

$$(\text{ReC})^2 + (\text{ImC}_5)^2 < 6 \times 10^{-20} \text{ GeV}^{-2}$$

PoS ICHEP2024(2025), 292

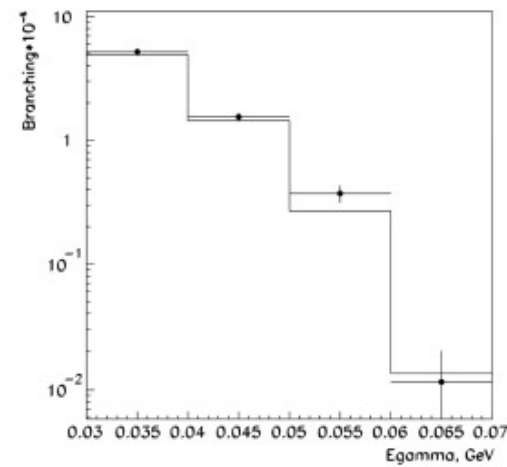
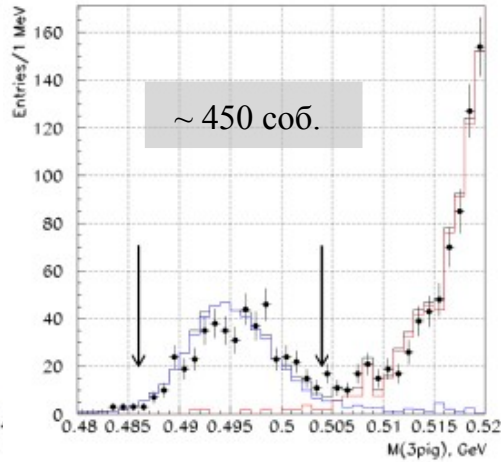
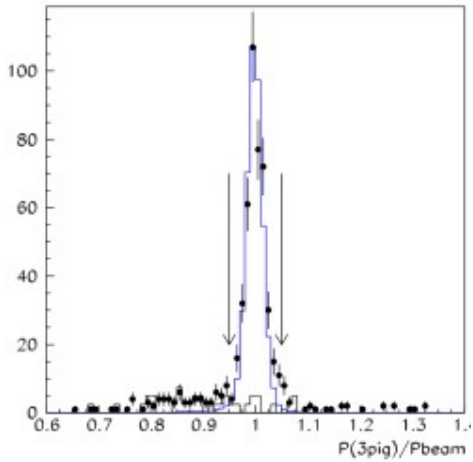


# Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$

G. D'Ambrosio, G. Ecker, G. Isidori, H. Neufeld “The present experimental status of  $K3\pi$  decays is rather meager”  
 $\chi$ PT  $O(p^4)$  “generalized bremsstrahlung”

Распад  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$  был обнаружен в ИТЭФ В.В. Бармин и др., ЯФ 50(1989)679-682  
7 соб.  $E_\gamma^* \sim 5-10$  МэВ, измерен Br.

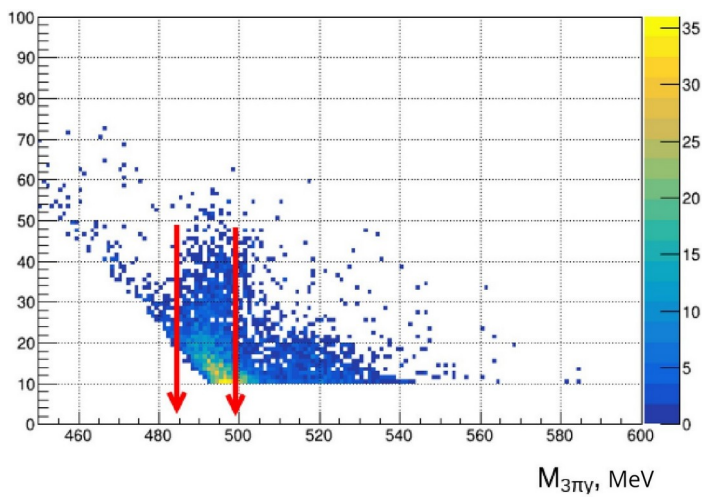
ОКА существенный шаг вперед Eur.Phys.J. C79 (2019) no.4, 296



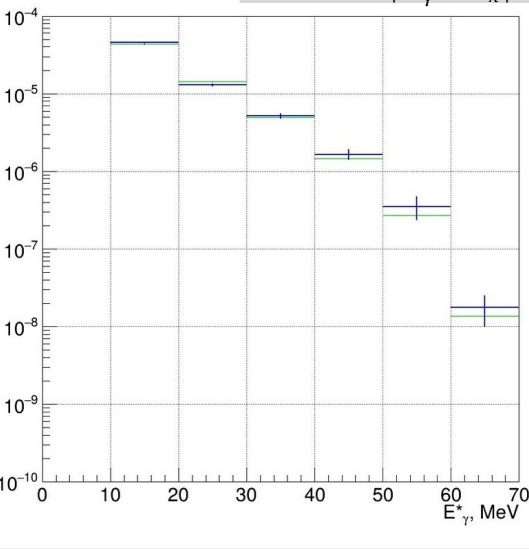
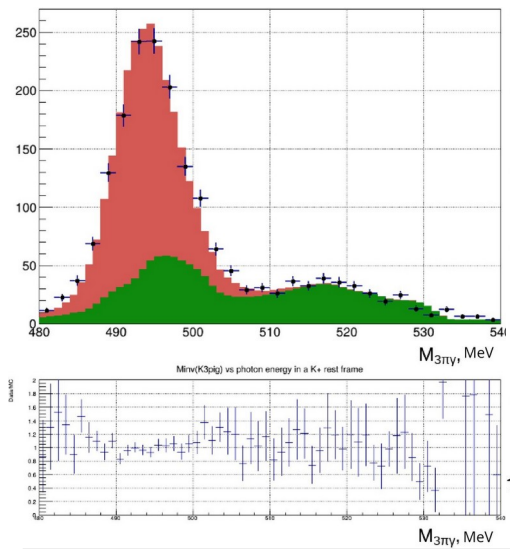
Нормировка на  $N(K \rightarrow 3\pi) \sim 20M$   
 $Br(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma) = (7.1 \pm 0.4_{\text{стат}} \pm 0.3_{\text{сист}}) \cdot 10^{-6}$   $E_\gamma^* > 30$  МэВ  
 $\chi$ PT  $O(p^4)$   $6.65 \cdot 10^{-6}$   
Eur.Phys.J. C79 (2019) no.4, 296



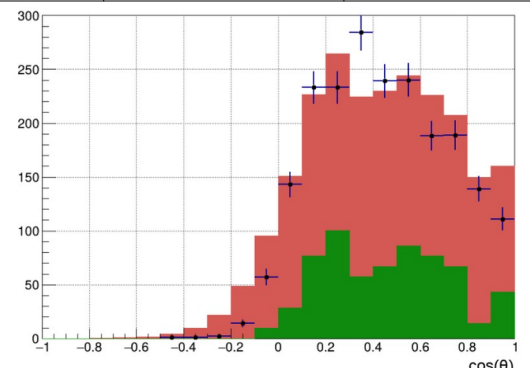
# Новое исследование распада $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$



- ### Отбор событий
- 1 пучковый  $K^+$  трек, 3 вторичных трека, суммарный заряд +1
  - Вершина распада внутри DV,  $CDA < 1\text{ см}$ .
  - $M_{\text{mis}}^2(\pi^+) = (P_{K^+} - P_{\pi^+})^2 > 0.07 \text{ ГэВ}^2$  Давит  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$
  - $E/p < 0.9$
  - 1 э.м. ливень в ГАМС с  $E > 0.5 \text{ ГэВ}$  не асоц. с треком
  - $\chi^2 > 0.4$  для фита кластера формой э.м. ливня
  - $0.95 < P_{3\pi\gamma}/P_{K^+} < 1.05$   $P_t^2(3\pi\gamma) < 0.001 \text{ ГэВ}^2$
- ### Отборы для подавления фона от $K_{3\pi}$
- $M_{\pi\gamma} < 0.15 \text{ ГэВ}$
  - $\Delta P = |\vec{p}_K| - |\vec{p}_{3\pi\gamma}| > 0$  для  $E_\gamma < 30 \text{ МэВ}$
  - $\Delta R = |\vec{R}_\gamma - \vec{R}_\pi| < 30\text{-}70 \text{ мм}$  для  $E_\gamma (30\text{-}10) \text{ МэВ}$



$E_\gamma^*, \text{ MeV}$	$BR(3\pi\gamma)$	Theory
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	$(1.76 \pm 0.77) \cdot 10^{-8}$	$(1.36 \pm 0.02) \cdot 10^{-8}$



2269 соб.      Нормировка на  $N(K \rightarrow 3\pi) \sim 20M$   
 $Br(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma) = (6.36 \pm 0.14_{\text{стат}} \pm 0.28_{\text{сист}}) \cdot 10^{-5} \quad E_\gamma^* > 10\text{ МэВ}$   
 $\chi_{PT} O(p^4)$        $(6.46 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$



# Заключение



- ✓ Проведен поиск калибровочного  $U(1)_D$  темного фотона в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}$ .  
Получен верхний предел на относительную вероятность распада:

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\gamma}) < 2.0_{-0.3}^{+0.4} \text{ (сист.)} \times 10^{-6}$$

Отсюда получен предел на константы  $C$  и  $C_5$  Лагранжиана  $L_{ds\gamma} = -\bar{d}(C + \gamma_5 C_5)\sigma^{\mu\nu} s\bar{F}_{\mu\nu}$ :

$$|C|^2 + |C_5|^2 < 1.7 \times 10^{-16} \text{ GeV}^{-2}$$

Проведено сравнение этого ограничения с результатами, полученными из поиска распадов

$\Sigma^+ \rightarrow p \bar{\gamma}$  на установке BES-III ВЕРСИИ и распада  $K_L \rightarrow \gamma \bar{\gamma}$  на установке КОТО JPARC

- ✓ Продолжено исследование распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$ . Зарегистрировано  $\sim 2300$  соб. с  $E_\gamma^* > 10$  МэВ.  
Измерена относительная вероятность:

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma) = (6.36 \pm 0.14_{\text{стат}} \pm 0.28_{\text{сист}}) \cdot 10^{-5} \quad E_\gamma^* > 10 \text{ МэВ}$$

Что можно сравнить с предсказаниями  $\text{Br}(\chi\text{PT } O(p^4)) = (6.46 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$

Получены дифференциальные спектры по  $E_\gamma^*$  и  $\cos(\theta_{\pi\gamma}^*)$

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-12-0051-П