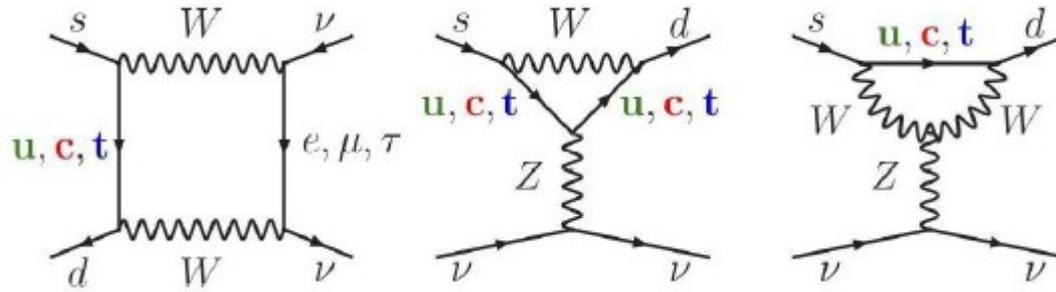


# Новые результаты по физике каонов

В.Ф. Образцов, “НИЦ КИ” - ИФВЭ, Протвино  
Рубаков-70, РАН, Москва, 19 Февраля 2025

- Исследование супер-редких распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}\nu$ ,  $K_L \rightarrow \pi^0 \bar{\nu}\nu$  ( NA62, KOTO)
- Поиски ALP в распадах каонов ( NA62, KOTO, OKA )

# Распады $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ (мотивация)



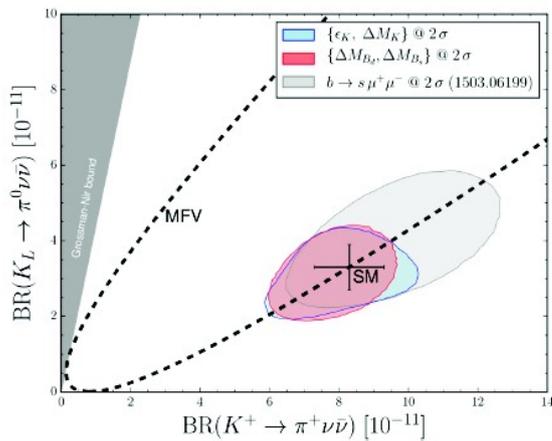
FCNC – процесс, подавлен GIM,  $A \sim m_W/m_t \cdot V_{ts}^* \cdot V_{td}$ ; Очень точно вычисляется в СМ:  $r \sim 1/m_t, 1/m_Z$ ,  $\langle \pi | H | K \rangle$  нормируется на  $Br(K_{e3})$ ; точность определяется эксп. данными по элементам СКМ

Mode	SM Branching Ratio [1]	SM Branching Ratio [2]
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	$(8.60 \pm 0.42) \times 10^{-11}$	$(7.86 \pm 0.61) \times 10^{-11}$
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$(2.94 \pm 0.15) \times 10^{-11}$	$(2.68 \pm 0.30) \times 10^{-11}$

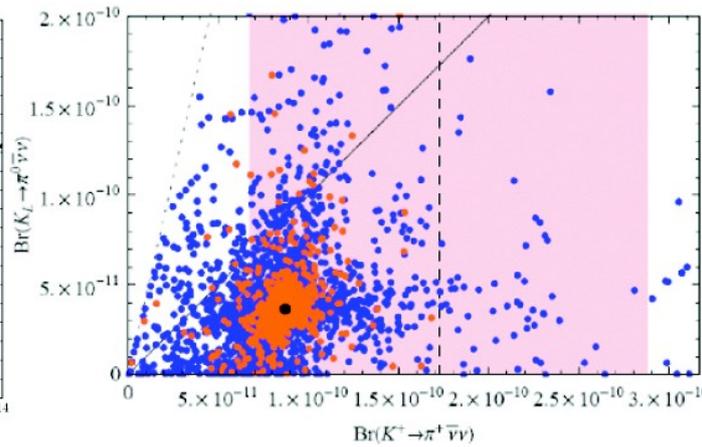
[1] Buras et al., EPJC 82(2022)7,615  
 [2] D'Ambrosio et al., JHEP 09(2022) 148  
 5% - 8% для  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$   
 5% - 10% для  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

Чувствительны к Новой Физике

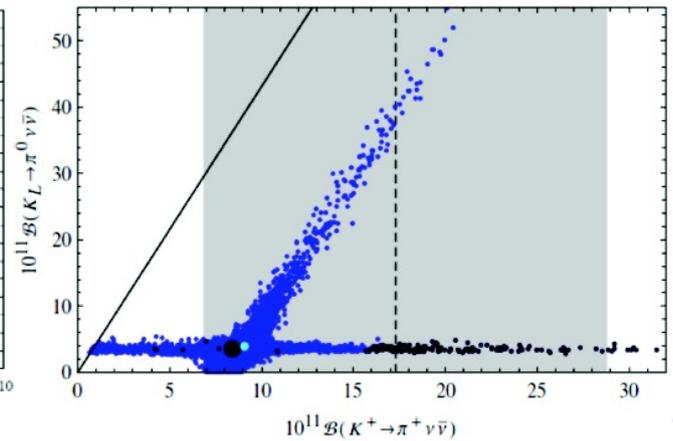
$Z'(5\text{TeV})$  in ConstrainedMFV



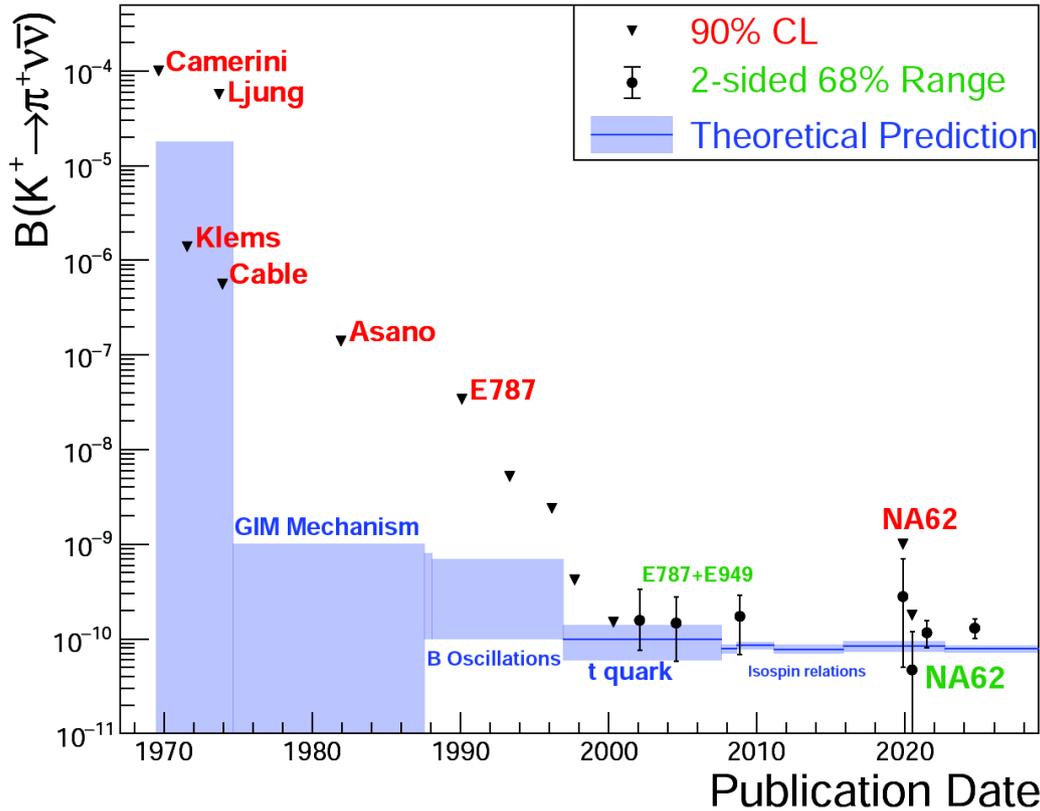
Randall – Sundrum



LittlestHiggs



# Распады $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ (экспериментальный статус)



Состояние на ~ 2010 год

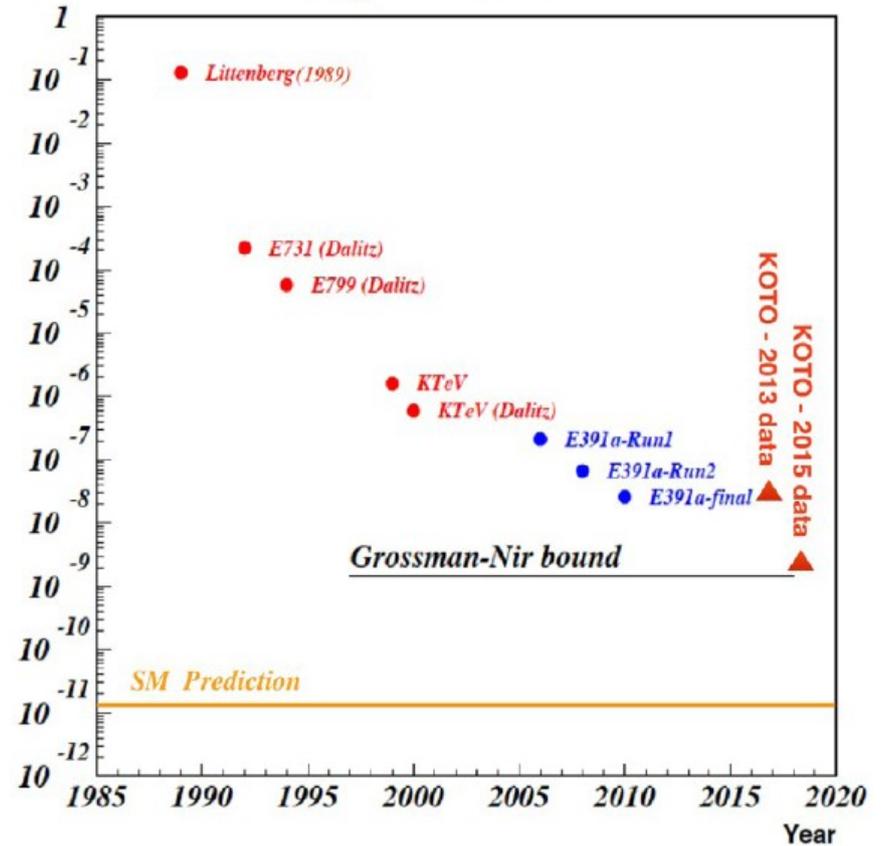
$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (1.73^{+1.15}_{-1.05}) \times 10^{-10} \quad (7 \text{ событий})$$

PRL 101 (2008) 191802

$$\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < (2.6 \times 10^{-8})$$

PRD 81, (2010) 072004

## $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$



$$\Gamma_{K^+} = \Gamma_{K_L} + \Gamma_{K_S} \rightarrow \text{Br}_{K_L} < \tau_{K_L} / \tau_{K^+} \cdot \text{Br}_{K^+} = 4.13 \cdot \text{Br}_{K^+}$$

предел Гроссмана-Нира (2010)  $\text{Br}_{K_L} < 1.6 \cdot 10^{-9}$

# Эксперимент NA62



~300 участников из 30 институтов

ОИЯИ, ИЯИ-РАН, НИЦ “КИ” - ИФВЭ

Цель- набрать  $O(100)$  событий  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$   
измерить  $Br$  с точностью  $\sim$  теоретической ( 10% )

- 2005 Предложение эксперимента
- 2010 Технический проект
- 2014-2015 Запуск установки
- 2016-2018 Первый период набора статистики  
20 событий включая  $7 \pm 1$  фоновых

$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 10.6_{-3.5}^{+4.1} \times 10^{-11}$$

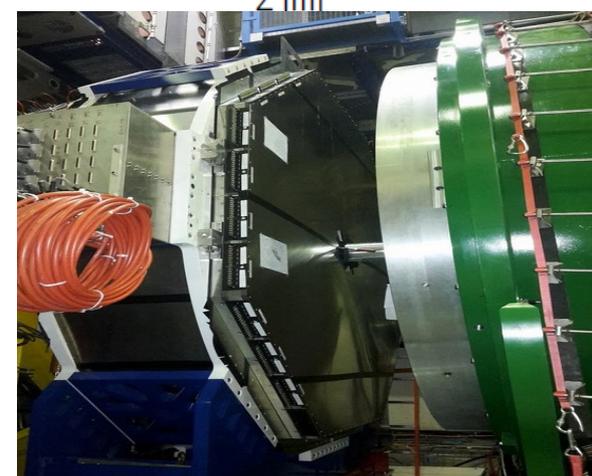
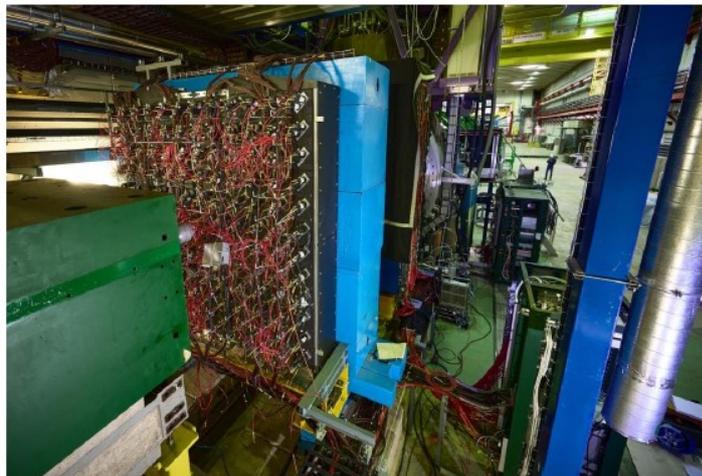
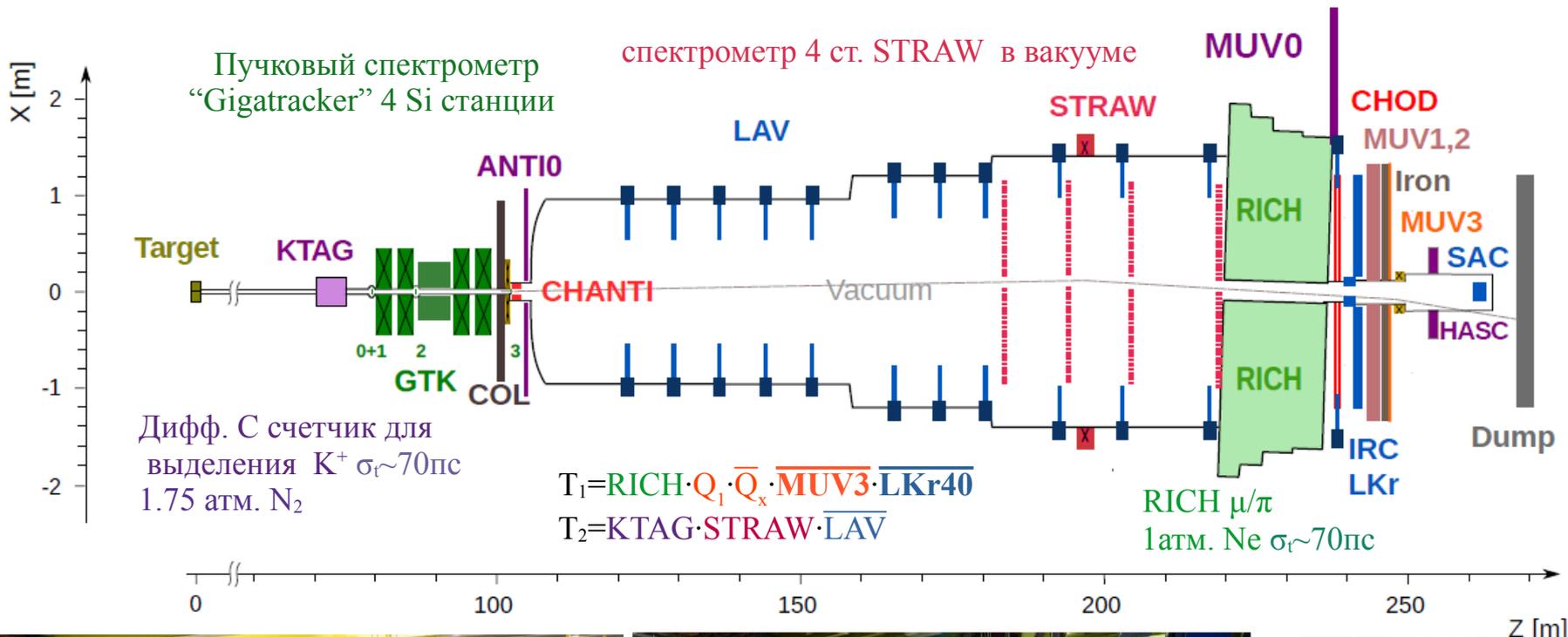
- 2021-2025(26) Второй период набора статистики

Конец 2024 г. Получен результат на статистике 2021-2022  
и суммарной статистике 2016-2022

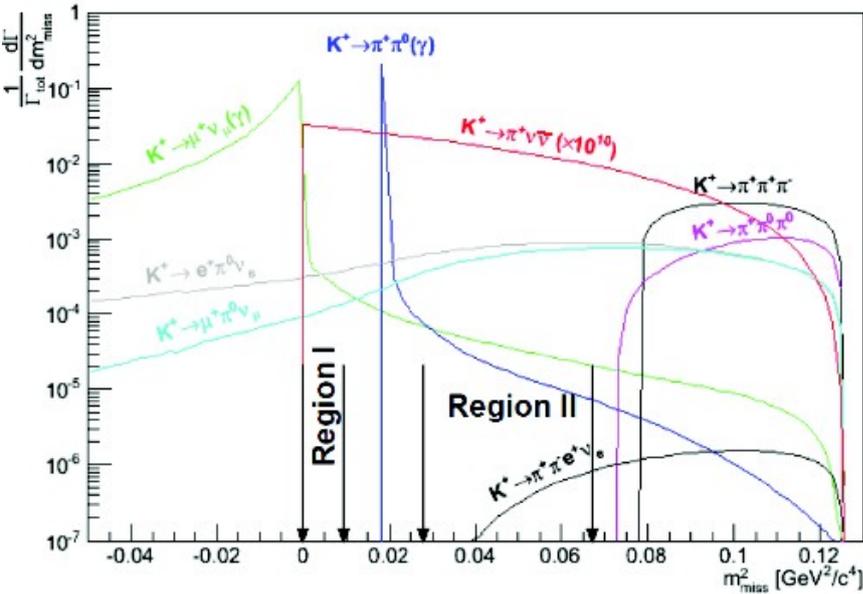
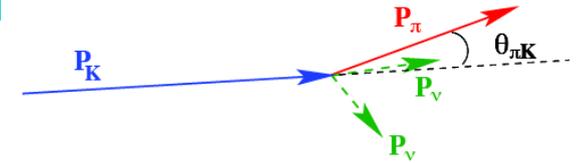
# Установка NA62

SPS p пучок 400 ГэВ/с  
 $3 \cdot 10^{12} / 4.8$  сек цикл 14.4 сек

Вторичный пучок 75 ГэВ/с,  $\Delta p/p \sim \pm 1\%$   
 $K^+ (6\%) \pi^+ (70\%) p (24\%)$  600 МГц



# Выделение сигнала, подавление фонов



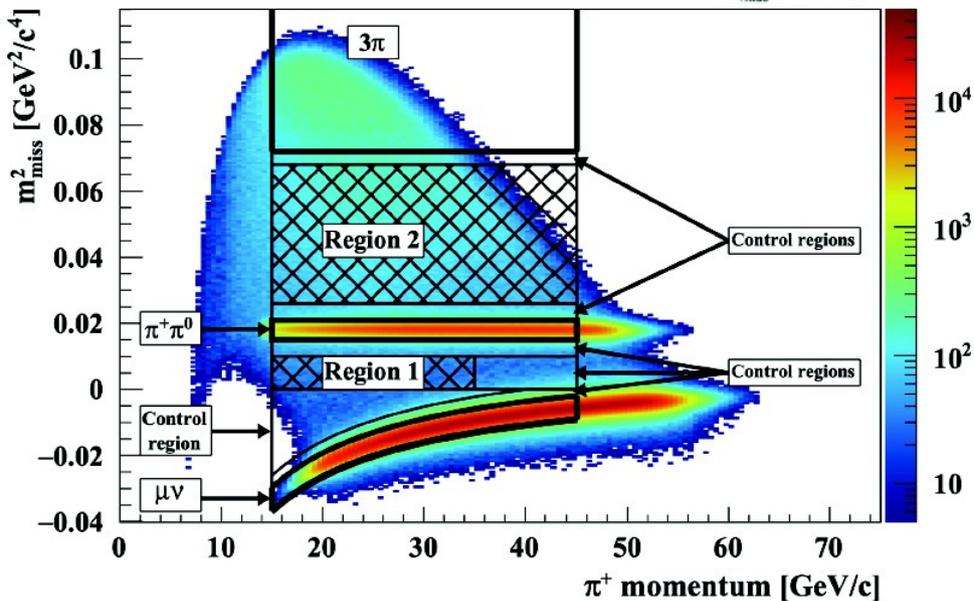
1-ая обл.  $0 < m^2_{\text{miss}} < 0.01 \text{ ГэВ}^2/\text{с}^4$

2-ая обл.  $0.026 < m^2_{\text{miss}} < 0.068 \text{ ГэВ}^2/\text{с}^4$

$m^2_{\text{miss}}$  вычисляется по STRAW – GTK, RICH – GTK  $\sigma_{\text{miss}} \sim 10^{-3} \text{ ГэВ}^2$   
 Кинематическое подавление  $10^{-3}$  ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ) и  $3 \cdot 10^{-4}$  ( $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ )

## Отбор событий

- 1 пучковый трек : КТАГ,  $72.7 < p < 77.2 \text{ ГэВ}$
- 1 вторичный трек  $15 < p < 45 \text{ ГэВ}$  .
- $\Delta t$  КТАГ, GTK, RICH  $< 500 \text{ псек}$
- $105 < Z_{\text{vertex}} < 165 \text{ м}$ ,  $CDA < 4 \text{ мм}$
- VETO: VC(2нс), CHANTI(3нс), ANTI0(3нс), LAV(3нс)
- LKr нет кластеров дальше 10 см. от  $\pi^+$
- $\pi^+$  - идентификация: RICH, MUV3, Lkr, MUV1,2
- $\epsilon(\mu) = 1.3 \cdot 10^{-8}$  при 73%  $\epsilon(\pi^+)$
- $\gamma$  - вето  $\epsilon(\pi^0) = (1.72 \pm 0.07) \cdot 10^{-8}$

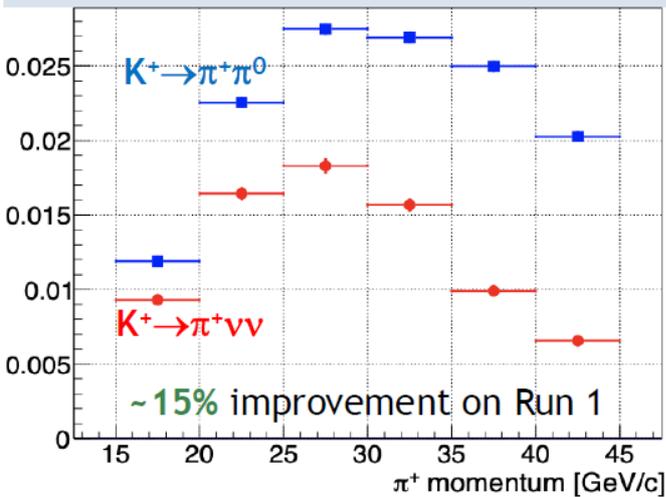


## Нормировка, эффективность

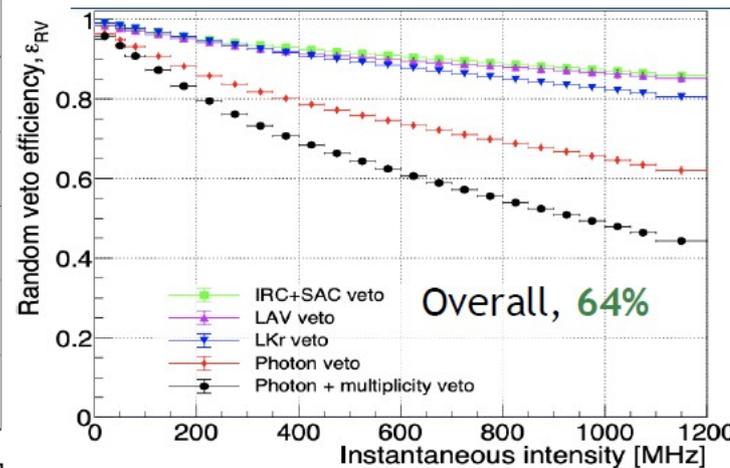
- $N_K$  из  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  набранных с контрольным триггером  
 $N_{\pi\pi} = 2.0 \times 10^8$ ,  $\epsilon_{\pi\pi} = 13.4\%$   $\rightarrow$  число распадов  $N_K = 2.9 \times 10^{12}$
  - $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  эффективность  $(7.6 \pm 0.2)\%$
  - Случайные выключения вето:  $63.6\% \pm 0.6\%$
  - Эффективность триггера  $85.9\% \pm 1.4\%$
- $SES = (0.84 \pm 0.03) \times 10^{-11}$

Ожидается  $9.9 \pm 0.34$  СМ событий

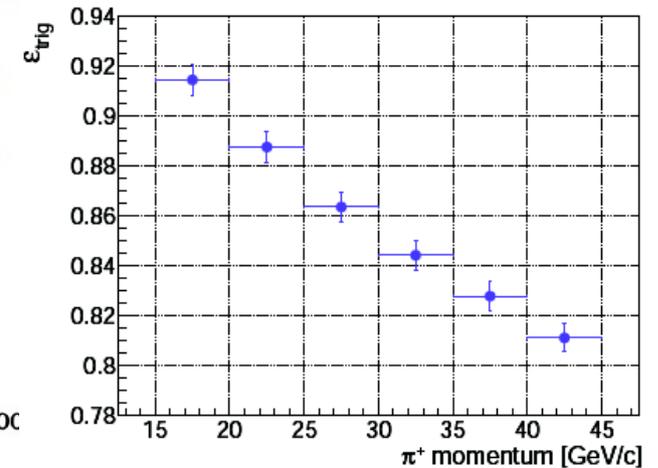
### Акцептанс $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$



### Случайные выключения



### Эффективность триггера

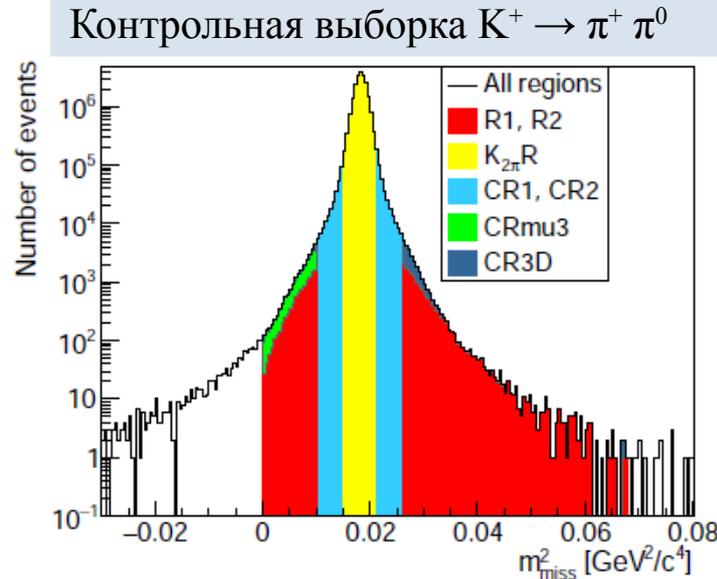
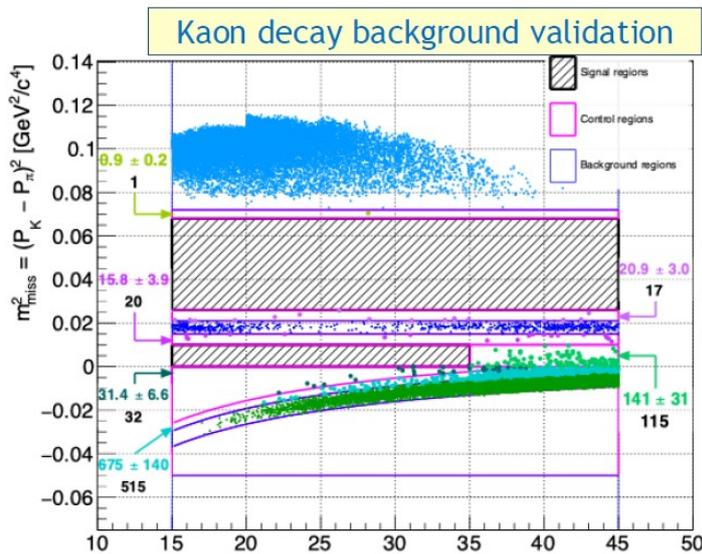
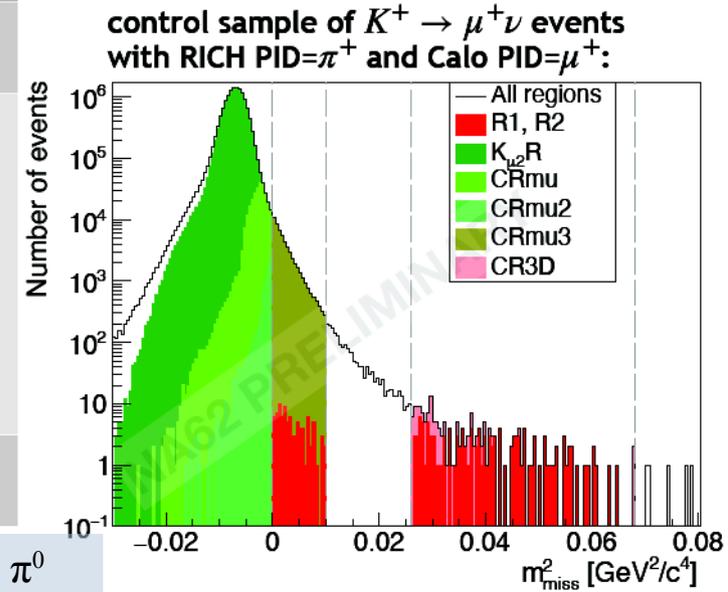


# Вычисление фонов 2021-2022 гг.

$$N_K = (13 \pm 1) \times 10^{11}$$

$$SES = (8.48 \pm 0.29) \times 10^{-12}$$

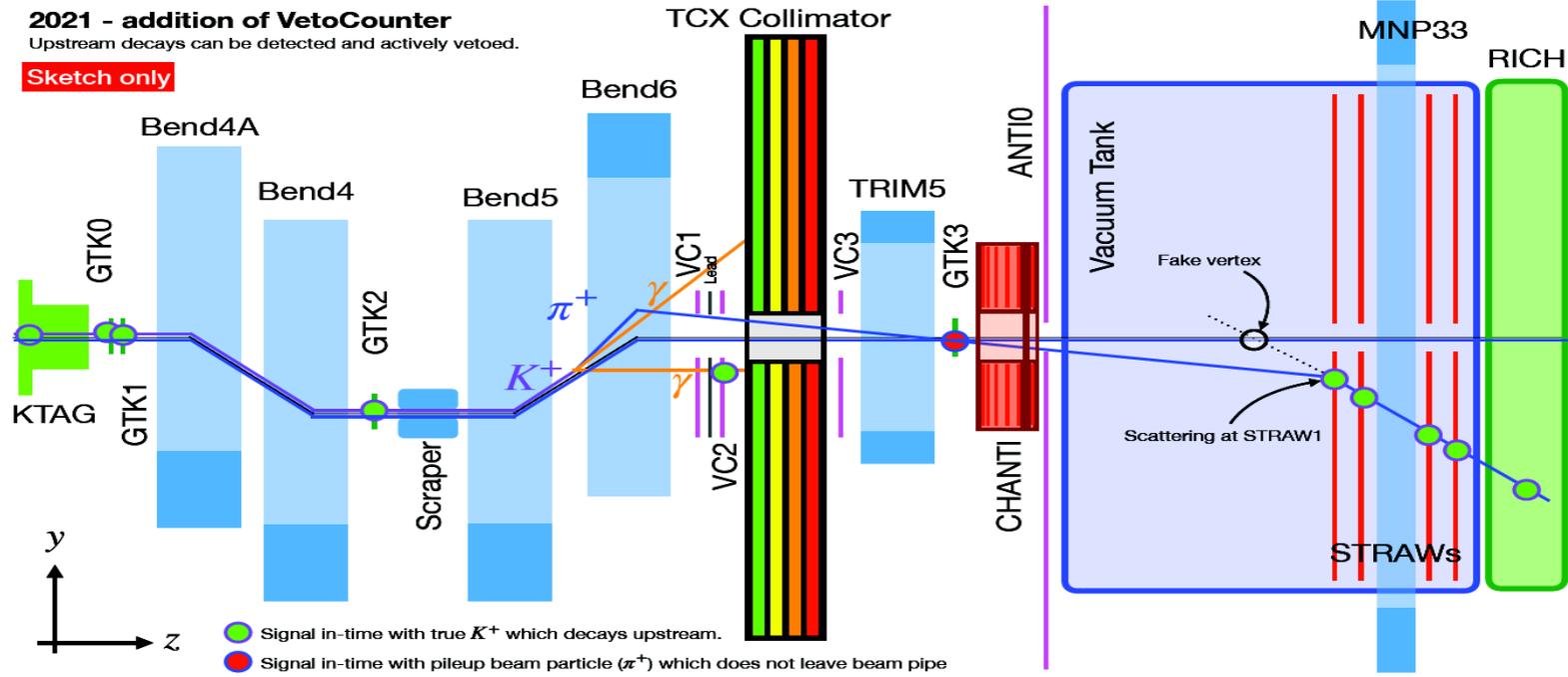
Процесс	Число событий в области сигнала
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ (CM)	$10.0 \pm 0.34$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$0.83 \pm 0.04$
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	$0.87 \pm 0.19$
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	$0.82 \pm 0.43$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$	$0.89 \pm 0.3$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$0.11 \pm 0.03$
Фон от пучка	$7.4^{+2.1}_{-1.8}$
<b>Сумма фонов</b>	<b><math>11.0^{+2.1}_{-1.9}</math></b>



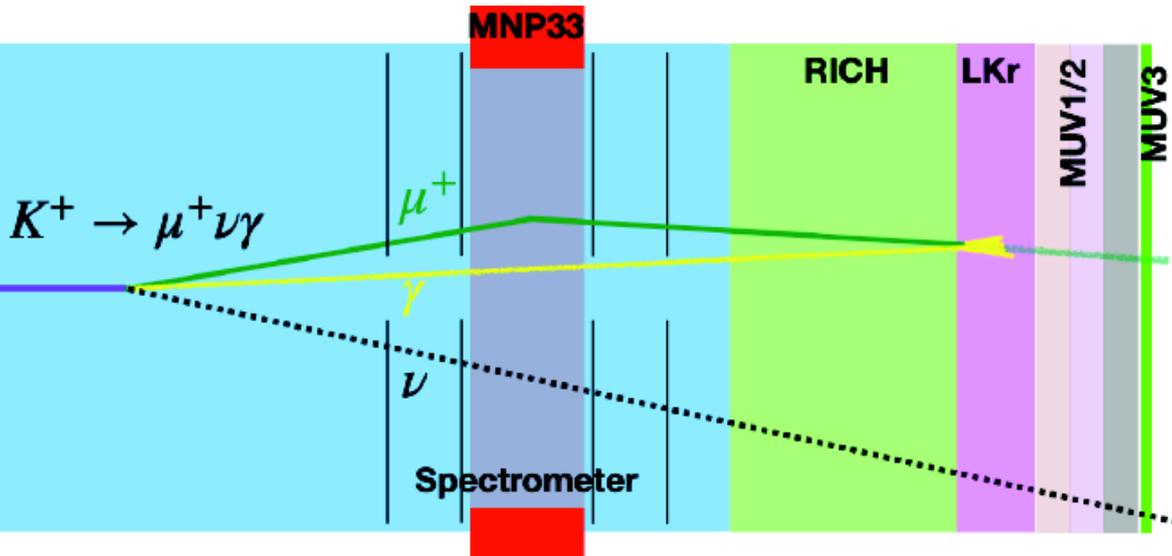
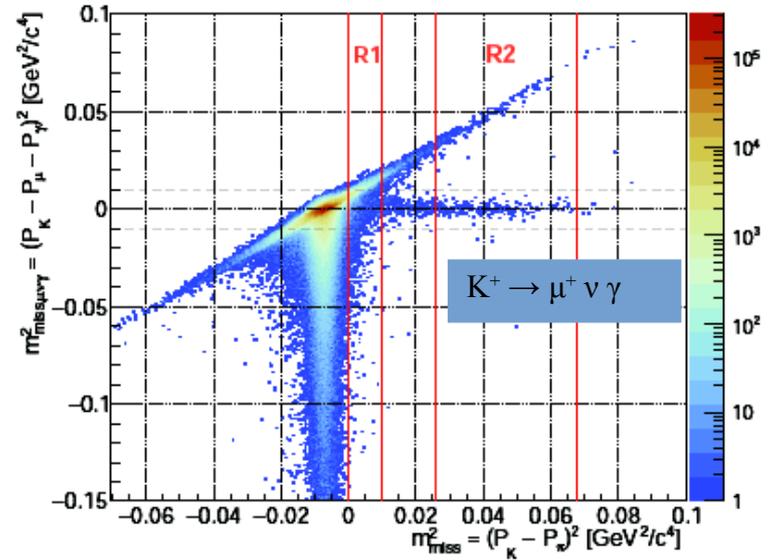
# Вычисление фонов 2021-2022 гг.

**2021 - addition of VetoCounter**  
Upstream decays can be detected and actively vetoed.

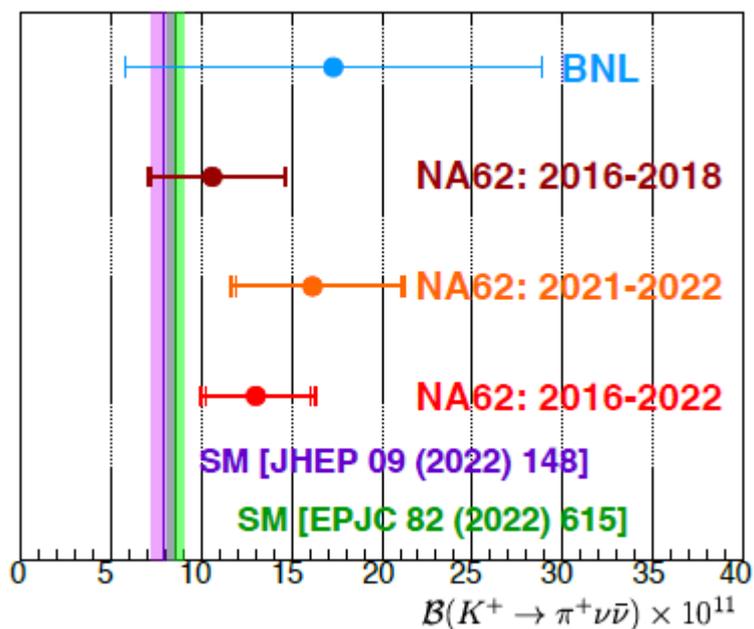
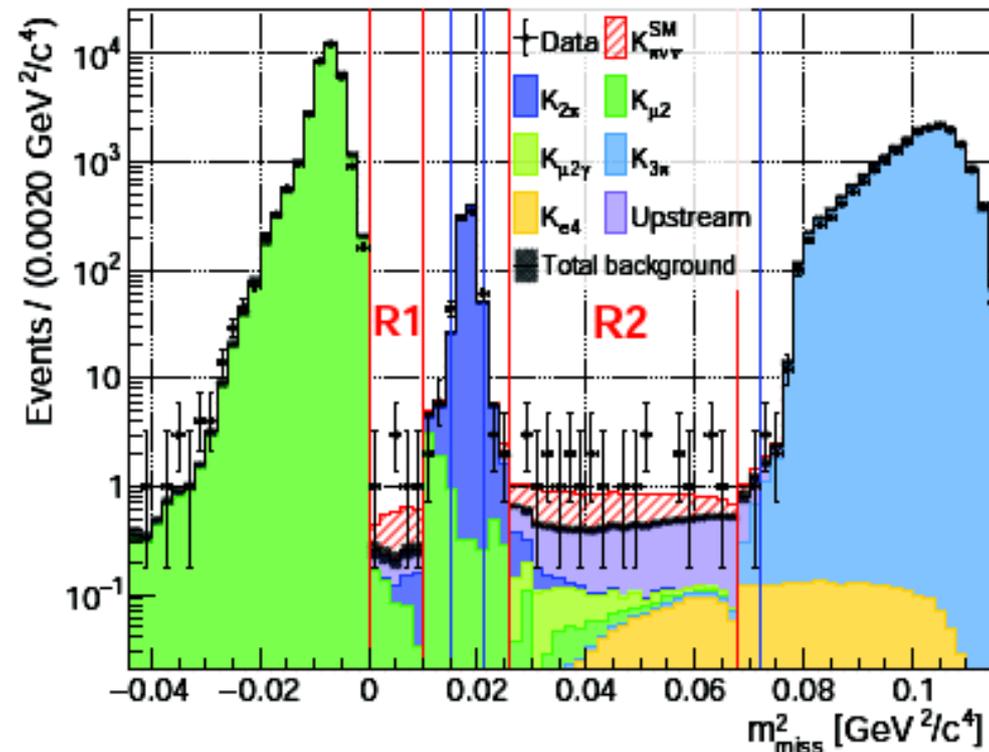
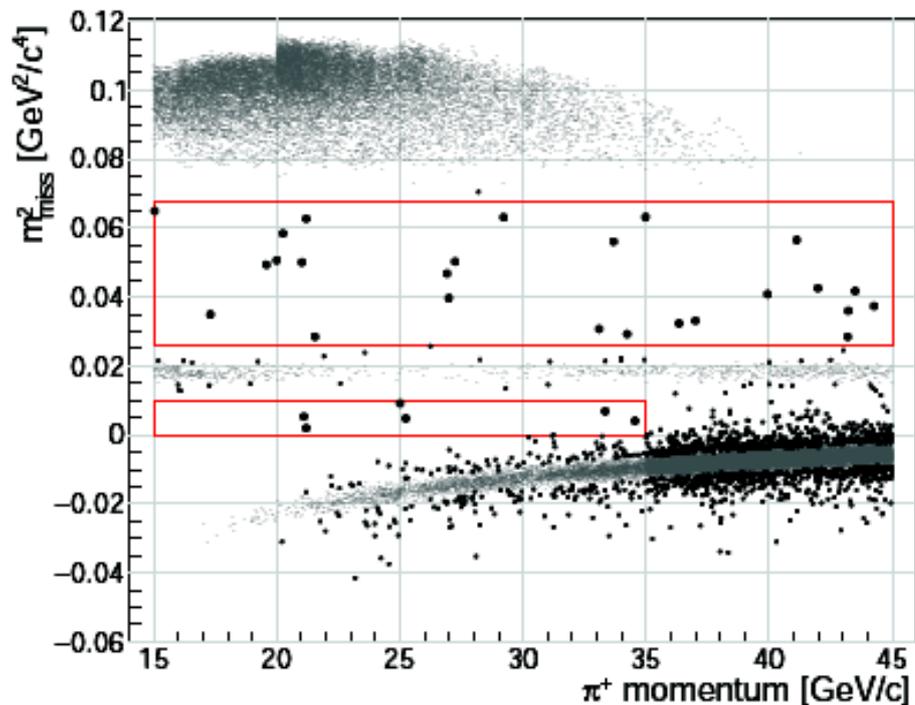
Sketch only



Данные с контрольным триггером



# Результаты 2021-2022 и 2016-2022



Ожидаемый сигнал  $N_{SM} = 10.0 \pm 0.34$   
 $N_{bkg} = 11.0^{+2.1}_{-1.9}$  Наблюдается 31 событие

$Br_{21-22}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (16.0^{+4.8}_{-4.4} \pm 0.3) \times 10^{-11}$

$Br_{16-18}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.4} \pm 0.9) \times 10^{-11}$

$Br_{16-22}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (13.0^{+3.3}_{-2.9}) \times 10^{-11}$

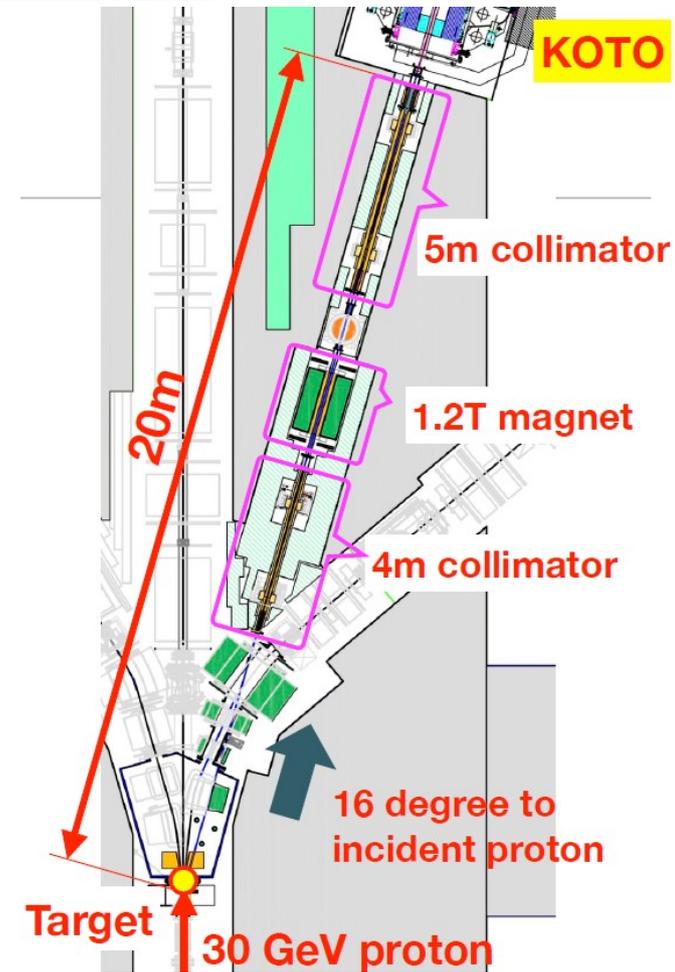
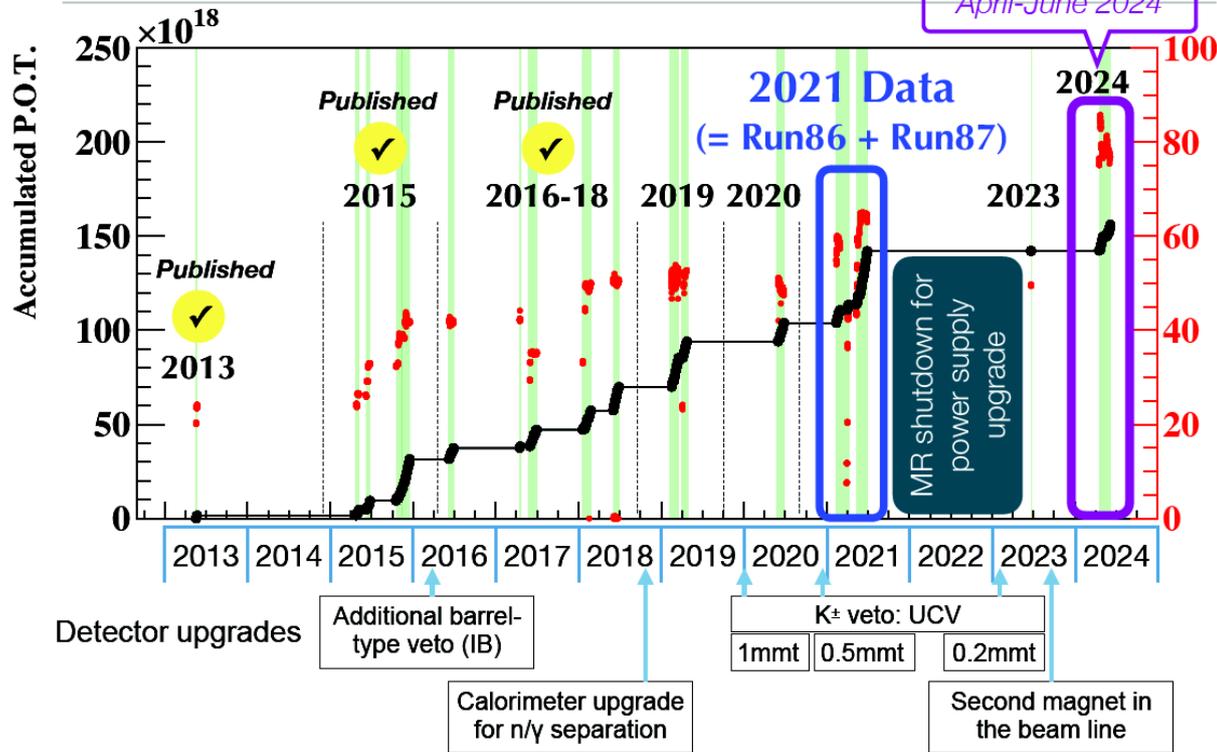
$Br_{SM} = (8.6 \pm 0.42) \times 10^{-11}$  Разница  $1.5\sigma$

Первое наблюдение на уровне  $5\sigma$

# Эксперимент "KOTO" J-PARC

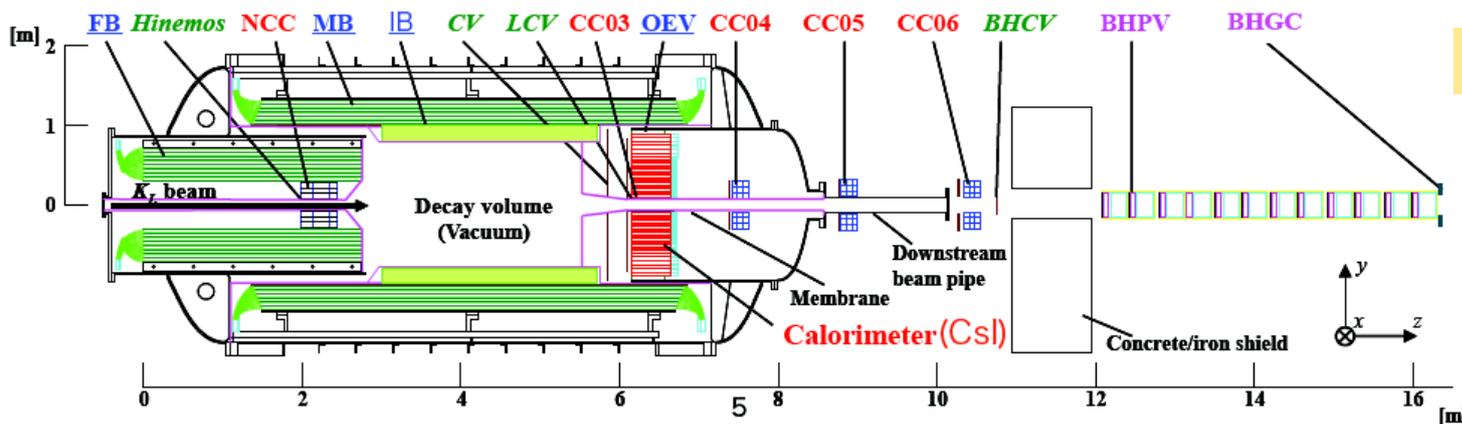
Предшественник - E391 (КЕК)

## KOTO data accumulation history



$p$  30 ГэВ  $7 \cdot 10^{13}/2\text{сек}$ , цикл 5.2(4.2) сек

Вторичный пучок ( $16^\circ$ )  
 $10^7 K_L$  max 1.4 ГэВ  $8 \times 8 \text{cm}^2$   
 $2 \cdot 10^8 n$   $6.5 \cdot 10^7 \gamma$

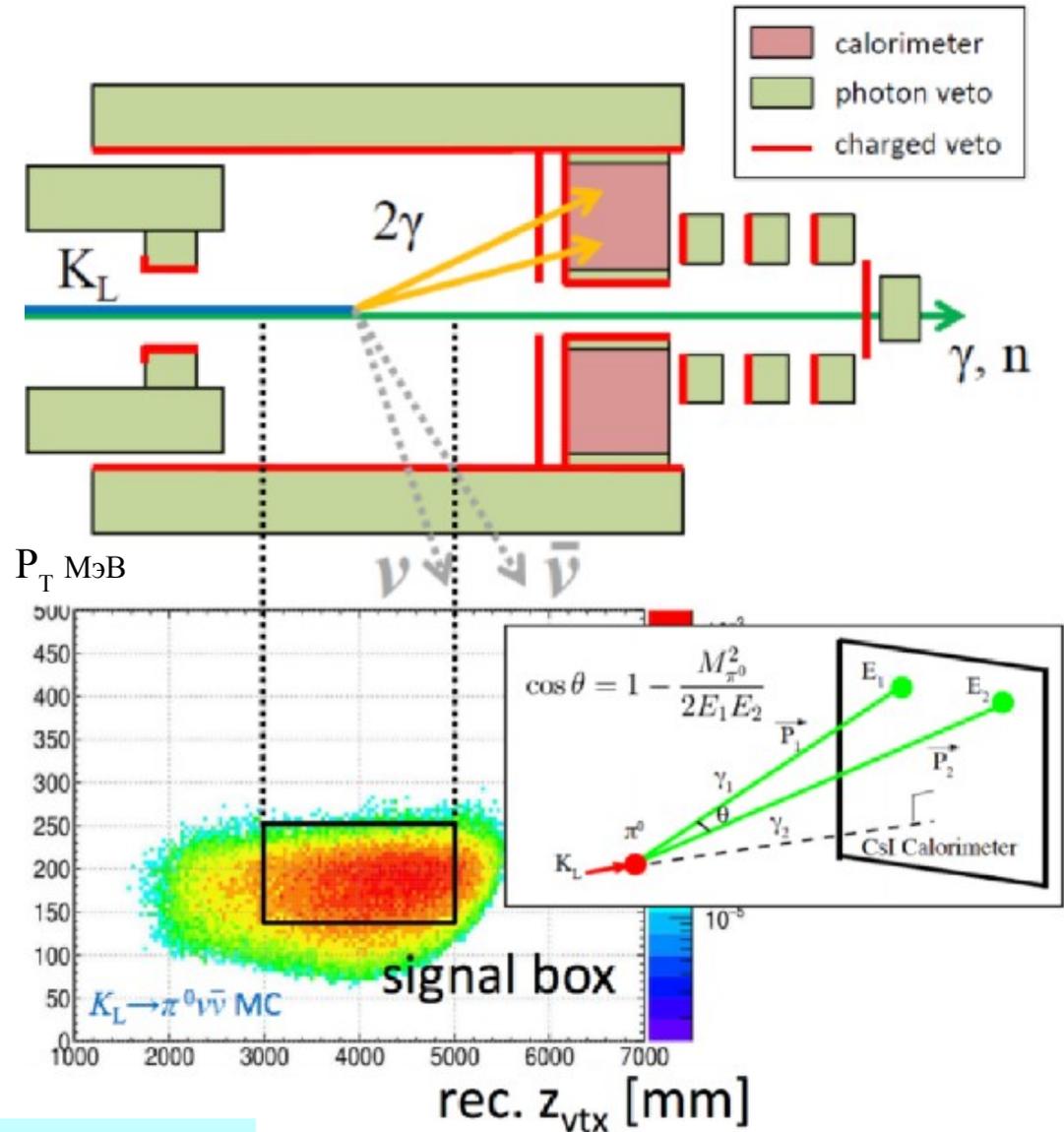
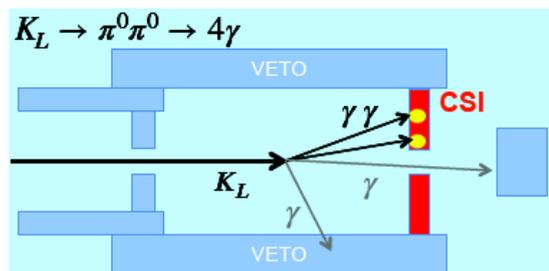
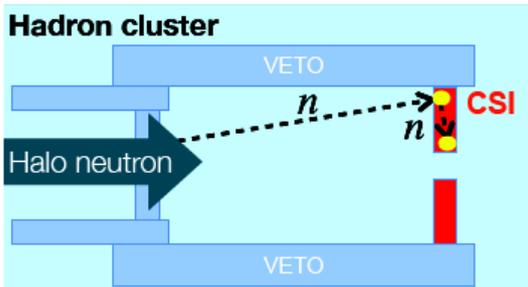
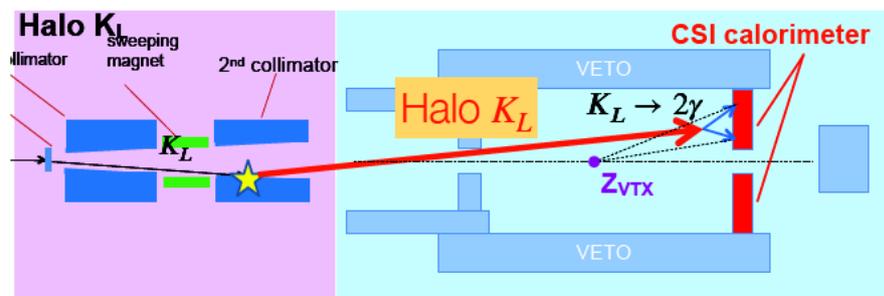
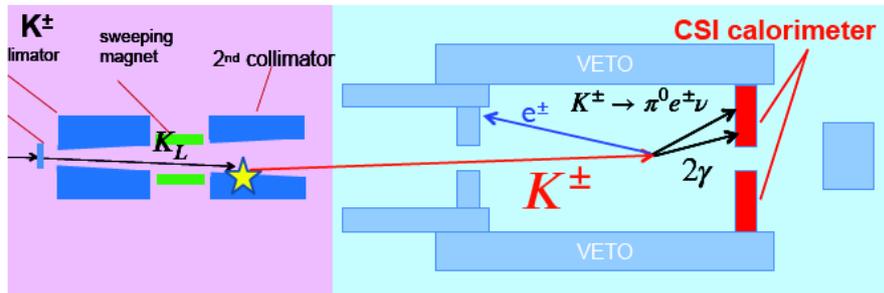


# Эксперимент КОТО

Сигнал:

- $2\gamma$  в CsI ;
- $M_{\pi^0} \rightarrow 320 < Z < 500$  см
- $130 < P_T < 250$  МэВ
- “Вето” ( $\gamma$ , заряд)  $< 1-3$  МэВ
- Размер и форма кластера в CsI
- $\Delta t_{12} < 1$  нсек.
- Форма (t) сигнала в CsI

Фон:

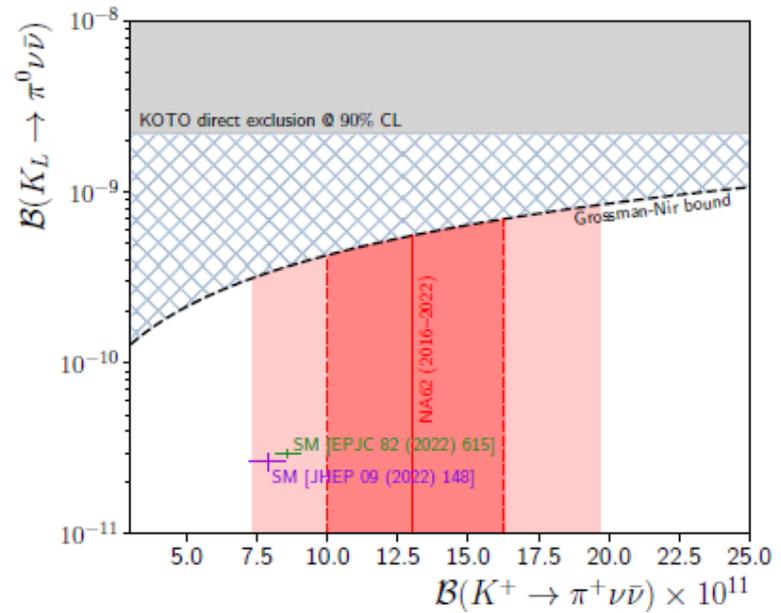
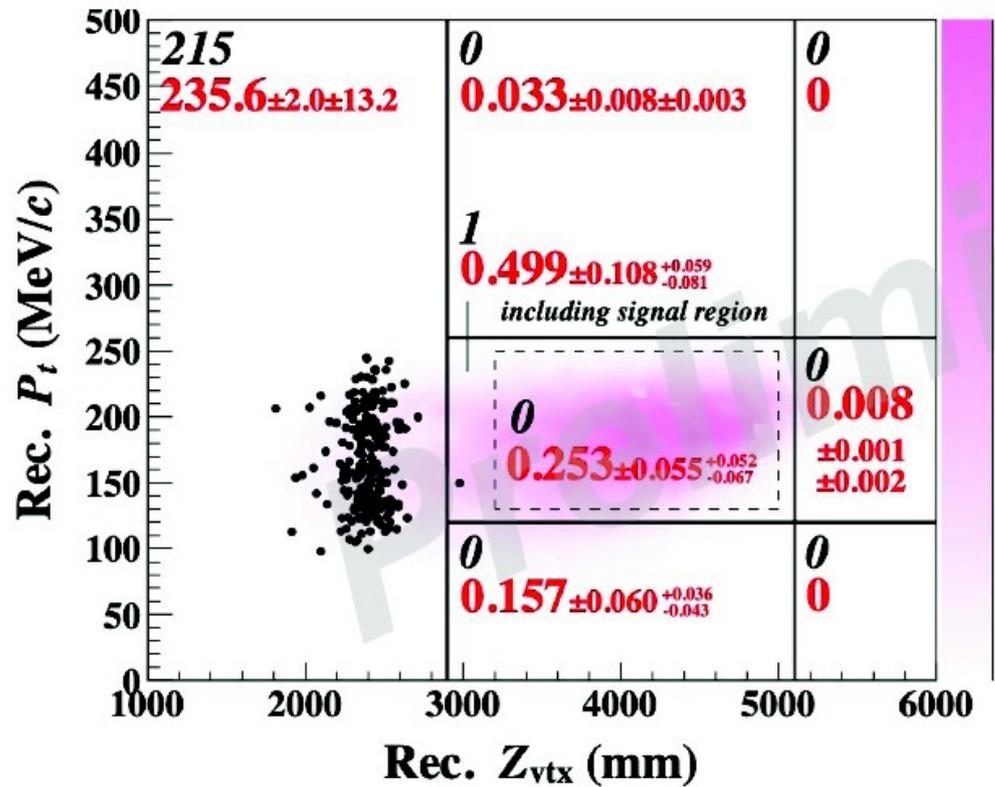


# KOTO: результаты 2021 г.

Нормировка по распаду  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$   
 $SES=9.26 \times 10^{-10}$

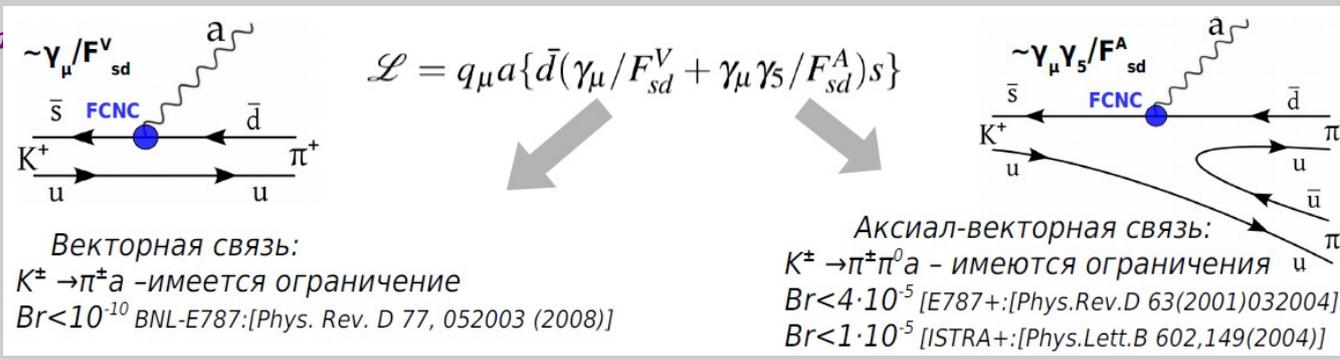
Процесс	соб. в области сигнала
SM $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	0.03
$\pi^0$ из пучка	$0.06 \pm 0.046$
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$0.059 \pm 0.06$
гало пучка $K_L \rightarrow \gamma\gamma$	$0.045 \pm 0.01$
$K^\pm$	$0.042 \pm 0.014$
<u>Нейтронный фон</u>	
Адронный кластер	$0.024 \pm 0.007$
$\eta$ от вз. нейтр. в CV	$0.023 \pm 0.01$
<b>Сумма фон</b>	<b><math>0.252 \pm 0.08</math></b>

$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.2 \times 10^{-9}$

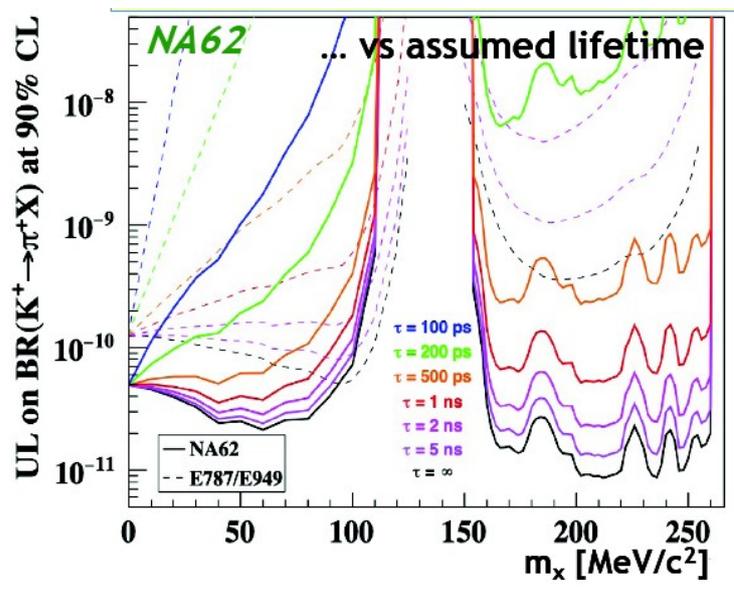


# Поиски ALP в распадах каонов

**КХД Аксион**- это Намбу-Голдстоуновский бозон, который появляется в результате спонтанного нарушения глобальной  $U(1)_{PQ}$  симметрии которая решает проблему нарушения **CP** в КХД ( $\alpha_s/8\pi \cdot \theta \cdot G_{\mu\nu} \bar{G}^{\mu\nu}$ ). Его свойства описываются константой  $f_a$ , связанной со шкалой нарушения симметрии Peccei-Quinn  $\Lambda_{PQ}$ :  $f_a = \Lambda_{PQ}/4\pi$ ;  $m_a = m_\pi f_\pi/f_a$ ;  $a \rightarrow \gamma\gamma$ ;  $\tau_a = 2^8 \pi^3 f_a^2 / (\alpha m_a^3)$ . Если аксион- это темная материя  $\rightarrow \tau_a > 13.8 \text{ Gyr} \rightarrow m_a \leq 10 \text{ eV}$ . Для аксионоподобных частиц (ALP)  $m_{ALP}$  определяется не только КХД  $\rightarrow$  два параметра:  $m_{ALP}$ ,  $f_{ALP}$   $m_{ALP} < 1 \text{ GeV}$ . ALP может иметь векторную и/или аксиальную связь с кварковыми токами ( DFSZ-аксион), в частности с FCNC -sd-током. "axiflavor"  $U(1)_{PQ+FN}$ . Из сохранения P- четности в сильных взаимодействиях, вектор работает в  $K^+ \rightarrow \pi^+ a$ , а аксиал в  $K^+ \rightarrow$

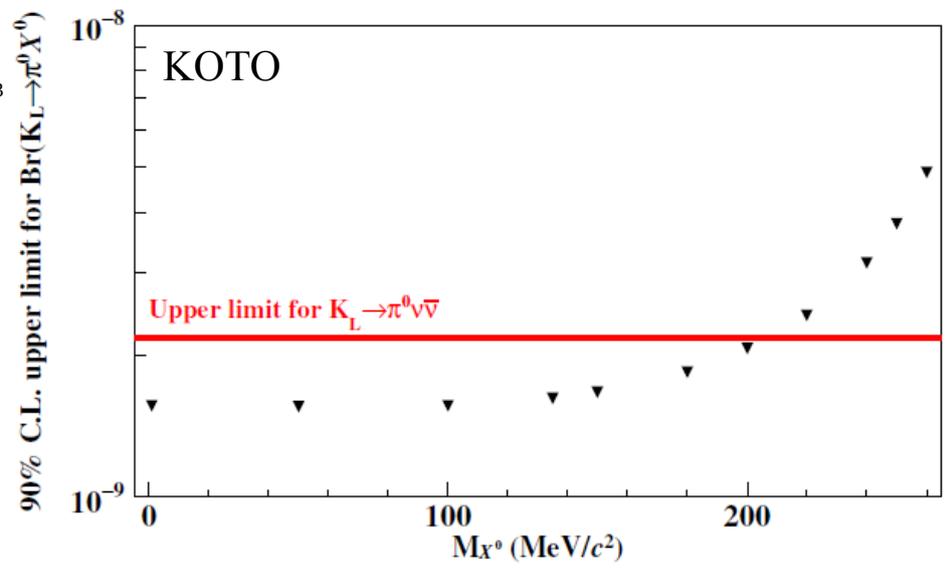


предполагается, что аксион распадается вне установки.



$$\Gamma_{\pi a} = \frac{M_K^3}{16\pi |F_{sd}^V|^2} \left(1 - \frac{m_\pi^2}{M_K^2}\right)^3$$

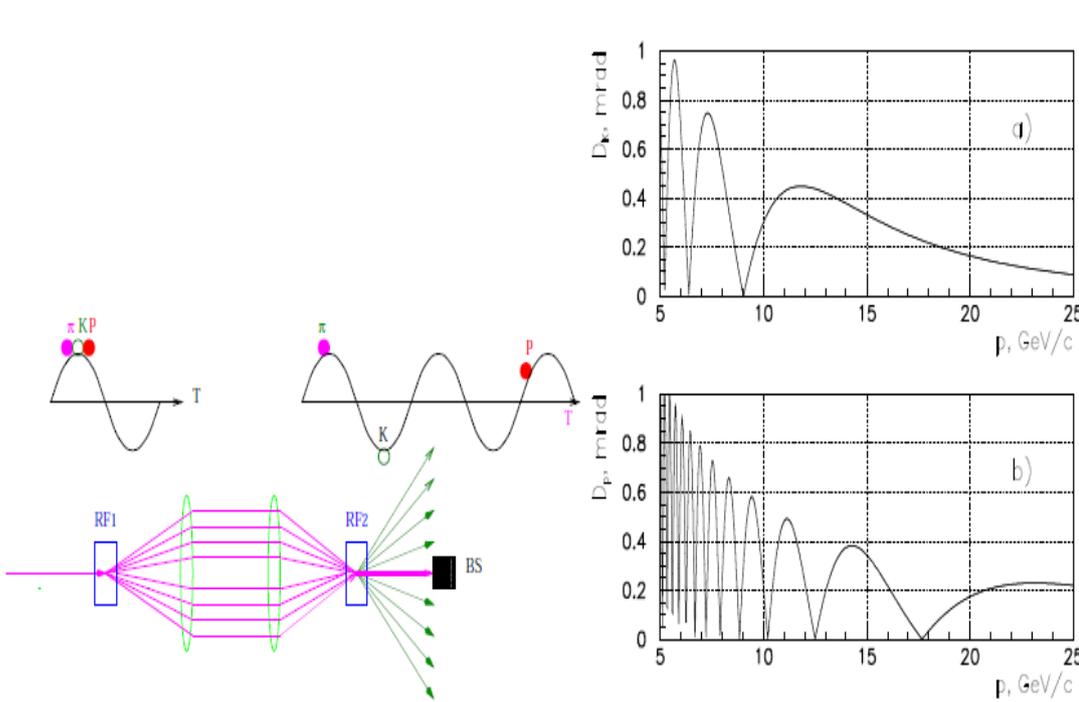
$F_{sd}^V > 8.9 \cdot 10^{11} \text{ GeV}$   
 для  $m_x = 0$





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

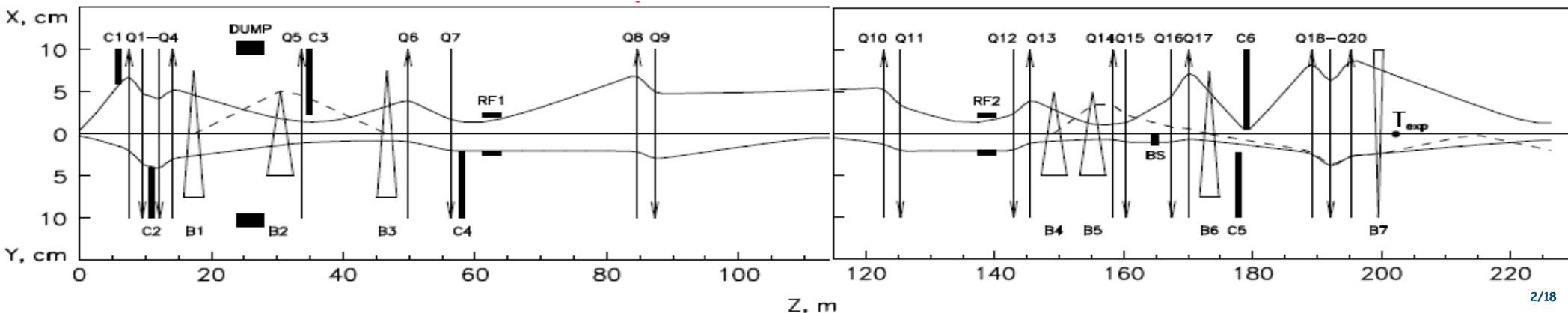
ВЧ-сепарация по схеме Панофского. Использует сверхпроводящие дефлекторы Карсруе-ЦЕРН. В ИФВЭ создана криогенная система, обеспечивающая охлаждение резонаторов сверхтекучим He.

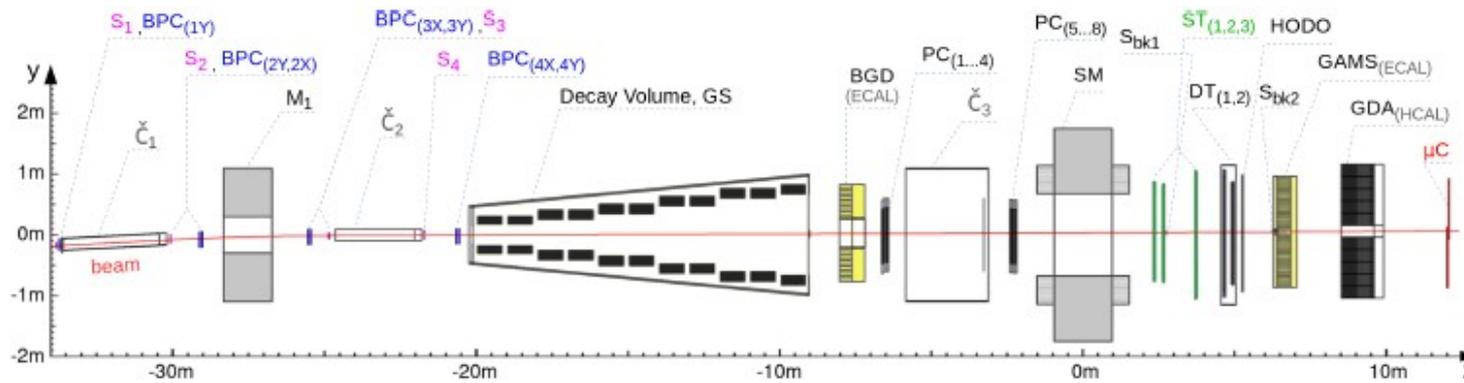


## Параметры сверхпроводящих дефлекторов

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 %





1. Пучковый спектрометр: 1мм ПК, ~1500 каналов; Сцинтилляционные и Черенковские счетчики
2. Распадный объем с охранной системой: 12м; Вето: 670 сэндвичей свинец-сцинтиллятор 20\* (5мм Sc+1.5 мм Pb), WLS
3. ПК, ST, ДТ основного магнитного спектрометра: ~5000 кан. ПК (2 mm) + 1300 ST и ДТ(1 и 3 см)
4. Матричный годоскоп ~300 каналов, светосбор WLS+SiPM
5. Магнит: апертура 200\*140 см<sup>2</sup>
6. Гамма-детекторы: ГАМС-2000, БГД всего ~ 4000 счетчиков из свинцового стекла.
7. Мюонная идентификация: адронный калориметр ГДА-100 + 4 мюонных счетчика

Основной триггер

$$S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{C}_1 \cdot C_2 \cdot \bar{S}_{bk} \cdot (\Sigma_{GAMS} > 2.5 GeV) \cup (2 \leq MH \leq 4)$$

Триггера с пересчетом

$$S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{C}_1 \cdot C_2 \cdot \bar{S}_{bk} / 10 \quad S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{C}_1 \cdot C_2 \cdot \bar{S}_{bk} \cdot \mu C / 4$$

Сеансы 2010-2013, 2016, 2018  $N_K \sim 5 \times 10^{10}$

Основные результаты:

$K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0$ ,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_s$ ,  $K^+ Cu \rightarrow K^+ \pi^0 Cu$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$ ,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0 \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0 \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma$

## Канал 21К, Установка «ОКА»



RF1 дефлектор в канале



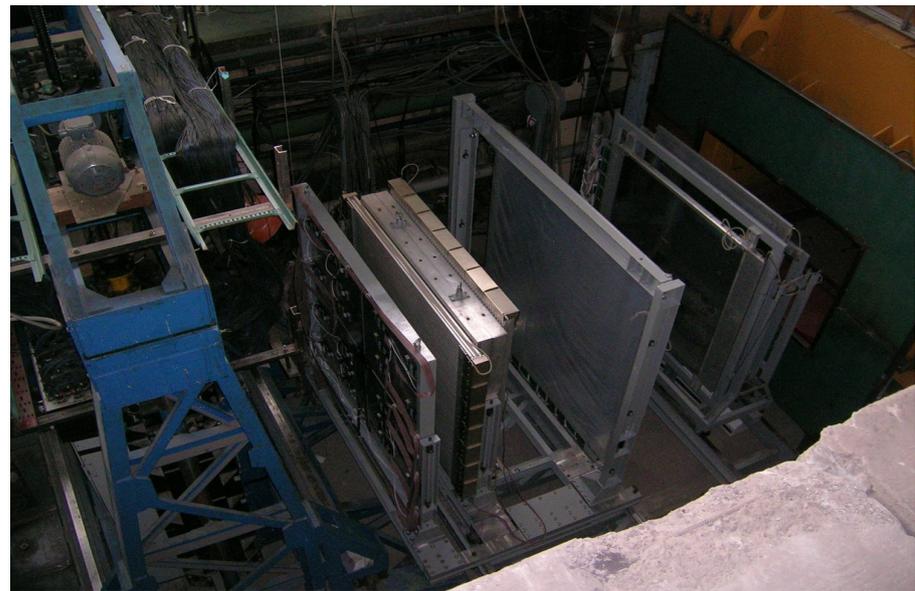
“Хвост” канала



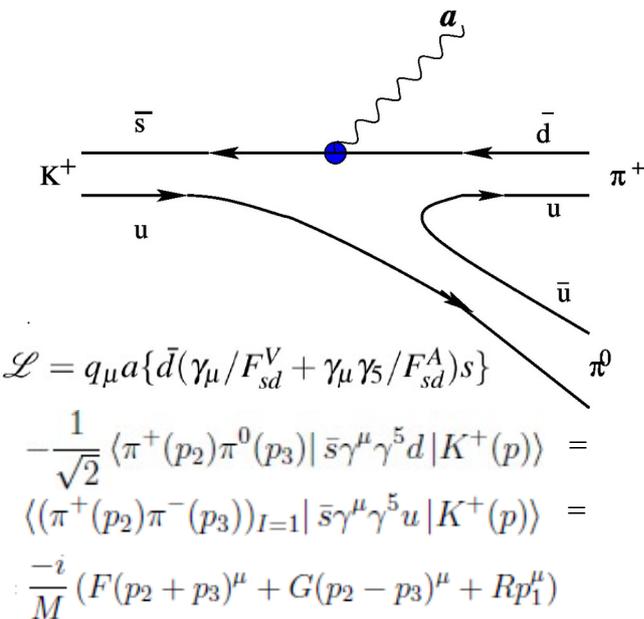
Охранная система распадного объема



Общий вид установки ОКА



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



F,G,R из  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^- l\nu$  (Kl4)

$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 a) < 10^{-5}$  BNL E-787

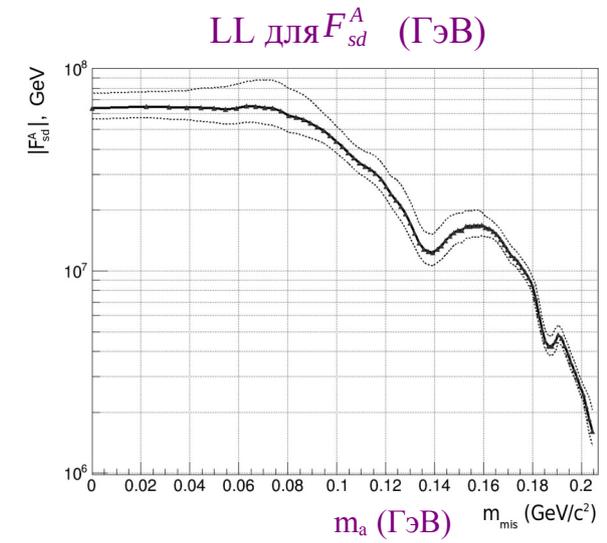
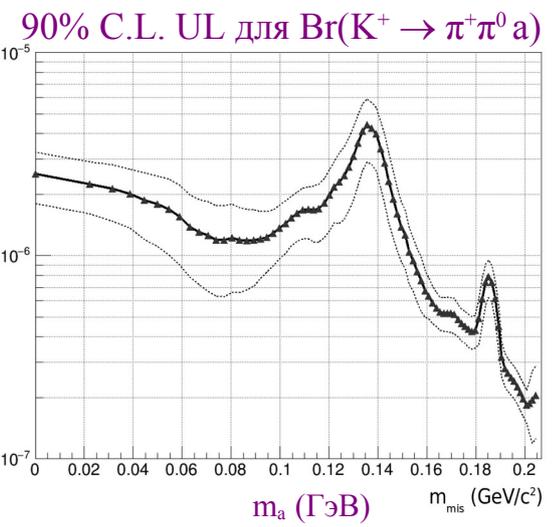
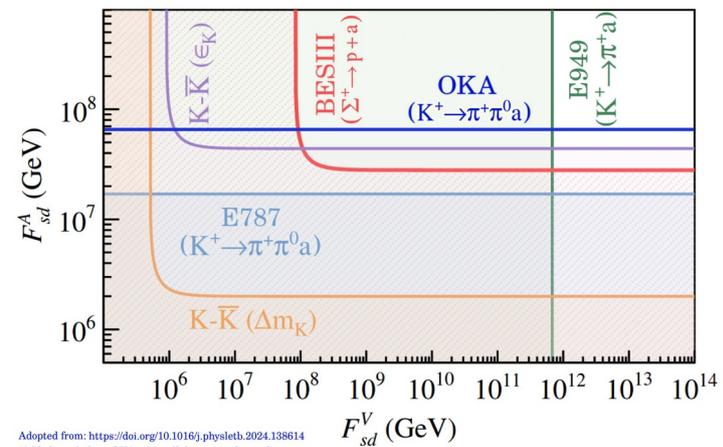
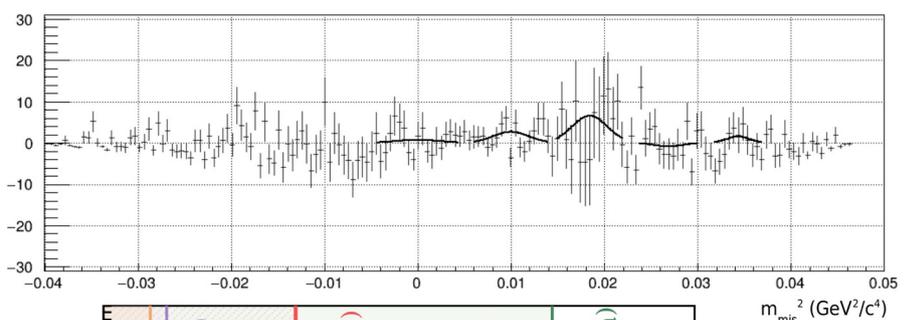
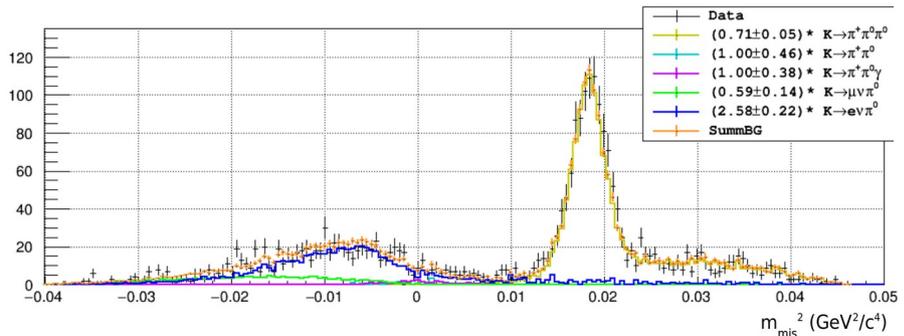
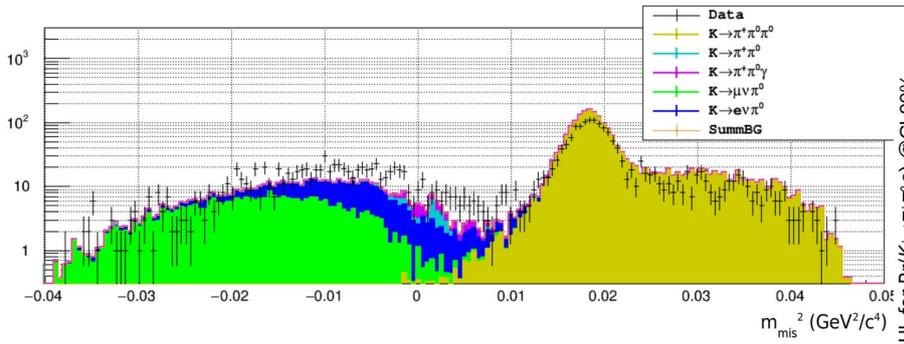
1<sup>ая</sup> группа отборов – выделение  $\pi^+\pi^0$

- пучковый+вторичный трек  $\theta > 4$  мрад, вершина внутри DV, CDA < 1.25 см
  - $17.0 < p_{\text{beam}} < 18.6$  ГэВ
  - Нет дополнительных сегментов треков после магнита SM
  - Число ливней в ГАМС или БГД не ассоциированных с треком = 2
  - $\pi^0$  - идентификация  $|m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0}| < 15$  MeV
- Если после этих отборов потребовать  $E_{\text{mis}} = E_{K^+} - E_{\pi^+} - E_{\pi^0} < 2.8$  GeV  
 $44.5 \cdot 10^6 K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$  (нормировка)

2<sup>ая</sup> группа отборов для подавления  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$ ,  $K^+ \rightarrow e^+\nu\pi^0$ ,  
 $K^+ \rightarrow \mu^+\nu\pi^0$

- $E_{\text{mis}} = E_{K^+} - E_{\pi^+} - E_{\pi^0} > 2.8$  GeV для подавления  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$
- отбор по импульсу пионов в с.ц.м.  $K^+$  для подавления  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$
- Нет сигнала в  $\mu\text{C}$  для подавления  $K^+ \rightarrow \mu^+\nu\pi^0$
- $E/p \leq 0.83$  E- энергия ливня, асс. с треком, для подавления  $K^+ \rightarrow e^+\nu\pi^0$
- идентификация  $\pi^+$  в ГАМС и ГДА-100
- $E_{\text{GS}} < 100$  MeV энергии в охранной системе против  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$

# Поиск ALP в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 a$



$F_{sd}^A > 6.5 \cdot 10^7 \text{ ГэВ}$  для  $m_a < 70 \text{ МэВ}$

Процесс	$F_{sd}^V$	$F_{sd}^A$
$K^+ \rightarrow \pi^+ a$	$8.9 \cdot 10^{11}$ NA62	.....
$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 a$	.....	$6.5 \cdot 10^7$ ОКА
$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 a$	.....	$1.7 \cdot 10^7$ E-787
$\Sigma^+ \rightarrow p a$	$8 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^7$ BES-III
$K^0 - \bar{K}^0$	$\Delta m_K$	$2.0 \cdot 10^6$
	$\epsilon_K$	$4.4 \cdot 10^7$

Предел из SN1987A : В нейтронной звезде(NS) сосуществуют n, p, e,  $\Lambda$   
 $\Lambda \rightarrow n a$  доп. механизм охлаждения NS в течение  $\sim 10$  секунд после взрыва SN, пока прото-нейтронная звезда остывает до  $T \sim 0.1 \text{ МэВ} \rightarrow$   
 $F_{sd}^A, F_{sd}^V > 10^9 - 10^{10} \text{ GeV}$  оценка модельно зависима !

Adopted from: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138614>  
 (Added result from OKA, exp. collaborations denoted).

# Заключение

На установке NA62 (CERN) :

Измерена относительная вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  на статистике 2016-18 + 2021-22 .  
Зарегистрированы 51 событие, включая  $18_{-2}^{+3}$  фоновых. Измерен брэнчинг :

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = ( 13.0_{-2.9}^{+3.3} ) \cdot 10^{-11} \quad \text{Что согласуется с СМ в пределах } 1.5\sigma$$

Проведен поиск ALP в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  . Сигнал не обнаружен. Получены ограничения:

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ a ) < 2.5 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-11} \quad \text{для } m_a \quad 0-200 \text{ МэВ.}$$

Отсюда следует ограничение на константу связи ALP с векторным кварковым током -sd-

$$F_{sd}^V > 6.4 \cdot 10^7 \text{ ГэВ} \quad \text{для } m_a \sim 0$$

На установке KOTO (J-PARC) проведен поиск распада  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  на статистике 2021 г. , получен предел 90% CL

$$\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.1 \cdot 10^{-9}$$

Проведен поиск ALP в распаде  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  . Сигнал не обнаружен. Получены ограничения:

$$\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 a ) < 1.6 \cdot 10^{-9} \quad \text{для } m_a \quad 0-135 \text{ МэВ.}$$

На установке ОКА

Проведен поиск аксионо-подобной частицы(ALP) в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$  .  
Сигнал от ALP не обнаружен, получен предел :

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a ) < 2.5 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-7} \quad \text{для } m_a \quad 0-200 \text{ МэВ.}$$

Получено ограничение на константу связи ALP с аксиальным кварковым током -sd-

$$F_{sd}^A > 6.4 \cdot 10^7 \text{ ГэВ} \quad \text{для } m_a < 70 \text{ МэВ.}$$