

Поиски легкой невидимой аксионо-подобной частицы в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$

(Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, 03 апреля 2024)

А.С. Садовский,

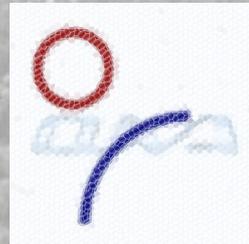
Alexander.Sadovskiy@ihep.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ имени А.А. ЛОГУНОВА
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
от имени сотрудничества ОКА

А.В. Артамонов, А.М. Горин, С.В. Донсков, А.В. Инякин, В.Н. Колосов, В.Ф. Куршецов, В.А. Лишин, М.В. Медынский,
В.Ф. Образцов, А.В. Охотников, В.А. Поляков, В.И. Романовский, В.И. Рыкалин, А.С. Садовский, В.Д. Самойленко,
И.С. Тюрин, В.А. Уваров, А.П. Филин, Г.В. Хаустов, С.А. Холоденко, О.П. Ющенко
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино),

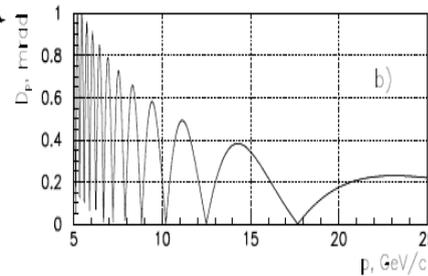
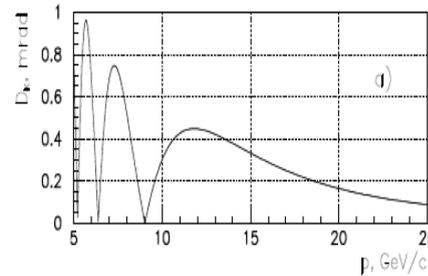
Е.Н. Гуцин, В.И. Кравцов, Ю. Г. Куденко,
А.В. Кулик, А.Ю. Поляруш,
С.Н. Филиппов,
А.А. Худяков,
(ИЯИ РАН, Москва),

В.Н. Бычков,
Б.Ж. Залиханов,
Г.Д. Кекелидзе, В.М. Лысан
(ОИЯИ, Дубна).



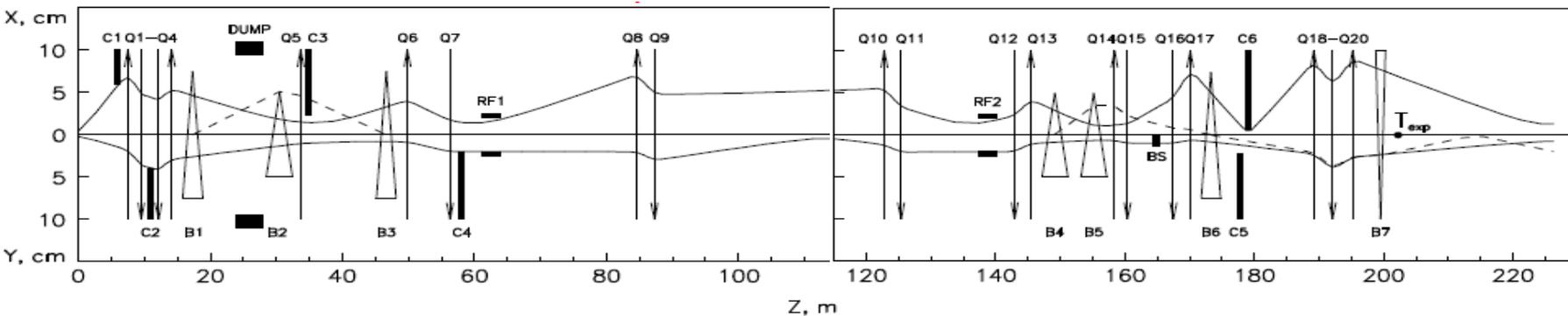
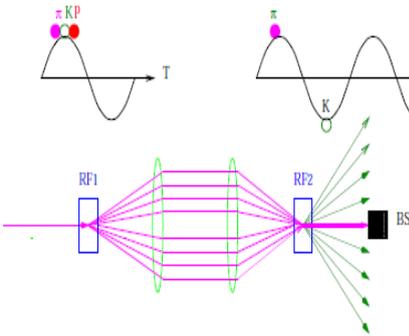
OKA: the experiment with RF-separated high energy K^\pm @ U-70

RF separation with Panofsky scheme is realised. It uses two Karlsruhe-CERN SC RF deflectors. Sophisticated cryogenic system, built at IHEP provides superfluid He for cavities cooling.



Operating frequency, (S-band)	2865 MHz
Wavelength, λ	~ 10.5 cm
Effective deflector length	2.74 m
Number of cells/deflector	104
Mean deflecting field	$\sim 1(0.6)$ MV/m
Working temperature	1.8 K

Main beam parameters :	
Primary proton beam energy	50 GeV
Primary proton beam intensity	$7 \cdot 10^{12}$ ppp
Secondary beam momentum	17.7 GeV/c
Length of the beam line	~ 200 m
K^+ intensity after RF sep	$\sim 10^6$
K^+ in the beam	12.5% (up to 20%)



OKA setup at the U-70 accelerator complex

3



RF deflector in the beamline



Liquid He lines



Tail of the beam line



General view of the OKA setup



Decay volume Veto System



ST, DT chambers,
matrix hodoscope, ECAL

Аксион появился как решение (Peccei-Quinn) проблемы CP-нарушения сильного взаимодействия за счет введения глобальной симметрии $U(1)_{PQ}$ преобразующей CP-нарушающую фазу. PQ-симметрия спонтанно нарушается и появляется Намбу-Голдстоуновский бозон = аксион. КХД обуславливает ненулевую массу аксиона.

Из КХД следуют основные свойства аксиона:

Псевдоскаляр

Основной распад на $\gamma\gamma$

Константа распада: $f_a = \Lambda_{PQ} / 4\pi$, (Λ_{PQ} - шкала нарушения PQ-симметрии)

Масса КХД аксиона: $m_a = m_\pi \cdot f_\pi / f_a$

Время жизни при распаде на два фотона: $\tau_{(a \rightarrow \gamma\gamma)} = 2^8 \cdot \pi^3 \cdot f_a^2 / (\alpha \cdot m_a^3)$

Аксион ~ теоретич.наиболее обоснованный кандидат в темную материю

Тогда из требования $\tau_{(a)} \geq 13.8$ млрд лет $\Rightarrow m_a \leq 10$ eV

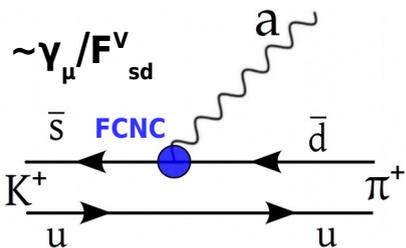
Рассматривают также аксионоподобные частицы (ALP):

ALP - принадлежат к более широкому классу теорий, где масса аксиона определяется не только КХД. Для ALP - два независимых параметра: m_{ALP} и f_{ALP} .

Масса может варьироваться в значительном диапазоне $m_{ALP} \leq 1$ GeV.

Аксион может иметь векторную и аксиал-векторную связь с кварковыми токами, в частности с FCNC см. [PoS CORFU2018(2019)035], [hep-ph:2303.13353].

$$\text{Для sd-FCNC: } \mathcal{L} = q_\mu a \{ \bar{d} (\gamma_\mu / F_{sd}^V + \gamma_\mu \gamma_5 / F_{sd}^A) s \}$$

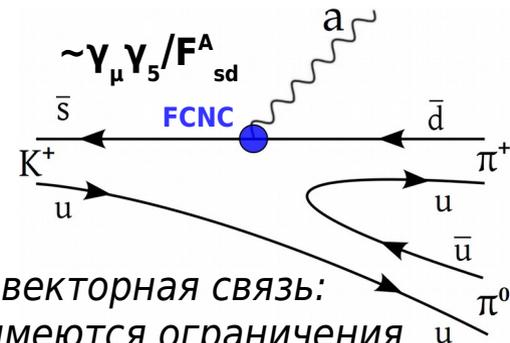


Векторная связь:

$K^\pm \rightarrow \pi^\pm a$ - имеется ограничение

$Br < 10^{-10}$ BNL-E787: [Phys. Rev. D 77, 052003 (2008)]

$$\mathcal{L} = q_\mu a \{ \bar{d} (\gamma_\mu / F_{sd}^V + \gamma_\mu \gamma_5 / F_{sd}^A) s \}$$



Аксиал-векторная связь:

$K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 a$ - имеются ограничения

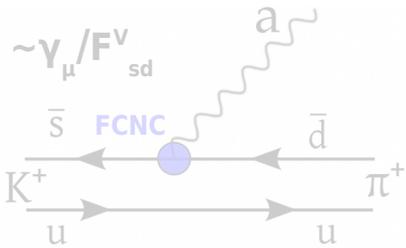
$Br < 4 \cdot 10^{-5}$ [E787+: [Phys. Rev. D 63(2001)032004]

$Br < 1 \cdot 10^{-5}$ [ISTRA+: [Phys. Lett. B 602,149(2004)]

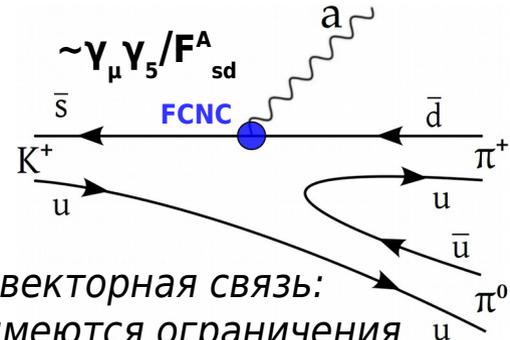
Можно использовать Ke4 (F, G, R формфакторы $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi e^\pm \nu$ NA48/2: [Phys. Lett. B 715 (2012) 105]) для получения аксиал-векторной амплитуды за счет изоспиновой симметрии [Phys. Rev. D 102 015023 (2020)]. Изоспиновая волновая ф-я ($\pi^+ \pi^-$)-системы проектируется на $I=1$ (p -волна) т.к. интересующее нас состояние: $I(K^+) = 1/2$ (т.к. $s \rightarrow da$) Лагр.: $|\Delta I| = 1/2 \Rightarrow I_3(\pi^+ \pi^0) = 1 \Rightarrow I=1$ (т.е. $I \neq 0$)

$$\langle \pi^+ \pi^0 | \bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 d | K^+ \rangle = -\sqrt{2} \langle (\pi^+ \pi^-)_{I=1} | \bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 u | K^+ \rangle = \frac{i\sqrt{2}}{m_K} (F(p_+ + p_-)^\mu + G(p_+ - p_-)^\mu + Rq^\mu)$$

Таким образом имеется хорошее описание процесса $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$



$$\mathcal{L} = q_\mu a \{ \bar{d} (\gamma_\mu / F_{sd}^V + \gamma_\mu \gamma_5 / F_{sd}^A) s \}$$



Векторная связь:
 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm a$ - ограничение

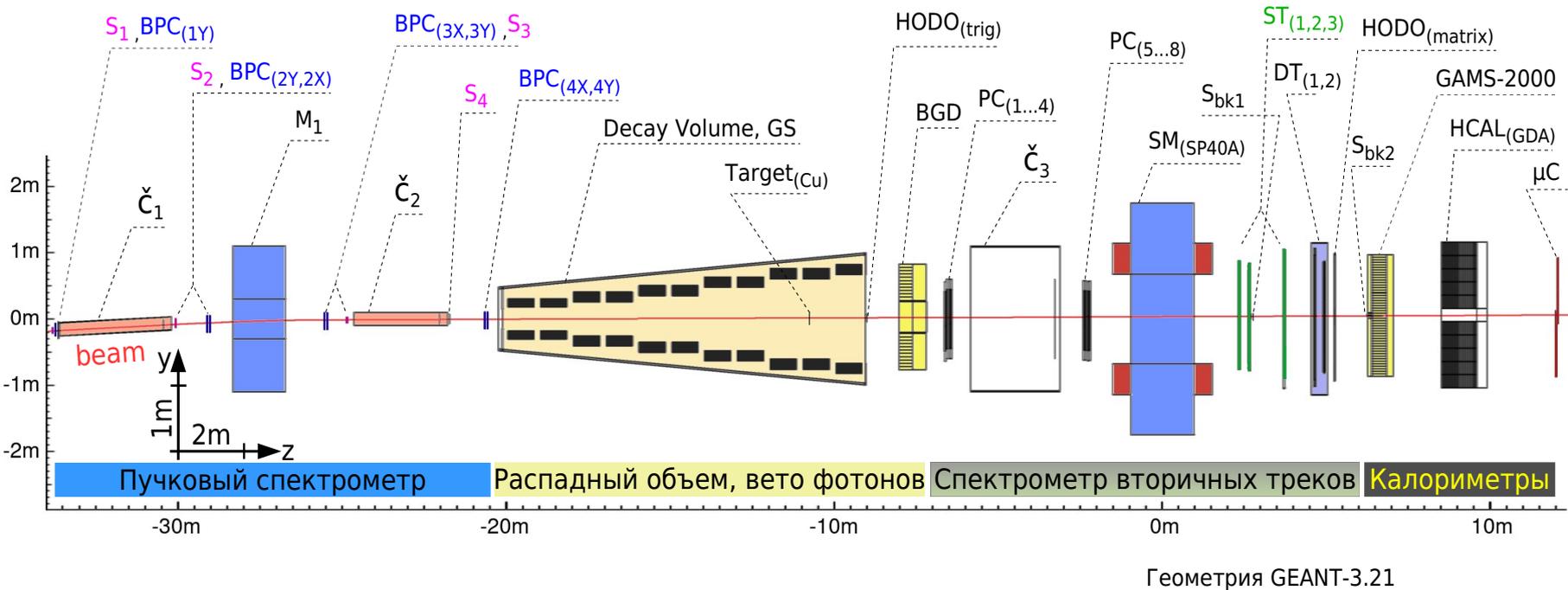
$Br < 10^{-10}$ BNL-E787: [Phys. Rev. D 77, 052003 (2008)]

Аксиал-векторная связь:
 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 a$ - имеются ограничения
 $Br < 4 \cdot 10^{-5}$ [E787+: [Phys.Rev.D 63(2001)032004]
 $Br < 1 \cdot 10^{-5}$ [ISTRA+: [Phys.Lett.B 602,149(2004)]

Можно использовать Ke4 (**F**, **G**, **R** формфакторы $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi e^\pm \nu$ NA48/2: [Phys. Let. B 715 (2012) 105]) для получения аксиал-векторной амплитуды за счет изоспиновой симметрии [Phys.Rev.D 102 015023 (2020)]. Изоспиновая волновая ф-я ($\pi^+ \pi^-$)-системы проектируется на $I=1$ (p -волна) т.к. интересующее нас состояние: $I(K^+) = 1/2$ (т.к. $(s \rightarrow da)$ Лагр.: $|\Delta I| = 1/2$) $\Rightarrow I_3(\pi^+ \pi^0) = 1 \Rightarrow I=1$ (т.е. $I \neq 0$)

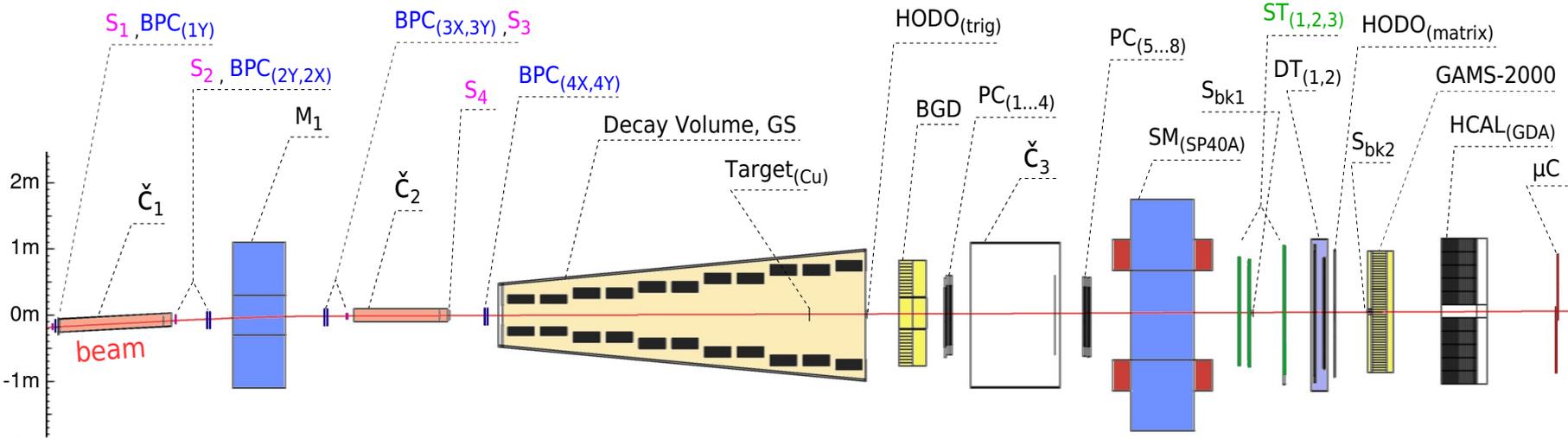
$$\langle \pi^+ \pi^0 | \bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 d | K^+ \rangle = -\sqrt{2} \langle (\pi^+ \pi^-)_{I=1} | \bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 u | K^+ \rangle = \frac{i\sqrt{2}}{m_K} (F(p_+ + p_-)^\mu + G(p_+ - p_-)^\mu + Rq^\mu)$$

Таким образом имеется хорошее (!) описание процесса $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$



- (§) Триггер: 6mm сцинт. (S_0) & 2mm (S_1, S_2, S_3); пучк.черенк.счетч. (\check{C}_1, \check{C}_2), veto пучка $S_{bk1,2}$
- (§) Пучковый спектрометр: y-магнит (M_2) & 7 BPC (шаг 1mm ~1500 каналов)
- (§) Распадный объем (He) & veto (охранн. система «GS») 670 Pb-Sc (200 ADC каналов)
- (§) Спек-р вторичных треков: 8 PC (шаг 2mm 5K каналов), широко апп. x-магнит (SP40A) 0.6Tm, 200x140cm², 3straw (шаг 10mm 1K кан.), 2DT (Ф30mm /300 кан.), матр. годоскоп.
- (§) ЭМ-калориметры: «GAMS-2000» свинц.стекло (~2300 кан. 4X4cm²), «BGD» (~1050 кан. 5x5cm²)
- (§) HCAL «GDA» (120 Fe-Sc 20x20cm²), 4 muon counters (scint plates 1x1m² μC)

Набор данных (сеансы 14,15)



В анализе использованы данные полученные в 2012 и 2013 г.г. на установке ОКА:

В сеансе 14: $P_{beam}=17.7 \text{ ГэВ/с}$

Основной триггер: $(S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_0 \cdot C_1 \cdot \bar{C}_2 \cdot \bar{S}_{bk1,2} \cdot [\Sigma_{GAMS} > Mip]) \sim 2.3 \cdot 10^9$ решений

Триггер на распад каона: $\{1/10\}(S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_0 \cdot C_1 \cdot \bar{C}_2 \cdot \bar{S}_{bk1,2})$

$1/2$ часть сеанса с 2mm-Cu мишенью (рядом с выходом из распадного объема)

Восстановлено $5 \cdot 10^8$ одотрековых распадов

В сеансе 15: $P_{beam}=17.7 \text{ ГэВ/с}$

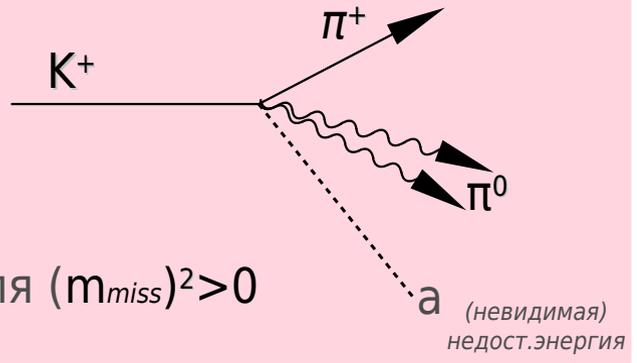
Основной триггер: $(S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_0 \cdot C_1 \cdot \bar{C}_2 \cdot \bar{S}_{bk1,2} \cdot [\Sigma_{GAMS} > Mip]) \sim 1.35 \cdot 10^9$ решений

Триггер на распад каона: $\{1/10\}(S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_0 \cdot C_1 \cdot \bar{C}_2 \cdot \bar{S}_{bk1,2})$

Восстановлено $3 \cdot 10^8$ одотрековых распадов

Сигнатуры $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$ и фоновых процессов

Выделяем распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$



Для $(m_{miss})^2 > 0$

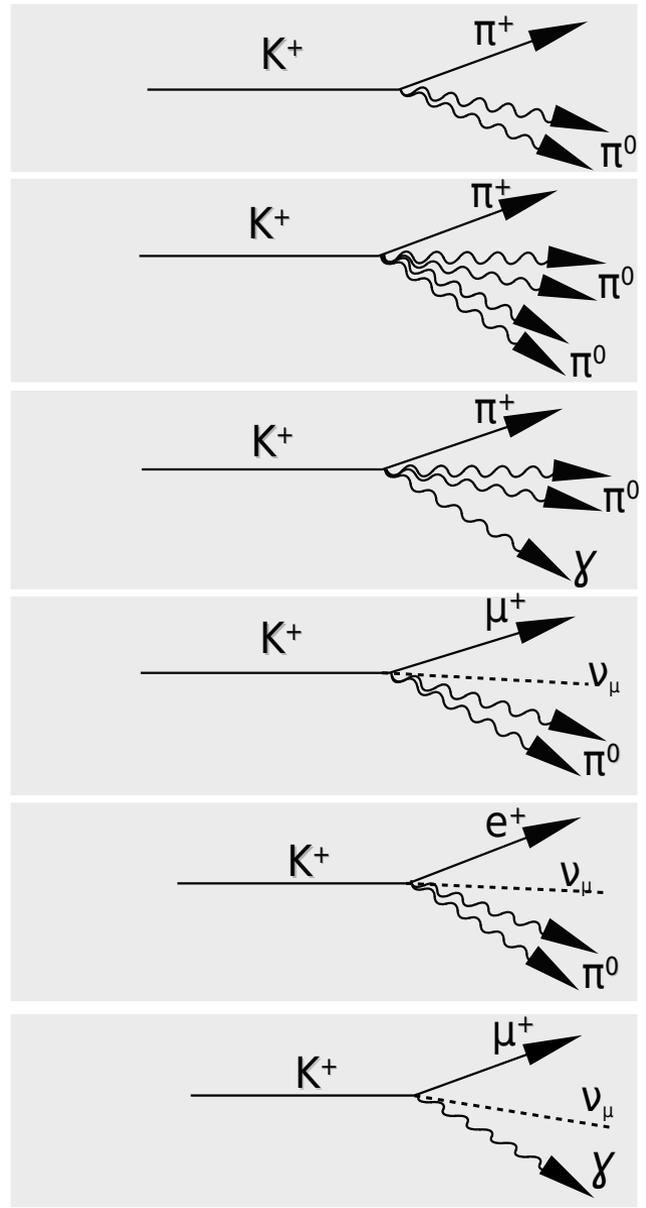
Основные отборы

- ☉ однотрековые события, с хорошей вершиной из расп.объема
- ☉ импульс $\approx 17.7 \text{ GeV}/c$
- ☉ вторичный заряд. трек: π^+
- ☉ =2 γ события в GAMS/BGD для π^0
- ☉ высокое качество трека
- ☉ Если 1 γ попадает в BGD, то не у внутр.края; Если γ в GAMS, то $y_\gamma \neq y_{track}$ (исключаем. торм.изл. от заряд. трека)
- ☉ вето фотонов в (охр.сист.) + BGD

МК для сигнала [$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$] и основных фоновых процессов для оценки захвата, эффективности и для возможности дальнейшего вычитания спектров.



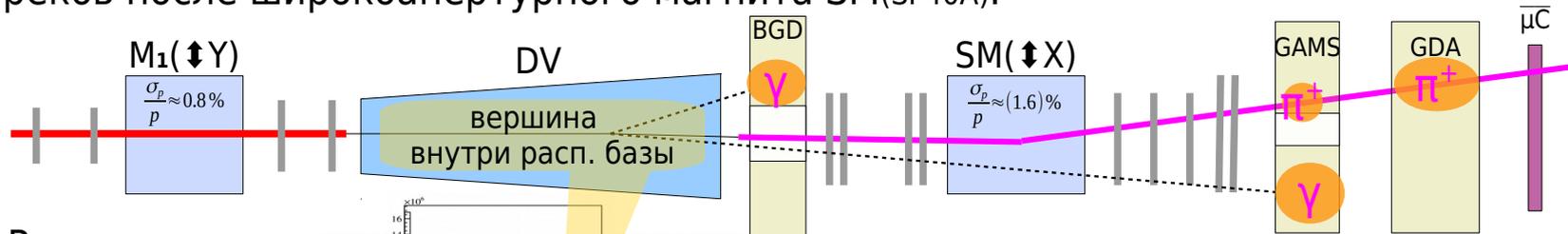
Фоны



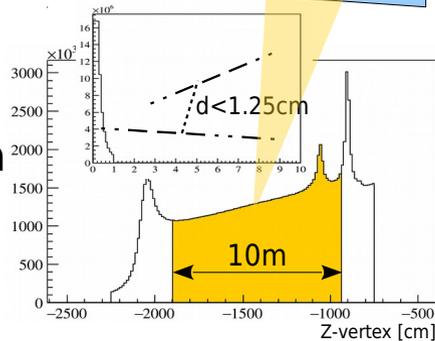
Отборы для $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$

10

- 1) Восстановлен **ровно один пучковый трек до DV** с импульсом $\sim 17 \text{ GeV/c}$ и **единственный трек после (высокого качества)**; также отсутствуют следы других треков после широкоапертурного магнита SM(SP40A).



- 2) Распадная база покрывает вершину распада ($\sim 2\sigma$ от фланцев).



- 3) Вторичный трек согласуется с координатами адронного кластера (π^+) в GAMS||GDA (позже потребуется также отсутствие срабатывания соответствующего координате мюонного счетчика).

- 4) Ровно 2 ЭМ-кластера в ЭМ-калориметрах:
либо [2 γ в GAMS] & [вето в BGD по энерговыделению]
либо [1 γ в GAMS] & [=1 γ в BGD, & запрет на любые дополнит. кластеры].

- 5) Отбрасываются события с γ на границе внутр. отверстия BGD (низкого качества),

- 6) Отбрасываются события где γ - положение фотона рядом с треком в GAMS для искл.возм. подозрения на испускание фотона заряженной частицей (SM отклоняет в oX).

- 1) Восстановлен **ровно один пучковый трек до DV** с импульсом $\sim 17 \text{ GeV/c}$ и **единственный трек после (высокого качества)**; также отсутствуют следы других треков после широкоапертурного магнита SM(SP40A);
Отбор по χ^2 для пучкового и распадного треков.
- 2) Распадная база покрывает вершину распада ($\sim 2\sigma$ от фланцев).
- 3) Вторичный трек согласуется с координатами адронного кластера (π^+) в GAMS||GDA (также требуется отсутствие срабатывания соответствующего координате мюонного счетчика).
- 4) Ровно 2 ЭМ-кластера в ЭМ-калориметрах:
либо [2 γ в GAMS] & [вето в BGD по энергovyделению]
либо [1 γ в GAMS] & [=1 γ в BGD, & запрет на любые дополнит. кластеры].
- 5) γ -кластер не на на границе внутр. отверстия BGD
- 6) Отбрасываются события где Υ - положение фотона рядом с треком в GAMS для искл.возм. подозрения на испускание фотона заряженной частицей (SM отклоняет в oX).

Отбор $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ кандидатов:

- π^+ кандидат: единственный заряженный адронный трек π^+ (трекинг, калориметрия)
- π^0 кандидат: 2 γ с $|m(\gamma\gamma) - m(\pi^0)| < 15 \text{ MeV}/c^2$ (рассматриваются как π^0 с табличной массой)

Статистика $\sim 30 \cdot 10^6$ событий (K2 π кандидатов) для дальнейшего анализа:

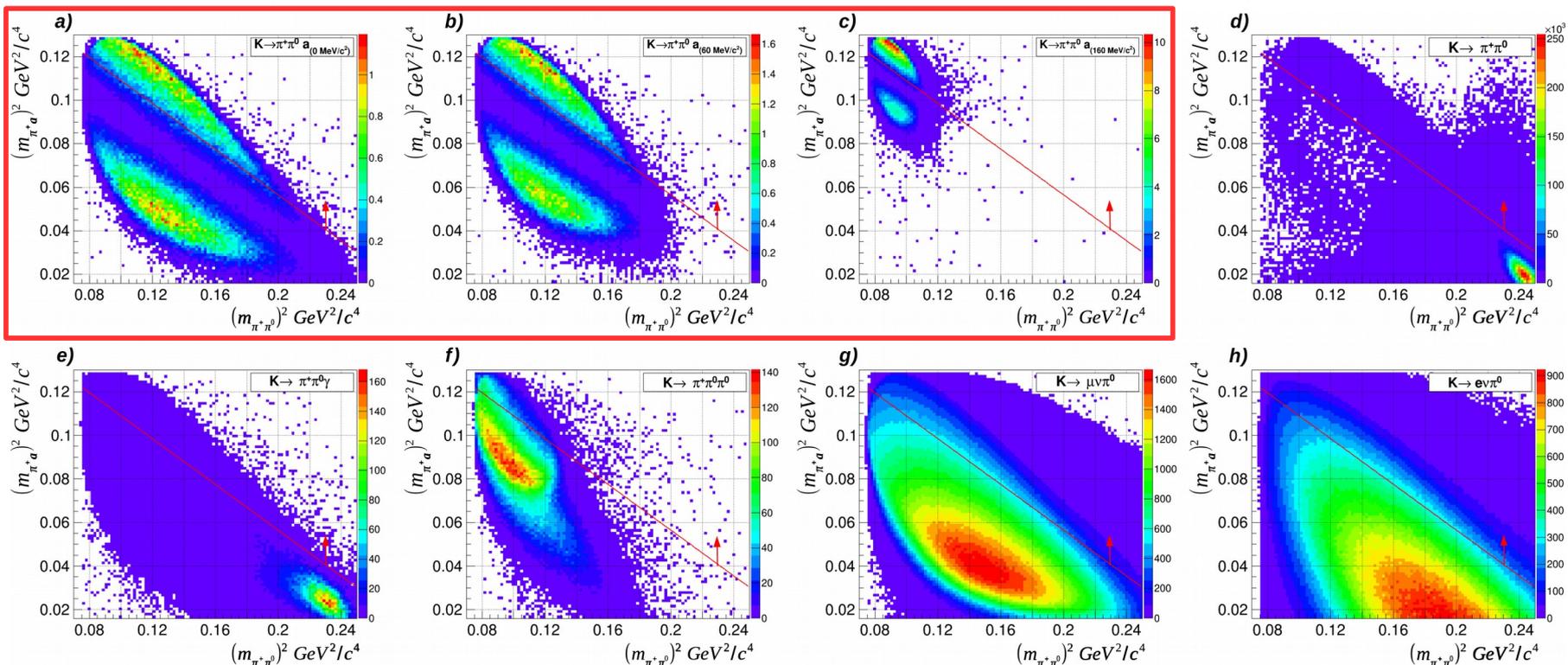
ОКА-run14/2012г.: $N(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0) = 18.4 \cdot 10^6$

ОКА-run15/2013г.: $N(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0) = 11.9 \cdot 10^6$

Возможно значительное подавление фоновых процессов 12 с учетом специфики матричного элемента $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$

Результаты моделирования с учетом матричных элементов после базовых отборов (топология, трекинг) для выделения $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$) - кандидатов

Далиц диаграммы для сигнала $m_a = \{0, 60, 160 \text{ MeV}/c^2\}$ и основных фонов:



Общая нормировка выполнена на $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, брэнчинги процессов из PDG.

Для сигнала положен $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a) = 1 \cdot 10^{-5}$, матричный эл-т см.: [Prisco Lo Chiatto UNIMORE/etd-10072021-091154]

Рис. [EPJC 84,266 (2024)]

Возможно значительно подавить фоновые процессы
ценой потери $\sim 1/2$ от ожидаемого сигнала (отбирая выше \uparrow)

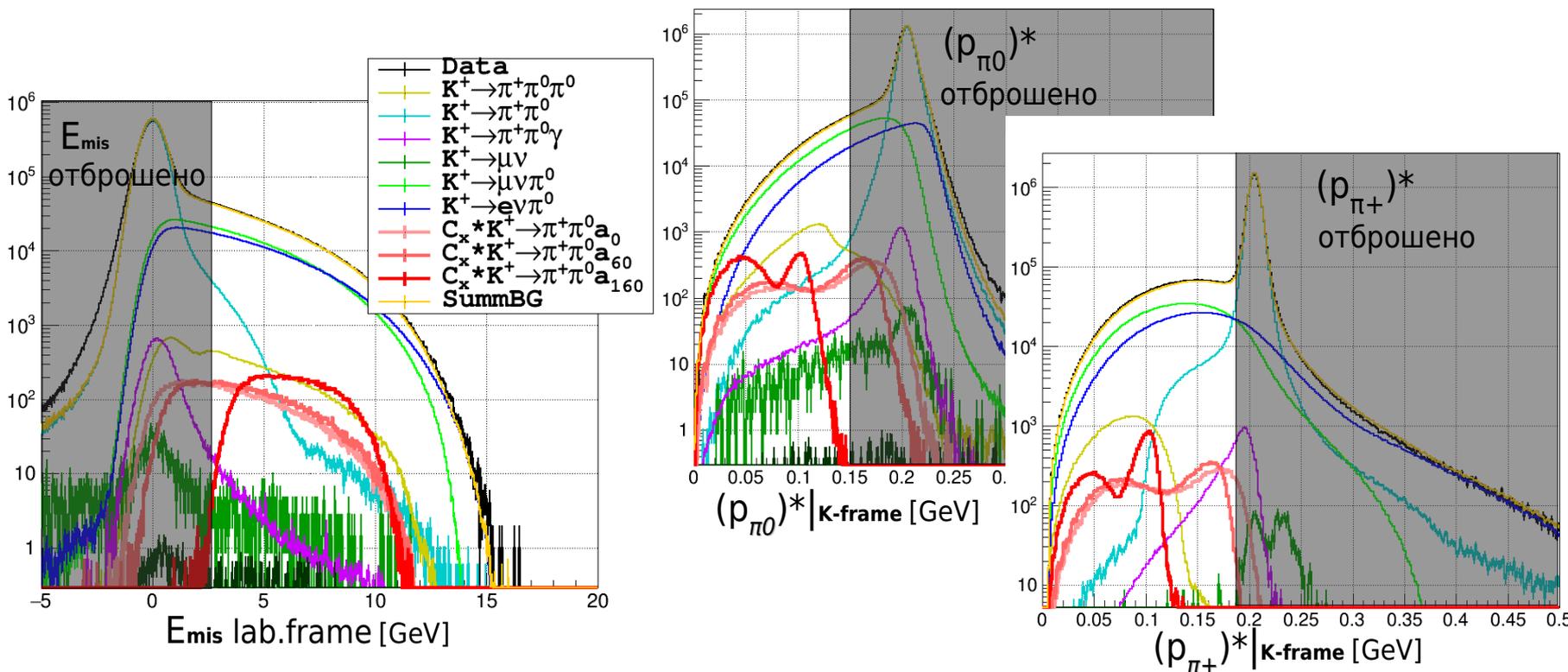
Подавление $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ (с потерянными 2γ)

7**) $E_{\text{mis}} = \{E(K^+) - E(\pi^+) - E(\pi^0)\} > 2.8 \text{ GeV}$ (подавляет также и сигнал)

8**) Импульс π^0 и π^+ в системе покоя каона (p)*

$(p_{\pi^0})^* < 150 \text{ MeV/c}$ и $(p_{\pi^+})^* < 189 \text{ MeV/c}$

NB: отборы 7**) и 8**) не используются для оценки эффективности Кп2, используемой в качестве нормировочного процесса для $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$



Подавление $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ (с потерянными 2γ)

7**) $E_{\text{mis}} = \{E(K^+) - E(\pi^+) - E(\pi^0)\} > 2.8 \text{ GeV}$ (подавляет также и сигнал)

8**) Импульс π^0 и π^+ в системе покоя каона (p)*

$(p_{\pi^0})^* < 150 \text{ MeV}/c$ и $(p_{\pi^+})^* < 189 \text{ MeV}/c$

NB: отборы 7**) и 8**) не используются для оценки эффективности $K\pi 2$ используемой в качестве нормировочного процесса для $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$

Подавление $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0$, $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0$ за счет калориметрии (от заряженного трека)

9эк) Экстраполяция трека сопровождается адронным ливнем в GAMS:

а) подавление возм. треков e^+ в GAMS: для соотв. кластера требуем $E/p < 0.83$

б) подавление кластера отвечающего мюонному треку в GAMS отбирая “ранний” адронный ливень (число ячеек кластера $N_{\text{cells}} > 4$ или $E > 1.9 \text{ GeV}$)

9ак) Экстраполяция трека сопровождается адронным ливнем в HCAL:

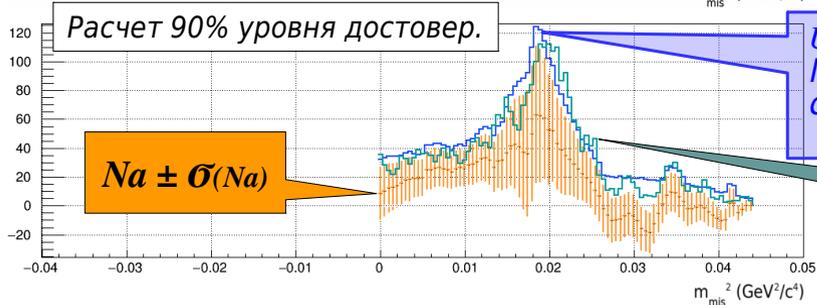
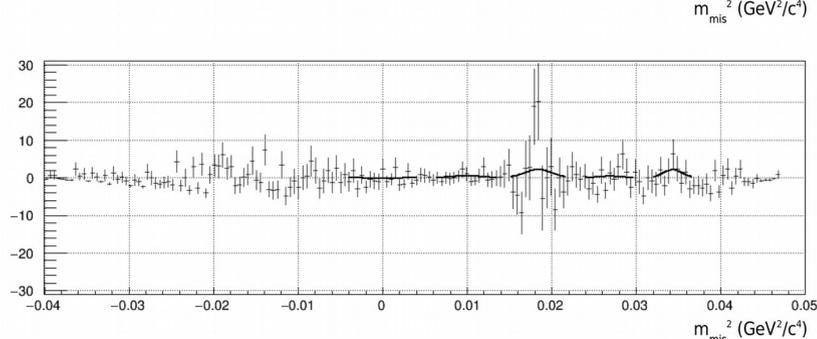
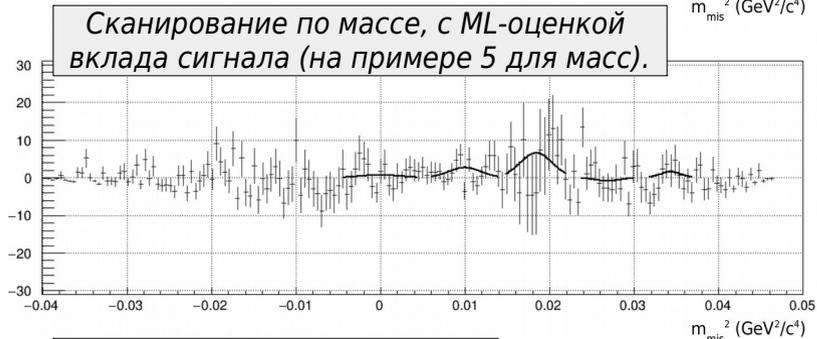
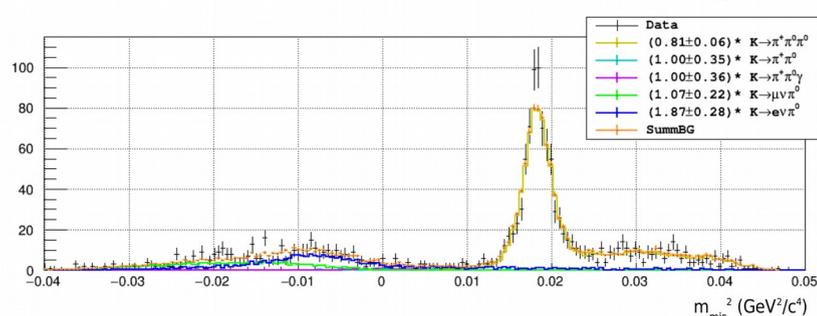
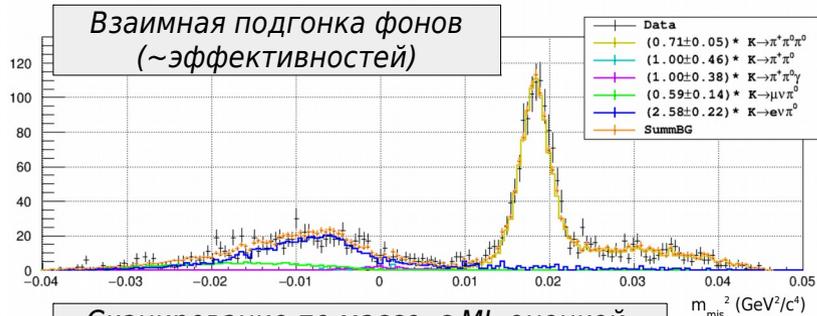
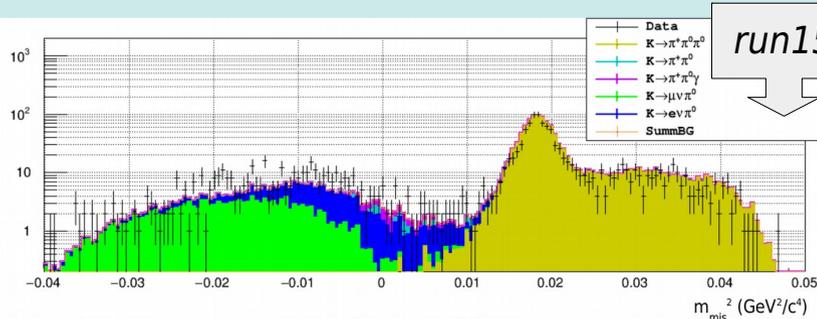
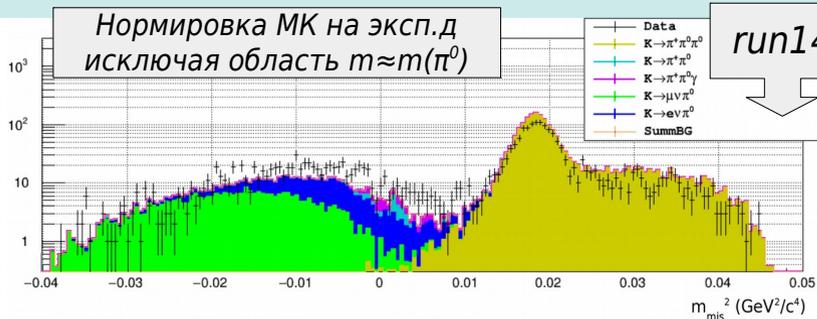
иначе, требуем надежный адронный ливень в GDA(HCAL)

или ($N_{\text{cells}} > 1 \ \&\& \ E/p > 0.67$)

или ($N_{\text{cells}} > 4$)

10) Отбрасываем события если сработал один из 4х мюонных счетчиков μC , отвечающий экстраполяции трека (немного ограничивает захват установки)

11) Вето = герметичность распадного объема: фотоны не должны пересекать стенки распадного объема (отбор по ΣE в охранной системе DV: $E > 100 \text{ MeV}$)

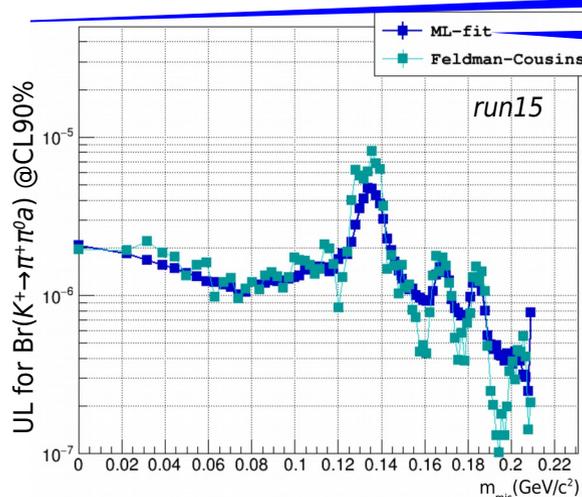
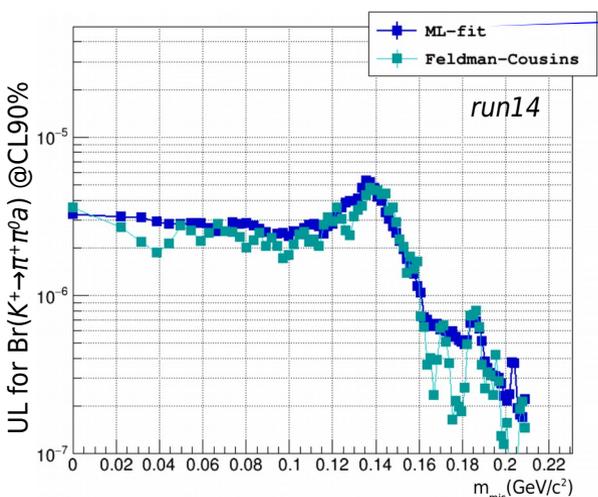


UL 90%CL для N_a
ML-подгонка по
форме сигнала
(в окне $\pm 2\sigma$)

$$N_a^{(Upp.Lim\ 90\%CL)} = 1.28 \sigma(N_a) + N_a^{(fit)}, \text{ для } N_a^{(fit)} \geq 0$$

$$N_a^{(Upp.Lim\ 90\%CL)} = 1.28 \sigma(N_a), \text{ для } N_a^{(fit)} < 0$$

UL 90%CL для N_a (Feldman-Cousins в окне $\pm 1.2\sigma$)



$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a) = Br(K\pi 2) \cdot (N_a / \epsilon_a) \cdot (\epsilon_{K\pi 2} / N_{K\pi 2})$$

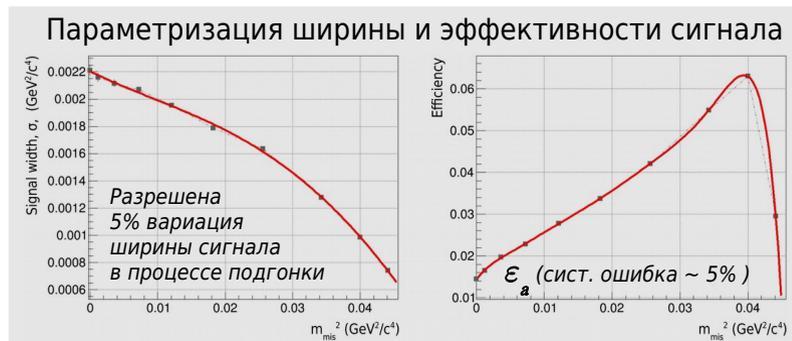
	run14	run15
$\epsilon_{K\pi 2}$	=0.069	=0.072
$N_{K\pi 2}$	=9.7млн	=6.1млн

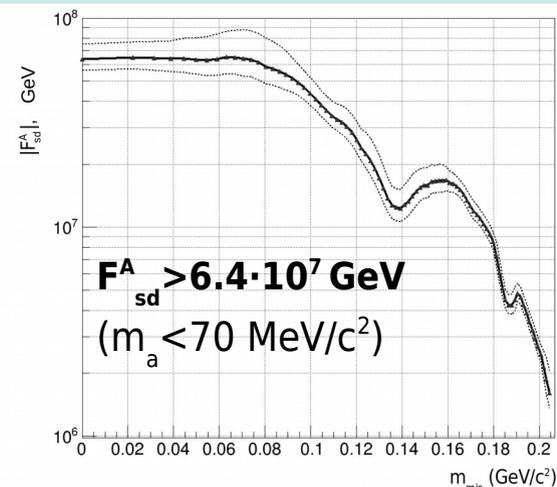
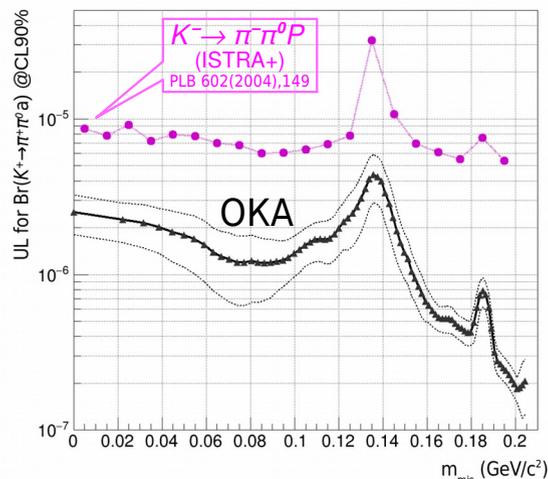
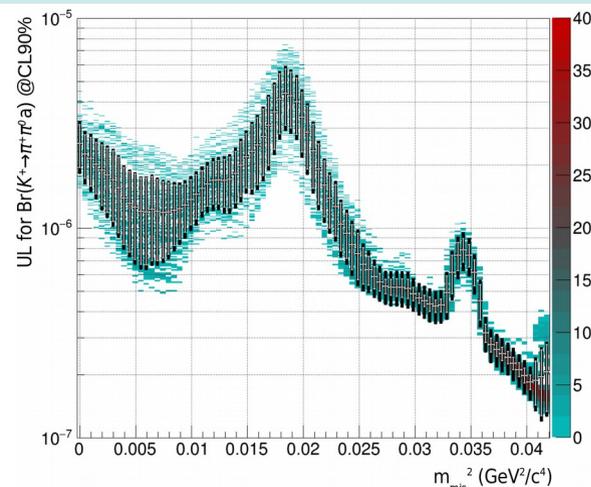
Сист. ошибка $(\epsilon_{K\pi 2} / N_{K\pi 2}) = 3.5\%$

Сист. ошибка на $Br = 14.8\%$ (сравнение с нормировкой на $K \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$)

Сист. ошибка $\approx 5\%$ (за счет неточностей измерения f_p и g_p формфакторов Ke_4 - входящ. в матр.эл-т.)

Дальнейшее изучение систематики: повторение анализа >100 раз - вариация отборов со случайной независимой сдвижкой каждого из стандартных отборов (равномерно внутри ± 1 ст.откл., определенного по МК разрешению или по эксп. разр.).





Для $m_a \approx 0$ ОКА дает лучшее эксп. ограничение $|F_{sd}^A|$ см. обзор:

В нейтронной звезде сосуществуют $\{p, n, e, \Lambda\}$, $\Lambda \rightarrow na \Rightarrow$ дополнит. механизм охлаждения протонейтронной звезды Сверхновая SN1987A $\Rightarrow F_{sd}^V, F_{sd}^A > 10^9$ GeV (оценки модельно зависимы!)

Наиболее надежная эксп. оценка из $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^0 a$

Ограничение на $|F_{sd}^A| > 4.4 \times 10^7$ GeV получено из анализа результатов по смешиванию $K^0 - \bar{K}^0$ путем сравнения вклада в параметр осцилляций $|\epsilon_K^{CM+a}| / |\epsilon_K^{CM}|$.
 \Rightarrow заметными неопредел., особенно для $|F_{sd}^V|$.

Компиляция из Camalich, Pospelov et.al., «Quark flavor phenomenology of the QCD axion» [Phys.Rev.D 102 015023 (2020)]

Flavors	Process	F_{ij}^V (GeV)	F_{ij}^A (GeV)	References
$s \rightarrow d$	$K^+ \rightarrow \pi^+ a$	6.8×10^{11}	...	[89]
	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$...	1.7×10^7	[108]
	$\Lambda \rightarrow na$ (decay)	6.9×10^6	5.0×10^6	[10]
	$\Lambda \rightarrow na$ (supernova)	$7.4 \times 10^{9\dagger}$	$5.4 \times 10^{9\dagger}$	
	$\Sigma^+ \rightarrow pa$	6.7×10^6	2.3×10^6	[10]
	$\Xi^- \rightarrow \Sigma^- a$	1.0×10^7	1.3×10^7	[10]
	$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^0 a$	1.6×10^7	2.0×10^7	[10]
	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda a$	5.4×10^7	1.0×10^7	[10]
	$K - \bar{K}$ (Δm_K)	$5.1 \times 10^{5\dagger}$	2.0×10^6	[10]
	(ϵ_K)	$0.9 \times 10^{6\dagger}$	4.4×10^7	[124]

Спасибо за внимание