



Исследование радиационных распадов каонов в эксперименте ОКА

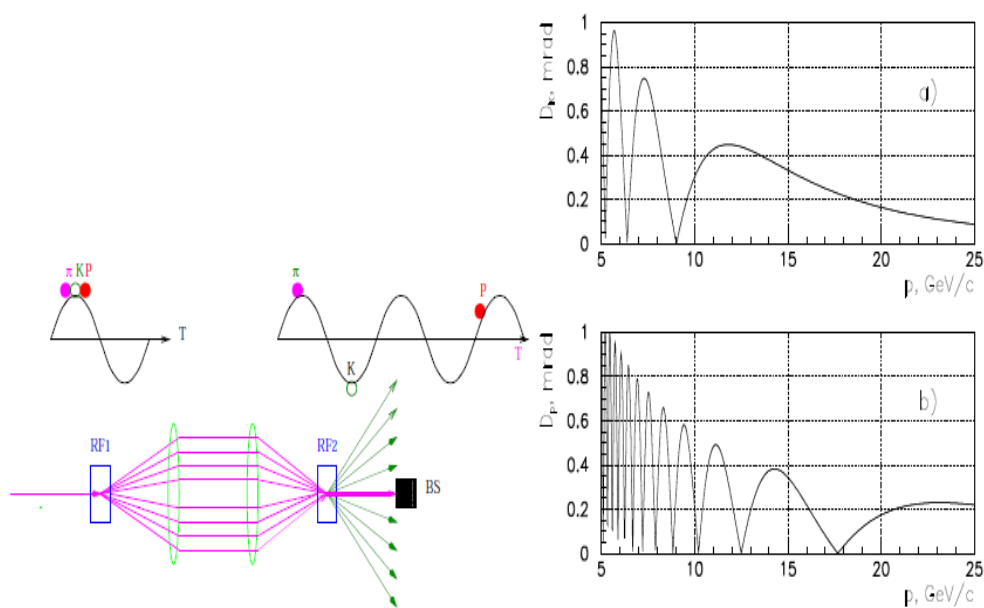
В.Ф. Образцов, ИФВЭ НИЦ “КИ”
эксперимент «ОКА» (ИФВЭ, ИЯИ РАН, ОИЯИ)
“ Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН”, Дубна,
01.04-05.04 2024

- ОКА пучок, детектор, данные
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$, измерение $F_V - F_A$;
- $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0 \gamma, \mu^+ \nu \pi^0 \gamma$ проверка $\chi_{PT} O(p^4)$ T-четность
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma, \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma$ проверка χ_{PT}



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

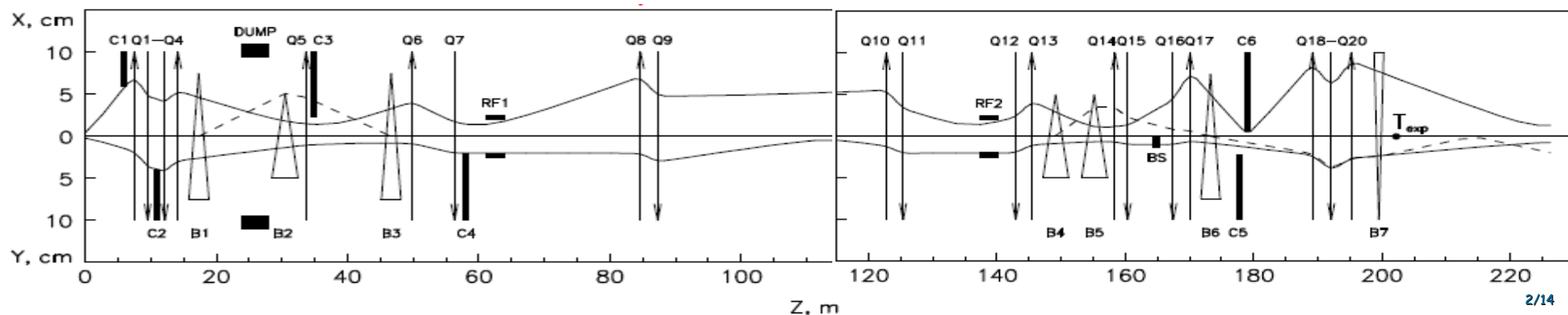
ВЧ- сепарация по схеме Панофского. Использует deflectory Карсруе-ЦЕРН.
 В ИФВЭ создана криогенная система, обеспечивающая охлаждение резонаторов сверхтекучим He.

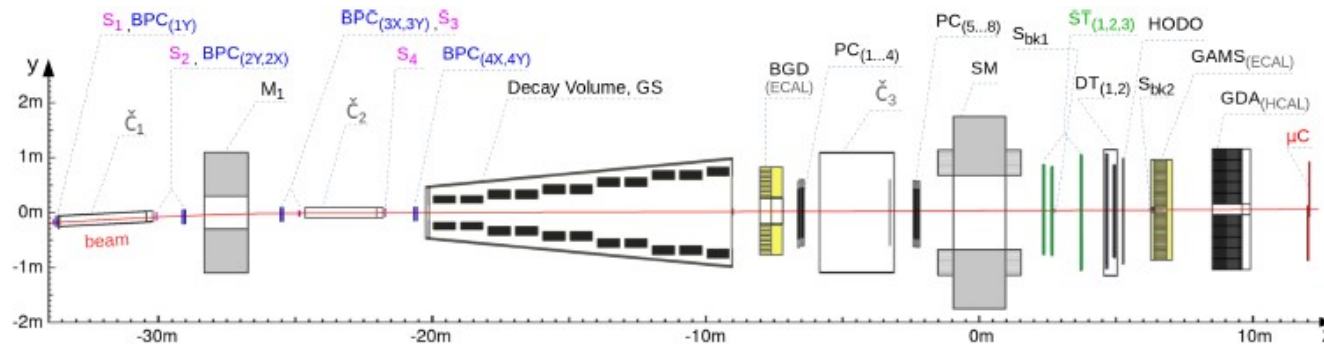


Параметры сверхпроводящих deflectory

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

Импульс протонного пучка	50-60 ГэВ
Интенсивность p пучка	7×10^{12} ppp
Энергия вторичного пучка	12.5, 17.7 ГэВ
Длина канала	~ 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), светосбор- WLS
3. ПК, ST, ДТ основного магнитного спектрометра: ~5000 кан. ПК (2 mm) + 1300 ST и ДТ(1 и 3 cm)
4. Матричный годоскоп ~300 каналов, светосбор WLS+SiPM
5. Магнит: апертура 200*140 см²
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:

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



RF1 дефлектор в канале



“Хвост” канала



Охранная система распадного объема



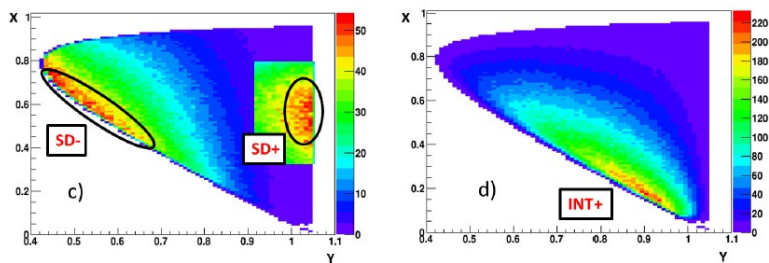
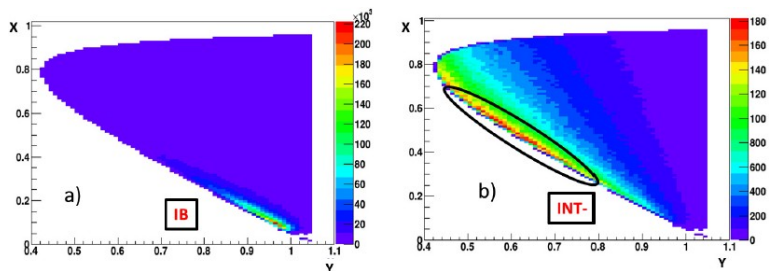
Общий вид установки ОКА



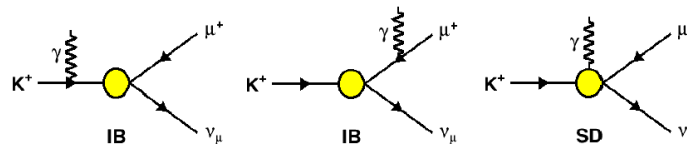
Straw и ДТ камеры, матричный годоскоп, электромагнитный калориметр ГАМС-2000



Исследование распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$



$$x = \frac{2 E_\gamma^{cm}}{m_K}; y = \frac{2 E_\mu^{cm}}{m_K}$$



$$\frac{d\Gamma}{dx dy} = A_{IB} f_{IB}(x, y) + A_{SD} [(F_V + F_A)^2 f_{SD+}(x, y) + (F_V - F_A)^2 f_{SD-}(x, y)] - A_{INT} [(F_V + F_A) f_{INT+}(x, y) + (F_V - F_A) f_{INT-}(x, y)]$$

$$f_{IB}(x, y) = \left[\frac{1-y+r}{x^2(x+y-1-r)} \right] \times \left[x^2 + 2(1-x)(1-r) - \frac{2xr(1-r)}{x+y-1-r} \right]$$

$$f_{SD+}(x, y) = [x+y-1-r][(1-x)(1-y)+r]$$

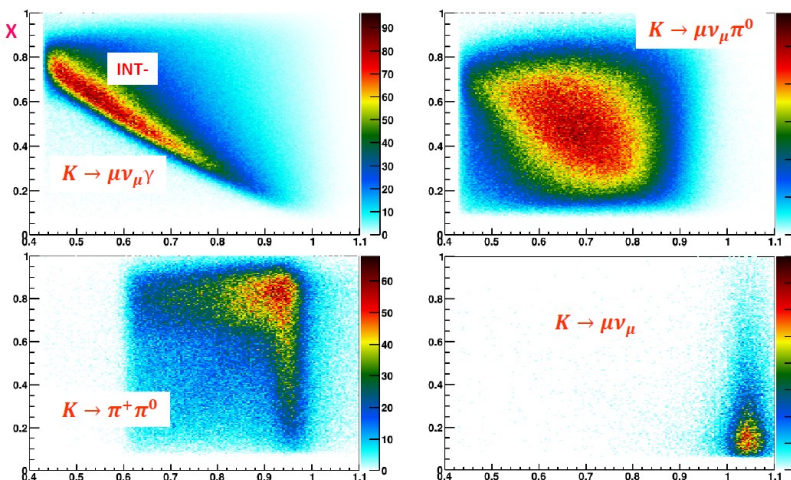
$$f_{SD-}(x, y) = [1-y+r][(x+y-1)(1-x)-r]$$

$$f_{INT+}(x, y) = \left[\frac{1-y+r}{x(x+y-1-r)} \right] \times [(1-x)(1-x-y)+r]$$

$$f_{INT-}(x, y) = \left[\frac{1-y+r}{x(x+y-1-r)} \right] \times [x^2 - (1-x)(1-x-y) - r]$$

$$x = \frac{2 E_\gamma^{cm}}{m_K}; y = \frac{2 E_\mu^{cm}}{m_K}$$

$$A_{IB} = \frac{\alpha}{2\pi} \Gamma_{K\mu^2} \frac{1}{(1-r)^2}; \quad A_{SD} = \frac{\alpha}{2\pi} \Gamma_{K\mu^2} \frac{1}{4r(1-r)^2} \left(\frac{m_K}{f_K} \right)^2; \quad A_{INT} = \frac{\alpha}{2\pi} \Gamma_{K\mu^2} \frac{1}{(1-r)^2} \frac{m_K}{f_K}; \quad r = \frac{m_\mu}{m_K}$$



$$\chi_{PTO}(p^4): F_V = \frac{\sqrt{2} M_K}{8 \pi^2 F_\pi} = 0.096; \quad F_A = \frac{4 \sqrt{2} M_K}{F_\pi} (L_9^r + L_{10}^r) = 0.042; \quad F_V - F_A = 0.054$$

$$\chi_{PTO}(p^6): F_V = F_V(0)(1 + \lambda(1-x)); \quad F_V(0) = 0.082; \quad \lambda = 0.4; \quad F_A = 0.034$$

VALUE	CL%	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	CHG	
-0.21 ± 0.06		22K	DUK	2011	ISTR	-
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••						
-0.24 to 0.04	90	2588	ADLER	2000B	B787	+
-2.2 to 0.6	90		DEMIDOV	1990	XEBC	
-2.5 to 0.3	90		AKIBA	1985	SPEC	

References:

DUK	2011	PL B695 59	Extraction of Kaon Formfactors from $K^- \rightarrow \mu \nu \gamma$ Decay at ISTR+ Setup		
ADLER	2000B	PRL 85 2256	Measurement of Structure-Dependent $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \mu \gamma$ Decay		
DEMIDOV	1990	SJNP 52 1006	Measurement of the $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \mu \gamma$ Decay Probability		
AKIBA	1985	PR D32 2911	A Study of the Radiative Decay $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \mu \gamma$		

Основные источники фона

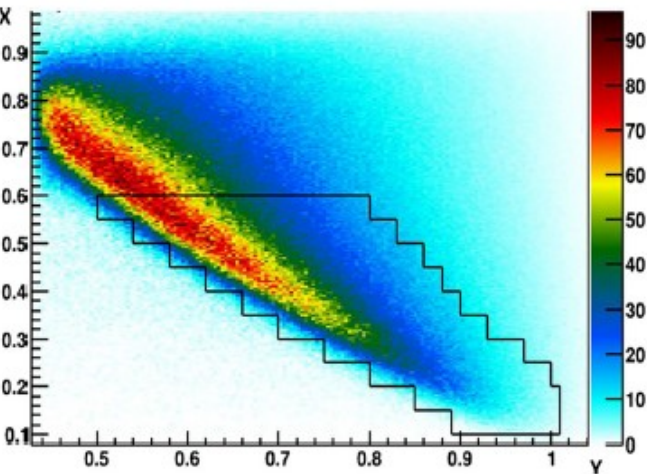
y



$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ отбор событий, анализ

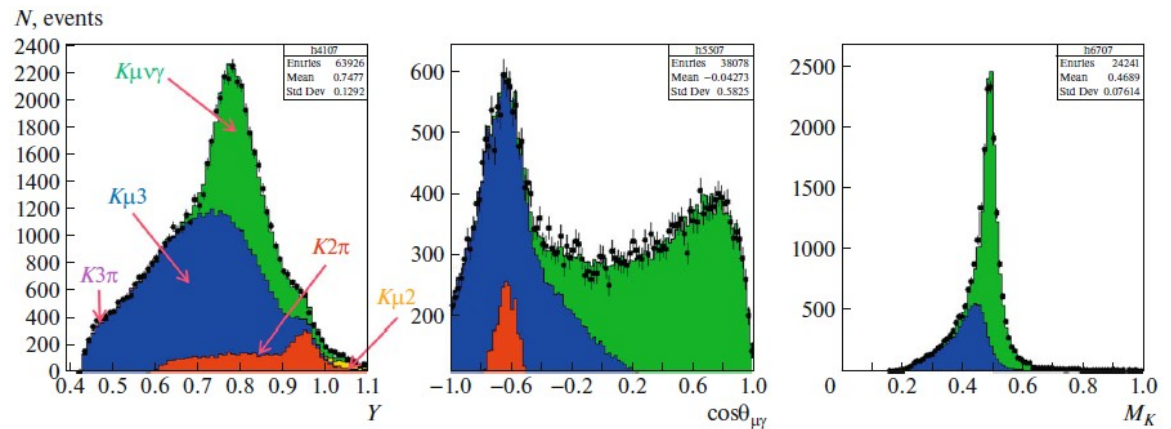
- 1 пучковый K^+ трек
- 1 вторичный трек μ in ГАМС, ГДА-100 и μ С
- Вершина внутри DV
- 1 е.т. ливень в ГАМС $E > 1$ ГэВ не ассоциированный с треком
- $E_{GS} < 10$ МэВ ; $E_{EGS} < 100$ МэВ

- Процедура фитирования_
- x, y разделена на полосы $\Delta x = 0.05$ (~ 12 МэВ)
- Строим y -распределение; выбираем $\{y_{min}, y_{max}\}$; строим $\cos\theta_{\mu\gamma}^*$; выбираем \cos_{min} ; строим M_K
- Одновременный фит 3 гистограм, параметры- N_{sig}, N_{bkg} форма сигнала(ИВ) и фона из МК
- Для корректного вычисления ошибок, фитируем только M_K – plot с начальными параметрами одновременного фита.



Geant3 МК: 22М сиг. , 624М фон.
только ИВ в сигнале

В итоге получаем 144115 ± 380 сигнальных соб. $25 < E_\gamma^* < 150$ MeV



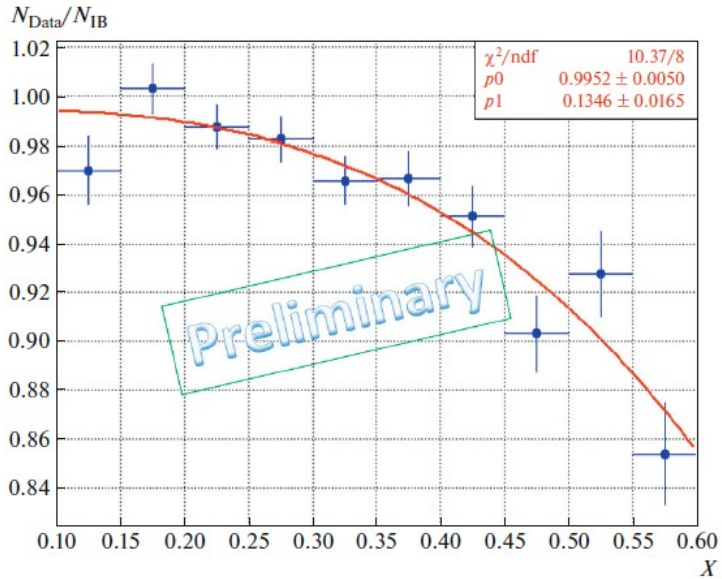
Полоса #6 ($0.35 < x < 0.4$)

$$M_K^2 = (p_\mu + p_\nu + p_\gamma)^2$$

$$\vec{p}_\nu = \vec{p}_K - \vec{p}_\mu - \vec{p}_\gamma ; E_\nu = |\vec{p}_\nu|$$



$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$, определение F_v-F_a



Отношение N_{DATA} / N_{IB} как функция x (синие точки)

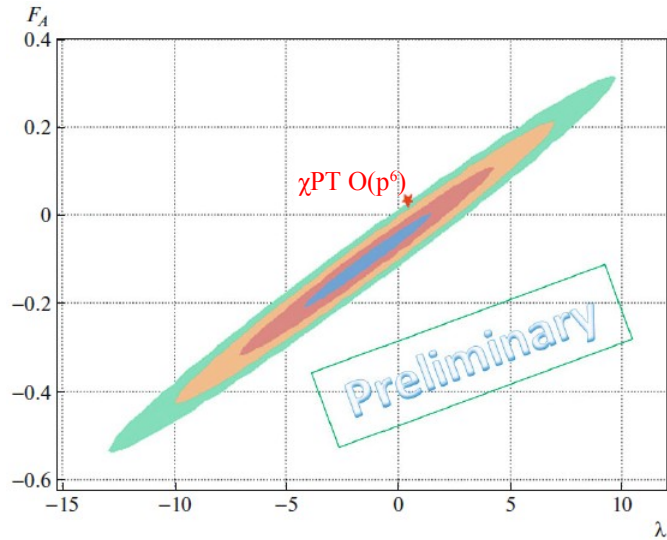
χ PT $O(p^4)$ fit : $F_V = 0.096$; $F_A = 0.042$; $F_V - F_A = 0.054$

Красная линия - результат подгонки $p_{sig}(x) = p0(1 + p1 \cdot \phi_{INT.}(x)/\phi_{IB}(x))$

$p0$ - нормировка $p0 = 0.9952 \pm 0.005$; $p1 = F_V - F_A = 0.135 \pm 0.017$

$\phi_{INT.}(x)$ - x -распределение реконструированного МК-сигнала с весом

$w_{INT.} = (M_K/F_K) f_{INT.}(x_{true}, y_{true})$; $\phi_{IB}(x)$ - тоже, но с весом $w_{IB} = f_{IB}(x_{true}, y_{true})$



χ PT $O(p^6)$ fit: $F_V = F_V(0)(1 + \lambda(1-x))$; $F_V(0) = 0.082$; $\lambda = 0.4$ $F_A = 0.034$

- Фит с фиксированными χ PT $O(p^6)$ параметрами: $\chi^2/NDF = 29.0/9$
- $F_V(0)$ и F_A из χ PT $O(p^6)$, λ -свободный параметр $\rightarrow \lambda = 2.23 \pm 0.44$; $\chi^2/NDF = 11.8/8$
- $F_V(0)$ из χ PT $O(p^6)$, λ , F_A -свободные параметры \rightarrow (корреляционный плот)



Распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ результаты

Систематика

- ❑ Не идеальное описание сигнала и фона МК: $1.3 < \chi^2/NDF < 1.7$ Стат.- ошибка в бинах N_{DATA}/N_{IB} множится на $\sqrt{(\chi^2/NDF)}$.
Получаем $F_V - F_A = 0.138 \pm 0.026$ (номинал 0.134 ± 0.021) $\rightarrow \sigma_{shape} = 0.012$
- ❑ Ширина -х- полосы: $F_V - F_A$ определяется для 2 значений ширины $\Delta x = 0.035, \Delta x = 0.07$ (номинал 0.05) $\rightarrow \sigma_{\Delta x} = 0.008$
- ❑ Число -х- полос: убираем один крайний левый(правый) бин. $\rightarrow \sigma_x = 0.005$
- ❑ Отбор по -у- в полосах: вместо максимума по $S/\sqrt{S+B}$ используем FWHM из сигнального МК $\rightarrow \sigma_y = 0.005$
- ❑ Учет INT+ : Добавляем в фит INT+ . Используем результат BNL E787 $|F_V + F_A| = 0.165 \pm 0.013$
 $\rightarrow \sigma_{INT+} = 0.018$
 $\sigma_{SYS} = 0.024$

“ОКА”

$$F_V - F_A = 0.135 \pm 0.017_{stat} \pm 0.024_{syst}$$

$\chi^2_{PT} O(p^4)$

$$F_V = \frac{\sqrt{2} M_K}{8 \pi^2 F_\pi} = 0.096 ; F_A = \frac{4 \sqrt{2} M_K}{F_\pi} (L_9^r + L_{10}^r) = 0.042$$

$$F_V - F_A = 0.054$$

различие 2.8σ

$\chi^2_{PT} O(p^6)$

эксп. точка вне 3σ -эллипса

Lattice calculations: $F_V - F_A = (0.083 \pm 0.013) - (0.019 \pm 0.012) \cdot x_\gamma$ Phys. Rev. D 103, 014502 (2021) (2σ)

E χ A (gauge non-local effective chiral action) S.Shim et al.,

Phys.Lett. B795 (2019)438-445

$$F_V - F_A = 0.08$$

(1.9σ)

Результат согласуется с ИСТРА+ :

$$F_V - F_A = 0.21 \pm 0.04_{stat} \pm 0.04_{syst} (1.17 \sigma)$$

И с (модельно-зависимым) результатом BNL E865 ($K^+ \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^-$)

$$F_V - F_A = 0.077 \pm 0.026 (1.47 \sigma)$$

Ожидается удвоение статистики к концу 2024

Исследование распада $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu \nu \gamma$ ($K\mu 3\gamma$)

Этот распад дополняет $Ke3\gamma$, исследованный ОКА и NA62 . ОКА публикации: JETP Lett. v.116 No 9 (2022), EPJC(2021) 81. $K^+\mu 3\gamma$ был обнаружен ИСТРА+ и КЕК К470 в 2006 и исследовался BNL E787 в 2010.

Аналогичный распад K^0 обнаружен NA48 в 1998 и позже изучался KTeV в 2005

Имеются детальные вычисления Br и T-нечетной асимметрии:

$$\xi = \vec{p}_\gamma \cdot (\vec{p}_l \times \vec{p}_\pi) / m_K^3 \quad A_\xi = \frac{N_{\xi>0} - N_{\xi<0}}{N_{\xi>0} + N_{\xi<0}}$$

$\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma) / \Gamma_{total}$ $\Gamma_{\mu/\Gamma}$

VALUE (10^{-5})	CL%	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
1.25 ± 0.25	OUR AVERAGE					
1.10 ± 0.32 ± 0.05		23	¹ ADLER 2010	B787		30 < E _γ < 60 MeV
1.46 ± 0.22 ± 0.32		153	² TCHIKILEV 2007	ISTR	-	30 < E _γ < 60 MeV
• • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •						
2.4 ± 0.5 ± 0.6		125	SHIMIZU 2006	K470	+	E _γ > 30 MeV; Θ _{μγ} > 20°
< 6.1	90	0	UJUNG 1973	HLBC	+	E(γ) > 30 MeV

¹ Value obtained from $B(K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma) = (2.51 \pm 0.74 \pm 0.12) \times 10^{-5}$ obtained in the kinematic region $E_\gamma > 20$ MeV, and then theoretical $K_{\mu 3\gamma}$ spectrum has been used. Also $B(K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma) = (1.58 \pm 0.46 \pm 0.08) \times 10^{-5}$, for $E_\gamma > 30$ MeV and $\theta_{\mu\gamma} > 20^\circ$, was determined.

² Obtained from measuring $B(K_{\mu 3\gamma}) / B(K_{\mu 3})$ and using PDG 2002 value $B(K_{\mu 3}) = 3.27\%$. $B(K_{\mu 3\gamma}) = (8.82 \pm 0.94 \pm 0.86) \times 10^{-5}$ is obtained for $5 \text{ MeV} < E_\gamma < 30 \text{ MeV}$.

Kl3γ теория, эксперимент $E_\gamma > 30 \text{ MeV } \theta_{\mu\gamma} > 20^\circ$	Br $K\mu 3\gamma$ $\times 10^5$	Br $Ke3\gamma$ $\times 10^4$	A_ξ $K\mu 3\gamma$ QED FSI	A_ξ $Ke3\gamma$ QED FSI
Bijnens et al. (1993) χ PT O(p ⁶)	1.9	2.8		
Braguta et al. (2002) χ PT O(p ⁴)	2.15	3.18	1.14x10 ⁻⁴	-0.59 x 10 ⁻⁴
Khriplovich, Rudenko (2011)	1.81 ± 0.2	2.72 ± 0.1	2.38 x 10 ⁻⁴	-0.30 x 10 ⁻⁴
NA62(2023)		3.087 ± 0.037		< 8.6 x 10 ⁻³
ОКА (2021), (2022)	2.0 ± 0.1	2.98 ± 0.094	< 0.1	< 13 x 10 ⁻³

Из Braguta et al. (2003) для НФ $K\mu 3\gamma$:

$$A_\xi = -(3.6 \cdot 10^{-3} \text{Im}(g_s) + 1.2 \cdot 10^{-2} \text{Im}(g_p) + 1.0 \cdot 10^{-2} \text{Im}(g_v + g_a))$$

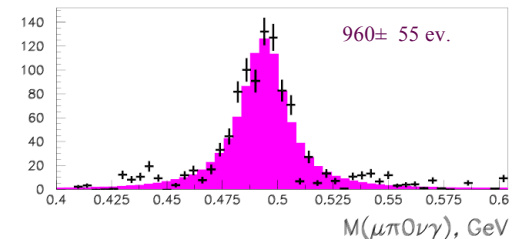
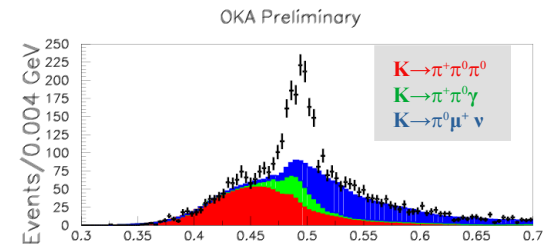
Чувствительность распада $Ke3\gamma$ к НФ заметно меньше :

$$A_\xi = -(2.9 \cdot 10^{-6} \text{Im}(g_s) + 3.7 \cdot 10^{-5} \text{Im}(g_p) + 3.0 \cdot 10^{-3} \text{Im}(g_v + g_a))$$

Отбор событий

- 1 пучковый K^+ трек
- 1 вторичный трек μ in ГАМС, ГДА-100 и μ С
- Вершина распада внутри DV
- 3 е.м. ливня в ГАМС с $E > 0.6$ ГэВ не ассоц. с треком
- Выделение π^0 $|m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0}| < 15 \text{ MeV}$ (лучшая комбинация)
- $E_{miss} > 0.5$ ГэВ
- Фотон в ГАМС (не на границах)
- $E_{GS} < 10$ МэВ ; $E_{BGD} < 100$ МэВ
- Нет дополнительных сегментов треков после магнита
- Miss-масса $(P_K - P_{\pi^+} - P_{\pi^0})^2 < 0.014 \text{ GeV}^2$ (против $K \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$)

30 MeV < E_γ < 60 MeV



Br : Для нормировки используется $K \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0$

$$\text{Br}(K\mu 3\gamma)/\text{Br}(K\mu 3) = (4.5 \pm 0.25 \text{ (stat)}) \cdot 10^{-4}, \quad 30 \text{ MeV} < E_\gamma^* < 60 \text{ MeV}$$

Из PDG: $\text{Br}(K\mu 3) = 3.352\%$:

$$\text{Br}(K\mu 3\gamma) = (1.49 \pm 0.085 \text{ (stat)}) \cdot 10^{-5}, \quad 30 \text{ MeV} < E_\gamma^* < 60 \text{ MeV}$$

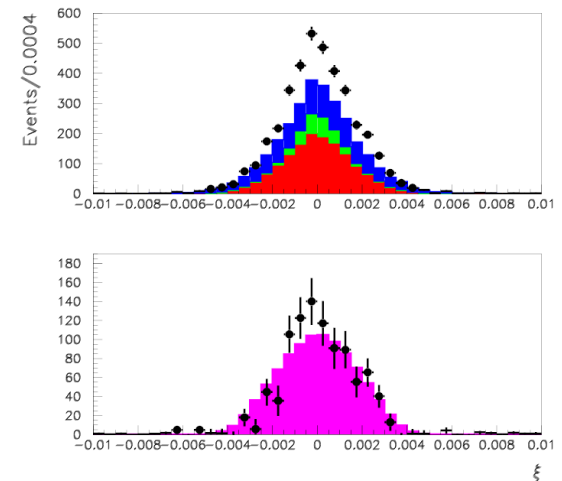
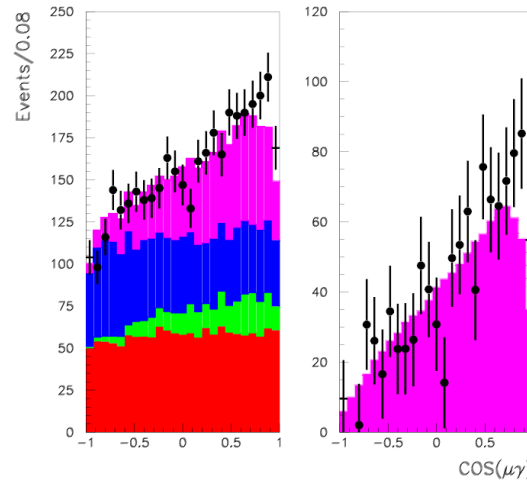
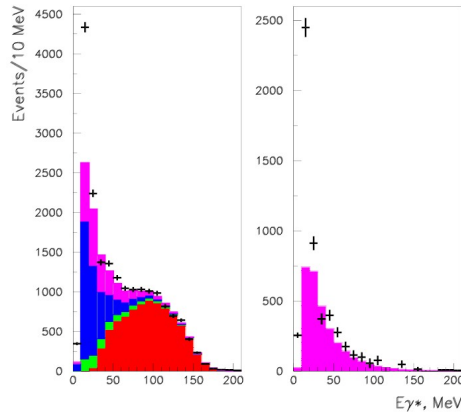
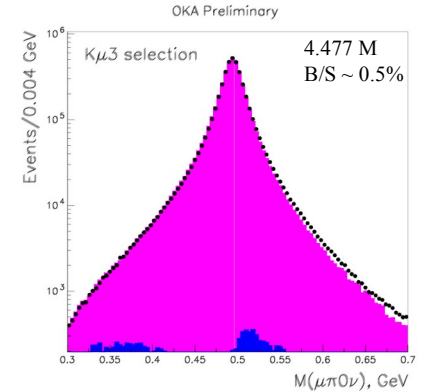
Согласуется с результатом ИСТРА+, стат. ошибка в 3 раза меньше.

Для сравнения с теорией :

$$\text{Br}(K\mu 3\gamma) = (2.0 \pm 0.1 \text{ (stat)}) \cdot 10^{-5}, \quad E_\gamma^* > 30 \text{ MeV}, \theta_{\mu\gamma} > 20^\circ$$

Bijnens et al. $\chi_{PT} O(p^6)$ 1.9×10^{-5} , Braguta et al. $\chi_{PT} O(p^4)$ 2.15×10^{-5} , Khriplovich et al. 1.8×10^{-5}

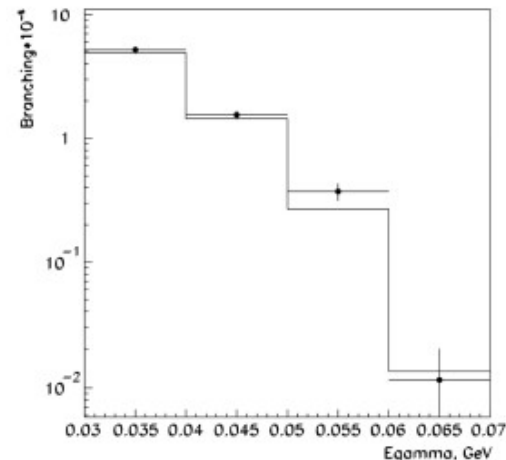
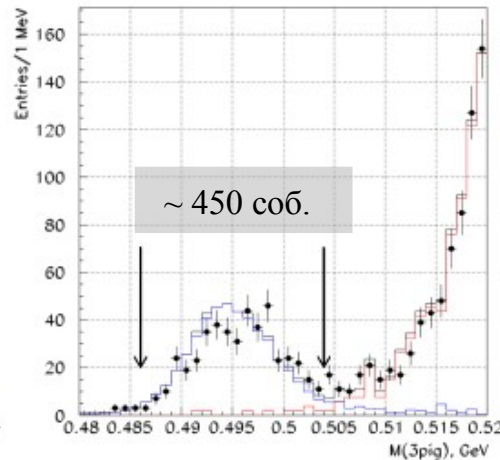
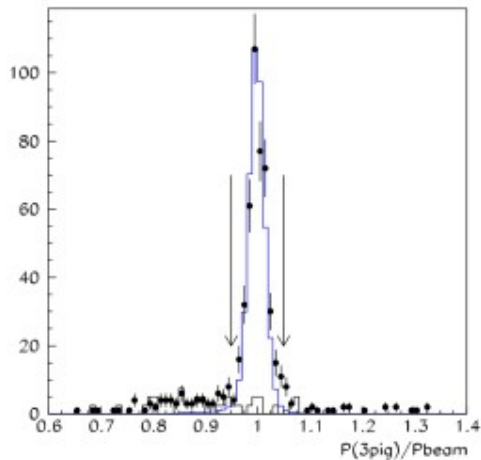
T-нечетная асимметрия: $A_\xi = -0.006 \pm 0.069$



Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$ Eur.Phys.J. C79 (2019) no.4, 296

G. D'Ambrosio, G. Ecker, G. Isidori, H. Neufeld “The present experimental status of $K3\pi$ decays is rather meager”
 χ 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.



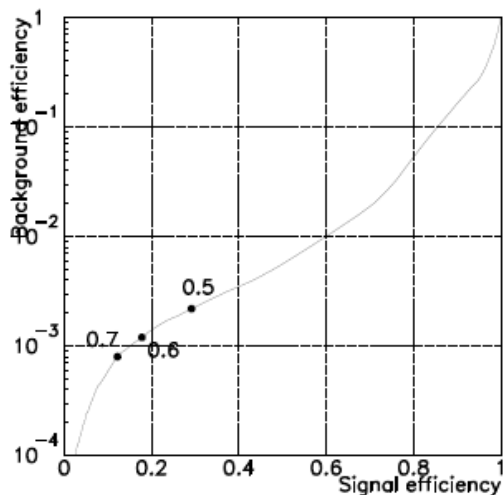
Нормировка на $N(K \rightarrow 3\pi) \sim 20M$
 $Br(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma) = (7.1 \pm 0.4_{\text{стат}} \pm 0.3_{\text{сист}}) \cdot 10^{-6} \quad E_\gamma^* > 30 \text{ МэВ}$
 χ PT $O(p^4) \quad 6.65 \cdot 10^{-6}$

Исследование этого распада продолжается на ~ 20 раз большей статистике NA62

Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0\gamma$ Eur.Phys.J. принят к печати

Этот распад дополняет $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$, меньше заряженных частиц в конечном состоянии

$K^- \rightarrow \pi^-\pi^0\pi^0\gamma$ искали на ИСТРА В.Н. Болотов и др., Письма в ЖЭТФ, 1985 т.42, вып.9, с.390-392
5 соб. $E_\gamma^* > 10$ МэВ, оценен Br.



Отбор событий (стартуем с $3.6 \cdot 10^9$ событий)

- 1 пучковый K^+ трек
 - 1 вторичный трек, $\theta > 2$ мрад, $\#$ (μC), ϵ (E/p ГАМС)
 - Вершина распада внутри DV, $CDA < 1$ см.
 - 5 э.м. ливней в ГАМС с $E > 0.5$ ГэВ не ассоц. с треком
- Выделение $\pi^0\pi^0$: $(m_{\gamma_1\gamma_2} - m_{\pi^0})^2 + (m_{\gamma_3\gamma_4} - m_{\pi^0})^2$ (лучшая комбинация)

230К событий, основной фон - $K \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$ (x 5000)

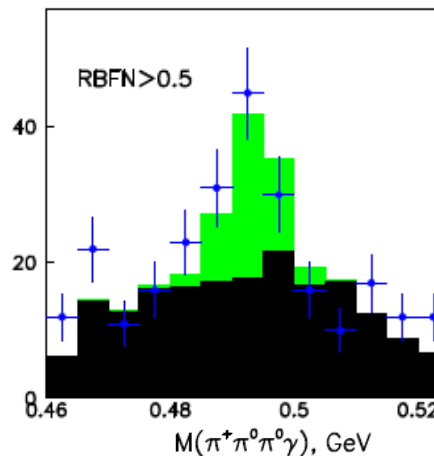
Далее используем NN (Radial Basis Function Network RFBN)

Входные параметры для NN:

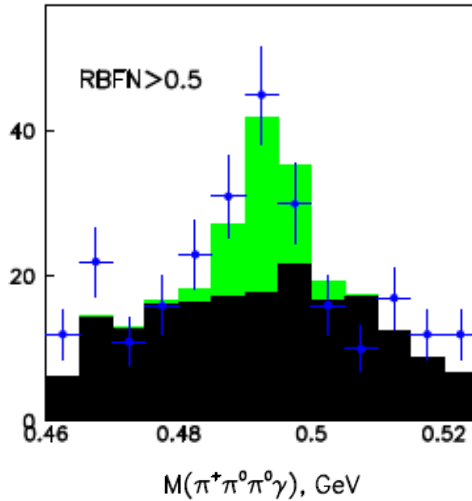
- $\Delta E = E_{\pi^+} + \Sigma E_{\gamma_i} - E_{\text{пучок}}$
- E_{γ_5} энергия свободного(5-го) гамма
- d_{γ_5} расстояние от 5-го гамма до трека на плоскости ГАМС
- χ^2 фита по форме ливня “свободного” фотона
- χ^2 3C-фита $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$
- χ^2 3C-фита $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0\gamma$
- $M(\pi^+\pi^0\pi^0)$

Иллюстрация работы NN: при выборе порога RFBN > 0.6 фон Подавляется в 1000 раз при эффективности к сигналу 0.2

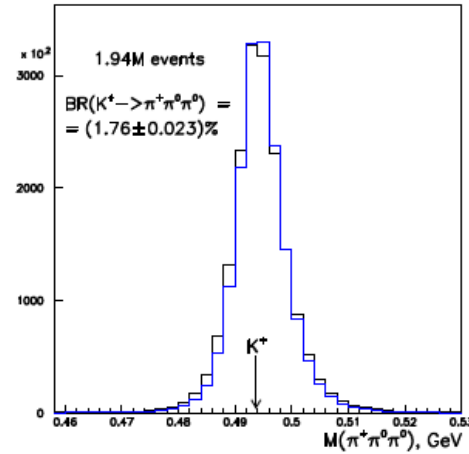
В пике 53.8 ± 13 соб.
P-value для нулевой гипотезы- $9 \cdot 10^{-5}$



Распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0\gamma$ Eur.Phys.J. принят к печати

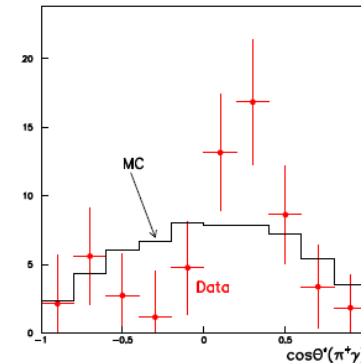
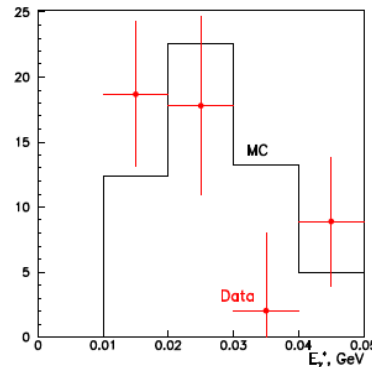


53.8 ± 13 соб.



Нормировка на $N(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0) \sim 2M$
 $Br(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0\gamma) = (3.7 \pm 0.9_{\text{стат}} \pm 0.3_{\text{сист}}) \cdot 10^{-6} \quad E_\gamma^* > 10 \text{ МэВ}$
 $Br(\chi_{PT} O(p^4)) = 3.76 \cdot 10^{-6}$

Получены также спектры по E_γ^* и $\cos\theta_{\pi\gamma}$
 в системе K^+



Заключение

- ✓ Радиационный распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ исследован на статистике $\sim 144K$ событий для $25 \text{ МэВ} < E_\gamma^* < 150 \text{ МэВ}$.
Наблюдается деструктивная интерференция IB и SD-. Измерена разность векторного и аксиального формфакторов $F_V - F_A$:

$$F_V - F_A = 0.135 \pm 0.017_{\text{стат}} \pm 0.024_{\text{сист}}$$

Что отличается на 2.8σ от $\chi^2PT O(p^4)$ и на 1.5σ от вычислений на решетках и $E\chi A$.

- ✓ Распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0 \gamma$ исследован на статистике $\sim 1K$ событий в диапазоне $E_\gamma > 30 \text{ МэВ}$.
Измерена относительная вероятность:

$$Br(K\mu 3\gamma) = (1.98 \pm 0.1_{\text{стат}}) \cdot 10^{-5}$$

Что можно сравнить с предсказаниями $\chi^2PT O(p^4)$ $2.15 \cdot 10^{-5}$; $\chi^2PT O(p^6)$ $1.9 \cdot 10^{-5}$

Получен верхний предел на T-нечетную асимметрию:

$$A_\xi = -0.006 \pm 0.069 \quad (A_\xi < 0.1 \text{ 90\% C.L.})$$

- ✓ Впервые зарегистрирован редкий распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma$ наблюдается ~ 50 событий с $E_\gamma > 10 \text{ МэВ}$.
Измерена относительная вероятность:

$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma) = (3.7 \pm 0.9_{\text{стат}} \pm 0.3_{\text{сист}}) \cdot 10^{-6} \quad E_\gamma^* > 10 \text{ МэВ}$$

Что можно сравнить с предсказаниями $Br(\chi^2PT O(p^4)) = 3.76 \cdot 10^{-6}$

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-0051