

Редкие распады каонов

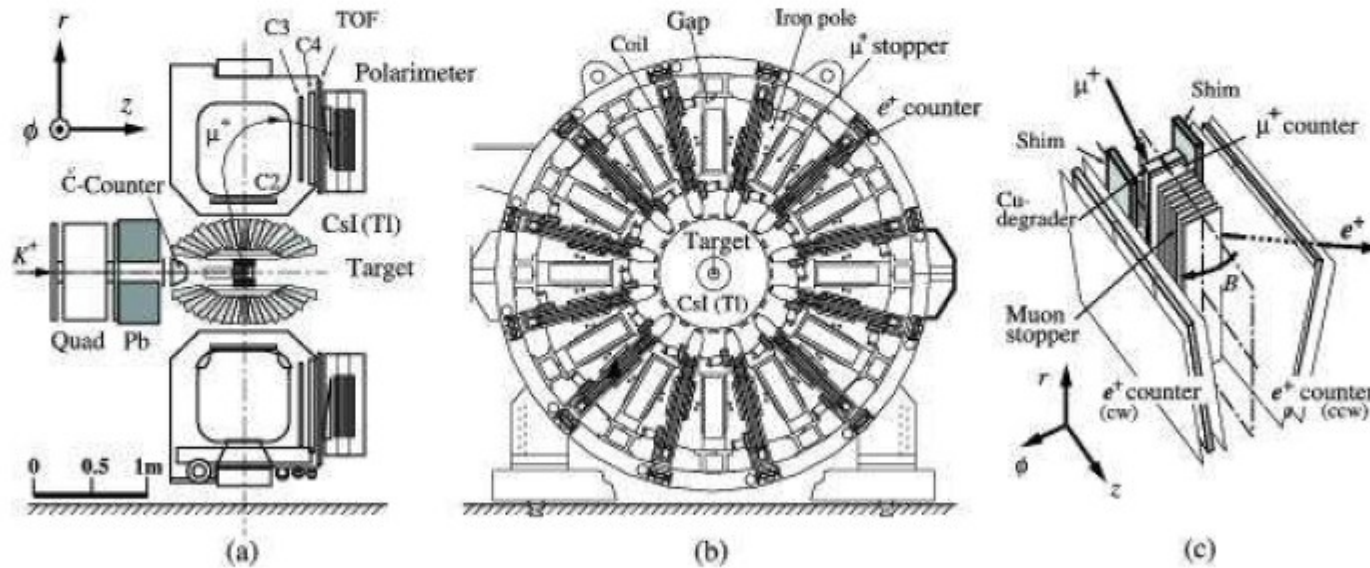
В.Ф. Образцов, “НИЦ КИ” - ИФВЭ, Протвино
ЮГК-70, ИЯИ РАН, 5 Октября 2021

- Эксперименты E246 КЕК, E949(E787) AGS BNL
- Исследование супер-редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в NA62
- Исследование распадов K^+ на установке ОКА

• σ_{\perp} in $K \rightarrow \mu\nu\pi^0$ (KEK E246)

$$\sigma_{\perp}^{\mu} = \frac{\vec{\sigma}_{\mu} \cdot (\vec{p}_{\pi} \times \vec{p}_{\mu})}{|\vec{p}_{\pi} \times \vec{p}_{\mu}|} \sim m_K \cdot m_{\mu} \cdot \text{Im}\xi; \xi = f_{-}/f_{+} \text{ Unique feature: } \sigma_{\perp}^{FSI} \sim 4 \cdot 10^{-6}$$

In some models (Weinberg multi-Higgs), $\sigma_{\perp} \sim 10^{-2}$



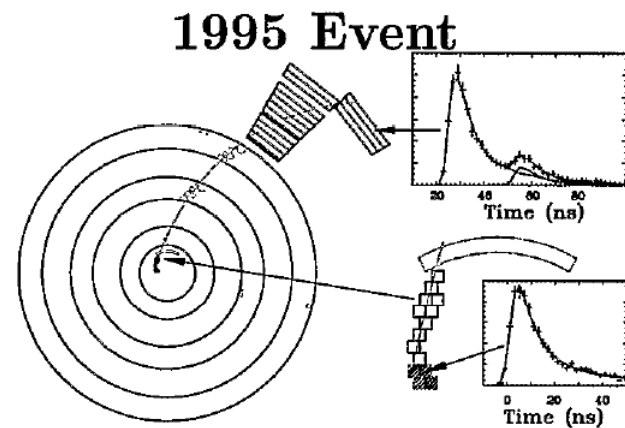
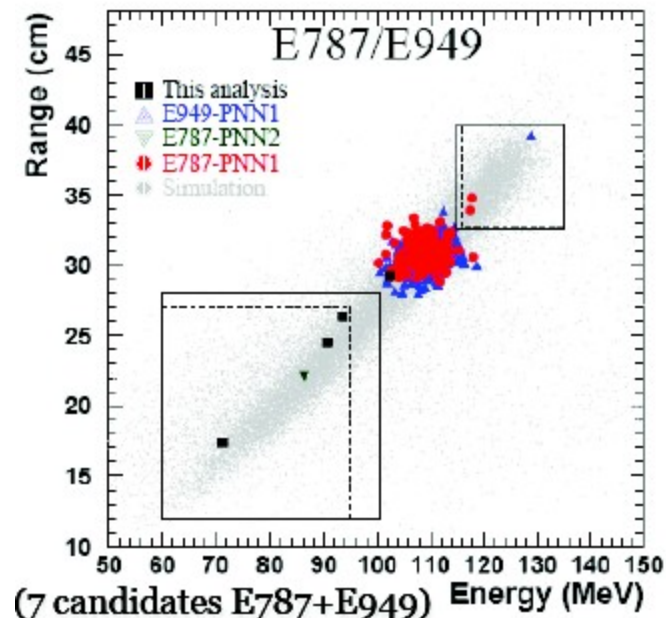
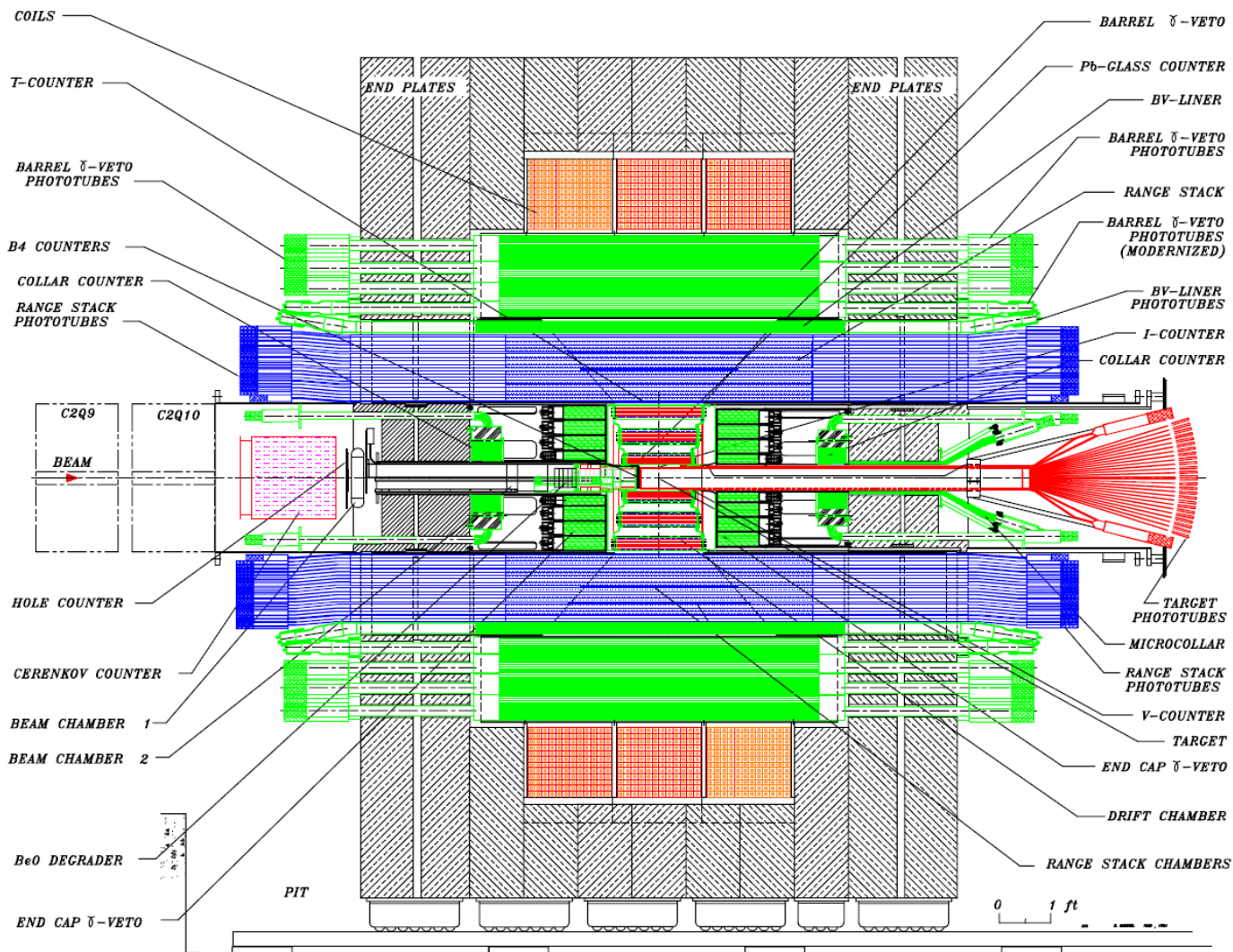
$$\sigma_{\perp}^{K\mu 3} < 4.3 \cdot 10^{-3} \text{ 90\% C.L.} \rightarrow |\text{Im}\xi| < 1.3 \cdot 10^{-2}; \sigma_{\perp}^{K\mu 2\gamma} < 3.1 \cdot 10^{-2} \text{ 90\% C.L.}$$

$E \times B$ separated 550-600 MeV K^+ beam(K5);

12 GeV PS 2.7 Tr/cycle; 0.6/3 sec. cycle; $2.7 \times 10^5 K^+$ /cycle; 15% K^+

- э.м. калориметр 768 счетчиков CsI(Tl)
- Набор данных 1996-2000 гг. $\sim 4\text{M } K\mu 3$

E949(E787) AGS BNL распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

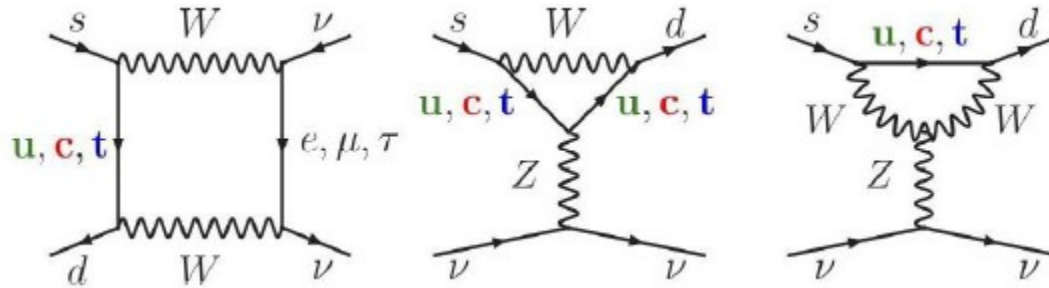


$E \times B$ separated 690 MeV K^+ beam (LESB3);

30 GeV AGS 65 Tp/cycle; 4.1/6.5 sec. cycle; $3 \times 10^6 K^+$ /cycle; 70% K^+

E949 был принят с 60 неделями пучкового времени, работал 12 недель в 2002 г.

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



FCNC – процесс, подавлен GIM, $Br \sim |V_{ts} \times V_{td}|^2$; 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

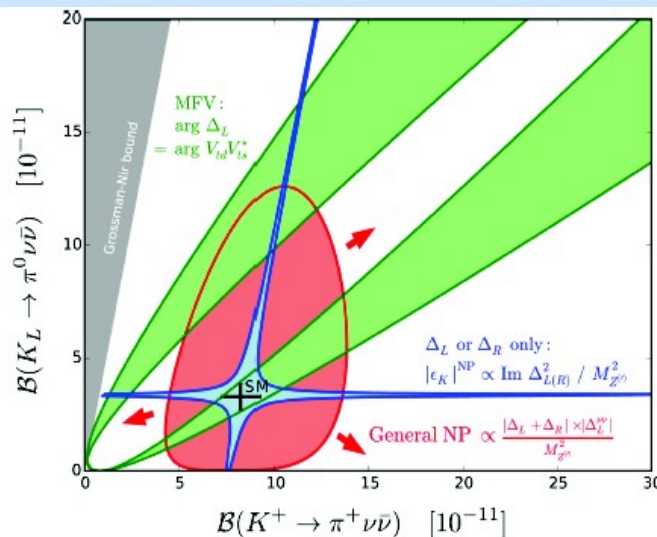
$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.39 \pm 0.30) \times 10^{-11} \cdot \left[\frac{|V_{cb}|}{0.0407} \right]^{2.8} \cdot \left[\frac{\gamma}{73.2^\circ} \right]^{0.74} = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$$

Buras et al., JHEP 1511(2015) 033

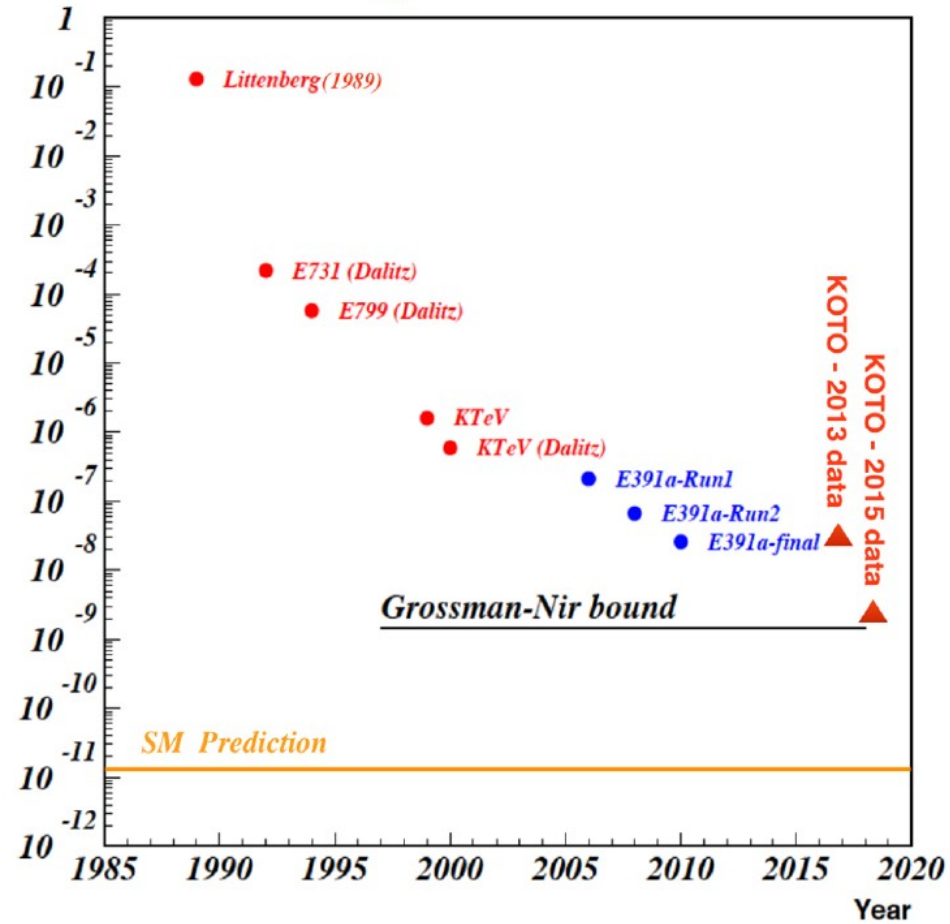
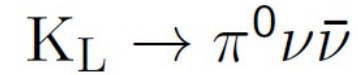
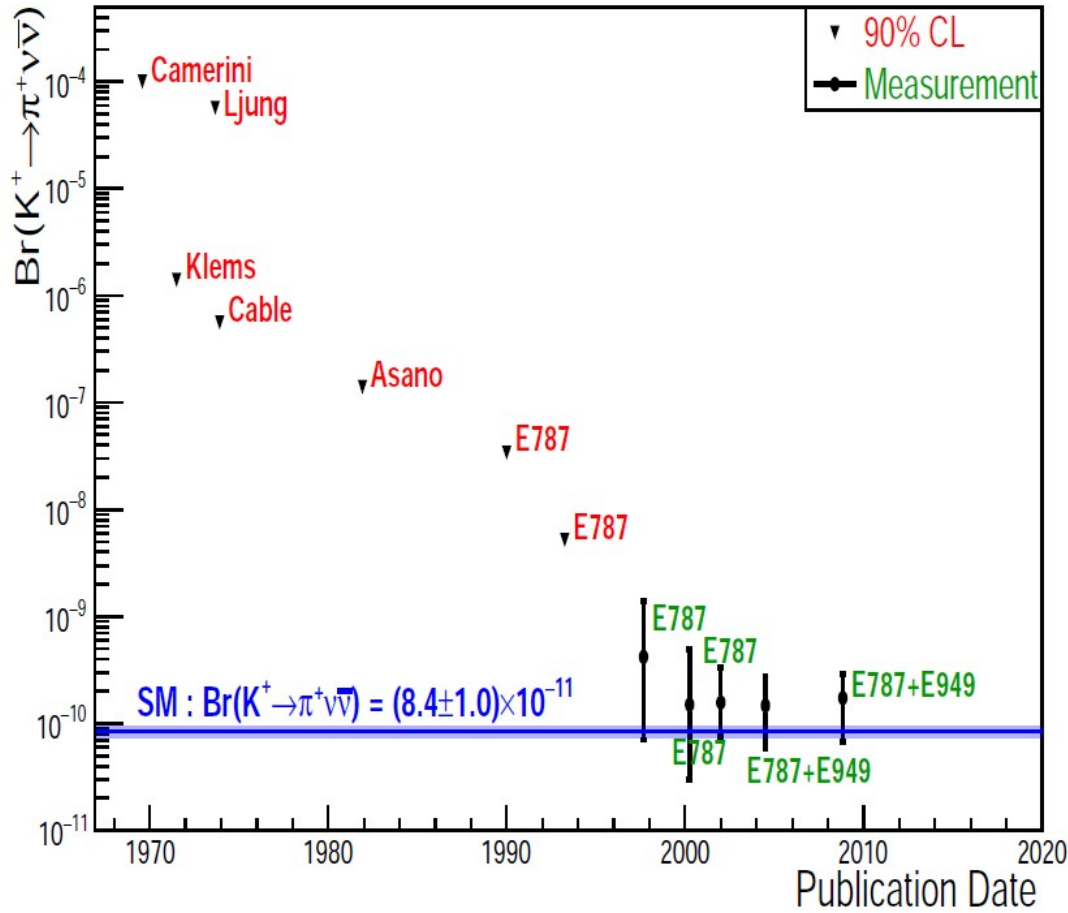
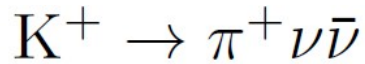
$$BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (3.36 \pm 0.05) \times 10^{-11} \cdot \left[\frac{|V_{ub}|}{3.88 \times 10^{-3}} \right]^2 \cdot \left[\frac{|V_{cb}|}{0.0407} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin \gamma}{\sin 73.2^\circ} \right]^2 = (3.4 \pm 0.6) \times 10^{-11}$$

Чувствительны к Новой Физике

Buras, Buttazzo, Kneijens, JHEP11(2015)166



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



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

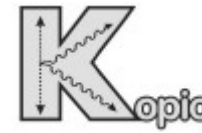
PRL 101 (2008) 191802

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < (2.6 \times 10^{-8}) \quad \text{PRD 81, (2010) 072004}$$

$$\Gamma_{K^+} = \Gamma_{K_L} + \Gamma_{K_S} \rightarrow Br_{K_L} < \tau_{K_L} / \tau_{K_S} \times Br_{K^+} = 4.37 \times Br_{K^+}$$

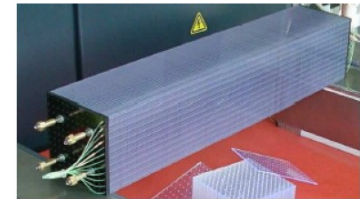
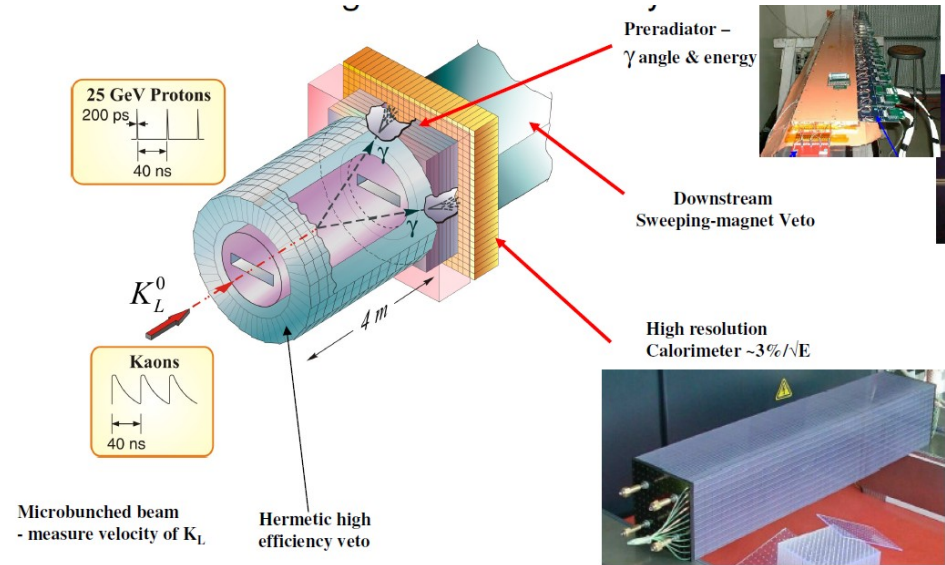
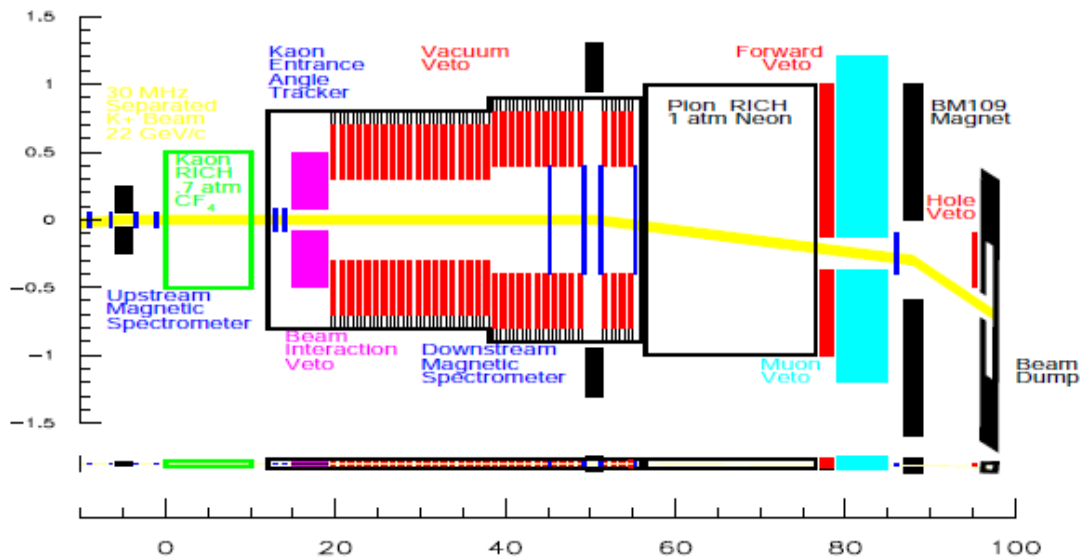
Предел Гроссмана-Нира $Br_{K_L} < 1.46 \times 10^{-9}$

Эксперимент CKM (FNAL) $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
 LoI 1998, TP 2001, 2005



(1999 г.) $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

CKM Apparatus



Эксперимент NA62

Birmingham, Bratislava, Bristol, Bucharest, CERN, Dubna (JINR), Fairfax (GMU), Ferrara, Florence, Frascati, Glasgow, Lancaster, Liverpool, Louvain-la-Neuve, Mainz, Moscow (INR), Naples, Perugia, Pisa, Prague, Protvino (IHEP), Rome I, Rome II, San Luis Potosi, Sofia, TRIUMF, Turin, Vancouver (UBC) ~200 участников



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

2005	Предложение эксперимента
2010	Технический проект
2014-2015	Запуск установки
2016	Первый набор статистики (4 недели) $\sim 10^{11}$ распадов K^+
2017-2018	Набор статистики (6-7 мес.) $\sim 8 \times 10^{12}$ распадов K^+
JHEP 06(2021) 093 Опубликован результат 2016-2018 г.	
2021-2023	Run2 В 2021 г. Июль-Ноябрь

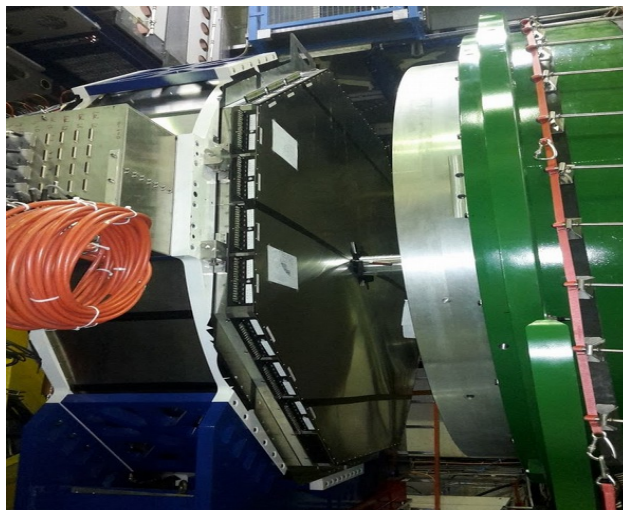
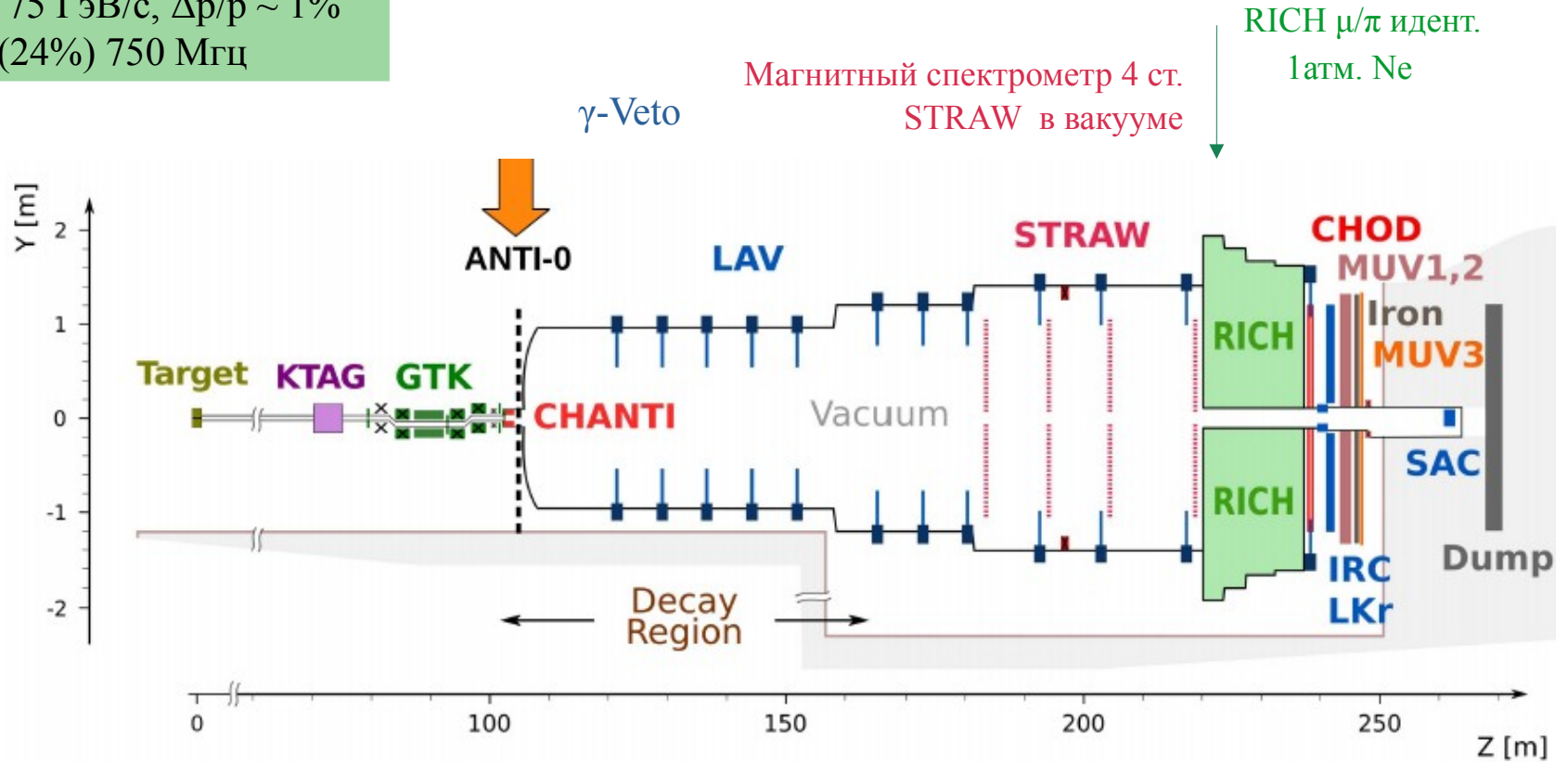
SPS p пучок 400 ГэВ/с
 $3 \cdot 10^{12} / 3.5$ сек

Установка NA62

Вторичный пучок 75 ГэВ/с, $\Delta p/p \sim 1\%$
 K^+ (6%) π^+ (70%) p (24%) 750 МГц

Дифф. С счетчик
триггер на K^+

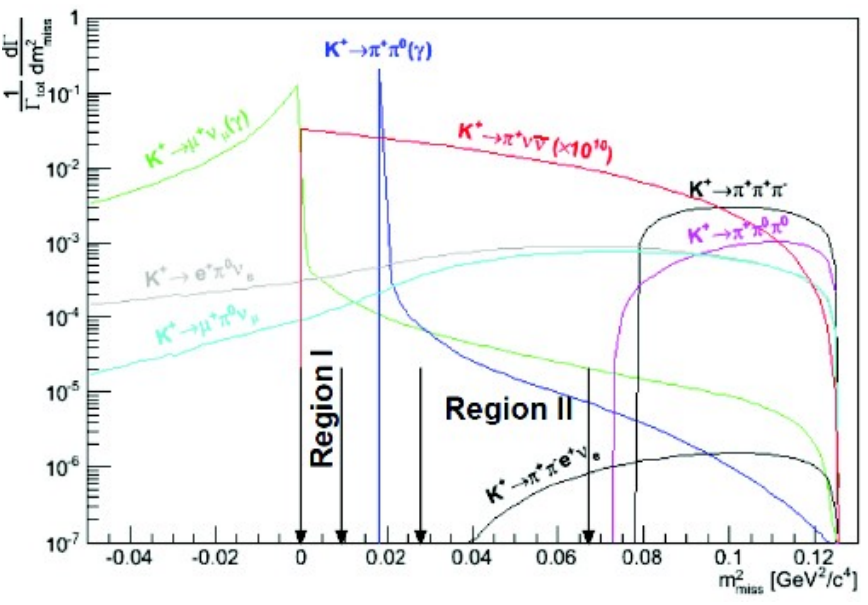
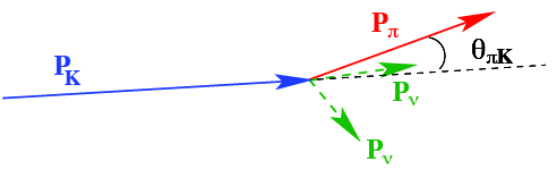
Детектор пучка
“Gigatracker”
3 Si станции



Установка НА62

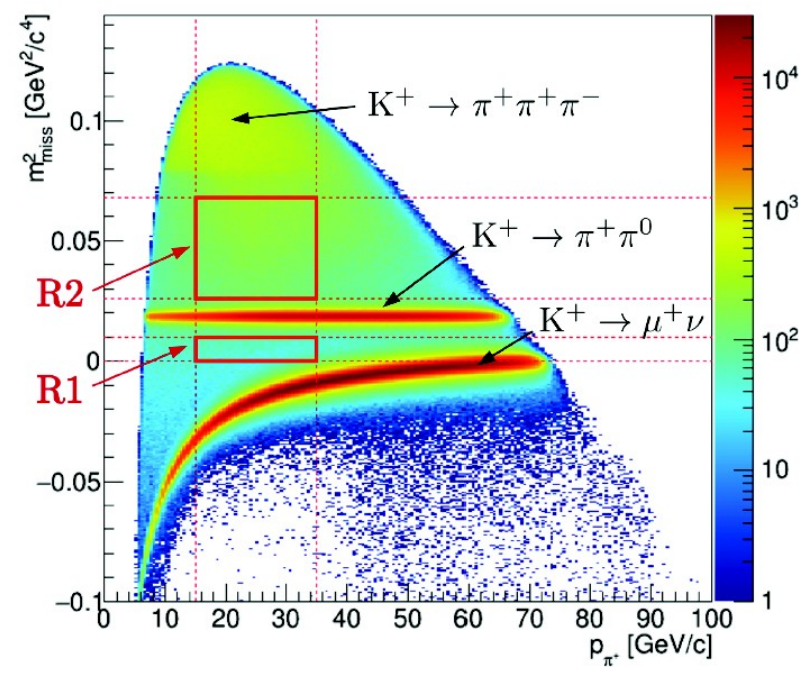


Выделение сигнала, подавление фонов



1-ая обл. $0 < m_{miss}^2 < 0.01 \text{ ГЭВ}^2/\text{с}^4$
 2-ая обл. $0.026 < m_{miss}^2 < 0.068 \text{ ГЭВ}^2/\text{с}^4$
 m_{miss}^2 вычисляется по STRAW – GTK, RICH – GTK $\sigma_{miss} \sim 10^{-3} \text{ ГЭВ}^2$

- ### Отбор событий
- Один вторичный трек $\sigma_t \sim 100$ псек.
 - π^+ - идентификация: $\varepsilon(\mu) = 10^{-8}$ (при 64% $\varepsilon(\pi^+)$)
 - γ - вето $\varepsilon(\pi^0) = 10^{-8}$
 - $105 < Z_{\text{vertex}} < 165$ м
 - $15 < p_{\pi^+} < 35 \text{ ГЭВ}$ для работы RICH и $E_{\text{miss}} > 40 \text{ ГЭВ}$

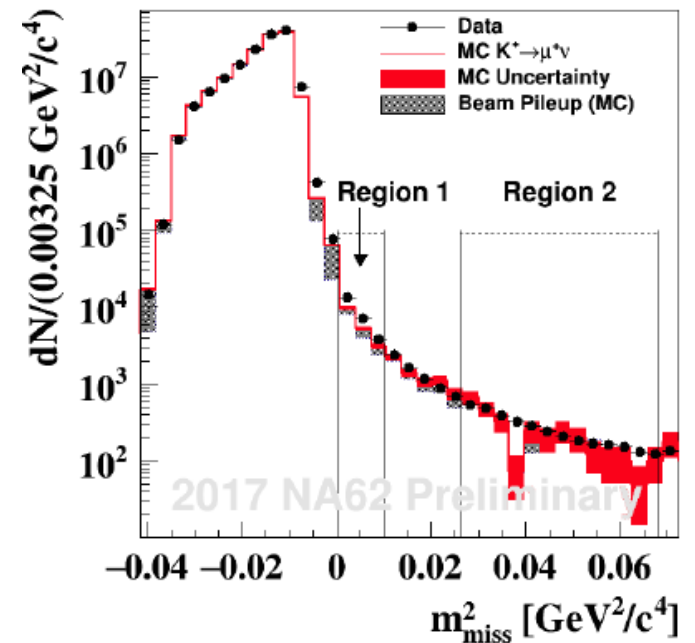
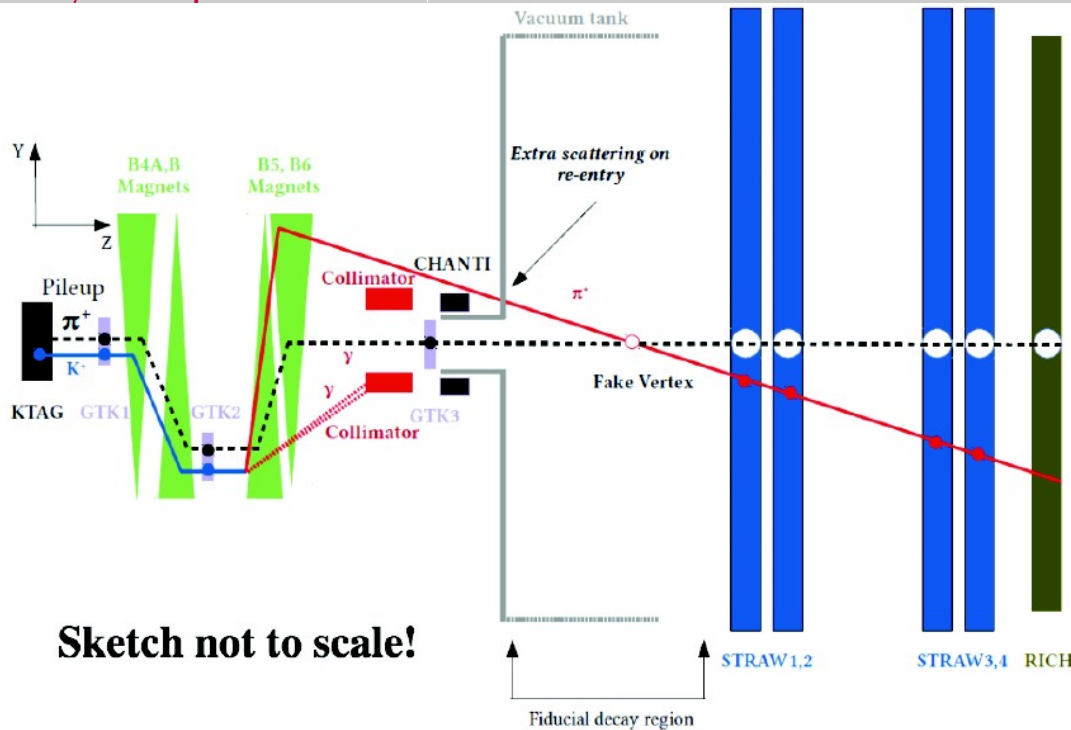
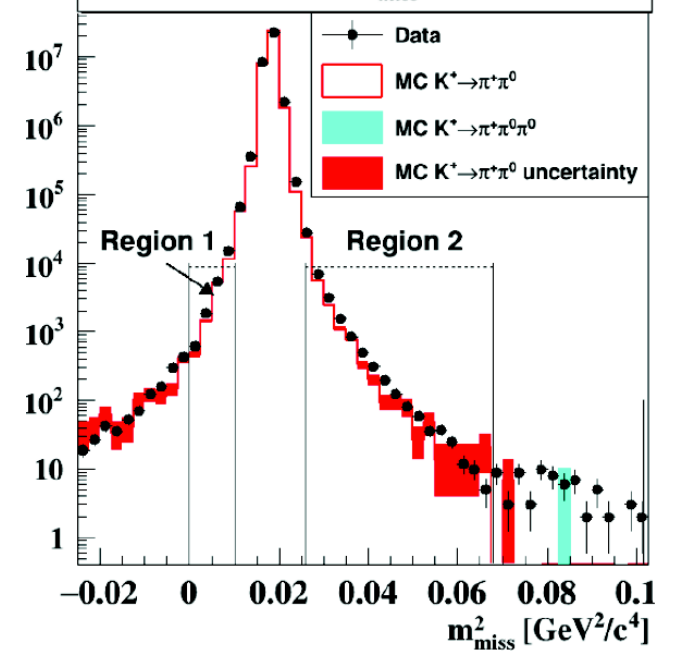


Обработка сеансов 2016-2018 гг.

$$SES = (1.11 \pm 0.07) \times 10^{-11}$$

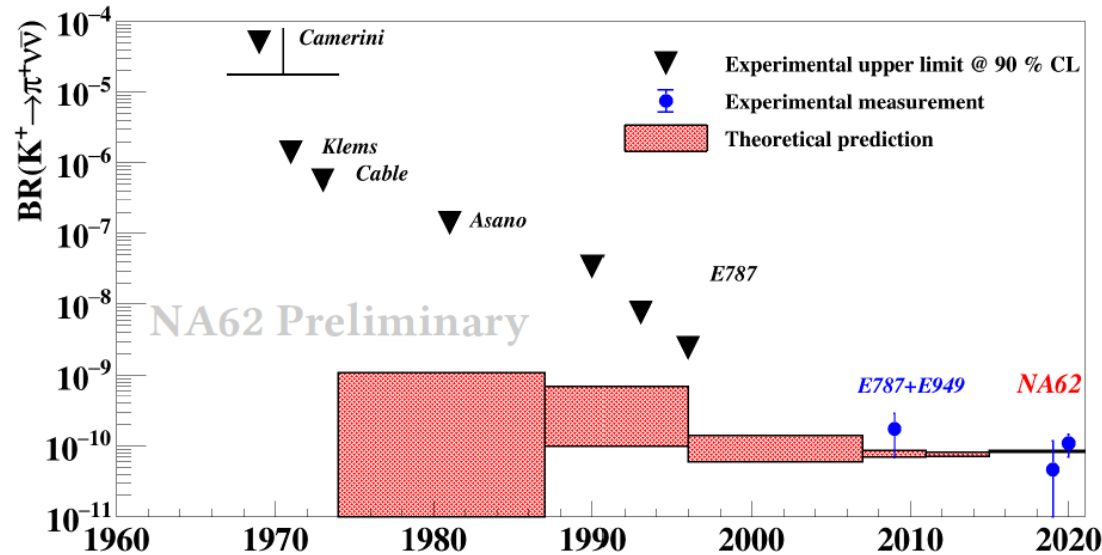
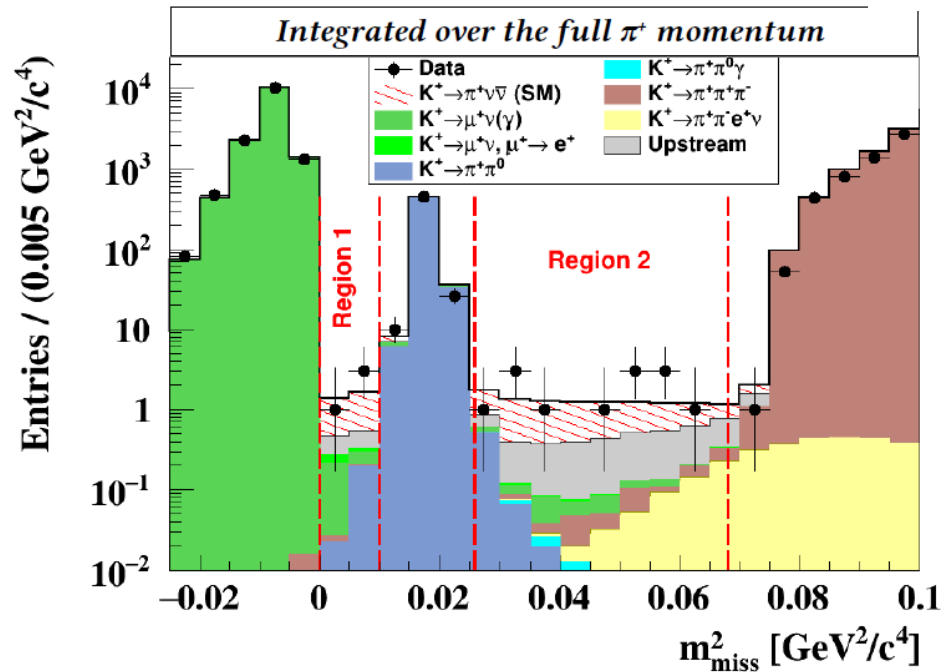
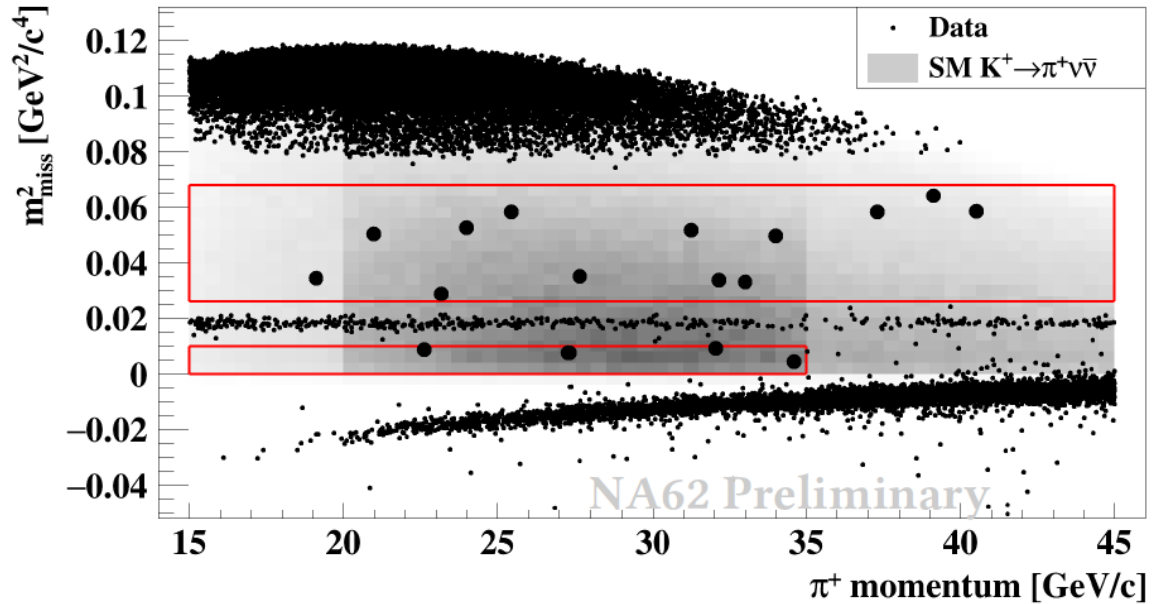
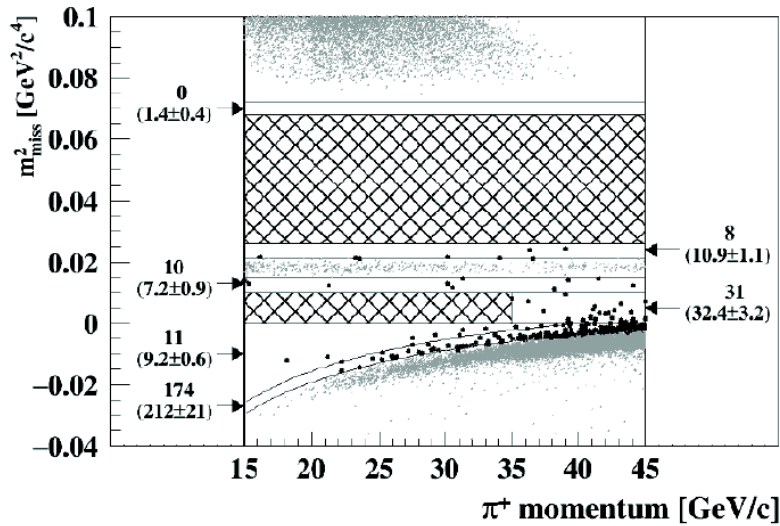
Процесс	Число событий в области сигнала
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$	10.01 ± 1.26
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 (\gamma)$	0.75 ± 0.04
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu (\gamma)$	0.49 ± 0.05
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$	0.50 ± 0.11
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	0.22 ± 0.09
Фон от пучка	3.3 ± 0.9
Сумма фон	5.28 ± 0.86

Control $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ data used to study the tails of the m_{miss}^2 distribution



Результат 2016-2018

Observed (expected) events in control regions

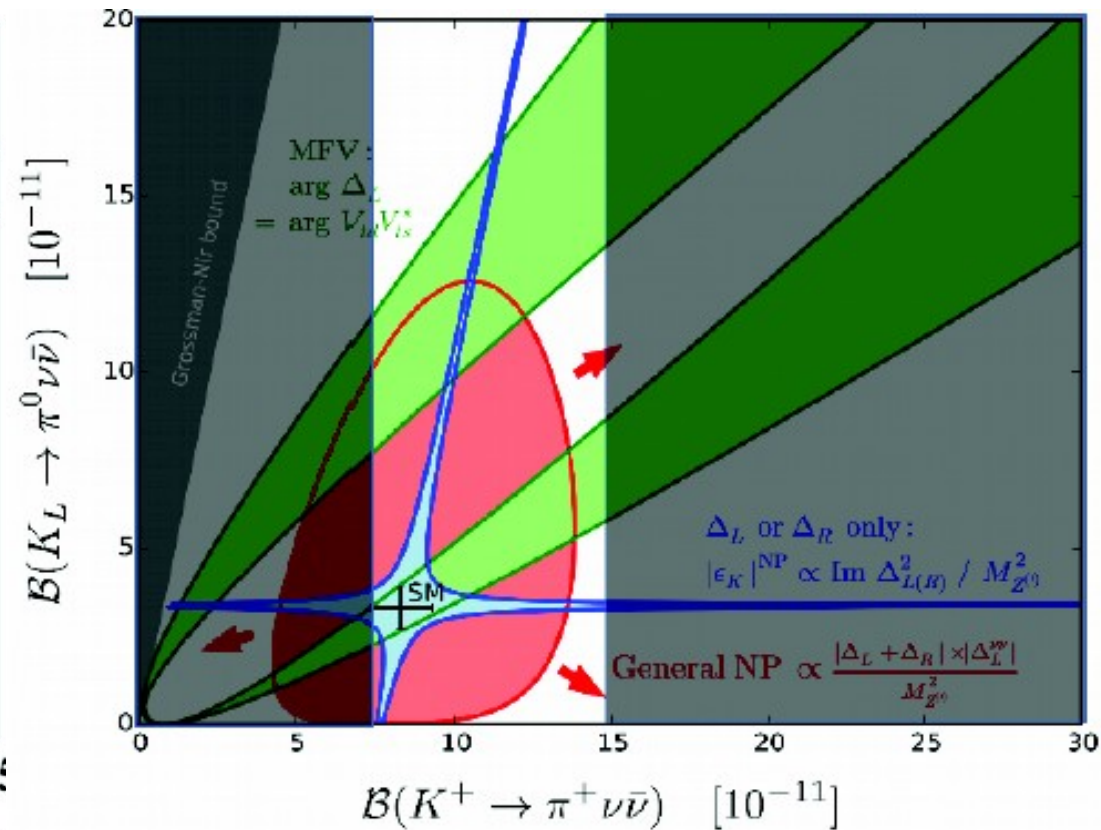
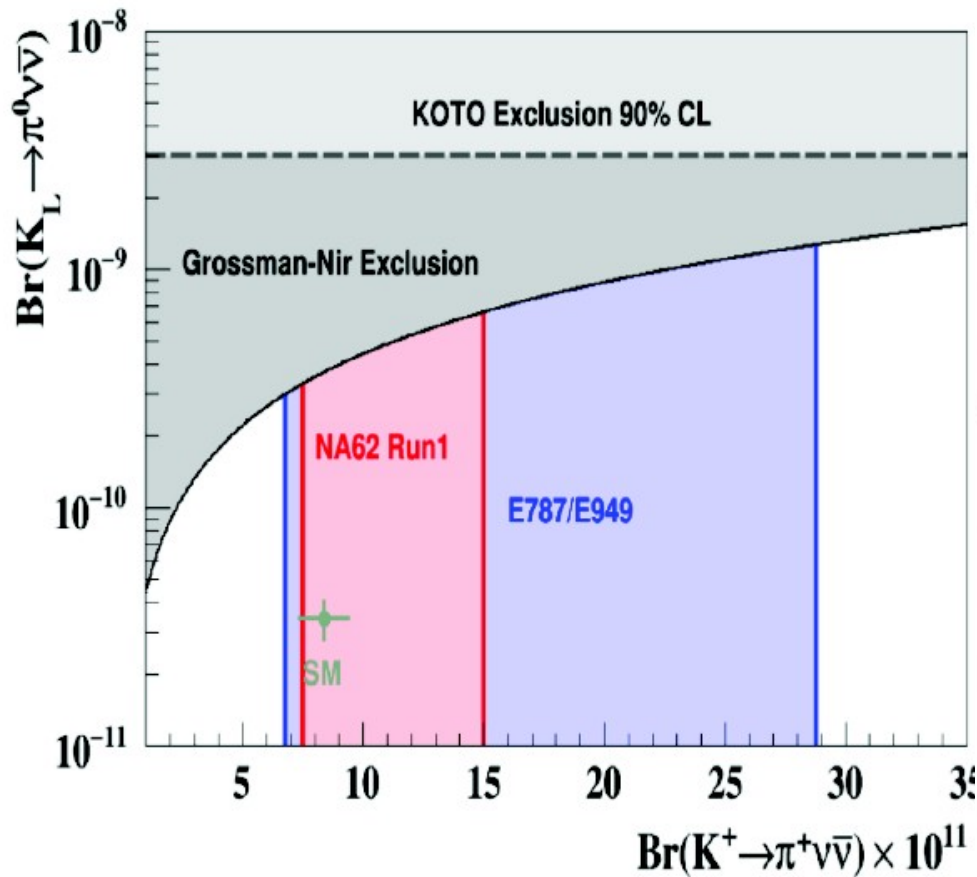


20 соб. $\phi_{\text{OH}} 7 \pm 0.9$

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.4} |_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{syst}}) \times 10^{-11}$$

Результат 2016-2018

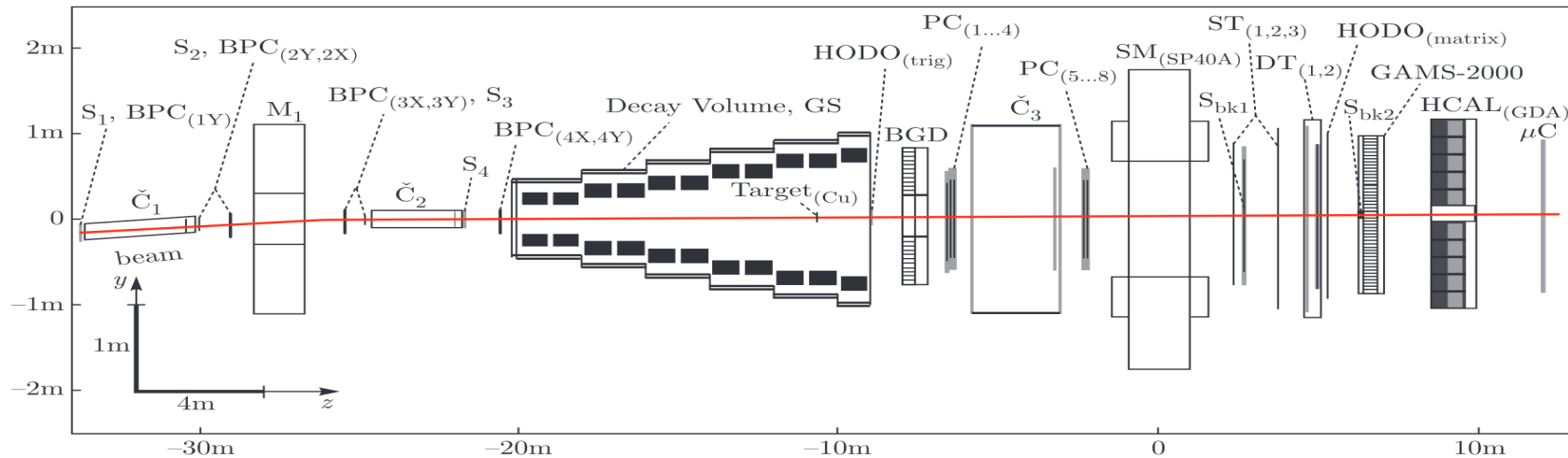
$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6_{-3.4}^{+4.0} |_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{syst}}) \times 10^{-11}$$



Ближайшие планы NA62

- В 2021-2024 гг. будет продолжен набор статистики (проектная интенсивность, вето-годоскоп, вето-счетчики, 4-ая плоскость GTK)
- Цель – набрать ~ 100 событий

ОКА: Эксперимент с RF-сепарированным K^+ пучком на У-70 ИФВЭ-ИЯИ-ОИЯИ



• Основной триггер

$$Trg = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \check{C}_1 \cdot \check{C}_2 \cdot \bar{S}_{bk} \cdot (\Sigma_{GAMS} > Mip)$$

• Контрольные триггера

$$S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot S_{bk} \cdot MC / 4$$

$$S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot S_{bk} / 10$$

Параметры сверхпроводящих дефлекторов

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

Основные параметры пучка:

Энергия протонного пучка	50-65 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 - 18 %

1. Пучковый спектрометр: 1мм ПК, ~1500 каналов; сцинтилляционные и черенковские счетчики
2. Распадный объем с охранной системой: 11м; 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, ЕГС-БГД всего ~ 4000 счетчиков из свинцового стекла.
7. Мюонная идентификация: адронный калориметр ГДА-100 + 4 мюонных счетчика

Канал 21К, Установка «ОКА»



RF1 дефлектор в канале



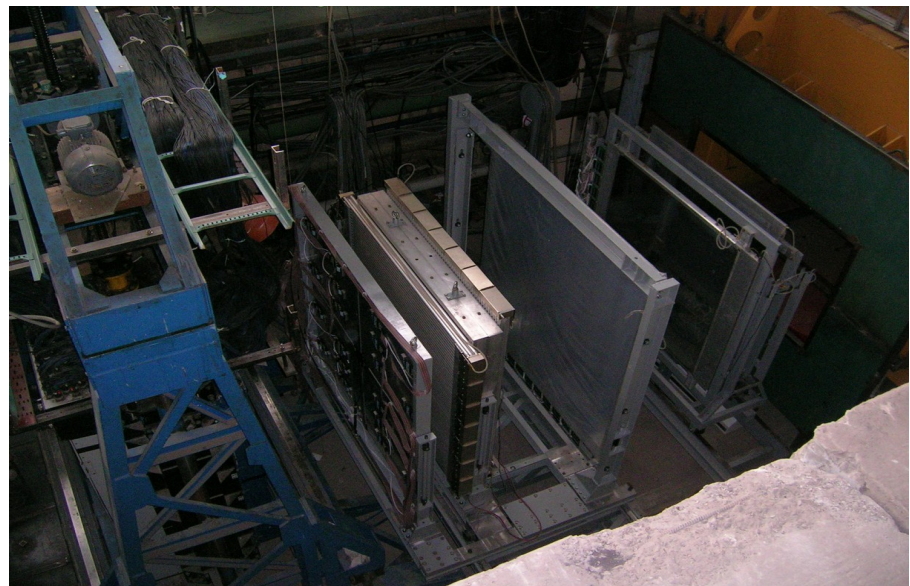
“Хвост” канала



Охранная система распадного объема



Общий вид установки ОКА



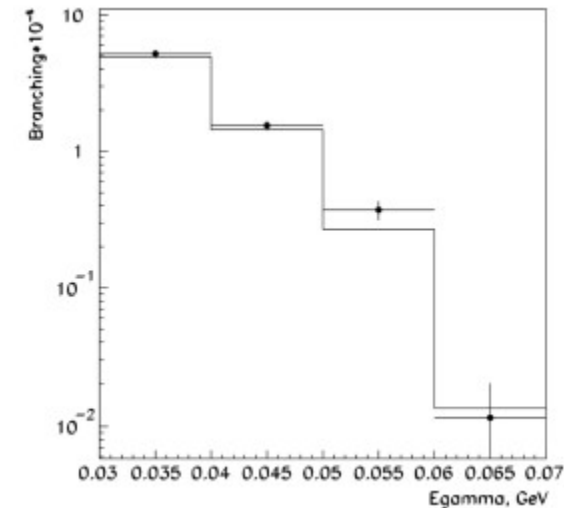
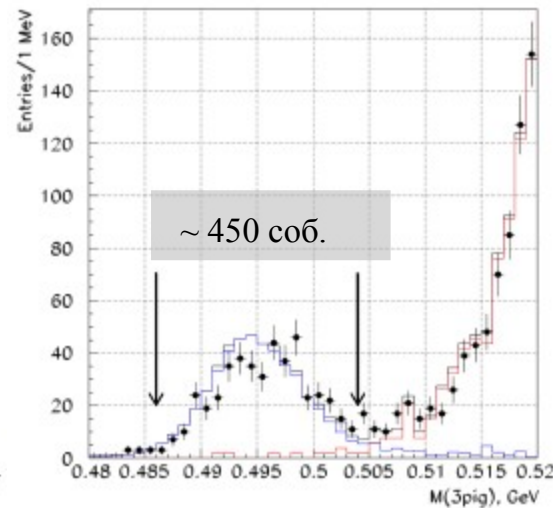
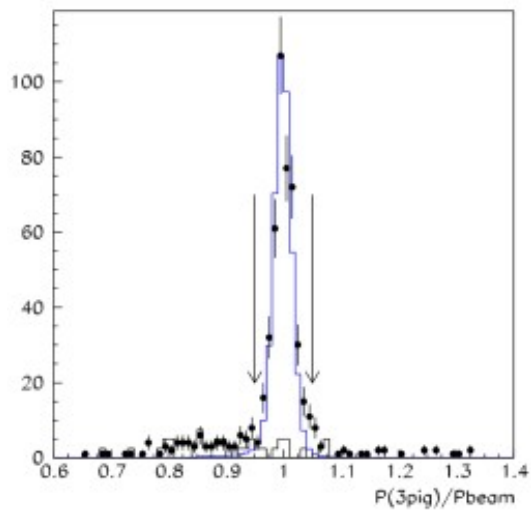
Straw и ДТ камеры, матричный годоскоп, электромагнитный калориметр ГАМС-2000

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

Основные направления анализа данных:

Распады: $Ke3$, $K\mu3$, $K^+ \rightarrow \mu^+\nu_s$, $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0 P$, $Ke3\gamma$, $K\mu3\gamma$, $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma$, $K^+ \rightarrow \mu^+\nu\gamma$, $K^+ A \rightarrow K^+ \pi^0 A$

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

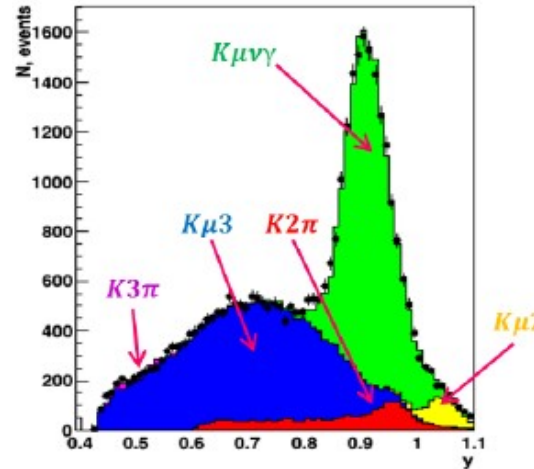
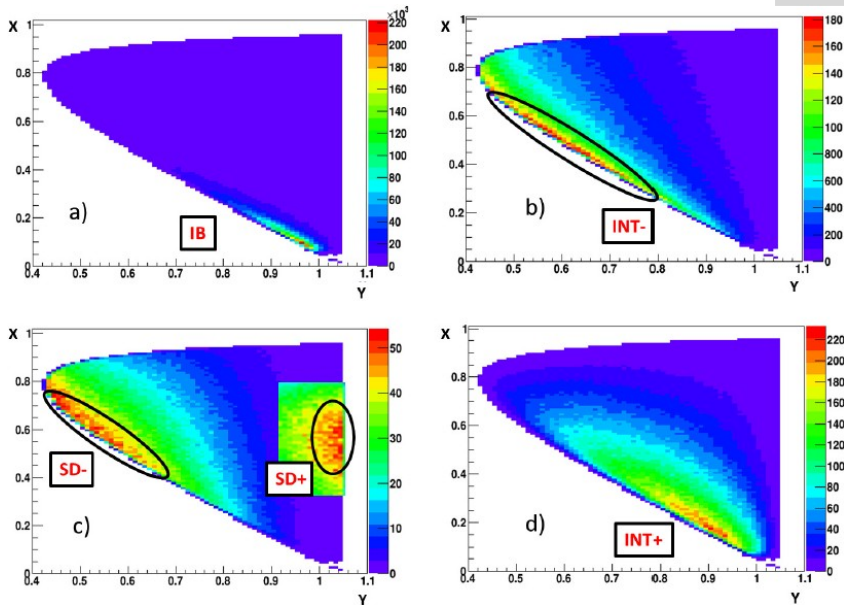


Нормировка на $N(K \rightarrow 3\pi) \sim 20M$

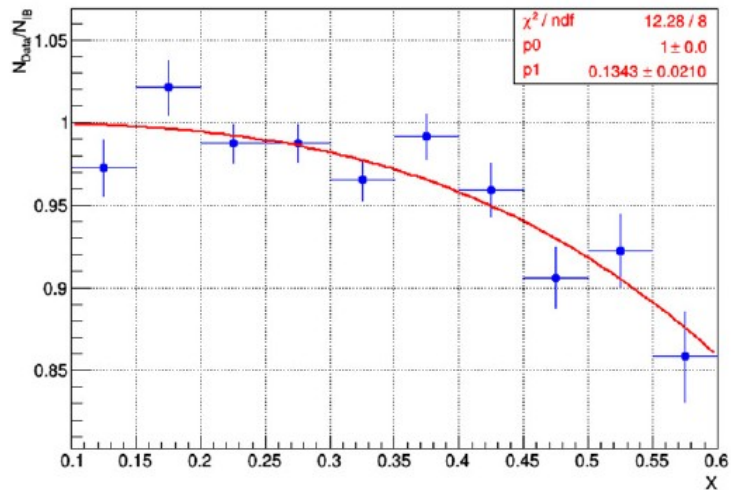
$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\gamma) = (7.1 \pm 0.4_{\text{стат}} \pm 0.3_{\text{сист}}) \cdot 10^{-6} \quad E_\gamma^* > 30 \text{ МэВ}$$

Избранные результаты: $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ Eur.Phys. J.C (2019) 79

Распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ изучали в ИТЭФ В.С. Демидов и др., ЯФ 52(1990)1595
 ~ 420 соб. $-2.2 < F_V - F_A < 0.6$



95К СОБЫТИЙ
 $25 < E_\gamma^* < 150$ МэВ



“ОКА” $F_V - F_A = 0.134 \pm 0.021_{\text{стат}} \pm 0.027_{\text{сист}}$

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

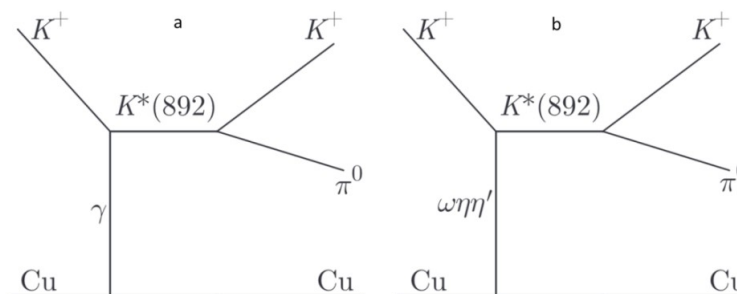
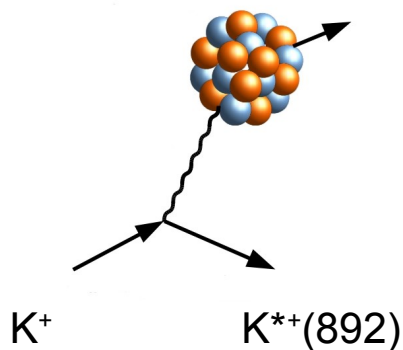
$F_V - F_A = 0.054$ т.е. имеем отличие 2.3 σ

$E\chi_A$ $F_V - F_A = 0.08$ (1.6 σ)

“Gauged nonlocal effective chiral action” arXiv:1810.06815, 2018

Наблюдение χ аномалии в процессе $K^+ Cu \rightarrow K^+ \pi^0 Cu$

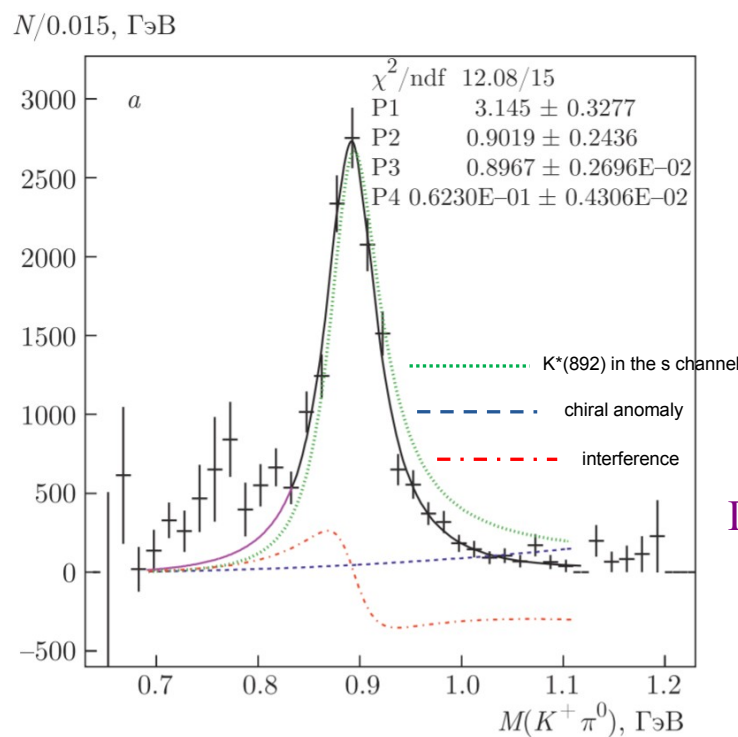
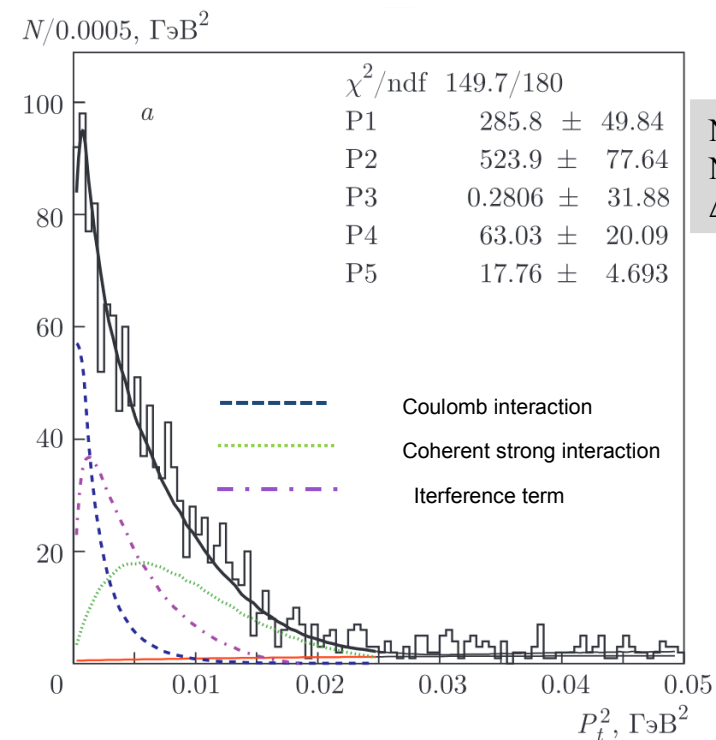
JETP, 2020, v. 131, pp. 928-939; ЖЭТФ, 2020 т. 158, №6, стр. 1070-1082



$$M_d = -\frac{2\alpha Z}{\pi F_\pi^3 q^2} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} p_{1\mu} q_\nu b_\alpha f_\beta, \quad M_\gamma = 4eZ \frac{g_{K\gamma} g_{K\pi}}{q^2} \frac{\varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} p_{1\mu} q_\nu b_\alpha f_\beta}{w - m_*^2 + i m_* \Gamma_*} F_C(q^2) \quad M_\omega = \frac{g_{N\omega} g_{K\omega} g_{K\pi} A_{Cu}^{2/3}}{q^2 - m_\omega^2 + i m_\omega \Gamma_\omega} \frac{\varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} p_{1\mu} q_\nu b_\alpha f_\beta}{w - m_*^2 + i m_* \Gamma_*} F_S(q^2)$$

Вклад от WZW-аномалии

1. R. Rogalyov, Phys. At. Nucl. 64, 68 (2001).
2. V. Burtovoy, Phys. At. Nucl. 76, 450 (2013).
3. M. Vysotsky, E. Zhemchugov, Phys. Rev. D 93, 094029 (2016)



$$A_{\text{exp}} / A_{\text{th}} = 0.9 \pm 0.24 \text{ (stat.)}$$

Первое наблюдение χ аномалии в процессах с s-кварками