

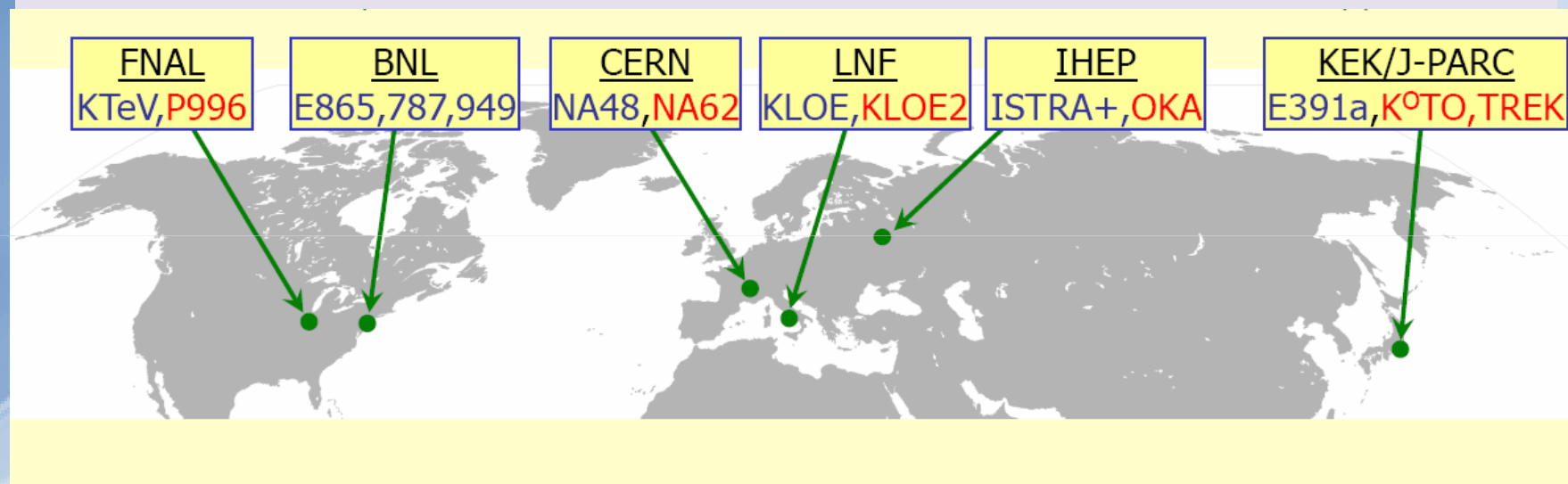
Вячеслав Дук, ИЯИ РАН
коллорація «ИСТРА+»

**Редкие распады каонов:
статус и ближайшие перспективы**

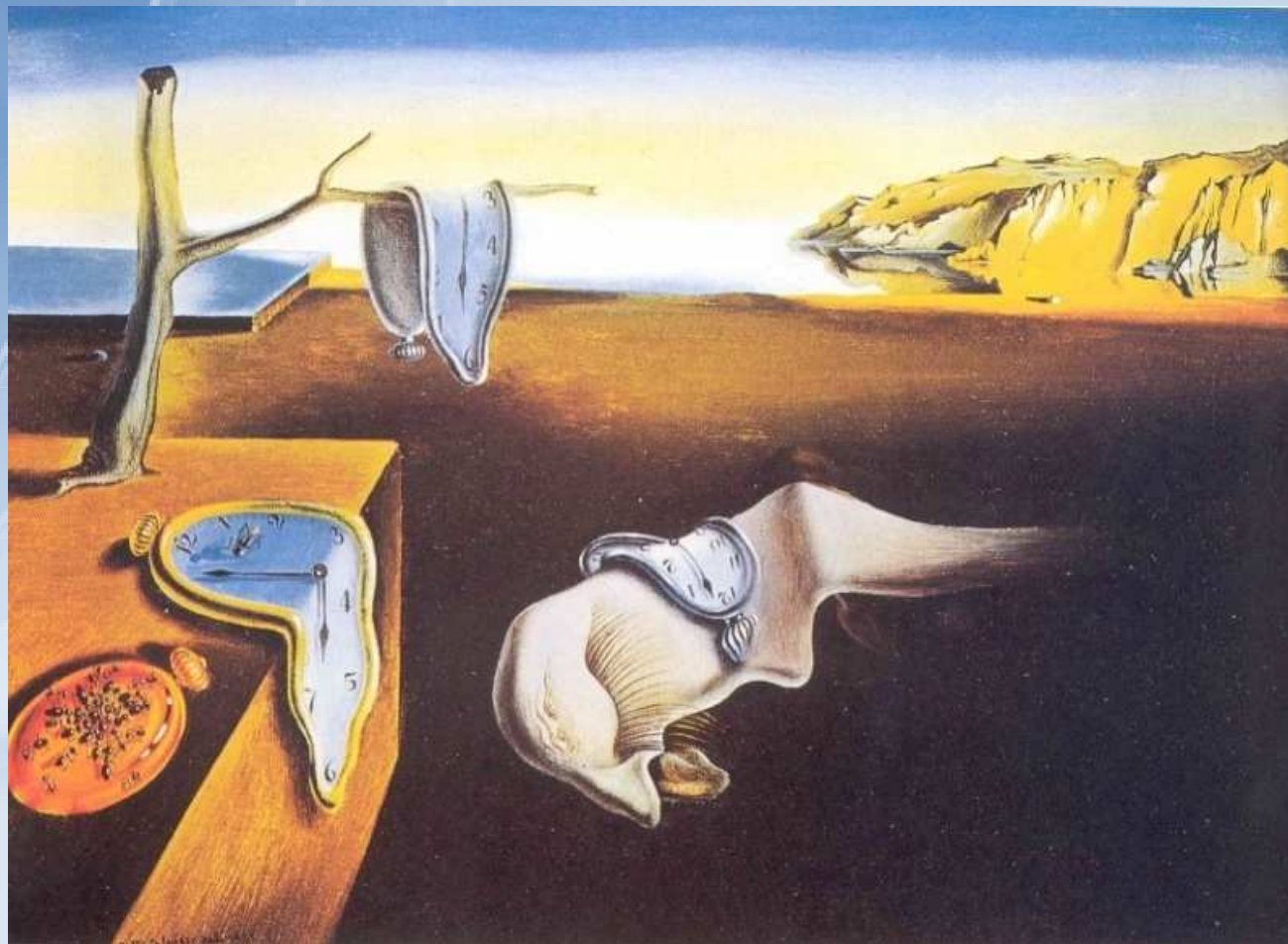
План

- **Настоящее:**
 - ✓ NA62 (поиск LFV)
 - ✓ ИСТРА+ (поиск тяжелого нейтрино ν_h)
 - ✓ E391a (поиск распада $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$)
- **Будущее:**
 - ✓ NA62 ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$)
 - ✓ ОКА (радиационные распады, программа с мишенью)
 - ✓ КОТО ($K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$)
 - ✓ ТРЕК (поиск LFV, измерение P_T)
- **Заключение**

Каонная карта мира



Каонная физика: НАСТОЯЩЕЕ



NA62 @ CERN

CERN NA48/NA62 experiments

Earlier: NA31

1997: $\epsilon'/\epsilon: K_L + K_S$
1998: $K_L + K_S$
1999: $K_L + K_S$ K_S HI
2000: K_L only K_S HI
2001: $K_L + K_S$ K_S HI

NA48 discovery of direct CPV

2002: K_S /hyperons
2003: K^+ / K^-
2004: K^+ / K^-

NA48/1

NA48/2

2007: $K_{e2}^+ / K_{\mu 2}^+$ tests
2008: $K_{e2}^- / K_{\mu 2}^-$ tests

NA62 (R_K phase)

NA62 design & construction

2012: first data taking

NA62: Birmingham, Bristol, CERN, Dubna, Fairfax, Ferrara, Florence, Frascati, Glasgow, IHEP Protvino, INR Moscow, Liverpool, Louvain-la-Neuve, Mainz, Merced, Naples, Perugia, Pisa, Rome I, Rome II, Saclay, San Luis Potosí, SLAC, Sofia, TRIUMF, Turin

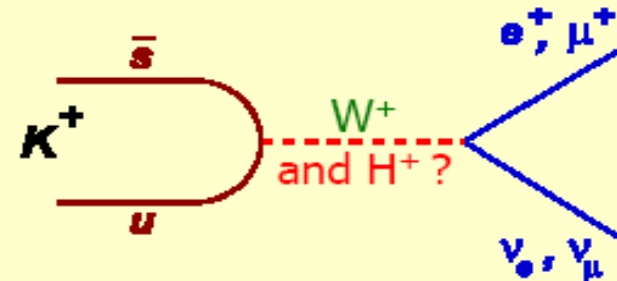
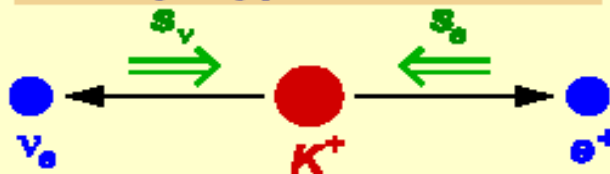
Поиск LFV в распадах $K \rightarrow l\nu$

Lepton Flavour Universality (LFU): not a fundamental law (violated in ν sector).
 New physics models (2HDM, SUSY, SM4): significant LFU violation.

Observable sensitive to LFU violation:

$$R_K = \frac{\Gamma(K^\pm \rightarrow e^\pm \nu)}{\Gamma(K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu)} = \underbrace{\frac{m_e^2}{m_\mu^2}}_{\text{Helicity suppression: } f \sim 10^{-5}} \cdot \left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2} \right)^2 \cdot \underbrace{(1 + \delta R_K^{\text{rad. corr.}})}_{\text{Radiative correction (well known, few \%)}}$$

Helicity suppression: $f \sim 10^{-5}$



- **SM prediction:** excellent sub-permille accuracy: free of hadronic uncertainties.
- Measurements of R_K (and R_π) have long been considered as tests of LFU.
- NP contributions accessible experimentally due to the suppression of the SM value.

$$R_K^{\text{SM}} = (2.477 \pm 0.001) \times 10^{-5}$$

PRL99 (2007) 231801

8

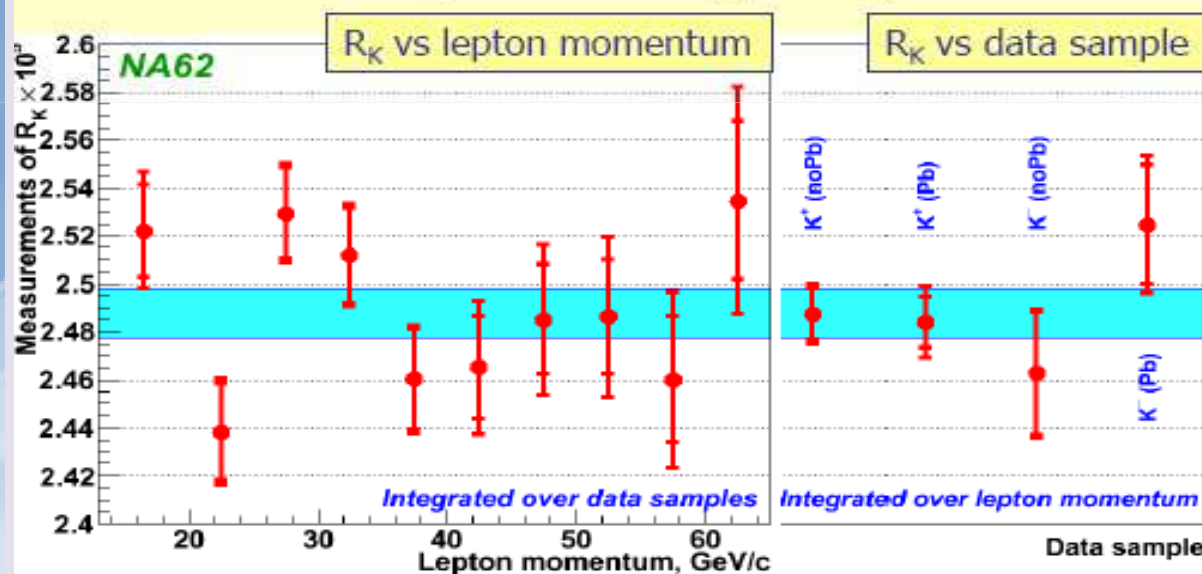
NA62: результат измерения R_K

$$R_K = (2.488 \pm 0.007_{\text{stat}} \pm 0.007_{\text{syst}}) \times 10^{-5}$$

$$= (2.488 \pm 0.010) \times 10^{-5}$$

New result:
July 2011

Fit over 40 measurements (4 data samples x 10 momentum bins)
including correlations: $\chi^2/\text{ndf}=47/39$.



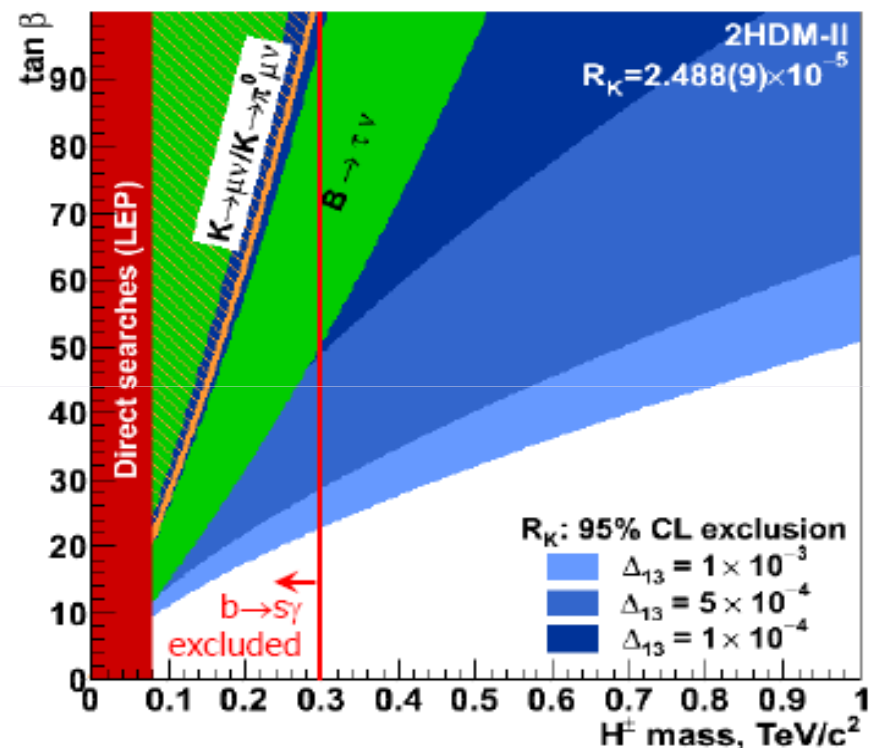
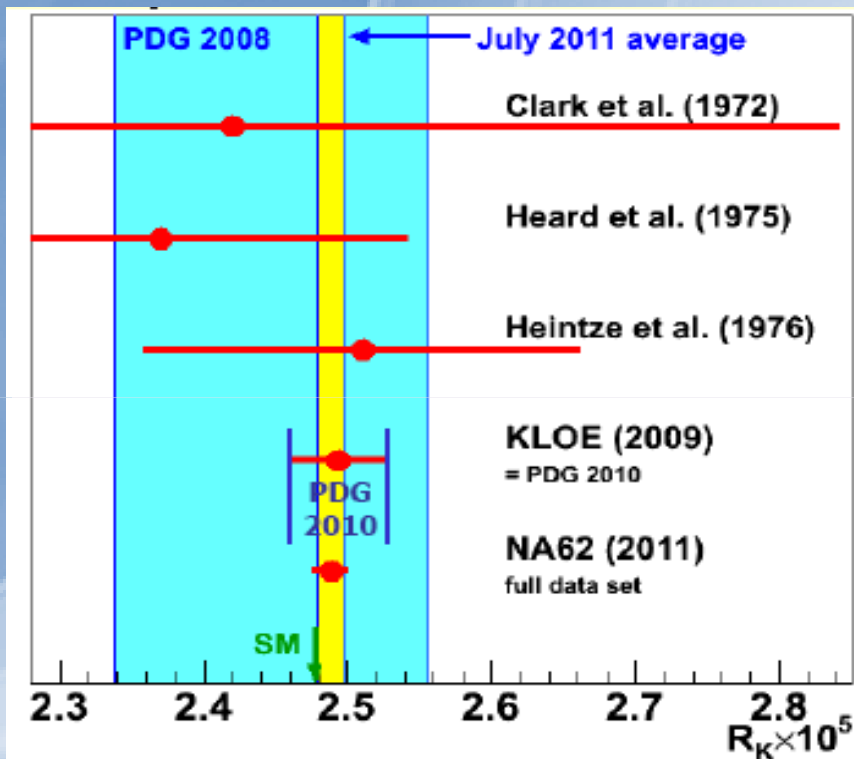
Uncertainty source	$\delta R_K \times 10^5$
Statistical	0.007
$K_{\mu 2}$ background	0.004
$K^\pm \rightarrow e^\pm \nu \gamma$ (SD ⁺)	0.002
$K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu$, $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$	0.003
Beam halo background	0.002
Helium purity	0.003
Acceptance correction	0.002
DCH alignment	0.001
Electron identification	0.001
1TRK trigger efficiency	0.001
LKr readout efficiency	0.001
Total uncertainty	0.010

NA62 partial (40%) data set result: $R_K = (2.487 \pm 0.013) \times 10^{-5}$ [PLB698 (2011) 105]

17

NA62: чувствительность результата к Новой Физике

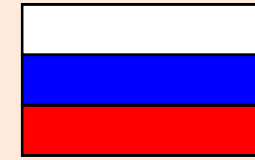
$$R_K^{LFV} \simeq R_K^{SM} \left[1 + \left(\frac{M_K}{M_H} \right)^4 \left(\frac{M_\tau}{M_z} \right)^2 |\Delta_R^{31}|^2 \tan^8 \beta \right]$$



World average	$\delta R_K \times 10^5$	Precision
PDG 2008	2.447 ± 0.109	4.5%
July 2011	2.488 ± 0.009	0.4%

Other limits on 2HDM-II:
PRD 82 (2010) 073012.
SM with 4 generations:
JHEP 1007 (2010) 006.

Коллаборация «ИСТРА+»



- Институт физики высоких энергий, Протвино (**ИФВЭ**)
- Институт ядерных исследований РАН, Москва (**ИЯИ РАН**)
- Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (**ОИЯИ**)



Поиск тяжелого
нейтрино в
распаде $K \rightarrow \mu \nu_h$
($\nu_h \rightarrow \nu \gamma$)

Нейтринные осцилляции: сводная таблица результатов

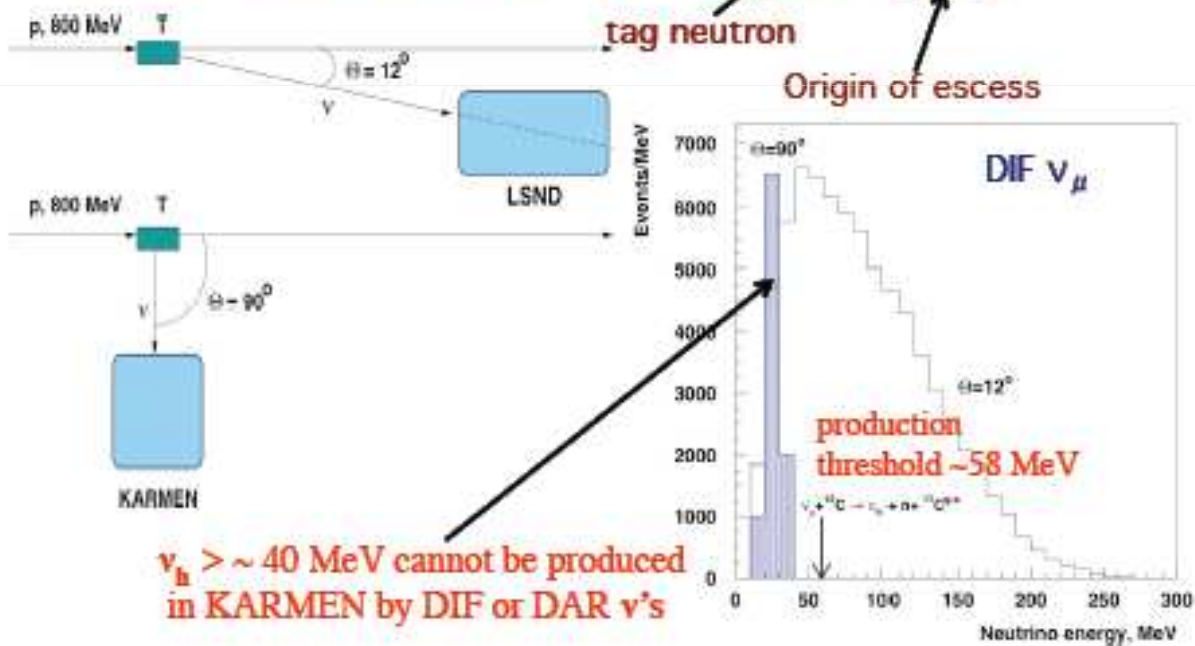
Summary:

Experiment	Event excess	Energy range, MeV	Background
LSND, $\bar{\nu}_\mu$ 1.8E23 POT	87.9±22.4±6.0 3.8 σ	20-60	53.8
KARMEN, $\bar{\nu}_\mu$ 5.9E22 POT	10±32 No excess	16-50	15.8±0.5
MiniBooNE, ν_μ 6.64E20 POT	129.0±43.0, $\approx 3 \sigma$ 22.1 ± 35.7	200-475 475-1250	415.2±43 386.0±35.7
MiniBooNE, $\bar{\nu}_\mu$ 5.66E20 POT Approved for 1.5E21 POT	43.2±22.5, $\approx 2 \sigma$ 18.5±14.3, 1.3 σ 20.9±13.9, 1.5 σ	200-1250 200-475 475-1250	233.8±22.5 105±14.3 99.1±13.9

Возможное объяснение результатов экспериментов (С.Н.Гниненко, ИЯИ РАН)

Why **LSND** see excess, while **KARMEN** not ?

Hint: LSND/KARMEN do not distinguish **e** and γ events
 Possible explanation: **DIF $\nu_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow n + X + \nu_h \rightarrow \gamma \nu$**



Новая слабо взаимодействующая частица ν_h

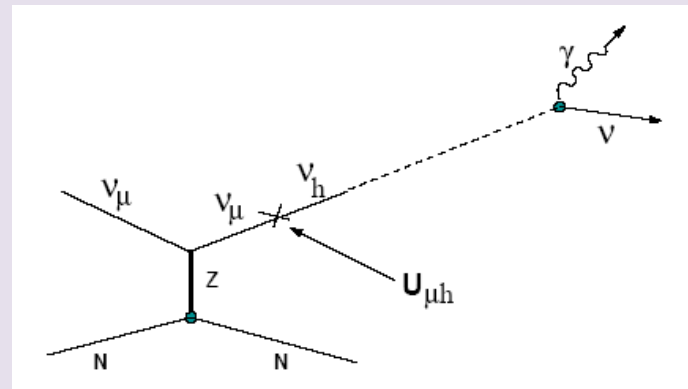
$$40 \text{ MeV} < m(\nu_h) < 80 \text{ MeV}$$

$$10^{-3} < |U_{\mu h}|^2 < 10^{-2}$$

$$10^{-11} \text{ sec} < \tau(\nu_h) < 10^{-9} \text{ sec}$$

- ✓ Родается в нейтральных токах
- ✓ Является компонентой ν_μ

Радиационный распад (>99%):
 $\nu_h \rightarrow \nu \gamma$



Поиск ν_h в распадах K-мезонов

$K \rightarrow \mu \nu_h$:

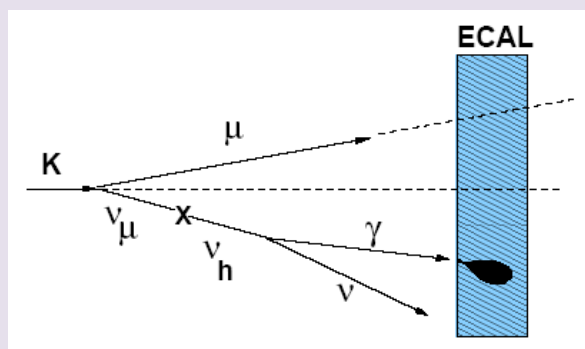
- ✓ пик в E_μ (cms)
- ✓ фон от $K \rightarrow \mu \nu_\mu$
- ✓ нет чувствительности к малым массам ν_h из-за разрешения

$K \rightarrow \mu \nu_h, \nu_h \rightarrow \nu \gamma$:

- ✓ пик в E_μ (cms)
- ✓ нет фона от $K \rightarrow \mu \nu_\mu$
- ✓ есть чувствительность к малым массам ν_h

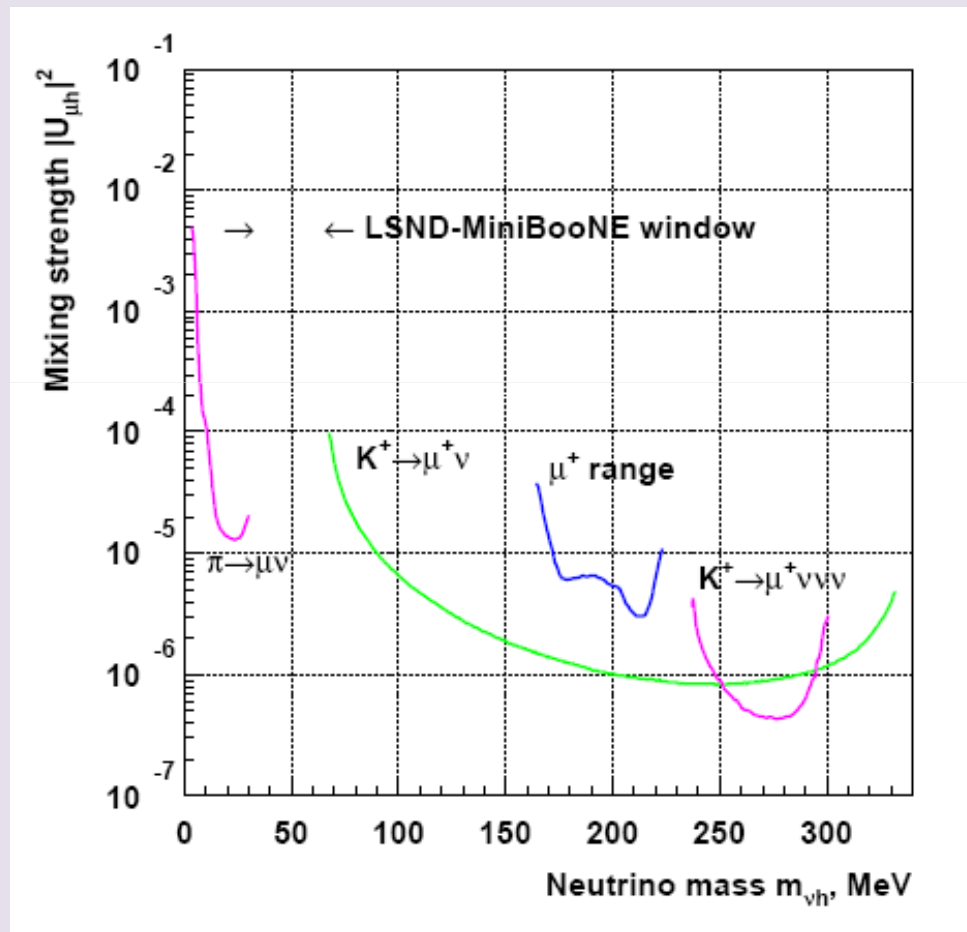
Энергия мюона в 2-частичном распаде

$$E_\mu = \frac{M_K^2 + m_\mu^2 - m_{\nu_h}^2}{2M_K}$$

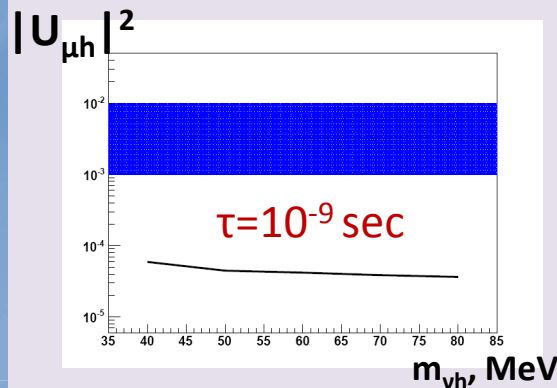


**подходит
для
«ИСТРА+»**

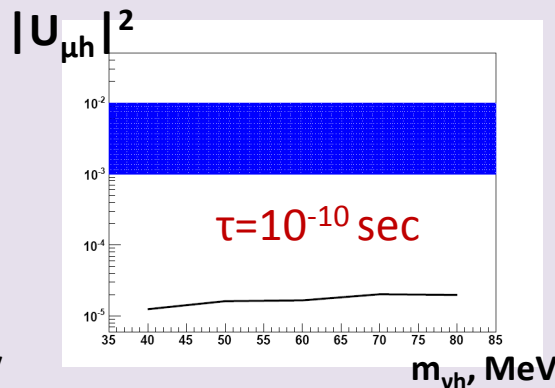
ν_h : ограничения из каонных/пионных распадов



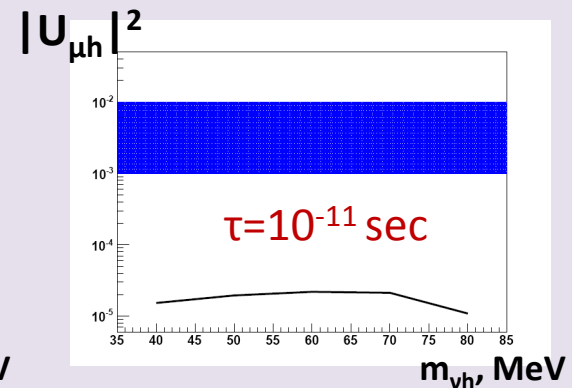
Полученное ограничение на $|U_{\mu h}|^2$



$|U_{\mu h}|^2 < (4-6) \times 10^{-5} \text{ (95\% CL)}$



$|U_{\mu h}|^2 < (1-2) \times 10^{-5} \text{ (95\% CL)}$



$|U_{\mu h}|^2 < (1.5-2) \times 10^{-5} \text{ (95\% CL)}$

Сплошная линия:
верхний предел
ИСТРА+ @ 95% C.L.

Синяя полоса : предсказание
из результатов LSND,
KARMEN. MiniBoonE

arXiv: 1110.1610

Распады $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$

Ultra-rare, theoretically clean, sensitive to new physics

Highest CKM suppression of the $s \rightarrow d$ coupling:

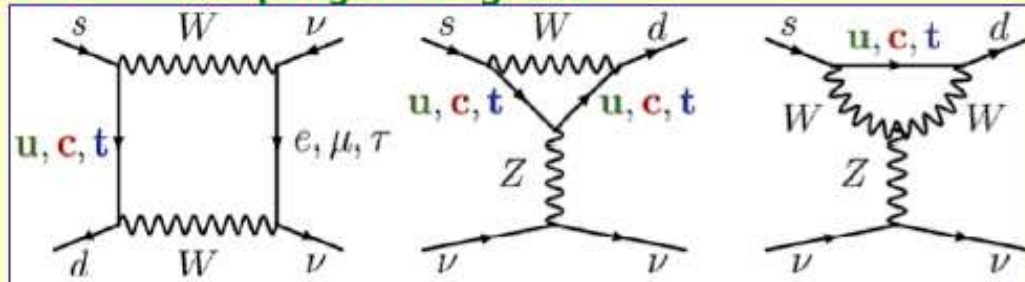
$$A \sim (m_t/m_W)^2 |V_{ts}^* V_{td}| \sim \lambda^5$$

SM branching ratios

(Brod, Gorbahn, Stamou; PRD83 (2011) 034030)

Mode	$BR_{SM} \times 10^{11}$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu} (\gamma)$	$7.81 \pm 0.75 \pm 0.29$
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$2.43 \pm 0.39 \pm 0.06$

SM: box and penguin diagrams



CKM parametric (mainly $|V_{ts}|$)

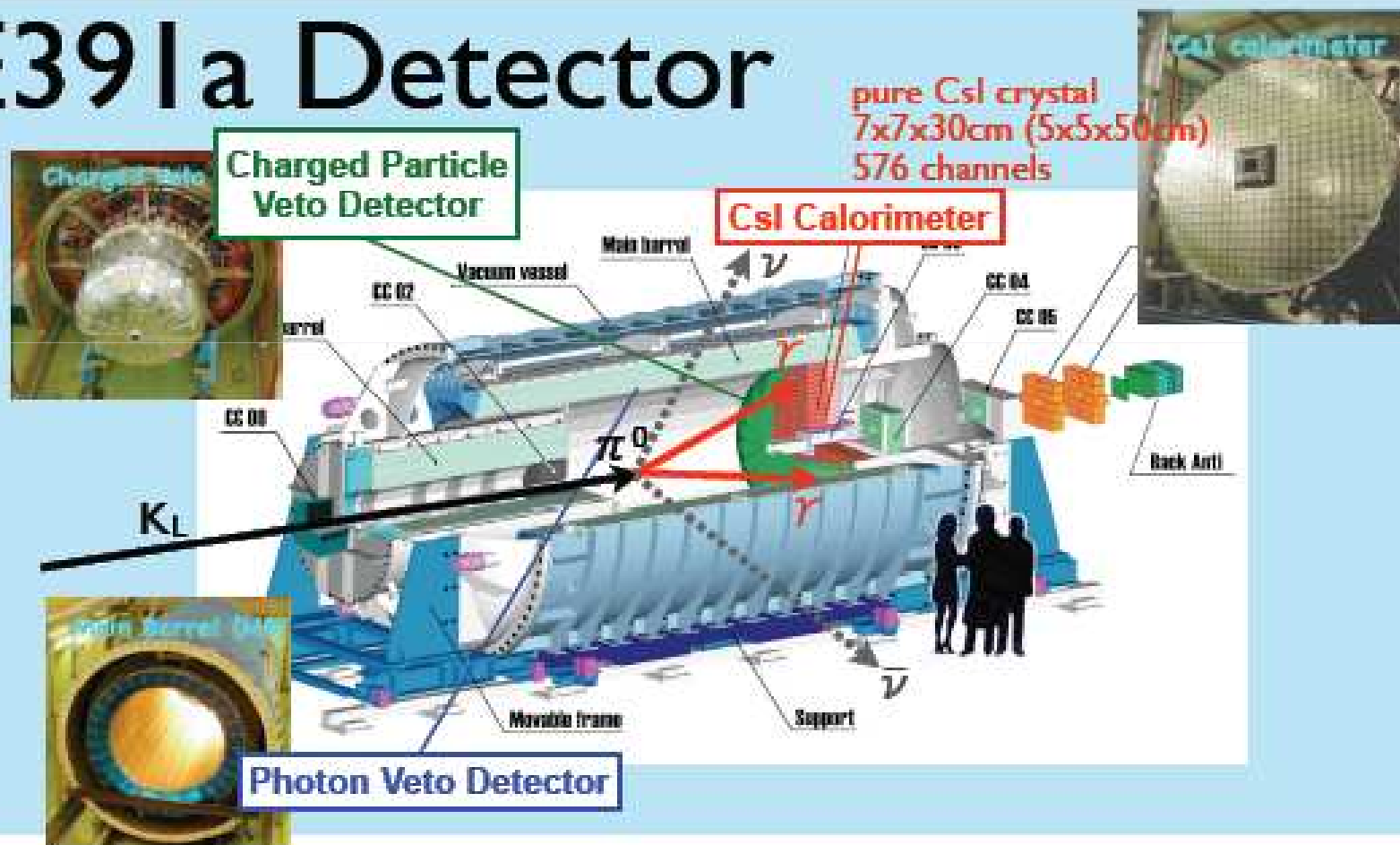
Intrinsic

- Hadronic matrix element can be related to measured quantities ($K \rightarrow \pi e \nu$ form factors).
- SM precision surpasses any other FCNC process involving quarks.
- Measurement of $|V_{td}|$ complementary to those from $B-\bar{B}$ mixing and $B^0 \rightarrow \rho \gamma$.
- $\delta BR/BR = 10\%$ would lead to $\delta |V_{td}|/|V_{td}| = 7\%$.

20

E391a (КЕК, Япония)

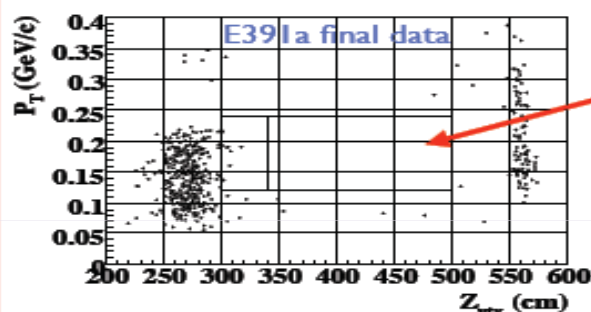
E391a Detector



E391a: окончательный результат

Results & Summary

- Opening the signal box for the final data sample



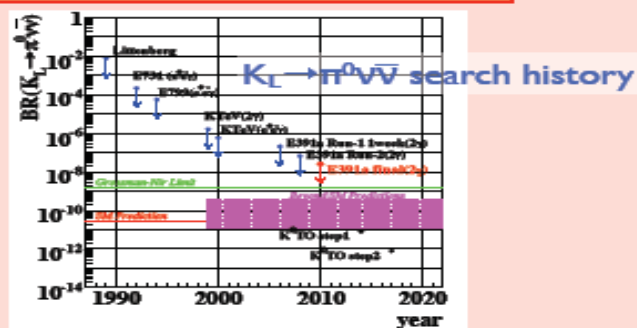
**NO event observed
in the signal box!**

- Statistics
 - $(8.70 \pm 0.61) \times 10^9$ K_L decays
 - estimated by $K_L \rightarrow 2\pi^0$ event sample

**E391a Final Upper Limit
 $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8}$ @ 90% C.L.**

PR D81,072004 (2010)

- Improvements
 - **x20** from previous experiment (kTeV)
 - **x2.6** from our previous result



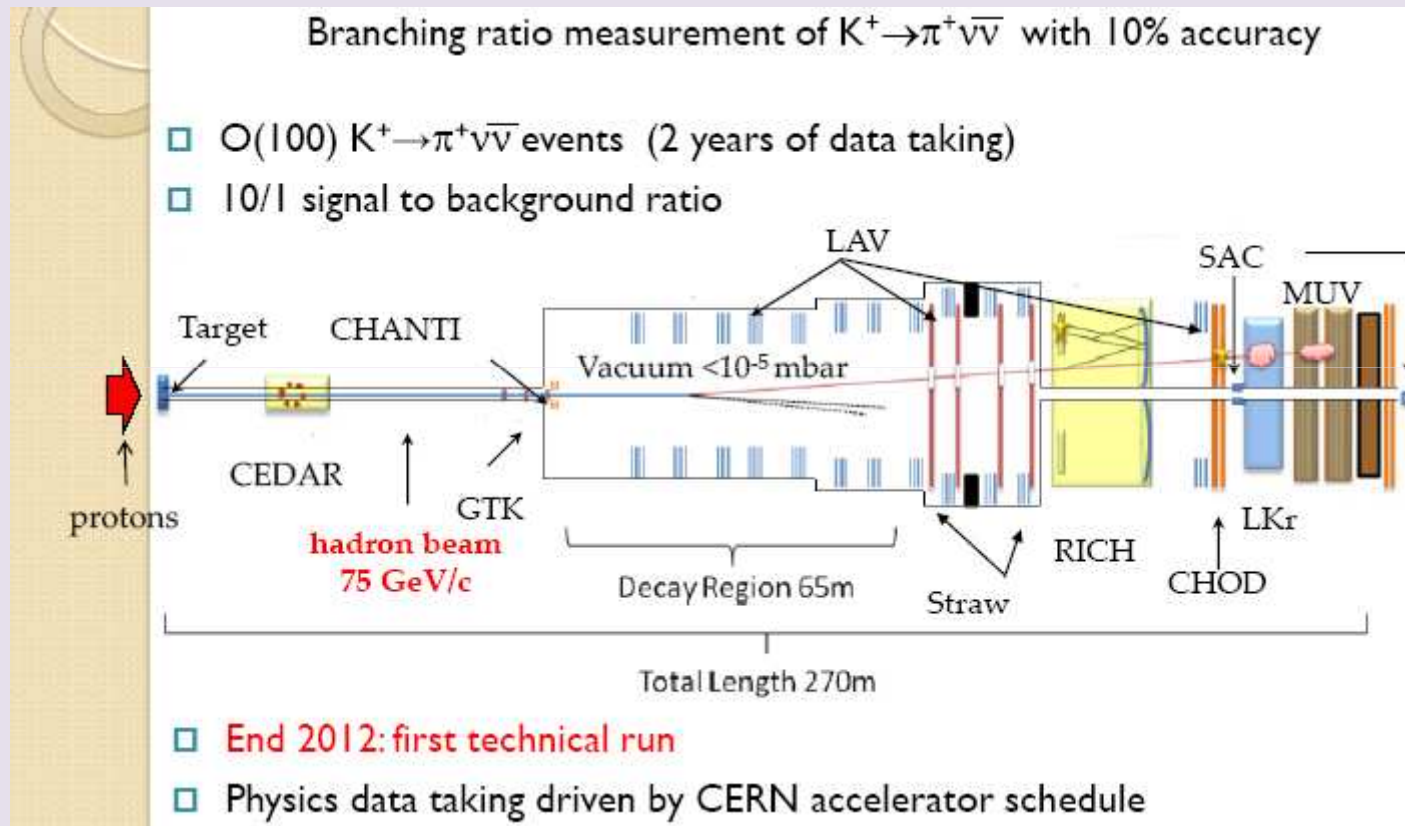
Каонная физика: БУДУЩЕЕ



NA62 (ЦЕРН, Швейцария)

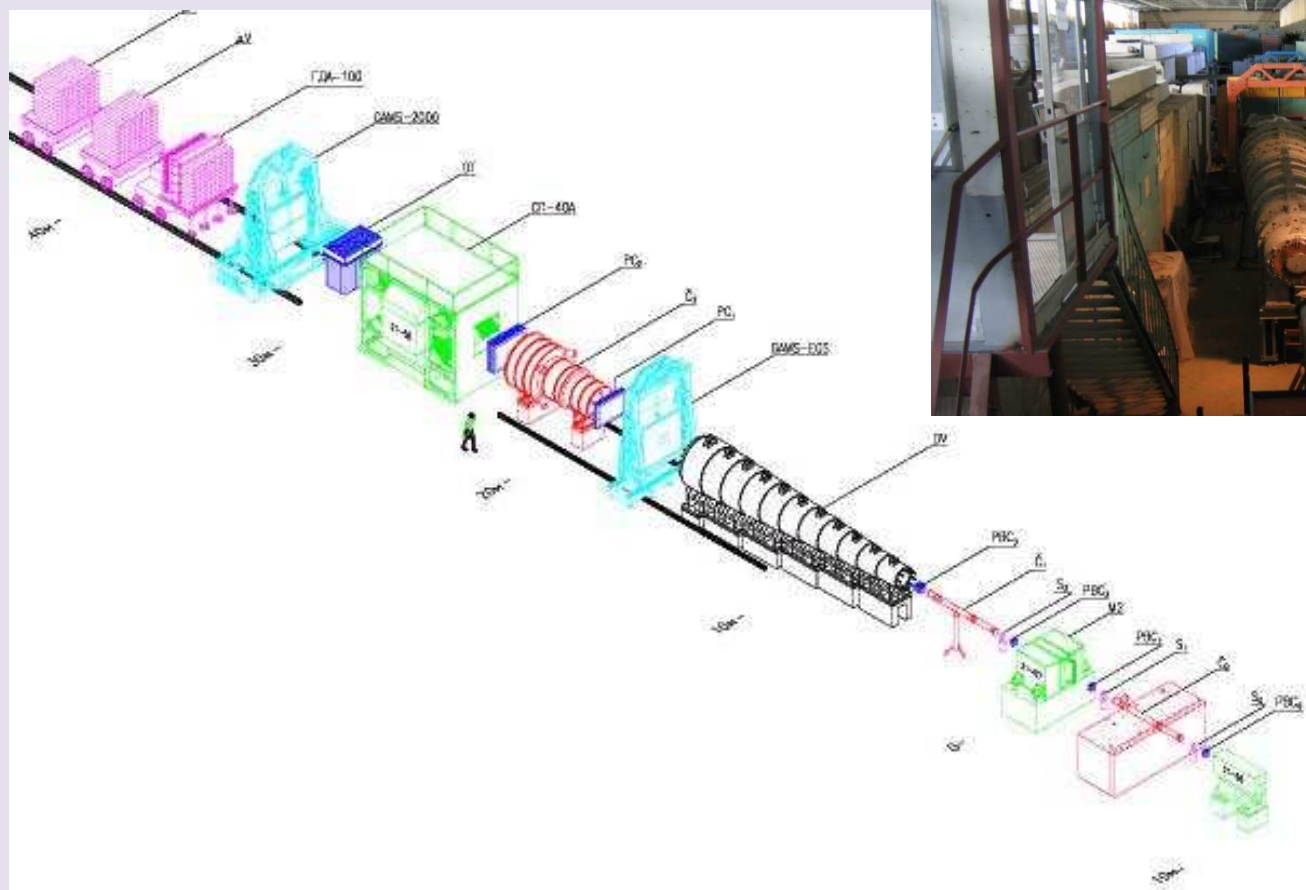
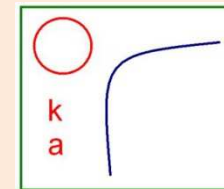
Branching ratio measurement of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ with 10% accuracy

- $O(100)$ $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ events (2 years of data taking)
- 10/1 signal to background ratio



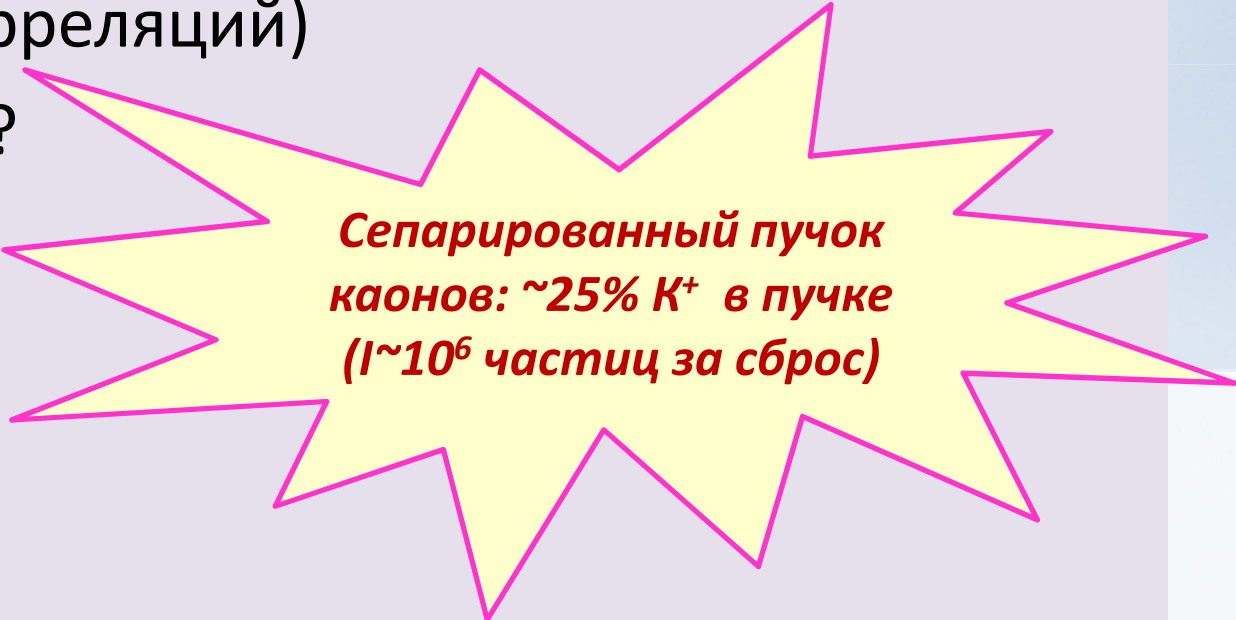
- End 2012: first technical run
- Physics data taking driven by CERN accelerator schedule

ОКА (ИФВЭ, Россия)



ОКА: прецизионное измерение редких распадов

- радиационные $Kl2\gamma$ распады $K \rightarrow l\nu\gamma$ (формфакторы, измерение BR)
- радиационные $Kl3\gamma$ распады $K \rightarrow l\nu\pi^0\gamma$ (измерение T-нечетных корреляций)
- Новые идеи???

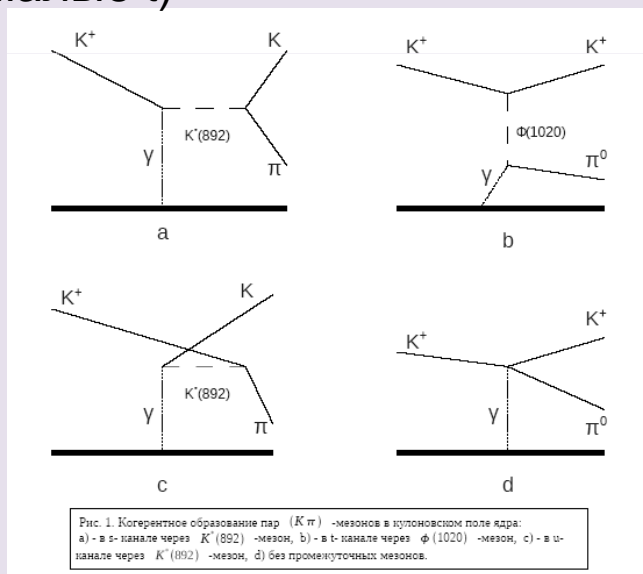


Сепарированный пучок каонов: ~25% K^+ в пучке ($I \sim 10^6$ частиц за сброс)

ОКА: программа с мишенью

Взаимодействия K^+ с ядром

Когерентные процессы
электромагнитного образования пар $K\pi$
(малые t)



Сечение образования ($K\pi$):
резонансные вклады,
киральная аномалия

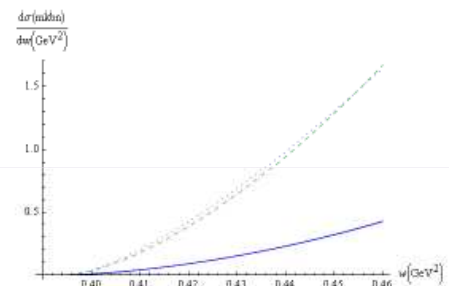


Рис. 4. Зависимость сечений от ω . Тонкая линия - вклад диаграммы киральной аномалии, сплошная - вклад от диаграммы с $K^*(892)$ - мезонами с распадами на $(K^+\pi^0)$ - пары, пунктирная - вклад от нл. интерференции.

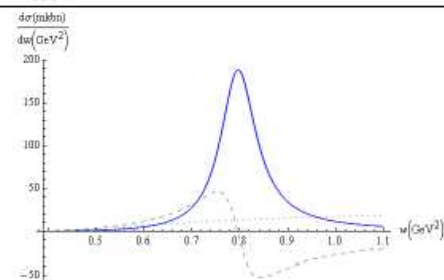
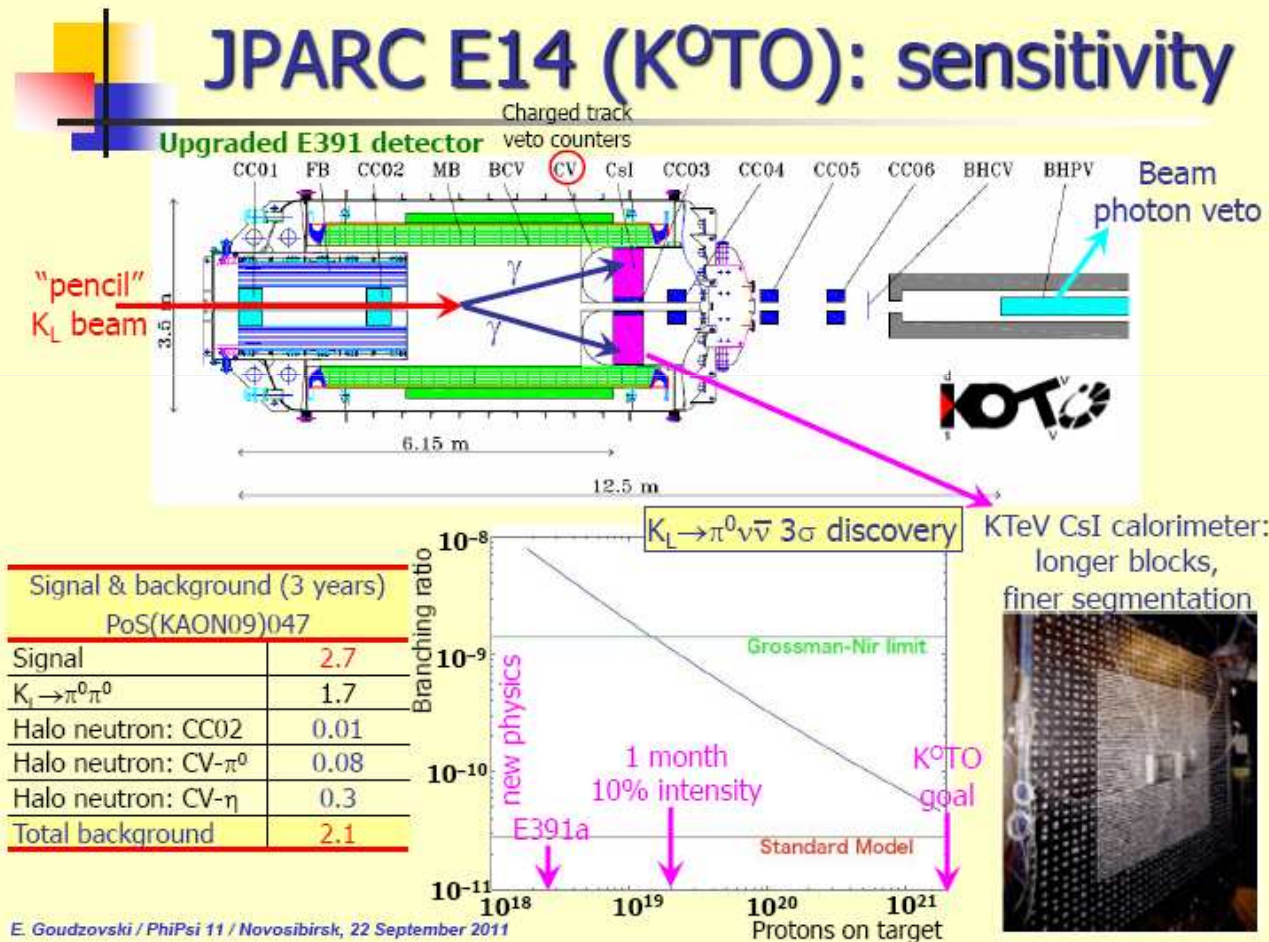


Рис. 5. Зависимость сечений от ω . Тонкая линия - вклад диаграммы киральной аномалии, сплошная - вклад от диаграммы с $K^*(892)$ - мезонами с распадами на $(K^+\pi^+)$ - пары, пунктирная - вклад от нл. интерференции.

КОТО (JPARC, Япония)



TREK, LFU (JPARC, Япония)

Stopped K^+ Experiments K1.1BR

- E06 (TREK)

“Measurement of T-violating transverse muon polarization (P_T) in $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ decay”

Stage-1 270 kW

- P36 (LFU)

“Measurement of $R_K = \Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$ and search for heavy sterile neutrinos”

Stage-1 (PAC11-Jan'11) 30 kW

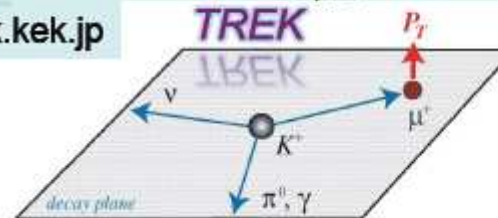
TREK (JPARC, Япония)

Transverse μ^+ polarization in $K_{\mu 3}$ Decay

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ decay

<http://trek.kek.jp>

$$P_T = \frac{\sigma_\mu \cdot (\mathbf{p}_{\pi^0} \times \mathbf{p}_{\mu^+})}{|\mathbf{p}_{\pi^0} \times \mathbf{p}_{\mu^+}|}$$



- P_T is T-odd, and spurious effects from final state interaction are small: $P_T(\text{FSI}) < 10^{-5}$
Non-zero P_T is a signature of T violation.
- Standard Model (SM) contribution to P_T : $P_T(\text{SM}) < 10^{-7}$
Hence P_T in the range $10^{-3} - 10^{-5}$ is a sensitive probe of CP violation beyond the SM.
- There are theoretical models of new physics which allow a sizable P_T value without conflicting with other experimental constraints.

The TREK experiment aims for a sensitivity of 10^{-4}

Заключение

- *Каонные распады остаются на переднем крае физики частиц*
- **Последние достижения:**
 - ✓ Измерение LFU с рекордной точностью 0.4%
 - ✓ Ограничение на смешивание тяжелого нейтрино:
 $|U_{\mu h}|^2 < 6 \times 10^{-5}$
 - ✓ Ограничение на $BR(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu)$ на уровне 2.6×10^{-8}
- **Планируется:**
 - ✓ Изучение распадов $K \rightarrow \pi \nu \nu$
 - ✓ Изучение радиационных распадов
 - ✓ Измерение P_T
 - ✓ Взаимодействие каонов с ядрами

Спасибо!!!



