

# Поиск тяжёлых нейтрино в распадах положительных каонов



А.Т. Шайхиев  
ИЯИ РАН

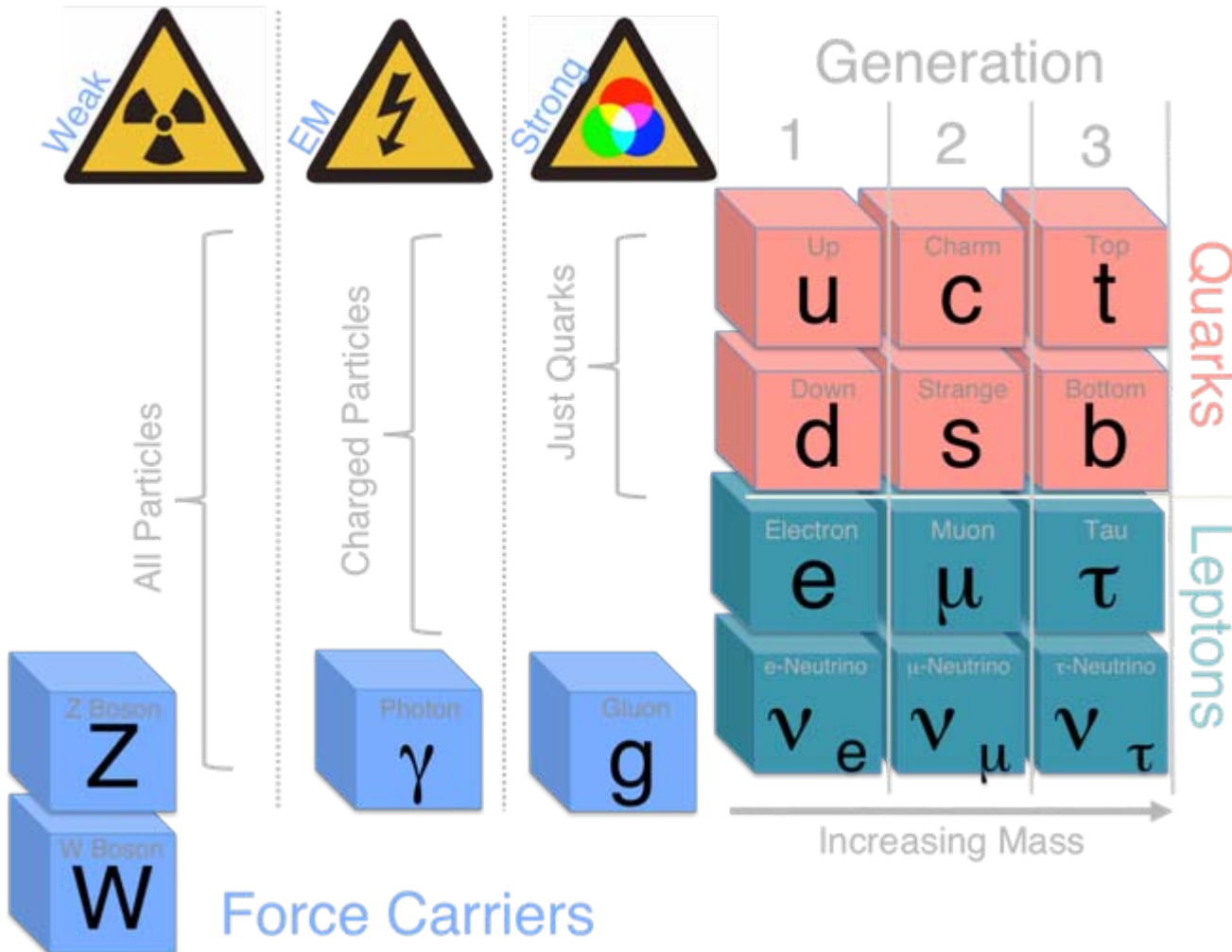
27 июня 2011

# План



- Нейтрино
- Предыдущие эксперименты
- Эксперимент E949
- Отбор событий
- Изучение фоновых процессов
- Измерение акцептанса
- Анализ ~5% данных E949
- Заключение

# Нейтрино в Стандартной модели



# Осцилляции нейтрино

Слабые состояния  $| \nu_l \rangle$  линейные комбинации собственных массовых состояний  $| \nu_i \rangle$

$$\nu_l = \sum U_{li} \nu_i, \quad l = e, \mu, \tau; \quad i = 1, 2, 3$$

$$7.4 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 < \Delta m_{\text{sol}}^2 < 7.8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$0.84 < \sin^2 \theta_{\text{sol}} < 0.9$$

SK, SNO,  
KamLAND

$$2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 < \Delta m_{\text{atm}}^2 < 2.56 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$0.92 < \sin^2 \theta_{\text{atm}} < 1.0$$

K2K, MINOS



# See-saw механизм

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + i\bar{N}_a \not{\partial} N_a - y_{\alpha a} H^\dagger \bar{L}_\alpha N_a - \frac{M_a}{2} \bar{N}_a^c N_a + h.c.$$

$$\mathcal{M}^{(n+3)} = \begin{pmatrix} 0 & y_{\alpha a} \langle H \rangle \\ y_{a\alpha} \langle H \rangle & \text{diag}\{M_1, \dots, M_n\} \end{pmatrix}$$

$$m(\nu_{1,2,3}^{(m)}) \sim \frac{y^2 \langle H \rangle^2}{M}$$

active neutrinos

$$m(\nu_a^{(m)}) \sim M \quad (a > 3)$$

sterile neutrinos

# Стерильные нейтрино с массой ниже 100 ГэВ

- Темная материя
- Барионная асимметрия
- Движение пульсаров
- Осцилляции нейтрино



# $\nu$ MSM

arXiv:0804.4542v2 [hep-ph]  
arXiv:0901.0011v2 [hep-ph]

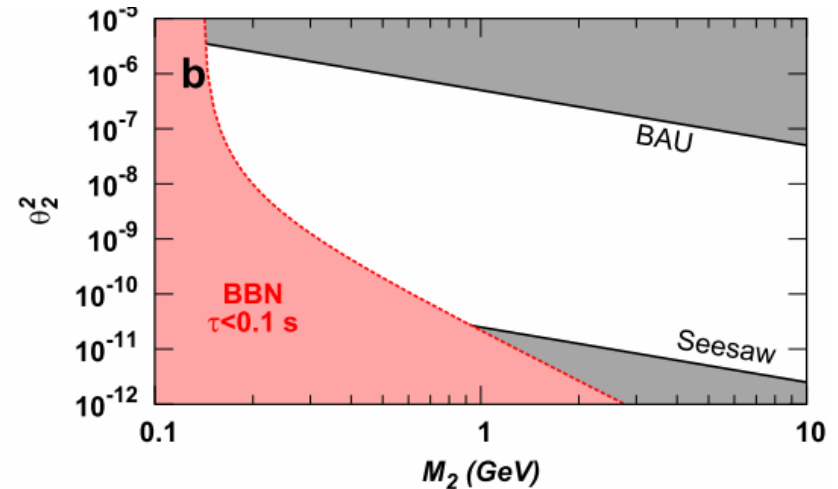
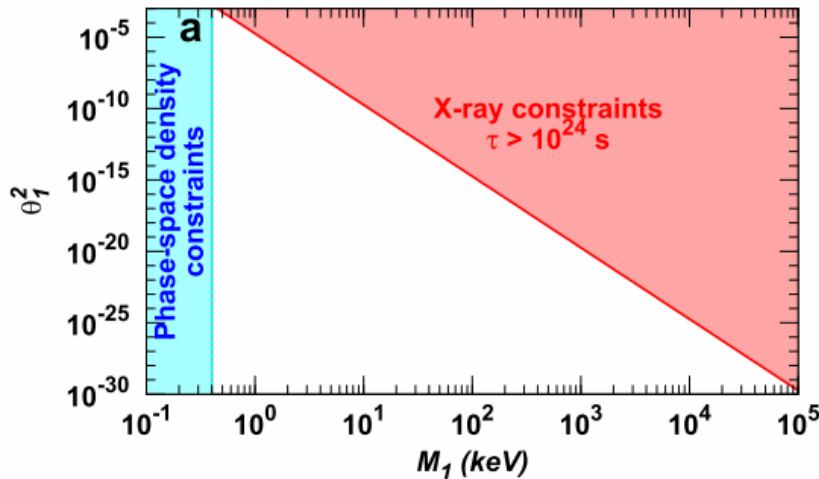
## SM + 3 нейтральных правых тяжелых лептона

$$M_{N_1} \in O(10) \text{ кэВ}$$

$$M_{N_{2,3}} \in O(1) \text{ ГэВ}$$

кандидат в темную материю

барионная асимметрия



$\theta_1$  и  $\theta_2$  - углы смешивания с частицами SM

# Как искать тяжелые нейтрино?

## Распады мезонов

Поиск дополнительного пика, лежащего ниже основного

$$\Gamma(M^+ \rightarrow l^+ \nu_h) \sim \Gamma(M^+ \rightarrow l^+ \nu_l) |U_{lh}|^2$$

## Распады тяжелых нейтрино

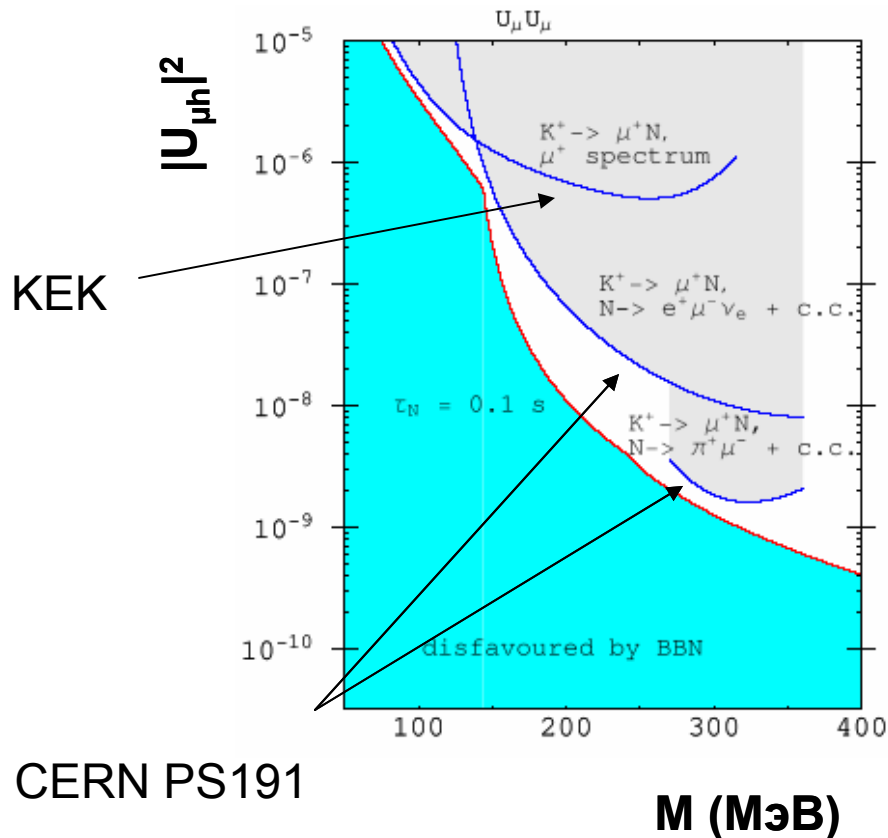
“Ничего” → лептоны и адроны

$$N \rightarrow e^+ e^- \nu_\alpha, N \rightarrow \mu^\pm e^\mp \nu_\alpha, N \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\alpha$$

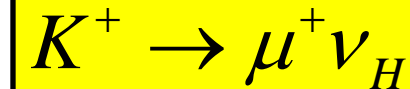
$$N \rightarrow \pi^0 \nu, \pi e, \pi \mu, K e, K \mu \dots$$



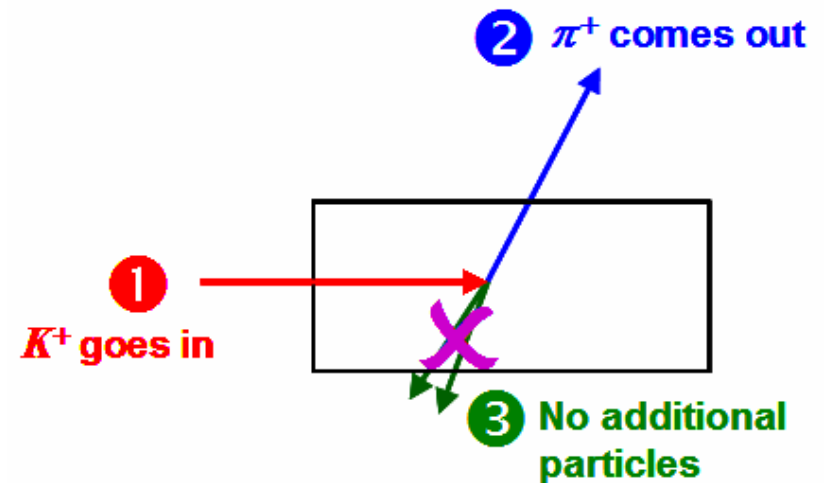
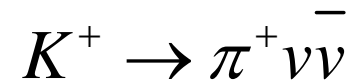
# Результаты предыдущих экспериментов и космологическое ограничение



Для исследования  
области масс от 150  
МэВ до 270 МэВ было  
предложено  
использовать данные  
эксперимента E949 для  
поиска распада



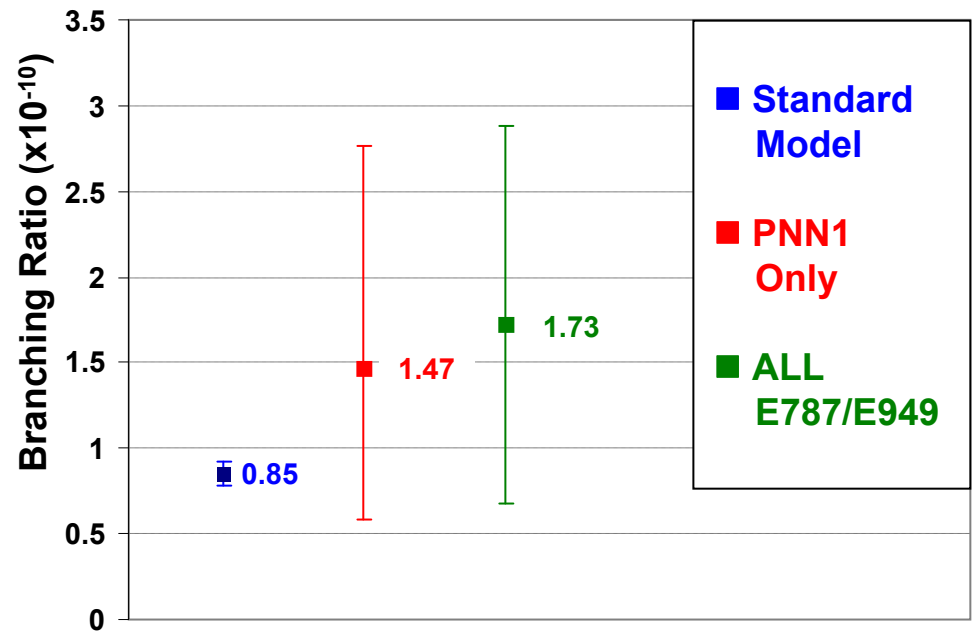
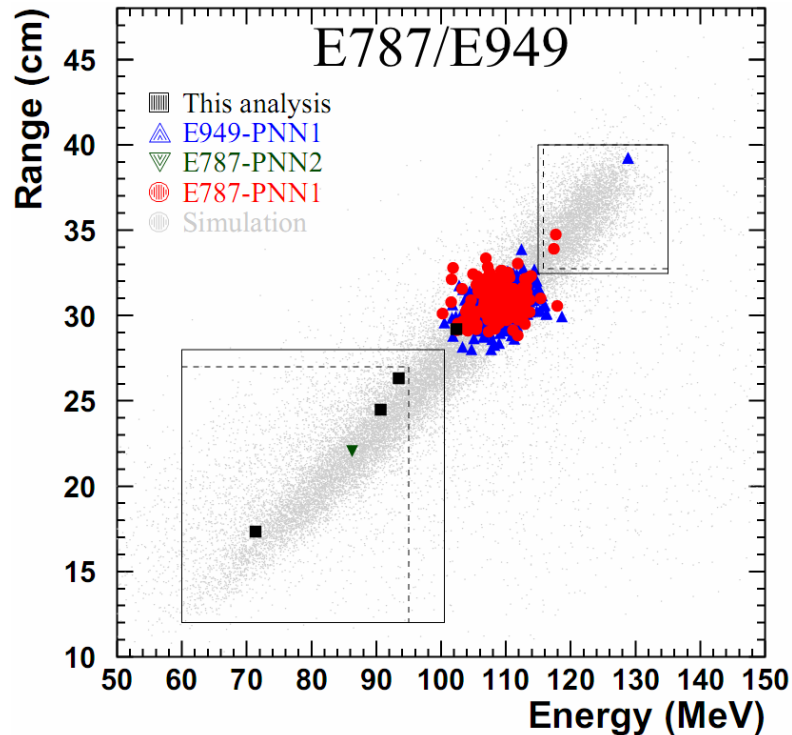
# Эксперимент BNL E787/E949



Предсказание СМ

$$\mathcal{B}_{SM}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.85 \pm 0.07) \times 10^{-10}$$

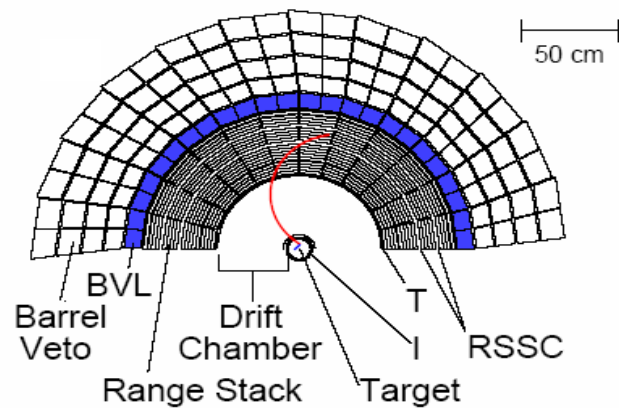
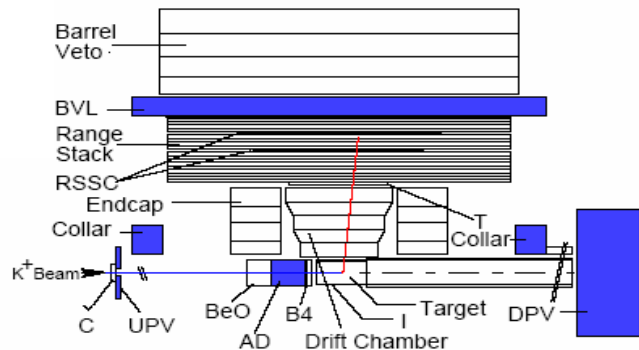
# Результат E787/E949



Phys. Rev. D 79, 092004 (2009)

$$\mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (1.73_{-1.05}^{+1.15}) \times 10^{-10}$$

# Детектор E949



- Пучок  $\sim 700$  MeV/c входящих каонов замедляется BeO и AD

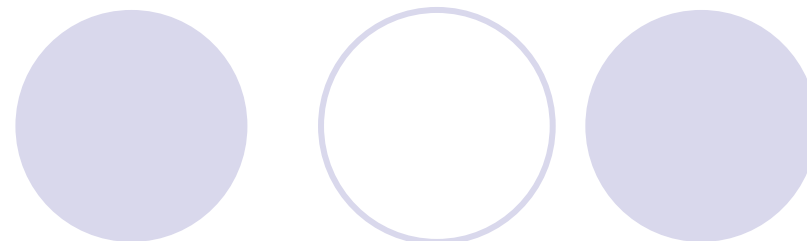
- $K^+$  останавливаются и распадаются в сцинтилляционной мишени

- Импульс вылетающего  $\pi^+$  измеряется в UTC, энергия и глубина проникновения - в RS и мишени

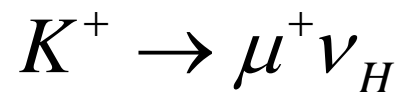
- $\pi^+$  останавливается и распадается в RS – детектируется цепочка распада  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

- Вето система фотонов: BV – BVL, RS, EC, CO, USPV, DSPV

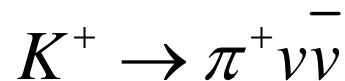
# Отбор событий



Отличительная черта распада



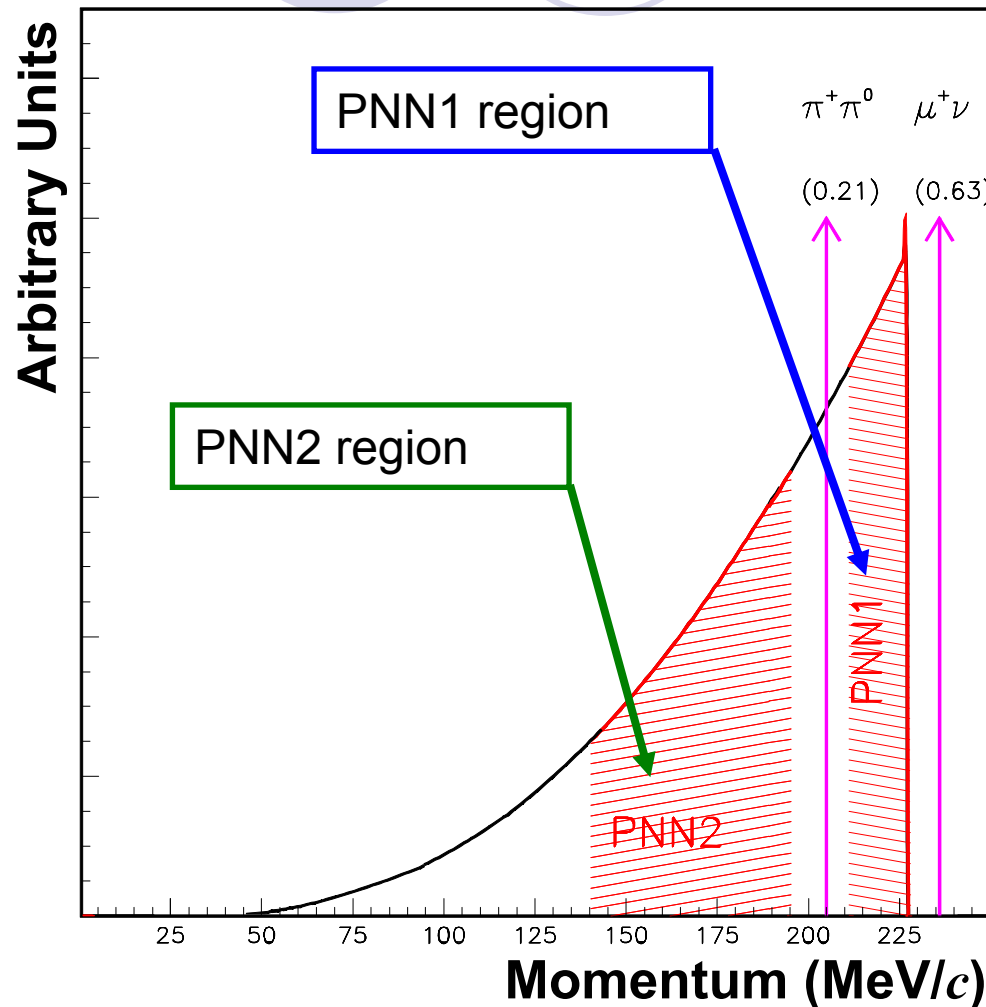
такая же как для



одна заряженная частица +  
“ничего”



используем основной триггер E949



# Критерии отбора рпп1, рпп2 триггеров

## рпп1 триггер

- Временная задержка на вылет частицы из мишени, 2 нс
- Остановка частицы между 11 и 18 слоями RS
- Фотонное вето
- **Идентификация  $\pi^+$  :  
поиск цепочки распада  
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+$  в остановленном  
счетчике (L1n)**

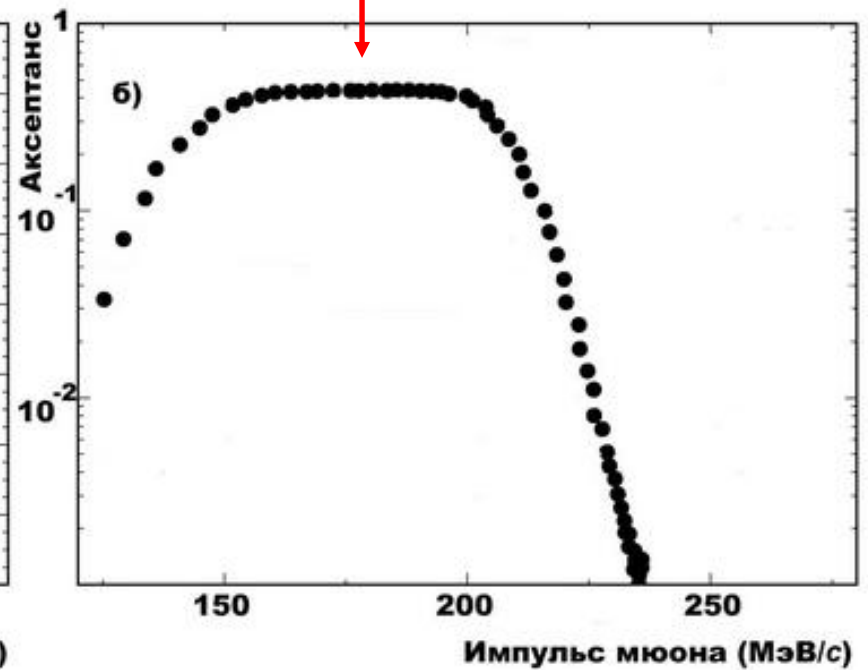
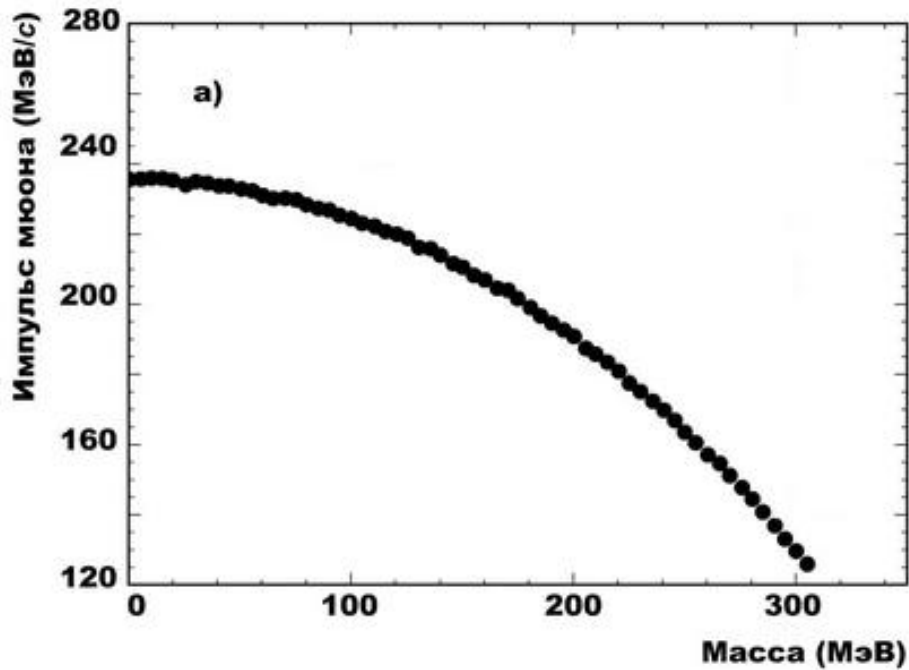
## рпп2 триггер

- Временная задержка на вылет частицы из мишени, 2 нс
- Остановка частицы между 6 и 12 слоями RS
- Фотонное вето
- **Идентификация  $\pi^+$  :  
поиск цепочки распада  
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+$  в остановленном  
счетчике (L1n)**

# Эффективность рпп12 триггера

Монте-Карло моделирование  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$

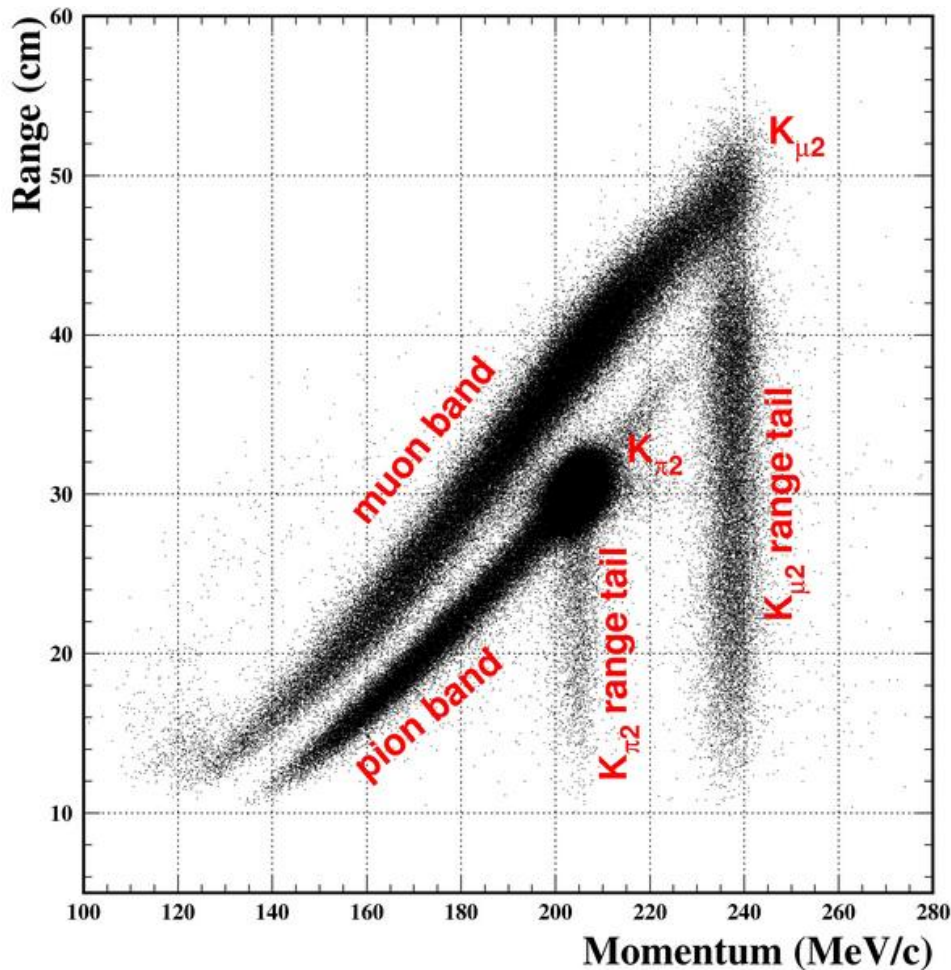
Моделирование не учитывает идентификацию пиона онлайн



Оптимальная для анализа область масс нейтрино: 160 МэВ – 260 МэВ



# Источники фона



- **Muon band: в основном  $K_{\mu 2\gamma}$ ,  $K_{\mu 3}$  распады**
- **Pion band:  $K_{\pi 2\gamma}$ ,  $K_{\pi 2}$  распады или пионы из пучка**



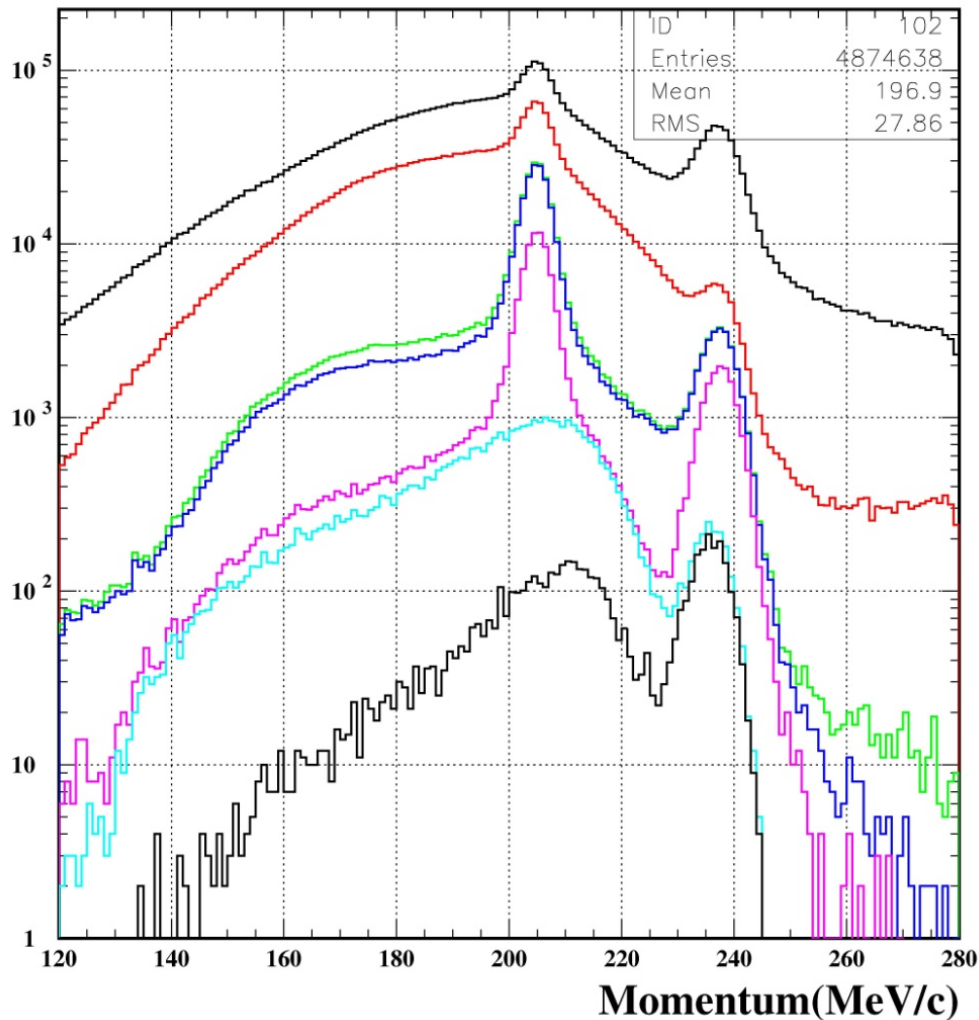
# Моделирование основных источников фона

Process	Trigger+cuts rej	BR	Total rejection
$K_{\mu\nu\gamma}$	$\sim 10^4$	$6.2 \times 10^{-3}$	$\sim 10^7$
$K_{\mu 3}$	$\sim 10^7$	$3.35 \times 10^{-2}$	$\sim 10^9$
Only $\pi\nu\nu(1+2)$ trigger			
$K_{\pi 2\gamma}$	$\sim 5 \times 10^4$	$2.75 \times 10^{-4}$	$\sim 2 \times 10^9$

$K_{\pi 2\gamma}$  не дает вклад в фон из-за наличия 3 фотонов в конечном состоянии и подавления пионов при идентификации частиц в детекторе

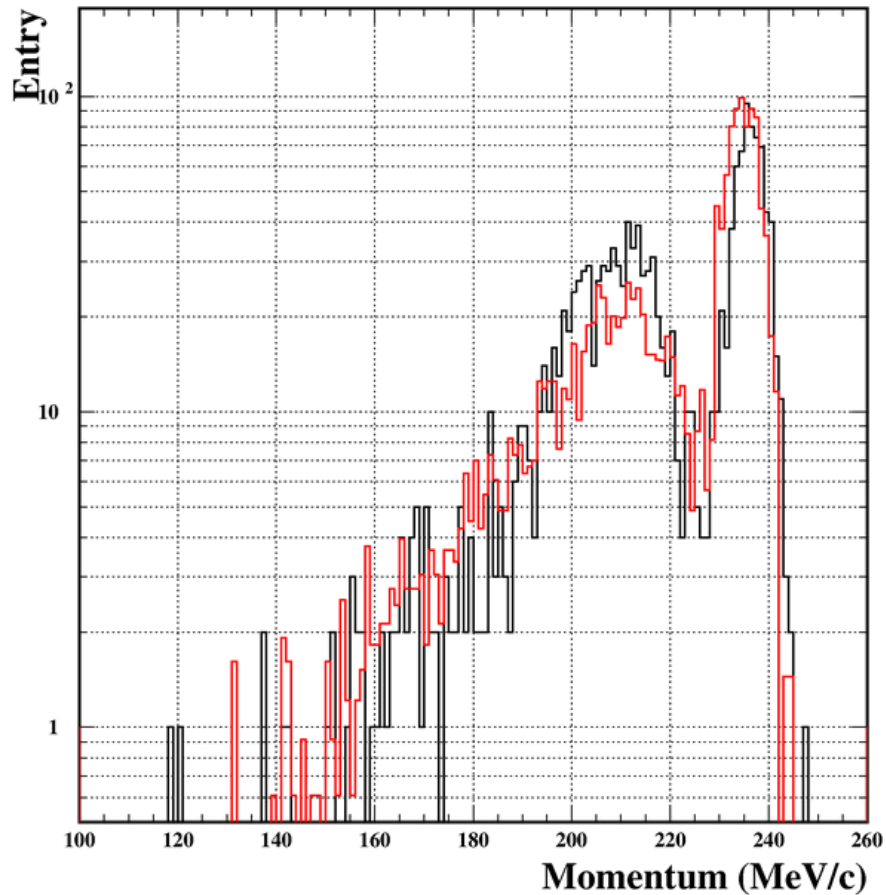
$K_{\mu\nu\gamma}$  является доминирующим фоновым процессом

# 1/20 данных E949



- after trigger
- after kinematics
- after beam
- after DELCO2
- after target
- after inv RNGMOM
- after PV, 90% Acc.

# Сравнение Монте-Карло моделирования с экспериментальными данными



— 1/20 данных E949 после  
некоторых критериев  
отбора

— Смоделированный  
 $K_{\mu\nu\gamma} + K_{\mu 2}$  распад после  
некоторых критериев  
отбора

# Измерение аксептанса

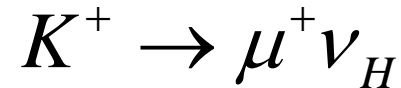
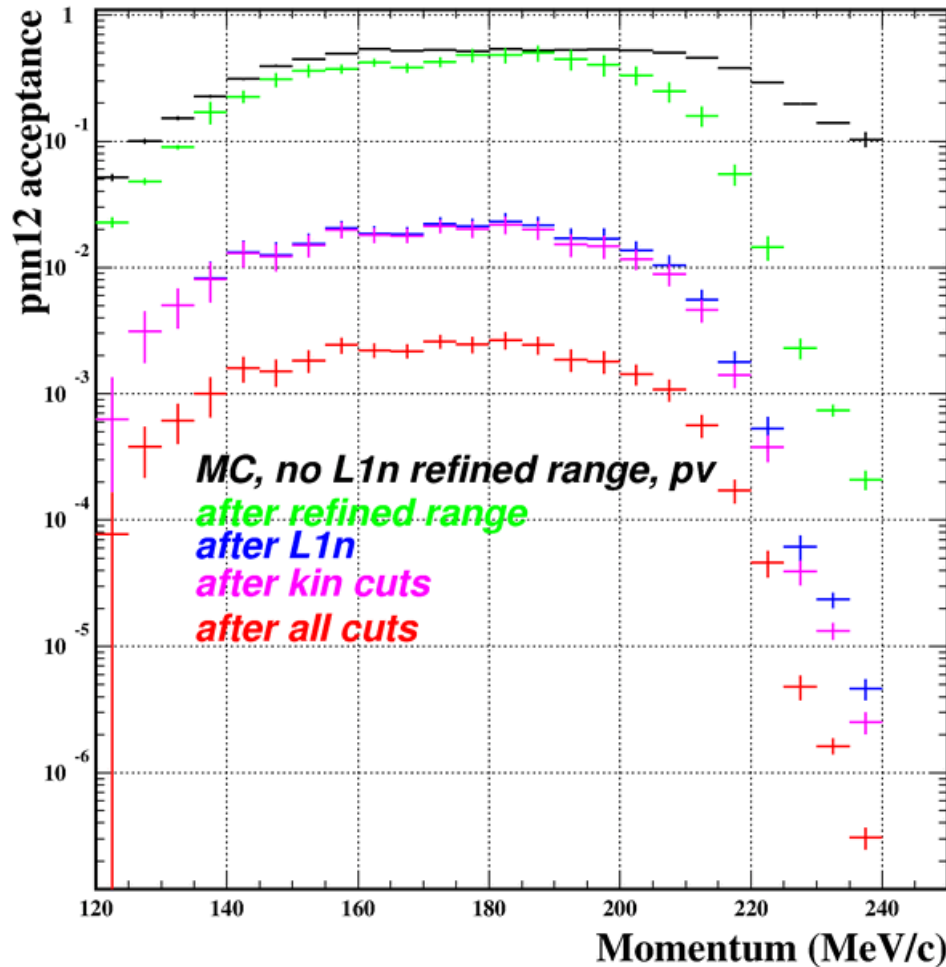
## Триггер

- Остановка частицы между 6 и 18 слоями RS – MC
  - L1n
  - Refined Range
  - Photon veto
- } Data

## Offline cuts

- Kin cuts – MC
  - Beam
  - Target
  - Photon veto
  - Others
- } Data

# Acceptance vs Momentum



Наибольший вклад в потерю аксептанса вносит L1n – онлайн идентификация пиона. Это условие убрать нельзя.

# Проверка измерений акцептанса

Для проверки измерений акцептанса используем два хорошо известных распада:

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad \text{высокий импульс}$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma \quad \text{низкий импульс}$$

$$BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma) = \frac{N_{candidates}}{(K\text{Live})_{pnn12} \times A_{tot} \times Correction}$$

$Correction = \varepsilon_{T \bullet 2} \times f_s$ ,  $f_s$  – эффективность остановки каонов в мишени

$\varepsilon_{T \bullet 2}$  - эффективность запуска триггера

# BR(K<sub>μ2</sub>) calculation

$$BR(K_{\mu 2}) = \frac{N_{K_{\mu 2}}}{\varepsilon_{T \cdot 2} \times f_s \times (K\text{live})_{1/20} \times A_{K_{\mu 2}, \text{trig}}^{UMC} \times A_{K_{\mu 2}, \text{kin}}^{UMC} \times A_{L1n} \times A_{19ct} \times A_{L0rr1} \times A_{\text{offline\_cuts}}}$$

$$A_{\text{offline\_cuts}} = A_{PRRF} \times A_{OPSVETO} \times A_{UTCQUAL} \times A_{\text{beam\&tg}} \times A_{\text{tgkin}} \times A_{PV} \times A_{\text{box}}$$

$$A_{K_{\mu 2}, \text{trig}}^{UMC} = 0.4551 \pm 0.0016$$

$$A_{L0RR1} = 0.0023 \pm 0.0002$$

$$A_{K_{\mu 2}, \text{kin}}^{UMC} = 0.6165 \pm 0.0027$$

$$A_{19ct} = 0.0914 \pm 0.0005$$

$$A_{PRRF} = 0.6570 \pm 0.0030$$

$$A_{PV} = 0.7189 \pm 0.0012$$

$$A_{L1n} = 0.0206 \pm 0.0006$$

$$A_{\text{tgkin}} = 0.9799 \pm 0.0003$$

$$A_{\text{beam\&tg}} = 0.4195 \pm 0.0016$$

$$(K\text{live})_{1/20} = 9.1 \times 10^{10}$$

$$A_{\text{box}} = 0.3255 \pm 0.0082$$

$$f_s = 0.7558 \pm 0.0075$$

$$A_{UTCQUAL} = 0.9503 \pm 0.0007$$

$$\varepsilon_{T \cdot 2} = 0.9505 \pm 0.0012$$

$$A_{OPSVETO} = 0.9742 \pm 0.0006$$

$$N_{K_{\mu 2}} = 2625 \pm 51$$

$$BR(K_{\mu 2}) = 0.5649 \pm 0.0543$$

$$BR^{PDG}(K_{\mu 2}) = 0.6355 \pm 0.0011$$

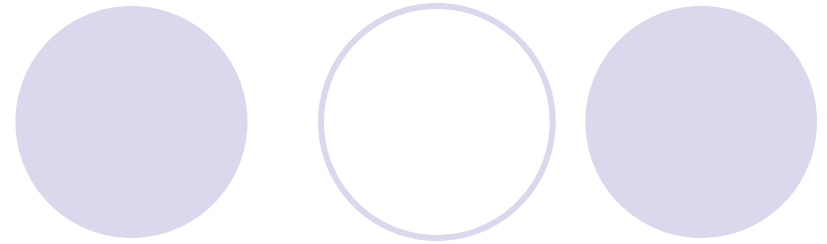
# BR( $K_{\mu 2\gamma}$ ) calculation

	pnn1 trigger	pnn2 trigger
$A_{trigger}^{UMC}$	$0.2676 \pm 0.0006$	$0.0544 \pm 0.0003$
$A_{RefinedRange}$	$0.5189 \pm 0.0251$	$0.9852 \pm 0.0066$
$A_{L1n}$	$0.0392 \pm 0.0016$	$0.0413 \pm 0.0021$
$A_{beam\&target}$	$0.4195 \pm 0.0003$	$0.4195 \pm 0.0003$
$A_{tgkin}$	$0.9799 \pm 0.0012$	$0.9799 \pm 0.0012$
$A_{kin}$	$0.9053 \pm 0.0016$	$0.9107 \pm 0.0020$
$A_{UTCQUAL}$	$0.9503 \pm 0.0007$	$0.9503 \pm 0.0007$
$A_{OPSVETO}$	$0.9742 \pm 0.0006$	$0.9742 \pm 0.0006$
$A_{RNGMOM}$	$0.9739 \pm 0.0012$	$0.9739 \pm 0.0012$
$A_{PRRF}$	$0.9520 \pm 0.0007$	$0.9520 \pm 0.0007$
$A_{box}$	$0.5460 \pm 0.0035$	$0.8972 \pm 0.0034$
$A_{PV}$	$0.0077 \pm 0.0003$	$0.0049 \pm 0.0004$
$A_{fs}$	$0.7558 \pm 0.0075$	$0.7558 \pm 0.0075$
$A_{\epsilon_{T\bullet 2}}$	$0.9505 \pm 0.0012$	$0.9505 \pm 0.0012$
$(KB_{live})_{1/20}$	$9.1 \times 10^{10}$	$9.1 \times 10^{10}$
$N_{K_{\mu\nu\gamma}}$	$710 \pm 27$	$414 \pm 21$
$\mathcal{B}(K_{\mu\nu\gamma})$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	$(2.0 \pm 0.2) \times 10^{-3}$

Для диапазона  
импульса  
мюона от 155  
до 205 МэВ/с



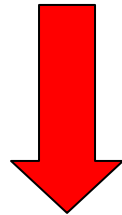
# PDG BR(Km2g)



PDG value for  $p < 231.5$ :  $BR^{PDG} = (6.2 \pm 0.8) \times 10^{-3}$

Use MC simulation of the Km2g decay to measure ratio  $\frac{N_{155 < p < 205}}{N_{p < 231.5}}$

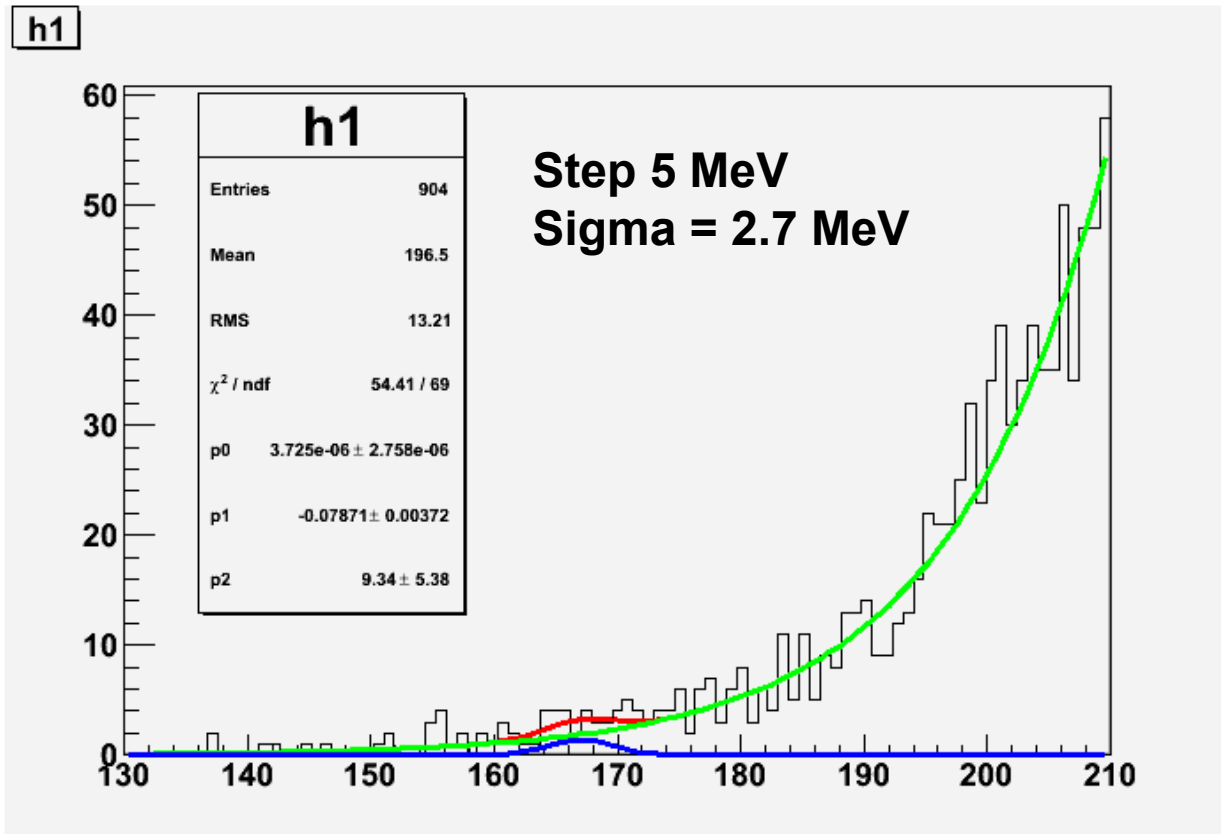
$$\frac{N_{155 < p < 205}}{N_{p < 231.5}} = 0.2351 \pm 0.0054$$



PDG value for  $155 < p < 205$ :

$$BR^{PDG} = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{-3}$$

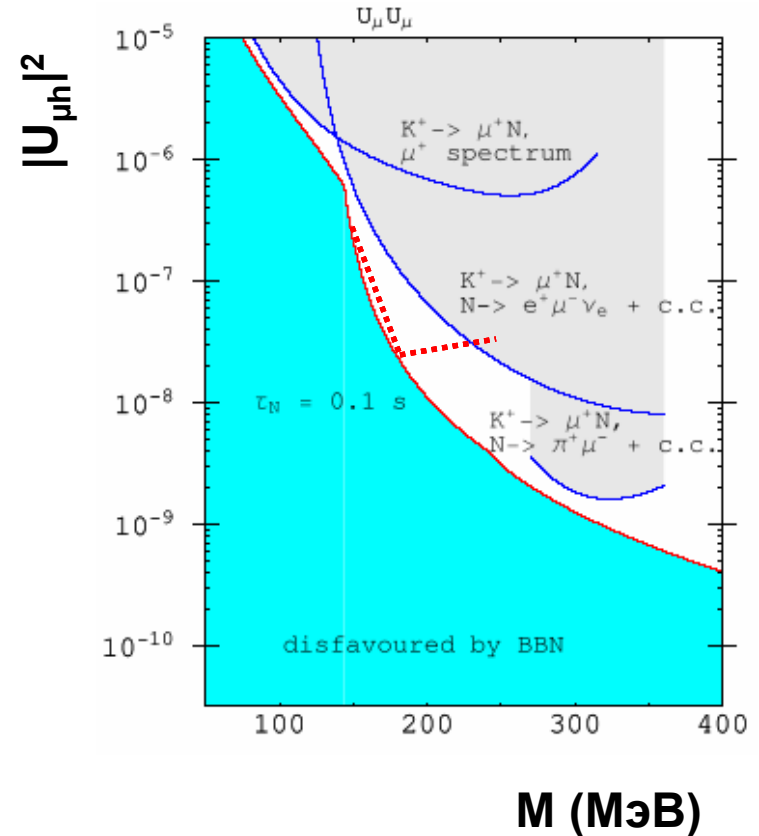
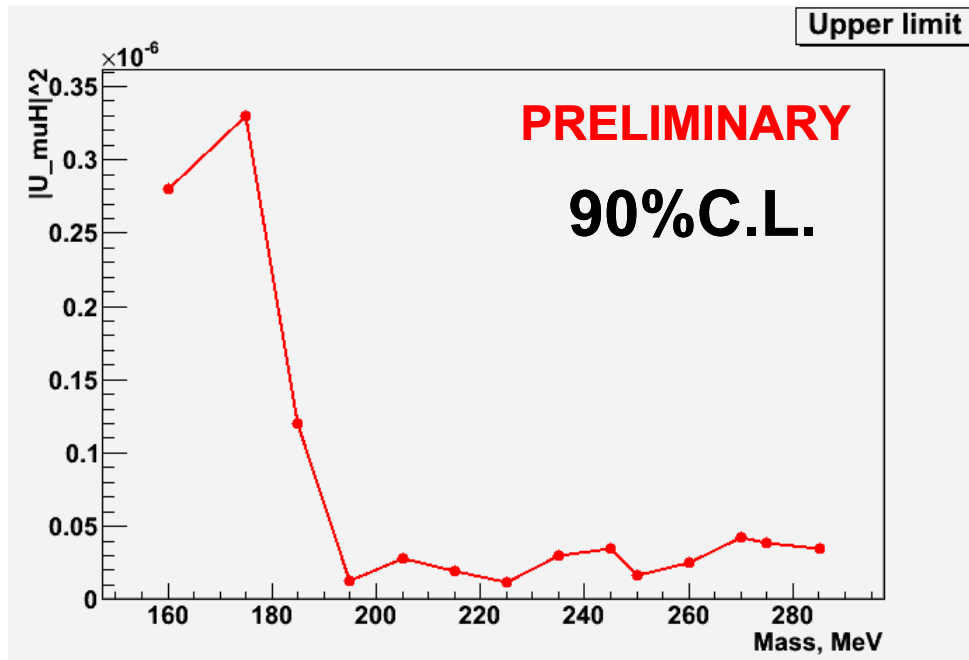
# Extract signal



Fit histogram by  
Exp+Gauss (red  
line), green line –  
background  
(Km2g), blue line  
– signal

# Upper limit from ~5% data

PRELIMINARY



This analysis

Previous experiments

# Заключение

- Разработана методика поиска тяжелых нейтрино в распаде  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ , используя данные эксперимента E949
- Проанализированы ~5% всех данных
- Получено ограничение на  $|U_{\mu H}|^2$  на уровне  $\sim 10^{-8}$  для масс тяжелого нейтрино от 200 до 280 МэВ, что лучше чувствительности предыдущих экспериментов
- Окончательный результат на основе всех данных ожидается осенью 2011

# Спасибо за внимание!

PRELIMINARY

