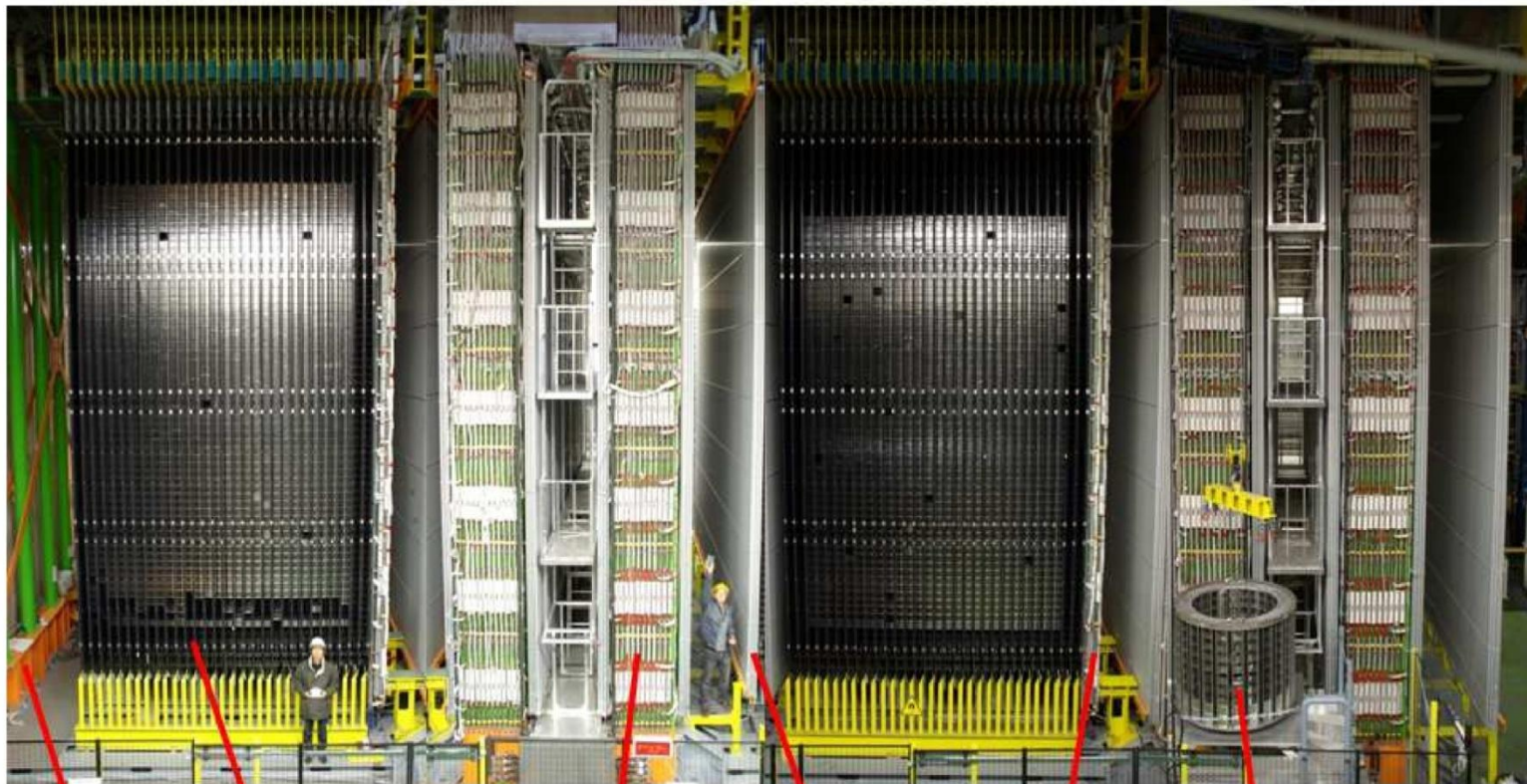


# Результаты эксперимента OPERA – осцилляции нейтрино

← SM1 → ← SM2 →



VETO

Target area

Magnet and  
RPCs

PT

PT+XPC

BMS

Тимур Джатдоев (НИИЯФ МГУ)

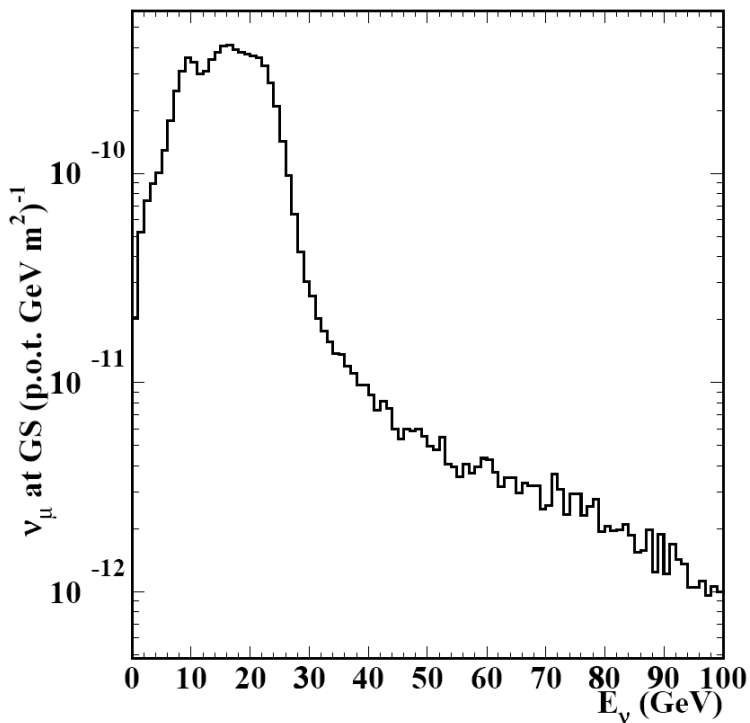
# Содержание

1. Эксперимент OPERA и его родословная (CHORUS, DONUT, NOMAD)
2. Реконструкция характеристик взаимодействия гибридным детектором OPERA
3. Первый кандидат на взаимодействие  $\nu_\tau$  в эмульсионном детекторе
4. Поиск осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  по данным 2008-2009 гг.
5. Фон: рождение чармированных адронов, рассеяние мюонов и адронов на большие углы
6. Многомерные критерии поиска событий от  $\nu_\tau$
7. Заключение и выводы

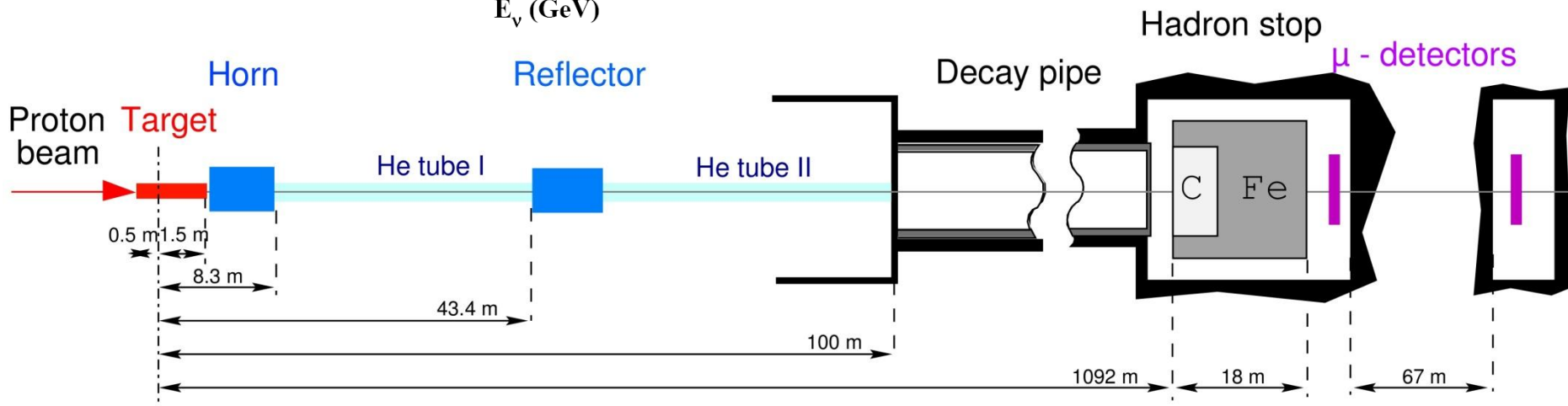
# “Родители” эксперимента OPERA: DONUT и CHORUS

- I. **D**irect **O**bservation of **NU** **T**au (DONUT): открытие  $\nu_\tau$  (для  $\tau$   $c\tau \approx 87 \mu\text{m}$ ) (K. Kodama et al. (DONUT Collaboration), Phys. Rev. D, **78**, 052002 (2008))
- II. **C**ERN **H**ybrid **O**scillation **R**esearch apparatus **US** (CHORUS):
  1. Поиск осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  (E. Eskut et al. (CHORUS Collaboration), Nucl. Phys. B, **793**, 326 (2008))
  2. Детальное исследование процессов рождения чармированных адронов (A. Kayis-Topaksu et al. (CHORUS Collaboration), NJP, **13**, 093002 (2011))
- III. **N**eutrino **O**scillation **MA**gnetic **D**etector (NOMAD): прецизионное измерение сечений взаимодействия  $\nu_\mu$  (Q. Wu et al., Phys. Lett. B, **660**, 19 (2008)), поиск осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  (P. Astier et al., Nucl. Phys. B, **611**, 3 (2001))  $\rightarrow$  генератор событий для эксперимента OPERA(!) (D. Autiero, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **139**, 253 (2005))

# Пучок CERN-Gran Sasso (CNGS) с базой 730 км (Bailey et al, CERN-SL/99-034(DI) (1999))



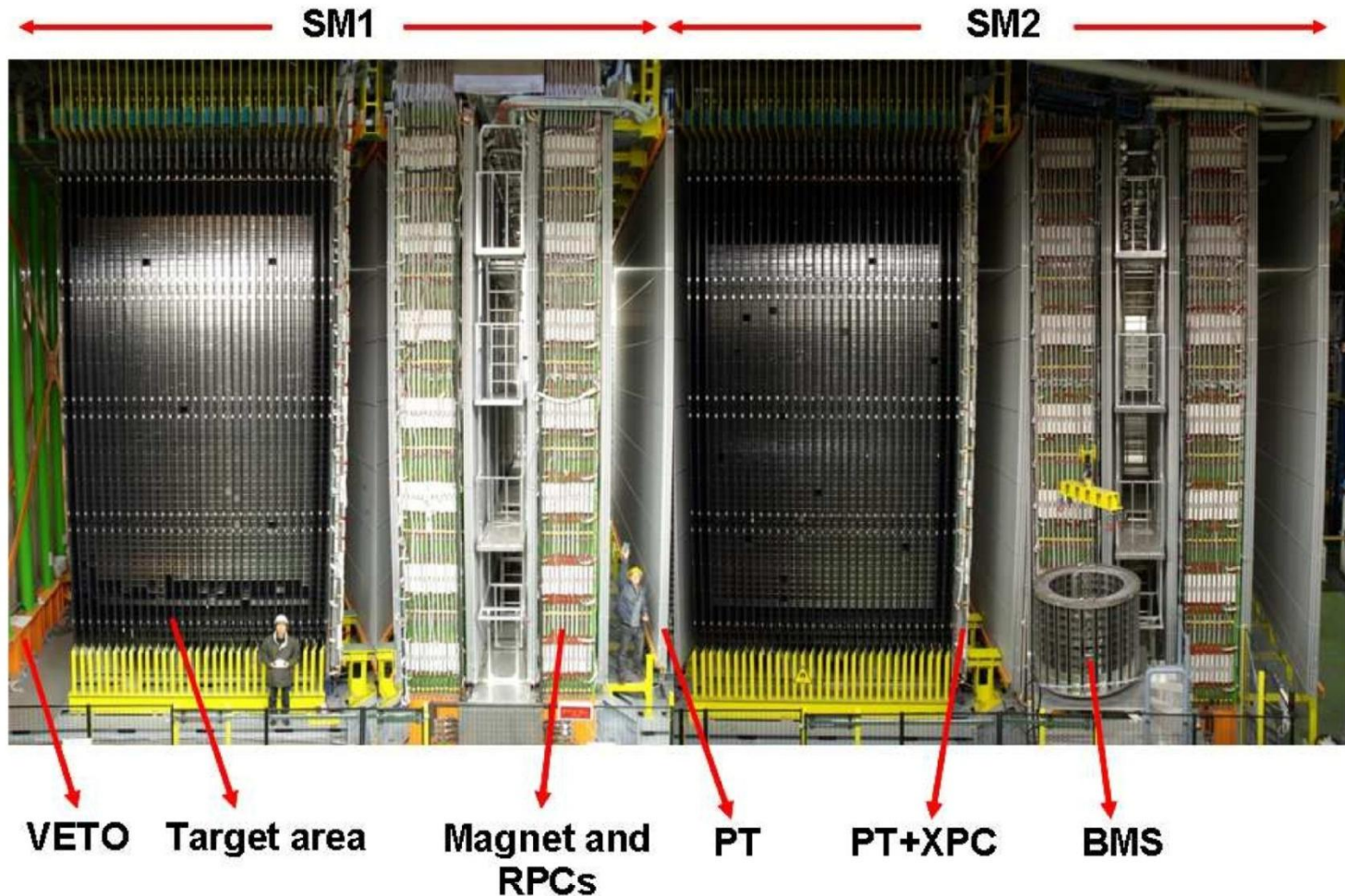
Поток первичных  $\nu_\tau$  мал (расчет для пучка CHORUS— В. Van de Vyver & P. Zucchelli, NIM A, **385**, 91 (1997)). Доля взаимодействий  $\nu_e=0.8\%$ , anti- $\nu_\mu$ — 2.0 %, anti- $\nu_e$ — 0.05 %



Детектор эксперимента OPERA (R. Acquafredda et al. (OPERA Collaboration), JINST, 4, P04018 (2009))

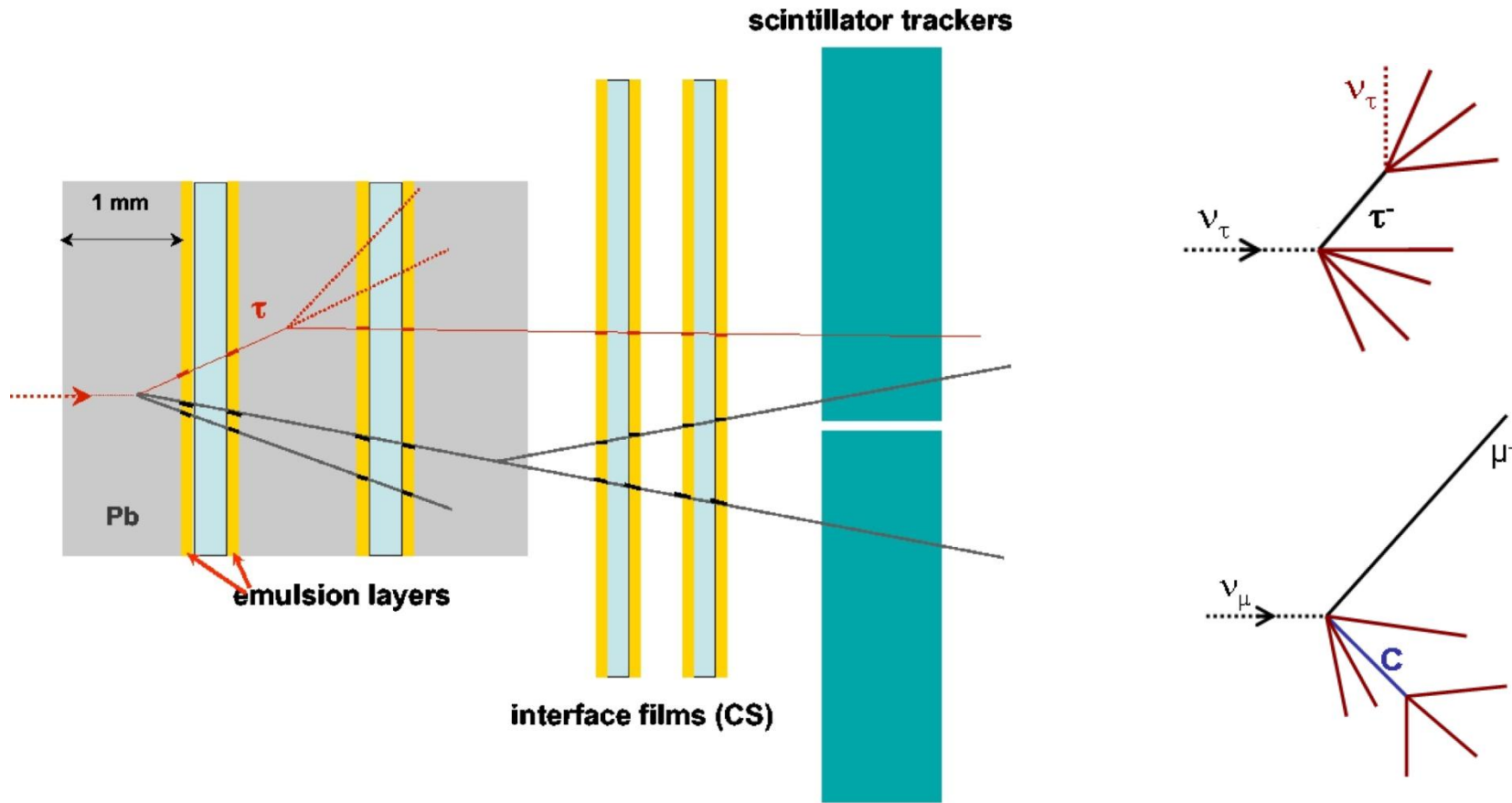
Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus

поиск осцилляций нейтрино с помощью эмульсионного детектора



~100 взаимодействий  $\nu_\tau$  в детекторе за 5 лет эксперимента; эффективность поиска  $\nu_\tau$  7-8 %

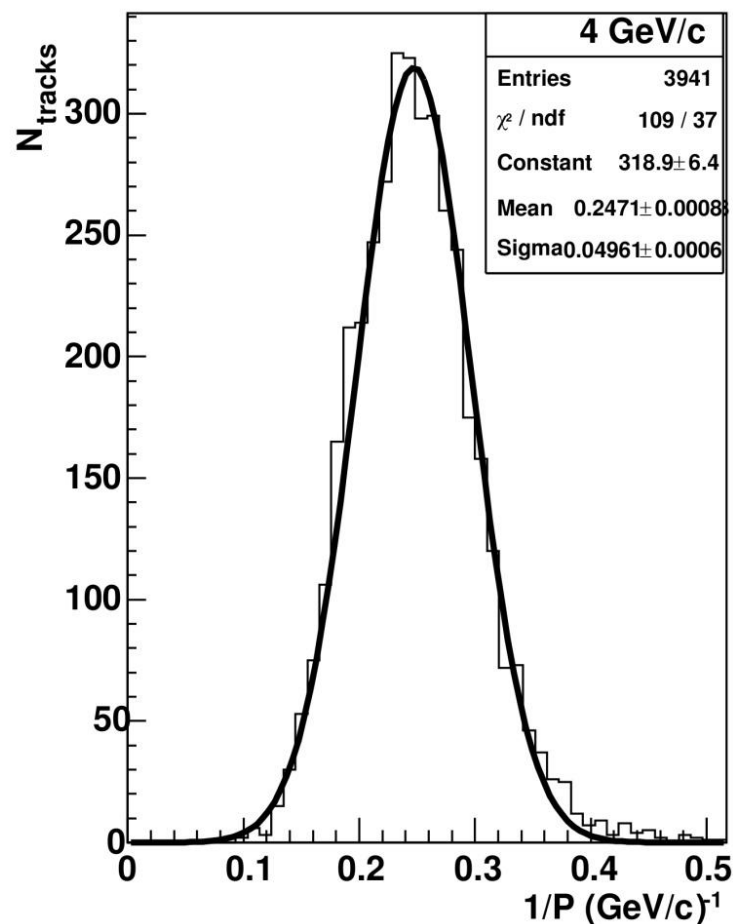
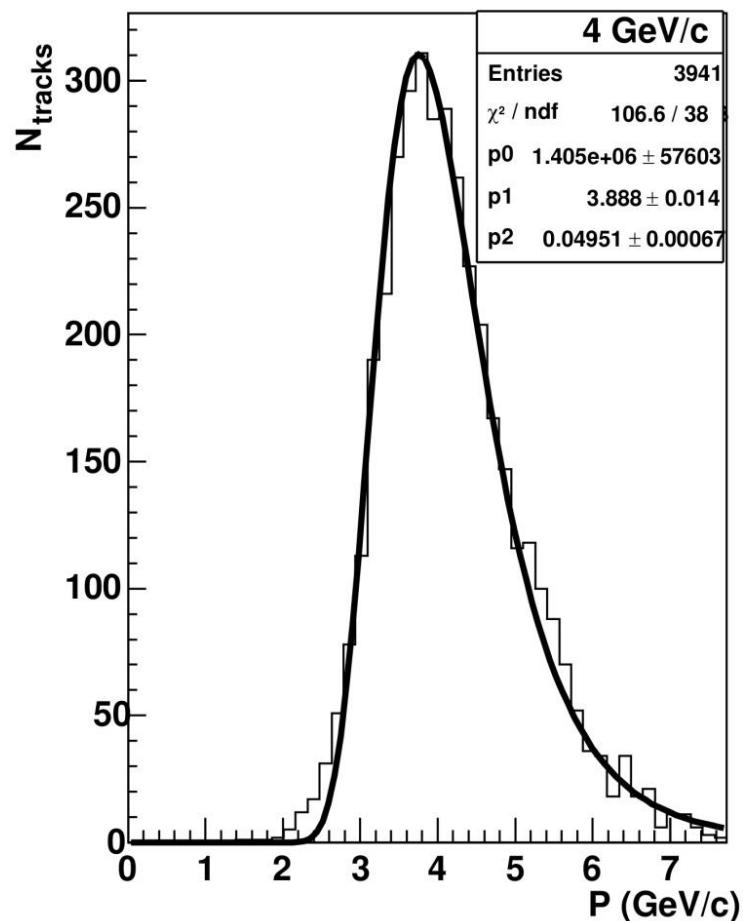
# Схема поиска событий от $\nu_\tau$



## Эксперимент “на появление”

Индивидуальная идентификация событий от  $\nu_\tau$   
Основной источник фона: события с рождением чармированных адронов

Измерение импульса адронов методом многократного рассеяния  
 (N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), NJP, **14**, 013026  
 (2012)): погрешность  $\approx 20\%$  для 4 GeV/c и нормального падения



$$\theta_0 = \frac{13.6}{(pc\beta)} \times \sqrt{\frac{x}{X_0}} \times \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right]$$

- I. Энергия гамма-кванта по эмульсионным данным измеряется с погрешностью  $<30\%$  для  $E_\gamma > 3 \text{ GeV}$  (F. Juliet, J. Phys. CS, **160**, 012033 (2009))
- II. Характерная погрешность восстановления энергии первичного нейтрино электронными детекторами  $\approx 20\%$  (N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), NJP, **13**, 053051 (2011))
- Наиболее опасный источник фона — события с чармированными адронами и мюоном низкой энергии, идущем под большим углом ( $>1 \text{ рад}$ ) к оси пучка*



Критерии отбора для событий-кандидатов: параметры частиц, образующих первичную вершину (N. Agafonova et al., Phys. Lett. B, **691**, 138 (2010))

At the primary vertex, the selection criteria are:

- there are no tracks compatible with that of a muon or an electron;
- the missing transverse momentum ( $P_T^{miss}$ ) is smaller than 1 GeV/c;
- the angle  $\Phi$  in the transverse plane between the  $\tau$  candidate track and the hadronic shower direction is larger than  $\pi/2$ .

(\*) Эффективность идентификации мюона электронными детекторами= 95 % (N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), NJP, **13**, 053051 (2011))

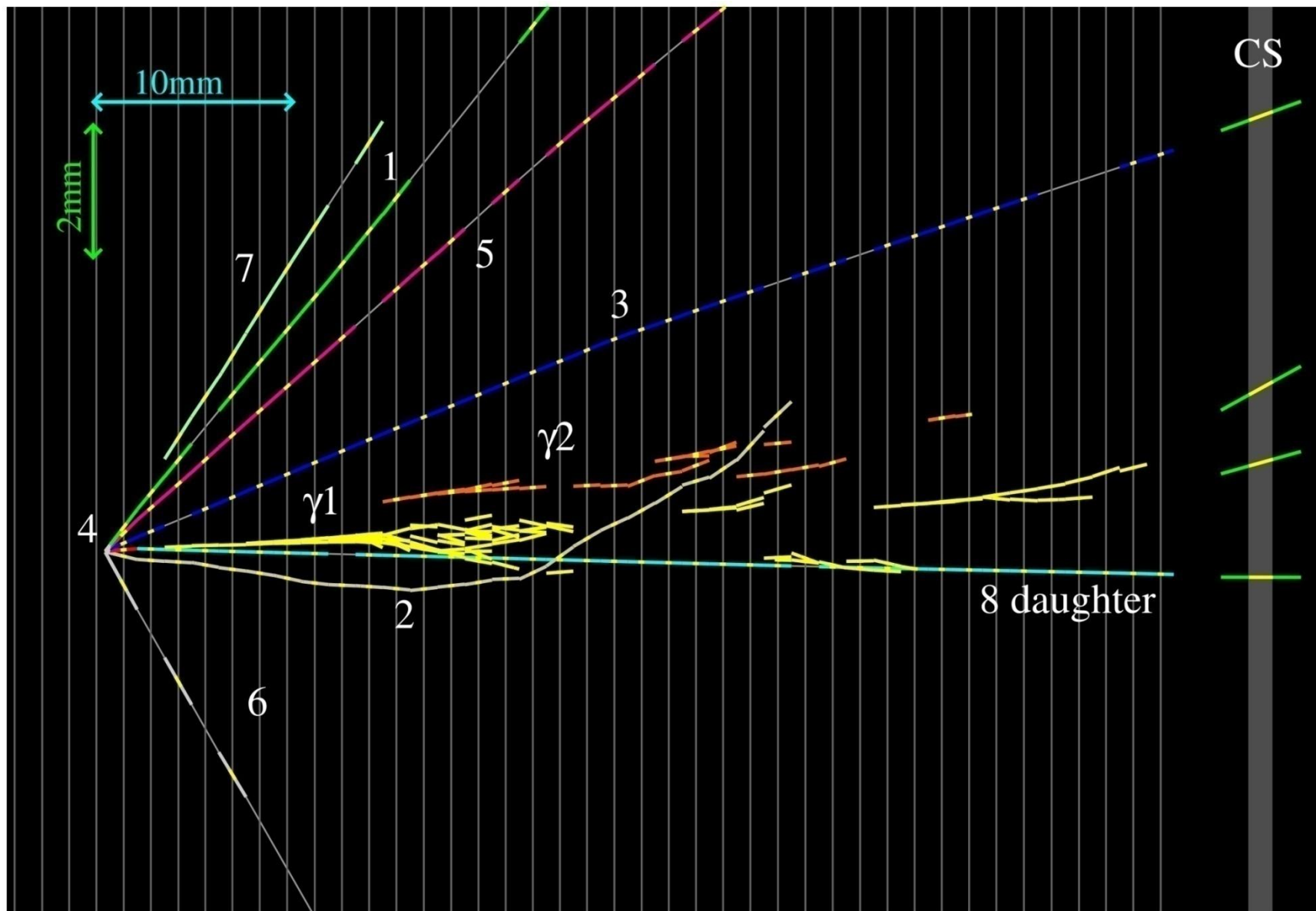
(\*\*) Ошибки классификации  $\pi^{+/-}/e$  исследованы в работе L. Arrabito et al., JINST, **2**, P02001 (2007)

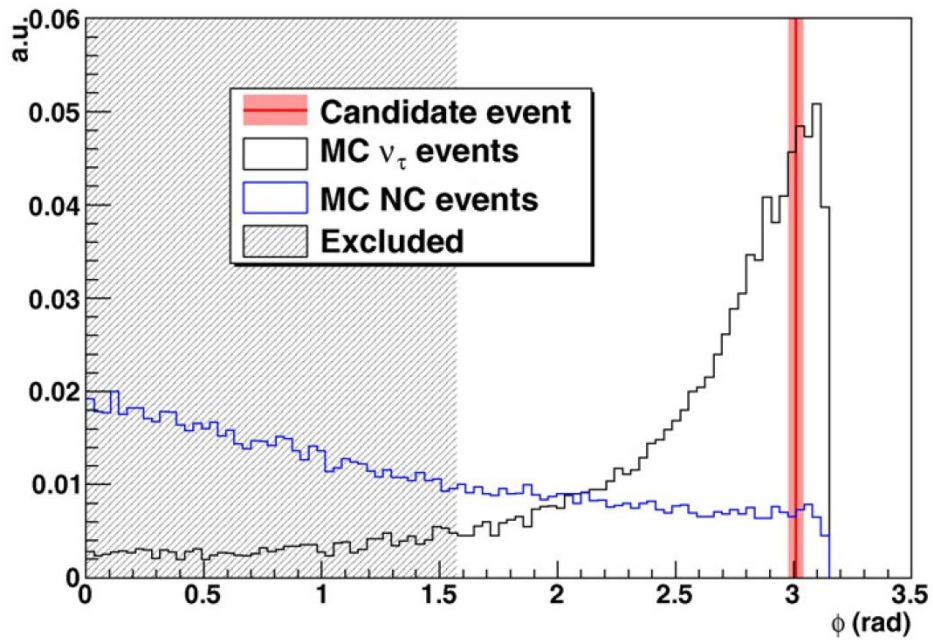
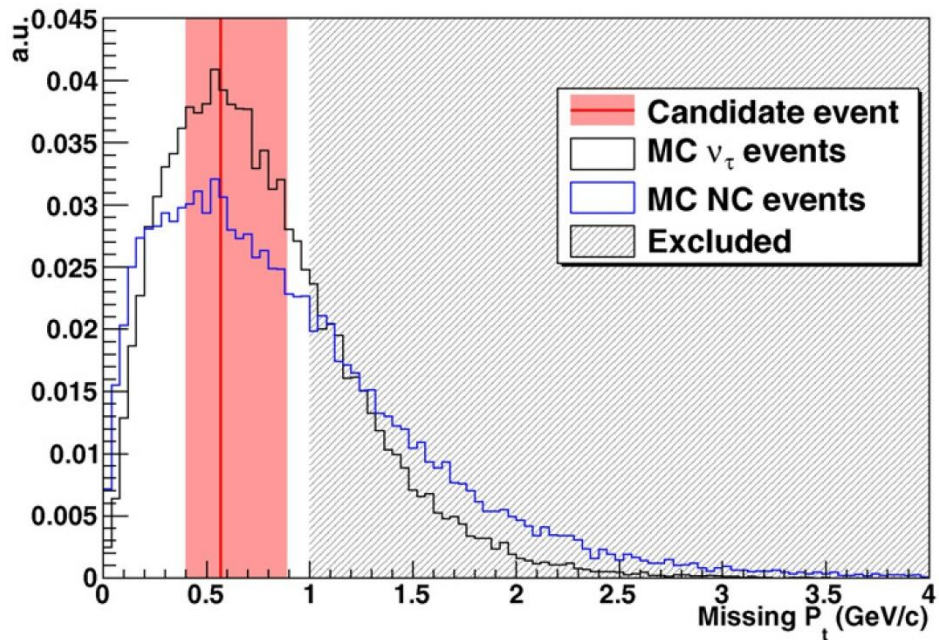
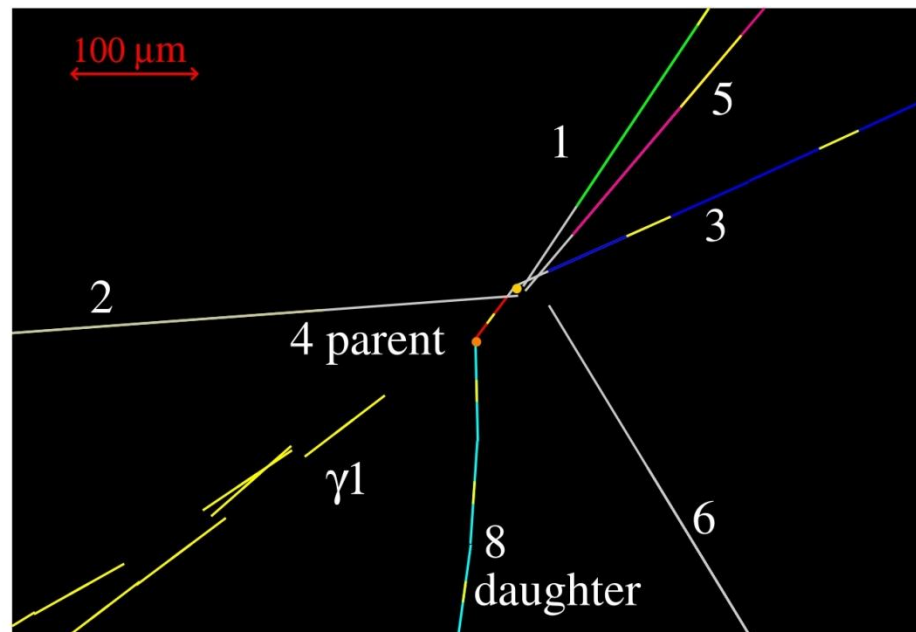
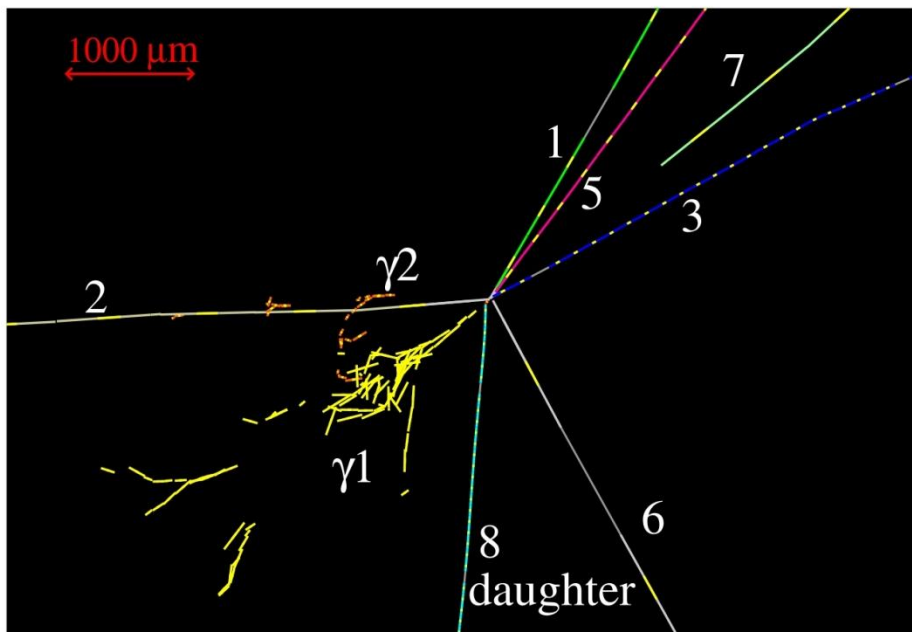
# Критерии отбора: параметры частиц из вторичной вершины

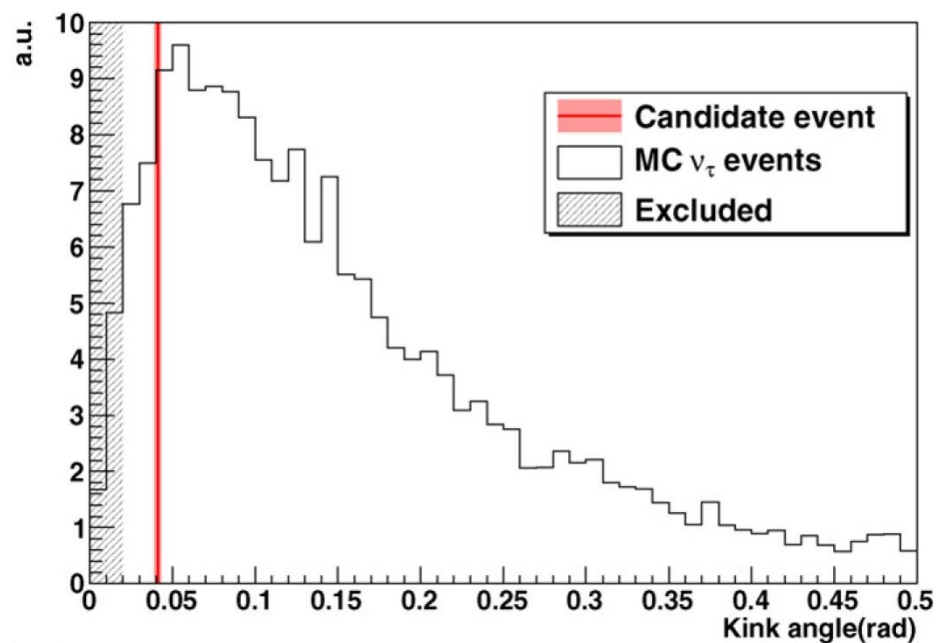
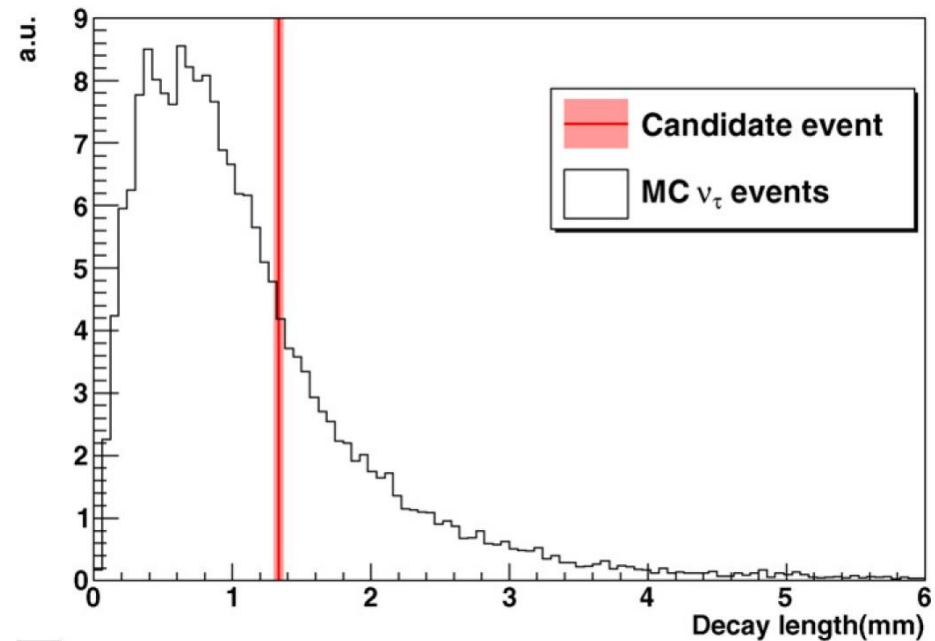
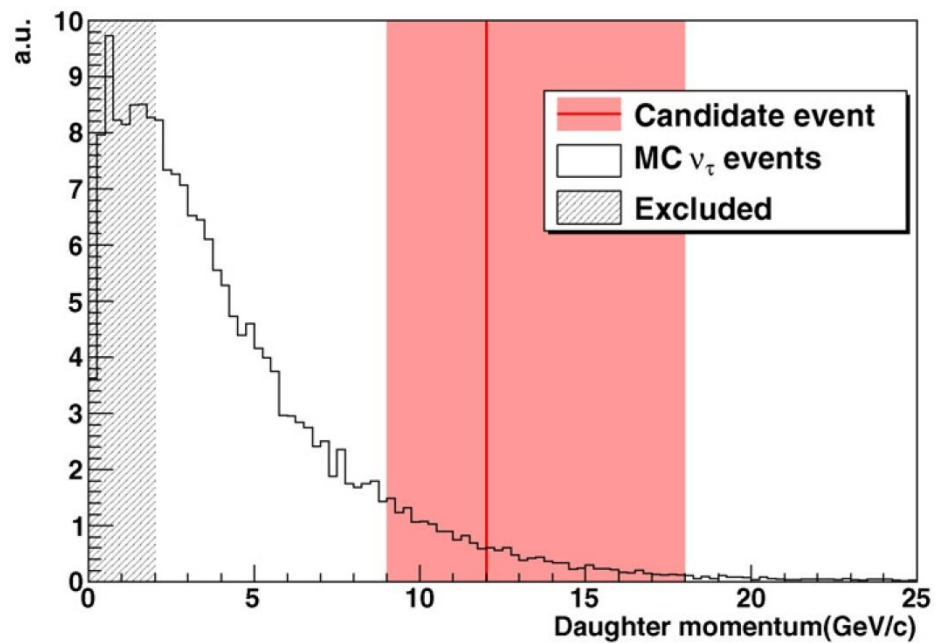
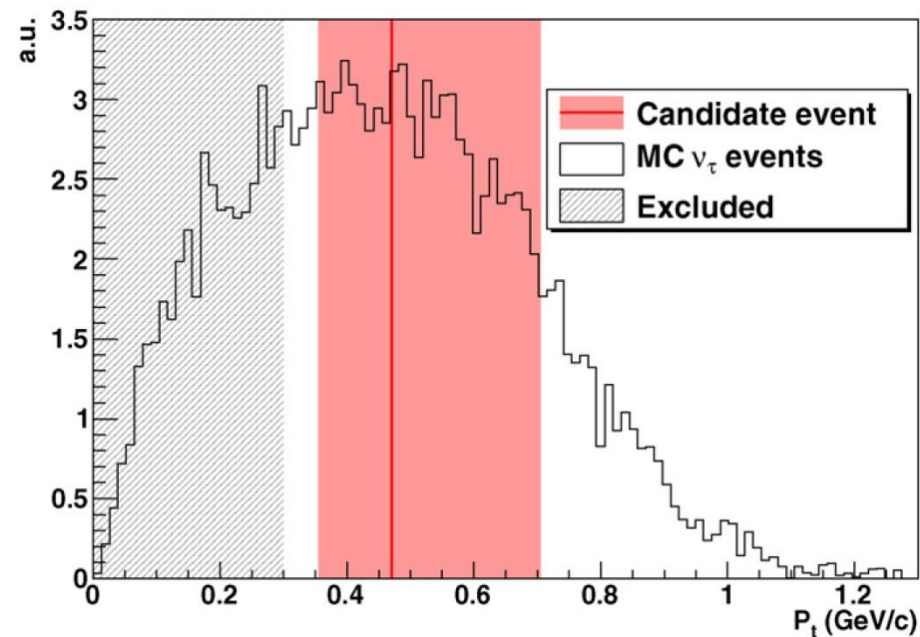
For decays of the  $\tau$  to a single charged hadron, it is required at the secondary vertex, when not in the primary vertex lead plate, that:

- the kink angle  $\theta_{kink}$  is larger than 20 mrad;
- the secondary vertex is within the two lead plates downstream of the primary vertex;
- the momentum of the charged secondary particles is larger than 2 GeV/c;
- the total transverse momentum ( $P_T$ ) of the decay products is larger than 0.6 GeV/c if there are no photons emitted at the decay vertex, and 0.3 GeV/c otherwise.

# Событие-кандидат на взаимодействие $\nu_\tau$ в ЭМУЛЬСИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ







# События с рождением чармированных адронов

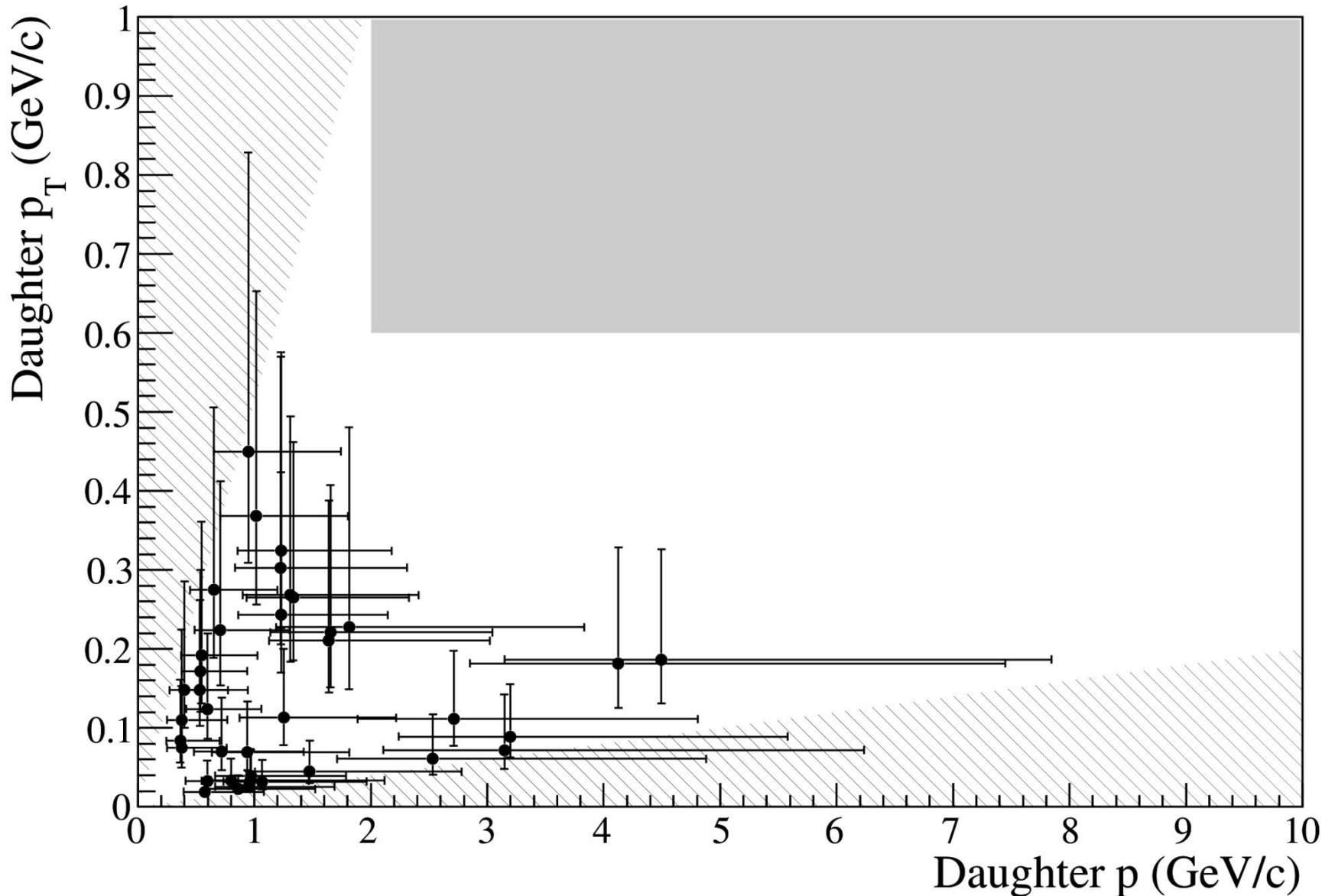
(N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), NJP, **14**, 033017 (2012))

Topology	Observed charm candidate events	Expected events		
		Charm	Background	Total
Charged 1-prong	13	15.9	1.9	17.8
Neutral 2-prong	18	15.7	0.8	16.5
Charged 3-prong	5	5.5	0.3	5.8
Neutral 4-prong	3	2.0	<0.1	2.1
Total	39	$39.1 \pm 7.5$	$3.0 \pm 0.9$	$42.2 \pm 8.3$

## Основные источники фона

Decay channel	Number of background events expected for							
	$22.5 \times 10^{19}$ p.o.t.				$4.88 \times 10^{19}$ p.o.t.			
	Charm	Hadron	Muon	Total	Charm	Hadron	Muon	Total
$\tau \rightarrow \mu$	0.025	0.00	0.07	$0.09 \pm 0.04$	0.00	0.00	0.02	$0.02 \pm 0.01$
$\tau \rightarrow e$	0.22	0.00	0.00	$0.22 \pm 0.05$	0.05	0.00	0.00	$0.05 \pm 0.01$
$\tau \rightarrow h$	0.14	0.11	0.00	$0.24 \pm 0.06$	0.03	0.02	0.00	$0.05 \pm 0.01$
$\tau \rightarrow 3h$	0.18	0.00	0.00	$0.18 \pm 0.04$	0.04	0.00	0.00	$0.04 \pm 0.01$
Total	0.55	0.11	0.07	$0.73 \pm 0.15$	0.12	0.02	0.02	$0.16 \pm 0.03$

# Фон от адронных взаимодействий и рассеяния адронов на большие углы



Ожидаемое среднее число событий-кандидатов за 5 лет эксперимента уменьшилось с 10 (M. Guler et al. (OPERA Collaboration), CERN/SPSC 2000-028 (Proposal) (2000)) до 7.63

Decay channel	Number of signal events expected for		Interaction vertex location efficiency	Global $\tau$ detection efficiency
	$22.5 \times 10^{19}$ p.o.t.	$4.88 \times 10^{19}$ p.o.t.		
$\tau \rightarrow \mu$	1.79	0.39	0.54	0.09
$\tau \rightarrow e$	2.89	0.63	0.59	0.14
$\tau \rightarrow h$	2.25	0.49	0.59	0.04
$\tau \rightarrow 3h$	0.71	0.15	0.64	0.04
Total	7.63	1.65	0.59	0.07

**Table 3.** Expected numbers of observed signal events for the design intensity of  $22.5 \times 10^{19}$  p.o.t. and for the 2008-2009 analysed data sample corresponding to  $4.88 \times 10^{19}$  p.o.t.. The updated efficiency for locating interaction vertices is shown in the fourth column. The last column shows the global  $\tau$  detection efficiency that includes detection and selection efficiencies for both interaction and decay vertices.

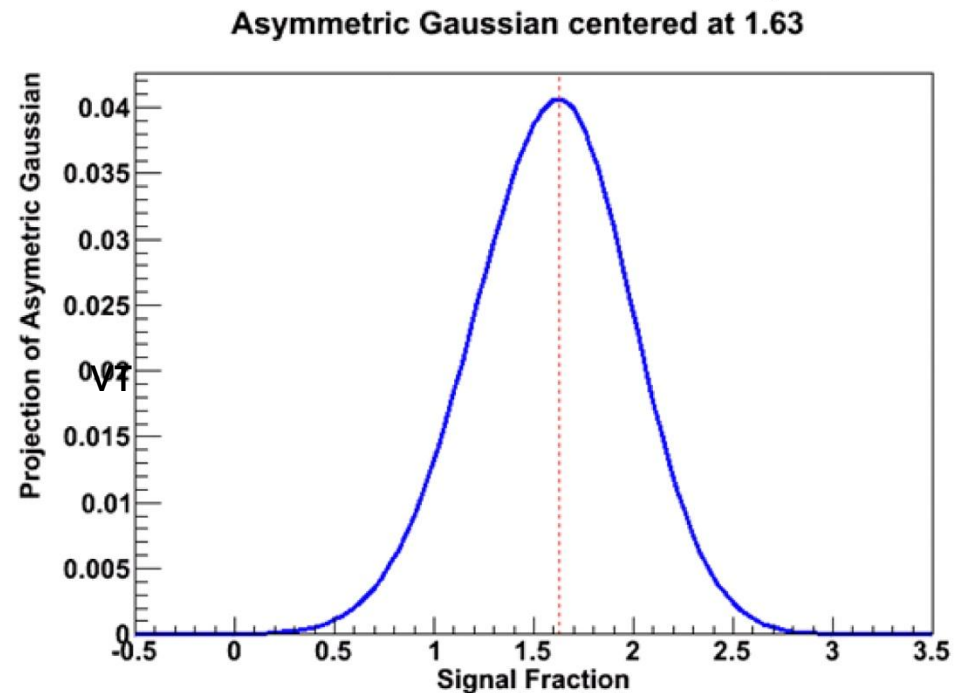


# R. Wendell (Super-Kamiokande Collaboration), NNN, Toyama (Japan) (2010)

## Significance Calculation

Central value of SK-I+II+III Fit

- » Prepare an asymmetric gaussian centered about the best fit from the data with widths corresponding to the systematic errors (previous page)
- » The integral of the PDF below zero (corresponding to no  $\tau$  appearance) is a measure of the significance



[ SK I+II+III : Integral below zero =  $5.8 \times 10^{-5}$  corresponds to  $3.8 \sigma$   
The Expected significance :  $2.6\sigma$  (  $2.9\sigma$  without systematics ) ]

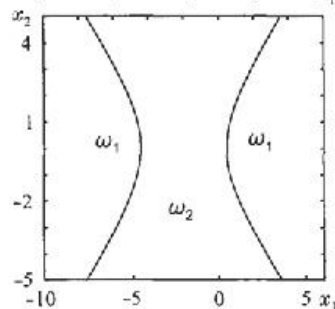
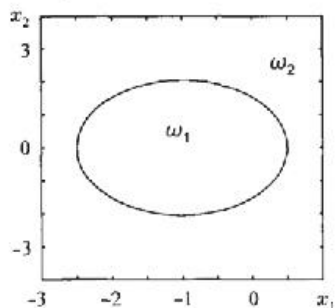
Preliminary

SK data are *inconsistent* with *no*  $\tau$  appearance at  $3.8\sigma$

Метод: многомерная байесова классификация;  
 генератор событий: Neugen 3.5.5 (H. Gallagher, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **112**,188 (2002))

$$P(\omega_i|x) = \frac{p(x|\omega_i)P(\omega_i)}{p(x)}$$

$$p(x) = \sum_{i=1}^M p(x|\omega_i)P(\omega_i)$$



$$p(x) = \frac{1}{(2\pi)^{l/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)\right)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1l} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{l1} & \sigma_{l2} & \dots & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_i^2 = E[(x_i - \mu_i)^2]$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} = E[(x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j)]$$

$$p(x) \rightarrow p(x|\omega_i)$$

$$g_i(x) = -\frac{1}{2}x^T \Sigma_i^{-1} x + \frac{1}{2}x^T \Sigma_i^{-1} \mu_i - \frac{1}{2}\mu_i^T \Sigma_i^{-1} \mu_i + \frac{1}{2}\mu_i^T \Sigma_i^{-1} x$$

$$+ \ln P(\omega_i) + c_i$$

$$\text{Decision rule } p(x|\omega_1) \geq p(x|\omega_2)$$

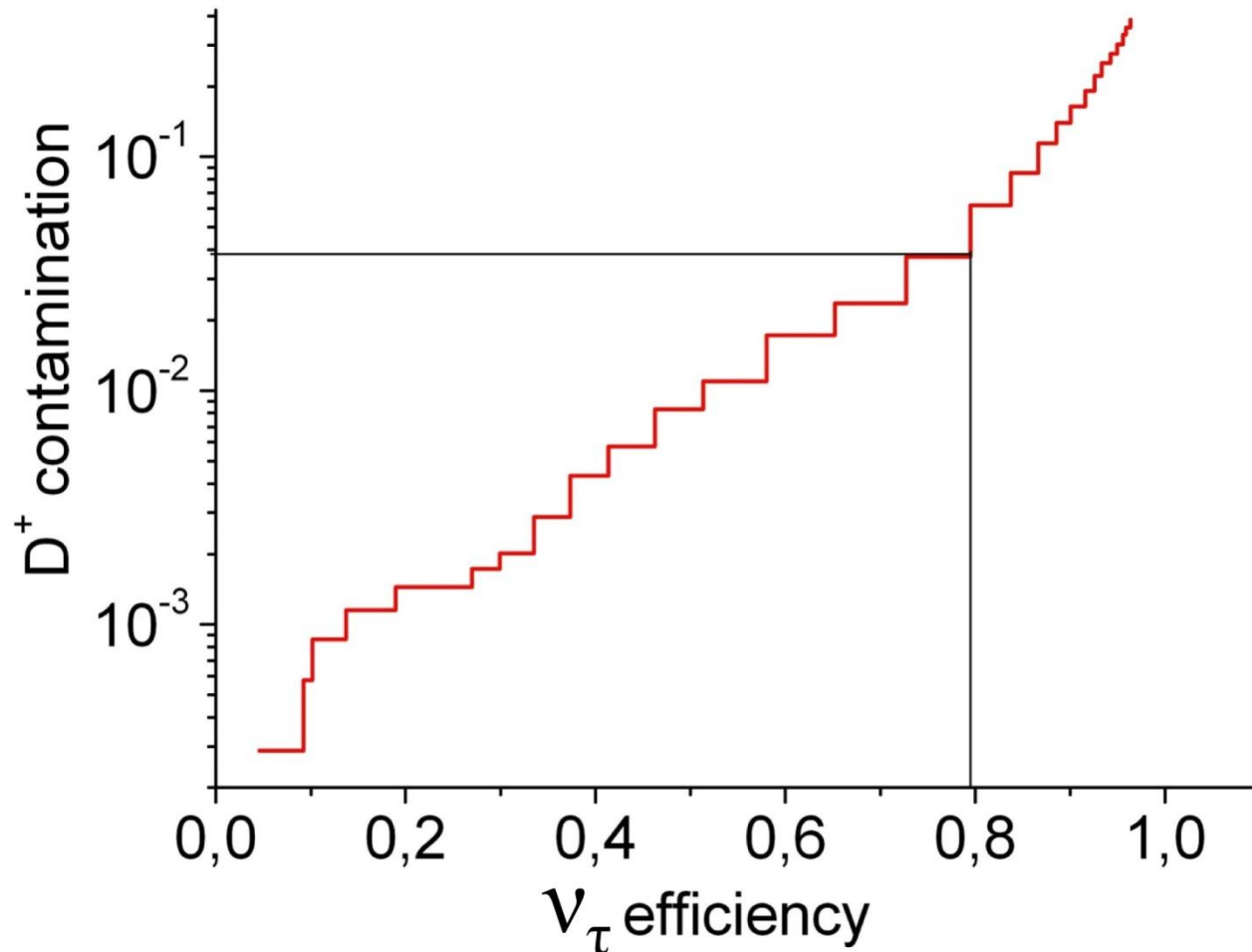
(\*). Для случая распада 3-prong многомерные критерии были разработаны в диссертациях

M. Lavy, LAPP-T-2004-03 (PhD Thesis) (2004) (In French)

M. Besnier, LAPP-T-2008-02 (PhD Thesis) (2008) (In French)

Для канала 1-prong: T. Tran, PhD Thesis (IPNL Lyon) (2010) (In French)

Зависимость доли неправильно классифицированных событий с присутствием  $D^+$  (фон) в зависимости от эффективности выделения  $\nu_\tau$ . Для классификации отбирались события, близкие по топологии к событию-кандидату.



Для случая канала с рождением двух адронов и мюона получен близкий результат (N. Agafonova et al., BRAS, **75**, 423 (2011))

# Статус эксперимента OPERA

*2013 г. — перерыв в работе ускорителя SPS(?)*

Экспозиция 2008-2011 составила  $1.43 \cdot 10^{20}$  pot (protons on target)  
(L. Stanco, Talk at IAS-CERN School, Singapore (2012))

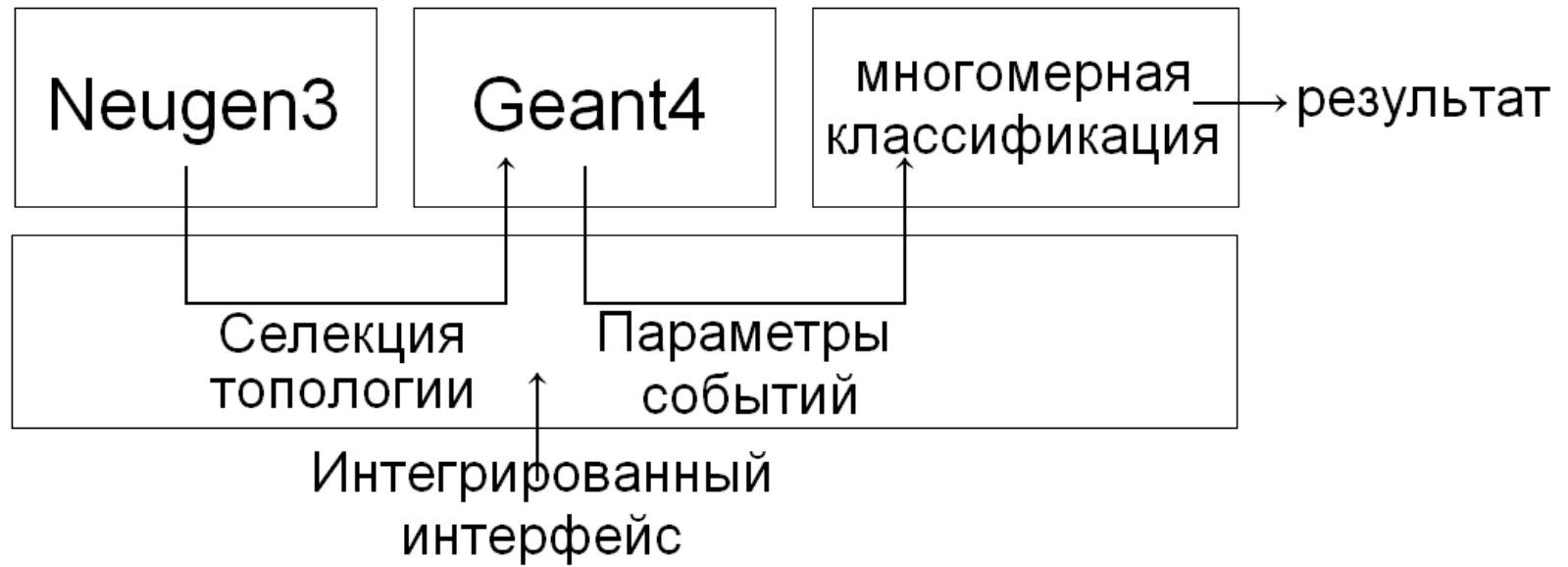
План на 2012 год:  $\sim 5 \cdot 10^{19}$  pot  $\rightarrow$  2008-2012:  $1.93 \cdot 10^{20}$  pot  
(перед началом эксперимента было запланировано  
 $2.25 \cdot 10^{20}$  pot)  $\rightarrow$  86 % от первоначального плана  $\rightarrow 6.54 \nu_\tau$

Среднее ожидаемое количество событий-кандидатов в  
отсканированных эмульсиях  $\sim 2.5-3 \nu_\tau \rightarrow$  в самое ближайшее  
время следует ожидать появления 1-2 событий-кандидатов

# Выводы

1. Эксперимент OPERA по прямому наблюдению осцилляций нейтрино в канале  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  успешно накапливает материал.
2. К настоящему моменту обнаружен один кандидат на взаимодействие таонного нейтрино в эмульсионном детекторе.
3. Детально изучены основные источники фона — события с рождением чармированных адронов и рассеянием адронов и мюонов на большие углы.
4. Многомерная методика выделения событий, инициированных  $\nu_{\tau}$ , позволяет повысить статистическую значимость результата.

# Дополнения



1. Генерация событий-Neugen3  
(инструмент коллаборации MINOS)  
2. Выбор канала (конкретной  
топологии событий)  $\mu+2h$   
(в дальнейшем  $h$ - *заряженные  
адроны*),  $E > 300 \text{ MeV}$

3. Моделирование отклика  
детектора (Geant4)  
4. Вычисление параметров  
событий: 3 угла между  
частицами, 3 энергии, IP  
(расстояние от трека  $\mu$  до  
вершины  $2h$ )  
5. Многомерная  
классификация

# Моделирование отклика детектора (Geant4)

1. Геометрия: эмульсионный кирпич эксперимента OPERA (emulsion brick; 57 слоев эмульсии и 56 пластин свинца)
2. Частицы в первичной вершине: из базы событий Neugen3
3. Взаимодействие частиц с веществом: стандартные электромагнитные процессы, распады короткоживущих частиц, упругие и неупругие адронные процессы
4. Прослеживаются частицы с  $E > 300 \text{ MeV}$
5. Топология:  $\nu_\tau \rightarrow \tau + 2h$ ,  $\nu_\mu \rightarrow \mu^- + D^0$
6. Моды распада:  $\tau \rightarrow \mu$ ,  $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$  (представитель 2p-моды)

Частица	$\tau, \text{s}$	$M, \text{GeV}$	BR
$\tau^-$	$2.90 \cdot 10^{-13}$	1.777	
$D^0$	$4.10 \cdot 10^{-13}$	1.865	0.45
$D^+$	$1.04 \cdot 10^{-12}$	1.869	0.10
$D_s^+$	$5.00 \cdot 10^{-13}$	1.968	0.18
$\Lambda_c^+$	$2.00 \cdot 10^{-13}$	2.286	0.26

	BR(%)
$D^0 \rightarrow \text{neutrals}$	$15 \pm 6$
$D^0 \rightarrow \mu^+ h^-$	$5.9 \pm 1.4$
$D^0 \rightarrow e^+ h^-$	$5.9 \pm 1.4$
$D^0 \rightarrow h^+ h^-$	$59.2 \pm 4.9$
$D^0 \rightarrow 2h^+ 2h^-$	$14.6 \pm 0.5$



# Осцилляции нейтрино (в вакууме)

Необходимые условия:

1. Наличие у нейтрино массы  
(разной у различных ароматов)

2. Смешивание

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13}e^{i\alpha_1/2} & s_{12}c_{13}e^{i\alpha_2/2} & s_{13}e^{-i\delta} \\ (s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta})e^{i\alpha_1/2} & (c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta})e^{i\alpha_2/2} & s_{23}c_{13} \\ (s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta})e^{i\alpha_1/2} & (-c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta})e^{i\alpha_2/2} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

Для двух ароматов нейтрино:

$$U = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[ 1.27 \frac{\Delta m^2 (eV^2) L (km)}{E_\nu (GeV)} \right]$$