
Новое поколение экспериментов с пучками дальних нейтрино

РЯБОВ Владимир Алексеевич

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

**Шестые Черенковские чтения,
Москва, ФИАН, 9 апреля 2013 г.**

Задачи в экспериментах с пучками дальних нейтрино

1. Прецизионное измерение параметров осцилляций;
 2. Определение угла смешивания θ_{13} ;
 3. Определение массовой иерархии;
 4. Определение CP-нарушения в лептонном секторе;
 5. Новая физика, стерильные нейтрино.
-

НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ: ФОРМАЛИЗМ ОПИСАНИЯ

- **Нейтринные осцилляции** представляют собой периодический процесс полного или частичного изменения аромата движущегося в вакууме или веществе нейтринного пучка. Существование нейтринных осцилляций возможно, если нейтрино имеет массу и реализуется гипотеза смешивания

$$\nu_{\alpha} = \sum U_{\alpha i} \nu_i$$

- **В ускорительных экспериментах** с нейтринными пучками обычно анализируют явное решение задачи вакуумных осцилляций нейтрино двух ароматов

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

- **Параметры Δm^2 и $\sin^2 2\theta$** определяется методом χ^2 при анализе вероятности наблюдения осцилляций в пучке нейтрино с энергией E_{ν} на расстоянии L

$$P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}) = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos 2,54 \frac{\Delta m^2 L}{E_{\nu}}\right) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m^2 L}{E_{\nu}}\right)$$

НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ: ФОРМАЛИЗМ ОПИСАНИЯ

ν mixing: 3×3 unitary matrix U_{PMNS} (PMNS= Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$c_{ij} = \cos\theta_{ij}, \quad s_{ij} = \sin\theta_{ij}$$

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

“atmospheric” “solar”

Parameters: 3 mixing angles ($\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}$)

+ 1 CP phase (δ)

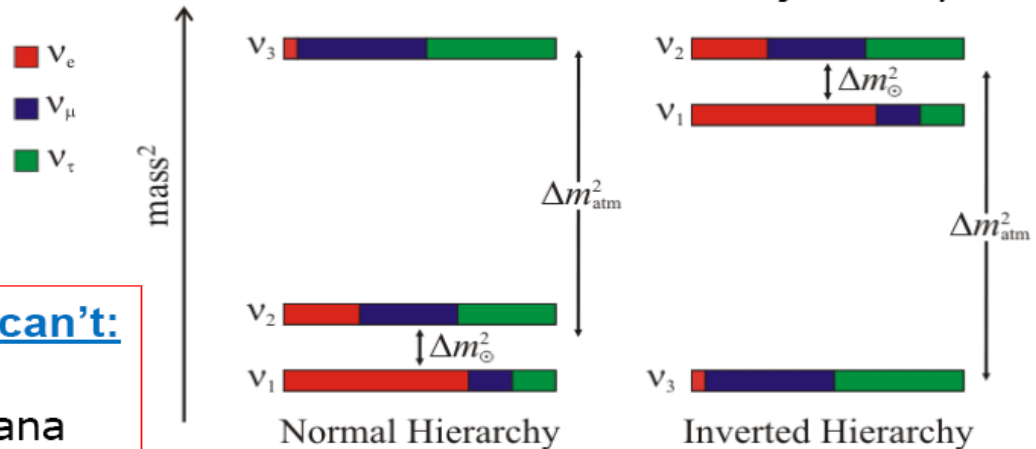
+ 2 mass² differences $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$

$$(\Delta m_{ij}^2 \equiv m_j^2 - m_i^2; \Delta m_{12}^2 + \Delta m_{13}^2 + \Delta m_{23}^2 = 0)$$

НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ: ИЗВЕСТНЫЕ И НЕИЗВЕСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

- (1,2): $\theta_{12} \approx 34^\circ$, $\Delta m_{12}^2 \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (solar + reactor)
- (2,3): $\theta_{23} \approx 45^\circ$, $\Delta m_{23}^2 \approx 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (atm. + accelerator)
- (1,3): $\theta_{13} < 11^\circ$ only upper limit (reactor(CHOOZ) + accelerator)
- CP-phase δ and **sign of Δm^2**

(Normal “+” or Inverted Hierarchy “-”?)

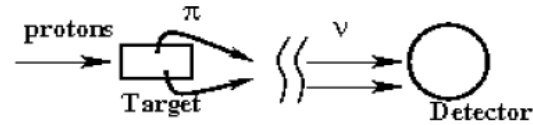


Accelerator ν -experiments can't:

- measure absolute masses
- distinguish btw Dirac/Majorana

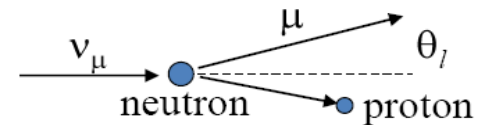
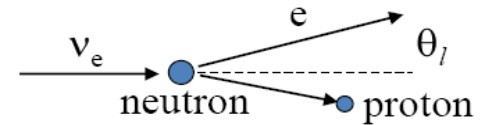
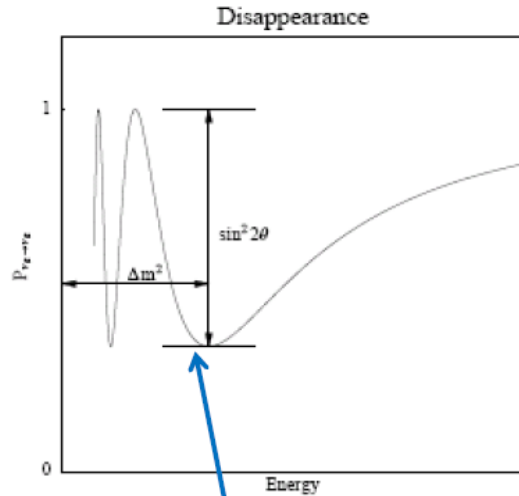
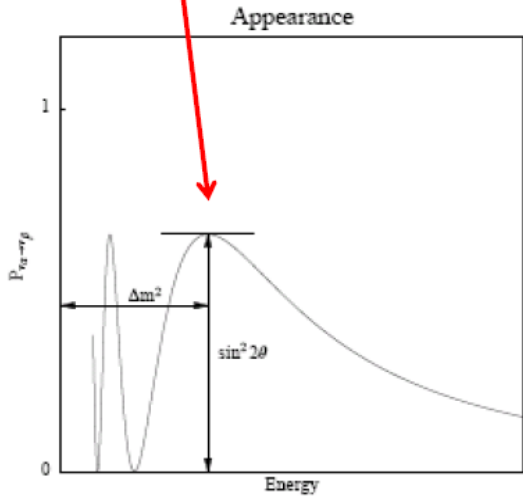
НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ: ВЕРОЯТНОСТЬ

Appearance:



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$$

$\longleftarrow L$



Disappearance:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L (km)}{E (GeV)} \right)$$

Поиск нейтринных осцилляций

Солнечные нейтрино

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau \text{ ИЛИ } \nu_{ster}$$

а) в веществе Солнца с MSW-эффектом

$$\Delta m_{sun}^2 \approx (10^{-5} - 10^{-4}) \text{ эВ}^2;$$

$$(\sin^2 2\theta \approx 10^{-3}) \text{ или } (\sin^2 2\theta \approx 0,8 - 1)$$

б) вакуумные "just-so"

$$\Delta m_{sun}^2 \approx (10^{-10} - 10^{-11}) \text{ эВ}^2 \text{ и } \sin^2 2\theta \approx 0,8 - 1$$

Атмосферные нейтрино

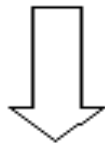
$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \text{ ИЛИ } \nu_\mu \rightarrow \nu_{ster}$$

$$\Delta m_{atm}^2 \approx (10^{-2} - 10^{-3}) \text{ эВ}^2 \text{ и } \sin^2 2\theta \approx 0,8 - 1$$

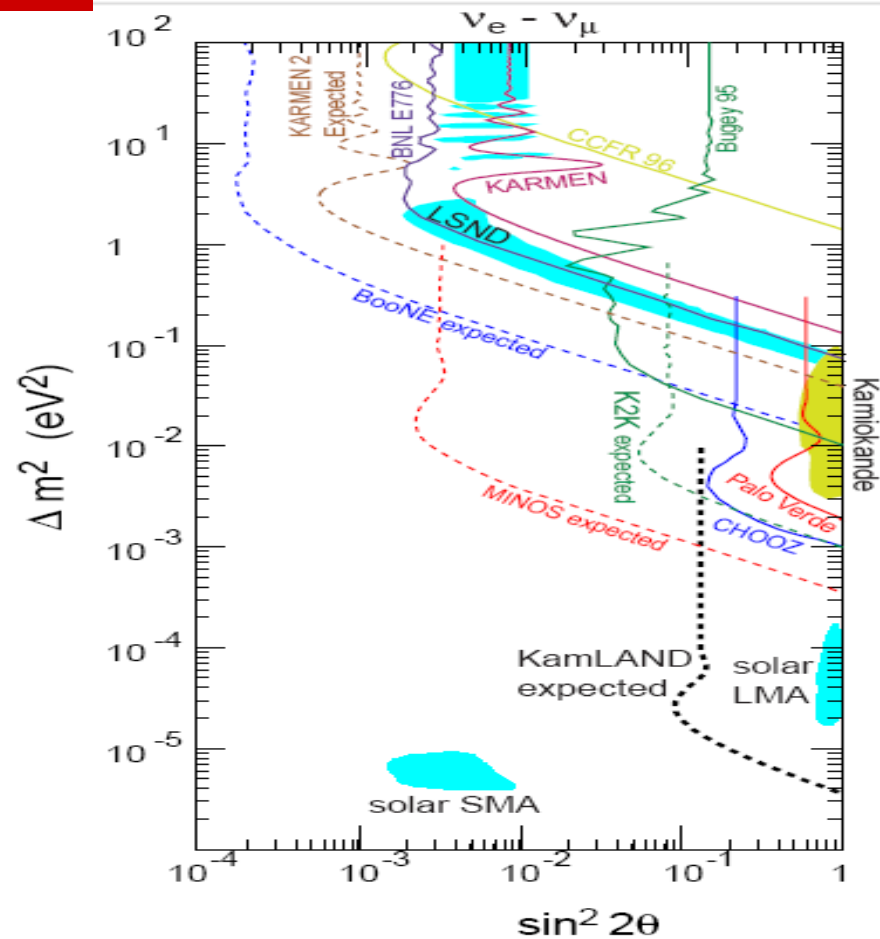
Эксперимент LSND

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

$$0,3 \text{ эВ}^2 \leq \Delta m_{LSND}^2 \leq 2,2 \text{ эВ}^2 \text{ и } \sin^2 2\theta \approx 10^{-2} - 10^{-3}$$



Три неперекрывающиеся области по Δm^2



Задача экспериментов с дальними нейтрино – разрешить это противоречие

Составные части экспериментов по поиску осцилляций нейтрино от ускорителя

Нейтринный пучок

- ✓ Нейтрино определенного сорта (ν_μ) с хорошо известным спектром. Примесь ν_e составляет около 1%, а примесь ν_τ – менее 10^{-5} ;
 - ✓ Контроль интенсивности, временной структуры, направления и профиля пучка;
 - ✓ Возможность варьирования энергии родителей нейтрино (π - и K -мезонов) и различных схем их магнитооптической фокусировки. Это позволяет получать нейтринные пучки с широким спектром энергий (от нескольких $ГэВ$ до $\sim 100 ГэВ$), низкоэнергетические пучки (с максимумом спектра в области $3 - 7 ГэВ$), а также монохроматические пучки, настроенные на выделенную узкую область спектра энергий.
-

Пучки дальних нейтрино от ускорителя

□ Основные элементы комплекса дальних нейтрино для формирования нейтринного пучка:

- система быстрого вывода пучка протонов;
- система транспортировки протонного пучка до мишени нейтринного канала;
- бериллиевая мишень;
- фокусирующая система для формирования параллельного пучка π и K -мезонов;
- распадный тоннель, в котором распадаются π и K -мезоны с образованием нейтрино;
- адронный поглотитель для поглощения вторичных частиц.

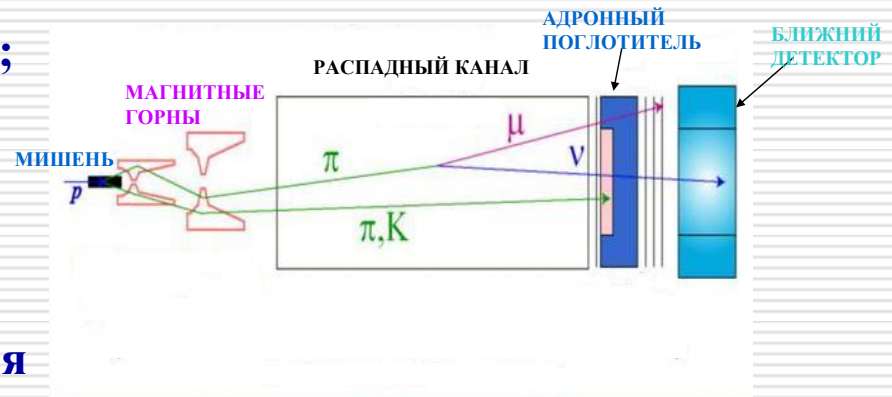


Схема формирования нейтринного пучка

Составные части экспериментов по поиску осцилляций нейтрино от ускорителя

Детекторы

В детекторах регистрируются события взаимодействия нейтрино того или иного аромата по каналам заряженного и нейтрального токов

$$\nu_l + N \rightarrow l + \text{адроны}, \quad l = e, \mu, \tau$$

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + \text{адроны}$$

Возможности размещения детектора относительно пучка:

- ✓ **один детектор, расположенный на известном расстоянии L от ускорителя** → регистрируются взаимодействия нейтрино первоначального аромата ν_μ и нейтрино других ароматов (ν_e и ν_τ), появившихся в результате осцилляций, а также измерение их энергетических спектров;
- ✓ **несколько детекторов, расположенных на разных расстояниях от ускорителя** → **ближний детектор** устанавливается в конце нейтринного канала ускорителя и контролирует взаимодействия нейтрино в исходном пучке; **дальний детектор** фиксирует изменение числа этих взаимодействий вследствие осцилляций

Experiment	Run	Proton Energy	Proton Target	$\langle E_\nu \rangle$	L (Baseline)	Det. Tech.	Near/Far Det. Mass	Goal
K2K*	1999-2004	12 GeV	Al 2 horns	1.3 GeV	250 km	Water Ch	1kt / 50 kt	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$
MINOS	2005-	120 GeV	C 2 horns	3 GeV 9 GeV	735 km	Fe+Sci.	\approx 1kt / 5.4 kt	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ +anti- ν_μ
OPERA	2008-	400 GeV	C 1 horn	17 GeV	732 km	Pb+Emul +Track.	1.25 kt	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$
T2K*	2010-	30 GeV	C 3 horns	0.6 GeV	295 km OA=2.5°	Sci./Water Ch	2kt / 50 kt	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
NOvA	2013?	120 GeV	C 2 horns	2 GeV	810 km OA=0.8°	Liq.Sci.+ WLS	0.22kt / 14 kt	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
LSND*	1993-1998	798 MeV	Water/ Metals	20-53 MeV	30 m	(CH ₂) Ch+Sci.	167 t	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
MiniBooNE*	2002-	8 GeV	Be 1 horn	600 MeV	541 m	(CH ₂) Ch+Sci.	800 t	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

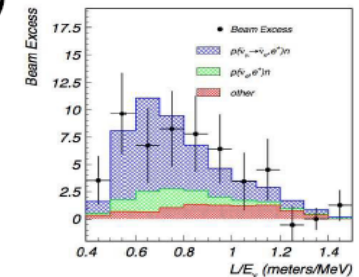
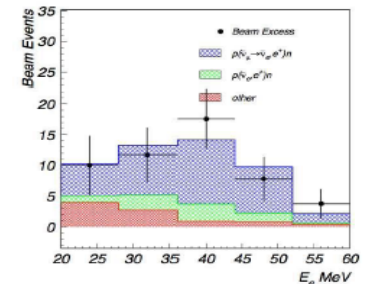
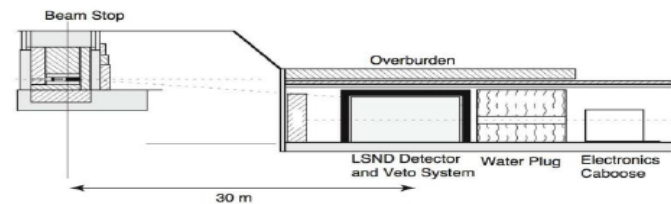
LBL

SBL

Эксперименты на короткой базе: LSND

(Liquid Scintillator Neutrino Detector)

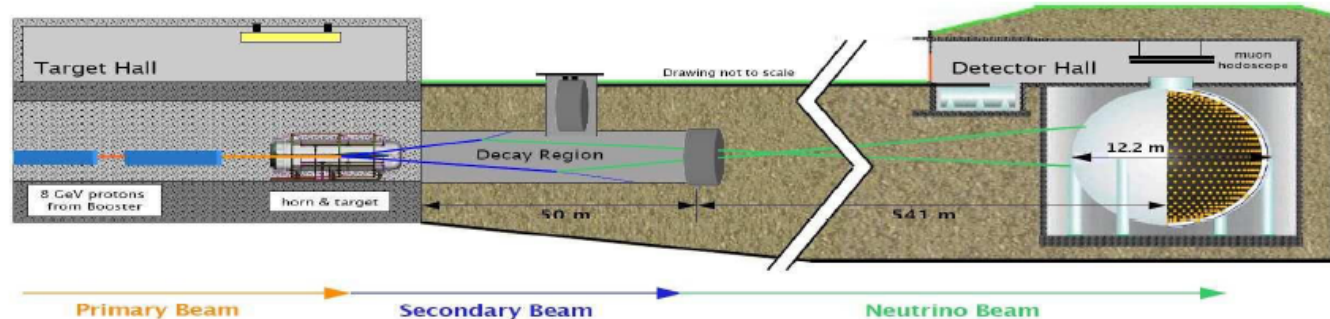
- Los Alamos, USA. 1993-1998.
- **anti- ν_μ** (from μ^+ -decays at rest)
- Detector: 167 t of mineral oil (CH_2)
- **L=30 m / E=20-53 MeV**
- **Excess of anti- ν_e events: $87.9 \pm 22.4 \pm 6.0$ (3.8σ)**
- Best fit: **$\Delta m^2 = 0.2-10 \text{ eV}^2$** (very large!)
 $\sin^2(2\theta) \sim 0.001-0.04$ (includes constraints)
Phys.Rev. D64, 11207, 2001
- KARMEN (UK): no confirmation
- To confirm/refute: MiniBooNE (see next slide)



Эксперименты на короткой базе: MiniBooNE

(Mini-Booster Neutrino Experiment)

- FermiLab, IL, USA.
- 2002-...
- ν_μ and $\text{anti-}\nu_\mu$
- Detector: 800 t of mineral oil (CH_2)
- $L=541 \text{ m}$ / $E=200\text{-}1450 \text{ MeV}$
- Goal: confirm/refute LSND results

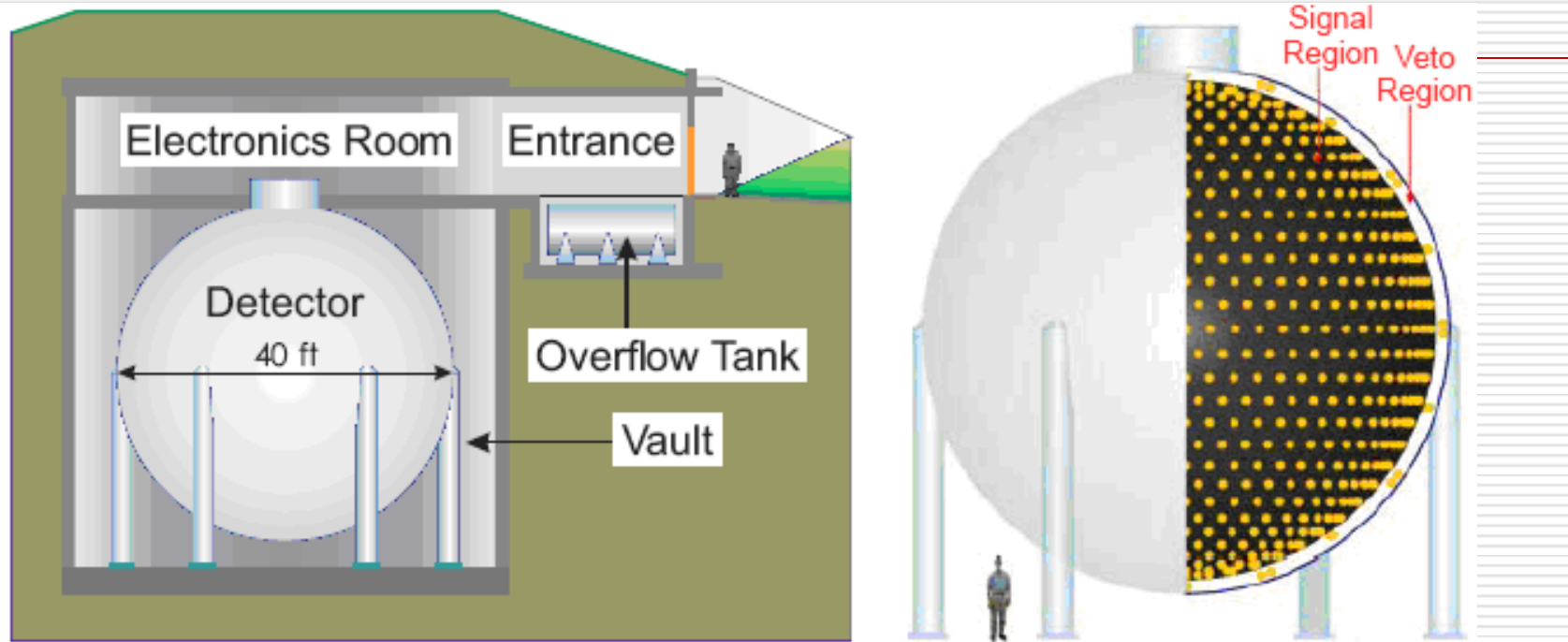


"The data are consistent with $\text{anti-}\nu_\mu \rightarrow \text{anti-}\nu_e$ oscillations in the $0.1 \text{ to } 1.0 \text{ eV}^2 \Delta m^2$ range and with the evidence for antineutrino oscillations from the Liquid Scintillator Neutrino Detector at Los Alamos National Laboratory."

PRL, 105, 181801 (2010)

Mode	POT	Excess in $E=475\text{-}1250 \text{ MeV}$
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	6.46×10^{20}	22.1 ± 35.7
$\text{anti-}\nu_\mu \rightarrow \text{anti-}\nu_e$	5.66×10^{20}	20.9 ± 14.0 (1.5σ)

Эксперименты на короткой базе: MiniBooNE



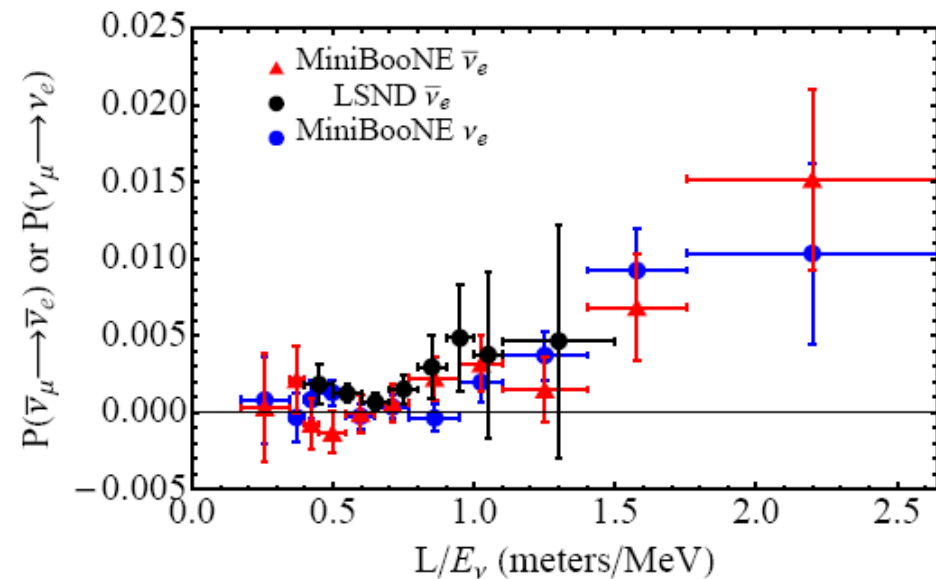
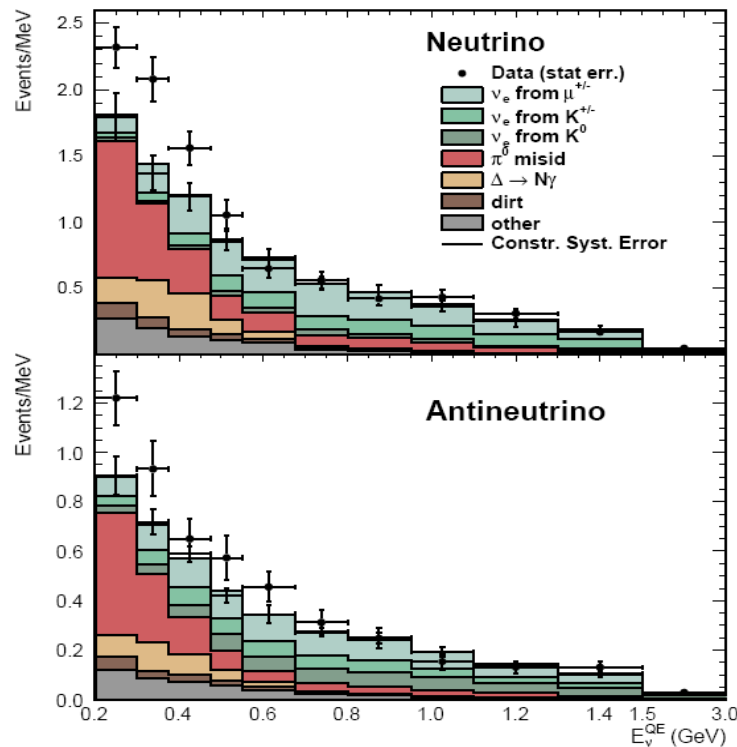
Детектор MiniBooNE находится на расстоянии 540 м от мишени нейтринного канала

бустера ускорителя FNAL и представляет собой сферический танк с внутренним радиусом 610 см, наполненный 800 т чистого минерального масла.

Частицы, проходя через заполненный маслом объем, излучают направленный черенковский свет и рассеянный сцинтилляционный.

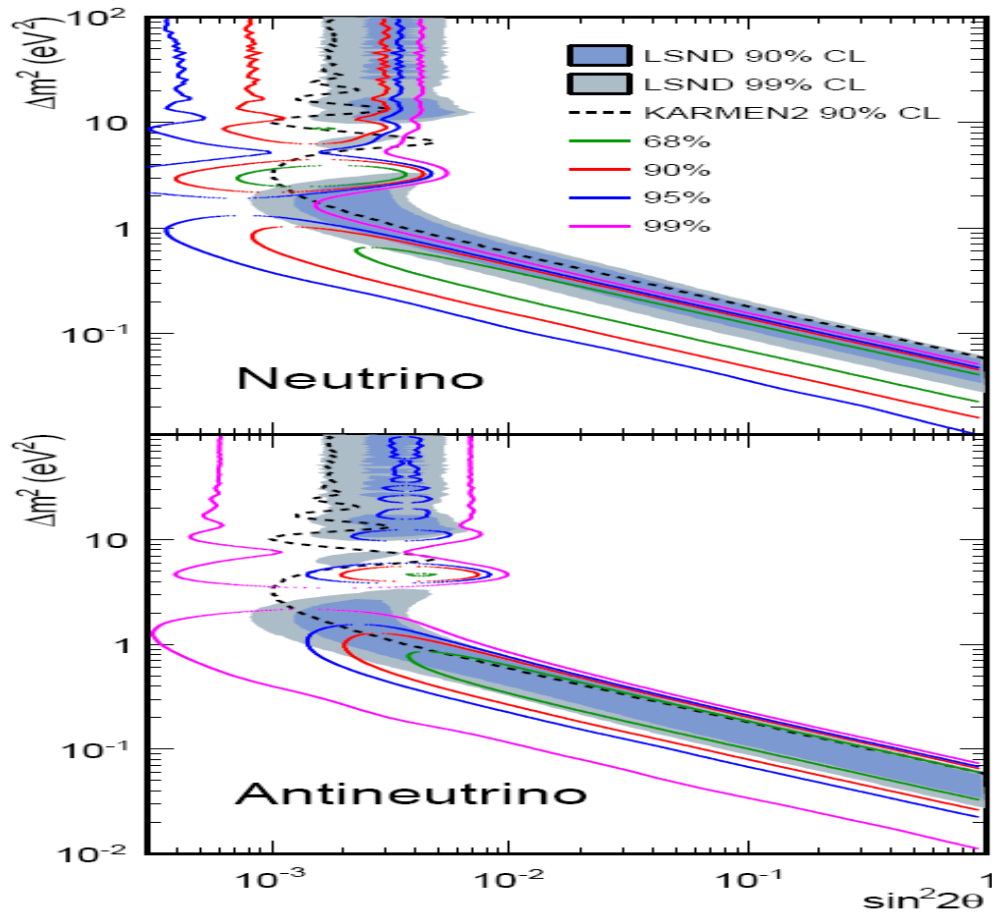
1280 ФЭУ, обеспечивают 10% покрытие поверхности фотокатодами.

Эксперименты на короткой базе: MiniBooNE



The MiniBooNE experiment at Fermilab reports results from an analysis of the combined ν_e and $\bar{\nu}_e$ appearance data from 6.46×10^{20} protons on target in neutrino mode and 11.27×10^{20} protons on target in antineutrino mode. A total excess of $240.3 \pm 34.5 \pm 52.6$ events (3.8σ) is observed from combining the two data sets in the energy range $200 < E_{\nu}^{QE} < 1250$ MeV.

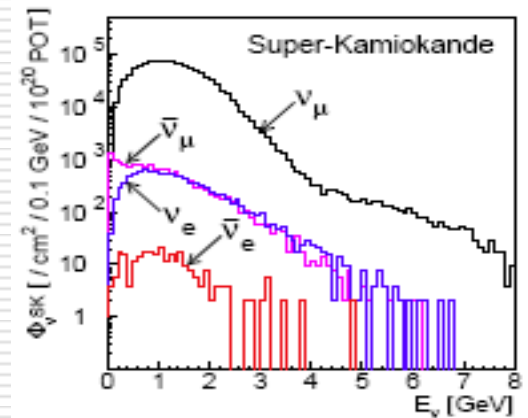
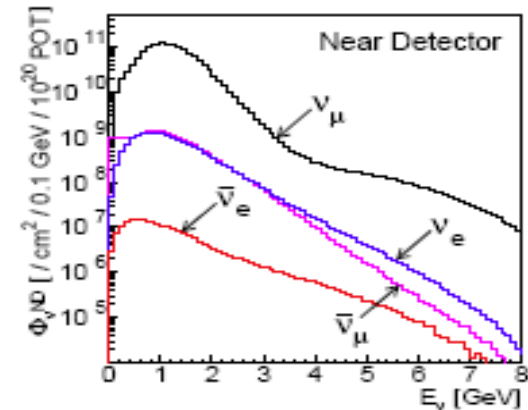
Эксперименты на короткой базе: MiniBooNE



The allowed regions from a 3+1 fit to the data, shown in Fig. 1, are consistent with $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ and $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ oscillations in the 0.01 to 1 eV² Δm^2 range and consistent with the allowed region reported by the LSND experiment

K2K (KEK to Kamioka)

- Впервые существование нейтринных осцилляций в ускорительном пучке дальних нейтрино было обнаружено в эксперименте K2K (KEK-Super-Kamiokande);
- Сформированный на ускорителе KEK нейтринный пучок имеет среднюю энергию 1.4 ГэВ и проходит внутри Земли расстояние 250 км до детектора Super-Kamiokande.



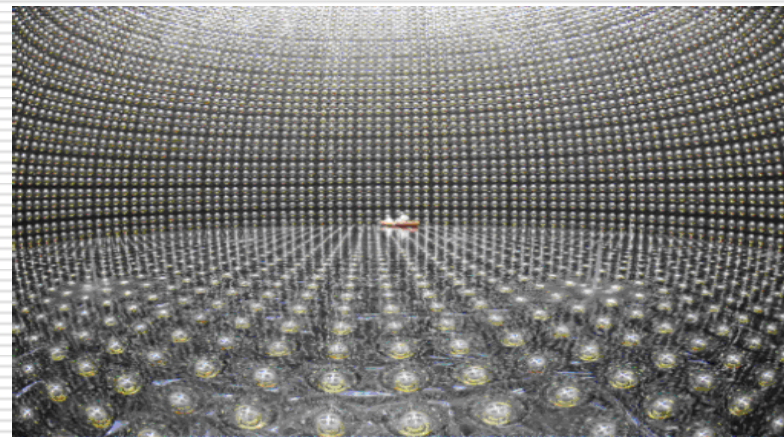
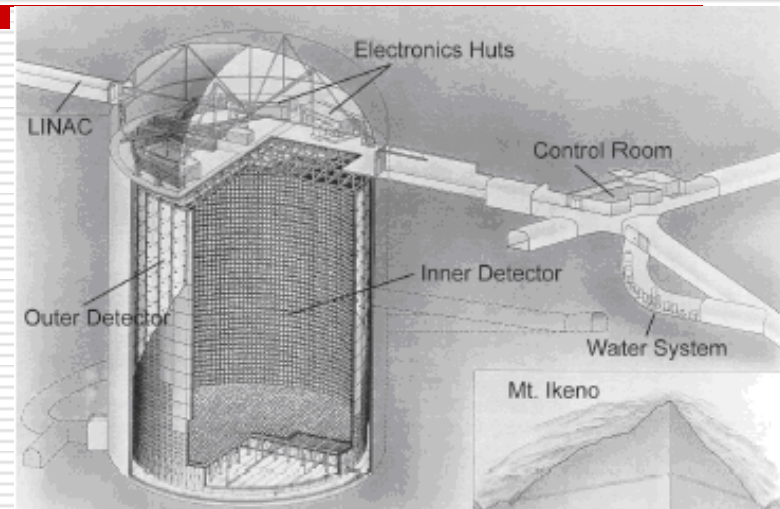
K2K (KEK to Kamioka)

□ Дальний детектор - **SuperKamiokande**

содержит 50 кт воды.

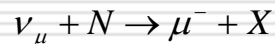
На стенках закреплено 11146 ФЭУ Hamamatsu R3600 с диаметром фотокатода 50 см;

Ближний детектор – 1 кт.

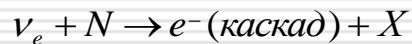


K2K (KEK to Kamioka)

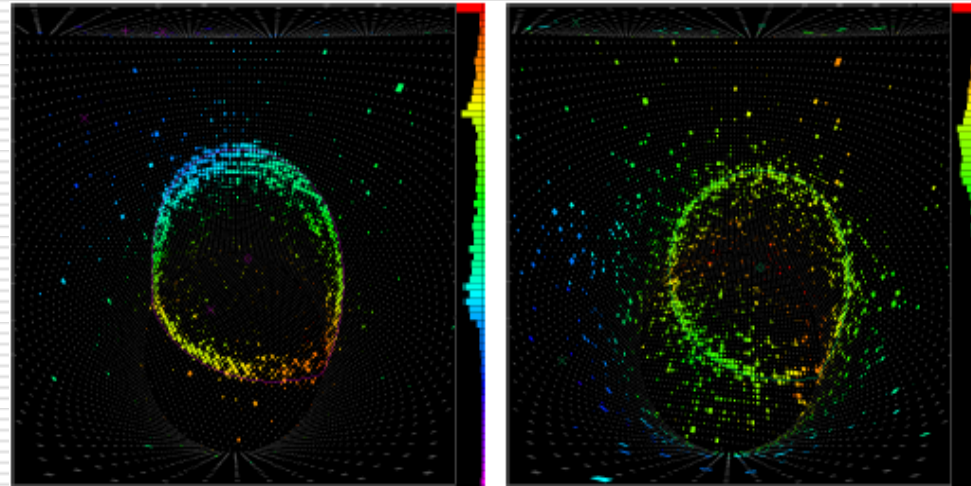
- Аромат образовавшегося лептона идентифицируется по форме кольца черенковского излучения: в случае мюона, образованного в реакции



в детекторе имеется четкий образ кольца, а в случае электрона - ливневое событие



– черенковское кольцо размытое, так как представляет собой суперпозицию множества частиц электромагнитного каскада.

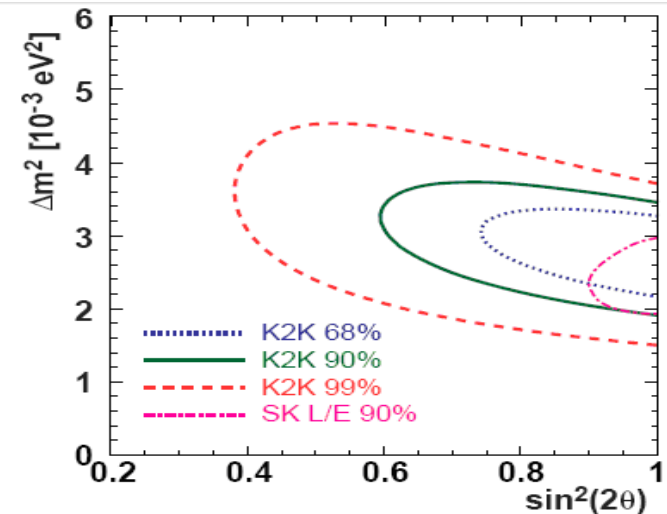
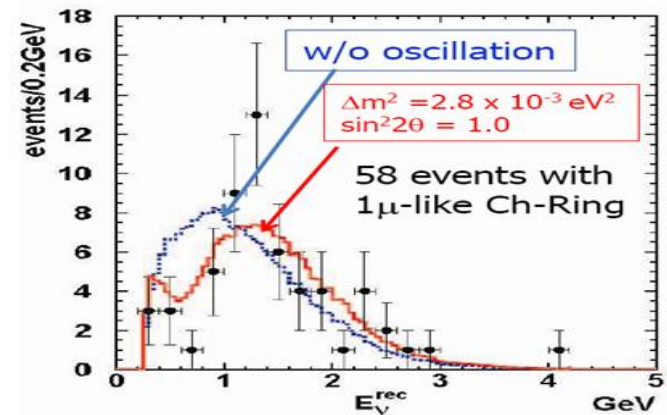


K2K (KEK to Kamioka)

- Всего в Super-Kamiokande было зарегистрировано **112** нейтринных событий от пучка KEK. Расчетное по Монте-Карло количество событий в отсутствие осцилляций должно составлять **158 ± 9**.
- Нулевая гипотеза осцилляций исключена на уровне **4.3** стандартных отклонений.

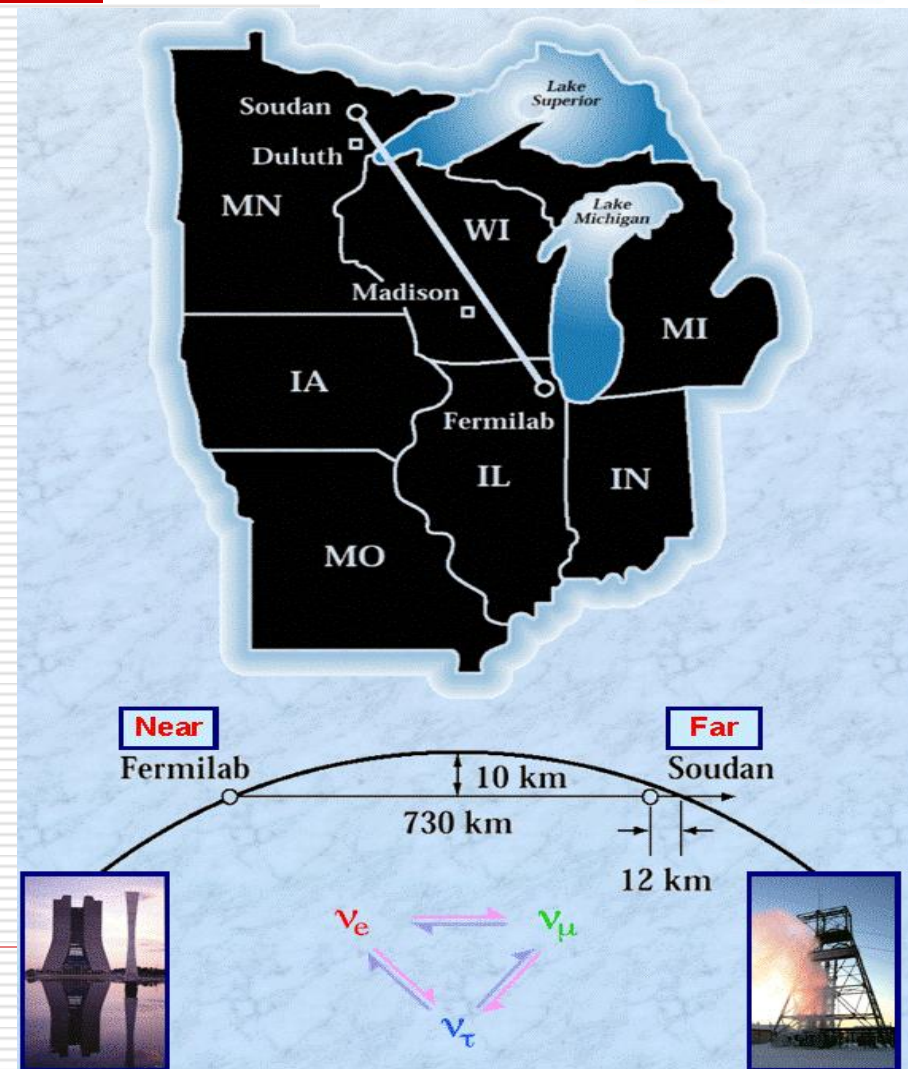
$$2,2 \cdot 10^{-3} < \Delta m_{32}^2 < 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} > 0,74$$





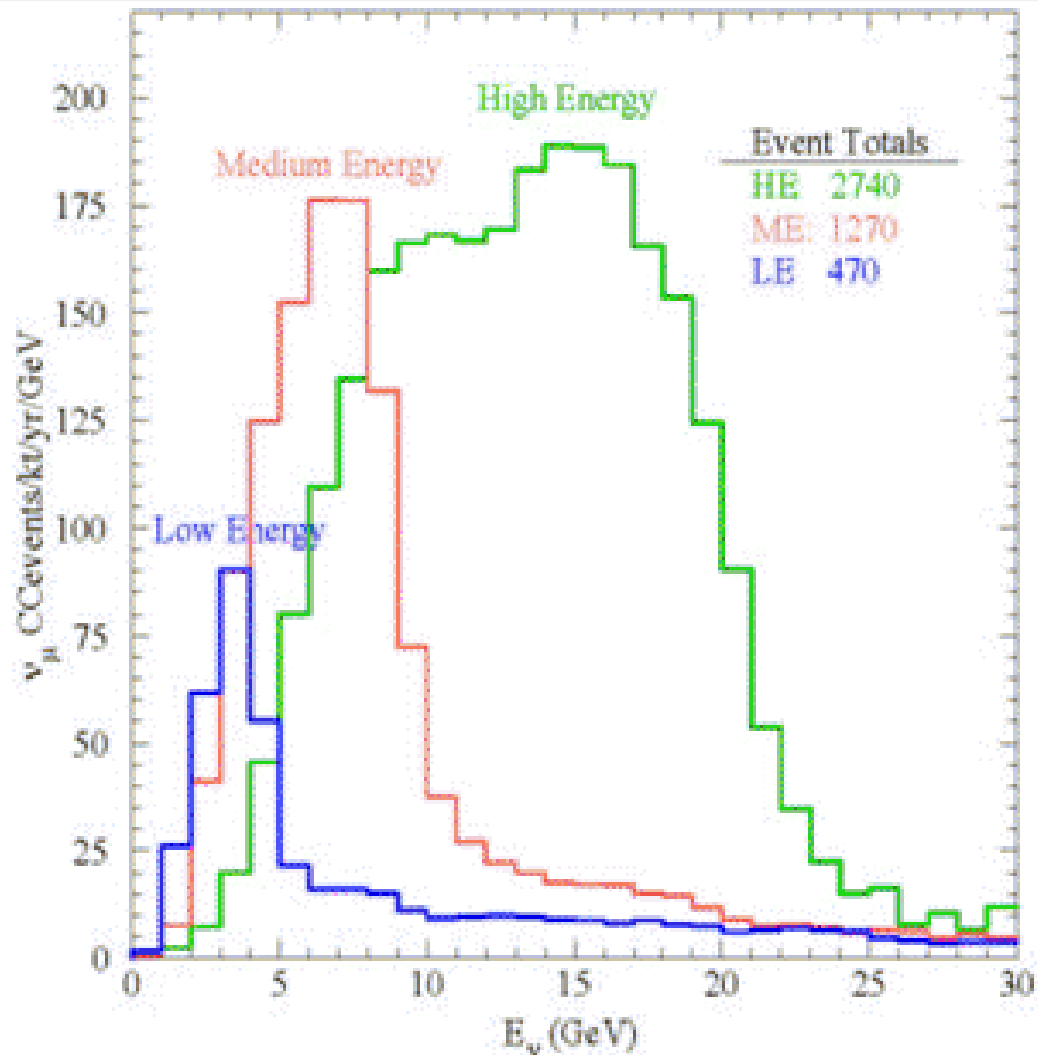
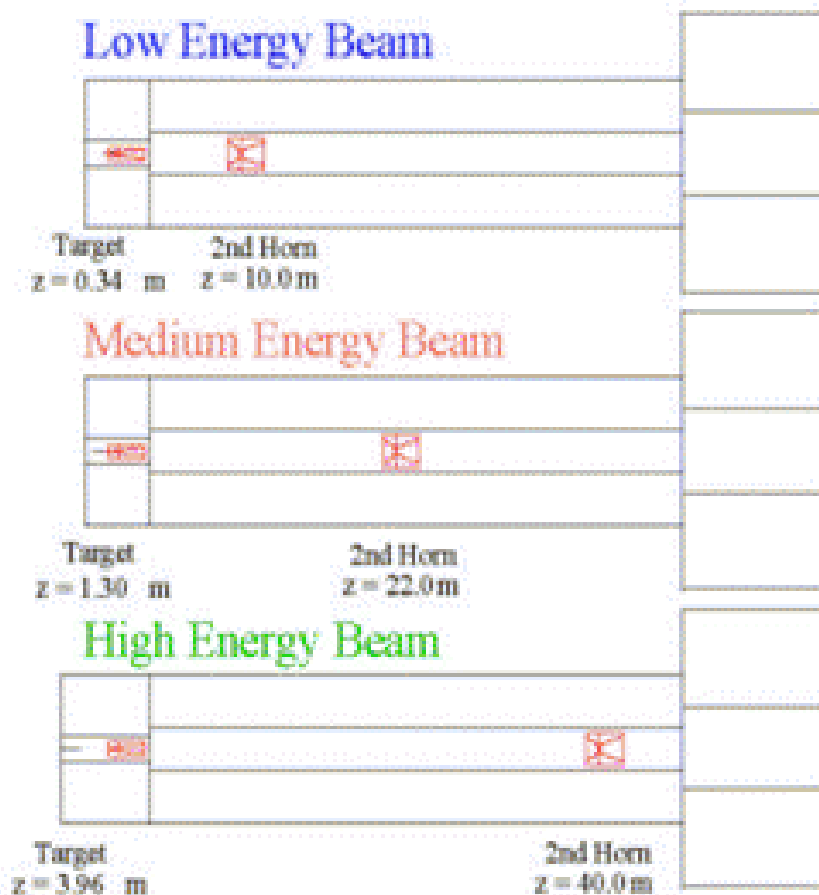
Эксперимент MINOS

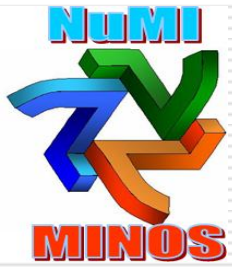




Эксперимент MINOS

Нейтринные пучки

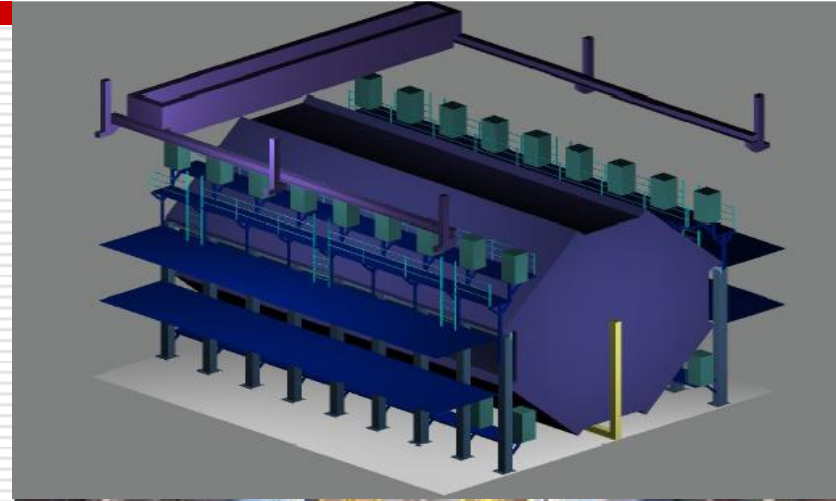




Эксперимент MINOS

Дальний детектор

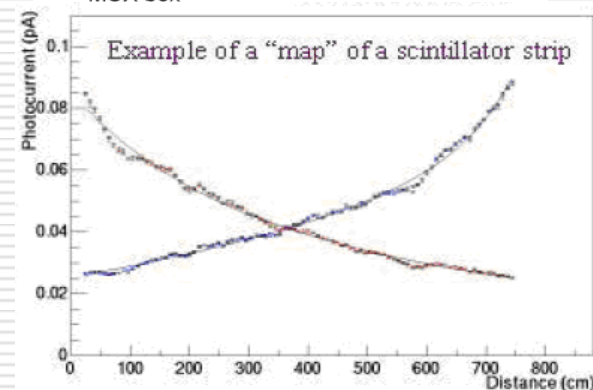
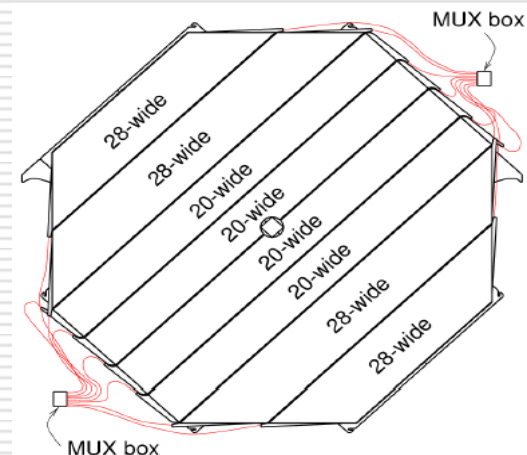
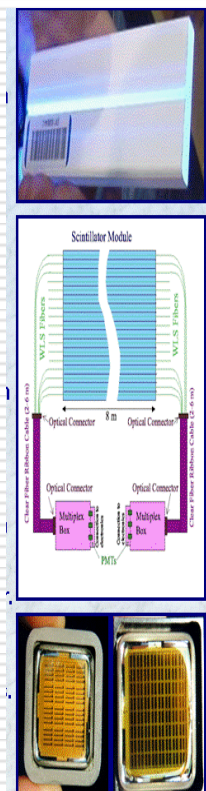
- Сэндвич-калориметр весом $5,4 \text{ кт}$, состоит из пластин намагниченного железа, прослоенных плоскостями пластического сцинтиллятора.
- Калориметр разделен на два одинаковых супермодуля, каждый из которых набран из 243 железных пластин с поперечным размером 8 м и толщиной $2,54 \text{ см}$ и такого же количества плоскостей сцинтиллятора.
- Обмотки электромагнитов, создающих в объеме калориметра магнитное поле напряженностью $1,5 \text{ Т}$.
- Вето- система, необходима для выделения атмосферных нейтрино.



Эксперимент MINOS

Сцинтилляционный детектор

- Каждая плоскость сцинтиллятора состоит из 192 полос шириной 4,1 см и длиной от 4 до 8 м.
- Полосы изготовлены из пластического сцинтиллятора, имеют светоотражающий поверхностный слой TiO_2 и канавку по всей длине под размер WLS-фибра.
- Свет захватывается фибром, изотропно переизлучается на другой длине волны и транспортируется к фотоприемникам. Используются WLS-фибры *Kuraray Y-11*, а в качестве фотоприемника – 16-канальный фотоумножитель *Hamamatsu R5900-M16* (2040 штук).
- Мультипликация сигналов в дальнем детекторе.

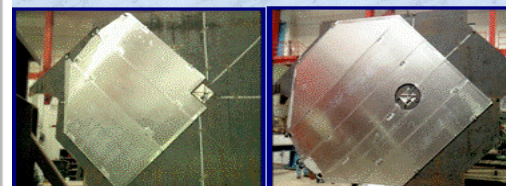
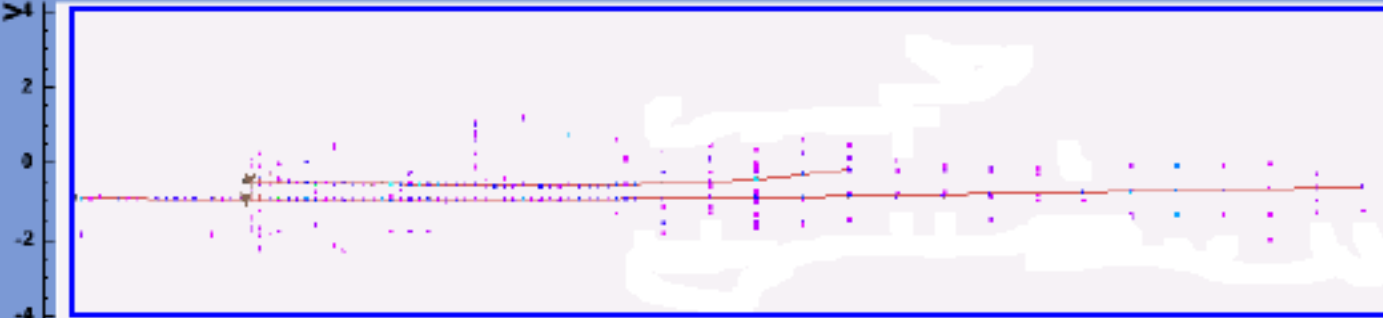
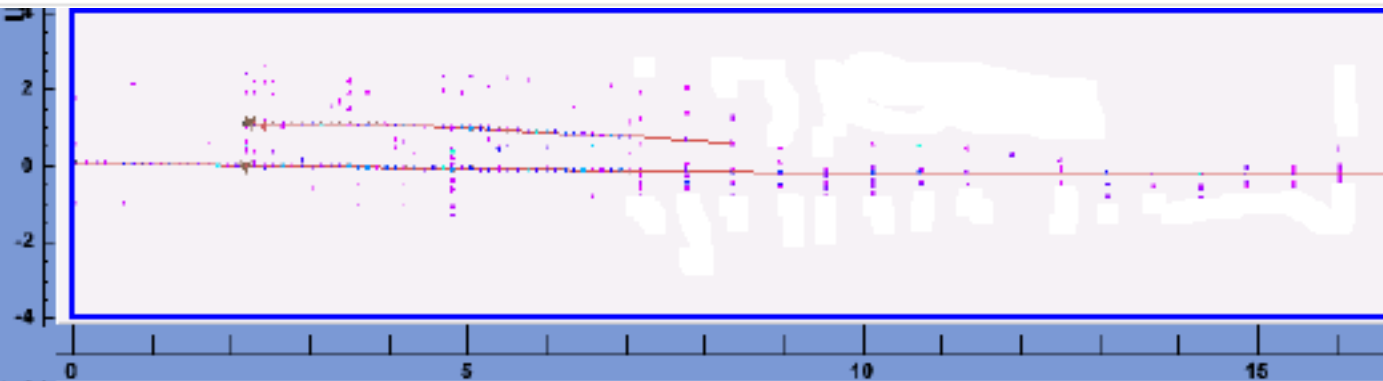
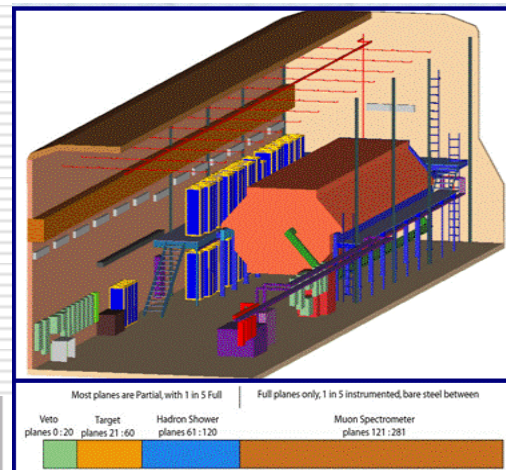


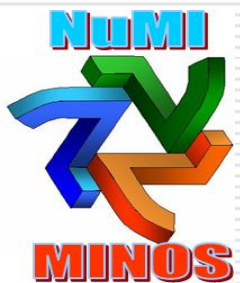
Калибровочные измерения световыхода

Эксперимент MINOS

Ближний детектор

- Имеет полезную массу **1,0 кт** и собран из **280 железных пластин** с толщиной по пучку **2,54 см**.
- Считывание сигналов с каждого конца пластика без мультипликации. Для съема сигналов **147 64-канальных ФЭУ Hamamatsu R5900-M64**.
- Загрузка в 10^6 раз больше, чем в дальнем детекторе – **20 событий на один мс** - сброс ускорителя.





Эксперимент MINOS

Методы поиска осцилляций

□ **Наблюдение убывания потока мюонов от взаимодействий ν_μ по каналу заряженного тока (CC- метод).**

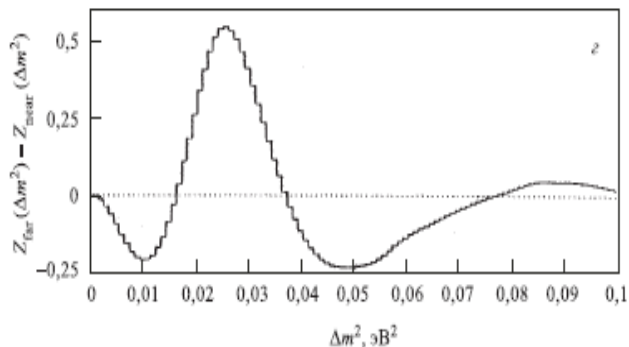
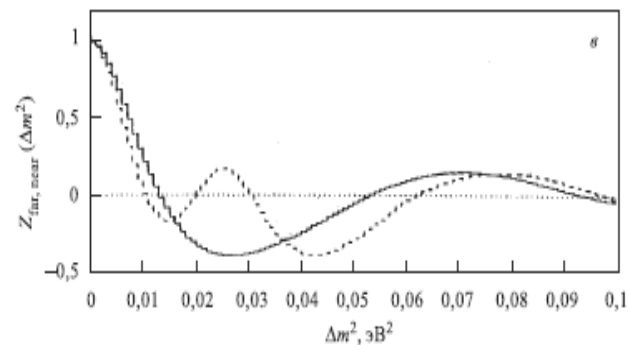
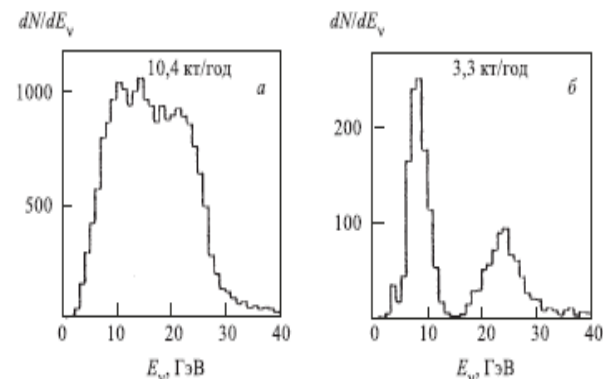
□ **Измерение в пучке ν_μ отношения числа безмюонных событий нейтрального тока к числу событий заряженного тока с зарегистрированным мюоном (NC/CC- метод).**

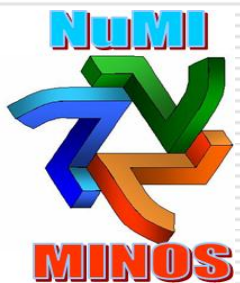
□ **Сравнение энергетических распределений CC- и NC-событий в ближнем и дальнем детекторах.**

Если в детекторе зарегистрировано N событий - CC- взаимодействий, то, можно ввести статистическую величину

$$Z(\Delta m^2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos(2,54 \cdot \Delta m^2 L / E_i)$$

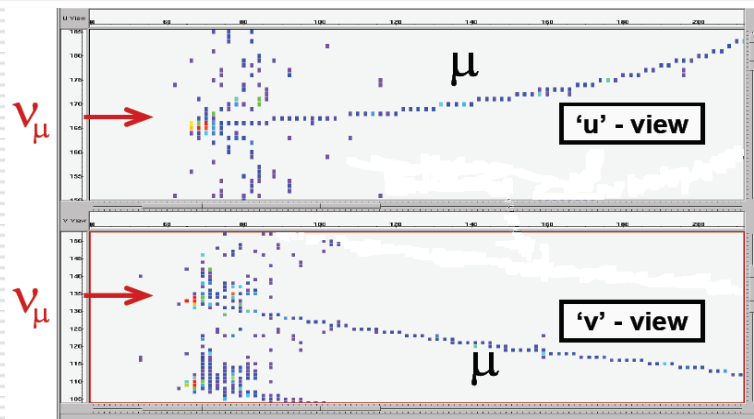
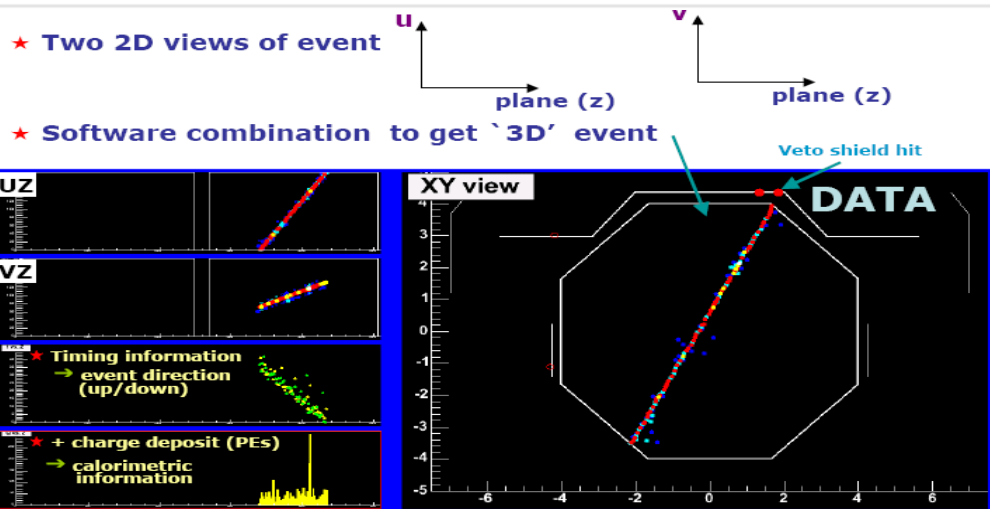
которая является частичной суммой ряда Фурье спектральной функции энергетического распределения dN/dE_ν . Величина Z рассчитывается в виде функции от Δm^2 для событий, зарегистрированных в ближнем и дальнем детекторах. **Статистически значимое различие между значениями $Z_{\text{ближний}}(\Delta m^2)$ и $Z_{\text{дальний}}(\Delta m^2)$ является чистой демонстрацией осцилляций. Положение максимума величины $\Delta Z(\Delta m^2)$ определяет Δm^2 , а высота связана с $\sin^2 2\theta$.**





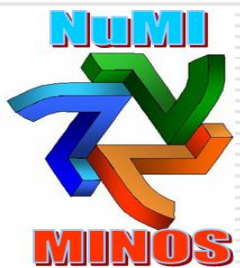
Эксперимент MINOS

Результаты наблюдения осцилляций нейтрино от ускорителя



Пример восстановления трека мюона космических лучей

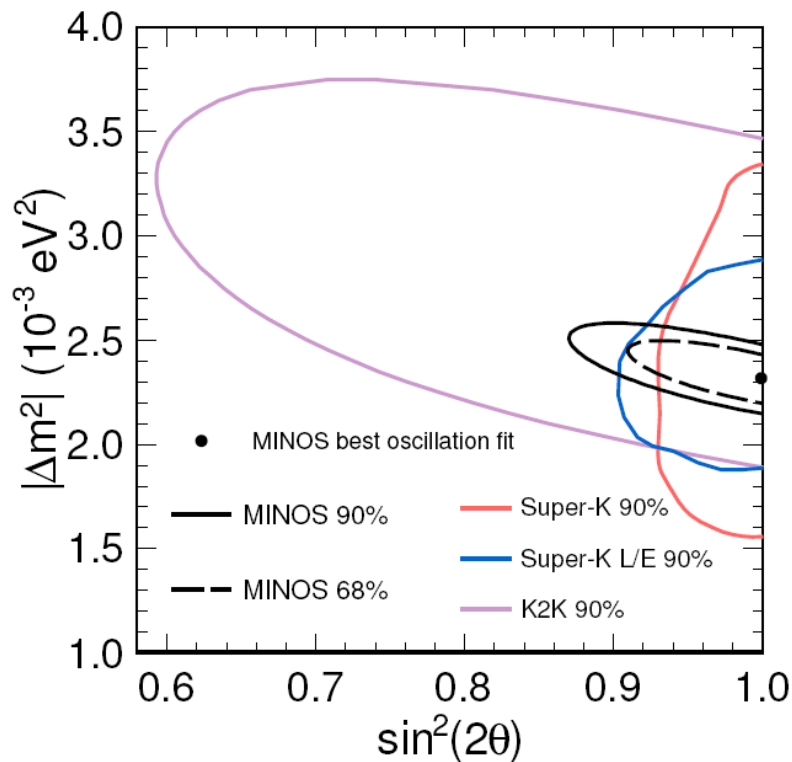
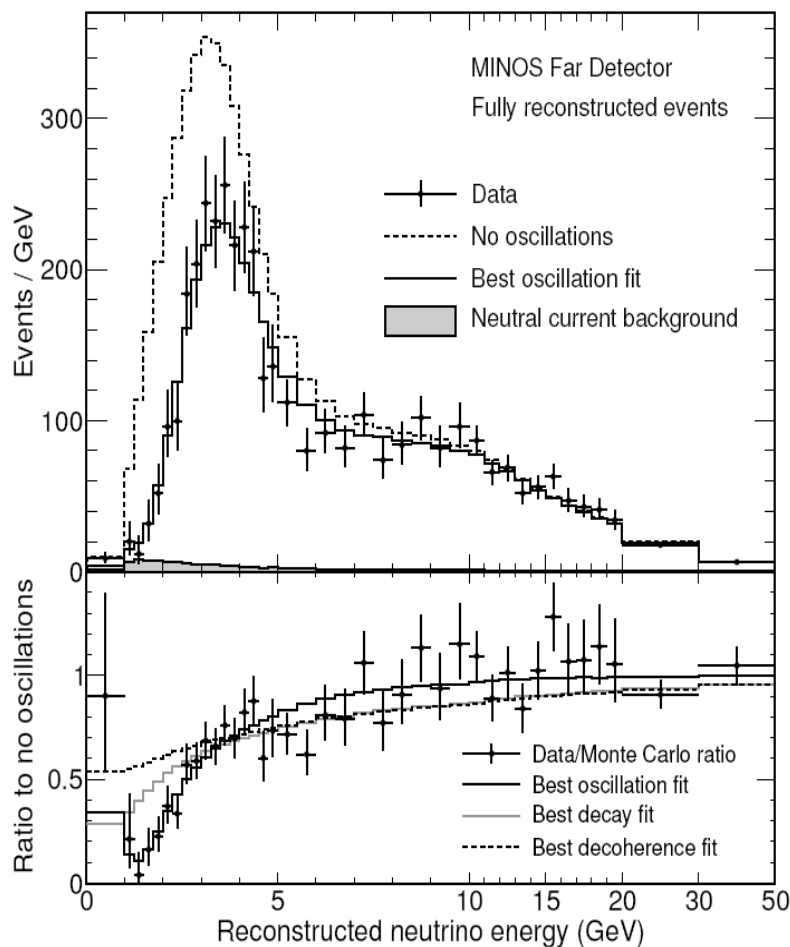
Нейтринное событие в дальнем детекторе от пучка NuMI



Эксперимент MINOS

Результаты наблюдения осцилляций нейтрино от ускорителя

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (disappearance)



Total neutrino beam exposure is 10.7×10^{20} POT

Best fit:

$$|\Delta m^2| = (2.39^{+0.09}_{-0.10}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta) = 0.96^{+0.04}_{-0.04}$$

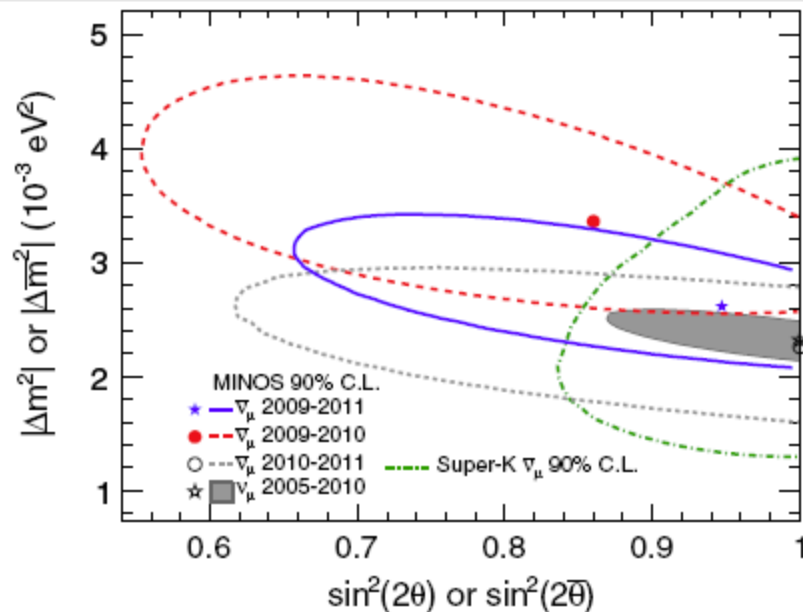
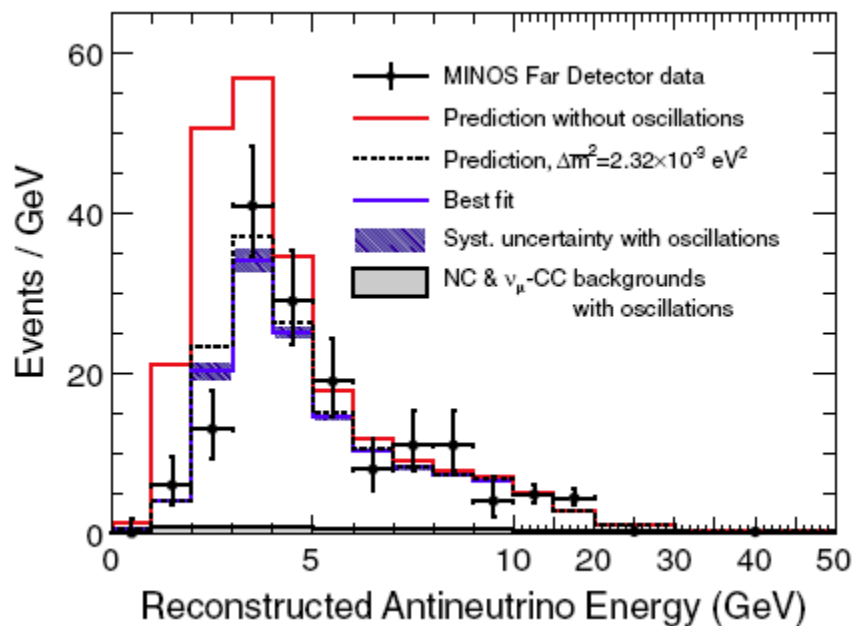
PRL 106, 181801 (2011)



Эксперимент MINOS

Результаты наблюдения осцилляций нейтрино от ускорителя

anti- ν_μ disappearance



Total antineutrino beam exposure is 2.95×10^{20} POT

Best fit:

$$|\Delta m^2| = (2.62^{+0.31}_{-0.28}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta) = 0.95^{+0.1}_{-0.11}$$



Эксперимент MINOS

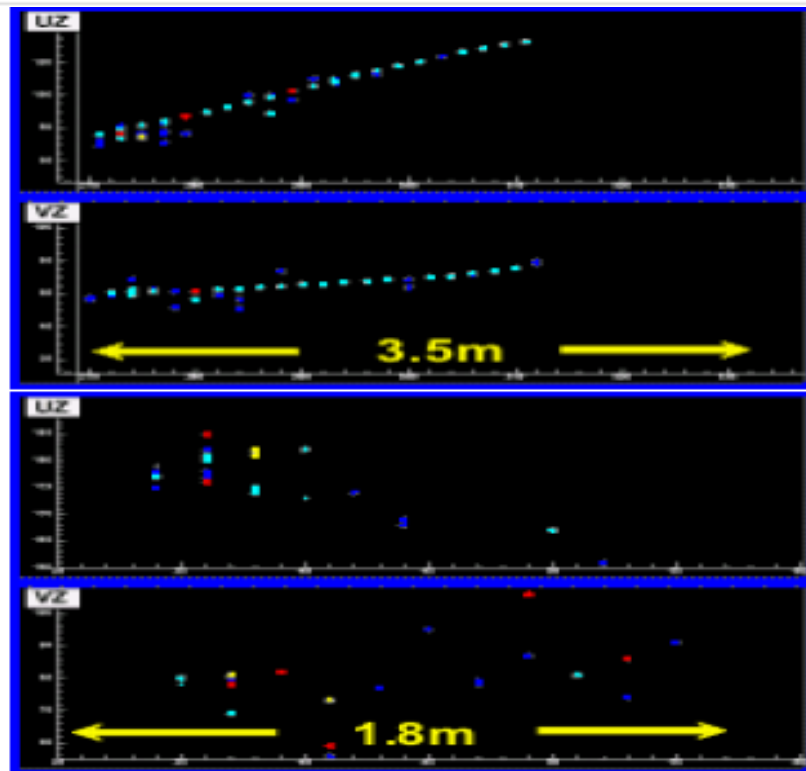
Возможности наблюдения стерильных нейтрино

Взаимодействия NC не чувствительны к $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, но будут отражать вклады $\nu_\mu \rightarrow \nu_{ster}$, если они существуют.

Необходимо изучить выбывание потока NC-событий, измеряемое в дальнем детекторе, относительно потока, регистрируемого в ближнем.

Число NC-событий будет изменяться в зависимости от вероятности

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_s) &= f_s \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(1.27 \Delta m_{32}^2 \frac{L}{E}\right) \\ &= f_s [1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)] \end{aligned}$$



Эксперимент MINOS

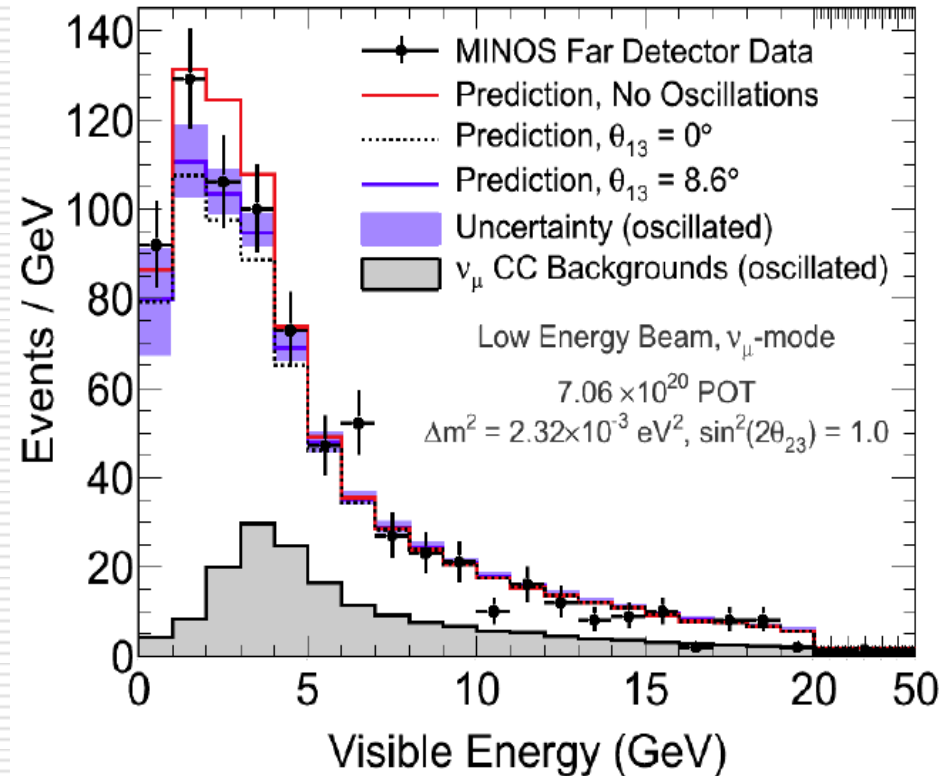
Search for sterile neutrino mixing in the MINOS long baseline experiment

Реконструирован энергетический спектр NC- взаимодействий.

Зарегистрировано 388 NC-событий.

Ожидание в трехароматовой модели
377 ± 19,4 (стат) ± 18,5 (сист).

Имеется полное согласие с гипотезой отсутствия осцилляций в стерильный аромат!

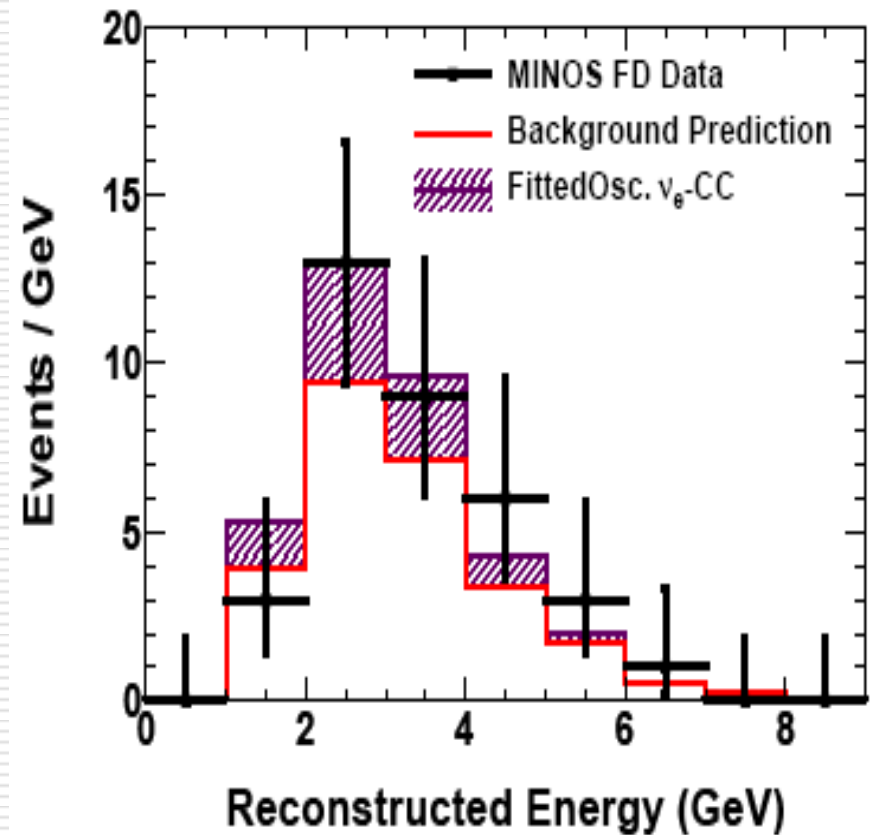




Эксперимент MINOS

Возможности наблюдения появления электронных нейтрино

- Реконструирован энергетический спектр электронных нейтрино в ν_e -CC взаимодействиях.
- Зарегистрировано 35 событий.
- Расчетный фон $27 \pm 5 \pm 2$.



Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations in MINOS



Эксперимент MINOS

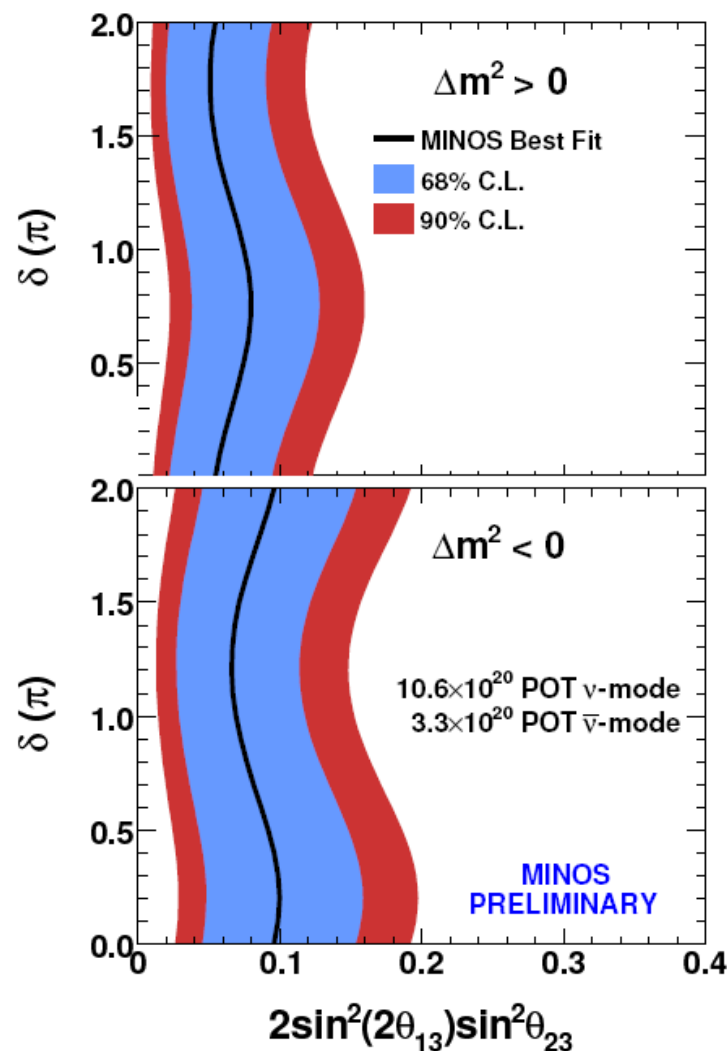
Наблюдение появления электронных нейтрино

Total neutrino beam exposure is 10.6×10^{20} POT.
 In the neutrino beam and assuming
 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ ($\sin^2(2\theta_{13}) = 0.1, \delta_{CP} = 0$, normal hierarchy)
 expected to see 128 (161) events in Far detector.
152 events were observed.

The $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ hypothesis is disfavored at the 96% C.L.

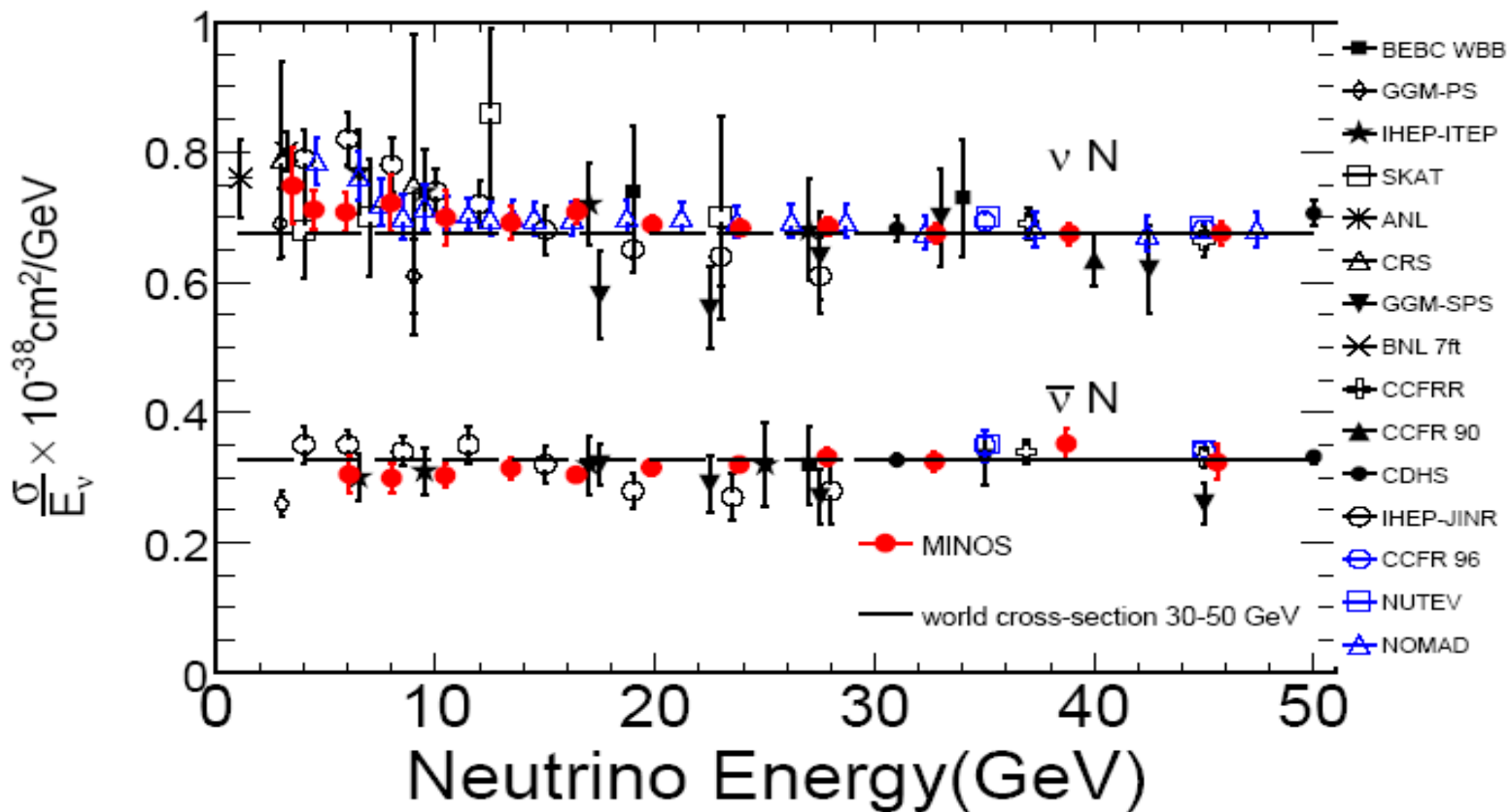
For $\delta_{CP} = 0$ and normal (inverted) mass hierarchy
 a best fit - $2 \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \theta_{23} = 0.053$ (0.094).

Allowed range - $0.01 < 2 \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \theta_{23} < 0.12$
 ($0.03 < 2 \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \theta_{23} < 0.19$)





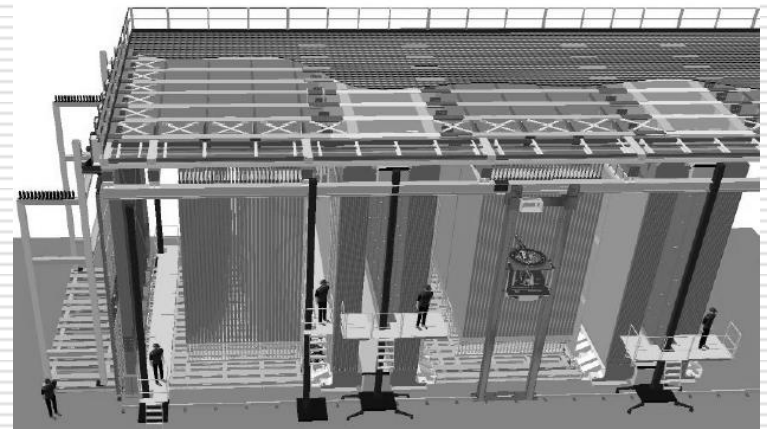
Neutrino and antineutrino inclusive charged-current cross section measurement with the MINOS Near Detector





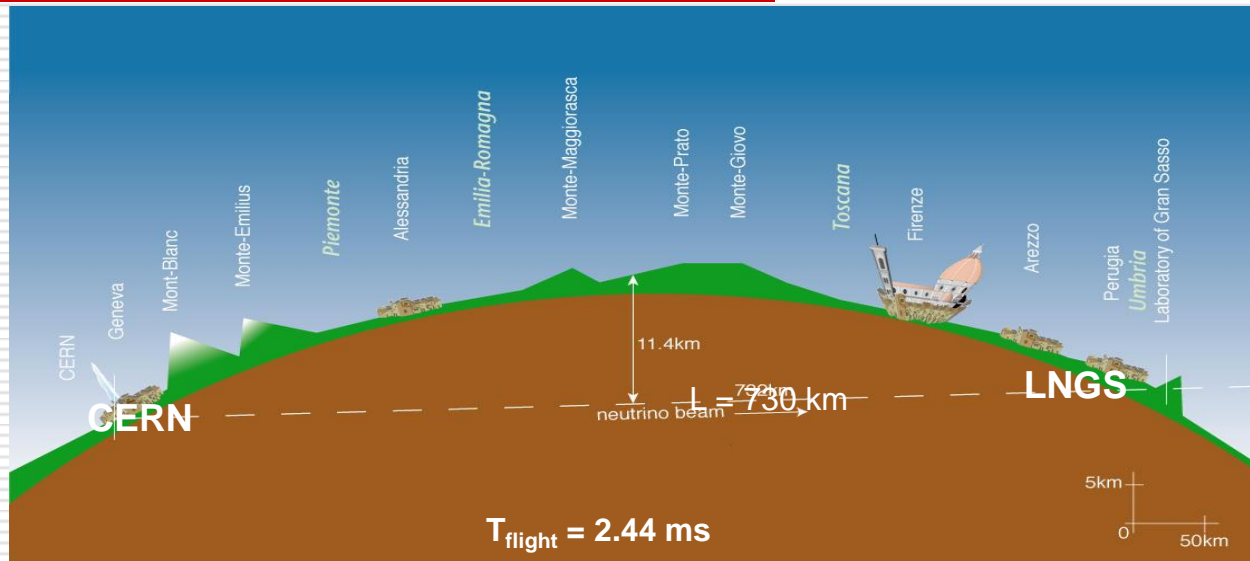
Эксперимент OPERA

- Детектор ОПЕРА – это свинцово - фотоэмульсионный детектор модульной конструкции с полезной массой около 1,25 кт, из которой масса фотоэмульсии составляет около 100 т, что не имеет аналогов в экспериментальной физике.
- Мишенные блоки состоят из эмульсионных «кирпичей», являющихся основным элементом детектора. Около каждой стенки мишенного блока расположены электронные детекторы, позволяющие определить в каком эмульсионном «кирпиче» произошло взаимодействие.
- Эмульсионные «кирпичи» состоят из 56 чередующихся пластин свинца толщиной 1000 мкм и ядерной эмульсии толщиной 45 мкм.





Эксперимент OPERA



Регистрация взаимодействий в детекторе OPERA.
Регистрация тау-лептонов в ядерной эмульсии .

$\langle E \rangle$	17 GeV
L	730 km
$(\nu_e + \bar{\nu}_e) / \nu_\mu$ (CC)	0.87%
$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ (CC)	2.1%
ν_τ прямые	negligible

Ожидаемое число взаимодействий для 22.5×10^{19} pot:

$\sim 23600 \nu_\mu^- \text{CC} + \text{NC}$

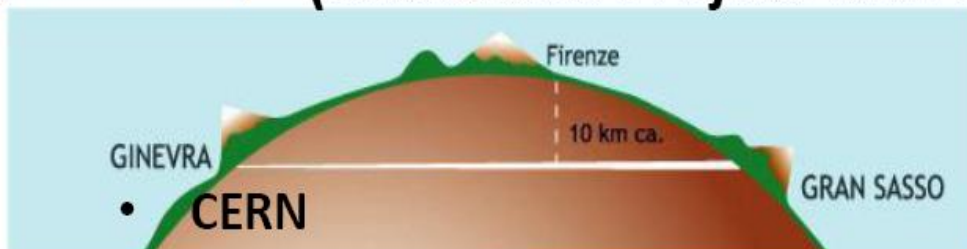
$\sim 160 \nu_e + \bar{\nu}_e \text{CC}$

$\sim 115 \nu_\tau \text{CC}$ ($\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$)



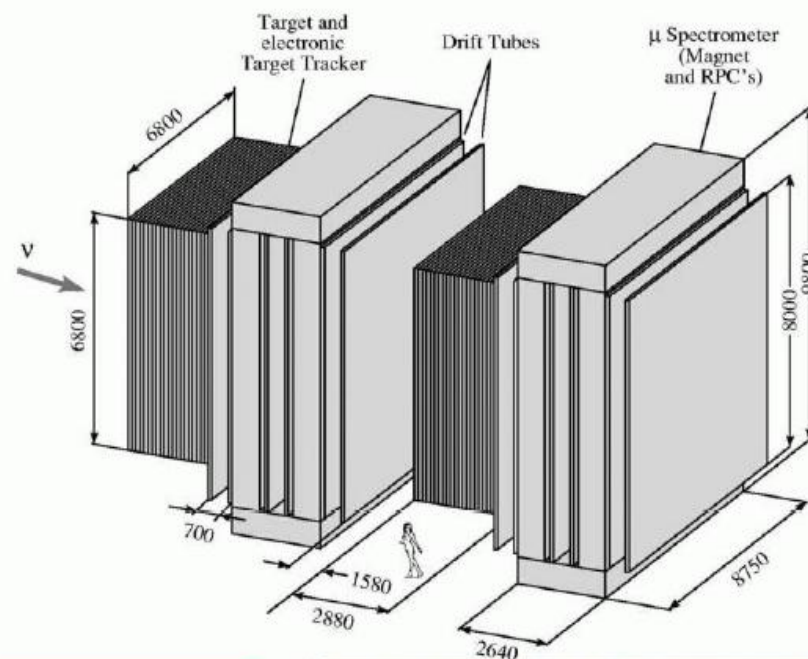
OPERA

(Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus)



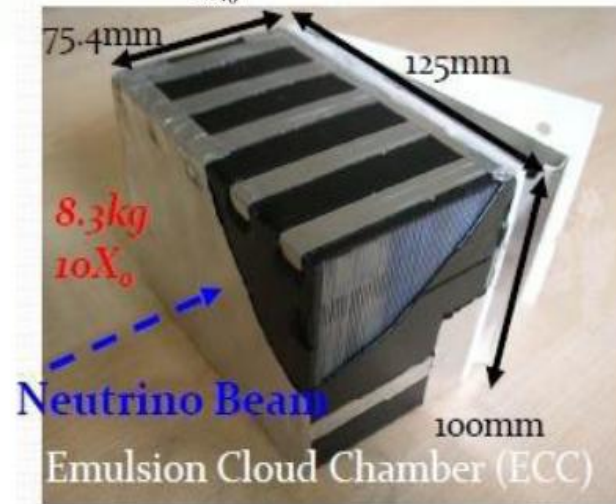
Gran-Sasso, Italy

- 2008-...
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (ν_τ -direct search)
- Detector: Lead/Emulsion Hybrid + Sci.+...
- $L = 732 \text{ km} / \langle E \rangle = 17 \text{ GeV}$



Hybrid Detector:

- Two supermodules - Target Mass ~ 1.25 ktons
- 2 Magnetic spectrometers with RPC & Drift tubes
- 2 x [31 Target Tracker planes and Target Walls]
- "ECC bricks" (56 Pb/57 Emulsion layers): 150000
- 12 M Emulsion plates (thin double-coated)

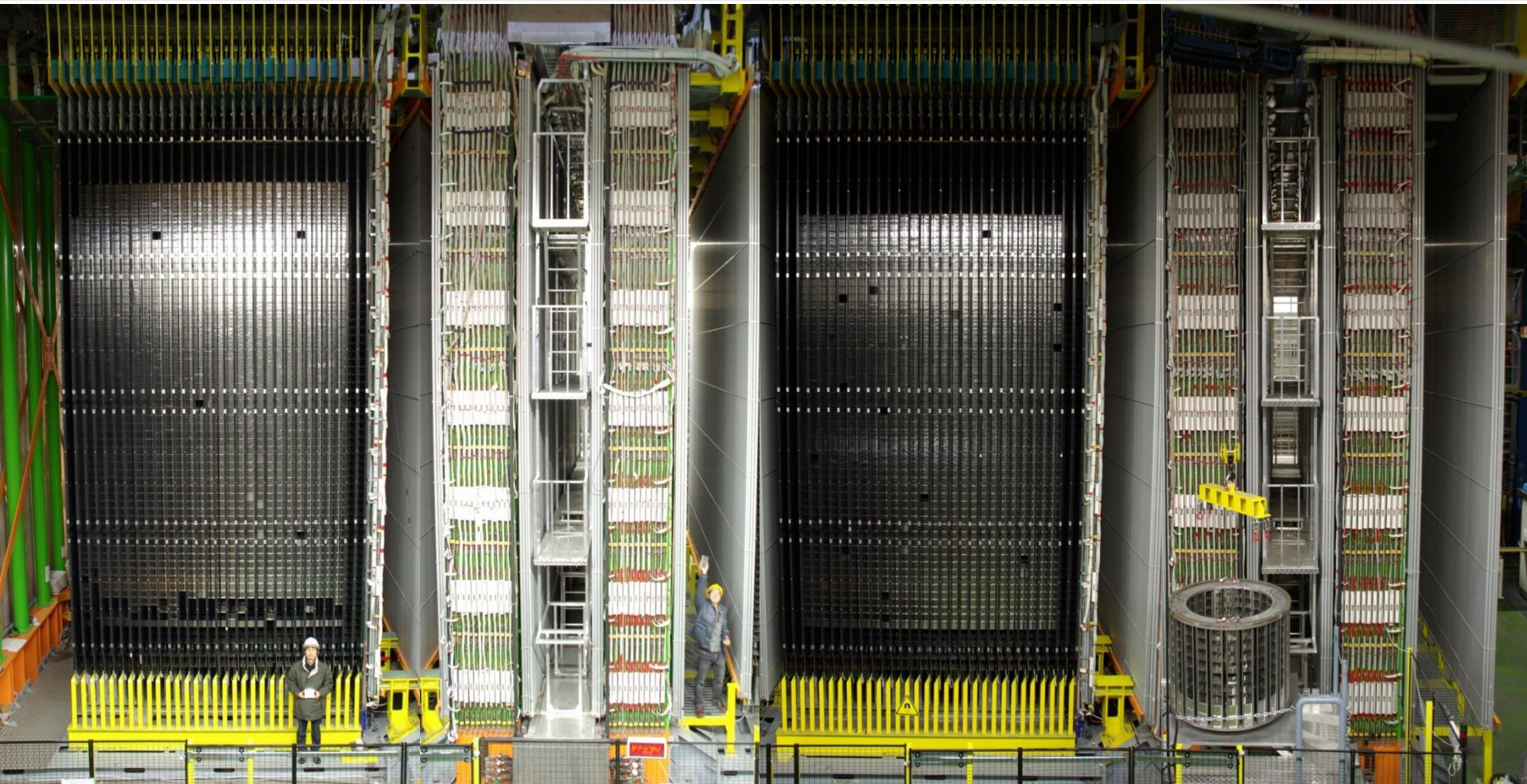




Эксперимент OPERA

SM1

SM2

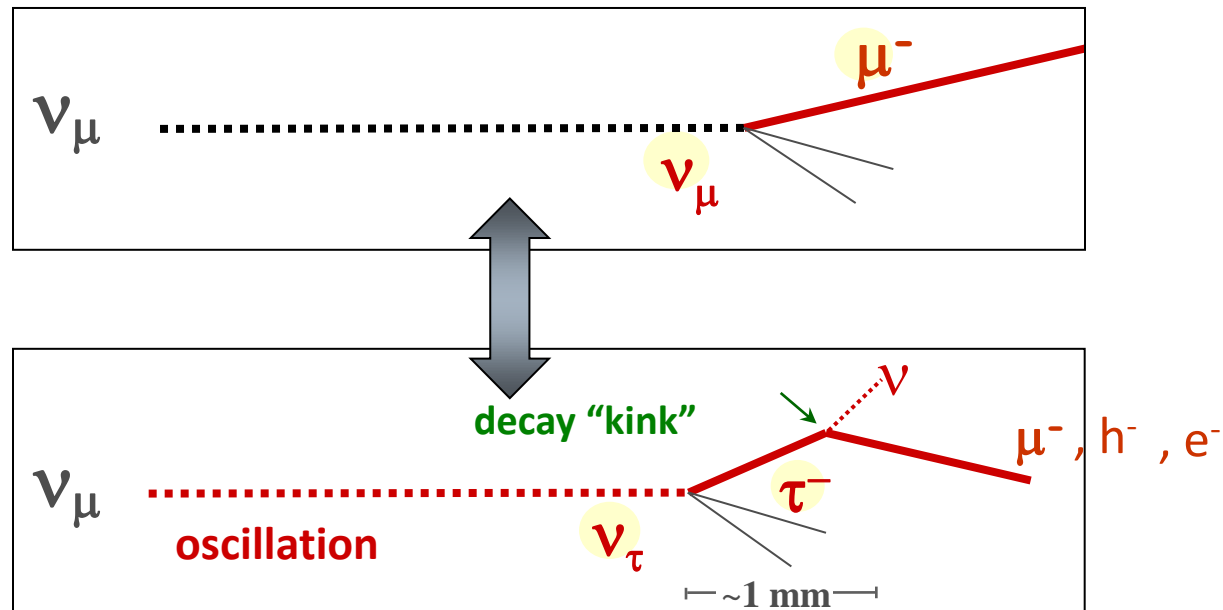




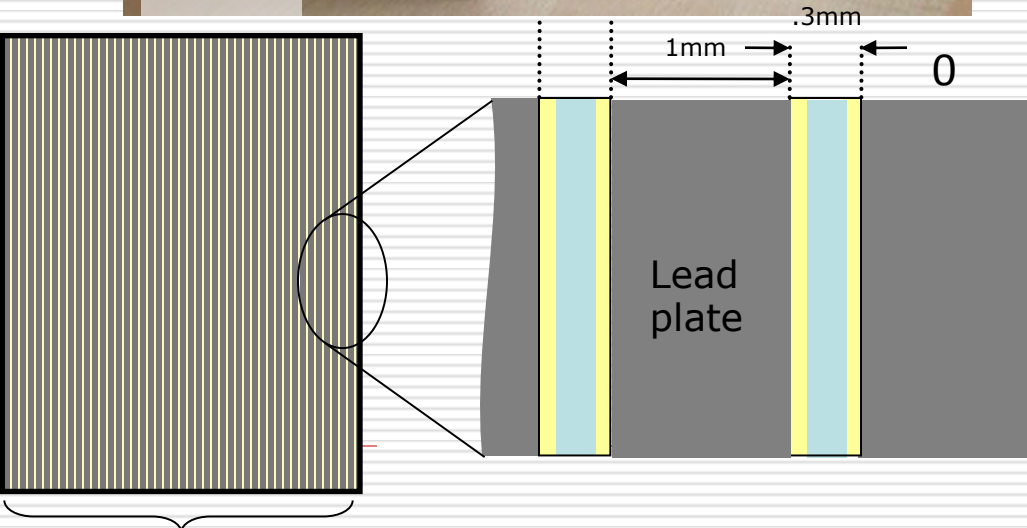
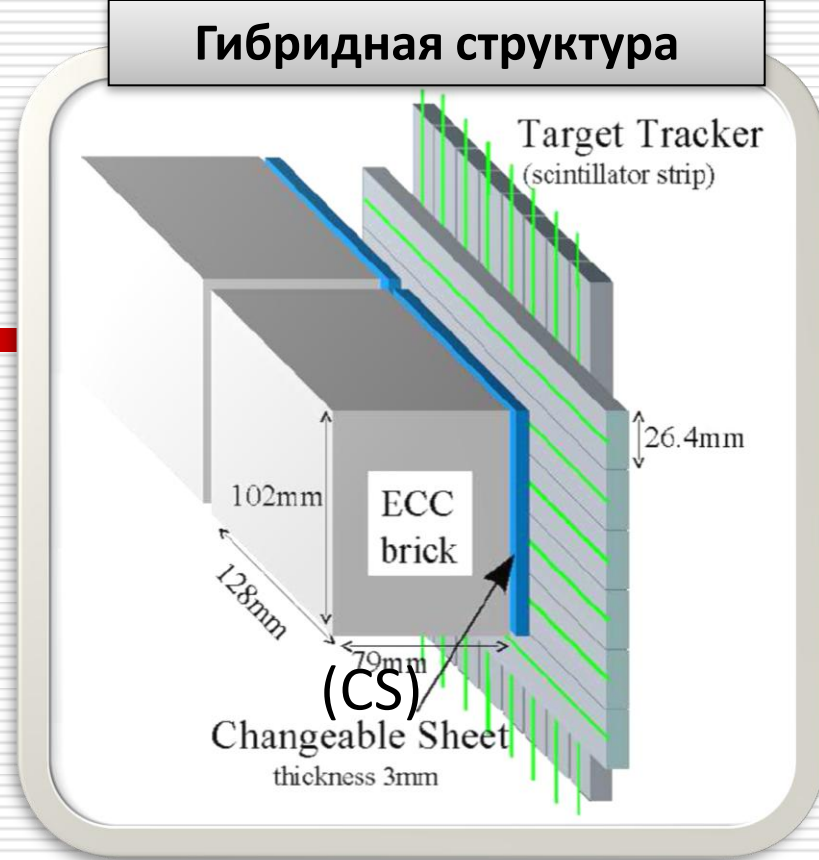
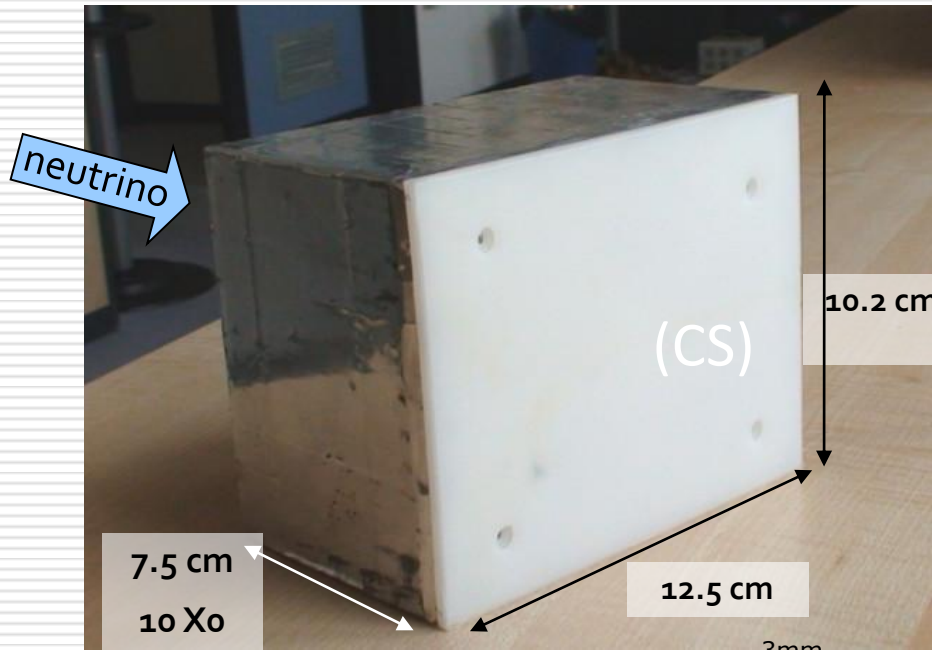
Эксперимент OPERA

Требования к эксперименту:

- 1) Большая база,
- 2) Высокая энергия нейтринного пучка,
- 3) Большая интенсивность пучка,
- 4) Возможность детектирования короткоживущего τ -лептона



ОСНОВА: ЕСС мишенный блок



Мишень состоит из 150'000 ЕСС блоков

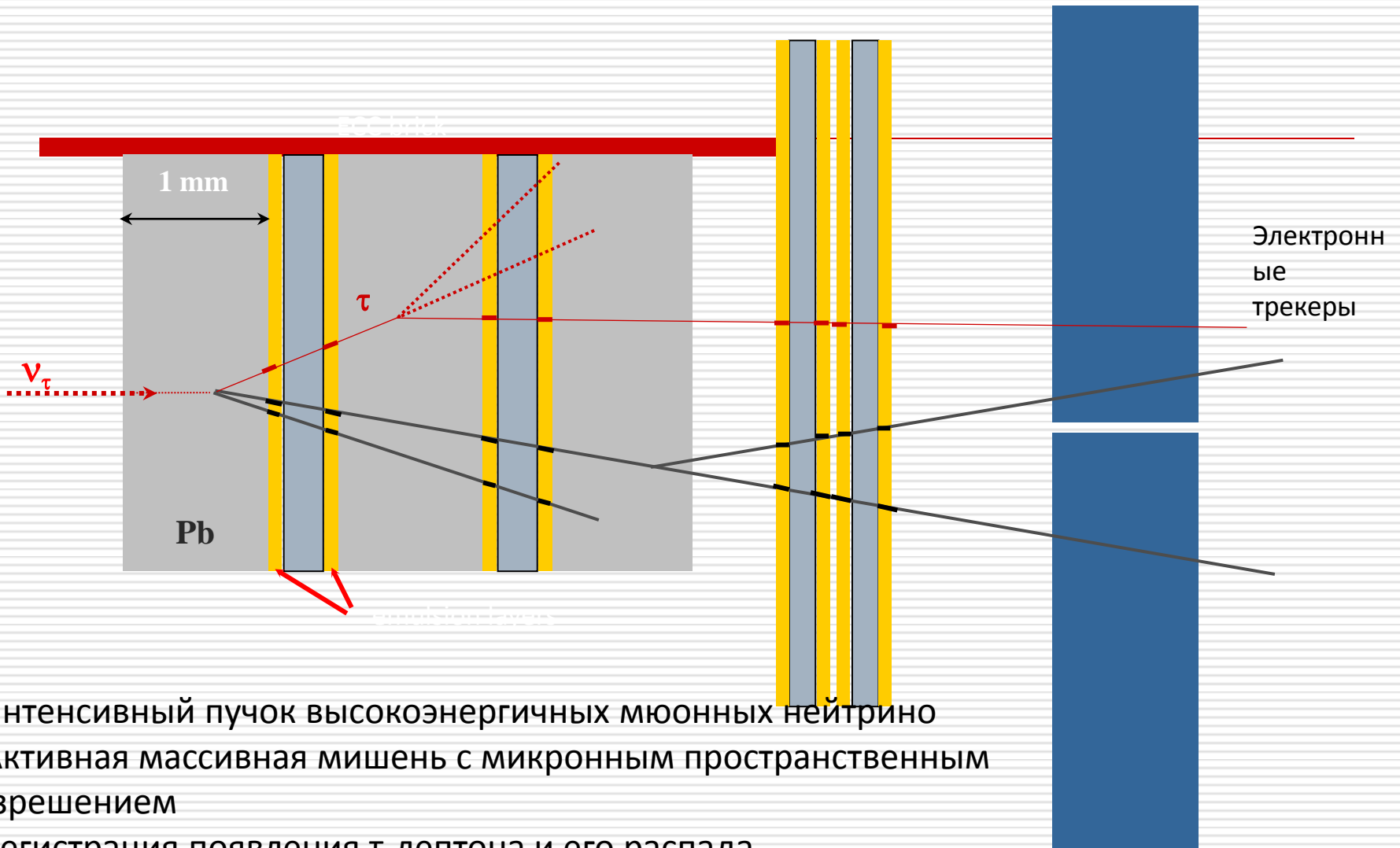
Поверхность свинца 105'000 m²

поверхность эмульсии 111'000 m²

(~ 8.9 x 10⁶ слоев)

Масса мишени: 1.25 x 10³т

Основной принцип: ЕСС + ЭЛЕКТРОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ



- Интенсивный пучок высокоэнергичных мюонных нейтрино
- Активная массивная мишень с микронным пространственным разрешением
- Регистрация появления τ -лептона и его распада
- Использование электронных детекторов для временной привязки к эмульсионному детектору и определение места взаимодействия нейтрино



OPERA: first ν_τ candidate

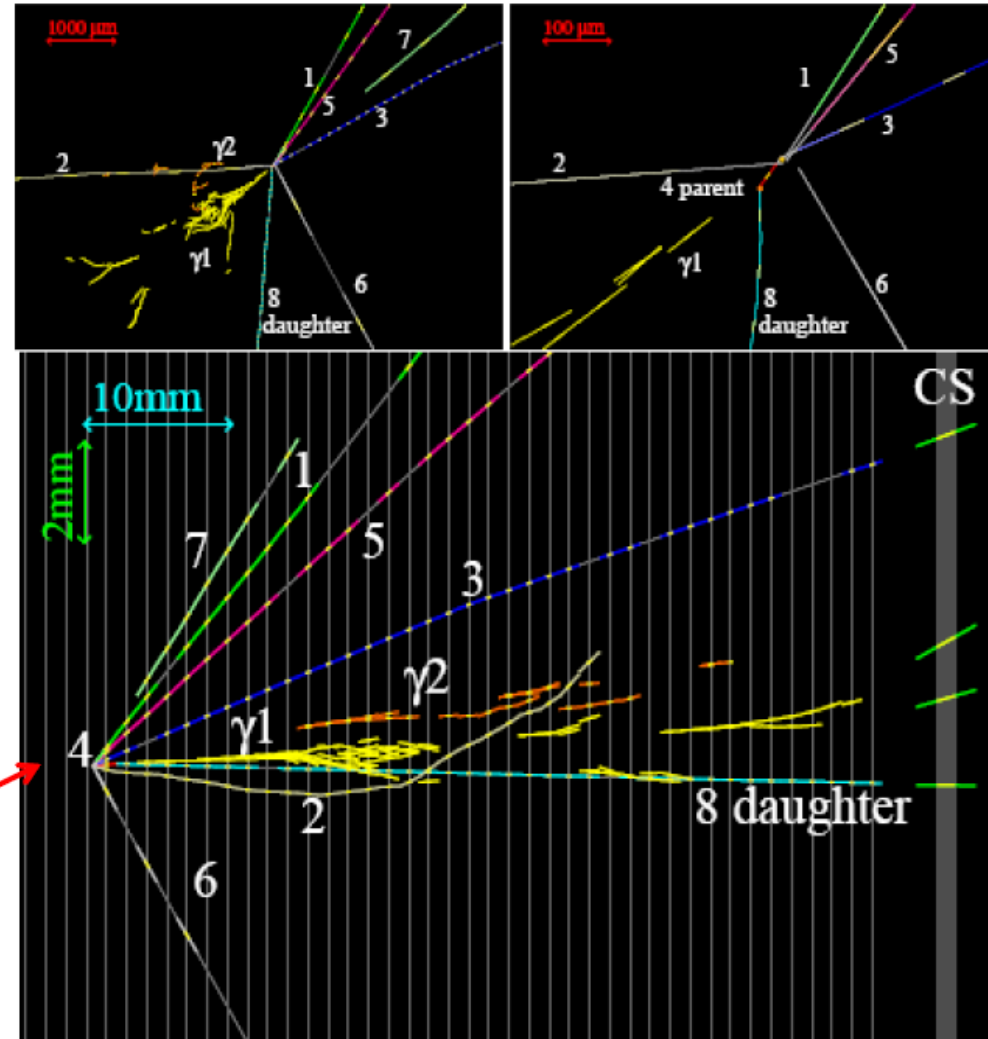
Phys. Lett. B 691 (2010) 138; arXiv:1006.1623 [hep-ex]

Accumulated in 2008-10 $\sim 9.34 \times 10^{19}$ POT
 Analysis of data with 1.85×10^{19} POT

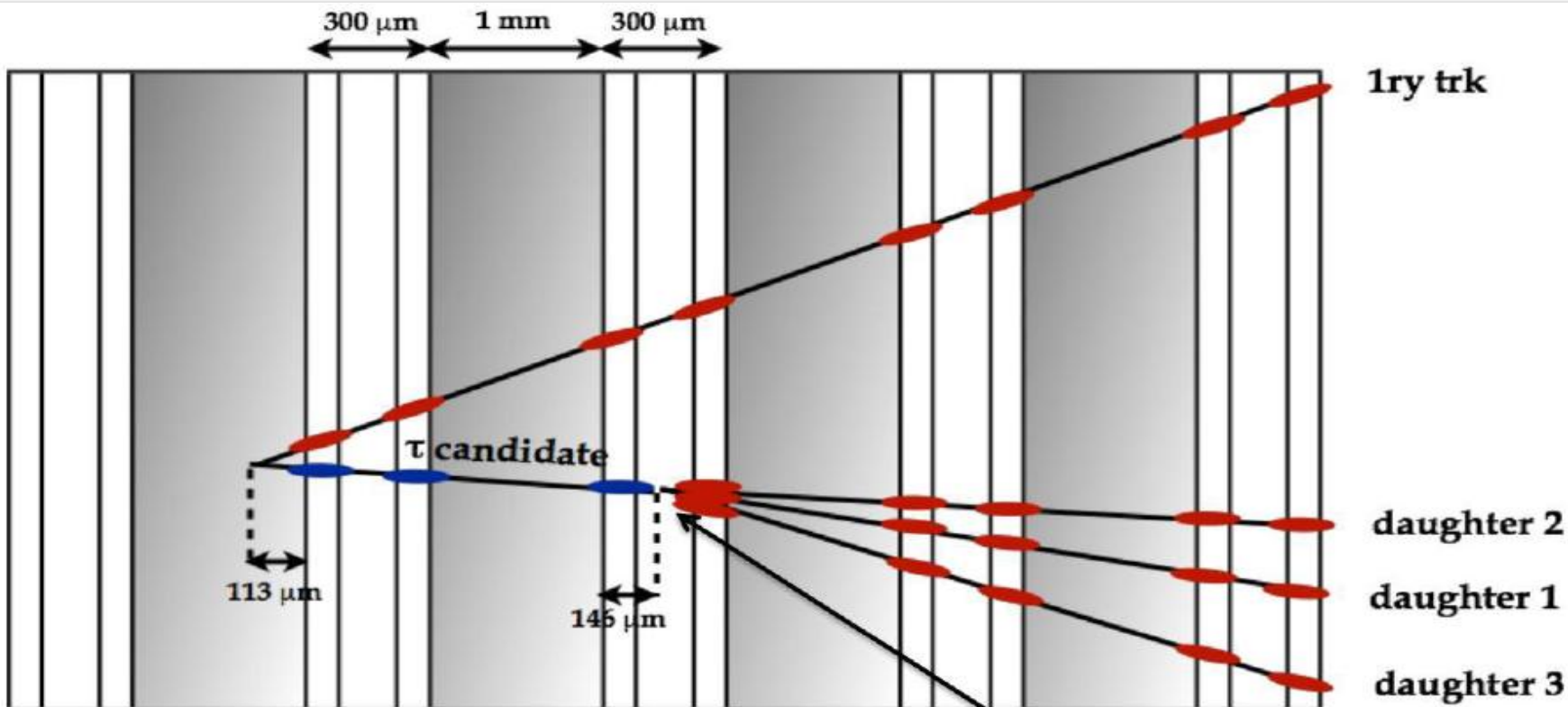
- Expected number of ν_τ events 0.54 ± 013 (syst)
- Probability that this event due to background fluctuation 4.5%
- Significance of observation 2.01σ
- 20 charm decays observed
- expectation from MC 16.0 ± 2.9

decay
 $\tau^- \rightarrow h^-(n\pi^0)\nu_\tau$

ν_τ interaction point

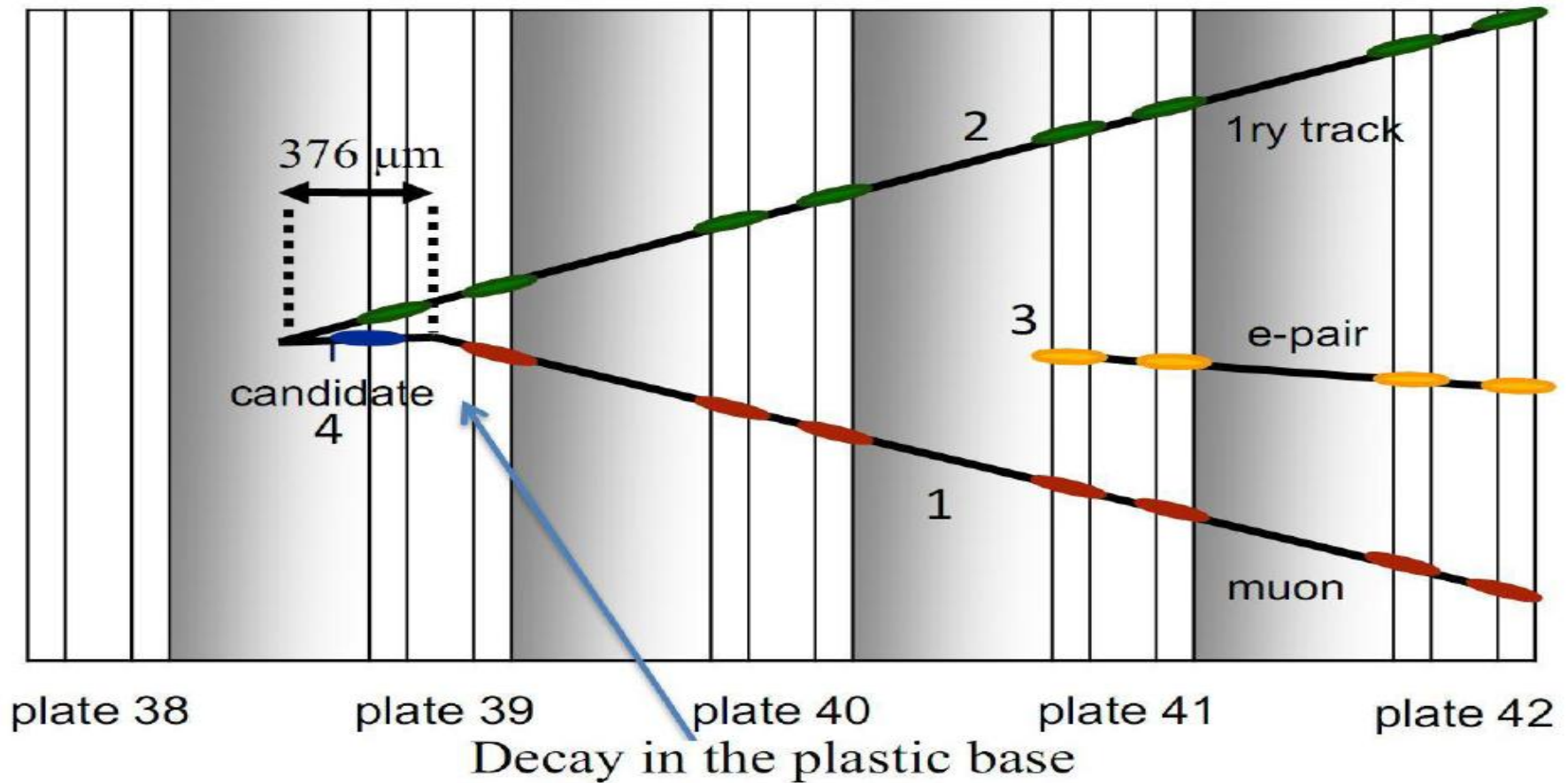


OPERA: второй кандидат в канале $\tau \rightarrow 3h$



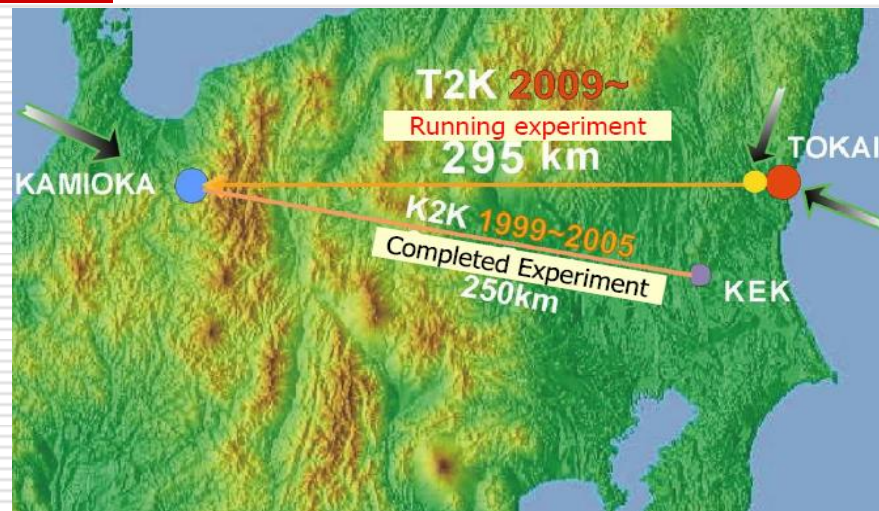
Decay point
In Plastic Base
No Nuclear fragment
Flight length 1.54mm

OPERA: третий кандидат в канале $\tau \rightarrow \mu$



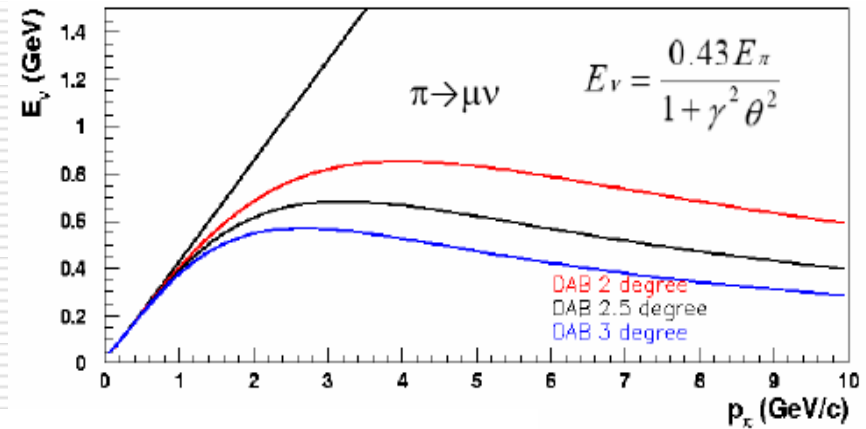
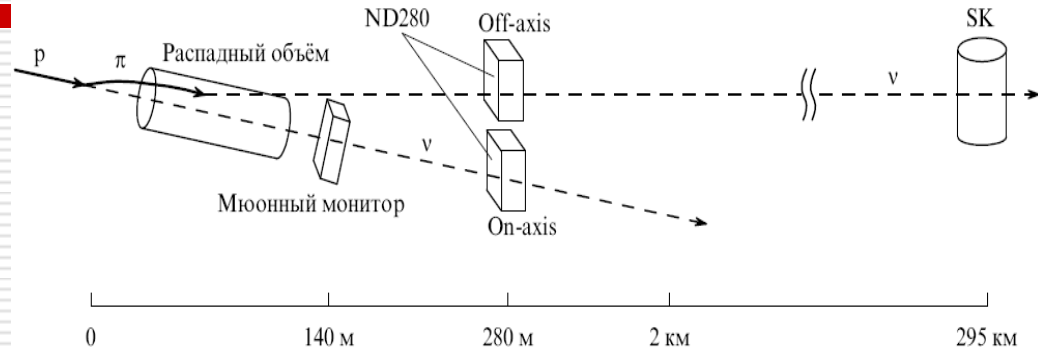
"Off-axis"- эксперимент T2K (Tokai to Kamioka)

- 30 ГэВ протонный синхротрон J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex);
- Комплекс ближних детекторов на расстоянии 280 м от мишени;
- Дальний детектор – SuperKamiokande на расстоянии 295 км от мишени



"Off-axis"- эксперимент T2K

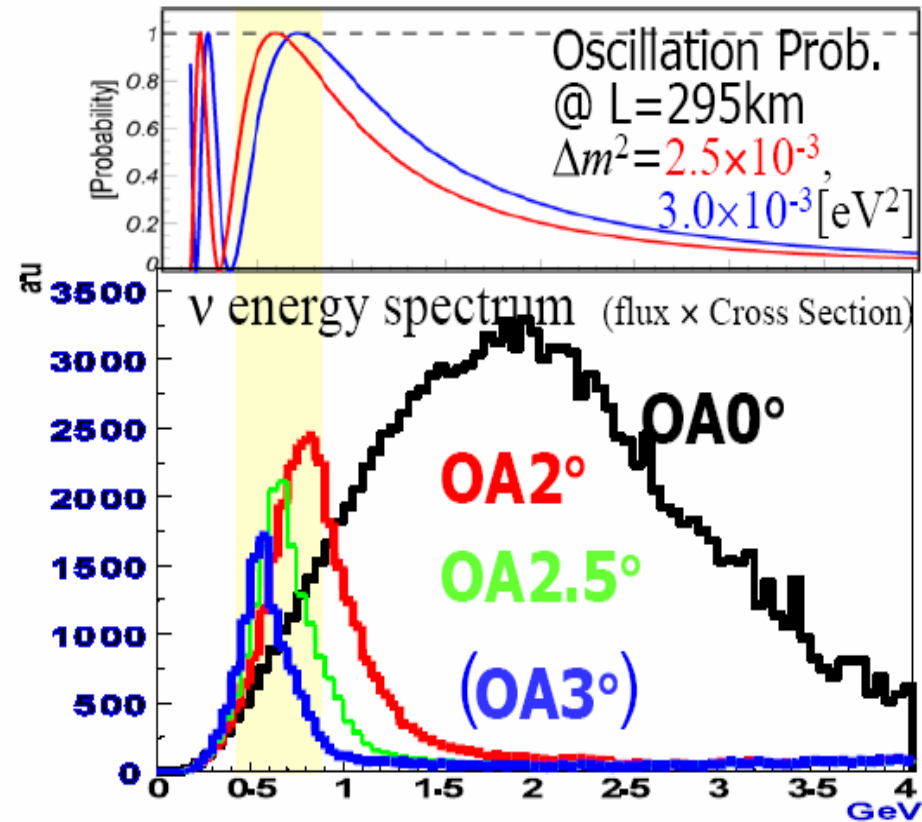
- **Концепция постановки эксперимента, заключается в размещении детекторов не на оси пучка, где интенсивность максимальна, а на некотором расстоянии от его оси.**
- **В этом случае интенсивность пучка невелика, но спектр нейтрино становится моноэнергичным.**
- **Это следует из кинематики распадов пионов.**
- **С увеличением угла Θ , связь между энергиями нейтрино и пиона выглаживается. Начиная с некоторых углов, распады пионов любых энергий приводят к образованию нейтрино с одной и той же энергией.**



$$E_\nu \simeq \left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_\pi^2}\right) \frac{E_\pi}{1 + \gamma^2 \theta^2}$$

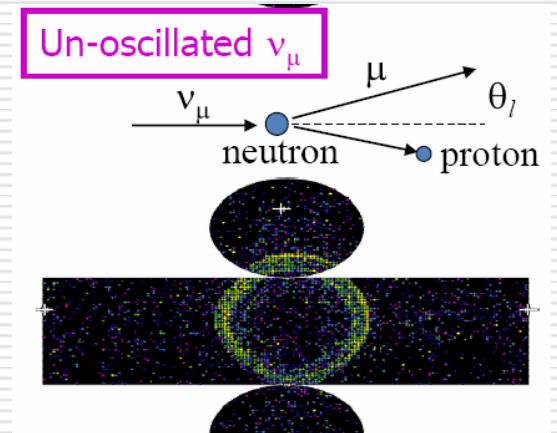
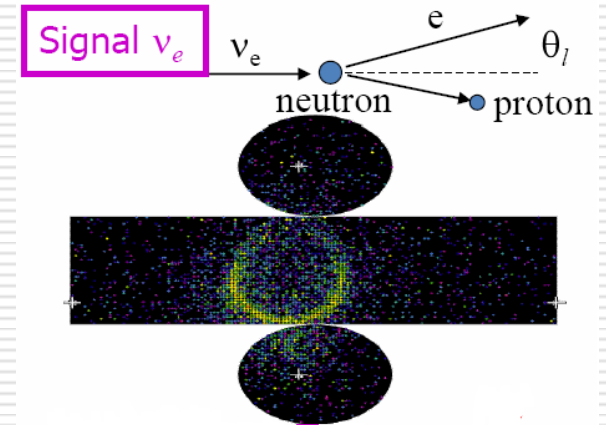
"Off-axis"- эксперимент T2K

- Используется квазимонохроматичный пучок нейтрино под углом 2,5 град.
- Максимальная интенсивность пучка при энергии 600 МэВ.



"Off-axis"- эксперимент T2K

- Основной процесс при энергиях нейтринного пучка T2K квазиупругие реакции

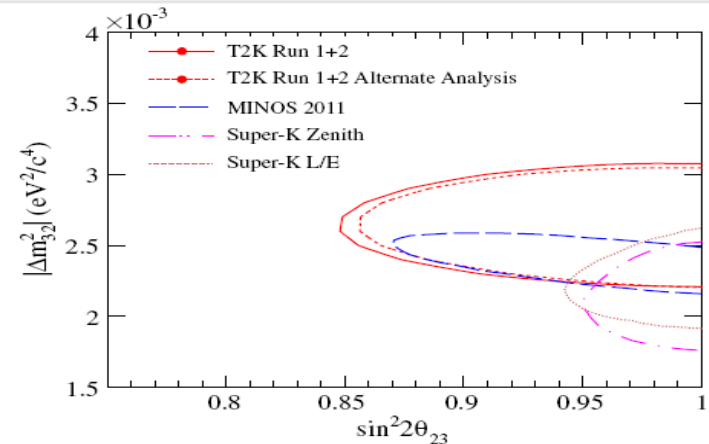
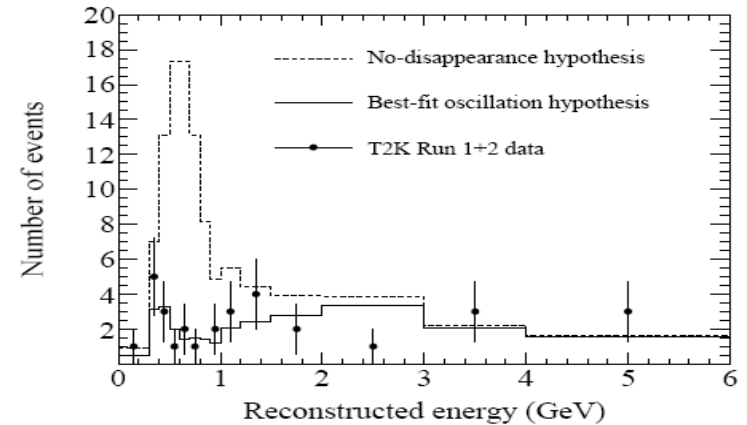


"Off-axis"- эксперимент T2K (muon neutrino disappearance)

Total neutrino beam exposure is 1.43×10^{20} POT

Observe 31 fully-contained single μ -like ring events in Super-Kamiokande, compared with an expectation of 104 ± 14 events without neutrino oscillations.

The best-fit is $\sin^2(2\theta_{23}) = 0.98$, $|\Delta m_{23}^2| = 2.65 \times 10^{-3}$



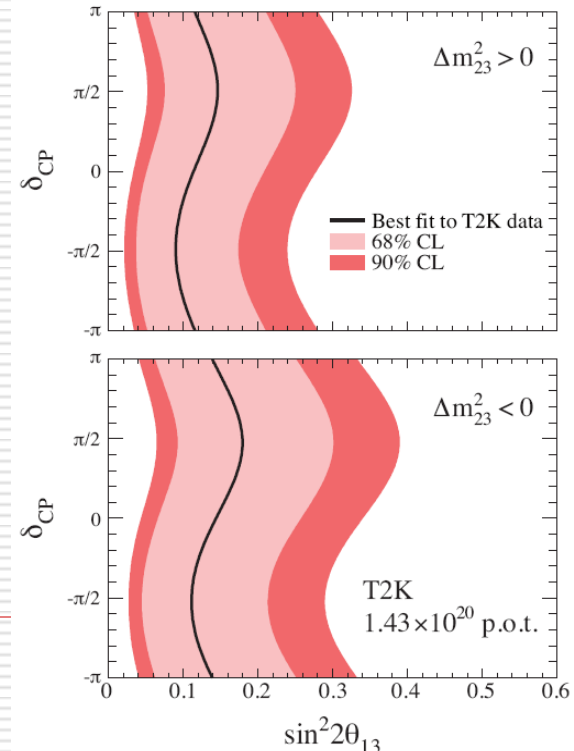
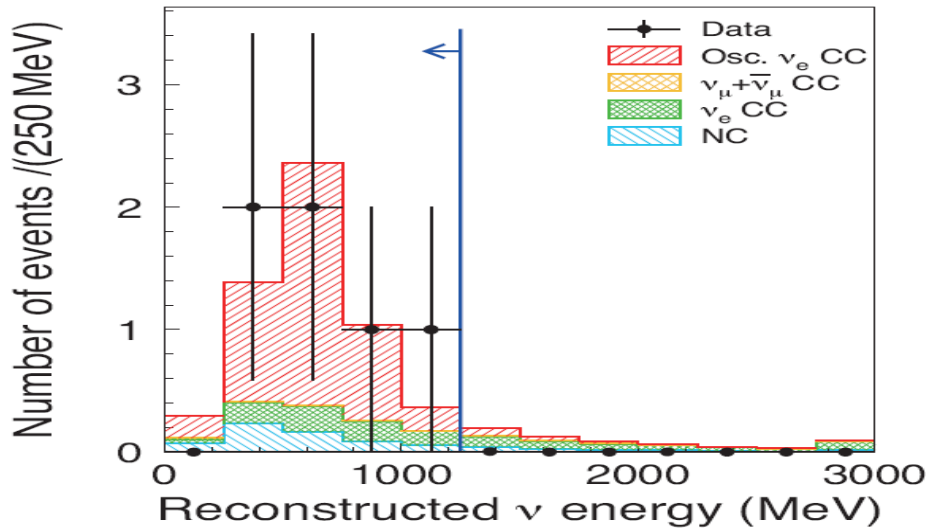
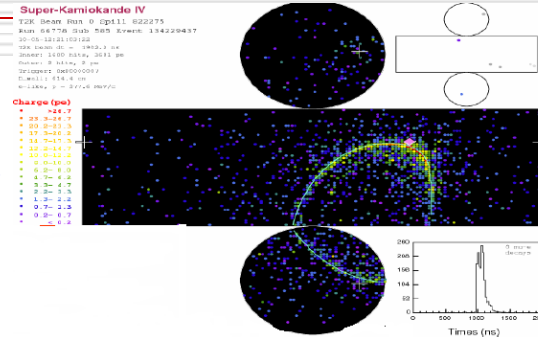
"Off-axis"- эксперимент T2K (electron neutrino appearance)

Total neutrino beam exposure is 1.43×10^{20} POT

Six events pass all selection criteria at the SK for reaction $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$.

In a three-flavor oscillation scenario with $|\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2(2\theta_{23}) = 1$ and $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$,

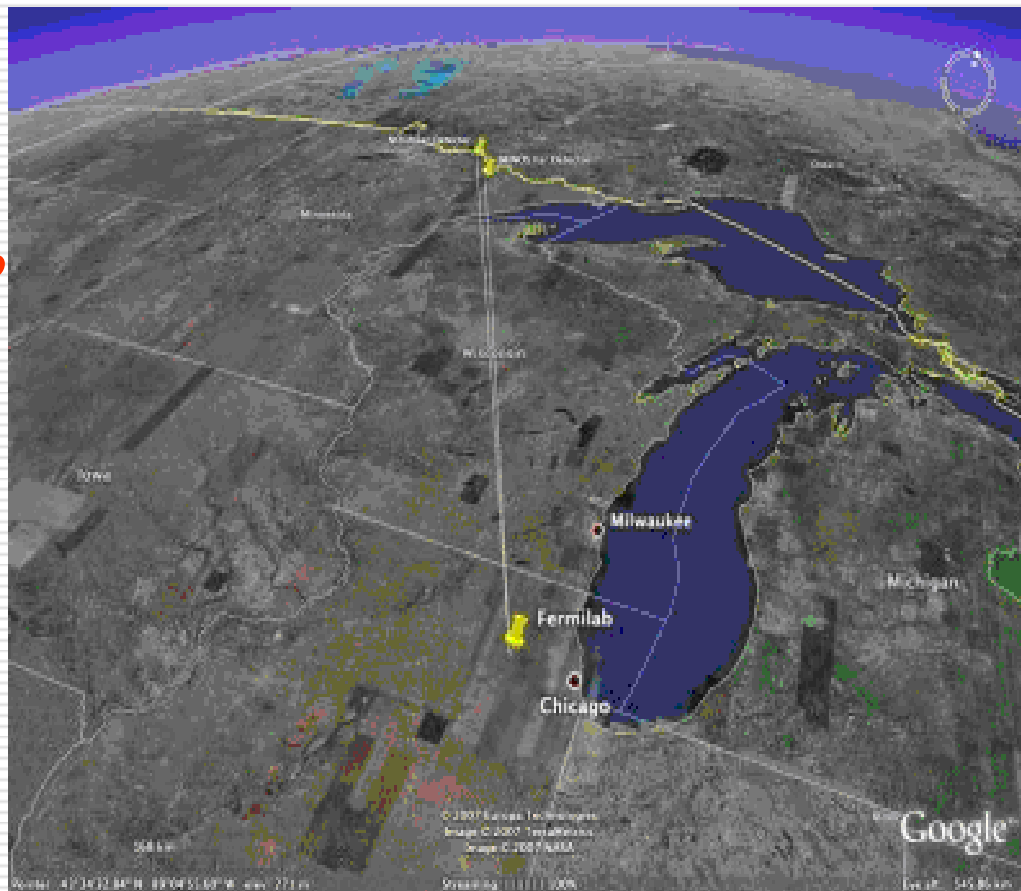
The expected number of such events is 1.5 ± 0.3 .
 At 90% C.L. the data are consistent with $0.03 (0.04) < \sin^2(2\theta_{13}) < 0.28 (0.34)$ for $\delta_{CP} = 0$ and Normal (inverted) hierarchy.





Off-axis''- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)

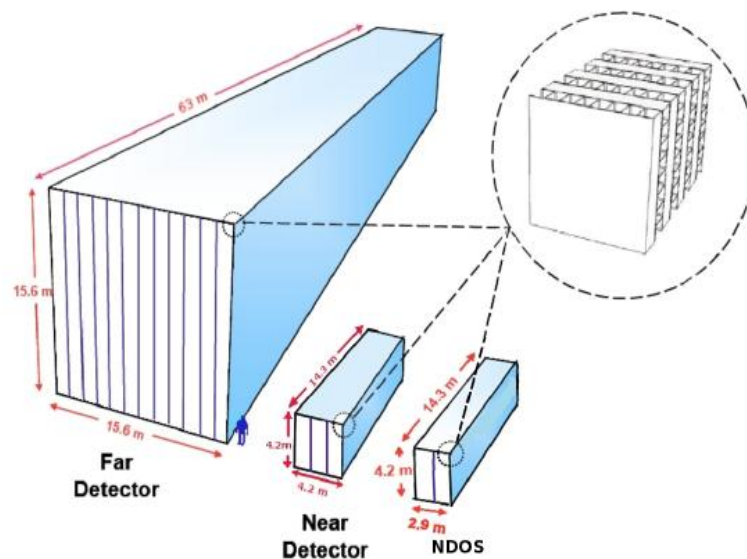
- Нацелен на изучение осцилляций $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$.
- Fermilab \rightarrow Ash River, Minnesota, 810 км.
- Детектор с полезной массой 14 кт будет размещен на выходе пучка NuMI на поверхность Земли, после дальнего калориметра MINOS.





"Off-axis"- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)

- Надежную регистрацию появления ν_e должна обеспечить структура калориметра NOvA, в котором **толщина структурного элемента в продольном направлении составляет всего 0,15 радиационных длин** (что в 10 раз меньше, чем в MINOS).
- В калориметре NOvA 80% полезной массы составляет активный детектор – жидкий сцинтиллятор на основе минерального масла, залитый в модули сотовой конструкции. На полной длине детектора 64 м размещено 928 взаимно-ортогональных плоскостей детектора размером 15,7 × 15,7 м² собранных из сот.

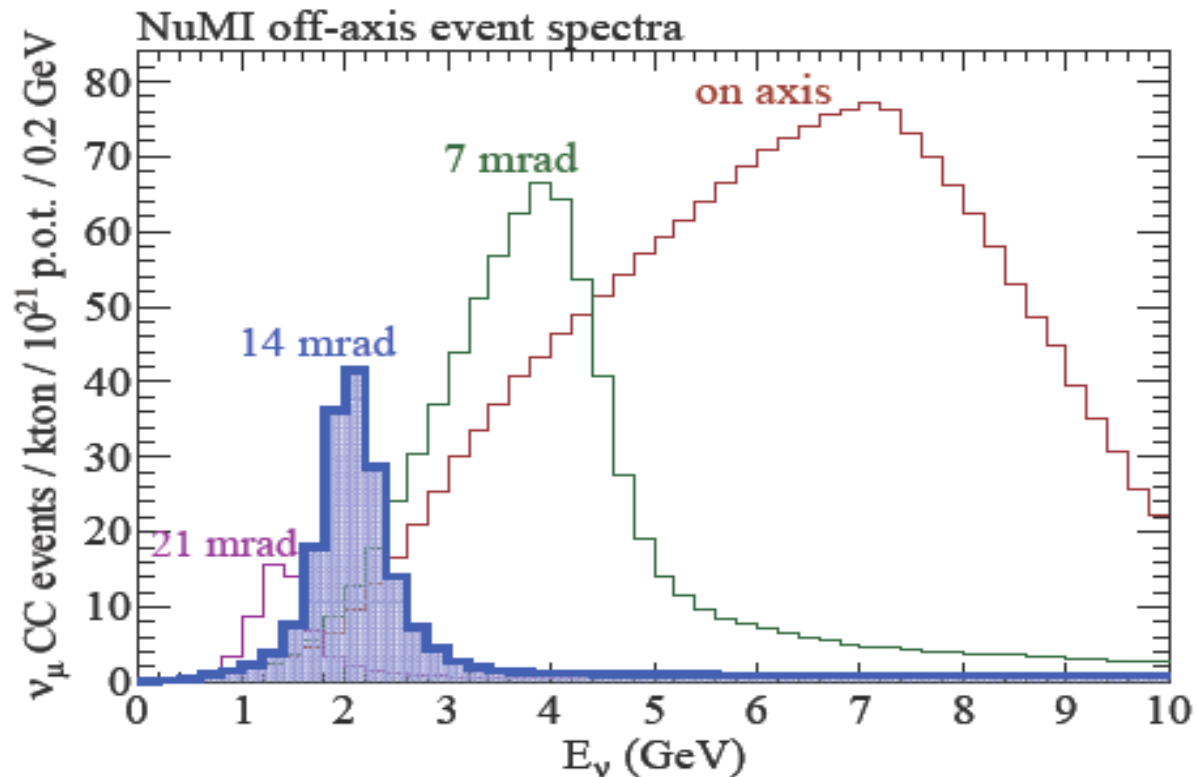


Предложение о проведении эксперимента NOvA было разработано в 2002 г.



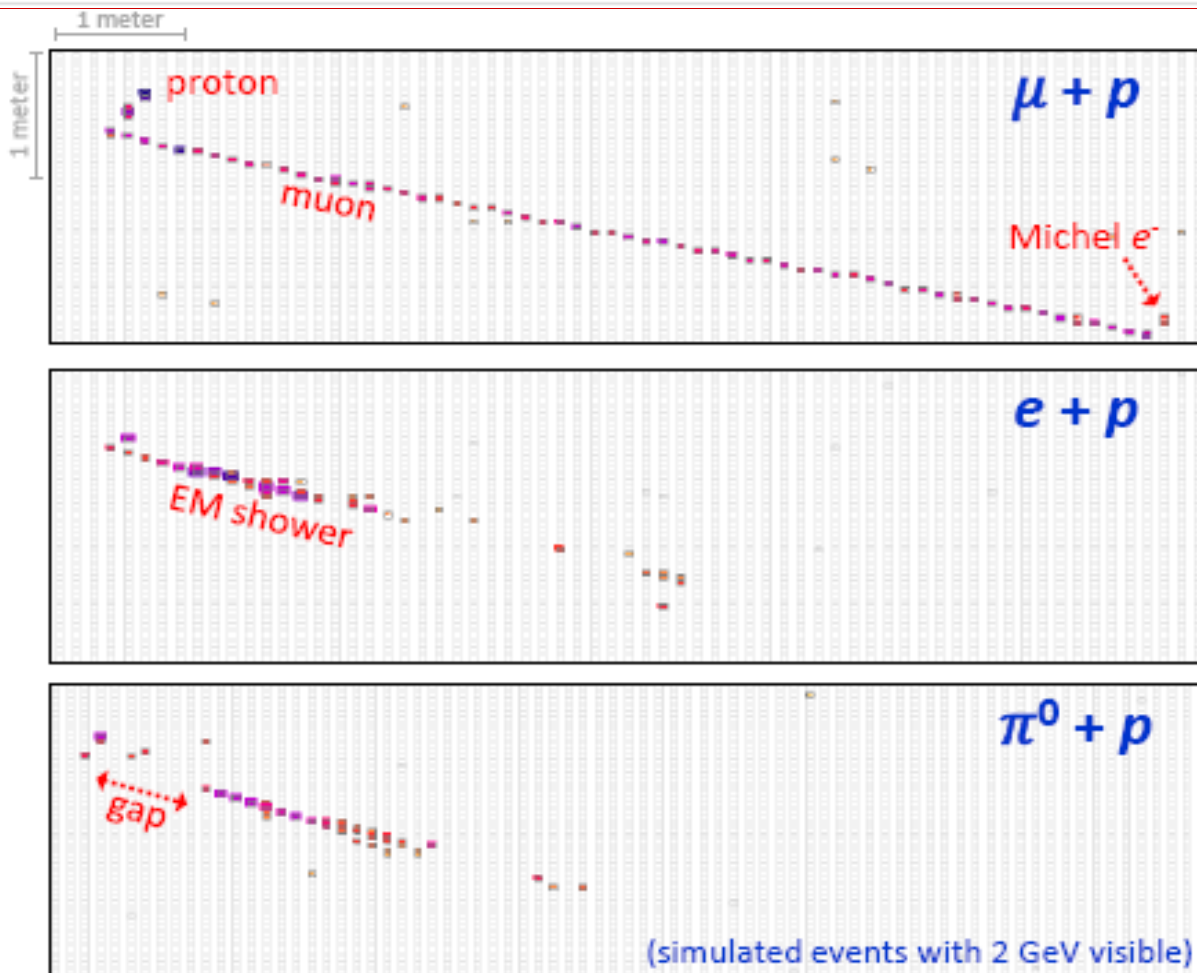
"Off-axis"- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)

- Создание моноэнергичного нейтринных пучков путем перемещения детектора с оси пучка на расстояния 5, 10 и 20 км (соответствующие углы 7, 14 и 21 мрад)





"Off-axis"- эксперимент NOvA (Nomi Off-axis Appearance experiment)

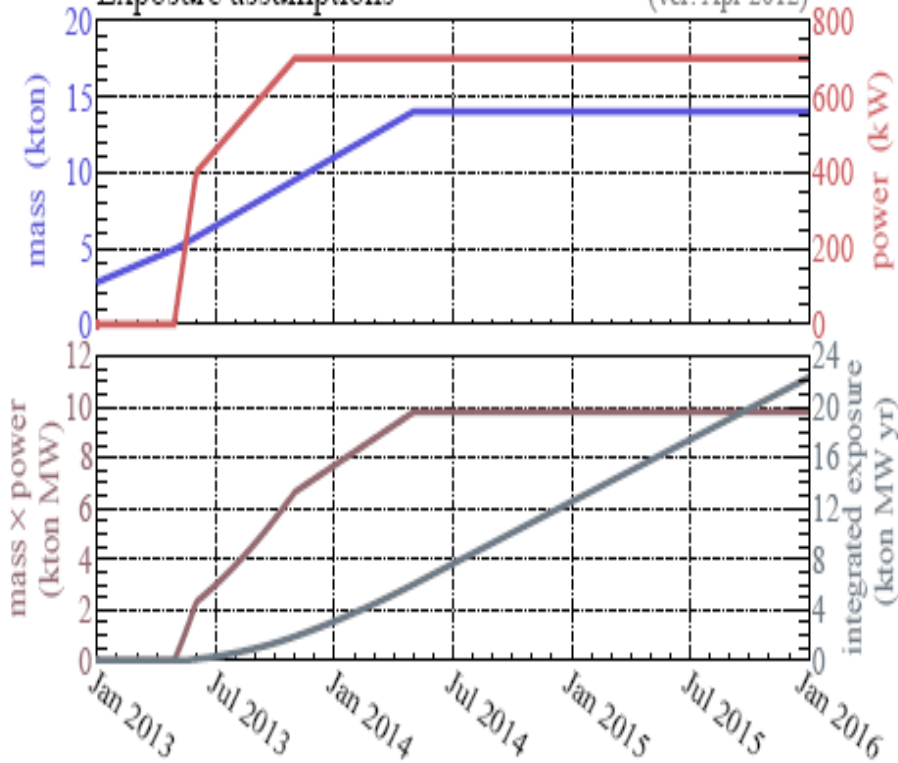




"Off-axis"- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)

NOvA early reach
Exposure assumptions

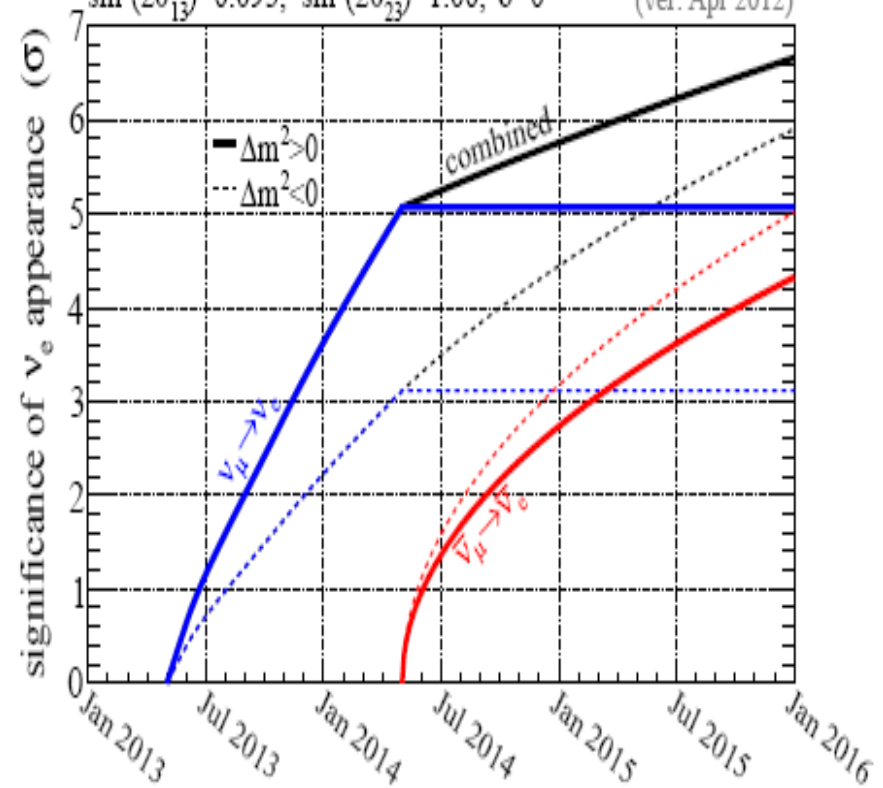
(ver: Apr 2012)



NOvA early reach

$\sin^2(2\theta_{13})=0.095$, $\sin^2(2\theta_{23})=1.00$, $\delta=0$

(ver: Apr 2012)

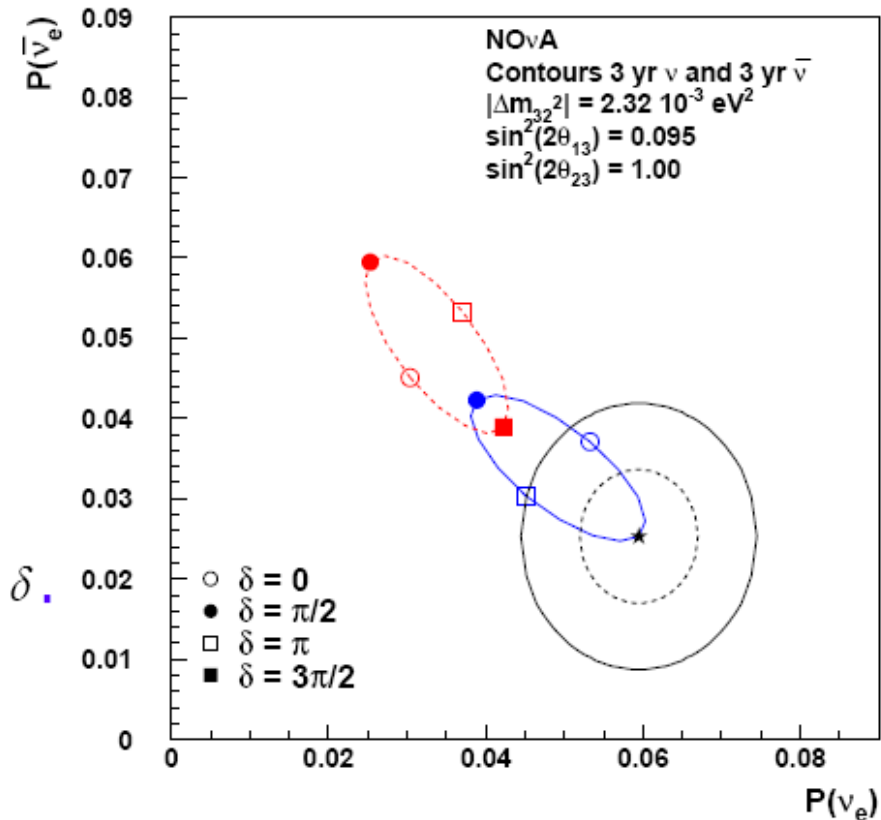




“Off-axis”- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)

В эксперименте на появление в моноэнергетических пучках ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ определяются две вероятности: $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ и $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ при энергии 2 ГэВ.

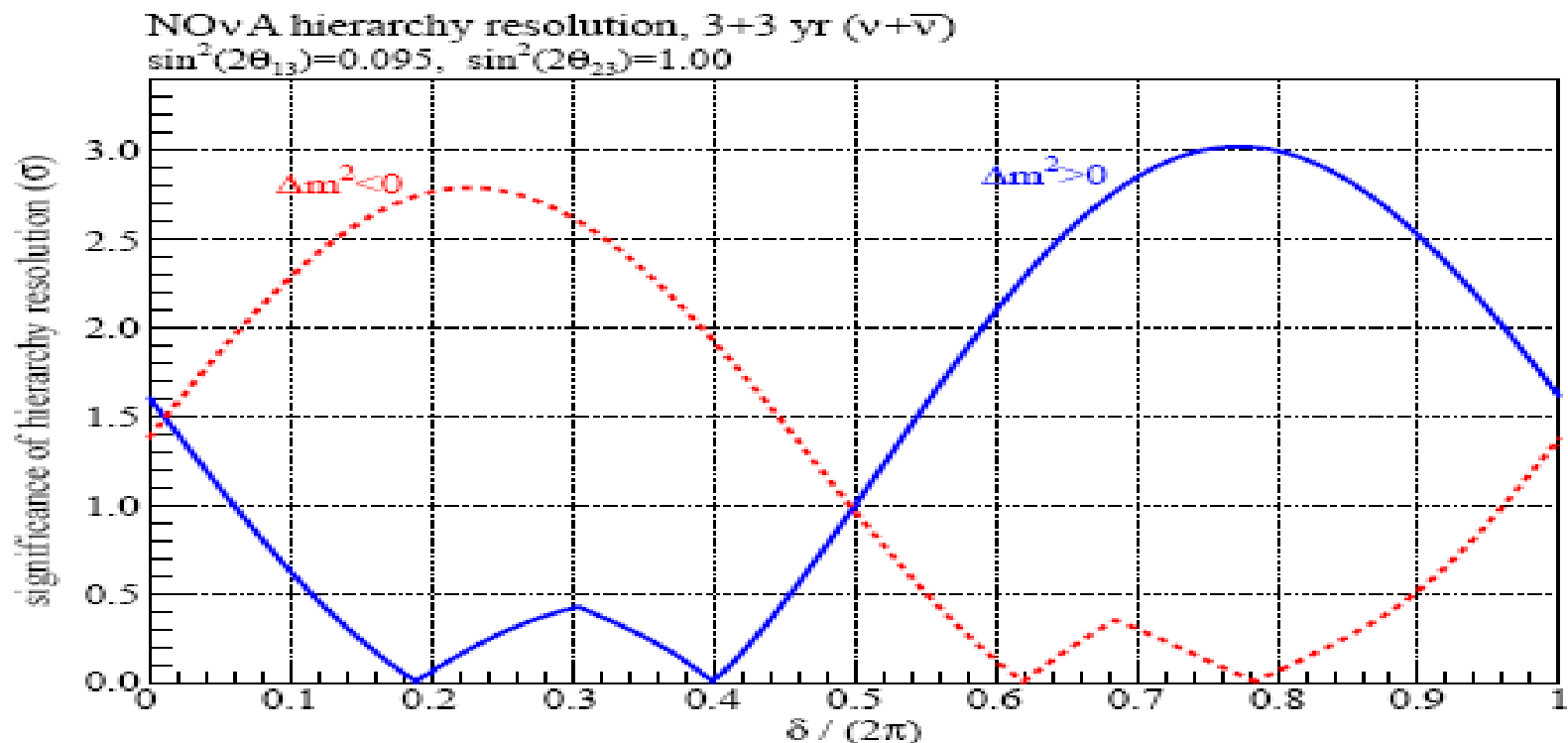
Эти вероятности зависят от массовой иерархии CP нарушающей фазы δ .



Возможные величины вероятностей появления для набора углов смешивания.



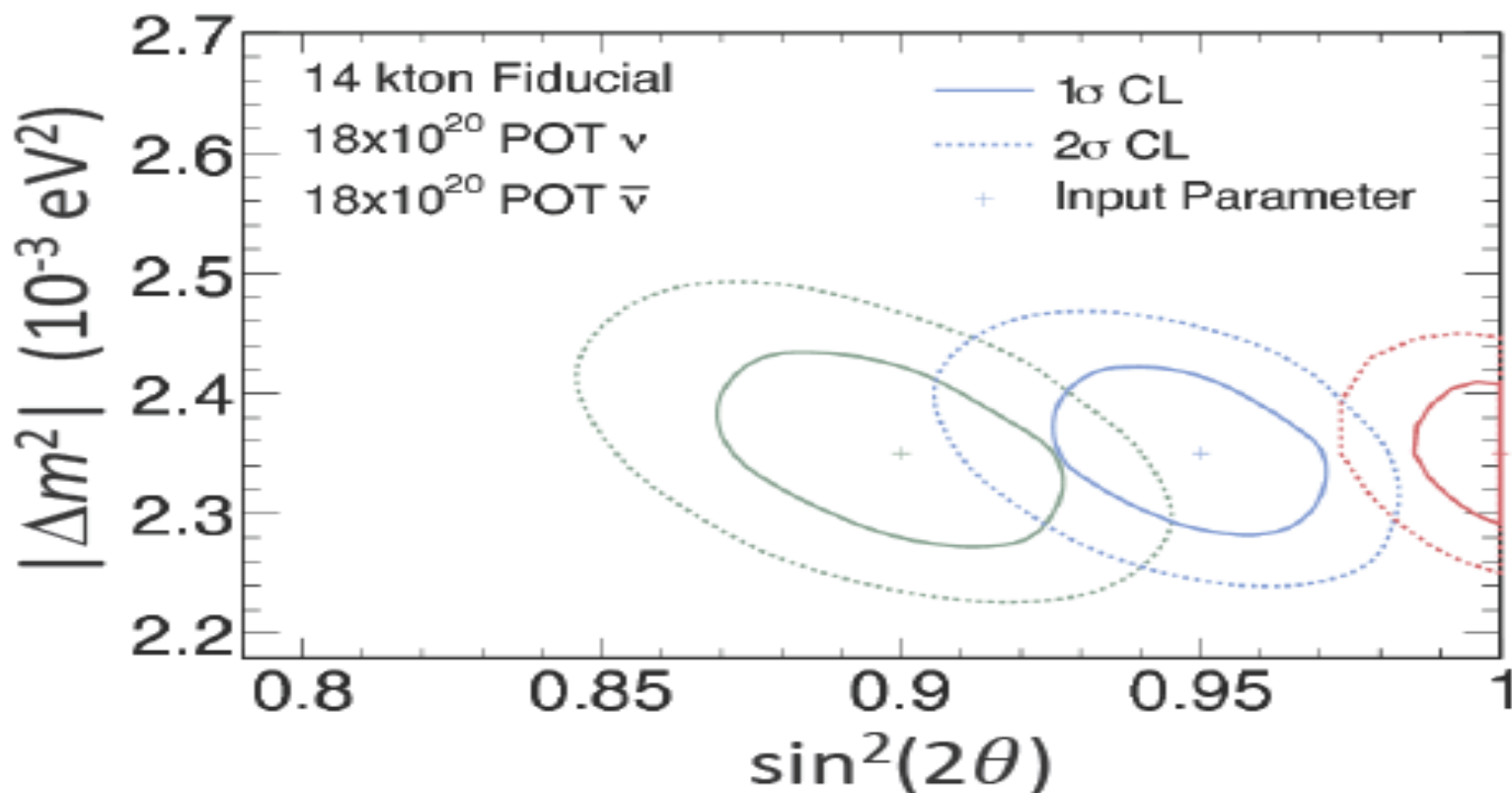
"Off-axis"- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)



Уровень достоверности в определении
массовой иерархии в зависимости от CP-фазы



"Off-axis"- эксперимент NOvA (Numi Off-axis Appearance experiment)



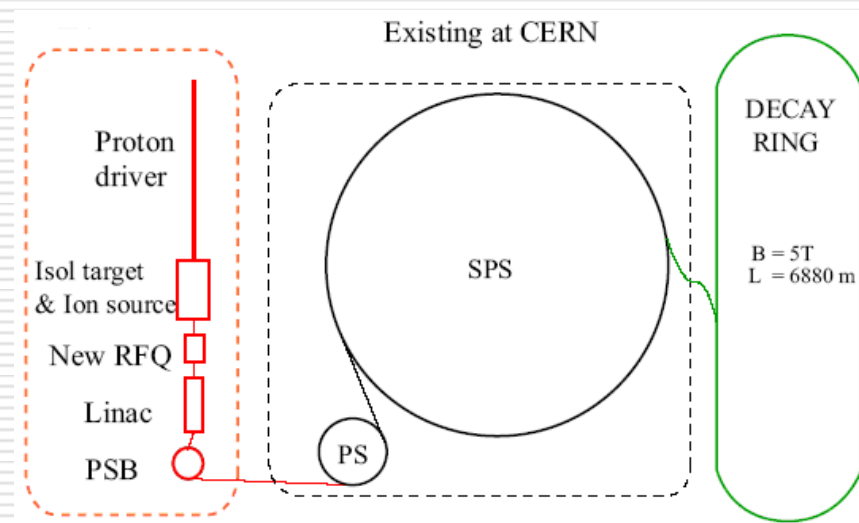
NOvA 1σ and 2σ sensitivity to $\sin^2(2\theta_{23})$ and $|\Delta m^2_{\text{atm}}|$ after a 3+3 year ($\nu+\bar{\nu}$) run.

Супер-пучки нейтрино от ускорителей

- **Нейтринный супер-пучок создается с использованием стандартной схемы формирования ускорительного пучка ν_μ нейтрино от распадов π и K-мезонов. Особенностью супер-пучка является его очень высокая интенсивность, так как пучок формируется на основе сверх-интенсивного ускорителя протонов, мощность которого достигает 5 МВт. Такие супер-пучки могут быть оптимизированы как на проведение экспериментов по наблюдению ν_μ -выбывания, так и регистрацию каналов ν_e или ν_τ появления.**
-

Бета-пучки от распадов ускоренных радиоактивных изотопов

- Чистый источник электронных нейтрино (или антинейтрино) с энергиями, в области от МэВ;
- Его происхождение напрямую связано с радиоактивными распадами ионов, ускоренных в накопительном кольце;
- Выбор изотопов основывается исходя из соотношения между энергией электрона в граничной точке бета-распада и временем жизни изотопа;
- Используют изотопы у которых время жизни составляет ~ 1 сек, а $E_0 \sim 1 - 10$ МэВ.

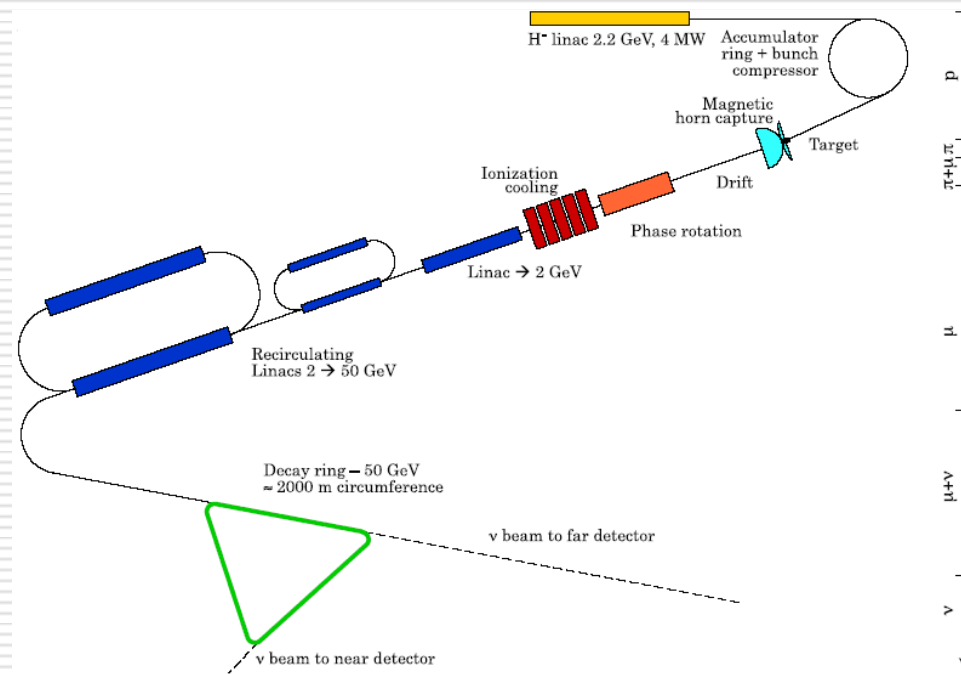


${}^6\text{He}$ ($E_0 = 3506,7$ кэВ), β -распад которого приводит к образованию $\bar{\nu}_e$;

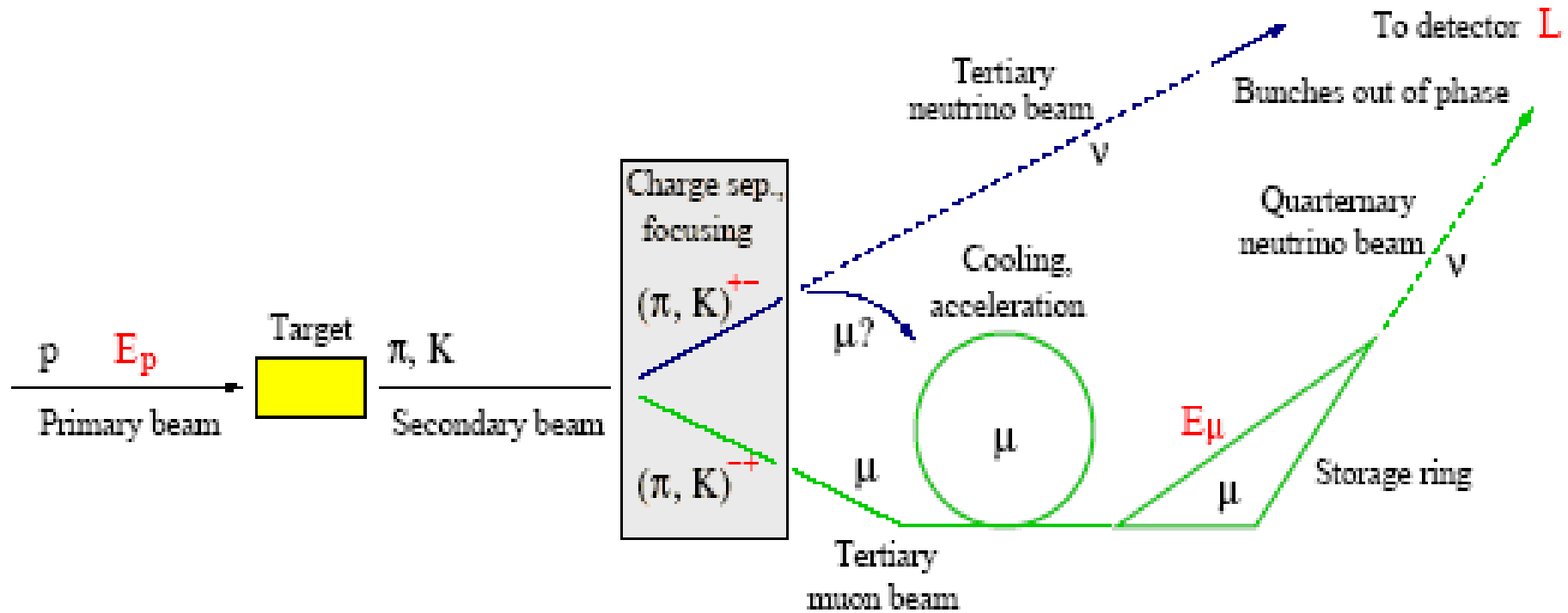
${}^{18}\text{Ne}$ ($E_0 = 3423,7$ кэВ), при распаде которого образуется ν_e .

Мюонные накопительные кольца и нейтринные фабрики

- В идейном плане на ускорителе необходимо создать банчи содержащие $\sim 10^{12}$ мюонов, за время \sim мкс (пока большая часть мюонов не распалась) сжать в $10^5 - 10^6$ раз их фазовое пространство, а затем ускорить до энергий в несколько десятков ГэВ;
- На прямолинейных участках петли, распадающиеся мюоны производят высокоинтенсивные нейтринные пучки.



Комбинация нейтринной фабрики с нейтринным супер-пучком



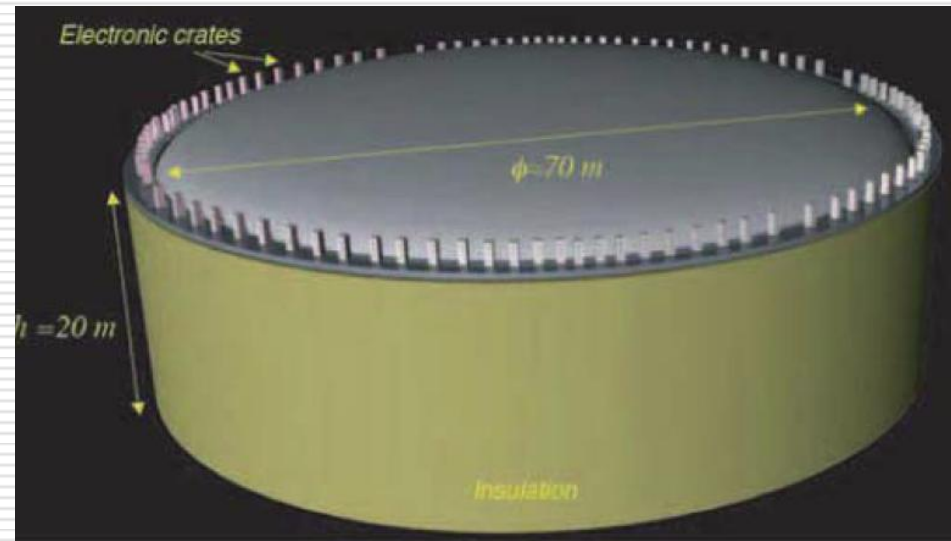
Оба пучка направляются на один и тот же детектор, расположенный на одном и том же расстоянии от нейтринной фабрики и нейтринного супер-пучка.

LAGUNA (Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics)

Location	Distance from CERN [km]	1st osc max [GeV]
Fréjus (France)	130	0.26
Canfranc (Spain)	630	1.27
Umbria (Italy)	665	1.34
Sierozsowice (Poland)	950	1.92
Boulby (UK)	1050	2.12
Slanic (Romania)	1570	3.18
Pyhäsalmi (Finland)	2300	4.65

LAGUNA LAr: GLACIER

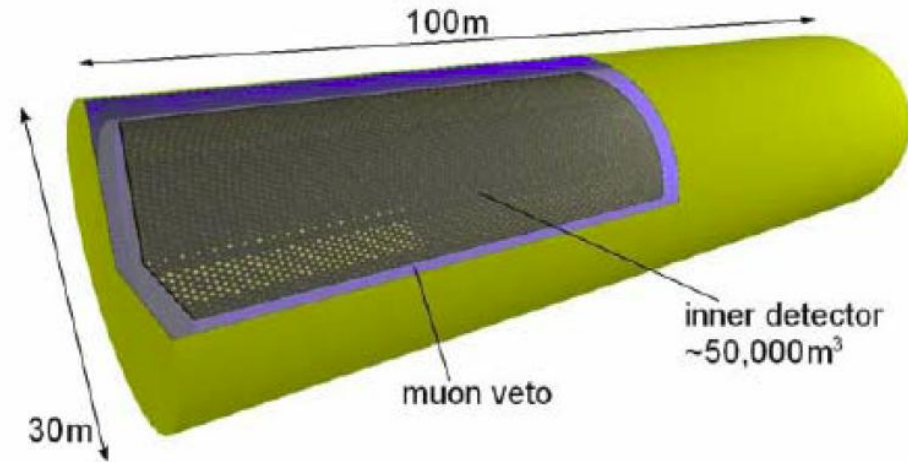
- ❑ **Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment**
- ❑ **100 кт аргона в жидком и газообразном состояниях;**
- ❑ **Очень высокое энергетическое разрешение;**
- ❑ **Низкий порог (несколько МэВ для электронов и несколько десятков МэВ для протонов)**



$$E_{\nu} = 0.1 - 10 \text{ ГэВ}$$

LAGUNA LSc: LENA

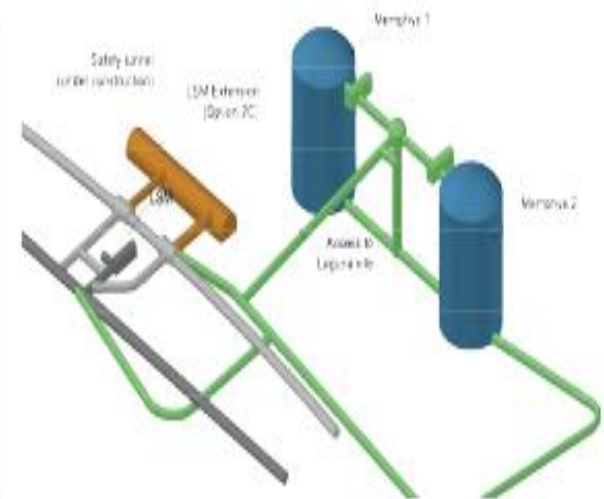
- **Low Energy Neutrino Astronomy**
- **масса жидкого сцинтиллятора составляет 50 кт;**
- **12 000 ФЭУ с диаметром 20", площадь покрытия фотокатодами составляет 30%;**
- **высокое энергетическое разрешение, низкий порог, большой световыход.**



$$E_{\nu} = 0.5 - 7 \text{ ГэВ}$$

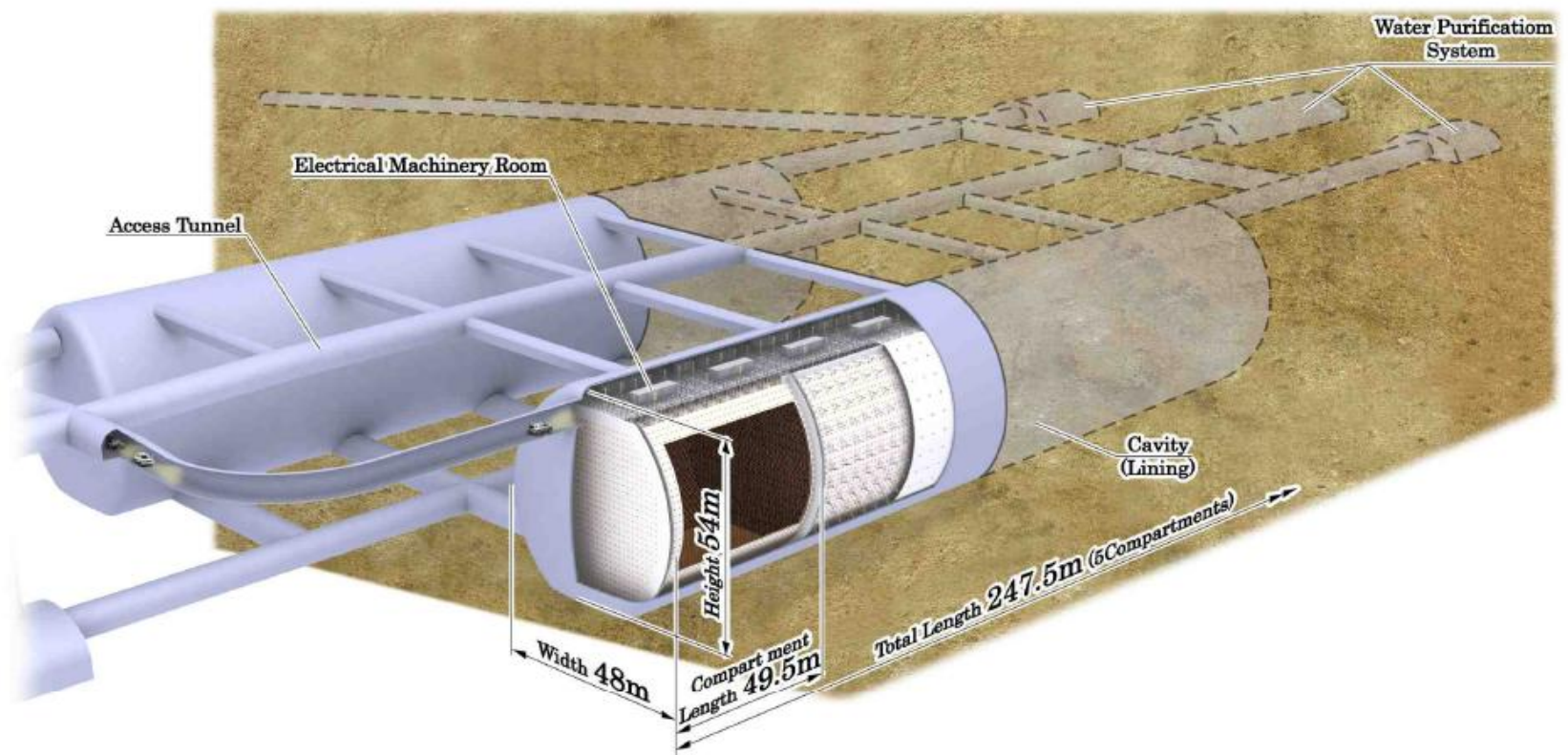
LAGUNA WC: MEMPHYS

- **MEgaton Mass PHYSics**
- **Водный черенковский детектор с массой 440 кт;**
- **Наиболее простая технология;**
- **Неоптимален для высокоэнергичных нейтринных взаимодействий и разделения электронов от нейтральных пионов**



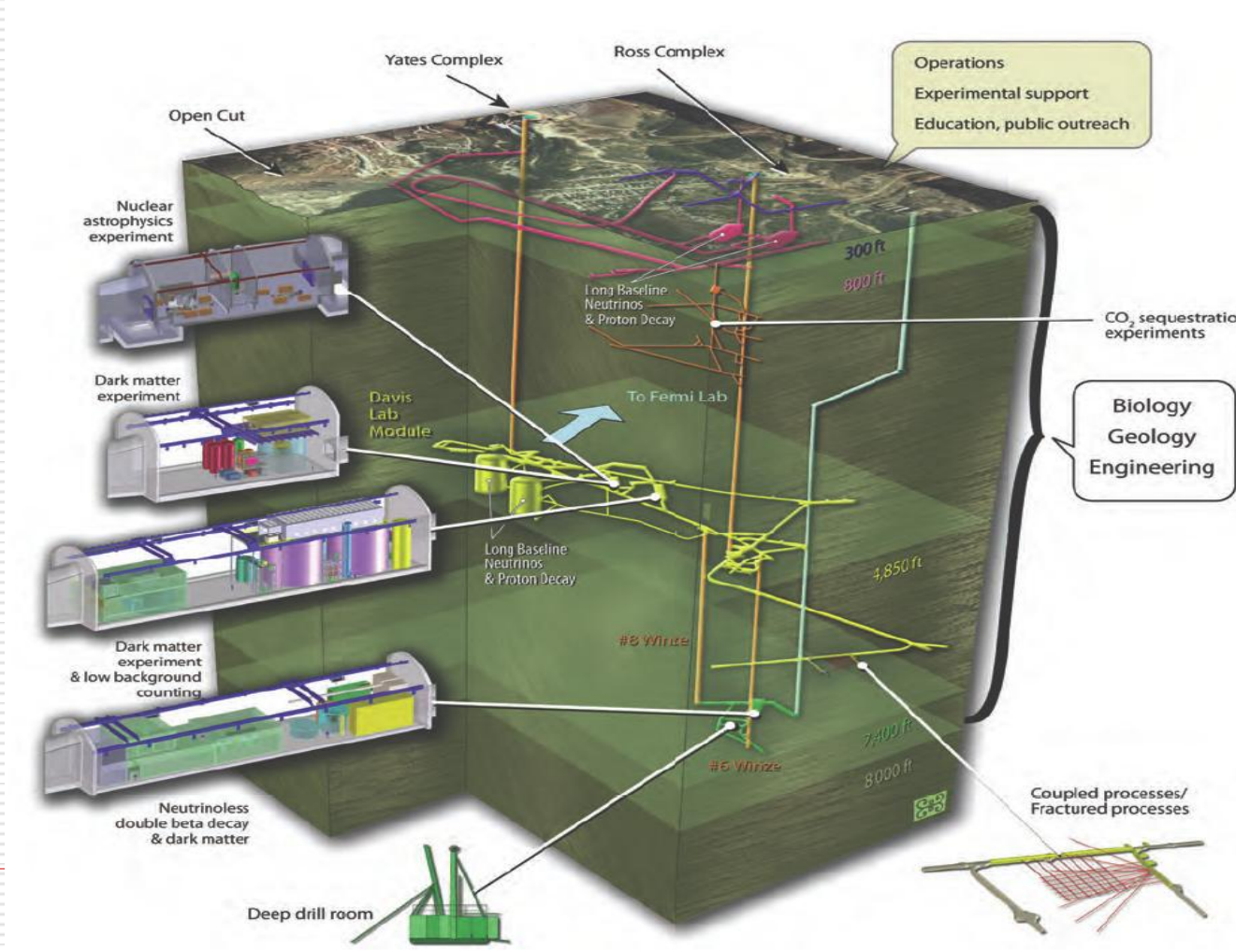
$$E_{\nu} = 0.5 - 10 \text{ ГэВ}$$

Hyper-Kamiokande



**Водный черенковский детектор с
массой 0.99 Мт – в 20 раз больше SK**

DUSEL (Deep Underground Science and Engineering Laboratory)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Прецизионное измерение параметров осцилляций;
 2. Определение угла смешивания θ_{13} ;
 3. Определение массовой иерархии;
 4. Определение CP-нарушения в лептонном секторе;
 5. Новая физика, стерильные нейтрино.
-