

Осцилляции нейтрино: прорыв в новую физику

Ю.Г. Куденко

ИЯИ РАН

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
16 декабря 2011



План

Нейтрино в Стандартной модели

Осцилляции: - основные понятия
- экспериментальные результаты

Эксперимент T2K

Измерение угла смешивания θ_{13}

Массы и смешивание нейтрино

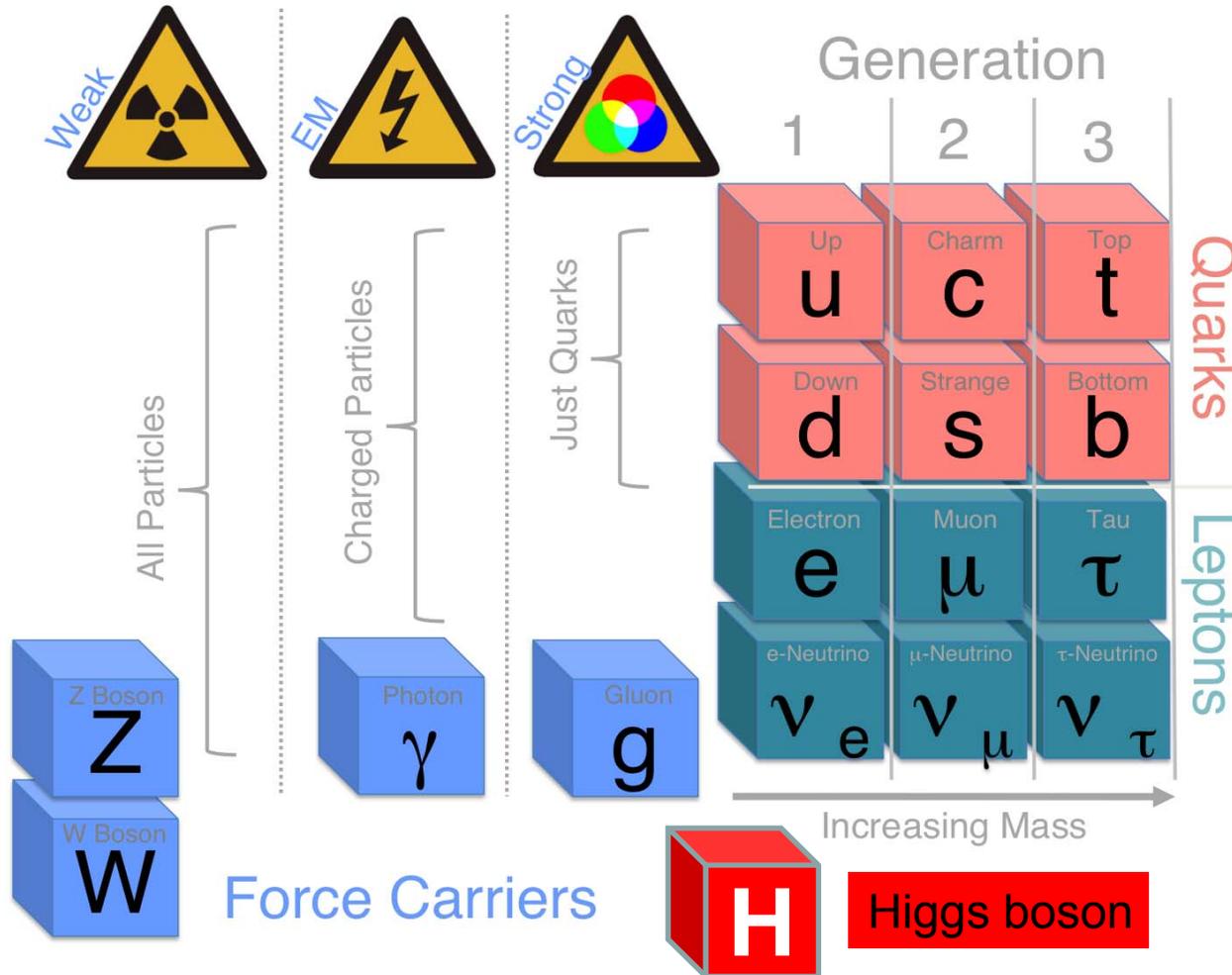
Нейтрино и Барионная асимметрия Вселенной

Нейтринные парадоксы



Элементарные частицы

Стандартная модель

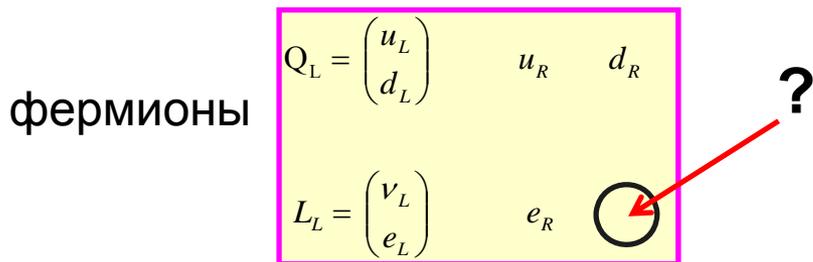




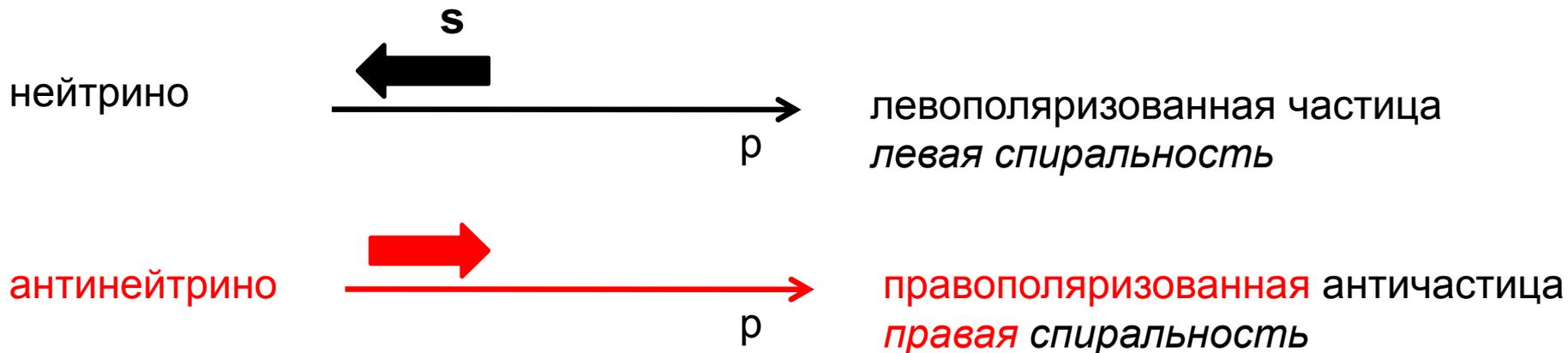
Лептоны

Спин лептонов: $\mathbf{s} = 1/2$

Спиральность – проекция спина на направление импульса частицы



	L_e	L_μ	L_τ
ν_e, e^-	+1	0	0
ν_μ, μ^-	0	+1	0
ν_τ, τ^-	0	0	+1



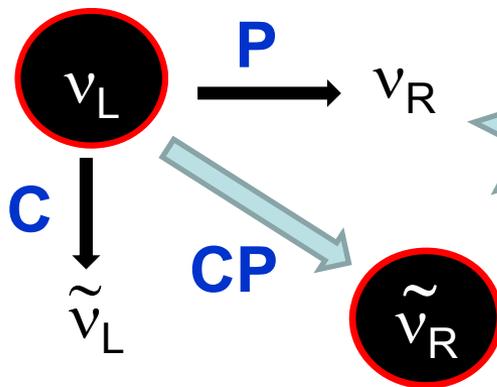
Только левополяризованные нейтрино и правополяризованные антинейтрино участвуют в слабом взаимодействии



Дискретные симметрии

зарядовое сопряжение	C	частица \leftrightarrow античастица
пространственная инверсия	P	$x, y, z \leftrightarrow -x, -y, -z$
обращение времени	T	$t \leftrightarrow -t$

электромагнитное и сильное взаимодействия инвариантны относительно **C, P, T** преобразований



слабое взаимодействие
лептонный сектор:
 $P \neq 1$ $C \neq 1$ $T = 1$ $CP = 1$ $CPT = 1$

кварковый сектор:
слабое нарушение CP в распадах
каонов и В-мезонов

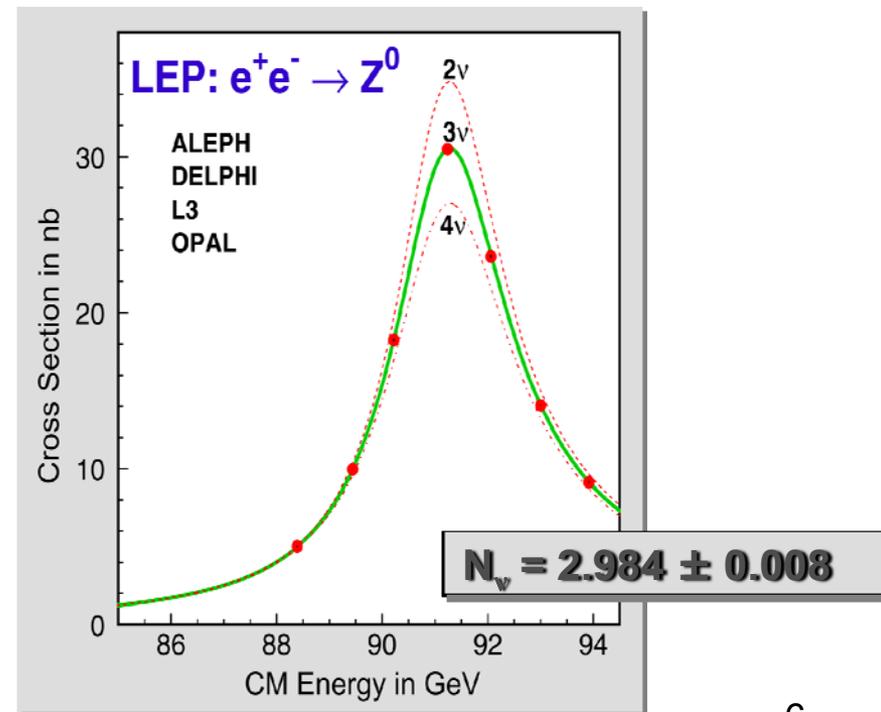


Стандартная Модель

Три типа (аромата) нейтрино: ν_e ν_μ ν_τ
Нейтрино – партнеры заряженного лептона: $W \rightarrow e\nu_e$ $W \rightarrow \mu\nu_\mu$ $W \rightarrow \tau\nu_\tau$
Нейтрино - безмассовые частицы
Сохраняются лептонные числа L_e L_μ L_τ
Невозможны переходы (осцилляции) одного типа нейтрино в другой
CP в лептонном секторе сохраняется

Эксперименты на LEP (ЦЕРН):
из ширины распада Z бозона

три типа легких активных нейтрино





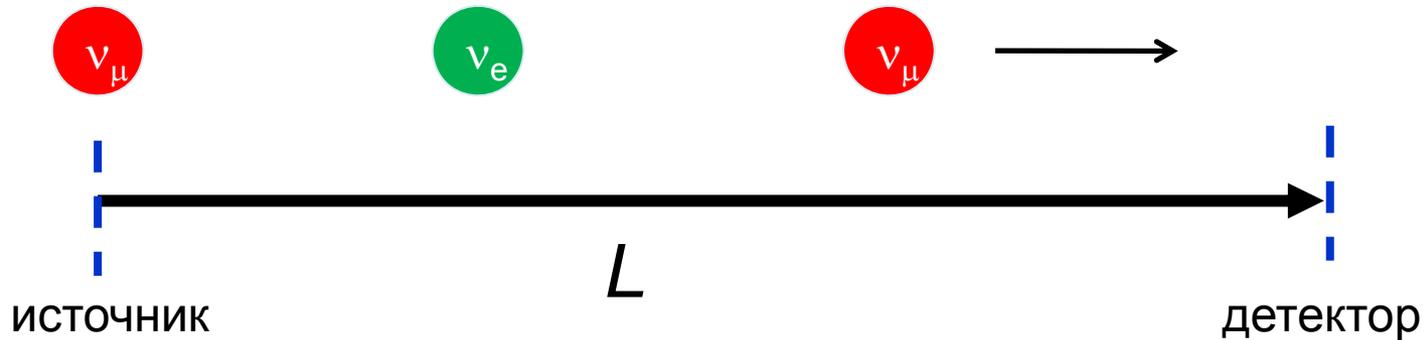
Гипотеза нейтринных осцилляций

Б.М. Понтекорво: идея массивных нейтрино и осцилляций – 1957 г.



Бруно Понтекорво

- один тип нейтрино переходит в другой
- необходима ненулевая масса и смешивание
- вероятность осцилляции зависит от **массы** нейтрино, энергии нейтрино E_ν и расстояния L



Собственные состояния слабого взаимодействия $\left\{ \begin{array}{l} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \right\} = U \left\{ \begin{array}{l} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{array} \right\}$ массовые состояния $\left\{ \begin{array}{l} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{array} \right\}$

Собственные (активные) состояния не совпадают с массовыми состояниями



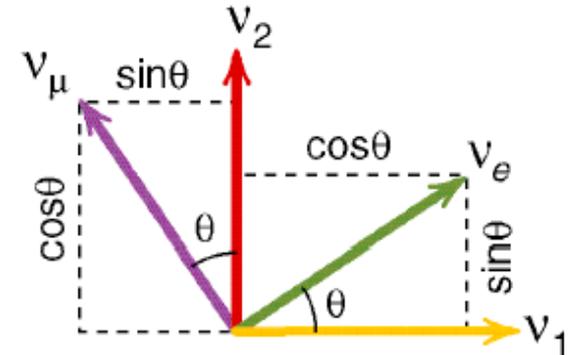
Смешивание двух типов нейтрино

Для простоты 2 типа нейтрино

Слабые (активные) состояния: ν_e ν_μ

Массовые состояния: $\nu_1(m_1)$ $\nu_2(m_2)$

Тогда матрица смешивания определяется одним параметром θ



Слабые (активные) и массовые состояния связаны через простое двумерное вращение

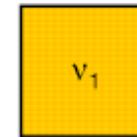
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$\nu_e = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle$$

$$\nu_\mu = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle$$

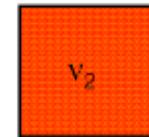
Mass states

First



ν_1

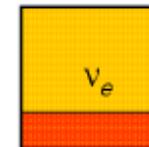
Second



ν_2

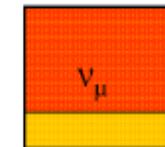
Weak states

First



ν_e

Second

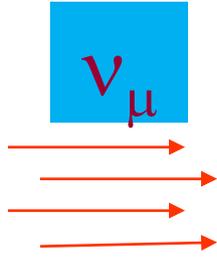
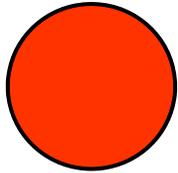


ν_μ

Осцилляции нейтрино



ИСТОЧНИК

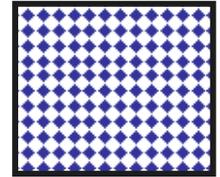


распространение

L



детектор



активные состояния
рождены в слабых
взаимодействиях

$$x_0 = 0, t = 0$$

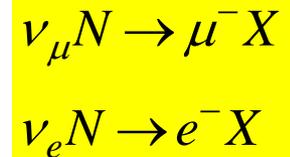
$$| \nu(x_0) \rangle = | \nu_\mu \rangle \\ = \cos \theta | \nu_2 \rangle - \sin \theta | \nu_1 \rangle$$

массовые состояния
распространяются с
разными скоростями

$$x, t$$

$$| \nu_\mu \rangle_t = \cos \theta \exp(ip_2 x) \exp(-iE_2 t) | \nu_2 \rangle \\ - \sin \theta \exp(ip_1 x) \exp(-iE_1 t) | \nu_1 \rangle$$

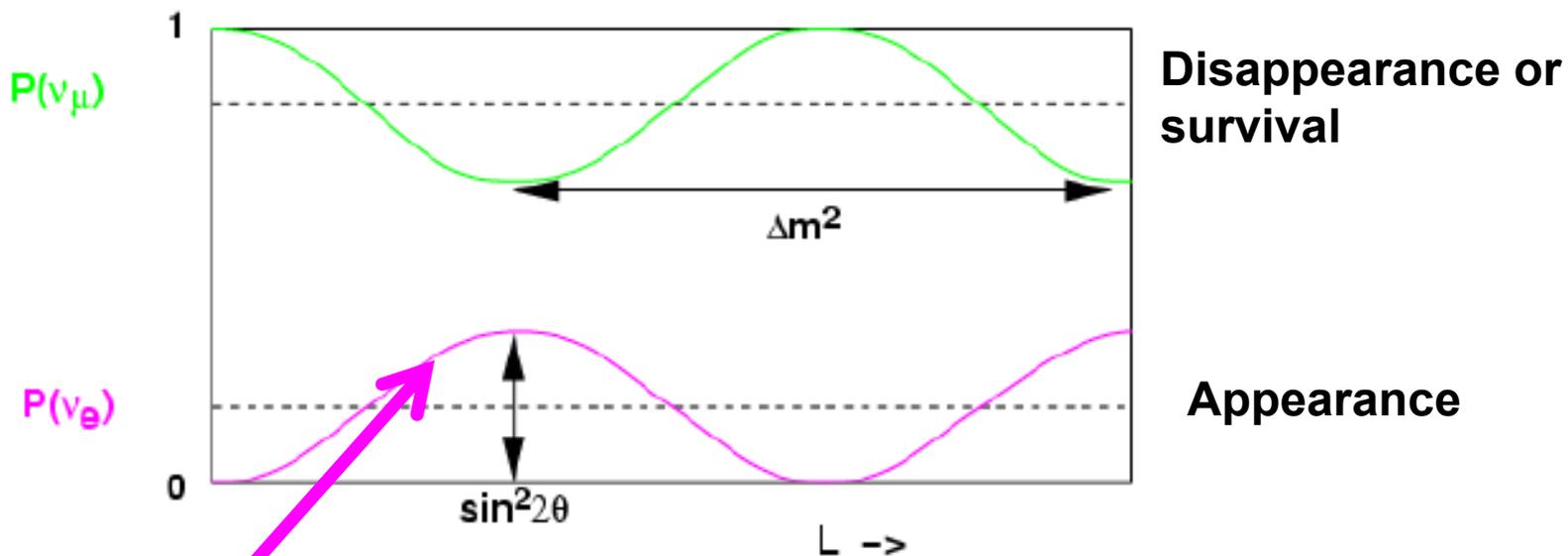
детектирование
через слабые
взаимодействия



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = | \langle \nu_e | \nu(t) \rangle |^2$$



Осцилляционные эксперименты: Appearance and Disappearance



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) L (\text{km}) / E_\nu (\text{GeV})]$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) L (\text{km}) / E_\nu (\text{GeV})]$$



Осцилляционная индустрия

Homestake, США



1970

Солнечные нейтрино

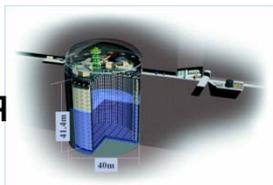
Sage, Россия



Реакторы ГТЭП

Атмосферные нейтрино

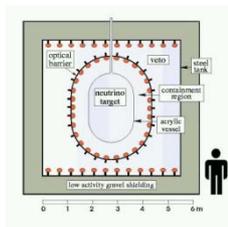
SK, Япония



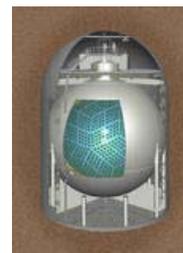
MACRO, Италия
Soudan2, США

Реакторные нейтрино

CHOOZ, Франция



KamLand, Япония



Ускорительные нейтрино

K2K, Япония



Minos, США



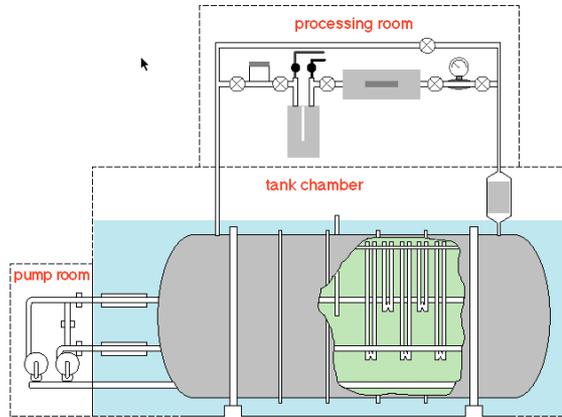
OPERA, Италия



LSND, США
MiniBooNe, США

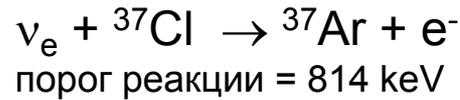


солнечные ν : Homestake

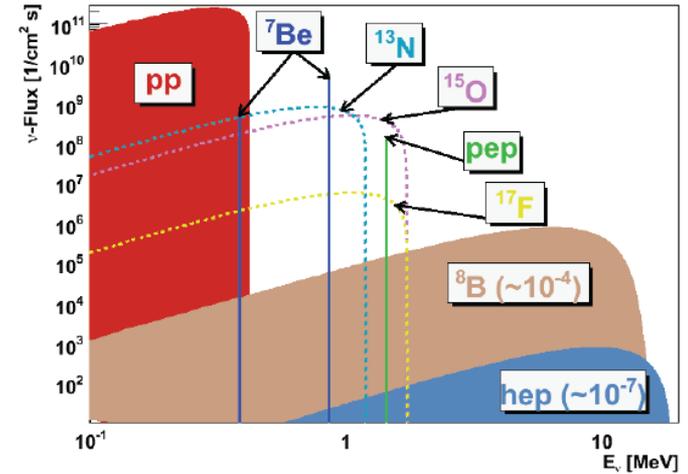


615 t C_2Cl_4

Измерения с 1970



$t_{1/2}({}^{37}\text{Ar}) = 25$ дн
 2.62 keV электроны Ожэ
 детектируются в газовом
 пропорциональном счетчике



Solar ν flux [$10^{10} \text{ cm}^{-2} \times \text{c}^{-1}$]

pp	6.0
${}^7\text{Be}$	0.47
pep	0.014
${}^{13}\text{N}$	0.06
${}^{15}\text{O}$	0.05
${}^8\text{B}$	5.8×10^{-4}
${}^{17}\text{F}$	5.2×10^{-4}

30-year rate: $2.56 \pm 0.16 \pm 0.16$ SNU
 SSM: 8.1 ± 1.3 SNU

$$\text{SNU} = 1 \text{ capture} / (10^{36} \text{ atoms} \times \text{s})$$

$$8.1 \text{ SNU} = 0(\text{pp}) + 0.2(\text{pep}) + 1.2({}^7\text{Be}) + 6.1({}^8\text{B}) + 0.1({}^{13}\text{N}) + 0.3({}^{15}\text{O})$$



SAGE

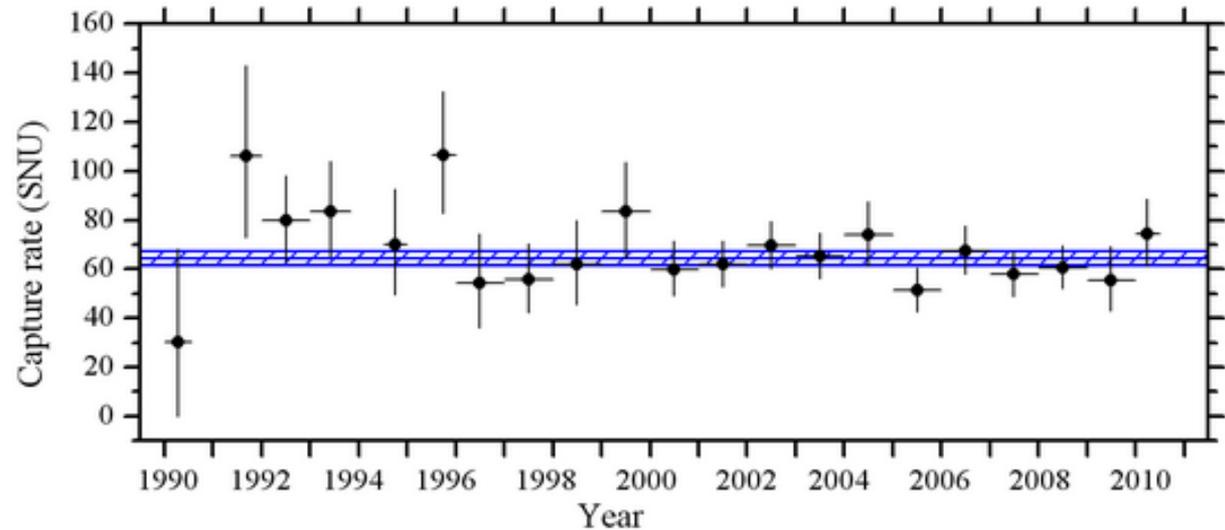


SAGE (Баксан, ИЯИ РАН):
Измерение скорости захвата
в металлическом галлии
 ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^{-}){}^{71}\text{Ge}$ $E_{\text{th}}(\nu)=0.23$ МэВ
Чувствительность к **pp** нейтрино

7 reactors with ~50 t of metallic Ga

${}^{71}\text{Ge}$ извлекался химическим методом и затем детектировался пропорциональным счетчиком

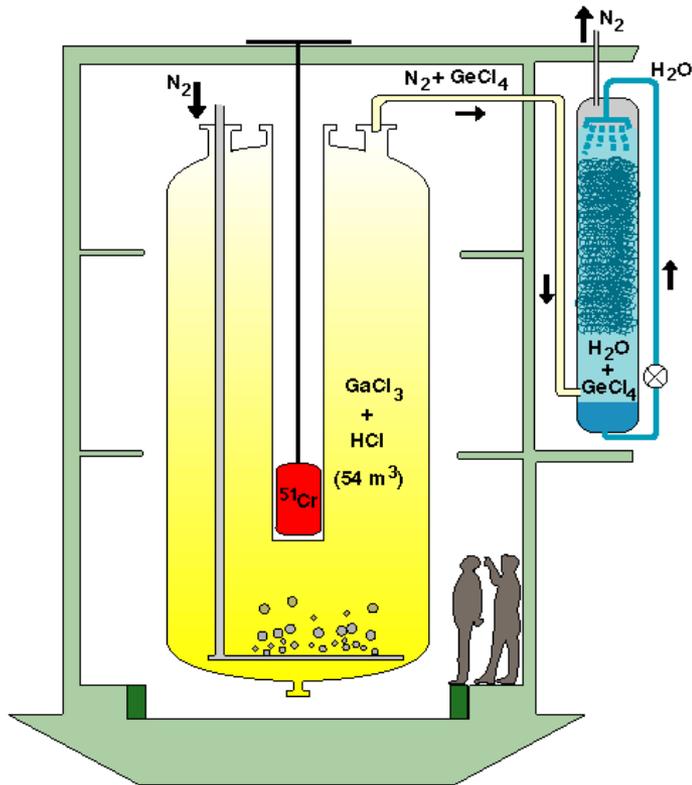
Capture rate
Experiment: 64.6 ± 3.8 SNU
SSM: 128 SNU



1 SNU = 1 interaction/s in target of 10^{36} atoms of the neutrino absorbing isotope.

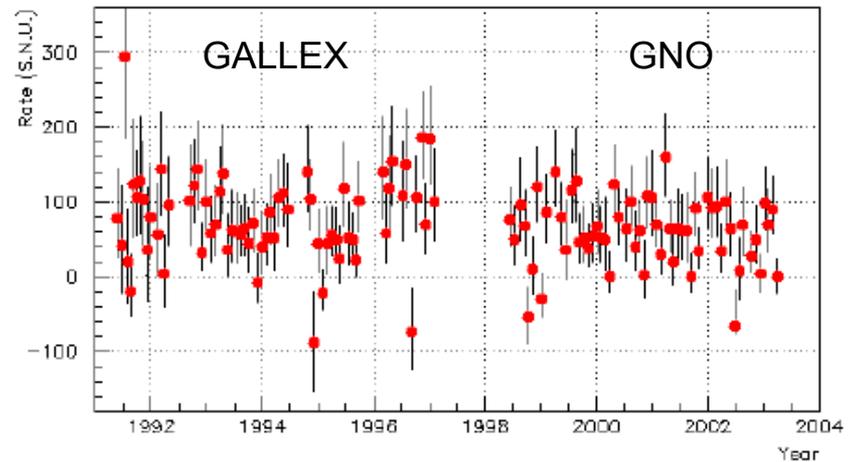


GALLEX/GNO



Gallex/GNO experiment
Gran Sasso Laboratory
 $\text{GaCl}_2 + \text{HCl}$

100 t of liquid $\text{GaCl}_2\text{-HCl}$ \rightarrow 30 t of gallium

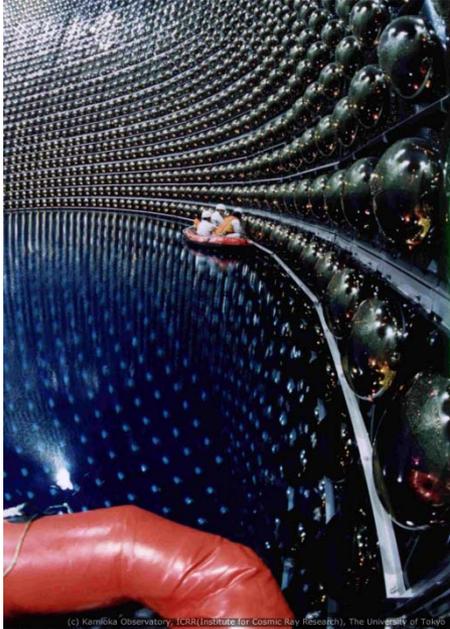


GALLEX + GNO: 69.3 ± 5.5 SNU

GNO Collab, Phys.Lett.B616:174-190,2005



СуперКамиоканде



50 кт водный Черенковский
детектор
 ^8B солнечные нейтрино
с энергией 5 – 20 МэВ



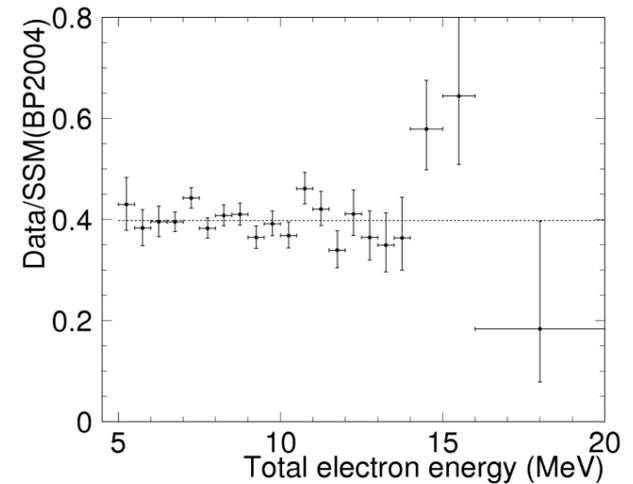
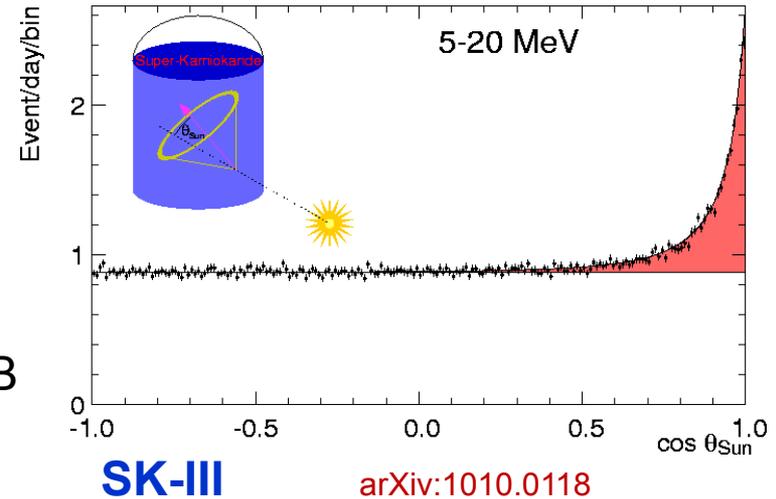
$$E_{\text{th}}(e) = 6.5 \text{ МэВ} \rightarrow 5.0 \text{ МэВ}$$

$$\Phi^{\text{sk}}(^8\text{B}) = (2.35 \pm 0.08) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$



~0.4 от потока SSM

Угловое распределение
солнечных нейтрино в SK



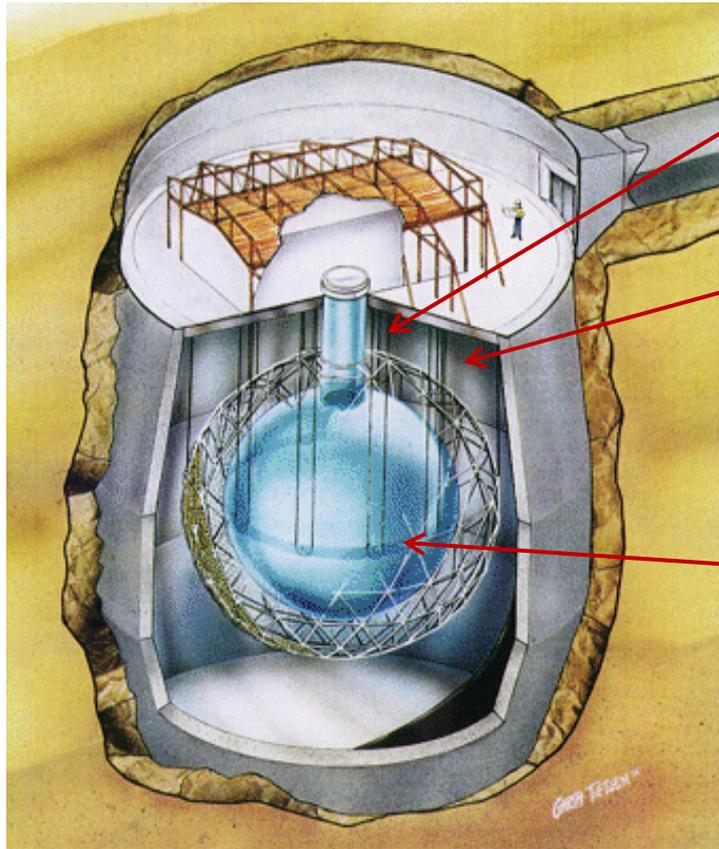


SNO

Взаимодействие солнечных нейтрино с D₂O

Sudbury, Ontario, Canada

Детектор чувствителен к ⁸B солнечным нейтрино



1000 t D₂O

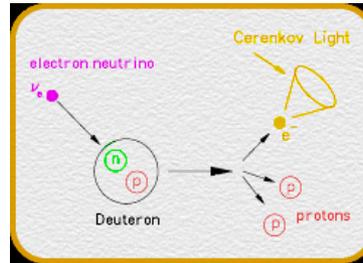
1700 t Inner Shielding H₂O

5300 t Outer Shield H₂O

Phys.Rev.Lett. 89 (2002) 011301

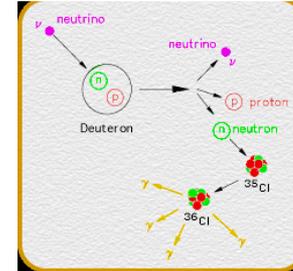
charged current

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$$



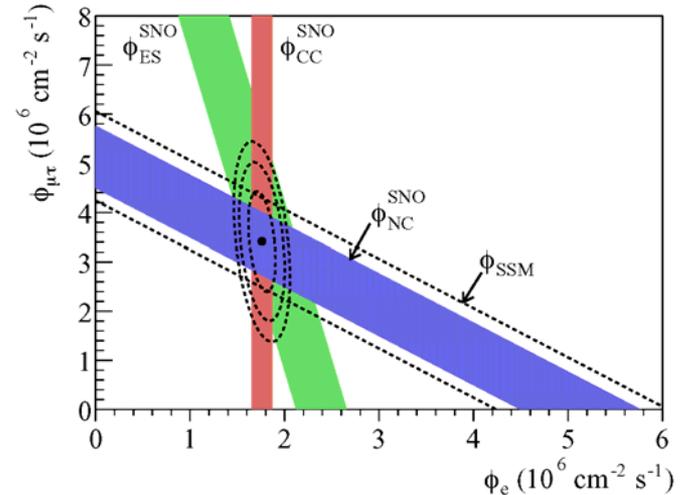
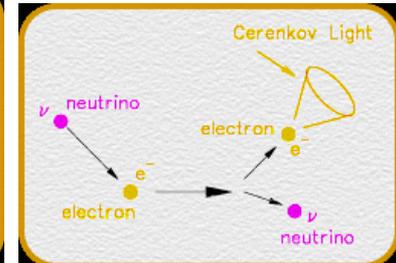
neutral current

$$\nu_\alpha + d \rightarrow p + n + \nu_\alpha$$



electron scattering

$$\nu_\alpha + e \rightarrow \nu_\alpha + e$$



Fluxes (10⁶ cm⁻² s⁻¹)

ν_e 1.76(11)

$\nu_{\mu\tau}$ 3.41(66)

ν_{total} 5.09(64)

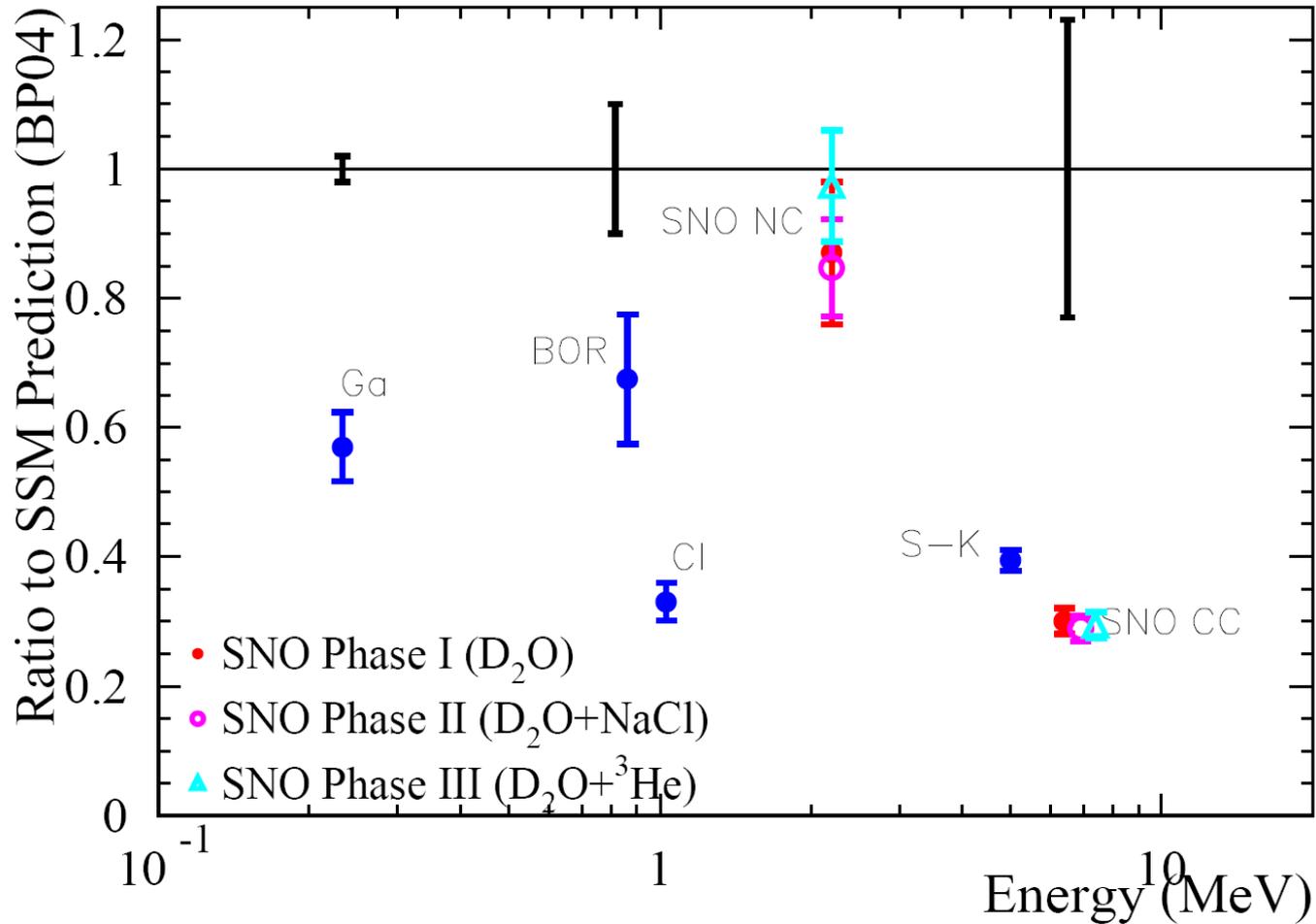
ν_{SSM} 5.05



Измерения солнечных ν

Global Summary

A. Hallin, talk at PIC 2010





KamLAND

Расположен в камере Kamiokande

~ 140-210 км от 53 реакторов

Среднее расстояние = 180 км

Реакторный эксперимент с длинной базой

изучение анти- $\nu_e \rightarrow$ анти- ν_e
осцилляций с Δm^2_{sol}

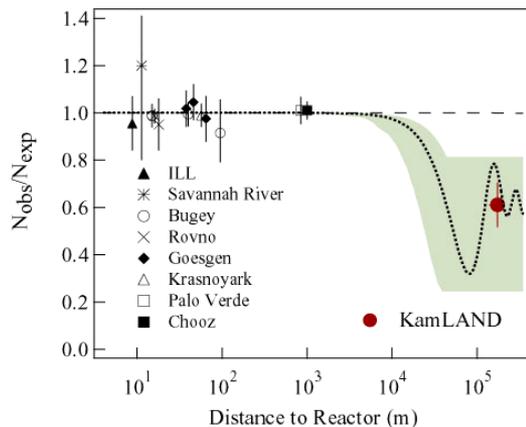
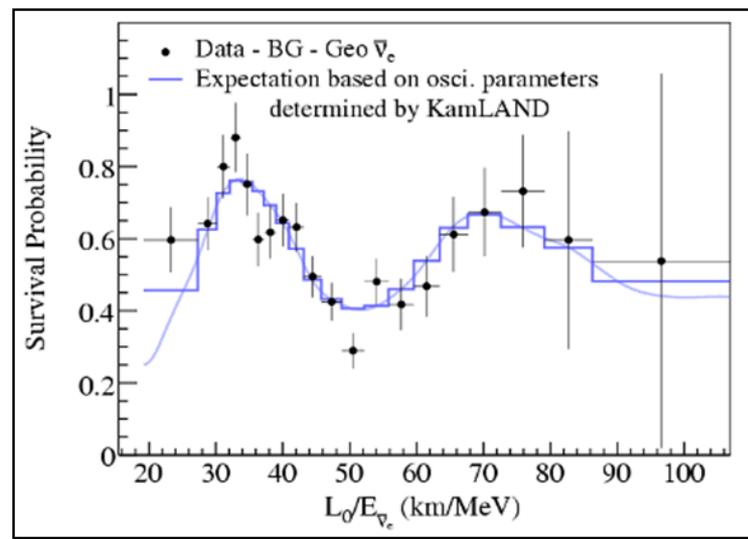
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$



1200 m³ of liquid scintillator

Порог регистрации
2.6 МэВ

disappearance



предполагая CPT= 1

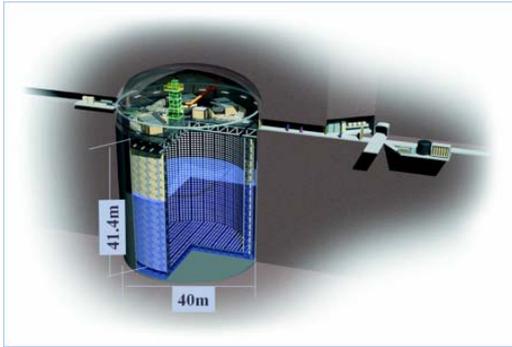
Solar + KamLAND комбинация

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47^{+0.06}_{-0.05}$$

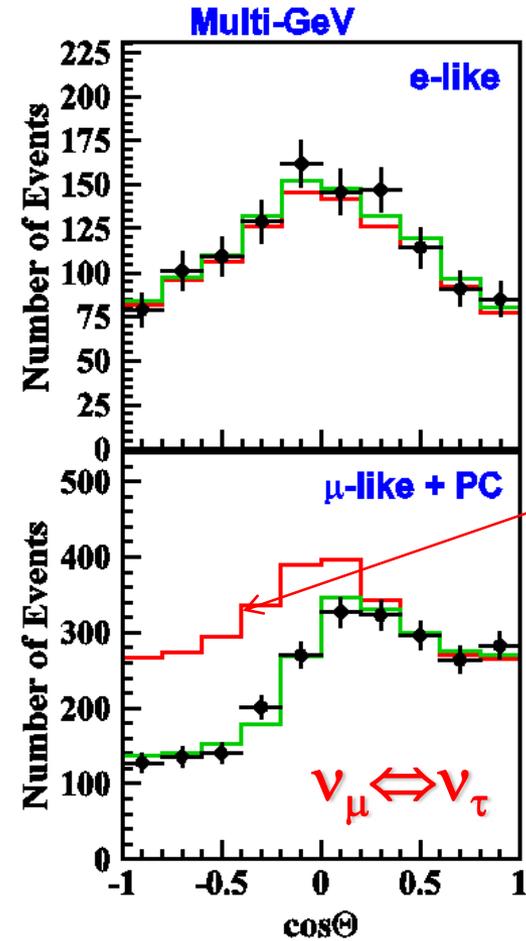
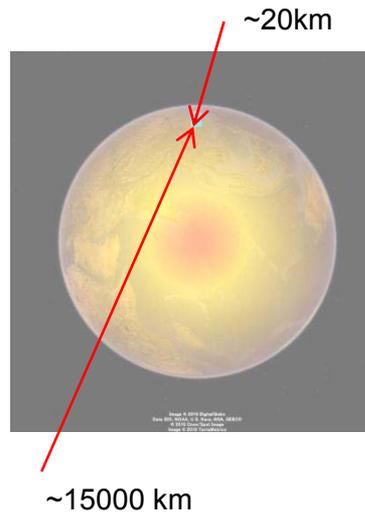
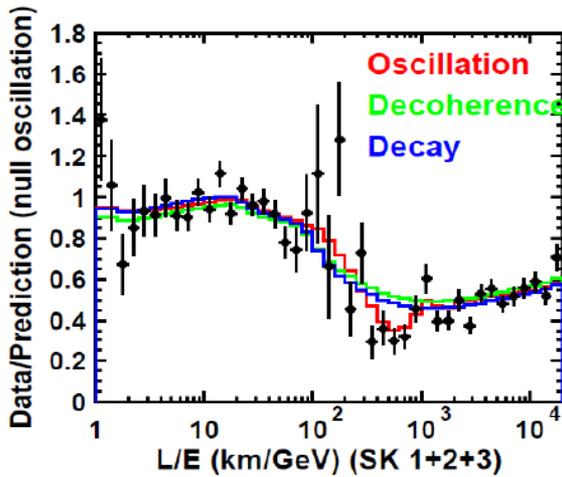
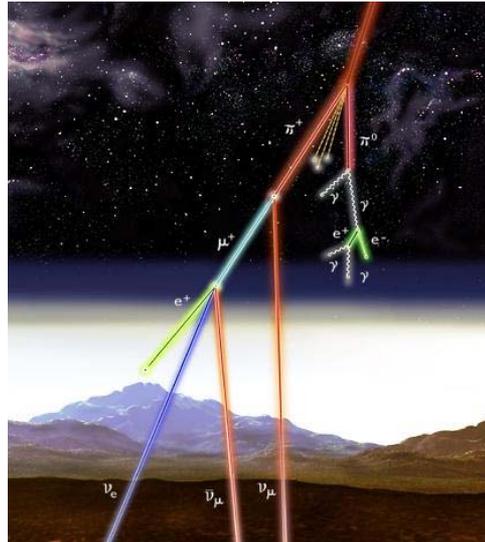
$$\Delta m^2_{21} = 7.59^{+0.21}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$



SuperKamiokande: атмосферные ν



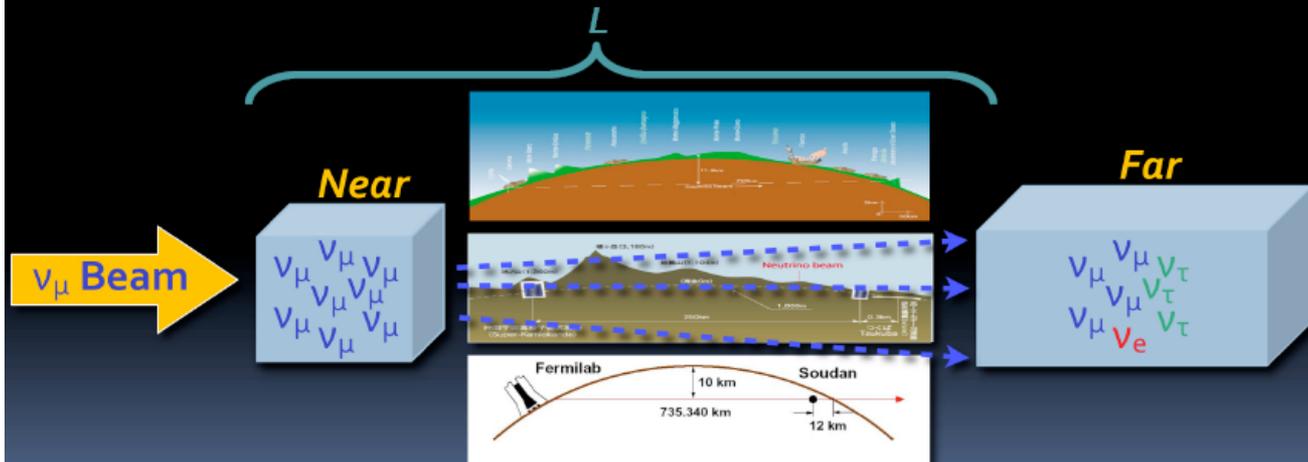
Roughly
 $\nu_e : \nu_\mu \sim 1:2$





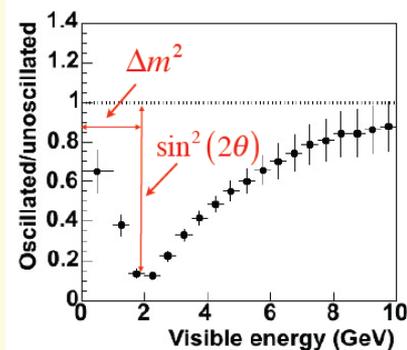
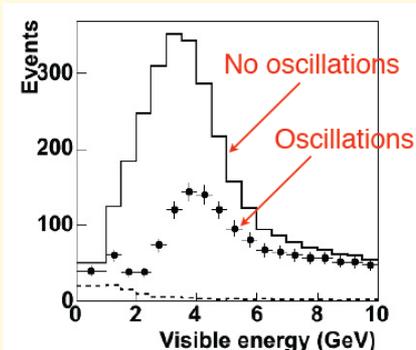
Ускорительные эксперименты с длинной базой

- Create a neutrino beam as intense as possible (>100 kW)
- Measure beam with a Near Detector $\sim \mathcal{O}(1$ km) from source
- Measure again with a large Far Detector $\sim \mathcal{O}(100$ km) away



- Far/Near comparison largely cancels systematic errors

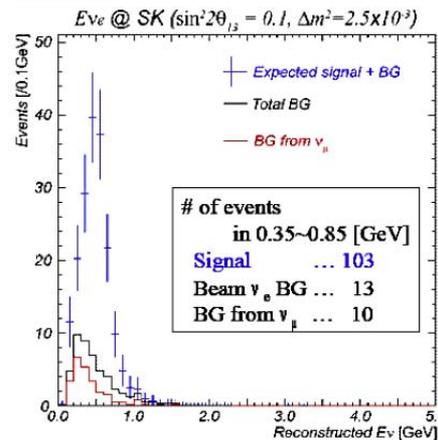
Two flavor approximation: $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / E)$



Size of dip gives the mixing angle; location of dip Δm^2

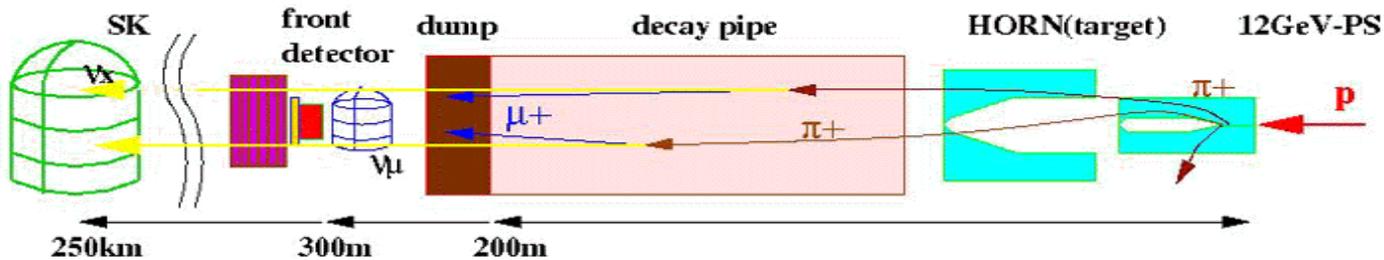
Parameters used in this example: $\sin^2(2\theta) = 1$, $\Delta m^2 = 3.35 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$\theta_{13} = 9^\circ$



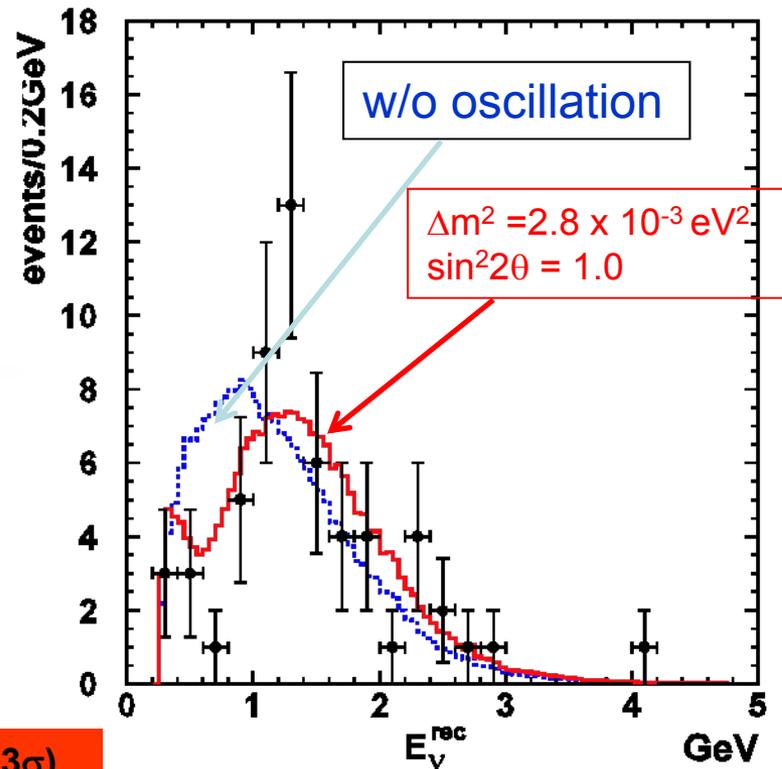


К2К: первый эксперимент с длинной базой



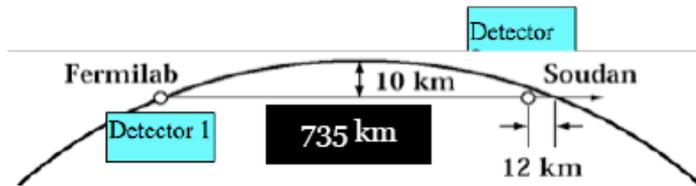
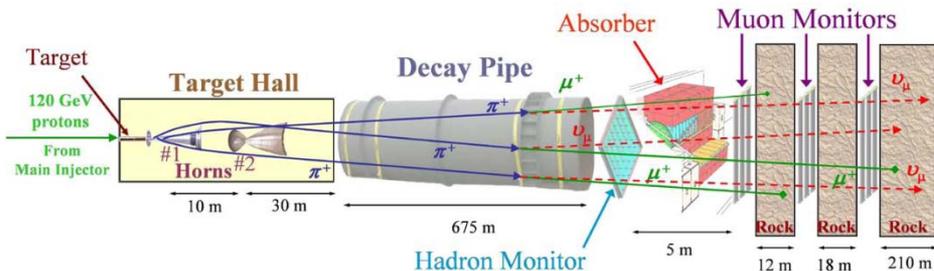
**К2К подтвердил результат SK :
Осцилляции атмосферных нейтрино**

Вероятность отсутствия осцилляций = 0.050%(4.3σ)





MINOS



1 кТ Ближний детектор

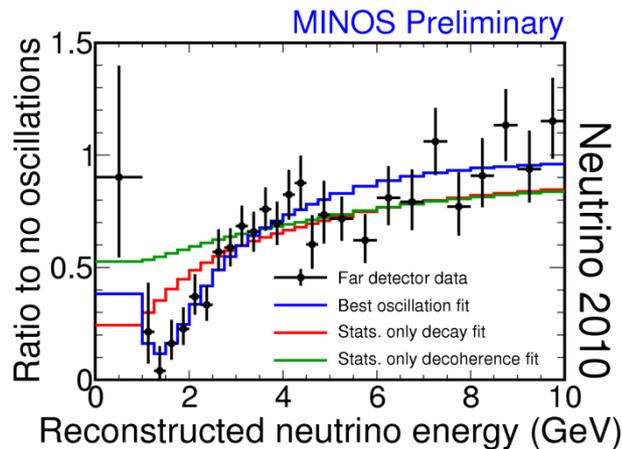
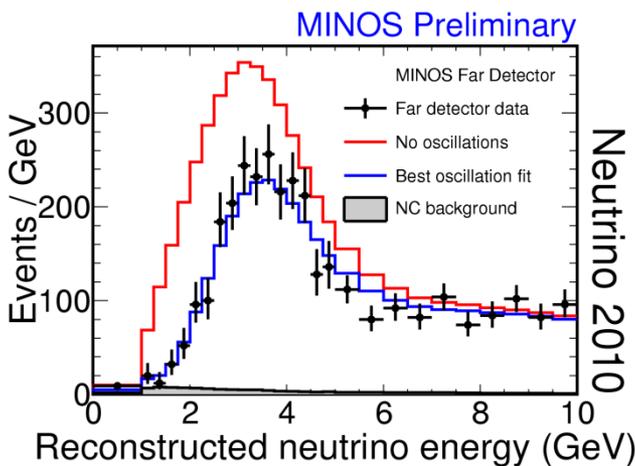


5.3 кТ Дальний детектор

Протонный пучок: 120 ГэВ

ν- пучок: ν_μ- 92.9%, анти-ν_μ- 5.8%, (ν_e + анти-ν_e)- 1.3%,
энергия ~ (3-9) ГэВ

1986 событий зарегистрированы в дальнем детекторе
2451 событий ожидалось в отсутствие осцилляций



$$\Delta m^2 = (2.35 \pm 0.11 \pm 0.08) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta) > 0.91 \text{ (90\% CL)}$$

Far Detector

5.4 kton magnetized Fe/Sci Tracker/Calorimeter

Near Detector

980 ton at $L \approx 1$ km

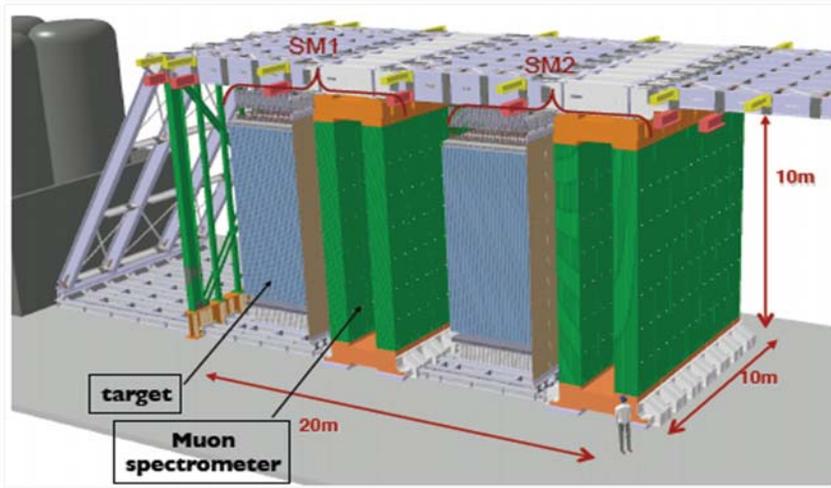
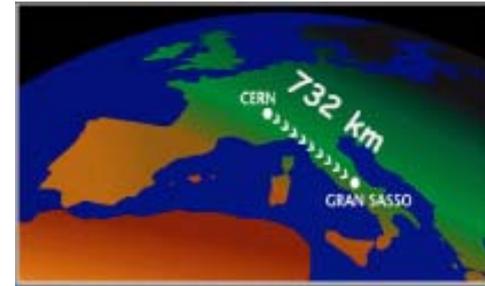
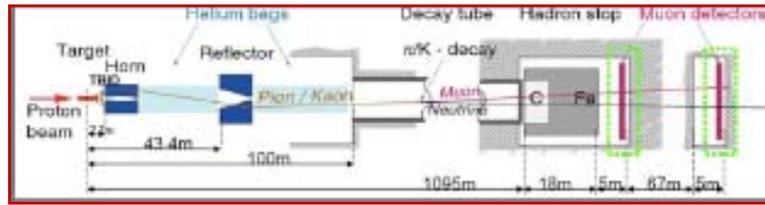
[the same technology in](#)

[both detectors](#)



OPERA

Цель: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

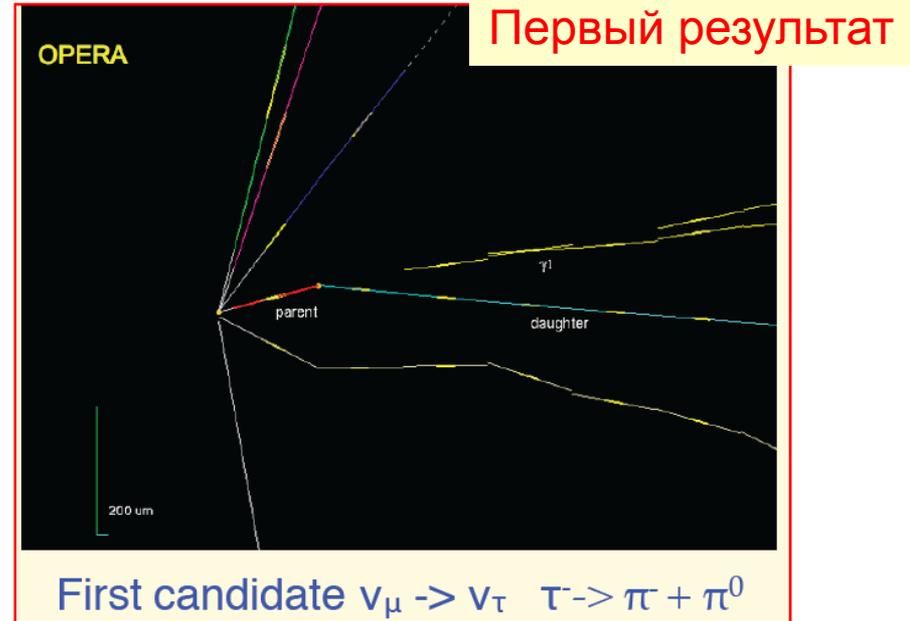
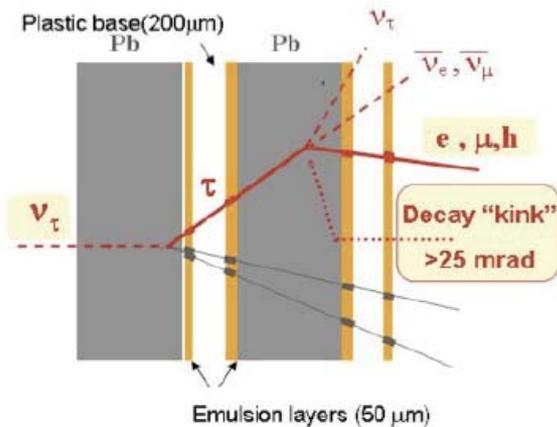


Hybrid Detector:

- Two supermodules - Target Mass ~1.8 ktons
- 2 Magnetic spectrometers with RPC & Drift tubes
- 2 x [31 Target Tracker planes and Target Walls]
- ~200000 "ECC bricks" (56 Pb/Emulsion layers)
- 12 M Emulsion plates (thin double-coated)

OPERA Collab., arXiv:1006.1623 [hep-ex]

target: lead/emulsion bricks



First candidate $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ $\tau^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$



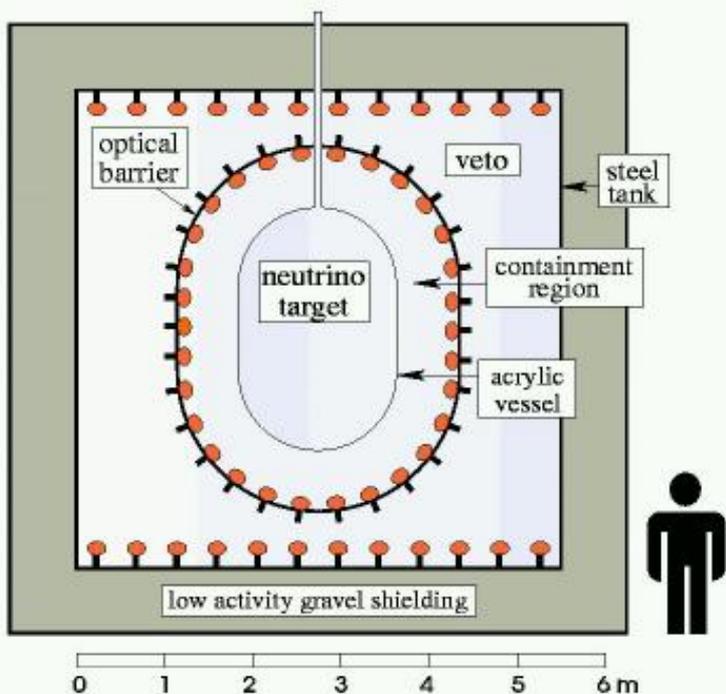
Реакторный эксперимент CHOOZ

Атомная станция Chooz, Франция

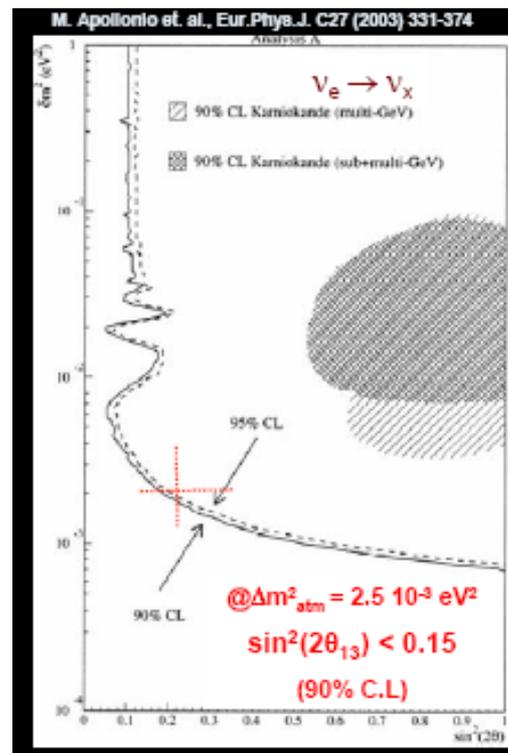
Измерение **анти- $\nu_e \rightarrow \text{анти-}\nu_e$**

- $\text{anti-}\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$,
- $\langle E_\nu \rangle \sim 4 \text{ MeV}$, $E_{\text{thr}} = 1.8 \text{ MeV}$
- Disappearance experiment: search for a departure from the $1/D^2$ behavior + shape distortion

0.09% Gd loaded scintillator



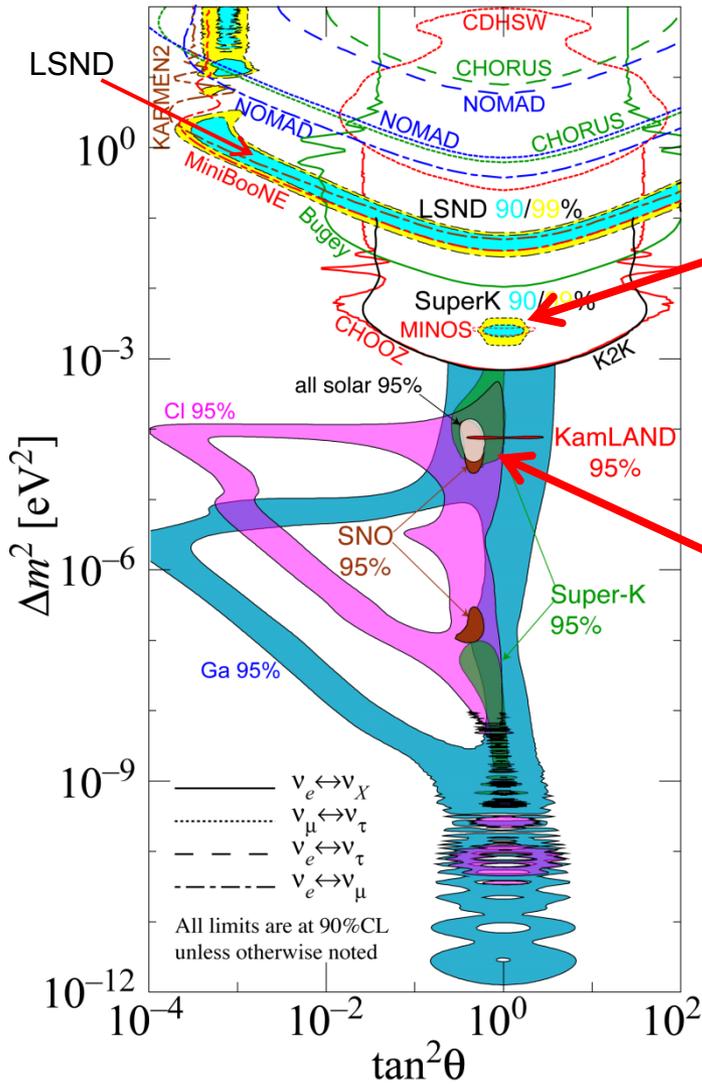
Расстояние от реактора $\sim 1 \text{ км}$
 Масса детектора 5 t



$R = 1.01 \pm 2.8\%(\text{stat}) \pm 2.7\%(\text{syst})$

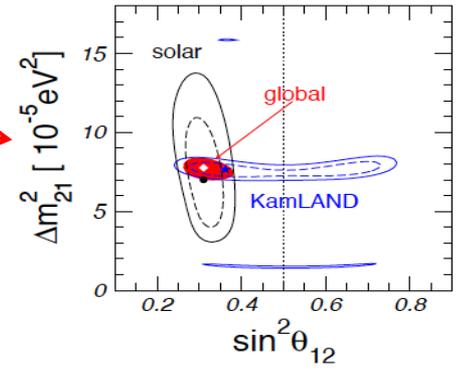


Экспериментальные результаты

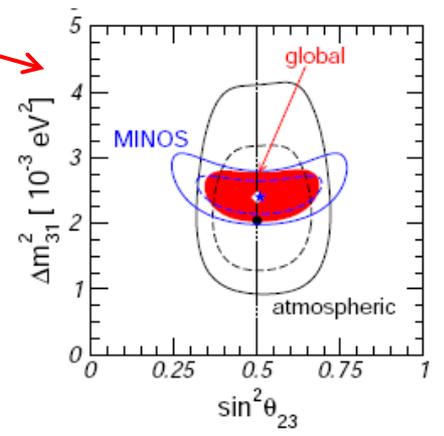
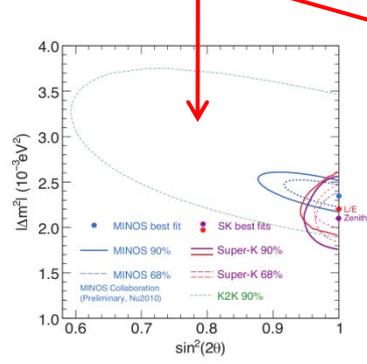


<http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino>

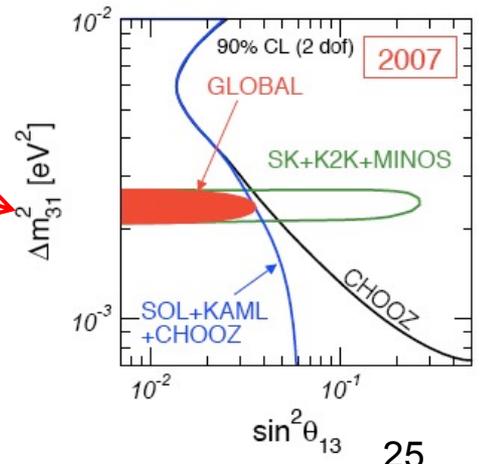
Solar + KamLAND



SK + K2K + MINOS



CHOOZ + atm + LBL
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.11$ (90%CL)





ν : ОСЦИЛЛЯЦИИ И СМЕШИВАНИЕ

Стандартная Модель: масса нейтрино = 0

3 типа ν

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$

атмосферные

солнечные

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

связь между атмосферными и солнечными

U параметризация: три угла смешивания θ_{12} θ_{23} θ_{13} и CP нечетная фаза δ

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2 \quad \Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2 + \Delta m_{31}^2 = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{two independent } \Delta m^2$$

$$\Delta m_{12}^2 = \Delta m_{sol}^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \Delta m_{23}^2 \cong \Delta m_{31}^2 = \Delta m_{atm}^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \sim 34^\circ \quad \theta_{23} \sim 45^\circ$$

Two unknown parameters: θ_{13} and δ



Проблемы

➤ Абсолютная шкала масс

➤ Смешивание нейтрино $\theta_{13} = ? \rightarrow$ CP нарушение ?

➤ Иерархия масс

$\Delta m^2_{23} > 0$ or $\Delta m^2_{23} < 0$

} T2K

➤ Дираковские или Майорановские частицы

➤ LSND/MiniBooNe аномалия, стерильные нейтрино

.....

.....



Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment



Toyama

Kamioka Mine

SuperK

Япония

Токио

Tokyo/Narita Airport

JPARC

Tokai

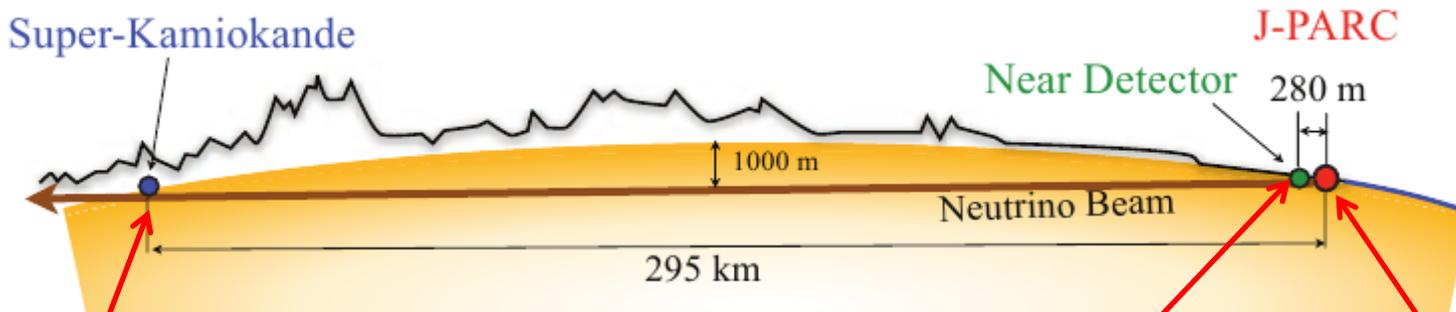




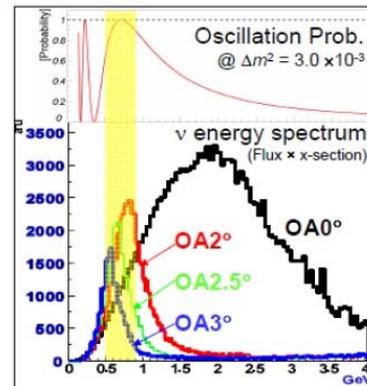
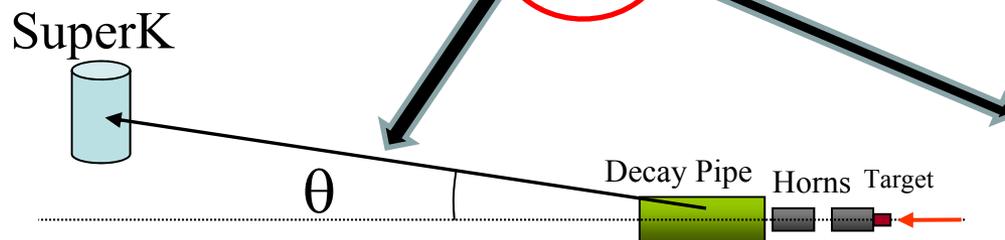
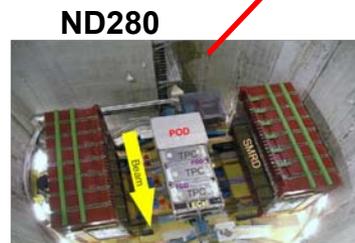
T2K: - поиск $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$

- измерение θ_{13}
- CP - нарушение

- Более 500 участников из 12 стран
 - Россия: ИЯИ РАН



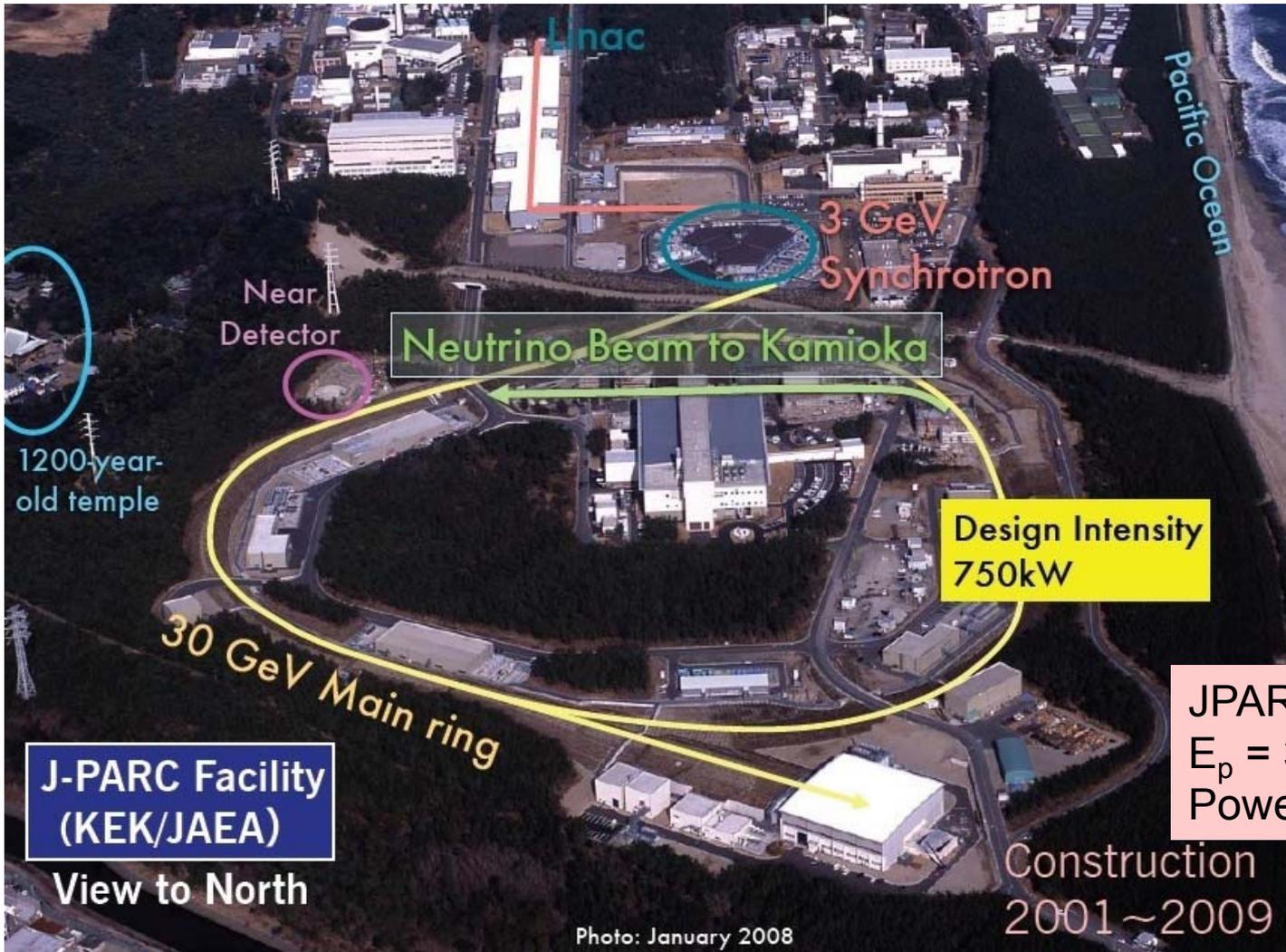
Концепция смещенного от центральной оси нейтринного пучка на небольшой угол θ



При смещении на 2.5 градуса энергия нейтрино настроена на осцилляционный максимум



JPARC



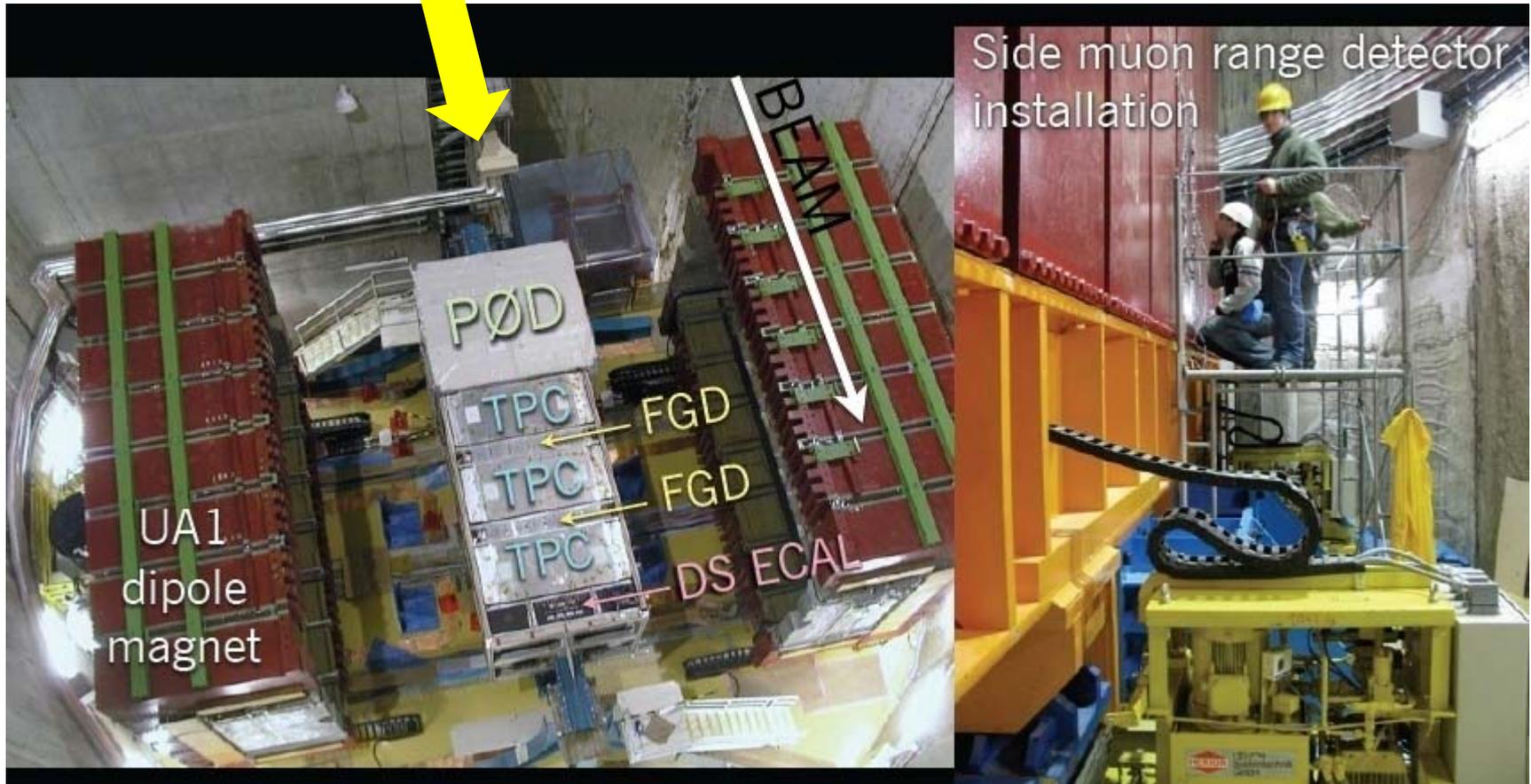
JPARC:
 $E_p = 30 \text{ GeV}$
Power = 750 kW



ND280 off-axis

v beam

Запущен в работу в 2009



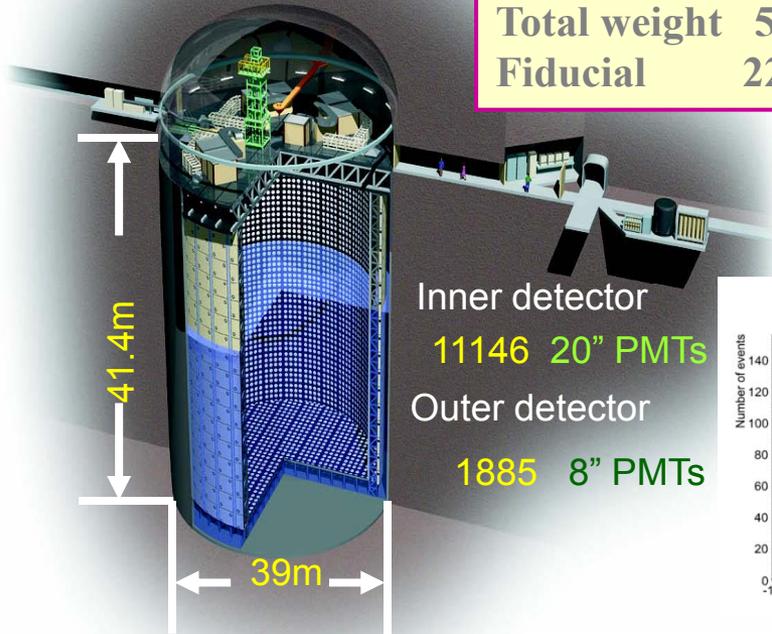


Дальний детектор

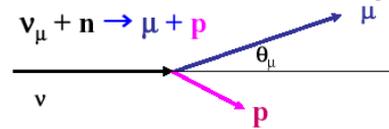
Super-Kamiokande IV

- 4π acceptance, very efficient π^0/e separation.
- High Particle ID (μ/e) power ($\sim 99\%$ at 600 MeV/c)
- Good energy reconstruction.
- Methods are established.

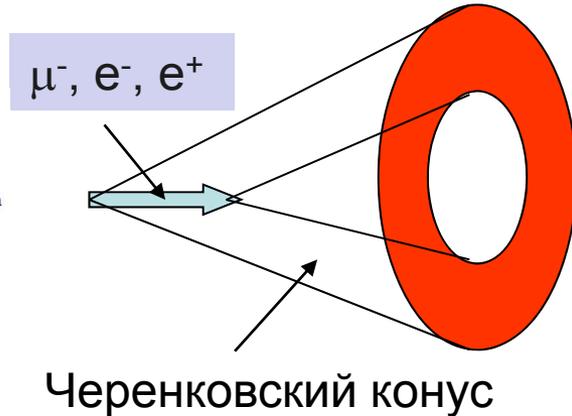
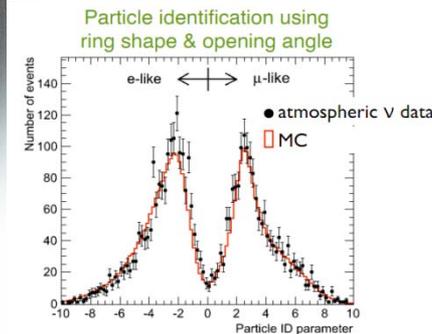
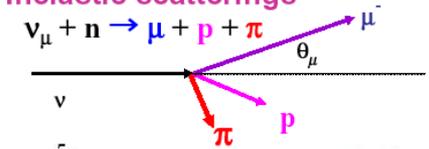
~ 11000 PMTs
with FRP+Acrylic cover
40% photo-coverage



CC quasi elastic scatterings



Inelastic scatterings



Основные фоны:

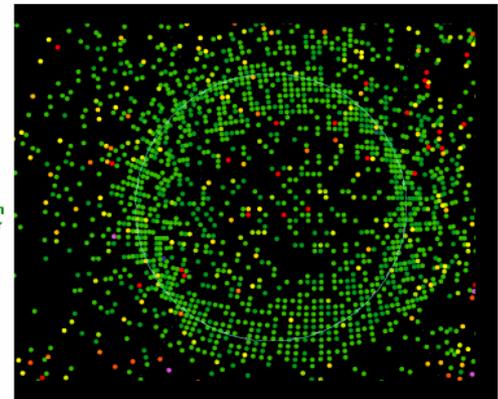
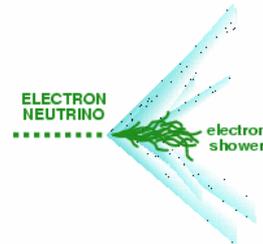
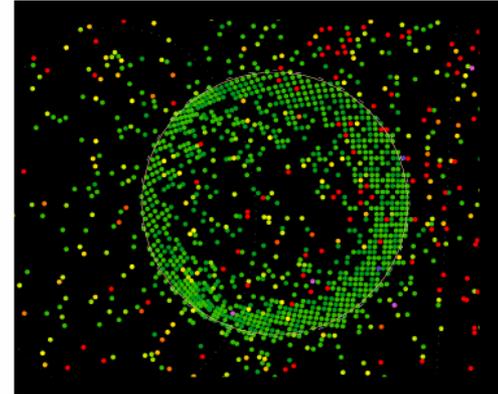
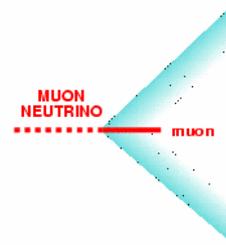
- π^0 от нейтральных токов – подавление ~ 100
- примесь ν_e в пучке ν_μ - $\sim 0.4\%$ в максимуме спектра



Идентификация частиц в SK

PID from ring topology (“fuzziness”)

Use atmospheric data vs. MC
to check reconstruction and
set systematic errors



Временные параметры Т2К

$L = 295 \text{ км}$

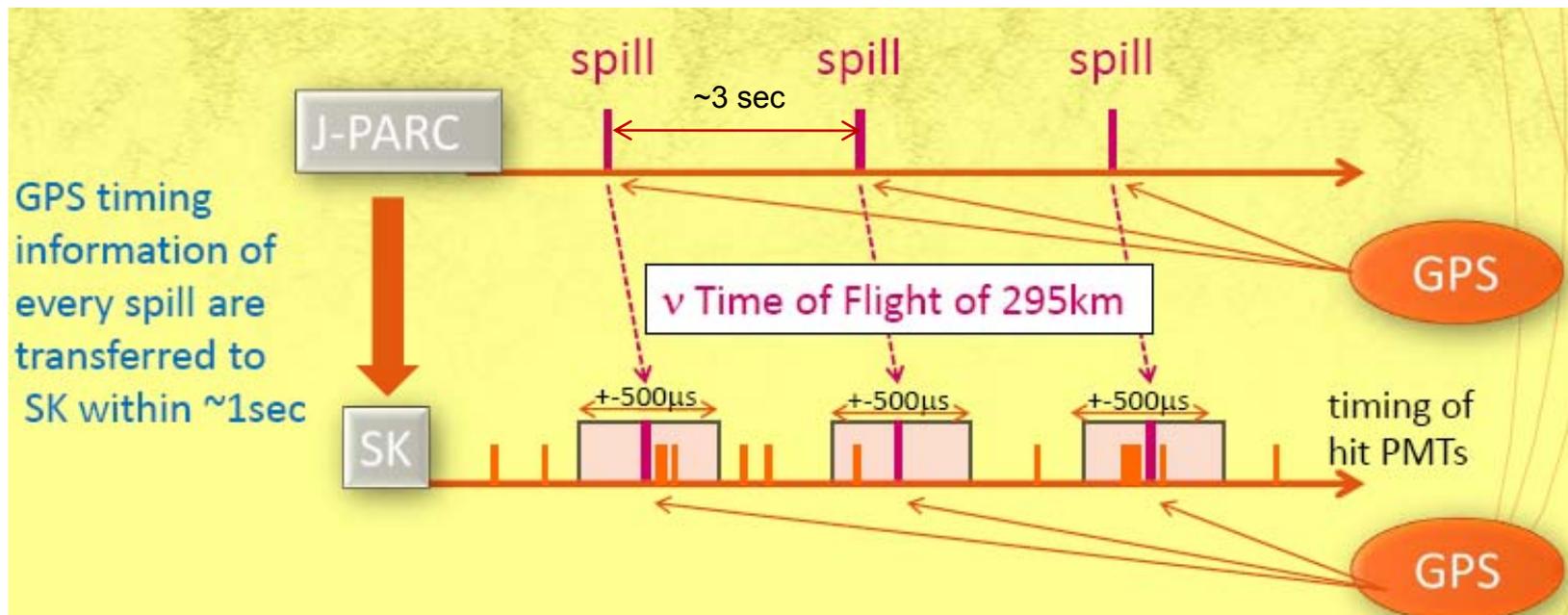
$\text{TOF} = 985 \text{ }\mu\text{s}$

GPS стабильность $\sim 50 \text{ ns}$

Каждый сброс ускорителя
состоит из 8 микробанчей

Длительность 56 ns

Интервал 580 ns





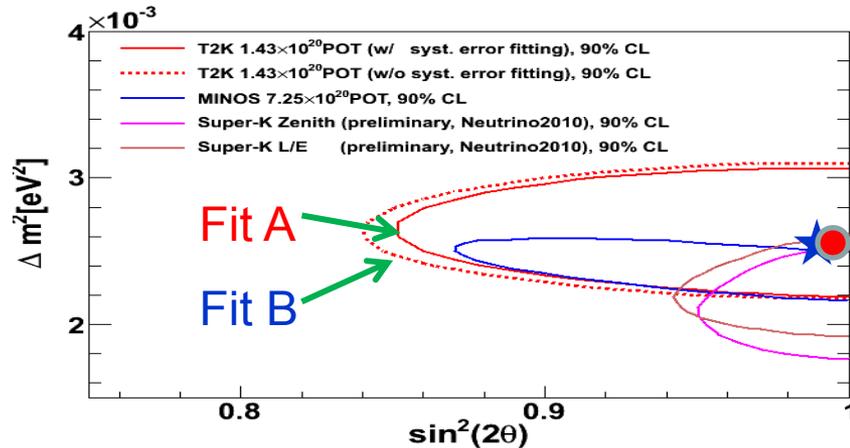
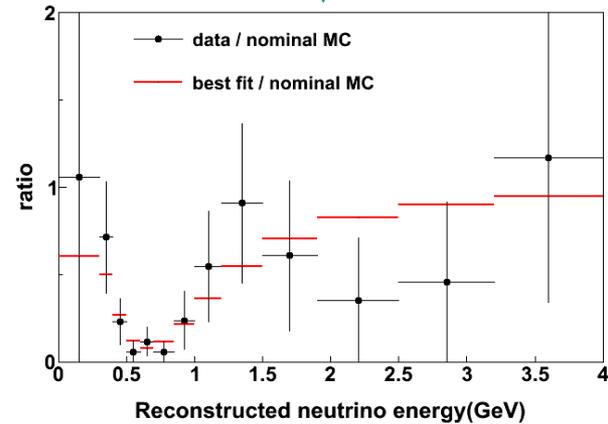
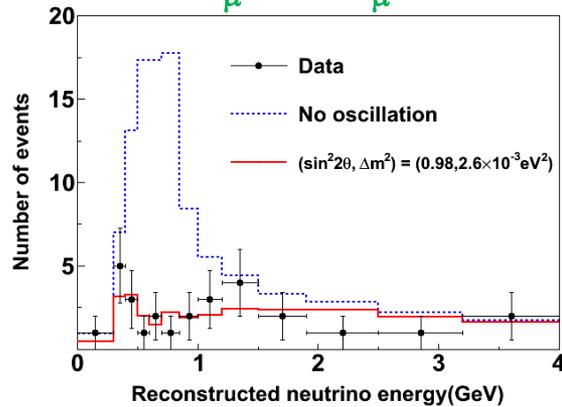
T2K: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$

Набор статистики T2K: январь 2010 – март 2011 $\rightarrow 1.43 \times 10^{20}$ POT

104 ν_μ события ожидалось в отсутствие осцилляций

31 событие зарегистрировано

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2 L / E_\nu)$$



Best-fit (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$)

- Fit A ($2.6 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, 0.99)1020
- ★ Fit B ($2.6 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, 0.98)

Эффект осцилляций подтвержден на уровне 4.5σ



T2K: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu}$$

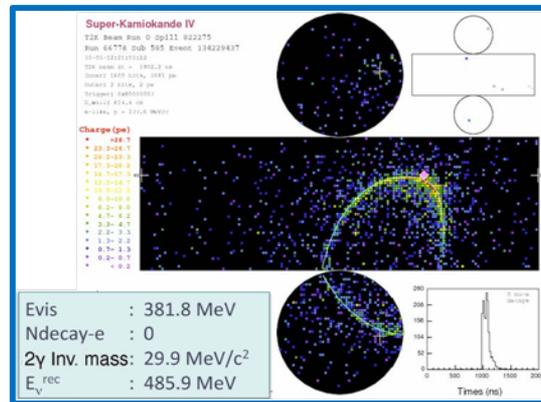
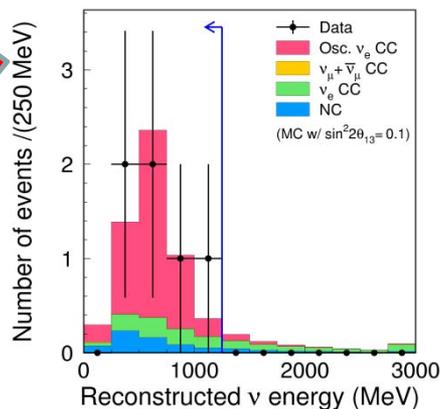
После анализа всех данных

6 электронных нейтрино зарегистрировано в СуперКамиоканде

Фон (в отсутствие осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) составляет 1.5 ± 0.2 события

- вероятность регистрации 6 событий как флуктуации фона ($\sin^2 2\theta_{13} = 0$) = **0.7%**

- с вероятностью **99.3%** этот результат может быть интерпретирован как указание на осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



электроноподобное событие в SK

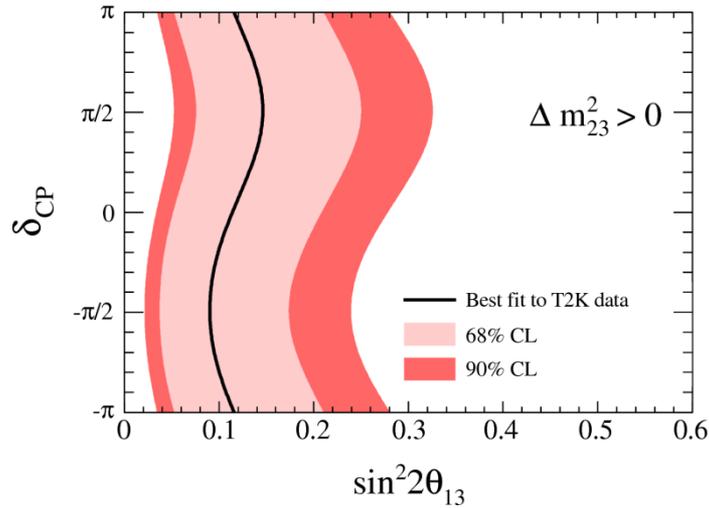
Первое экспериментальное обнаружение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



θ_{13}

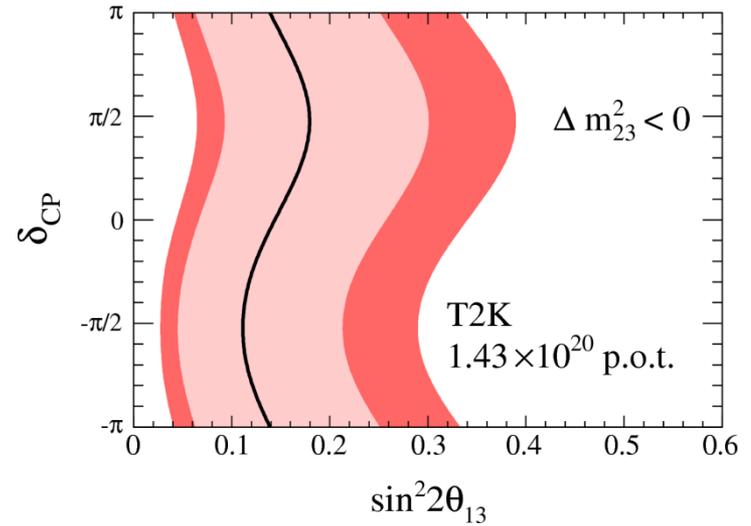
Нормальная иерархия масс

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.11$ (best fit) $\delta_{CP}=0$
0.03-0.28 (90% C.L.)

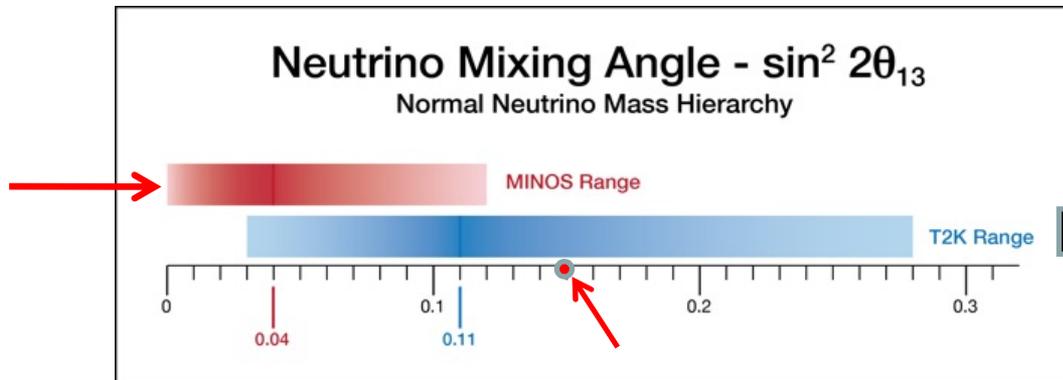


Инверсная иерархия масс

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.14$ (best fit) $\delta_{CP}=0$
0.04-0.34 (90% C.L.)



MINOS,
Фермилаб, США



Глобальный анализ
всех экспериментальных
данных

$\theta_{13} \approx 8-10^\circ$



Землетрясение 11 марта 2011

-Землетрясение магнитудой **9.0** 11 марта 2011

- всего 5 землетрясений ≥ 9 с 1900 года

- около **24000** погибших и пропавших без вести из-за цунами и землетрясения

-атомная станция **Фукусима** повреждена цунами





J-PARC после землетрясения

- J-PARC - **260км** от эпицентра
- **Никто из сотрудников не пострадал**
- Повреждены здания и некоторые компоненты ускорителя



- **Декабрь 2011:** восстановлен протонный пучок, ν_μ ожидаются 20-25 декабря
- **Ближайшая цель T2K – чувствительность к $\theta_{13} > 3\sigma$**



Измерение θ_{13} на реакторах

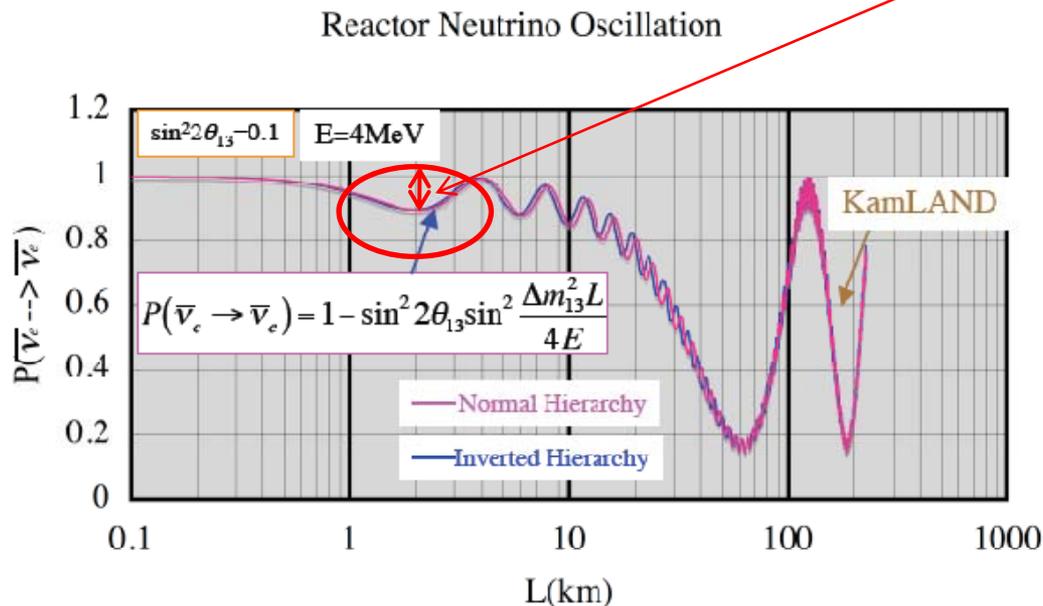
реакторные эксперименты $\text{anti-}\nu_e \rightarrow \text{anti-}\nu_e$

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu} \right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \right)$$

Нет чувствительности к δ (!)

Нет чувствительности к иерархии масс (!)

Измерение дефицита антинейтрино на расстоянии 1-2 км от ректора



Чувствительность определяется систематическими погрешностями, которые должны быть $\leq 1\%$



Реакторные эксперименты

θ_{13}

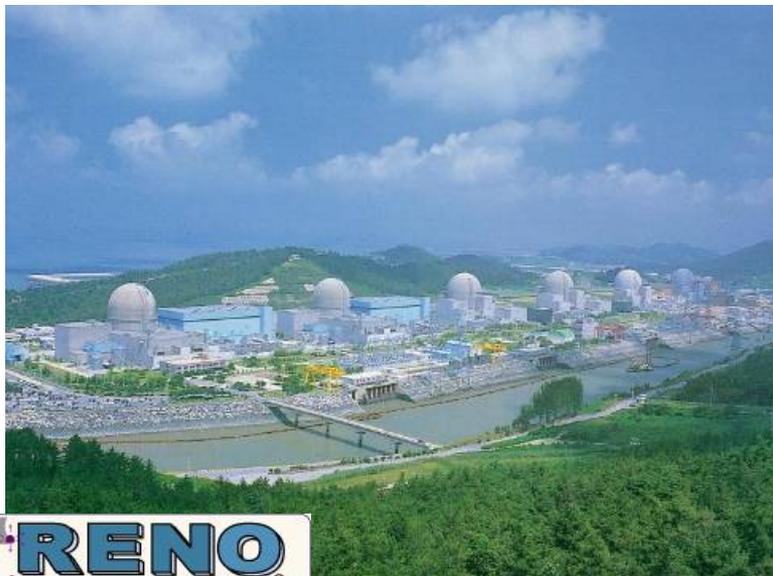
Experimental Setup.

Chooz Reactors
Power: 8.5GW_{th}

Near
<L> 400m
400v/day
120mwe
Target: 8.2t
Sept 2012

Far
<L> 1050m
50v/day
300mwe
Target: 8.2t
Dec. 2010

Exp't	Power (GW)	Distance N/F (m)	Target N/F (t)
Double Chooz	8.6	400/1050	8.2/8.2
RENO	17.3	290/1380	16/16
Daya Bay	11.6 (17.4)	360(500)/1990(1620)	2x40/80





T2K, MINOS, Double-CHOOZ

MINOS

L.Whitehead,
Talk at LowNu,
Seoul, Korea, Nov 11

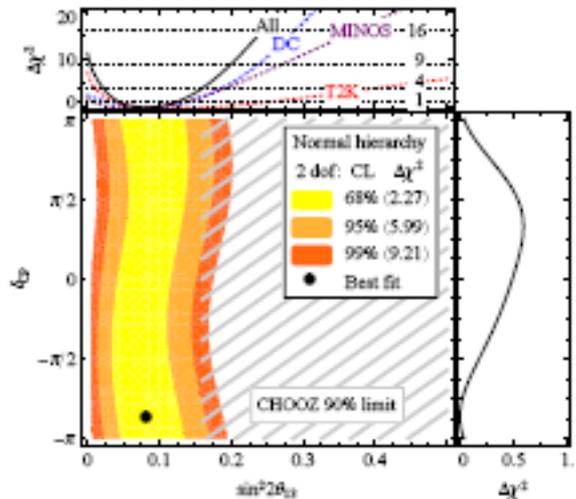
Best fit $\sin^2 2\theta_{13} = 0.041$

(Assuming $\delta=0$, $\theta_{23}=\pi/4$,
normal hierarchy)

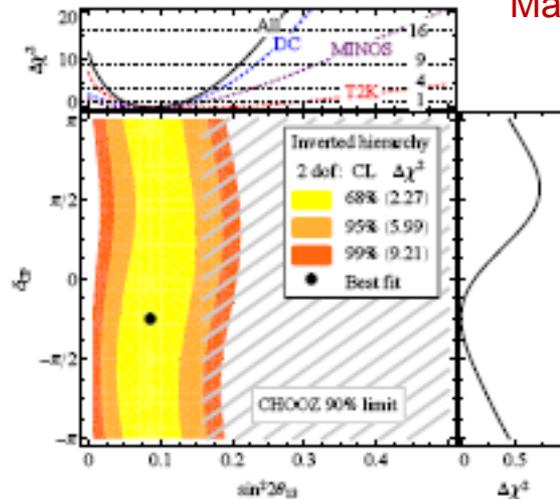
Double-CHOOZ

H.De.Kerret,
Talk at LowNu,
Seoul, Korea, Nov 9

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.085 \pm 0.051$



Нормальная иерархия



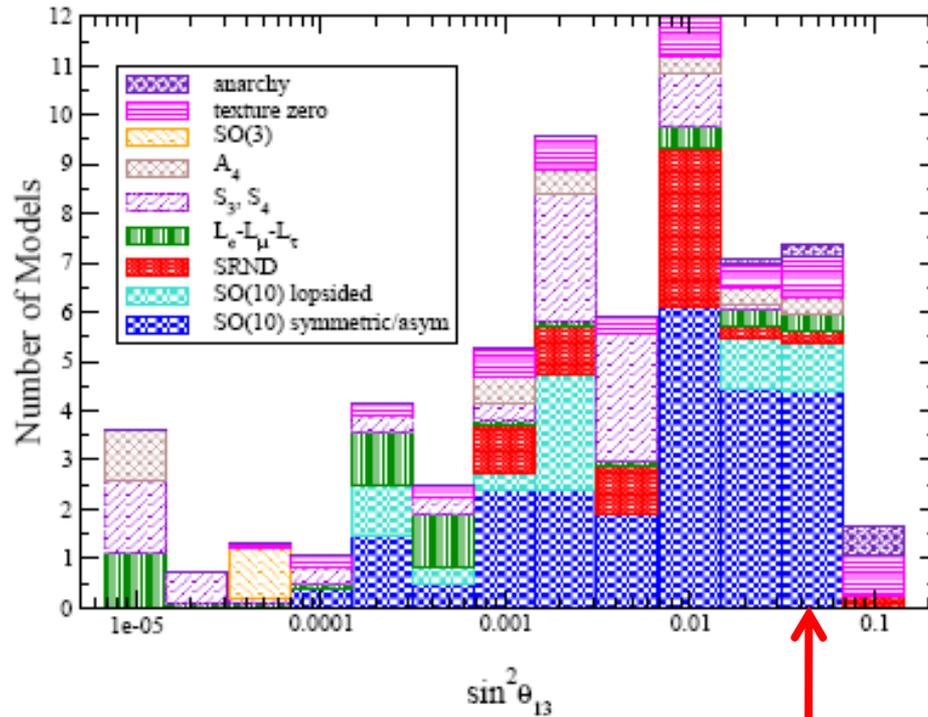
Обратная иерархия

Machado et al. arXiv:1111.3330[hep-ph]



Теоретические предсказания θ_{13}

C.H.Albright, M.C.Chen, hep-ph/0608137



значение θ_{13} из T2K

Большинство моделей смешивания нейтрино предсказывают малую величину θ_{13}



Масса нейтрино

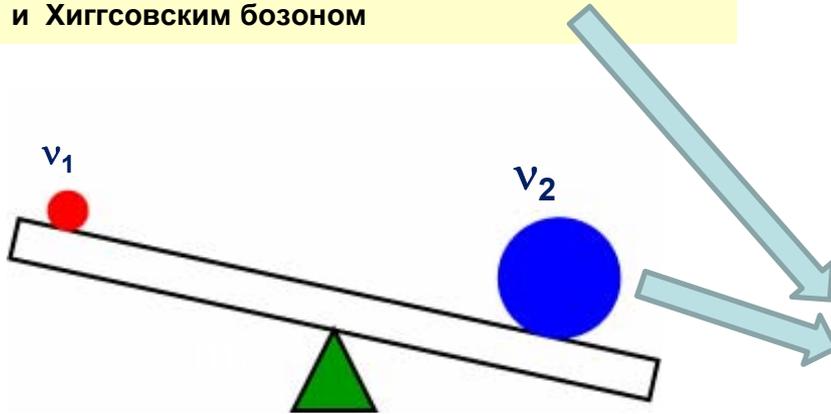
Прямые измерения $m_\nu < 2 \text{ эВ}$
Космология $m_\nu < 0.3 - 1.0 \text{ эВ}$

Шкала масс

Почему разница между массами заряженных фермионов и нейтрино составляет много порядков?

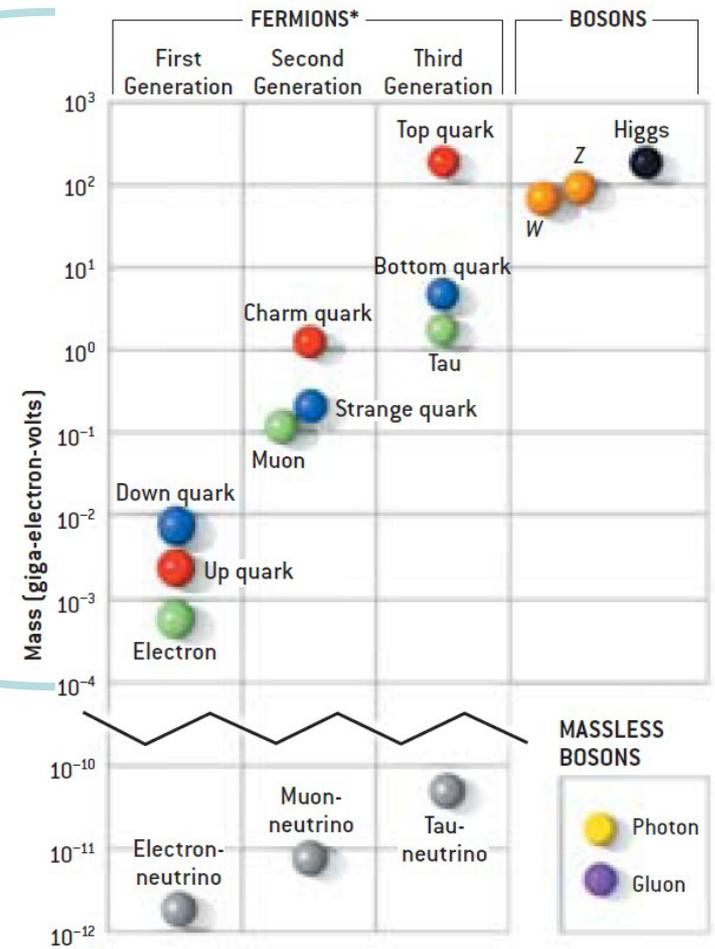
Механизм see-saw («качели»)

- тяжелые ($10^9 - 10^{15}$ ГэВ) правые Майорановские нейтрино N_R добавлены в СМ
- N_R взаимодействуют с левыми лептонами и Хиггсовским бозоном



ХИГГС

?



$m_D \sim 100 \text{ ГэВ}$ - через Хиггсовский механизм

$$m_1 \approx \frac{m_D^2}{M_R} \quad m_2 \approx M_R \quad \rightarrow \quad m_\nu \cong \frac{m_D^2}{M_R}$$

$$m_\nu \sim 0.05 \text{ eV} \quad \rightarrow \quad M_R \sim 10^{15} \text{ GeV}$$



Смешивание: кварки и нейтрино

матрицы смешивания
кварков и нейтрино

$$V_{\text{quark}} = \begin{pmatrix} 1 & S & s \\ S & 1 & s \\ s & S & 1 \end{pmatrix} \quad s \equiv \text{small}$$

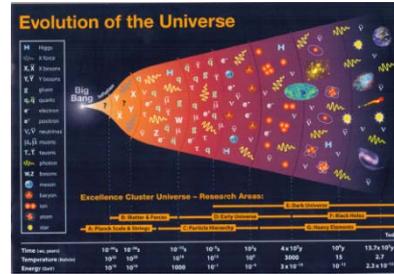
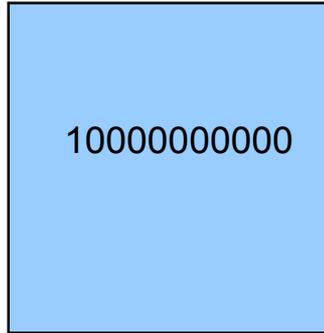
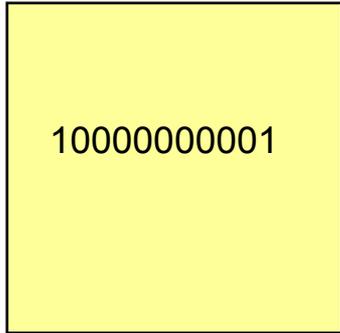
$$U_{\text{lepton}} = \begin{pmatrix} B & B & \theta_{13} \\ B & B & B \\ B & B & B \end{pmatrix} \quad B \equiv \text{Big}$$

Почему матрицы смешивания столь различны?
Какова природа смешивания?
Новые симметрии?



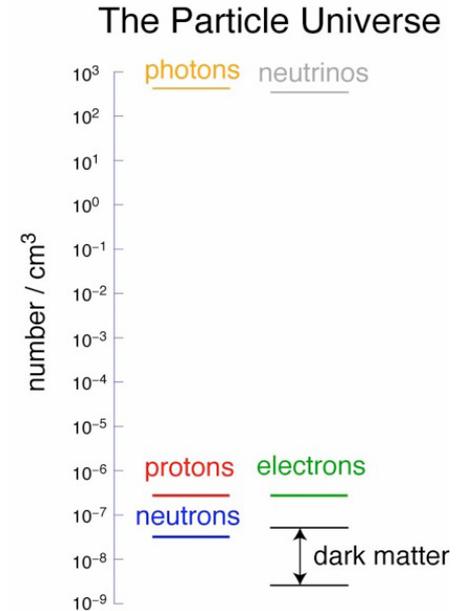
Барионная асимметрия Вселенной (BaU)

Ранняя Вселенная



Современная Вселенная

1



Вещество

Антивещество

$$Y_{\Delta B} = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{S} = (8.75 \pm 0.23) \times 10^{-11}$$

Один лишний кварк на **10 миллиардов** пар кварк-антикварк. Эта малая асимметрия привела к тому, что современная Вселенная состоит из **вещества**, т.к. в процессе расширения и охлаждения Вселенной в процессе аннигиляции кварков и антикварков избыточные кварки образовали **протоны и нейтроны**.

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{\gamma} = (6.21 \pm 0.16) \times 10^{-10}$$

$$\frac{n_B}{n_{\bar{B}}} < 10^{-6}$$

барионы: **протоны, нейтроны**



Возможное объяснение ВаU

3 условия А.Д.Сахарова

- нарушение барионного числа
- C и CP нарушение
- отклонение от термодинамического равновесия

Проблема барионной асимметрии не находит решения в рамках Стандартной Модели. CP нарушение в кварковом секторе слишком мало, чтобы быть источником асимметрии

Модель «качелей» удовлетворяет этим требованиям: барионная асимметрия $Y_{\Delta B}$ получается из лептонной асимметрии $Y_{\Delta L}$, которая генерируется в распадах тяжелых Майорановских нейтрино $N_R \rightarrow$ механизм **лептогенезиса**

Обнаружение CP нарушения в лептонном секторе \Rightarrow серьезное указание на лептогенезис

Барионная асимметрия Вселенной \Leftrightarrow Нейтринная физика



Нейтринные парадоксы

! Нарушение четности → ~~зеркальная симметрия~~

! Осцилляции нейтрино → новая физика: $m_\nu \neq 0$
смешивание

? Стерильные нейтрино → ??

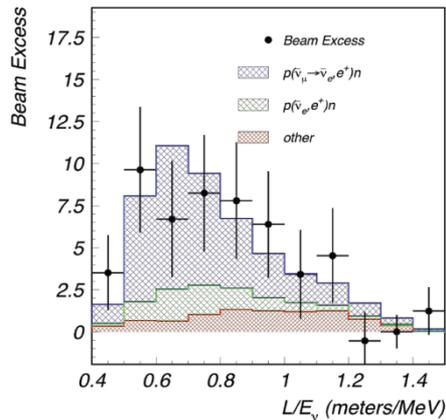
? Сверхсветовая скорость → ??



LSND/MiniBooNe аномалия

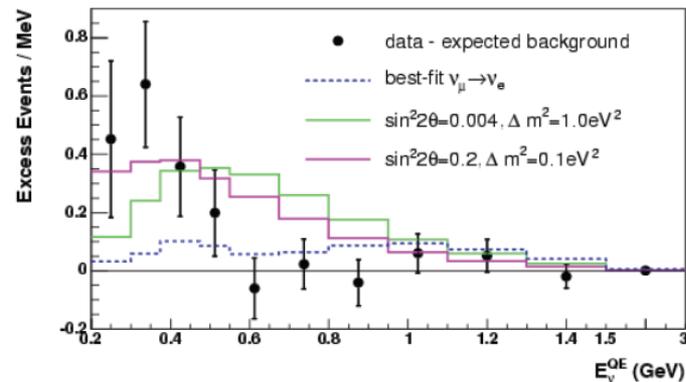
Ряд результатов по исследованию осцилляций не укладывается в общепринятую картину переходов между **три** типами активных нейтрино

LSND, Лос-Аламос, США



Избыток **3.8 σ**

MiniBooNe, Фермилаб, США



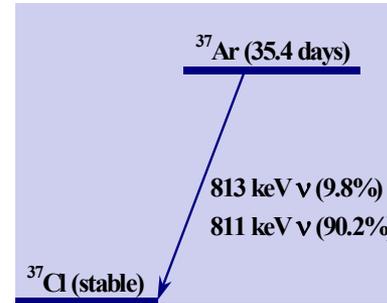
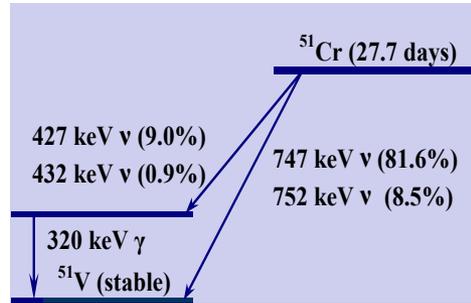
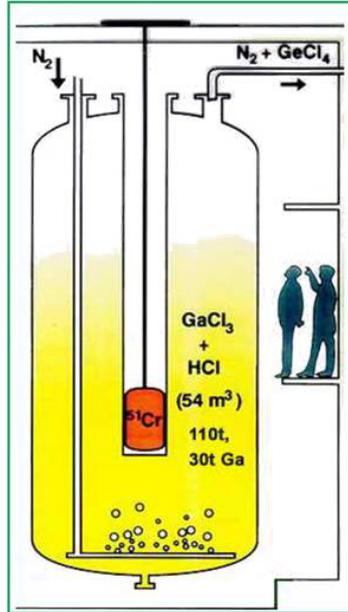
Избыток **3.0 σ** для ν и **2.3 σ** для анти- ν
в диапазоне энергий нейтрино 200-1250 МэВ

осцилляции нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$?



Га аномалия

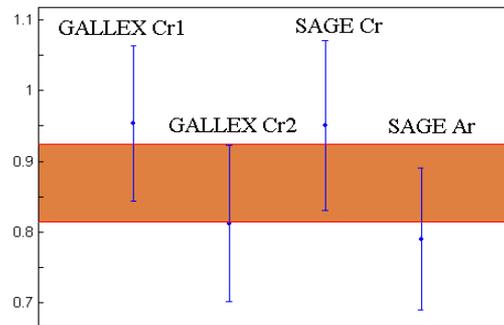
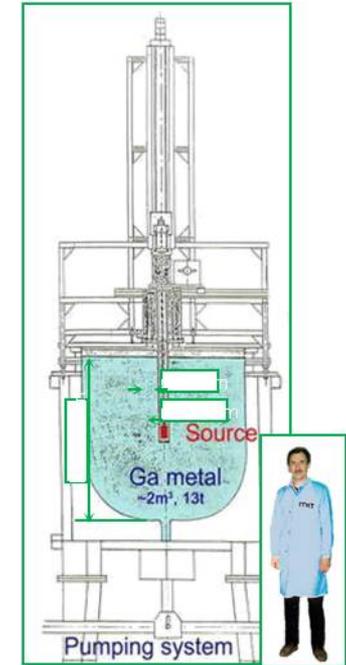
GALLEX



Детектирование нейтрино: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

	GALLEX m(Ga)=30 t		SAGE m(Ga)=13 t	
источник	${}^{51}\text{Cr}$ -1	${}^{51}\text{Cr}$ -2	${}^{51}\text{Cr}$	${}^{37}\text{Ar}$
интенсивность (Mci)	1.714	1.868	0.517	0.409
$R = (p_{exp}/p_{theory})$	0.95 ± 0.11	0.81 ± 0.11	0.95 ± 0.12	0.79 ± 0.10
R_{comb}	0.88 ± 0.08		0.86 ± 0.08	

SAGE

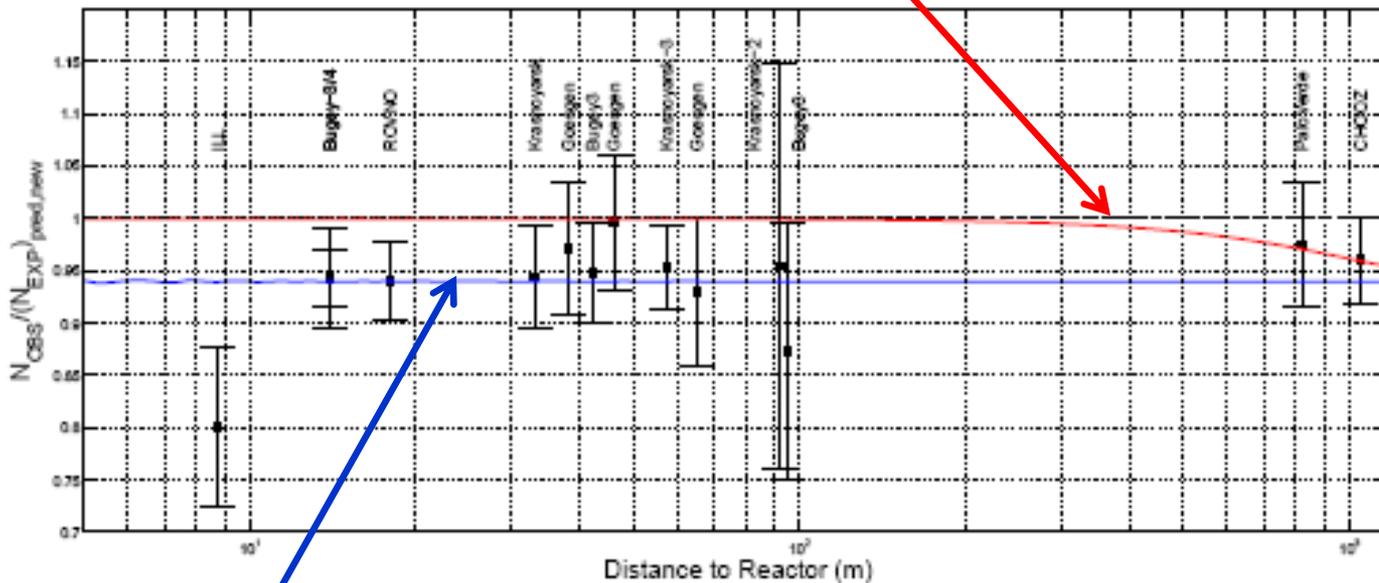


$$R = P(\text{exp})/P(\text{theory}) = 0.87 \pm 0.05$$



Реакторная аномалия

Смешивание 2-х активных нейтрино с $\sin^2 2\theta_{13} = 0.06$



G.Mention et al.
arXiv: 1101.2755

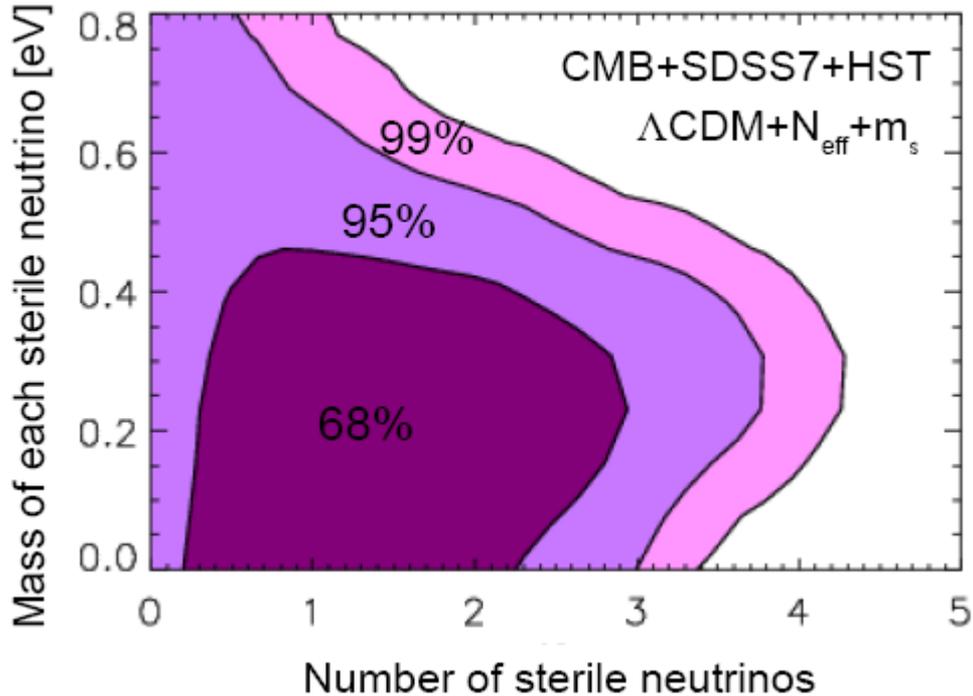
0.937 ± 0.027

Дефицит реакторных нейтрино

$|\Delta m^2| \geq 1.5 \text{ эВ}^2$



Космология



3 + 1

$m_s < 0.48$ эВ (95% CL)



Ускорительные/реакторные данные
 $m_s \sim 1$ эВ

3 + 2

$m_{s1} + m_{s2} < 0.90$ эВ (95% CL)



Ускорительные/реакторные данные
 $m_{s1} \sim 0.7$ эВ $m_{s2} \sim 0.9$ эВ



Стерильные нейтрино ?

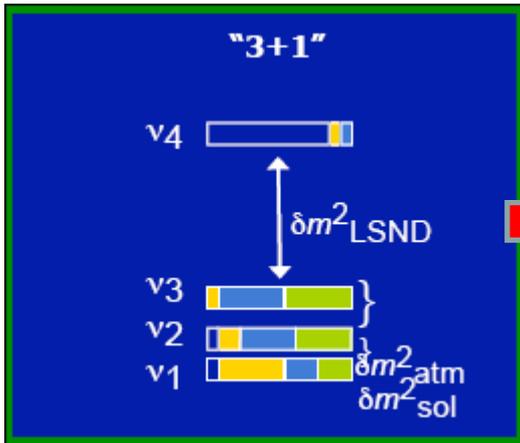
Combined analysis of anomalies:

- реакторные данные
- Ga эксперименты
- LSND и MiniBooNe,



$$|\Delta m^2| > 1.0 \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{\text{new}} \approx 0.17$$



$\Delta m^2_{34} \sim 1 \text{ эВ}^2 \Rightarrow$ 4-е нейтрино?
 ...но из Стандартной модели и LEP данных
 \Downarrow
 три типа легких активных нейтрино

Гипотеза стерильных нейтрино

Стерильные нейтрино ν_s

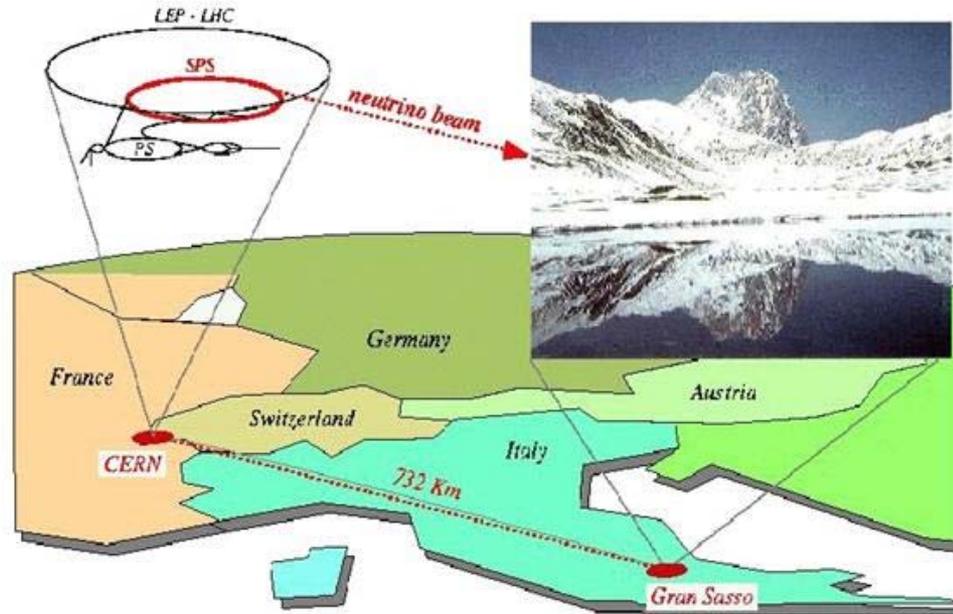
- могут рождаться в ранней Вселенной благодаря смешиванию с активными нейтрино
- не участвуют в слабых взаимодействиях
- могут иметь левую или правую спиральность
- четвертое массовое состояние
- ν_s ($m_s \geq 1 \text{ кэВ}$, $\theta \leq 10^{-4}$) кандидаты в теплую темную материю



Измерение скорости нейтрино

Эксперимент OPERA

Пучок мюонных нейтрино из ЦЕРН в Гран Сассо
Средняя энергия нейтрино 17 ГэВ

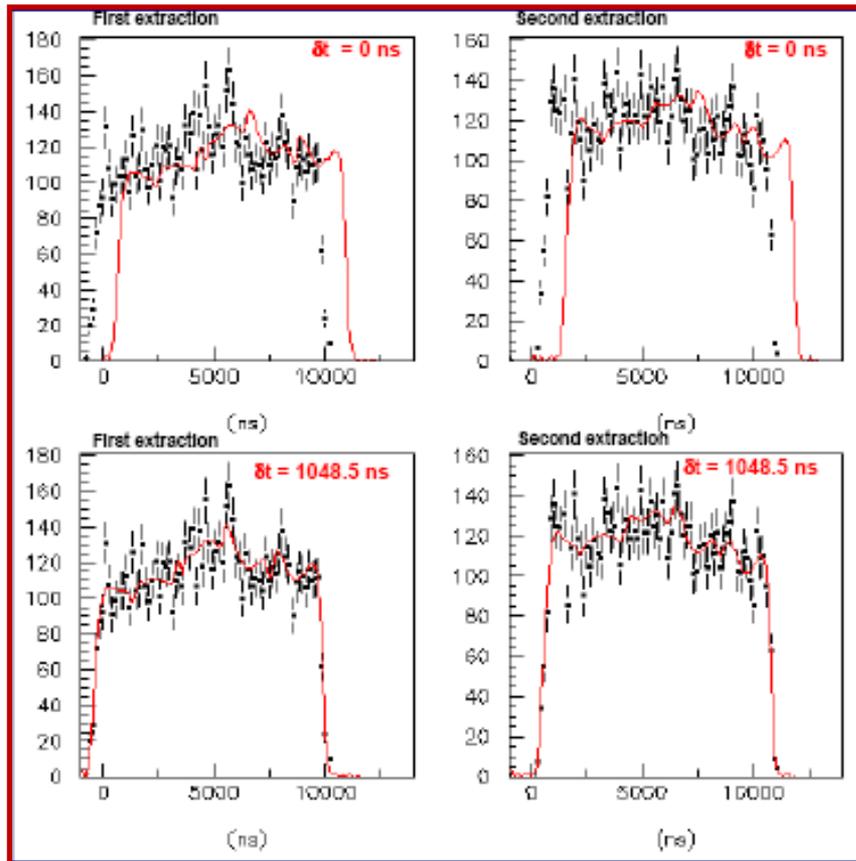


- 16000 нейтринных событий в детекторе
- ~1 нс временная синхронизация ЦЕРН-Гран Сассо
- Расстояние измерено с точностью 20 см



Временные распределения

Широкий банч – 10.5 мксек



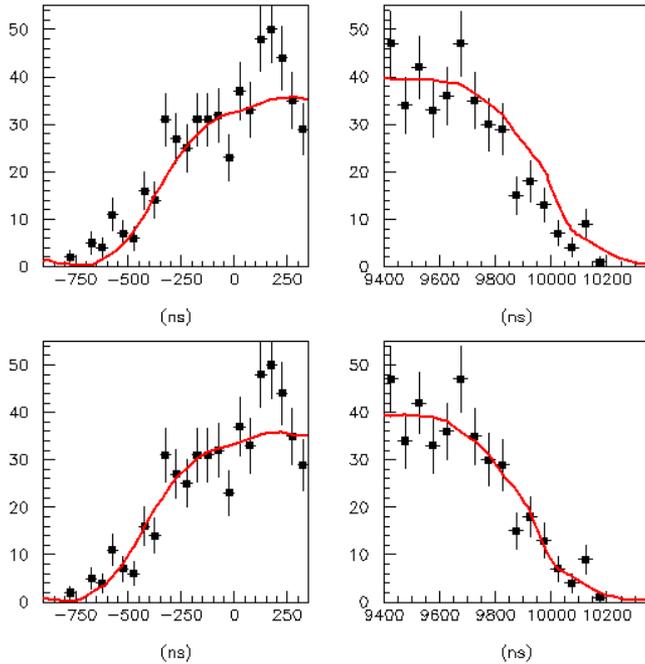
Красная линия
моделирование протонного пучка

Точки с ошибками
временное распределение
нейтринных событий



ZOOM: передний и задний фронт

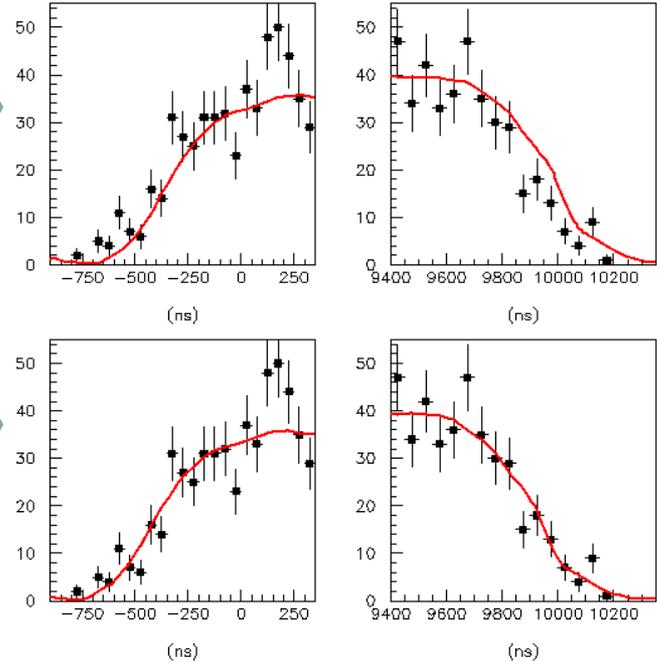
Extraction 1



Extraction 2

← $\delta t = 0 \text{ ns}$ →

← $\delta t = 60.7 \text{ ns}$ →



измеренная задержка – 987.8 нс

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v =$$

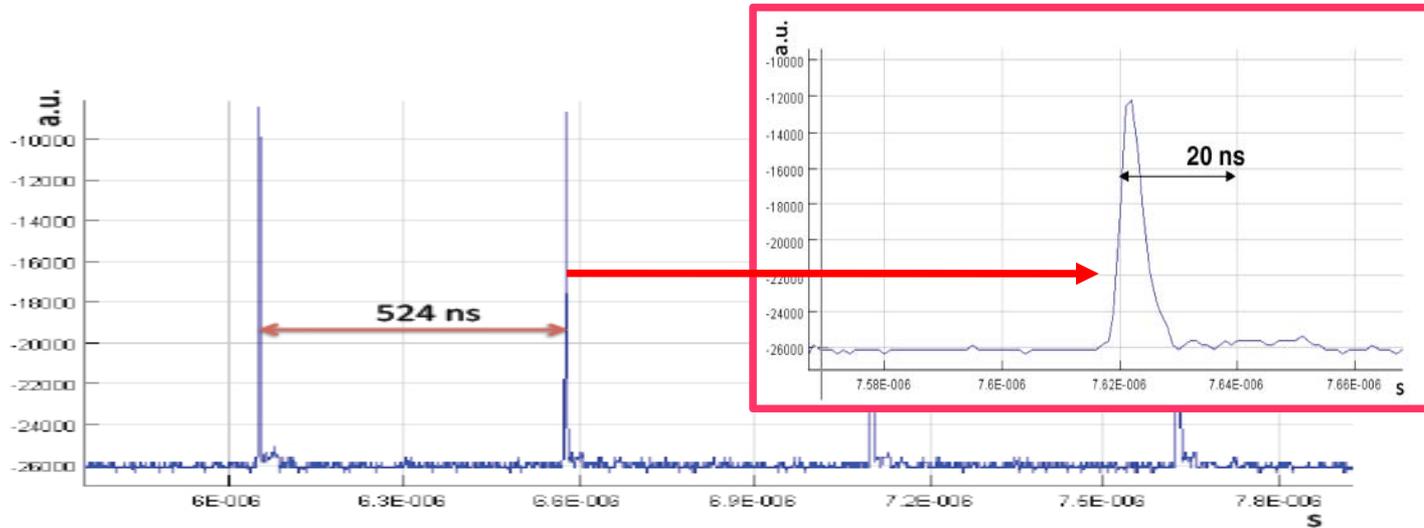
$$(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)}) \text{ ns} - 987.8 \text{ ns} = (60.7 \pm 6.9 \text{ (stat.)} \pm 7.4 \text{ (sys.)}) \text{ ns}$$

$$(v-c)/c = \delta t / (\text{TOF}_c - \delta t) = (2.49 \pm 0.28 \text{ (stat.)} \pm 0.30 \text{ (sys.)}) \times 10^{-5}$$

(730085 m used as neutrino baseline from parent mesons average decay point)

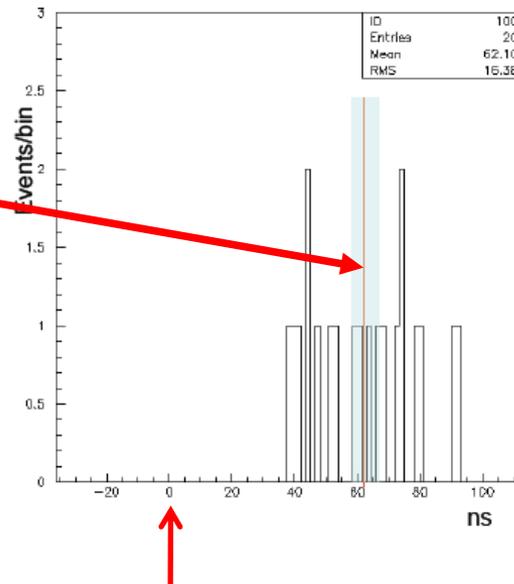


Результаты сеанса с пучком CNGS, состоящим из коротких микробанчей (29/10-12/11)



20 events
suitable for the
analysis
detected in
OPERA

62.1 ± 16.4 ns





Ближайшее будущее

2012 - 2015

Measurement of θ_{13}



+

Реакторные эксперименты:
Double Chooz, Франция
Reno, Корея
Daya Bay, Китай

+

MINOS+
OPERA



$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$$

$$\nu_e \rightarrow \nu_e$$

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$$

$\delta(\theta_{13}) \sim 1-2$ degrees



Отдаленное будущее

2016 →

Mass hierarchy

**Nova (FNAL)
SuperK**

CP violation

**T2K + HyperKamiokande
LAGUNA-LBNO (CERN to Pyhasalmi, Финляндия)
LBNE (FNAL)**

**Sterile
neutrinos**

**FNAL, short baseline experiments
 ν source Cr-51 (INR, Borexino, LENS...)
Reactor experiments with short baseline
CERN, detector LAr, short baseline**



Заключение

Осцилляции нейтрино



$m_\nu \neq 0$
large mixing
 $L_e, L_\mu, L_\tau \neq 1$

$\theta_{13} = ?$

Как близко значение θ_{23} к максимальной величине?

Почему смешивание нейтрино и смешивание кварков различно?

ν : дираковские или майорановские частицы?

Абсолютная шкала масс нейтрино?

Нормальная или инверсная иерархия?

CP нарушение в нейтринном секторе?

Стерильные нейтрино, нестандартные взаимодействия...?

Ненулевая масса нейтрино → однозначное доказательство существования осязаемой Новой Физики за рамками Стандартной Модели, но истинная природа этой физики все еще скрыта для нас

спасибо за внимание!