

Нейтринные осцилляции: последние результаты и ближайшие перспективы

Ю.Г. Куденко

ИЯИ РАН

Семинар по ядерной физике НИИЯФ МГУ
29 ноября 2011



План

Стандартная модель и нейтрино
Осцилляции:

- основные понятия
- эксперименты

Угол смешивания θ_{13} и CP нарушение

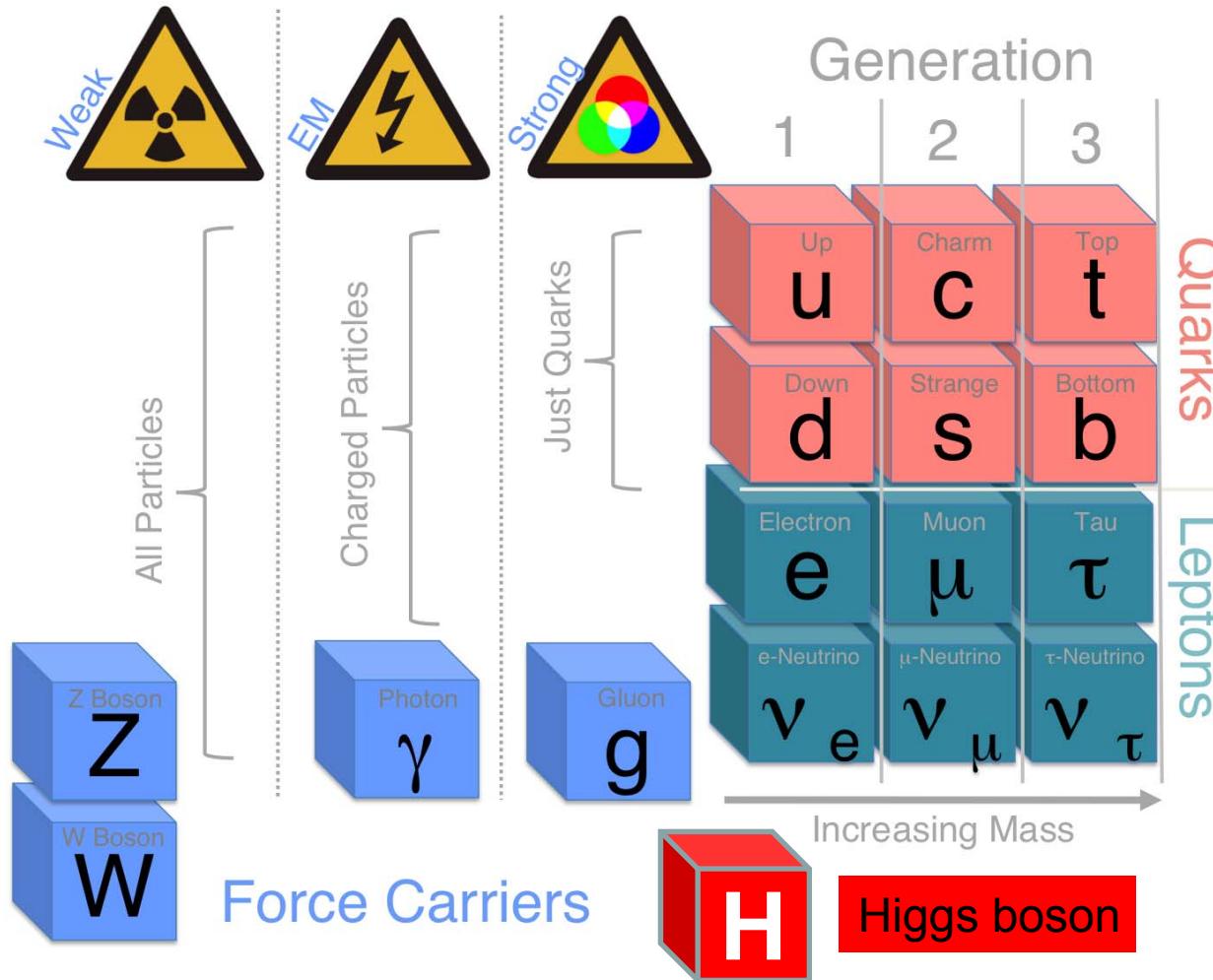
Эксперимент T2K

Нейтринные сюрпризы



Элементарные частицы

Стандартная модель





Лептоны

Спин лептонов: $s = 1/2$

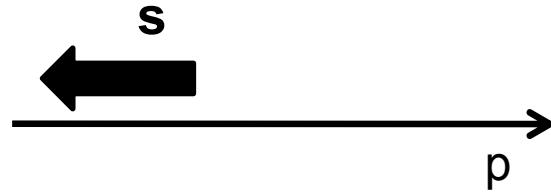
Спиральность – проекция спина на направление импульса частицы

фермионы

$$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R \quad d_R$$

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \quad e_R$$

нейтрино



левополяризованный частица
левая спиральность

антинейтрино



правополяризованный античастица
правая спиральность

Только левополяризованные нейтрино и правополяризованные антинейтрино участвуют в слабом взаимодействии

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



Дискретные симметрии

зарядовое сопряжение

C

частица \leftrightarrow античастица

пространственная инверсия

P

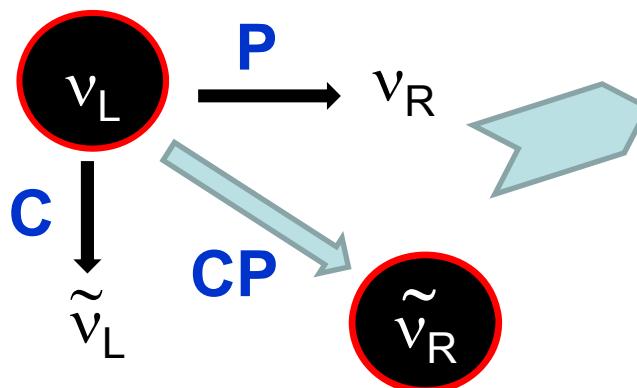
$x, y, z \leftrightarrow -x, -y, -z$

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

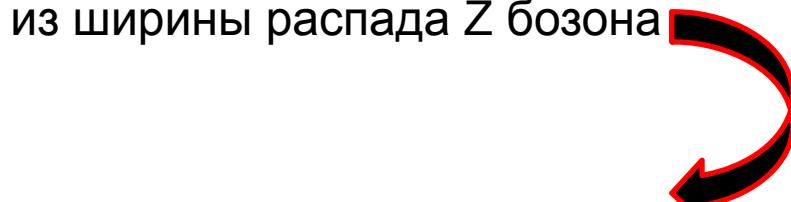
Сохраняются лептонные числа L_e L_μ L_τ

Невозможны переходы (осцилляции) одного типа нейтрино в другой

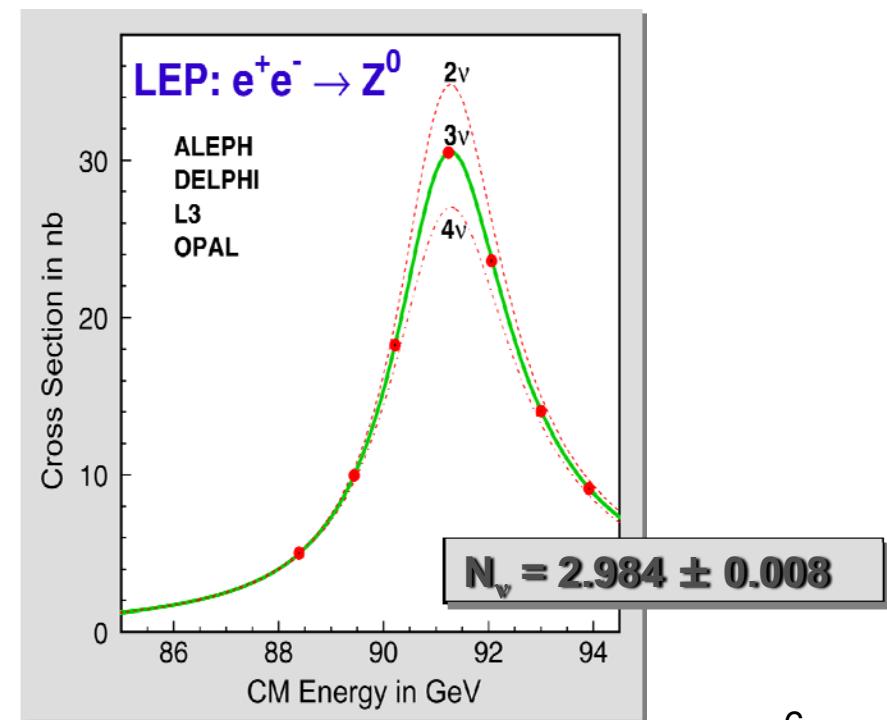
СР в лептонном секторе сохраняется

Эксперименты на LEP (ЦЕРН):

из ширины распада Z бозона



три типа легких активных нейтрино





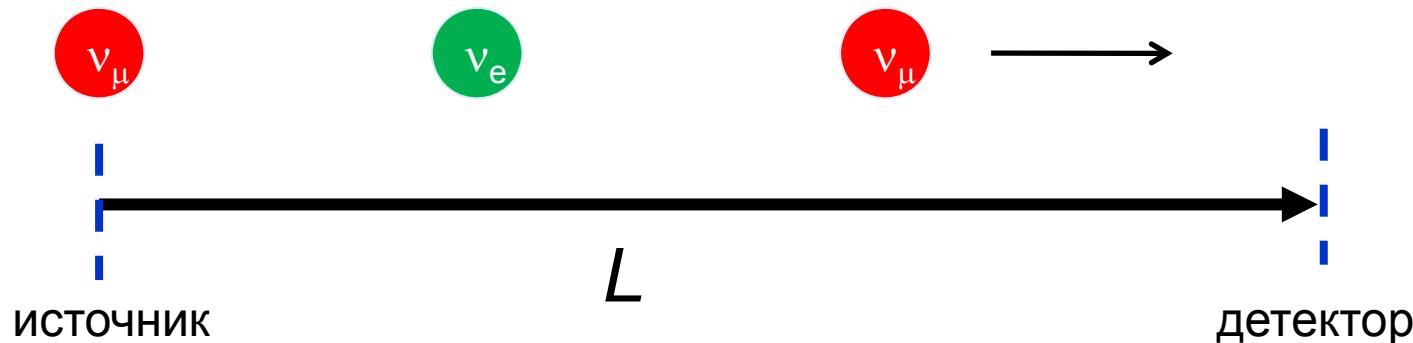
Гипотеза нейтринных осцилляций

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

ν_e

ν_μ

ν_τ

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

m_1 массовые состояния

m_2

m_3

Three green circles at the top left represent the active states of the weak interaction: ν_e , ν_μ , and ν_τ . To their right is an equation showing the transition from these active states to mass eigenstates. The matrix U transforms the three active states into three yellow circles of increasing size, labeled ν_1 , ν_2 , and ν_3 from top to bottom. To the right of the mass eigenstates, the text 'массовые состояния' is followed by m_1 , m_2 , and m_3 , representing the masses of the neutrinos.

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

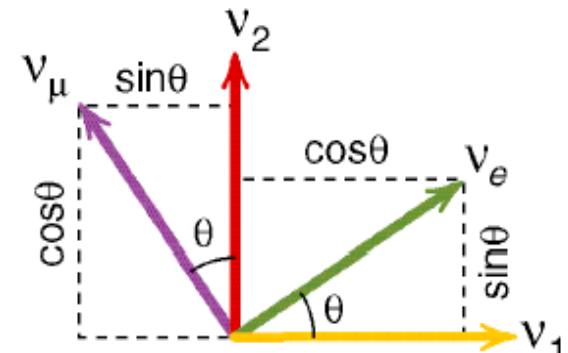
Тогда матрица смешивания определяется
одним параметром θ

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

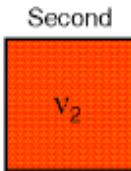
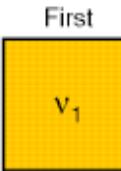
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

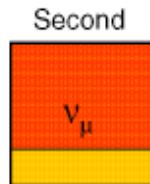
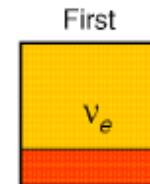
$$\nu_\mu = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$



Mass states

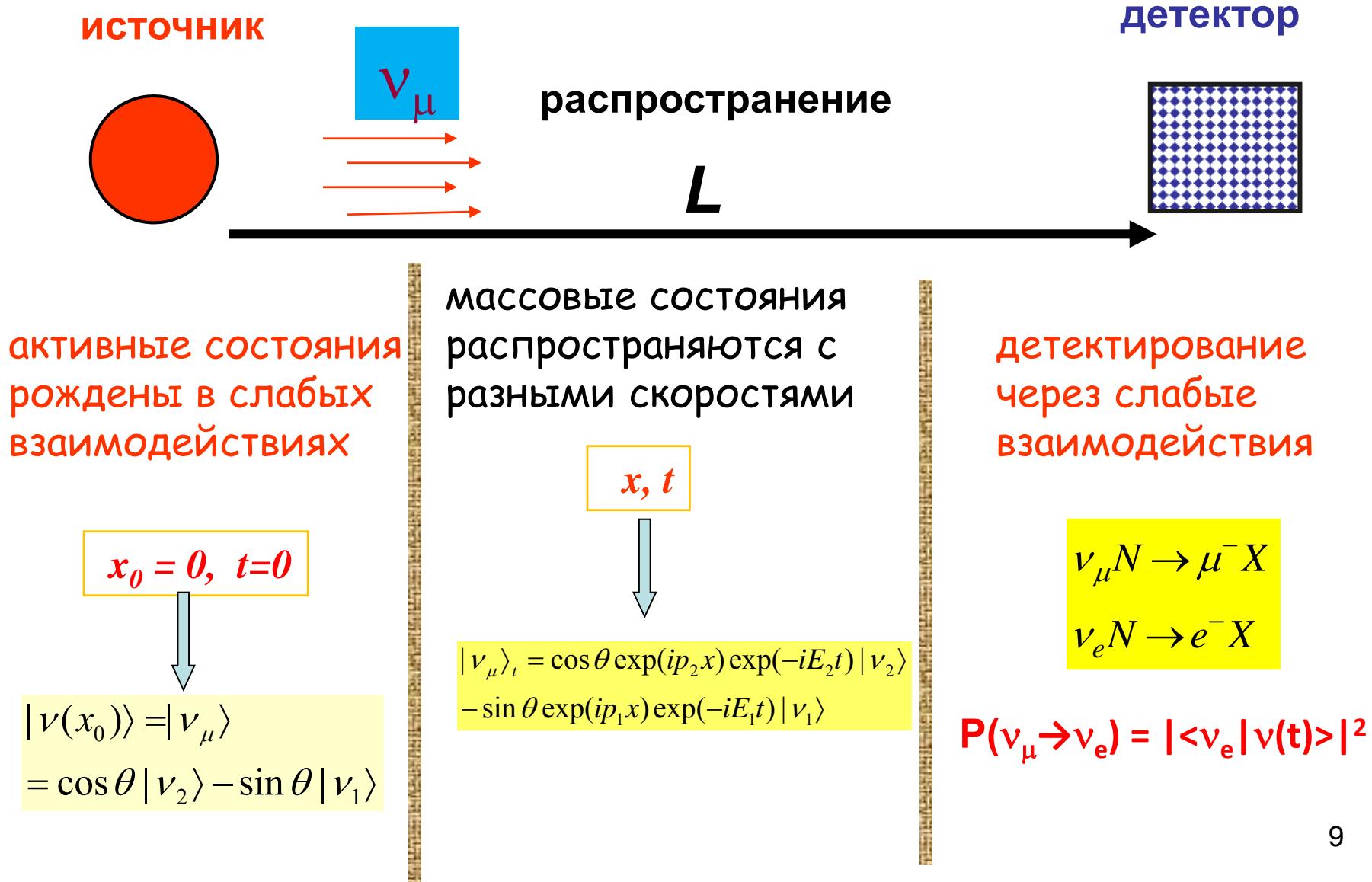


Weak states



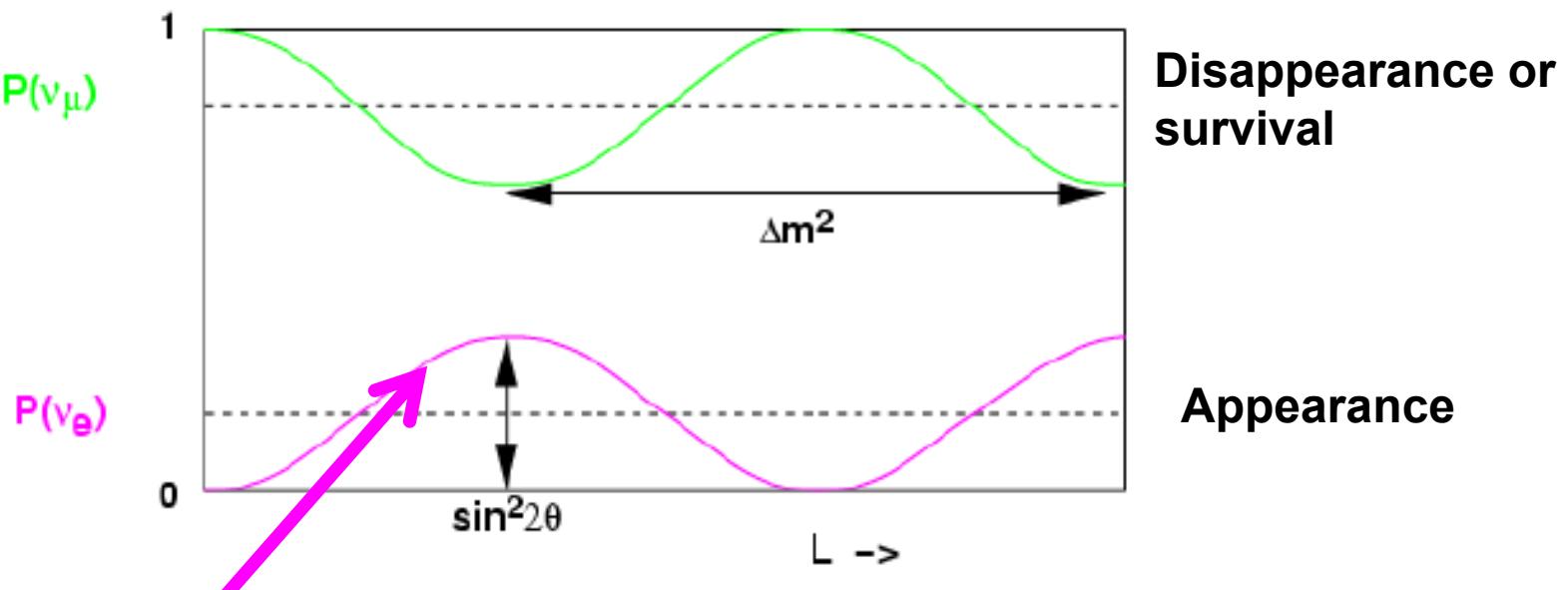


Осцилляции нейтрино





Осцилляционные эксперименты: Appearance and Disappearance



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

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



Осцилляционная индустрия

Homestake, США

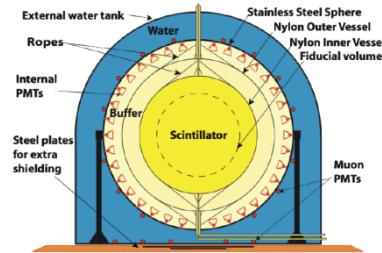


Солнечные
нейтрино

Sage, Россия



Borexino, Италия

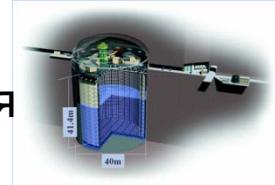


Gallex
SNO
SK

1970

Атмосферные
нейтрино

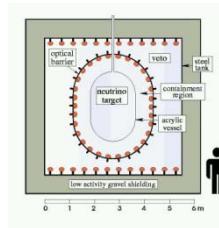
SK, Япония



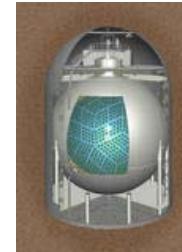
MACRO, Италия
Soudan2, США

Реакторные
нейтрино

CHOOZ,
Франция



KamLand,
Япония



Ускорительные
нейтрино

K2K, Япония



Minos, США



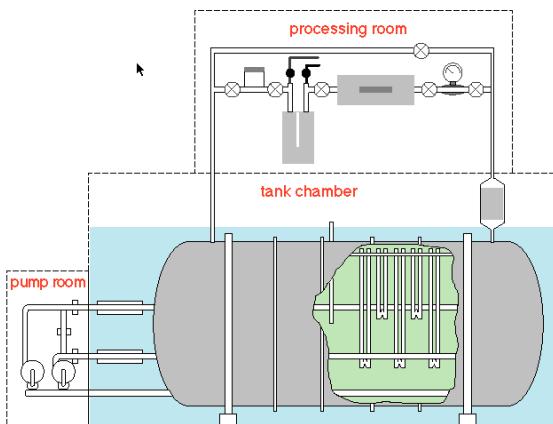
OPERA, Италия



LSND,
MiniBooNe,
США

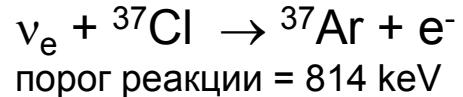


солнечные ν : Homestake

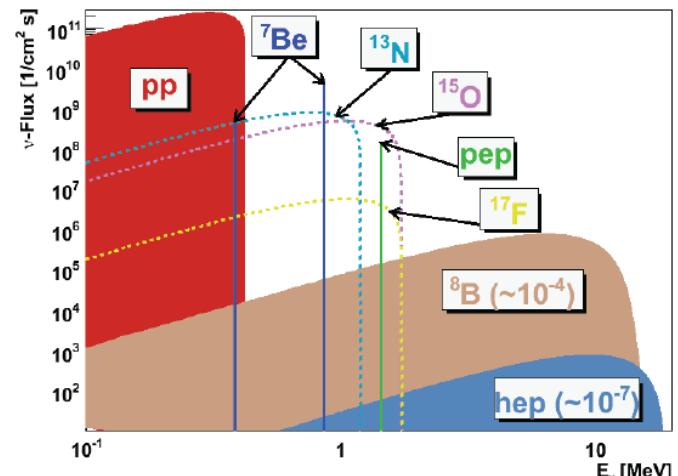


$615 \text{ t } \text{C}_2\text{Cl}_4$

Измерения с 1970



$t_{1/2}({}^{37}\text{Ar}) = 25 \text{ дн}$
 2.62 keV электроны Оже
 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: $2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU}$
 SSM: $8.1 \pm 1.3 \text{ SNU}$

SNU = 1 capture/(10^{36} atoms x 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



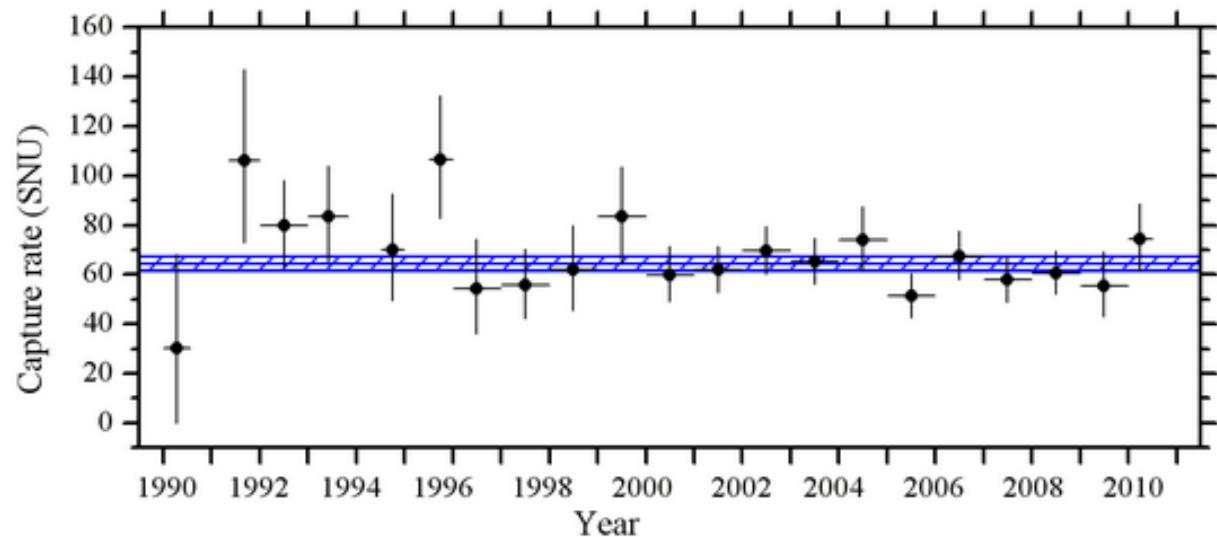
Реакторы ГГНТ

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

7 reactors with $\sim 50 \text{ t}$ of metallic Ga

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

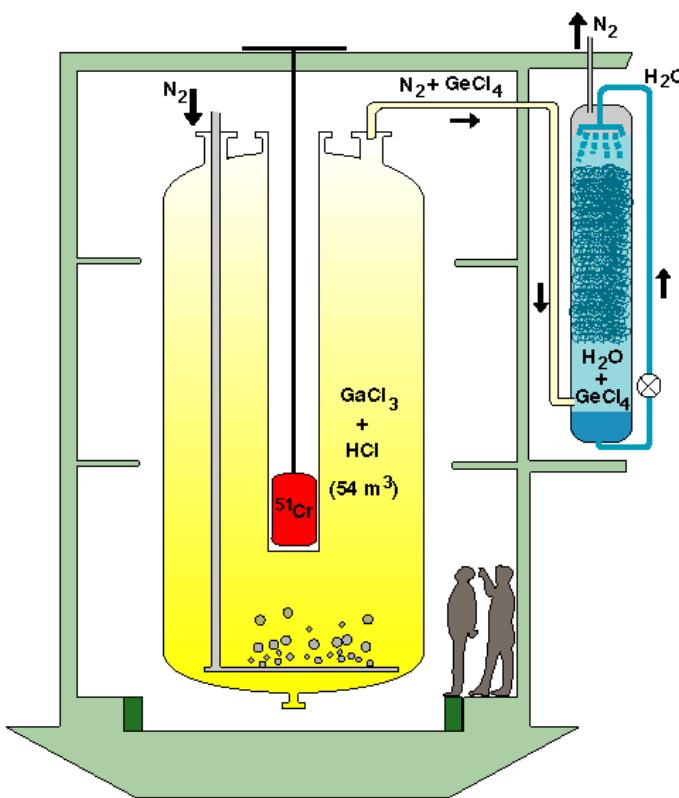
Capture rate
Experiment: $64.6 \pm 3.8 \text{ SNU}$
SSM: 128 SNU



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

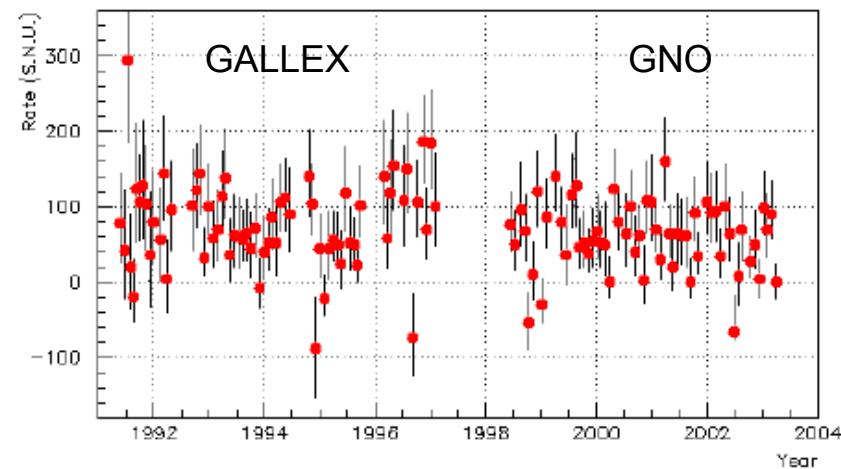


GALLEX/GNO



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

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

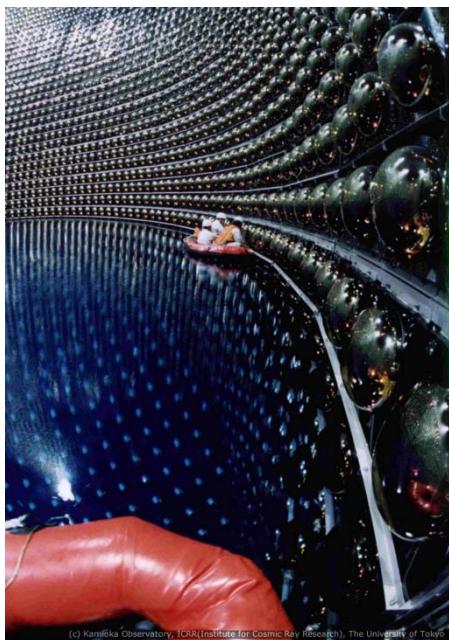


GALLEX + GNO: $69.3 \pm 5.5 \text{ SNU}$

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



СуперКамиоканде



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



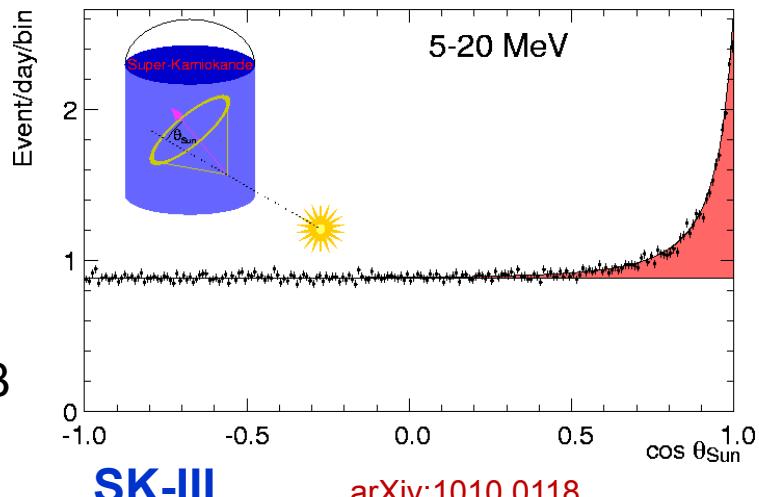
$$E_{\text{th}}(e) = 6.5 \text{ МэВ} \rightarrow 5.0 \text{ МэВ}$$

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



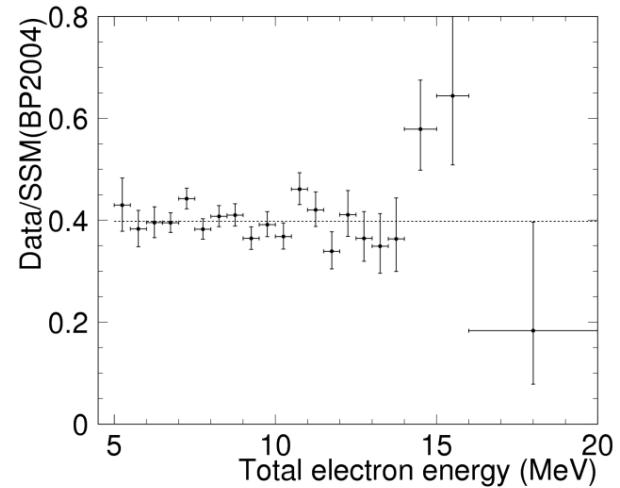
~0.4 от потока SSM

Угловое распределение
солнечных нейтрино в SK



SK-III

arXiv:1010.0118



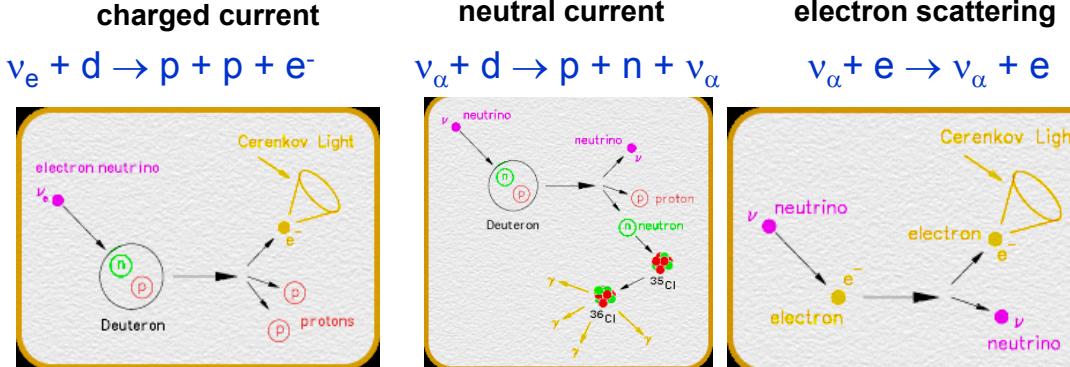
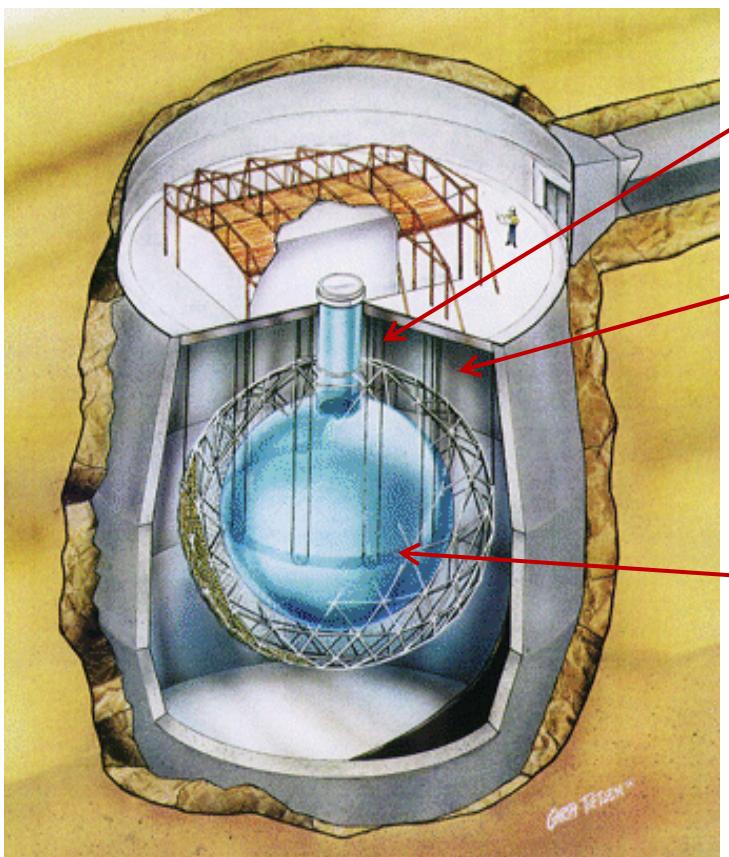


SNO

Взаимодействие солнечных нейтрино с D₂O

Sudbury, Ontario, Canada

Детектор чувствителен к
⁸B солнечным нейтрино

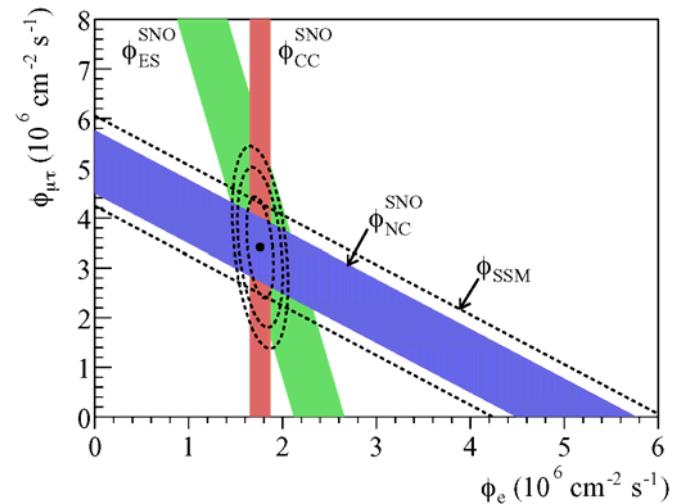


1000 t D₂O

1700 t Inner
Shielding H₂O

5300 t Outer
Shield H₂O

Phys.Rev.Lett. 89 (2002) 011301



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

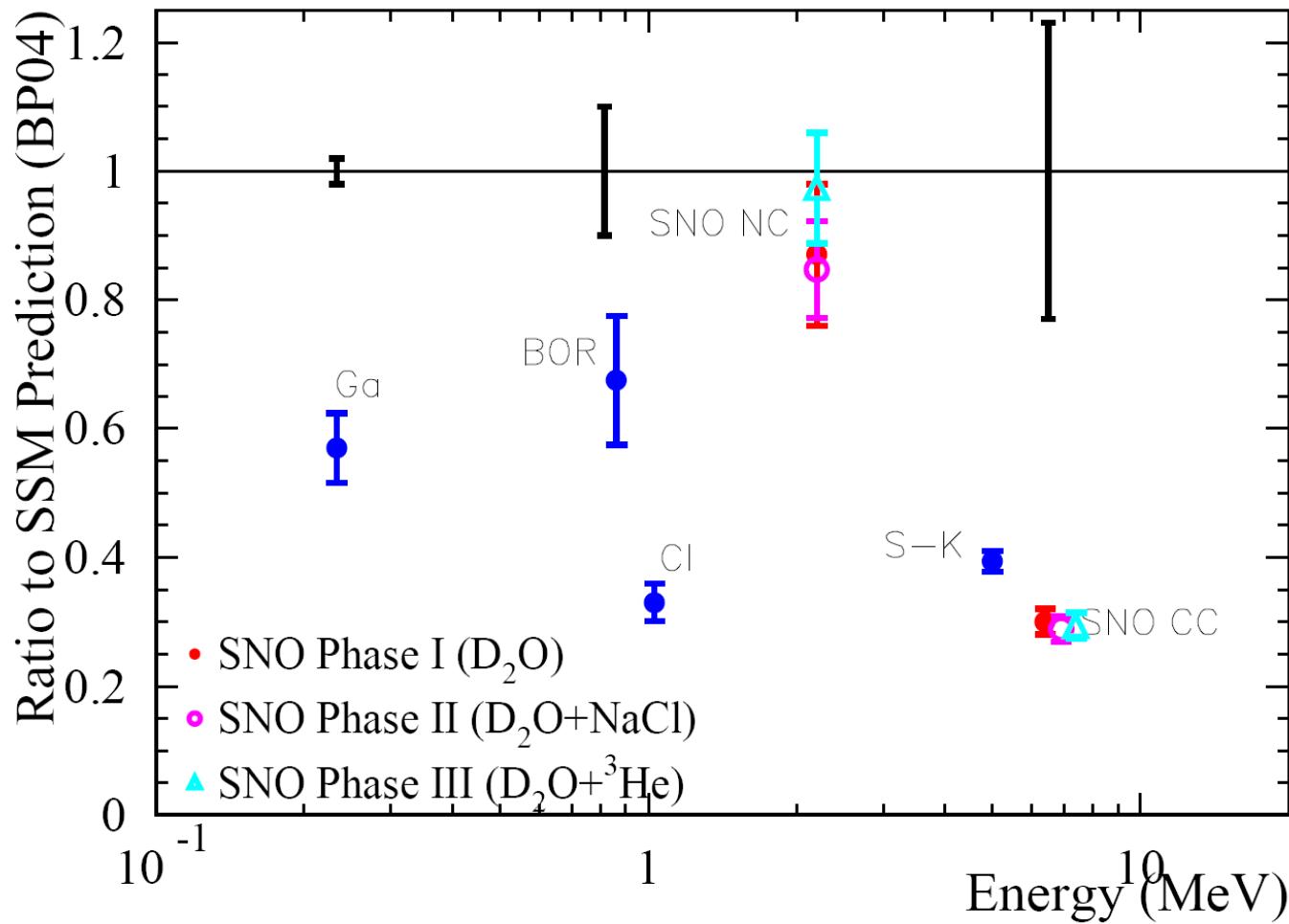
16



Измерения солнечных ν

Global Summary

A. Hallin, talk at PIC 2010





KamLAND

Расположен в камере Kamiokande

~ 140-210 км от 53 реакторов

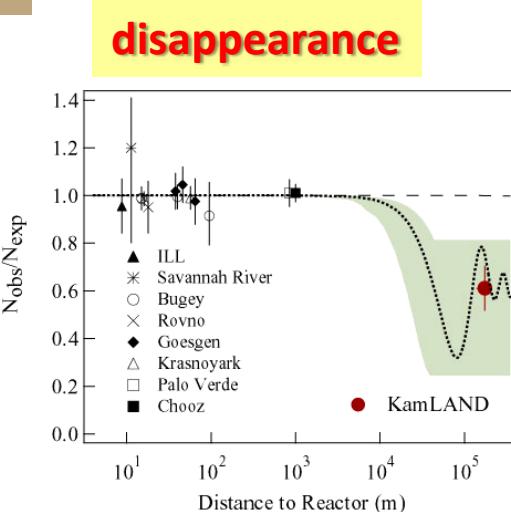
Среднее расстояние = 180 км



1200 m³ of liquid scintillator



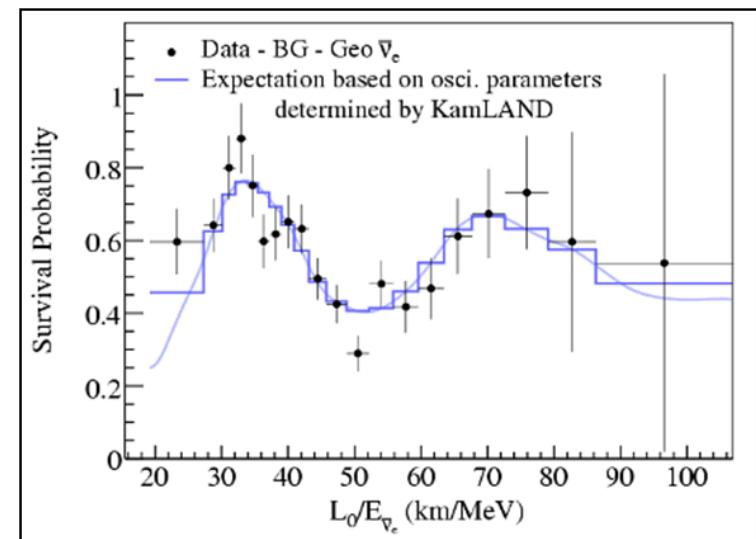
Порог регистрации
2.6 МэВ



Реакторный эксперимент с длинной базой

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

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



предполагая СРТ= 1

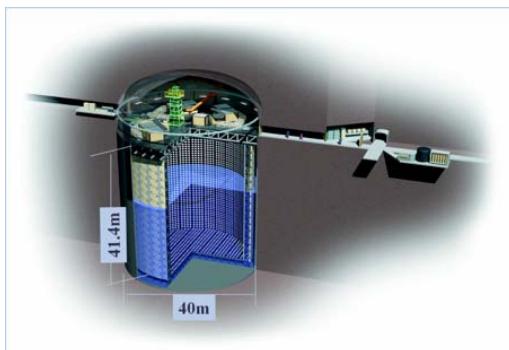
Solar + KamLAND комбинация

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

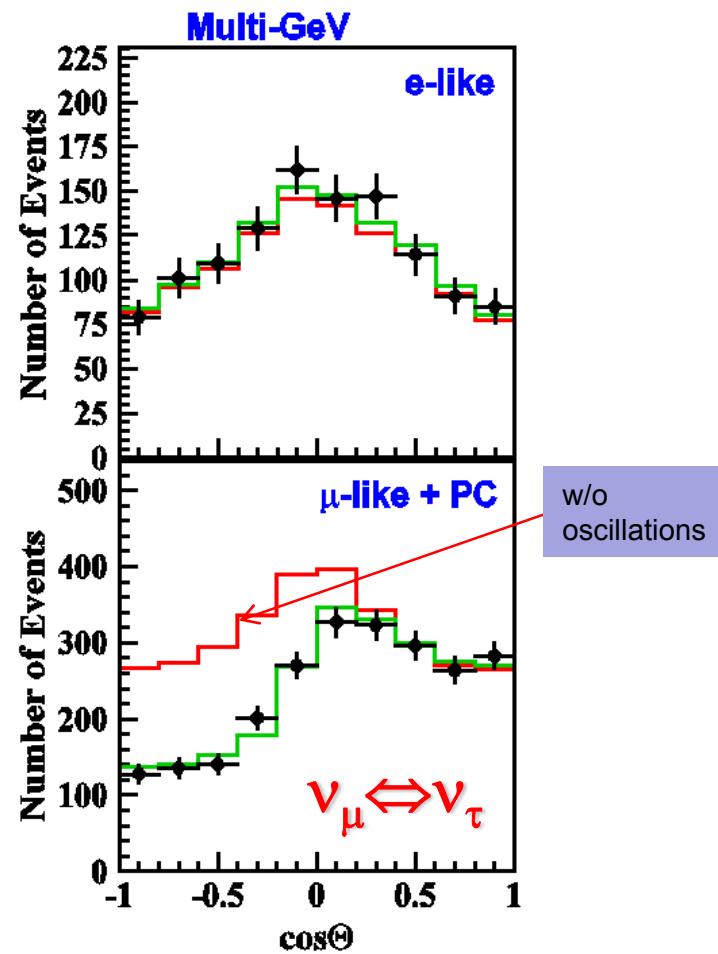
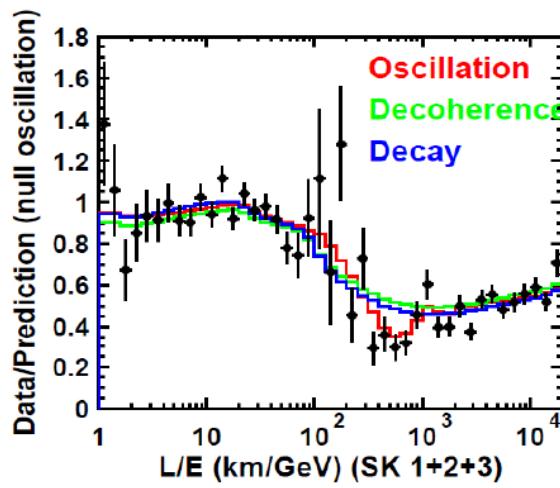
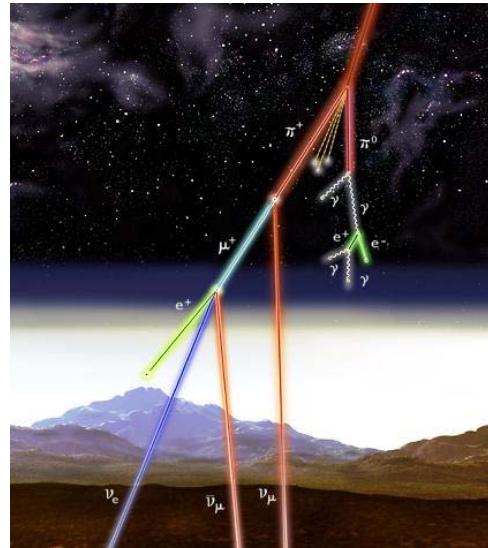
$$\Delta m^2_{21} = 7.59^{+0.21}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$



SuperKamiokande: атмосферные ν



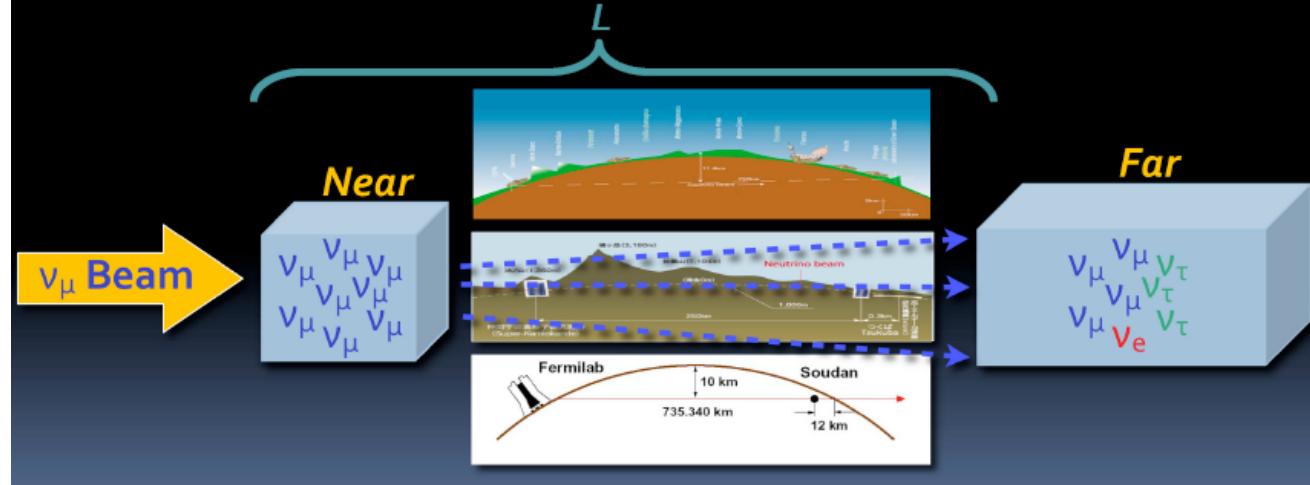
Roughly
 $\nu_e : \nu_\mu \sim 1:2$





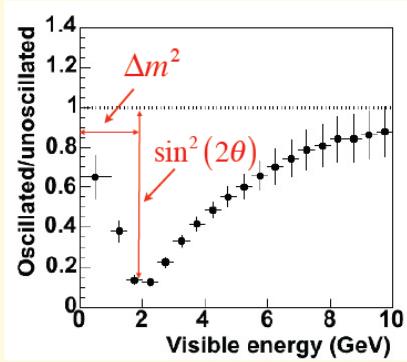
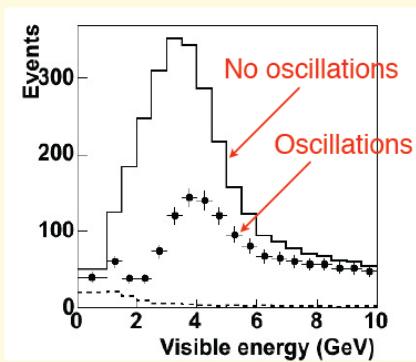
Ускорительные эксперименты с длинной базой

- 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



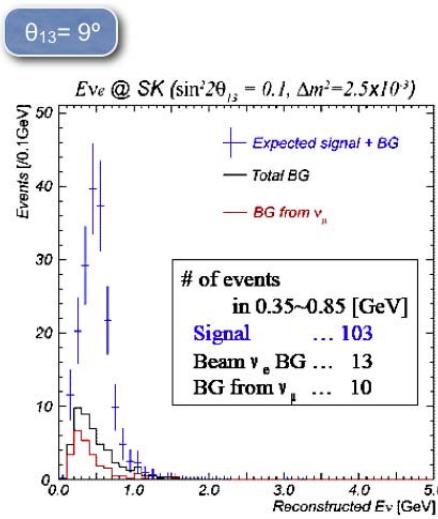
- Far/Near comparison largely cancels systematic errors

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



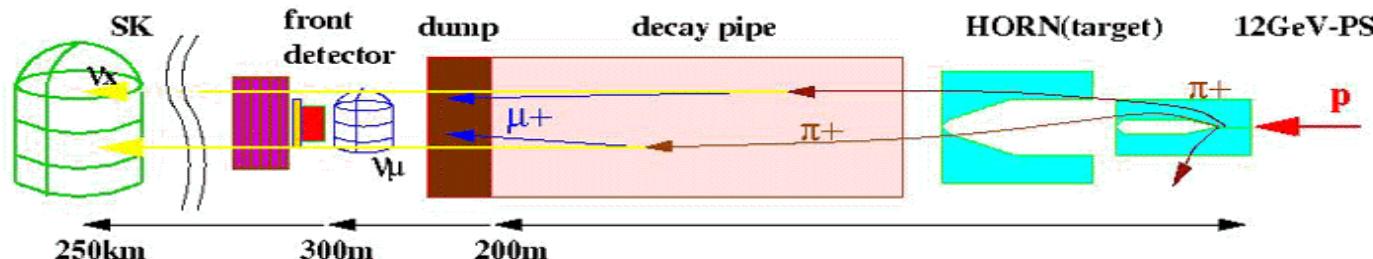
Size of dip gives the mixing angle; location of dip Δm^2

Parameters used in this example: $\sin^2(2\theta) = 1$, $\Delta m^2 = 3.35 \times 10^{-3}$ eV²



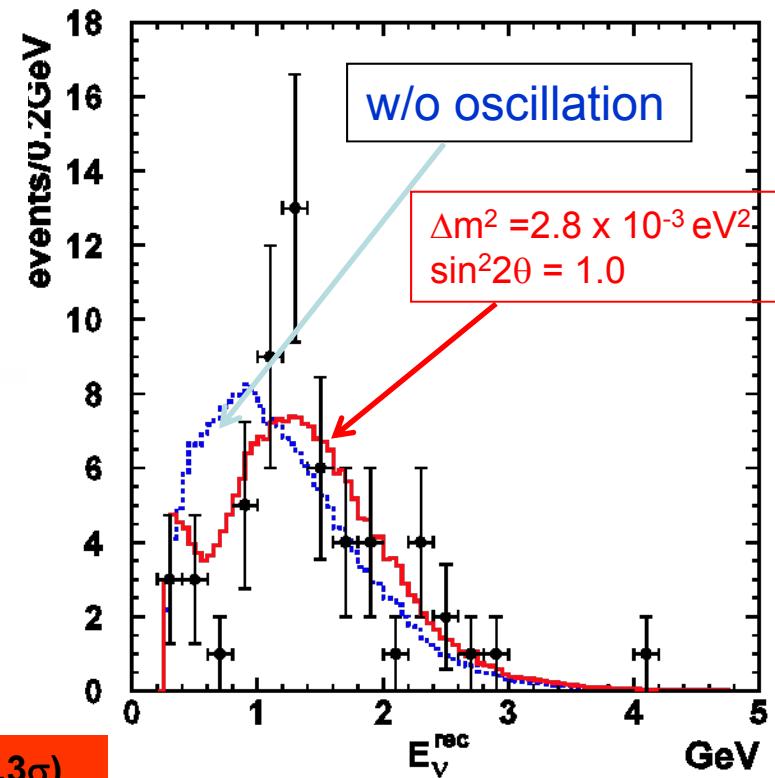


К2К: первый эксперимент с длинной базой



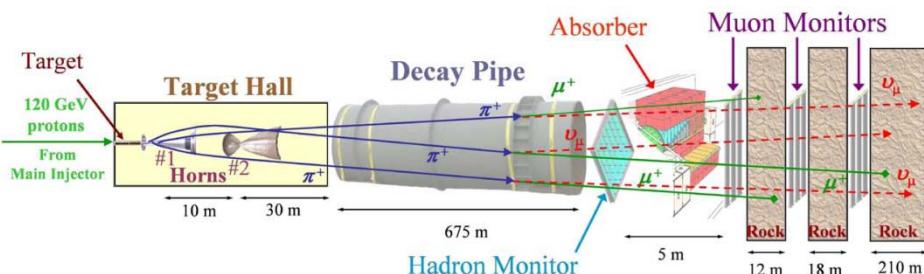
К2К подтвердил результат SK :
Осцилляции атмосферных нейтрино

Вероятность отсутствия осцилляций = 0.050% (4.3 σ)



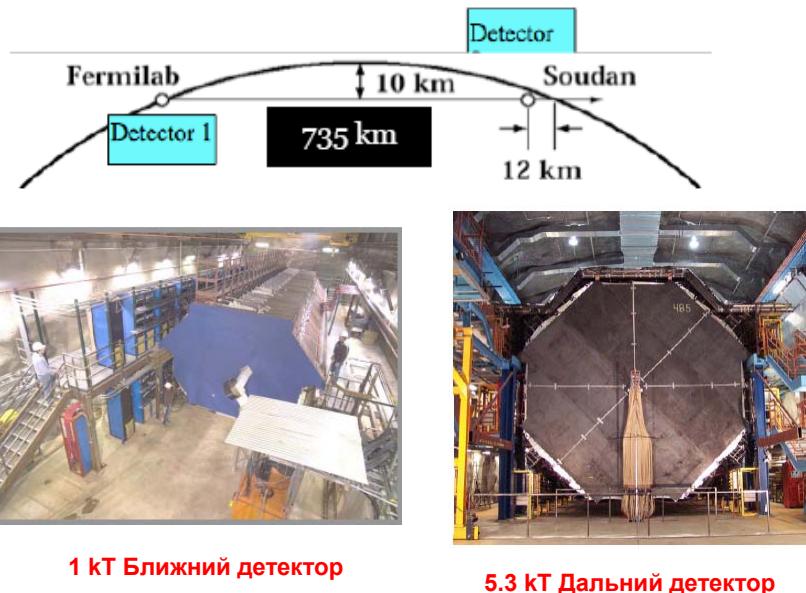


MINOS

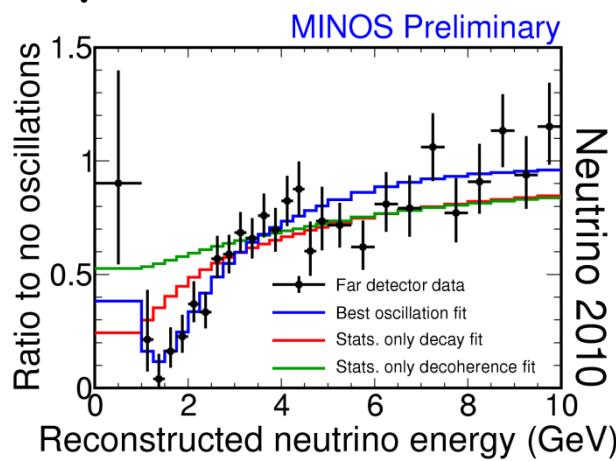
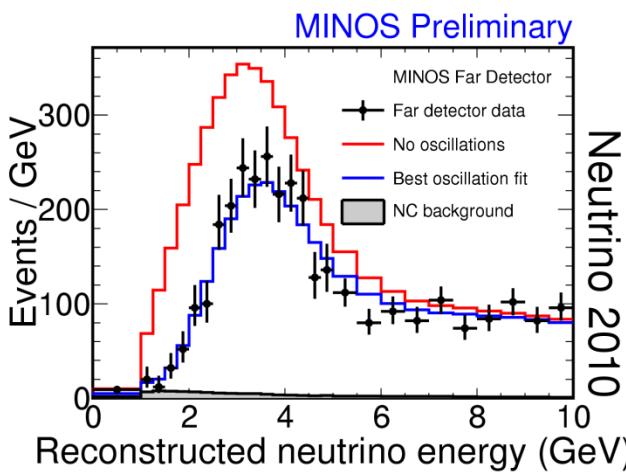


Протонный пучок: 120 ГэВ

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 ожидались в отсутствие осцилляций**



Far Detector
5.4 kton magnetized Fe/Sci Tracker/Calorimeter
Near Detector
980 ton at L ≈ 1 km
the same technology in both detectors

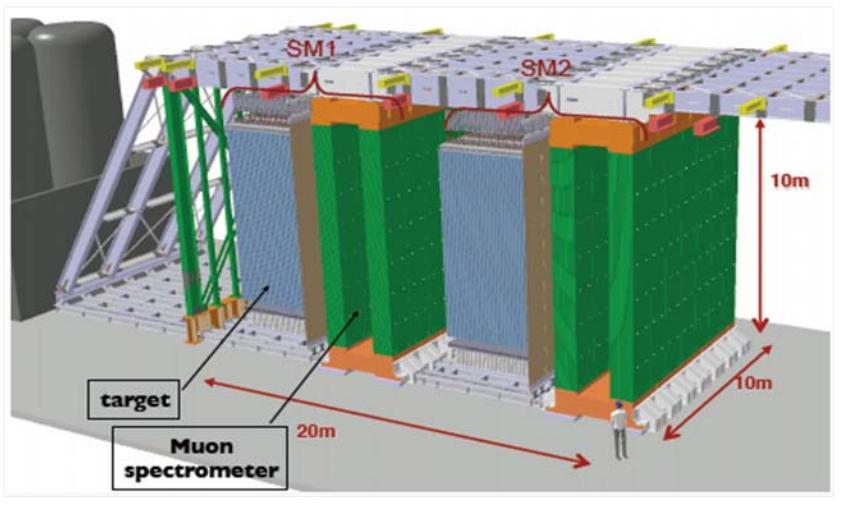
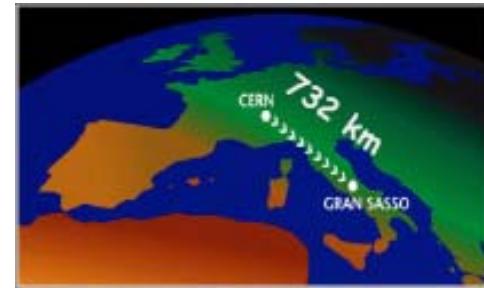
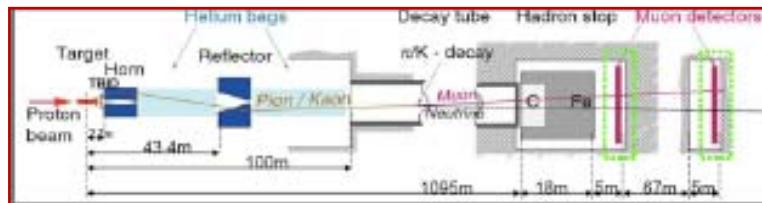
$$\Delta m^2 = (2.35 \pm 0.11 - 0.08) \times 10^{-3}$$

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

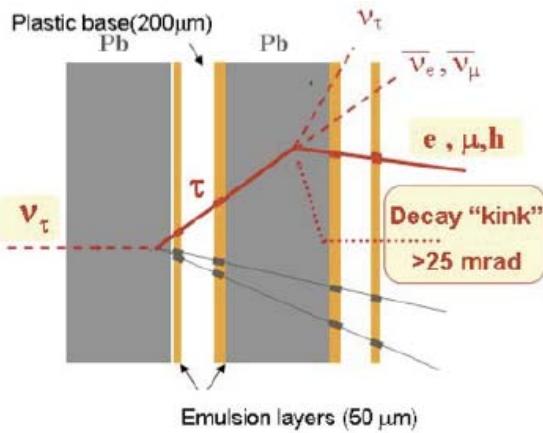


OPERA

Цель: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



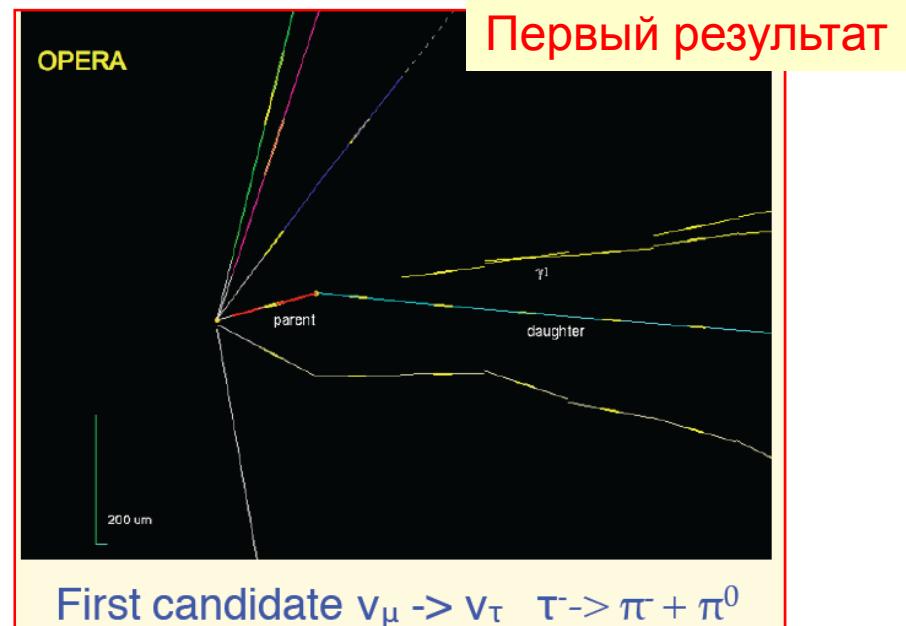
target: lead/emulsion bricks



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]

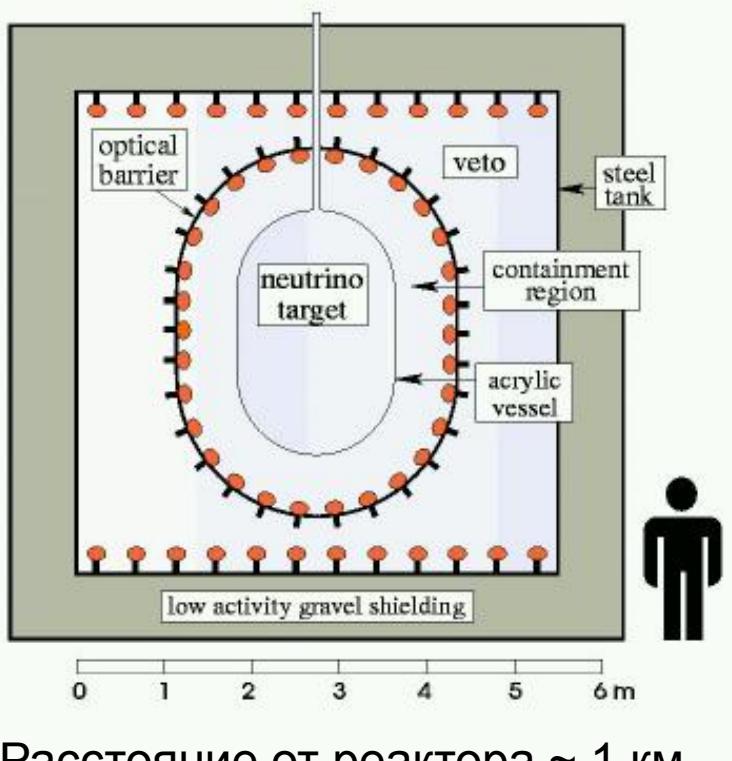


Реакторный эксперимент CHOOZ

Атомная станция Chooz, Франция

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

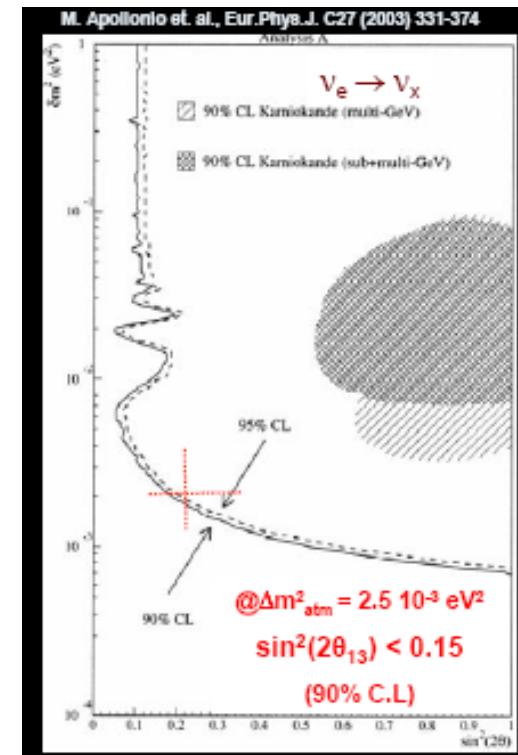
0.09% Gd loaded scintillator



Расстояние от реактора ~ 1 км

Масса детектора 5 т

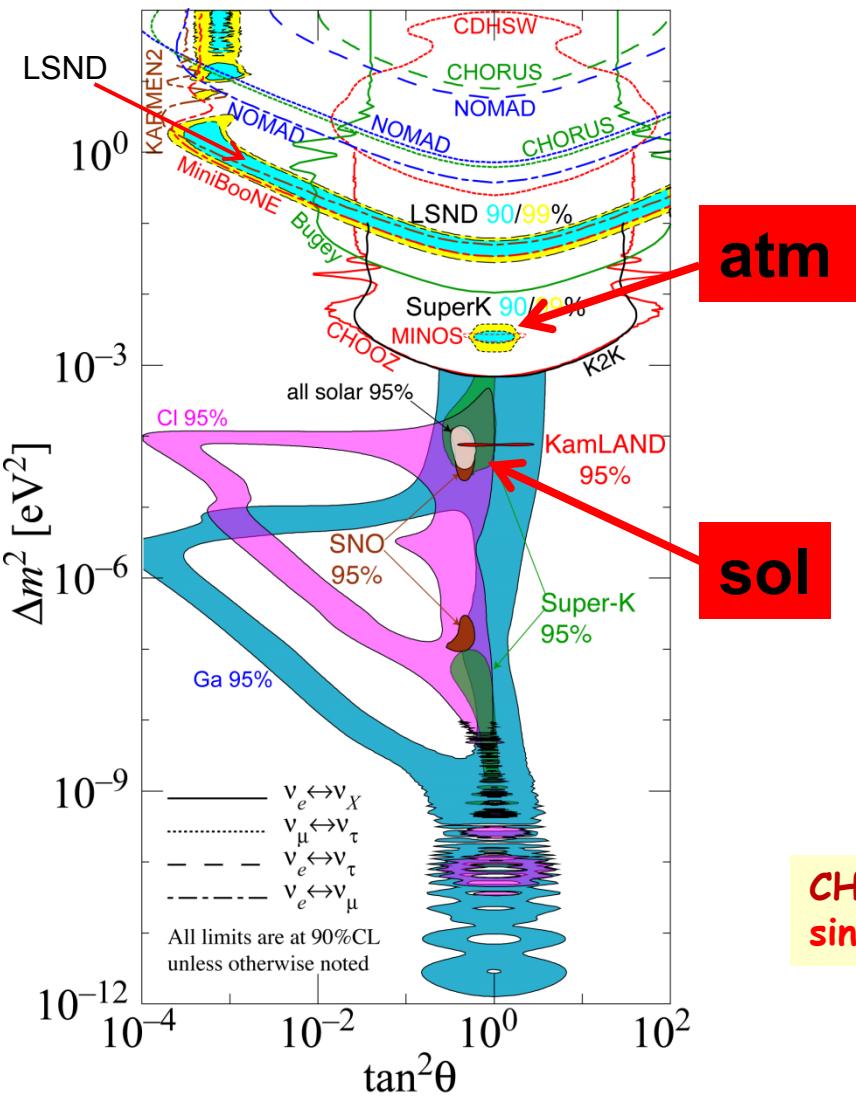
- anti- $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$,
- $\langle E_\nu \rangle \sim 4 \text{ MeV}$, $E_{\text{thr}} = 1.8 \text{ MeV}$
- Disappearance experiment: search for a departure from the $1/D^2$ behavior
+ shape distortion



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

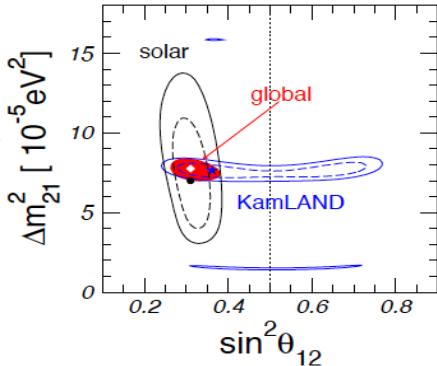


Экспериментальные результаты

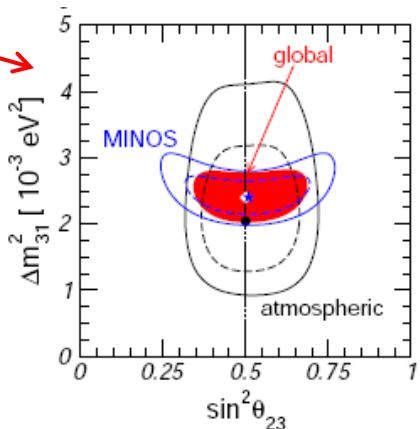
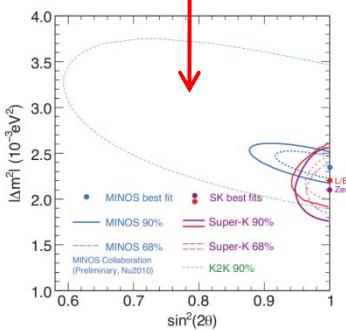


<http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino>

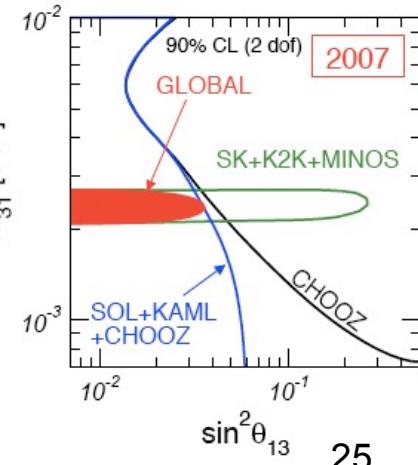
Solar + KamLAND



SK + K2K + MINOS



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





ν : осцилляции и смещивание

Стандартная Модель: масса нейтрино = 0

3 типа ν

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

$$U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$

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 смещивания θ_{12} θ_{23} θ_{13} и СР нечетная фаза δ

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

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

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

Two unknown parameters: θ_{13} and δ



Проблемы

- Абсолютная шкала масс
- Смешивание нейтрино $\theta_{13} = ? \rightarrow \text{CP нарушение ?}$
- Иерархия масс $\Delta m^2_{23} > 0 \text{ or } \Delta m^2_{23} < 0$
- Дираковские или Майорановские частицы
- LSND/MiniBooNe аномалия, стерильные нейтрино

T2K

.....

.....



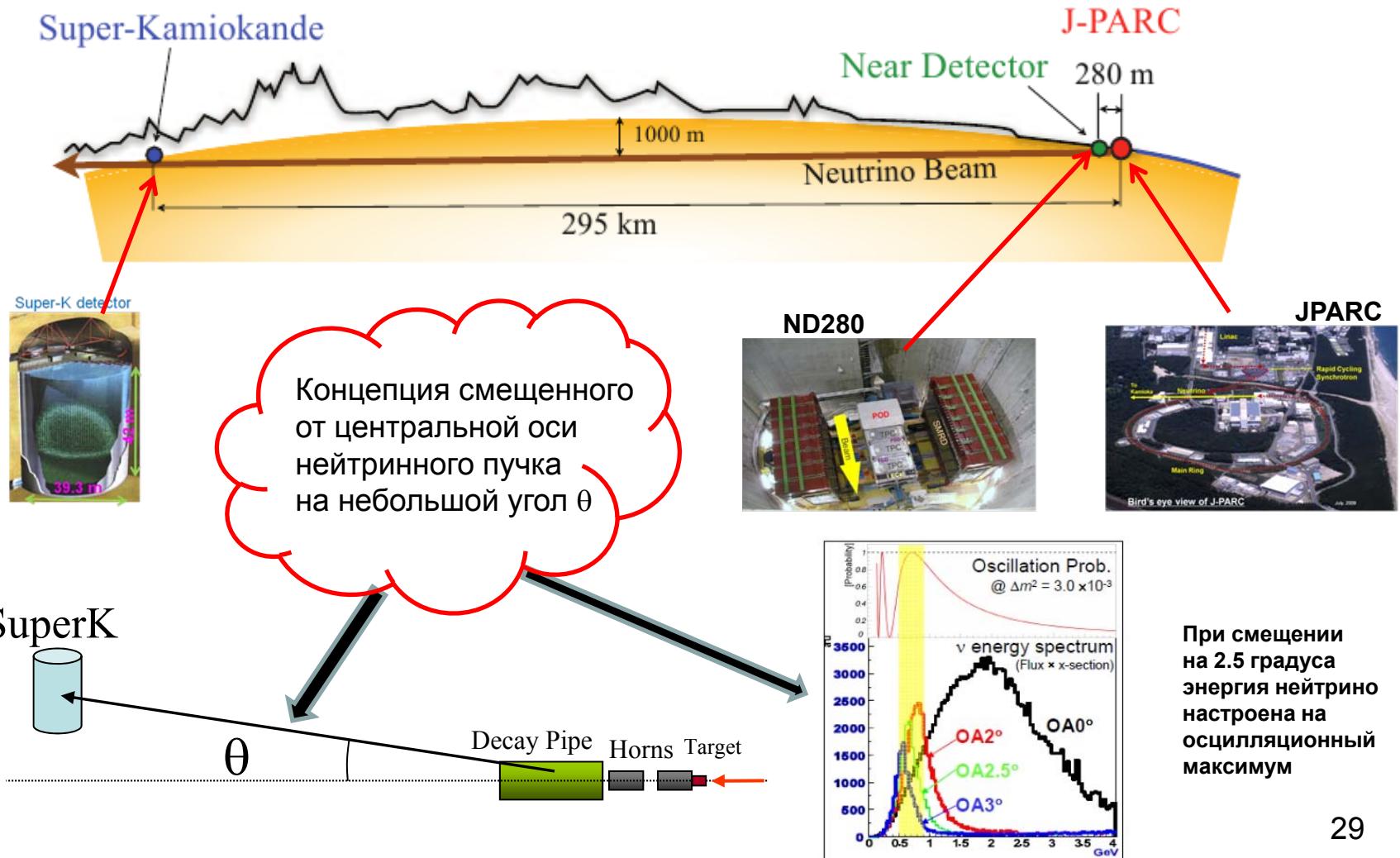
Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment





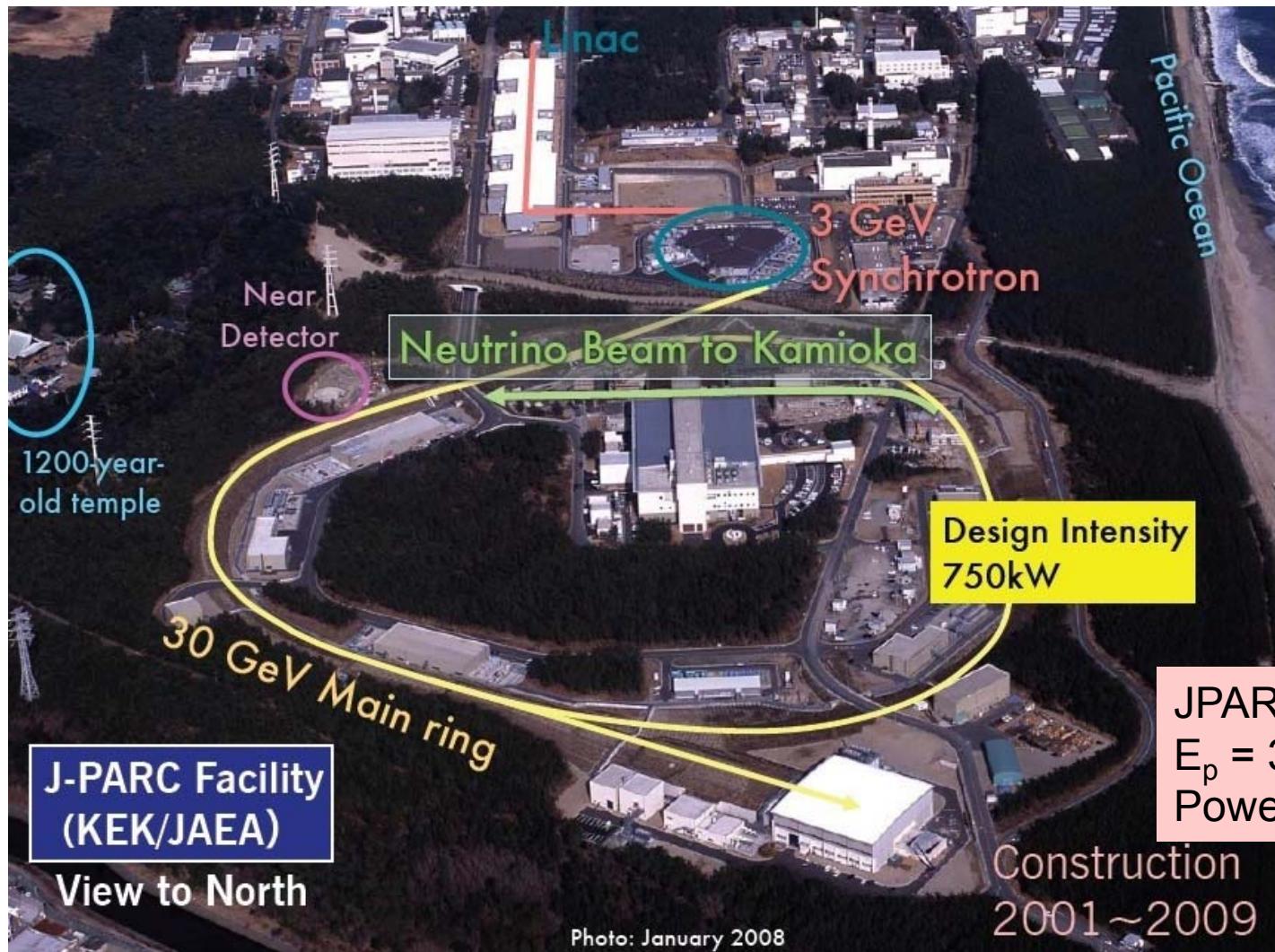
T2K: - поиск $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ - измерение θ_{13} - CP - нарушение

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



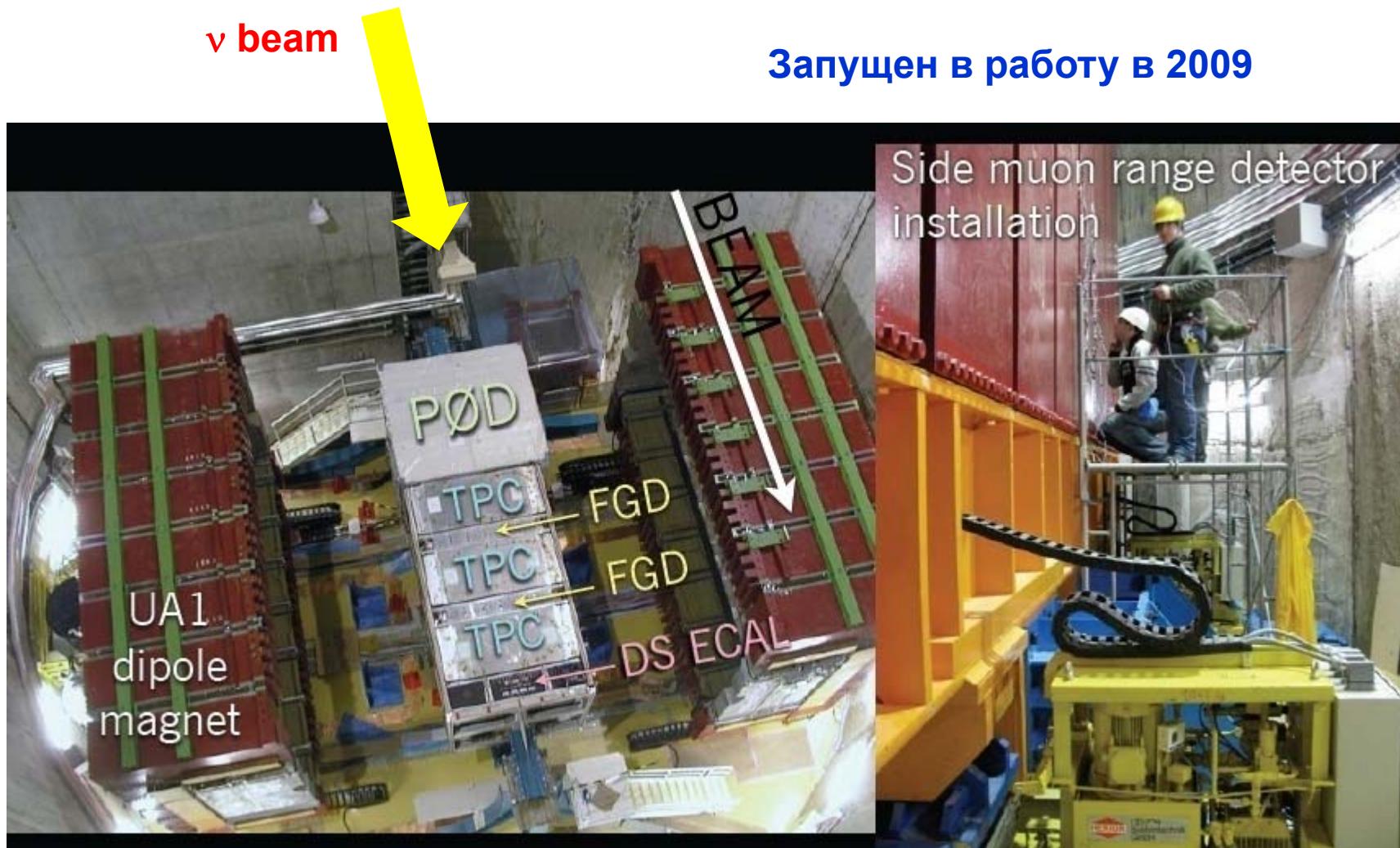


JPARC





ND280 off-axis



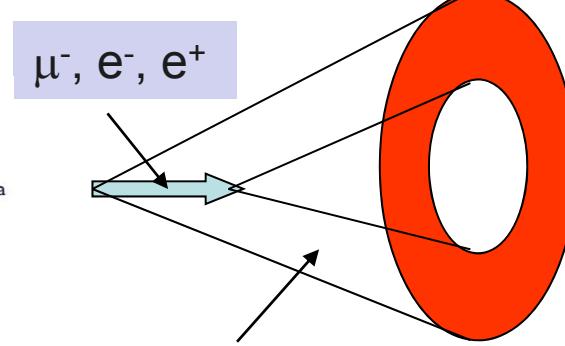
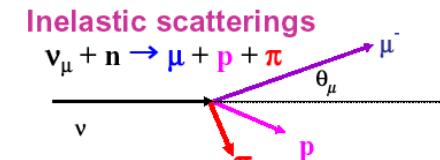
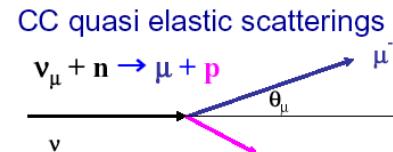
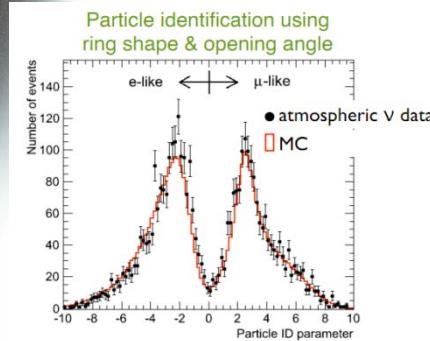
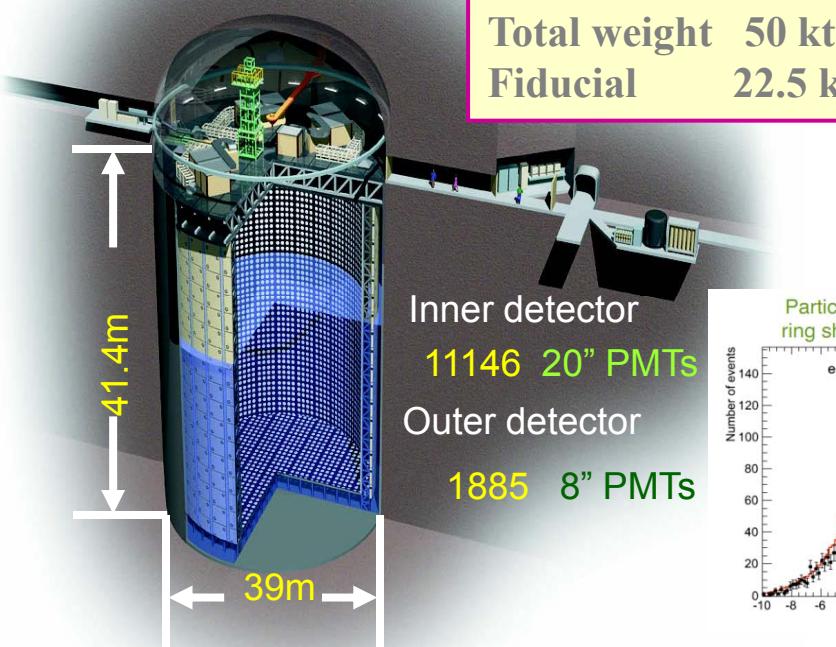


Дальний детектор

Super-Kamiokande IV

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

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



Черенковский конус

Основные фоны:

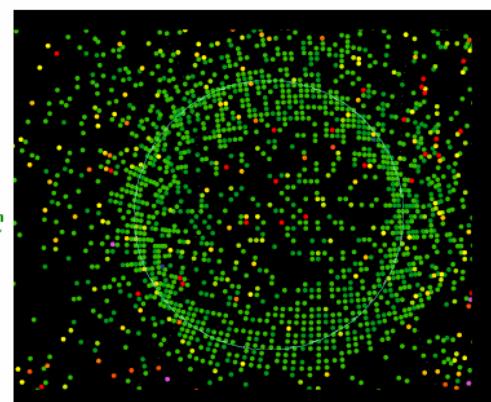
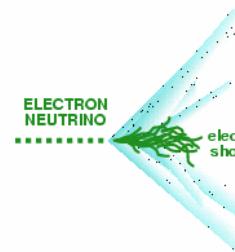
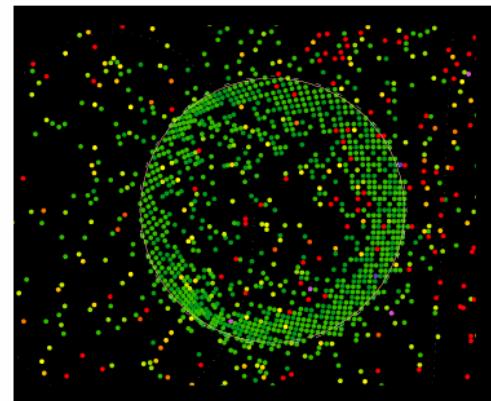
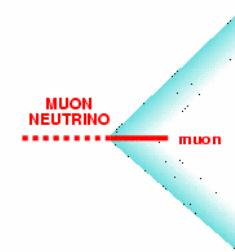
- π^0 от нейтральных токов – подавление ~100
- примесь ν_e в пучке ν_μ – ~0.4% в максимуме спектра



Идентификация частиц в SK

PID from ring topology (“fuzziness”)

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



Временные параметры T2K

$L = 295$ км

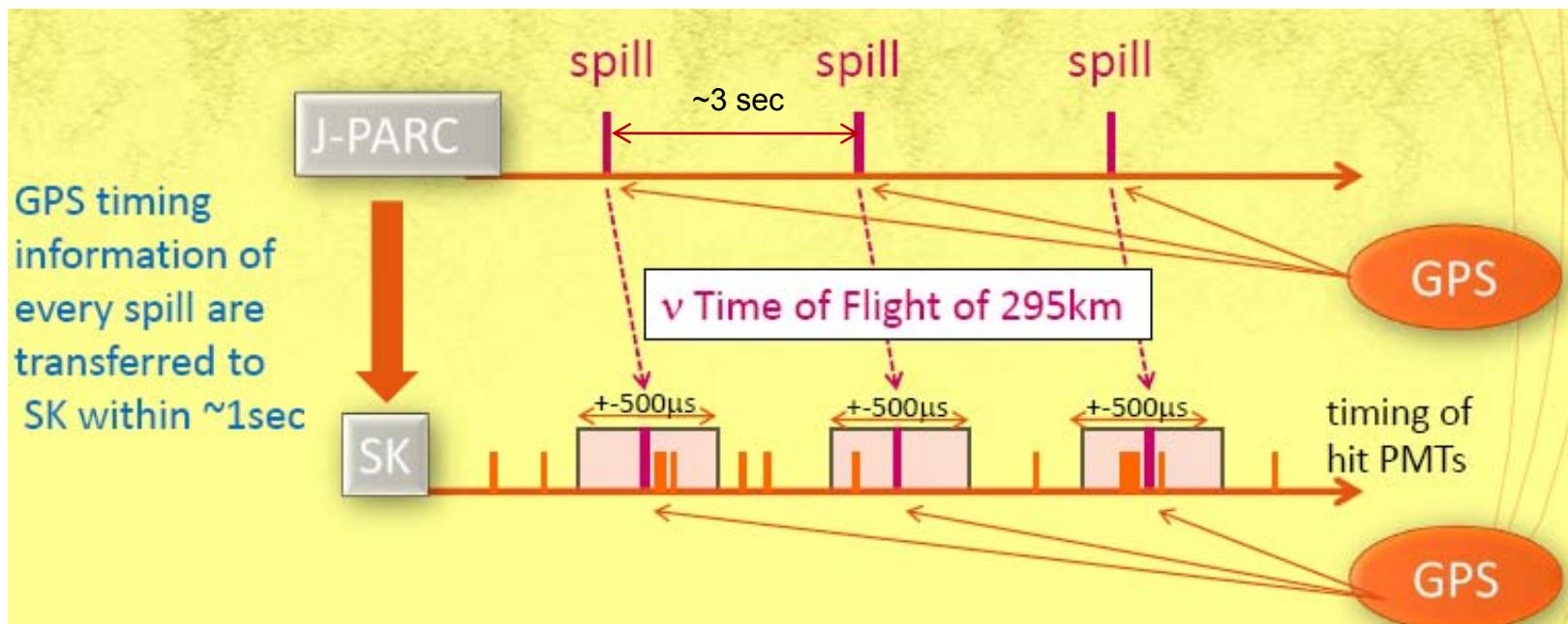
$TOF = 985 \mu s$

GPS стабильность ~ 50 ns

Каждый сброс ускорителя
состоит из 8 микробанчей

Длительность 56 ns

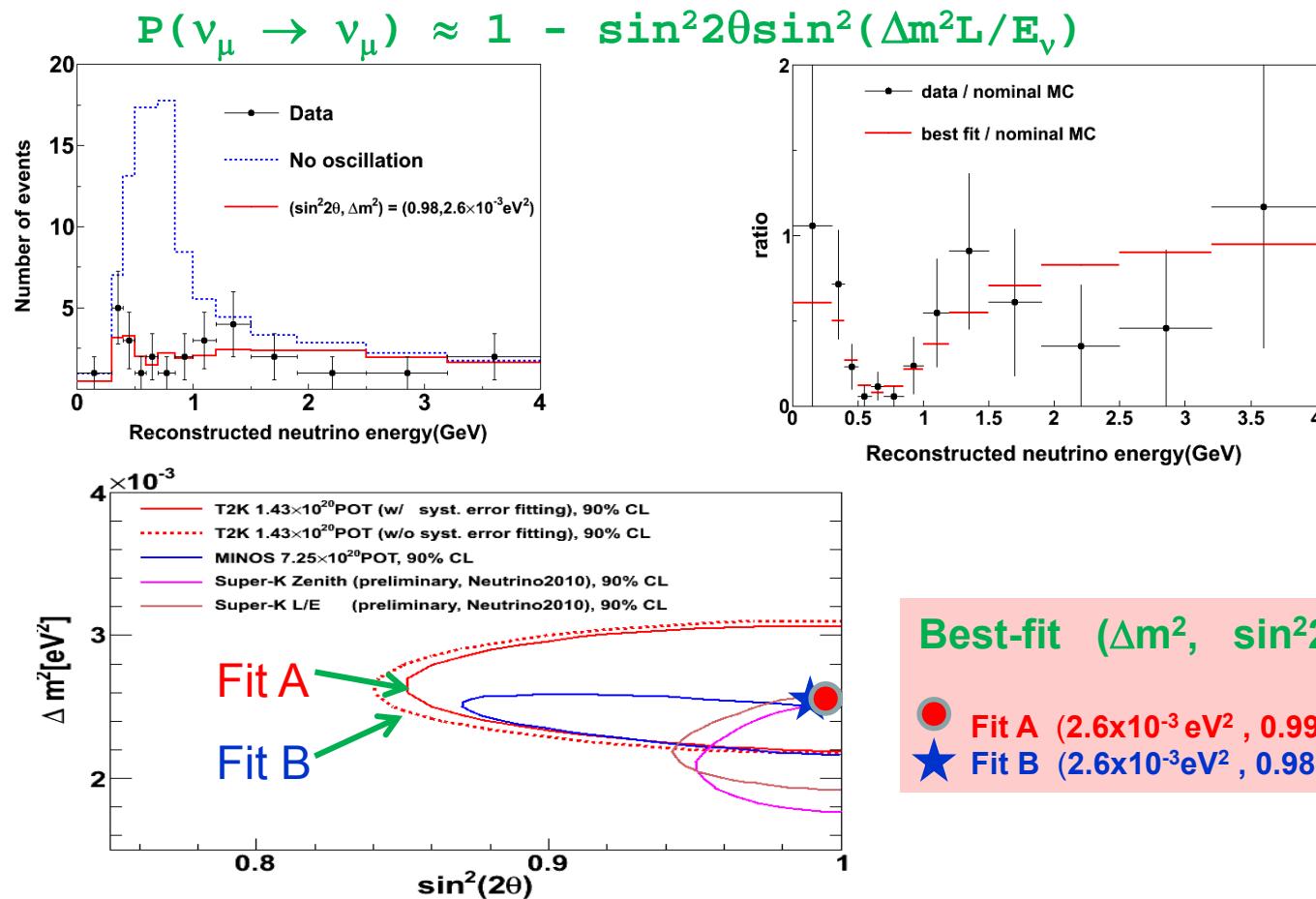
Интервал 580 ns





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

Набор статистики T2K: январь 2010 – март 2011 $\rightarrow 1.43 \times 10^{20}$ РОТ
104 ν_μ события ождалось в отсутствие осцилляций
31 событие зарегистрировано



Эффект осцилляций подтвержден на уровне 4.5σ



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

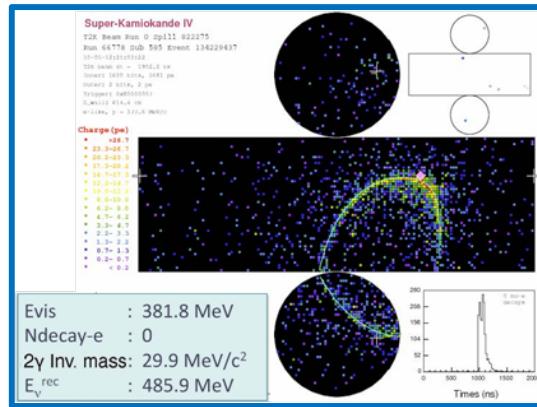
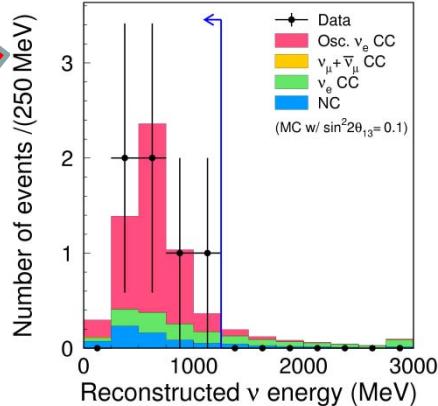
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu}$$

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 флюктуации 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

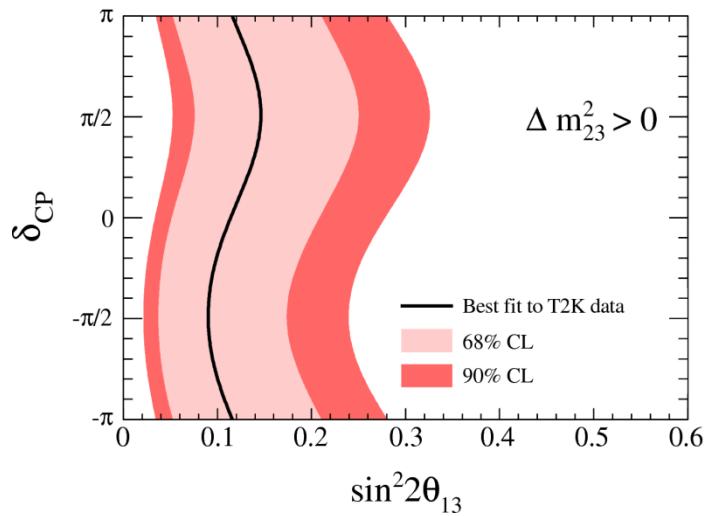
Первое экспериментальное обнаружение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



θ_{13}

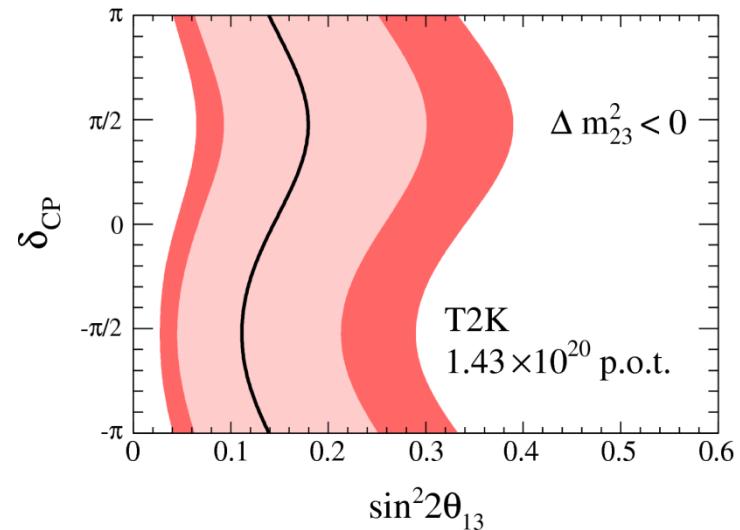
Нормальная иерархия масс

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

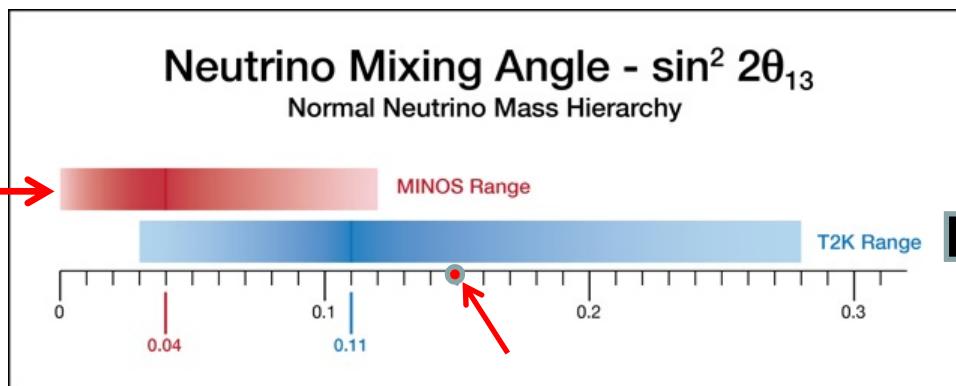


Инверсная иерархия масс

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



MINOS,
Фермилаб, США



Глобальный анализ
всех экспериментальных
данных



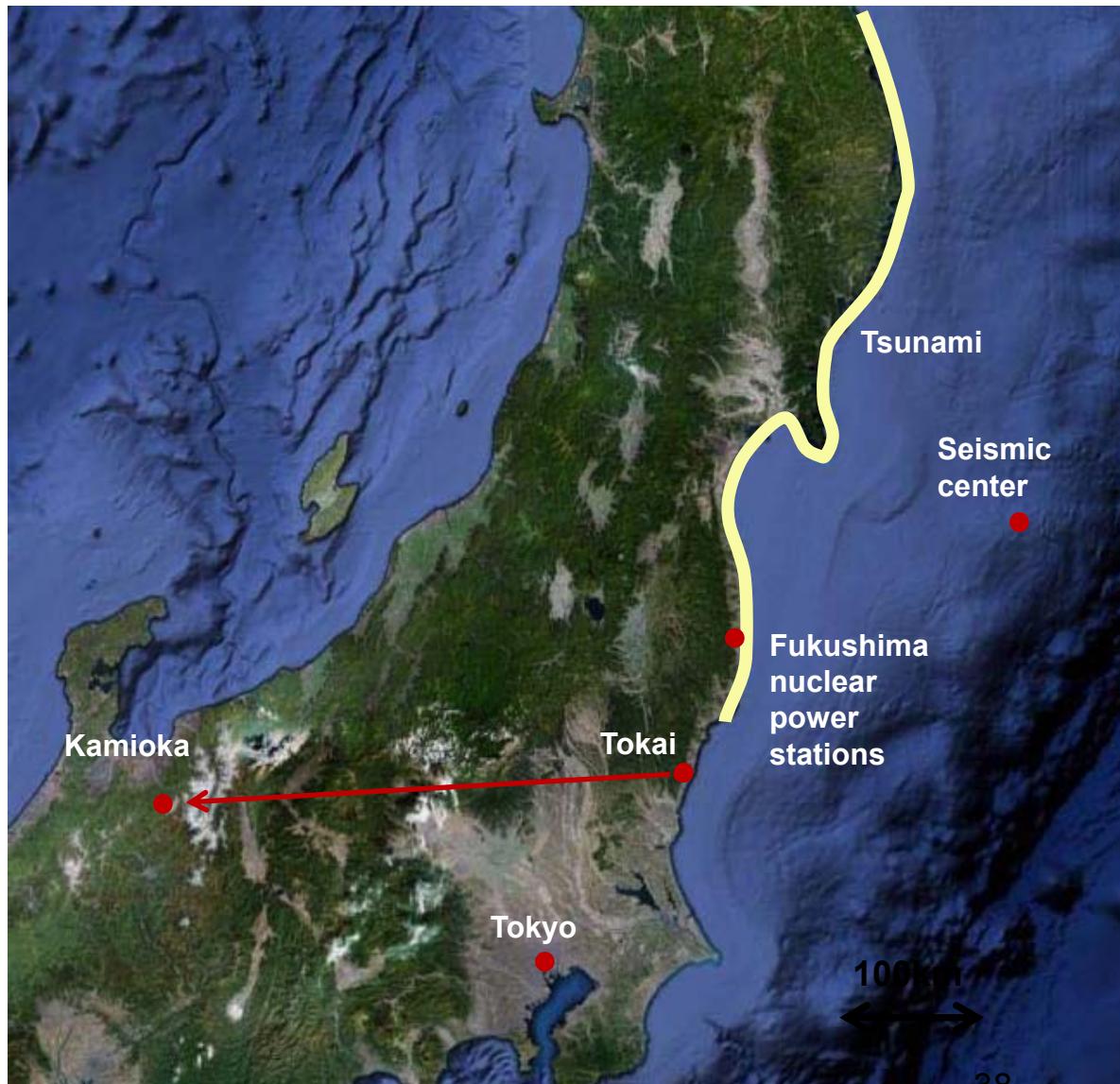
Землетрясение 11 марта 2011

- Землетрясение магнитудой
9.0 11 марта 2011

- всего 5 землетрясений ≥ 9
с 1900 года

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

- атомная станция
Фукусима повреждена
циунами





J-PARC после землетрясения

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



- Идет восстановление, нейтринный пучок - **декабрь 2011**
- **Ближайшая цель T2K – чувствительность к $\theta_{13} > 3\sigma$**



Измерение θ_{13} на реакторах

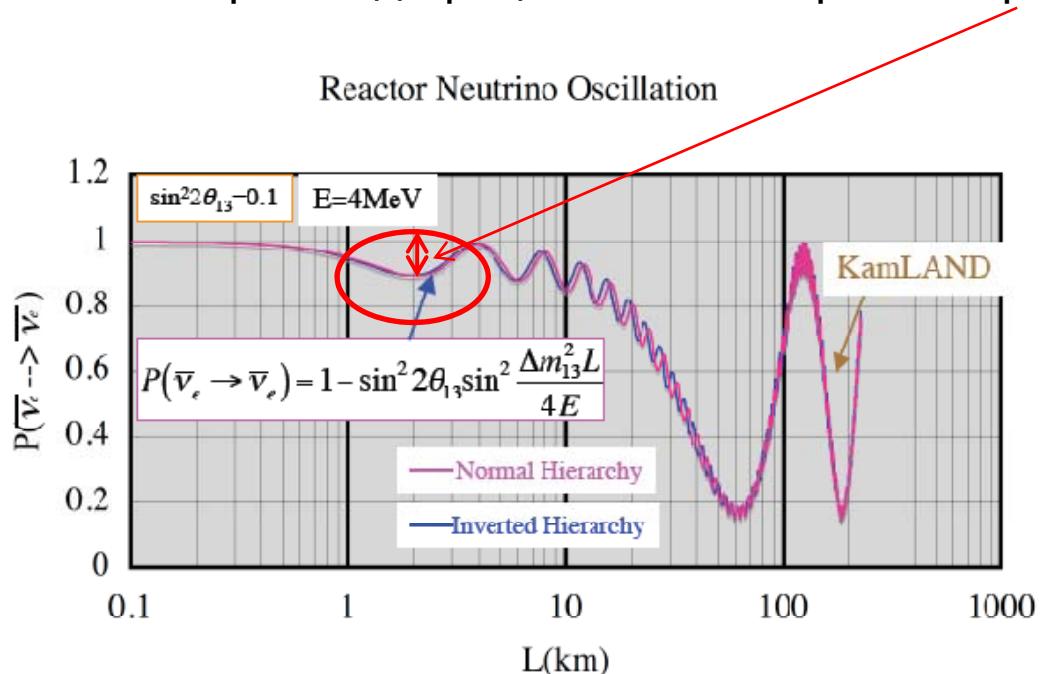
реакторные эксперименты $\text{anti-}\bar{\nu}_e \rightarrow \text{anti-}\bar{\nu}_e$

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

Нет чувствительности к δ (!)

Нет чувствительности к иерархии масс (!)

Измерение дефицита антинейтрино на расстоянии 1-2 км от ректора

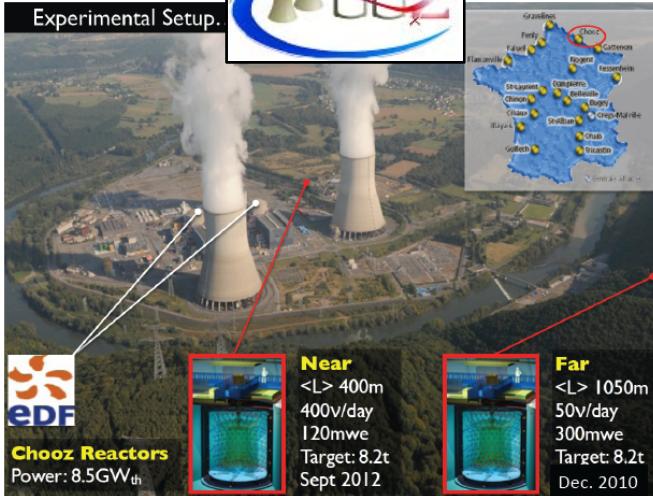


Чувствительность определяется систематическими погрешностями, которые должны быть $\leq 1\%$

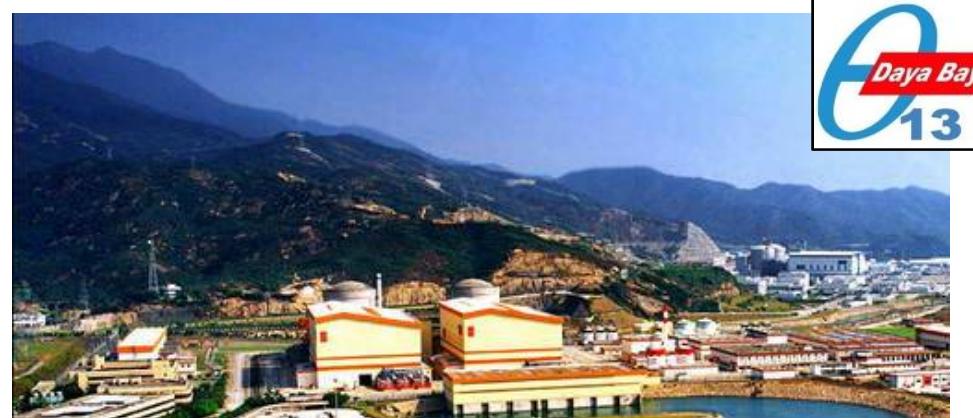
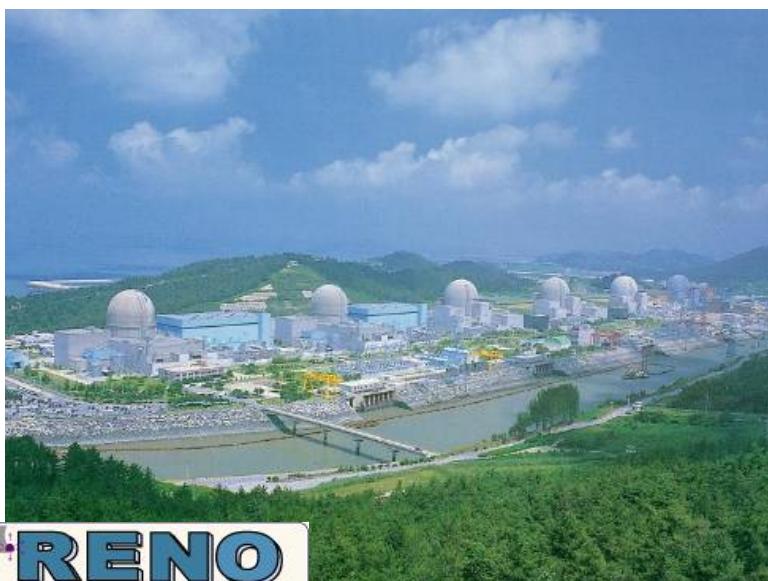


Реакторные эксперименты

θ_{13}



Expt	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

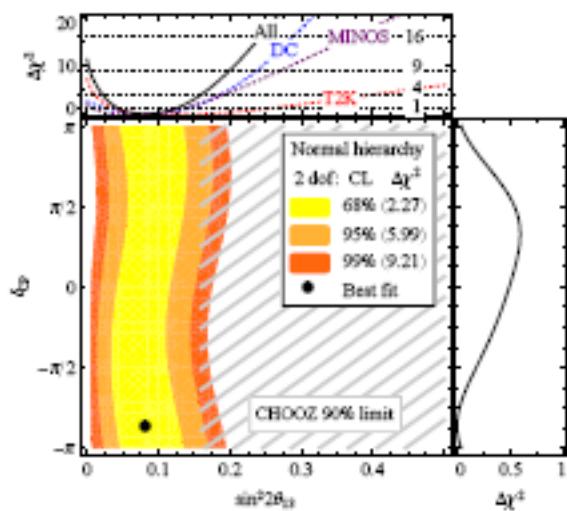


MINOS

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)

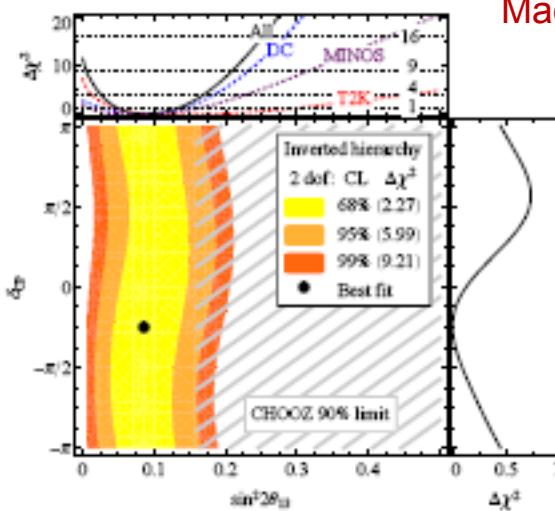


Нормальная иерархия

Double-CHOOZ

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

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

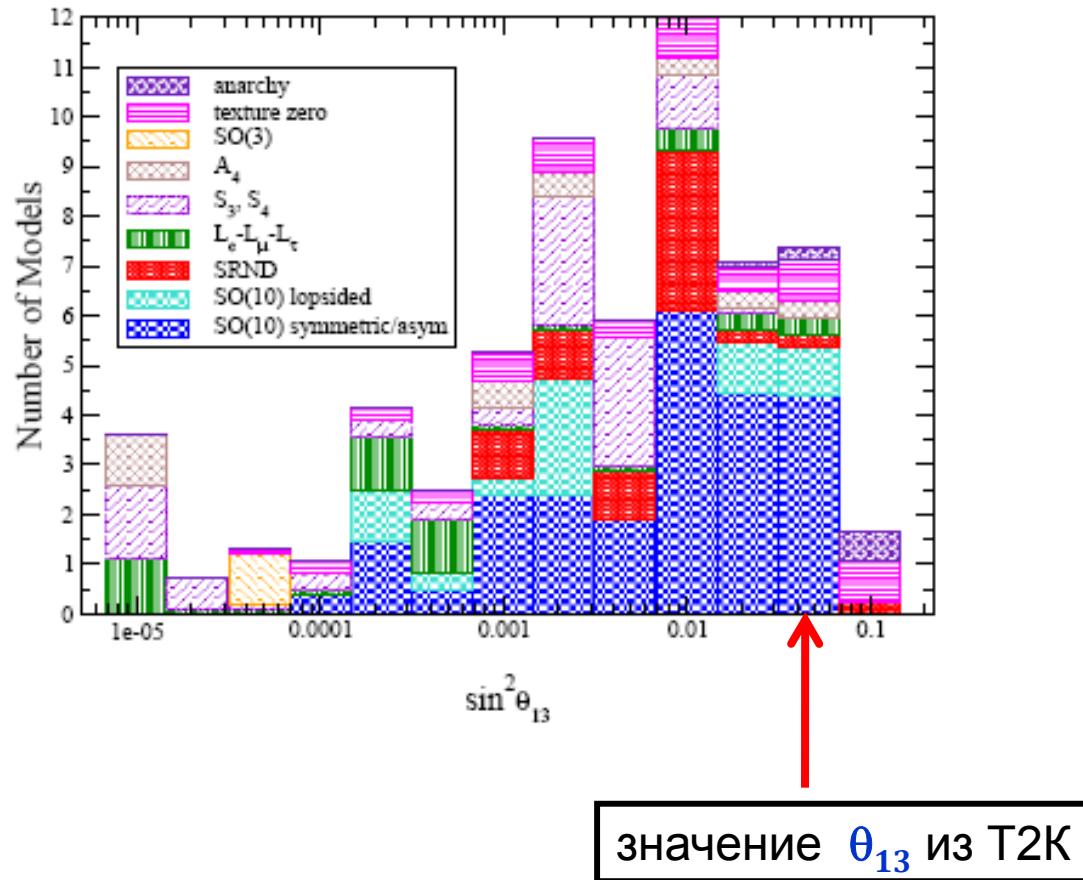


Machado et al. arXiv:1111.3330[hep-ph]



Теоретические предсказания θ_{13}

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



Большинство моделей смешивания нейтрино
предсказывают малую величину θ_{13}



Масса нейтрино

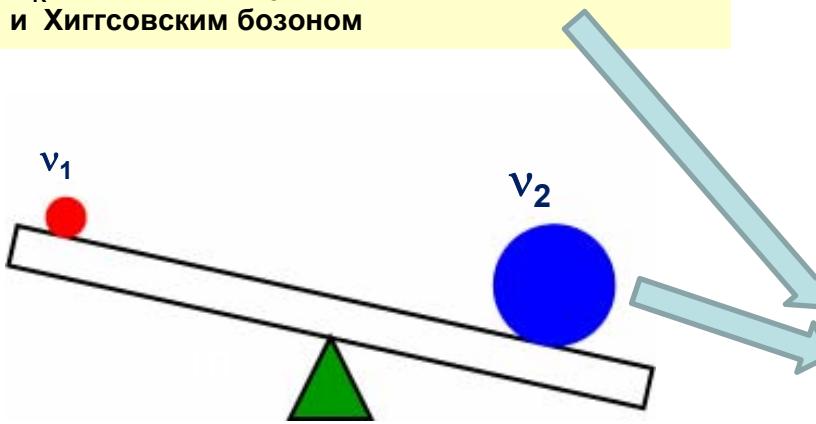
Прямые измерения $m_\nu < 2 \text{ эВ}$
Космология $m_\nu < 0.3 - 1.0 \text{ эВ}$

Шкала масс

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

Механизм see-saw («качели»)

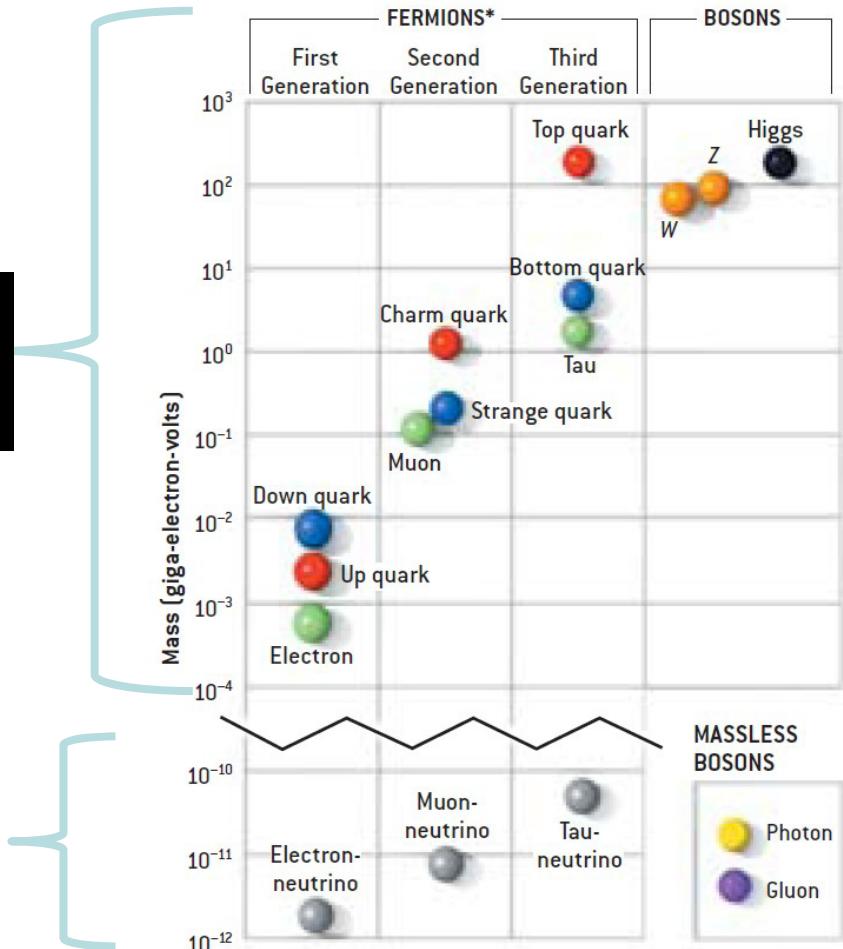
- тяжелые ($10^9 - 10^{15} \text{ ГэВ}$) правые Майорановские нейтрино N_R добавлены в СМ
- N_R взаимодействуют с левыми лептонами и Хиггсовским бозоном



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

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

Хиггс



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



Смешивание: кварки и нейтрино

Матрицы смешивания
кварков и нейтрино

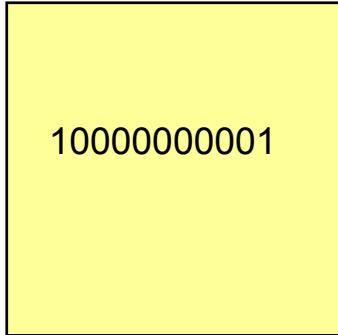
$$V_{\text{quark}} = \begin{pmatrix} 1 & s & s \\ s & 1 & s \\ s & s & 1 \end{pmatrix} \quad s \equiv \text{small}$$
$$U_{\text{lepton}} = \begin{pmatrix} B & B & \theta_{13} \\ B & B & B \\ B & B & B \end{pmatrix} \quad B \equiv \text{Big}$$

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

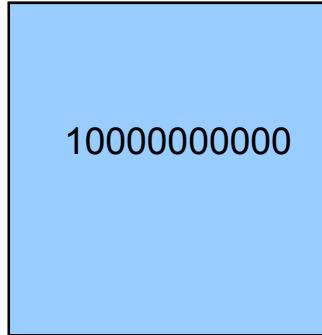


Барионная асимметрия Вселенной (BaU)

Ранняя Вселенная



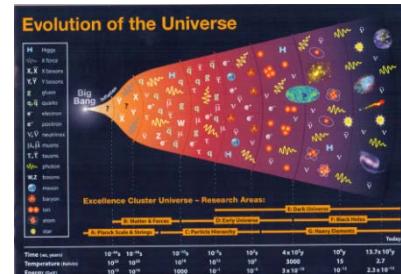
Вещество



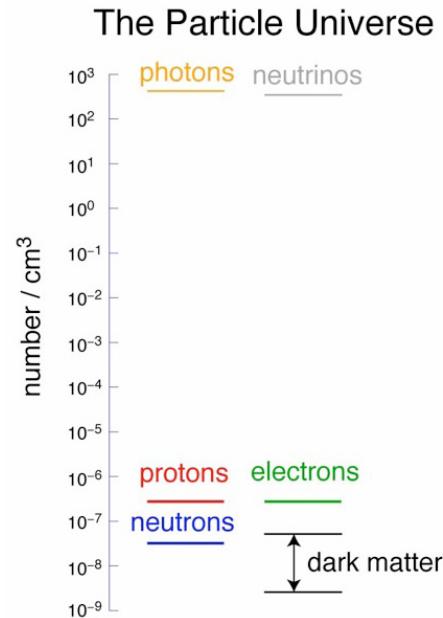
Антивещество

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

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.



Современная Вселенная



$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{\gamma} = (6.21 \pm 0.16) \times 10^{-10}$$
$$\frac{n_B}{n_{\bar{B}}} < 10^{-6}$$

барионы: протоны, нейтроны



Возможное объяснение BaU

3 условия А.Д.Сахарова

- нарушение барионного числа
- С и СР нарушение
- отклонение от термодинамического равновесия

Проблема барионной асимметрии не находит решения в рамках Стандартной Модели. СР 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 СР нарушения в лептонном секторе \Rightarrow серьезное указание на лептогенезис

Барионная асимметрия Вселенной \Leftrightarrow Нейтринная физика



Нейтринные парадоксы

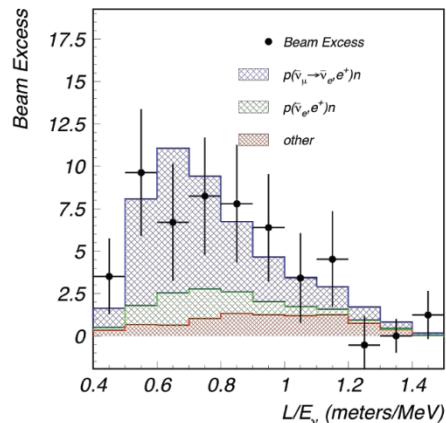
- ! Нарушение четности → ~~зеркальная симметрия~~
- ! Осцилляции нейтрино → **новая физика: $m_\nu \neq 0$**
смешивание
- ? Стерильные нейтрино → ??
- ? Сверхсветовая скорость → ??



LSND / MiniBooNe аномалия

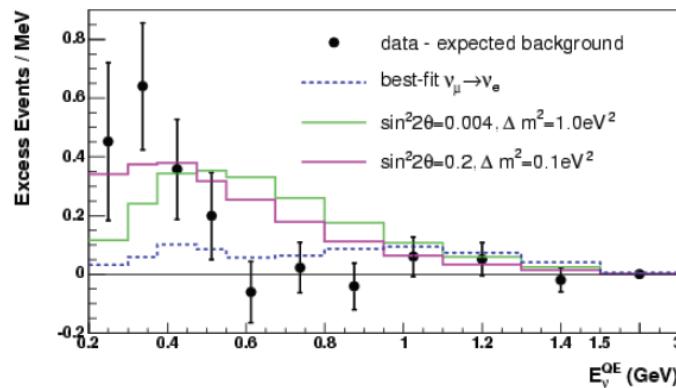
Ряд результатов по исследованию осцилляций не укладывается в общепринятую картину переходов между **тремя типами** активных нейтрино

LSND, Лос-Аламос, США



Избыток **3.8 σ**

MiniBooNe, Фермилаб, США



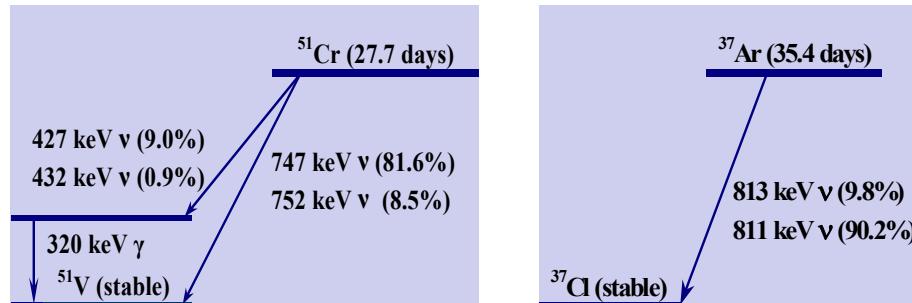
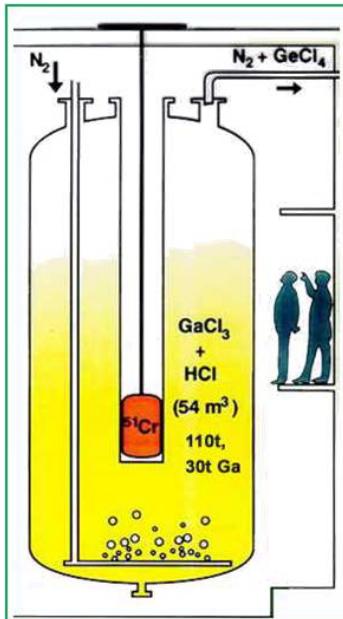
Избыток **3.0 σ** для ν и **2.3 σ** для анти- ν
в диапазоне энергий нейтрино 200-1250 МэВ

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



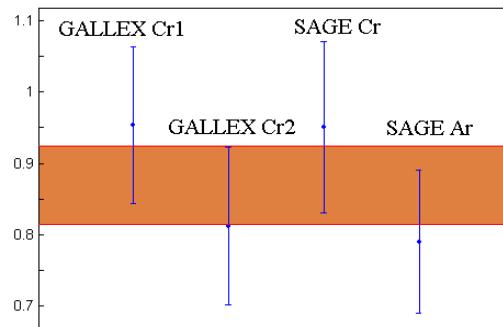
Га аномалия

GALLEX

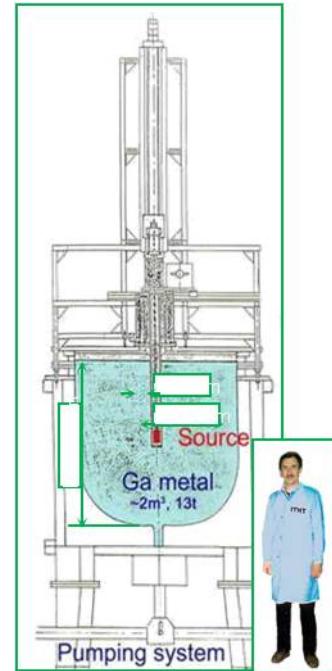


Детектирование нейтрино: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

	GALLEX $m(\text{Ga})=30\text{ t}$		SAGE $m(\text{Ga})=13\text{ t}$	
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
$R = (p_{\text{exp}}/p_{\text{theory}})$	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	



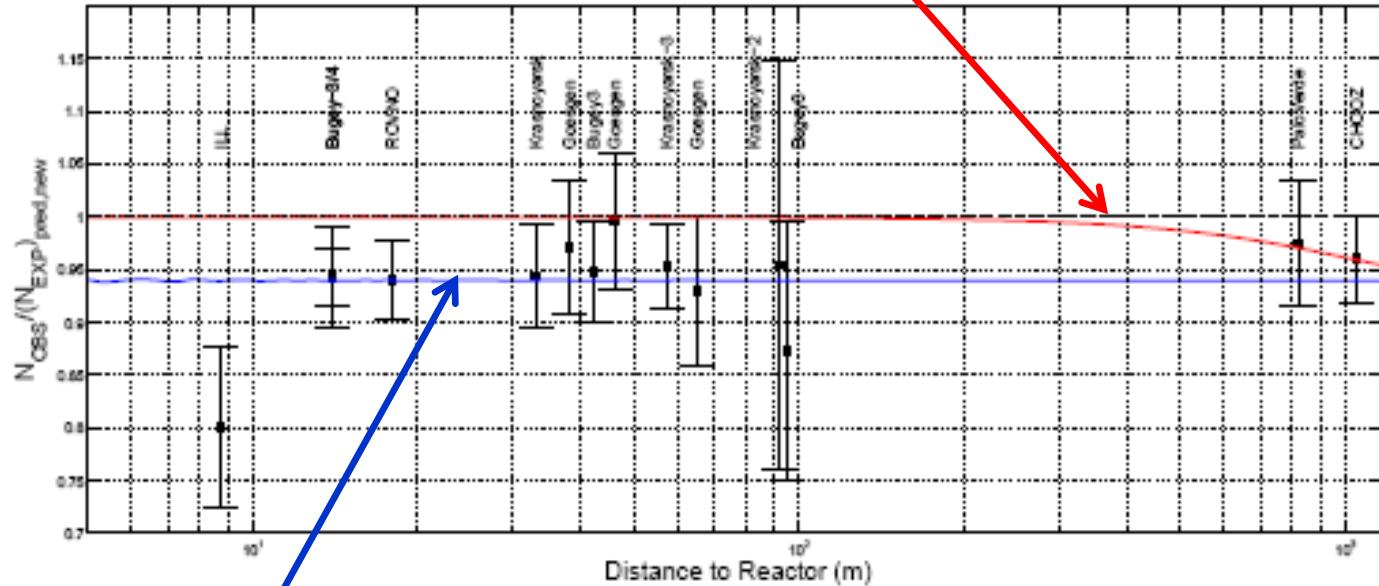
SAGE



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

Реакторная аномалия

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



$$0.937 \pm 0.027$$

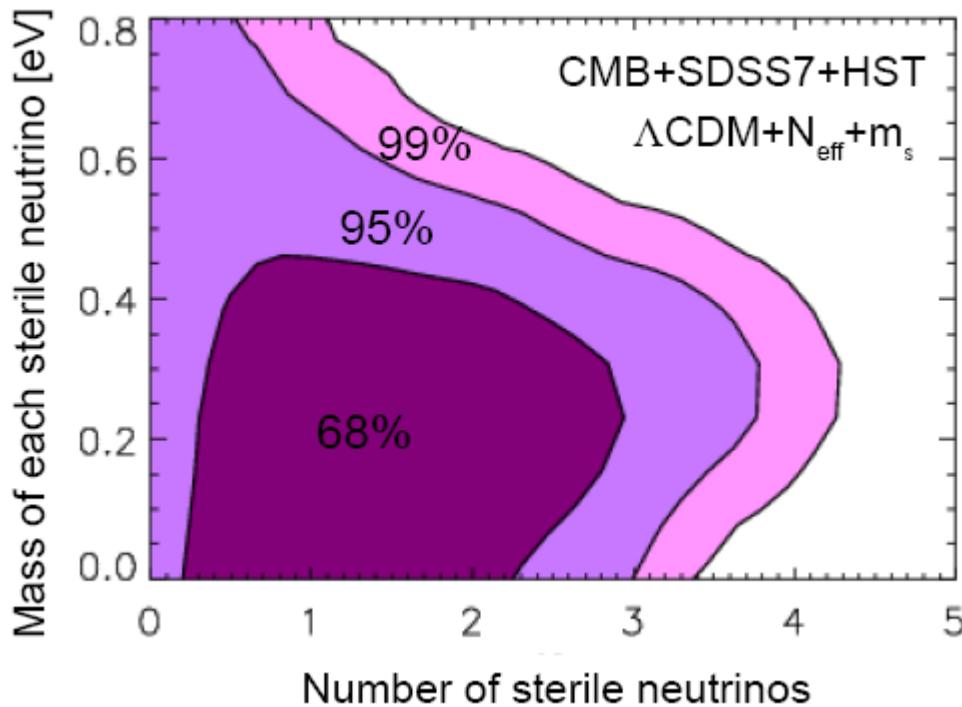
G.Mention et al.
arXiv: 1101.2755

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

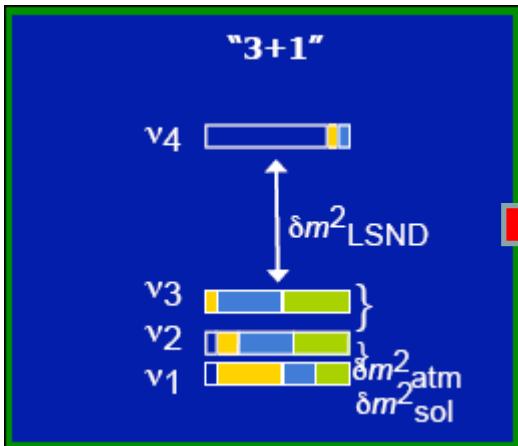


Стерильные нейтрино ?

Combined analysis
of anomalies:

- реакторные данные
- Ga эксперименты
- LSND и MiniBooNe,

$$|\Delta m^2| > 1.0 \text{ эВ}^2$$
$$\sin^2 2\theta_{\text{new}} \approx 0.17$$



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

три типа легких активных нейтрино

Гипотеза стерильных
нейтрино

Стерильные нейтрино ν_s

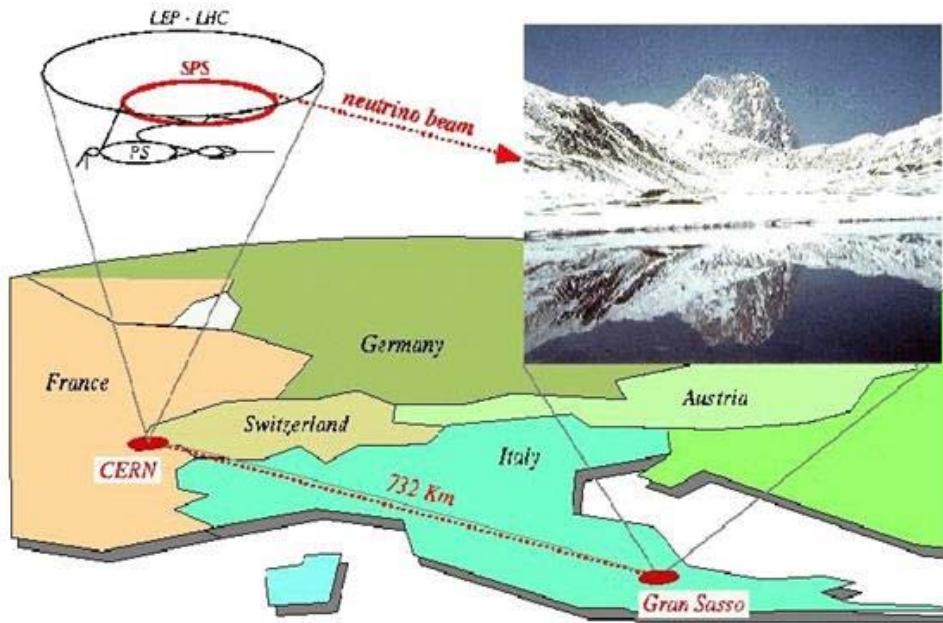
- могут рождаться в ранней Вселенной благодаря смешиванию с активными нейтрино
- не участвуют в слабых взаимодействиях
- могут иметь левую или правую спиральность
- четвертое массовое состояние
- ν_s ($m_s \geq 1 \text{ кэВ}, \theta \leq 10^{-4}$) кандидаты в теплую темную материю



Измерение скорости нейтрино

Эксперимент OPERA

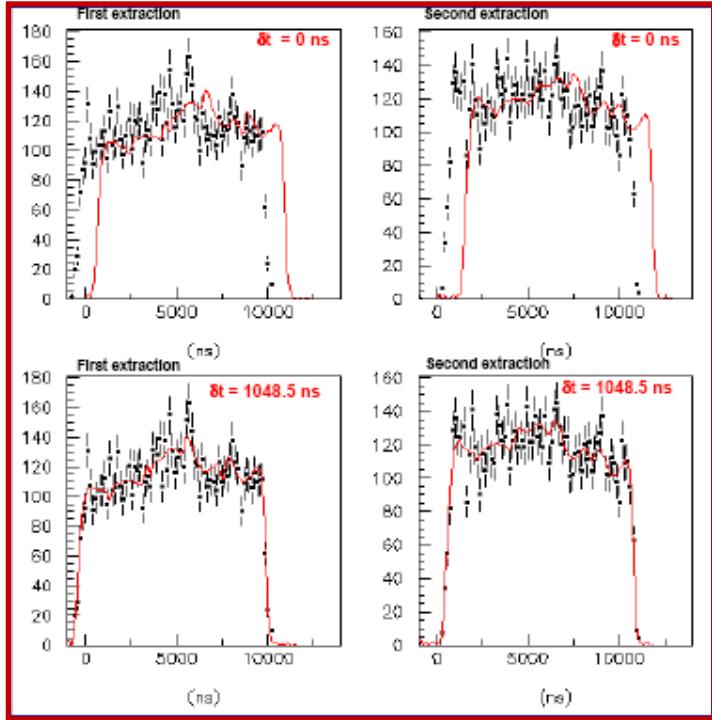
Пучок мюонных нейтрино из ЦЕРН в Гран Сассо
Средняя энергия нейтрино 17 ГэВ



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



$V_\nu > C ?$



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

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

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

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

OPERA: измерения будут проведены с короткими (~ 2 нс) импульсами пучка
MINOS и T2K также планируют измерить скорость нейтрино



Ближайшее будущее

2012 - 2015

Measurement of θ_{13}



+

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

+

MINOS+
OPERA



$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$\nu_e \rightarrow \nu_e$

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

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



Отдаленное будущее

2016 →

Mass hierarchy

Nova (FNAL)
SuperK

CP violation

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

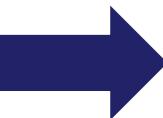
Sterile
neutrinos

FNAL, short baseline experiments
✓ 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夸ков различно?

ν : дираковские или майорановские частицы?

Абсолютная шкала масс нейтрино?

Нормальная или инверсная иерархия?

СР нарушение в нейтринном секторе?

Стерильные нейтрино, нестандартные взаимодействия...?

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

спасибо за внимание!