



Российская Академия Наук

Академик Моисей Александрович Марков 1908 - 1994



Вторые Марковские чтения

12 - 13 мая 2004 года
Дубна - Москва

Осцилляции нейтрино

С.П. Михеев
ИЯИ РАН

- Что мы знаем об осцилляциях
- Что мы хотим узнать

Осцилляции нейтрино – периодический во времени (или пространстве) процесс полного или частичного перехода одного типа нейтрино в другой, который возможен при наличии у нейтрино массы и смешивания.

Смешивание означает, что состояния, которые участвуют в слабых взаимодействиях, не совпадают с состояниями, имеющими определенные массы.

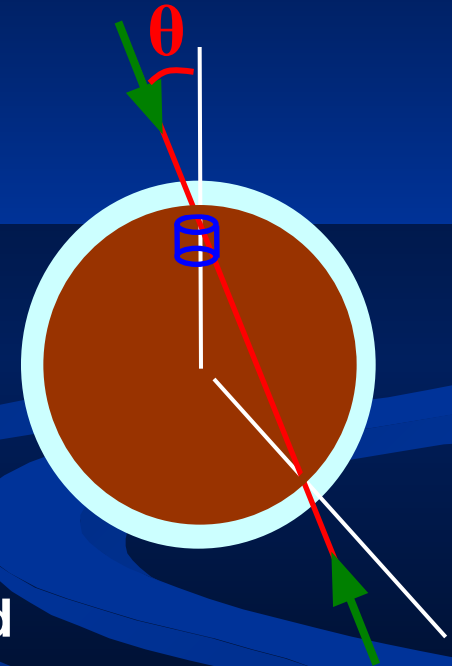
2-ν

$$P(\nu_e \leftrightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\vartheta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / E)$$

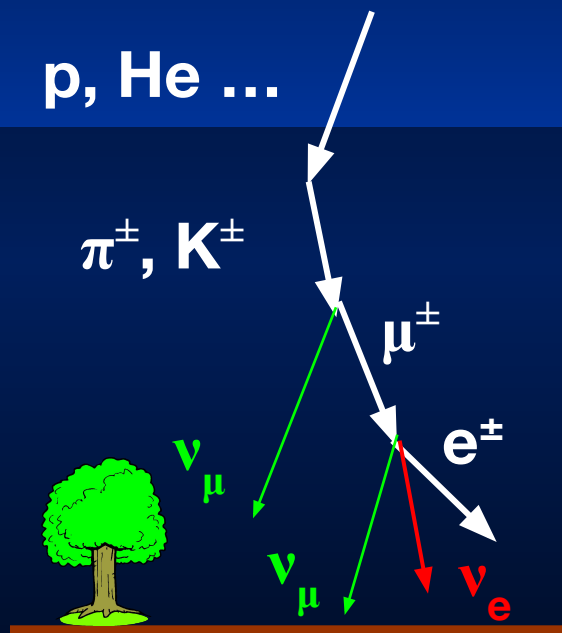
Атмосферные нейтрино

Zenith angle

Downward
($L=10\sim 100$
km)



Upward
($L=\text{up to } 13000$
km)

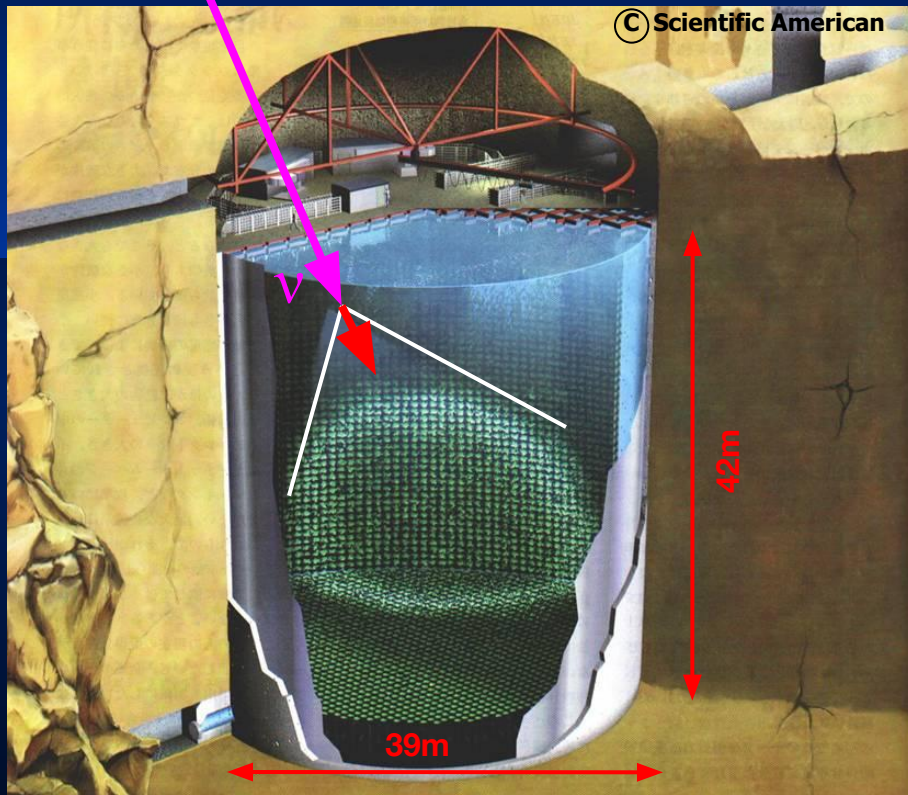


$E_\nu > \text{a few GeV}$
Up/Down Symmetry

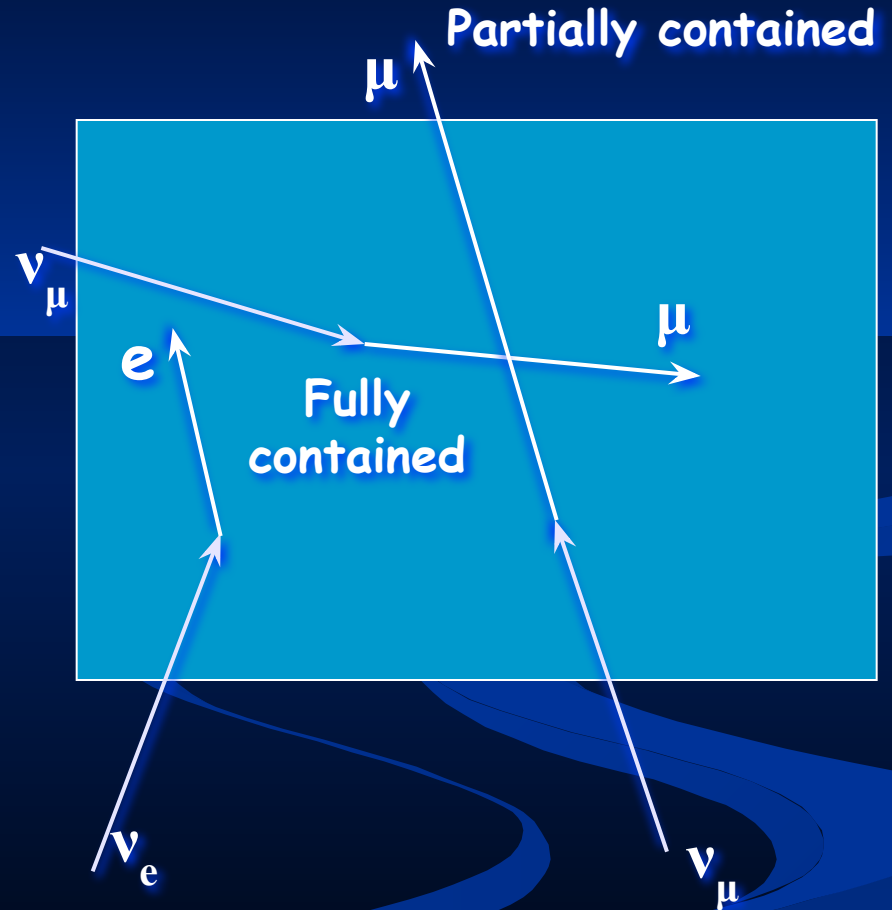
Атмосферные нейтрино

Choji Saji
NOON2004

Черенковский детектор Super-Kamiokande



50,000 тонн (22,500 тонн)



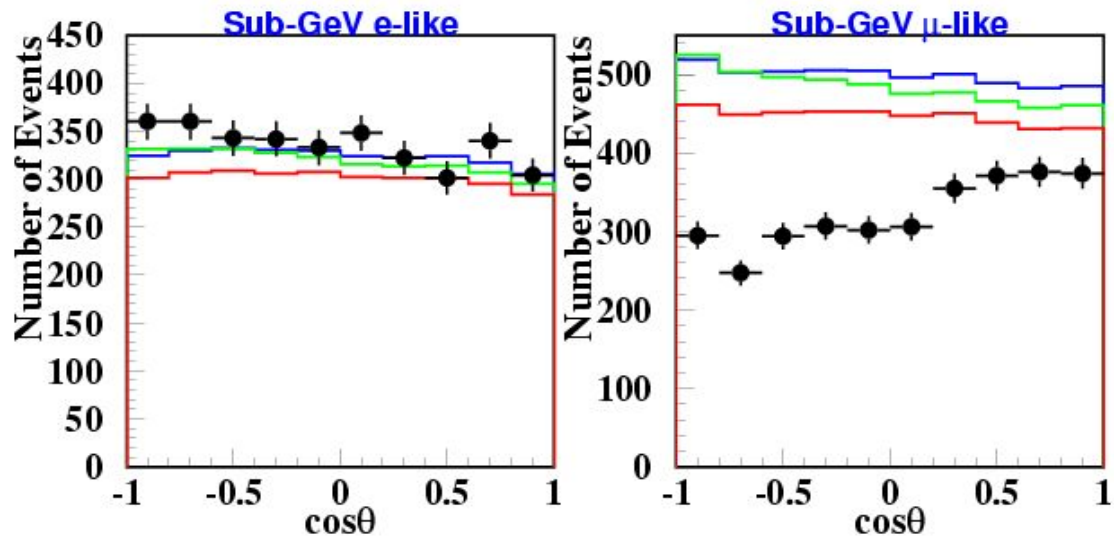
Атмосферные нейтрино

Sub-GeV

$$E_{\text{vis}} < 1.33 \text{ GeV}$$

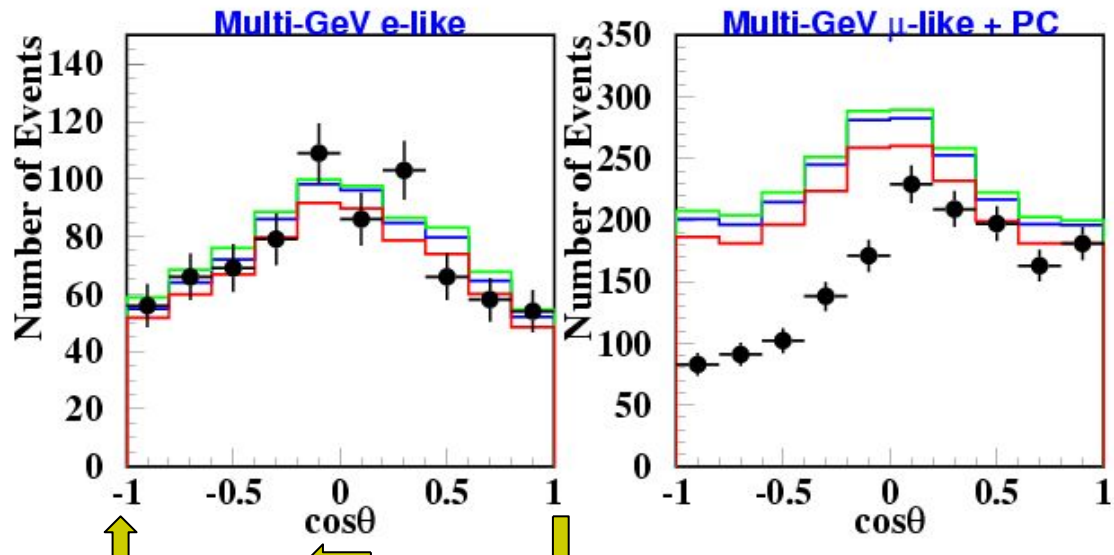
$$P_e > 100 \text{ MeV}/c$$

$$P_\mu > 200 \text{ MeV}/c$$



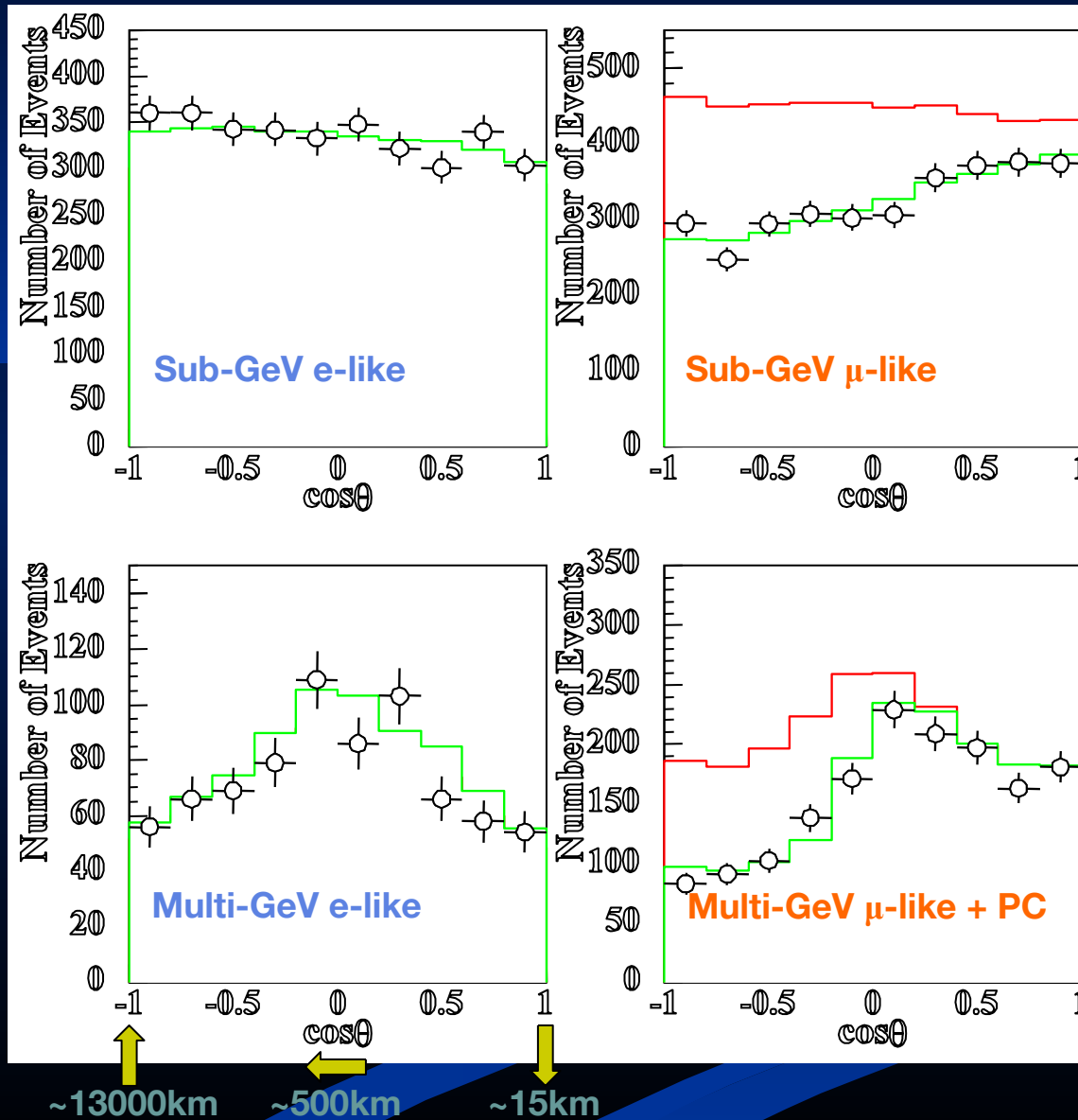
Multi-GeV

$$E_{\text{vis}} > 1.33 \text{ GeV}$$



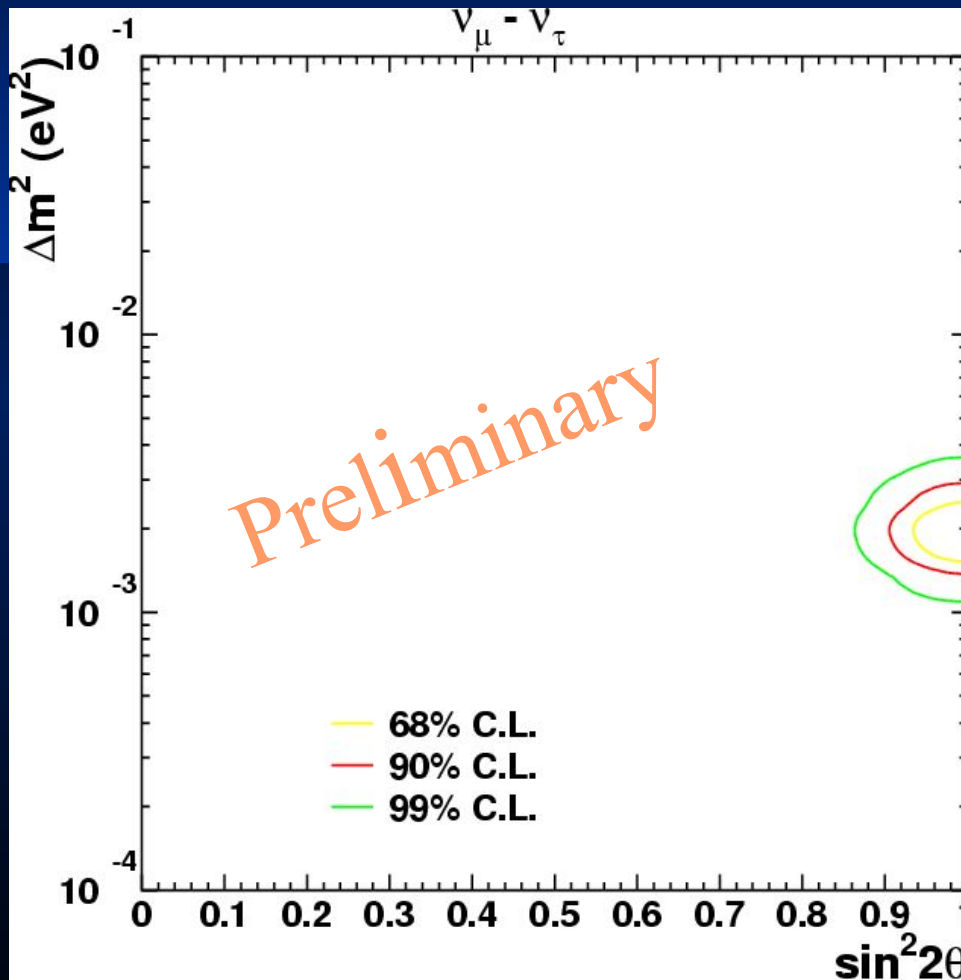
$\sim 13000 \text{ km}$ $\sim 500 \text{ km}$ $\sim 15 \text{ km}$

Атмосферные нейтрино



Атмосферные нейтрино

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$
2-flavor oscillations



- **Best fit:**
 $\sin^2 2\theta = 1.0$
 $\Delta m^2 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $\chi^2 = 170.8/170 \text{ dof}$
- **90% C.L. region:**
 $\sin^2 2\theta > 0.90$
 $1.3 < \Delta m^2 < 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Эксперимент K2K

K2K - первый эксперимент с дальними нейтрино для исследования осцилляций нейтрино, обнаруженных в атмосферных нейтрино.

	Atm.- ν	K2K
L	$10 \sim 10^4 \text{ km}$	250km (fix.)
E_ν	0.1~100GeV	~ 1.3GeV
Δm^2	$10^{-1} \sim 10^{-4} \text{ eV}^2$	$> 2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
ν_e / ν_μ	50 %	~1%

Super-Kamiokande



KEK-
12GeV PS

Эксперимент K2K

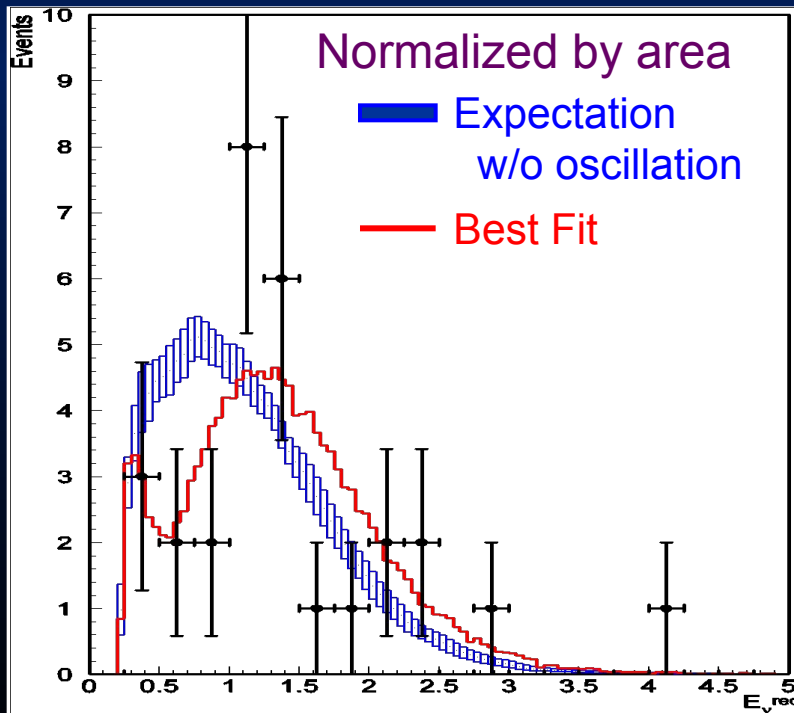
Use both Number of events + Spectrum shape
(June '99 – July '01) (Nov. '99 – July '01)

56_{obs}

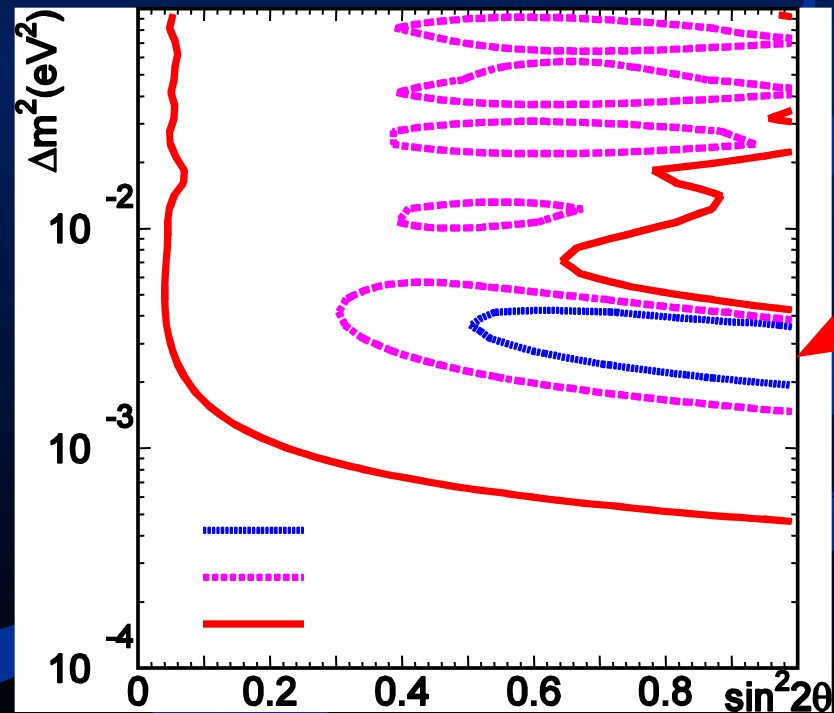
80.1^{+6.2}_{-5.4 exp}

- Null oscillation probability: **less than 1%**
- $\Delta m^2 = 1.5 \sim 3.9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ @ $\sin^2 2\theta = 1$ (90%CL)

reconstructed E_ν



Allowed region

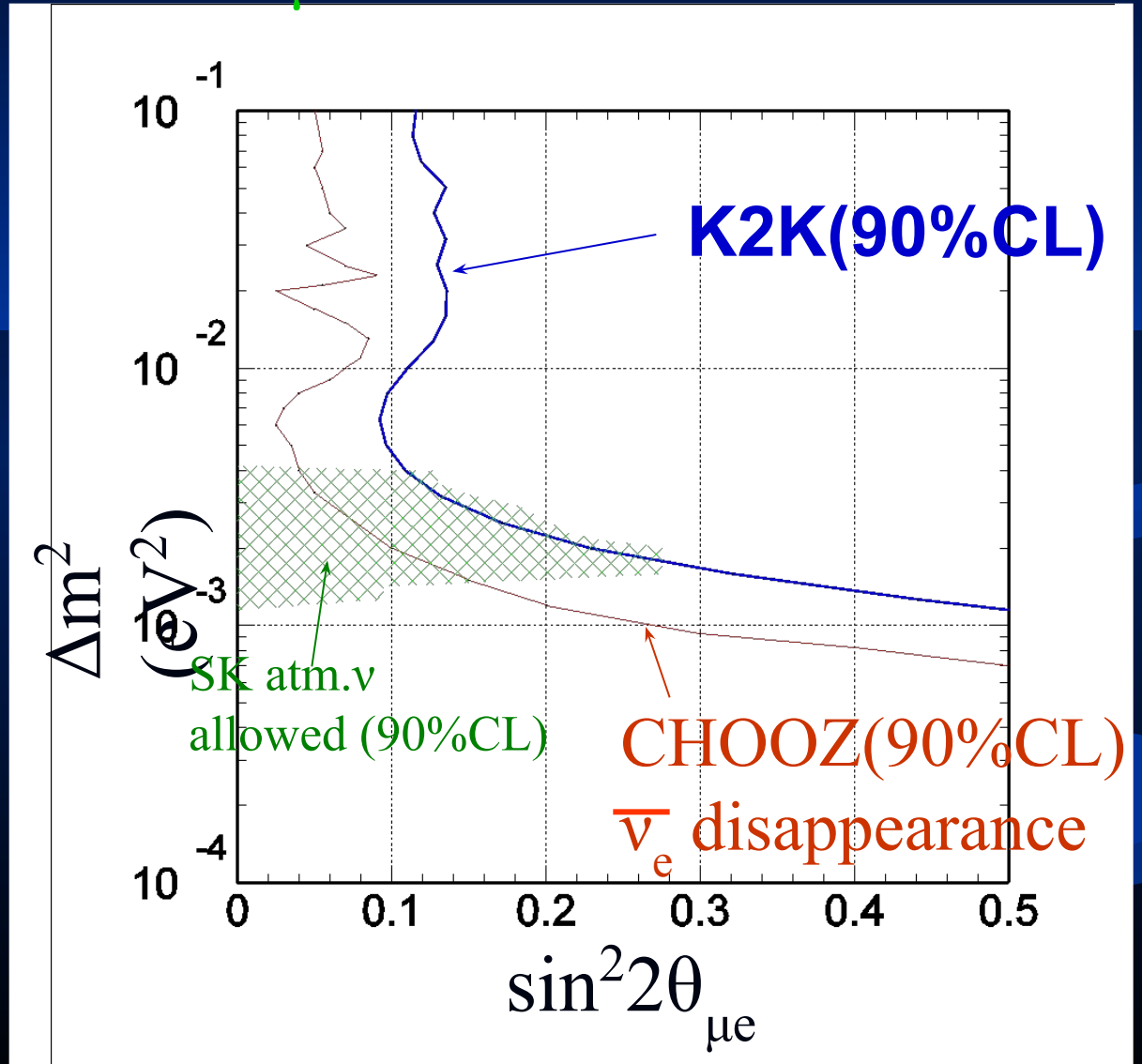


Эксперимент K2K

Results of $\nu_\mu \nu_e$ Analysis

Takanobu Ishii
NOON2004

electron candidate:
1 event observed
2.4 events expected.



Атмосферные нейтрино

Masaki Ishitsuka
NOON2004

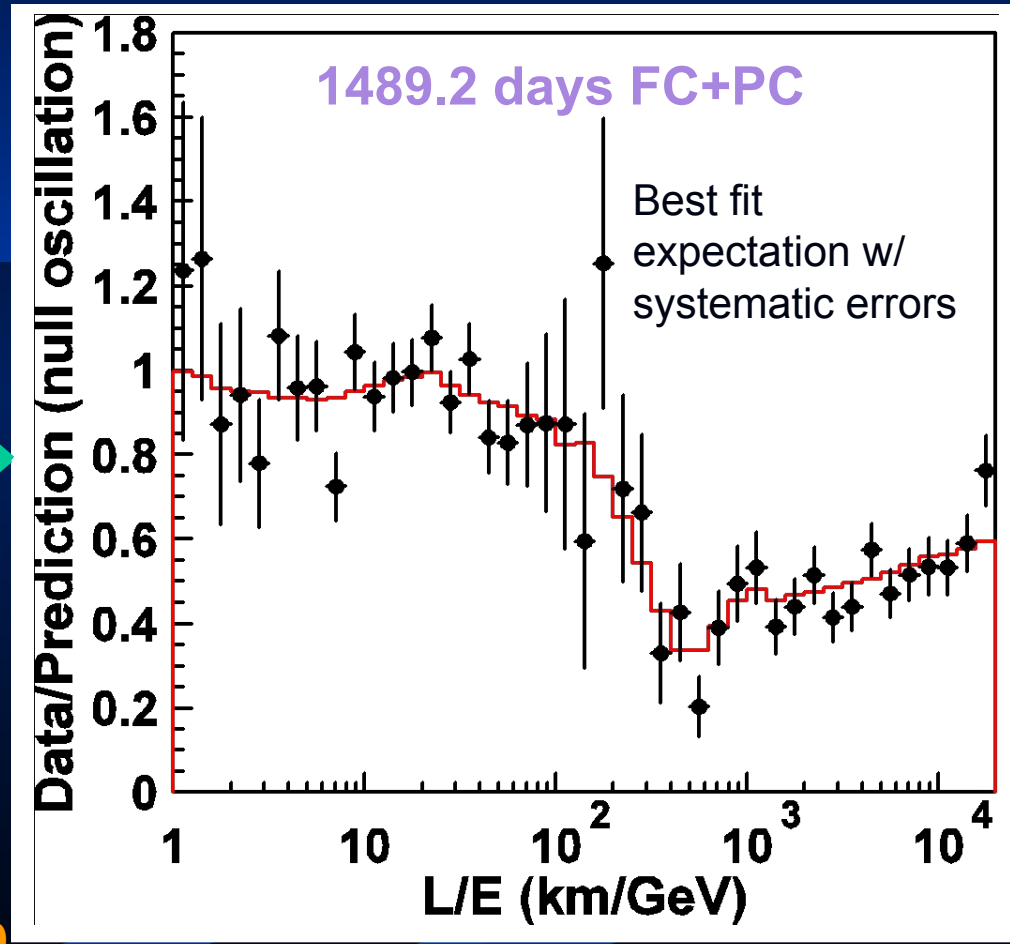
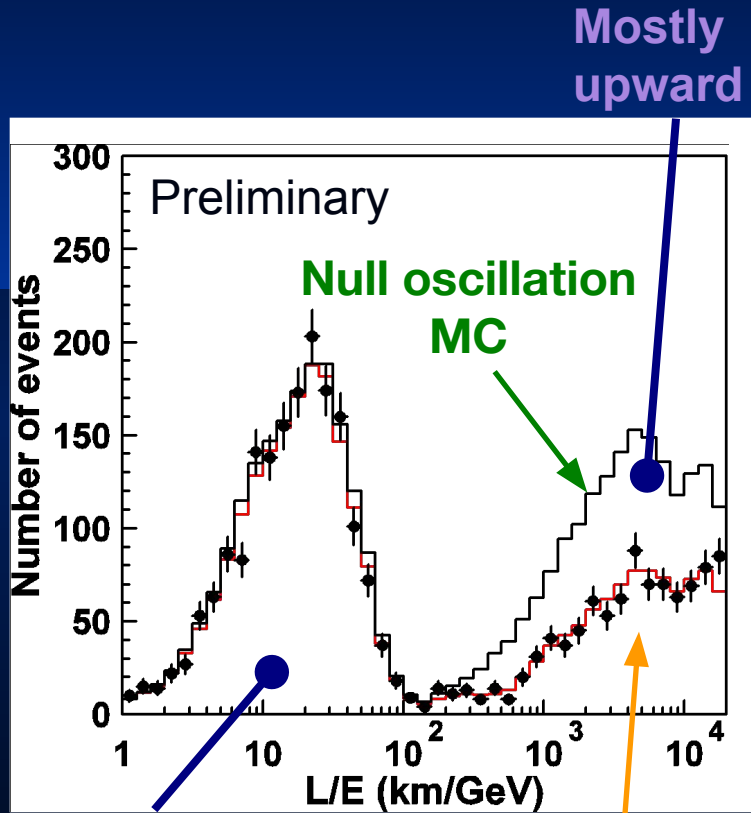


Neutrino oscillation : $P_{\mu\mu} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$

Neutrino decay : $P_{\mu\mu} = \left(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \times \exp \left(- \frac{m}{2\tau} \frac{L}{E} \right) \right)^2$

Neutrino decoherence : $P_{\mu\mu} = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \times \left(1 - \exp \left(- \gamma_0 \frac{L}{E} \right) \right)$

Атмосферные нейтрино

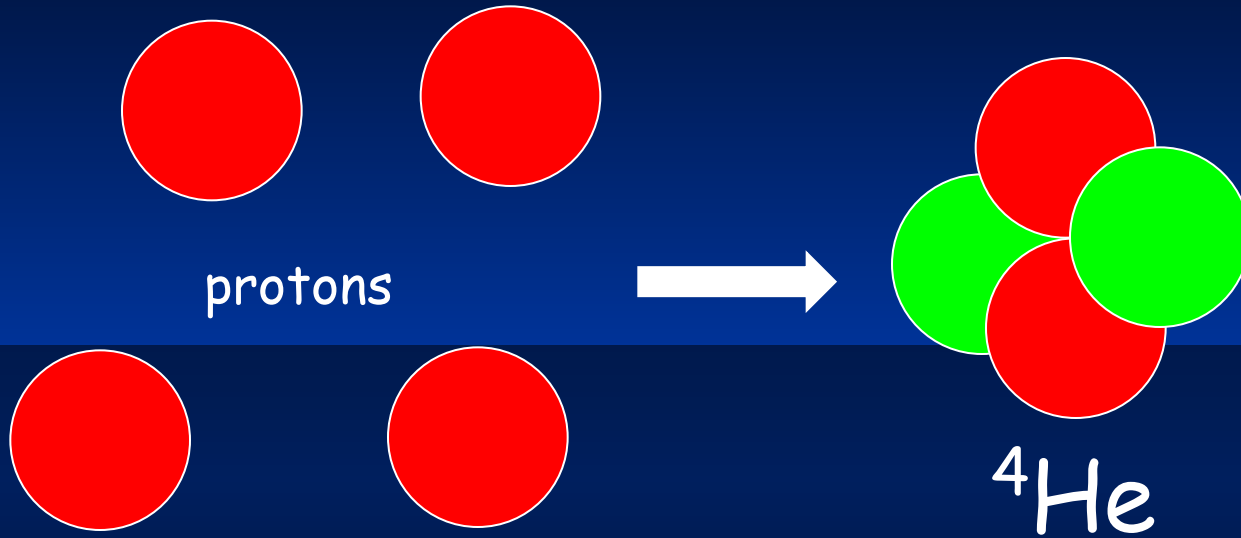


Best-fit expectation

$\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3}, \sin^2 2\theta = 1.00$

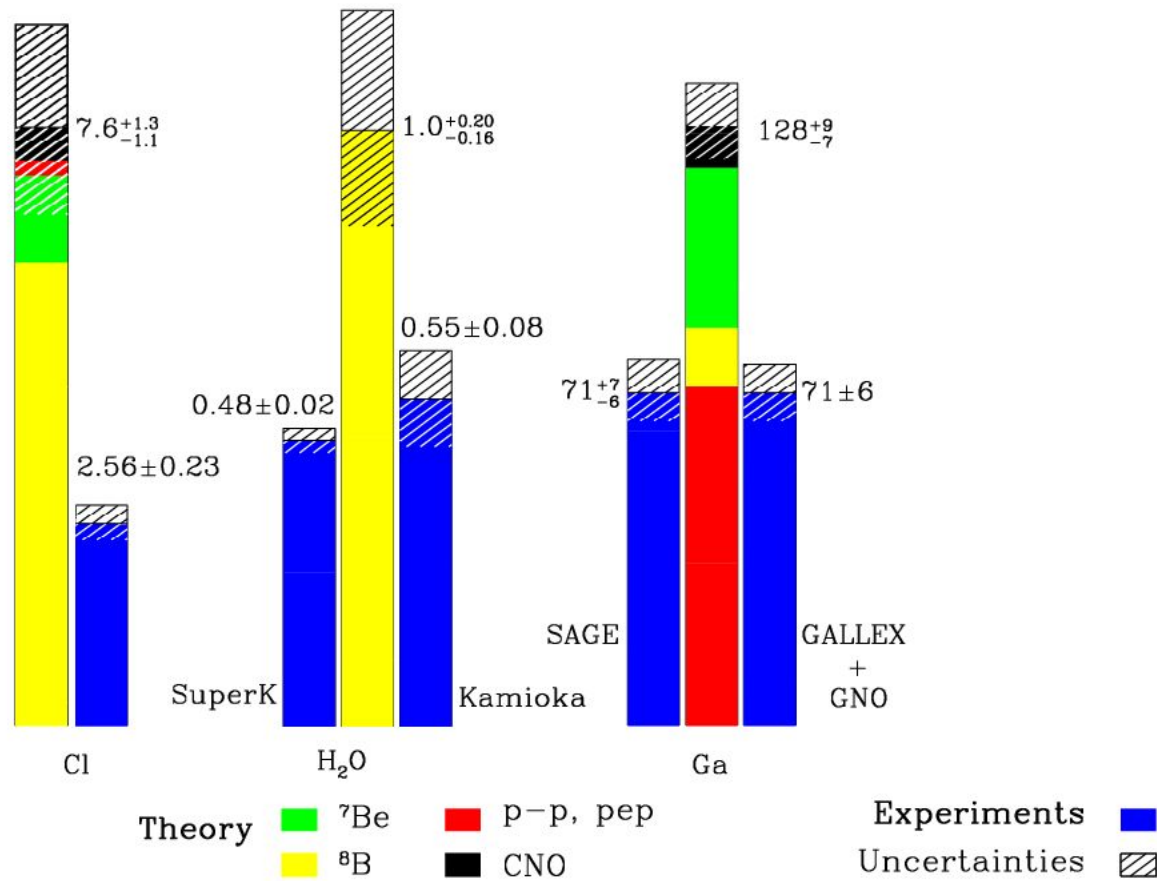
$\chi^2_{\min} = 37.8/40 \text{ d.o.f}$

Солнечные нейтрино



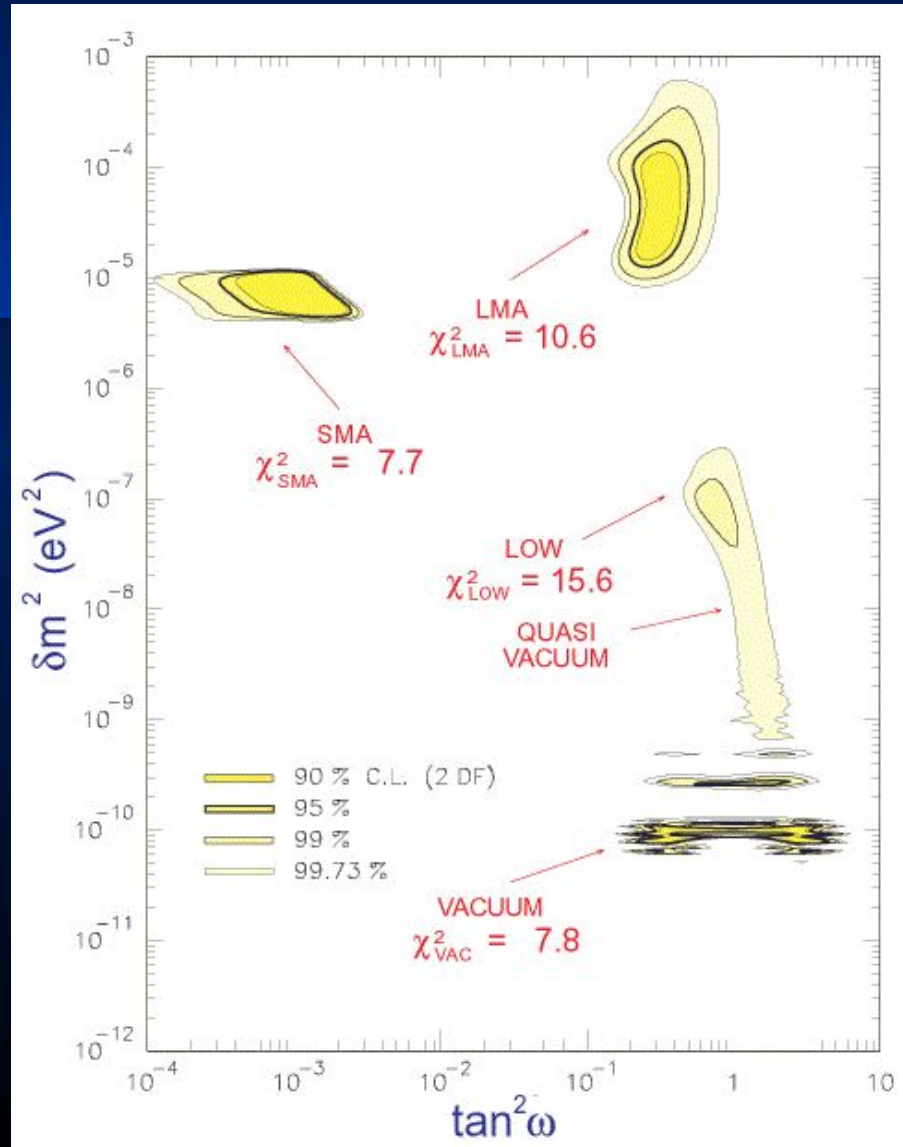
Солнечные нейтрино

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



Солнечные нейтрино

G.Fogli et al.
hep-ph/0106247

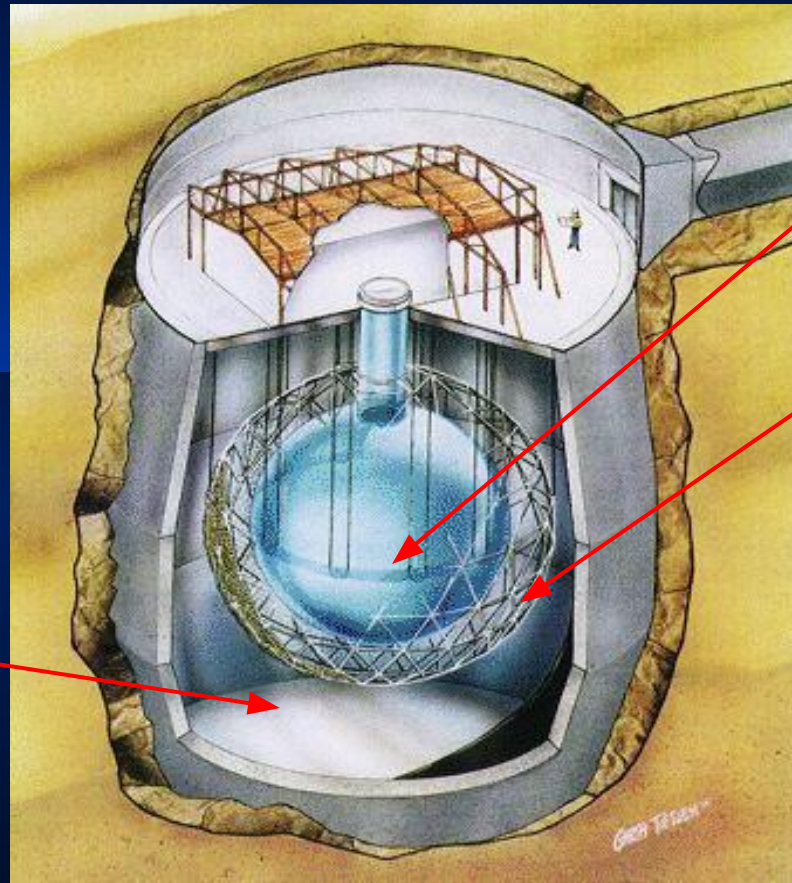


Эксперимент SNO

Kevin Graham
NOON2004



Глубина 2039 м



1000 тонн
тяжлой воды

1700 тонн
обычной воды

9438 ФЭУ для
внутреннего
объема

5300 тонн
обычной воды

91 ФЭУ для
внешнего
объема
(антисовпадения)

Эксперимент SNO



- $Q = 1.445 \text{ MeV}$
- good measurement of ν_e energy spectrum
- some directional info $\propto (1 - 1/3 \cos\theta)$
- ν_e only

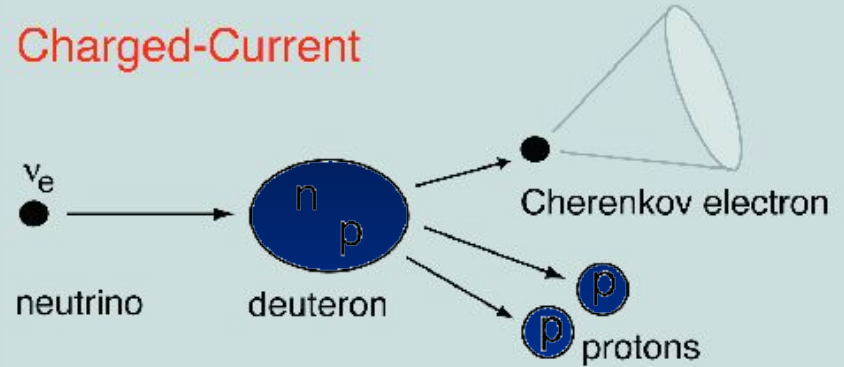


- $Q = 2.22 \text{ MeV}$
- measures total ${}^8\text{B}$ ν flux from the Sun
- equal cross section for all ν types

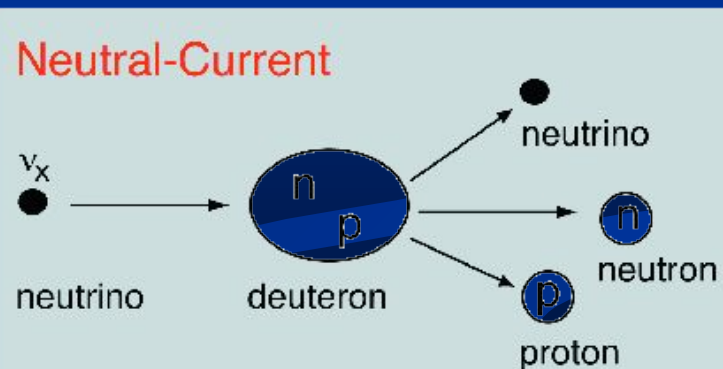


- low statistics
- mainly sensitive to ν_e , some ν_μ and ν_τ
- strong directional sensitivity

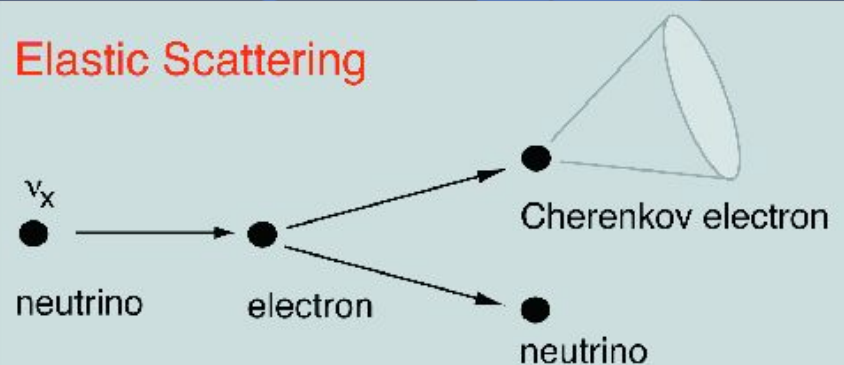
Charged-Current



Neutral-Current



Elastic Scattering



Pure D₂O (phase I)

Эксперимент SNO

Kevin Graham
NOON2004

Salt (phase II)

$$\Phi_{CC}^{I-cons.} = 1.76_{-0.05}^{+0.06} (stat.)_{-0.09}^{+0.09} (syst.)$$

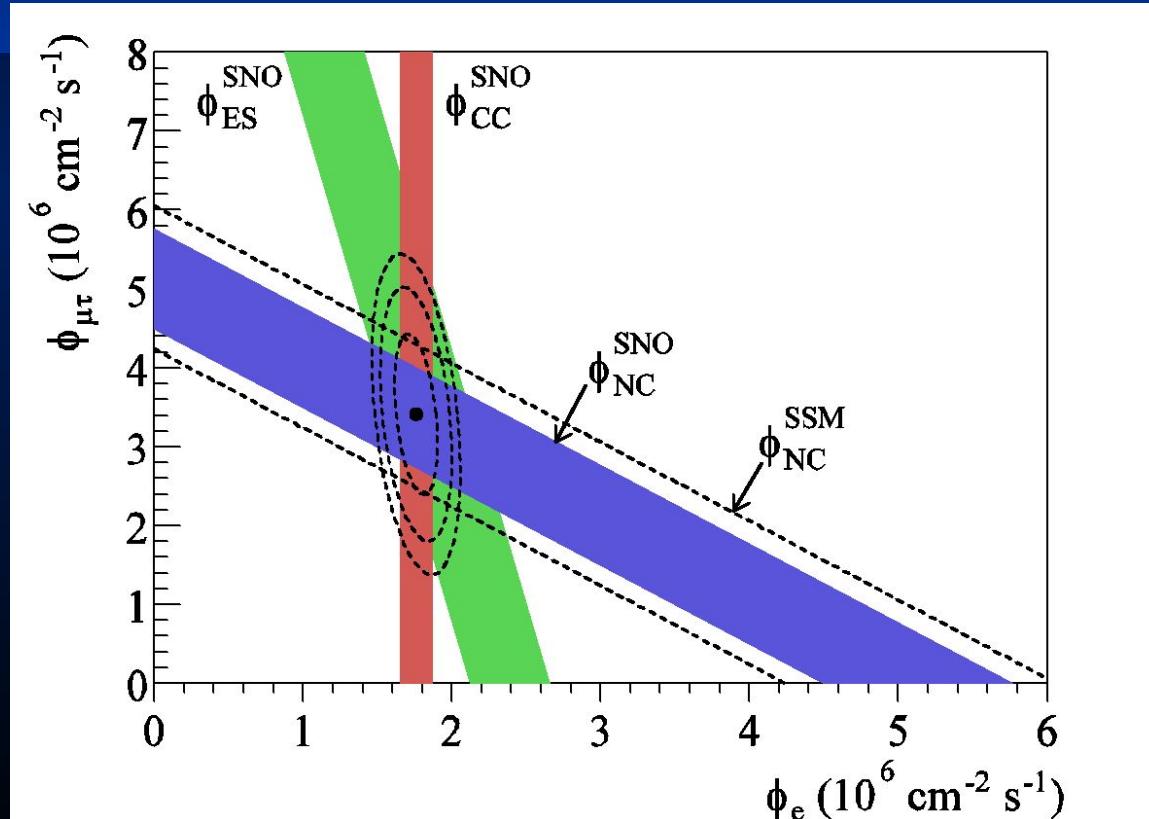
$$\Phi_{ES}^{I-cons.} = 2.39_{-0.23}^{+0.24} (stat.)_{-0.12}^{+0.12} (syst.)$$

$$\Phi_{NC}^{I-cons.} = 5.09_{-0.43}^{+0.44} (stat.)_{-0.43}^{+0.46} (syst.)$$

$$\Phi_{CC}^{II-cons.} = 1.70 \pm 0.07 (stat.)_{-0.10}^{+0.09} (syst.)$$

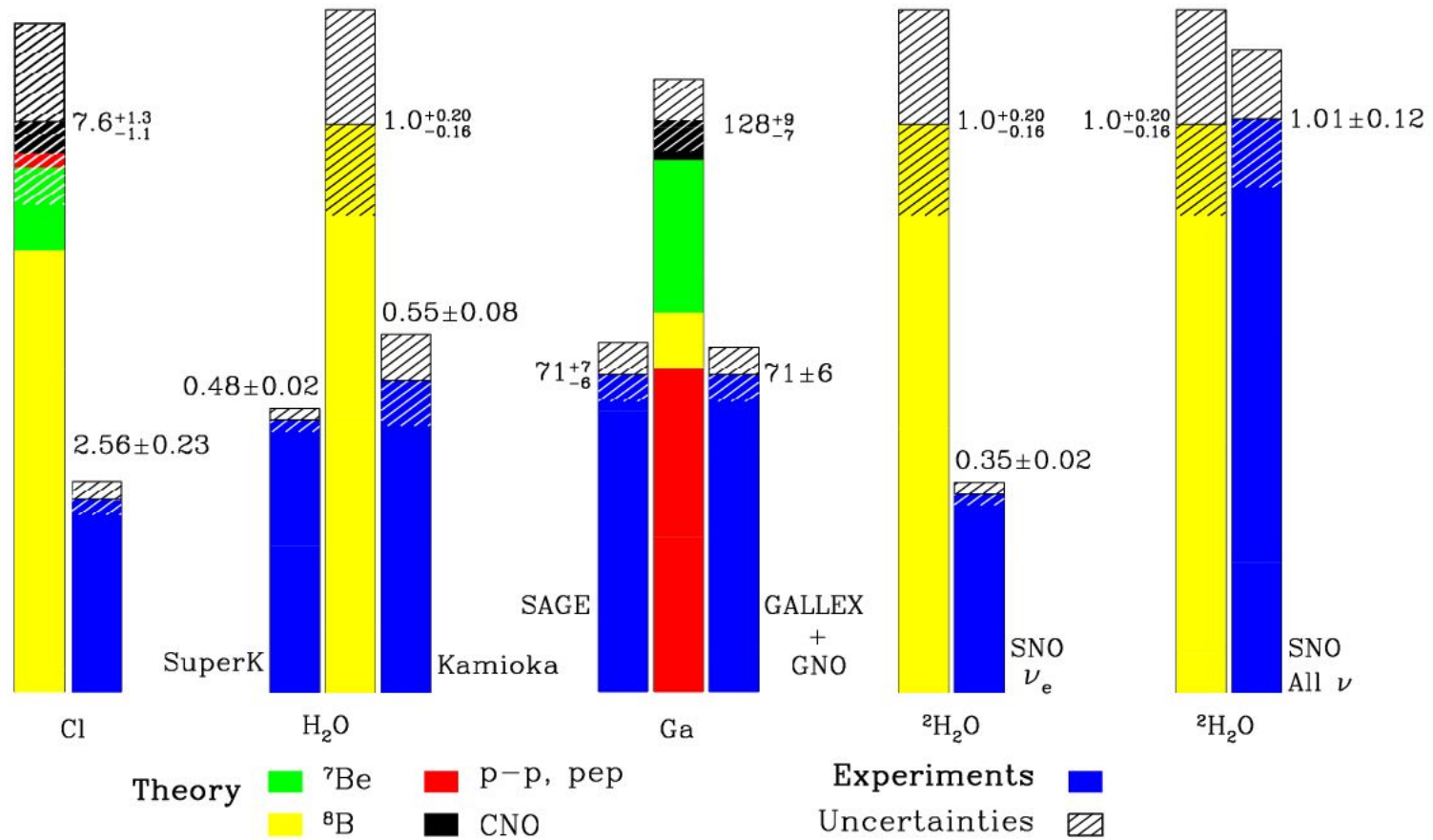
$$\Phi_{ES}^{II-cons.} = 2.13_{-0.28}^{+0.29} (stat.)_{-0.08}^{+0.15} (syst.)$$

$$\Phi_{NC}^{II-cons.} = 4.90 \pm 0.24 (stat.)_{-0.27}^{+0.29} (syst.)$$

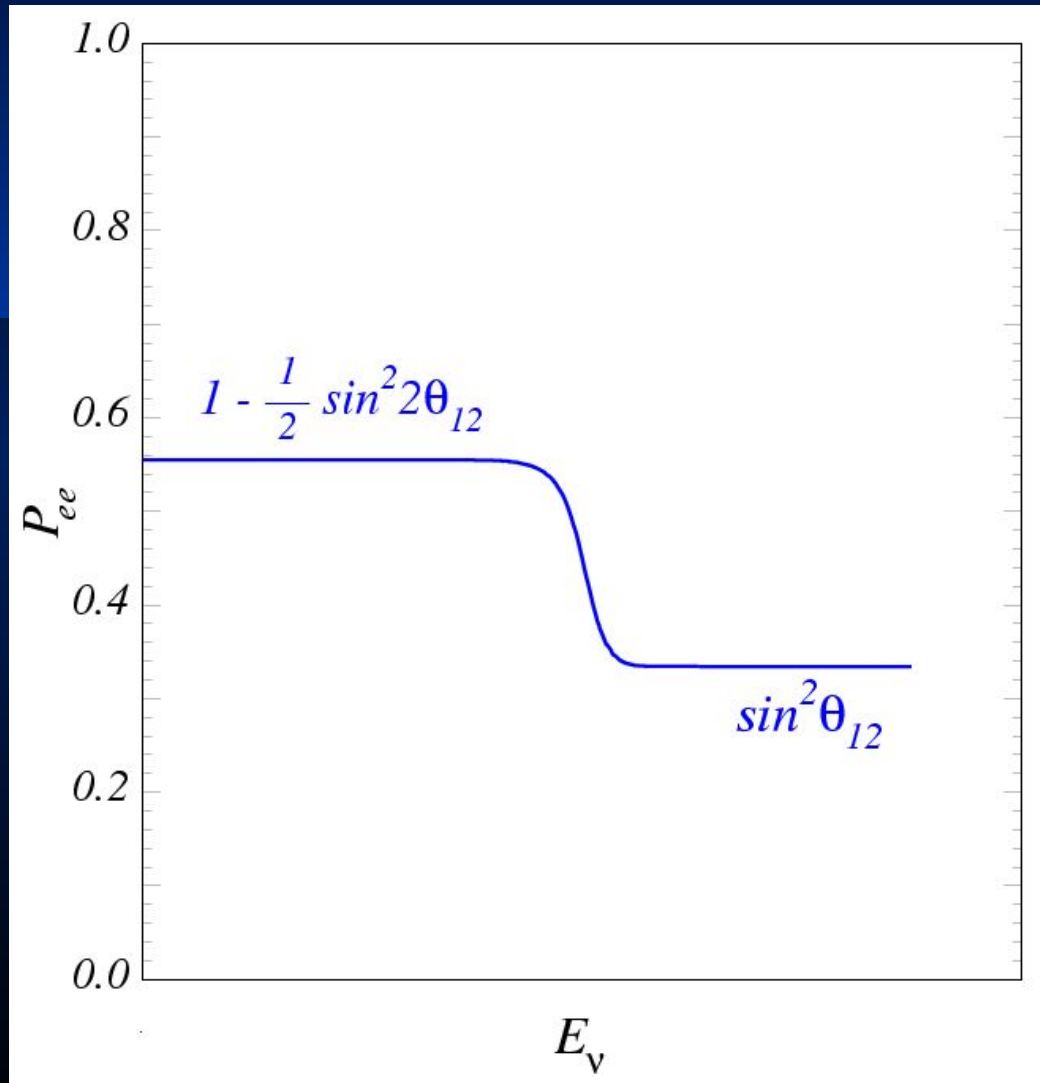


Солнечные нейтрино

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000

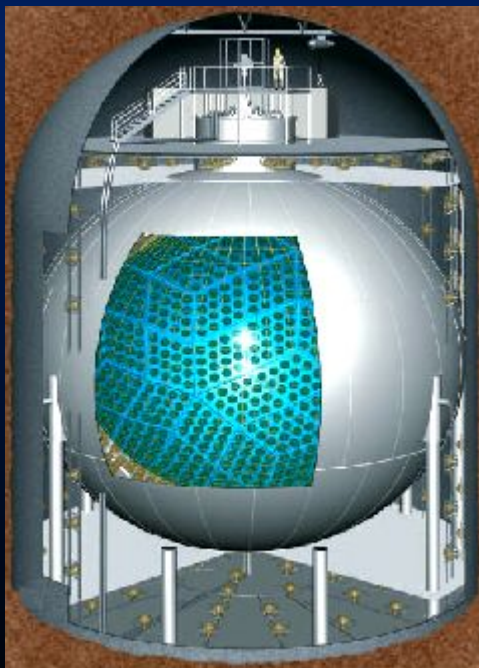
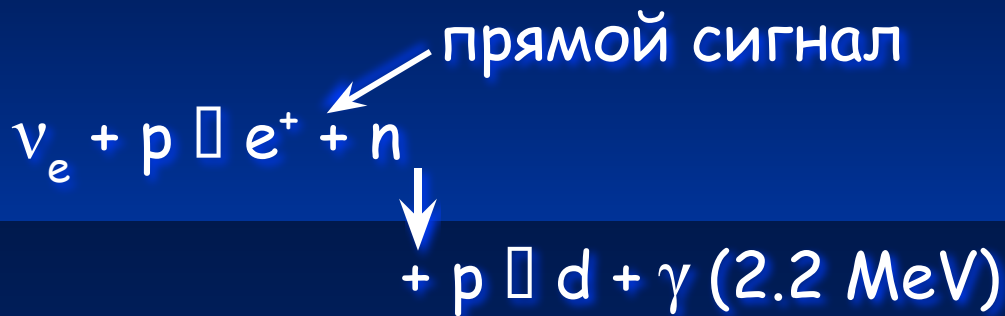


Солнечные нейтрино

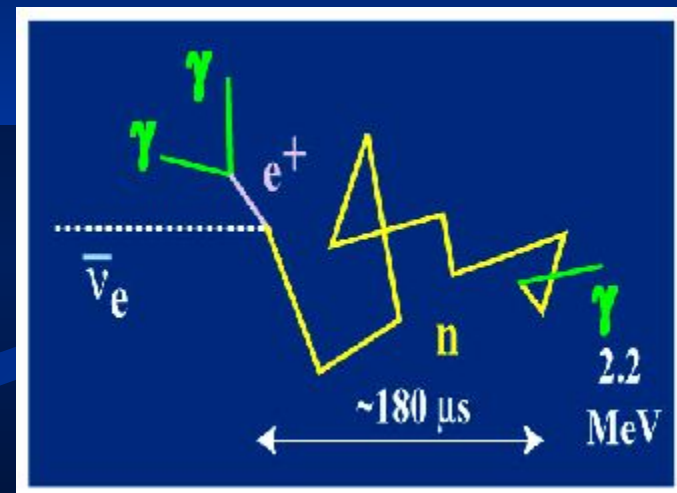


Эксперимент KamLAND

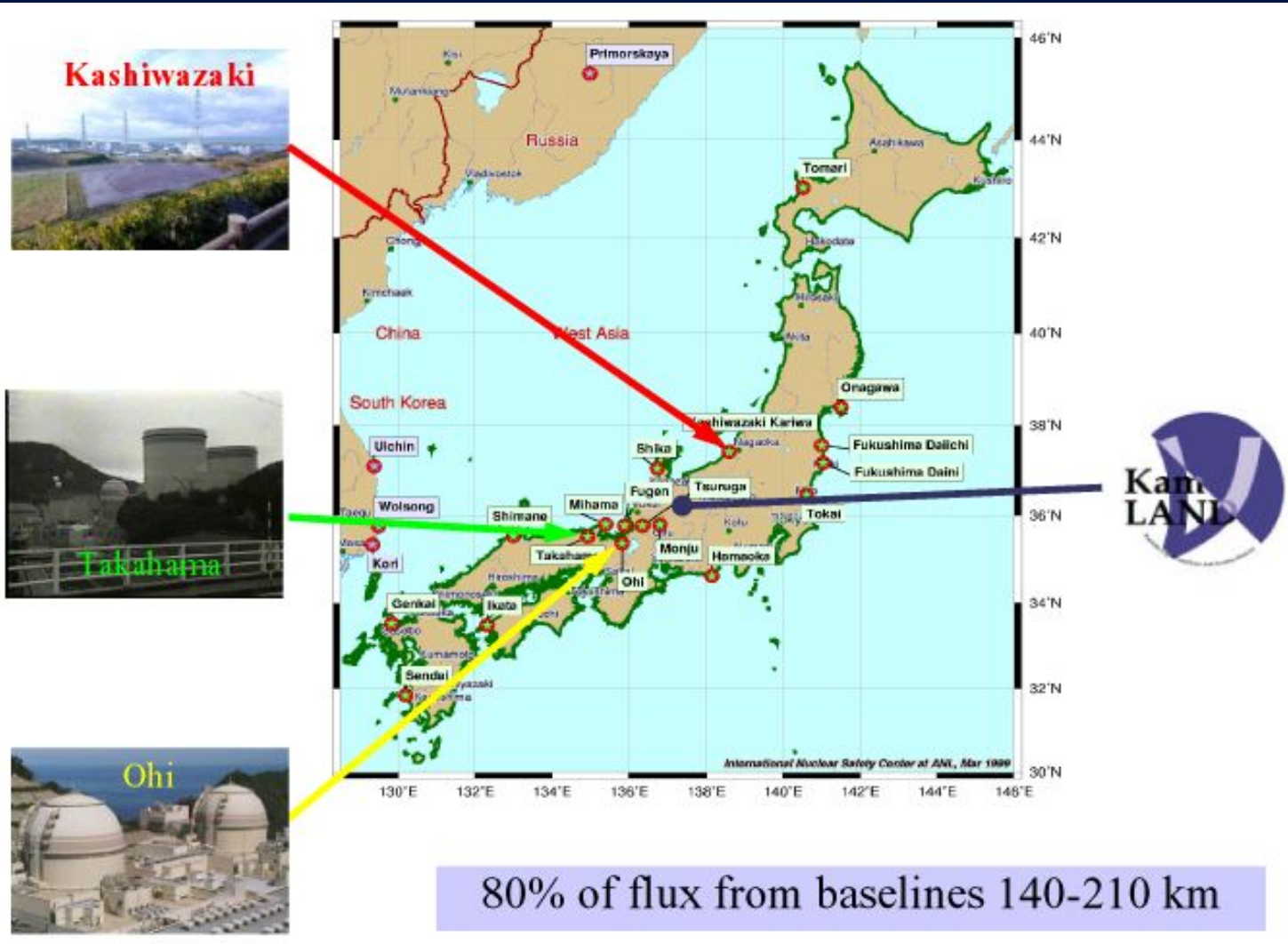
Измерение потока $\bar{\nu}_e$ от реакторов на расстоянии ≈ 180 км



Сфера диаметром 13 м
1000 тонн жидкого
сцинтиллятора



Эксперимент KamLAND



Эксперимент KamLAND

Число событий

с $E > 2.6 \text{ MeV}$

54

Ожидаемое

число

86.8 ± 5.6

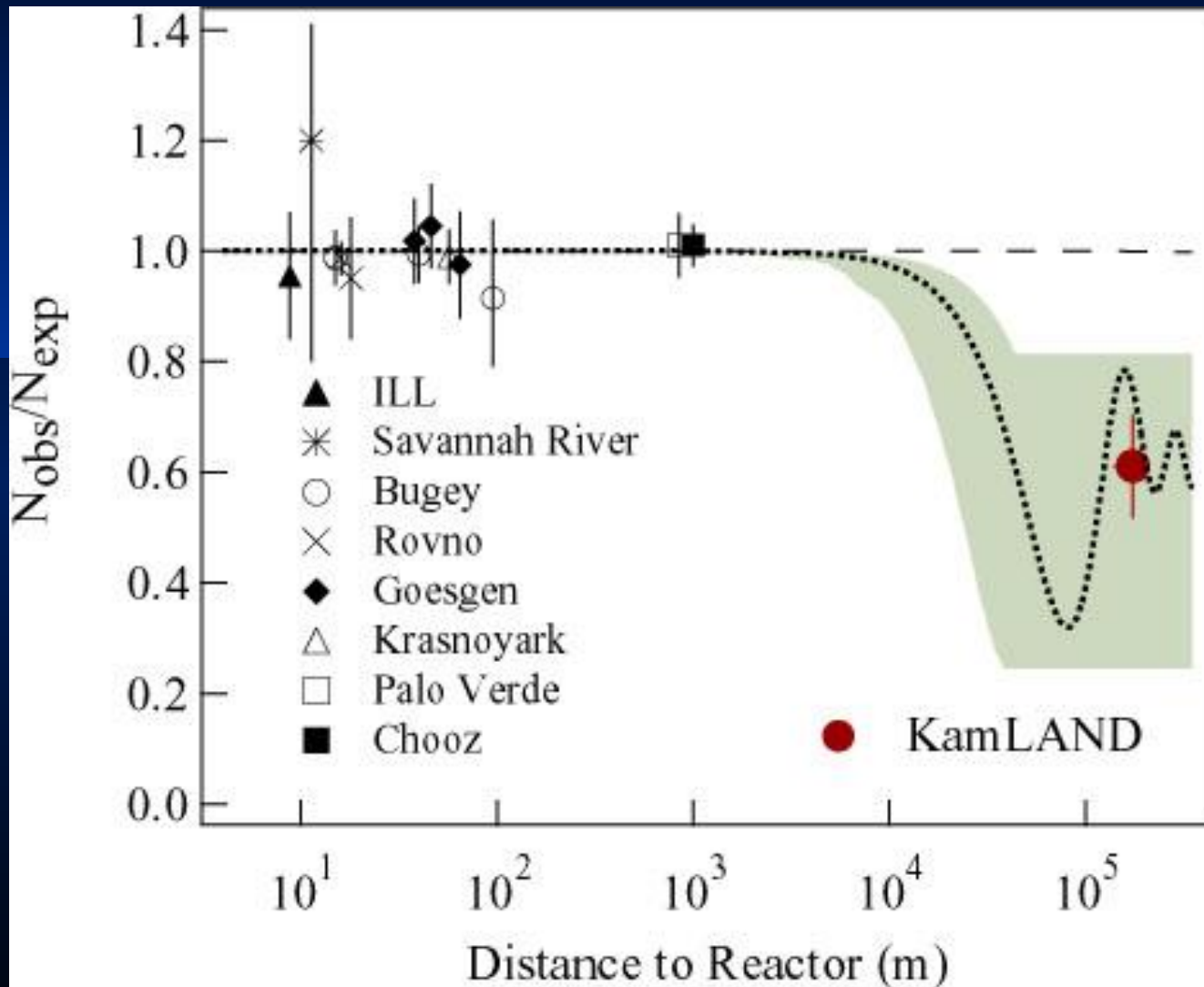
Фон

0.95 ± 0.99

$$\frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}}{N_{\text{expected}}} = 0.611 \pm 0.085 \text{ (stat)} \\ \pm 0.041 \text{ (syst)}$$

99.95 % C.L.

Эксперимент KamLAND



Смешивание нейтрино

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

$$\alpha = e, \mu, \tau, \dots; \quad i =$$

$$U = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1, 2, 3, \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} e1 \\ \mu1 \\ \tau1 \end{matrix} & \begin{pmatrix} U & U & U \\ U & U & U \\ U & U & U \end{pmatrix} \\ \begin{matrix} e2 \\ \mu2 \\ \tau2 \end{matrix} & \\ \begin{matrix} e3 \\ \mu3 \\ \tau3 \end{matrix} & \end{matrix}$$

Уравнение эволюции

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} | \nu_\alpha \rangle \\ | \nu_\beta \rangle \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} | \nu_\alpha \rangle \\ | \nu_\beta \rangle \end{pmatrix}$$

$$H \approx \frac{1}{2E} U \text{diag}(0, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2) U^* + \text{diag}(V, 0, 0)$$

$$\Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2 \quad V = \sqrt{2} G_F N_e$$

$$H \approx \frac{\Delta m_{31}^2}{2E} U \text{diag}(0, \alpha, 1) U^* + \text{diag}(2EV/\Delta m_{31}^2, 0, 0)$$

$$\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2}$$

$$\Delta m_{21}^2 / \Delta m_{31}^2$$

Смешивание нейтрино

3 угла смешивания ($\vartheta_{12}, \vartheta_{23}, \vartheta_{13}$)
и 1 фаза CP нарушения (δ)

Солнечные нейтрино
 Δm^2_2 ($5.4 \times 10^{-5} \div 9.5 \times 10^{-5}$)
 eV^2 θ_1
 $\sin^2 2\theta_1$ (0.71 \div 0.95)

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

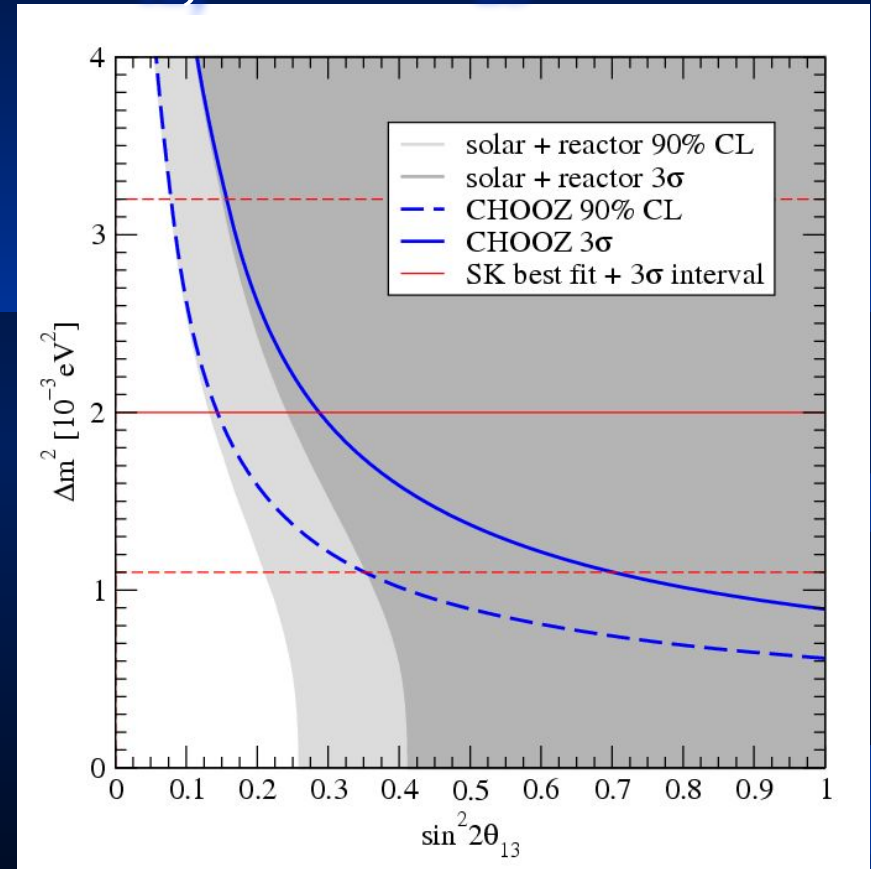
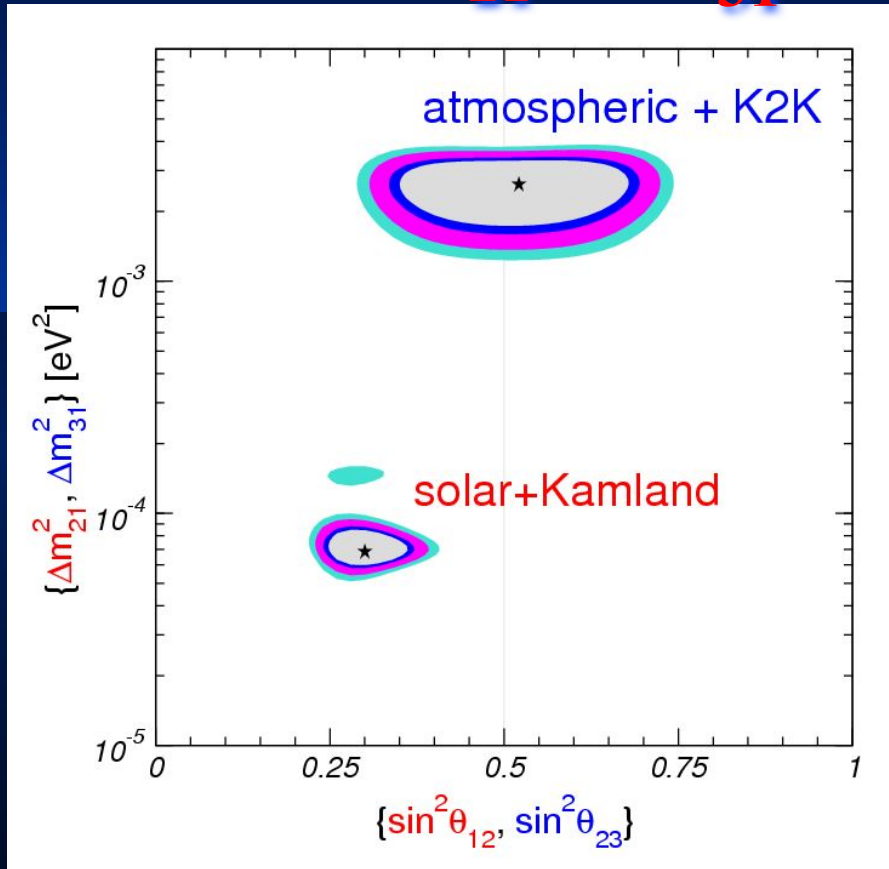
$$c_{ij} = \cos \vartheta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \vartheta_{ij}$$

Атмосферные нейтрино
 Δm^2_3 ($1.3 \times 10^{-3} \div 3.0 \times 10^{-3}$)
 eV^2 θ_2

$$\sin^2 2\theta_2 > 0.9$$

Известные параметры (Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 , $\sin^2 2\theta_{12}$, $\sin^2 2\theta_{23}$)



... и ограничение на $\sin^2 2\theta_{13}$

Неизвестные параметры

$$\sin^2 2\theta_{13} \leq$$

0.2

δ - фаза CP нарушения

Знак $\Delta m_{31}^2 \equiv$ Тип иерархии масс

нормальная

ν_3 —

ν_2 —

ν_1 —

обратная

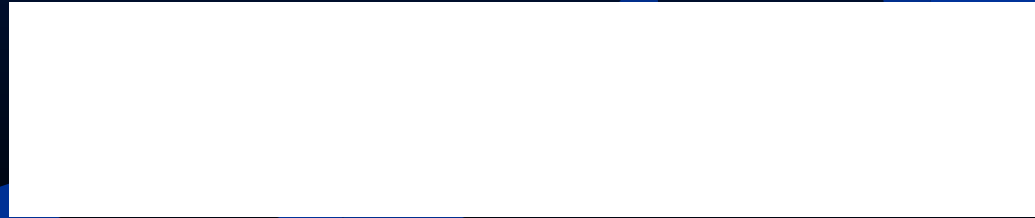
ν_2 —

ν_1 —

ν_3 —

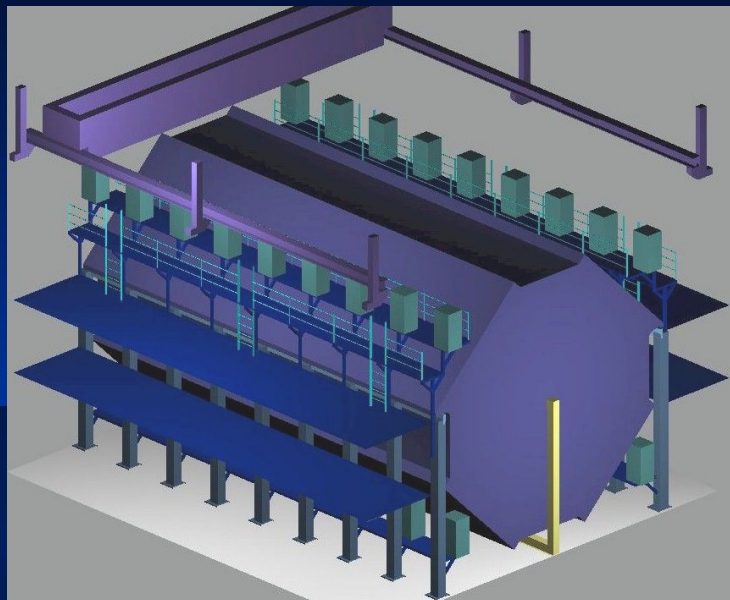
Эксперимент MINOS

N. Tagg
NO-VE 2003



Эксперимент MINOS

N. Tagg
NO-VE 2003

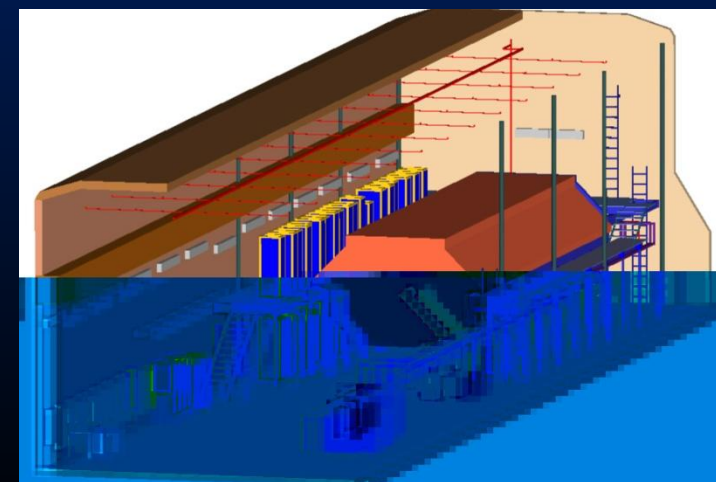


Far Detector

485 planes of scintillator + steel
8m x 8m octagon
5.4 kT total mass

BOTH:

Steel/Scintillator sandwiches
2.54 cm steel + 1 cm scint
Magnetized $\sim 1.5\text{T}$
55%/ \sqrt{E} hadrons
23%/ \sqrt{E} electrons

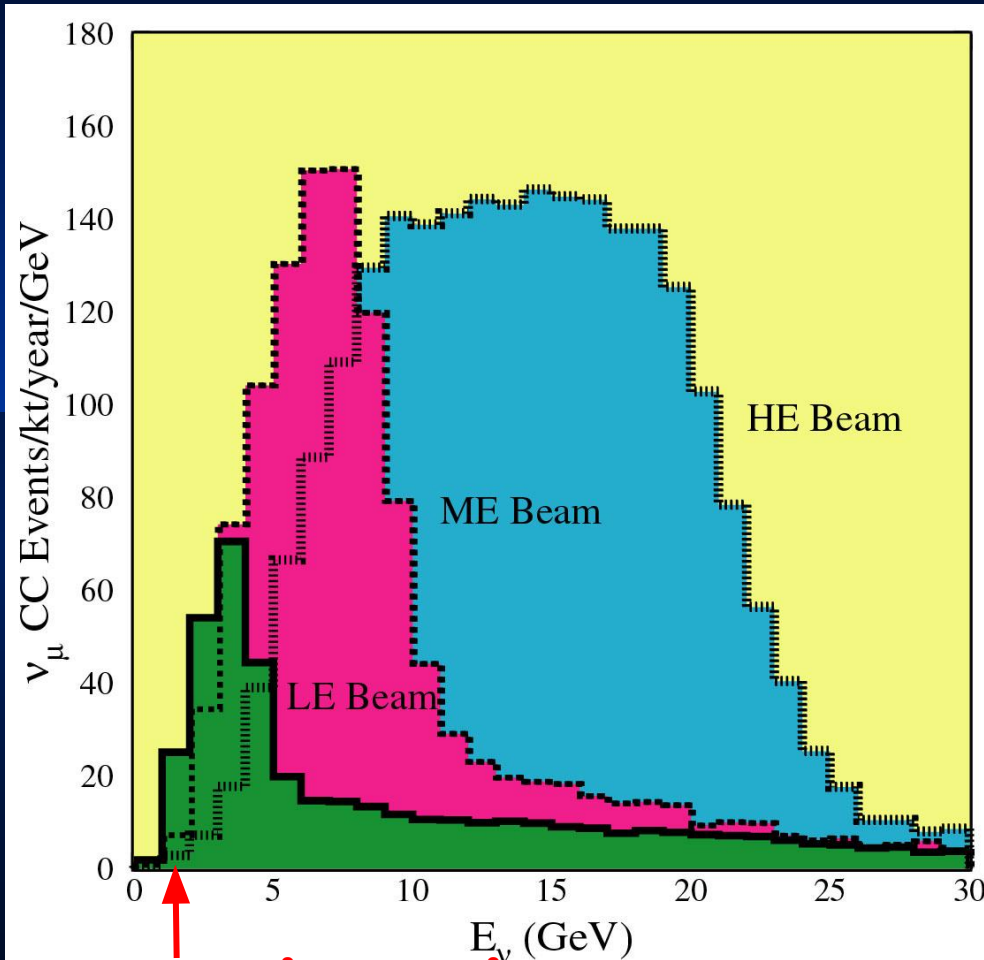


Near Detector

282 steel + 153 scintillator planes
3.8m x 4.8 m
0.98 kT total mass

Эксперимент MINOS

N. Tagg
NO-VE 2003



Osc. Max. for $\Delta m^2 = 0.002 \text{ eV}^2$

By moving the horns and target, different energy spectra are available using the NuMI beamline. The energy can be tuned depending on the specific oscillation parameters expected/observed.

ν_{μ} CC Events/kt/3.7e20pot

Low	Medium	High
440	1040	2170

ν_{μ} CC Events/MINOS/7.4e20pot

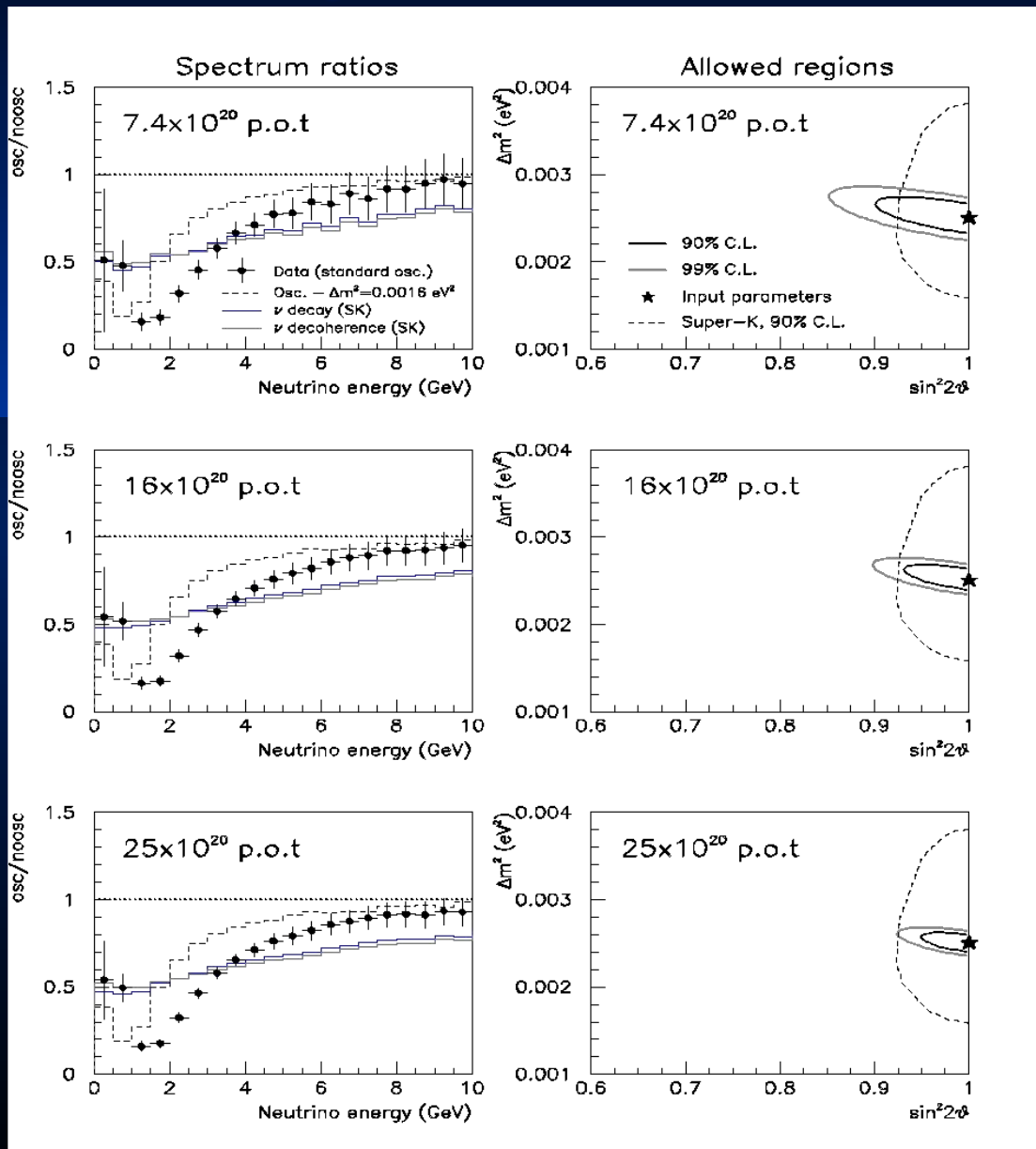
Low	Medium	High
4760	11300	23400

3.7×10^{20} protons on target/year
requires 4×10^{13} protons/2.0 seconds

Эксперимент MINOS

N. Tagg
NO-VE 2003

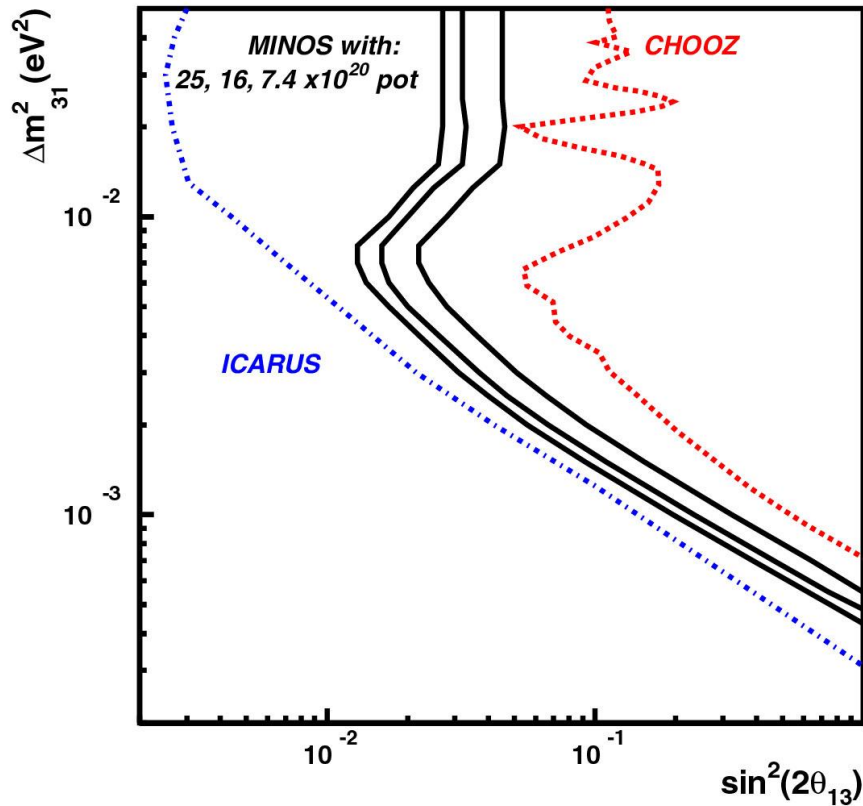
$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\mu}$$



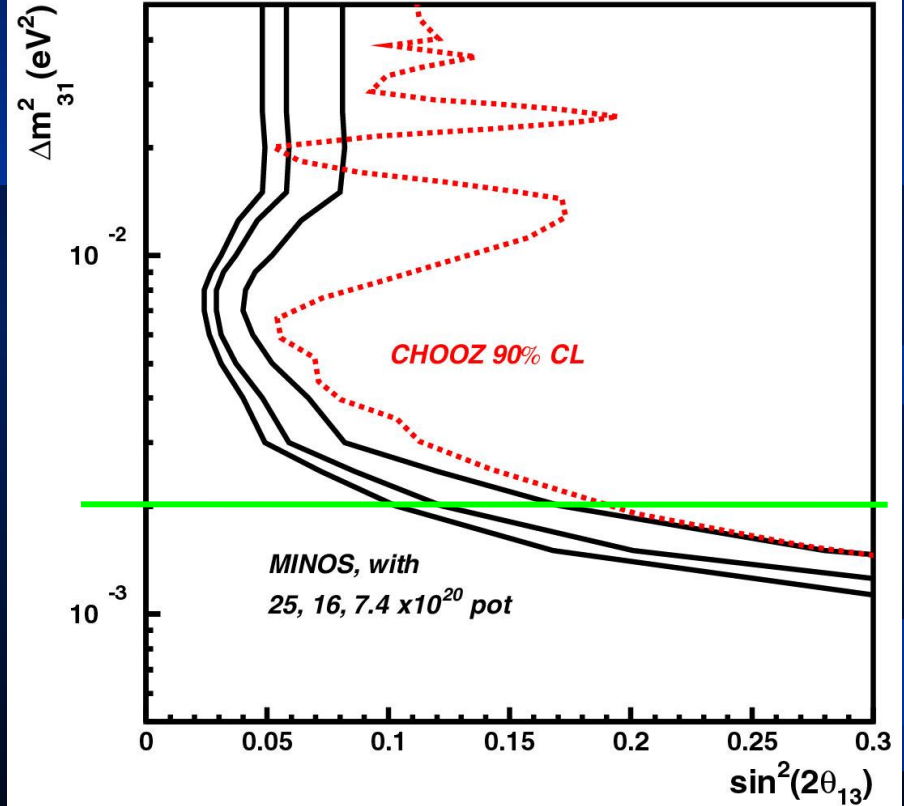
Эксперимент MINOS

$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_e$$

90% CL Exclusion



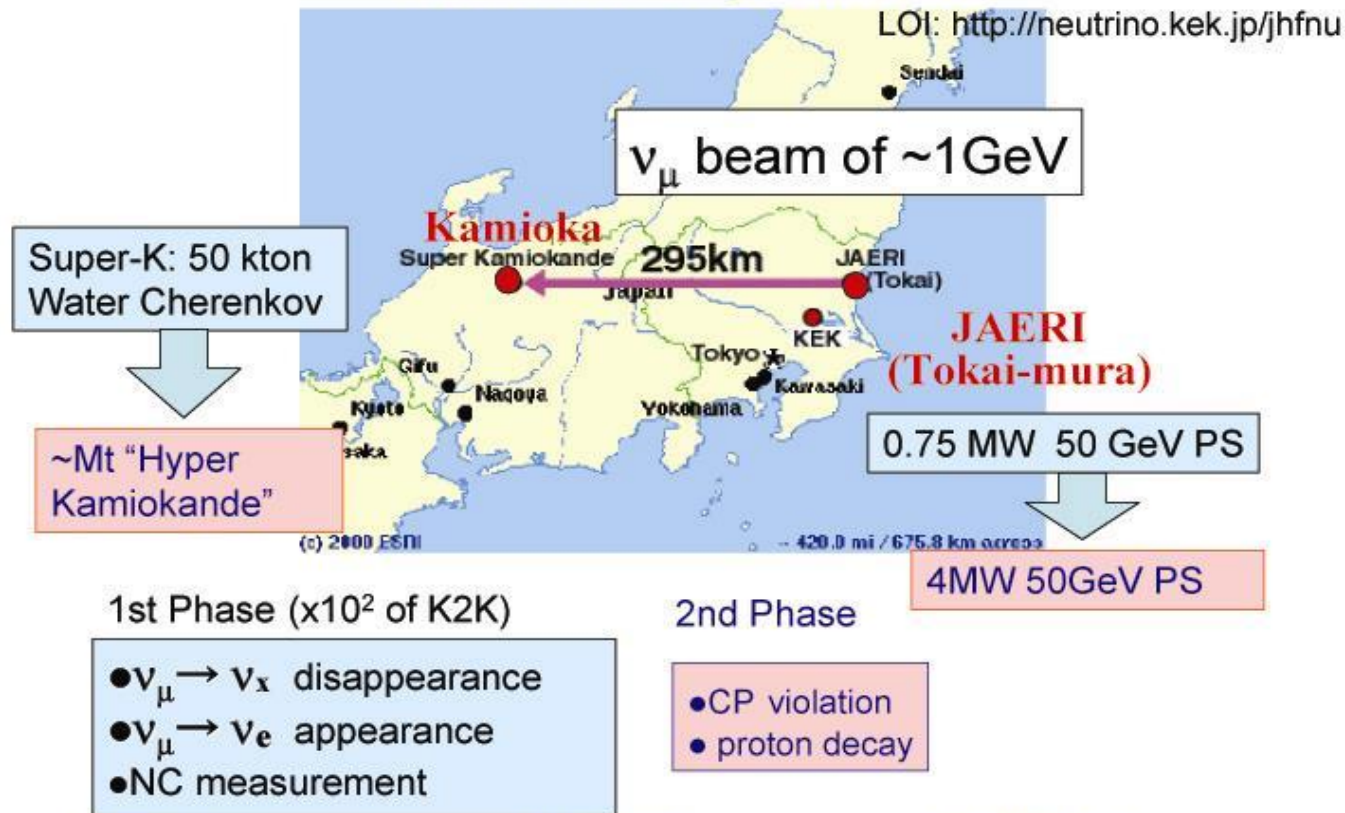
3 σ Contours



• MINOS sensitivities based on varying numbers of protons on target

Проект J-PARC

“T2K” (Tokai-to-Kamioka) neutrino experiment



T.Kobayashi (KEK)

La Thuile 2004

Feb. 29~Mar 6, 2004

13

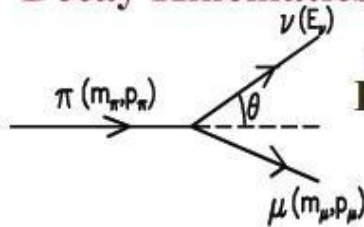
Проект J-PARC

Off-axis beam (ref.: BNL-E889 Proposal)

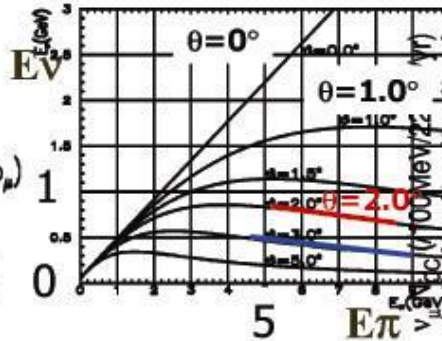


WBB w/ intentionally misaligned beam line from det. axis

Decay Kinematics



$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta)}$$



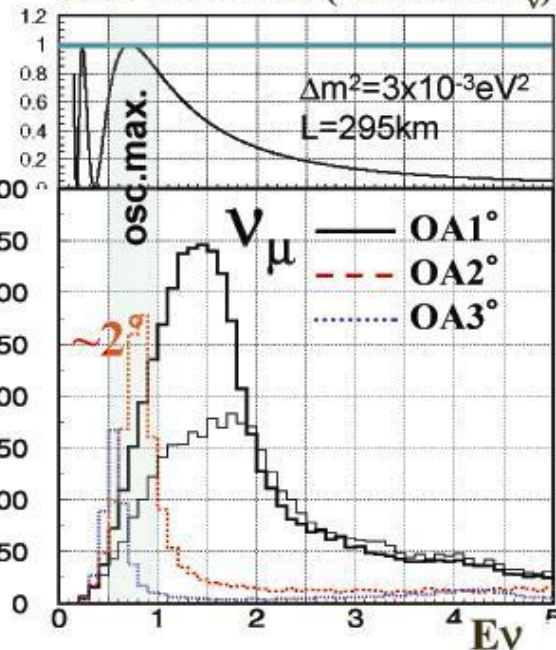
~3000 CC int./22.5kt/yr

ν_e : 1.0% (0.2% @ peak);

T.Kobayashi (KEK)

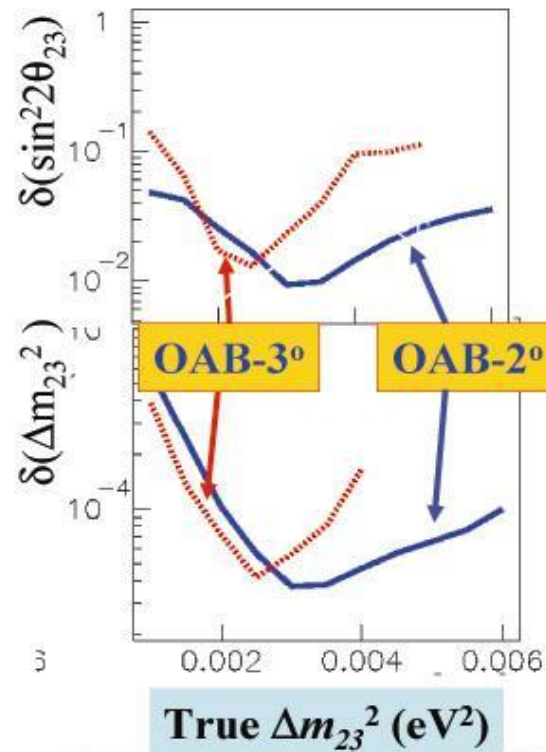
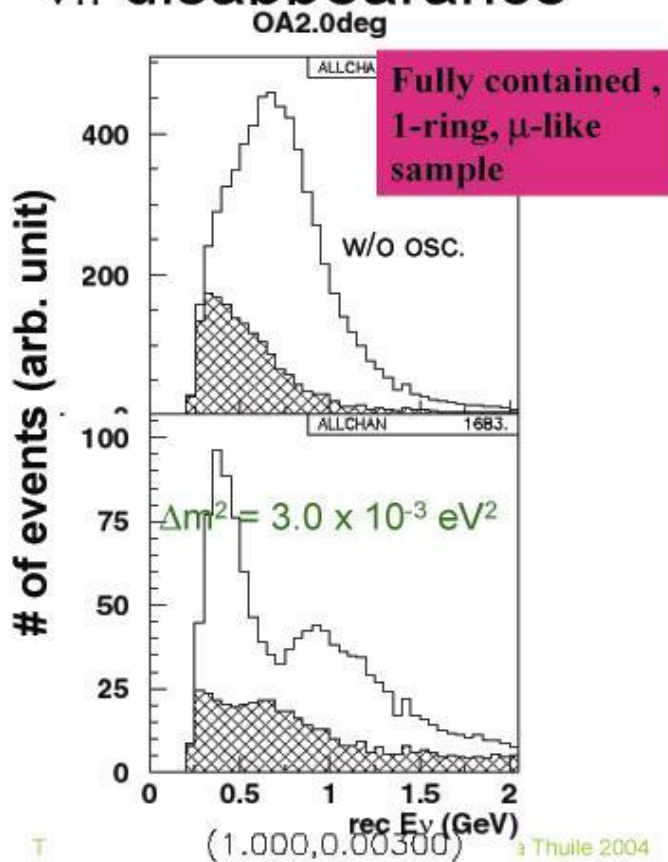
La Thuile 2004

$$\text{Osc. Prob.} = \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / E_\nu)$$



Measurement of $\sin^2 2\theta_{23}$, Δm_{23}^2

ν_μ disappearance



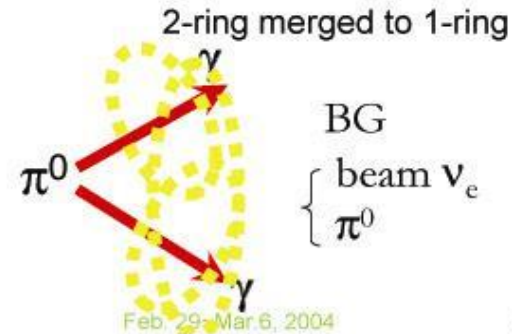
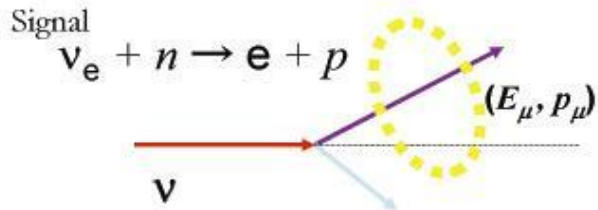
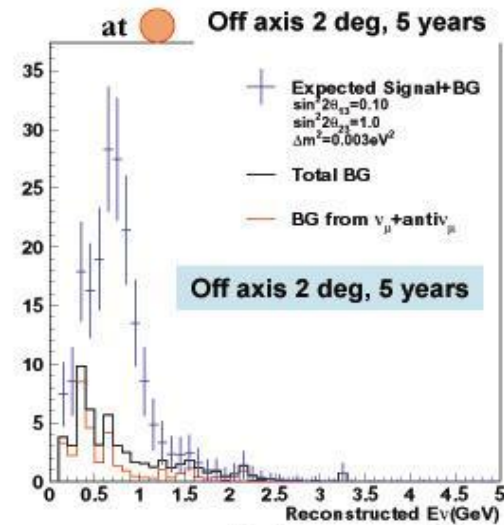
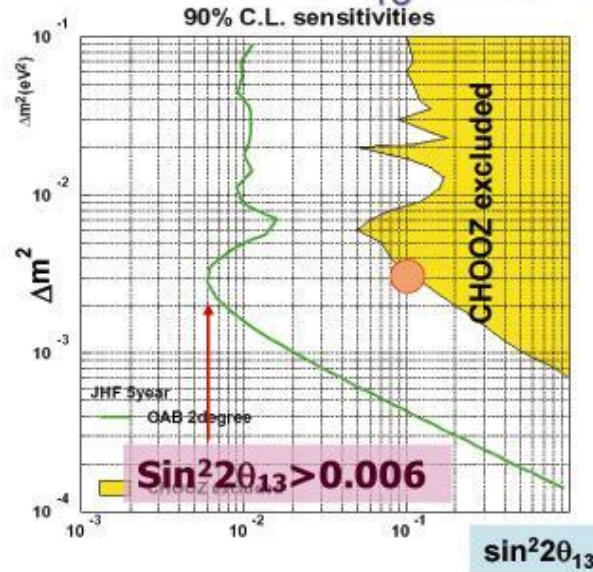
$$\delta(\sin^2 2\theta) \sim 0.01$$

$$\delta(\Delta m^2) \sim < 1 \times 10^{-4}$$

19

Проект J-PARC

$\sin^2 2\theta_{13}$ from ν_e appearance



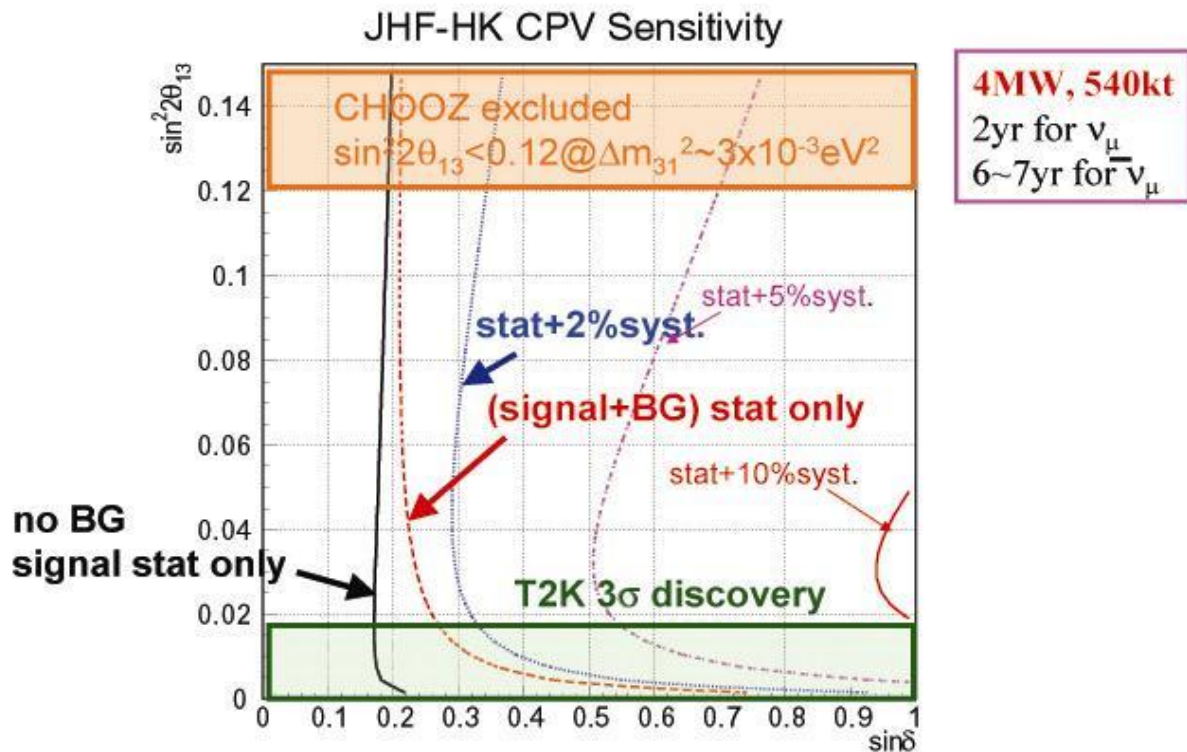
T.Kobayashi (KEK)

La Thuile 2004

Feb. 29- Mar 6, 2004

21

Future Extension: Search for CPV



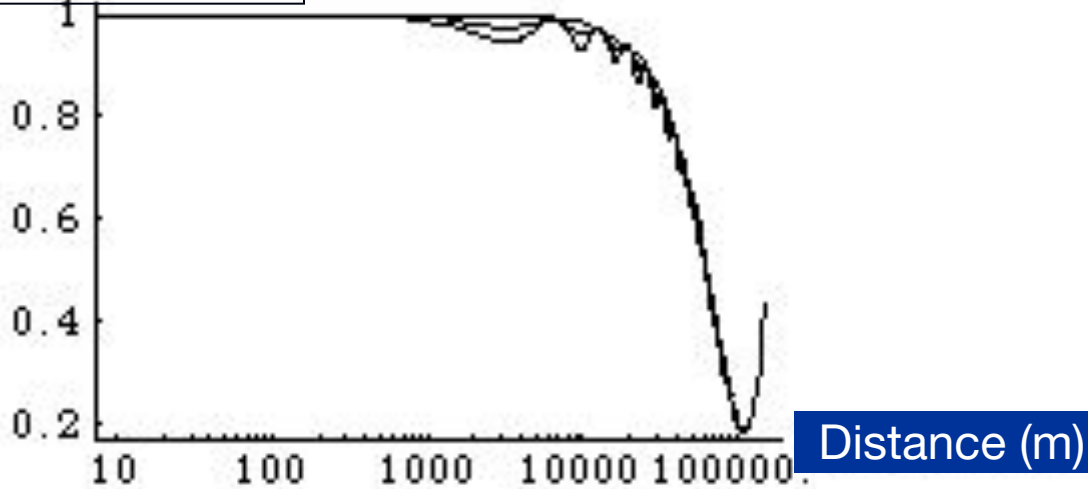


Реакторные антинейтрино

Dominant θ_{12}
Oscillation

$$P_{ee} \approx 1 - \cos^4 \theta_{13} \left[1 - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \right) \right]$$

$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$

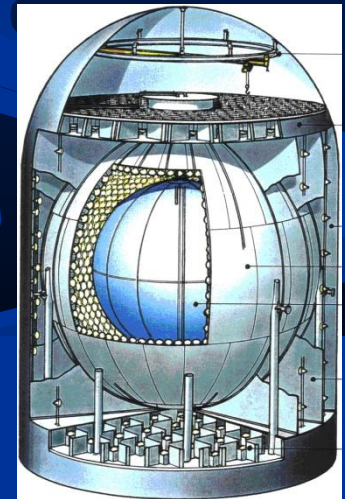


Distance (m)

Subdominant θ_{13}

Oscillation

$$P_{ee} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} + \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \right) \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12}$$



Реакторные антинейтрино

Luminosity Scaling

