

Нейтрино – на переднем крае мироздания.

По мотивам Нобелевской премии по физике 2015 года

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award
the Nobel Prize in Physics for 2015 to

Takaaki Kajita, born 1959, former head of **Super-Kamiokande Collaboration**,
University of Tokyo, Kashiwa, Japan

and

Arthur B. McDonald, born 1943, former head of **Sudbury Neutrino Observatory**
Collaboration, Queen's University, Kingston, Canada

***“for the discovery of neutrino oscillations,
which shows that neutrinos have mass”.***

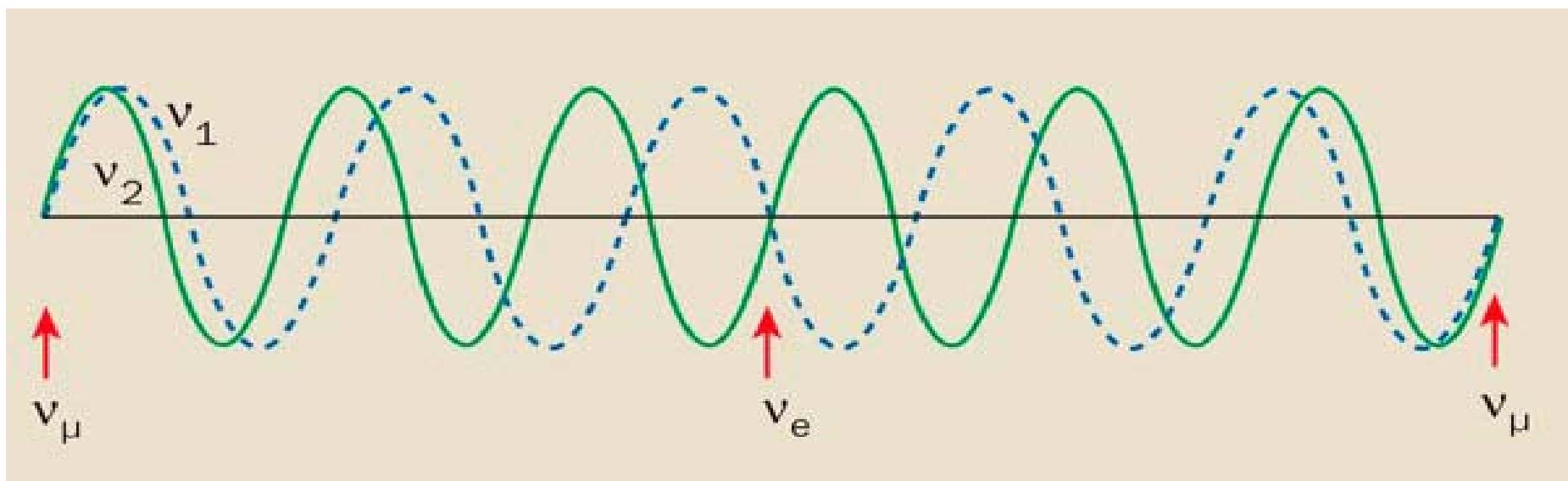
**Лауреаты Нобелевской премии по физике 2015 года:
Артур Брюс Макдональд (Arthur Bruce McDonald) и
Такааки Кадзита (Takaaki Kajita). Фото © Lars Hagberg**



Открытие нейтрино в бета-распаде ядер: Чадвик, 1914, и
Паули, 1930: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

Превращения на лету нейтрино мюонного сорта в электронное нейтрино, а затем обратно в мюонное

- Рисунок с сайта physicsworld.com



Current understanding of neutrino mixing

ν_e, ν_μ, ν_τ mix to form
three mass eigenstates ν_1, ν_2, ν_3

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

	Best fit	3σ range
$m_2^2 - m_1^2$ [10 ⁻⁵ eV ²]	7.65	7.05 - 8.34
$ m_3^2 - m_1^2 $ [10 ⁻³ eV ²]	2.40	2.07 - 2.75
$\sin^2 \theta_{12}$	0.304	0.25 - 0.37
$\sin^2 \theta_{23}$	0.50	0.36 - 0.67
$\sin^2 \theta_{13}$	0.01	≤ 0.056

Основы теории нейтринных осцилляций

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \vec{p}_i \cdot \vec{x})} |\nu_i(0)\rangle,$$

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \approx E + \frac{m_i^2}{2E},$$

$$|\nu_i(L)\rangle = e^{-im_i^2 L/2E} |\nu_i(0)\rangle.$$

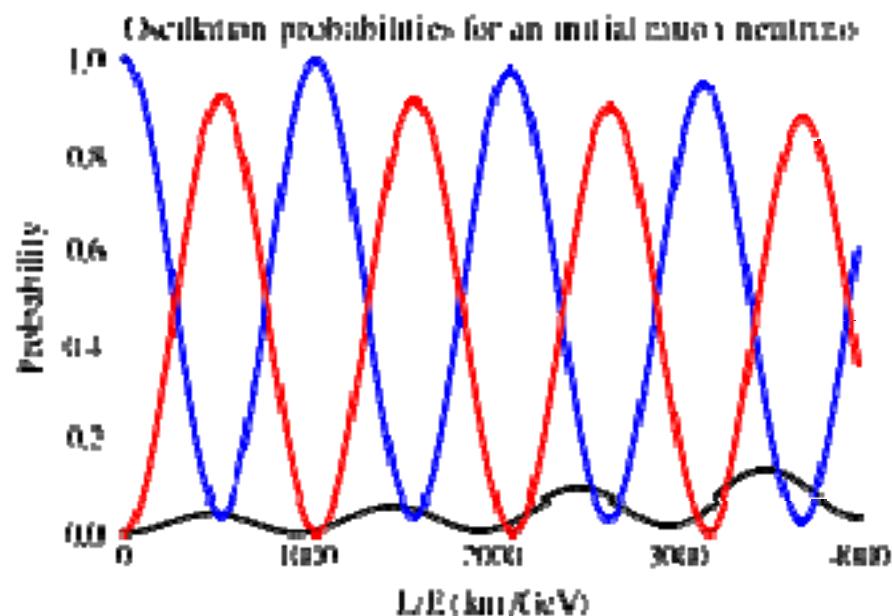
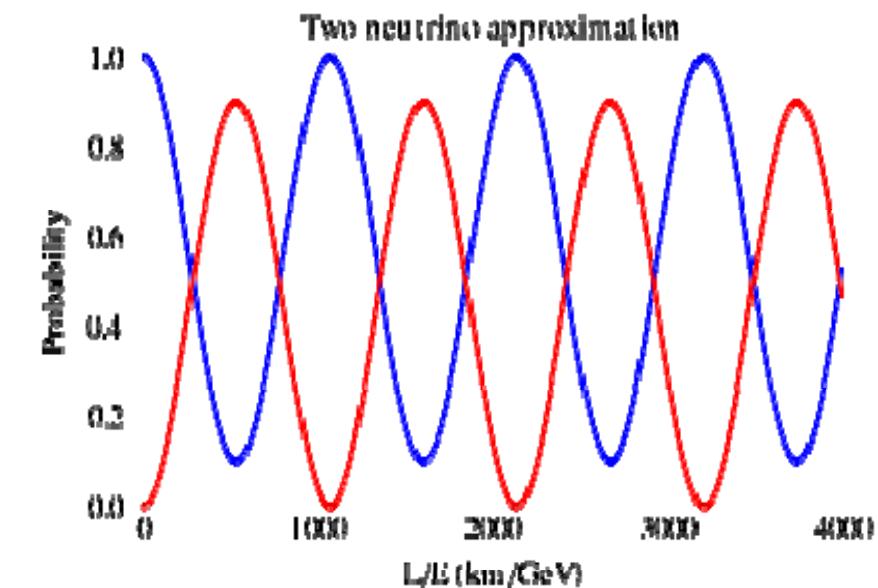
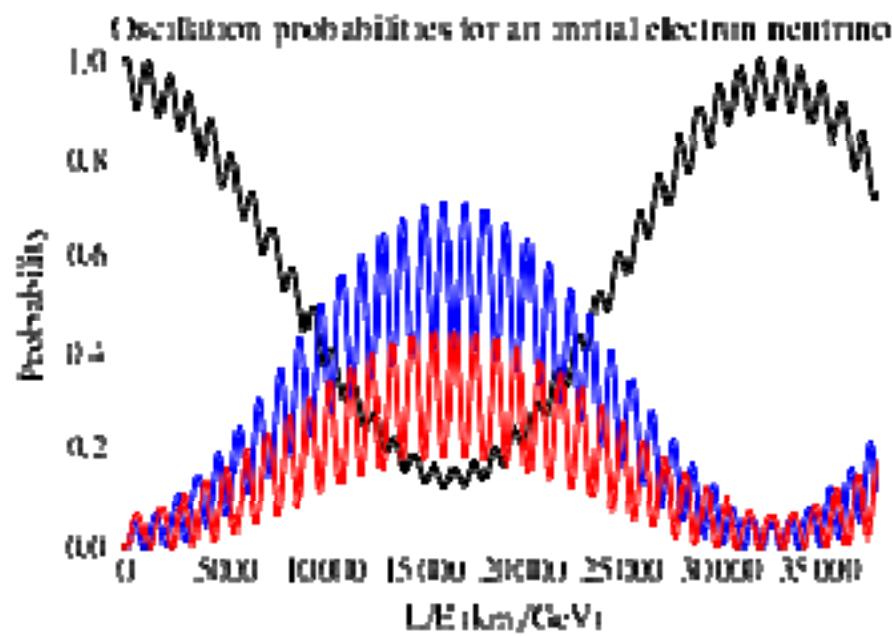
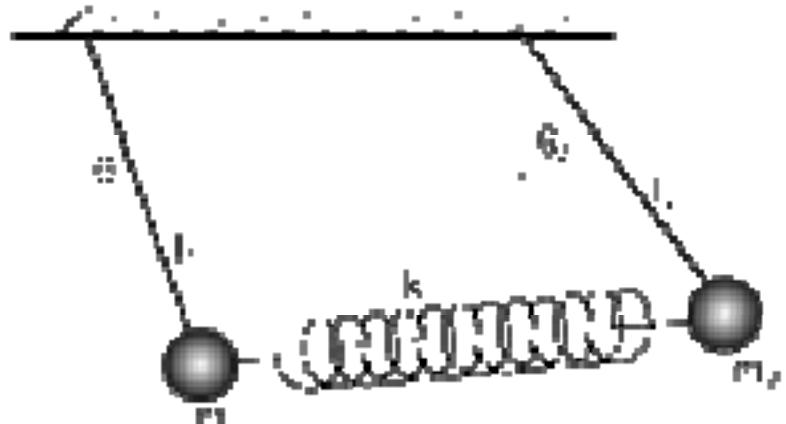
$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \delta_{\alpha \beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right)$$

$$+ 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right),$$

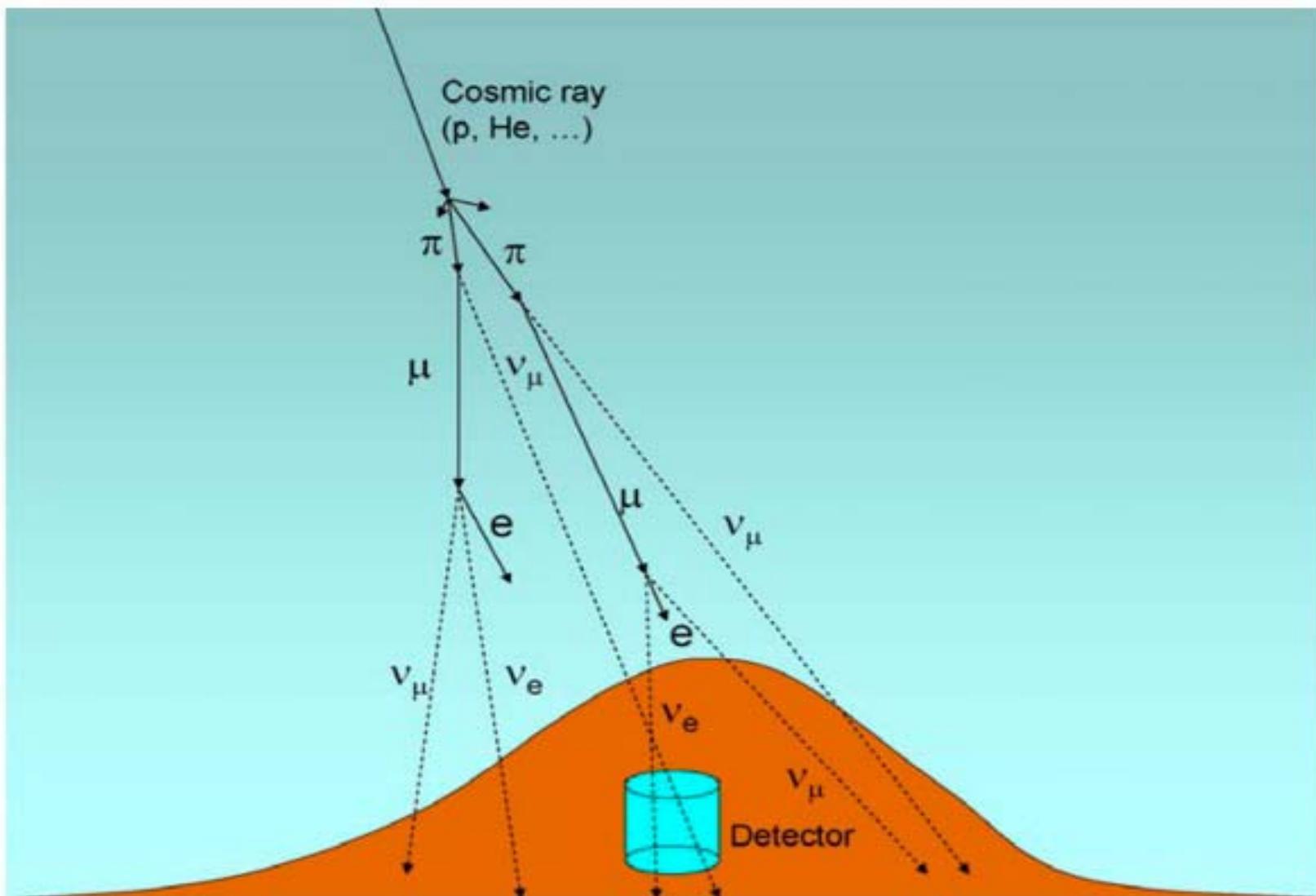
$$\frac{\Delta m^2 c^2 L}{4\hbar E} = \frac{\text{GeV fm}}{4\hbar c} \times \frac{\Delta m^2}{\text{eV}^2} \frac{L}{\text{km}} \frac{\text{GeV}}{E} \approx 1.27 \times \frac{\Delta m^2}{\text{eV}^2} \frac{L}{\text{km}} \frac{\text{GeV}}{E},$$

$$A_{\text{CP}}^{(\alpha\beta)} = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) - P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = 4 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right)$$

Классический аналог нейтриновых осцилляций



Проблема нейтрино от космических лучей



Рождение мюонных и электронных нейтрино в атмосфере Земли.

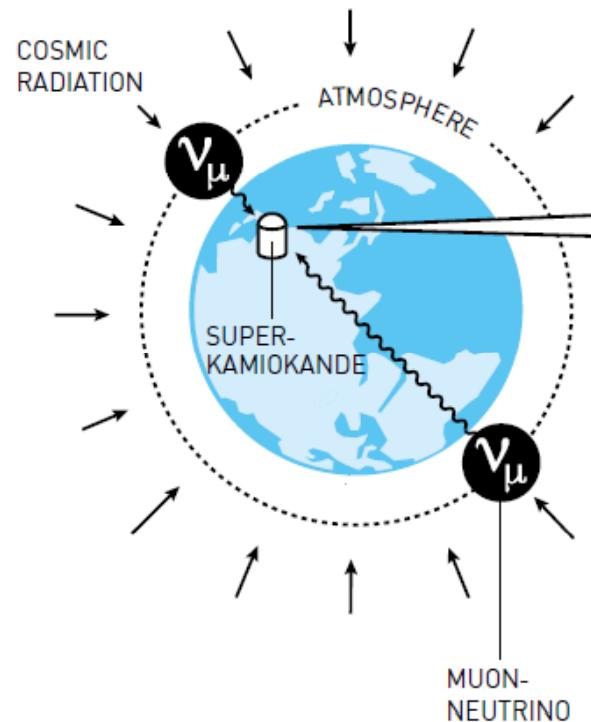
Рисунок из статьи Т. Kajita, 2006. [Discovery of neutrino oscillations](#)



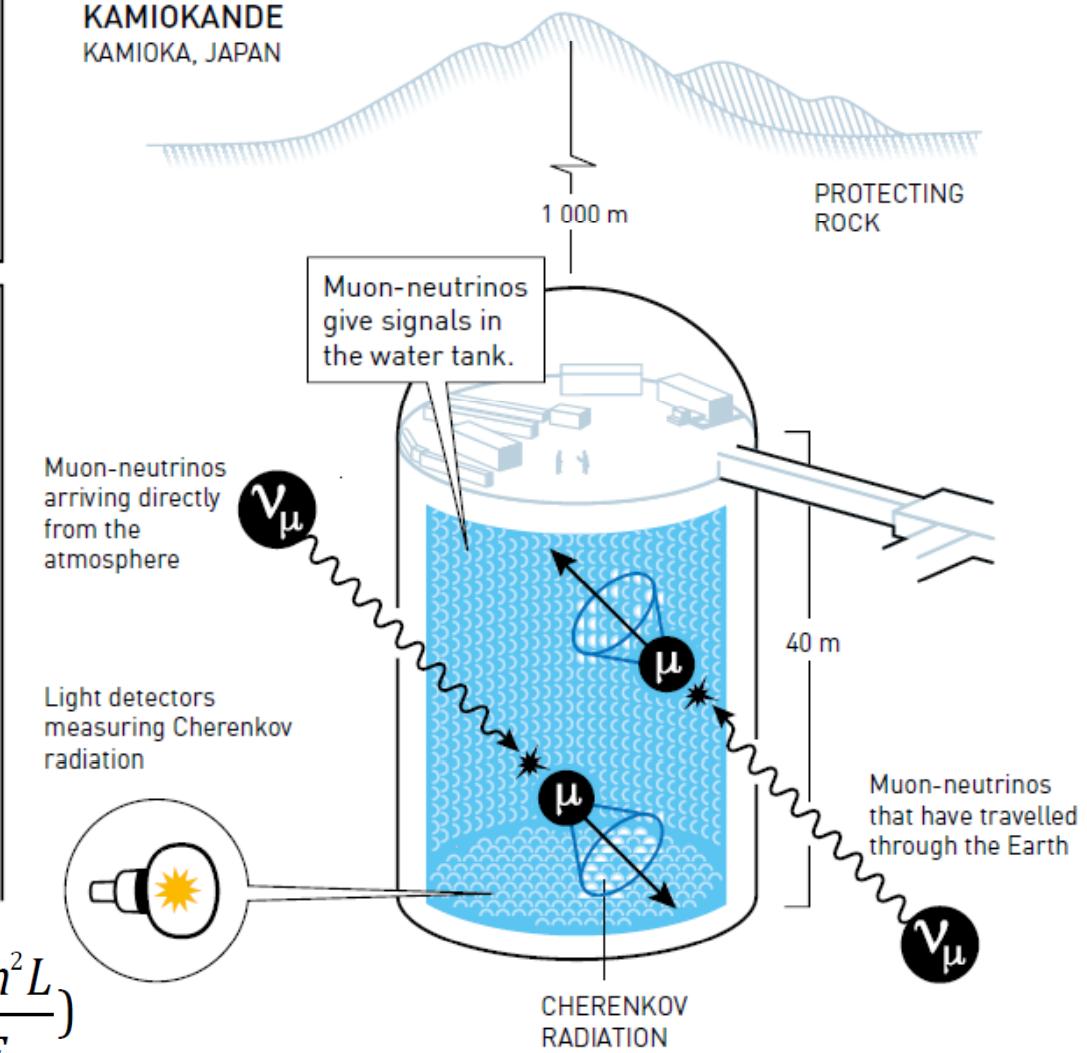
Детектор **Super-Kamiokande** представляет собой резервуар из нержавеющей стали высотой 42 м и диаметром 40 м, заполненный 50 тыс. тонн специально очищенной воды. На стенах резервуара размещены 11146 фотоумножителей.

Предназначен для поиска гипотетического распада протона, изучения нейтрино, а также регистрации нейтринных вспышек сверхновых. Детектор размещён в японской лаборатории на глубине в 1 км в цинковой шахте Камиока, в 290 км к северу от Токио.

NEUTRINOS FROM COSMIC RADIATION

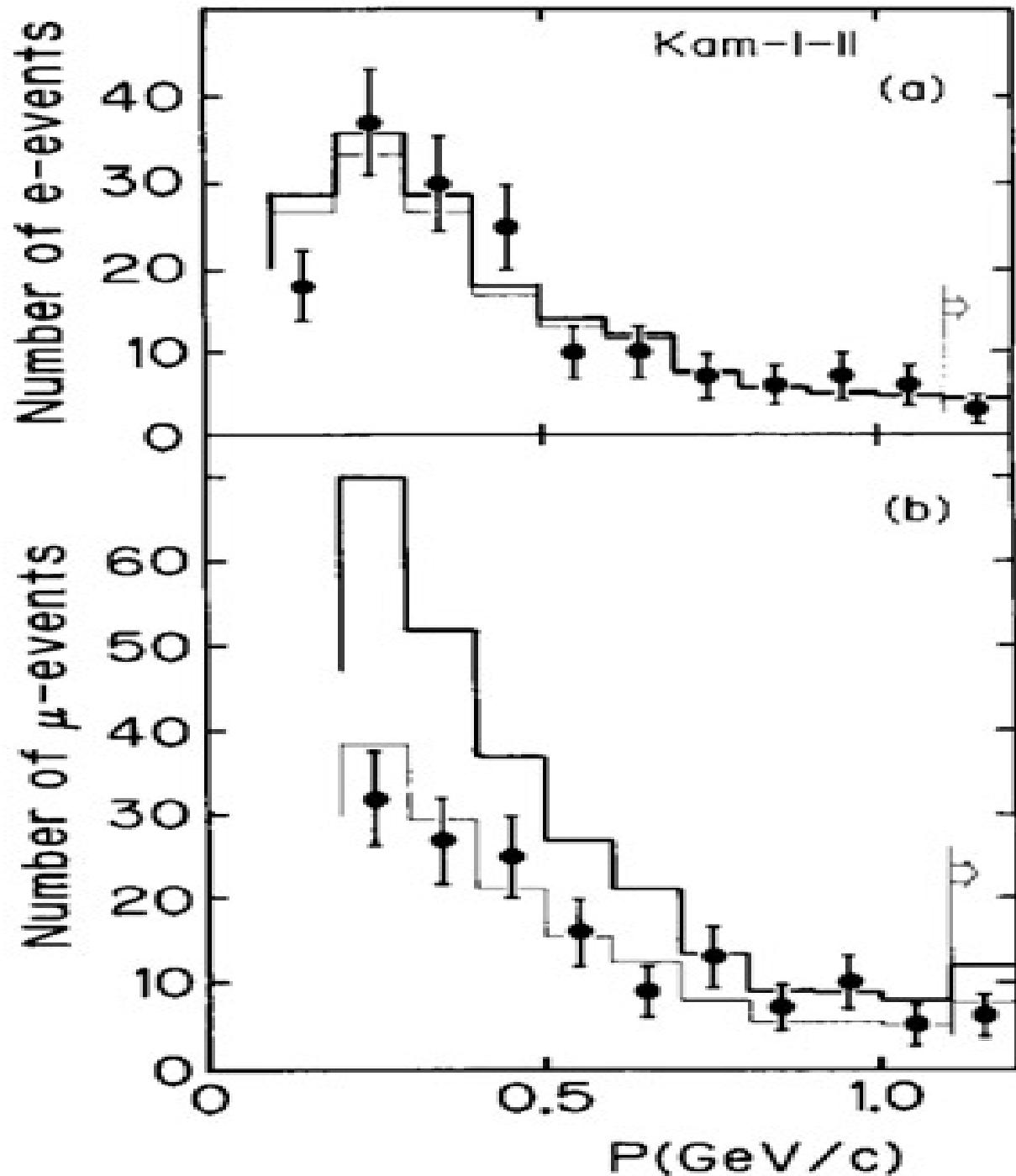


SUPER-KAMIOKANDE KAMIOKA, JAPAN



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

Super-Kamiokande detects atmospheric neutrinos. When a neutrino collides with a water molecule in the tank, a rapid, electrically charged particle is created. This generates Cherenkov radiation that is measured by the light sensors. The shape and intensity of the Cherenkov radiation reveals the type of neutrino that caused it and from where it came. The muon-neutrinos that arrived at Super-Kamiokande from above were more numerous than those that travelled through the entire globe. This indicated that the muon-neutrinos that travelled longer had time to change into another identity on their way.

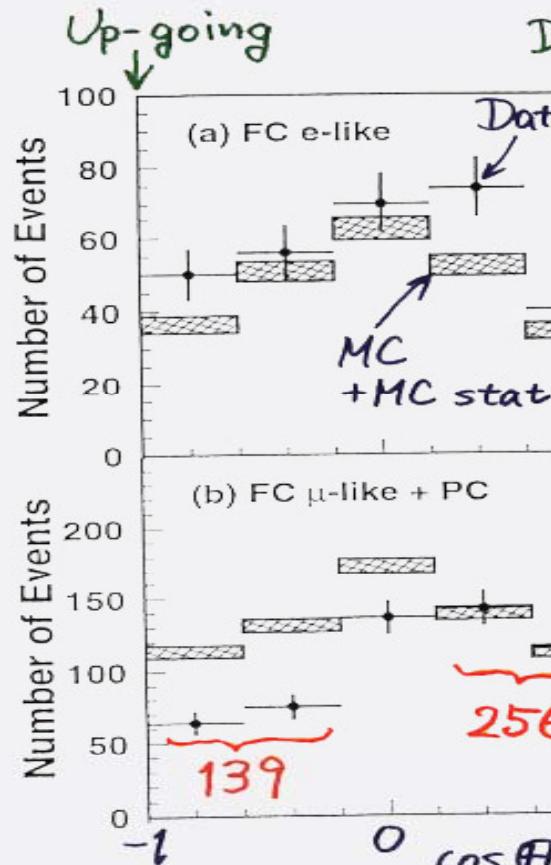


Потоки
электронных и
мюонных
нейтрино
в зависимости от
импульса,
измеренные
экспериментом
Kamiokande
в 1991 году.
Черная линия —
исходные
теоретические
ожидания,
серая линия —
вариант описания
с учетом
осцилляций.

Графики из статьи
K. S. Hirata et al., 1992

Zenith angle dependence (Multi-GeV)

e

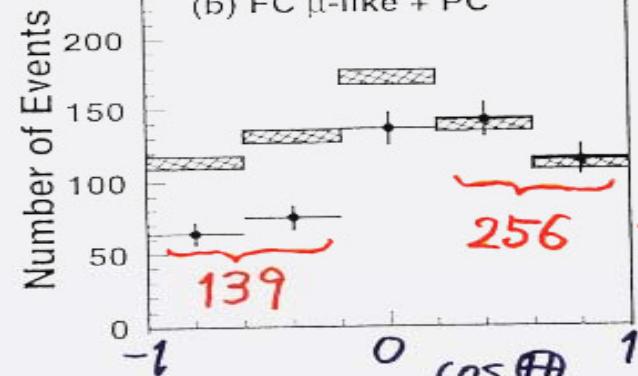


$$\chi^2(\text{shape}) = 2.8 / 4 \text{ dof}$$

$$\frac{\text{Up}}{\text{Down}} = 0.93^{+0.13}_{-0.12}$$

$$\chi^2(\text{shape}) = 30 / 4 \text{ dof}$$

$$\frac{\text{Up}}{\text{Down}} = 0.54^{+0.06}_{-0.05} \quad (6.2\sigma !!)$$



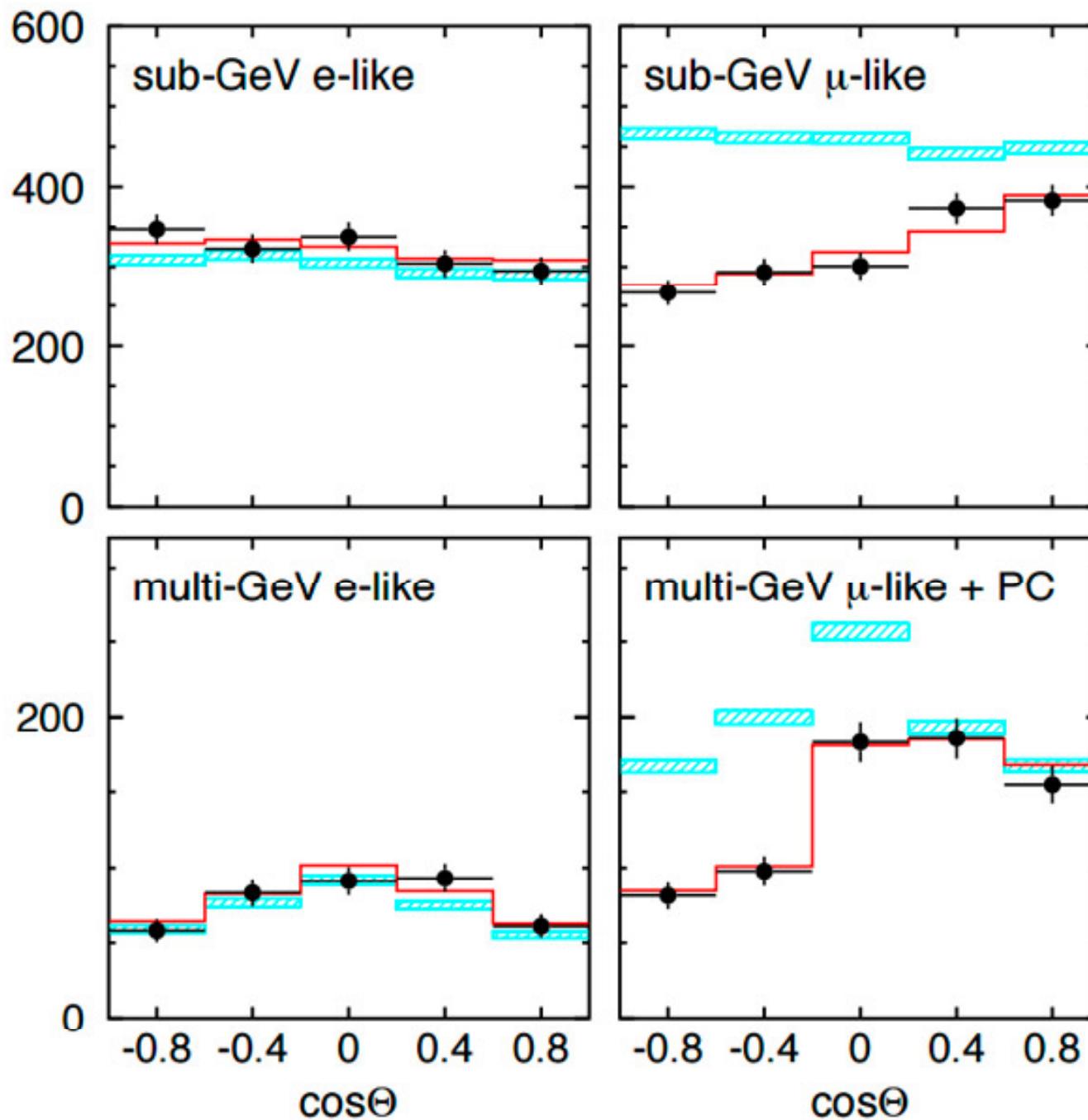
* Up/Down syst. error for μ -like

Prediction (flux calculation ... $\lesssim 1\%$.
1km rock above SK ... 1.5% .) 1.8% .

Data (Energy calib. for $\uparrow \downarrow$... 0.7% .
Non ν Background ... $< 2\%$.) 2.1% .

Слайд
с презентации
Такааки
Кадзиты
с явным
указанием
на то, что
нейтрино
осцилируют.

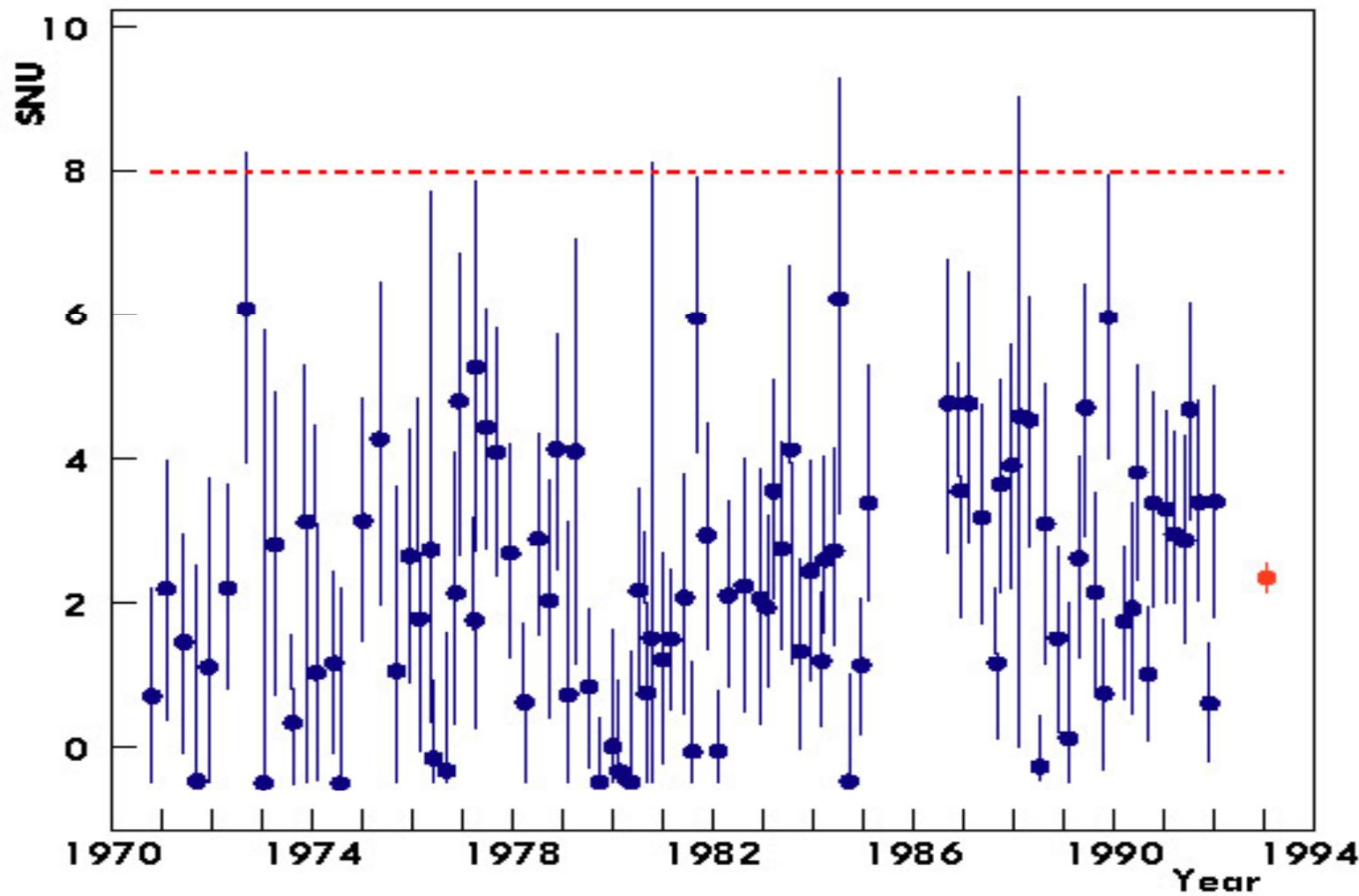
Изображение с сайта
symmetrymagazine.org



Потоки электронных и мюонных нейтрино низких и высоких энергий, пришедших с разных направлений. Угол Θ отсчитывается от зенита; значение $\cos\Theta = 1$ отвечает нейтрино, идущим сверху вниз, $\cos\Theta = -1$ — идущим снизу вверх, $\cos\Theta = 0$ — идущим горизонтально.

Голубые полоски показывают ожидаемый поток в предположении, что нейтрино не осциллируют, *красная гистограмма* — поток с учетом осцилляций

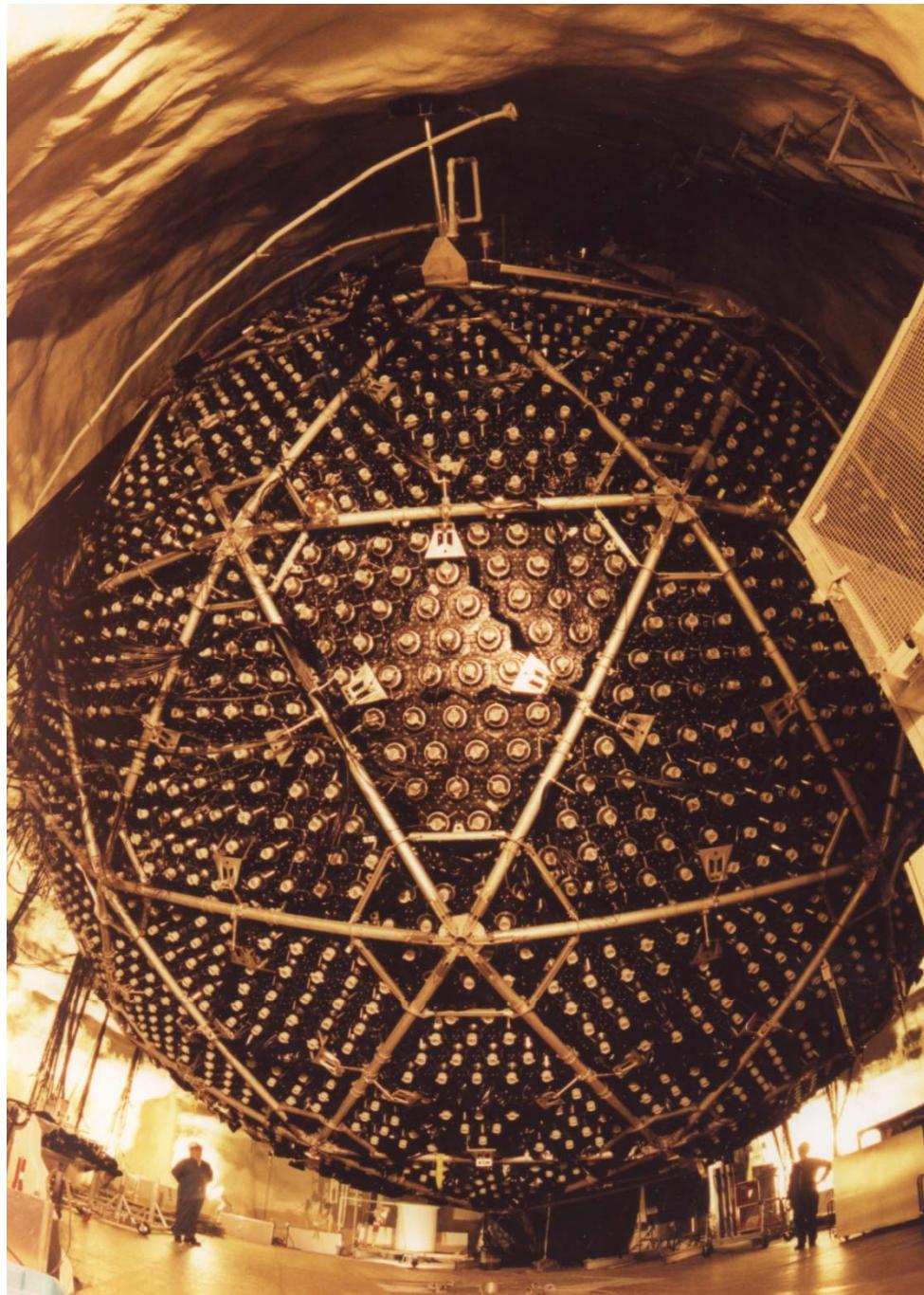
Проблема солнечных нейтрино



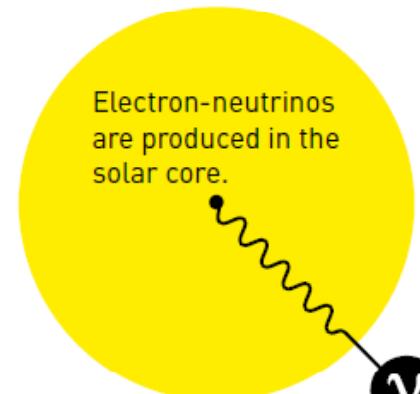
Поток солнечных нейтрино, выраженный в солнечных нейтринных единицах, по результатам эксперимента Homestake. *Красный пунктир* показывает предсказания солнечной стандартной модели. Изображение с сайта lappweb.in2p3.fr

Sudbury Neutrino Observatory

Детектор SNO состоит из 1000 тонн тяжелой воды, содержащейся в акриловой сфере с толщиной стенок 5,5 см и диаметром 12 метров. Сфера окружена 9600 фотоэлектронными умножителями, которые покрывают 64 % её площади.

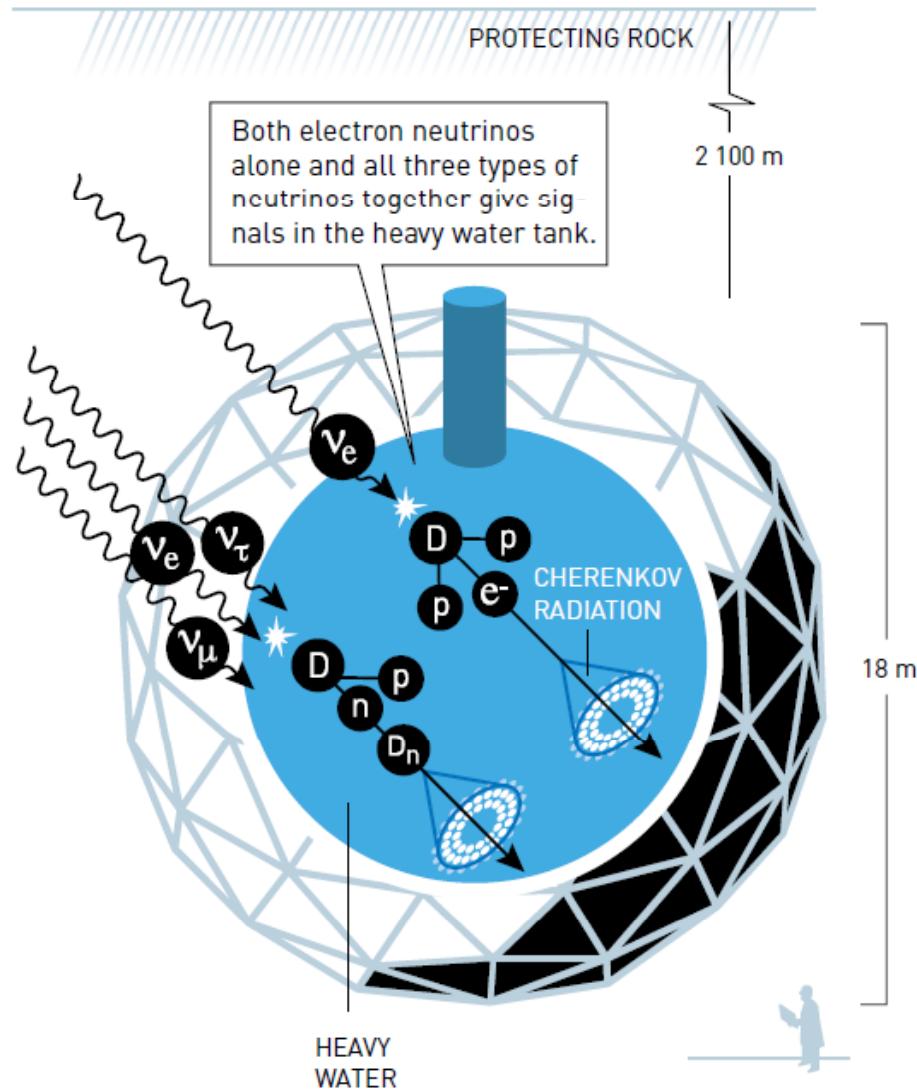


NEUTRINOS FROM THE SUN



Electron-neutrinos are produced in the solar core.

SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO) ONTARIO, CANADA

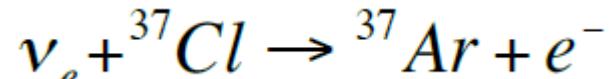
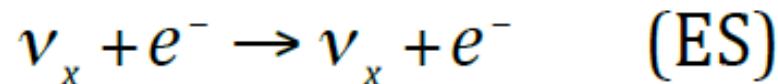
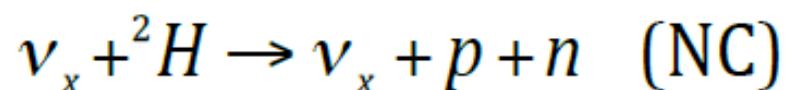
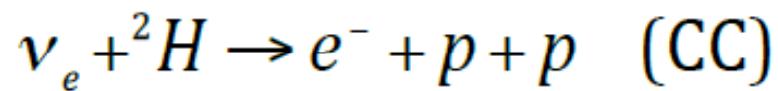


Sudbury Neutrino Observatory detects neutrinos from the Sun, where only electron-neutrinos are produced. The reactions between neutrinos and the heavy water in the tank yielded the possibility to measure both electron-neutrinos and all three types of neutrinos combined. It was discovered that the electron-neutrinos were fewer than expected, while the total number of all three types of neutrinos combined still corresponded to expectations. The conclusion was that some of the electron-neutrinos had changed into another identity.

Процессы рождения солнечных нейтрино



Процессы, используемые для регистрации



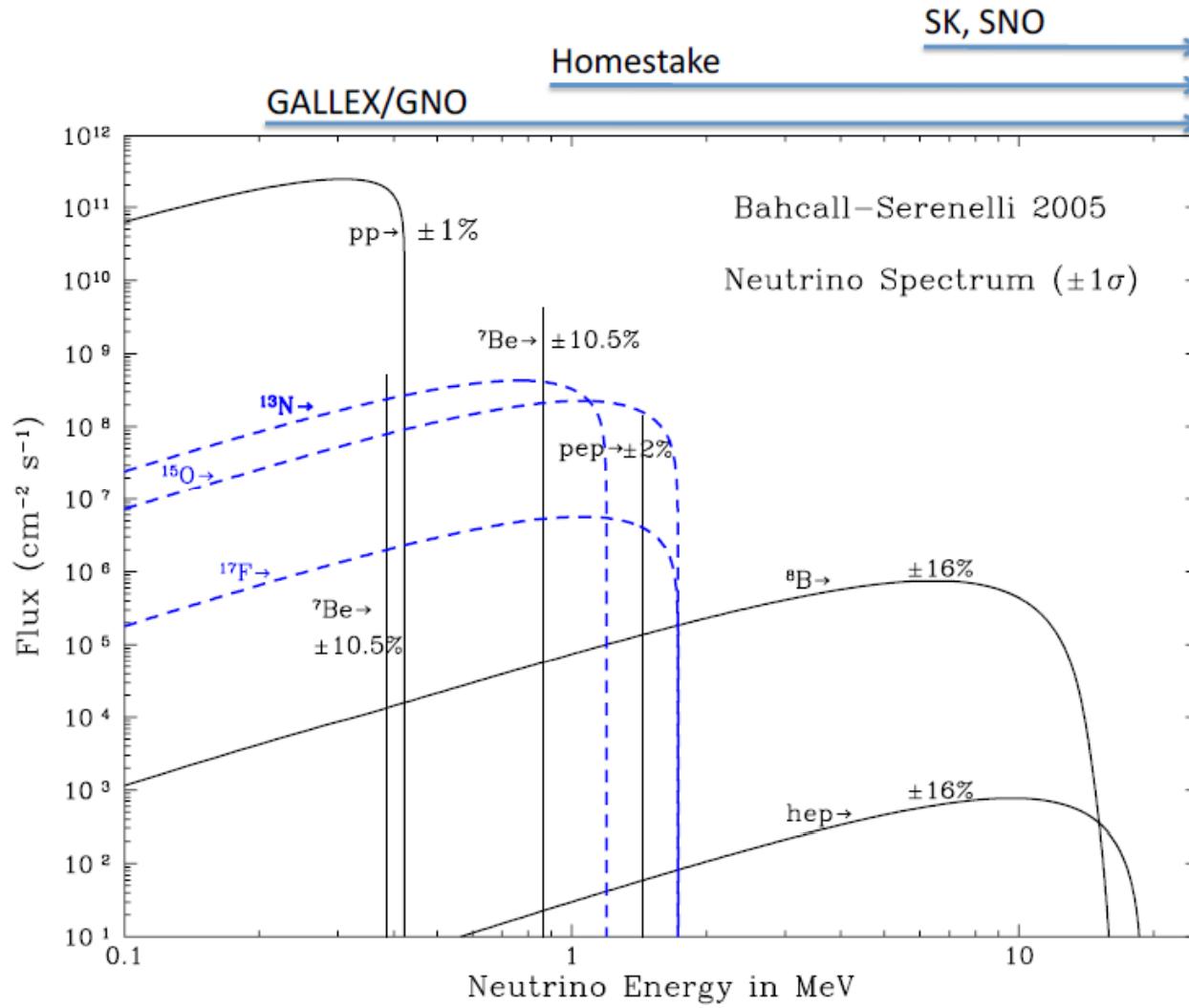
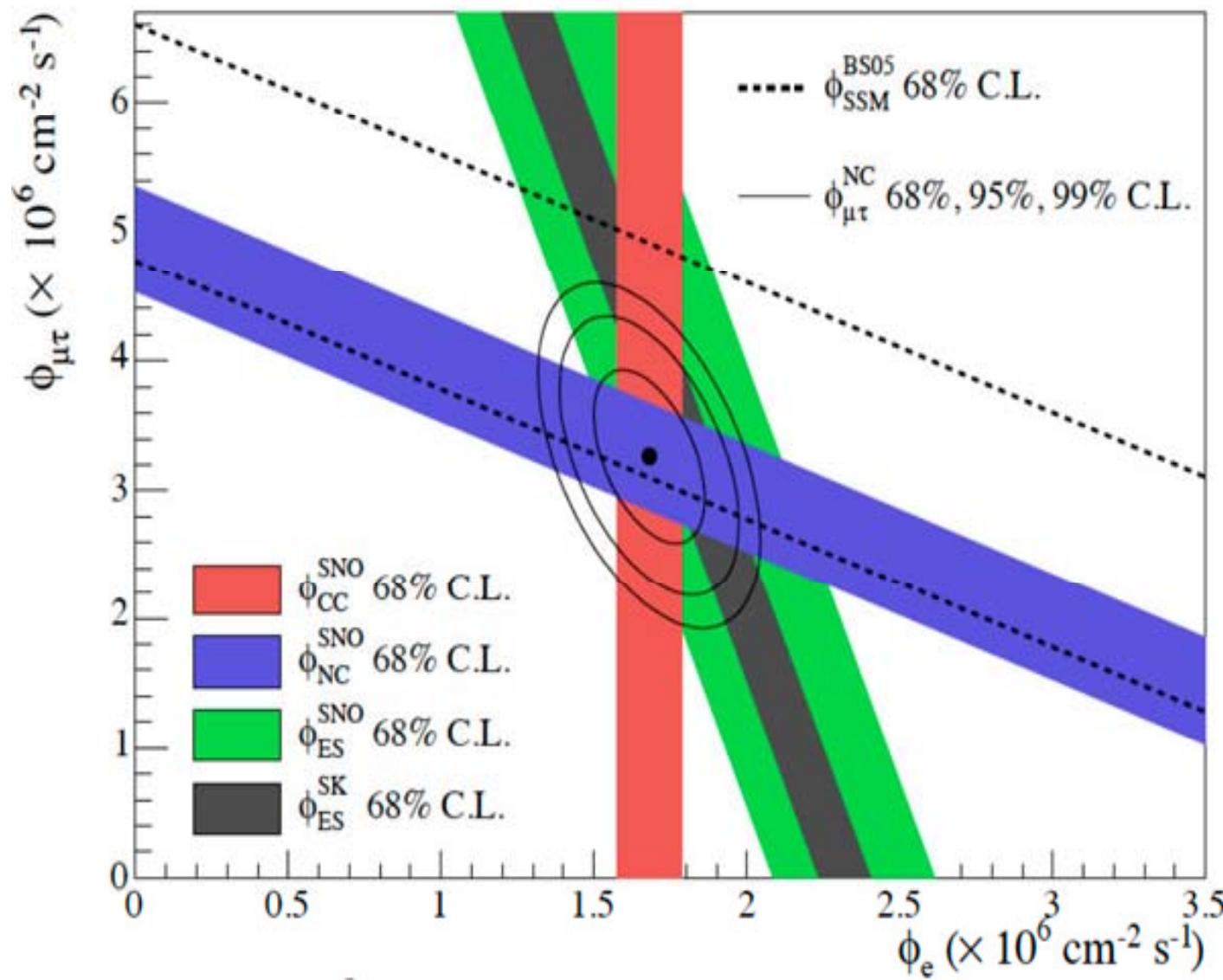


Figure 1: Neutrino fluxes (with percentage uncertainties) as predicted by the Bahcall-Serenelli solar model (BS05) [38], in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$ ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ for the lines). The arrows above the diagram indicate the energy ranges accessible to experiments. [From J.N. Bahcall's web site <http://www.sns.ias.edu/~jnb/> with arrows added above the graph.]



$$\phi(\nu_\mu) + \phi(\nu_\tau) = (3.26 \pm 0.25^{+0.40}_{-0.35}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi = \phi(\nu_e) + \phi(\nu_\mu) + \phi(\nu_\tau) = 5.25 \pm 0.16(stat)^{+0.11}_{-0.13}(sys) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

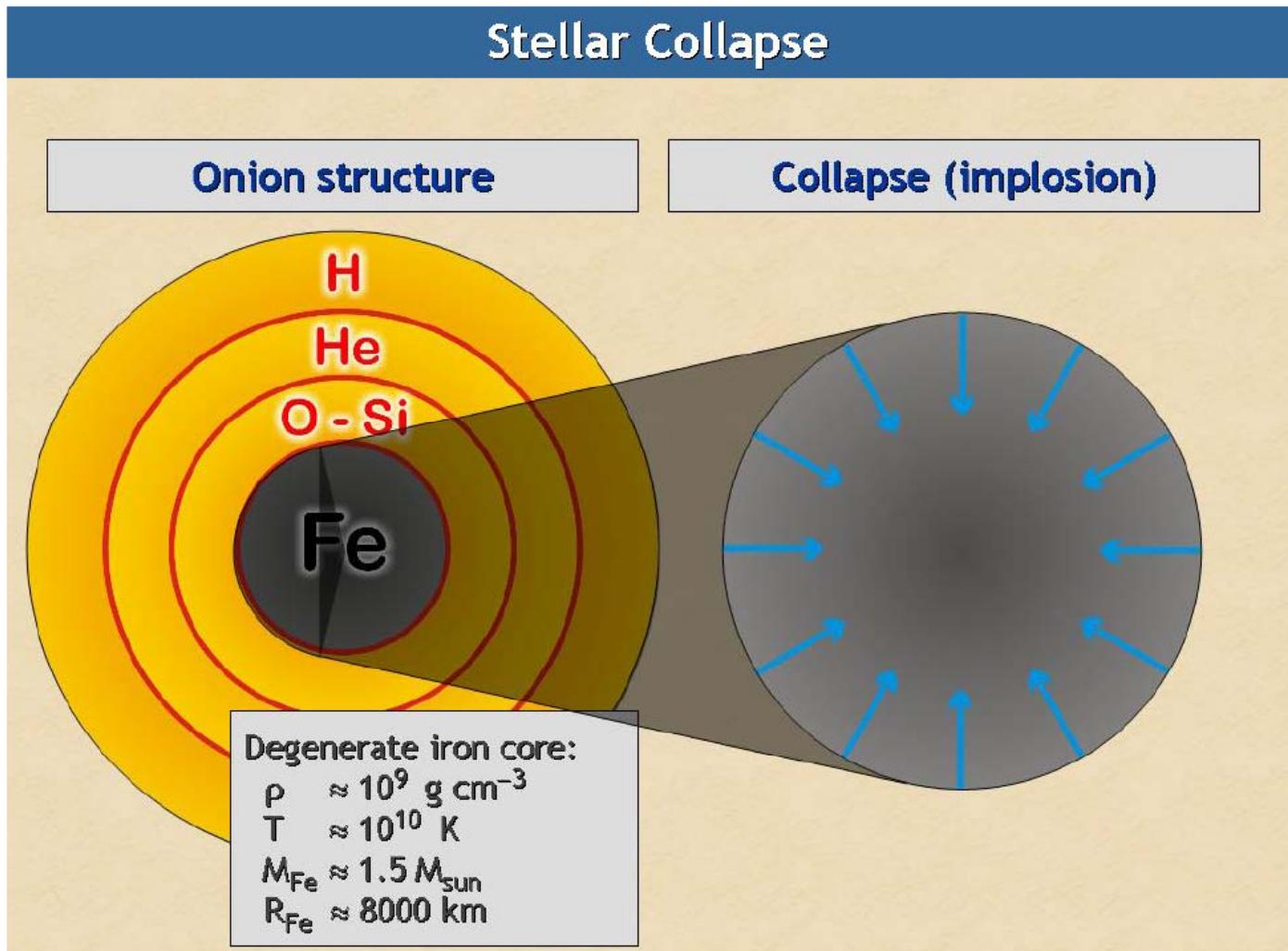
Потоки электронных (*по горизонтали*) и мюонных плюс таунейтрино (*по вертикали*), идущих от Солнца.

Серая полоса — результат Super-Kamiokande, цветные полосы — результаты эксперимента SNO, полученные разными способами.

Полоса, ограниченная пунктирами, — предсказания солнечной модели.

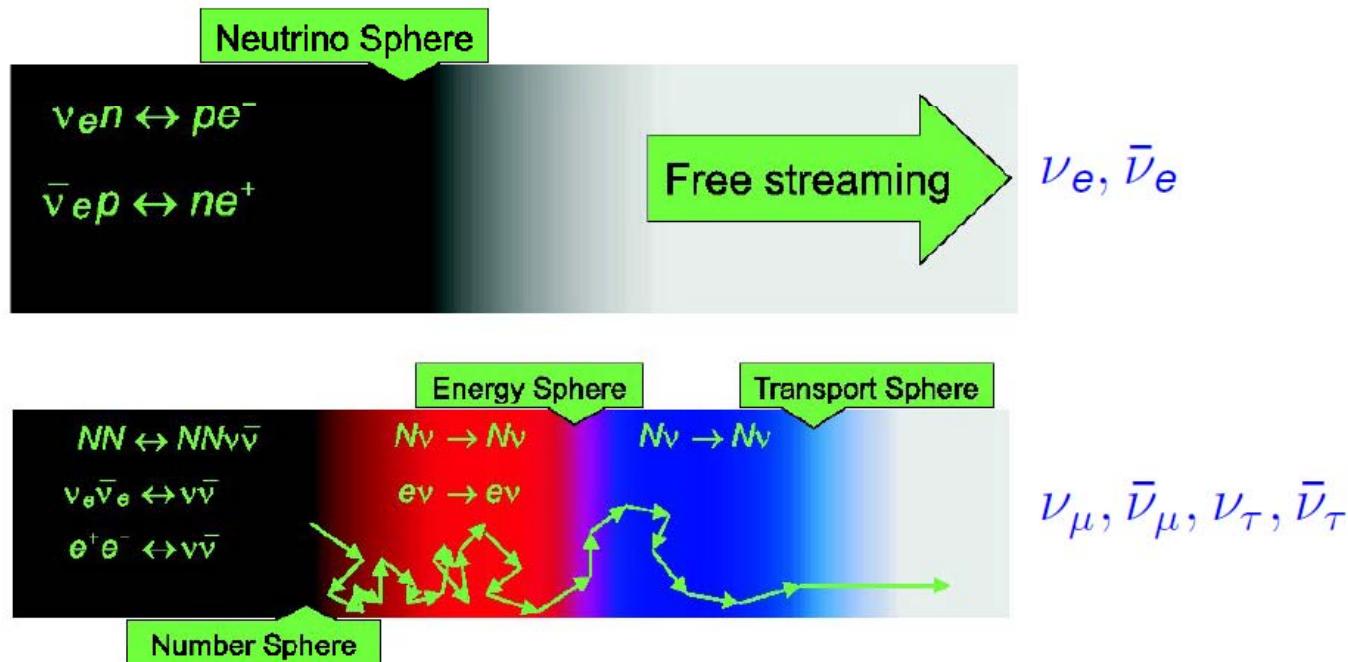
Обозначения:
 СС — заряженная часть слабых взаимодействий,
 NC — нейтральная часть, ES — упругое рассеяние на электронах.

The would-be supernova before the collapse



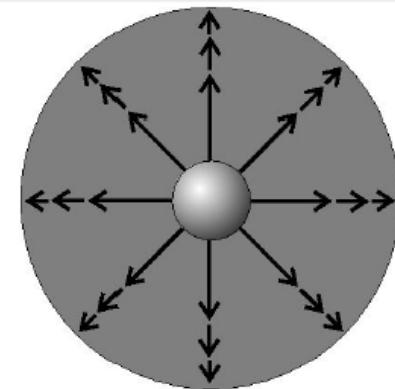
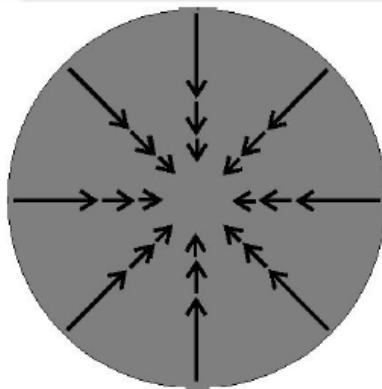
Trapped neutrinos before the collapse

- Neutrinos trapped inside “neutrinospheres” around $\rho \sim 10^{10} \text{ g/cc}$
- Free-streaming when $\rho \lesssim 10^{10} \text{ g/cc}$



Core collapse, shock wave, and explosion

Gravitational core collapse \Rightarrow Shock Wave



Neutronization burst: ν_e emitted for ~ 10 ms

Cooling through neutrino emission: $\sim 10^{58}$ neutrinos

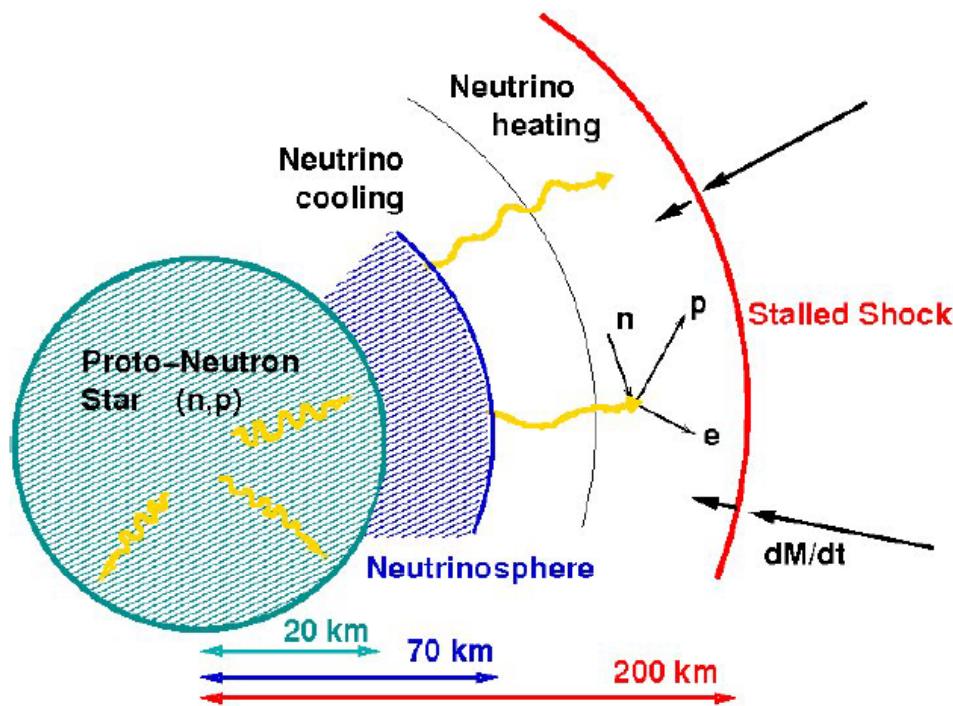
$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$

Duration: About 10 sec

Emission of 99% of the SN collapse energy in neutrinos

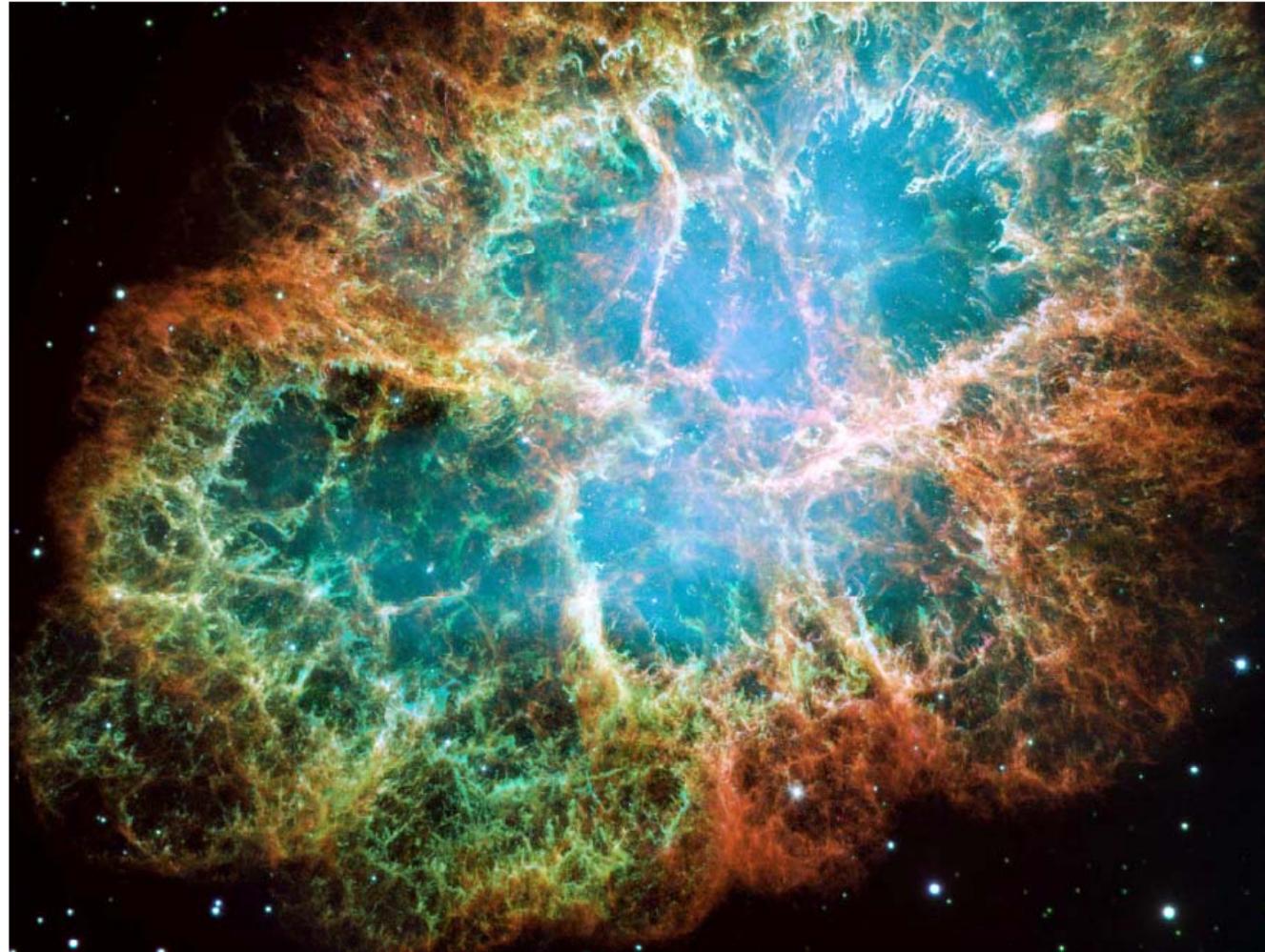
¿¿¿ Explosion ???

Role of neutrinos in explosion



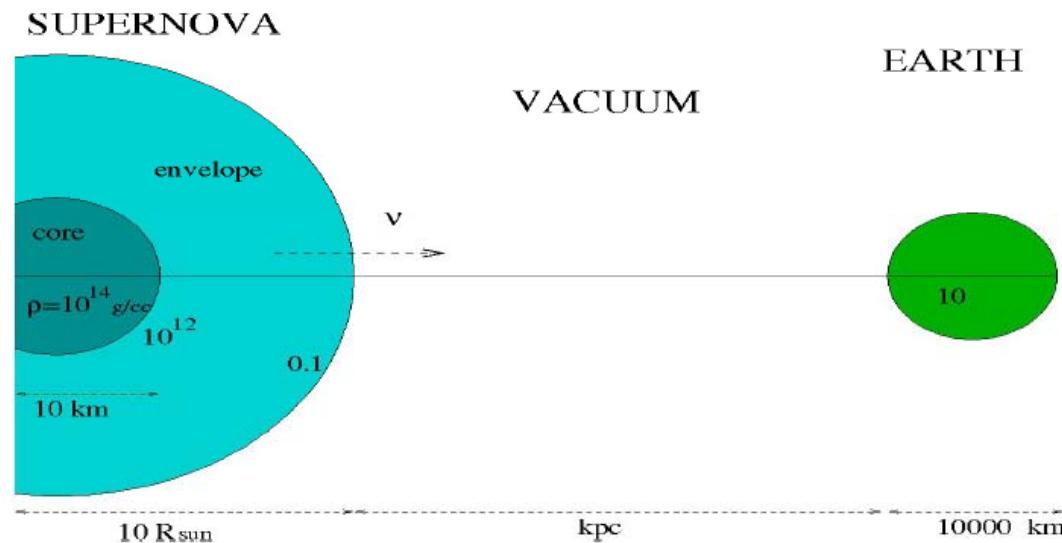
- Neutrino heating needed for pushing the shock wave
- Large scale convection also needed for explosion

The star after explosion



(Crab nebula, supernova seen in 1054)

Propagation through matter of varying density



Inside the SN: *flavor conversion*

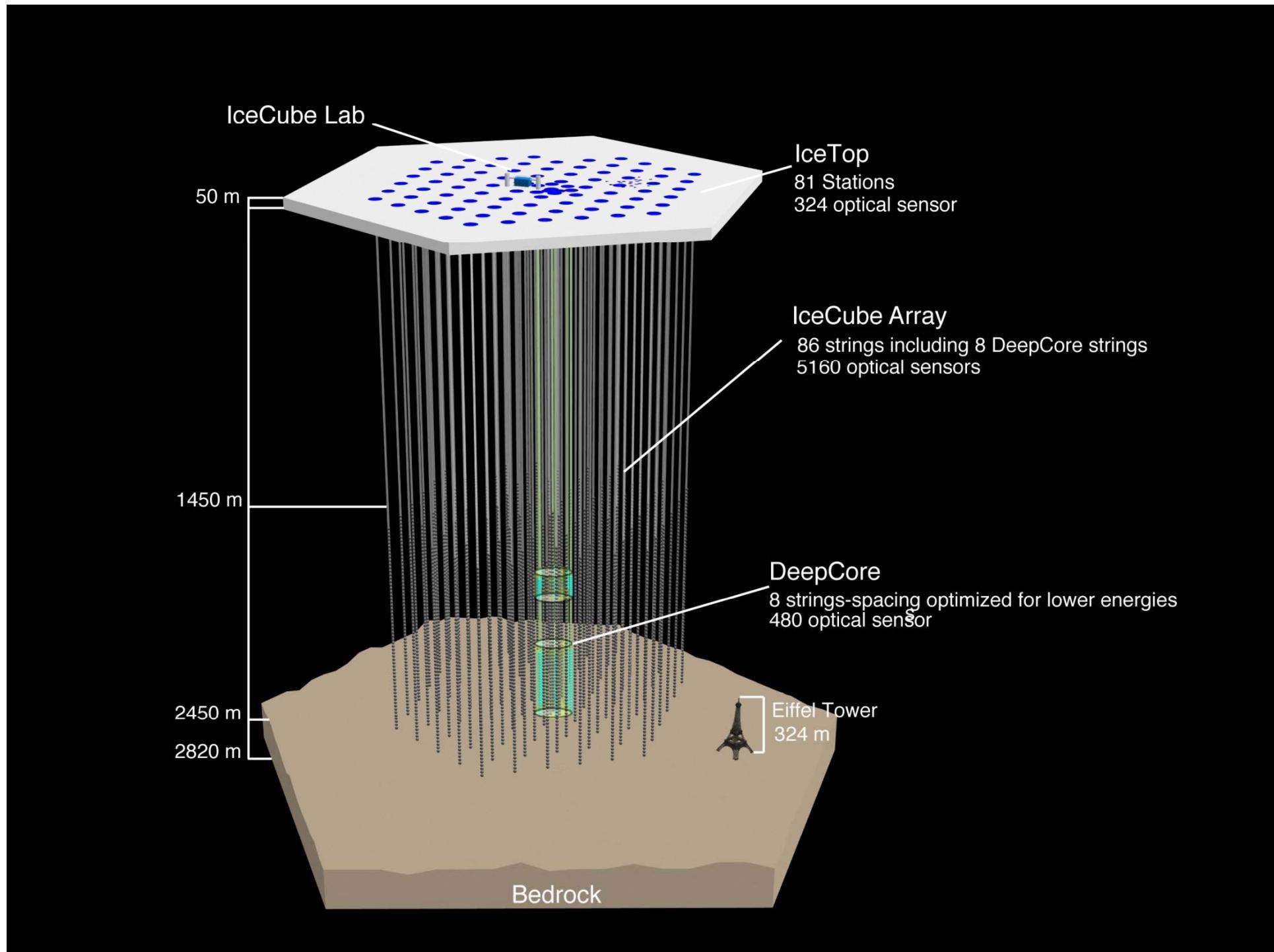
Collective effects and MSW matter effects

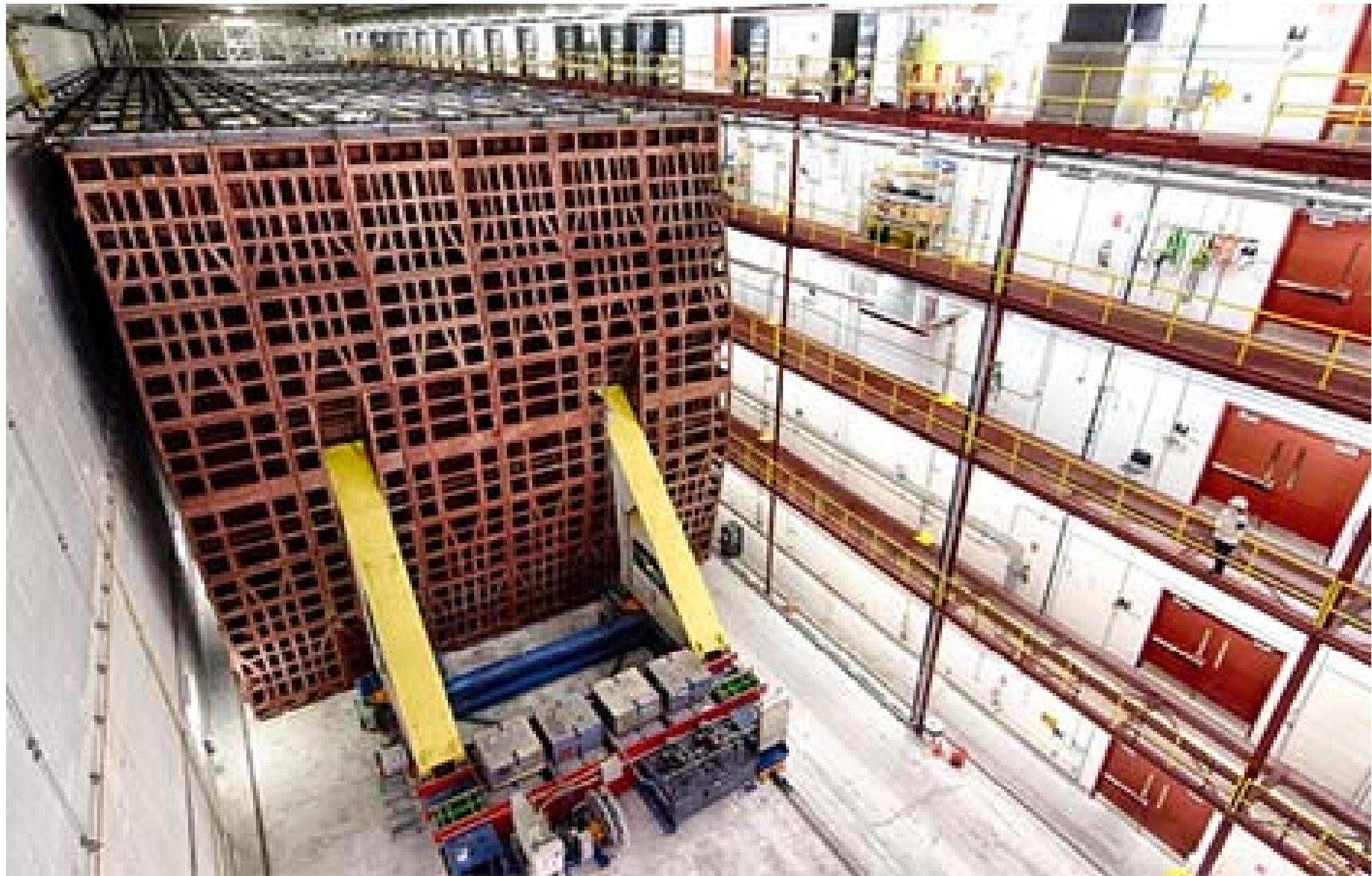
Between the SN and Earth: *no flavor conversion*

Mass eigenstates travel independently

Inside the Earth: *flavor oscillations*

MSW matter effects (*if detector is shadowed by the Earth*)





Детектор NOvA (от английского NuMI Off-Axis Neutrino Appearance) в США впервые наблюдал осцилляции нейтрино (изменения их типа) после прохождения этими частицами расстояния 800 километров.

Borexino Design

