



# LENA

И

# Осцилляции нейтрино

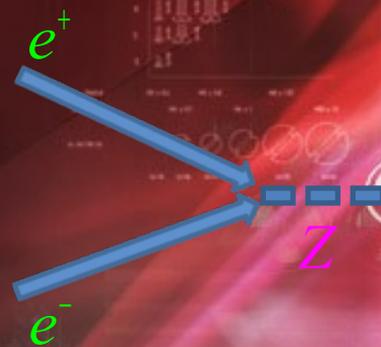
5 апреля 2012

# План

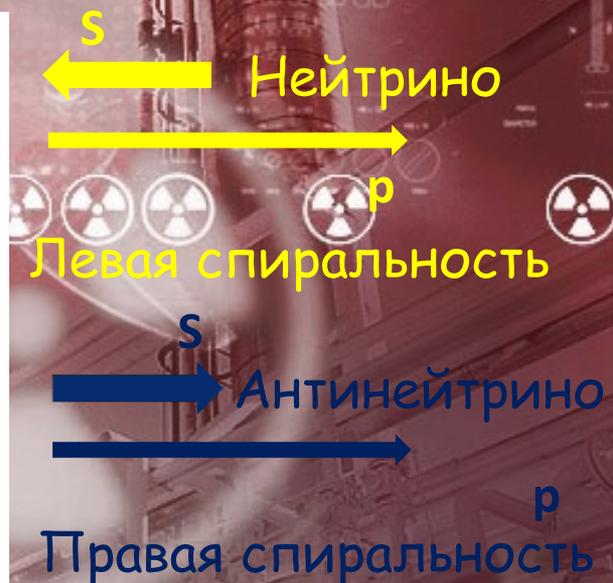
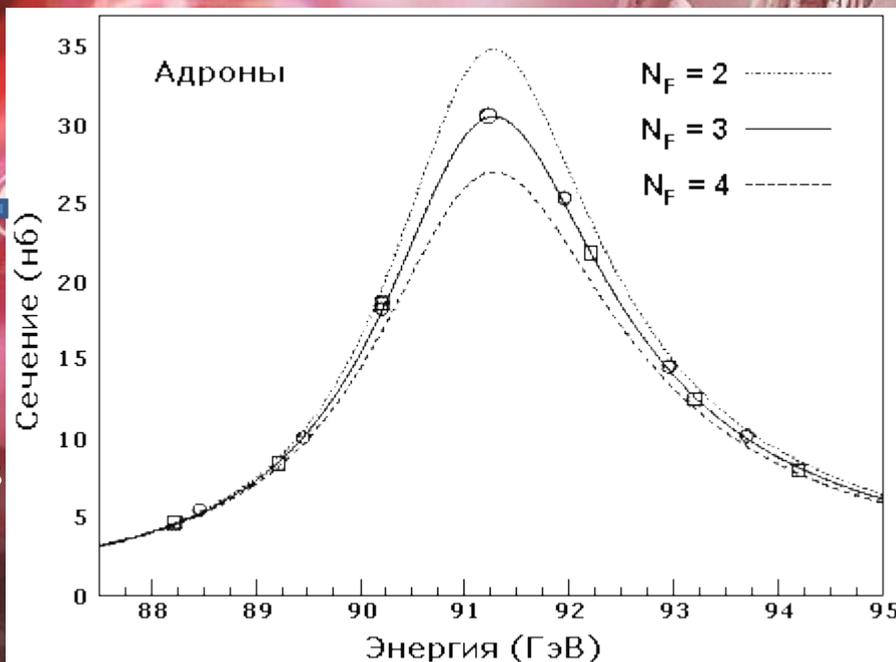
- ☐ Нейтрино в стандартной модели
- ☐ Осцилляции нейтрино
- ☐ Обсерватория Садбери
- ☐ Эксперимент K2K
- ☐ Эксперимент MINOS
- ☐ Эксперимент Daya Bay
- ☐ Детектор LENA

# Стандартная модель

- Три типа (аромата) нейтрино:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- У каждого нейтрино есть партнёр:  $W \rightarrow e\nu_e, W \rightarrow \mu\nu_\mu, W \rightarrow \tau\nu_\tau$
- Нейтрино безмассовые частицы:  $m_\nu = m_\mu = m_\tau = 0$
- Сохраняются лептонные числа  $L_e, L_\mu, L_\tau$
- Невозможны переходы (осцилляции) одного типа нейтрино в другой
- CP в лептонном секторе сохраняется

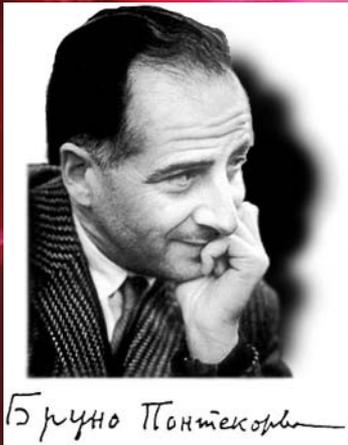


Число ароматов  
 $n = 2.982 \pm 0.013$



# Осцилляции нейтрино

В 1957 г. Б.М.Понтекорво предложил идею нейтринных осцилляций



Собственные  
состояния

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

Массовые  
состояния

Унитарная матрица  
смешивания

# Анализ матрицы $U$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13} \exp(-i\delta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13} \exp(-i\delta) & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

1. Осцилляция атмосферных нейтрино  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$
2. Реакторные осцилляции  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$
3. Осцилляции солнечных нейтрино  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$
4. Отвечает за майорановскую массу нейтрино

# Вероятность осцилляций

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \underbrace{\delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{k>j} \operatorname{Re} \left[ U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \right]}_{CP=1} \sin^2 \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{4E_\nu} + \underbrace{2 \sum_{k>j} \operatorname{Im} \left[ U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \right]}_{CP \neq 1} \sin^2 \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2E_\nu}$$

1.  $\Delta m_{jk}^2 = 0 \Rightarrow P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta}$

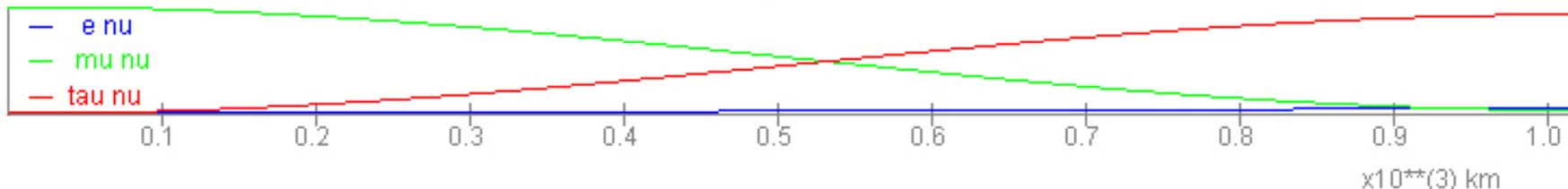
2. Осцилляция в вакууме

3. Эксперименты на появление  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$   
 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$

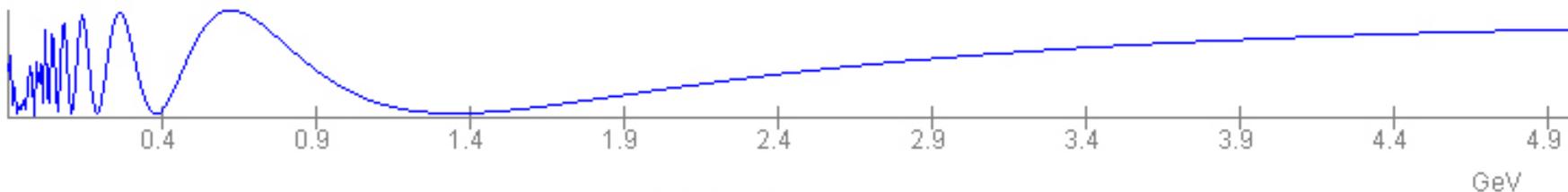
4. CP-нарушение только в экспериментах на появление

5.  $\sum_{\beta} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1$

# Пример смешивания



Energy spectrum modification at a distance  $L=732.0$  km



1 = 0.233

2 = 0.354

3 = 0.411



composition of the  
initial neutrino  
in terms of mass eigenstates

Mixing Matrix

0.841	0.517	0.154
-0.48	0.595	0.641
0.240	-0.61	0.751
1	2	3

e  
mu  
tau

e = 0.036

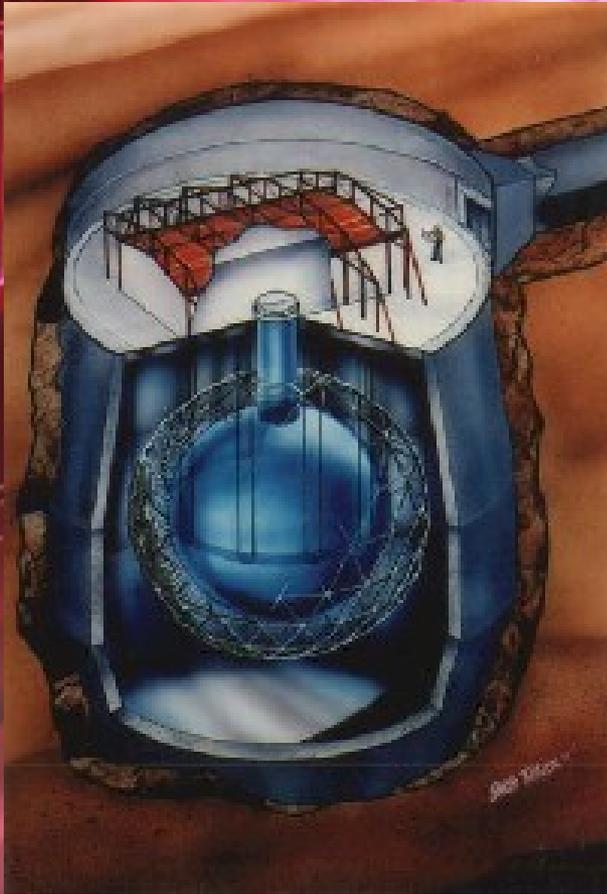
mu = 0.207

tau = 0.755



composition of the  
2.0 GeV flux at 732.0 km  
in terms of flavor states

# Обсерватория Садбери SNO



- 2001 год
- Черенковский детектор D2O
- Сфера  $d=12$  м
- Глубина 2092 м

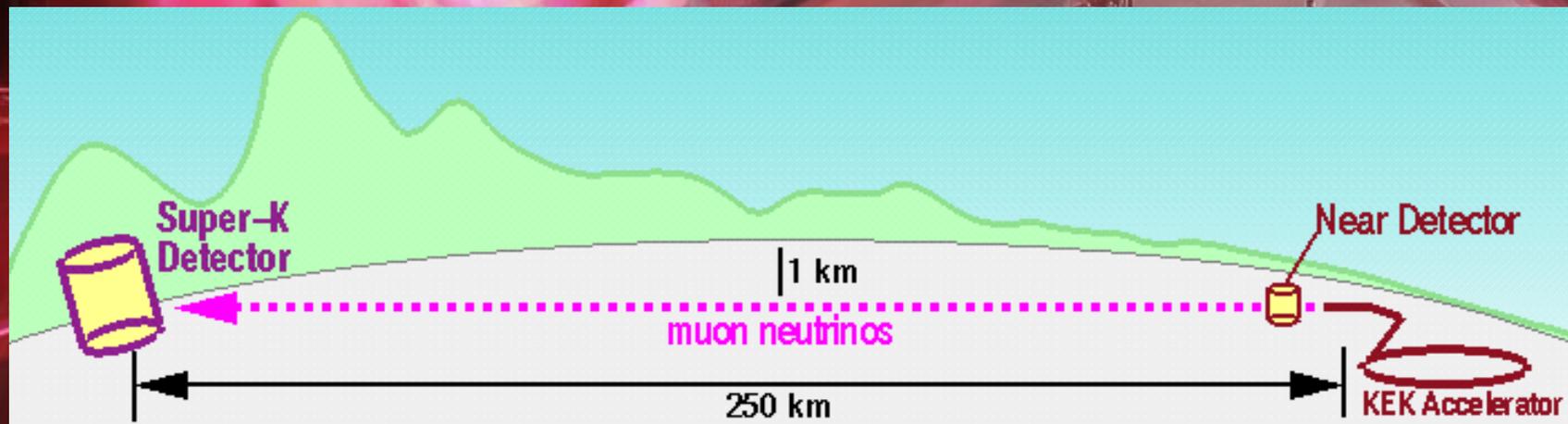


$x = e, \mu, \tau$  

- CC:  $0,347 \pm 0,027$
- EC:  $0,473 \pm 0,074$
- NC:  $1,008 \pm 0,122$

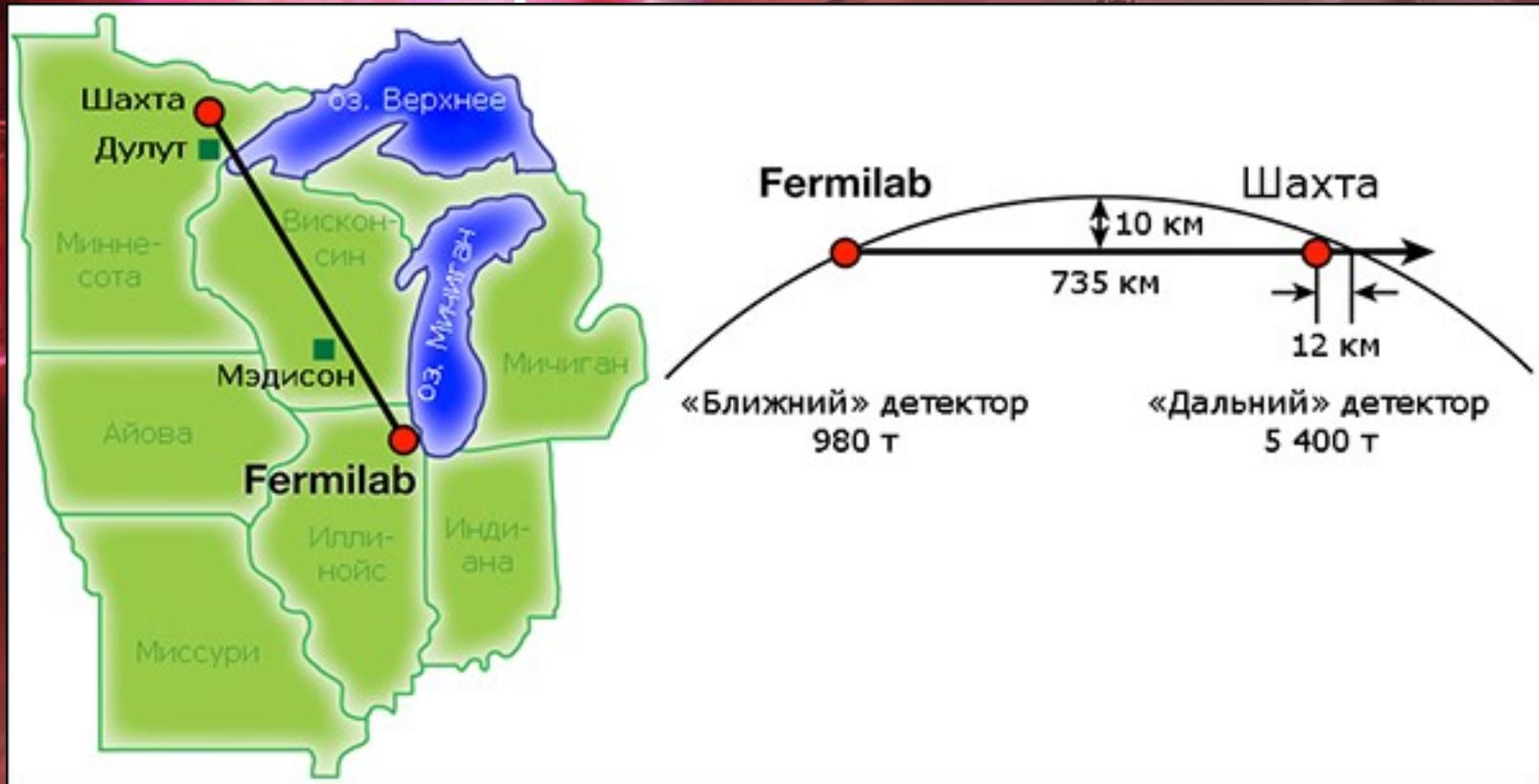
Эксперимент решил «проблему» солнечных нейтрино

# Эксперимент K2K



- 1999-2004 годы
- Осцилляции мюонных нейтрино с энергией  $\sim 1$  ГэВ в области атмосферных параметров.
- Ближний детектор
- Дальний черенковский детектор 50 кт воды
- $\Delta m_{23}^2 = 2.8 \times 10^{3-2}$
- $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$

# Эксперимент MINOS

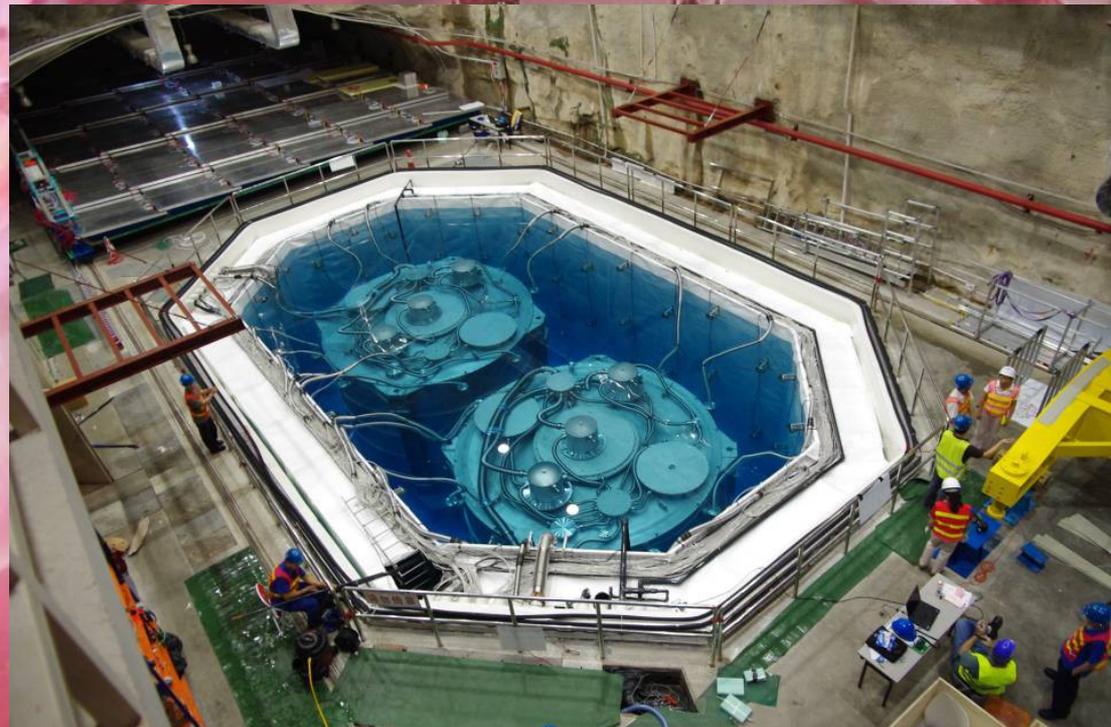
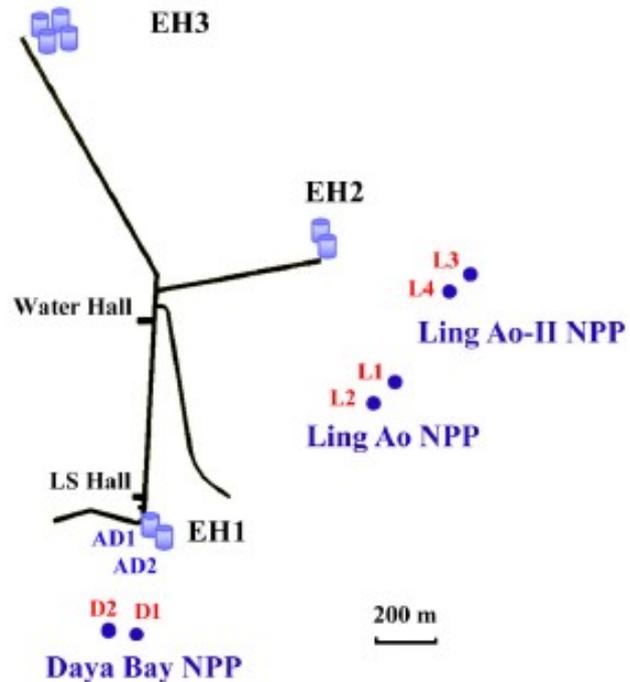


- 2005 год
- Осцилляции мюонных и антимюонных нейтрино

$$\Delta m_{23}^2 = 2,32^{+0.12}_{-0.08} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} > 0,9$$

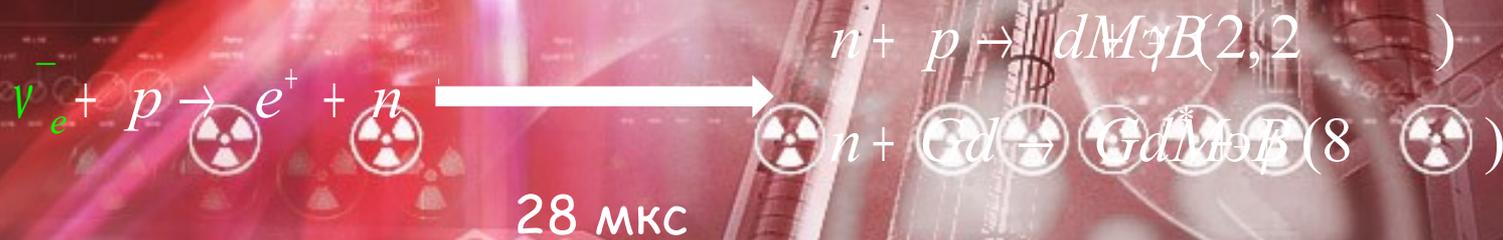
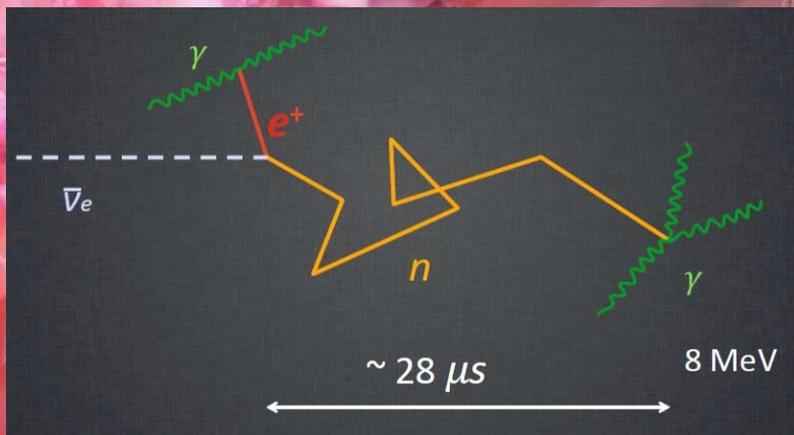
# Эксперимент Daya Bay



	Overburden (MWE)	$R_{\mu}$ (Hz/m <sup>2</sup> )	$E_{\mu}$ (GeV)	D1,2 (m)	L1,2 (m)	L3,4 (m)
EH1	250	1.27	57	364	857	1307
EH2	265	0.95	58	1348	480	528
EH3	860	0.056	137	1912	1540	1548

- Набор статистики  
24.12.2011-17.02.2012 г
- Результат опубликован  
8.03.2012 г
- Реакторный эксперимент

# Детектирование нейтрино



Результат

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0,092 \pm 0,016 \pm 0,005$$

# Параметры смешивания

$$\Delta m_{12}^2 = 7,65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{23}^2| = 2,4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0,304$$

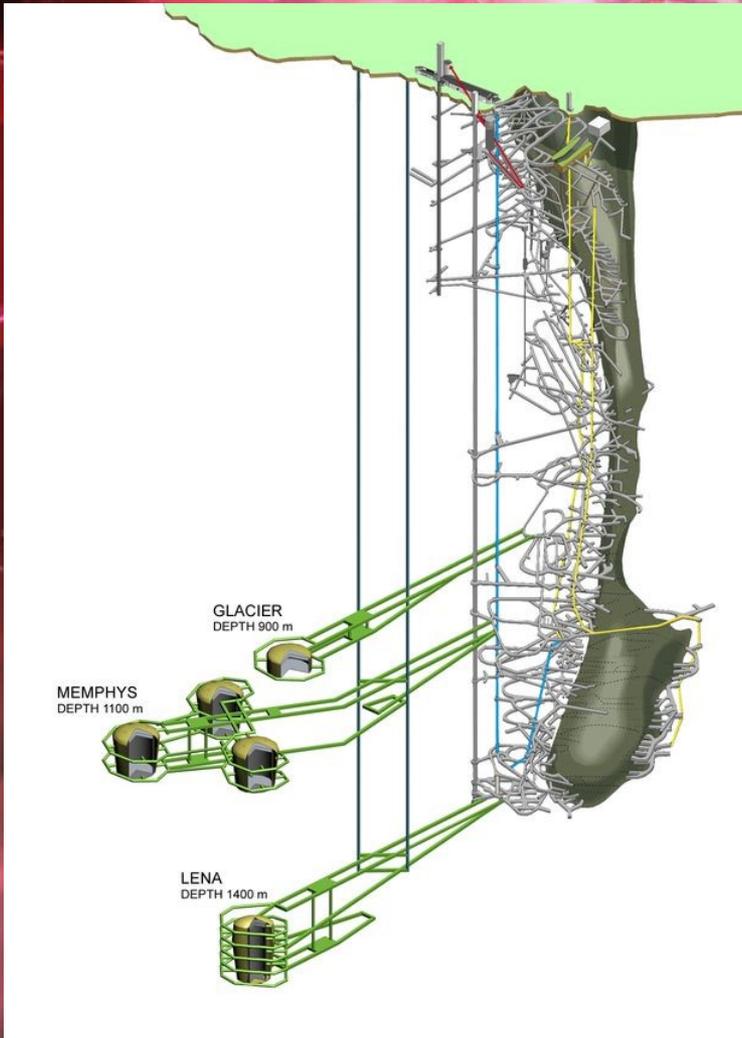
$$\sin^2 \theta_{23} = 0,5$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0,024$$

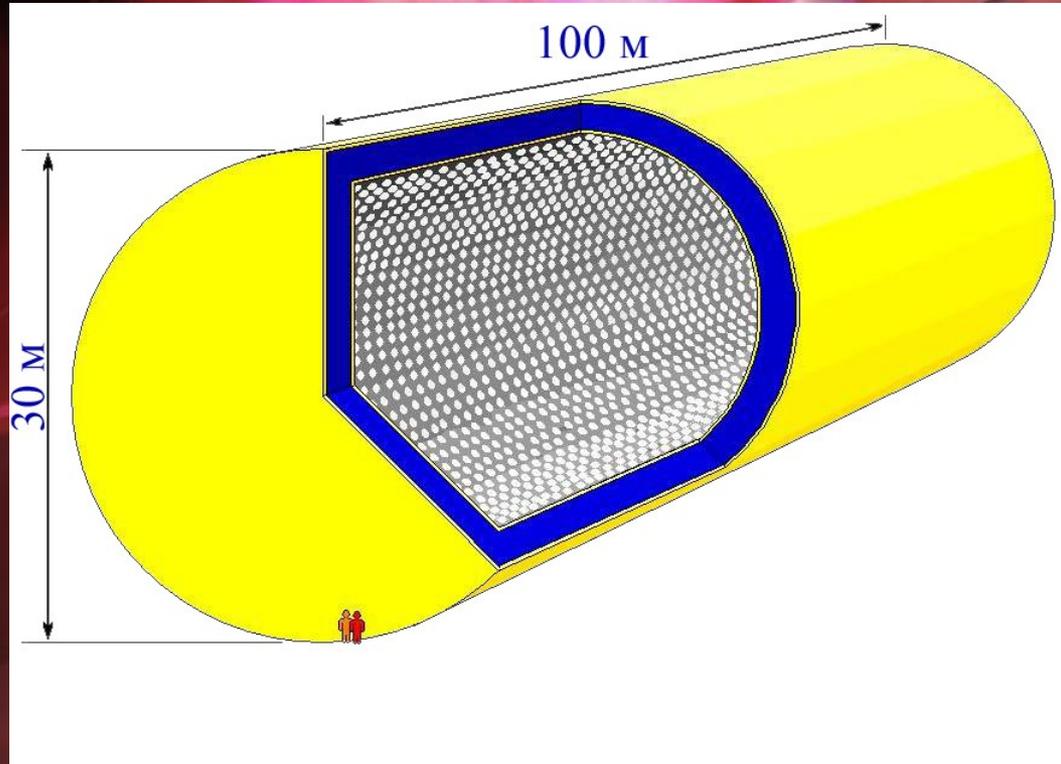


# LENA

## Low Energy Neutrino Astrophysics



# LENA детектор



Parameter	LAB	PXE	
<i>Target properties</i>			
Target height	[m]	96.0	
Target radius	[m]	13.0	
PMT radial distance	[m]	14.5	
Mass	[kt]	43.8	50.3
Number of electrons	[ $10^{34}$ ]	1.5	2.6
Number of free protons	[ $10^{33}$ ]	3.1	2.4
Number of C nuclei	[ $10^{33}$ ]	2.0	2.1
<i>Light emission</i>			
Light yield		$10^4/\text{MeV}$	
Birks coefficient $k_B$ : [mm/MeV]			
- electrons		0.15	
- protons		0.12	
- $\alpha$ -particles		0.107	
<i>Fluorescence time profile</i>			
Time constant $\tau_1$	[ns]	4.6	
Time constant $\tau_2$	[ns]	18	
Time constant $\tau_3$	[ns]	156	
Weight $N_1$ ( $e$ -like event)		0.71	
Weight $N_2$		0.22	
Weight $N_3$		0.07	
<i>Light propagation</i>			
Attenuation length	[m]	11	
Absorption length	[m]	20	
Abs./Reemission length	[m]	60	
Rayleigh scat. length	[m]	40	
<i>Light detection</i>			
Optical coverage		0.3	
Quantum efficiency		0.2	
Time jitter (tts)	[ns]	1.0	
Mean photoelectron yield		240 pe/MeV	

# Задачи LENA

## Нейтрино низких энергий

- Нейтрино от взрыва сверхновых млечного пути
- Фоновые нейтрино от взрыва сверхновых
- Спектроскопия солнечных нейтрино
- Исследования земных нейтрино

## Нейтрино высоких энергий

- Поиск распада протона
  - Регистрация треков нейтрино
  - Детектор ускорительных нейтрино для исследования CP фазы и иерархии масс
- CERN-Pyhasalmi 2288 км оптимальная энергия 4,2 ГэВ

