

# Осцилляции нейтрино: прорыв в новую физику

Ю.Г. Куденко

Институт ядерных исследований РАН

**Заседание Президиума РАН  
8 ноября 2011**



# План

**Нейтрино в Стандартной модели**

**Осцилляции:** - основные понятия  
- экспериментальные результаты

**Эксперимент T2K**

**Измерение угла смешивания  $\theta_{13}$**

**Массы и смешивание нейтрино**

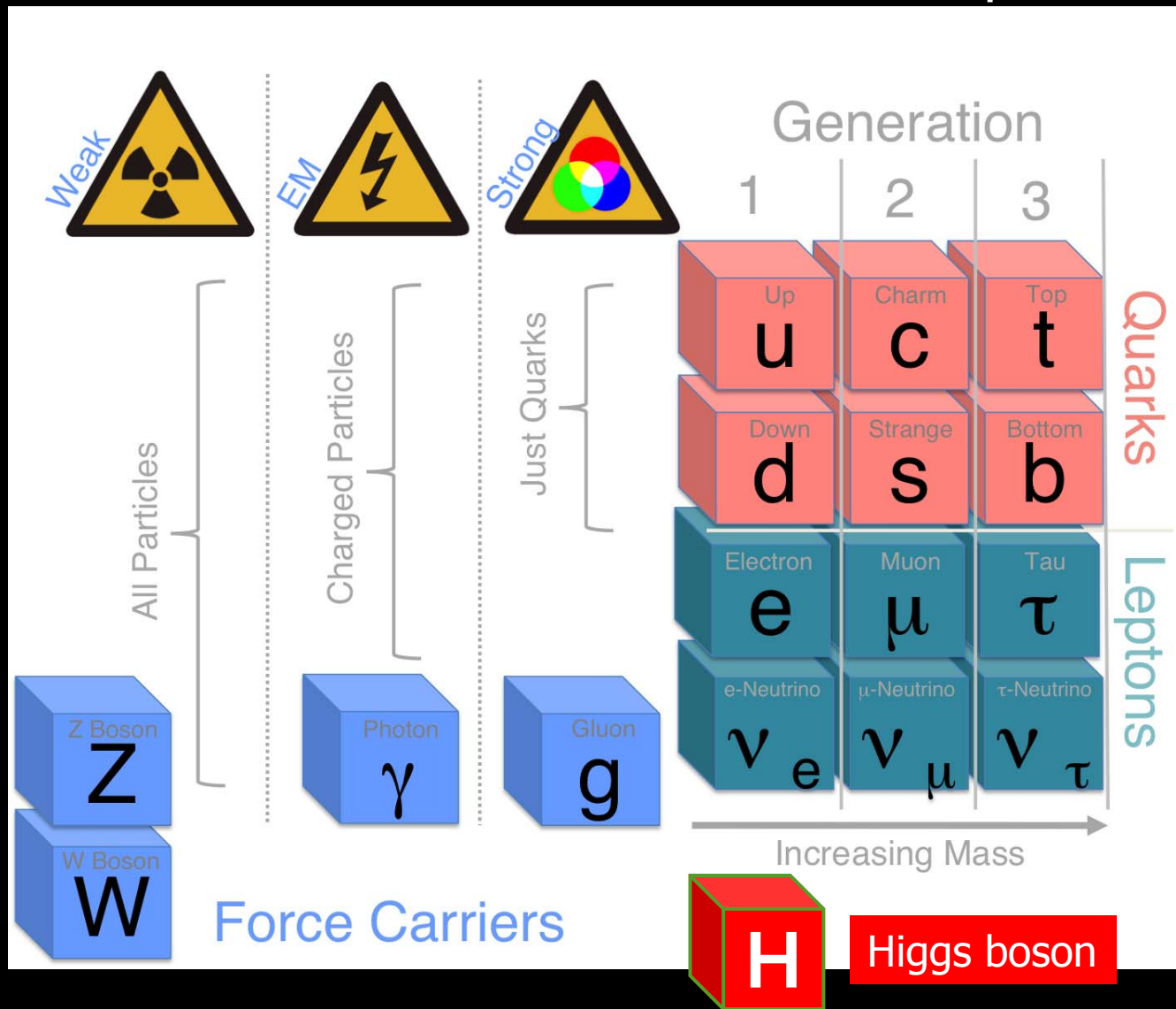
**Нейтрино и Барионная асимметрия Вселенной**

**Нейтринные парадоксы**



# Элементарные частицы

## Стандартная модель






# Лептоны

Спин лептонов:  $s = 1/2$

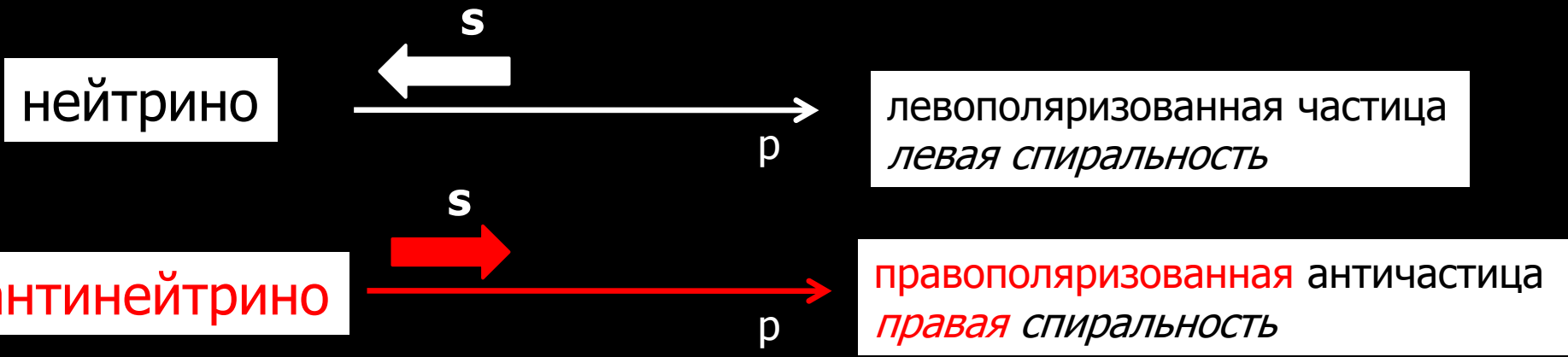
Спиральность – проекция спина на направление импульса частицы

фермионы

$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$u_R$	$d_R$
$L_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	$e_R$	

?

	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$\nu_e, e^-$	+1	0	0
$\nu_\mu, \mu^-$	0	+1	0
$\nu_\tau, \tau^-$	0	0	+1



Только левополяризованные нейтрино и правополяризованные антинейтрино участвуют в слабом взаимодействии



# Дискретные симметрии

зарядовое сопряжение

**C**

частица  $\leftrightarrow$  античастица

пространственная инверсия

**P**

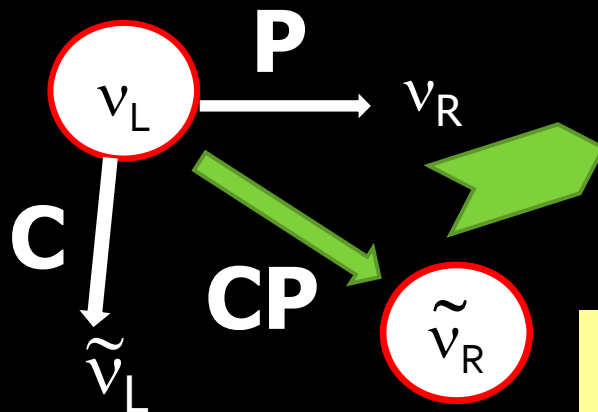
$x, y, z \leftrightarrow -x, -y, -z$

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:  $\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$

Нейтрино – партнеры заряженного лептона



Нейтрино - безмассовые частицы

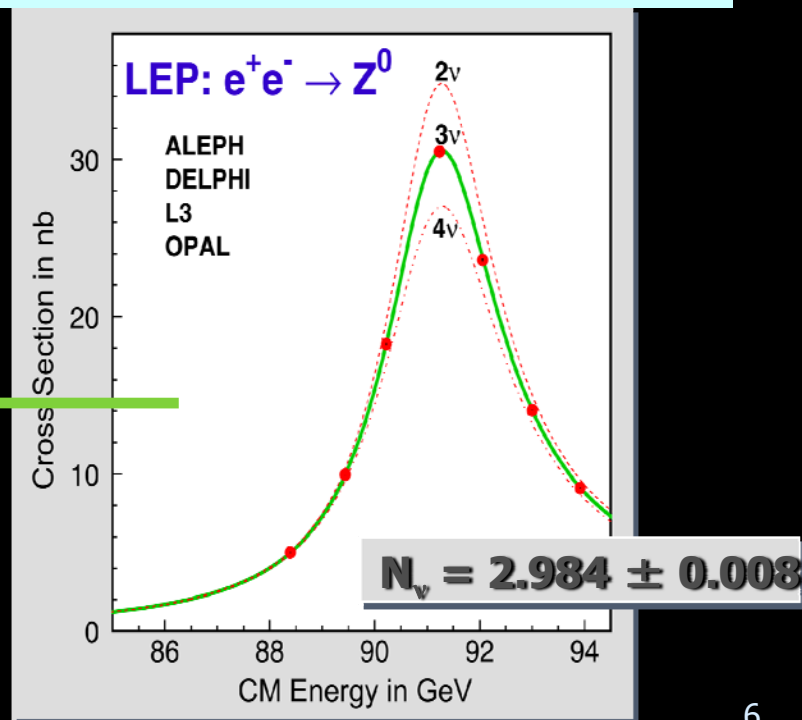
Сохраняются лептонные числа  $L_e$   $L_\mu$   $L_\tau$

Невозможны переходы (осцилляции) одного типа нейтрино в другой  
CP в лептонном секторе сохраняется

Эксперименты на LEP (ЦЕРН):  
из ширины распада Z бозона  
следует, что существуют только

**три типа** ←

легких активных нейтрино



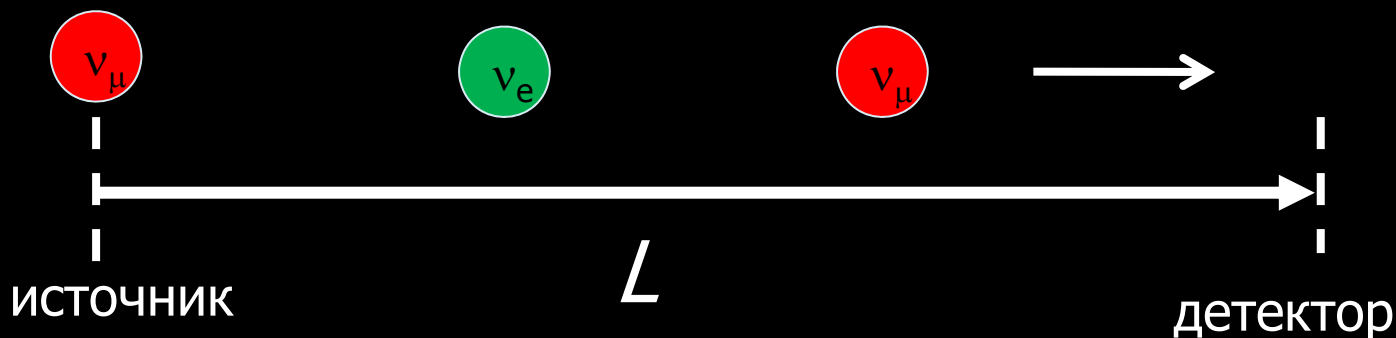


# Гипотеза нейтринных осцилляций

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



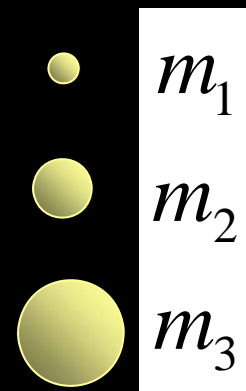
- один тип нейтрино переходит в другой
- необходима ненулевая масса и смешивание
- вероятность осцилляции зависит от массы нейтрино, энергии нейтрино  $E_\nu$  и расстояния  $L$



собственные  
состояния



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



массовые  
состояния

**Собственные (активные) состояния не совпадают с массовыми состояниями**



# Смешивание двух типов нейтрино

Два типа для простоты:  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$

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

Матрица смешивания определяется одним параметром - углом смешивания  $\theta$

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

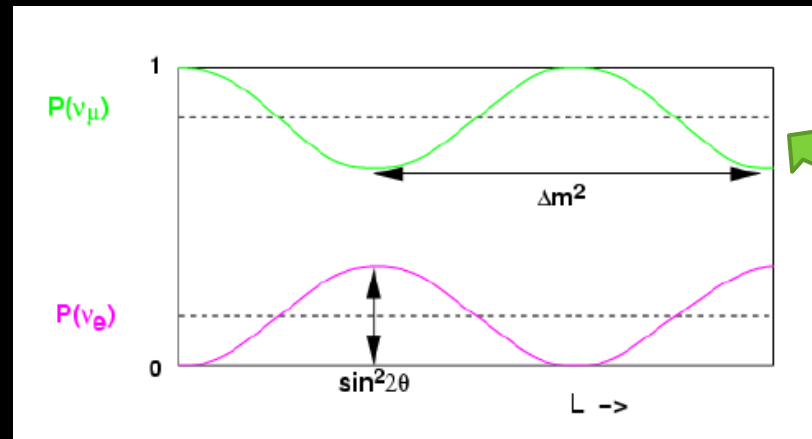
$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle \\ \nu_\mu &= -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \end{aligned}$$

## 2 типа осцилляционных экспериментов

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

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

«избыток»  $\nu_e$



«дефицит»  $\nu_\mu$





# Осцилляционная индустрия

Homestake, США

SAGE, ИЯИ РАН, Россия

Borexino, Италия

Солнечные нейтрино

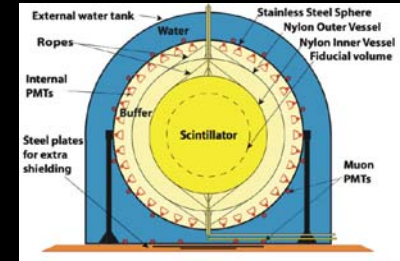


1970



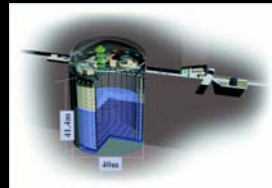
1990

Gallex  
SNO  
SK



Атмосферные нейтрино

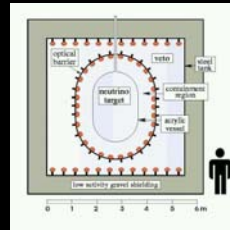
SK, Япония



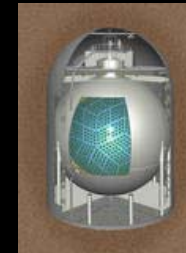
MACRO, Италия  
Soudan2, США

Реакторные нейтрино

CHOOZ, Франция

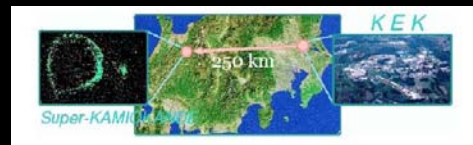


KamLand, Япония



Ускорительные нейтрино

K2K, Япония



MINOS, США



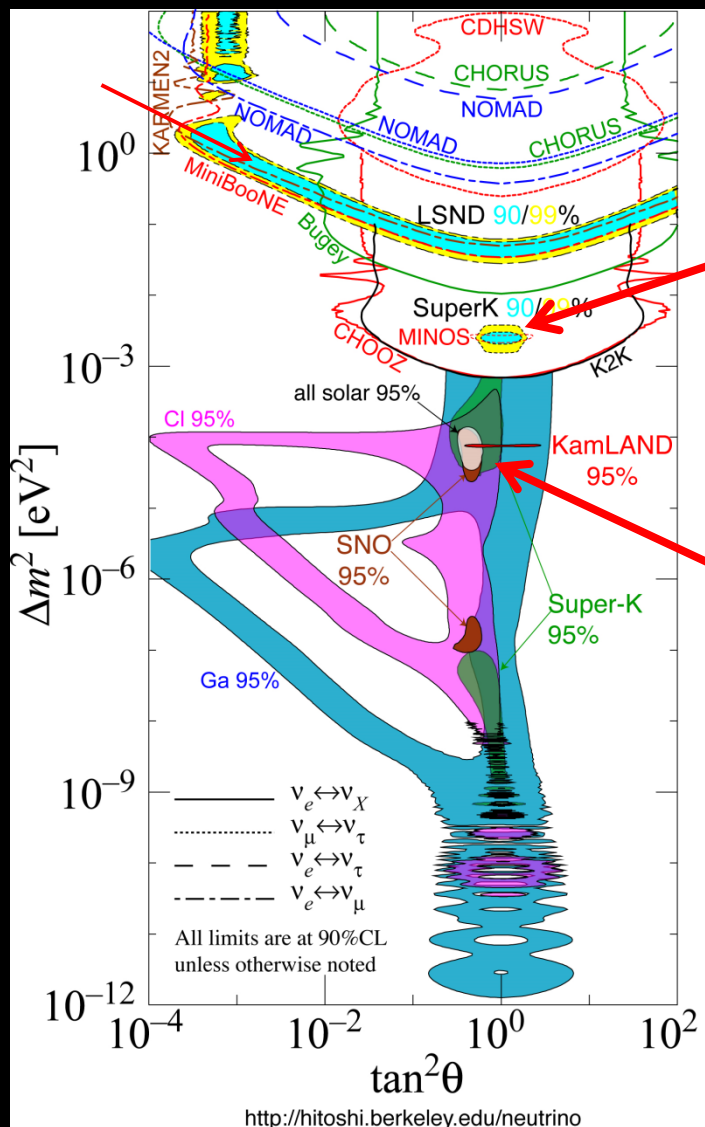
OPERA, Италия



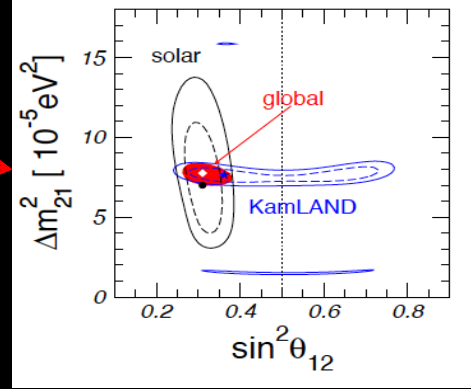
LSND,  
MiniBooNe,  
США



# Экспериментальные результаты

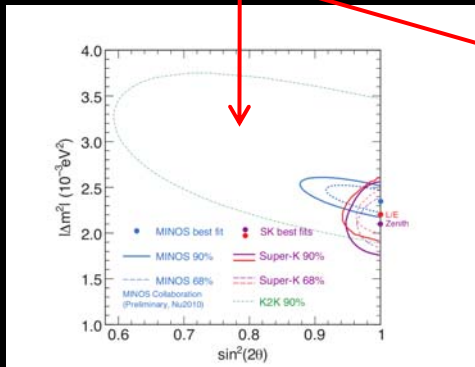


**Solar + KamLAND**

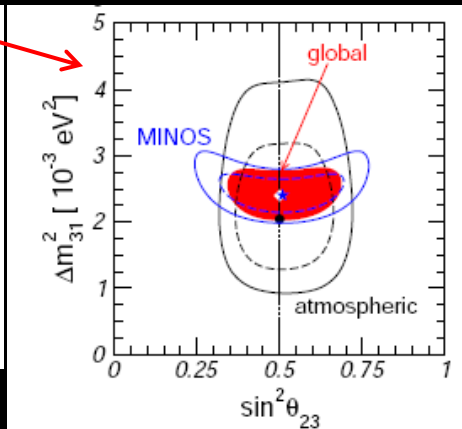


**atm**

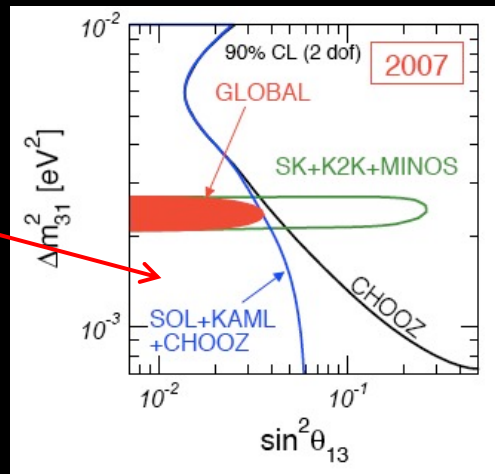
**SK + K2K + MINOS**



**sol**



**CHOOZ + atm + LBL**  
**sin²(2θ₁₃) < 0.11**

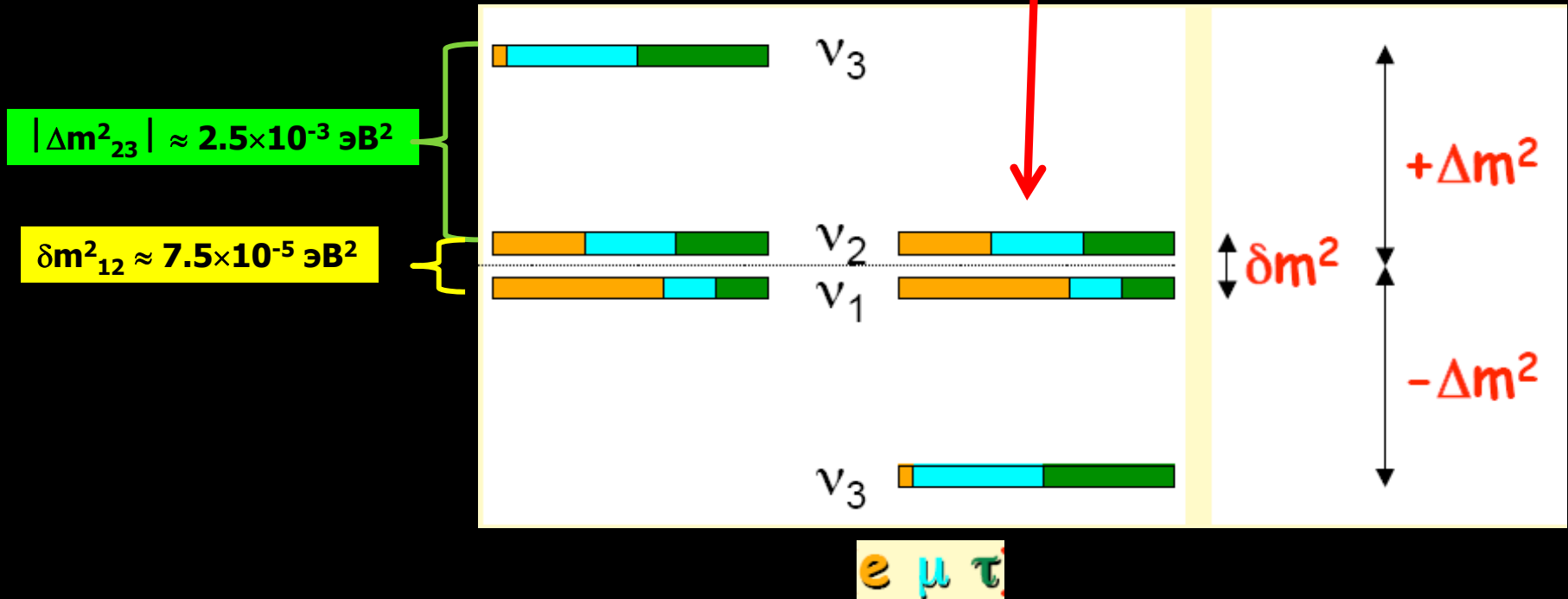




# Иерархия масс нейтрино

нормальная  
иерархия

инверсная  
иерархия



Неизвестно, какая иерархия реализуется в природе

$m_3 > m_2$  или  $m_3 < m_2$  ?



# Параметры смешивания

атмосферные  $\nu$

Связь между атмосферными и солнечными нейтрино

солнечные  $\nu$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{23} \approx 45^\circ$$

$$|\Delta m_{23}^2| \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

?

$$\theta_{12} \approx 34^\circ$$

$$\Delta m_{12}^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$\theta_{13} = ?$$

CP нечетная фаза  $\delta = ?$   $A_{CP} \sim P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\tilde{\nu}_\mu \rightarrow \tilde{\nu}_e)$

Только  $\theta_{13} \neq 0$  открывает путь к поиску CP нарушения  
Первоочередная задача - измерение величины  $\theta_{13}$





# Эксперимент с длинной базой



Предложение одобрено	<b>2003</b>
Создание установки	<b>2004-2009</b>
Начало набора статистики	<b>2010</b>



Toyama  
Kamioka Mine

**SuperKamiokande**

**Япония**

Токио



Tokyo/Narita Airport

JPARC

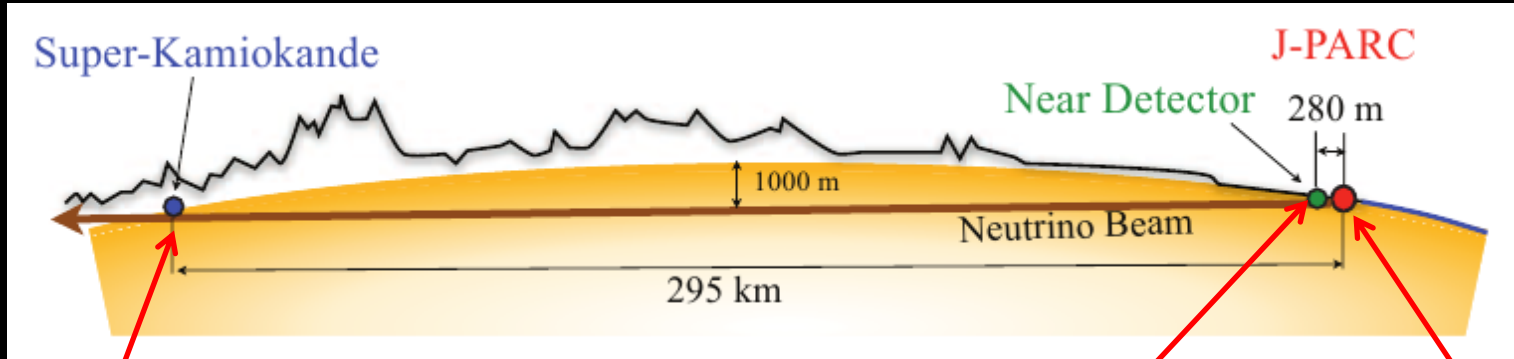
**Tokai**



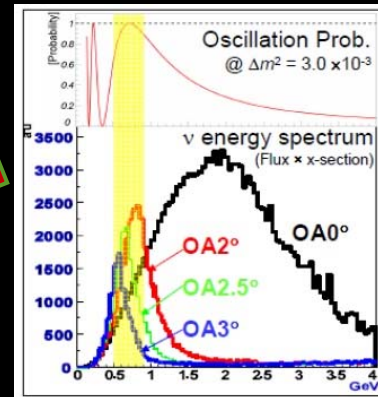
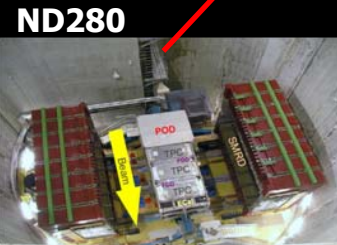
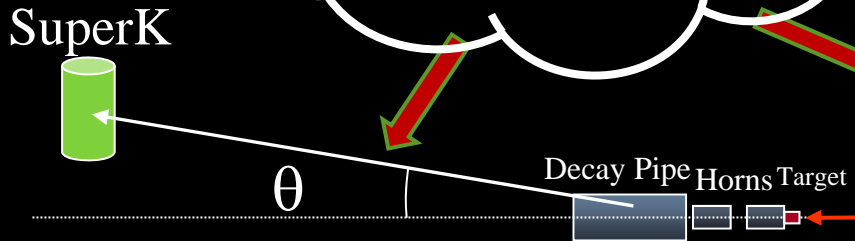


**T2K: - поиск  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$**   
**- измерение  $\theta_{13}$**   
**- CP - нарушение**

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



Концепция нейтринного пучка, смещенного от центральной оси на небольшой угол  $\theta$



**Протонный синхротрон 30 ГэВ**  
**0.75 МВатт**

При  $\theta=2.5$  градуса энергия нейтрино настроена на осцилляционный максимум



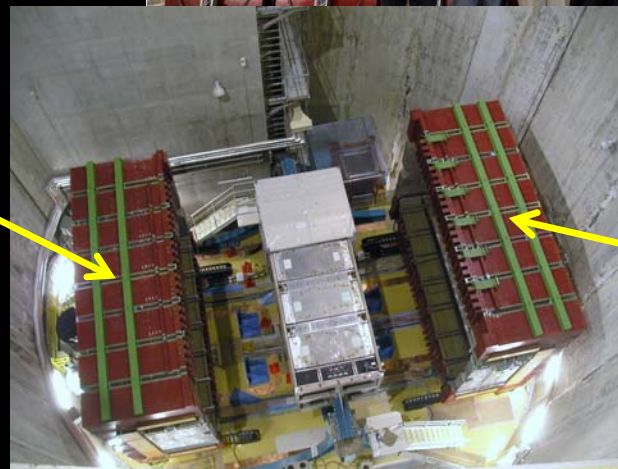
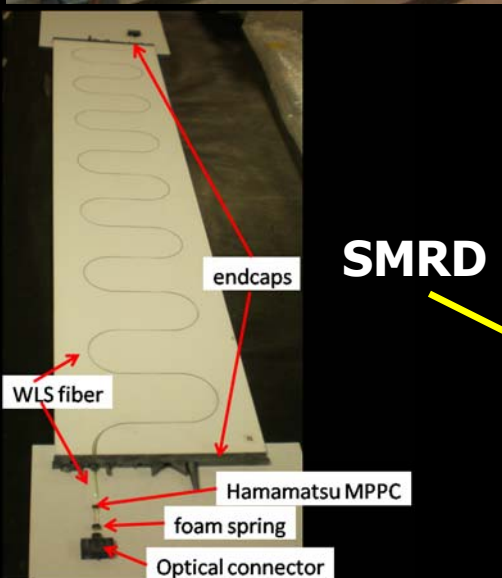
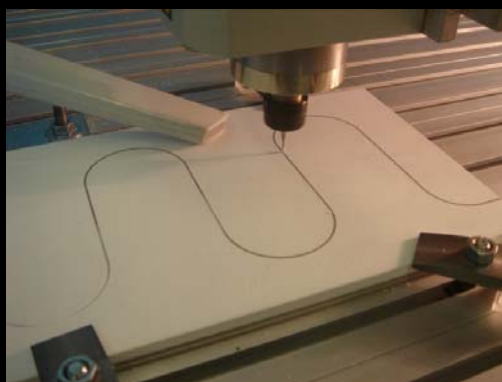


# Ближний детектор T2K

Вклад ИЯИ РАН: создание детектора мюонов высоких энергий (**SMRD**), который является частью ND280.

Участие ИЯИ в T2K осуществляется в рамках

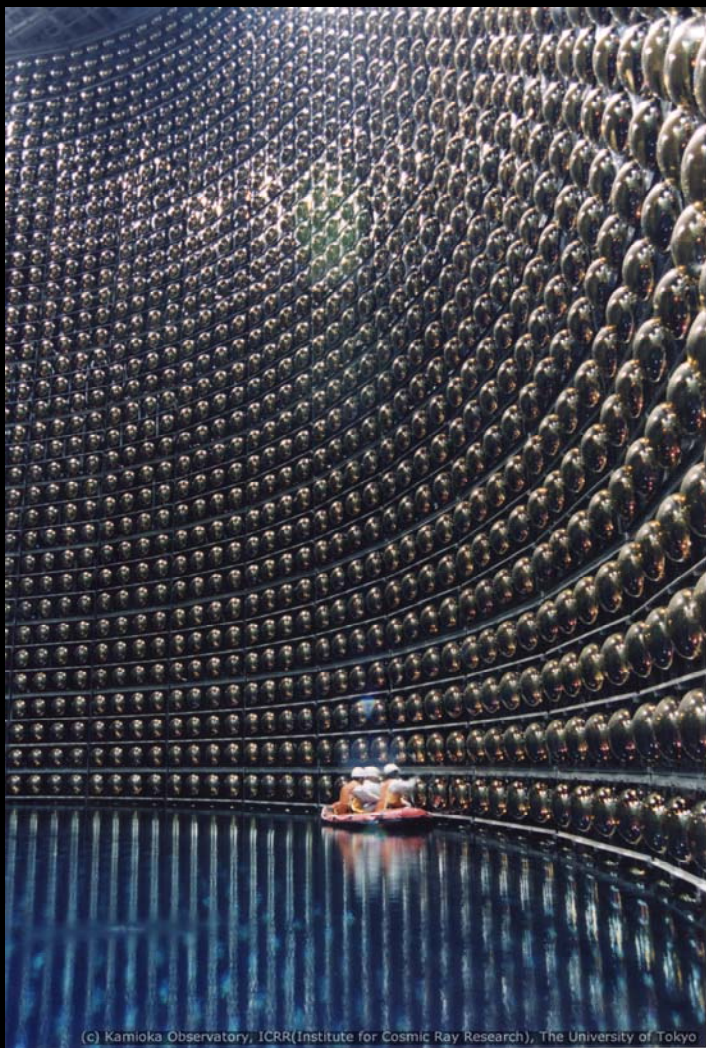
Программы Президиума РАН «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика»



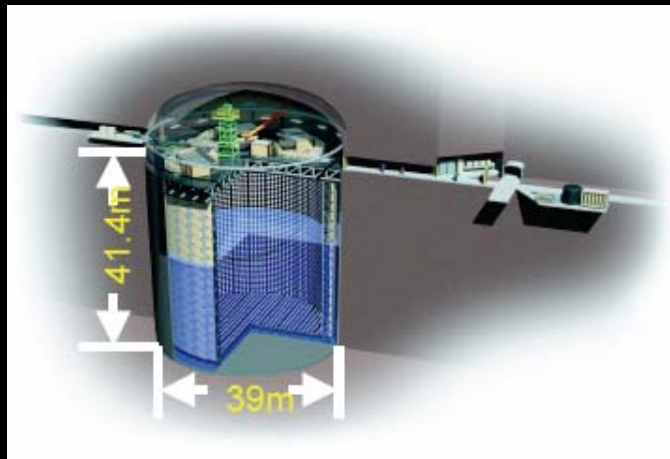
**SMRD**



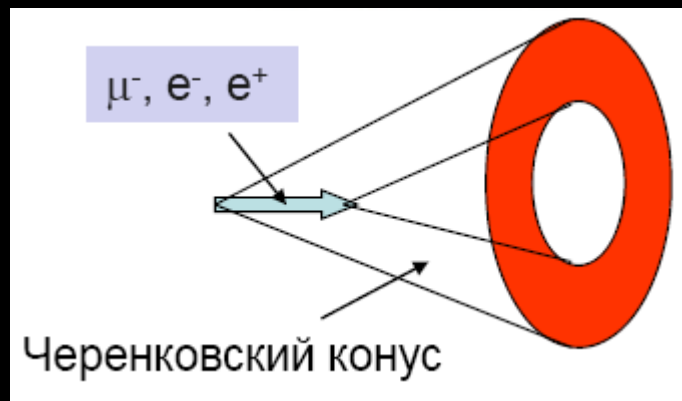
# СуперКамиоканде – дальний детектор T2K



(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo



Черенковский детектор  
масса воды 50 кт  
более 11000 фотоумножителей



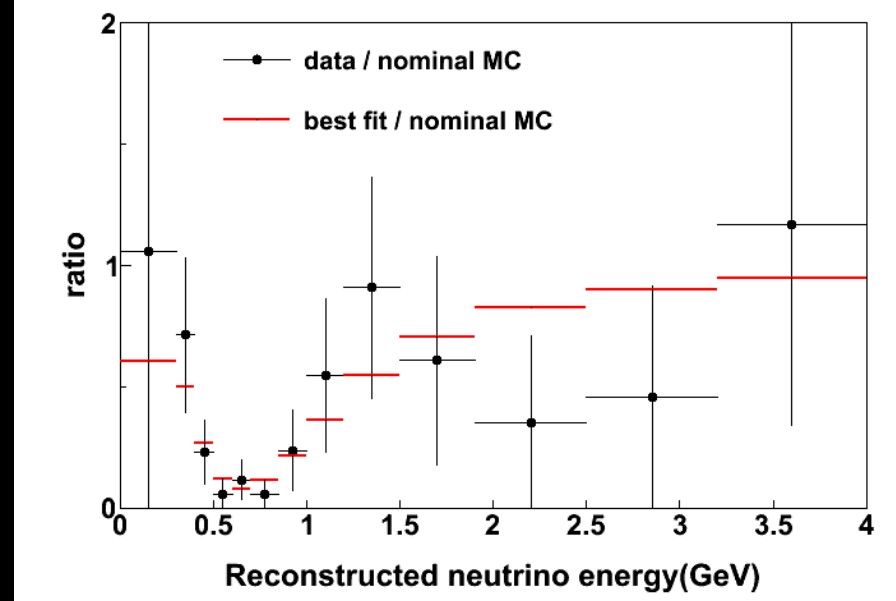
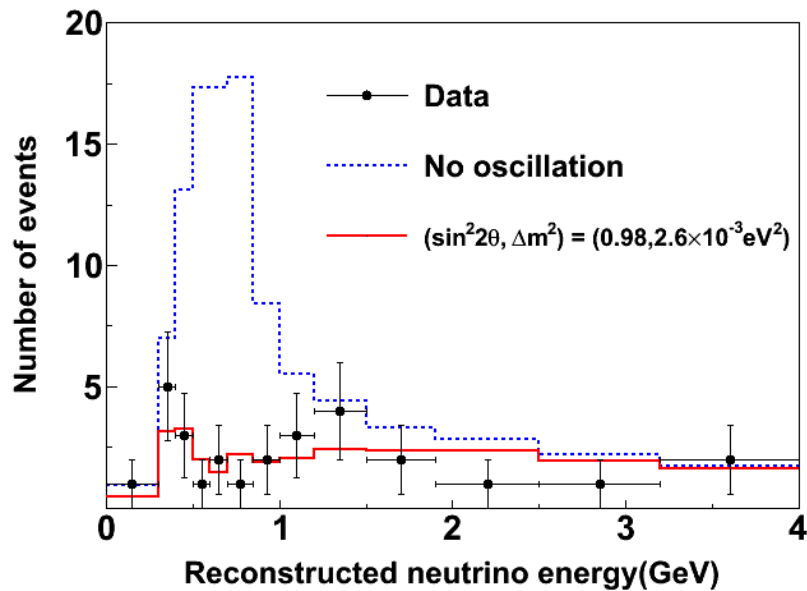




# T2K: $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$

Набор статистики T2K: январь 2010 – март 2011

**~104**  $\nu_{\mu}$  события ожидалось в отсутствие осцилляций  
**31** зарегистрировано



$$\Delta m^2 = 2.6 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$
$$\sin^2 2\theta = 0.99$$



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

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2 2\theta_{13}$$

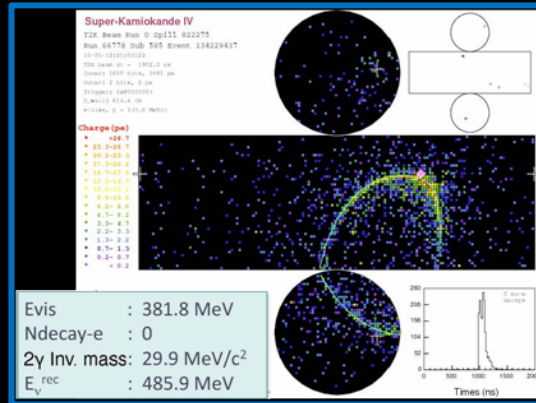
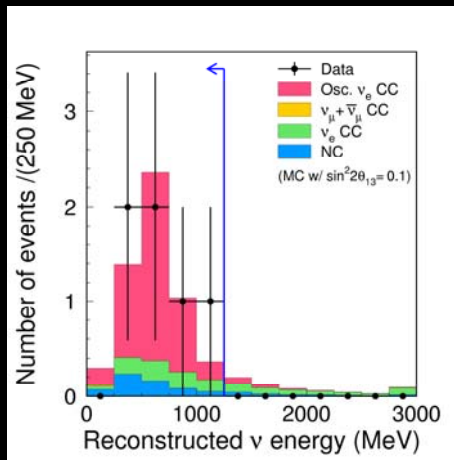
**После анализа всех накопленных данных**

**6** электронных нейтрино зарегистрировано в СуперКамиоканде



**$1.5 \pm 0.2$**  события - ожидаемый фон в отсутствие осцилляций

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



электроноподобное событие в SK

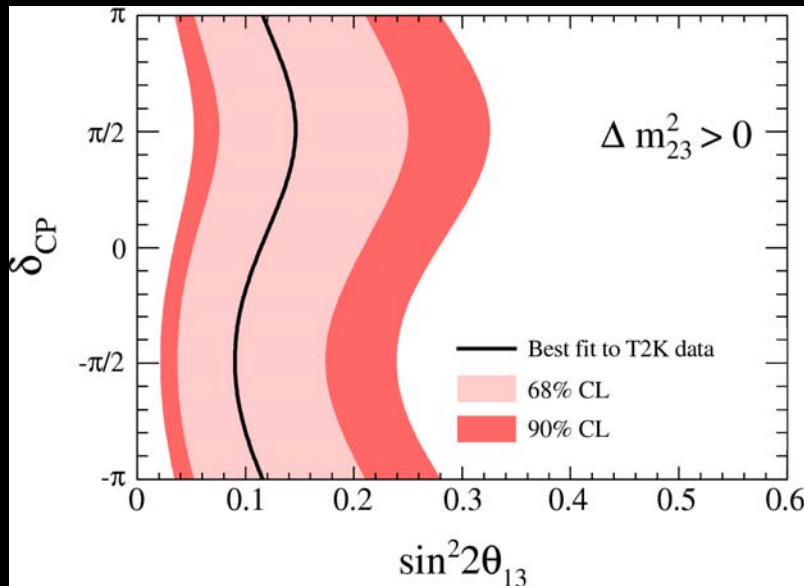
**Первое экспериментальное обнаружение осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$**



# Значение $\theta_{13}$

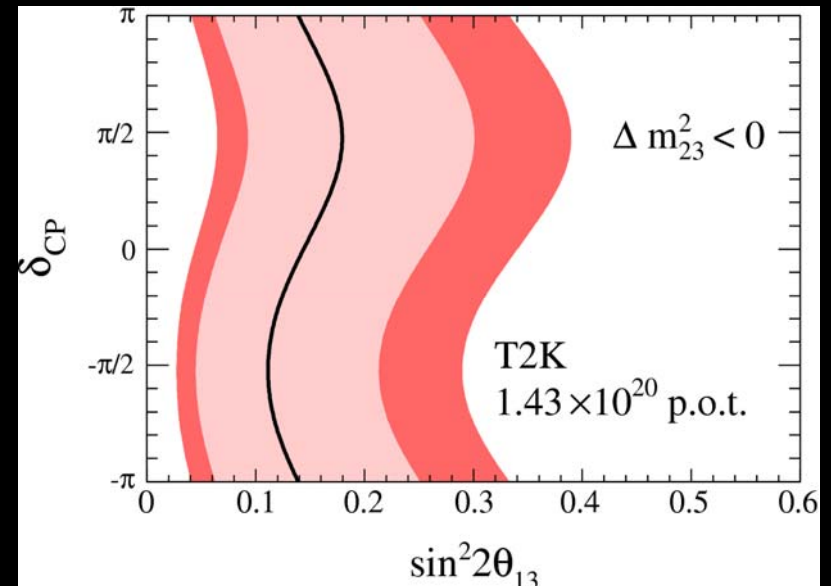
Нормальная иерархия масс

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.11$$



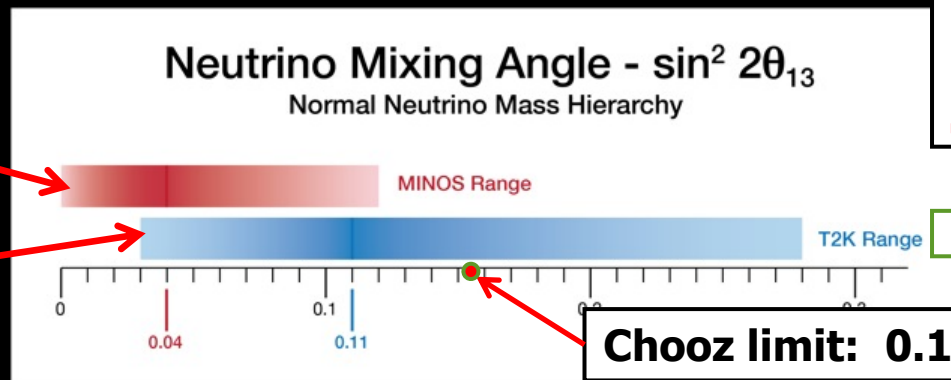
Инверсная иерархия масс

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.14$$



MINOS,  
Фермилаб, США

T2K

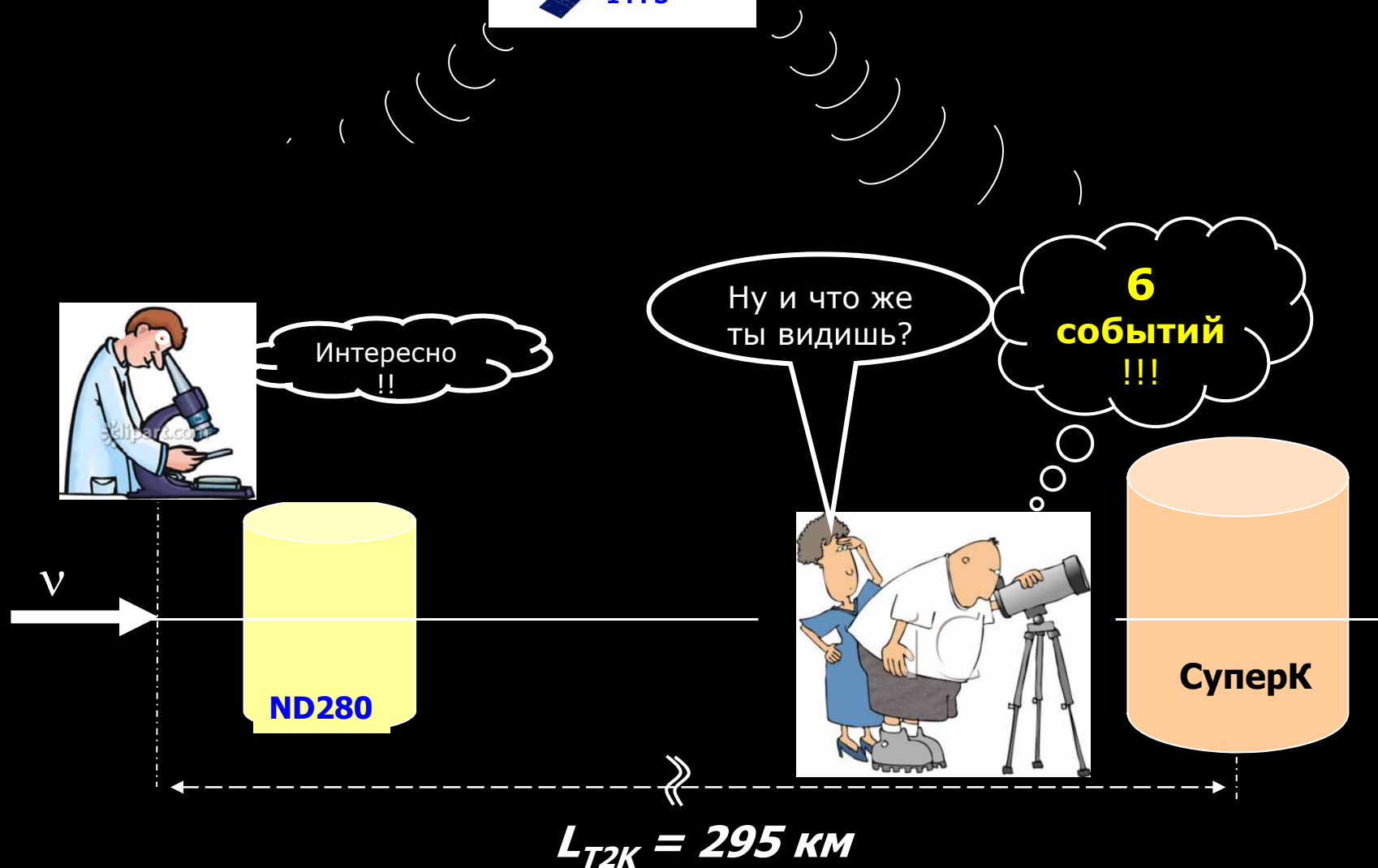


Глобальный анализ  
всех экспериментальных  
данных

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



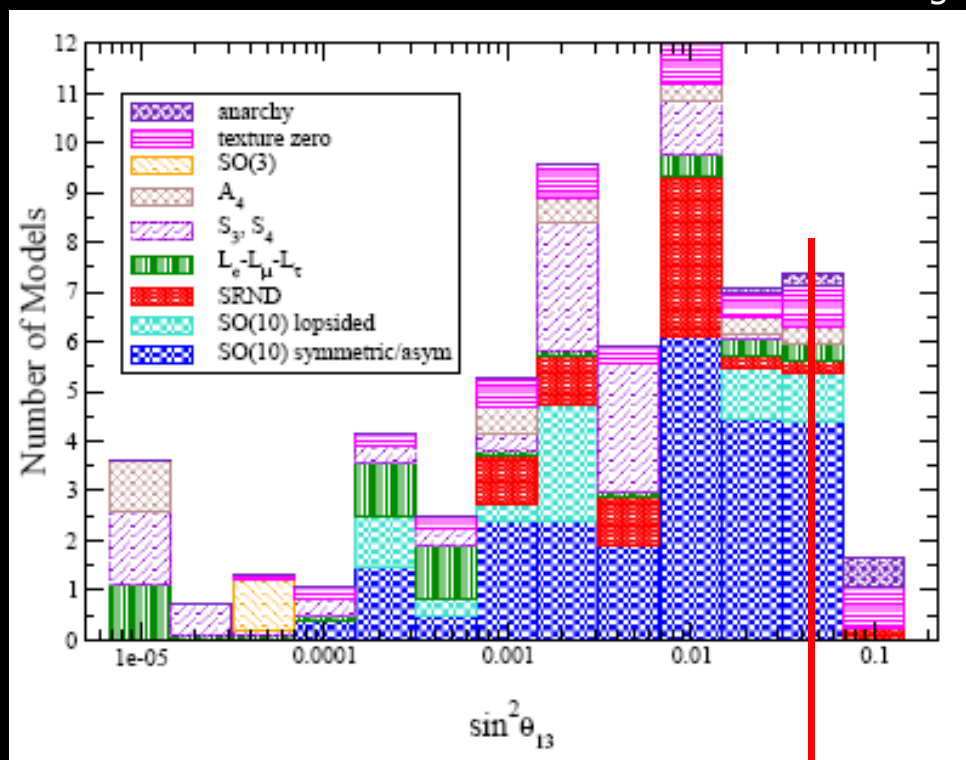
**T2K, 21 мая 2011 г.**





# Теоретические предсказания $\theta_{13}$

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



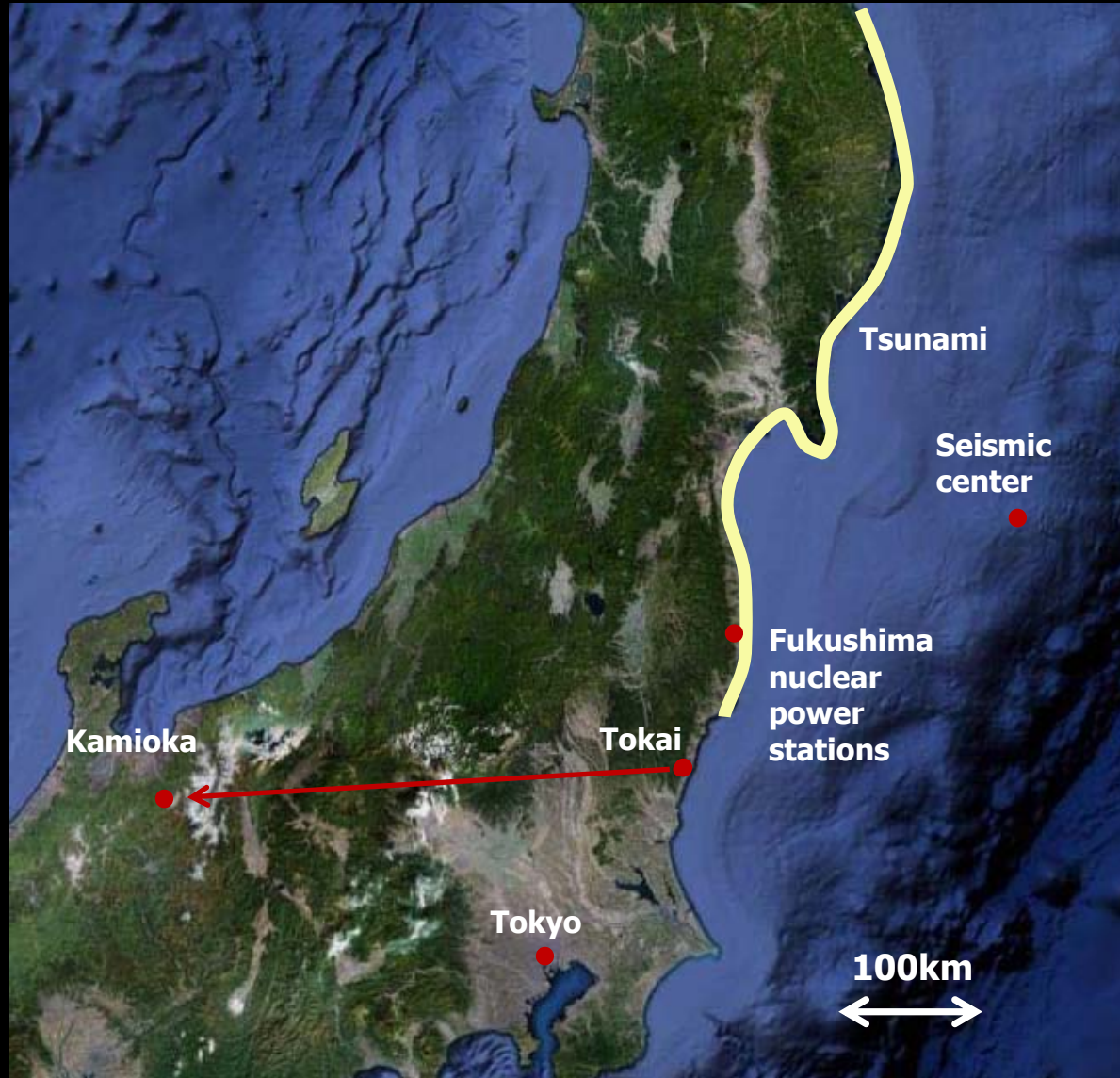
значение  $\theta_{13}$  из T2K

Большинство моделей смешивания нейтрино предсказывают малую величину  $\theta_{13}$



# Землетрясение 11 марта 2011

- Землетрясение магнитудой **9.0**
- всего 5 землетрясений  $\geq 9$  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



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



# Масса нейтрино

$\beta$ -распад трития  $m_\nu < 2$  эВ  
 (Троицк  $\nu$ -масс, ИЯИ РАН; Майнц)  
 Космология  $m_\nu < 0.3 - 1.0$  эВ

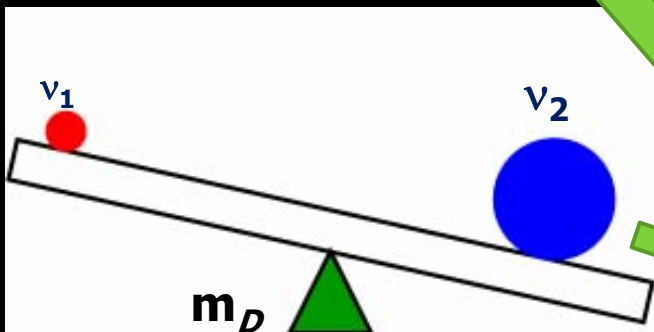
## Шкала масс

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

### Механизм see-saw («качели»)

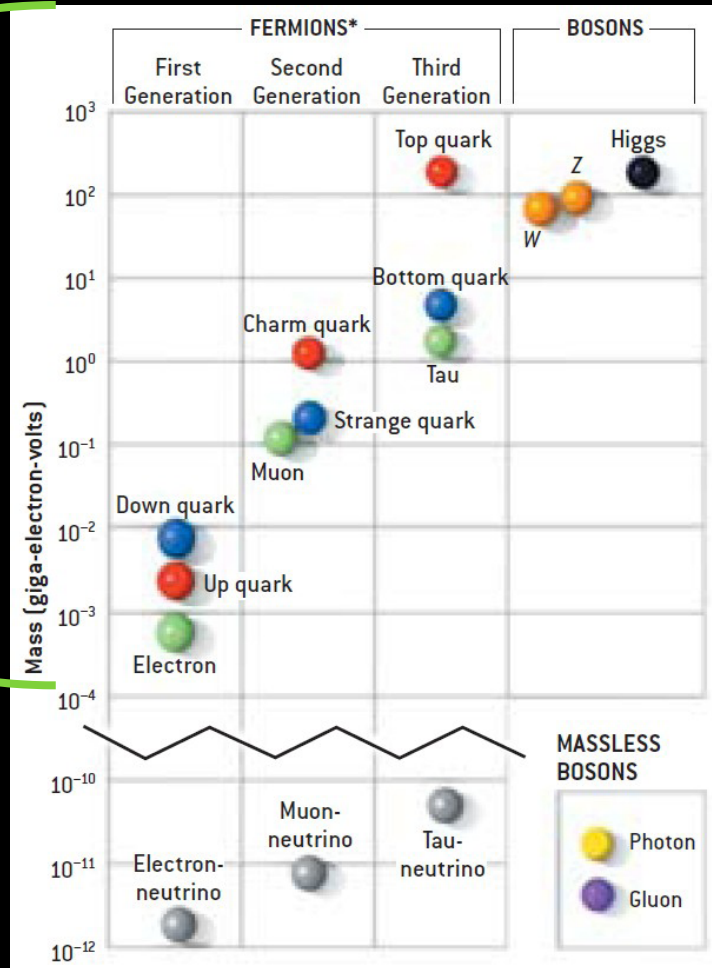
- тяжелые ( $10^9 - 10^{15}$  ГэВ) правые Майорановские нейтрино  $N_R$  добавлены в СМ
- $N_R$  взаимодействуют с левыми лептонами и Хиггсовским бозоном

**ХИГГС**



$m_D \sim 100$  ГэВ - через Хиггсовский механизм

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



$m_\nu \sim 0.05$  eV  $\rightarrow$   $M_R \sim 10^{15}$  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 различны?  
Какова природа смешивания?  
Новые симметрии?

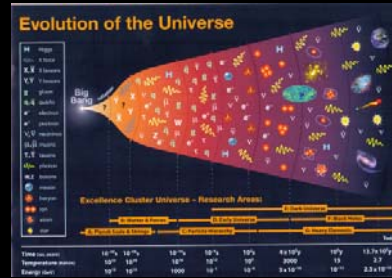


# Барионная асимметрия Вселенной (BaU)

## Ранняя Вселенная

1000000000 **1**

100000000000



**1**

Вещество

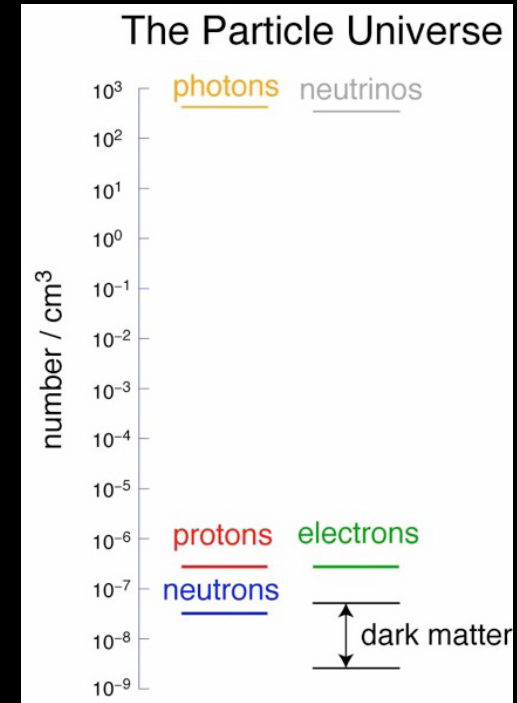
Антивещество

Вещество

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

**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 ВаУ

## 3 условия А.Д.Сахарова

- нарушение барионного числа
- С 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

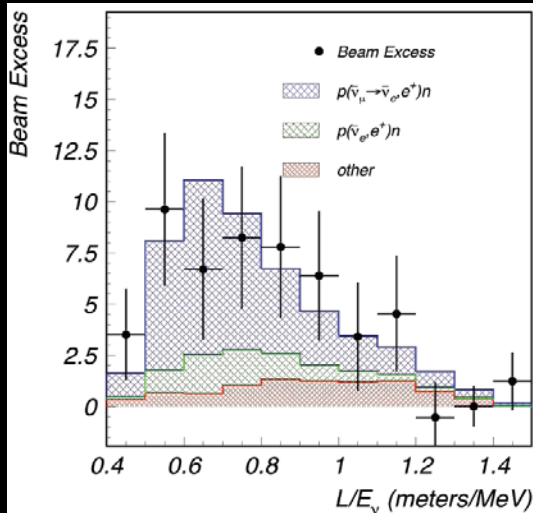
- !** Нарушение четности → ~~зеркальная симметрия~~
- !** Осцилляции нейтрино → новая физика:  $m_\nu \neq 0$   
смешивание
- ?** Стерильные нейтрино → ??
- ?** Сверхсветовая скорость → ??



# LSND/MiniBooNe аномалия

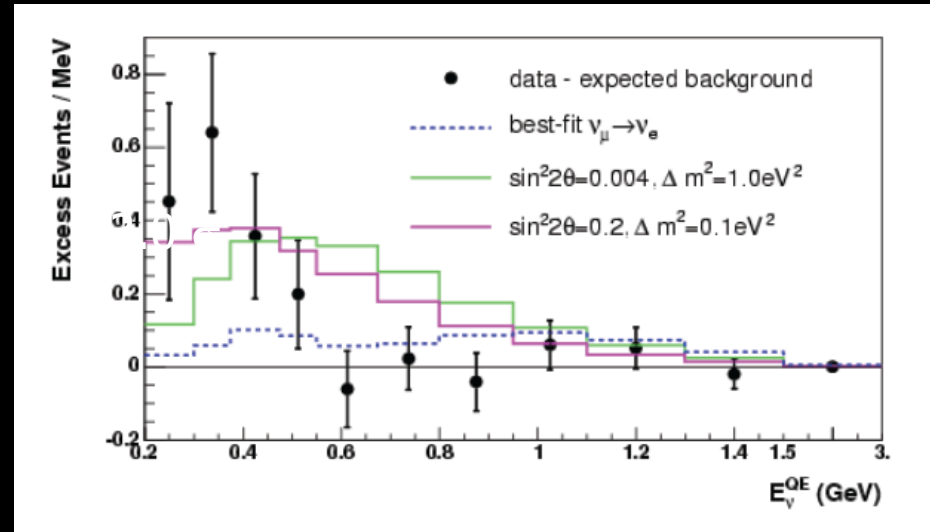
Ряд результатов по исследованию осцилляций не укладывается в общепринятую картину переходов между **тремя типами** активных нейтрино

LSND, Лос-Аламос, США



Избыток **3.8σ**

MiniBooNe, Фермилаб, США



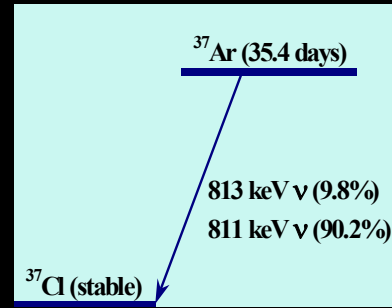
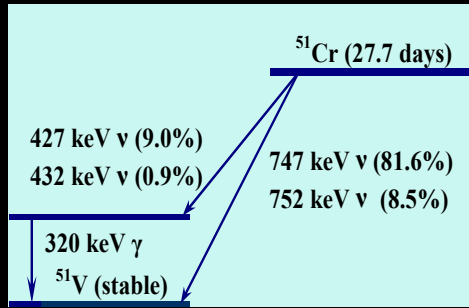
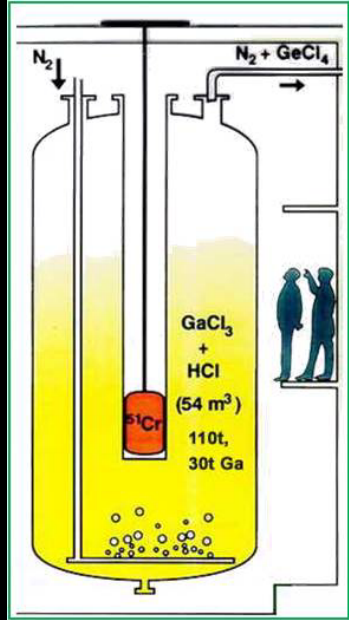
Избыток **3.0σ** для  $\nu$  и **2.3σ** для анти- $\nu$  в диапазоне энергий нейтрино 200-1250 МэВ

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

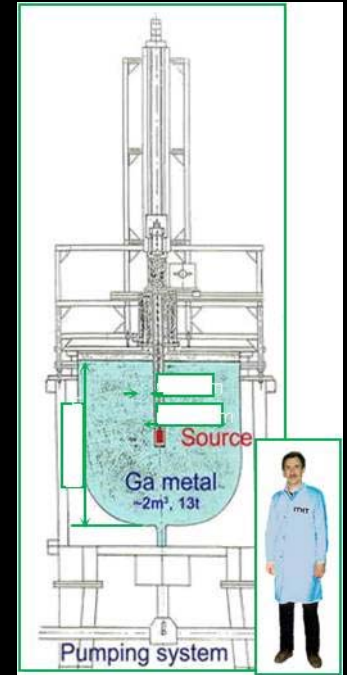
# Га аномалия



**GALLEX**

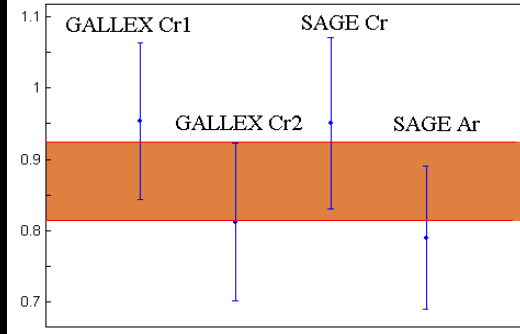


**SAGE**



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

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

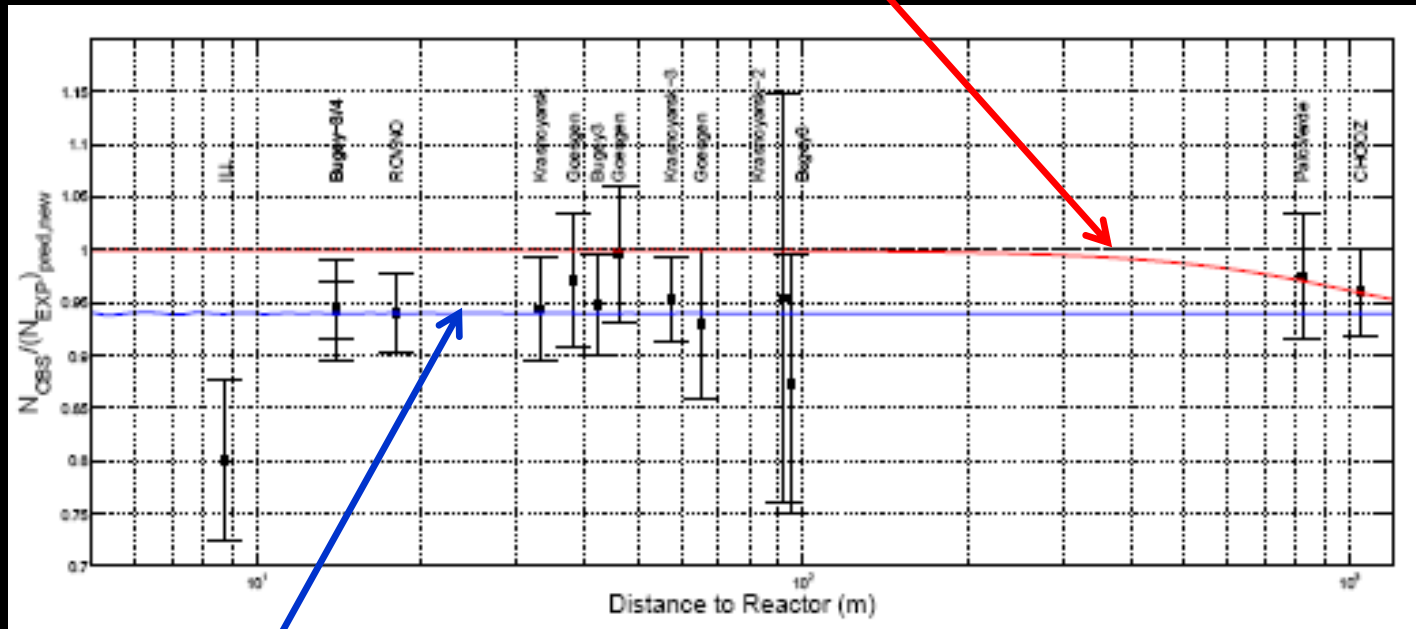


**$R = p_{exp}/p_{theory} = 0.87 \pm 0.05$**



# Реакторная аномалия

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



G.Mention et al.  
arXiv: 1101.2755

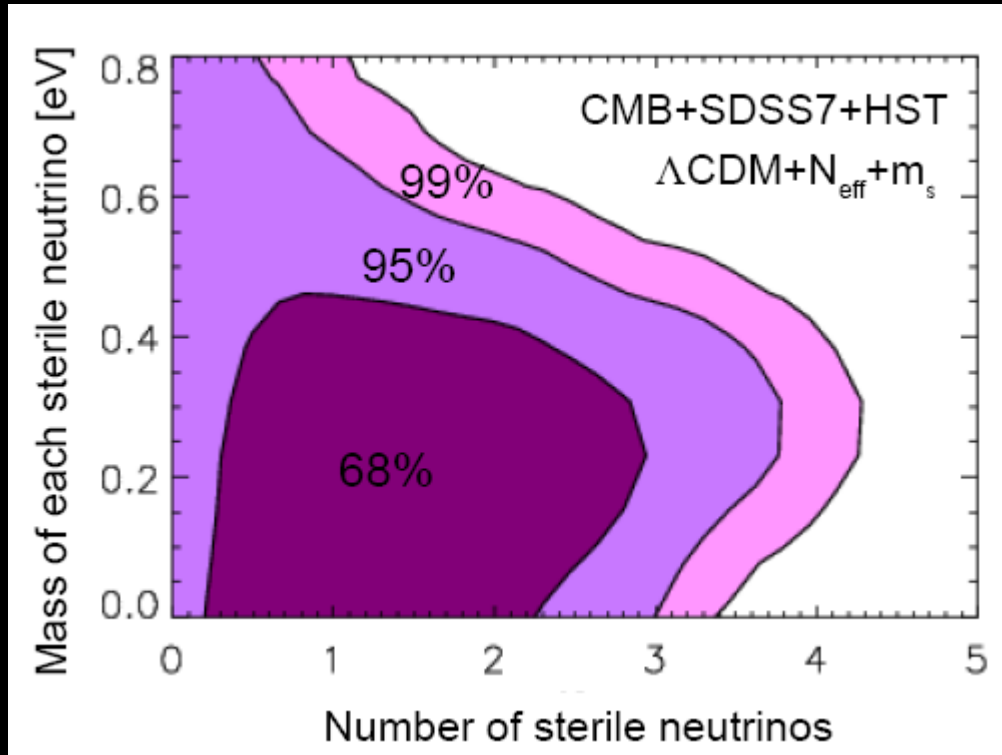
$0.937 \pm 0.027$

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 ?

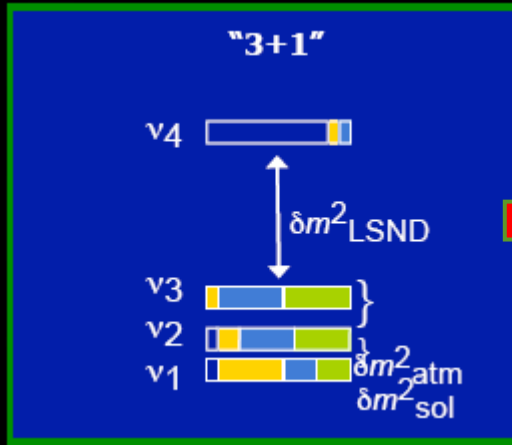
## Комбинированный анализ:

- реакторные данные
- Ga эксперименты
- LSND и MiniBooNe



$$|\Delta m^2| > 1.0 \text{ эВ}^2$$

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



$$\Delta m^2_{34} \sim 1 \text{ эВ}^2 \Rightarrow \text{4-е нейтрино?}$$

...но из Стандартной модели и LEP данных



три типа легких активных нейтрино

**Гипотеза стерильных нейтрино**

## Стерильные нейтрино $\nu_s$

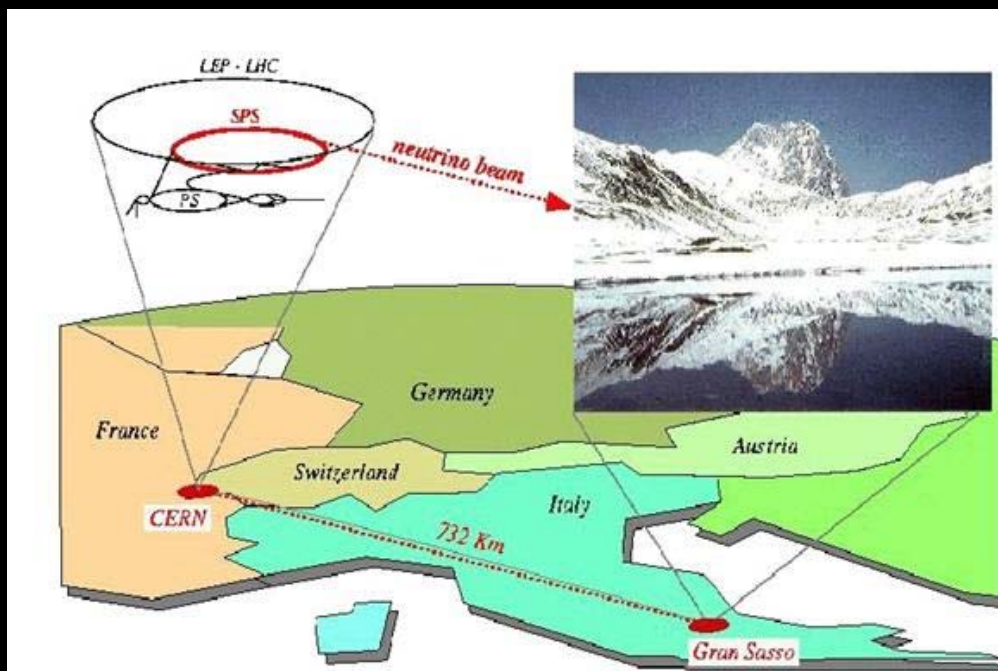
- могут рождаться в ранней Вселенной благодаря смешиванию с активными нейтрино
- не участвуют в слабых взаимодействиях
- могут иметь левую или правую спиральность
- четвертое массовое состояние
- $\nu_s$  ( $m_s \geq 1 \text{ кэВ}$ ) кандидаты в теплую темную материю



# Измерение скорости нейтрино

## Эксперимент OPERA

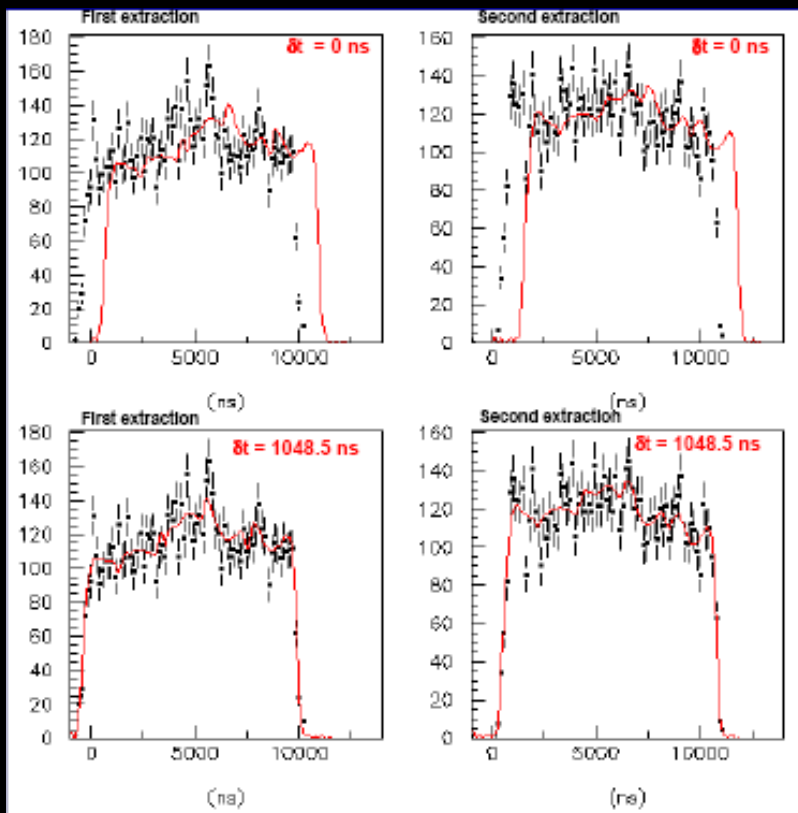
Пучок мюонных нейтрино из ЦЕРН в Гран Сассо  
Средняя энергия нейтрино 17 ГэВ



- 16000 событий в детекторе
- ~1 нс временная синхронизация ЦЕРН-Гран Сассо
- Расстояние 732 км измерено с точностью 20 см



$v_\nu > c$  ??



## Результат OPERA

$$\delta t = \text{ToF}_c - \text{ToF}_\nu = 60 \pm 10 \text{ ns}$$

$$(v_\nu - c)/c = (2.49 \pm 0.45) \times 10^{-5}$$

Расстояние 732 км нейтрино  
Пролетают на **60 нс** быстрее, чем  
свет, т.е. нейтрино обгоняют свет на  
**~20** метров на этой дистанции,  
как следует из результата OPERA

- **OPERA** измерения будут проведены с короткими ( $\sim 2$  нс) импульсами пучка
- **MINOS** и **T2K** также планируют измерить скорость нейтрино



# Ближайшее будущее

## Измерение $\theta_{13}$

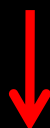


+

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

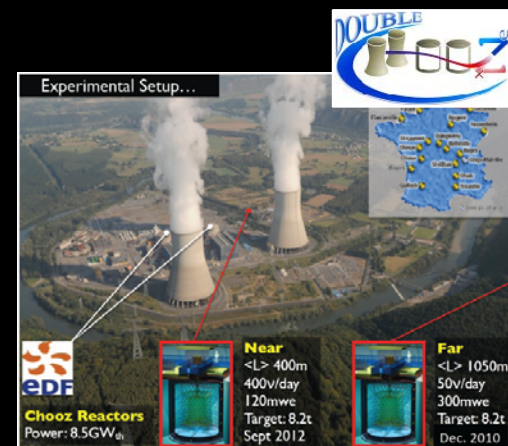


$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$$



$$\nu_e \rightarrow \nu_e$$

Значение  $\theta_{13}$  будет определено  
с точностью 1-2 градуса





# Отдаленное будущее

**3-5 лет**

**Стерильные  
нейтрино**

- Фермилаб, США: эксперименты с короткой базой
- Источник нейтрино Cr-51 (ИЯИ РАН, Borexino, LENS...)
- Реакторные эксперименты с короткой базой
- ЦЕРН: эксперимент с короткой базой, детектором LAr

**5-10 лет**

**Иерархия масс**

- Ускорительный эксперимент Nova, Фермилаб
- Супер Камиоканде

**10-20 лет**

**CP нарушение**

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



# Заключение

Осцилляции нейтрино



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

## Фундаментальные вопросы:

- $\theta_{13} \neq 0$ . Точное значение ?
- Как близко значение  $\theta_{23}$  к максимальной величине?
- Почему смешивание нейтрино и смешивание кварков различно?
- $\nu$ : 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!