Физика нейтрино

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

CERN, Женева

2 ноября 2011

Физика нейтрино

Дмитрий Горбунов

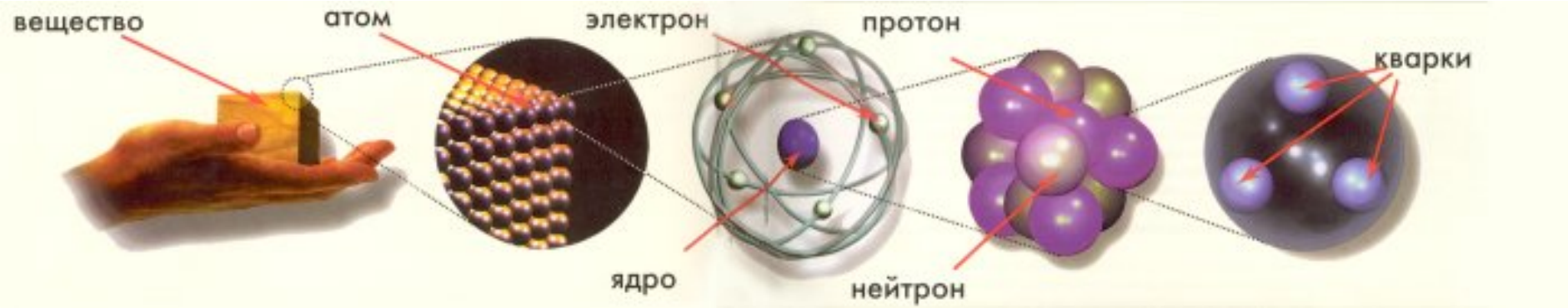
gorby@ms2.inr.ac.ru

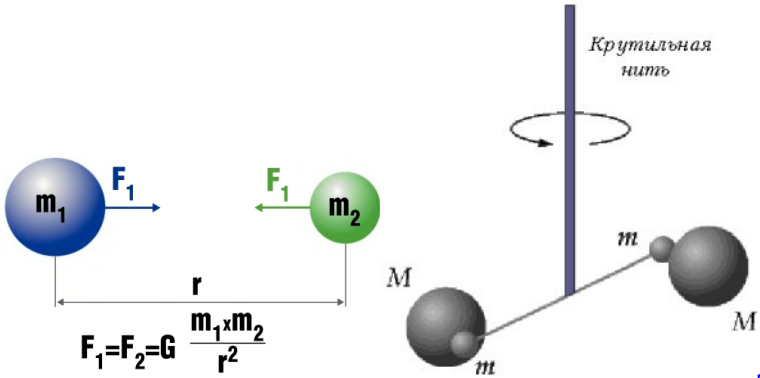
Институт ядерных исследований РАН, Москва

CERN, Женева

2 ноября 2011

Элементарные частицы и взаимодействия между ними





дальнодействие

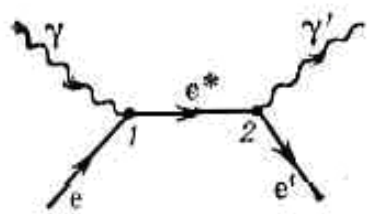


Рис. 2.

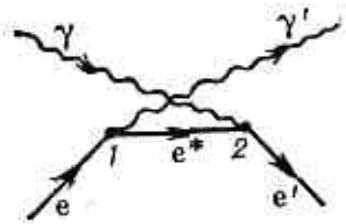
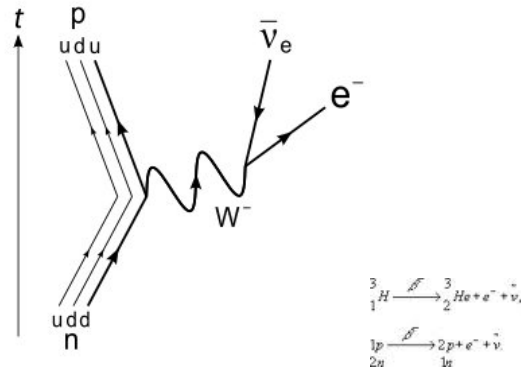


Рис. 3.

10^{-13} см

короткодействие

10^{-16} см



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

1 2 3 ← поколения

И античастицы материи (e^+, ...)

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

1 2 3 ← поколения

У античастиц противоположный заряд!
$(e^+, \ldots)$

У всех поколений одинаковы

- сильные
- слабые
- электромагнитные

взаимодействия!

Пример: электромагнетизм

$$\begin{pmatrix} u\left(+\frac{2}{3}\right) \\ d\left(-\frac{1}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c\left(+\frac{2}{3}\right) \\ s\left(-\frac{1}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t\left(+\frac{2}{3}\right) \\ b\left(-\frac{1}{3}\right) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e(0) \\ e(-1) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu(0) \\ \mu(-1) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau(0) \\ \tau(-1) \end{pmatrix}$$

$$W^+(+1)\,, \quad W^-(-1)\,,$$

NB: остальные нейтральны!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

1 2 3 ← поколения

У античастиц та же масса! ($M_{e^+} = M_{e^-}, \ldots$)

Что их различает?

- МАССЫ и значит
- гравитационные

взаимодействия!

В массах электрона и протона,
$m_p \approx 2000\, m_e \approx 1.7 \times 10^{-27}$ кг

$$\begin{pmatrix} m_u \approx 5\, m_e \\ m_d \approx 10\, m_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} m_c \approx 1.3\, m_p \\ m_s \approx 0.1\, m_p \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} m_t \approx 175\, m_p \\ m_b \approx 4.5\, m_p \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} m_{\nu_e} - ? \\ m_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} m_{\nu_\mu} - ? \\ m_\mu \approx 200\, m_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} m_{\nu_\tau} - ? \\ m_\tau \approx 1.8\, m_p \end{pmatrix}$$

$$m_{W^+} = m_{W^-} \approx 80\, m_p\,, \quad m_Z \approx 90\, m_p$$
$$m_H > 115\, m_p$$

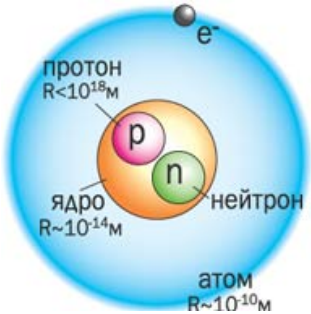
$0 < m_\nu c^2 < 10^{-6}\, m_e c^2 \sim \text{эВ} < \text{Ry}$!! $\lambda_\gamma \sim 0.1\, \mu m$

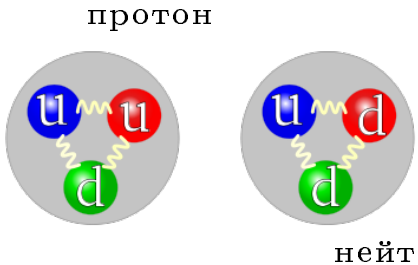
NB: остальные (γ, g) безмассовы!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

1 2 3 ← поколения

- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?





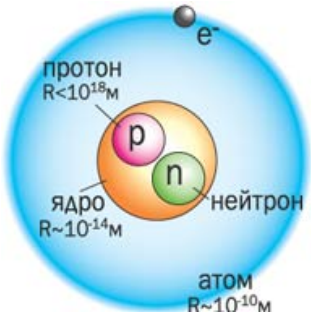
Элементарные частицы и взаимодействия между ними

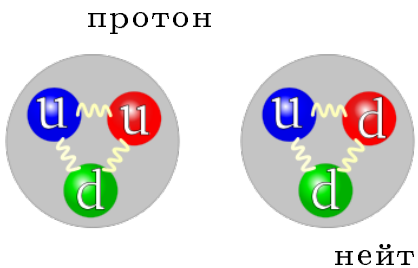
1 2 3 ← поколения

$m_d - m_u \approx 5\, m_e$, $m_n - m_p \approx 3\, m_e$

долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6}$ с

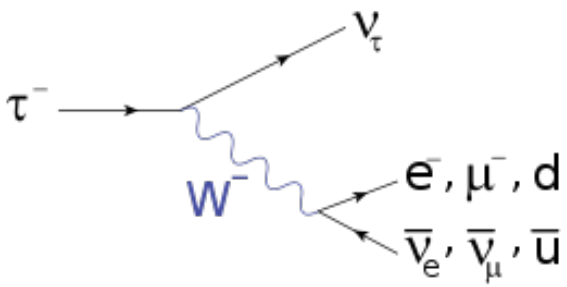
- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?

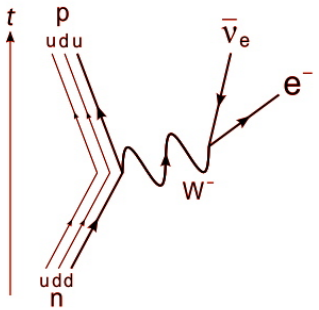




Спасибо

слабым взаимодействиям!





Роль нейтрино в слабых взаимодействиях

В. Паули (1930)

- Сохраняет энергию (экспериментально спектр позитронов непрерывен!)

$$\text{Ядро}\,(A,Z) \to \text{Ядро}\,(A,Z+1) + e + ?$$

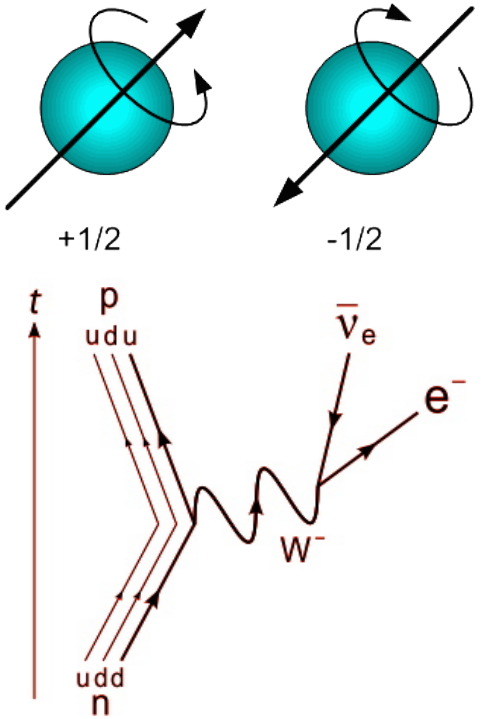
- Сохраняет угловой момент (фермионы! спины! Вспоминаем химию... принцип Паули)

$$n \to p + e + \bar{\nu}_e$$

$$\text{Спины:}\quad \frac{1}{2} \to \frac{1}{2}\quad \frac{1}{2}\quad \frac{1}{2}$$

- Сохраняет лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

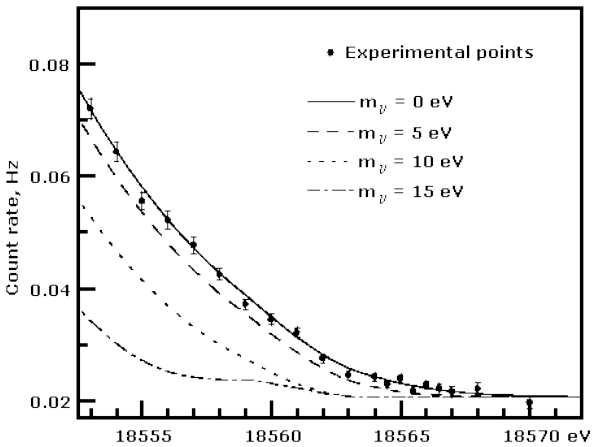
$$L_e(n) = 0 \implies L_e(\bar{\nu}_e) = -L_e(e)$$
$$L_e(\nu_e) = -L_e(\bar{\nu}_e)$$



Спектр e: прямые поиски массы (анти)нейтрино

$$T \to {}^3He + e + \bar{\nu}_e$$

$$(pnn) \to (ppn) + e + \bar{\nu}_e$$

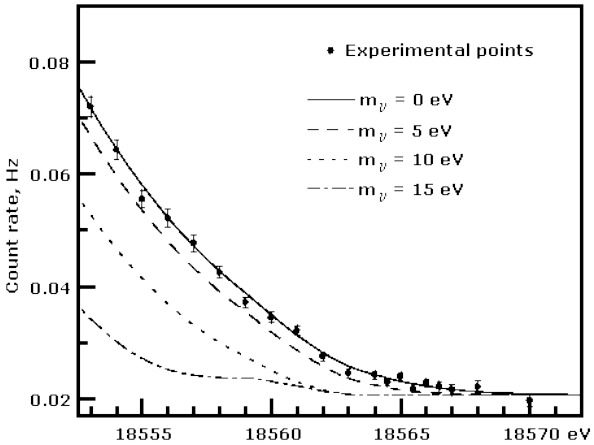


ИЯИ, 1990-2000-е годы: $m_{\bar{\nu}_e} \lesssim 2$ эВ/с^2

Спектр e: прямые поиски массы (анти)нейтрино

$$T \to {}^3He + e + \bar{\nu}_e$$

$$(pnn) \to (ppn) + e + \bar{\nu}_e$$



ИЯИ, 1990-2000-е годы: $m_{\bar{\nu}_e} \lesssim 2\,\text{эВ}/c^2$

Космология:

- объяснили бы тёмную материю при $m_{\bar{\nu}_e} \sim 20\,\text{эВ}/c^2$
- современные ограничения из космологии:

$$\sum_i m_{\nu_i} \lesssim 0.5\,\text{эВ}/c^2$$

Свойства нейтрино

- нейтрино очень лёгкие (в Стандартной модели — безмассовы!)
- антинейтрино $\bar{\nu}_e$ рождаются в β^--распаде (вместе с электроном), $\Delta L_e = 0$

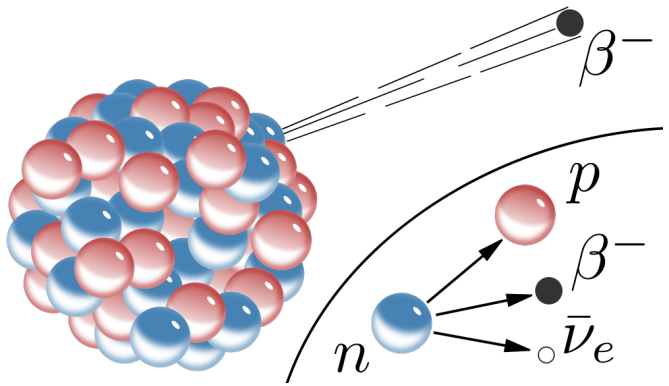
$$\text{в ядре:} \quad n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- нейтрино ν_e рождаются в β^+-распаде (вместе с позитроном), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре:} \quad p \to n + e^+ + \nu_e$$

всё зависит от энергетического баланса
(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

$$M_{\text{ядра}}(A,Z) = Z\,m_p + (A-Z)\,m_n - E_{\text{связи}}(A,Z)$$



Свойства нейтрино

- нейтрино очень лёгкие (в Стандартной модели — безмассовы!)
- антинейтрино $\bar{\nu}_e$ рождаются в β^--распаде (вместе с электроном), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре:} \quad n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- нейтрино ν_e рождаются в β^+-распаде (вместе с позитроном), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре:} \quad p \to n + e^+ + \nu_e$$

всё зависит от энергетического баланса
(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

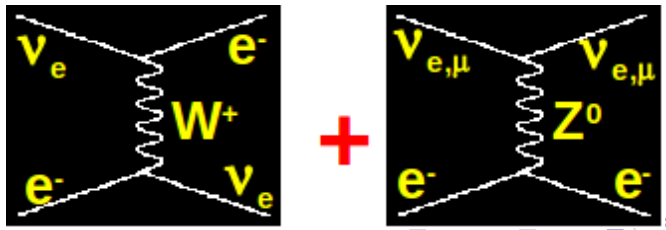
$$M_{\text{ядра}}(A,Z) = Z\,m_p + (A-Z)\,m_n - E_{\text{связи}}(A,Z)$$

- Важнейшее свойство:

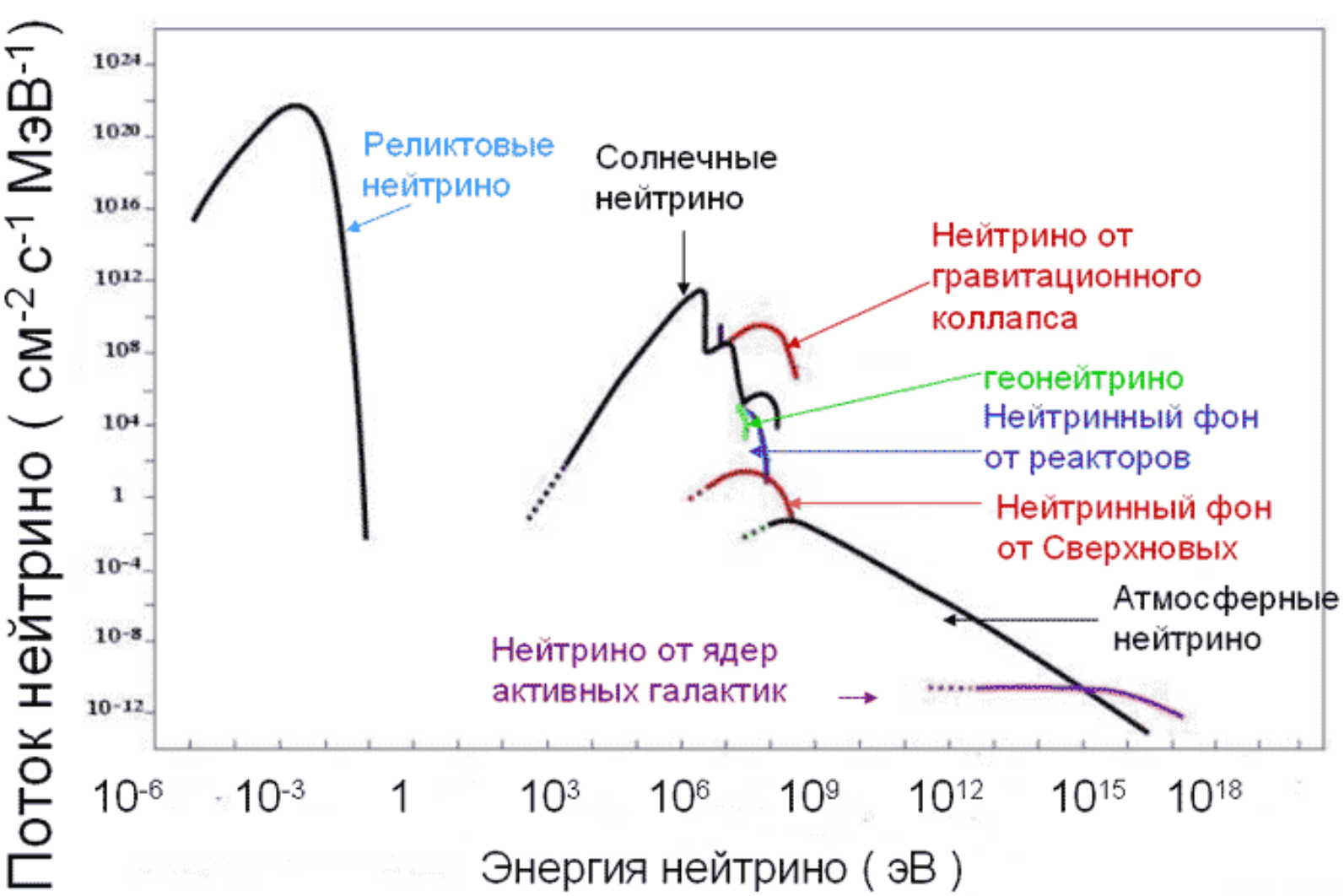
участвуют только в слабых взаимодействиях
($W^+ \to e^+ \nu_e$, $W^+ \to e^- \bar{\nu}_e$, $Z \to \nu_e \bar{\nu}_e$)

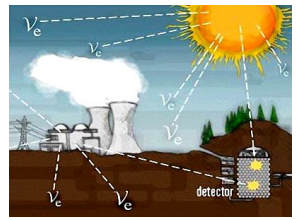
взаимодействуют очень редко!

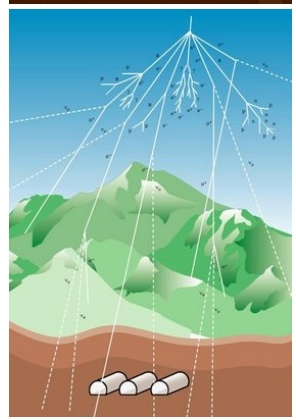
$\bar{\nu}_e$ из ядерного реактора пролетает в воде без столкновений более 10^{13} км
столько свет пролетит за год!!!
1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы

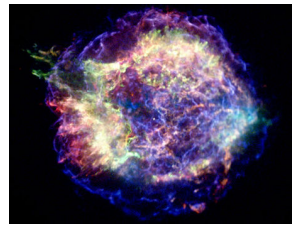


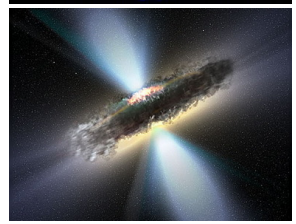
Нейтрино и антинейтрино вокруг нас



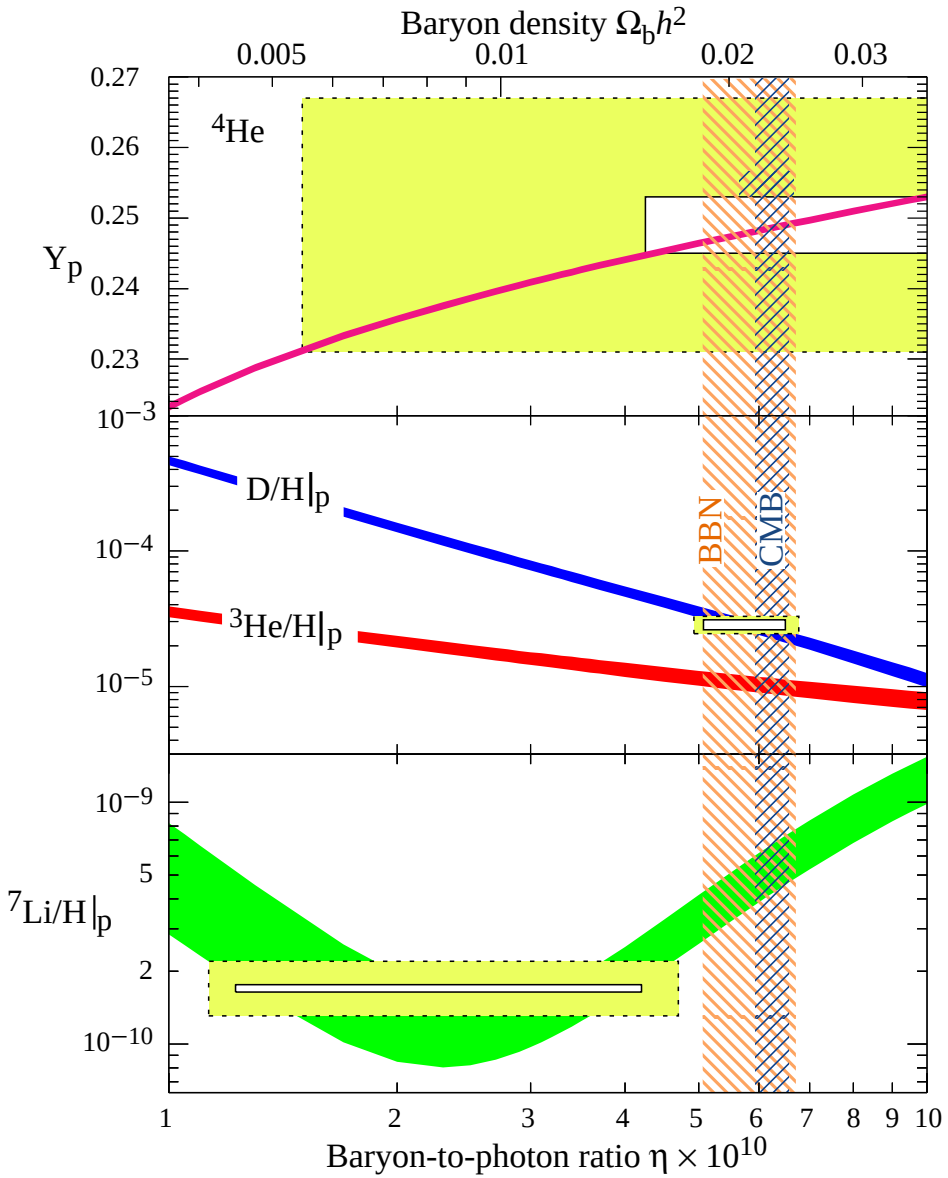


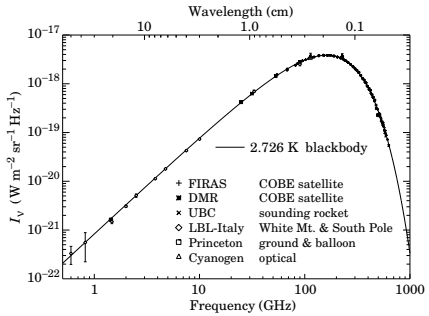


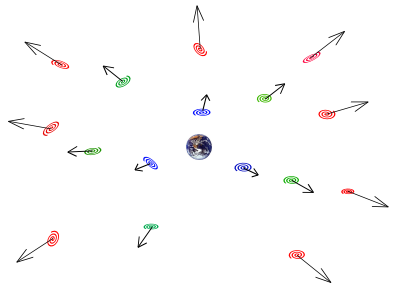




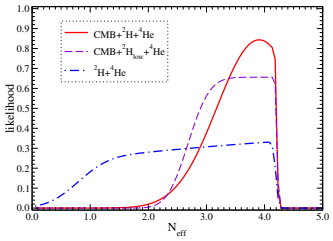
Реликтовые нейтрино и антинейтрино





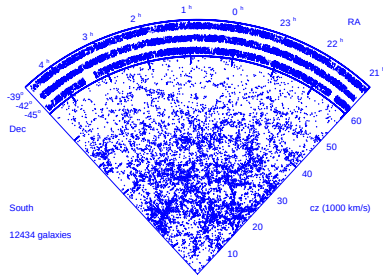


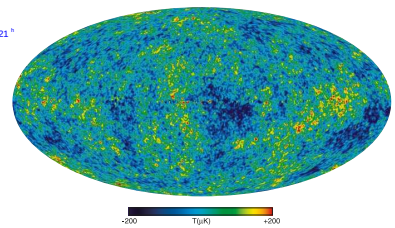
Должны быть реликтовые нейтрино с планковским спектром и $T = 1.8\,\mathrm{K}$!!!



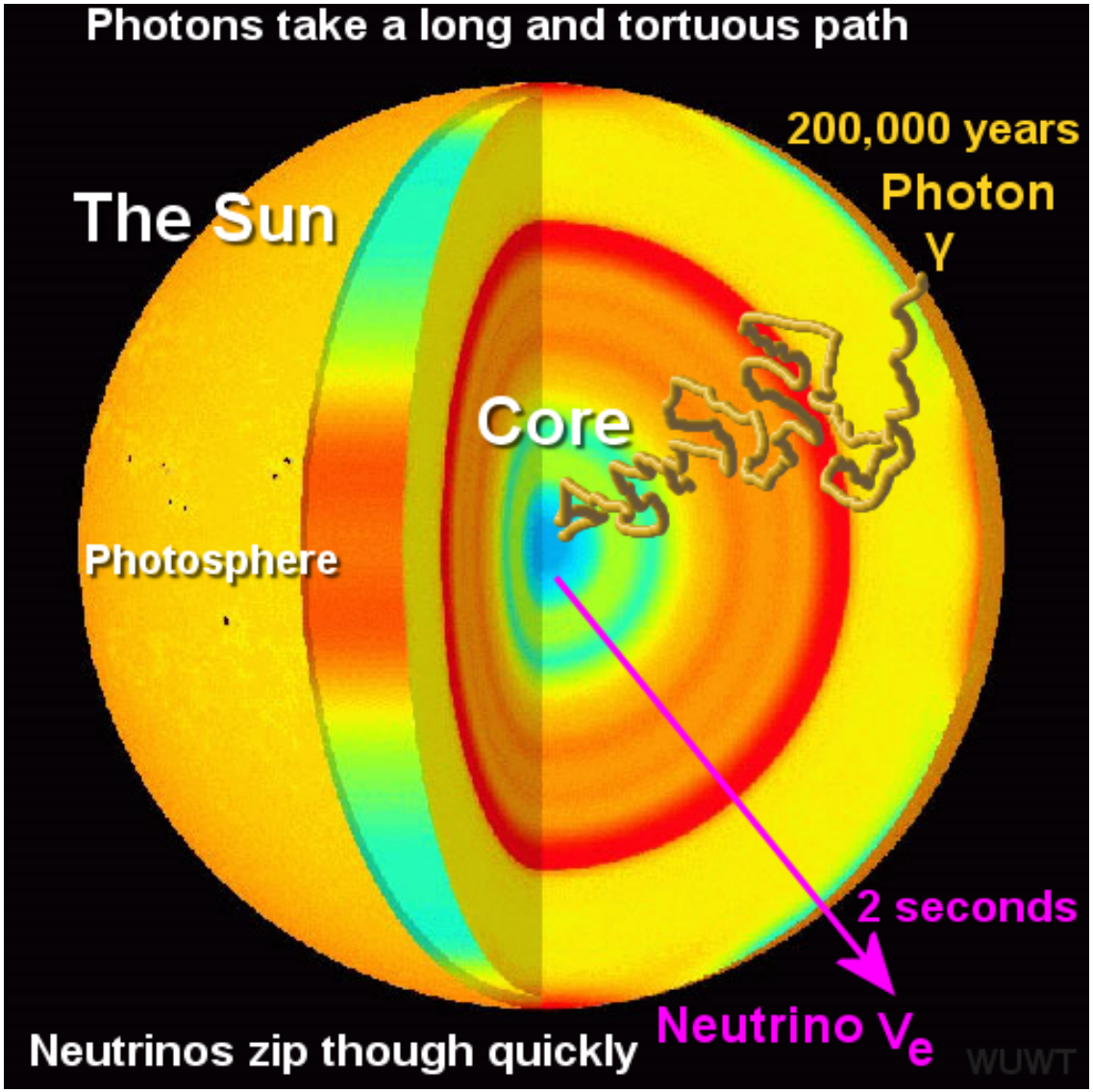
В ранней Вселенной температуры должны быть не менее 2-3 МэВ !
Не менее трёх поколений!

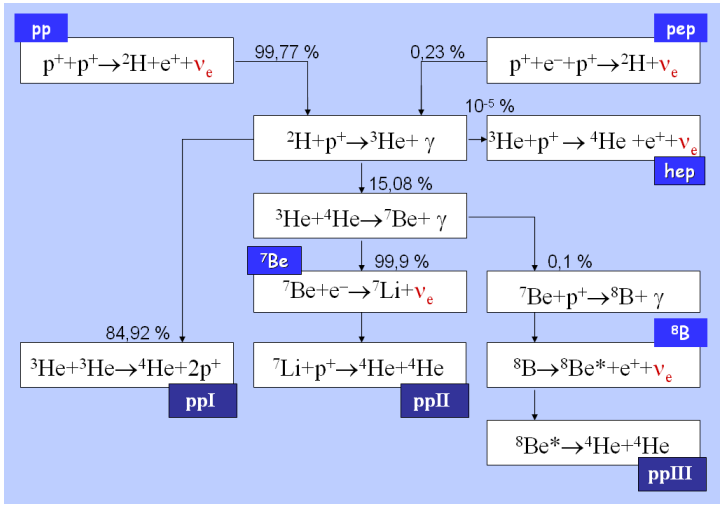
$2.4 < N_\nu < 4.2$ @ 95%CL

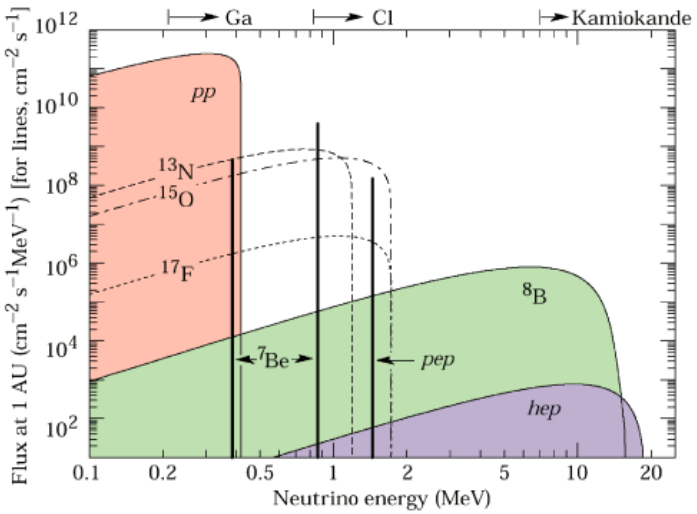




Нейтрино от Солнца: синтез $p + p \to D + e^+ + \nu_e$, ...





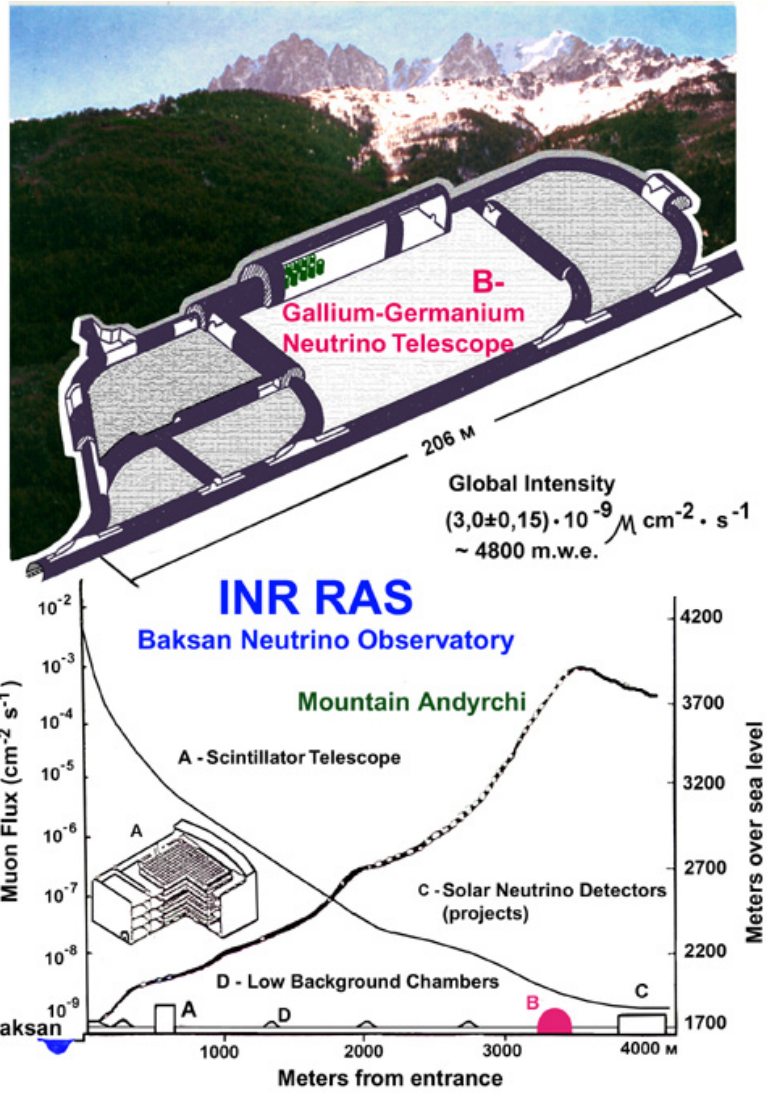


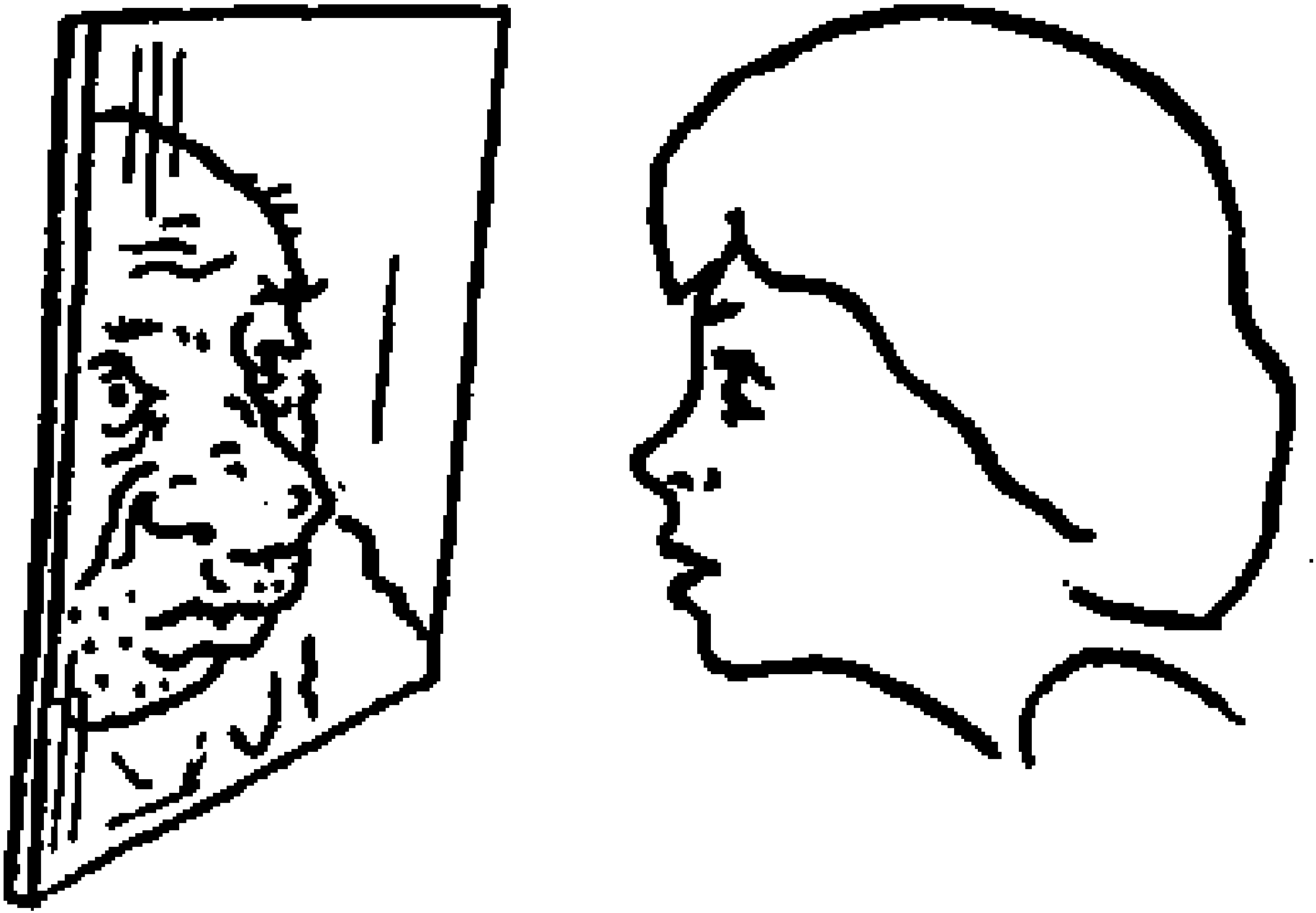
мониторинг Солнца!

Измерение потока солнечных нейтрино

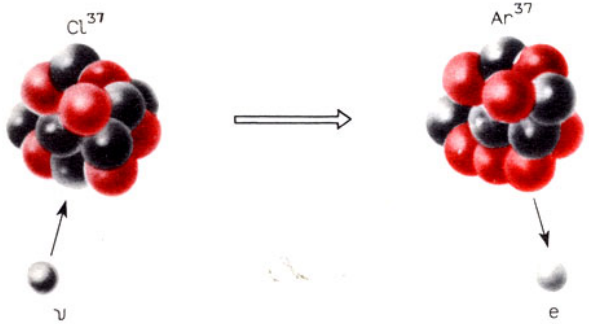
Солнце: $p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_e$

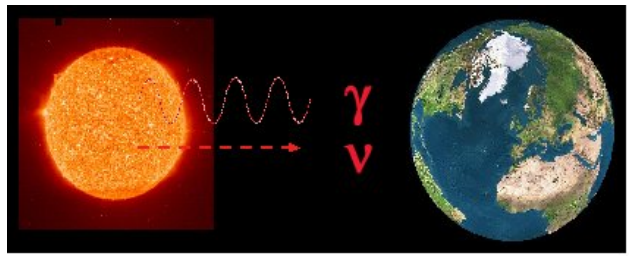
Земля: ${}^{71}Ga + \nu_e \rightarrow {}^{71}Ge + e^{-}$





Нейтрино от Солнца не хватает!!! подтверждено



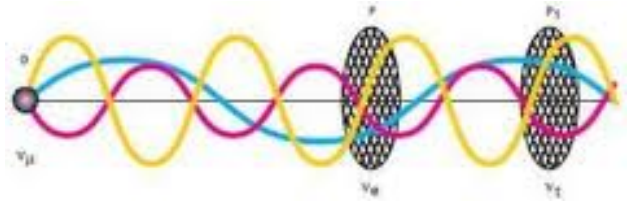


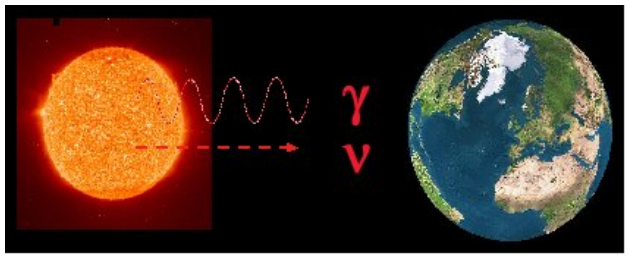
Нейтрино от Солнца не хватает!!! подтверждено

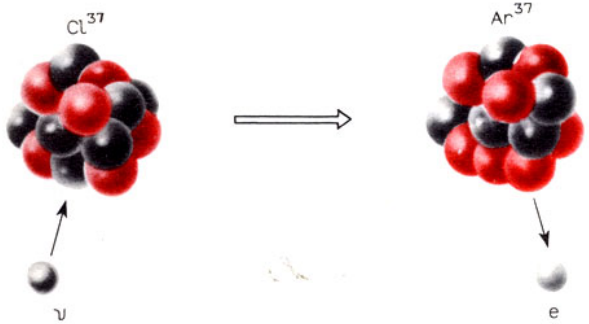
Бруно Понтекорво

Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться” !

$$\nu_e \to \nu_\mu$$







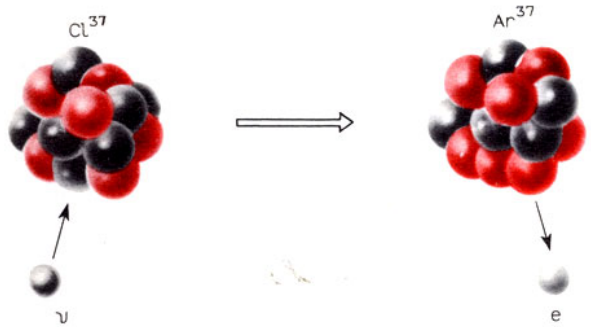
Нейтрино от Солнца не хватает!!! подтверждено

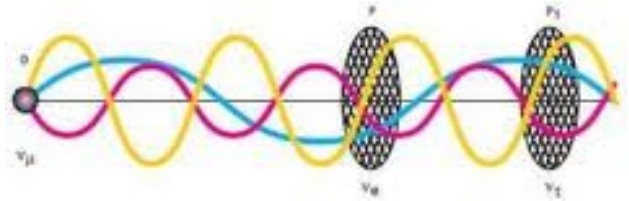
Бруно Понтекорво

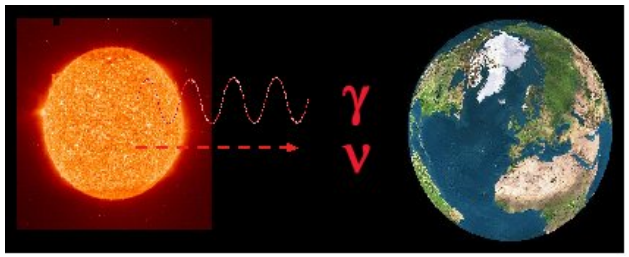
Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться” !

$$\nu_e \to \nu_\mu$$

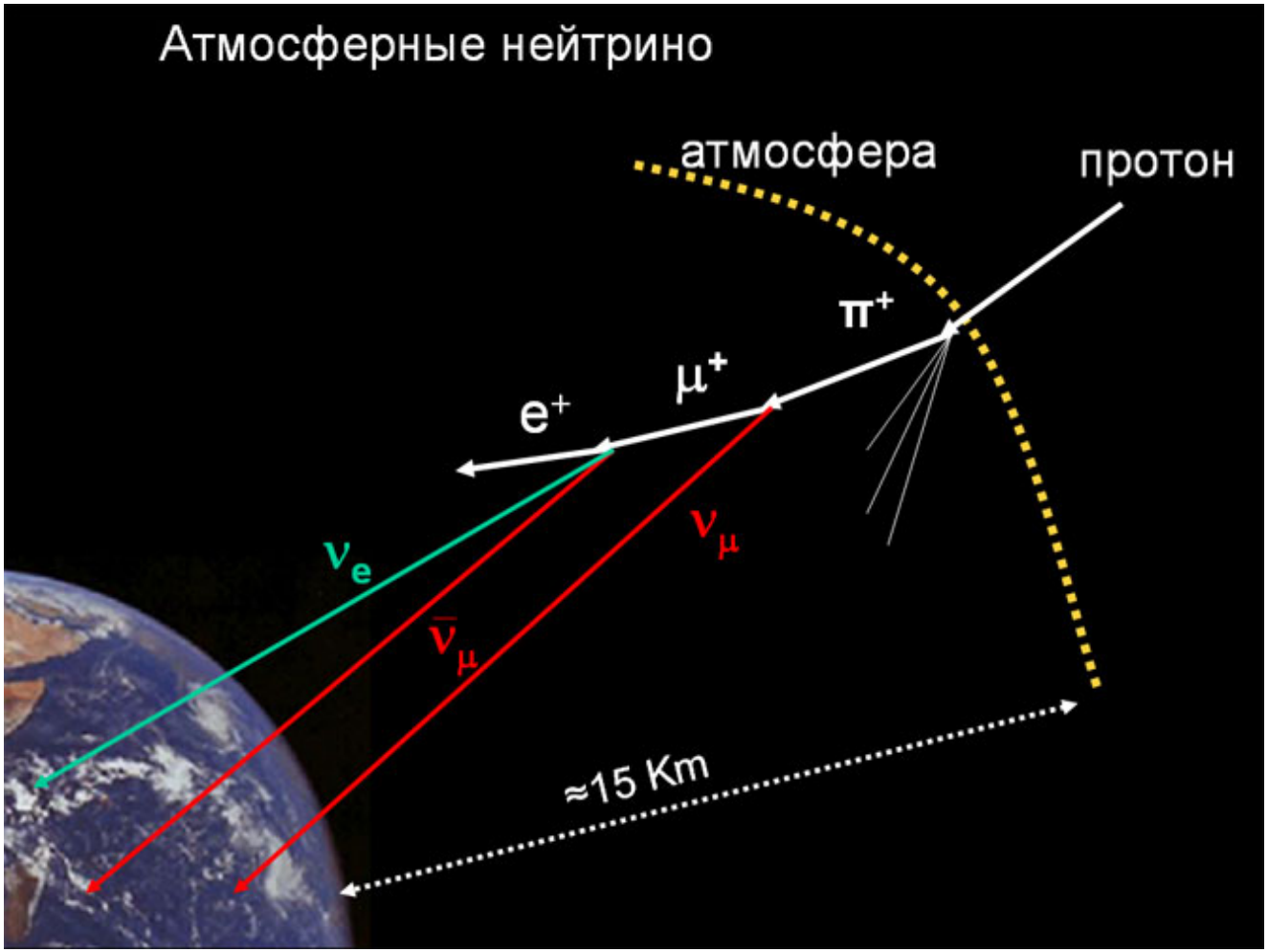
процесс запрещён в СМ
ибо нейтрино безмассовы
Нейтрино массивны!
СМ неполна!

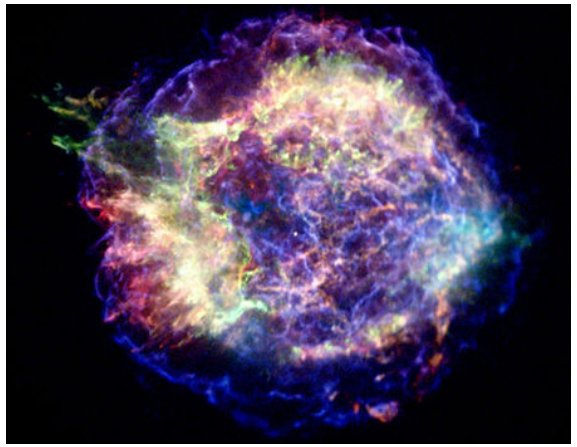






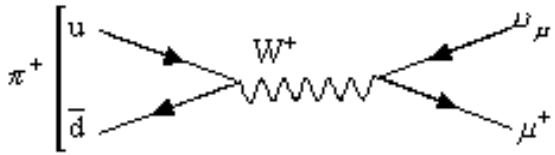
Атмосферные нейтрино





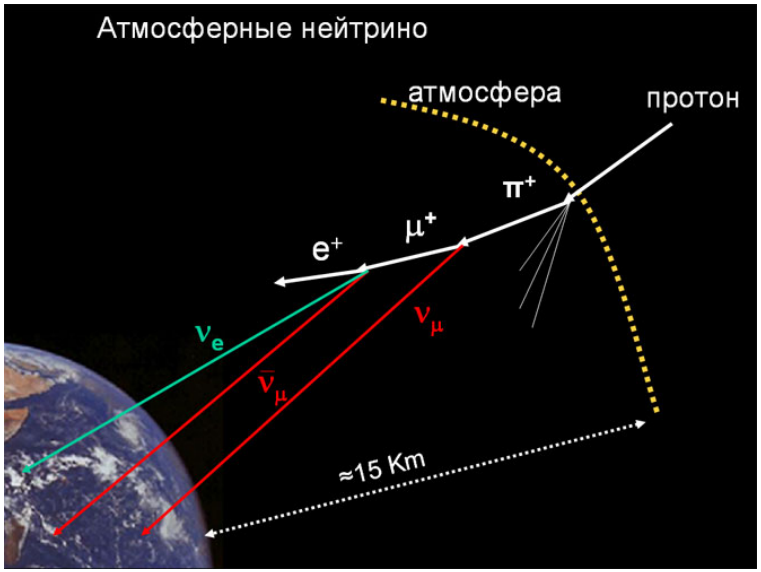
Галактические космические лучи: ускорение в остатках сверхновых звёзд

В атмосфере Земли рождаются пионы

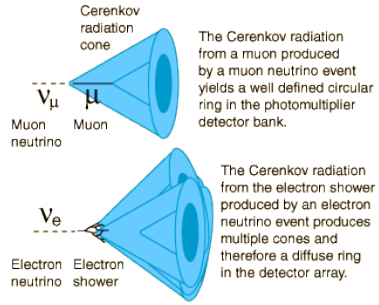


Знаем отношение потоков ν_e и ν_μ

Осцилляции атмосферных нейтрино: $\nu_\mu \to \nu_\tau$

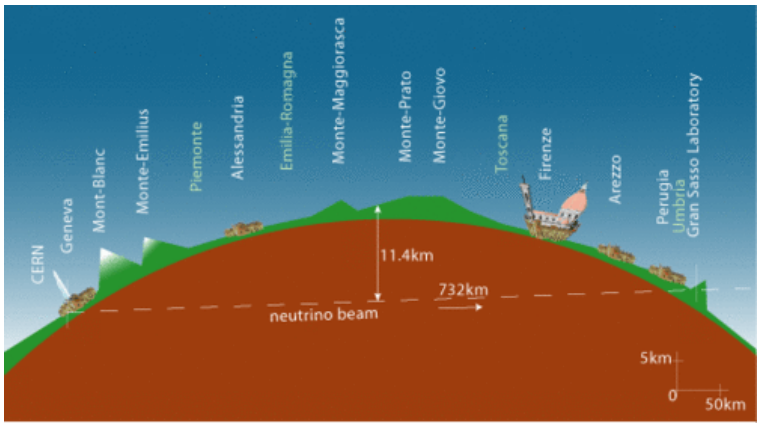


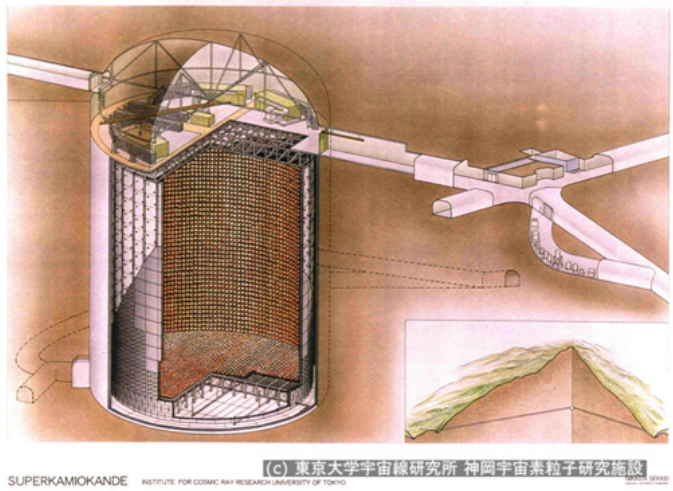
Черенковский свет от e и μ ($\nu_{\text{частицы}} <$ c в среде)



← SuperK

OPERA: появление ν_τ



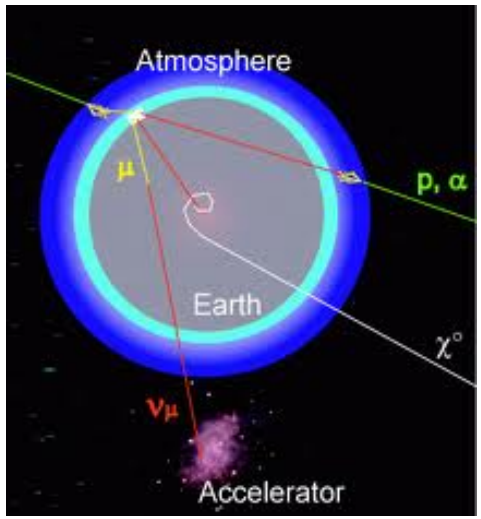


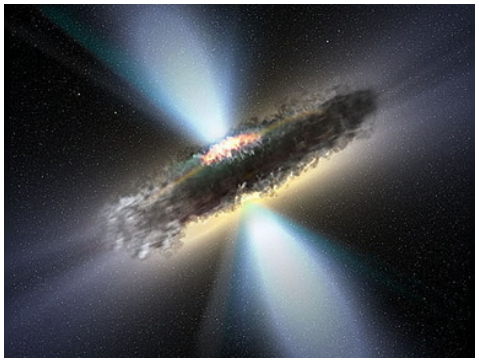
Поток$_\mu$ ↑< Поток$_\mu$ ↓

Поток$_e$ ↑= Поток$_e$ ↓

Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

Большие энергии, но слабый поток...



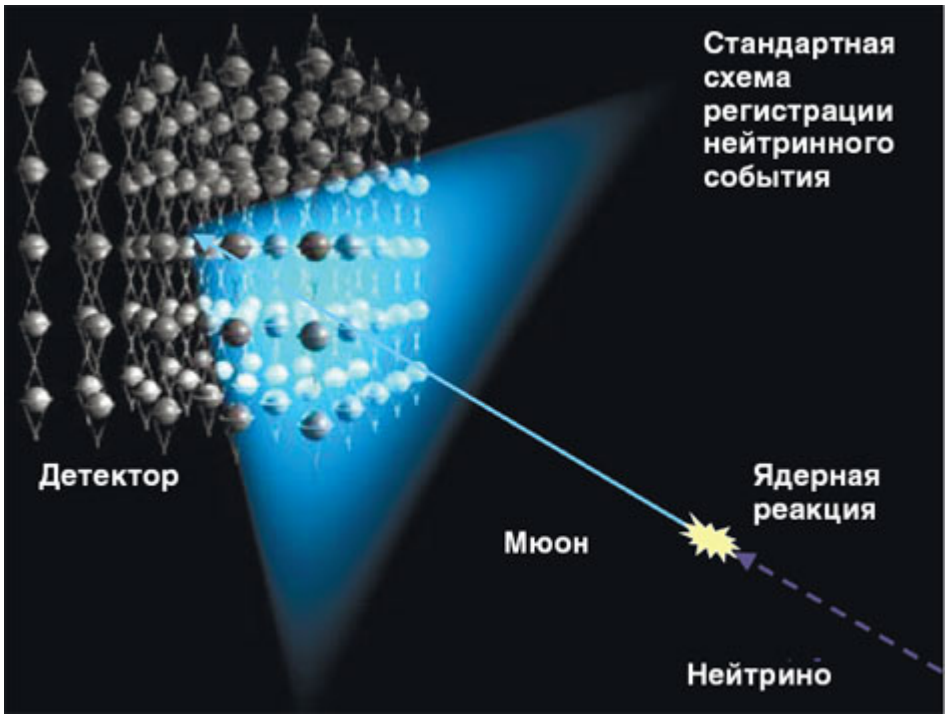


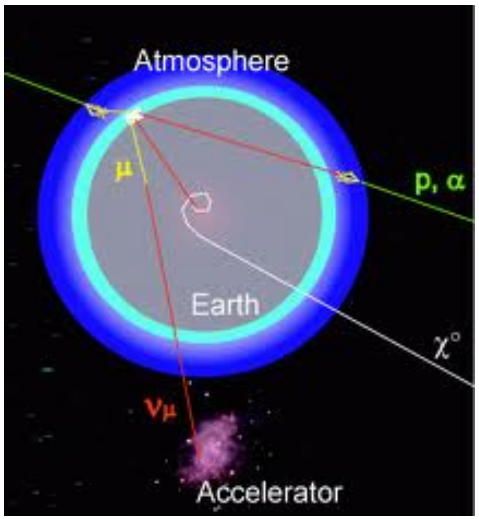
Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

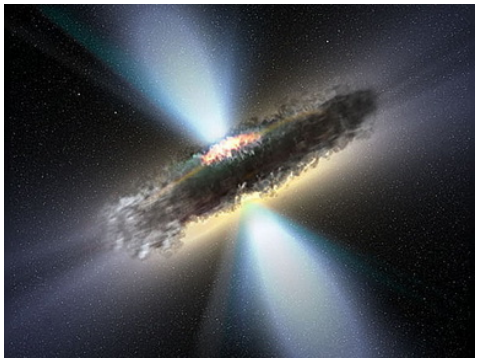
М. Марков

Большие энергии, но слабый поток...

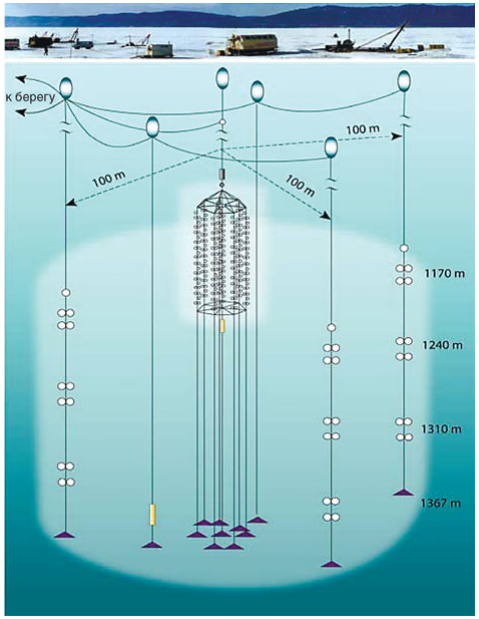
Идея: естественный водоём как эффективный детектор!

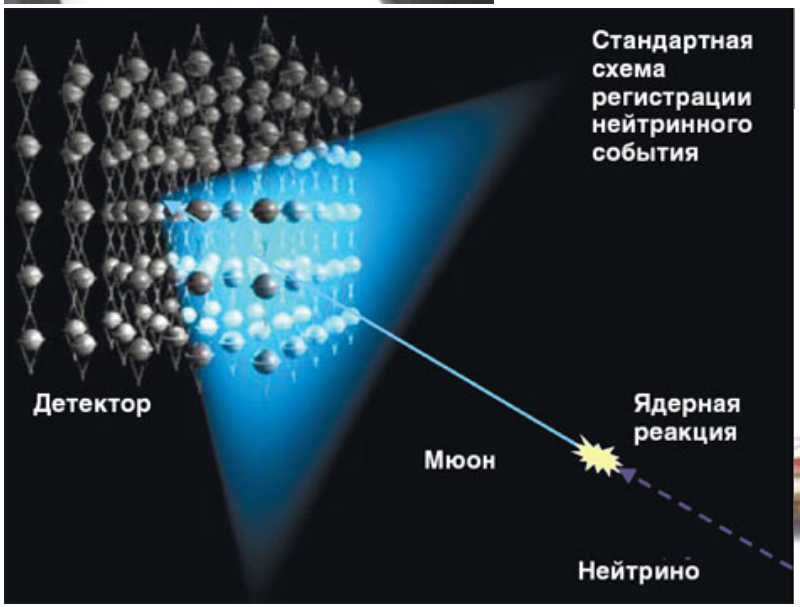


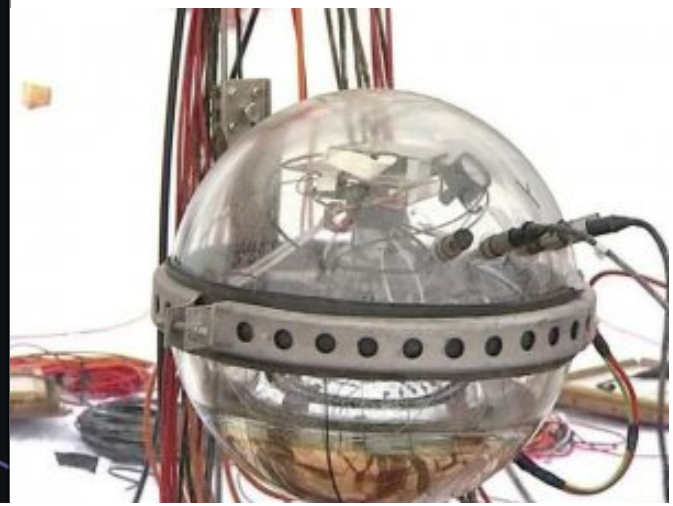


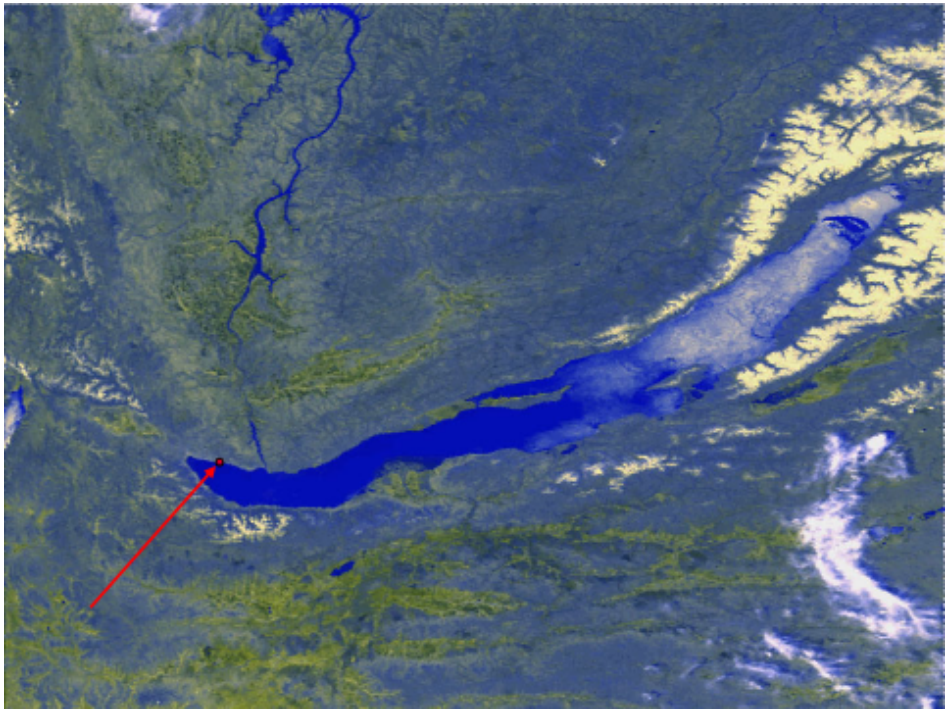


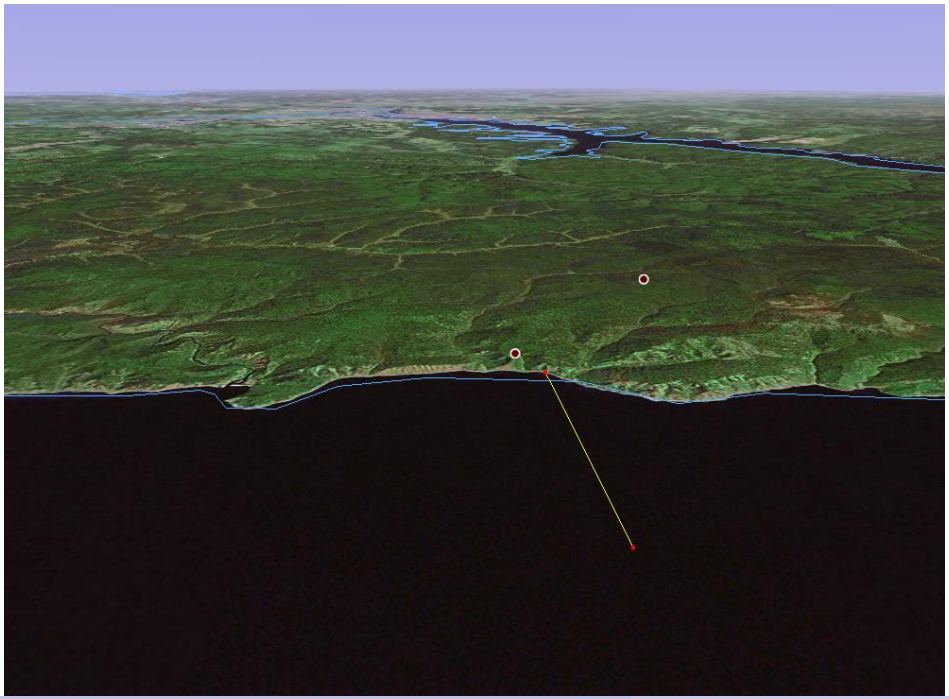
Байкальский нейтринный телескоп ИЯИ РАН

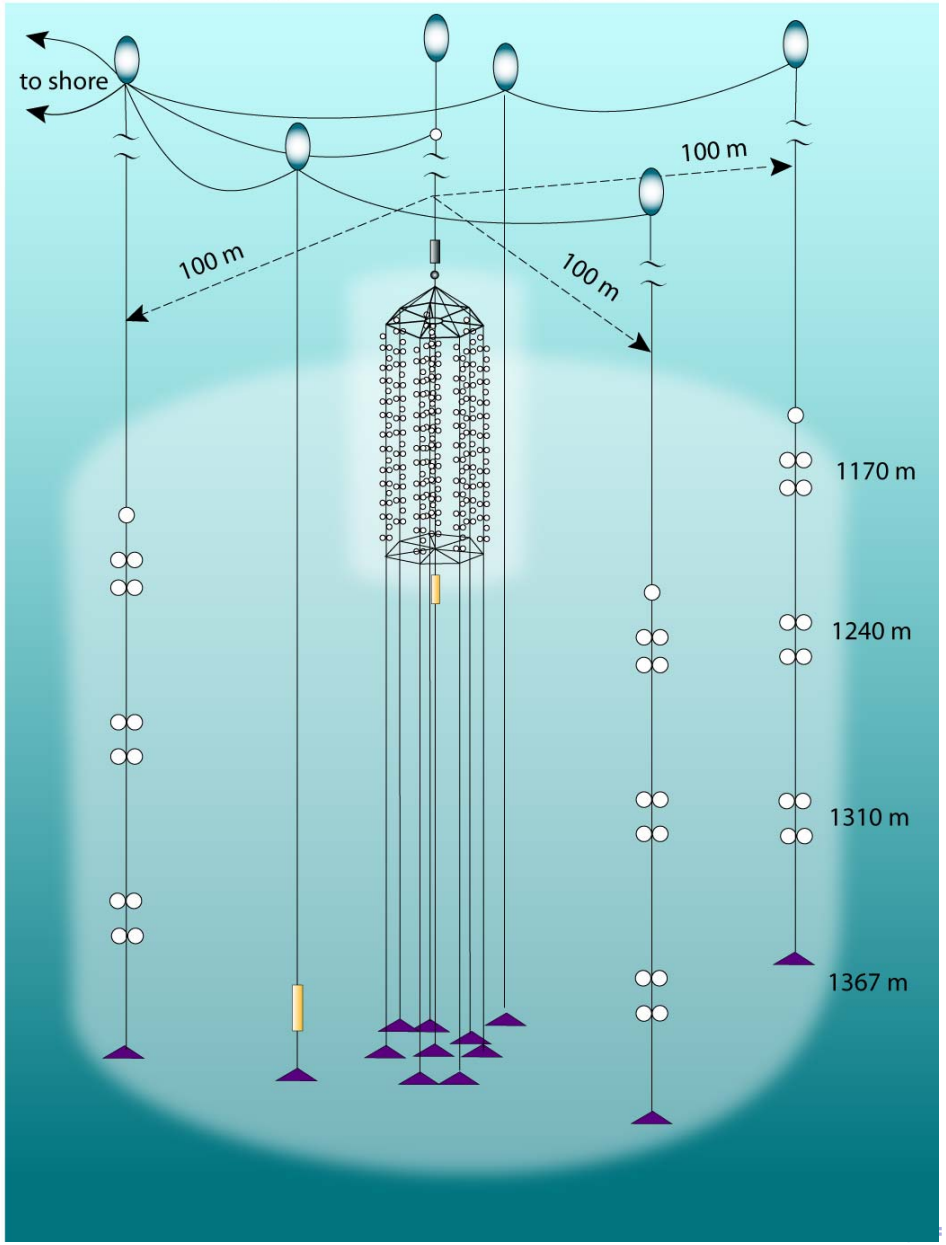




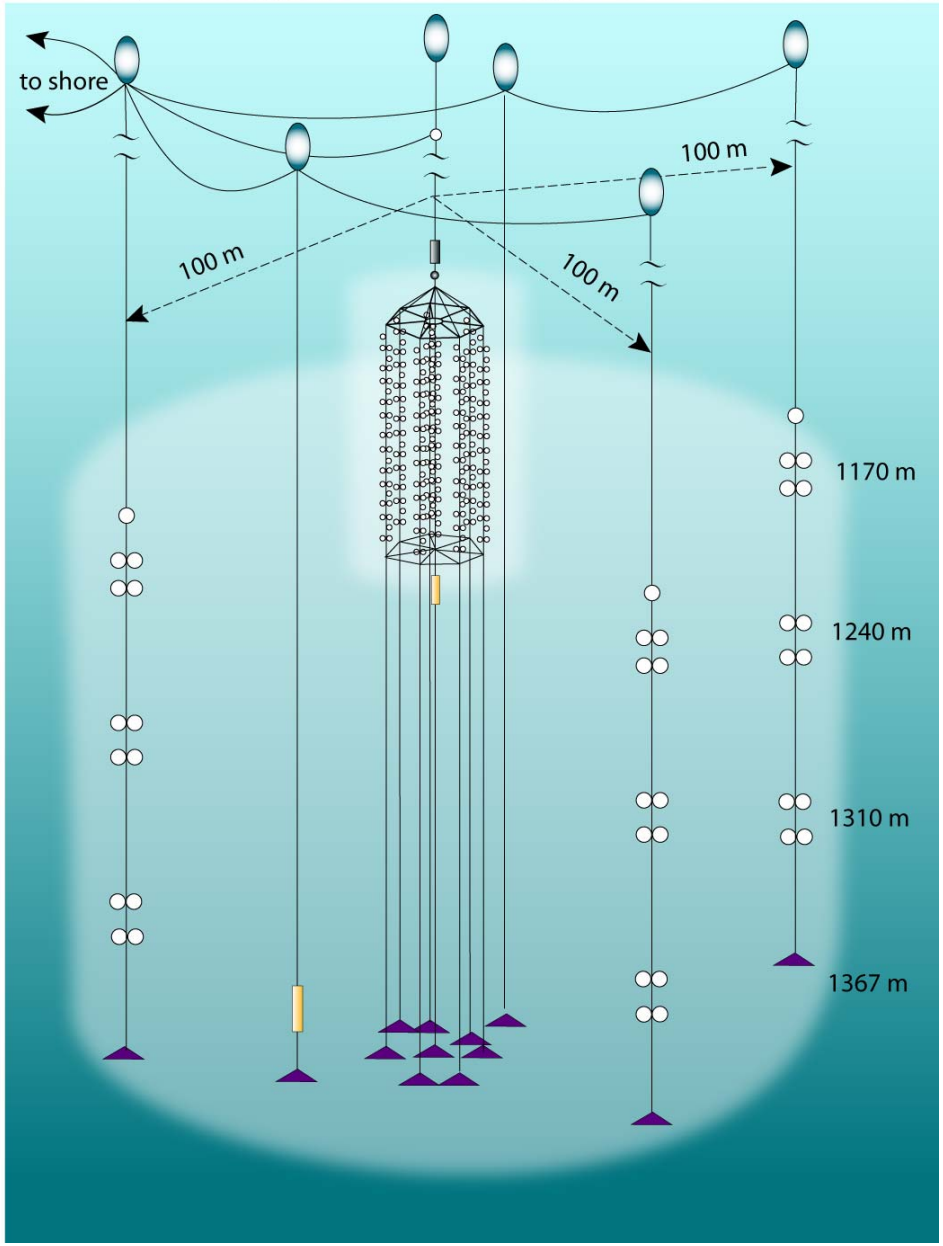


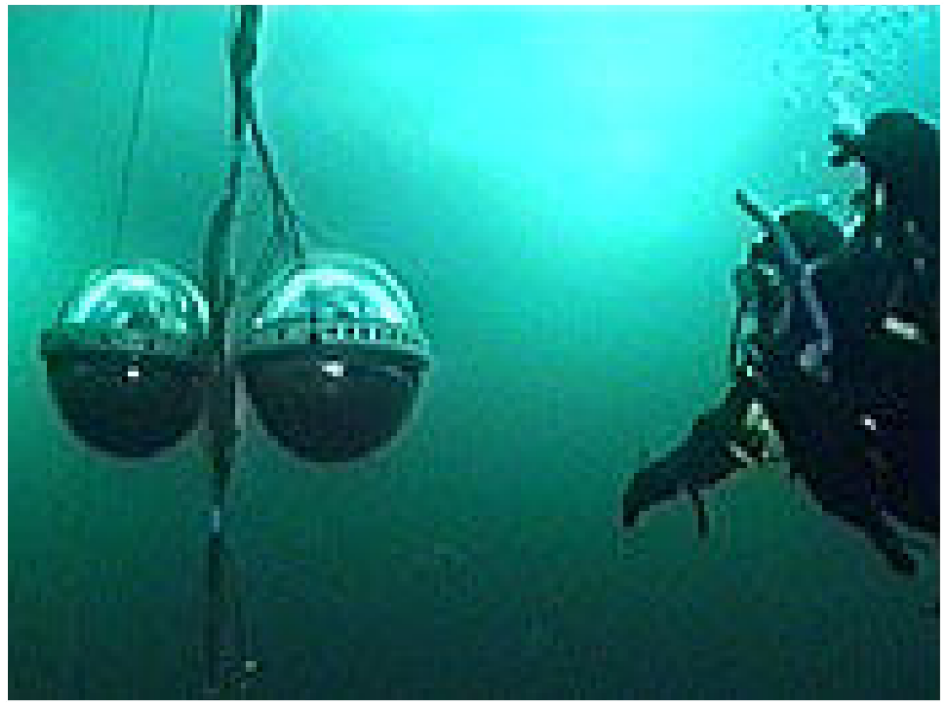


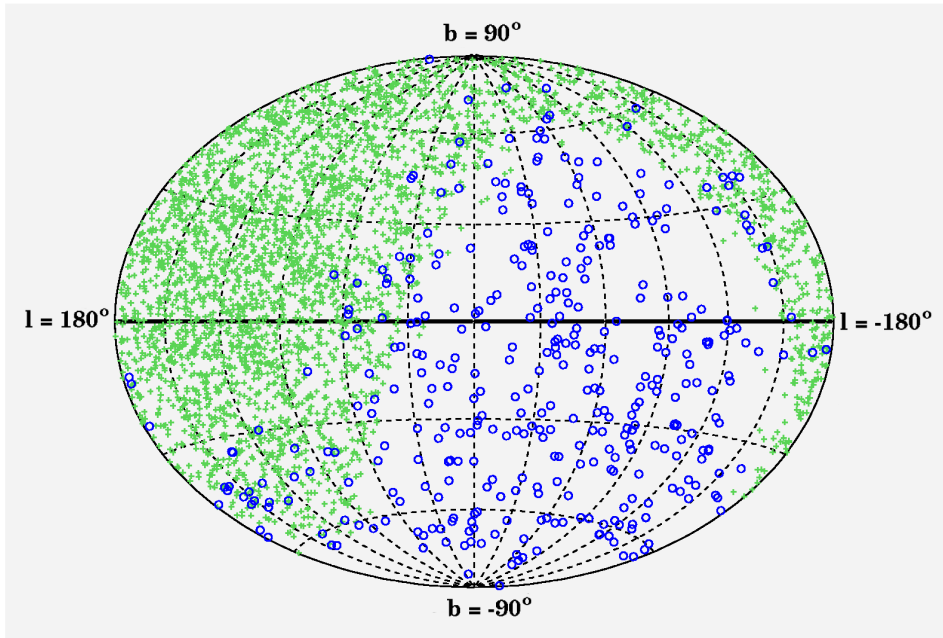



to shore
100 m
100 m
100 m
1170 m
1240 m
1310 m
1367 m

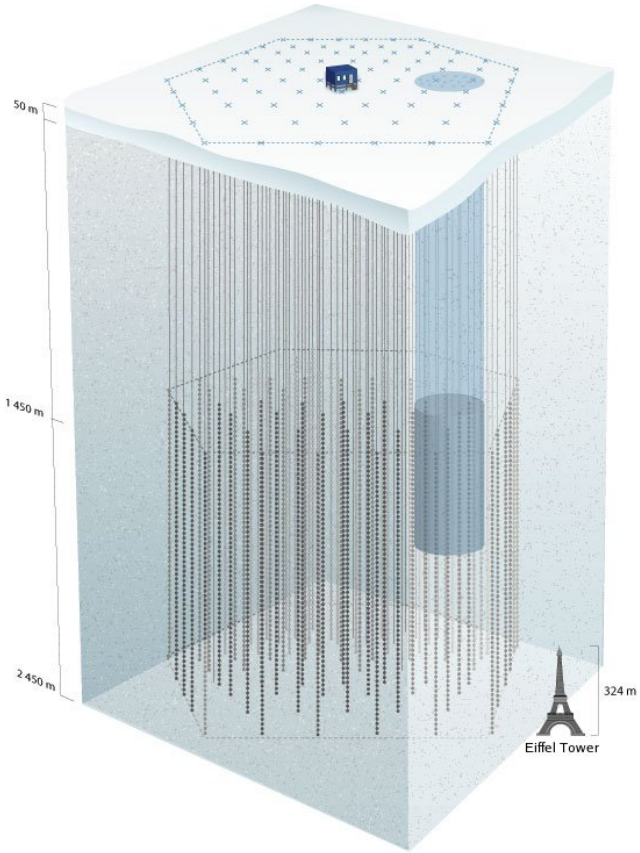
ОСТОРОЖНО СТЕКЛО


to shore
100 m
100 m
100 m
1170 m
1240 m
1310 m
1367 m




b = 90°
l = 180°
l = -180°
b = -90°

Нейтринный телескоп на Южном полюсе: ICECUBE



Объём под наблюдением: 1 км^3

пока только атмосферные нейтрино

Нейтрино: подводя итог

Установленные факты:

- Фермионы, спин 1/2
  (как электрон!)
- Электрически нейтральны
  (не как электрон!)
- Есть нейтрино и есть антинейтрино
  (из Солнца (синтез) и из ядерного реактора (распад))
- Участвуют только в слабых взаимодействиях
  (нейтрино из ядерного реактора долетит до звёзд, даже если Вселенная заполнена водой!)
- Очень лёгкие!
  (миллион нейтрино легче электрона!)
- Нейтрино осциллируют!
  (процесс вне рамок Стандартной модели физики частиц!)
- Есть реликтовые нейтрино
  (первичный нуклеосинтез, образование водорода и галактик)

Нейтрино: подводя итог

Установленные факты:

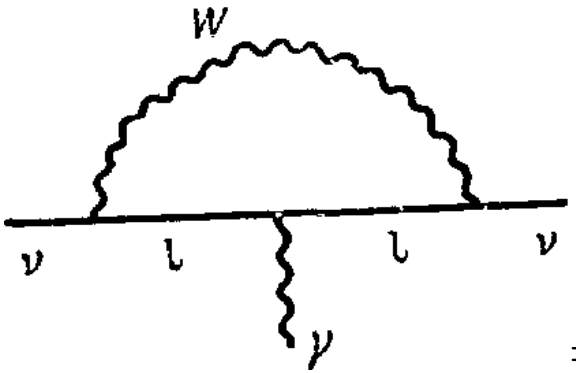
- Фермионы, спин 1/2
  (как электрон!)
- Электрически нейтральны
  (не как электрон!)
- Есть нейтрино и есть антинейтрино
  (из Солнца (синтез) и из ядерного реактора (распад))
- Участвуют только в слабых взаимодействиях
  (нейтрино из ядерного реактора долетит до звёзд, даже если Вселенная заполнена водой!)
- Очень лёгкие!
  (миллион нейтрино легче электрона!)
- Нейтрино осциллируют!
  (процесс вне рамок Стандартной модели физики частиц!)
- Есть реликтовые нейтрино
  (первичный нуклеосинтез, образование водорода и галактик)

Факты, гипотезы и идеи

- Наблюдения солнечных нейтрино — мониторинг термоядерных процессов в центре Солнца
  (уже идёт!)
- Наблюдения геонейтрино — мониторинг ядерных процессов в центре Земли
  (есть перспектива, геонейтрино зарегистрированы)
- Мониторинг ядерных реакторов
  (уже проводили!)
- дистанционное обезвреживание ядерного оружия
- при высоких энергиях движутся быстрее скорости света?
  OPERA: означало бы революцию

Backup slides

Взаимодействие массивных нейтрино с фотонами

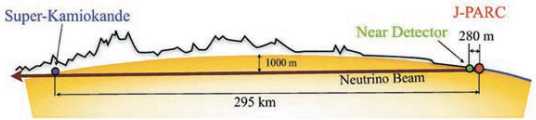


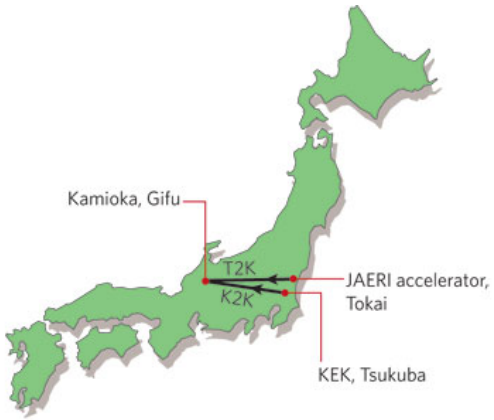
$$\Rightarrow \vec{\mu}_\nu \vec{B}\,, \quad \vec{d}_\nu \vec{E}$$

В рамках СМ с массивными нейтрино $\mu_B = e/2m_e$

$$\mu_\nu \sim 10^{-19} \times \mu_B \times \left(\frac{1\,\text{эВ}}{m_\nu}\right)$$

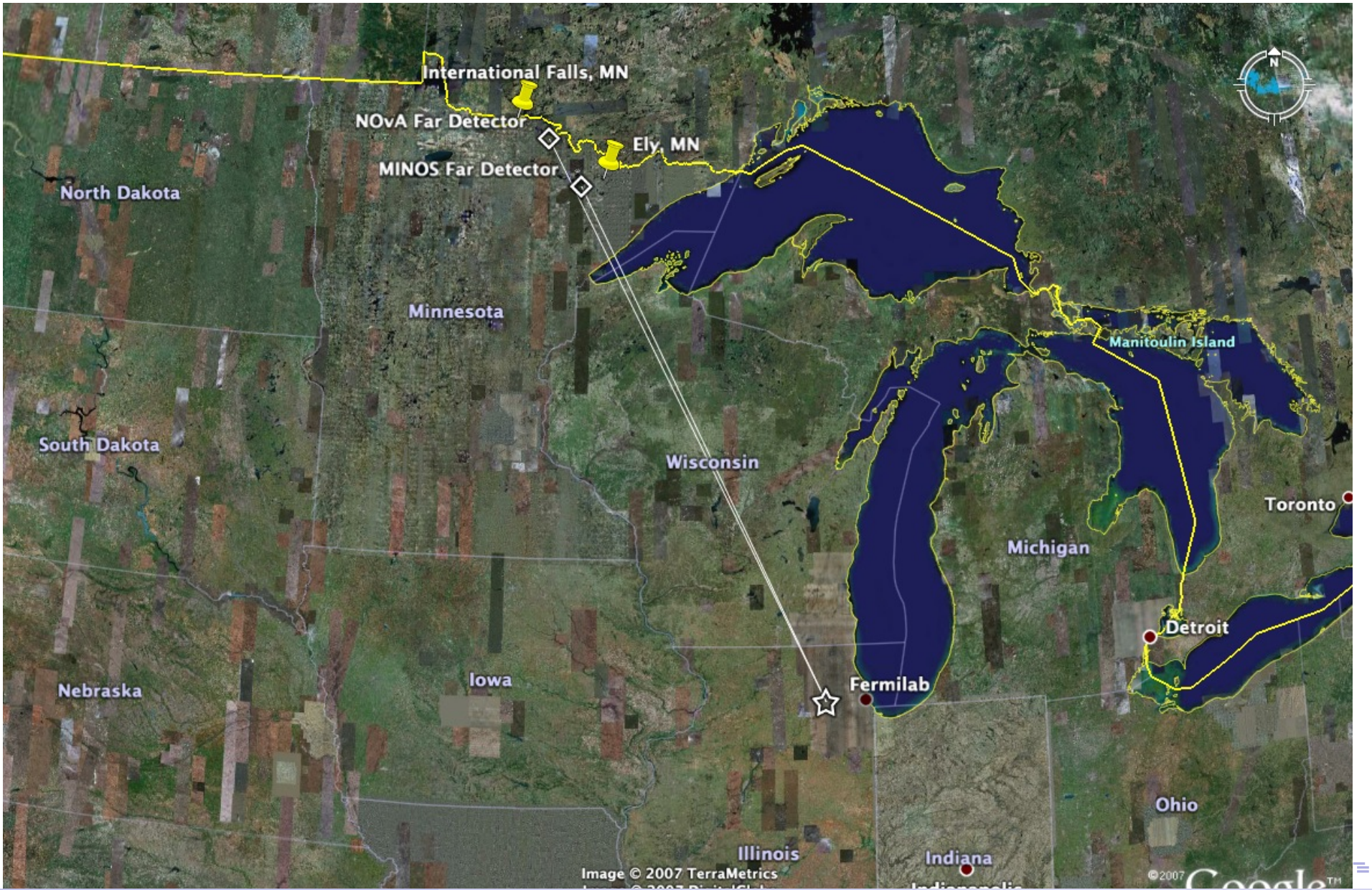
Ускорительные нейтрино, $\nu_\mu \to \nu_e$, $\nu_\mu \to \ldots$



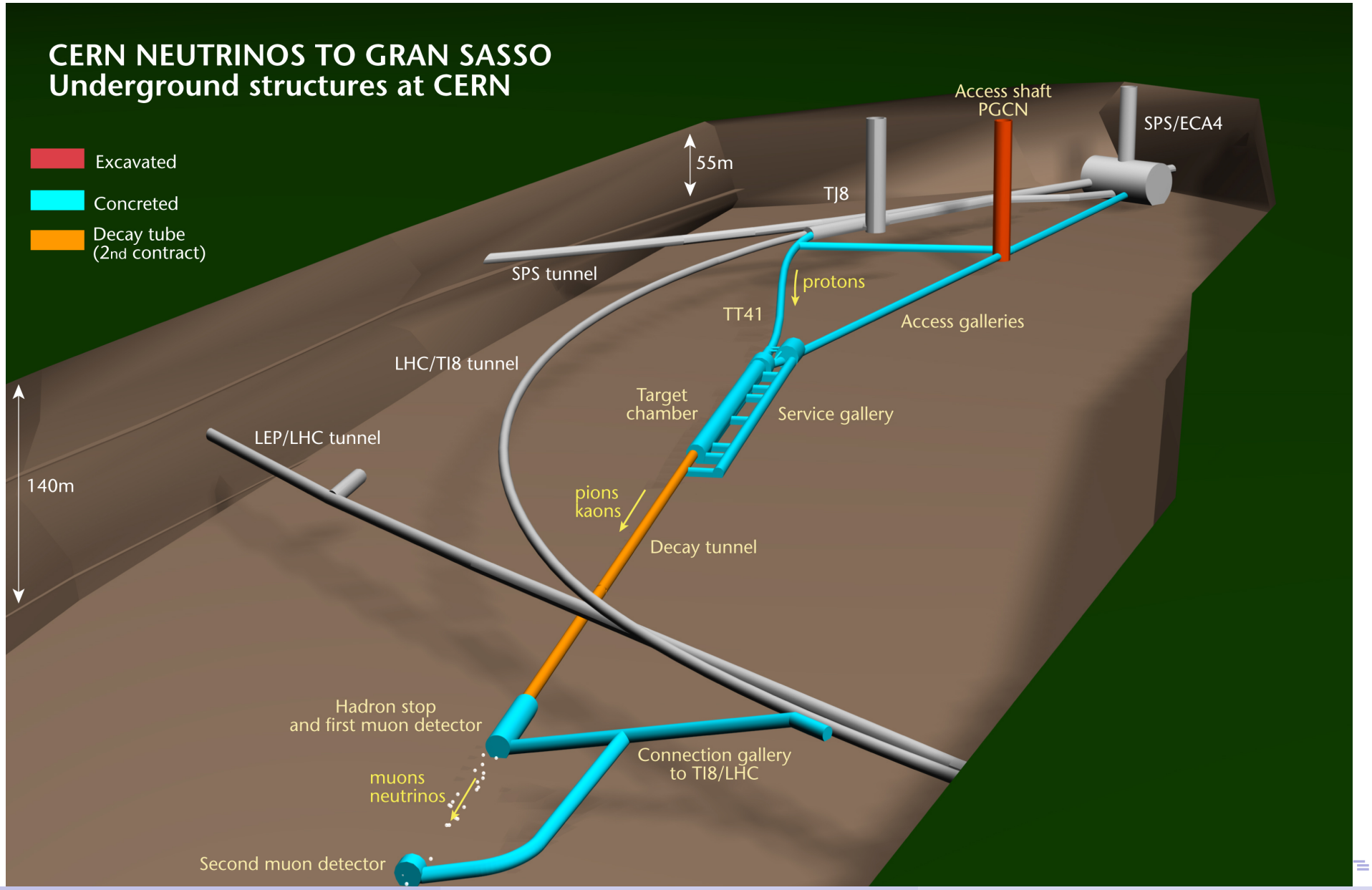


Япония, T2K: JPARC $\to$ SuperK

MINOS и NOνA: география



OPERA: устройство эксперимента



OPERA: детали и результаты

Основная задача: найти τ-лептон от взаимодействии в детекторе ν_τ, появившейся в результате осцилляций из ν_μ

CERN: 10^{20} протонов (0.1 мг !!!) Gran Sasso: 16111 мюонных нейтрино

Средняя энергия нейтрино $E_\nu = 17\,\text{ГэВ} \sim 17\,m_p$ Временная привязка CERN и Gran Sasso: с точностью 1-2 нс

Расстояние: $(731\,278.0 \pm 0.2)$ м

— 730 км с точностью 20 см !!!

— Наблюдают небольшое удаление на 1 см в год: движение плит земной коры

— После землетрясения в L'Aquila заметили увеличение расстояния на 7 см

Аномальный временной интервал [опережение!]:

$$\delta t = (60.7 \pm 6.9\,(\text{stat.}) \pm 7.4\,(\text{sys.}))\ \text{нс}$$

соответствующее отличие скорости (мюонного) нейтрино от скорости света [превышение!]

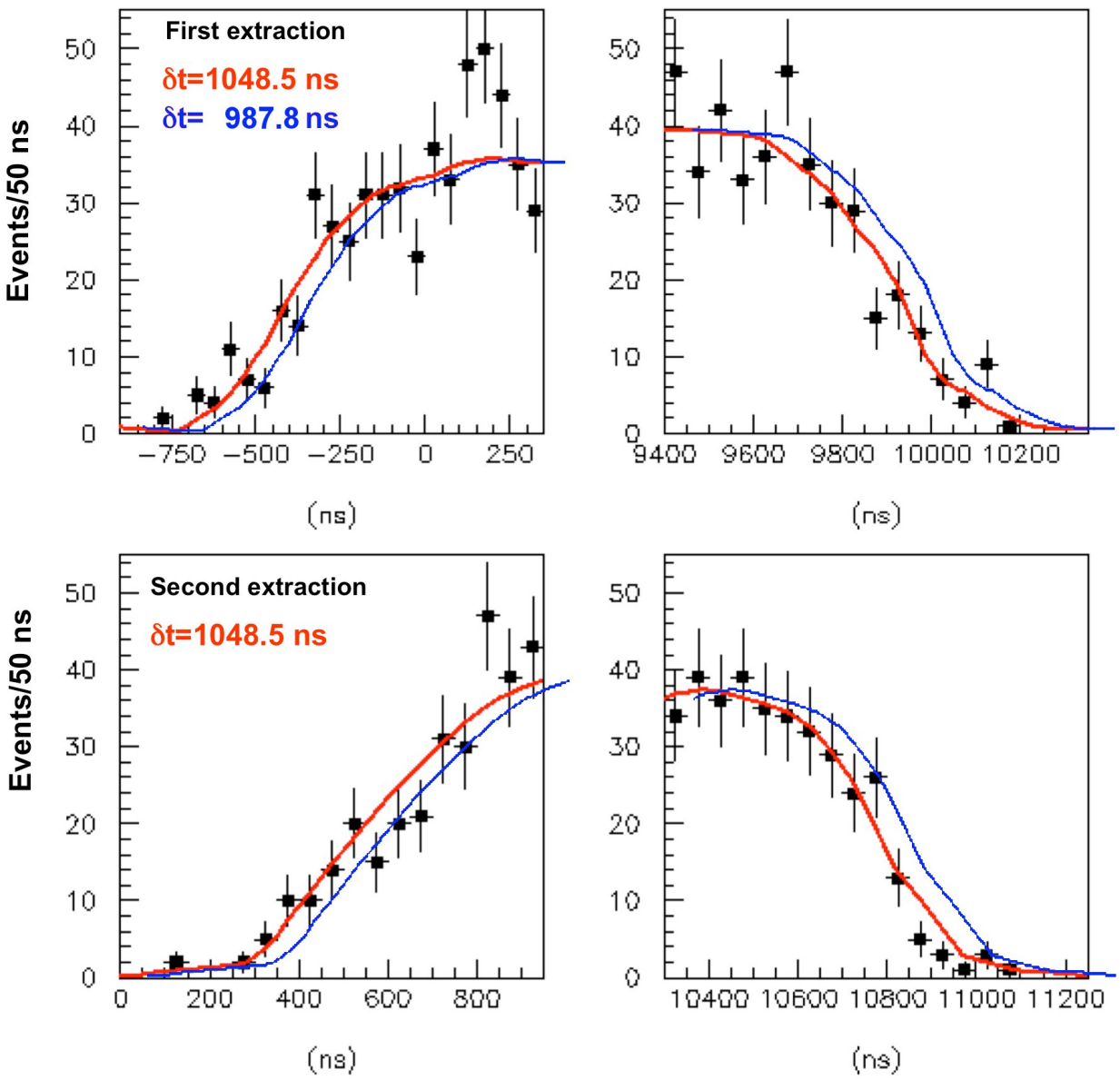
$$(v - c)/c = (2.48 \pm 0.28\,(\text{stat.}) \pm 0.30\,(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

№: Массы нейтрино не при чём!:

— численно эффект менее 10^{-19} даже для $m_\nu = 2\,\text{эВ}/c^2$

— массы ЗАМЕДЛЯЮТ движение

Как это выглядит



Предыдущие результаты измерений

OPERA: Средняя энергия нейтрино $E_\nu = 17\,\text{ГэВ} \sim 17\,m_p$
соответствующее отличие скорости (мюонного) нейтрино от скорости света [превышение!]

$$(v-c)/c = (2.48 \pm 0.28\,(\text{stat.}) \pm .30\,(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

Предыдущие прямые измерения: $(E_\nu > 30\,\text{ГэВ} \sim 60\,m_p c^2)$:

$$|v-c|/c < 4 \times 10^{-5}$$

Недавние прямые измерения: $(E_\nu \sim 3\,\text{ГэВ} \sim 3\,m_p c^2)$:

$$(v-c)/c = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5}$$

Наблюдение нейтринного сигнала $(E_\nu \sim 10\,\text{МэВ} \sim 20\,m_e c^2)$ при выспышке сверхновой SN1987a:

$$|v-c|/c < 2 \times 10^{-9}$$