

Нейтрино вокруг нас



Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

CERN, Женева

18 октября 2012

Нейтрино вокруг нас



Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

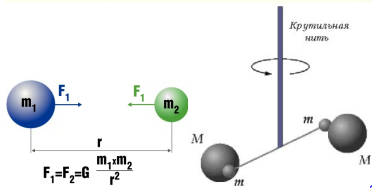
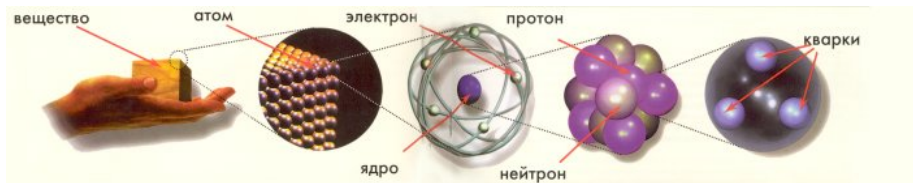


CERN, Женева

18 октября 2012



Элементарные частицы и взаимодействия между ними



дальнодействие

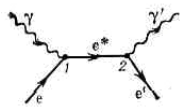


Рис. 2.

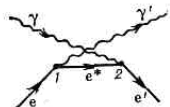
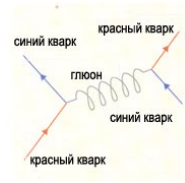


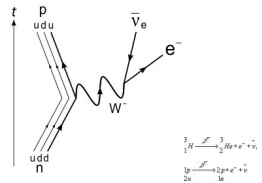
Рис. 3.



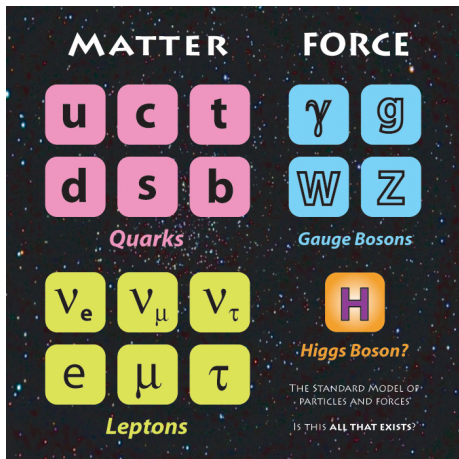
10^{-13} см

короткодействие

10^{-16} см



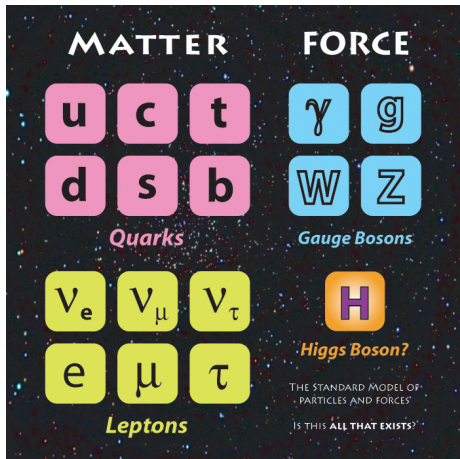
Элементарные частицы и взаимодействия между ними



1 2 3 ← поколения

И античастицы материи (e^+ , ...)

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



1 2 3 ← поколения

У античастиц противоположный заряд!
(e^+ , ...)

У всех поколений одинаковы

- сильные
- слабые
- электромагнитные

взаимодействия!

Пример: электромагнетизм

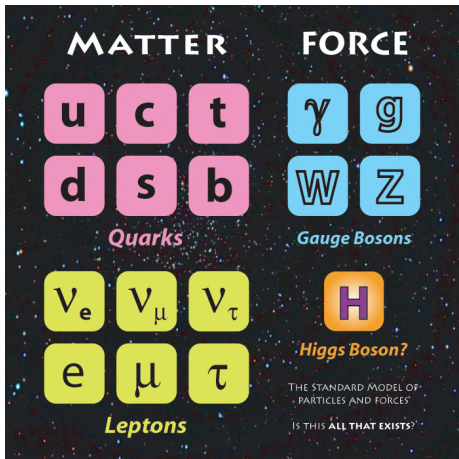
$$\begin{pmatrix} u (+\frac{2}{3}) \\ d (-\frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c (+\frac{2}{3}) \\ s (-\frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t (+\frac{2}{3}) \\ b (-\frac{1}{3}) \end{pmatrix}$$

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

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

NB: остальные нейтральны!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



1 2 3 ← поколения

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

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

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

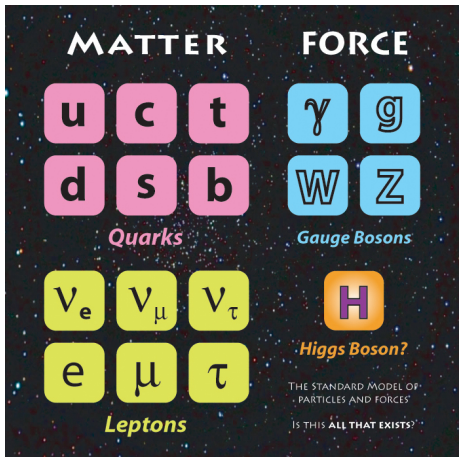
$$m_{W^+} = m_{W^-} \approx 80 m_p, \quad m_Z \approx 90 m_p$$

$$m_H > 115 m_p$$

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

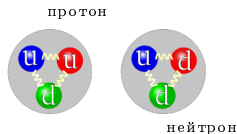
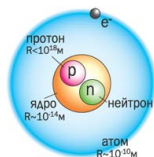
У античастиц та же масса! ($M_{e^+} = M_{e^-}, \dots$) NB: остальные (γ, g) безмассовы!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

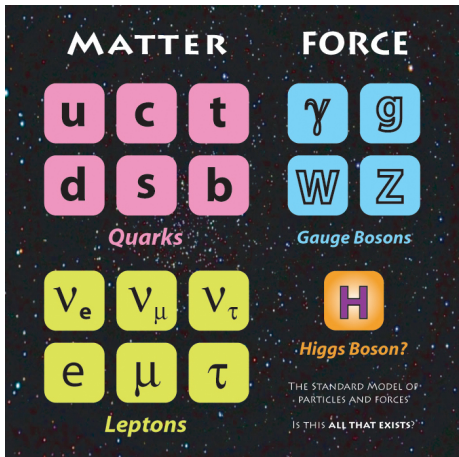


1 2 3 ← ПОКОЛЕНИЯ

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



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

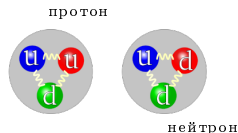
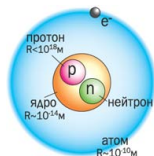


1 2 3 ← ПОКОЛЕНИЯ

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

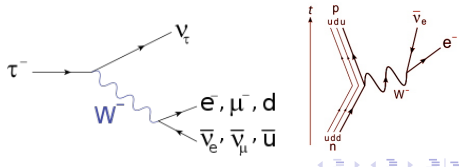
долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6} \text{ с}$

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



Спасибо

слабым взаимодействиям!

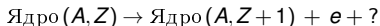


Роль нейтрино в слабых взаимодействиях



В. Паули (1930)

- Сохраняет энергию (экспериментально спектр позитронов непрерывен!)



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

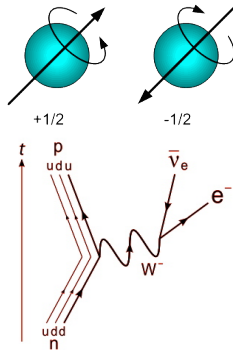
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

Спины: $\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2}$

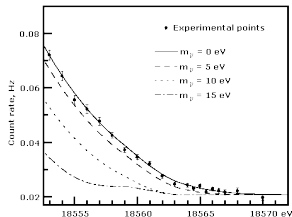
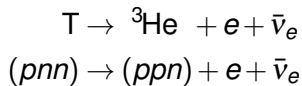
- Сохраняет лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

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

$$L_e(\nu_e) = -L_e(\bar{\nu}_e)$$



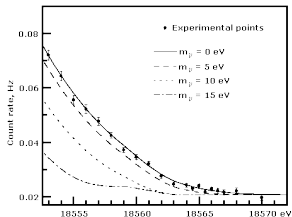
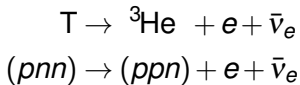
Спектр e : прямые поиски массы (анти)нейтрино



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



Спектр e : прямые поиски массы (анти)нейтрино



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**), $\Delta L_e = 0$

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

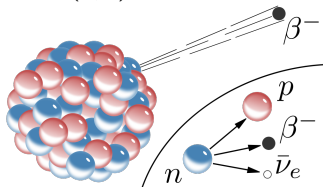
- **нейтрино** ν_e рождаются в β^+ -распаде (вместе с **позитроном**), $\Delta L_e = 0$

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

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**), $\Delta L_e = 0$

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

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

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

всё зависит от энергетического баланса

(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

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

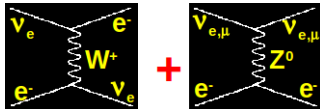
- **Важнейшее свойство:**

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

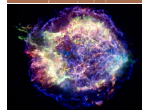
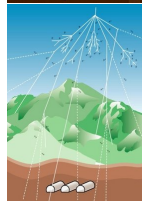
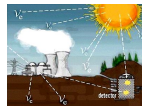
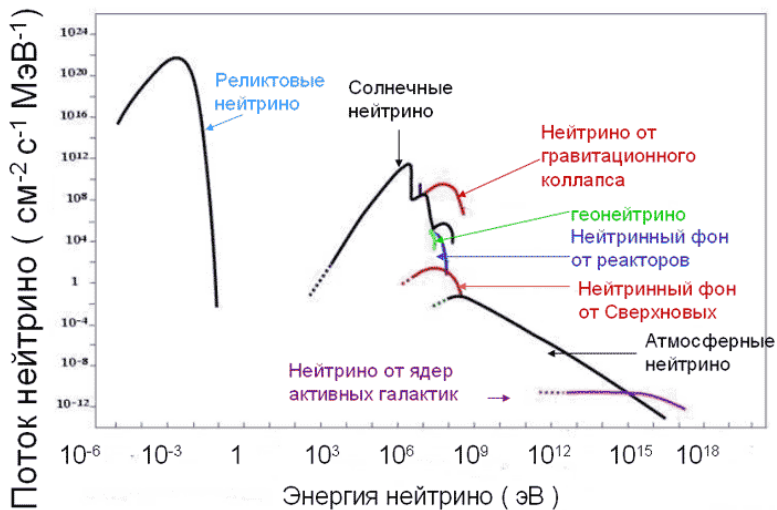
взаимодействуют очень редко!

$\bar{\nu}_e$ из ядерного реактора пролетает в воде без столкновений более 10^{13} км
столько свет пролетит за год!!!

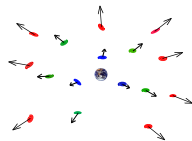
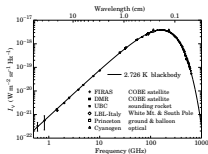
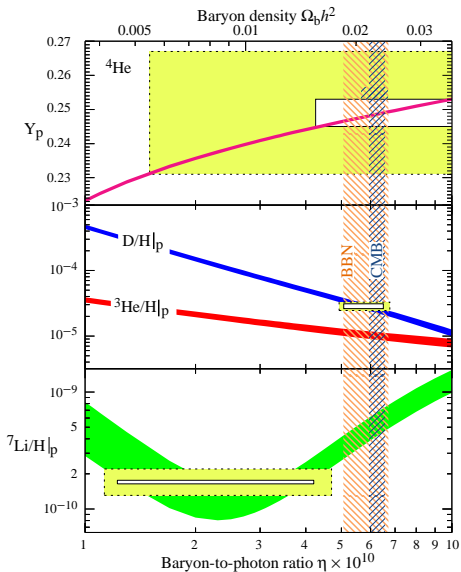
1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы



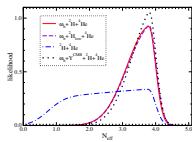
Нейтрино и антинейтрино вокруг нас



Реликтовые нейтрино и антинейтрино

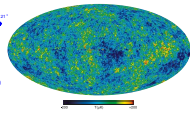
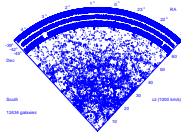


Должны быть реликтовые нейтрино с планковским спектром и $T = 1.8 \text{ K}$!!!

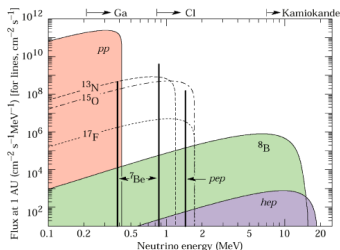
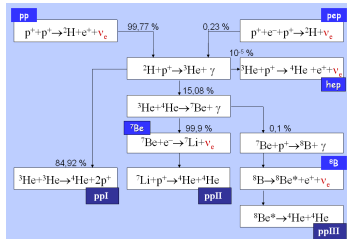
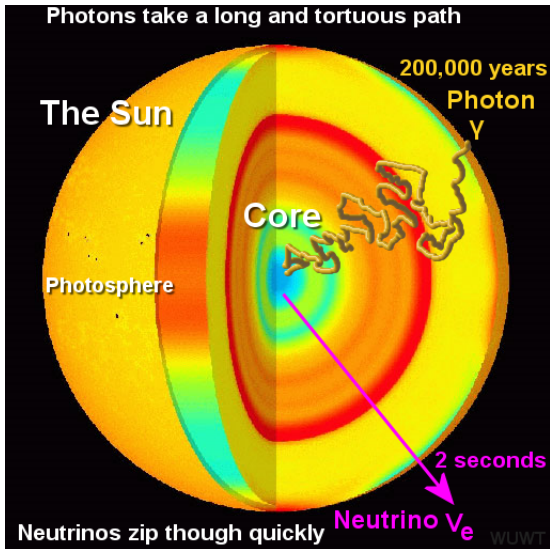


В ранней Вселенной температуры должны быть не менее 2-3 МэВ!
Не менее трёх поколений!

$$2.4 < N_\nu < 4.2 \text{ @ } 95\% \text{CL}$$



Нейтрино от Слънца: синтез $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e, \dots$

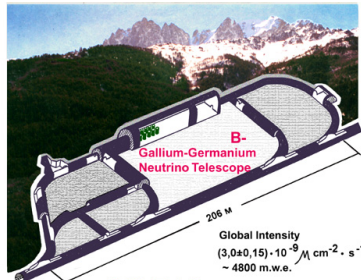


мониторинг Слънца!

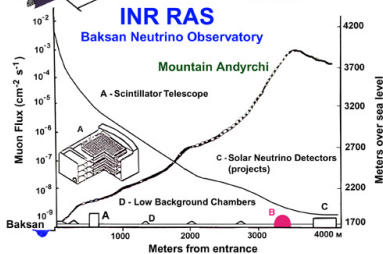
Измерение потока солнечных нейтрино

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

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



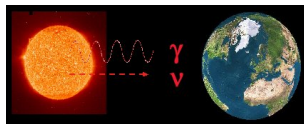
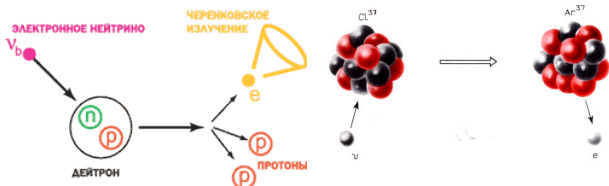
Global Intensity
 $(3,0 \pm 0,15) \cdot 10^{-9} \text{ M cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\sim 4800 \text{ m.w.e.}$





Нейтрино от Солнца не хватает!!!

подтверждено



Нейтрино от Солнца не хватает!!!

подтверждено

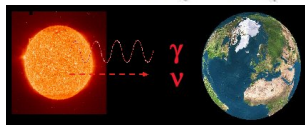
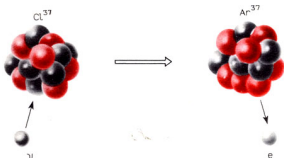


Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться”!

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$$



Бруно Понтекорво



Нейтрино от Солнца не хватает!!!

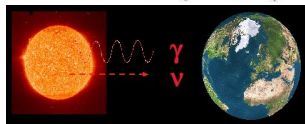
подтверждено



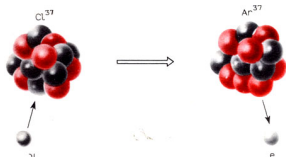
Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться”!

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$$

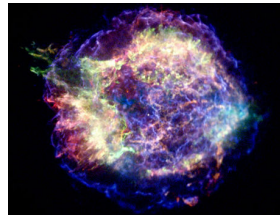
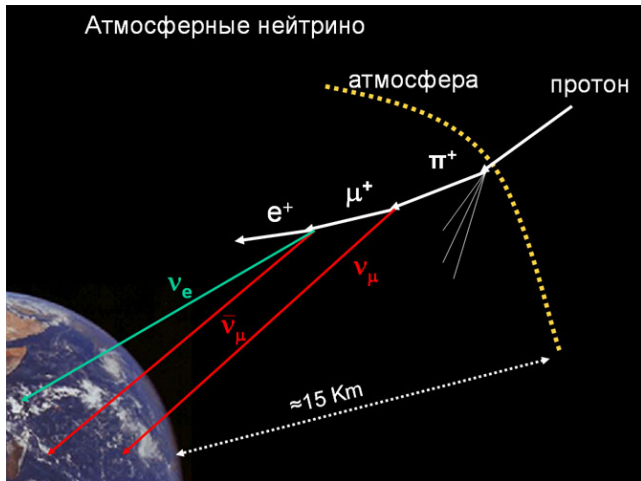
процесс запрещён в СМ
ибо нейтрино безмассовы
Нейтрино массивны!
СМ неполна!



Бруно Понтекорво

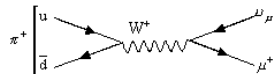


Атмосферные нейтрино



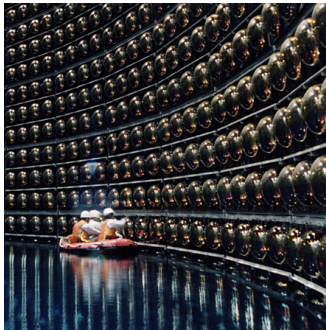
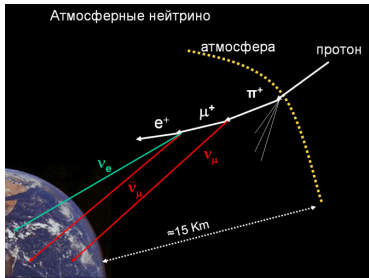
Галактические
космические лучи:
ускорение в остатках
сверхновых звёзд

В атмосфере Земли
рождаются пионы

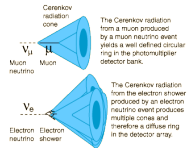


Знаем отношение потоков ν_e и ν_μ

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

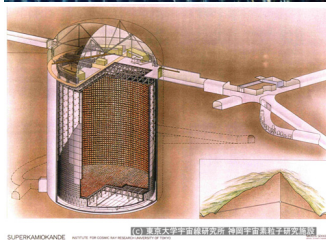
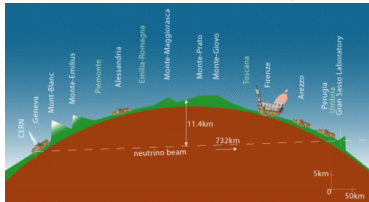


Черенковский свет от e и μ
($v_{\text{частицы}} < c$ в среде)



← SuperK

OPERA: появление ν_τ

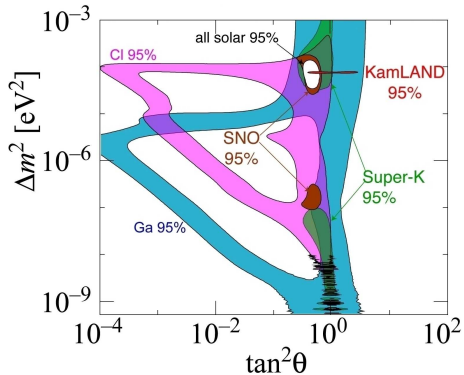


Поток $\mu \uparrow < \text{Поток } \mu \downarrow$

Поток $e \uparrow = \text{Поток } e \downarrow$

Нейтринные осцилляции: массы и углы смешивания

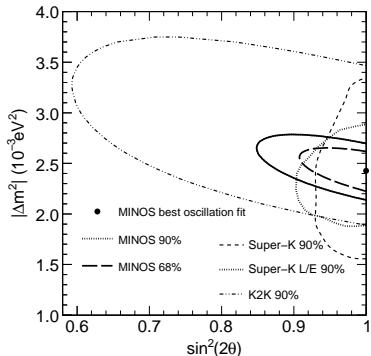
“солнечный” 2×2 сектор



$m_1 > 0.008$ эВ

DAYA-BAY, RENO: $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.1$

“атмосферный” 2×2 сектор



$m_2 > 0.05$ эВ

также T2K

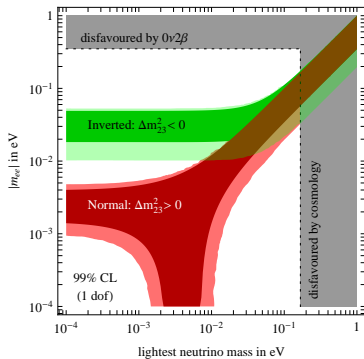
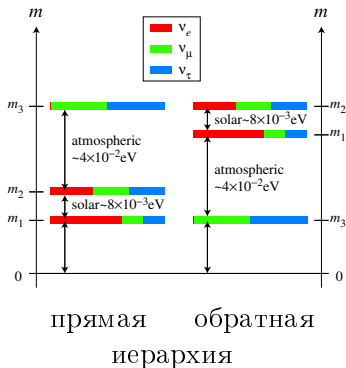
“Прямая” и “обратная” иерархии масс нейтрино

Определены только разности квадратов масс, для самих масс есть варианты. . .

возможно, их определяют

эксперименты T2K & Novae

двойной безнейтринный $Z \rightarrow (Z+2) + 2e^-$ CP ??

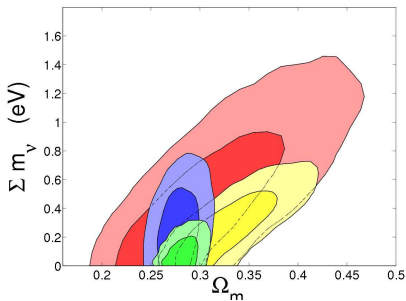


$|m_{ee}| = \left| \sum U_{ei}^2 m_i \right|$, если массы майорановские

Космологические ограничения на Σm_ν Planck (2013)

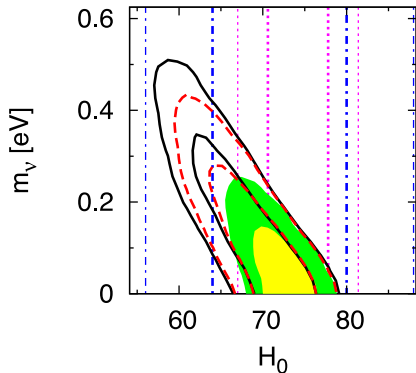
Нейтрино влияют на:

- Рост структур (начало формирования: радиация, сегодня: в скоплениях $v < 10^{-2}$)
- Анизотропия РИ (величину грав. потенциалов на рекомбинации, если $m \sim 0.1$ эВ)
- стандартные свечи (расширение Вселенной: сегодня 2 специи точно нерелятивистские!)



LRG+BAO+CMB+SNe

$\Sigma m_\nu < 0.28$ эВ (95% CL)

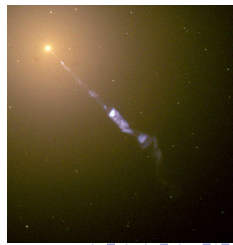
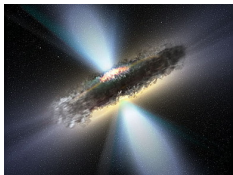
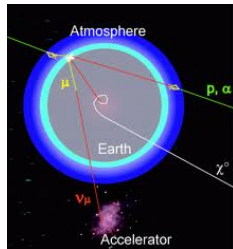


CMB+Hubble

$\Sigma m_\nu < 0.20$ эВ (95% CL)

Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

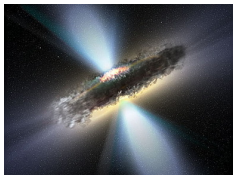
Большие энергии, но слабый
поток...



Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

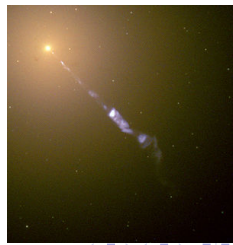
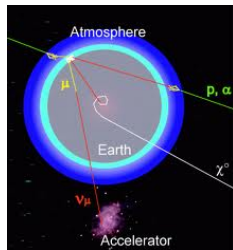
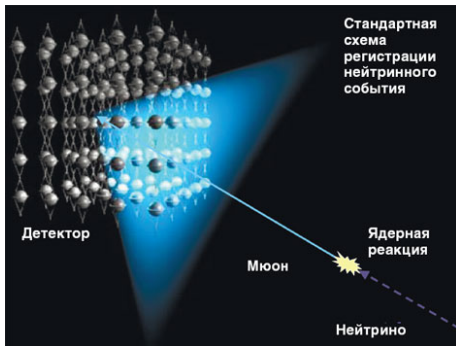


М. Марков

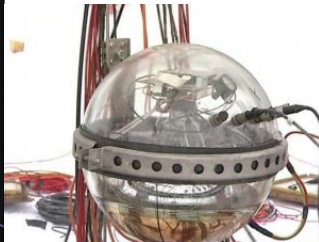
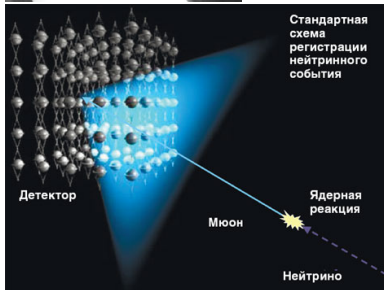
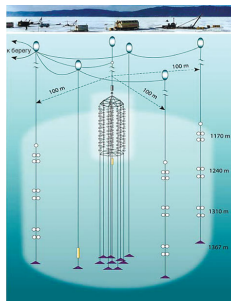


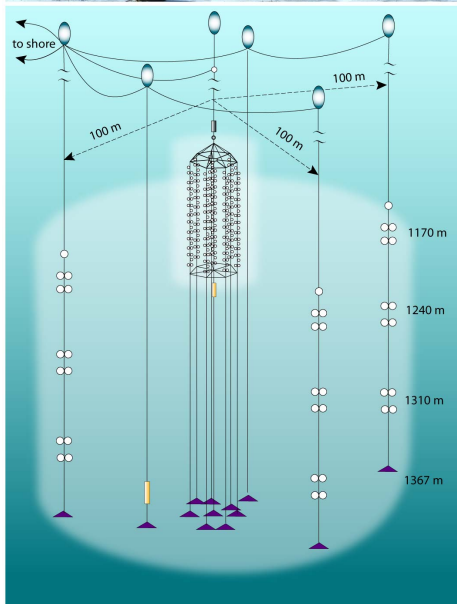
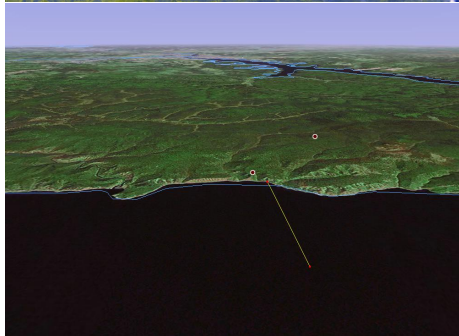
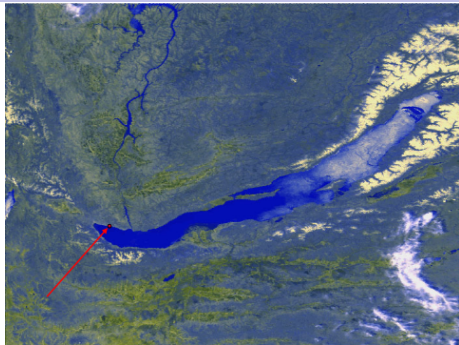
Большие энергии, но слабый поток...

Идея: естественный водоём как эффективный детектор!

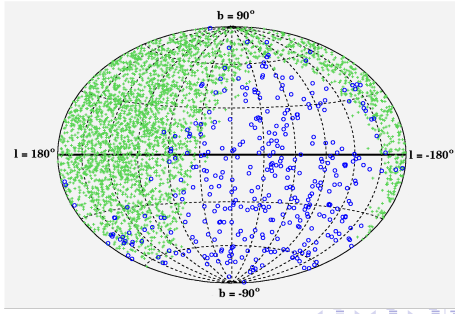
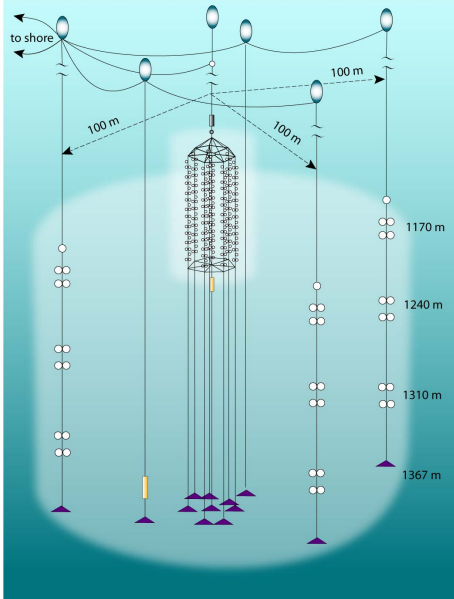


Байкальский нейтринный телескоп ИЯИ РАН

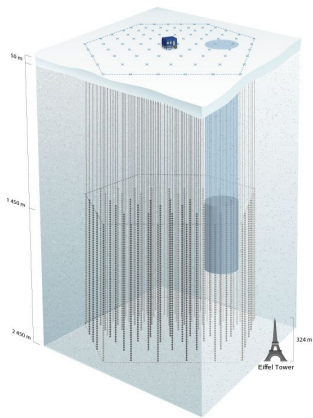








Нейтринный телескоп на Южном полюсе: ICECUBE



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! Уточнение модели Солнца)
- Наблюдения геонейтрино — мониторинг ядерных процессов в центре Земли
(есть перспектива, геонейтрино зарегистрированы !!!)
- Мониторинг ядерных реакторов
(уже проводили! перспектива подвижных установок)
- поиск полезных ископаемых глубокого залегания



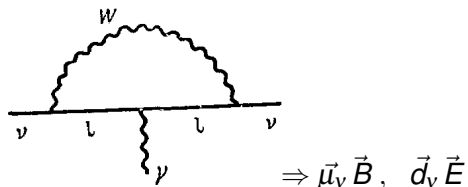
Backup slides

Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
name →	u up	c charm	t top
	Left Right	Left Right	Left Right
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	d down	s strange	b bottom
	Left Right	Left Right	Left Right
0 eV	0 eV	0 eV	
0	0	0	
ν_e	ν_μ	ν_τ	
Left Right	Left Right	Left Right	
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	
-1	-1	-1	
e	μ	τ	
Left Right	Left Right	Left Right	
Leptons	electron	muon	tau

Bosons (Forces) spin 1	0	g gluon
	0	γ photon
	91.2 GeV	Z⁰ weak force
80.4 GeV	W[±] weak force	
>114 GeV	H Higgs boson	
spin 0		

Взаимодействие массивных нейтрино с фотонами

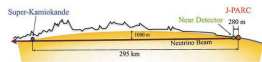


В рамках СМ с массивными нейтрино

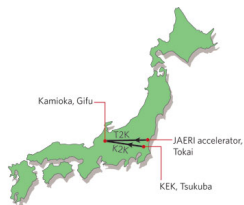
$$\mu_B = e/2m_e$$

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

Ускорительные нейтрино, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\nu_\mu \rightarrow \dots$



Япония, T2K: JPARC \rightarrow SuperK



MINOS и NOvA: география

