

Нейтрино вокруг нас: самое проникающее излучение в мире

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

МГУ, Москва

9 октября 2011

Нейтрино вокруг нас: самое проникающее излучение в мире

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва



МГУ, Москва

9 октября 2011



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

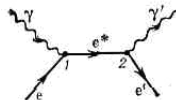
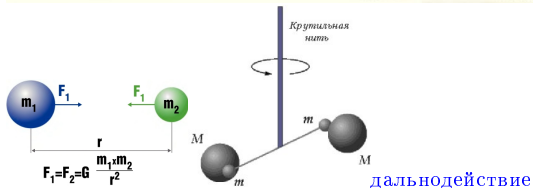
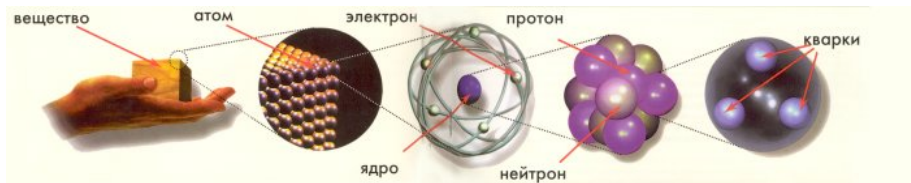


Рис. 2.

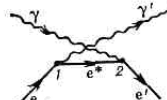
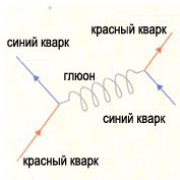


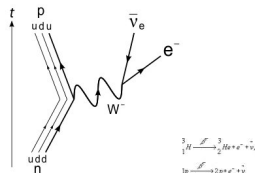
Рис. 3.



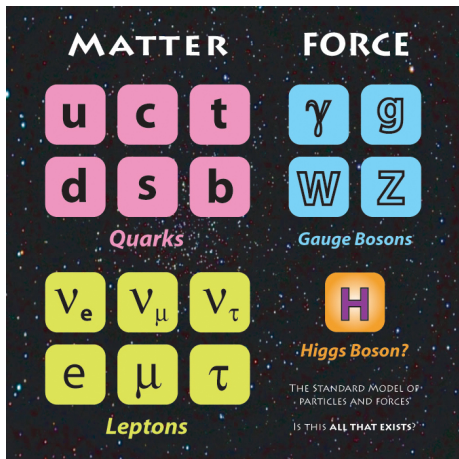
10^{-13} см

короткодействие

10^{-16} см



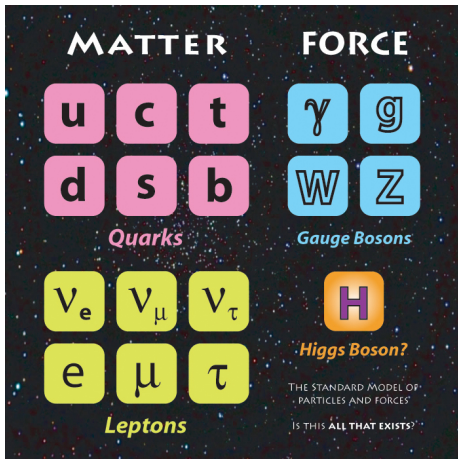
Элементарные частицы и взаимодействия между ними



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

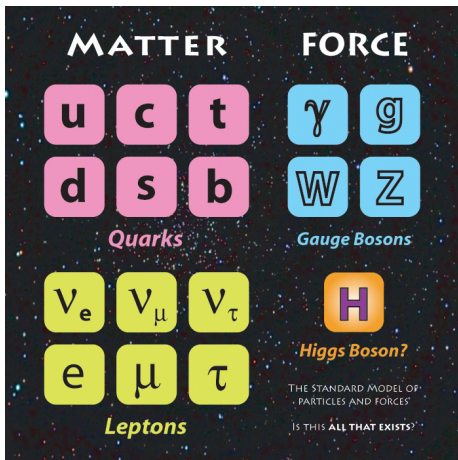
$$\begin{pmatrix} u(+\frac{2}{3}) \\ d(-\frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c(+\frac{2}{3}) \\ s(-\frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t(+\frac{2}{3}) \\ b(-\frac{1}{3}) \end{pmatrix}$$

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

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

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,

$$m_p \approx 2000 m_e \approx 1.7 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

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

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

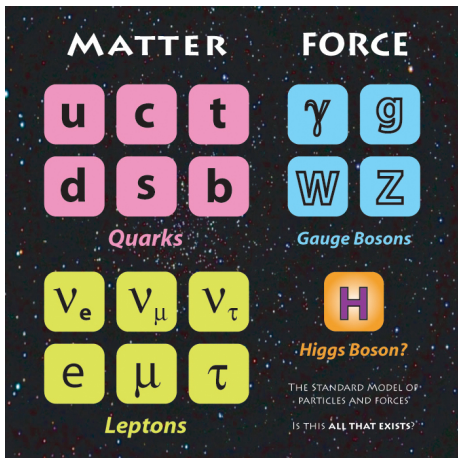
$$m_{W^+} = m_{W^-} \approx 80 m_p, \quad m_Z \approx 90 m_p$$

$$m_H > 115 m_p$$

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

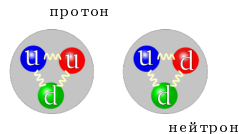
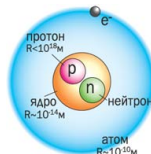
У античастиц та же масса! ($M_{e^+} = M_{e^-}, \dots$) NB: остальные (γ, g) безмассовы!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

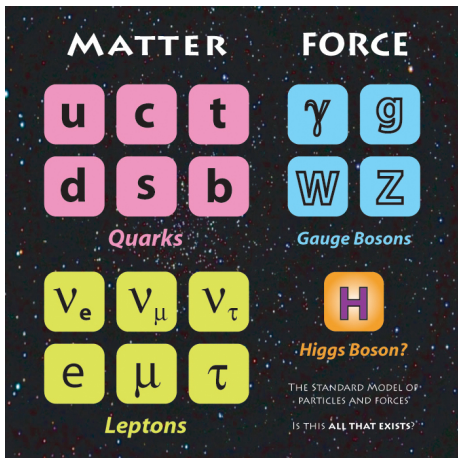


1 2 3 ← поколения

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



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

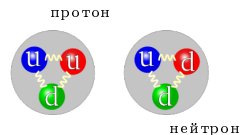
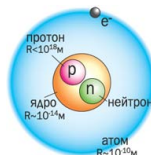


1 2 3 ← поколения

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

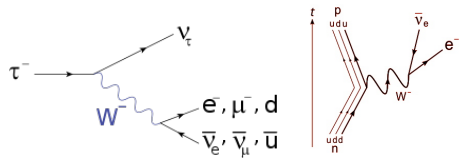
долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6} \text{ с}$

- 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!)

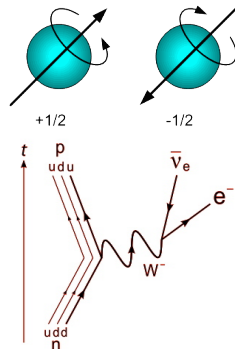
$$\text{Ядро}(A, Z) \rightarrow \text{Ядро}(A, Z+1) + e + ?$$

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

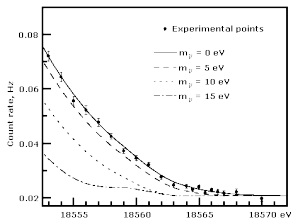
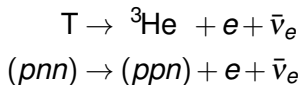
$$\begin{array}{l} n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e \\ \text{Спины: } \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \end{array}$$

- Сохраняет лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

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



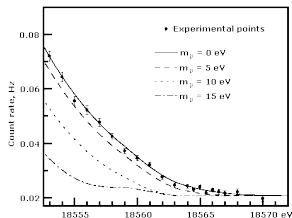
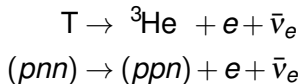
Спектр e : прямые поиски массы (анти)нейтрино



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**), $\Delta L_e = 0$

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

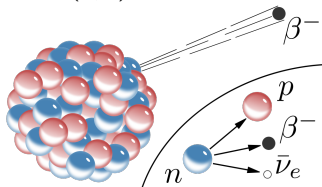
- **нейтрино** ν_e рождаются в β^+ -распаде (вместе с **позитроном**), $\Delta L_e = 0$

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

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):

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

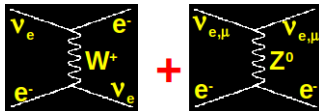
- **Важнейшее свойство:**

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

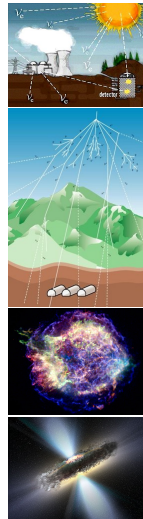
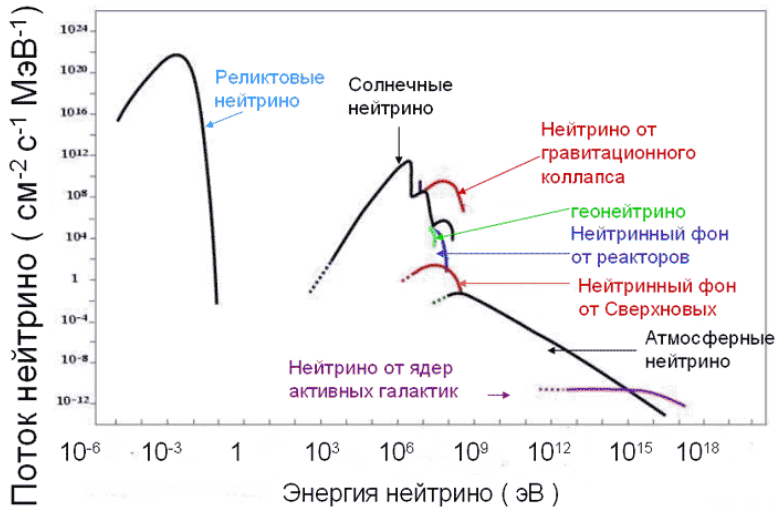
взаимодействуют очень редко!

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

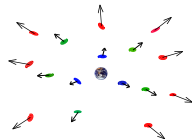
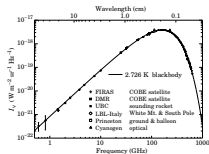
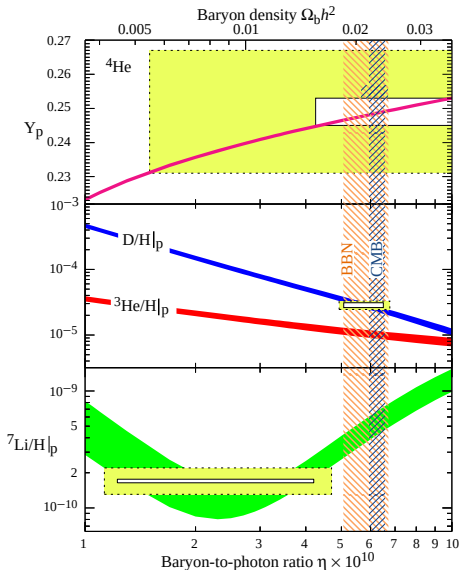
1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы



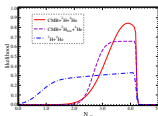
Нейтрино и антинейтрино вокруг нас



Реликтовые нейтрино и антинейтрино

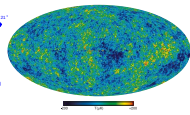
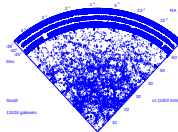


Должны быть реликтовые нейтрино с планковским спектром и $T = 1.8 \text{ K}$!!!

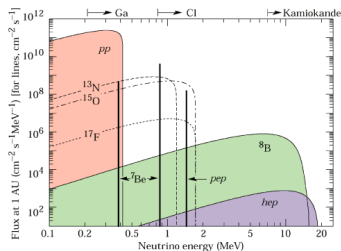
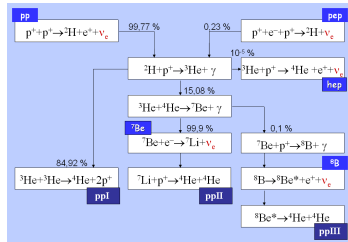
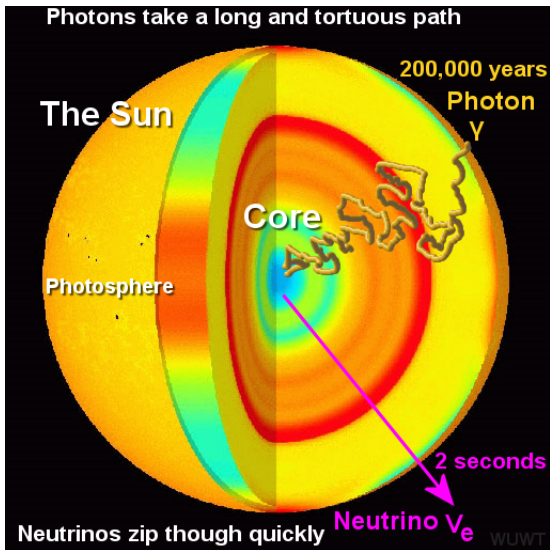


В ранней Вселенной температуры должны быть не менее 2-3 МэВ !
Не менее трёх поколений!

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



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

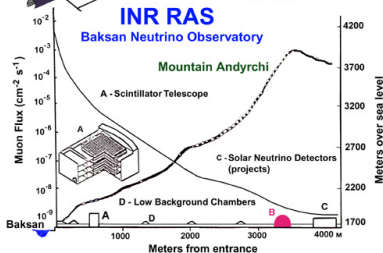
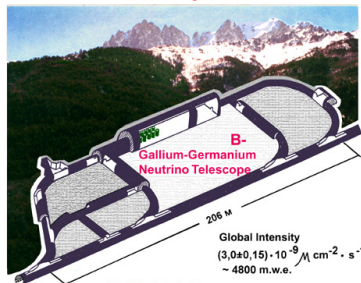


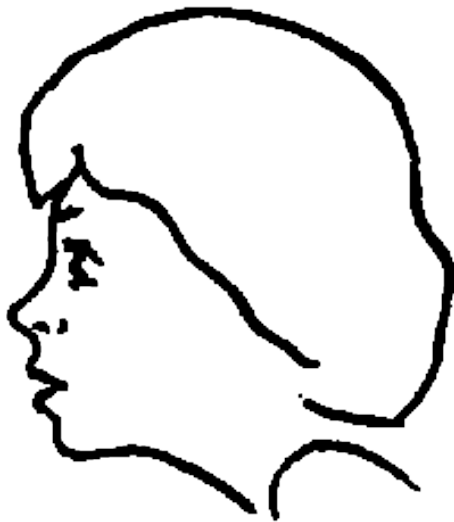
мониторинг Слънца!

Измерение потока солнечных нейтрино

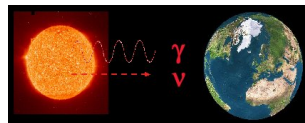
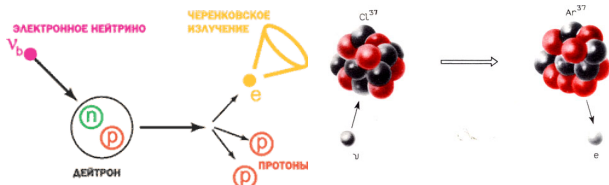
Солнце: $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$

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





Нейтрино от Солнца не хватает!!! подтверждено



Нейтрино от Солнца не хватает!!!

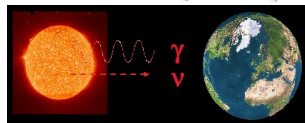
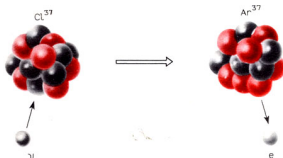
подтверждено



Все нейтрино
взаимодействуют
одинаково — могут
“смешиваться” !

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

Бруно Понтекорво



Нейтрино от Солнца не хватает!!!

подтверждено



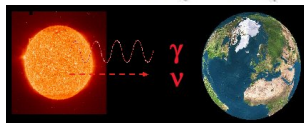
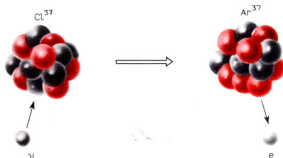
Бруно Понтекорво



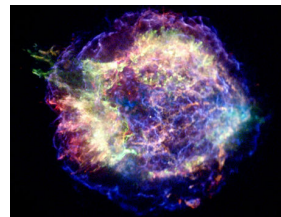
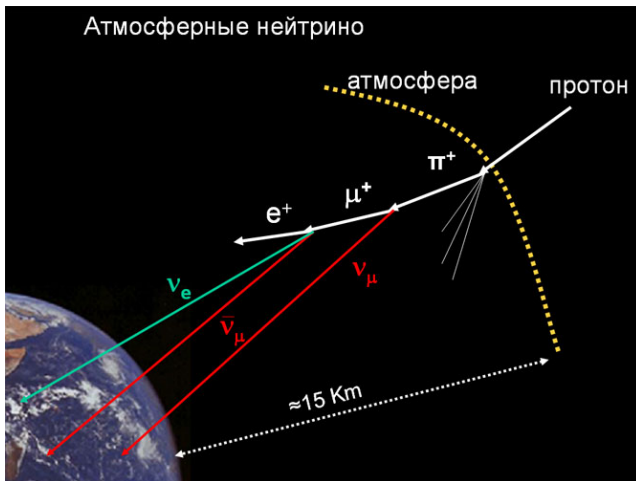
Все нейтрино
взаимодействуют
одинаково — могут
“смешиваться”!

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

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

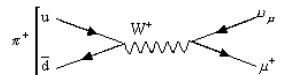


Атмосферные нейтрино



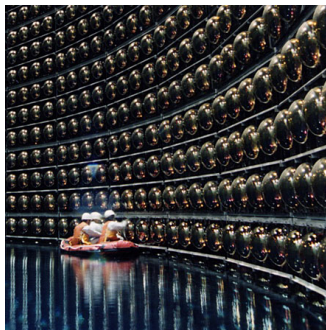
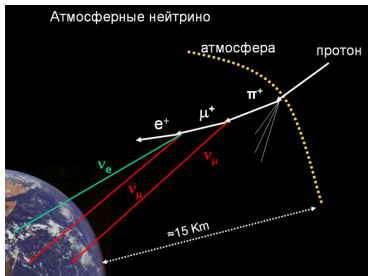
Галактические
космические лучи:
ускорение в остатках
сверхновых звёзд

В атмосфере Земли
рождаются пионы

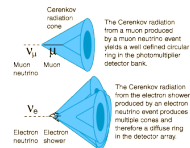


Знаем отношение потоков ν_e и ν_μ

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

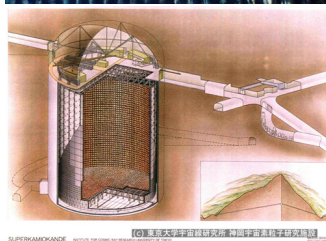
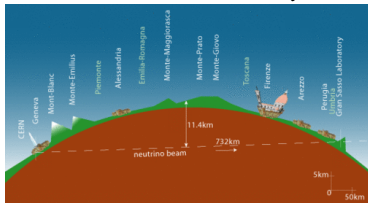


Черенковский свет от e и μ
($v_{\text{частицы}} < c$ в среде)



← SuperK

OPERA: появление ν_τ

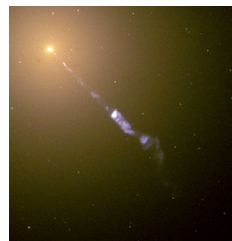
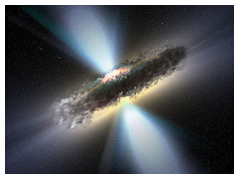
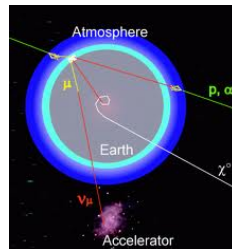


Поток $\mu \uparrow < \text{Поток } \mu \downarrow$

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

Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

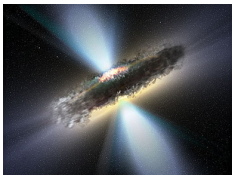
Большие энергии, но слабый
поток. . .



Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

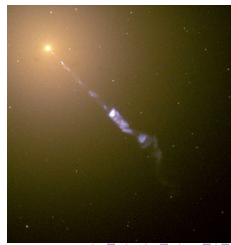
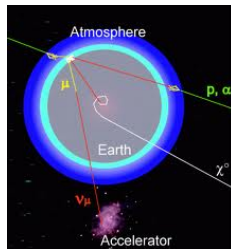
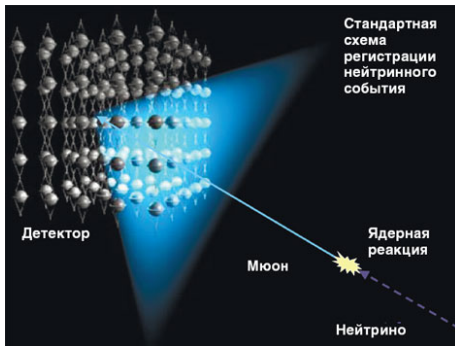


М. Марков

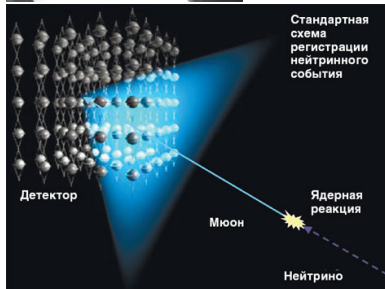
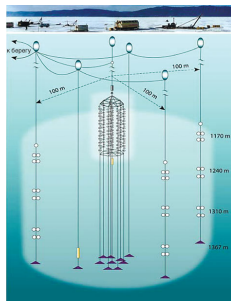


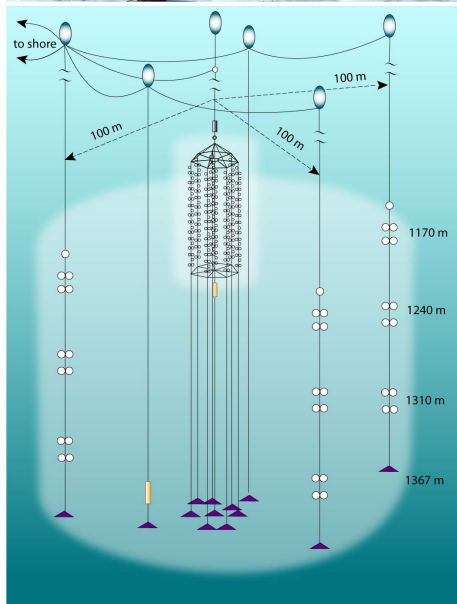
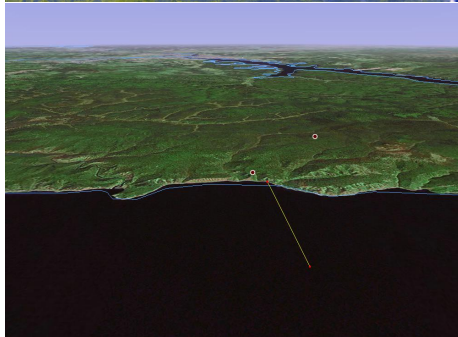
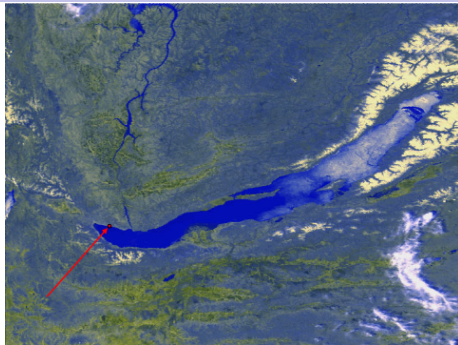
Большие энергии, но слабый
поток. . .

Идея: естественный водоём как
эффективный детектор!

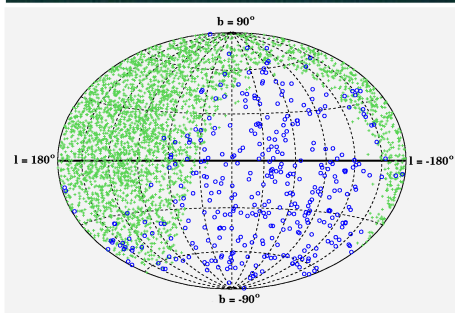
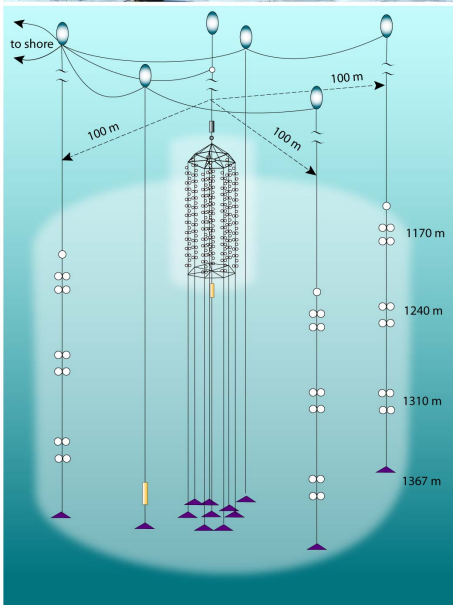


Байкальский нейтринный телескоп ИЯИ РАН

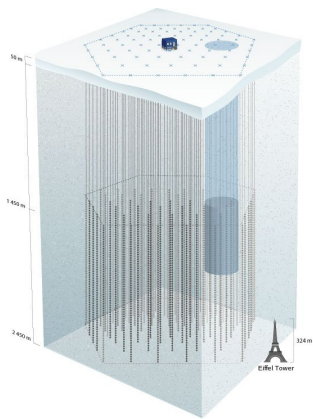








Нейтринный телескоп на Южном полюсе: ICECUBE



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)

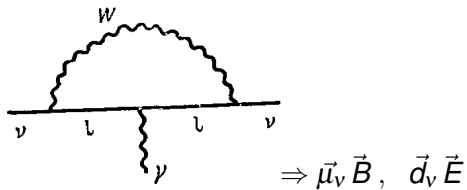
Факты, гипотезы и идеи

- Наблюдения солнечных нейтрино — мониторинг термоядерных процессов в центре Солнца
(уже идёт!)
- 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



В рамках СМ с массивными нейтрино

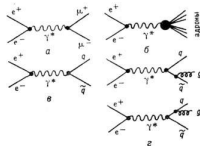
$$\mu_B = e/2m_e$$

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

Проверки Стандартной модели

- распады частиц:
- рассеяния частиц:

$$\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Фундаментальные частицы

масса →	2.4 МэВ	1.27 ГэВ	173.2 ГэВ	0
заряд	2/3	2/3	2/3	0
спин	1/2	1/2	1/2	1
К	u	c	t	γ
В	верхний	очарованный	истинный	фотон
А	4.2 МэВ	164 МэВ	42 ГэВ	0
Р	1/3	-1/3	-1/3	8
К	d	s	b	g
К	down	strange	bottom (beauty)	глюон
И	1/3	1/3	1/3	0
Л	0.51 МэВ	0.17 МэВ	1.777 МэВ	91.2 ГэВ
Е	ν _e	ν _μ	ν _τ	Z ⁰
П	электронное	мюонное	тау-	1
Т	нейтрно	нейтрно	нейтрно	±
О	8.31 МэВ	105.7 МэВ	1.777 ГэВ	91.2 ГэВ
И	e	μ	τ	W [±]
М	электрон	мюон	тау-лептон	W-бозон
	I	II	III	

Три поколения фермионов

Проверки предсказаний СМ

Проверки предсказаний её мотивированных обобщений

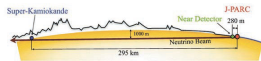
Регулярно обновляемая достоверная информация

<http://pdg.lbl.gov>

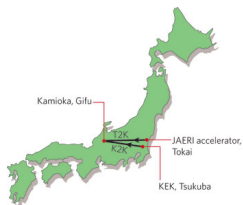
зеркала
в России

<http://pdg.ihep.su>
<http://www.inp.nsk.su/pdg>

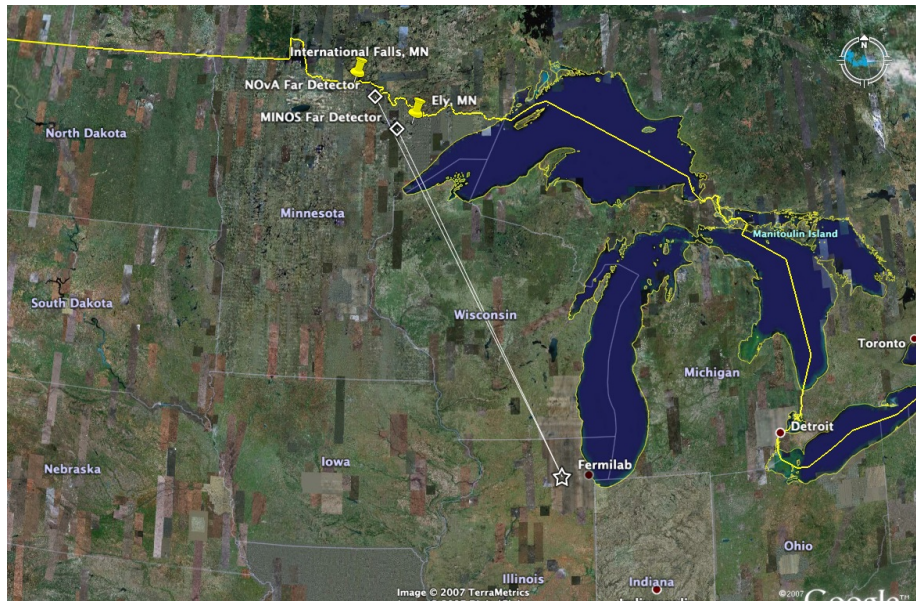
Ускорительные нейтрино, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\nu_\mu \rightarrow \dots$



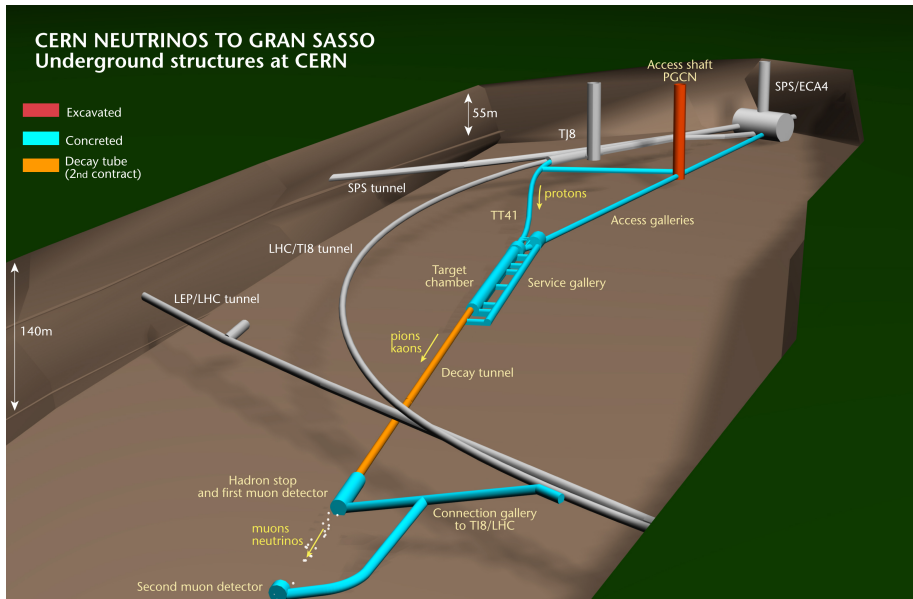
Япония, T2K: JPARC $\rightarrow$ SuperK



MINOS и NOvA: география



OPERA: устройство эксперимента



OPERA: детали и результаты

Основная задача: найти τ -лептон от взаимодействия 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: $(731278.0 \pm 0.2) \text{ м}$

— 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!]

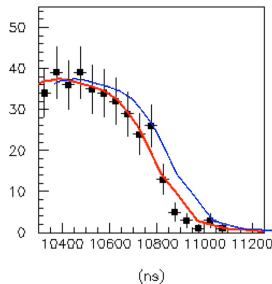
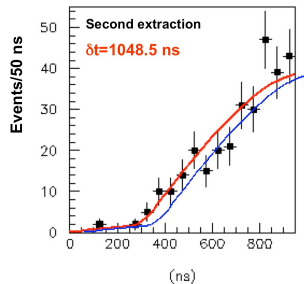
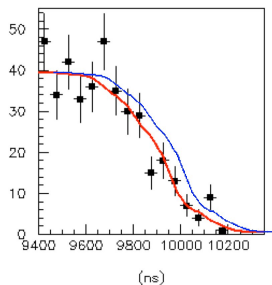
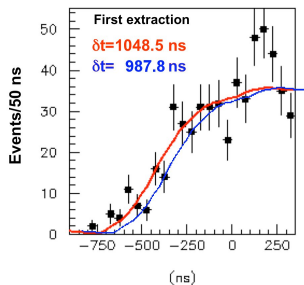
$$(v - c)/c = (2.48 \pm 0.28(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

NB: Массы нейтрино не при чём!:

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

— 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: ($E_\nu > 30 \text{ ГэВ} \sim 60 m_p c^2$):

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

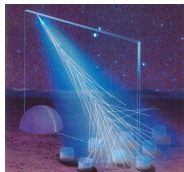
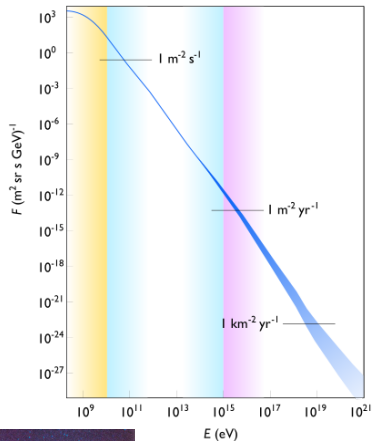
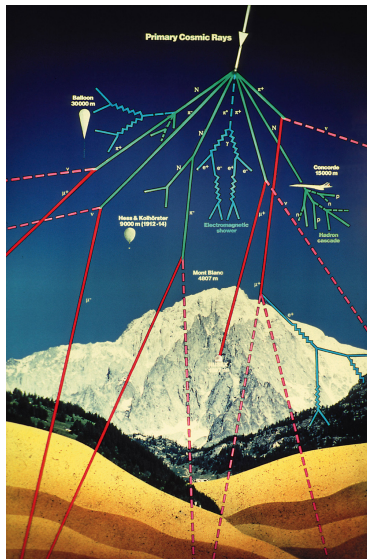
Недавние прямые измерения: ($E_\nu \sim 3 \text{ ГэВ} \sim 3 m_p c^2$):

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

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

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

Поток космических лучей



Форма спектра и химический состав

