

# Нейтринные осцилляции: физика за рамками Стандартной модели

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

CERN, Женева

7 ноября 2013

# Нейтринные осцилляции: физика за рамками Стандартной модели

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва



CERN, Женева

7 ноября 2013



# Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
name →	<b>u</b> Left up Right	<b>c</b> Left charm Right	<b>t</b> Left top Right
Quarks	4.8 MeV $-1/3$ <b>d</b> Left down Right	104 MeV $-1/3$ <b>s</b> Left strange Right	4.2 GeV $-1/3$ <b>b</b> Left bottom Right
	0 eV 0 <b><math>\nu_e</math></b> Left electron neutrino Right	0 eV 0 <b><math>\nu_\mu</math></b> Left muon neutrino Right	0 eV 0 <b><math>\nu_\tau</math></b> Left tau neutrino Right
Leptons	0.511 MeV -1 <b>e</b> Left electron Right	105.7 MeV -1 <b><math>\mu</math></b> Left muon Right	1.777 GeV -1 <b><math>\tau</math></b> Left tau Right

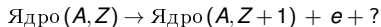
Bosons (Forces) spin 1	0 0 <b>g</b> gluon	spin 0
	0 0 <b><math>\gamma</math></b> photon	
	91.2 GeV 0 <b>Z<sup>0</sup></b> weak force	
80.4 GeV $\pm 1$ <b>W<sup>±</sup></b> weak force	>114 GeV 0 0 <b>H</b> Higgs boson	

# Роль нейтрино в слабых взаимодействиях

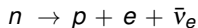


В. Паули (1930)

- Сохраняет энергию (экспериментально спектр позитронов непрерывен!)



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

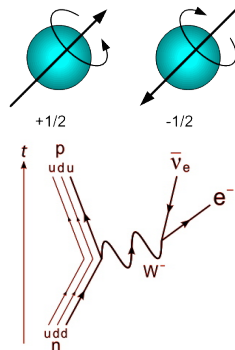


$$\text{Спины: } \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2}$$

- Сохраняет лептонные числа  $L_e, L_\mu, L_\tau$

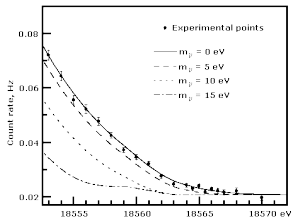
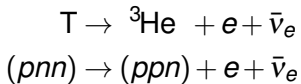
$$L_e(n) = 0 \implies L_e(\bar{\nu}_e) = -L_e(e)$$

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





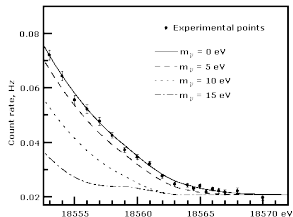
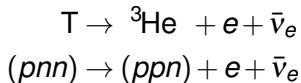
# Спектр $e$ : прямые поиски массы (анти)нейтрино



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  $\beta^-$ -распаде (вместе с **электроном**),  $\Delta L_e = 0$

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

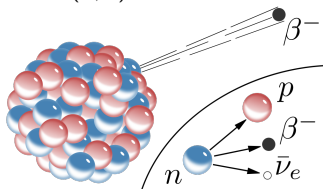
- **нейтрино**  $\nu_e$  рождаются в  $\beta^+$ -распаде (вместе с **позитроном**),  $\Delta L_e = 0$

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

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  $\beta^-$ -распаде (вместе с электроном),  $\Delta L_e = 0$

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

- нейтрино  $\nu_e$  рождаются в  $\beta^+$ -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:

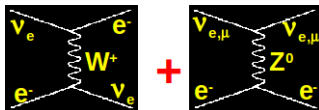
участвуют только в слабых взаимодействиях  
( $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ ,  $W^+ \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ ,  $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$ )

взаимодействуют очень редко!

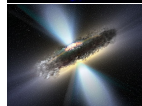
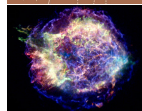
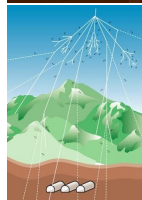
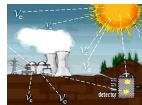
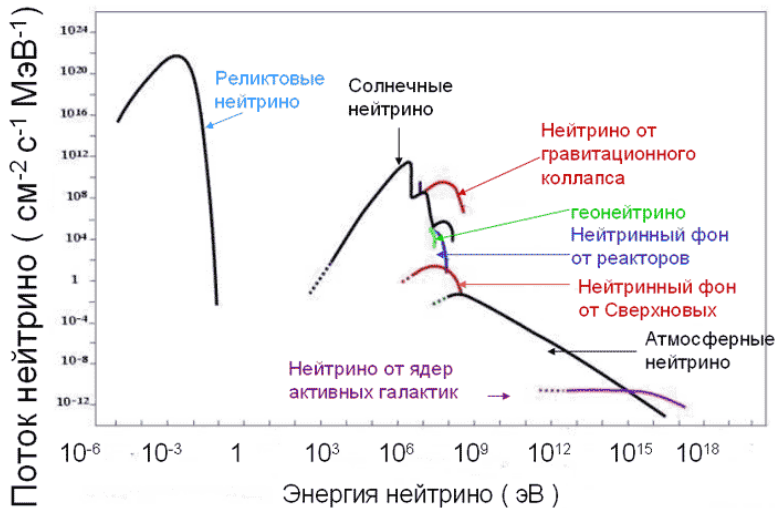
$\bar{\nu}_e$  из ядерного реактора пролетает в воде без столкновений более  $10^{13}$  км

столько свет пролетит за год!!!

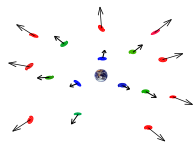
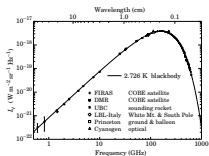
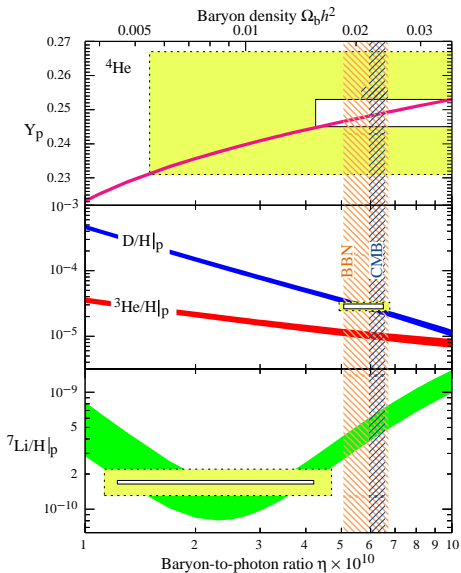
1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы



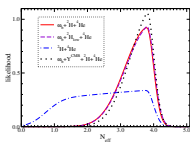
# Нейтрино и антинейтрино вокруг нас



# Реликтовые нейтрино и антинейтрино

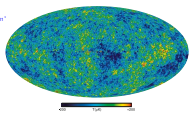
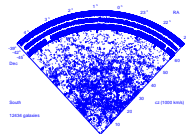


Должны быть реликтовые нейтрино с планковским спектром и  $T = 1.8 \text{ K}$  !!!

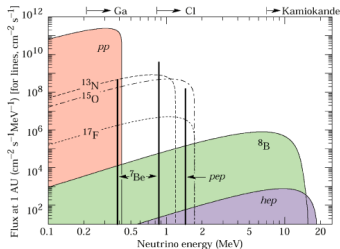
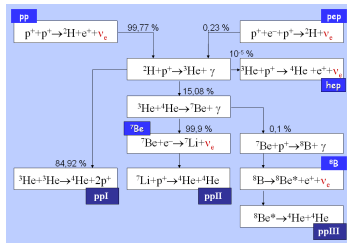
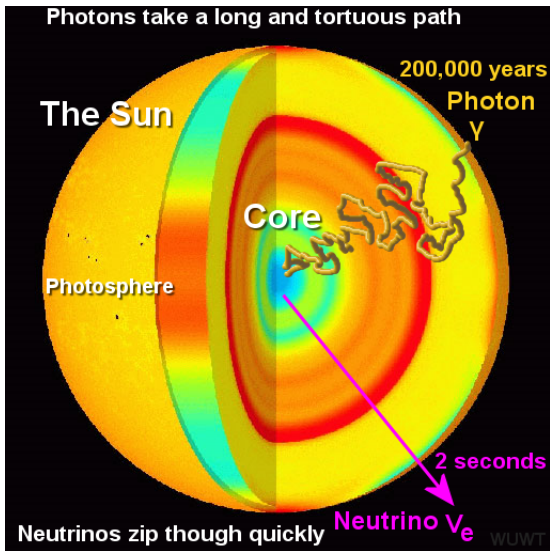


В ранней Вселенной температуры должны быть не менее 2-3 МэВ !  
Не менее трёх поколений!

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

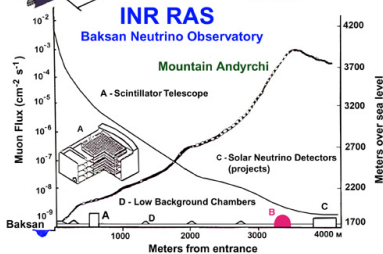
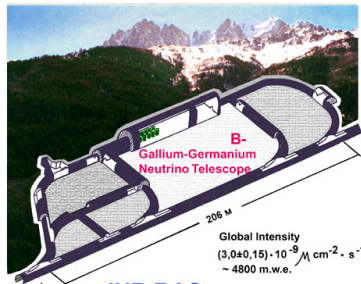
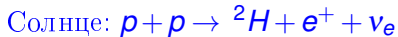


# Нейтрино от Слънца: синтез $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e, \dots$



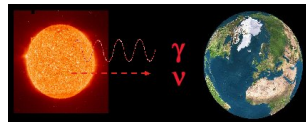
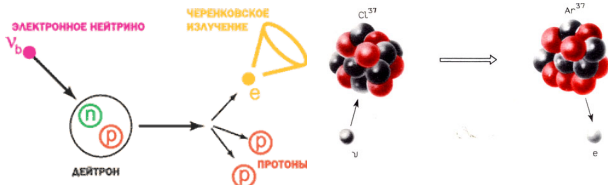
мониторинг Слънца!

# Измерение потока солнечных нейтрино









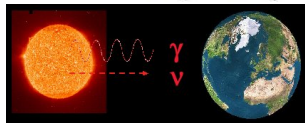
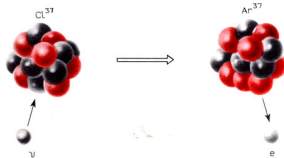


Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться”!

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



Бруно Понтекорво



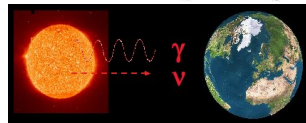
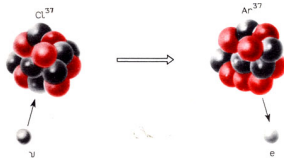


Бруно Понтекорво

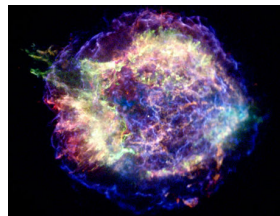
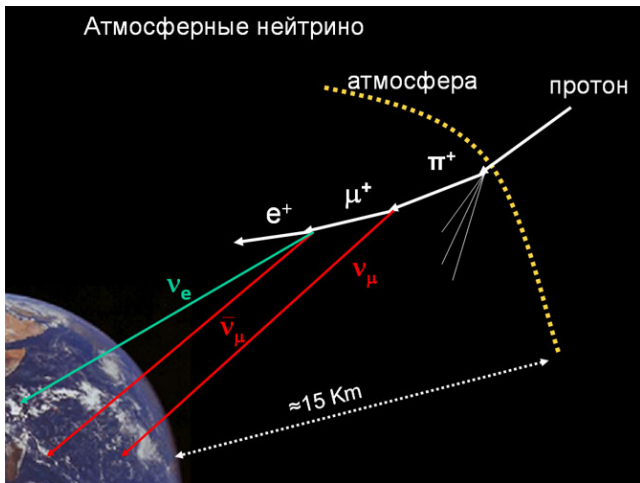
Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться”!

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

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

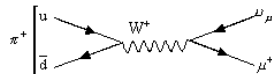


# Атмосферные нейтрино



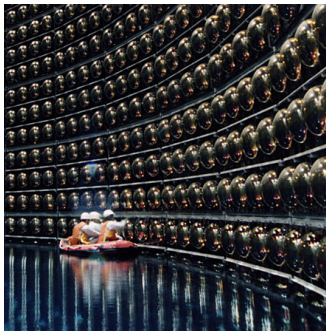
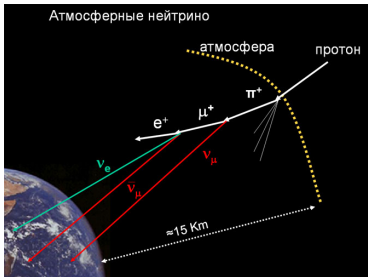
Галактические космические лучи: ускорение в остатках сверхновых звёзд

В атмосфере Земли рождаются пионы

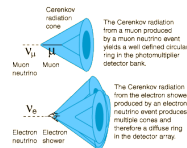


Знаем отношение потоков  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$

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

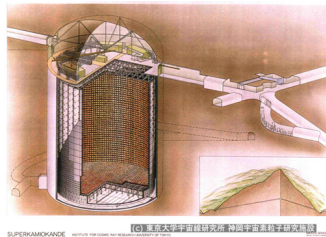
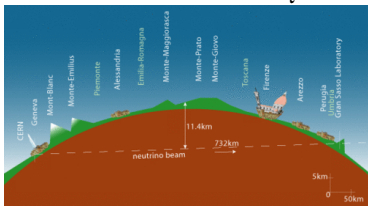


Черенковский свет от  $e$  и  $\mu$   
( $v_{\text{частицы}} < c$  в среде)



← SuperK

## OPERA: появление $\nu_\tau$

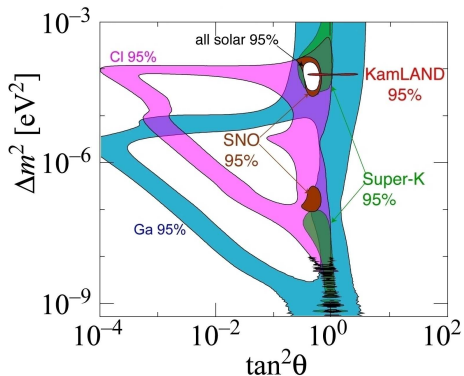


Поток  $\mu \uparrow < \text{Поток} \mu \downarrow$

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

# Нейтринные осцилляции: массы и углы смешивания

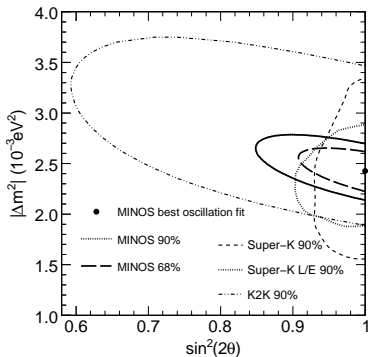
“солнечный”  $2 \times 2$  сектор



$m_1 > 0.008$  эВ

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

“атмосферный”  $2 \times 2$  сектор



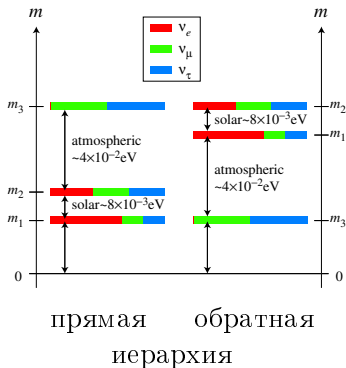
$m_2 > 0.05$  эВ

также T2K

# “Прямая” и “обратная” иерархии масс нейтрино

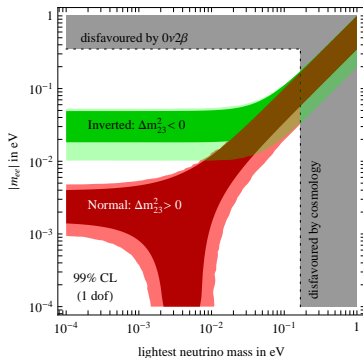
Определены только разности квадратов масс, для самих масс есть варианты. . .

возможно, их определяют



эксперименты T2K & Novae

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



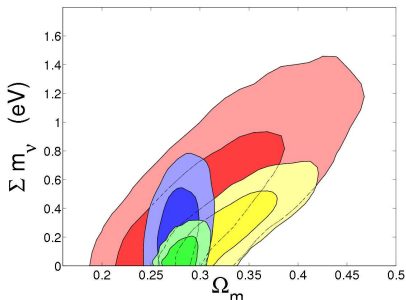
$|m_{ee}| = \left| \sum U_{ei}^2 m_i \right|$ , если массы майорановские



# Космологические ограничения на $\sum m_\nu$ Planck (2013)

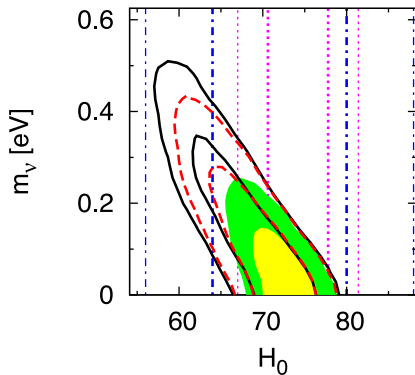
Нейтрино влияют на:

- Рост структур (начало формирования: радиация, сегодня: в скоплениях  $\nu < 10^{-2}$ )
- 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

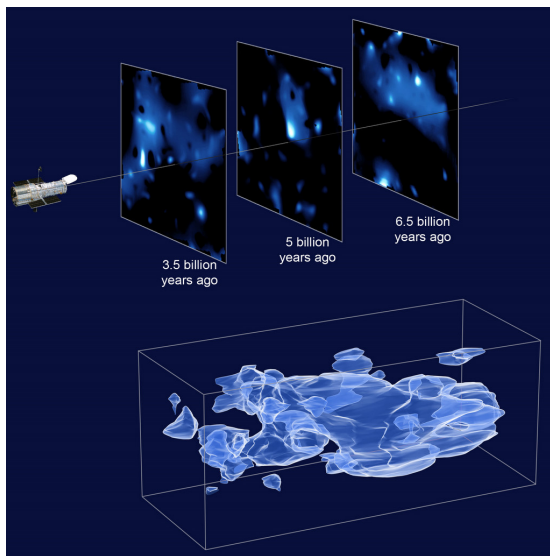
$\sum m_\nu < 0.28$  эВ (95% CL)



CMB+Hubble

$\sum m_\nu < 0.20$  эВ (95% CL)

# LSS: SZ-clusters, Weak lensing of CMB



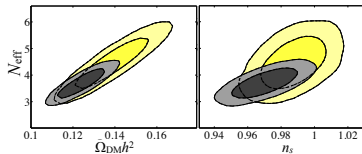
- $\Delta N_V$  amplifies shear power: cancel with quintessence contribution and flattening of spectrum,  $n_s \rightarrow 1$
- $M_N$  reduces power

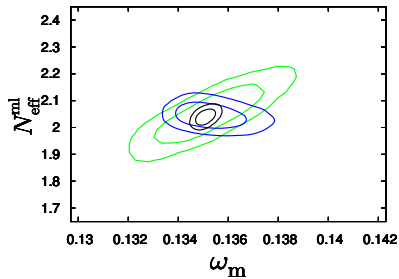
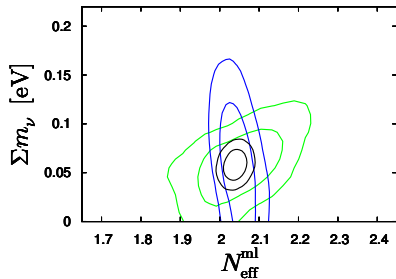
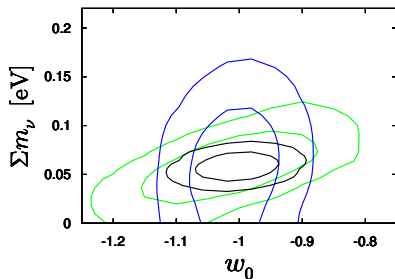
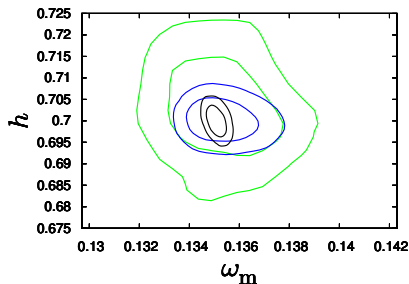
$$N_{eff} = 3 \rightarrow M_V < 0.46 \text{ eV}$$

$$M_V = 0 \rightarrow N_{eff} = 3.8 \pm 0.4$$

$$M_V < 0.62 \text{ eV} \rightarrow N_{eff} = 3.9 \pm 0.4$$

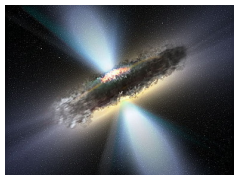
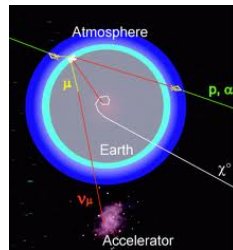
1212.3608





# Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

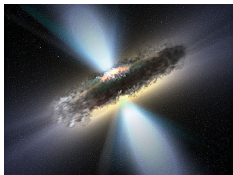
Большие энергии, но слабый поток...



# Нейтрино от астрофизических ускорителей, аннигиляции тёмной материи?

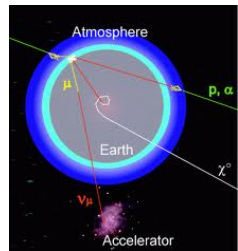
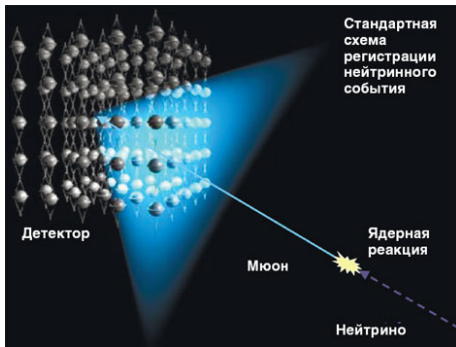


М. Марков

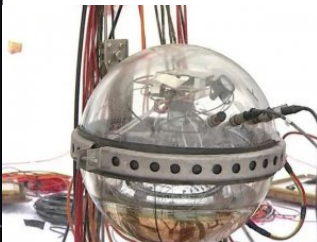
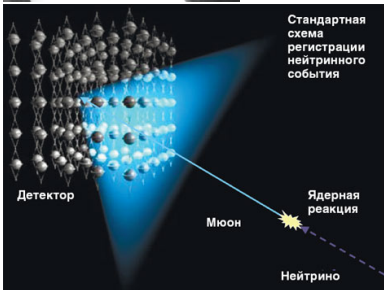
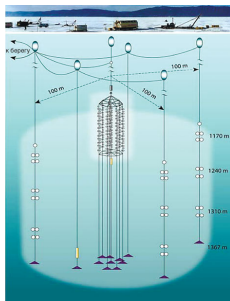


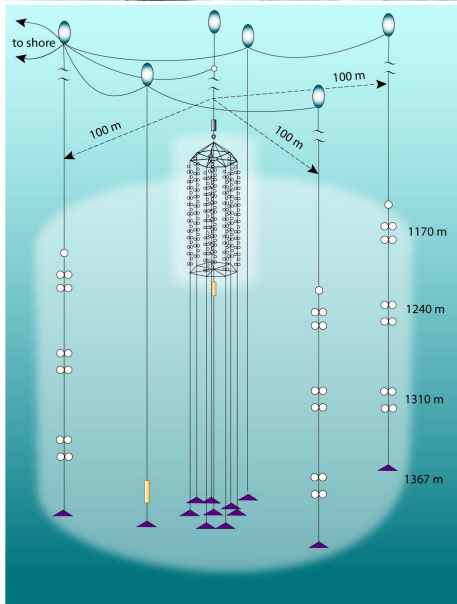
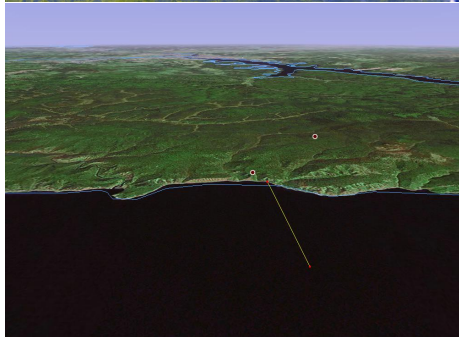
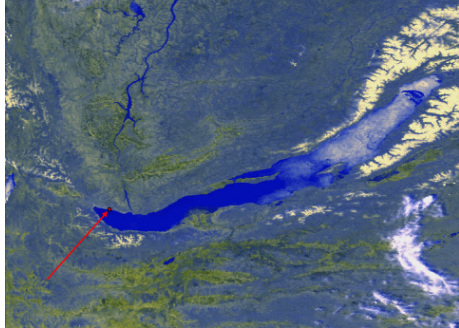
Большие энергии, но слабый поток...

Идея: естественный водоём как эффективный детектор!



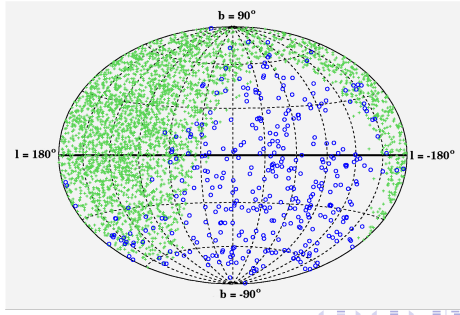
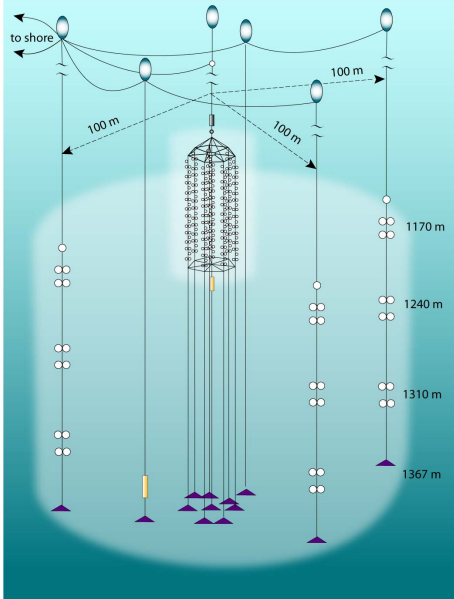
# Байкальский нейтринный телескоп ИЯИ РАН



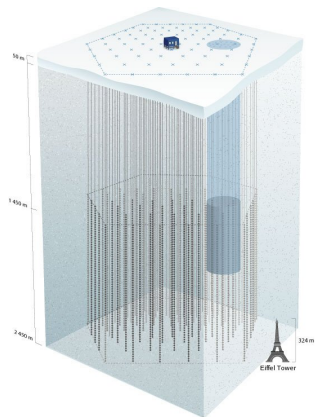








# Нейтринный телескоп на Южном полюсе: ICESCube



Объём под наблюдением:  $1 \text{ км}^3$

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:

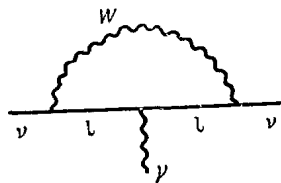
- Наблюдения солнечных нейтрино — мониторинг термоядерных процессов в центре Солнца  
(уже идёт! Уточнение модели Солнца)
- Наблюдения геонейтрино — мониторинг ядерных процессов в центре Земли  
(есть перспектива, геонейтрино зарегистрированы !!!)
- Мониторинг ядерных реакторов  
(уже проводили! перспектива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





# Backup slides

# Взаимодействие массивных нейтрино с фотонами



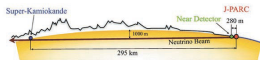
$$\Rightarrow \vec{\mu}_\nu \vec{B}, \vec{d}_\nu \vec{E}$$

В рамках СМ с массивными нейтрино

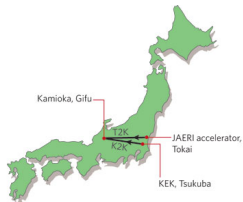
$$\mu_B = e/2m_e$$

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

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



Япония, T2K: JPARC  $\rightarrow$  SuperK





# MINOS и NOvA: география

