

Поиски стерильных нейтрино

И.И. Ткачев

Юбилейная конференция посвященная 80-летию со дня рождения
академика В.М. Лобашева

23 октября 2014, ИЯИ РАН

Эксперимент Лобашева в Троицке



Лучшее ограничение на массу
электронного антинейтрино

$$m_{\nu} < 2.05 \text{ eV}$$

В.М. Лобашев

Стандартная модель

Кварки

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

Лептоны

Бозоны

0 0 g gluon
0 0 γ photon
91.2 GeV 0 Z^0 weak force
80.4 GeV ± 1 $W^\pm$ weak force

$>114 \text{ GeV}$ 0 0 H Higgs boson
--

spin 0

Все кварки и лептоны входят парами, кроме нейтрино

Физика элементарных частиц

Стандартная модель

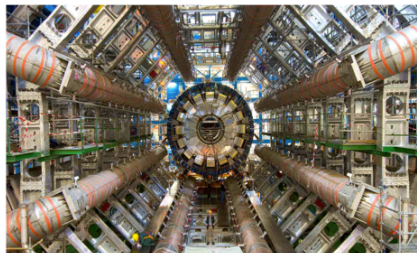
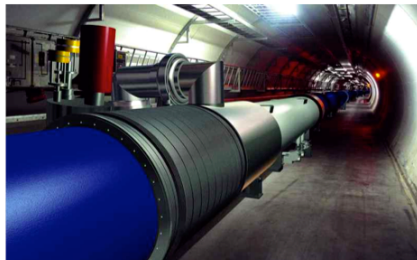
Кварки

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

Лептоны

Бозоны

0 0 g gluon	0 0 γ photon	91.2 GeV 0 Z weak force	>114 GeV 0 H Higgs boson
80.4 GeV ± 1 W weak force	spin 0		



Масса Хиггсовского бозона 125 ГэВ

- легче - Вселенная нестабильна
- тяжелее - полюс Ландау

Новая физика не нужна?

Стандартная модель не объясняет

- Осцилляции нейтрино
- Барионную асимметрию Вселенной
- Темную материю

Стерильные нейтрино.

Известно что

- Нейтрино существуют
- Нейтрино имеют массу

Неизвестна

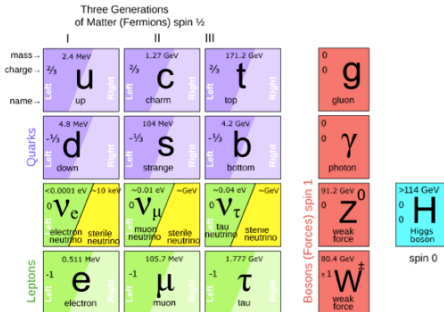
- Массовая матрица нейтрино

Стерильные нейтрино

Стандартная модель



Расширение с ν_R



Весь вопрос в массе ν_R

Стерильные нейтрино

После минимального расширения Стандартной Модели с включением правых нейтрино N_j , $j = 1, 2, 3$

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + i\bar{N}_j \partial_\mu \gamma^\mu N_j - \left[\lambda_{ji} N_j (H L_i) + \frac{M_{ji}}{2} N_j N_i + \text{h.c.} \right]$$

появляется возможность объяснения:

- Ненулевой массы нейтрино и осцилляций
 - Если $m_D \equiv \lambda \langle H \rangle \ll M$, работает стандартная формула "see-saw" $m_\nu = m_D M^{-1} m_D^T$
- Барионной асимметрии, если $M_1 \gtrsim 10^8 \text{ GeV}$

Fukugita & Yanagida, (86)

Стерильные нейтрино

После минимального расширения Стандартной Модели с включением правых нейтрино N_j , $j = 1, 2, 3$

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + i\bar{N}_j \partial_\mu \gamma^\mu N_j - \left[\lambda_{ji} N_j (H L_i) + \frac{M_{ji}}{2} N_j N_i + \text{h.c.} \right]$$

появляется возможность объяснения:

- Темной материи, если $M_1 \gtrsim \text{keV}$

Dodelson & Widrow (94)

Asaka, Blanchet & Shaposhnikov (2005)

- Темной материи и барионной асимметрии, если $M_1 \gtrsim \text{keV}$ и $M_2, M_3 \sim \text{GeV}$

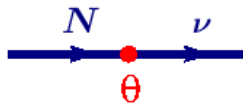
Akhmedov, Rubakov & Smirnov (98)

Asaka & Shaposhnikov (05)

Стерильные нейтрино

Важный параметр - смешивание активных и стерильных нейтрино

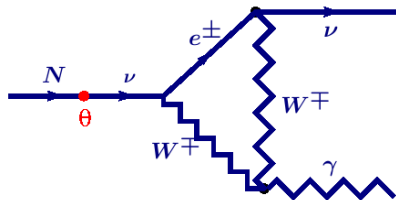
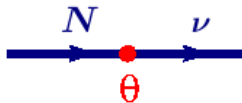
$$\theta_{1\alpha}^2 = \frac{|m_{1\alpha}^D|^2}{M_1^2}, \quad \alpha = e, \mu, \tau$$



Стерильные нейтрино

Важный параметр - смешивание активных и стерильных нейтрино

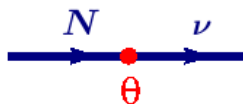
$$\theta_{1\alpha}^2 = \frac{|m_{1\alpha}^D|^2}{M_1^2}, \quad \alpha = e, \mu, \tau$$



Стерильные нейтрино

Важный параметр - смешивание активных и стерильных нейтрино

$$\theta_{1\alpha}^2 = \frac{|m_{1\alpha}^D|^2}{M_1^2}, \quad \alpha = e, \mu, \tau$$



Вспомним $m_\nu = -m_D M^{-1} m_D^T$, тогда в пределе "see-saw"

$$\theta_\alpha^2 \propto \frac{m_{\text{active}}}{M_1} \approx 5 \times 10^{-5} \left(\frac{1 \text{ keV}}{M_1} \right)$$

Ограничения на стерильные нейтрино

- Лабораторные
 - $M_1 \lesssim 100 \text{ eV}$: осцилляционные эксперименты
 - $10 \text{ eV} \lesssim M_1 \lesssim \text{MeV}$: радиоактивный распад
 - $\text{MeV} \lesssim M_1 \lesssim \text{GeV}$: лептонные распады мезонов
 - $\text{MeV} \lesssim M_1 \lesssim 100 \text{ GeV}$: распады стерильных нейтрино
- Космологические и астрофизические

Ограничения на тяжелые нейтрино

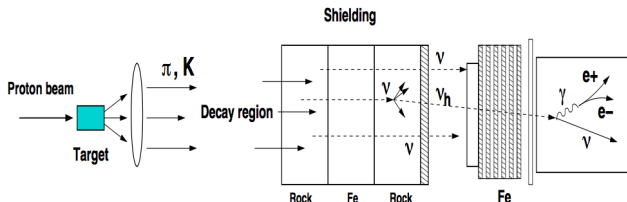
- $\text{MeV} \lesssim M_1 \lesssim \text{GeV}$: Лептонные распады мезонов

$$\pi \rightarrow e + \nu \Rightarrow \pi \rightarrow e + N \text{ if } M_N < m_\pi - m_e;$$

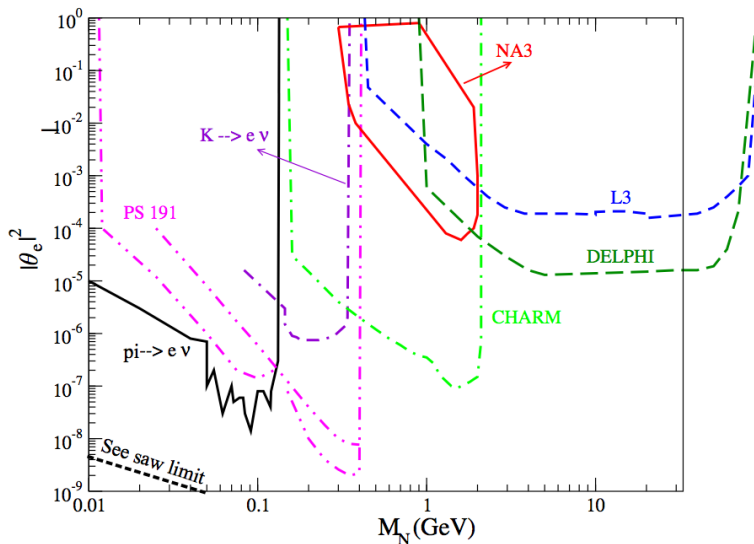
$$K \rightarrow e + \nu \Rightarrow K \rightarrow e + N \text{ if } M_N < m_K - m_e;$$

$$K \rightarrow \mu + \nu \Rightarrow K \rightarrow \mu + N \text{ if } M_N < m_K - m_\mu,$$

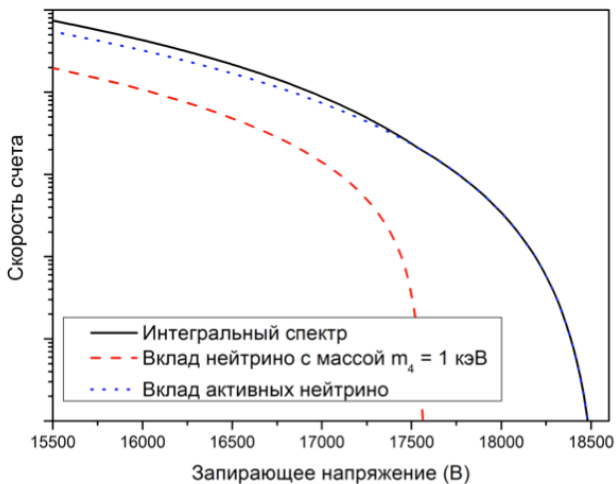
- $\text{MeV} \lesssim M_1 \lesssim 100 \text{ GeV}$: Распады стерильных нейтрино в "beam-dump" экспериментах



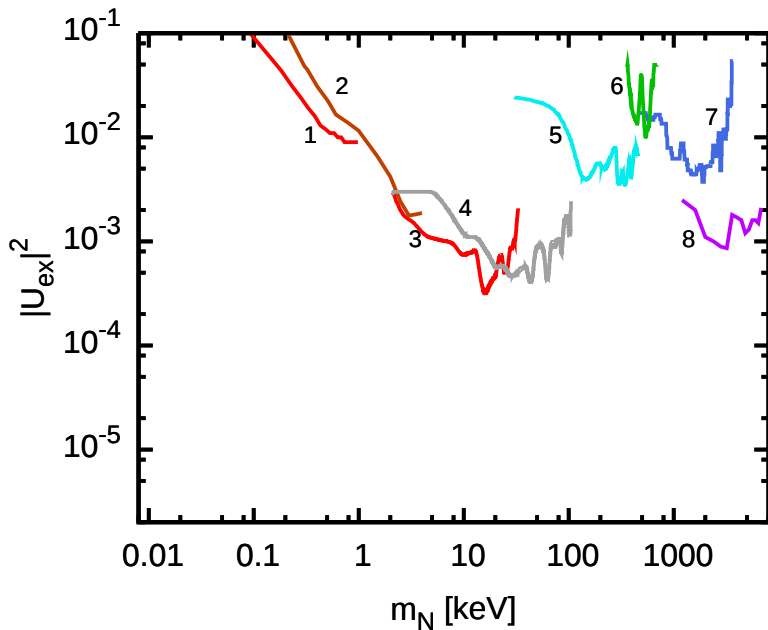
Ограничения на тяжелые нейтрино



Спектр β -распада



Ограничения из β -спектра



Эксперимент Лобашева в Троицке

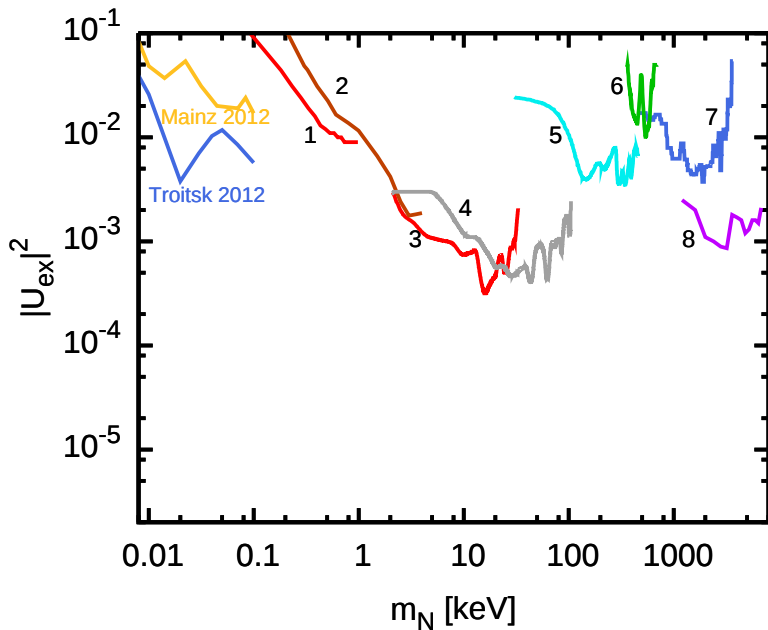


В.М. Лобашев

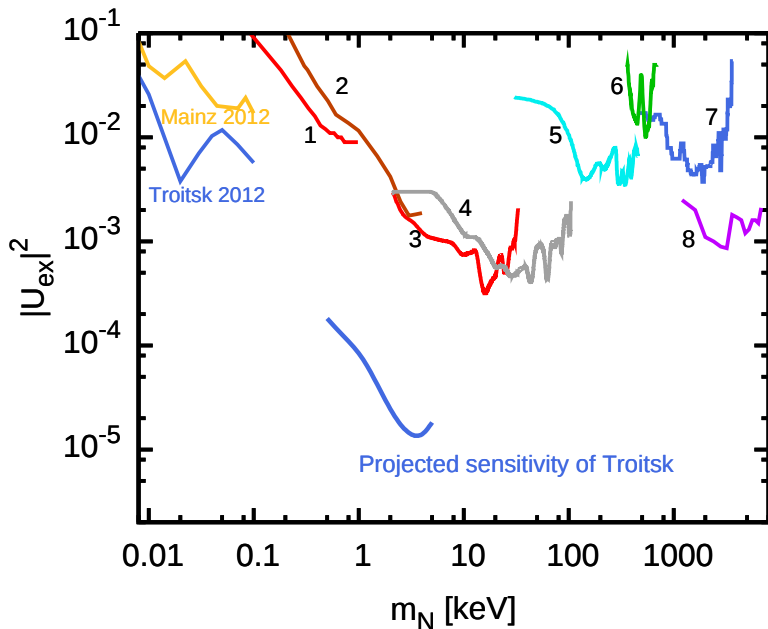
Лучшее ограничение на массу
электронного антинейтрино,
 $m_{\bar{\nu}} < 2.05 \text{ eV}$

Лучшее ограничение на
стерильные нейтрино для
 $M_S < 100 \text{ eV}$

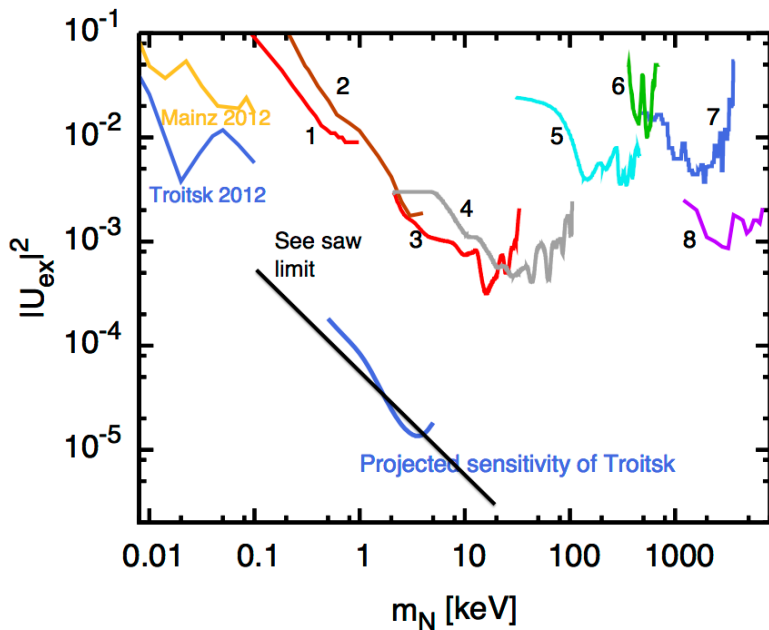
Ограничения из β -спектра



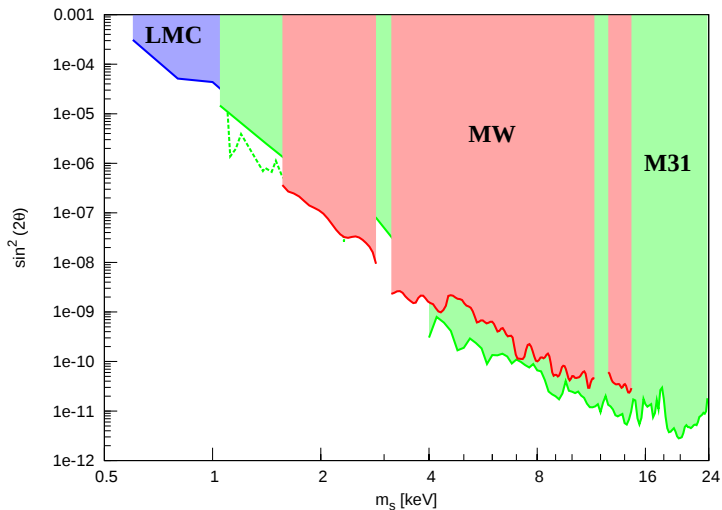
Ограничения из β -спектра



Ограничения из β -спектра



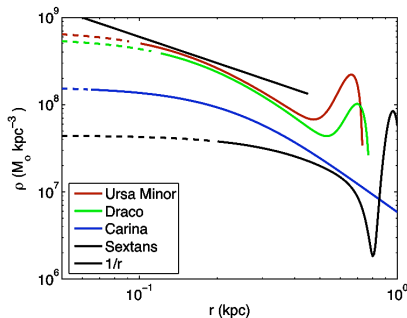
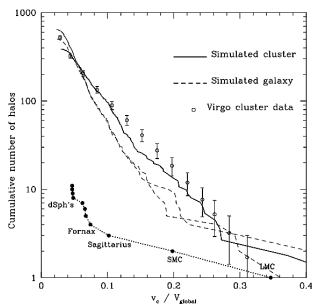
Астрофизические ограничения



Темная материя из стерильных нейтрино светится, $N \rightarrow \nu_e, \gamma$

Проблемы холодной темной материи

На малых космологических масштабах



Избыточное число dSph

Сингулярные профили dSph

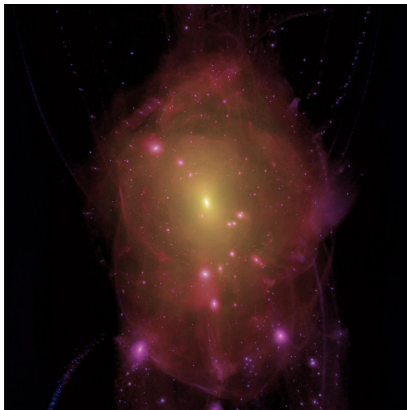
Теплая темная материя

Галактическое гало:

CDM



WDM



2 keV нетермальное стерильное нейтрино лучше согласуется с наблюдениями

Эксперимент Лобашева в Троицке



В.М. Лобашев

Троицкая установка имеет большой научный потенциал. Существующие лабораторные ограничения на стерильные нейтрино в космологически интересной области масс **100 eV - 10 keV** можно улучшить на два порядка.