



# Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино

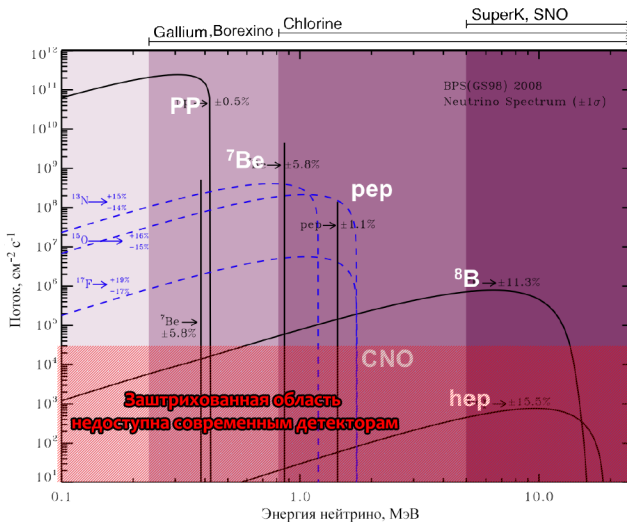
Громов М.Б., Чепурнов А.С.  
от имени коллаборации Борексино

Семинар Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН

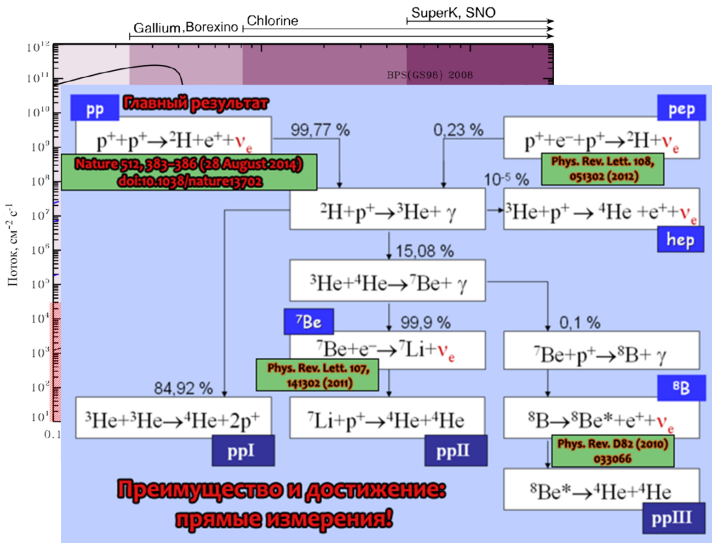
19.01.2015



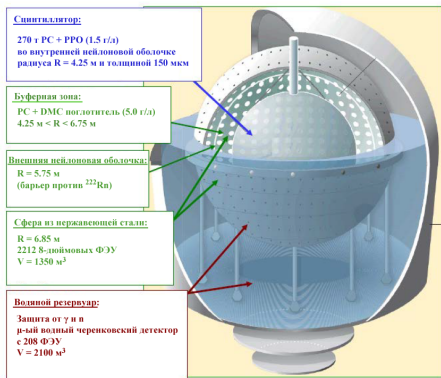
# Borexino: солнечная программа



# Нейтрино: основные результаты



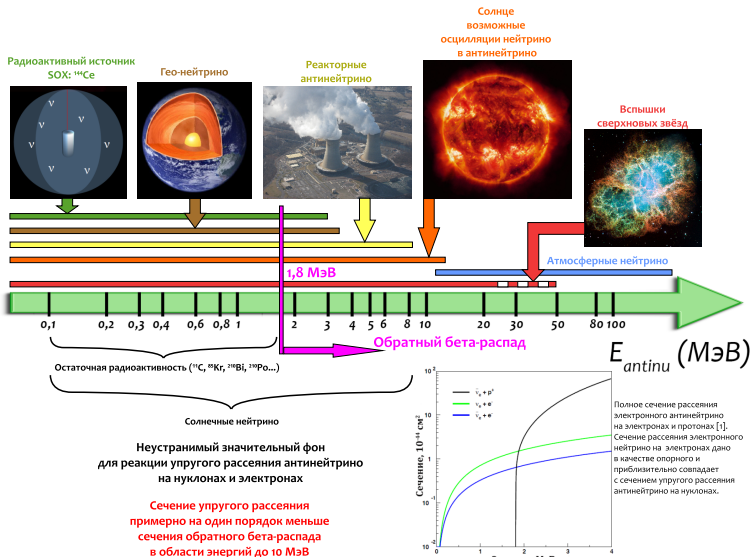
# Детектор Borexino



- Жидко-сцинтилляционный детектор
- Размещён в подземной лаборатории  
1400 м  $\Leftrightarrow$  3800 м.в.э. или  
1.2 мюона/(ч · м<sup>2</sup>)
- Слоистая защита (луковичная структура)
- Работает в режиме реального времени
- Высокая радиохимическая чистота прежде всего по урану и торью:  
 $^{238}\text{U} < 8 \times 10^{-20}$  г/г,  
 $^{232}\text{Th} < 9 \times 10^{-19}$  г/г

- Суммарный световыход  $\Rightarrow$  энергия,  $\sim 500$  ф.э./МэВ, точность 5% на энергии в 1 МэВ, диапазон видимой энергии: от 0.2 до 50 МэВ
- Время пролёта (до каждого ФЭУ)  $\Rightarrow$  пространственное положение события в детекторе с точностью в 10 см на энергии в 1 МэВ
- Отбор событий по форме импульса

# Источники антинейтрино

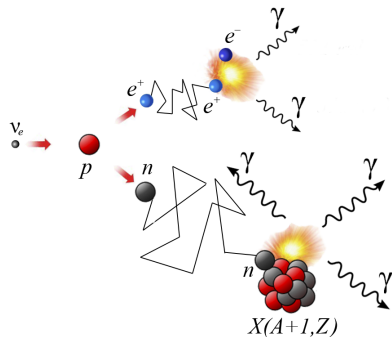


# Обратный $\beta$ -распад

Обратный  $\beta$ -распад  $\bar{\nu}_e + p \longrightarrow n + e^+ -$  основной процесс  
для детектирования антинейтрино

Реакция характеризуется четкой сигнатурой:

- мгновенное событие (prompt event) – аннигиляция  $e + e^+ \longrightarrow 2\gamma$   
Видимая энергия при условии пренебрежения отдачей нейтрона  $E_{\text{МГН}} = E_{\text{КИН}}(e^+) + m_{e^+} + m_{e^-} = E_{\bar{\nu}_e} + Q + 2m_e = E_{\bar{\nu}_e} - 0.784 \text{ МэВ}$
- запаздывающее событие (delayed event) – захват термализованного нейтрона с последующим испусканием  $\gamma$ -квантов  $n + X(A, Z) \longrightarrow X(A + 1, Z) + \gamma$



Реакция является пороговой,  $|Q| = m_n + m_{e^+} - m_p$ ,  $Q < 0$ ,

$$E_{\text{ПОР}} = |Q| \left( 1 + \frac{|Q|}{2m_p} \right), \text{ т.к. } m_{\bar{\nu}_e} \sim 0, \quad E_{\text{ПОР}} = 1.806 \text{ МэВ}$$

# Антинейтринная физика (Фазы 1 и 2)



- Измерение потока гео-нейтрино и исследования внутреннего строения Земли (проверка существующих моделей Земли)  
*Сопоставление результатов экспериментов Borexino и KamLand*
- Поиск вспышек сверхновых звёзд  
*Borexino участвует в глобальном проекте SNEWS*
- Получение оценки сверху на аномальный магнитный момент нейтрино путём поиска возможных осцилляций солнечных борных нейтрино в антинейтрино  
*Результат сильно зависит от модели Солнца*

# План (Фаза 1 и 2)



- Обновить текущие результаты на большей статистике
- Продолжить поиск вспышек сверхновых звёзд
- Поиск корреляций между (анти)нейтринными событиями и гамма-всплесками (GRB)
- Поиск корреляций в данных нейтринных экспериментов и экспериментов по поиску гравитационных волн
- Атмосферные антинейтрино низких энергий?  
*(десятки МэВ, обсуждается возможность измерения)*



# В ожидании вспышки сверхновой



SNEWS – SuperNova Early Warning System

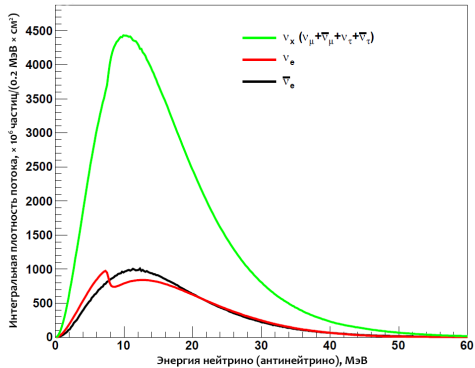
Система раннего оповещения о

вспышке сверхновой

В проекте участвуют следующие детекторы:

- Borexino
- IceCube

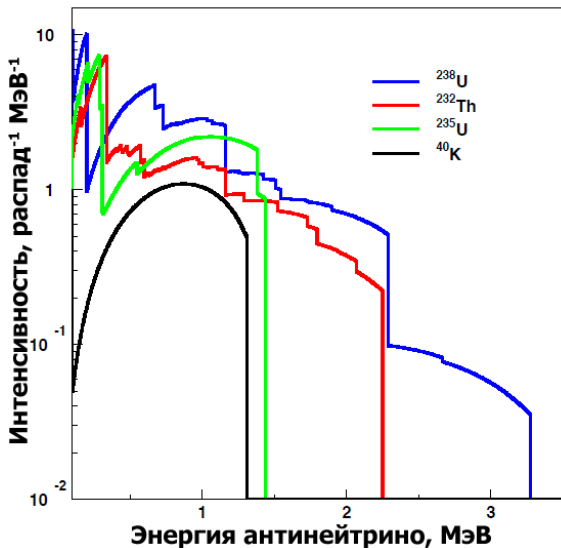
- LVD
- Super-KamiokaNDE







# Спектр гео-нейтрино



# Зачем измерять поток гео-нейтрино?

- 0) Подтвердить существование гео-нейтрино и оценить их поток
- 1) Объяснение наблюдаемого теплового потока из недр Земли
- 2) Исследования структуры и компонентного состава Земли

**Следствие:** новые данные о происхождении Земли и Солнечной системы





# Методы исследования строения Земли

- Сейсмические методы разведки (измерения скоростей распространения упругих волн в среде)
- Сбор и анализ химического состава образцов горных пород и мантии ([петрология](#))
- Лабораторные исследования свойств различных химических соединений при нестандартных внешних условиях (от сотен кПа до сотен ГПа, температура до нескольких тысяч К) [в том числе в рамках петрологии](#)
- Анализ химического состава метеоритов
- **Последние годы: Измерение потока гео-нейтрино**

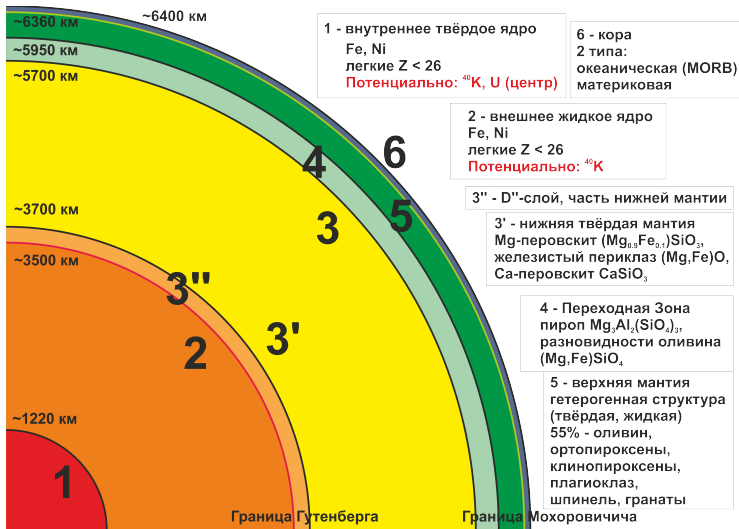
# Предварительная Эталонная Модель Земли

Англ: PREM, Preliminary Reference Earth Model





# Структура Земли



MORB - Mid-Ocean Ridge Basalts, базальты срединно-океанических хребтов

# Структура нижней мантии

В относительно однородной среде на границе с ядром выделяют крупные блоки разных размеров:

- LLSVPs, Large Low Shear Velocity Provinces – Большие Области Низких Скоростей Вторичных (Поперечных) Волн; существует две такие области; характерные размеры – 5000 км в длину и 1000 в высоту
- Зоны средних размеров, 1000 км в длину и 400 в высоту
- ULVZs, Ultra Low Velocity Zones – Области Сверхнизких Скоростей; 100 км в длину и 10 км в высоту

Неоднородности мантии потенциально могут изменить наблюдаемый поток гео-нейтрино

# Компонентный состав Земли

Описывается семейством Силикатных Моделей Земли (CM3, англ. BSE, Bulk Silicate Earth)

- Задаёт состав Первичной Мантии (Primitive Mantle), возникшей после выделения железно-никелевого ядра и до формирования коры и современной мантии
- В качестве опорного компонентного состава берётся состав хондритов (разновидность каменных метеоритов) с учётом химического состава солнечной фотосферы  
Считается, что хондриты образовались непосредственно из протопланетного облака
- Для Th, U и K используются хондритовые (массовые) соотношения  $m_{\text{Th}}/m_{\text{U}} = 3.9$ ,  $m_{\text{K}}/m_{\text{U}} = \sim 13000$

# Компонентный состав Земли

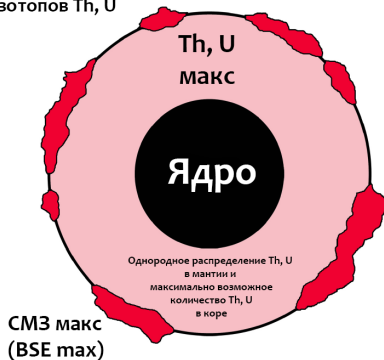
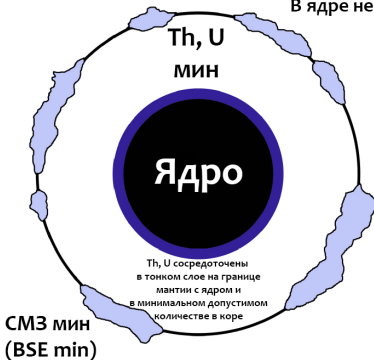
Описывается семейством Силикатных Моделей Земли (CM3, англ. BSE, Bulk Silicate Earth)

- Делают поправки двух видов
  - 1) Учитывают наблюдаемую распространённость элементов в земной коре и в потоках мантии при извержении вулканов
  - 2) Предполагают возможность потери планетой части своей массы\* в ходе эволюции

\* – вещества с низкой температурой конденсации

# Базовые приближения

В ядре нет изотопов Th, U



# Классификация моделей

Выделяют три категории моделей на основе предсказываемого ими радиогенного теплового потока:

- $Q = 10 - 15$  ТВт  
Частный случай – **космохимические модели**  
(энстатитные хондриты + столкновительная эрозия)
- $Q = 17 - 22$  ТВт (углеродистые хондриты + земные образцы)  
Частный случай – **геохимические модели**
- $Q > 25$  ТВт  
Частный случай – **геодинамические модели**  
(конвекция мантии + измерения потока тепла)

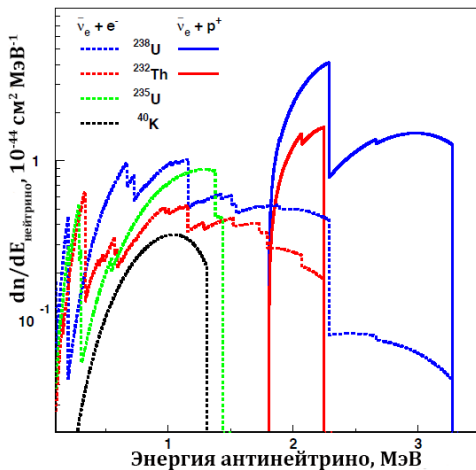
# Размеры детектора

Данные приводятся для обратного  $\beta$  -распада при использовании водородной мишени

Сечение взаимодействия	$\sim 10^{-43} \text{ см}^2$
Поток гео-нейтрино выше порога	$\sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Количество событий	10 – 100 TNU
"Свободных" протонов в мишени	$\sim 10^{32}$ шт.
Объём рабочего вещества (жидкость)	$\sim 10^3 \text{ м}^3$
Масса рабочего вещества (жидкость)	$\sim 1 \text{ кт}$

TNU, Terrestrial neutrino unit, Земная Нейтринная Единица – единица нейтринного потока, равная одному событию в мишени с  $10^{32}$  "свободными" протонами за один год.

# Энергетический спектр антинейтрино



Энергетический спектр антинейтрино, нормированный на один акт деления для  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ .



# Влияние осцилляций

Упрощения:

- Приближение для вакуума, так как учёт среды увеличивает вероятность антинейтрино сохранить свой флейвор на 2%
- $\Delta m_{31}^2 \sim \Delta m_{32}^2 \gg \Delta m_{21}^2$
- Малость пространственной длины когерентности по сравнению с радиусом Земли

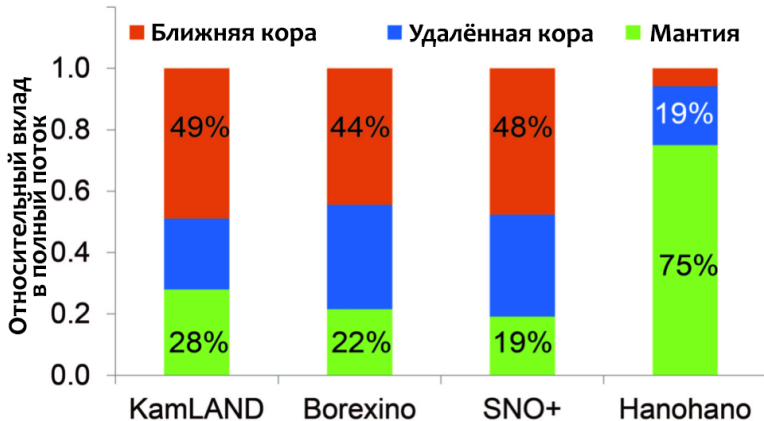
$$L \sim \pi c \hbar \frac{4E}{\Delta m_{21}^2}, \quad E \sim 3 \text{ МэВ} \implies$$

$$L \sim 100 \text{ км} \ll R_{\text{Земля}} \approx 6371 \text{ км}$$

В итоге:

$$\langle P_{ee} \rangle \simeq \cos^4 \theta_{13} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{12}\right) + \sin^4 \theta_{13} \sim 0.55$$

# Влияние окружения



Пример ожидаемых вкладов в гео-нейтринный сигнал от разных участков земного шара. Ближняя кора – земная кора, удалённая от детектора не более чем на 500 км.

# Гео-нейтрино: публикации Borexino

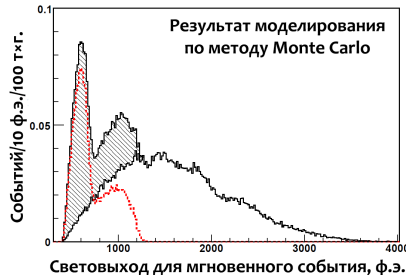
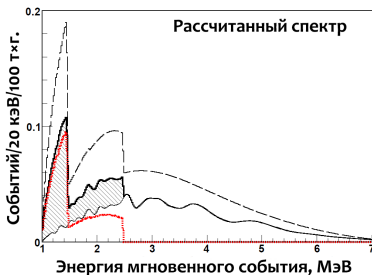
## Статьи:

- 1 G. Bellini et al., (Borexino Collaboration), Observation of geo-neutrinos, Phys. Lett. B 687 (2010) 299-304, arXiv:1003.0284v2.
- 2 G. Bellini et al., (Borexino Collaboration), Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino, Phys. Lett. B 722 (2013) 295-300, arXiv:1303.2571v2.
- 3 В 2015 году ожидается статья с результатами на большей (удвоенной) статистике.

## Обзоры:

- 1 G. Bellini, A. Ianni, L. Ludhova, F. Mantovani, W.F. McDonough, Geo-neutrinos, arXiv:1310.3732v1.
- 2 L. Ludhova, S. Zavatarelli, Studying the Earth with Geoneutrinos, Advances in High Energy Physics, Volume 2013 (2013), Article ID 425693, 16 pages, doi: 10.1155/2013/425693, arXiv:1310.3961v2.

# Предполагаемый спектр



*Штриховой пунктир:* спектр гео-нейтрино и реакторных при отсутствии осцилляций.

**Толстая чёрная линия:** полный спектр с учётом осцилляций.

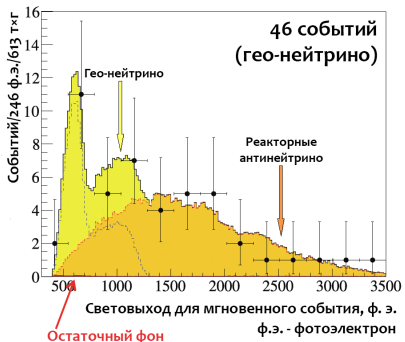
**Красный точечный пунктир:** спектр гео-нейтрино с учётом осцилляций.

*Заштрихованная область:* вклад от гео-нейтрино.

**Белая область под графиком:** вклад от реакторных антинейтрино.

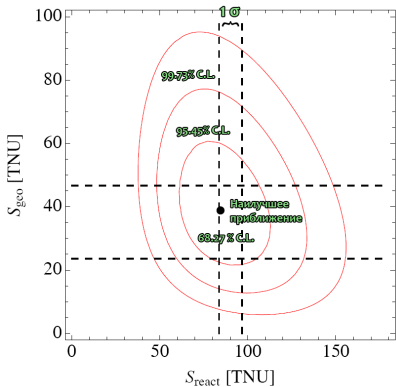
**Красный точечный пунктир:** гео-нейтрино.

# Гео-нейтрино: результаты



$$S_{geo} = 38.8 \pm 12.0 \text{ TNU}$$

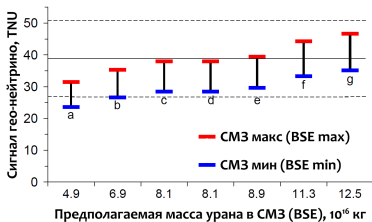
$$S_{react} = 84.5^{+19.3}_{-16.9} \text{ TNU}$$



# Гео-нейтрино: результаты

Экспозиция:  $(613 \pm 26)$  т·г или  $(3.69 \pm 0.16) \times 10^{31}$  протонов · год

$N_{реакт}$ модел. с осц.	$N_{реакт}$ модел. без осц.	Ост. фон	$N_{Гео}$ эксп.	$N_{реакт}$ эксп.
соб.	соб.	соб.	соб.	соб.
			TNU	TNU
$33.3 \pm 2.4$	$60.4 \pm 2.4$	$0.70 \pm 0.18$	$14.3 \pm 4.4$ $38.8 \pm 12.0$	$31.2^{+7}_{-6.1}$ $84.5^{+19.3}_{-16.9}$



BSE $S_{geo}$ [TNU]		Модели
- Min -	- Max -	
23.6	31.44	Javoy et al. (2010) (a)
26.6	35.24	Lyubetskaya & Korenaga (2007) (b)
28.4	37.94	McDonough & Sun (1995) (c)
28.4	37.94	Allegre et al. (1995) (d)
29.6	39.34	Palme & O'Neil (2004) (e)
33.3	44.24	Anderson (2007) (f)
35.1	46.64	Turcotte & Schubert (2002) (g)

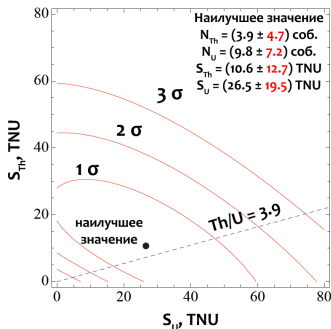
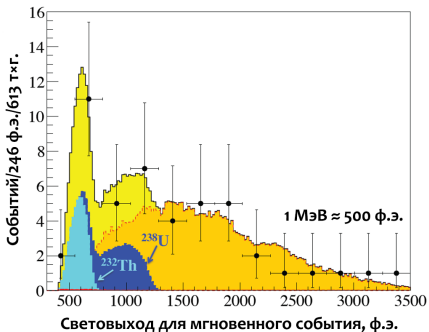
Отсутствие гео-нейтрино исключено **на уровне  $4.4 \sigma$  или 99.9989%**

Верхнее ограничение на мощность гео-реактора составляет

**4.5 ТВт с достоверностью 95%**

# Определение вкладов

От  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$



От коры и мантии

$$S_{\text{Measured}} = S_{\text{LOCal}} + S_{\text{Rest Of Crust}} + S_{\text{Mantle}}$$

	LOC TNU	ROC TNU	Measured TNU	Mantle TNU
Borexino	$9.7 \pm 1.3$	$13.7 \pm 2.5$	$38.8 \pm 12.0$	$15.4 \pm 12.3$
KamLAND	$17.7 \pm 1.4$	$7.3 \pm 1.4$	$31.1 \pm 7.3$	$6.1 \pm 7.6$

# Borexino и KamLAND

	Borexino	KamLAND
Depth.....	3600 m.w.e ( $\phi_\mu=1.2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	2700 m.w.e ( $\phi_\mu=5.4 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )
Scintillator mass.....	278 ton (PC+1.5g/l PPO)	1 kt (80% dodec.+20% PC+1.4g/l PPO)
Inner Detector .....	13 m sphere, 2212 8" PMT's	18 m sphere, 1325 17"+554 20" PMT's
Outer detector .....	2.4 kt HP water + 208 8" PMT's	3.2 kt HP water + 225 20" PMT's
Energy resolution.....	5% at 1 MeV	6.4% at 1 MeV
Vertex resolution .....	11 cm at 1 MeV	12 cm at 1 MeV
Reactors mean distance	~1170 km	~180 km

## Основные характеристики детекторов Borexino и KamLAND

	Borexino	KamLAND
Period	Dec 07 - Aug 12	Mar 02 - Nov 12
Exposure (proton · year)	$(3.69 \pm 0.16) 10^{31}$	$(4.9 \pm 0.1) 10^{32}$
Reactor- $\bar{\nu}_e$ events (no osc.)	$60.4 \pm 4.1$	$3564 \pm 145$
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ events	$0.13 \pm 0.01$	$207.1 \pm 26.3$
$^9\text{Li} - ^8\text{He}$ events	$0.25 \pm 0.18$	$31.6 \pm 1.9$
Accidental events	$0.206 \pm 0.004$	$125.5 \pm 0.1$
Total non- $\bar{\nu}_e$ backgrounds	$0.70 \pm 0.18$	$364.1 \pm 30.5$

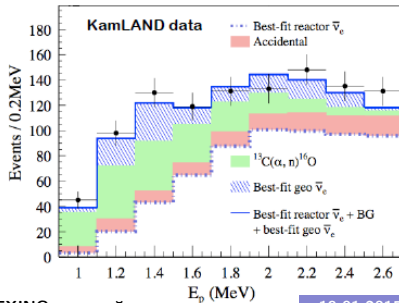
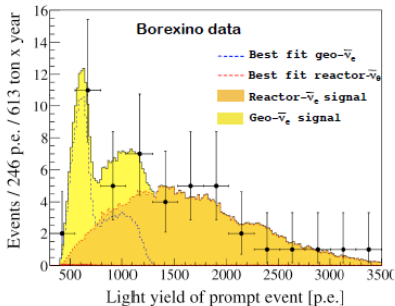
## Уровни наиболее важных фонов



# Borexino и KamLAND: результаты

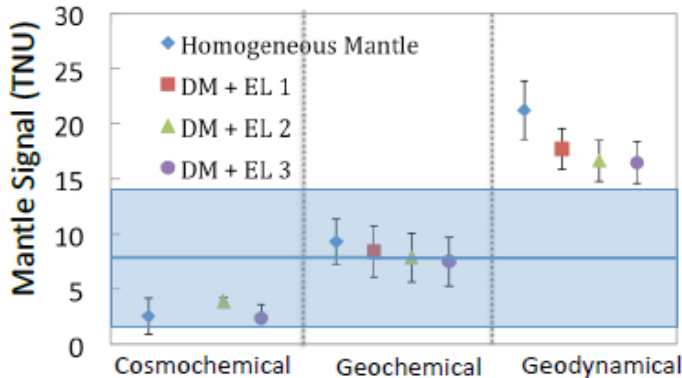
	Borexino	KamLAND
Period	Dec 07- Aug 12	Mar 02- Nov 12
Exposure (proton · year)	$(3.69 \pm 0.16) \cdot 10^{31}$	$(4.9 \pm 0.1) \cdot 10^{32}$
Geo- $\nu$ events	$14.3 \pm 4.4$	$116^{+28}_{-27}$
Geo- $\nu$ signal [TNU]	$38.8 \pm 12$	$30 \pm 7$
Geo- $\nu$ flux (oscill.) [ $\cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	$4.4 \pm 1.4$	$3.4 \pm 0.8$
Geo- $\nu$ signal/(not-oscill. anti- $\nu$ background)	0.23	0.032
Geo- $\nu$ signal/(non anti- $\nu$ background)	20.4	0.32

## Энергетические спектры мгновенных событий



# Сопоставление результатов

$$S_{\text{BX+KL}}(\text{Mantle}) = (7.7 \pm 6.2) \text{ TNU}$$



Сопоставление результатов совместного анализа данных экспериментов Borexino и KamLAND с предсказаниями разных моделей Земли. Обработка выполнена в

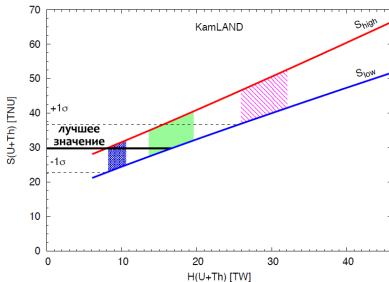
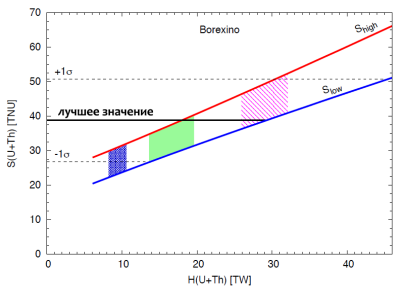
приближении сферически-симметричной мантии.

# Радиоогенный тепловой поток

Синяя область — космохимические СМЗ,

Зелёная область — геохимические СМЗ,

Заштрихованная пурпурная область — геодинамические СМЗ.



Borexino

$$S(U+Th) = 38.8 \pm 12.0 \text{ TNU}$$

KamLAND

$$S(U+Th) = 31.1 \pm 7.3 \text{ TNU}$$

# Стерильные нейтрино: эксп. указания

Несколько разных экспериментов наблюдали неизвестные сигналы на уровне  $\sim 3\sigma$ :

- Ускорительная аномалия ( $3.8\sigma$ )

В эксперименте LSND в пучке  $\nu_\mu$  наблюдался избыток  $\nu_e$  с низкими энергиями

Неизвестный сигнал на короткой базе?

- Галлиевая аномалия ( $2.8\sigma$ )

В ходе калибровочных рангов с нейтринными источниками в солнечных радиохимических экспериментах SAGE, GALLEX был зарегистрирован дефицит в скорости счёта  $\nu_e$ :  $R = 0.76 \pm 0.09$

- Реакторная антинейтринная аномалия ( $\sim 2.5\sigma$ )

Зафиксирован дефицит в скорости счёта во всех нейтринных реакторных экспериментах на короткой базе ( $L = 10 - 100$  м):  $R = 0.927 \pm 0.23$

Осцилляции электронных антинейтрино в стерильные  $\tilde{\nu}_e \rightarrow \nu_s$ ?

# Смешивание при стерильных нейтрино

В случае наличия легких стерильных нейтрино ( $m_\nu < 45$  ГэВ, непарные к  $Z^0$ -бозону) матрица смешивания ПМНС в общем виде

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_{s1} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} & \dots \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} & \dots \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} & \dots \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

+ дополнительные  $\Delta m^2$ :  $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2, \Delta m_{32}^2, \Delta m_{41}^2 \dots$

Будут наблюдаться новые виды осцилляций:

- 1) активное состояние  $\rightarrow$  стерильные

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_s) = \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right); \quad \sin^2 2\theta_{14} = 4|U_{14}|^2(1 - |U_{14}|^2)$$

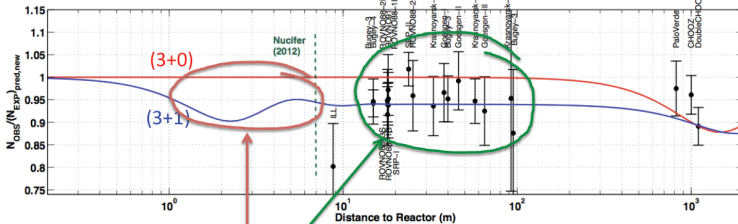
- 2) активное состояние  $\rightarrow$  активное

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right); \quad \sin^2 2\theta_{12} = 4|U_{14}|^2|U_{24}|^2$$

# Методы наблюдения

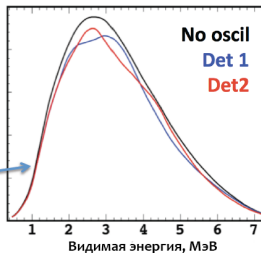
Текущий статус: отношение наблюдаемой скорости счёта антинейтрино к ожидаемой в зависимости от расстояния до активной зоны реактора

[1204.5379]



Сейчас: наблюдается только дефицит скорости счёта  
 “Новые” подходы к проблеме:

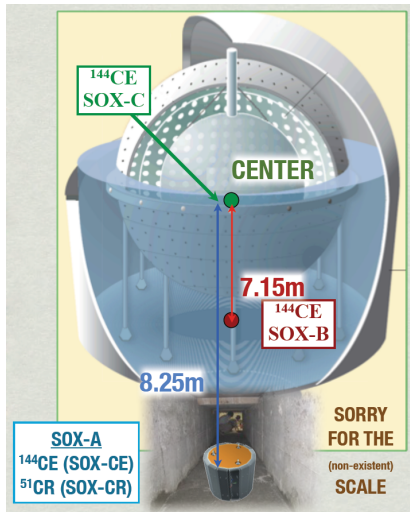
- измерение скорости счёта на короткой базе при разной удалённости от источника антинейтрино
  - 1) подвижный источник
  - 2) подвижный детектор
  - 3) несколько детекторов
- наблюдение изменения формы спектра в зависимости от расстояния до источника



# Short-distance Oscillations with BoreXino

## Задачи:

- "Открыть/закрыть" стерильные нейтрино, исходя из нейтринной осциллометрии на короткой базе
- $\Delta m_{41}^2, \theta_{14}$ ?
- Прецизионные измерения угла Вайнберга на энергиях  $\sim 1$  МэВ
- Измерение аномального магнитного момента нейтрино
- Измерение  $g_A$  и  $g_V$  в области низких энергий (единицы МэВ)



# CeSOX: $^{144}\text{Ce}/\text{Pr}$ как источник $\tilde{\nu}_e$

Источник	$^{144}\text{Ce}/\text{Pr}$
Производство	выделение из отработавшего ядерного топлива
Канал распада	$\beta^-$
Спектр антинейтрино	$< 3 \text{ МэВ}$
Начальная активность	$4 \cdot 10^{15} \text{ Бк (100 кКи)}$
Период полураспада	285 дней
Экспозиция	около 1.5 лет
Масса мишени	240 т
Длина осцилляций ( $\Delta m^2 = 2 \text{ эВ}^2$ )	$< 3.6 \text{ м}$
Событий за 1.5 года	$10^4$
Тепловыделение	7.6 Вт/кКи

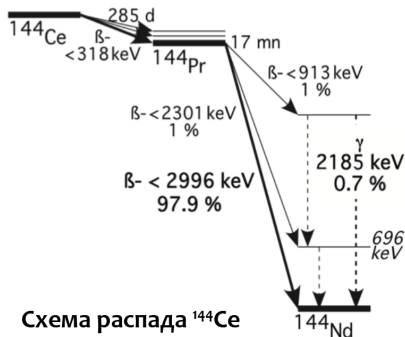
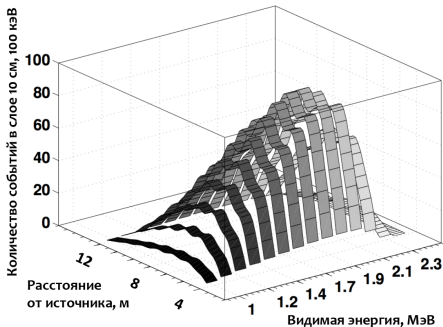


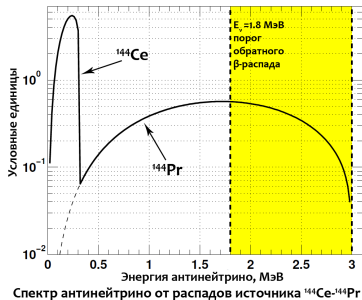
Схема распада  $^{144}\text{Ce}$



# Ожидаемый сигнал от $^{144}\text{Ce}/\text{Pr}$

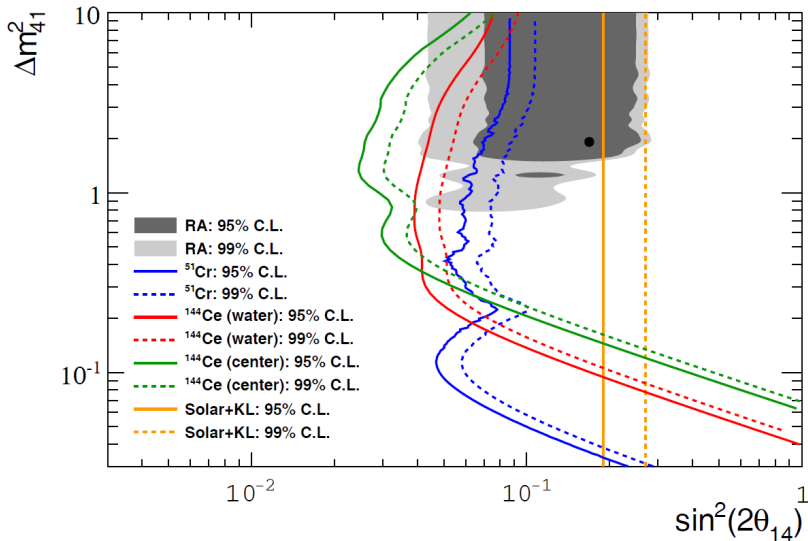


Осциллометрический профиль для второй фазы SOX

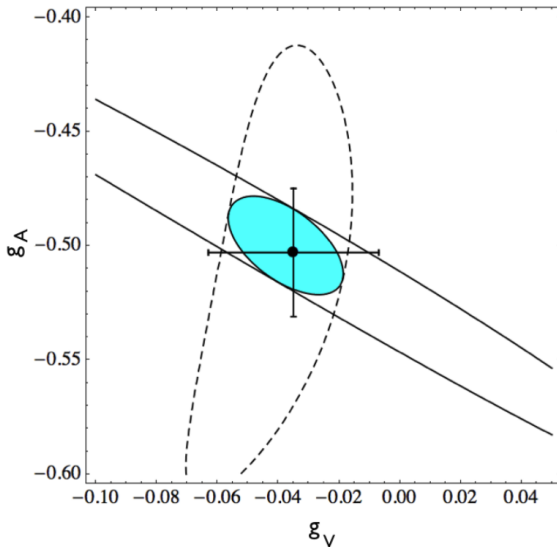


Спектр антинейтрино от распадов источника  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$

# SOX: эксперимент на "закрытие"



# Предполагаемые значения $g_A$ и $g_V$



# Заключение

## Результаты:

- достигнуты хорошие фоновые условия и отработана методика регистрации антинейтрино
- измерен поток гео-нейтрино и наложены новые ограничения на модели строения Земли; текущих результатов недостаточно для однозначных выводов

## Перспективы:

- увеличение точности измерения потока гео-нейтрино (большая статистика)
- программа исследований вспышек сверхновых звёзд, гамма-всплесков и другая экзотическая физика
- исследование осцилляций и смешивания на короткой базе; проверка гипотезы о существовании стерильных нейтрино
- измерение  $g_A$  и  $g_V$  в области низких энергий