



Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино

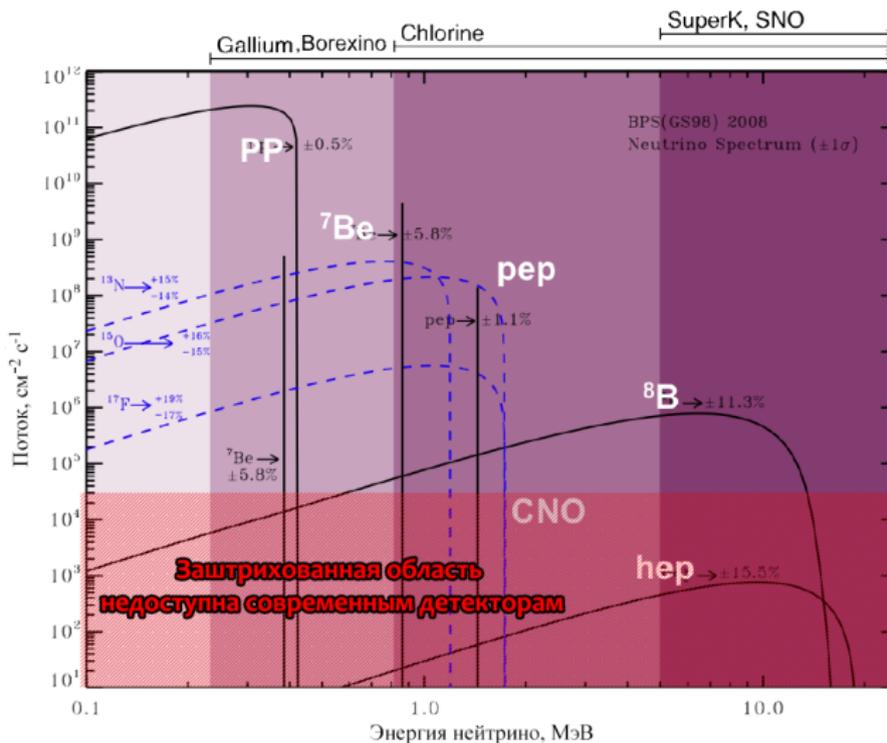
Громов М.Б., Чепурнов А.С.
от имени коллаборации Борексино

Семинар Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН

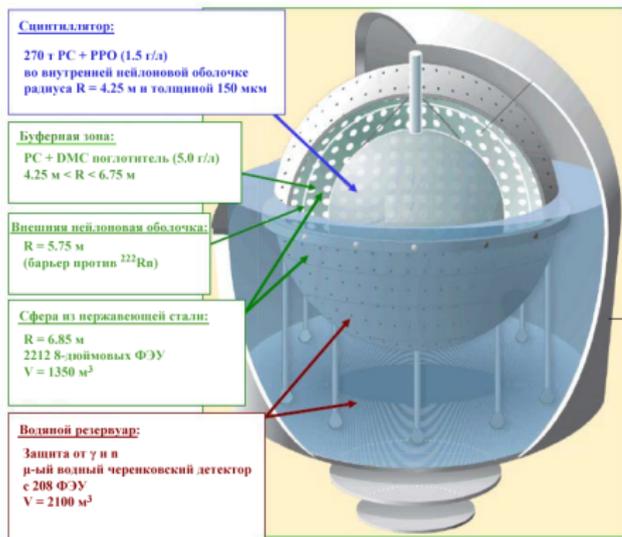
19.01.2015



Vorexino: солнечная программа



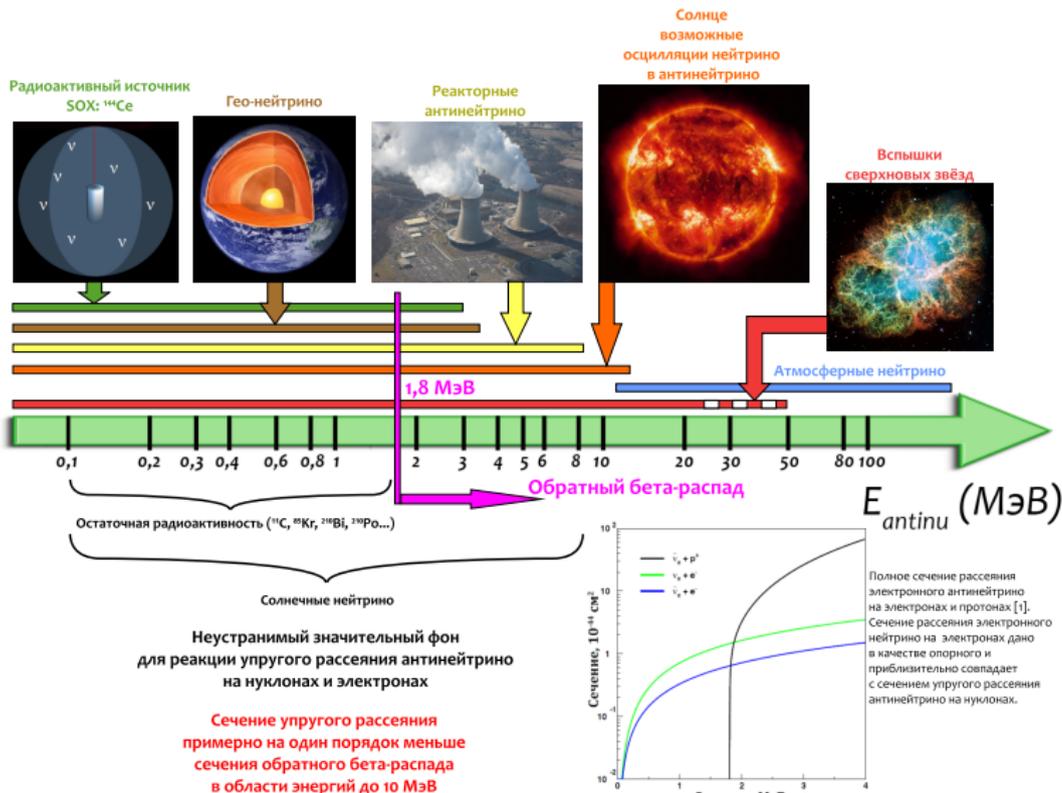
Детектор Borexino



- Жидко-сцинтилляционный детектор
- Размещён в подземной лаборатории
1400 м \Leftrightarrow 3800 м.в.э. или
1.2 мюона/(ч · м²)
- 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, ~ 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

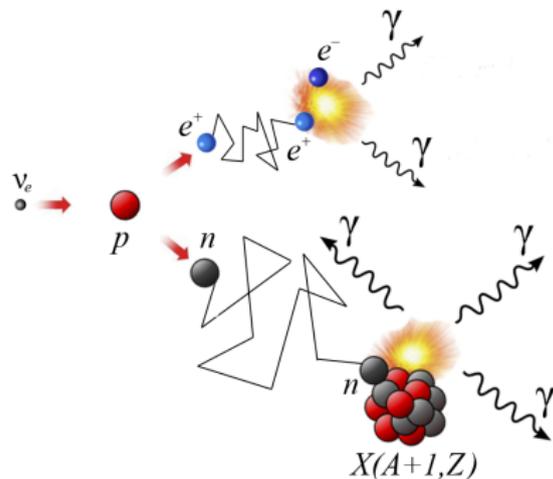


Обратный β -распад

Обратный β -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 γ -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

В ожидании вспышки сверхновой



SNEWS – SuperNova Early Warning System

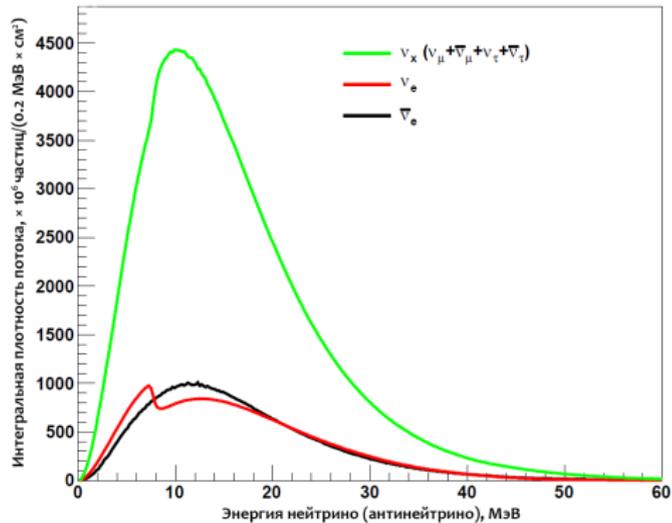
Система раннего оповещения о

вспышке сверхновой

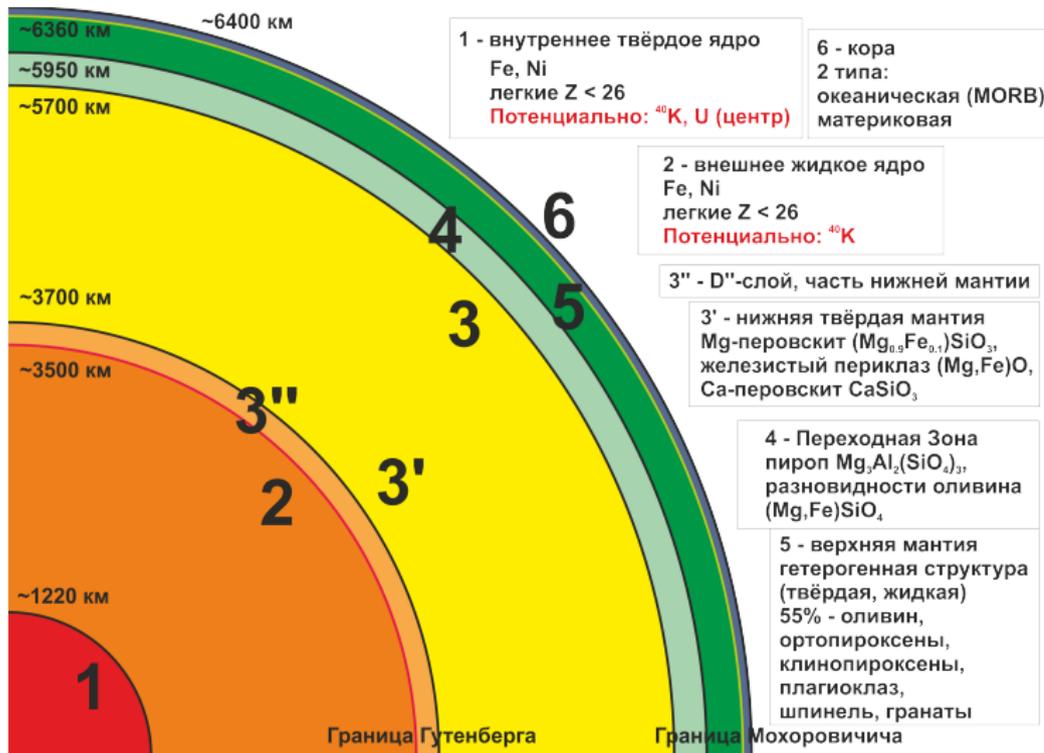
В проекте участвуют следующие детекторы:

- Borexino
- IceCube

- LVD
- Super-KamiokaNDE



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

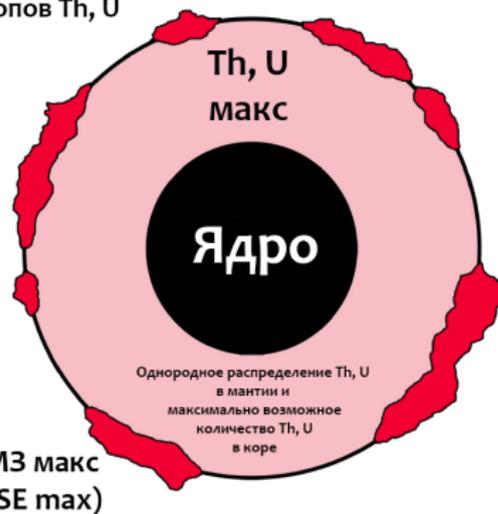
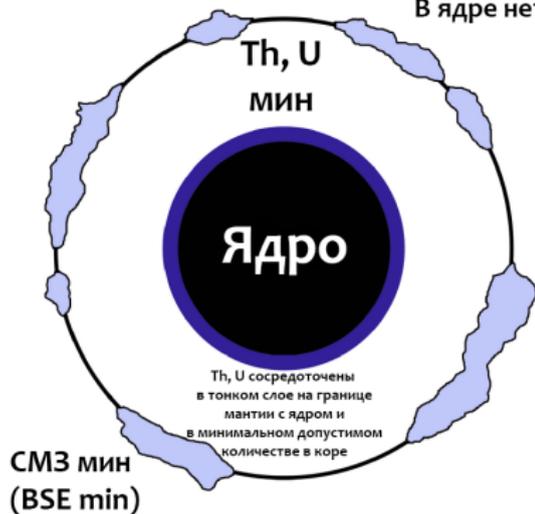
Описывается семейством Силикатных Моделей Земли (CM3, англ. BSE, Bulk Silicate Earth)

- 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:

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

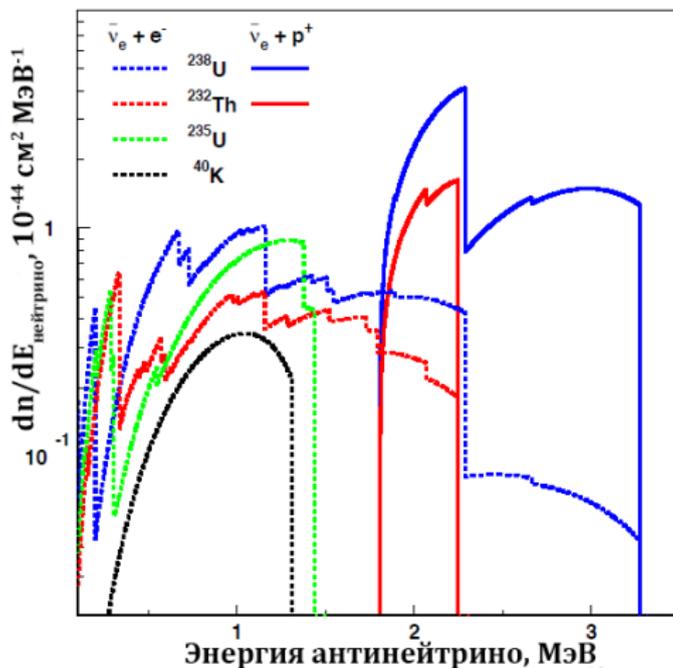
Размеры детектора

Данные приводятся для обратного β -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}U , ^{235}U , ^{232}Th и ^{40}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

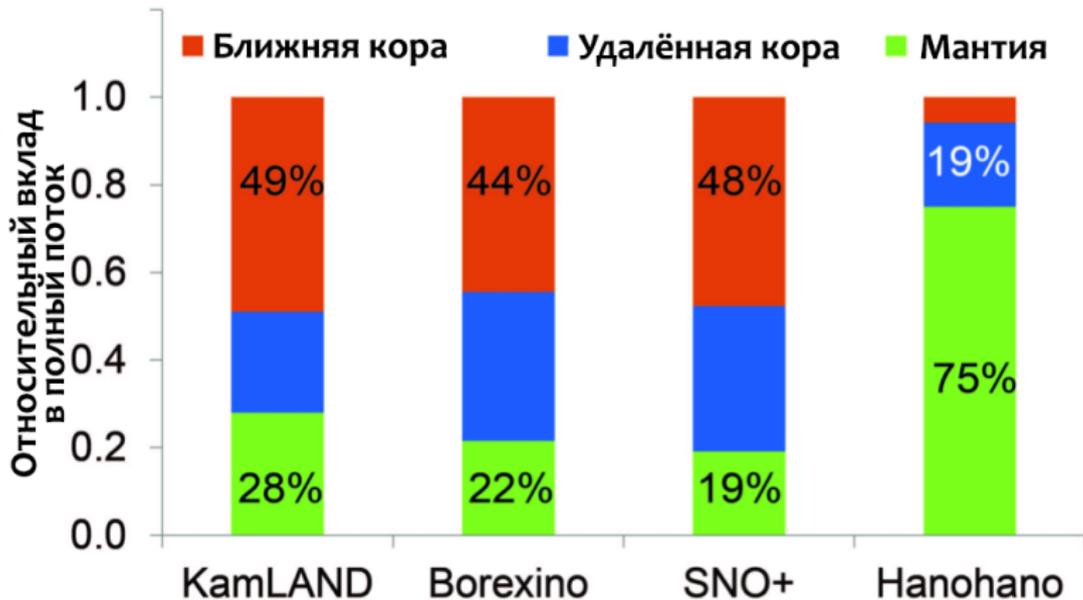
$$L \sim \pi c \hbar \frac{4E}{\Delta m_{21}^2}, \quad E \sim 3 \text{ МэВ} \implies$$

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

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

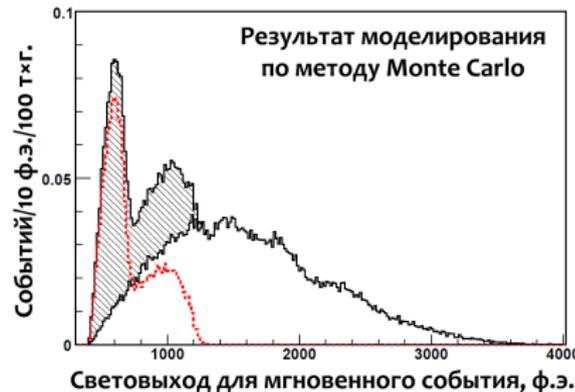
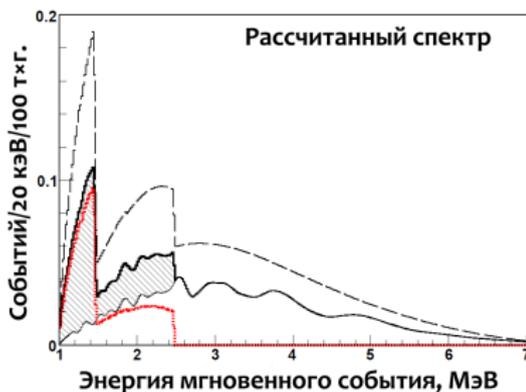
Статьи:

- 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.

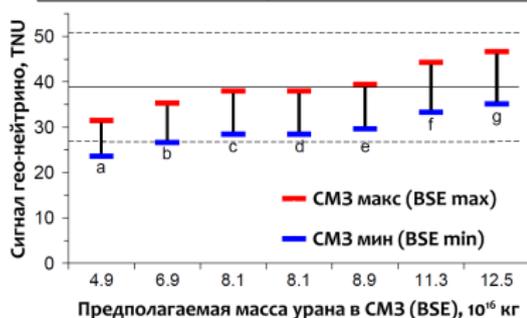
Белая область под графиком: вклад от реакторных антинейтрино.

Красный точечный пунктир: гео-нейтрино.

Гео-нейтрино: результаты

Экспозиция: (613 ± 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 ± 2.4 | 60.4 ± 2.4 | 0.70 ± 0.18 | 14.3 ± 4.4 38.8 ± 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) |

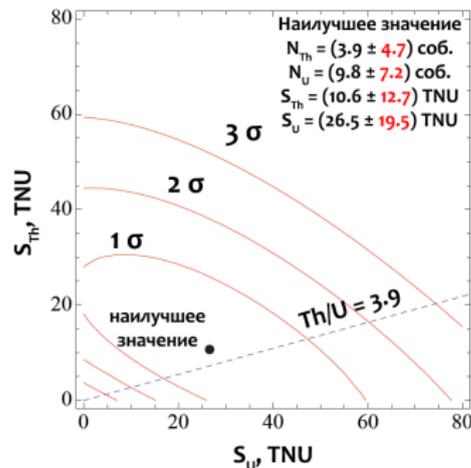
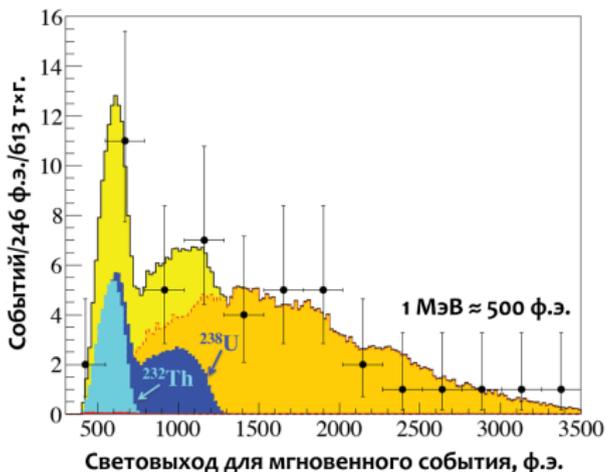
Отсутствие гео-нейтрино исключено **на уровне 4.4σ или 99.9989%**

Верхнее ограничение на мощность гео-реактора составляет

4.5 ТВт с достоверностью 95%

Определение вкладов

От ^{232}Th и ^{238}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 ± 1.3 | 13.7 ± 2.5 | 38.8 ± 12.0 | 15.4 ± 12.3 |
| KamLAND | 17.7 ± 1.4 | 7.3 ± 1.4 | 31.1 ± 7.3 | 6.1 ± 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

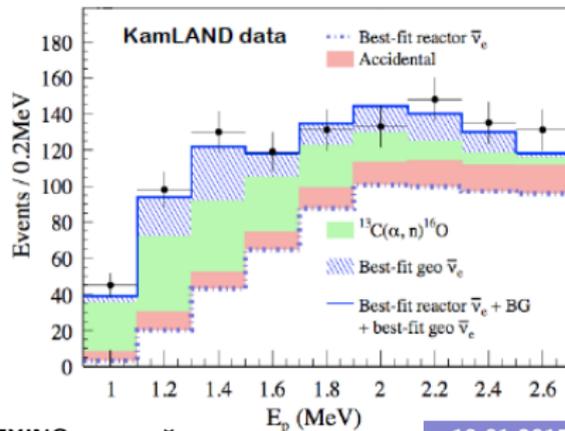
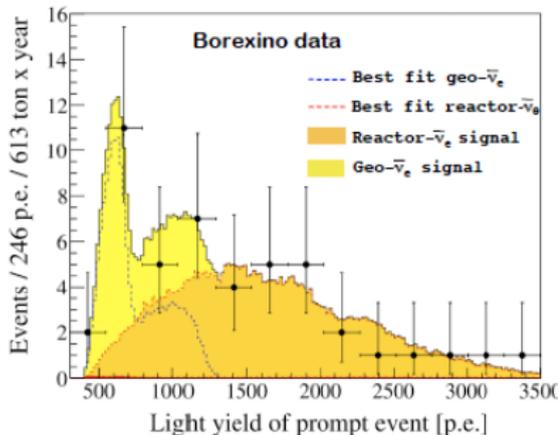
| | Borexino | KamLAND |
|--|---------------------------|-------------------------|
| Period | Dec 07 - Aug 12 | Mar 02 - Nov 12 |
| Exposure (proton · year) | $(3.69 \pm 0.16) 10^{31}$ | $(4.9 \pm 0.1) 10^{32}$ |
| Reactor- $\bar{\nu}_e$ events (no osc.) | 60.4 ± 4.1 | 3564 ± 145 |
| $^{13}\text{C}(\alpha,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

Уровни наиболее важных фонов

Borexino и KamLAND: результаты

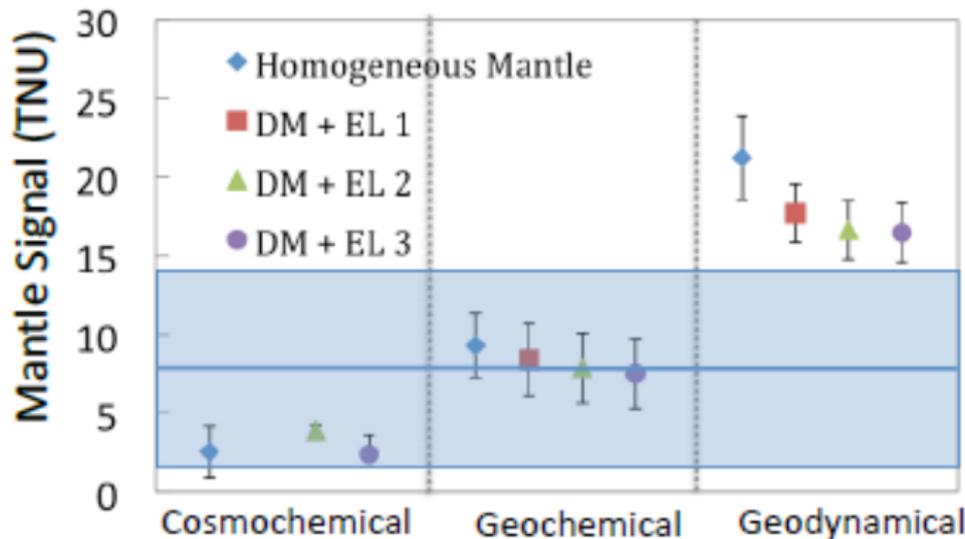
| | Borexino | KamLAND |
|---|---------------------------|-------------------------|
| Period | Dec 07- Aug 12 | Mar 02- Nov 12 |
| Exposure (proton · year) | $(3.69 \pm 0.16) 10^{31}$ | $(4.9 \pm 0.1) 10^{32}$ |
| Geo- ν events | 14.3 ± 4.4 | 116^{+28}_{-27} |
| Geo- ν signal [TNU] | 38.8 ± 12 | 30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

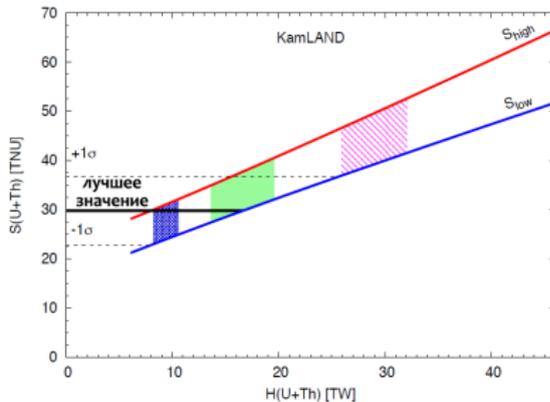
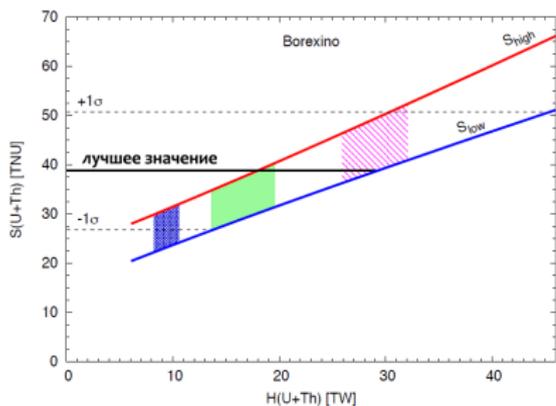
приближении сферически-симметричной мантии.

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 (3.8σ)

В эксперименте LSND в пучке ν_μ наблюдался избыток ν_e с низкими энергиями

Неизвестный сигнал на короткой базе?

- Галлиевая аномалия (2.8σ)

В ходе калибровочных рангов с нейтринными источниками в солнечных радиохимических экспериментах SAGE, GALLEX был зарегистрирован дефицит в скорости счёта ν_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 Δm^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

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

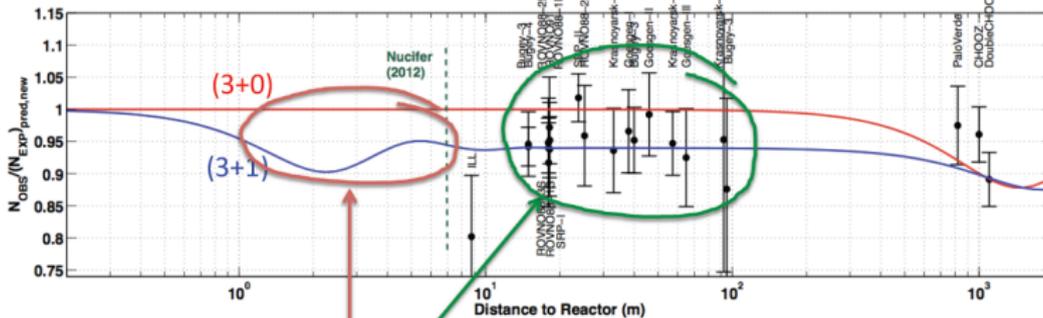
- 2) активное состояние \rightarrow активное

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

Методы наблюдения

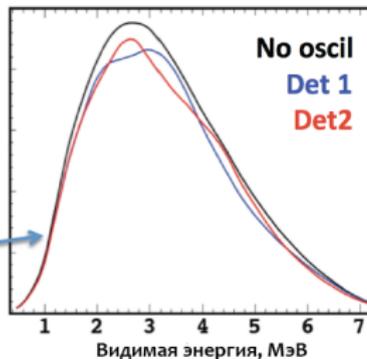
Текущий статус: отношение наблюдаемой скорости счёта антинейтрино к ожидаемой в зависимости от расстояния до активной зоны реактора

[1204.5379]



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

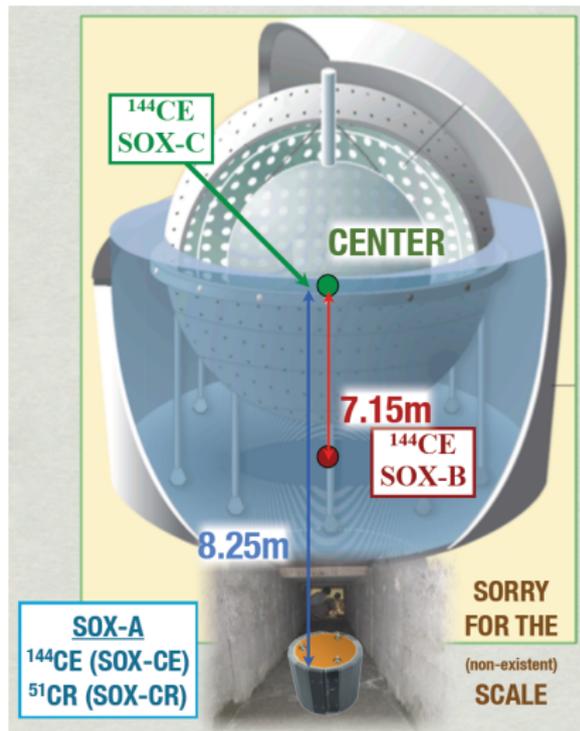
- измерение скорости счёта на короткой базе при разной удалённости от источника антинейтрино
 - 1) подвижный источник
 - 2) подвижный детектор
 - 3) несколько детекторов
- наблюдение изменения формы спектра в зависимости от расстояния до источника



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 ~ 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 | β^- |
| 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 |

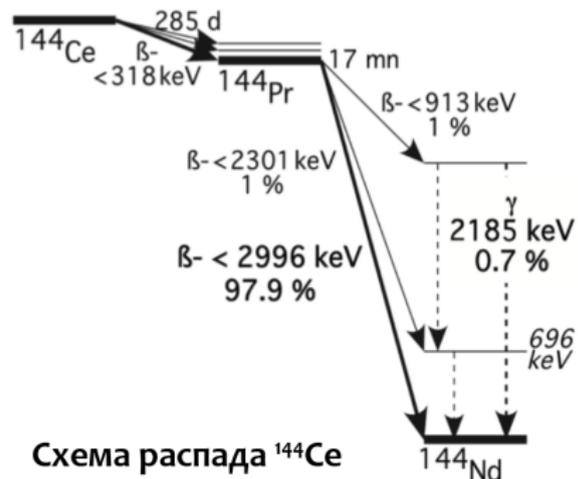
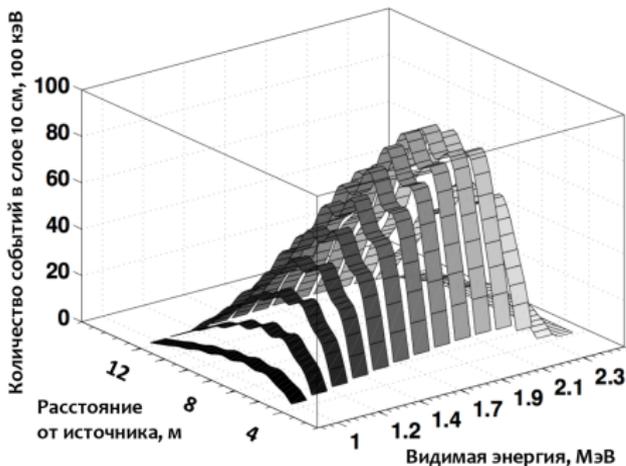
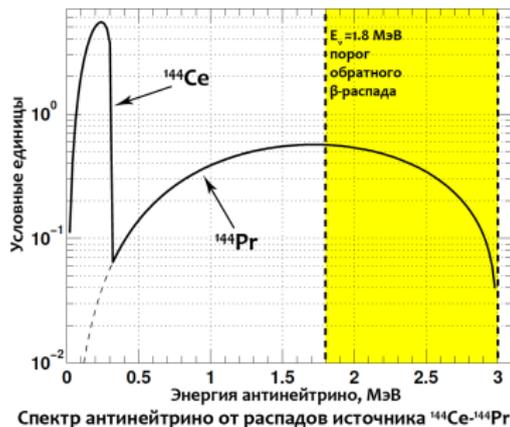


Схема распада ^{144}Ce

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

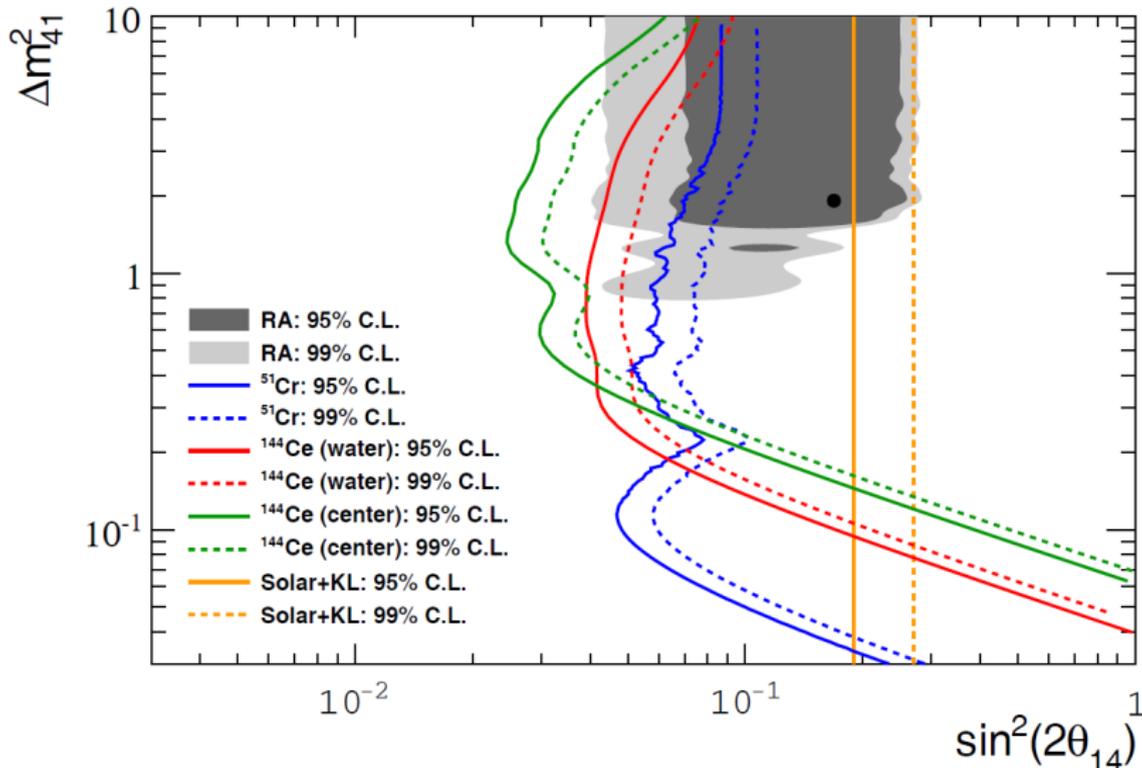


Осциллометрический профиль для второй фазы SOX

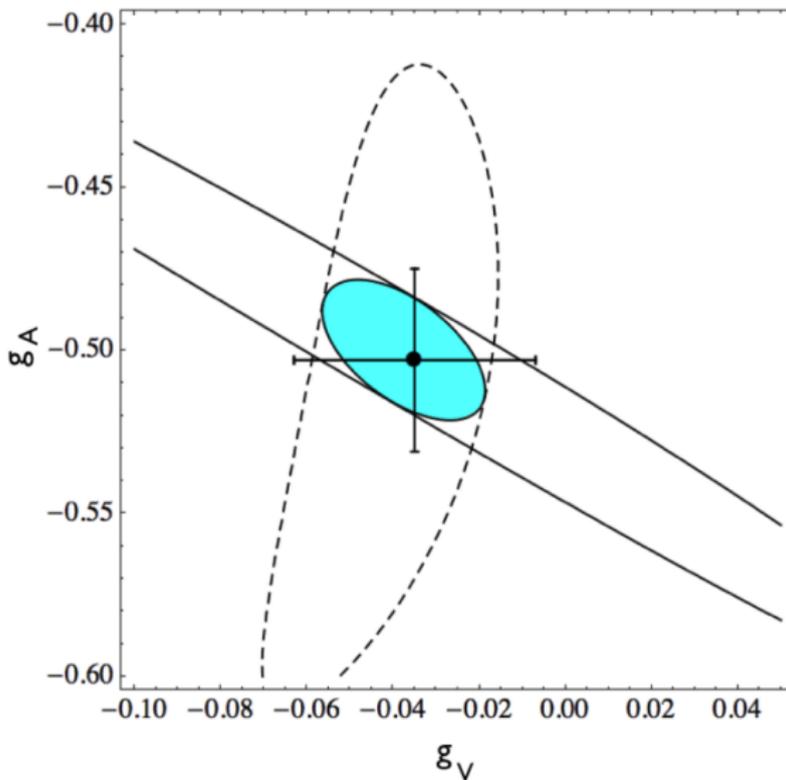


Спектр антинейтрино от распадов источника $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$

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