

Регистрация нейтрино с энергиями от 1 до 50 МэВ с помощью детектора BOREXINO

Громов Максим Борисович,
Чепурнов Александр Сергеевич
от имени коллаборации Борексино (Borexino)

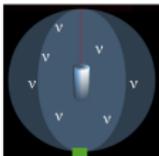
НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ

XI Черенковские чтения

17.04.2018

Источники нейтрино с энергиями от 200 кэВ до 50 МэВ

Нейтрино от искусственных источников



Реакторные антинейтрино



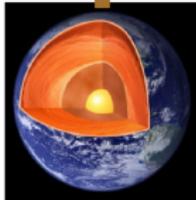
Астрофизические нейтрино: вспышки сверхновых звёзд, DSNB, гамма-всплески



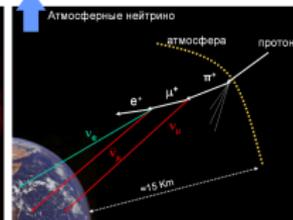
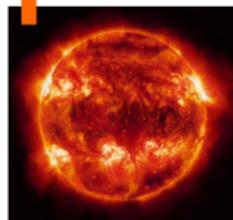
1,8 МэВ ← Обратный бета-распад

Атмосферные нейтрино

Гео-нейтрино



Солнечные нейтрино



Научная программа эксперимента 2017 года

2007

- ФАЗА I
- Солнечные нейтрино (${}^7\text{Be-}\nu$, **сезонные модуляции**, ${}^8\text{B-}\nu$ от 3 МэВ, **реп-ν**, CNO-ν предел),
- **Гео-ν**, пределы на редкие процессы (эл/м св-ва ν, нестандартные осцилляции), SNEWS

Первая калибровочная кампания: 2008-2011

2010

- **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА СЦИНТИЛЛЯТОРА**
- 6 циклов водной экстракции

2011

- ФАЗА II
- Солнечные нейтрино (**pp-ν ±11%**, ${}^7\text{Be-}\nu$, сезонные модуляции, ${}^8\text{B-}\nu$, реп-ν, **CNO-ν?**, hep-ν предел),
- **Гео-ν**, пределы на редкие процессы (GRB-ν, GW-ν, DSNB, эл/м св-ва ν, ...), SNEWS

Вторая калибровочная кампания: 2018

2018

- ФАЗА III: SOX
- **Поиск стерильных нейтрино с помощью источника антинейтрино ${}^{144}\text{Ce-}{}^{144}\text{Pr}$**
- SNEWS, исследования редких процессов

Научная программа эксперимента 2018 года

2007

- **ФАЗА I**
- Солнечные нейтрино (**${}^7\text{Be-}\nu$** , **сезонные модуляции**, ${}^8\text{B-}\nu$ от 3 МэВ, **реп-ν**, CNO-ν предел),
- **Гео-ν**, пределы на редкие процессы (эл/м св-ва ν, нестандартные осцилляции), SNEWS

Первая калибровочная кампания: 2008-2011

2010

- **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА СЦИНТИЛЛЯТОРА**
- 6 циклов водной экстракции

2011

- **ФАЗА II**
- Солнечные нейтрино (**pp-ν ±11%**, ${}^7\text{Be-}\nu$, сезонные модуляции, ${}^8\text{B-}\nu$, реп-ν, **CNO-ν?**, hep-ν предел),
- **Гео-ν**, пределы на редкие процессы (GRB-ν, GW-ν, DSNB, эл/м св-ва ν, ...), SNEWS

2018

- **ФАЗА II: ПРОДОЛЖЕНИЕ**
- **Солнечные нейтрино (CNO-ν)**
- Гео-ν, GW-ν, SNEWS,...

Вторая калибровочная кампания: 2019-2020?

Регистрация нейтринного излучения в детектореorexino

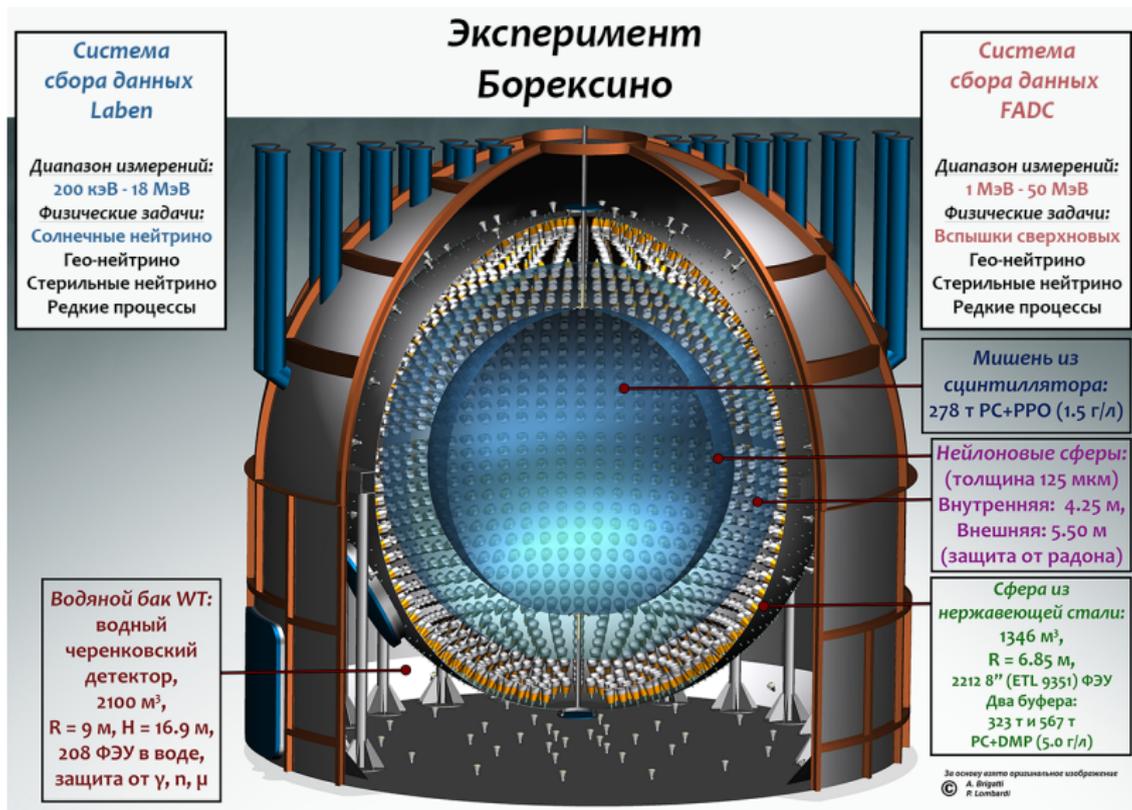
arXiv:1402.6953v1 [astro-ph.SR] 27 Feb 2014

№	Реакция	$E'_{\text{пор}}$, МэВ	Комментарий
1	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ (мгн.) $n + p \rightarrow d + \gamma$ (2.22 MeV) (зап.)	1.806	Обратный β-распад (ОБР) Основной канал СС
2	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	-	Упругое рассеяние (УР) на электронах NC Основной канал (с ν_e)
3	$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$	-	УР на протонах NC
4	$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu_x$ ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ (15.11 MeV)	15.11	Сверхразрешённый NC и монолиния
5	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$ ${}^{12}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e$	17.34	Сверхразрешённый СС и β^+ -распад СС
6	$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$ ${}^{12}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^- + \bar{\nu}_e$	14.37	Сверхразрешённый СС и β^- -распад СС
7	$\nu_e + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + e^-$ ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	2.22	Сверхразрешённый СС и β^+ -распад СС
8	$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{B} + p + \nu_x$	$\simeq 15.9$	Выбивание протона NC
9	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{C} + p + e^-$	~ 15	Выбивание протона СС

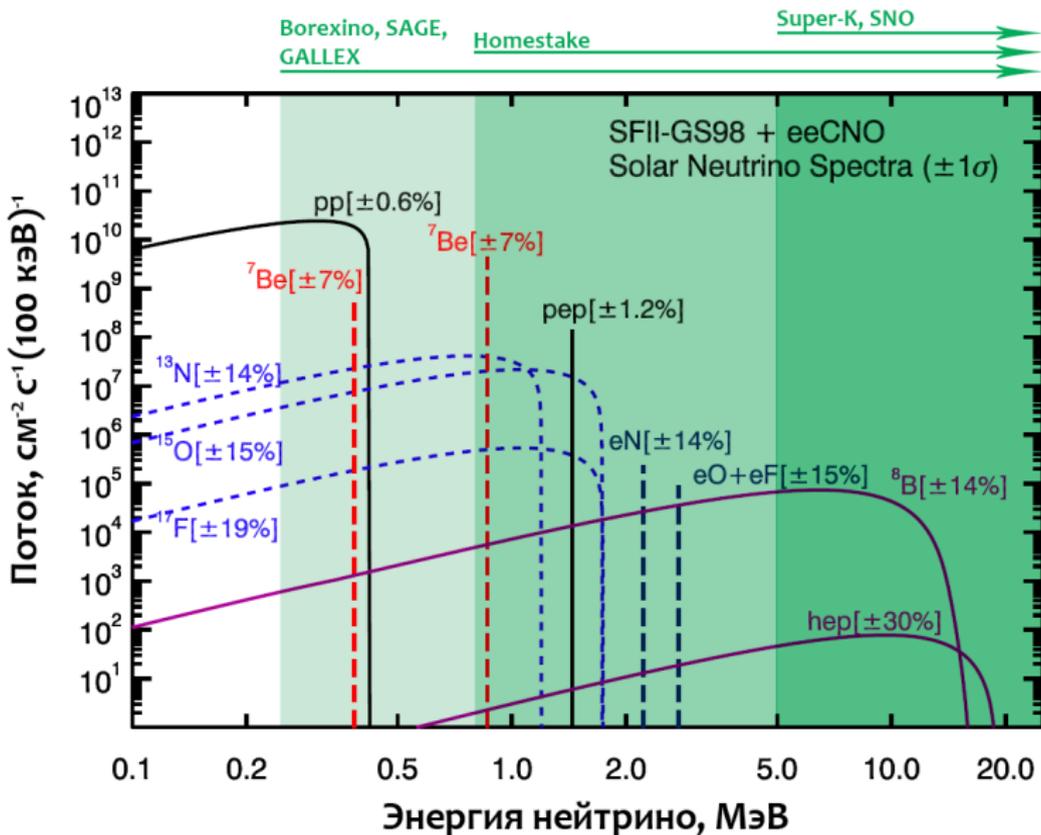
NC -- Neutral Current, реакция через Нейтральный Ток;

СС -- Charged Current, реакция через Заряженный Ток.

orexino - низкофоновый ЖС детектор реального времени



Теоретические спектры нейтрино от Солнца (SFII-GS98 + $\text{eCNO-}\nu$)



Солнечные нейтрино - результаты 2017 года

свд - событий в день; Д.И. - доверительный интервал

arXiv:1707.09279v2 [hep-ex] 1 Dec 2017

Солнечные нейтрино	Borexino	B16(GS98)-HZ	B16(AGSS09)-LZ
	скорость счёта в свд/100т, поток в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$		
pp	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$ $(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \cdot 10^{10}$	131.0 ± 2.4 $5.98 \cdot (1 \pm 0.006) \cdot 10^{10}$	132.1 ± 2.3 $6.03 \cdot (1 \pm 0.005) \cdot 10^{10}$
${}^7\text{Be}$	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$ $(4.99 \pm 0.13^{+0.07}_{-0.10}) \cdot 10^9$	47.8 ± 2.9 $4.93 \cdot (1 \pm 0.06) \cdot 10^9$	43.7 ± 2.6 $4.50 \cdot (1 \pm 0.06) \cdot 10^9$
per (HZ)	$2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$ $(1.27 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.12}) \cdot 10^8$	2.74 ± 0.05 $1.44 \cdot (1 \pm 0.009) \cdot 10^8$	2.78 ± 0.05 $1.46 \cdot (1 \pm 0.009) \cdot 10^8$
per (LZ)	$2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$ $(1.39 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.13}) \cdot 10^8$	2.74 ± 0.05 $1.44 \cdot (1 \pm 0.009) \cdot 10^8$	2.78 ± 0.05 $1.46 \cdot (1 \pm 0.009) \cdot 10^8$
CNO	< 8.1 (95% Д.И.) $< 7.9 \cdot 10^8$ (95% Д.И.)	4.91 ± 0.56 $4.88 \cdot (1 \pm 0.11) \cdot 10^8$	3.52 ± 0.37 $3.51 \cdot (1 \pm 0.10) \cdot 10^8$

1) Точность результата для pp -ν улучшена на 30% по сравнению с предыдущим (2014)

2) Результаты для ${}^7\text{Be}$ -ν точнее, чем предсказания солнечных моделей для HZ и LZ

3) Наилучшее указание на существование per -ν (отсутствие исключено с 5σ)

4) Лучшее текущее ограничение на поток CNO-ν

Солнечные нейтрино - сравнение результатов фазы I и фазы II

Новые результаты согласуются в пределах 1σ с предыдущими

свд - событий в день

Солнечные нейтрино	Фаза I	Фаза II	Уменьшение погрешности
	скорость счёта в свд/100 т		
pp	$144 \pm 13 \pm 10$	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	0.78
${}^7\text{Be}$ (862 + 384 кэВ)	$48.3 \pm 2.0 \pm 0.9$	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	0.57
pep	$3.1 \pm 0.6 \pm 0.3$	(HZ) $2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$ (LZ) $2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	0.61
${}^8\text{B}$	$0.217 \pm 0.038 \pm 0.008$	$0.220^{+0.015}_{-0.016} \pm 0.006$	0.42

Относительная погрешность измерения потока ${}^7\text{Be}-\nu$ по данным 2017 года составляет $\sim 2.7\%$

Гео-нейтрино и проблема теплового излучения Земли

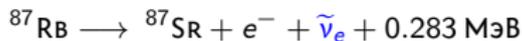
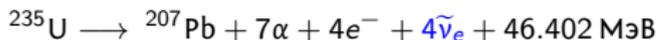
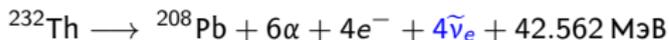
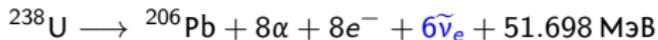
Сравнение разных источников подогрева Земли

Источник	Тепловыделение, Вт/м ²
Солнце	~ 1370
Недра Земли	~ (0.06 – 0.09)
Космические лучи	~ 10 ⁻⁸

Полный поток из недр Земли (47 ± 2) ТВт (~ 20000 ядерных реакторов!), где доля **радиогенного тепла** около 10 – 35 ТВт (согласно разным СМЗ (BSE))

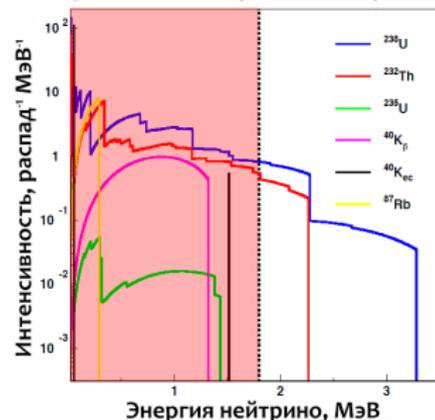
Ожидаемый поток гео-нейтрино на поверхности Земли $\Phi_{\tilde{\nu}} \sim 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Распады долгоживущих радиоактивных изотопов, дающих основной вклад в тепловой поток:



Громов М.Б. (НИИЯФ МГУ)

Регистрация $\tilde{\nu}_e$: обратный β-распад



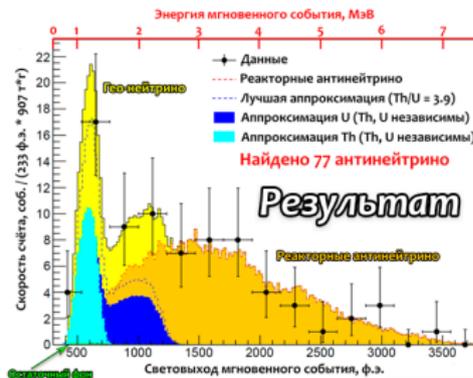
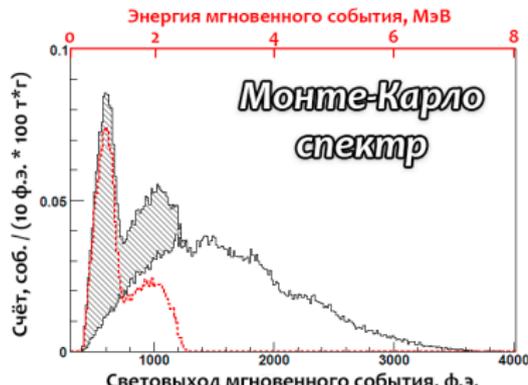
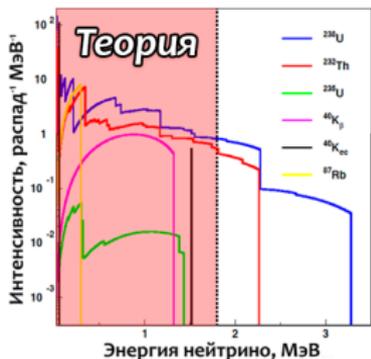
Регистрация нейтрино 1 – 50 МэВ вorexino

17.04.2018

10 / 25

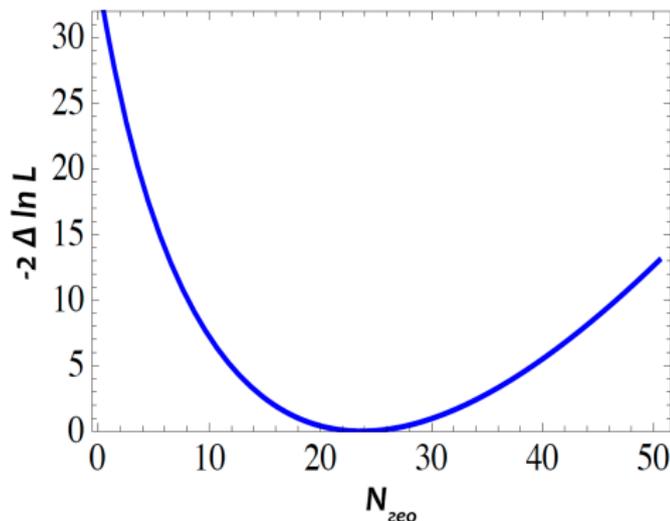
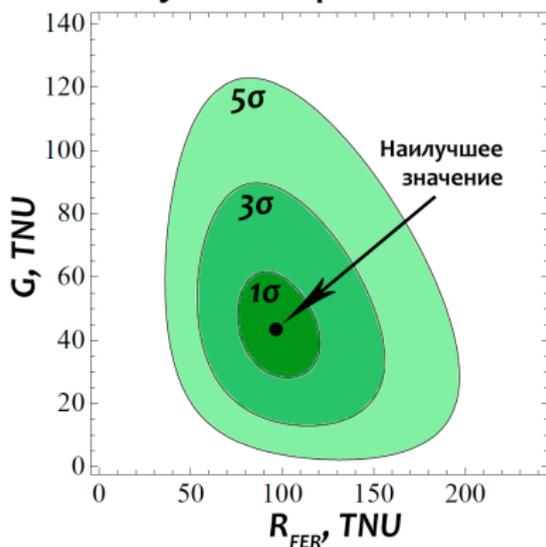
Спектр гео-нейтрино в детекторе Vorexino

Расчёт [1]: $R = 83.3^{+2.0}_{-1.9}$ TNU (реакторы), $G = 40.3^{+7.3}_{-5.8}$ TNU (гео-нейтрино)



Разделение вкладов от гео-нейтрино и реакторных антинейтрино

Результаты применения метода максимального правдоподобия



Зарегистрировано $N_{\text{Гео}} = 23.7^{+6.5}_{-5.7} +0.9_{-0.6}$ соб.,

гео-нейтринный сигнал $G_{\text{экс}} = 43.5^{+11.8}_{-10.4} +2.7_{-2.4}$ TNU,

поток $\Phi = (5.0 \pm 1.3) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Гипотеза отсутствия гео-нейтрино исключена с достоверностью $\sim 5.9\sigma$
(вероятность отсутствия гео-нейтрино $P = 3.6 \cdot 10^{-9}$).

Сравнение результатов по регистрации потока гео-нейтрино

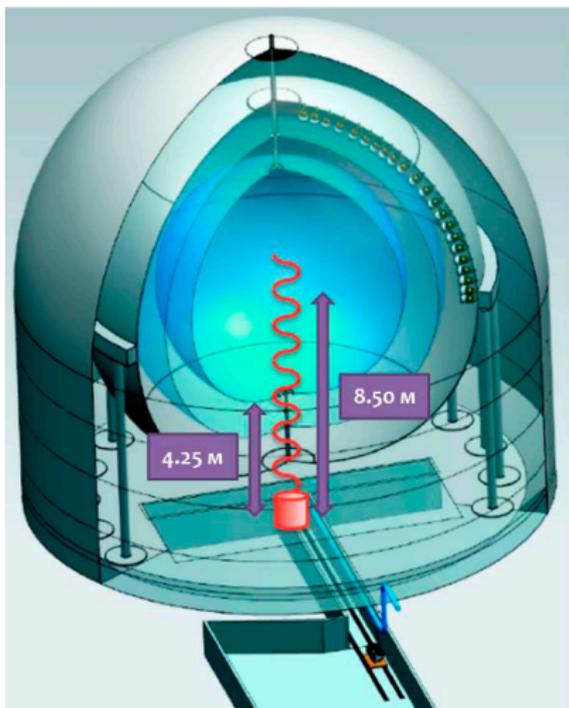
	KamLAND[2] (2013)	Borexino[3] (2013)	Borexino[4] (2015)
$N_p, 10^{32}$	0.598 ± 0.013	0.109 ± 0.006	0.109 ± 0.006
$\xi, 10^{32}$ протон · год	4.90 ± 0.10	0.369 ± 0.016	0.55 ± 0.03
$N_{\text{Гео}}$	116^{+28}_{-27}	14.3 ± 4.4	$23.7^{+6.5}_{-5.7} +^{0.9}_{-0.6}$
$G_{\text{Экс}}, \text{TNU}$	$23.7^{+6.2}_{-6.0} *$	38.8 ± 12.0	$43.5^{+11.8}_{-10.4} +^{2.7}_{-2.4}$
G^{**}, TNU	$31.5^{+4.9}_{-4.1}$	$40.3^{+7.3}_{-5.8}$	$40.3^{+7.3}_{-5.8}$
$\Phi, 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	3.4 ± 0.8	4.7 ± 4.6	5.0 ± 1.3
$\Phi_{\text{Экс}}(\text{U}), 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	--	2.1 ± 1.5	2.7 ± 0.7
$\Phi_{\text{Экс}}(\text{Th}), 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	--	2.6 ± 3.1	2.3 ± 0.6
P	$2 \cdot 10^{-6} (\sim 4.2\sigma)$	$6 \cdot 10^{-6} (\sim 4.5\sigma)$	$3.6 \cdot 10^{-9} (\sim 5.9\sigma)$

* Данный результат получен автором, используя данные из статьи [2].

** По данным статьи [1].

**Точность измерения потока гео-нейтрино с помощью Borexino составляет $\sim 25\%$.
 Для уменьшения ошибки в 2 раза, необходимо зарегистрировать
 ~ 100 гео-нейтринных событий ($\delta \sim 1/\sqrt{N}$).
 Или ещё 18 лет измерений...**

CeSOX: Short Distance Neutrino Oscillations With BoreXino



**Эксперимент CeSOX закрыт
1 февраля 2018 года**

Источник	$^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$
Получение	выделение из ОЯТ
Производство	ПО «Маяк»
Тип распада	β^-
Максимум спектра ^{144}Ce	~ 0.3 МэВ
Максимум спектра ^{144}Pr	~ 3.0 МэВ
Начальная активность	$(3.7 - 5.5) \cdot 10^{15}$ Бк (100 – 150 кКи)
Тепловыделение	7.6 Вт/кКи
Период полураспада ^{144}Ce	285 дней
Период полураспада ^{144}Pr	17 мин
Продолжительность эксперимента	1.5 года
Число событий (1.5 года)	10^4
Масса мишени	240 т
Длина осцилляций	~ 10 см – 25 м

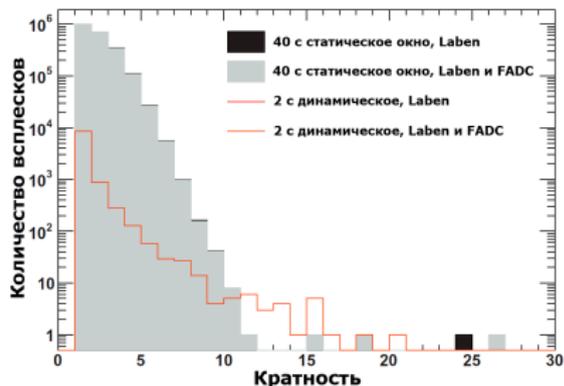
Поиск корреляций с гамма-всплесками (Г-В)

База данных по гамма-всплескам эксперимента IceCube:
 данные спутников WIFT , Fermi , INTEGRAL , AGILE , Suzaki и Konus/WIND
 Laben: 12.2007 – 11.2015, 2350 Г-В; FADC: 12.2009 – 11.2015, 1813 Г-В

Отбор всплесков "точечных" событий:

- в статическом временном окне 40 с, $E > 1$ МэВ
- в динамическом временном окне 2 с, $E > 5$ МэВ

Поиск корреляции в окне $\Delta t = \pm 5000$ с



Статистически значимых корреляций не найдено

Agostini M et al. (Borexino Collaboration) 2017 *Astropart. Phys.* 86 11-17 (Preprint 1607.05649v2)

Поиск корреляций с гамма-всплесками (Г-В)

Laben: 12.2007 – 11.2015, 2350 Г-В

FADC: 12.2009 – 11.2015, 1813 Г-В

Два подхода:

- **обратный β-распад (слева)**

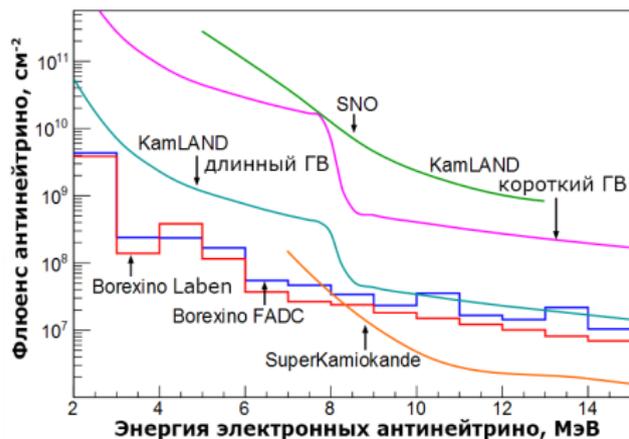
$\Delta t = \pm 5000$ с, Laben: 1791 Г-В, FADC: 1114 Г-В

- **упругое рассеяние на электронах (справа)**

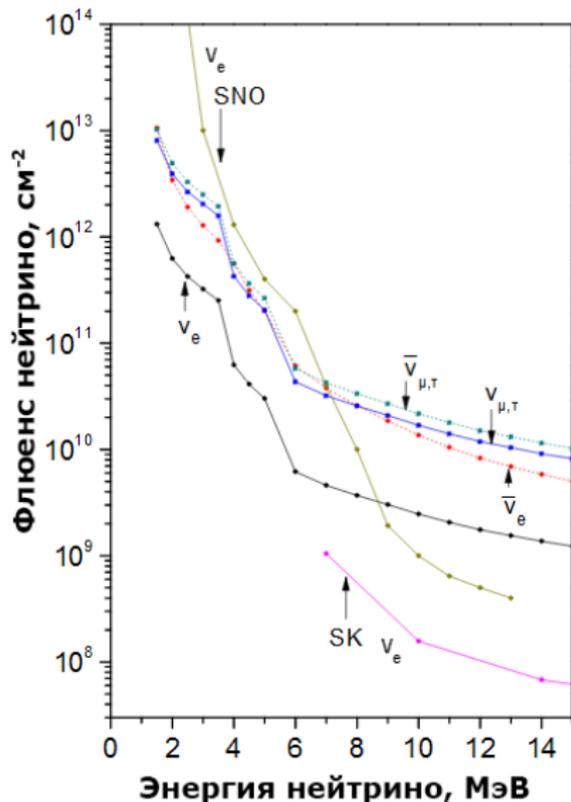
$\Delta t = \pm 1000$ с, , 980 Г-В

$\Delta t_{\text{фон}} = [-2000, -1000] \cup [1000, 2000]$ с

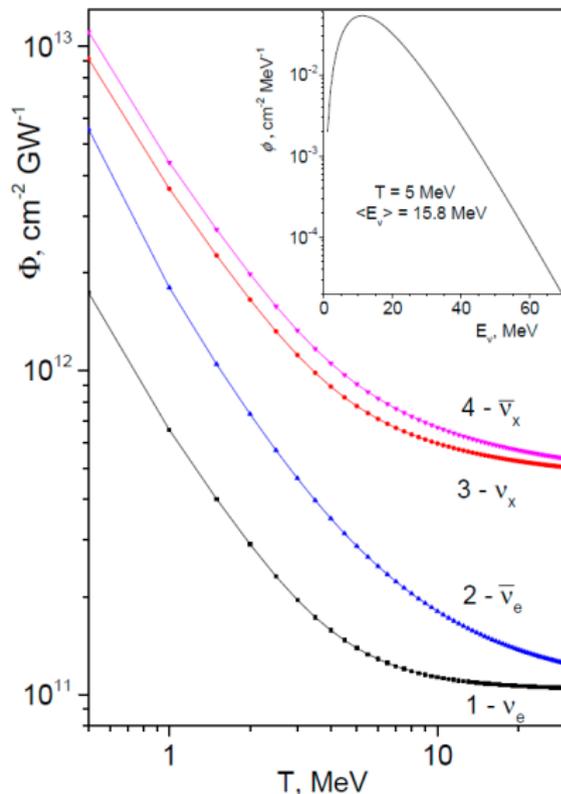
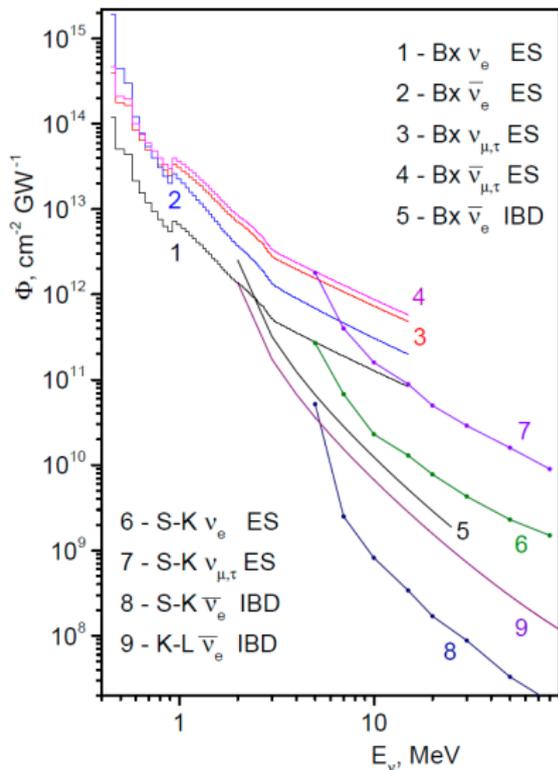
Расчёта основан на **процедуре Feldman-Cousins**



Верхние пределы на флюенс с Д.И. 90%



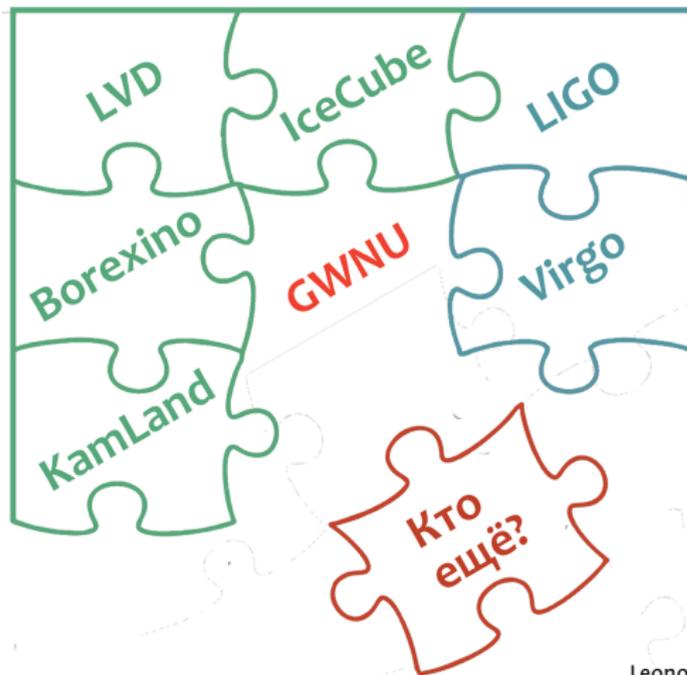
Поиск корреляций с гравитационно-волновыми событиями (СГВ)



Agostini M et al. (Borexino Collaboration) 2017 *Astrophys. J.* 850 21 (Preprint 1706.10176v1)

Поиск корреляций с гравитационными волнами (ГВ)

GWNU - межколлораборационная рабочая группа
по поиску корреляций в данных ГВ и ν экспериментов



Этапы развития:

2009-2010

возникновение идеи

Конец 2014

начало обмена данными,
разработки методологии и анализа

Апрель 2016

KamLAND присоединился к анализу

Конец 2017

начало обсуждения возможности
анализа в режиме реального
времени

M B Gromov and C Casentini 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 888 012099
Leonor I et al. 2010 Class. Quant. Grav. 27:084019 (Preprint 1002.1511v1)

Поиск корреляций с гравитационными волнами (ГВ)

Частота случайных совпадений (**False Alarm Rate, FAR**) - это количество случайных флуктуаций фона выше порога детектирования сигнала от сверхновой в год.

Оценка $FAR_{\text{совм}}$ - частоты случайных совпадений для сети детекторов:

$$FAR_{\text{совм}} = \prod_{i=1}^N FAR_i \times (2t_{\text{совп}})^{N-1}, \quad t_{\text{совп}} = 10 \text{ с}$$

Пусть $FAR_{\text{совм}} = 1$ всплеск/1000 лет, $FAR_{\text{ГВ}} = 1$ всплеск/1 месяц, тогда

$$FAR_{\text{совм}} = \frac{1 \text{ ВСПЛЕСК}}{1000 \text{ ЛЕТ}} = FAR_{\text{ГВ}} \times FAR_{\text{LVD}} \times FAR_{\text{IceCube}} \times FAR_{\text{ВХ}} \times (2t_{\text{совп}})^3$$

Допуская, что $FAR_{\text{LVD}} = FAR_{\text{IceCube}} = FAR_{\text{ВХ}}$

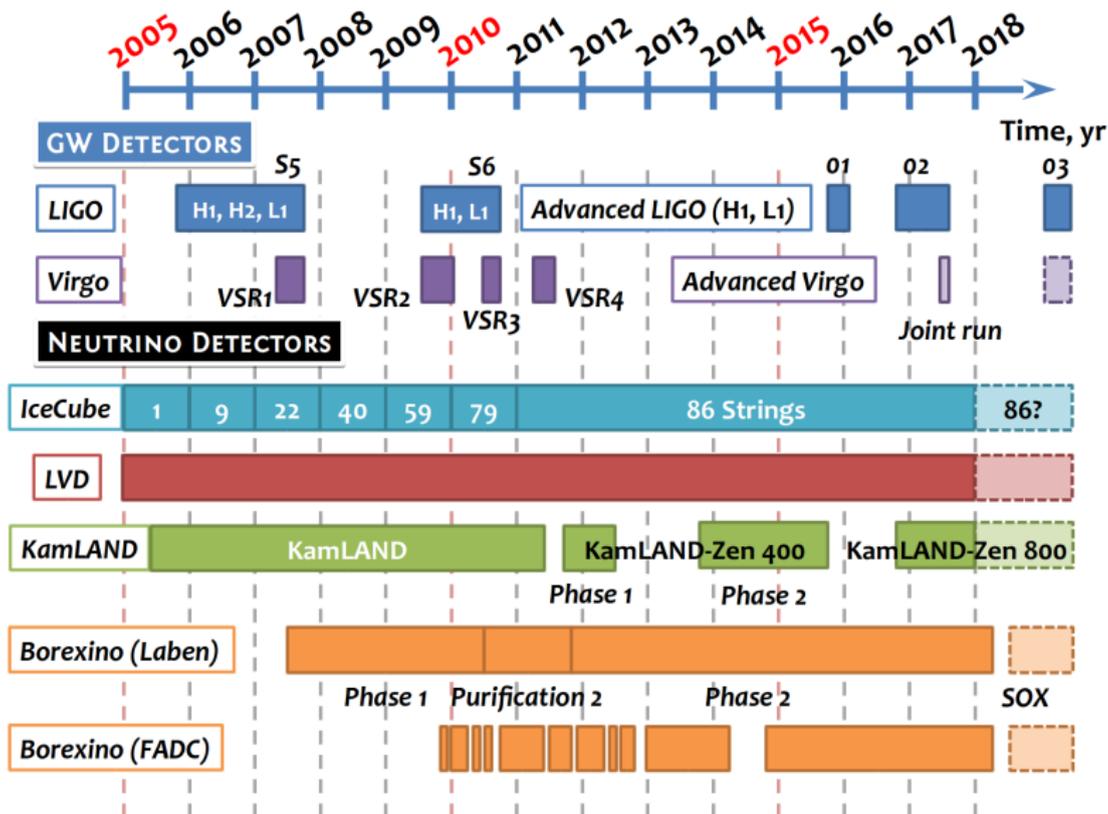
$$FAR_{\nu} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ Гц} \sim \frac{1 \text{ ВСПЛЕСК}}{10 \text{ МИНУТ}}$$

Если в сети только один детектор, то необходимо использовать малые значения FAR_i , чтобы получать статистически значимые результаты.

► В статье коллаборации LVD [*] использовалось значение $FAR_i = 1$ всплеск/100 .

[*] Agafonova N Y et al. (LVD Collaboration) 2015 ApJ 802 47 (Preprint 1411.1709v2)

Поиск корреляций с гравитационными волнами (ГВ)



Перспективы

Исследование	Статус
Солнечные нейтрино	продолжается, есть результаты
Гео-нейтрино	продолжается, есть результаты
Стерильные нейтрино	прекращён, нет результатов
Поиск корреляций с гамма-всплесками	завершён, получены ограничения
Поиск корреляций с гравитационно-волновыми событиями	завершён, получены ограничения
Поиск корреляций с гравитационными волнами	продолжается, результаты ожидаются
Поиск корреляций с солнечными вспышками	продолжается, результаты ожидаются
DSNB	продолжается, результаты ожидаются
Атмосферные нейтрино с энергией до 100 МэВ	продолжается, результаты ожидаются
Осцилляции ^8B -нейтрино в антинейтрино	завершён, получены ограничения
SNEWS	продолжается, результатов пока нет

Спасибо за внимание!

Список литературы I

-  М. Baldoncini и др. Англ. В: Phys. Rev. D 91.6 (2015). (*Preprint* 1411.6475v2), с. 065002.
-  A. Gando и др. Англ. В: Phys. Rev. D 88.3 (2013). (*Preprint* 1303.4667v2), с. 033001.
-  G. Bellini и др. Англ. В: Phys. Lett. B 722.4--5 (2013). (*Preprint* 1303.2571v2), с. 295–300.
-  М. Agostini и др. Англ. В: Phys. Rev. D 92.3 (2015). (*Preprint* 1506.04610v2)., с. 031101.

Дополнительные слайды

Радиохимическая чистота сцинтиллятора Vorexino

Основные технологические достижения

Нуклид	Ест. распростран. (и источник)	Цель счёт √ мас. фр.	Фаза I счёт √ мас. фр.	Фаза II счёт √ мас. фр.
^{14}C	10^{-12} г/г (космоген.)	$\sim 10^{-18}$ г/г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ г/г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ г/г
^{39}Ar	17 мБк/м ³ (воздух)	~ 1 свд/100 т	$\ll ^{85}\text{Kr}$	$\ll ^{85}\text{Kr}$
^{40}K	$2 \cdot 10^{-6}$ г/г (пыль)	$\sim 10^{-15}$ г/г	$< 1.7 \cdot 10^{-15}$ г/г (95% Д.И.)	$< 1.7 \cdot 10^{-15}$ г/г (95% Д.И.)
^{85}Kr	1 Бк/м ³ (воздух)	~ 1 свд/100 т	30.4 ± 5.5 свд/100т	< 7 свд/100 т (95% Д.И.)
^{210}Bi	В равновесии с ^{222}Rn или ^{210}Pb	Не указано	~ 70 свд/100 т	~ 25 свд/100 т
^{210}Po	Поверхностные загрязнения	100 свд/100 т	~ 6000 свд/100 т	~ 200 свд/100 т
^{222}Rn	100 атомов/см ³ (воздух)	~ 10 свд/100 т	1 свд/100 т	0.1 свд/100 т
^{232}Th	$10^{-6} - 10^{-5}$ (пыль)	$\sim 10^{-16}$ г/г или 10^{-6} Бк/т	6.8 ± 1.5 10^{-18} г/г	$< 1.2 \cdot 10^{-18}$ г/г (95% Д.И.)
^{238}U	$10^{-6} - 10^{-5}$ (пыль)	$\sim 10^{-16}$ г/г или 10^{-6} Бк/т	1.6 ± 0.1 10^{-17} г/г	$< 9.7 \cdot 10^{-19}$ г/г (95% Д.И.)

свд - событий в день; Д.И. - доверительный интервал.