

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

Лаб. низкофоновых измерений

- 1) А.В. Дербин внс, дфмн,
- 2) В.Н. Муратова, нс, кфмн
- 3) С.В. Бахланов вед. инж.
- 4) Д.А. Семенов, мнс. кфмн
- 5) И.М. Котина, снс, кфмн
- 6) Н.В. Базлов, нс
- 7) Е.В. Унжаков, мнс.
- 8) А.С. Каюнов, мнс
- 9) Г.В. Пацекина, нс
- 10) Л.М.Тухконен нс
- 11) И.С. Драчнев асп GSSI.
- 12) Н. Пилипенко, 4 курс СПбГУ

В отделе - 31 (24) чел.
внс – 3; снс – 2; нс – 4;
мнс – 3; асп. -1;
вед.инж.-12; инж. тех.-4;
рег. ап. -1; сл.мех.-1;
студ.совм. – 1;

Гр. физики и технологии ППД

- 1) А.Х. Хусаинов внс, кфмн
- 2) А.К. Пустовойт снс кфмн
- 3) А.А. Афанасьев вед. инж.-эл
- 4) М.П. Жуков вед. инж.-эл
- 5) Н.Т. Кислицкий инж.-эл
- 6) Л.В. Силантьева инж.-эл.
- 7) П.И. Трофимов инж.-эл
- 8) Г.Э. Иващенко инж.-тех.
- 9) Л.И. Пащук инж.-тех.
- 10) Е.В. Федоров инж.-тех.
- 11) Т.А. Филиппова инж.
- 12) Е.А. Чмель инж.-тех.

Гр. радиохимии

- 1) А.И. Егоров внс, кфмн
- 2) В.М. Тюнис вед. инж.

Конст. –технологический уч.

- 1) Г.Е.Жихаревич инж.-технолог
- 2) А.Д. Майанцев инж.
- 3) А.П.Михайлов сл.мех.с
- 4) В.А.Радаев сл.мех.сб.р.
- 5) А.И.Терентьева вед. инж

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



Состав (12 (8.5) чел.):

А.В. Дербин внс, дфмн,

С.В. Бахланов вед. инж.

В.Н. Муратова, нс, кфмн

Д.А. Семенов, мнс, кфмн

И.М. Котина снс, кфмн

Н.В. Базлов, нс

Л.М. Тукхонен, нс

Е.В. Унжаков, мнс

А.С. Каюнов, мнс

И.С. Драчнев, аспирант GSSI

Г.В. Пацекина, нс

Н. Пилипенко, 5 курс СПбГУ

1ст+1асп+3мнс+4нс+1снс+1внс



Отдел и Лаборатория в 2015 году

Работы проводились по 4 основным направлениям:

1) Нейтрино,

(эксперимент **Borexino**—солнечные и гео-нейтрино, **SOX**-стерильное нейтрино)

2) Темная материя

(эксперименты по поиску аксионов (**ПИЯФ**, **IAHO**, **Гран Сассо**) и эксперимент по поиску WIMPs (**DarkSide**)

3) Аморфно-кристаллические (aSi:H/cSi) структуры на кремнии

(рук. И.М. Котина)

4) Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами (доклад А.Х. Хусаинова 22.01.16)

Содержание доклада (30 мин.)

1) **Наукометрические показатели**

2) **Нейтрино в 2011- 2015 г.г.**

Нейтрино

3) **Эксперимент Борексино в 2015 году. Новые результаты.**

4) **Проверка стабильности электрона $> 6.6 \times 10^{28}$ лет**

Phys. Rev. Lett. -> Synopsis APS & Nature News

5) **Регистрация гео-нейтрино за 2056 суток (5.6 лет)**

6) **Стерильные нейтрино в Борексино – проект SOX_Ce**

Темная материя

7) **Поиск частиц темной материи в эксперименте DarkSide в Гран Сассо (доклад Д. Семенова).**

8) **Поиск солнечных аксионов с помощью Tm-содержащих $\text{NaTm}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{NaTm}(\text{MoO}_4)_2$ болометров (докл. Е. Унжакова).**

9) **Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром ^{83}Kr в Баксанской нейтринной обсерватории (совм. с ИЯИ)**

10) **Планы на 2016 год.**

Список публикаций в 2015 г. (27=17+10)

17 публикаций в реферируемых журналах (+ 10 в arXiv & Proceedings)

1. Ю.М. Гаврилюк и др. Новый эксперимент по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов , излучаемых в M1-переходе ядра ^{83}Kr , **Письма в ЖЭТФ**, т.101, вып. 10, с. 739 (2015)
2. Yu. M. Gavrilyuk et al., First Result of the Experimental Search for the 9.4 keV Solar Axion Reactions with ^{83}Kr in the Copper Proportional Counter, **Physics of Particles and Nuclei**, 2015, Vol. 46, No. 2, pp. 152–156.
3. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) First results from the DarkSide-50 dark matter experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso, **Physics Letters B** 743 (2015) 456–466
4. L. Ludhova et al., (Borexino coll.) Geo Neutrinos and Borexino, **Physics of Particles and Nuclei**, 2015, Vol. 46, No. 2, pp. 174–181
5. C. E. Aalseth et al., (DarkSide coll.) The DarkSide Multiton Detector for the Direct Dark Matter Search, **Advances in High Energy Physics** Volume 2015 (2015), Article ID 541362, 8 pages
6. O. Smirnov et al., (Borexino coll.) Short Distance Neutrino Oscillations with BoreXino: SOX, **Phys. Procedia** 61 (2015) 511-517
7. L. Miramonti et al., (Borexino coll.) Geo-neutrinos from 1353 Days with the Borexino Detector, **Phys. Procedia** 61 (2015) 340-344
8. K.J. Vogel et al., (IAXO coll.) The Next Generation of Axion Helioscopes: The International Axion Observatory (IAXO), **Phys. Procedia** 61 (2015) 193-200
9. M. Agostini, et al., (Borexino coll.) Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data, **Phys. Rev. D** 92, 031101 (2015)
10. L. Di Noto et al., (Borexino coll.) The SOX experiment in the neutrino physics, **Nuovo Cim. C038** (2015) 01, 36
11. L. Pagani et al., (DarkSide coll.) The DarkSide veto: muon and neutron detectors, **Nuovo Cim. C038** (2015) 01, 35
12. G. Bellini et al., (Borexino coll.) Neutrino measurements from the Sun and Earth: Results from Borexino, **AIP Conf. Proc.** 1666 (2015) 090002
13. P. Mosteiro et al., (Borexino coll.) Low-energy (anti)neutrino physics with Borexino: Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun, **Nucl. Part. Phys. Proc.** 265, 87-92 (2015)
14. M. Agostini et al., (Borexino coll.) Test of Electric Charge Conservation with Borexino, **Phys. Rev. Lett.** 115, 231802 (2015)
15. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) Direct Search for Dark Matter with DarkSide, **J. Phys. Conf. Ser.** 650 (2015) 1, 012006
16. E. Ferrer Ribas et al., (IAXO coll.), The IAXO Helioscope, **J. Phys. Conf. Ser.** 650 (2015) 1, 012009
17. A.S. Gogolev et al., Results of testing the energy dispersive Si detector with large working area, **NIM B** 355, 268 (2015)

10 публикаций в arXiv, proceedings и препринтах

1. A.V. Derbin et al., New limit on the mass of 9.4-keV solar axions emitted in an M1 transition in 83Kr nuclei, arXiv: **1501.02944** v1 [hep-ex] 13 Jan 2015
2. V.N. Muratova et al., Searches for axioelectric effect of solar axions with BGO-scintillator and BGO-bolometer detectors, arXiv: **1501.02943** v2 [hep-ex] 14 Jan 2015
3. M. Agostini, et al., (Borexino coll.) Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data, arXiv:**1506.04610**
4. А.Х. Хусаинов и др. Анализатор спектров рентгеновского и гамма-излучения на основе CdTe p-i-n детекторов – «РАДИАНТ», **Препринт 2979** НИЦ КИ ПИЯФ
5. O. Smirnov et al., (Borexino coll.) Measurement of neutrino flux from the primary proton-proton fusion process in the Sun with Borexino detector, arXiv:**1507.02432**
6. P. Mosteiro et al., (Borexino coll.) Low-energy (anti)neutrino physics with Borexino: Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun, arXiv:**1508.05379**
7. M. Agostini, et al., (Borexino coll.) A test of electric charge conservation with Borexino, arXiv:**1509.01223**
8. P. Agnes et al., Low radioactivity argon dark matter search results from the DarkSide-50 experiment, **arXiv:1510.00702**
9. A. V. Derbin, I. S. Drachnev, E. N. Galashov, V. N. Muratova, S. Nagorny, L. Pagnanini, K. Schaeffner, L. Pattavina, S. Pirro, D. A. Semenov, E. V. Unzhakov, Tm-Containing Bolometers for Resonant Absorption of Solar Axions, **Proceedings of the 11th Patras"Workshop on Axions, WIMPs and WISPs** PATRAS2015 June 22-26, 2015, Zaragoza, Spain <http://www-library.desy.de/preparch/desy/proc/proc15-02.pdf>
10. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The veto system of the DarkSide-50 experiment, arXiv:**1512.07896**

Доклады на конф. и семинары в 2015 г. (6=3+3)

6 докладов и выступлений на конференциях и семинарах

1. А.В. Дербин, Эксперименты с солнечными нейтрино, **Зимняя школа ПИЯФ, 2015**
2. A.V. Derbin, Searches for solar axions using the resonant absorption by ^{169}Tm and ^{83}Kr nuclei. **11th Patras workshop on axions, WIMPs and WISPs**, 30 Jun, Zaragoza, Spain
3. A.V. Derbin, V.N. Muratova, Searches for high energy solar axions and heavy sterile neutrinos with the Borexino detector, **LNGS Seminar Series**, April 2015, Gran Sasso, Italy
4. A.V. Derbin, V.N. Muratova, The Borexino experiment, **LHC2015 - The Third Annual Large Hadron Collider Physics**, 30 Aug-3 Sept., St. Petersburg, Russia
5. E. Unzhakov, Search for resonant absorption of solar axions using Tm-containing detectors. **LNGS Seminar Series**, November, 2015, Gran Sasso, Italy
6. V. Litichevskiy, S. Bakhlanov, ZnSe scintillating bolometer with ionization readout - a new approach for particle discrimination technique, **LNGS Seminar Series**, November 2015, Gran Sasso, Italy

Диссертации, аспирантура (2+1+1)

Подготовлены 2 кандидатский диссертации
«Поиск солнечных аксионов с помощью резонансного поглощения ядрами ^{169}Tm »

(Е.В. Унжаков, 2016)

«Поиск аксионов с энергией 5.5 МэВ, возникающих в реакции $p(d,^3\text{He})A$ на Солнце»

(А.С. Каюнов, 2016)

Защищена 1 бакалаврская диссертация

«Исследование характеристик кремниевых структур «металл-диэлектрик-полупроводник» с диэлектриком из нитрида алюминия»

(Н.Пилипенко, 2015, рук. И.М.Котина)

**Международная аспирантура GSSI & LNGS,
Италия+Россия**

И. С. Драчнев (2013)

5 грантов РФФИ в 2015 г

**Грант РФФИ - а «Поиск взаимодействия аксионов с атомами и атомными ядрами»
(рук. В.Н. Муратова)**

**Грант РФФИ – офи-м «Поиск аксионов темной материи и солнечных аксионов»
(рук. В.Н. Муратова)**

**Грант РФФИ - а «Поиск стерильного нейтрино с детектором Bogexino: измерение зависимости световыхода сцинтиллятора от энергии электрона»
(рук. А.В. Дербин)**

**Грант РФФИ – а «Поиск солнечных адронных аксионов»
(рук. А. Гапгашев, ИЯИ БНО)**

**Грант РФФИ ASPERA «Программа совместных разработок детекторов нейтрино низких энергий»
(рук. Л.Б. Безруков, ИЯИ)**

Награды, Премии в 2015 г.

Конкурс лучших работ ПИЯФ.

А.В. Дербин, В.Н. Муратова

Специальная премия и почетная грамота за особо важный вклад в международный эксперимент Борексино по регистрации ν -нейтрино.

Конкурс им. Курчатова среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей.

**А. С. Каюнов, Д. А. Семенов,
Е.В.Унжаков**

«Поиск резонансного поглощения и аксиоэлектрического эффекта для солнечных аксионов».



2011 – год нейтрино

Март: *стерильное нейтрино*

НОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ СПЕКТРА РЕАКТОРНЫХ НЕЙТРИНО
 $R_{\text{набл}} / R_{\text{пред}} = 0.943 \pm 0.023$ реакторная аномалия

Июль: θ_{13} *отличен от нуля*

T2K (Tokai to Kamioka) эксперимент
 $0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$ at 90% C.L.

Сентябрь: – *сверхсветовые нейтрино*

CerN GranSasso OPERA

$$v-c/c = (2.48 \pm 0.58) \times 10^{-5}$$

Апрель: *LMA решение для нейтрино*

$$A_{\text{dn}} = 0.001 \pm 0.012(\text{stat}) \pm 0.007(\text{syst})$$

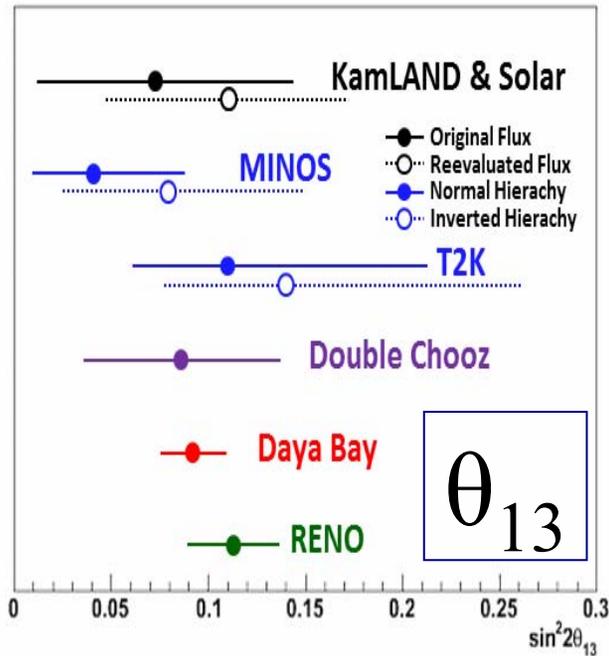
Сентябрь: *пер-нейтрино* $(1.6 \pm 0.3) 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Borexino,

Декабрь: θ_{13} *Double Chooz*

$$0.015 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.16 \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

2012 – год открытия θ_{13} и закрытия $V/C > 1$



T2K coll., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 041804

$$0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$$

MINOS coll., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 181892

$$0.01 < 2\sin^2 2\theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} < 0.088$$

Double Chooze coll., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 131801

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{syst}).$$

Daya Bay coll., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 171803

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{syst.})$$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \pm 0.005 \quad \delta m_{ee}^2 = (2.44 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (2014)}$$

RENO coll., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 191802

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.113 \pm 0.013(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst})$$

$$-1.8 \times 10^{-6} < (v - c)/c < 2.3 \times 10^{-6}$$

LVD coll. PRL 109, 070801 (2012)

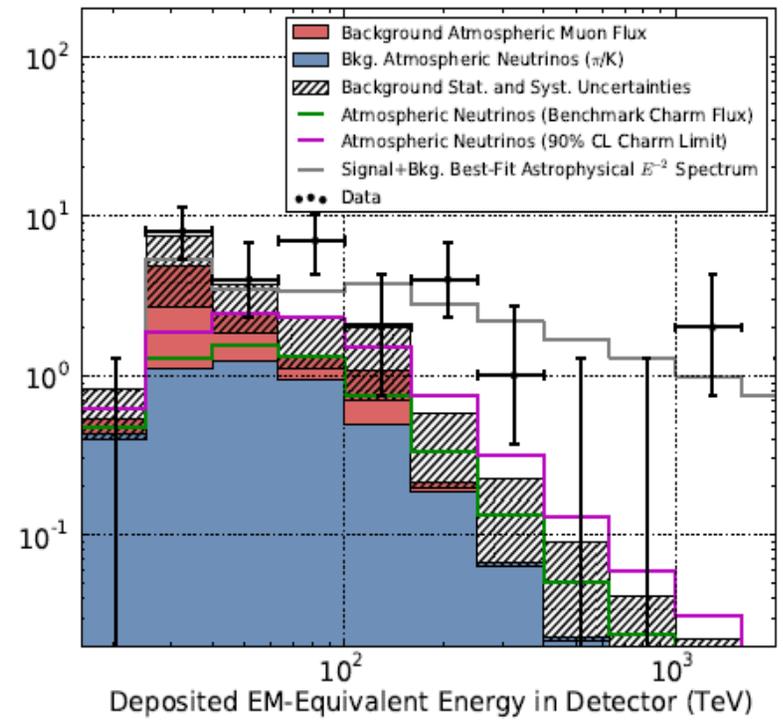
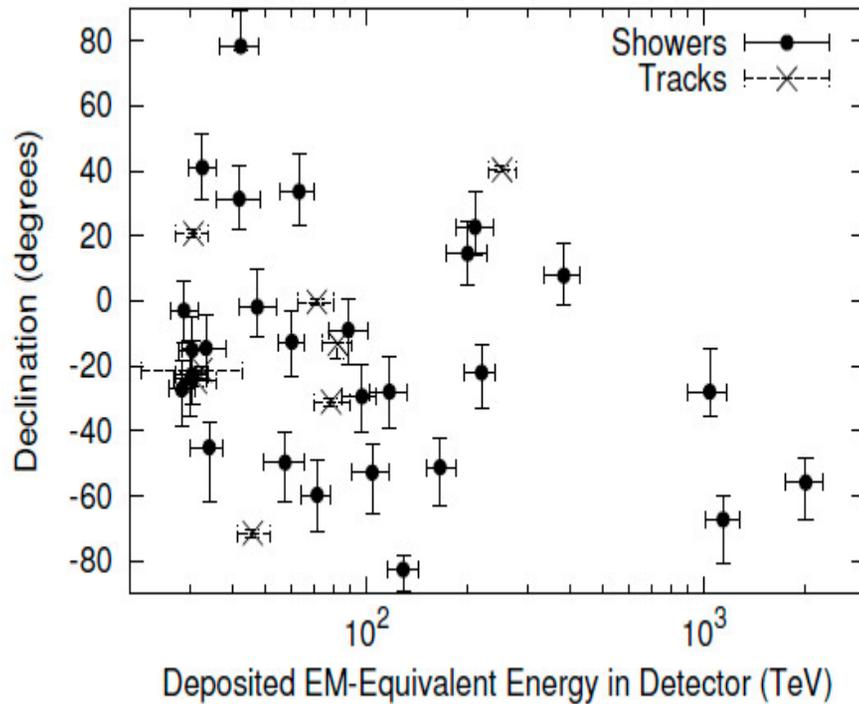
Borexino coll. arXiv:1207.6860

ICARUS coll. arXiv:1208.2629

OPERA coll. arXiv:1212.1276

$$(V - C) / C$$

2013 – год открытия астрофизических нейтрино



28 (37-2014) событий с энергией выше 30 ТэВ зарегистрированы детектором **IceCube**. Это значение на 4.3 (5.7) σ отличается от ожидаемого для мюонных нейтрино. В тоже время значение согласуется с предсказаниями для рождения нейтрино высокоэнергетическими космическими лучами реакциях pp , $p\gamma$.

ARTICLE

doi:10.1038/nature13702

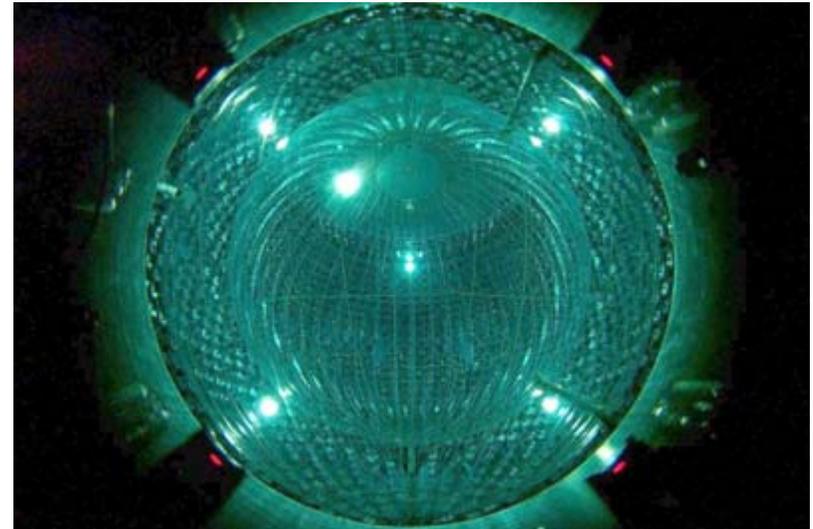
Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

Borexino Collaboration*

In the core of the Sun, energy is released through sequences of nuclear reactions that convert hydrogen into helium. The primary reaction is thought to be the fusion of two protons with the emission of a low-energy neutrino. These so-called *pp* neutrinos constitute nearly the entirety of the solar neutrino flux, vastly outnumbering those emitted in the reactions that follow. Although solar neutrinos from secondary processes have been observed, proving the nuclear origin of the Sun's energy and contributing to the discovery of neutrino oscillations, those from proton–proton fusion have hitherto eluded direct detection. Here we report spectral observations of *pp* neutrinos, demonstrating that about 99 per cent of the power of the Sun, 3.84×10^{33} ergs per second, is generated by the proton–proton fusion process.

Neutrinos spotted from Sun's main nuclear reaction

Aug 27, 2014 [9 comments](#)



[Solace for solar physicists: Borexino results back theory](#)

Physicists working on the [Borexino](#) experiment in Italy have successfully detected neutrinos from the main nuclear reaction that powers the Sun. The number of neutrinos observed by the international team agrees with theoretical predictions, suggesting that scientists do understand what is going on inside our star.

"It's terrific," says [Wick Haxton](#) of the University of California, Berkeley, a solar-neutrino expert who was not involved in the experiment. "It's been a long, long, long time coming."

Each second, the Sun converts 600 million tonnes of hydrogen into helium, and 99% of the energy generated arises from the so-called proton–proton chain. And 99.76% of the time, this chain starts when two protons form deuterium (hydrogen-2) by coming close enough together that one becomes a neutron, emitting a positron and a low-energy neutrino. It is this low-energy neutrino that physicists have now detected. Once this reaction occurs, two more quickly follow: a proton converts the newly minted deuterium into helium-3, which in most cases joins another helium-3 nucleus to yield helium-4 and two protons.

Новые результаты Борексино (2015 г.)

Стабильность электрона Данные по гео-нейтрино за 2056 суток Проект SOX_Ce

2014 год: pp-нейтрино.

2013 год - Тяжелое стерильное нейтрино.

- Новые данные по гео нейтрино.
- Подготовка - стерильное нейтрино SOX
- Возможность регистрации pp-нейтрино, магнитного момента, ..

2012 – год A_{solar} и V_{neutrino}

- Солнечные аксионы.
- Скорость нейтрино.
- Начало Фазы 2

2011 – год ${}^7\text{Be}$ -, $\text{p}\bar{\text{p}}$ -, CNO- ν

1. Вариации день-ночь для ${}^7\text{Be}$ - ν
2. Обнаружены $\text{p}\bar{\text{p}}$ -нейтрино
3. Поток ${}^7\text{Be}$ - ν измерен с 5% точ.

2010 – год антинейтрино

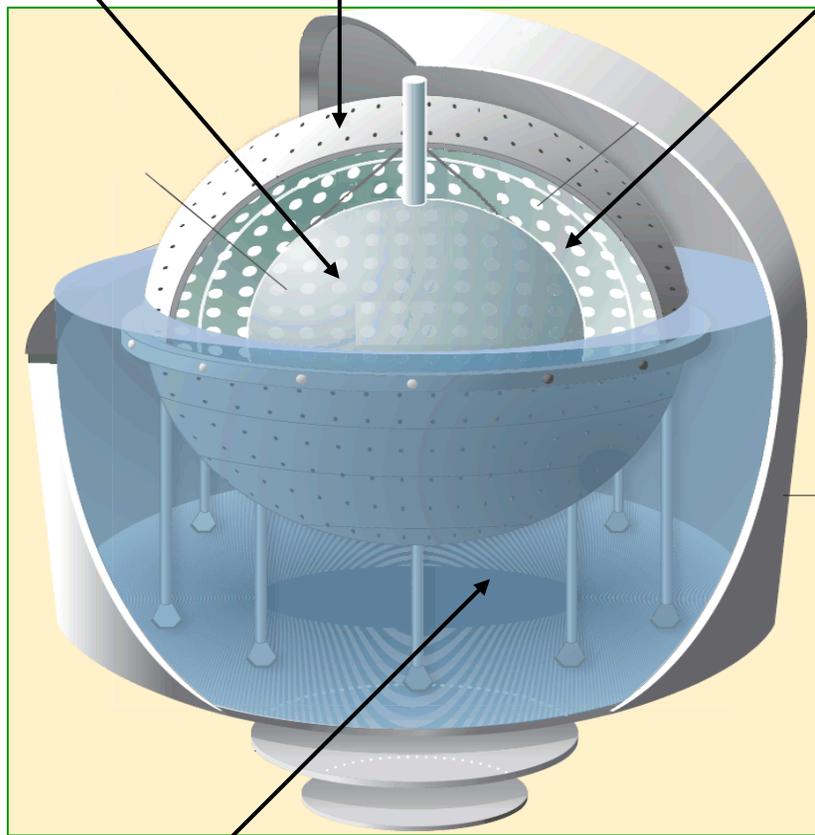
1. Гео-нейтрино
2. Солнечные анти-нейтрино
3. Фоновые анти-нейтрино
4. Переходы в ${}^{12}\text{C}$ с нарушением ПП

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

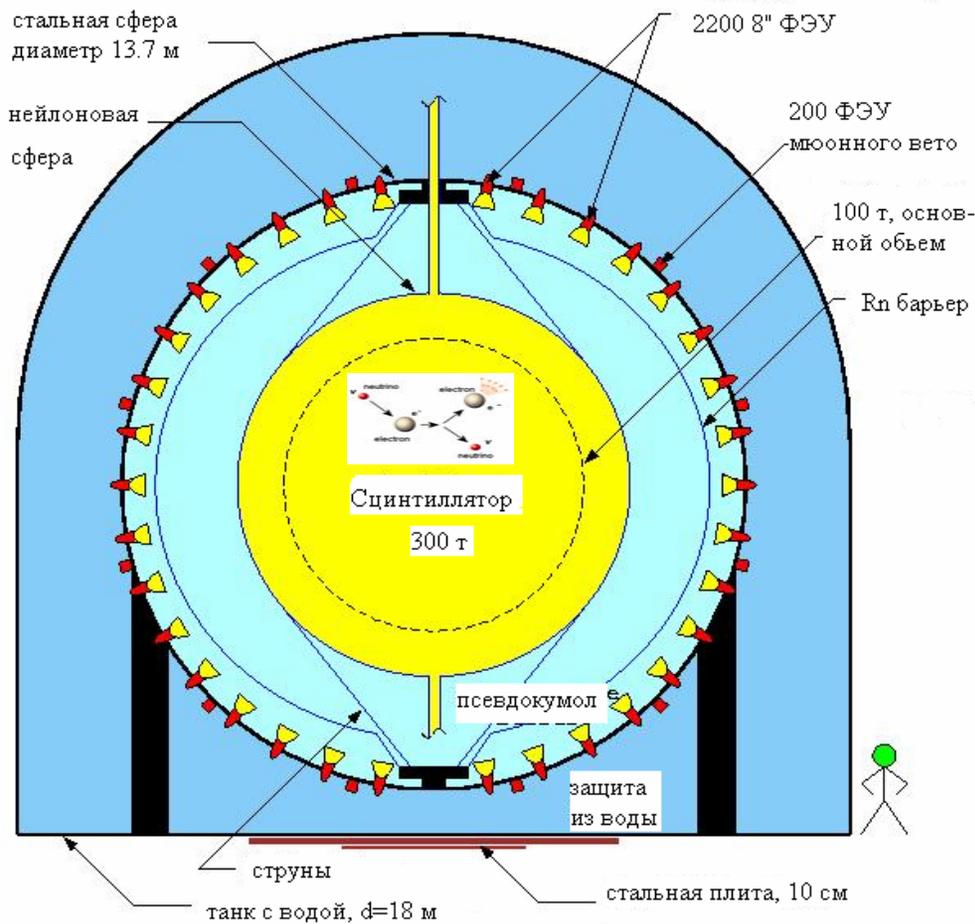
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

Стальная сфера (R=6,85 м)
- 2212 8" ФЭУ;
- 1350 м³ PC+DMP (5,0 г/л)

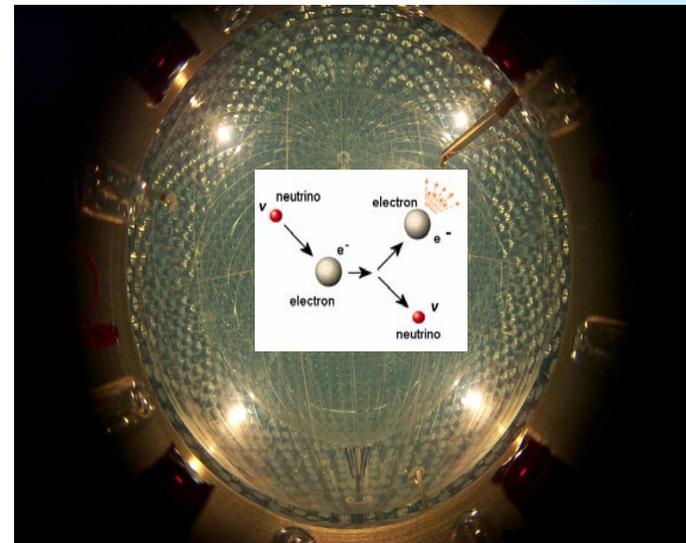
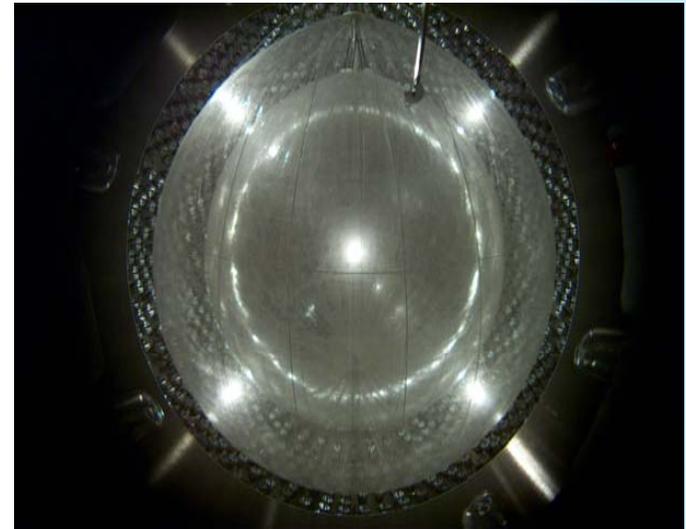
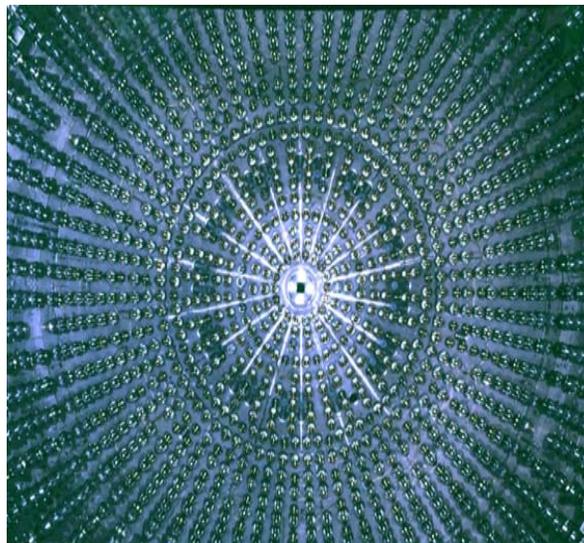
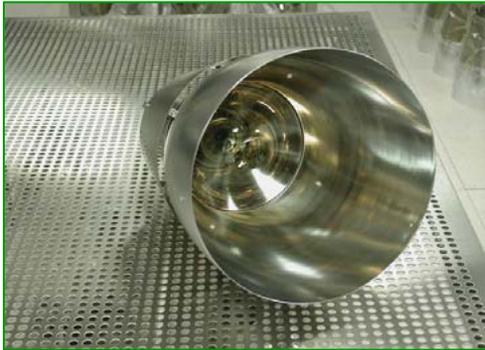
Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



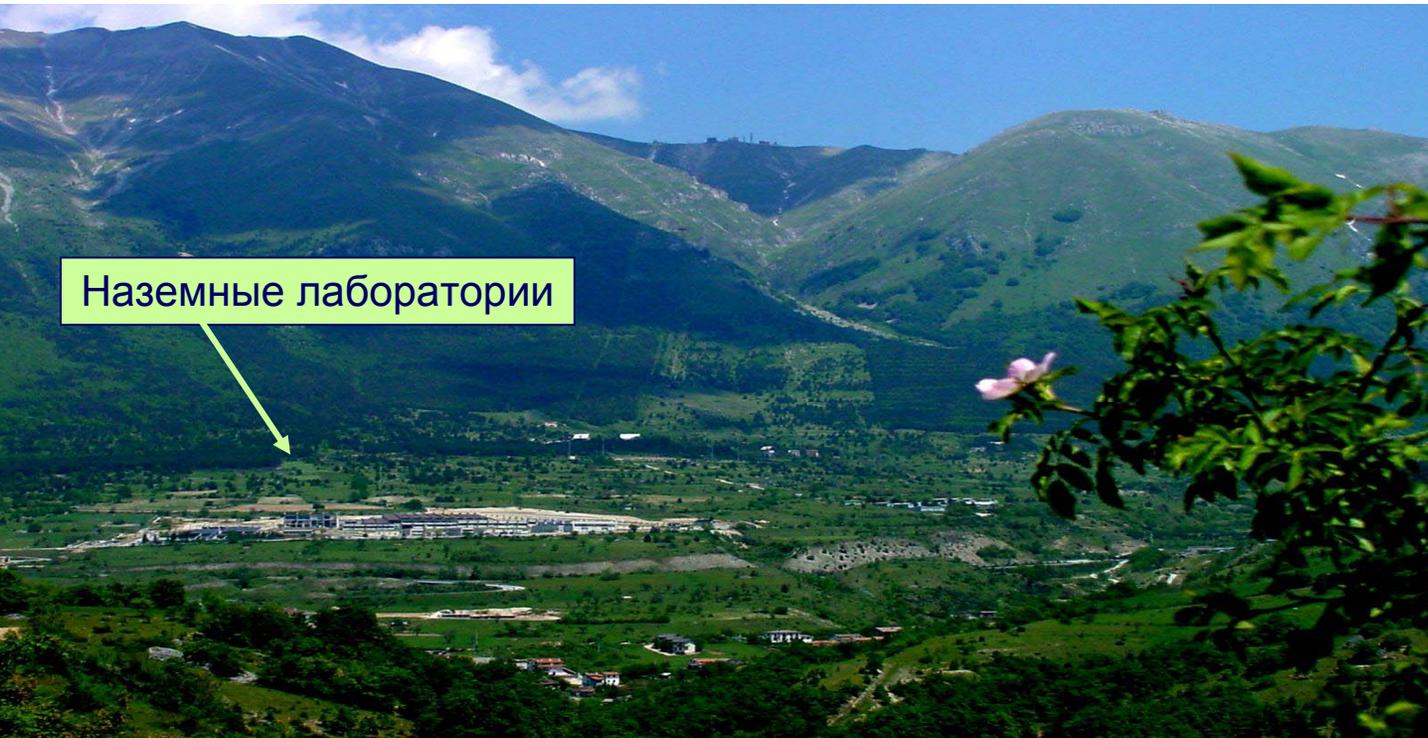
2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы

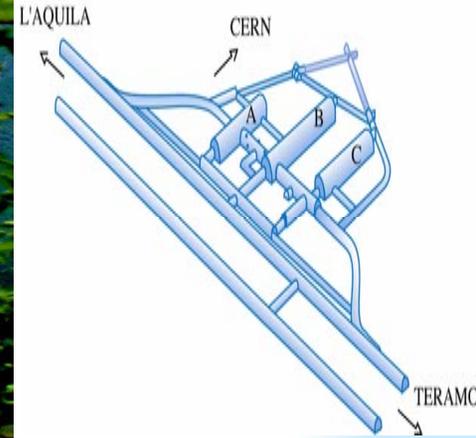


Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории

Италия,
120 км от Рима
3500 м.в.э.

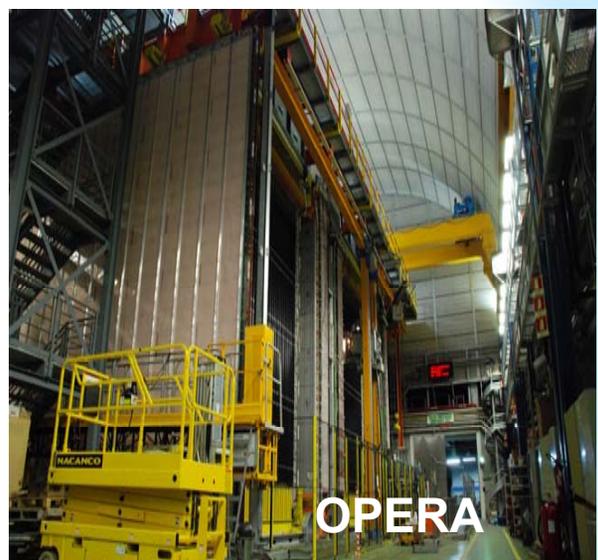
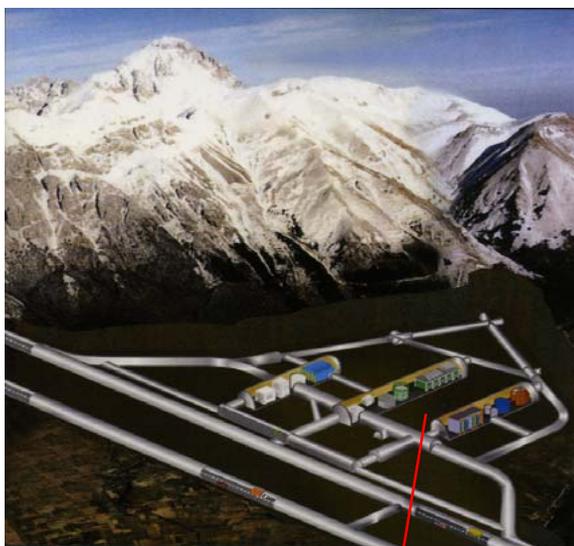


Борексина и завод по очистке





Подземная лаборатория Гран-Сассо



Borexino collaboration



Milano



Genova



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR KERNPHYSIK

Heidelberg



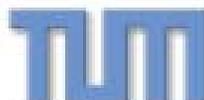
Paris



Gran Sasso



Perugia



München



Kraków



Hamburg



JINR
Dubna



the Borexino Collaboration



Virginia Tech



Princeton



UMass
Amherst



Kurchatov
Moscow



St. Petersburg



Ucla
Los Angeles



University of Houston
Founded 1927
Houston



Moscow State

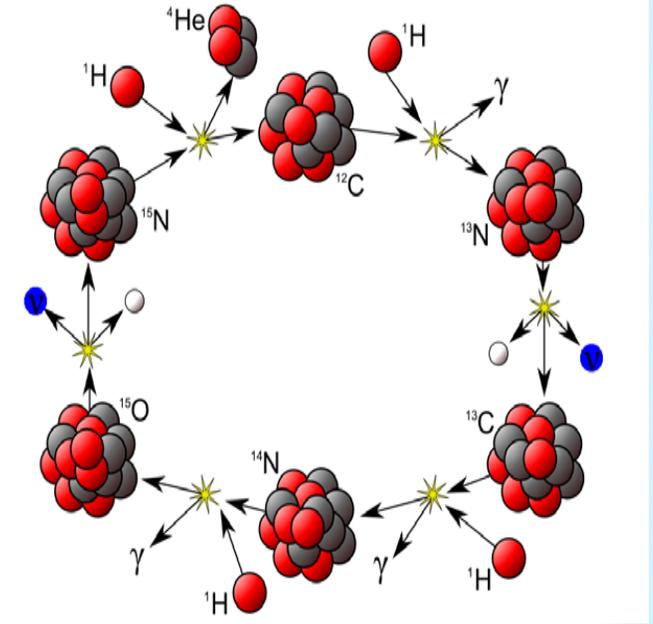
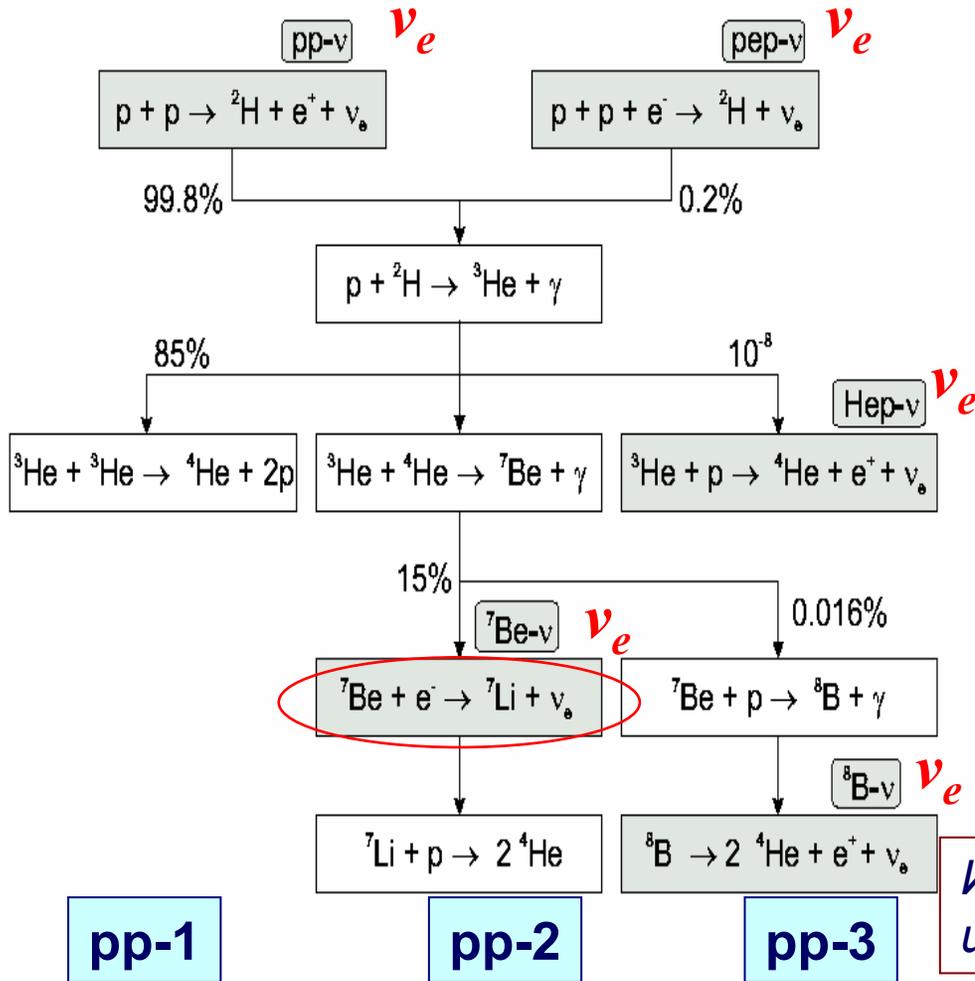
Рабочие группы и вклад ПИЯФ в 2015 г.

Входим в состав 7 (из 13) рабочих групп:

- 1) ${}^7\text{Be}$ -нейтрино,
- 2) Мюоны и нейтроны,
- 3) Анти-нейтрино,
- 4) $\nu\nu$ -нейтрино,
- 5) Редкие процессы (председатель)
- 6) Стерильное нейтрино (SOX)
- 7) NewSolar (новый анализ данных по солнечным ν)

- 1. В составе рабочих групп « $\nu\nu$ -нейтрино» и «редкие процессы» готовили статью по стабильности электрона. Один из трех авторов по переписке.**
- 2. Готовим статью по поиску корреляций ν -событий с гамма-вспышками (GRB)**
- 3. Группа «Редкие Процессы» продолжает готовить статью от коллаборации по нестандартным взаимодействиям нейтрино**
- 4. Работа в Гран Сассо - 8 чел./мес. на экспериментах Borexino и DarkSide**

pp-: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + (26.7 \text{ МэВ})$ и CNO-цикл



$${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$$

$${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

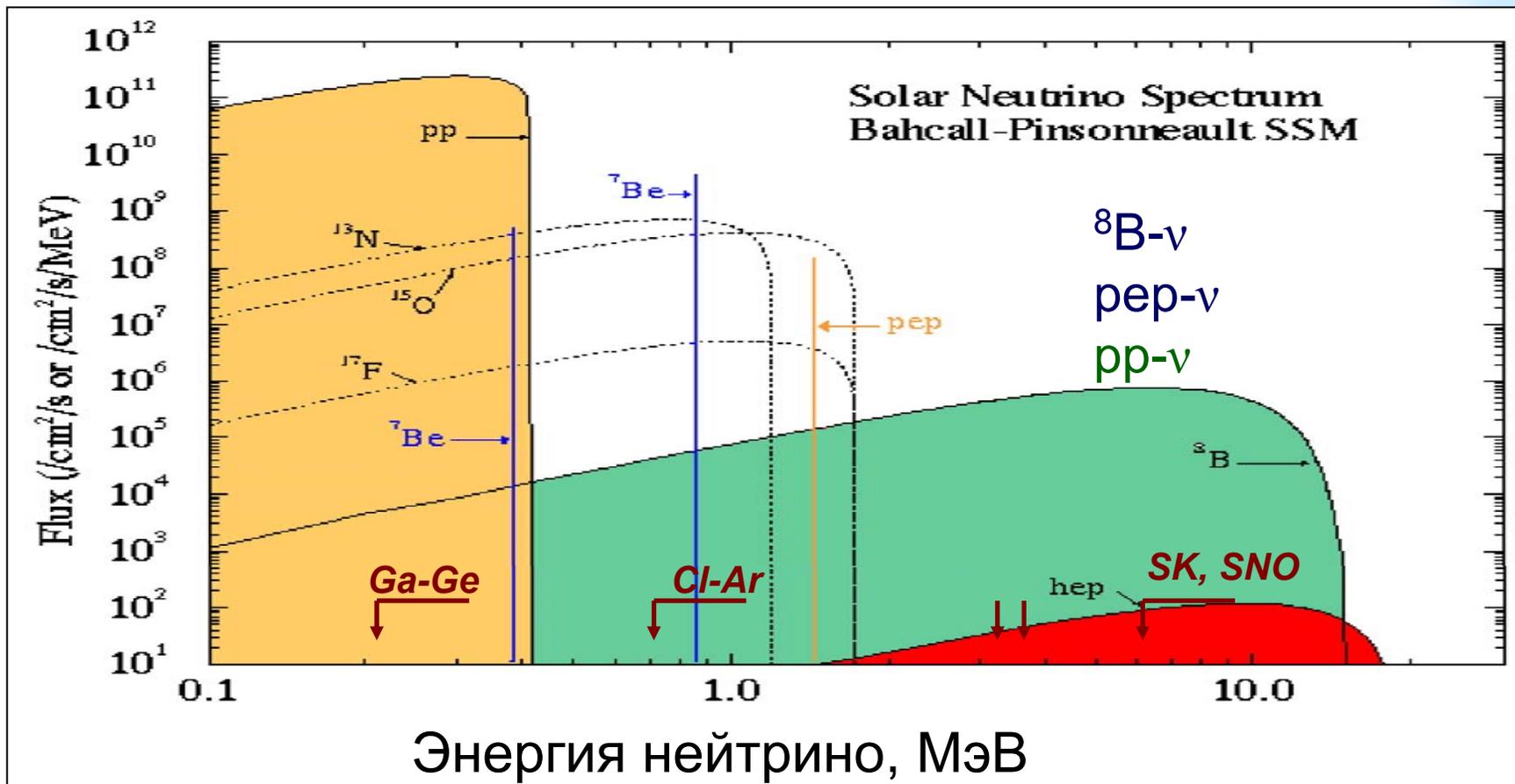
$${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

Излучается 5 нейтрино в pp-цепочке и 3 нейтрино в CNO-цикле

Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Полная выделяемая энергия 26.7 МэВ, из которой 0.6 МэВ уносят нейтрино.

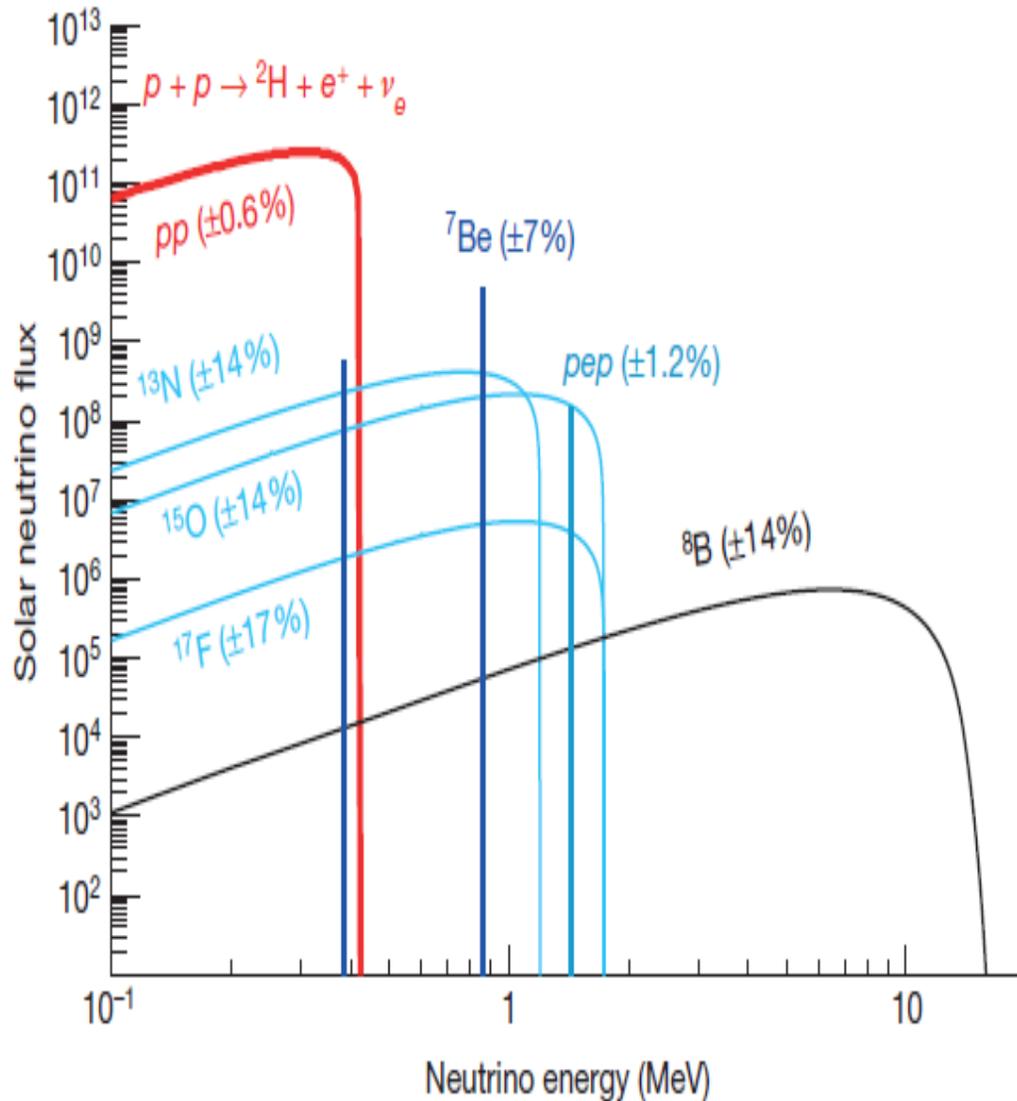
Основная задача БОРЕКСИНО -

регистрация упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроны - успешно решена, поток ${}^7\text{Be}$ - ν измерен с точностью 5%.



Наиболее интенсивный поток pp -нейтрино составляет $6 \cdot 10^{10} \nu/\text{cm}^2\text{сек}$, ${}^7\text{Be}$ - нейтрино - $5 \cdot 10^9$, ${}^8\text{B}$ -нейтрино - $6 \cdot 10^6$. Реактор - $10^{13} \nu/\text{cm}^2\text{сек}$

Нейтрино из pp-цепочки и CNO-цикла



${}^7\text{Be}$ - нейтрино

${}^8\text{B}$ - нейтрино

pep - нейтрино

pp - нейтрино

CNO - нейтрино

Поток ${}^7\text{Be}$ -нейтрино измерен с 4.8%

Precision measurement of the ${}^7\text{Be}$ solar neutrino interaction rate in Borexino" PRL 107 141302 (2011)

Результат Борексино:

$$R = 46.0 \pm 1.5^{+1.5}_{-1.6} \text{ c / (100 t day)}$$

Без осцилляций SSM high Z:

$$R = 74 \pm 5 \text{ cpd/100 t}$$

SSM MSW-LMA:

$$47.3 \pm 3.4 \text{ cpd/100 t}$$

В предположении ограничений на светимость Солнца получены потоки:

$$\Phi(\text{pp}) = (6.02^{+0.02}_{-0.06}) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

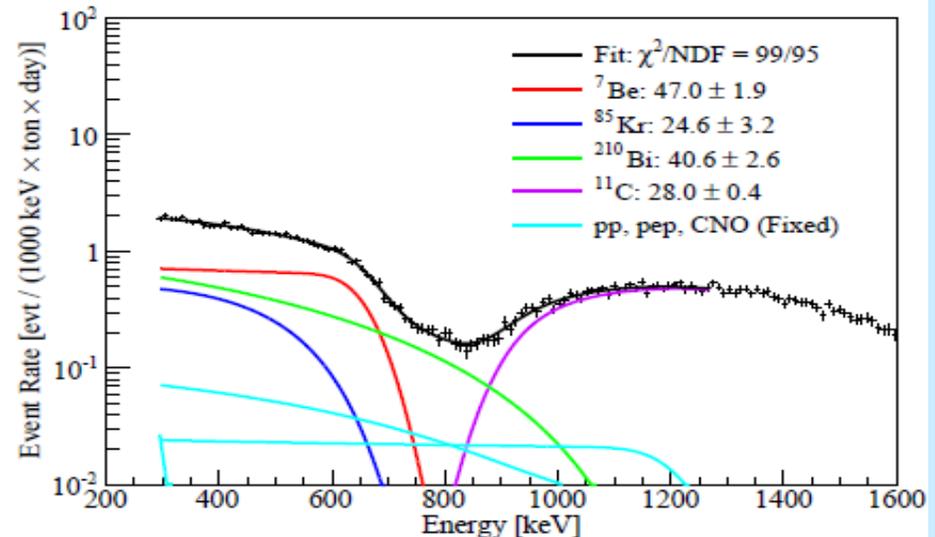
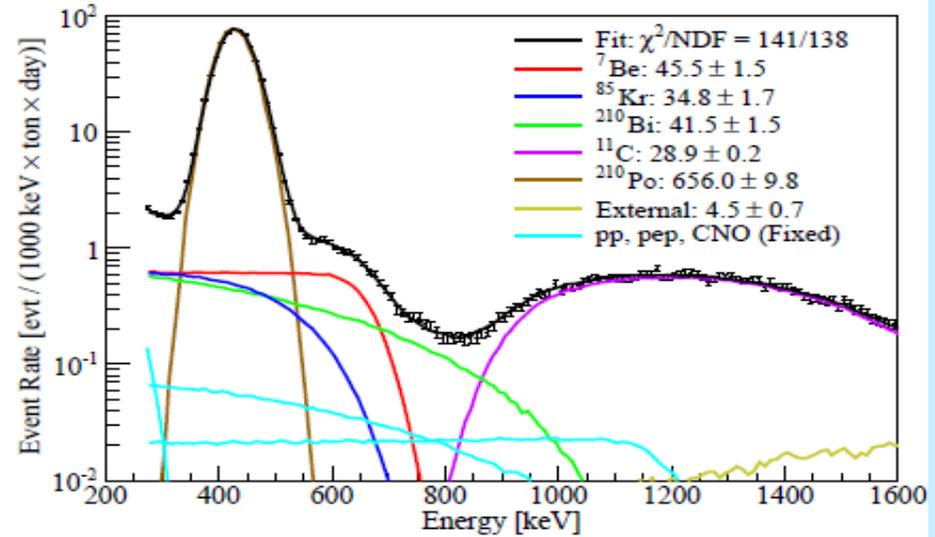
$$f_{\text{pp}} = 1.013^{+0.003}_{-0.010}$$

$$\Phi(\text{CNO}) < 1.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \text{ (95\% у.д.)}$$

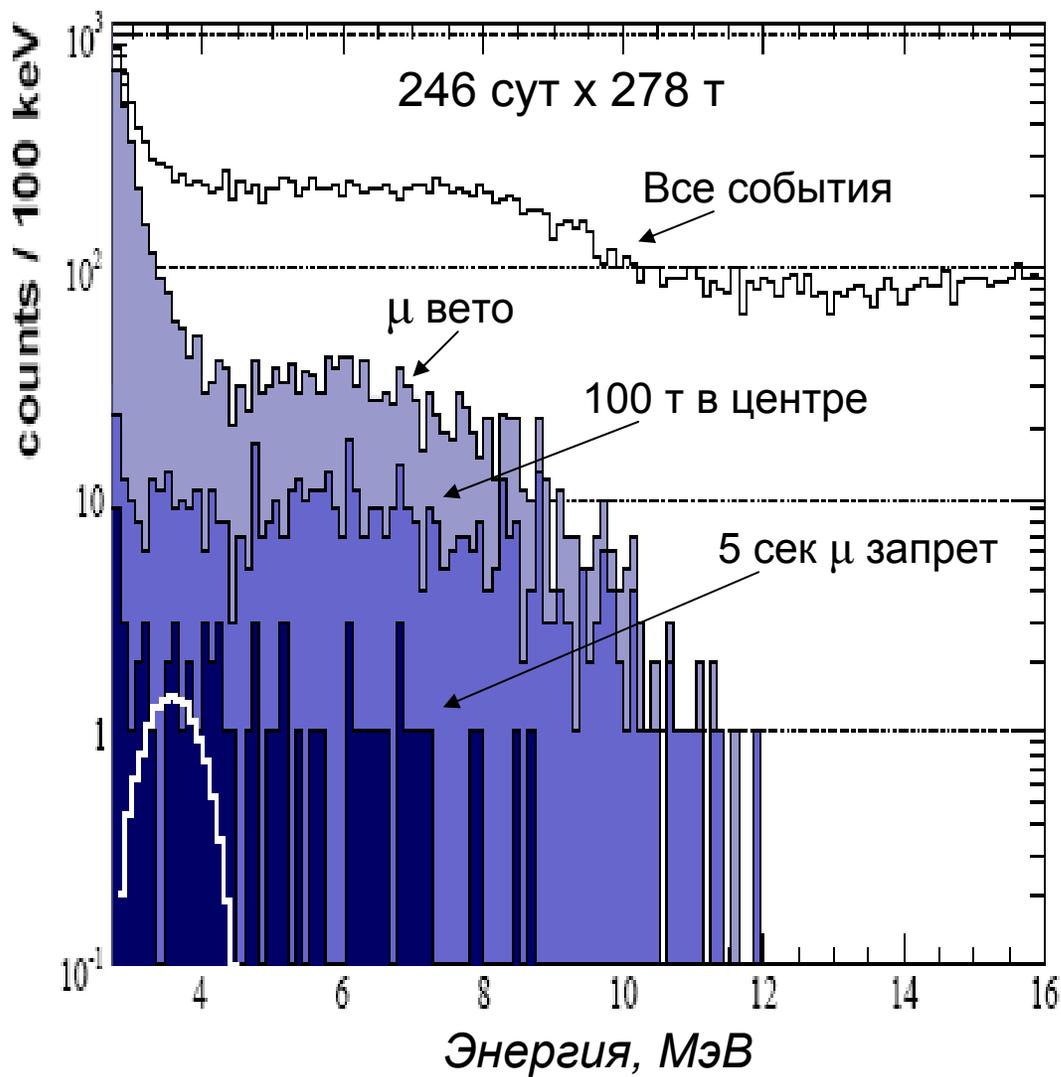
$$f_{\text{CNO}} < 2.5 \text{ (95\% у.д.)}$$

$$\delta m^2 = (7.5^{+0.16}_{-0.24}) 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$\tan^2\theta = 0.457^{+0.033}_{-0.025}$$



Регистрация ^8B -нейтрино в интервале 3.0 -16 МэВ



Ожидаемая скорость счета в **200 раз меньше** чем для ^7Be -нейтрино. Порог 3.0 МэВ связан с регистрацией γ -пика 2.614 МэВ.

Отбор событий

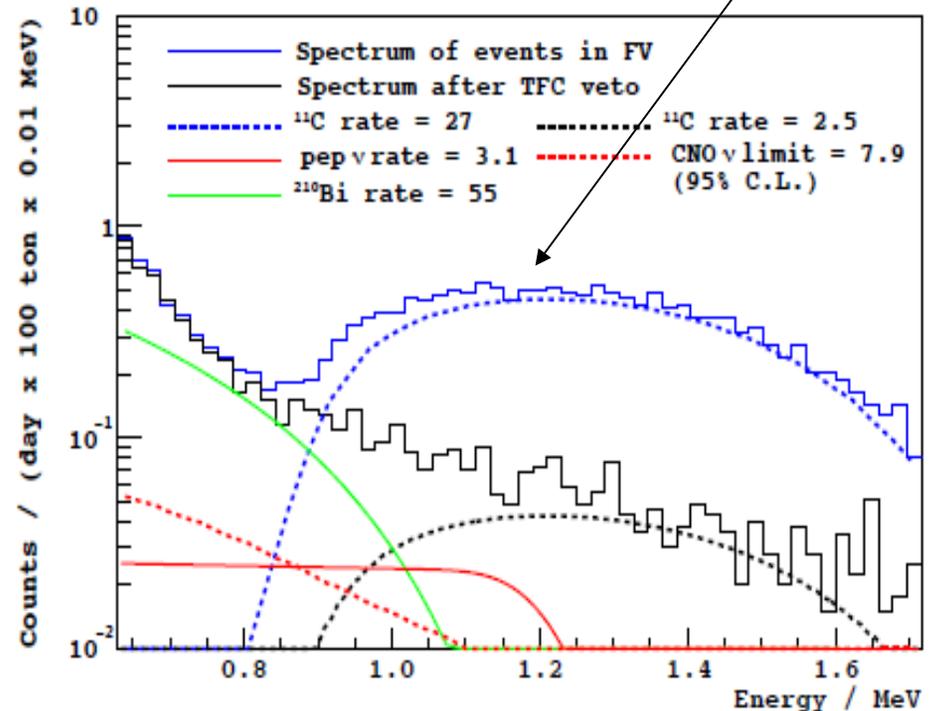
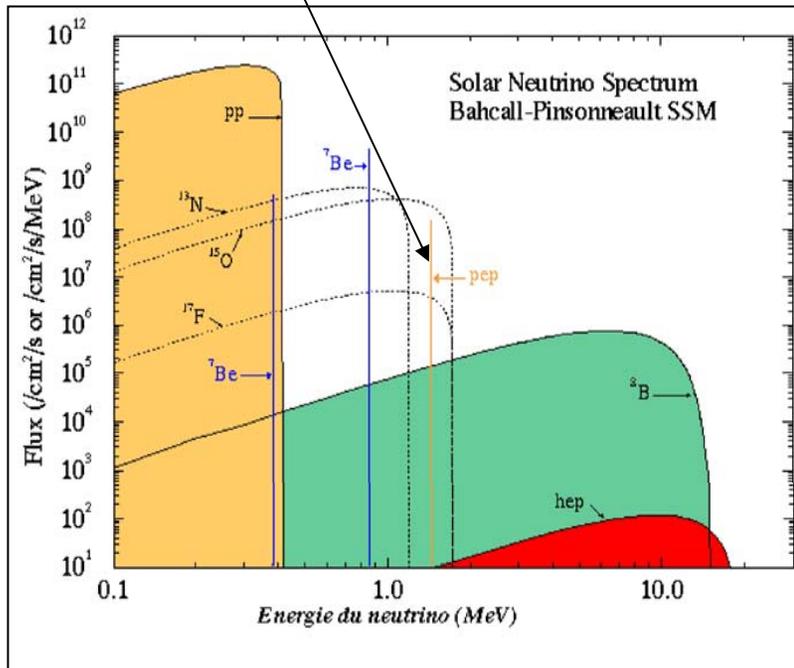
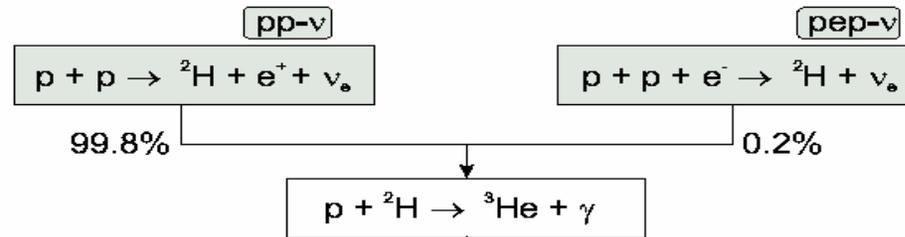
1. Мюонное вето
2. **Центральный объем** массой 100 т
3. Удаление событий в интервале 2 мс после мюонов пересекающий танк (нейтроны) + 5 с после мюонов, пересекающих SSS ^8Li , ^6He (23.4% м. вр.)
4. **Удаление $^{214}\text{Bi-Po}$ событий**
5. **Учет событий ^{10}C**
6. Учет событий ^{208}Tl исходя из числа $^{212}\text{BiPo}$ совпадений

Обнаружение пер-нейтрино: $p+p+e \rightarrow d+\nu$

Phys.Rev.Lett.
108, 051302 (2012)

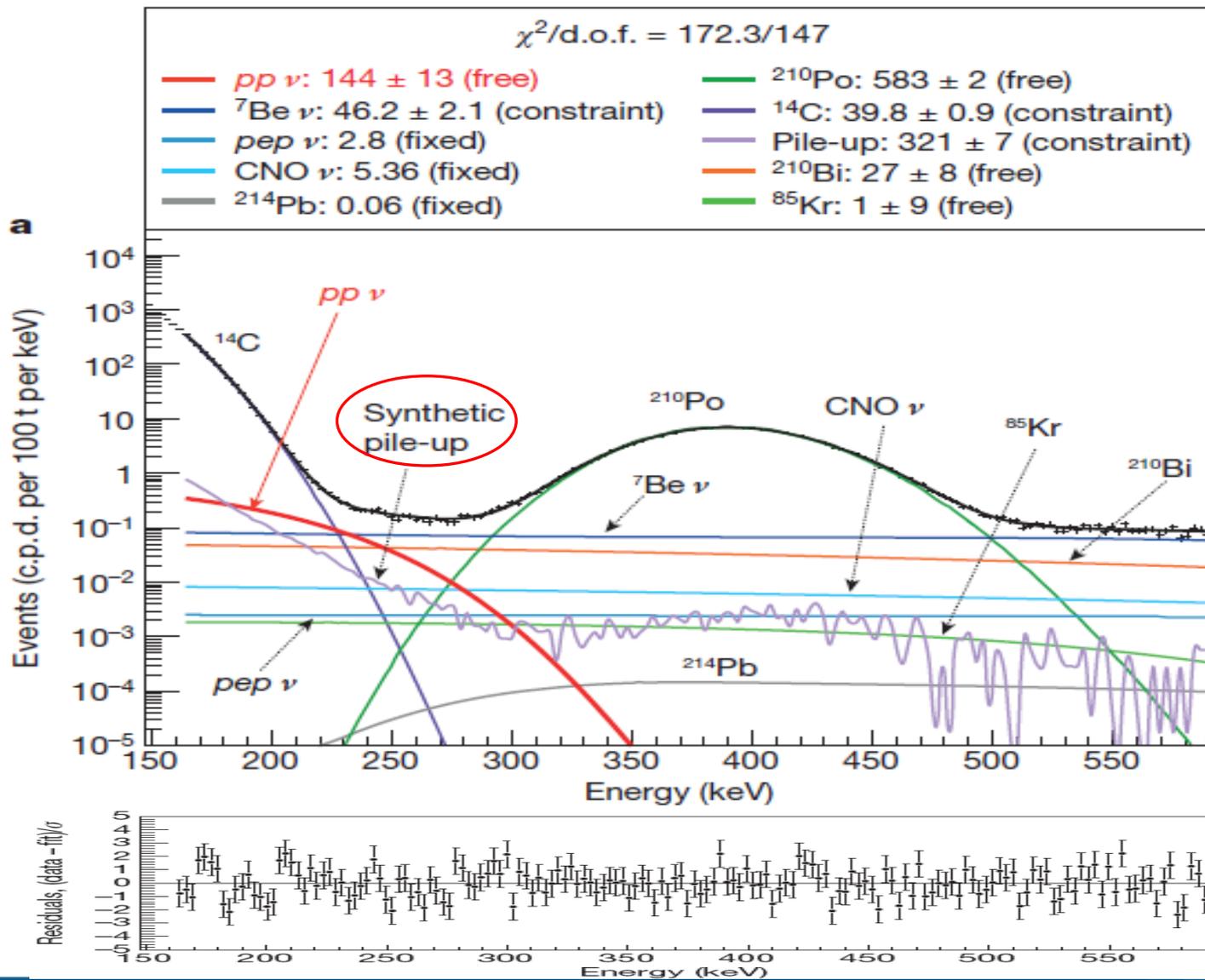
пер-нейтрино
с $E=1.44$ МэВ

Основной
фон от ^{11}C



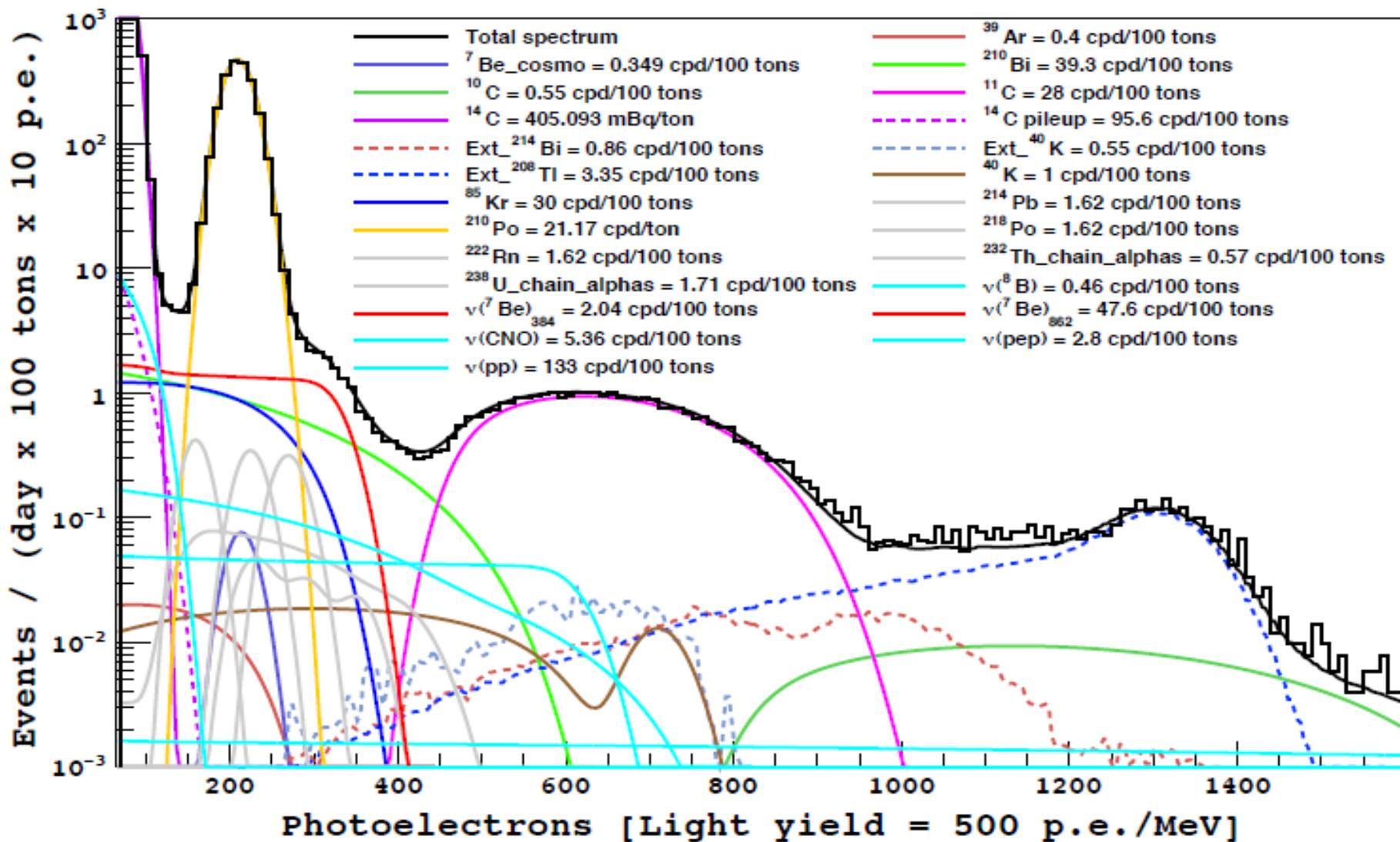
Детекторы солнечных нейтрино показали, что в Солнце действительно происходят ядерные реакции. Поток пер-нейтрино предсказан с точностью 1.2%. CNO нейтрино меняется в ~2 раза для high и low Z.

pp-нейтрино: фит в области 165 – 590 кэВ



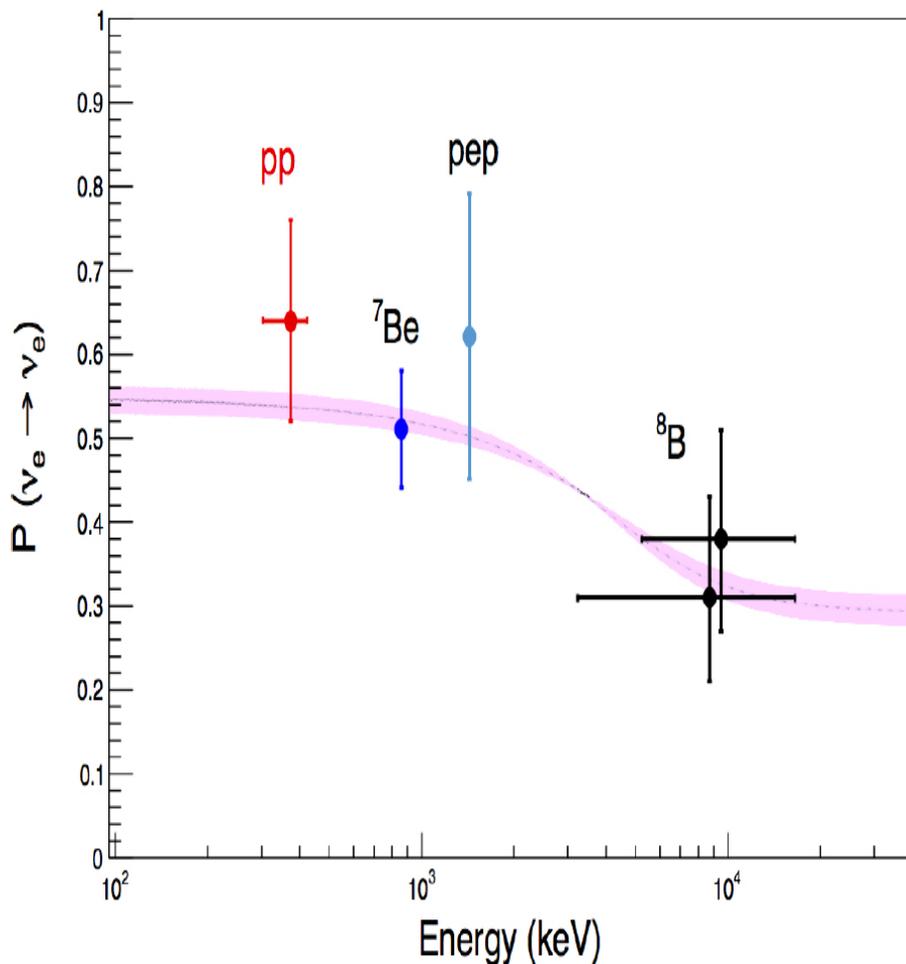
408 суток
живого
времени
январь 2012 –
май 2013:
ФАЗА II
(с окт. 2011)
после очистки
сцинтиллятора
с зимы 2010 с
более низким
содержанием
 ^{75}Kr и ^{210}Bi

Основные компоненты спектра Борексино



${}^{14}\text{C} \beta$, ${}^{210}\text{Po} \alpha$, ${}^7\text{Be} \nu$, ${}^{85}\text{Kr} \beta$, ${}^{210}\text{Bi} \beta$, ${}^{11}\text{C} \beta+$, ${}^{208}\text{Tl} \gamma$, ${}^{10}\text{C} \beta+$,

Вероятность «выживания» электронного нейтрино



Предсказания ССМ

$$\Phi_{pp} = 5.98 \times (1 \pm 0.006) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \text{ (HM)}$$

$$\Phi_{pp} = 6.03 \times (1 \pm 0.006) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \text{ (LM)}$$

$$R = 131 \pm 2 \text{ counts / 100 t day}$$

Измерено (стат. + сист.)

$$R = 144 \pm 13 \pm 10 \text{ counts / 100 t day}$$

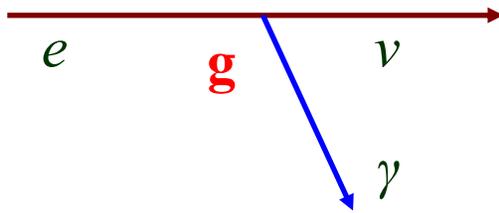
$$\Phi_{pp} = (6.6 \pm 0.7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

$$P_{ee} = 0.64 \pm 0.12$$

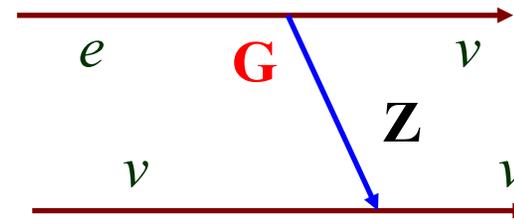
Определенная мощность Солнца 3.84×10^{33} эрг. Время необходимое для передачи тепла из центра к поверхности составляет $\sim 10^5$ лет. Солнце находится в термодинамическом равновесии на этой временной шкале.

Распад электрона: $e \rightarrow \nu + \gamma$, $e \rightarrow 3\nu$, $e \rightarrow \text{nothing}$

$$g(\bar{e}\gamma_\alpha\nu + \bar{\nu}\gamma_\alpha e)A_\alpha$$



$$G(\bar{\nu}\nu)(\bar{\nu}e)$$



Указанные распады невозможны в СМ. Калибровочная $U(1)$ -симметрия гарантирует сохранение электрического заряда и безмассовость фотона. В работах Зельдовича, Окуня и Волошина и Окуня была показана невозможность спонтанного нарушения $U(1)$ -симметрии с помощью механизма Хиггса. Прямое нарушение должно приводить к огромному (m_e/m_ν) числу фотонов.

**Л.Б. Окунь, О проверке закона сохранения электрического заряда и принципа Паули, УФН, 1989, Т.158, Вып.2, С.293-301.
«в фундаментальной физике, если что-то может быть проверено, оно обязательно должно быть проверено».**

В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, 1909 г.
«Электрон так же неисчерпаем как и атом. Природа бесконечна».

Список экспериментов по поиску $e \rightarrow \nu\gamma$, $e \rightarrow 3\nu$

year	experiment	material	decay mode	limit, years	CL
1959	Feinberg, Goldhaber	NaI	$e \rightarrow \nu\gamma$	10^{19}	68%
1959	Feinberg, Goldhaber	NaI	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	10^{17}	68%
1965	Moe, Reines	NaI	$e \rightarrow \nu\gamma$	4×10^{22}	68%
1965	Moe, Reines	NaI	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	2×10^{21}	68%
1975	Steinberg et al.	Ge	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	5.3×10^{21}	68%
1979	Kovalchuk et al. (Baksan)	NaI	$e \rightarrow \nu\gamma$	3.5×10^{23}	68%
1983	Belotti et al.	Ge	$e \rightarrow \nu\gamma$	3×10^{23}	68%
1983	Belotti et al.	Ge	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	2×10^{22}	68%
1986	Avignone III et al.	Ge	$e \rightarrow \nu\gamma$	1.5×10^{25}	68%
1993	Balysh et al. (Heidelberg-Moscow)	Ge	$e \rightarrow \nu\gamma$	1.63×10^{25}	68%
1995	Aharonov et al. (TWIN)	Ge	$e \rightarrow \nu\gamma$	2.1×10^{25}	90%
1995	Aharonov et al. (COSME)	Ge	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	2.6×10^{23}	90%
1996	Belli et al. (DAMA/LXe)	Xe	$e \rightarrow \nu\gamma$	2×10^{25}	68%
1996	Belli et al. (DAMA/LXe)	Xe	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	1.5×10^{23}	68%
1999	Belli et al. (DAMA)	NaI	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	$(1.5 - 2.4) \times 10^{23}$	90%
1999	Belli et al. (DAMA)	NaI (L-shell)	$e \rightarrow \nu\nu\nu$	2.4×10^{24}	90%
2000	Belli et al. (DAMA/LXe)	Xe	$e \rightarrow \nu\gamma$	2×10^{26}	90%
2002	Back et al. (Borexino/CTF-II)	PXE	$e \rightarrow \nu\gamma$	4.6×10^{26}	90%
2007	Klapdor-Kleingrothaus et al. (Heidelberg-Moscow)	Ge	$e \rightarrow \nu\gamma$	1.93×10^{26}	90%
2012	Bernabei et al. (DAMA/LIBRA)	NaI	e capture	1.2×10^{24}	90%

Невозможен в СМ. $U(1)$ -симметрия гарантирует сохранение электрического заряда и безмассовость фотона.

Прототип Борексино –СТФ (2000 г.)



ELSEVIER

Наша первая работа для коллаборации

Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 118 (2003) 497

NUCLEAR PHYSICS B
PROCEEDINGS
SUPPLEMENTS

www.elsevier.com/locate/nucp

Search for the electron decay mode $e \rightarrow \gamma + \nu$ with the prototype of the BOREXINO detector

O.Ju.Smirnov^a * and A.Derbin^b †
on behalf of the Borexino collaboration

^aJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^bSt. Petersburg Nuclear Physics Inst. - Gatchina, Russia



ELSEVIER

Physics Letters, 2002

17 January 2002

Physics Letters B 525 (2002) 29–40

PHYSICS LETTERS B

www.elsevier.com/locate/npe

Search for electron decay mode $e \rightarrow \gamma + \nu$ with prototype of Borexino detector

H.O. Back^a, M. Balata^a, A. de Bariⁱ, T. Beau^c, A. de Bellefon^c, G. Bellini^a, J. Benziger^p, S. Bonetti^a, C. Buck^d, B. Caccianiga^a, L. Cadonati^p, F. Calaprice^p, G. Cecchetⁱ, M. Chen^b, A. Di Credico^g, O. Dadoun^c, D. D'Angelo^b, A. Derbin^{1,1}, M. Deutsch^o, F. Elisei^j, A. Etenko^m, F. von Feilitzsch^e, R. Fernholz^p, R. Ford^p, D. Franco^a, B. Freudiger^d, C. Galbiati^p, F. Gatti^b, S. Gazzana^g, M.G. Giammarchi^{a,*,} D. Giugni^a, M. Goeger-Neff^o, A. Golubchikov^a, A. Goretti^g, C. Grieb^o, C. Hagner^q, T. Hagner^e, W. Hampel^d, B. Harding^p, F.X. Hartmann^d, G. Heusser^d, A. Ianni^{p,2}, A.M. Ianni^p, H. de Kerret^c, J. Kiko^d, T. Kirsten^d, G. Korga^{a,3}, G. Korschinek^e, Y. Kozlov^m, D. Kryn^c, M. Laubenstein^g, C. Lendvai^e, P. Lombardi^a, I. Machulin^m, S. Malvezzi^a, J. Maneira^a, I. Manno^f, G. Manuzio^b, F. Masetti^j, A. Martemianov^{g,4}, U. Mazzucato^j, K. McCarty^p, E. Meroni^a, L. Miramonti^a, M.E. Monzani^{a,9}, P. Musico^b, H. Neder^d, L. Niedermeier^a, L. Oberauer⁵, M. Obolensky^c, F. Ortica^j, M. Pallavicini^b, L. Papp^{a,3}, L. Perasso^a, A. Pocar^p, R.S. Raghavanⁿ, G. Ranucci^a, W. Rau^{g,d}, A. Razeto^b, E. Resconi^b, A. Sabelnikov^a, C. Salvo^b, R. Scardaoni^a, S. Schoenert^d, H. Seidel^e, H. Simgen^d, T. Shutt^p, M. Skorokhvatov^m, O. Smirnov¹, A. Sonnenschein^p, A. Sotnikov^l, S. Sukhotin^m, V. Tarasenkov^m, R. Tartaglia^g, G. Testera^b, D. Vignaud^c, S. Vitale^b, R.B. Vogelaar^q, V. Vyrodov^m, M. Wojcik^k, O. Zaimidoroga^l, G. Zuzel^k

Test of Electric Charge Conservation with Borexino

M. Agostini,^{19,21} S. Appel,¹⁹ G. Bellini,¹¹ J. Benziger,¹⁵ D. Bick,⁴ G. Bonfini,¹⁰ D. Bravo,¹⁷ B. Caccianiga,¹¹ F. Calaprice,^{14,21} A. Caminata,³ P. Cavalcante,¹⁰ A. Chepurinov,²⁰ D. D'Angelo,¹¹ S. Davini,²¹ A. Derbin,¹³ L. Di Noto,³ I. Drachnev,²¹ A. Empl,²² A. Etenko,⁸ K. Fomenko,² D. Franco,¹ F. Gabriele,¹⁰ C. Galbiati,^{14,11} C. Ghiano,³ M. Giammarchi,¹¹ M. Goeger-Neff,¹⁹ A. Goretti,^{10,14} M. Gromov,^{20,26} C. Hagner,⁴ E. Hungerford,²² Aldo Ianni,^{10,27} Andrea Ianni,^{14,10} K. Jędrzejczak,⁷ M. Kaiser,⁴ V. Kobychyev,⁶ D. Korablev,² G. Korga,¹⁰ D. Kryn,¹ M. Laubenstein,¹⁰ B. Lehnert,²³ E. Litvinovich,^{8,9} F. Lombardi,¹⁰ P. Lombardi,¹¹ L. Ludhova,¹¹ G. Lukyanchenko,⁸ I. Machulin,^{8,9} S. Manecki,¹⁷ W. Maneschg,⁵ S. Marcocci,²¹ E. Meroni,¹¹ M. Meyer,⁴ L. Miramonti,¹¹ M. Misiaszek,^{7,10} M. Montuschi,¹⁸ P. Mosteiro,¹⁴ V. Muratova,¹³ B. Neumair,¹⁹ L. Oberauer,¹⁹ M. Obolensky,¹ F. Ortica,¹² K. Otis,¹⁶ M. Pallavicini,³ L. Papp,¹⁹ L. Perasso,³ A. Pocar,¹⁶ G. Ranucci,¹¹ A. Razeto,¹⁰ A. Re,¹¹ A. Romani,¹² R. Roncin,^{10,1} N. Rossi,¹⁰ S. Schönert,¹⁹ D. Semenov,¹³ H. Simgen,⁵ M. Skorokhvatov,^{8,9} O. Smirnov,² A. Sotnikov,² S. Sukhotin,⁸ Y. Suvorov,²⁴ R. Tartaglia,¹⁰ G. Testera,³ J. Thurn,²³ M. Toropova,⁸ E. Unzhakov,¹³ A. Vishneva,² R. B. Vogelaar,¹⁷ F. von Feilitzsch,¹⁹ H. Wang,²⁴ S. Weinz,²⁵ J. Winter,²⁵ M. Wojcik,⁷ M. Wurm,²⁵ Z. Yokley,¹⁷ O. Zaimidoroga,² S. Zavatarelli,³ K. Zuber,²³ and G. Zuzel⁷

¹AstroParticule et Cosmologie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/IRFU, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, 75205 Paris Cedex 13, France

²Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

³Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 16146 Genova, Italy

⁴Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, 22761 Hamburg, Germany

⁵Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg, Germany

⁶Kiev Institute for Nuclear Research, 03680 Kiev, Ukraine

⁷M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30348 Krakow, Poland

⁸NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

⁹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

¹⁰INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi (AQ), Italy

¹¹Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 20133 Milano, Italy

¹²Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotechnologie, Università e INFN, 06123 Perugia, Italy

¹³St. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188350 Gatchina, Russia

¹⁴Physics Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA

¹⁵Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA

¹⁶Amherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003, USA

¹⁷Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

¹⁸Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra Università degli Studi di Ferrara e INFN, 44122 Ferrara, Italy

¹⁹Physik-Department and Excellence Cluster Universe, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany

²⁰Lomonosov Moscow State University Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia

²¹Gran Sasso Science Institute (INFN), 67100 L'Aquila, Italy

²²Department of Physics, University of Houston, Houston, Texas 77204, USA

²³Department of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany

²⁴Physics and Astronomy Department, University of California Los Angeles (UCLA), Los Angeles, California 90095, USA

²⁵Institute of Physics and Excellence Cluster PRISMA, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany

²⁶Lomonosov Moscow State University Faculty of Physics, 119234 Moscow, Russia

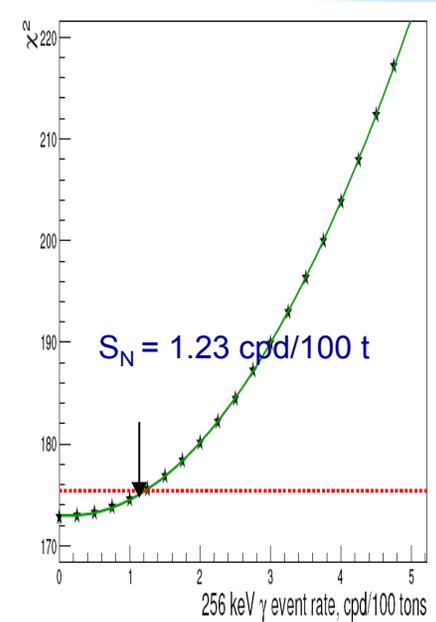
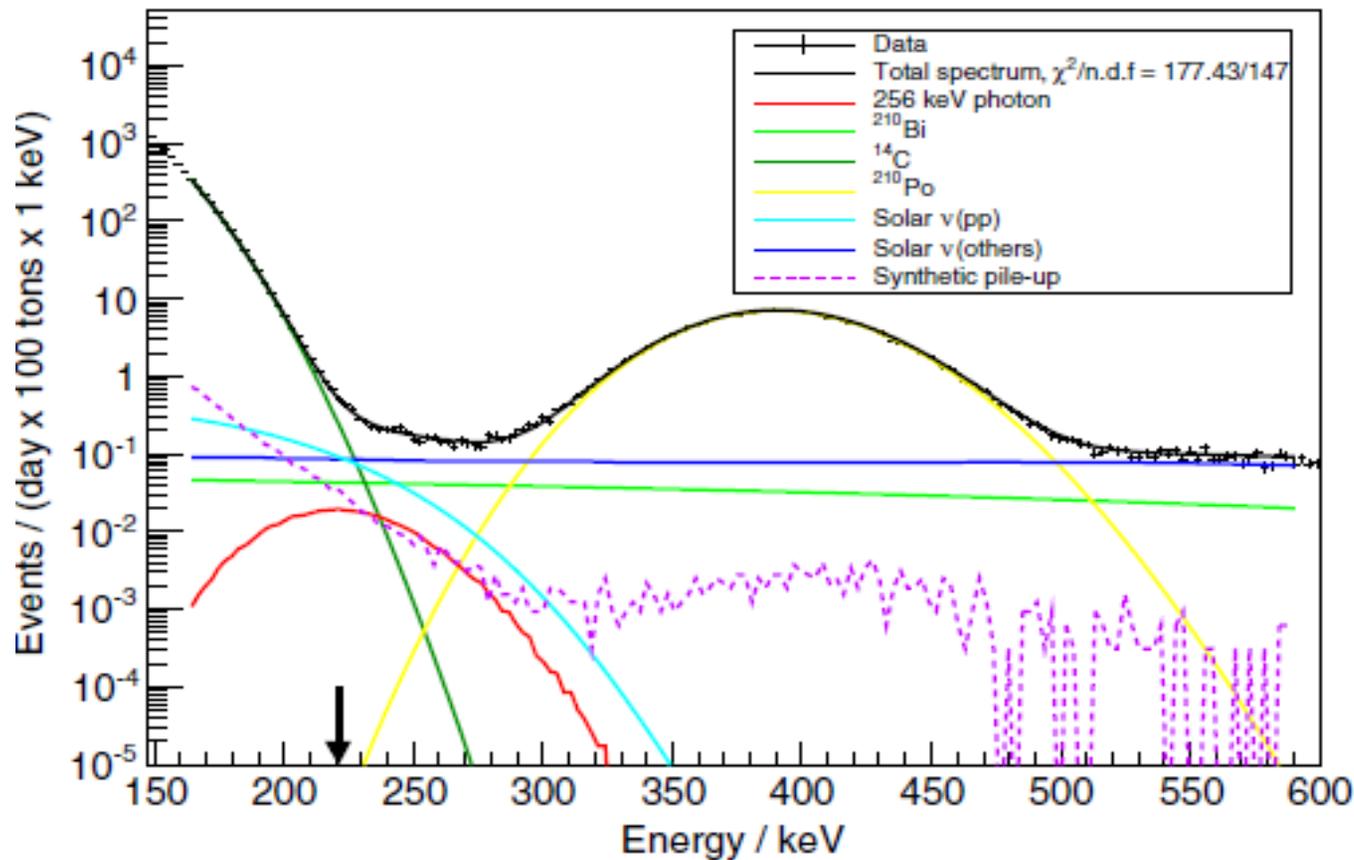
²⁷Laboratorio Subterráneo de Canfranc, Paseo de los Ayerbe S/N, 22880 Canfranc, Estacion Huesca, Spain

(Received 3 September 2015; published 3 December 2015)

ПИЯФ →

Время жизни электрона - $\tau \geq 6.6 \times 10^{28}$ лет

Fit result for the electron decay rate = 1.23 cpd/100 tons



$$\tau \geq \frac{\varepsilon N_e T}{S}$$

Задача состоит в поиске пика с энергией 256 кэВ. Необходимо знать положение (Q.F.) и форму пика. Стало возможным после того, как был выполнен фит для низкоэнергетической части спектра (pp-нейтрино). За время $T = 408$ сут. для массы 75.5 т ($N_e = 9.19 \times 10^{31}$ электронов в 278 т, эффективность $\varepsilon = 0.264$) верхний предел на число событий в пике составил $S = 379$ для 90% у.д.

Отмечена в Synopsis APS u Nature News

08.12.2015

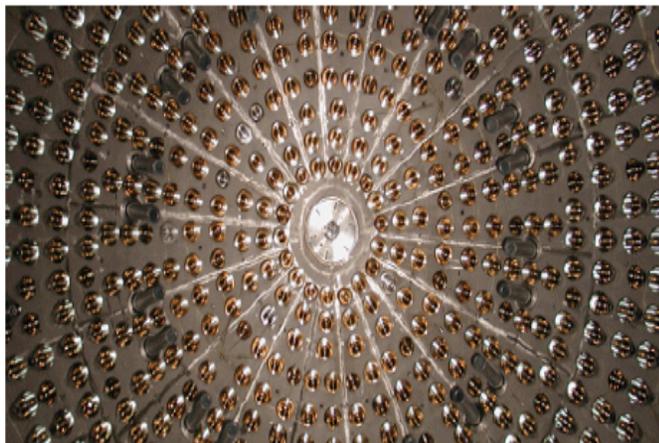
Physics - Synopsis: Still Waiting For Electron Decay



Synopsis: Still Waiting For Electron Decay

December 3, 2015

Scientists have placed new limits on how often electrons decay into neutrinos and photons, a reaction that—if it occurred—would violate the law of charge conservation.



Marco Pallavicini/INFN

ARTICLE PREVIEW

view full access options

NATURE | RESEARCH HIGHLIGHTS

NEWS DECEMBER 2015

PHYSICS

Long delay for electron decay

Nature 528, 167 (10 December 2015) doi:10.1038/528167b

Published online 09 December 2015

An underground experiment has yielded the strongest evidence so far that electrons are stable, by showing that they last for at least 66 billion billion billion years before decaying into photons and neutrinos.

The Borexino detector, located underground at the Gran Sasso National Laboratory in central Italy, is looking mainly for...

Subject terms: Particle physics

Гео-нейтрино – анти- ν от распадов U, Th, ^{40}K

PHYSICAL REVIEW D 92, 031101(R) (2015)

новая возможность узнать как устроена Земля

Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data

M. Agostini,¹ S. Appel,¹ G. Bellini,² J. Benziger,³ D. Bick,⁴ G. Bonfimi,⁵ D. Bravo,⁶ B. Caccianiga,² F. Calaprice,⁷ A. Caminata,⁸ P. Cavalcante,⁵ A. Chepurinov,⁹ K. Choi,¹⁰ D. D'Angelo,² S. Davini,¹¹ A. Derbin,¹² L. Di Noto,⁸ I. Drachnev,¹¹ A. Empl,¹³ A. Etenko,¹⁴ G. Fiorentini,¹⁵ K. Fomenko,¹⁶ D. Franco,¹⁷ F. Gabriele,⁵ C. Galbiati,⁷ C. Ghiano,⁸ M. Giammarchi,² M. Goeger-Neff,¹ A. Goretti,⁷ M. Gromov,⁹ C. Hagner,⁴ T. Houdy,¹⁸ E. Hungerford,¹³ Aldo Ianni,⁵ Andrea Ianni,⁷ K. Jedrzejczak,¹⁹ M. Kaiser,⁴ V. Kobychew,²⁰ D. Korabiev,¹⁶ G. Korga,⁵ D. Kryn,¹⁷ M. Laubenstein,⁵ B. Lehnert,²¹ E. Litvinovich,^{14,22} F. Lombardi,⁵ P. Lombardi,² L. Ludhova,² G. Lukyanchenko,^{14,22} I. Machulin,^{14,22} S. Manecki,⁶ W. Maneschg,²³ F. Mantovani,¹⁵ S. Marocci,¹¹ E. Meroni,² M. Meyer,⁴ L. Miramonti,² M. Misiaszek,^{19,5} M. Montuschi,¹⁵ P. Mosteiro,⁷ V. Muratova,¹² B. Neumair,¹ L. Oberauer,¹ M. Obolensky,¹⁷ F. Ortica,²⁴ K. Otis,²⁵ L. Pagani,⁸ M. Pallavicini,⁸ L. Papp,¹ L. Perasso,⁸ A. Pocar,²⁵ G. Ranucci,² A. Razeto,⁵ A. Re,² B. Ricci,¹⁵ A. Romani,²⁴ R. Roncin,^{5,17} N. Rossi,⁵ S. Schönert,¹ D. Semenov,¹² H. Simgen,²³ M. Skorokhvatov,^{14,22} O. Smirnov,¹⁶ A. Sotnikov,¹⁶ S. Sukhotin,¹⁴ Y. Suvorov,^{26,14} R. Tartaglia,⁵ G. Testera,⁸ J. Thurn,²¹ M. Toropova,¹⁴ E. Unzhakov,¹² R. B. Vogelaar,⁶ F. von Feilitzsch,¹ H. Wang,²⁶ S. Weinz,²⁷ J. Winter,²⁷ M. Wojcik,¹⁹ M. Wurm,²⁷ Z. Yokley,⁶ O. Zaimidoroga,¹⁶ S. Zavatarelli,⁸ K. Zuber,²¹ and G. Zuzel¹⁹

(Borexino Collaboration)

¹Physik-Department and Excellence Cluster Universe, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany

²Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 20133 Milano, Italy

³Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA

⁴Institut für Experimentalphysik, Universität, 22761 Hamburg, Germany

⁵INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi (AQ), Italy

⁶Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

⁷Physics Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA

⁸Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, Genova 16146, Italy

⁹Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia

¹⁰Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822, USA

¹¹Gran Sasso Science Institute (INFN), 67100 L'Aquila, Italy

¹²St. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188350 Gatchina, Russia

¹³Department of Physics, University of Houston, Houston, Texas 77204, USA

¹⁴NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

¹⁵Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra Università degli Studi di Ferrara e INFN, Via Saragat 1-44122, Ferrara, Italy

¹⁶Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

¹⁷AstroParticle and Cosmologie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/IRFU, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, 75205 Paris Cedex 13, France

¹⁸Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, Centre de Saclay, IRFU, 91191 Gif-sur-Yvette, France

¹⁹M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30059 Krakow, Poland

²⁰Kiev Institute for Nuclear Research, 06380 Kiev, Ukraine

²¹Department of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany

²²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

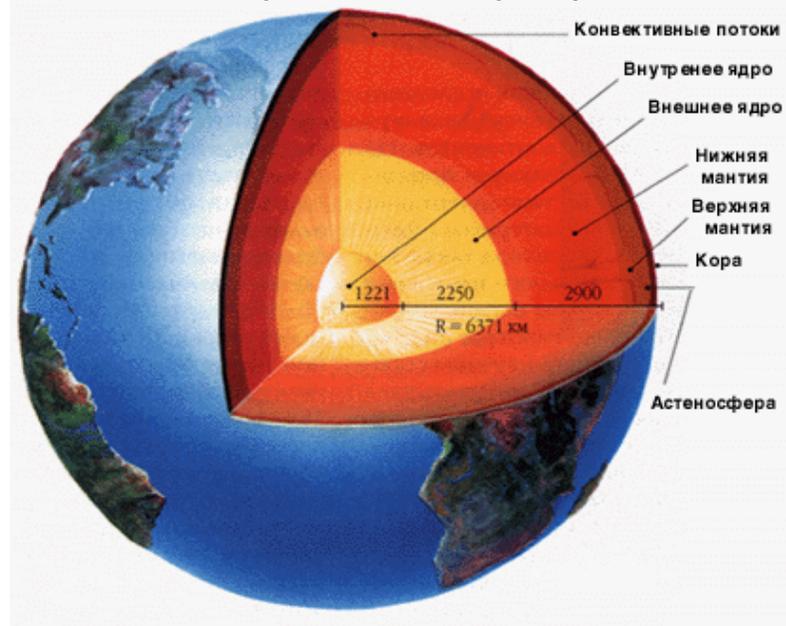
²³Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg, Germany

²⁴Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università e INFN, 06123 Perugia, Italy

²⁵Amherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003, USA

²⁶Physics and Astronomy Department, University of California Los Angeles (UCLA), Los Angeles, California 90095, USA

²⁷Institute of Physics and Excellence Cluster PRISMA, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany



Тепловой поток (47 ± 2) ТВт

Природа неясна

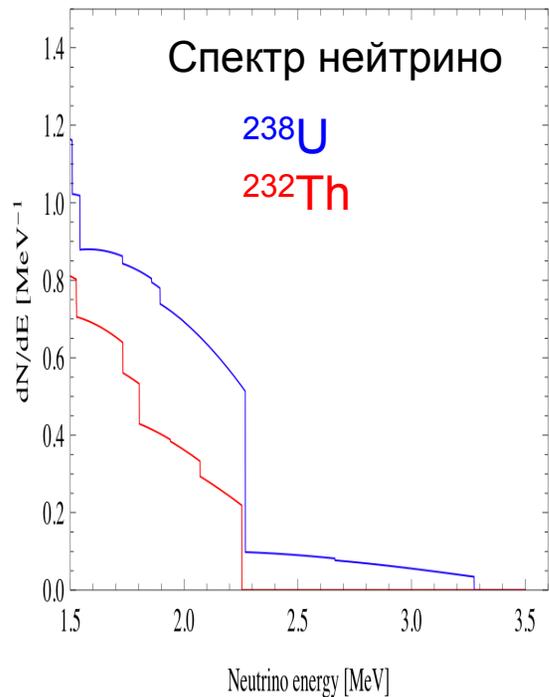
Гравитация, яд реактор, фазовые переходы, химические реакции

Какова доля радиогенного (U, Th, ^{40}K) тепла?

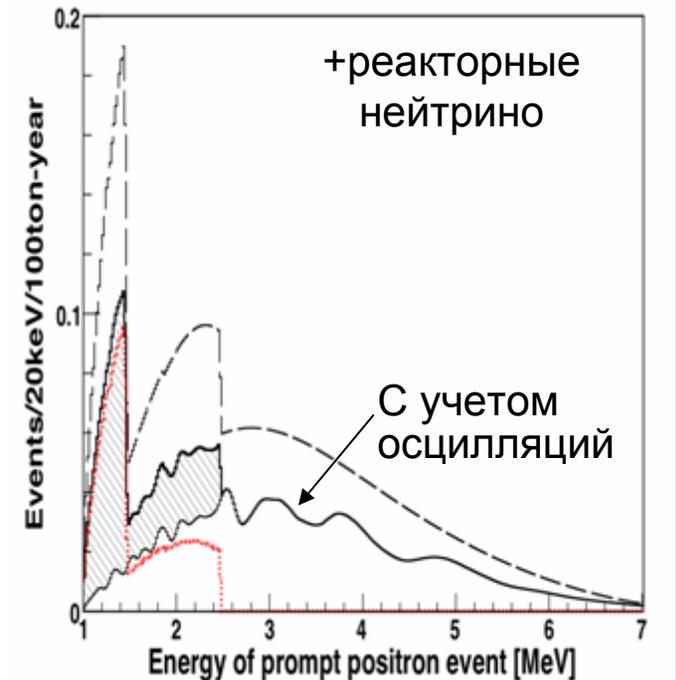
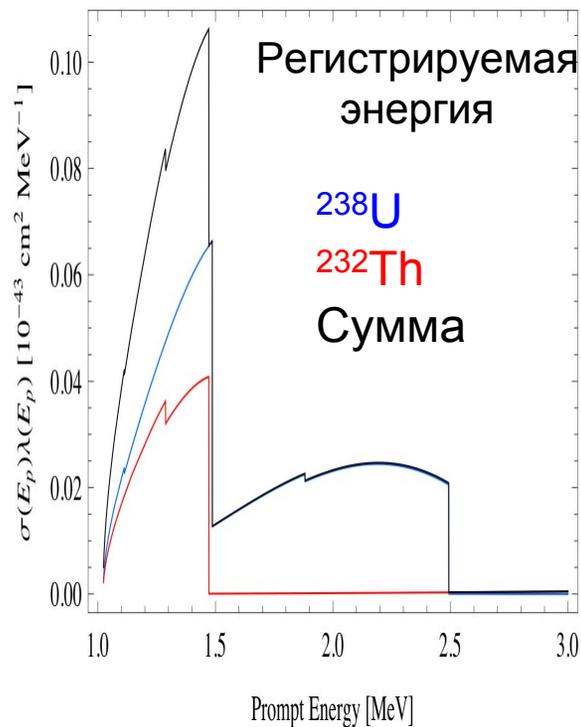
Стандартная BSE модель предсказывает 10, 20, 30 ТВт

Ожидаемый спектр позитронов

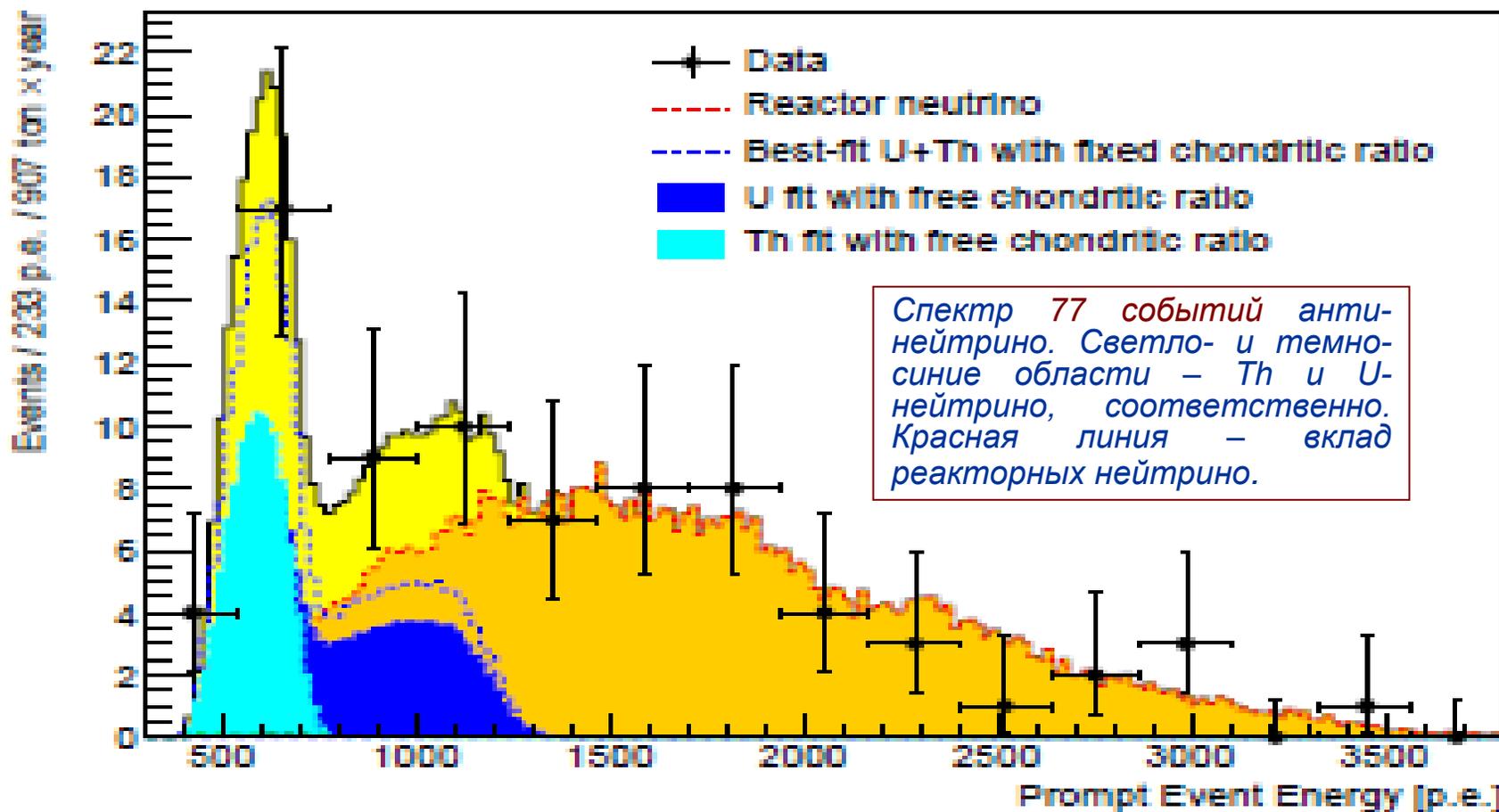
Decay	E_{\max} [MeV]	Q [MeV]	Q - $\langle E_{\nu} \rangle$ [MeV]	$\text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$	W kg^{-1}
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e^{-} + 6\nu_e$	3.25	51.7	47.7	7.41×10^7	0.94×10^{-4}
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e^{-} + 4\nu_e$	2.25	42.7	40.4	1.62×10^7	0.26×10^{-4}
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^{-} + \nu_e$ (89%)	1.311	1.311	0.59	2.30×10^8	0.22×10^{-4}
$^{40}\text{K} + e^{-} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + e^{-} + \nu_e$ (11%)	0.044	1.505	1.461	0.28×10^8	0.67×10^{-5}



$$\Phi_{\nu\text{-geo}} \sim 10^6 \text{ v/cm}^2 \text{ c}$$

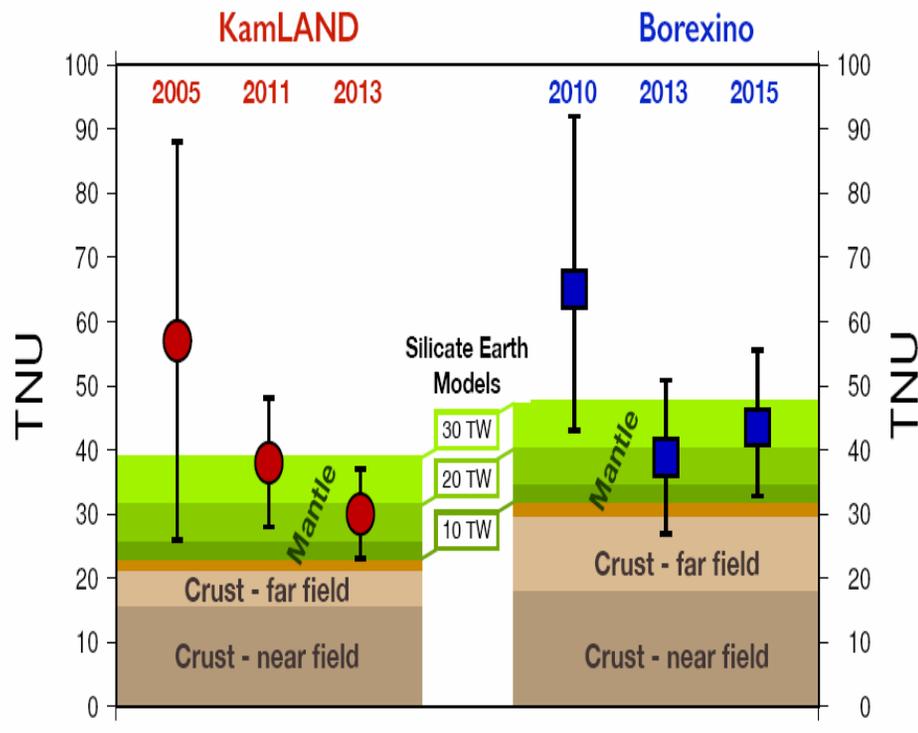
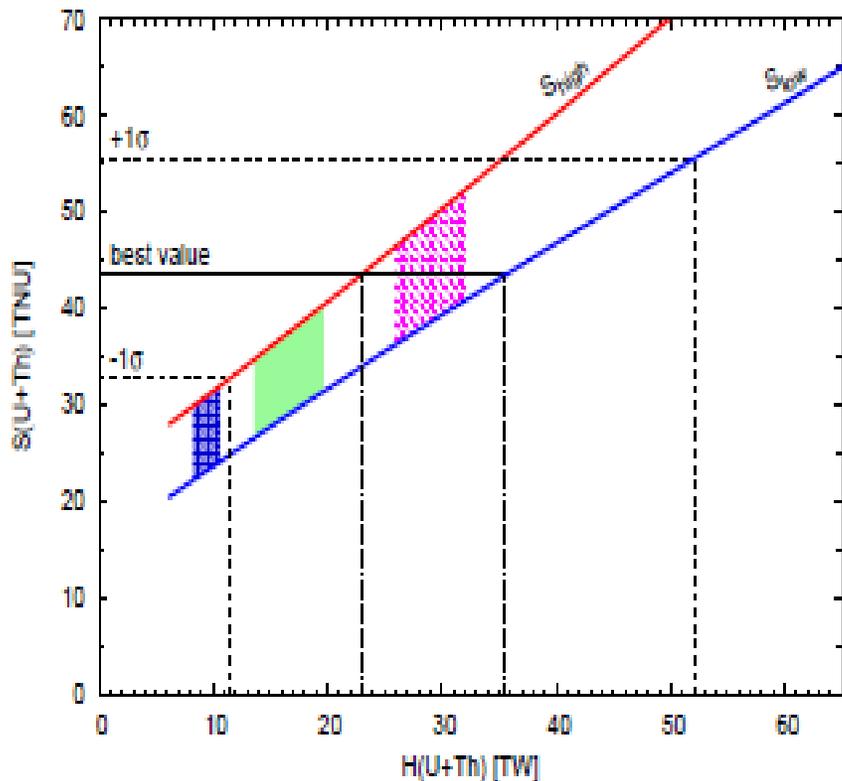


Анти- $\nu + p \rightarrow n + e^+$: Спектр e^+ за 2056 суток



Коллаборацияorexino представила данные по регистрации гео- и реакторных нейтрино за 2056 суток измерений с общей экспозицией $(5.5 \pm 0.3) \times 10^{31}$ протонов*год. В предположении массового отношения Th/U = 3.9, число зарегистрированных гео-нейтрино составляет $23.7^{+6.5}_{-5.7}$ (стат.) $^{+0.9}_{-0.6}$ (сист.). Отсутствие сигнала от гео-нейтрино исключается на уровне 3.6×10^{-9} (5.9 σ). Число реакторных нейтрино $52.7^{+8.5}_{-7.7}$ (стат.) $^{+0.7}_{-0.9}$ (сист.).

Радиоогенное (23-36) TWm vs полного (47±2) TWm



Мощность радиоогенного тепла, выделяемого U и Th семействами находится в интервале **23-36 TWm**. Полная мощность **(47±2) TWm**. $\Phi(U) = (2.7 \pm 0.7) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. $\Phi(\text{Th}) = (2.3 \pm 0.6) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Используя вычисления ожидаемого потока гео-нейтрино из земной коры, впервые удалось надежно (98% у.д.) установить существование потока гео-нейтрино из мантии, что является важным фактом для определения строения Земли.

Сотрудники ПИЯФ входят в рабочую группу «Антинейтрино», которая подготовила эту работу.

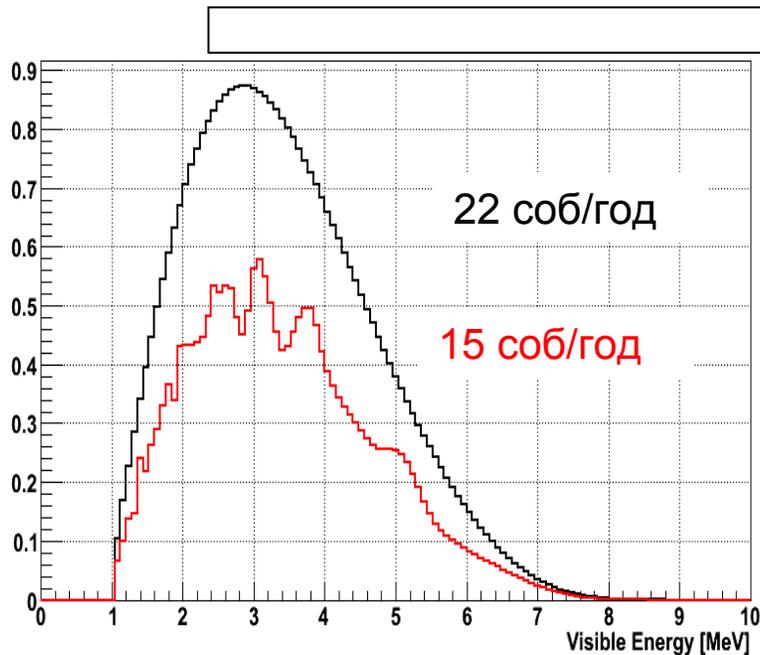


Реакторные нейтрино

Обратный бета-распад:



$$E_{\text{per}} = E_\nu - 0.78 \text{ MeV}, \sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$$



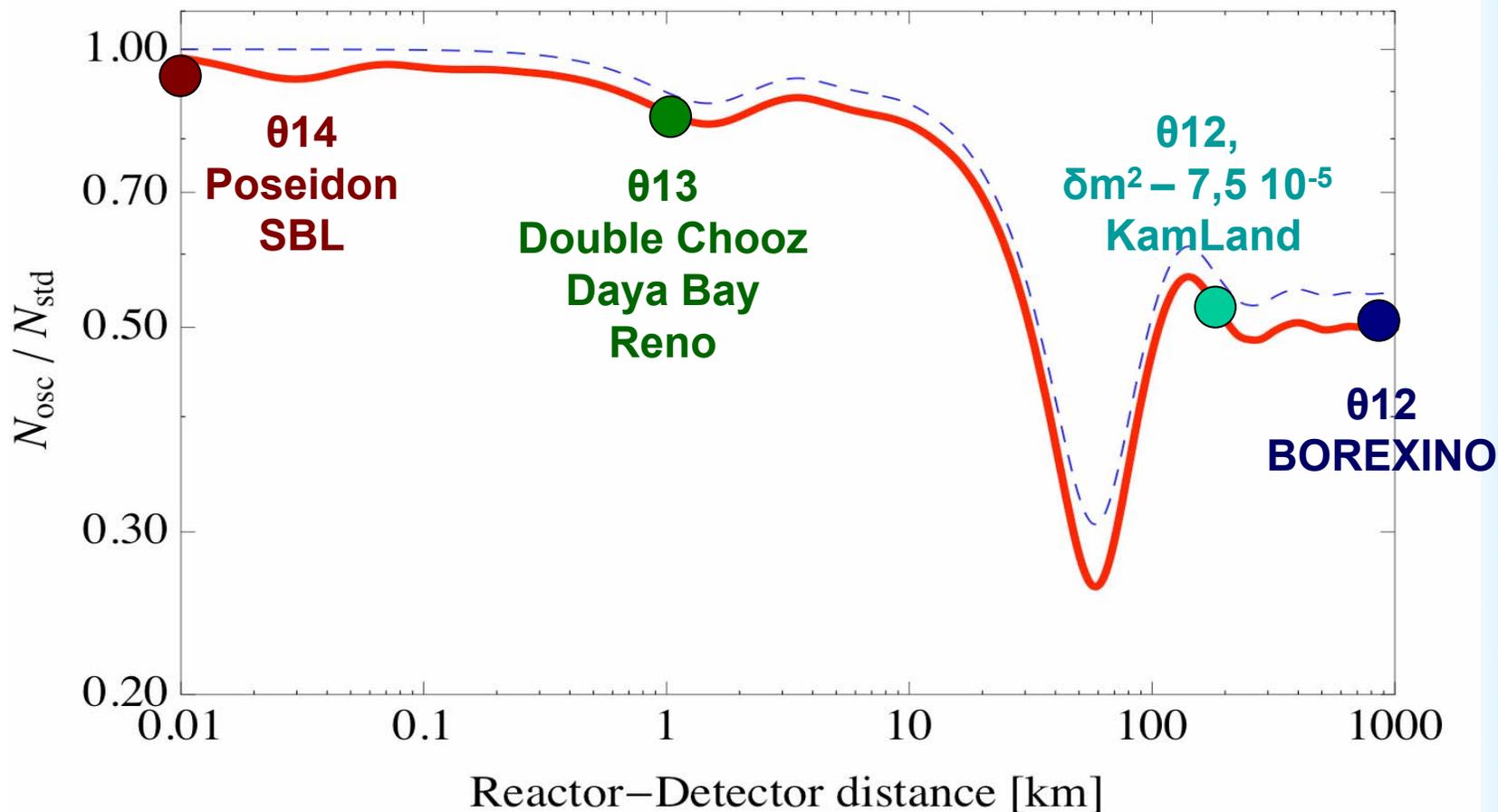
Ожидаемая скорость счета составляет 15 событий в год при 100% мощности всех реакторов. Борексино удачно расположен для поиска гео-нейтрино.



207 ядерных реакторов в 17 европейских странах. 245 остальных в мире дают 2.5%. 13 реакторов дают 40% вклад в ожидаемый сигнал. 3 наиболее мощных атомных станции дают 13%

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ фон от пренебрежимо мал. Космогенный фон связанный с β - n с изотопами ($^8\text{He}+^9\text{Li}$) и быстрыми нейтронами, пропущенными мюонной защитой подавляются 2 сек запретом после прохождения мюона через IV. Мертвое время 11%

Осцилляции реакторных нейтрино



Борексино измерил спектр позитронов на рекордно далеком расстоянии от ядерного реактора. Зарегистрировано 52.7 ± 8 событий. Ожидается 47.3 ± 2 соб. Результат находится в согласии с осцилляционным решением $P_{ee} = 1 - 0.5 \sin^2(2\theta)$. Мощность ядерного реактора в центре Земли менее 4.5 TBm (95% у.д.)

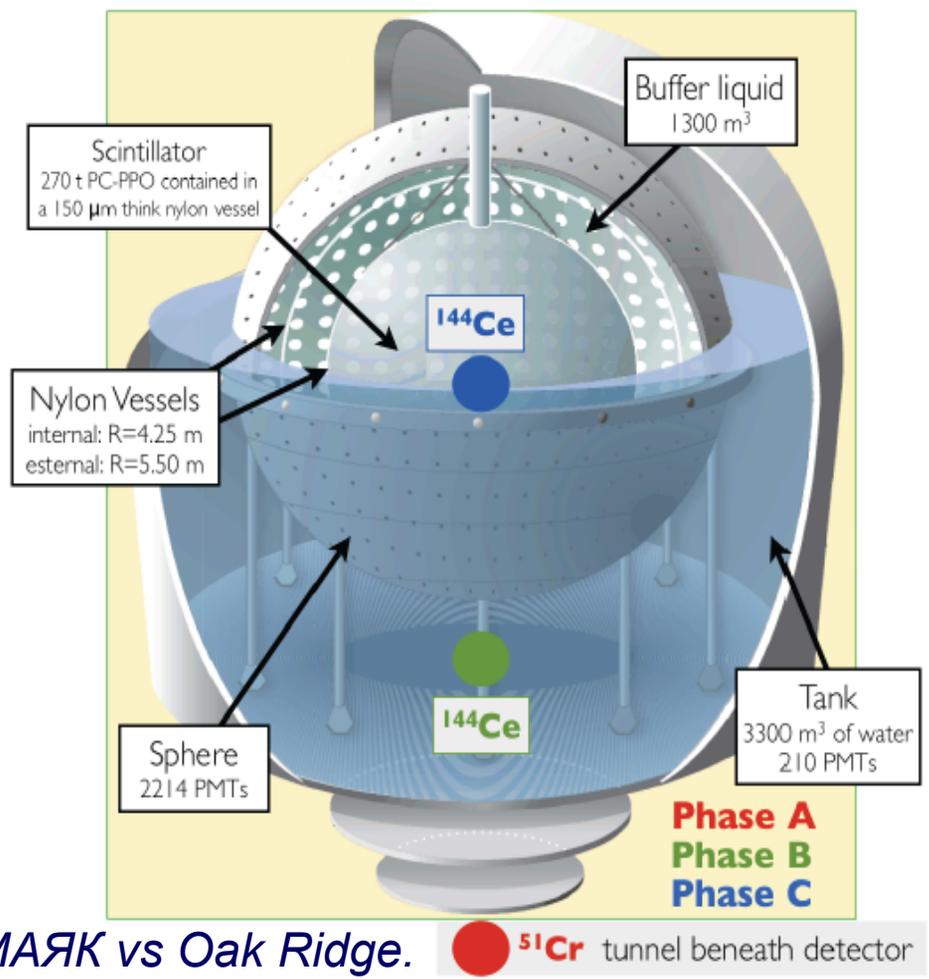
Проект SOX: Short distance Oscillations with BoreXino

Источники нейтрино:

- 1) Калибровки детектора по энергии и эффективности
- 2) Поиска магнитного момента

Стерильное нейтрино:

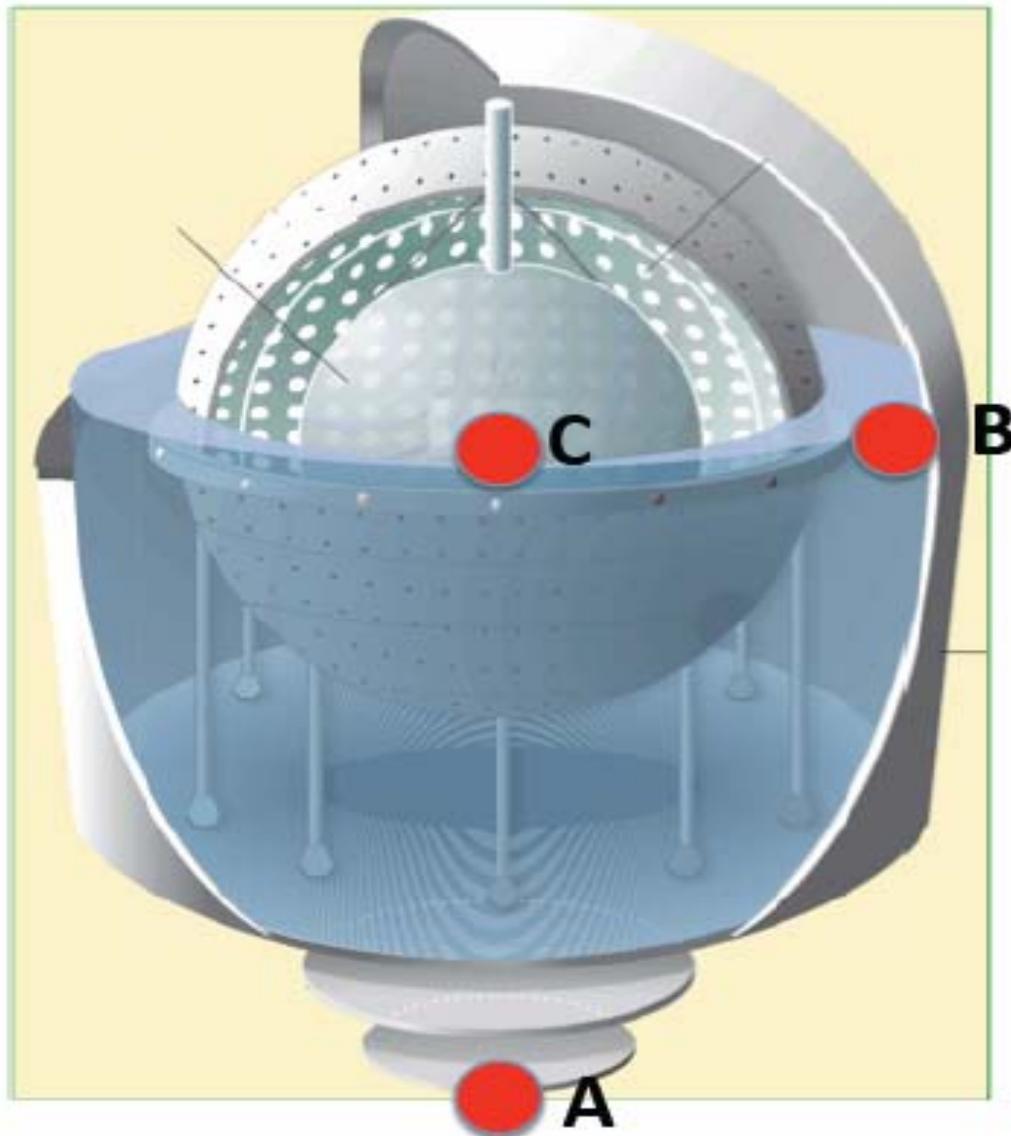
- 1) разрешение по координате **14 см при 1 МэВ**
- 2) по энергии **5% при 1 МэВ**
два подхода к поиску осцилляций на короткой базе
- 1) Использовать абсолютную интенсивность
- 2) использовать зависимость скорости счета от расстояния



Три этапа поиска осцилляций нейтрино с источниками нейтрино ⁵¹Cr и ¹⁴⁴Ce

Расположение источников нейтрино

- А**- под детектором 825 см до центра. Без изменений.
- В** – внутри водного танка 700 см до центра.
- С** – центр. Максимум изменений в конструкции

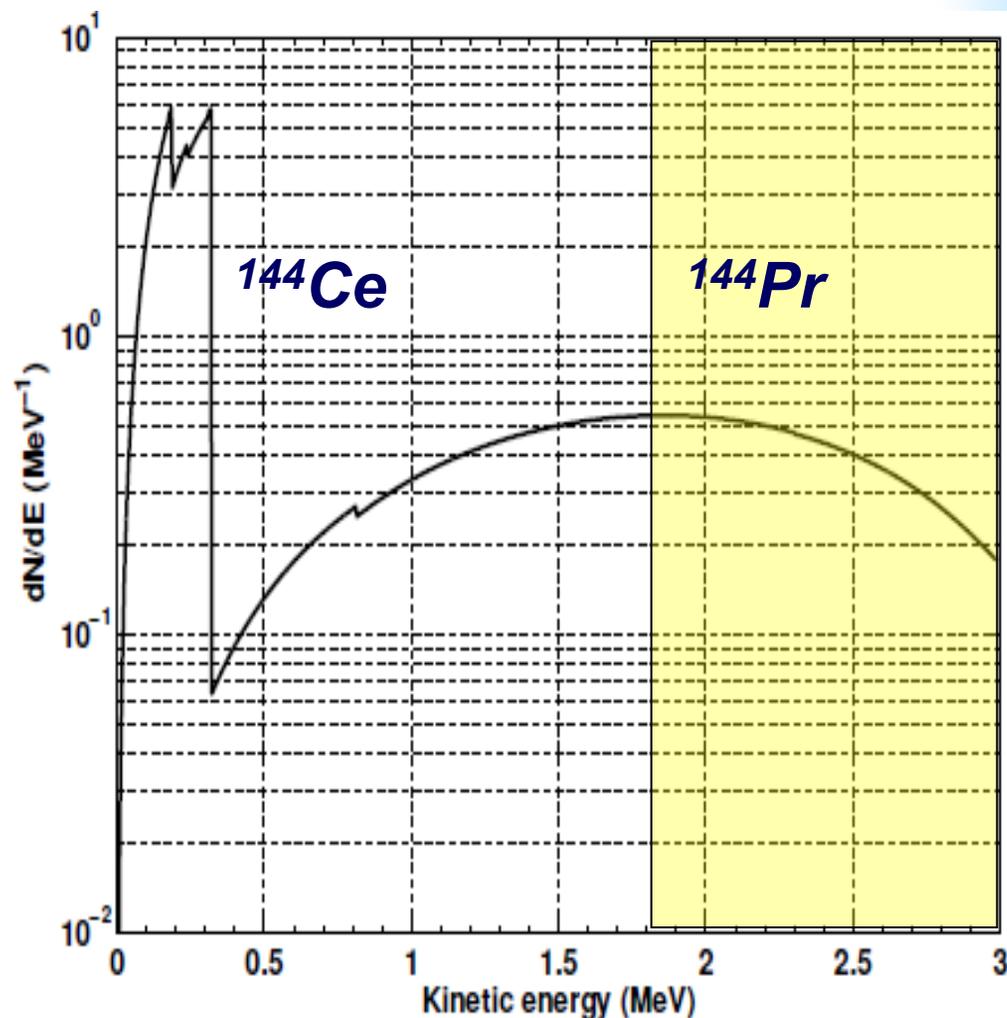
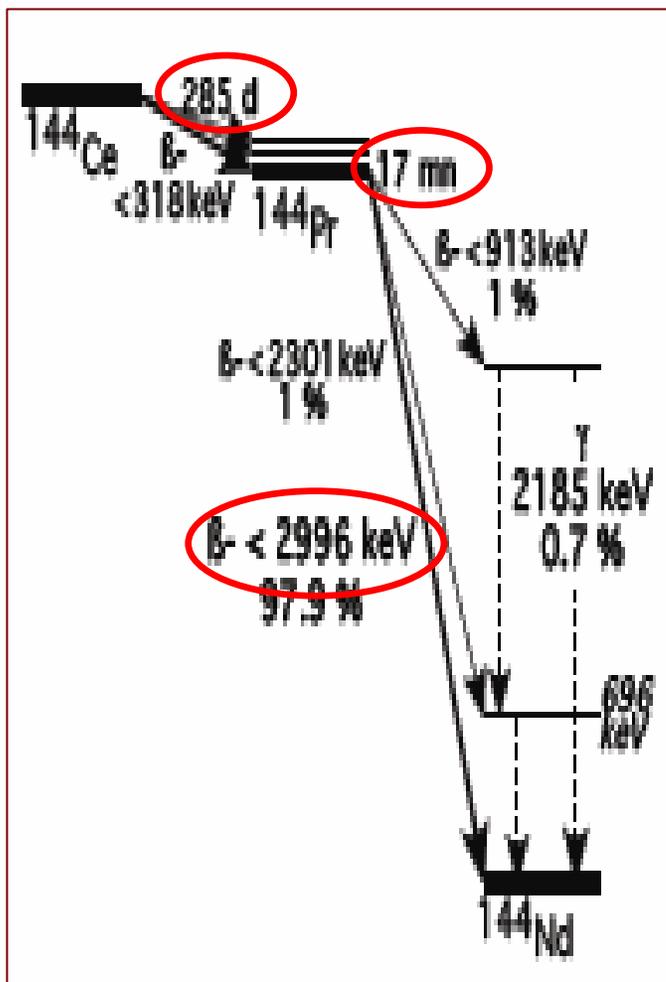


Источники нейтрино и антинейтрино

Источник (анти) нейтрино	Мо да	E_{ν} или E_{\max} (кэВ)	t , Сут..	Вт/ кКи	Кг/ МКи	производство
51Cr	ЕС	746 (81%)	40	0.19	0.01	50Cr(n,γ)51Cr
37Ar	ЕС	813 (100%)	50	~0.01		40Ca(n,α)37Ar
90Sr-90Y	β^-	2280 (100%)	1516 0	6.7	7.3	Деление осколок
144Ce-144Pr	β^-	2.9975 97.9%	411	7.6	0.3	Деление осколок

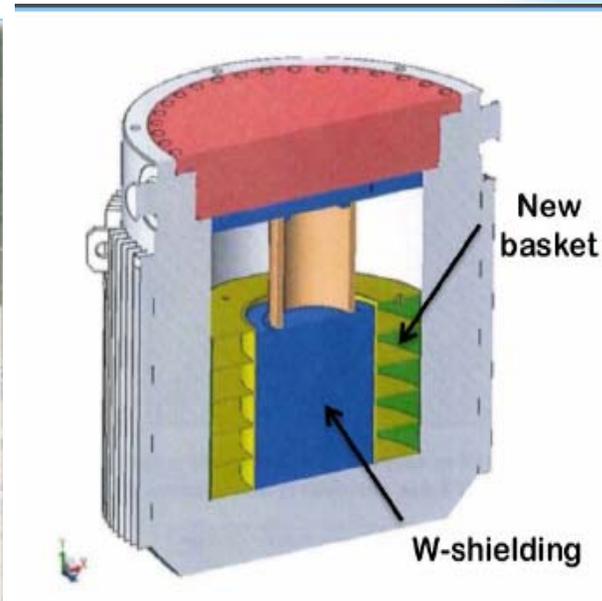
$\sim 10^4$ соб/год, $E > 250$ кэВ, $t > 30$ суток, мин Вт, размер, примеси

^{144}Ce - ^{144}Pr : спектр антинейтрино



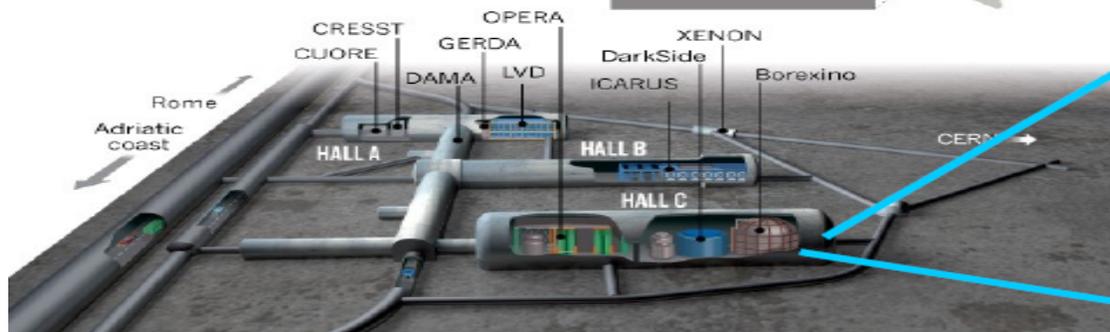
Максимальная энергия нейтрино для ^{144}Ce – 318 кэВ, для ^{144}Pr - 3.0 МэВ.
Порог реакции обратного бета-распада 1.8 МэВ.

Транспортировка МАЯК ---> LNGS



THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.



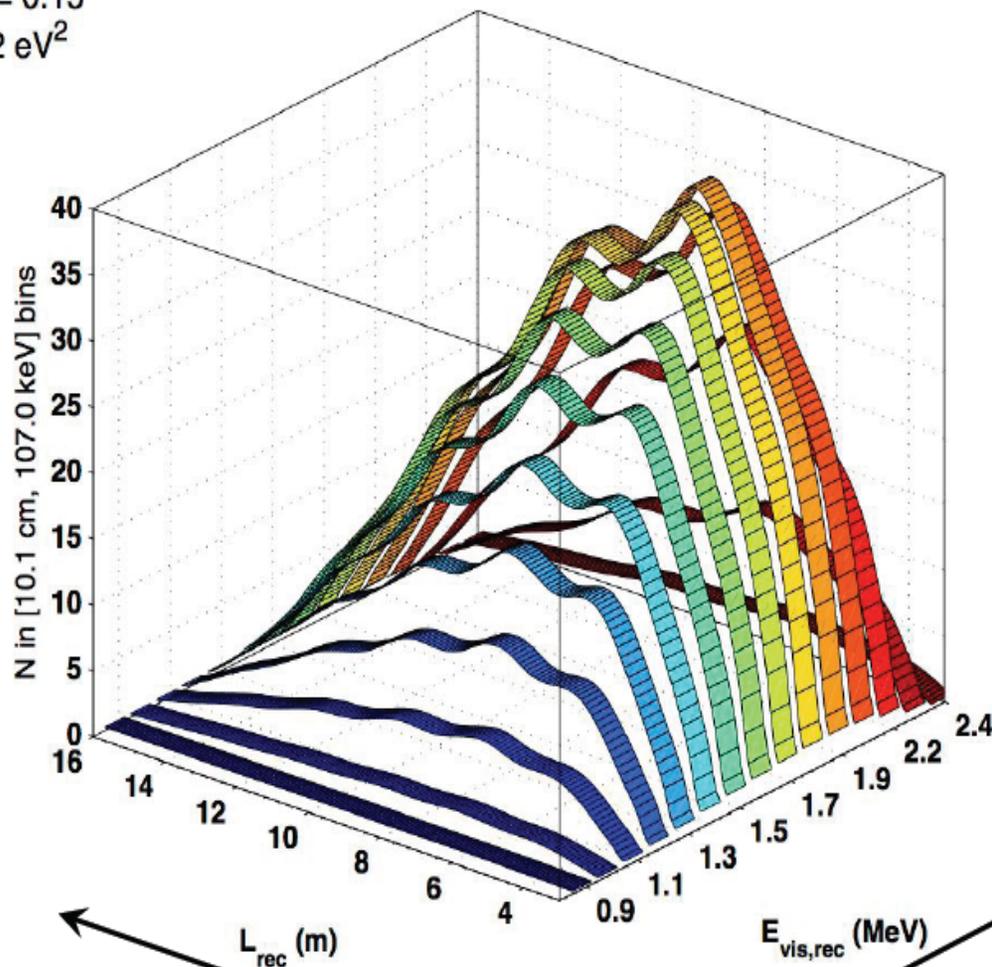
Из Челябинска в Петербург поездом, далее по морю во Францию, Гавр, Сакле и затем автотранспорт в Гран Сассо

Скорость счета в зависимости от R и E

$$\mathcal{P}(\theta, \Delta m^2, L, E) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

$$\sin^2(2\theta) = 0.15$$
$$\Delta m^2 = 2 \text{ eV}^2$$

Reconstructed 2D spectrum



100 кКи

8.5 м от центра.

1.5 года измерений.

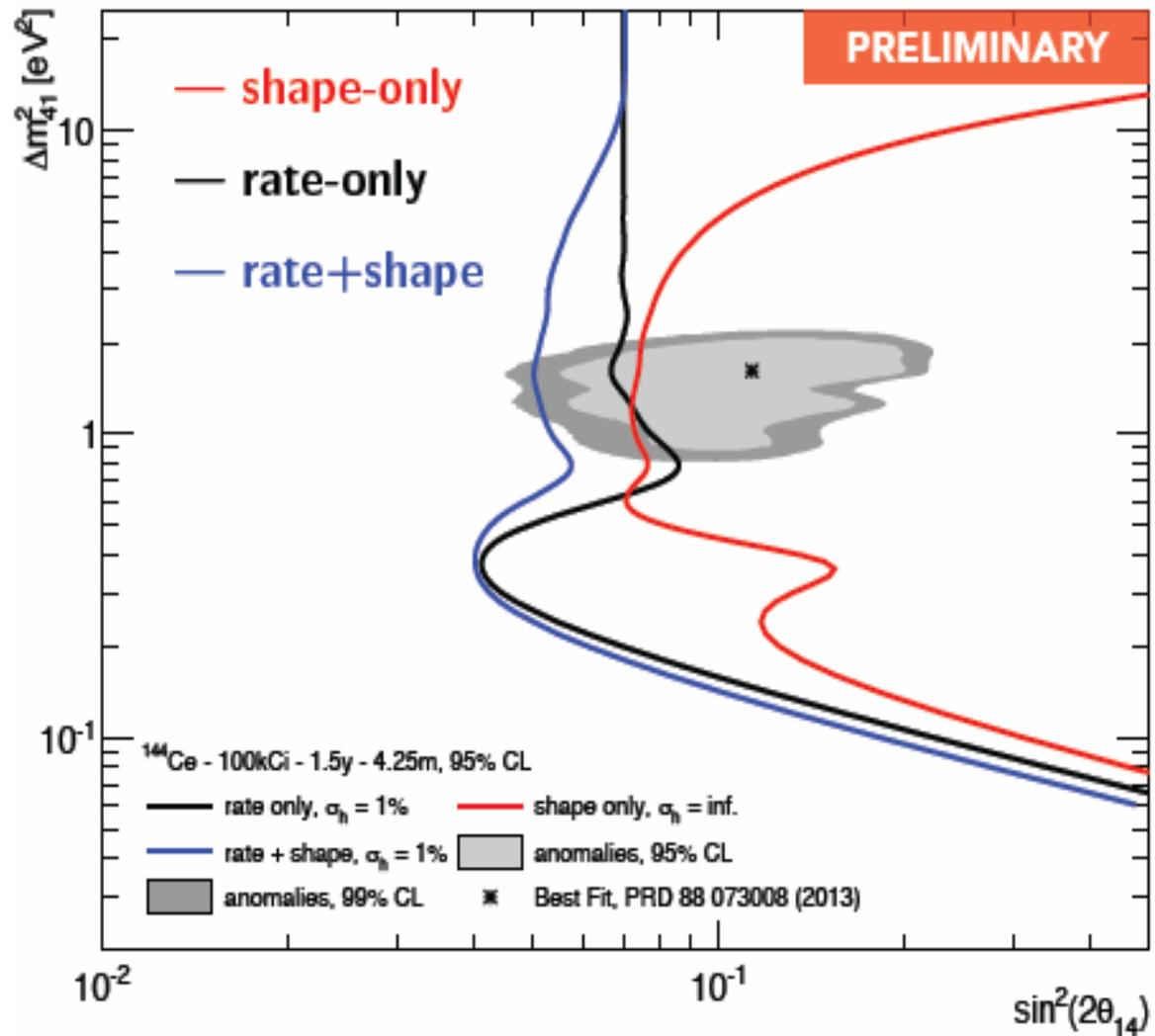
10⁴ событий.

$\sigma_E = 5\%$ (1 МэВ).

$\sigma_R = 15$ см (1 МэВ)

Фон = 0

Чувствительность SOX_Ce к стерильному нейтрино



Измерение формы (R,Ev)

1. Smoking-gun
2. Чувствительны к $\delta m^2 \approx 0.5 - 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимо хорошее энергетическое и пространственное разрешение
4. Чувствительность определяется статистикой

Счет+форма

1. Улучшение чувствительности по сравнению с формой
2. Чувствительны к $\delta m^2 > 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимы точные измерения тепловыделения и преобразования мощности в активность
4. Важны систематические ошибки для энергетической и пространственной реконструкций и эффективности к реакции обратного бета-распада

100 кКи на 8.5 м от центра 1.5 года измерений

Планы коллаборации Борексино и новые задачи

0.+1 Магнитный момент

$(\mu_{eff}, e \rightarrow \nu \gamma, \nu_H \rightarrow \nu_L \gamma)$

1. Измерение CNO- нейтрино

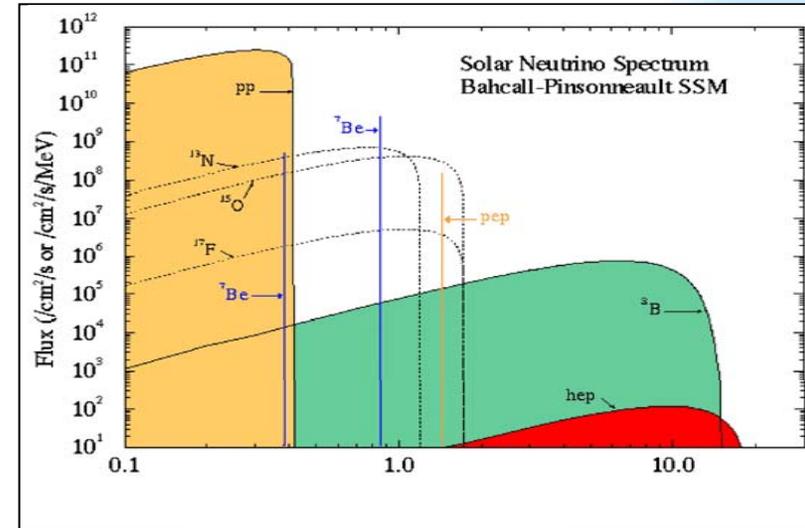
2. Стерильные нейтрино

$(^{144}\text{Ce}$ под детектором - вместе с программой с.н.)

3. Увеличение статистики для антинейтрино, ^7Be -, ^8B -,
рер-нейтрино, редких процессов

4. Стерильные нейтрино (^{51}Cr , ^{144}Ce в центре)

5. Поиск двойного бета-распада с Борексино (^{130}Xe , ^{125}Nd)



Поиск частиц темной материи в 2015

1. Поиск рассеяния **WIMPs (N1)** на ядрах **Ar** в эксперимент **DARKSIDE** (доклад Д.Семенова)

2. Поиск солнечных и реликтовых аксионов (N2)

2.1 Работы по созданию ^{169}Tm -содержащего детектора для регистрации резонансного поглощения солнечных аксионов с непрерывным спектром (доклад Е.Унжакова)

2.2 Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром ^{83}Kr в БНО ИЯИ

2.3 Участие в коллаборации **IA XO** – International Axion Observatory



First results from the DarkSide-50 dark matter experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso



P. Agnes^a, T. Alexander^{ae}, A. Alton^b, K. Arisaka^{ad}, H.O. Back^x, B. Baldin^g, K. Biery^g, G. Bonfini^d, M. Bossaⁱ, A. Brigatti^s, J. Brodsky^x, F. Budano^y, L. Cadonati^{ae}, F. Calaprice^x, N. Canci^{ad}, A. Candela^d, H. Cao^x, M. Carliello^h, P. Cavalcante^d, A. Chavarria^d, A. Chepurnov^t, A. G. Cocco^u, L. Crippa^s, D. D'Angelo^s, M. D'Incecco^d, S. Davini^k, M. De Deo^d, A. Derbin^v, A. Devoto^c, F. Di Eusanio^x, G. Di Pietro^s, E. Edkins^j, A. Empl^k, A. Fan^{ad}, G. Fiorillo^u, K. Fomenko^f, G. Forster^{ae}, D. Franco^a, F. Gabriele^d, C. Galbiati^x, A. Goretti^x, L. Grandi^d, M. Gromov^t, M.Y. Guanⁱ, Y. Guardincerri^g, B. Hackett^j, K. Herner^g, E.V. Hungerford^k, Al. Ianni^d, An. Ianni^x, C. Jollet^{aa}, K. Keeter^e, C. Kendziora^g, S. Kidner^{af}, V. Kobaychevⁿ, G. Koh^x, D. Korabely^f, G. Korga^k, A. Kurlej^{ae}, P.X. Li^l, B. Loer^x, P. Lombardi^s, C. Love^{ab}, L. Ludhova^s, S. Luitz^z, Y.Q. Ma^l, I. Machulin^{or}, A. Mandaranoⁱ, S. Mari^y, J. Maricic^j, L. Marini^v, C.J. Martoff^{ab}, A. Meregaglia^{aa}, E. Meroni^s, P.D. Meyers^x, R. Milincic^d, D. Montanari^g, A. Monte^{ae}, M. Montuschi^d, M.E. Monzani^z, P. Mosteiro^x, B. Mount^e, V. Muratova^y, P. Musico^h, A. Nelson^x, S. Odrowski^d, M. Okounkova^x, M. Orsini^d, F. Ortica^w, L. Pagani^h, M. Pallavicini^h, E. Pantic^{ad,ac}, L. Papp^{af}, S. Parmeggiano^s, R. Parsells^x, K. Pelczar^m, N. Pelliccia^w, S. Perasso^a, A. Pocar^{ad}, S. Pordes^g, D. Pugachev^o, H. Qian^x, K. Randle^{ae}, G. Ranucci^s, A. Razeto^d, B. Reinhold^j, A. Renshaw^{ad}, A. Romani^w, B. Rossi^{x,u}, N. Rossi^d, S.D. Rountree^{af}, D. Sablone^k, P. Saggese^d, R. Saldanha^d, W. Sands^x, S. Sangiorgio^p, E. Segreto^d, D. Semenov^v, E. Shields^x, M. Skorokhvatov^{or}, O. Smirnov^f, A. Sotnikov^f, C. Stanford^x, Y. Suvorov^{ad}, R. Tartaglia^d, J. Tatarowicz^{ab}, G. Testera^h, A. Tonazzo^a, E. Unzhakov^y, R.B. Vogelaar^{af}, M. Wada^x, S. Walker^u, H. Wang^{ad}, Y. Wang^l, A. Watson^{ab}, S. Westerdale^x, M. Wojcik^m, A. Wright^x, X. Xiang^x, J. Xu^x, C.G. Yang^l, J. Yoo^g, S. Zavatarelli^h, A. Zec^{ae}, C. Zhu^x, G. Zuzel^m

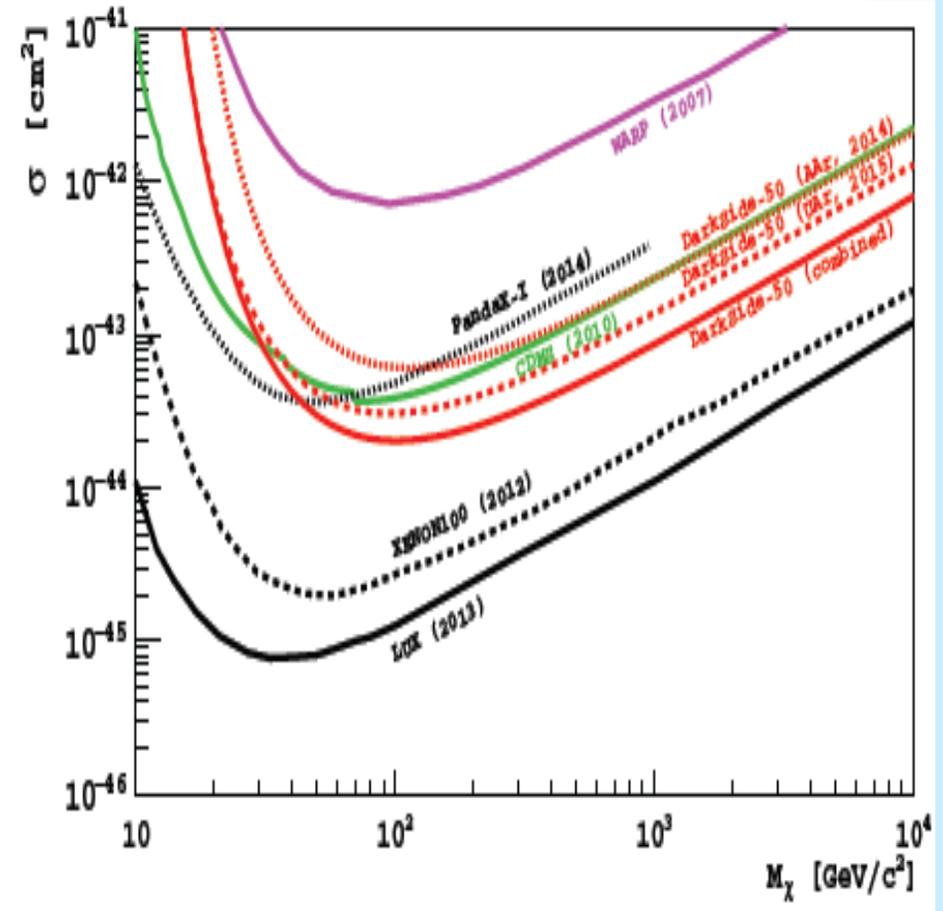
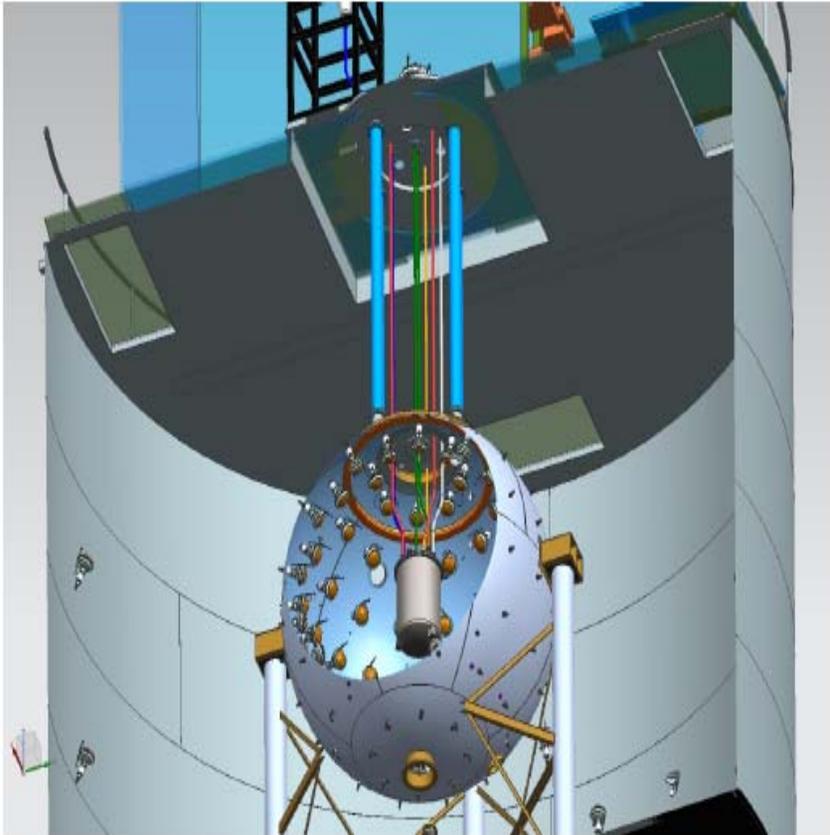
- ^a APC, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Paris 75205, France
- ^b Physics and Astronomy Department, Sioux Falls, SD 57197, USA
- ^c Physics Department, Università degli Studi and INFN, Cagliari 09042, Italy
- ^d Kavli Institute, Enrico Fermi Institute and Dept. of Physics, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA
- ^e School of Natural Sciences, Black Hills State University, Spearfish, SD 57799, USA
- ^f Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia
- ^g Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL 60510, USA
- ^h Physics Department, Università degli Studi and INFN, Genova 16146, Italy
- ⁱ Gran Sasso Science Institute, L'Aquila 67100, Italy
- ^j Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA
- ^k Department of Physics, University of Houston, Houston, TX 77204, USA
- ^l Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China
- ^m Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, Krakow 30059, Poland
- ⁿ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev 03680, Ukraine
- ^o National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia
- ^p Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Avenue, Livermore, CA 94550, USA
- ^q Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi (AQ) 67010, Italy
- ^r National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia
- ^s Physics Department, Università degli Studi and INFN, Milano 20133, Italy
- ^t Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
- ^u Physics Department, Università degli Studi Federico II and INFN, Napoli 80126, Italy
- ^v St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, 188350, Russia
- ^w Chemistry, Biology and Biotechnology Department, Università degli Studi and INFN, Perugia 06123, Italy
- ^x Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA
- ^y Physics Department, Università degli Studi Roma Tre and INFN, Roma 00146, Italy
- ^z SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA
- ^{aa} IPHC, Université de Strasbourg, CNRS/IN2P3, Strasbourg 67037, France
- ^{ab} Physics Department, Temple University, Philadelphia, PA 19122, USA
- ^{ac} Physics Department, University of California, Davis, CA 95616, USA
- ^{ad} Physics and Astronomy Department, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA
- ^{ae} Amherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA
- ^{af} Physics Department, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA

30 ИНСТИТУТОВ



First Results from the DarkSide-50

PL B742, 456 (2015) arXiv:1510.00702v2 [astro-ph.CO] 17 Oct 2015



Двухфазный жидкоаргоновый детектор. Пока достигнутая чувствительность хуже, чем в экспериментах XENON 100 и LUX

ПИЯФ аксион в Particle Data Group (2015)

A^0 (Axion) and Other Light Boson (X^0) Searches in Nuclear Transitions

<u>VALUE</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
$< 8.5 \times 10^{-6}$	90	90 DERBIN	02 CNTR	^{125m}Te decay
		91 DEBOER	97C RVUE	M1 transitions
$< 5.5 \times 10^{-10}$	95	92 TSUNODA	95 CNTR	^{252}Cf fission, $A^0 \rightarrow ee$
$< 1.2 \times 10^{-6}$	95	93 MINOWA	93 CNTR	$^{139}\text{La}^* \rightarrow ^{139}\text{La}A^0$
$< 2 \times 10^{-4}$	90	94 HICKS	92 CNTR	^{35}S decay, $A^0 \rightarrow \gamma\gamma$
$< 1.5 \times 10^{-9}$	95	95 ASANUMA	90 CNTR	^{241}Am decay
$< (0.4-10) \times 10^{-3}$	95	96 DEBOER	90 CNTR	$^8\text{Be}^* \rightarrow ^8\text{Be}A^0,$ $A^0 \rightarrow e^+e^-$
$< (0.2-1) \times 10^{-3}$	90	97 BINI	89 CNTR	$^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{16}\text{O}X^0,$

Invisible A^0 (Axion) MASS LIMITS from Astrophysics and Cosmology

<u>VALUE (eV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
none $0.7-3 \times 10^5$		166 CADAMURO	11 COSM	D abundance
<105	90	167 DERBIN	11A CNTR	D, solar axion
		168 ANDRIAMON..10	CAST	K, solar axions
< 0.72	95	169 HANNESTAD	10 COSM	K, hot dark matter
		170 ANDRIAMON..09	CAST	K, solar axions
<191	90	171 DERBIN	09A CNTR	K, solar axions
< 334	95	172 KEKEZ	09 HPGE	K, solar axions
< 1.02	95	173 HANNESTAD	08 COSM	K, hot dark matter

ПИЯФ аксион в Particle Data Group (2015)

Limit on Invisible A^0 (Axion) Electron Coupling

The limit is for $G_{Aee} \partial_\mu \phi_A \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 e$ in GeV^{-1} , or equivalently, the dipole-dipole potential $\frac{G_{Aee}^2}{4\pi} ((\sigma_1 \cdot \sigma_2) - 3(\sigma_1 \cdot \mathbf{n})(\sigma_2 \cdot \mathbf{n}))/r^3$ where $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$.

VALUE (GeV^{-1})	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
$< 7.8 \times 10^{-10}$	90	1 ABE	14F XMAS	$m_{A^0} = 60 \text{ keV}$
$< 7.5 \times 10^{-9}$	90	2 APRILE	14B X100	Solar axions
$< 1 \times 10^{-9}$	90	3 APRILE	14B X100	$m_{A^0} = 5-7 \text{ keV}$
$< 0.94-8.0 \times 10^{-5}$	90	4 DERBIN	14 CNTR	$m_{A^0} = 0.1-1 \text{ MeV}$
$< 3 \times 10^{-10}$	99	5 MILLER-BER...	14 ASTR	White dwarf cooling
$< 5.3 \times 10^{-8}$	90	6 ABE	13D XMAS	Solar axions
$< 1.05 \times 10^{-9}$	90	7 ARMENGAUD	13 EDEL	$m_{A^0} = 12.5 \text{ keV}$
$< 2.53 \times 10^{-8}$	90	8 ARMENGAUD	13 EDEL	Solar axions
		9 BARTH	13 CAST	Solar axions
$< 1.4-9.5 \times 10^{-4}$	90	10 DERBIN	13 CNTR	$m_{A^0} = 0.1-1 \text{ MeV}$
$< 2.9 \times 10^{-5}$	68	11 HECKEL	13	$m_{A^0} \leq 0.1 \mu\text{eV}$
$< 4.2 \times 10^{-10}$	95	12 VIAUX	13A ASTR	Low-mass red giants
$< 7 \times 10^{-10}$	95	13 CORSICO	12 ASTR	White dwarf cooling
$< 2.2 \times 10^{-7}$	90	14 DERBIN	12 CNTR	Solar axions
$< 0.02-1 \times 10^{-7}$	90	15 AALSETH	11 CNTR	$m_{A^0} = 0.3-8 \text{ keV}$

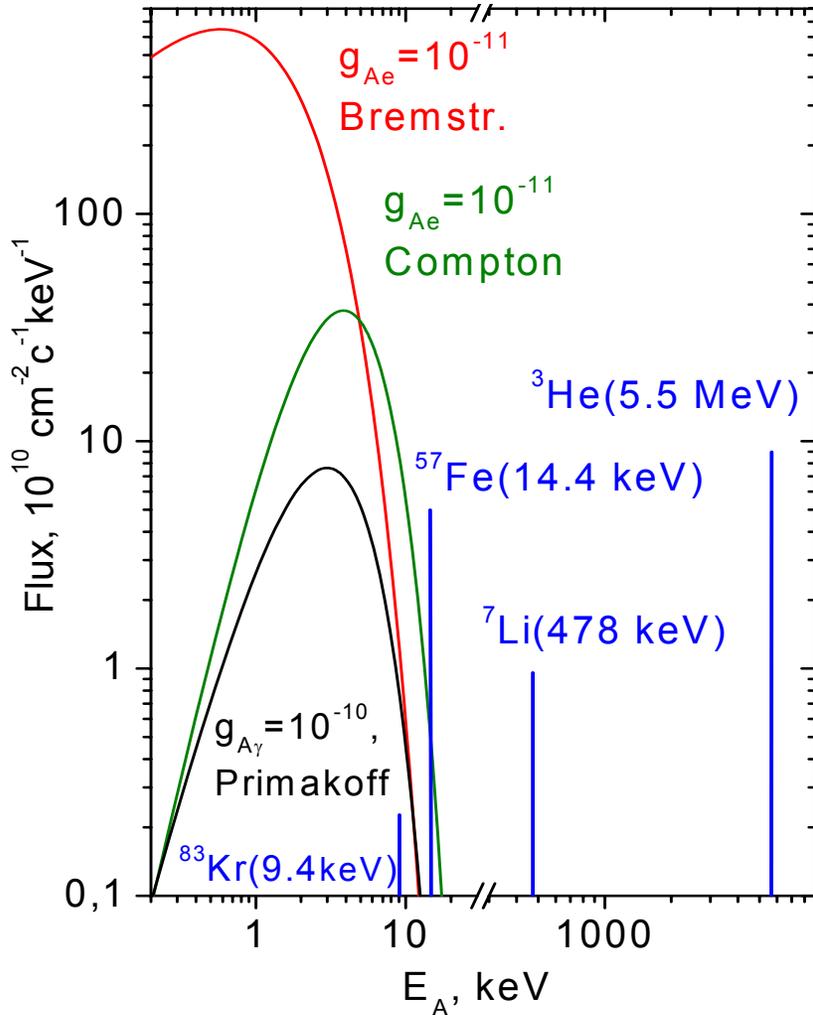
Invisible A^0 (Axion) Limits from Nucleon Coupling

Limits are for the axion mass in eV.

VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
$< 8.6 \times 10^3$	90	1 BELLI	12 CNTR	Solar axion
$< 1.41 \times 10^2$	90	2 BELLINI	12B BORX	Solar axion
$< 1.45 \times 10^2$	95	3 DERBIN	11 CNTR	Solar axion
		4 BELLINI	08 CNTR	Solar axion
		5 ADELBERGER	07	Test of Newton's law



Solar axions spectra vs $g_{A\gamma}$, g_{Ae} and g_{AN}



The main sources of solar axions:

1. Reactions of main solar chain. The most intensive fluxes are expected from M1-transitions in ${}^7\text{Li}$ and ${}^3\text{He}$ nuclei (g_{AN}):



2. Magnetic type transitions in nuclei whose low-lying levels are excited due to high temperature in the Sun (${}^{57}\text{Fe}$, ${}^{83}\text{Kr}$) (g_{AN})

3. Primakoff conversion of photons in the electric field of solar plasma ($g_{A\gamma}$).

4. Bremsstrahlung: $e + Z(e) \rightarrow Z + A$. (g_{Ae})

5. Compton process: $\gamma + e \rightarrow e + A$. (g_{Ae})

6. axio-recombination: $e + I \rightarrow I^- + A$ and axio-deexcitation: $I^* \rightarrow I + A$. PRD 83 023505 (2011) CAST 1302.6283, 1310.0823

Searches for solar axions were performed using the **axioelectric effect** in Si-, Ge-, Xe-, Bi-atoms and **resonant absorption** by ${}^7\text{Li}$ -, ${}^{57}\text{Fe}$ -, ${}^{169}\text{Tm}$ - and ${}^{83}\text{Kr}$ -nuclei.



Classification of experiments

Detection

Creation

	$g_{A\gamma}$	g_{AN}	g_{Ae}
$g_{A\gamma}$	<p>Axion-photon conversion in magnetic field</p> <p>IAXO, CAST, Tokyo Helioscope,</p>	<p>Resonant absorption by nuclei</p> <p>$^{169}\text{Tm}, ^{83}\text{Kr}$</p> <p>PNPI, BAKSAN, LNGS</p>	<p>Axioelectric effect in Si-, Ge-, Xe-atoms</p> <p>PNPI(SAXS), CUORE, EDELWEISS, XMASS, XENON100</p>
g_{AN}	<p>Primakoff conversion</p> <p>^7Li-axions, ^3He-axions</p> <p>BOREXINO</p>	<p>Resonant absorption by nuclei</p> <p>$^{57}\text{Fe}, ^6\text{Li}, ^{83}\text{Kr}$</p> <p>Krcmar et al, PNPI, BAKSAN</p>	<p>Axioelectric effect in Si-, Ge-, Xe Bi-atoms</p> <p>BOREXINO, CUORE, LUCIFER</p>
g_{Ae}	<p>Axion-photon conversion in magnetic field</p> <p>IAXO, CAST, Tokyo Helioscope,</p>	<p>Resonant absorption by nuclei</p> <p>$^{169}\text{Tm}, ^{83}\text{Kr}$</p> <p>PNPI, BAKSAN, LNGS</p>	<p>Axioelectric effect in Si-, Ge-, Xe-atoms</p> <p>PNPI(SAXS), CUORE, EDELWEISS, XMASS, XENON100</p>

Axioelectric effect in atoms and resonant absorption by nuclei

Two special reactions with high cross sections:

The axioelectric absorption of axions by atoms is an analog of the photoelectric effect. The reaction cross section is proportional to g_{Ae}^2 and σ_{pe} :

$$\sigma_{\text{abs}}(E_A) = \sigma_{pe}(E_A) \frac{g_{Ae}^2}{\beta} \frac{3E_A^2}{4\pi\alpha} \left(1 - \frac{\beta}{3}\right)$$

Photo effect crosssections are $4 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ (C) - $4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ (Pb) at 10 keV

The cross section of the resonant absorption of the axions is given by an expression similar to the one for the γ -ray absorption and corrected by the ω_A/ω_γ ratio

$$\sigma(E_A) = 2\sqrt{\pi}\sigma_{0\gamma} \exp\left[-\frac{4(E_A - E_M)^2}{\Gamma^2}\right] \left(\frac{\omega_A}{\omega_\gamma}\right)$$

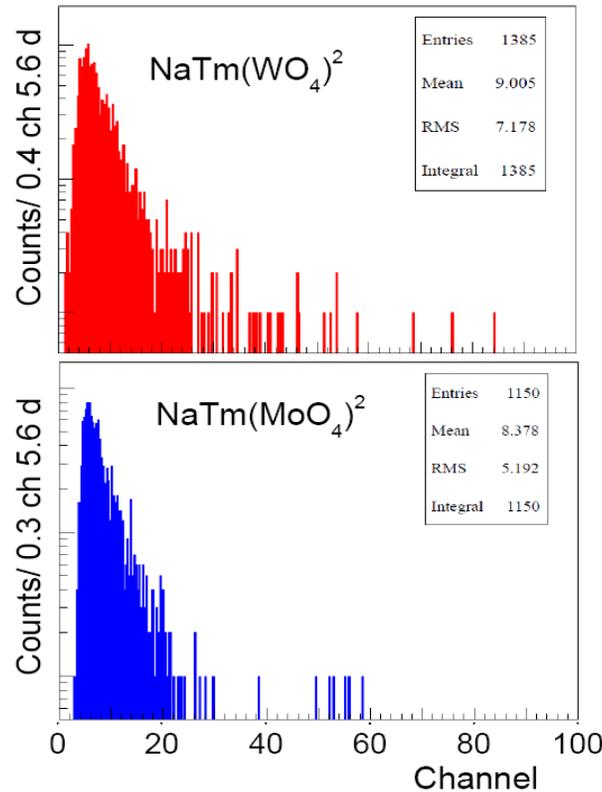
where $\sigma_{0\gamma}$ is the maximum cross section of the γ -ray resonant absorption and $\Gamma = 1/\tau$. The experimentally obtained value of $\sigma_{0\gamma}$ for the ^{57}Fe nucleus is equal to **$2.56 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$** . Due to huge c.s.

High sensitivity for g_{Ae} and g_{AN} can be reached with a relatively small detector

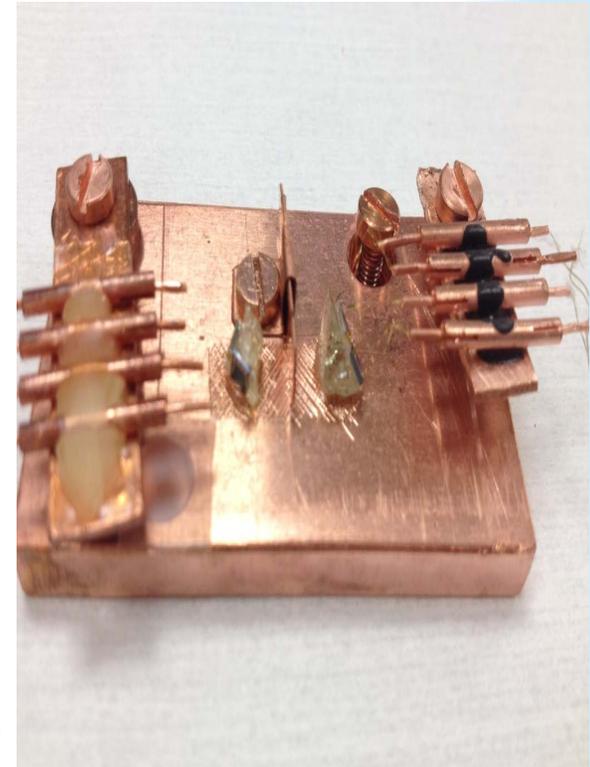
Кристаллы $\text{NaTm}(\text{MoO}_4)_2$ и $\text{NaTm}(\text{WO}_4)_2$ как болометры



Кристаллы внутри криогенной установки



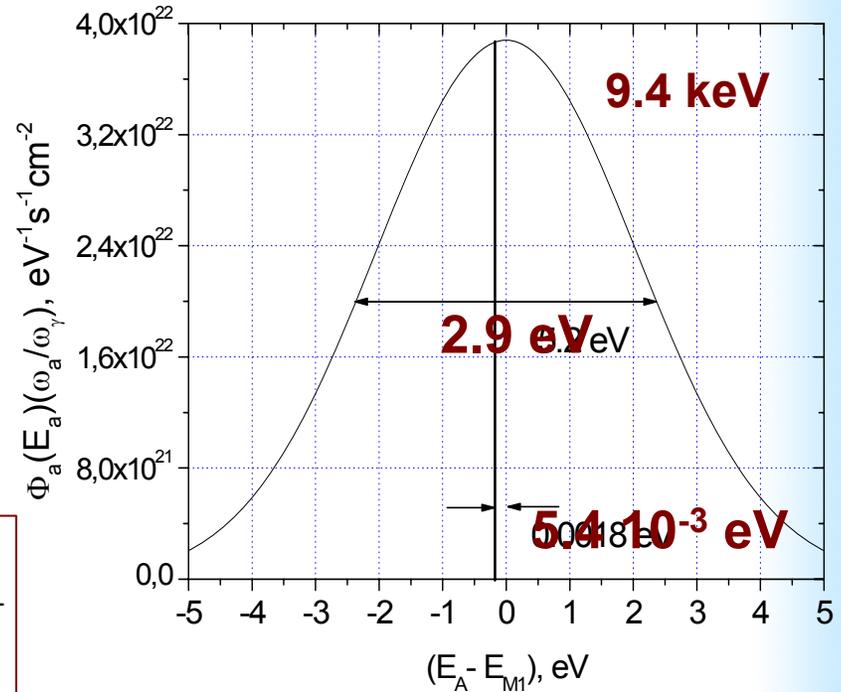
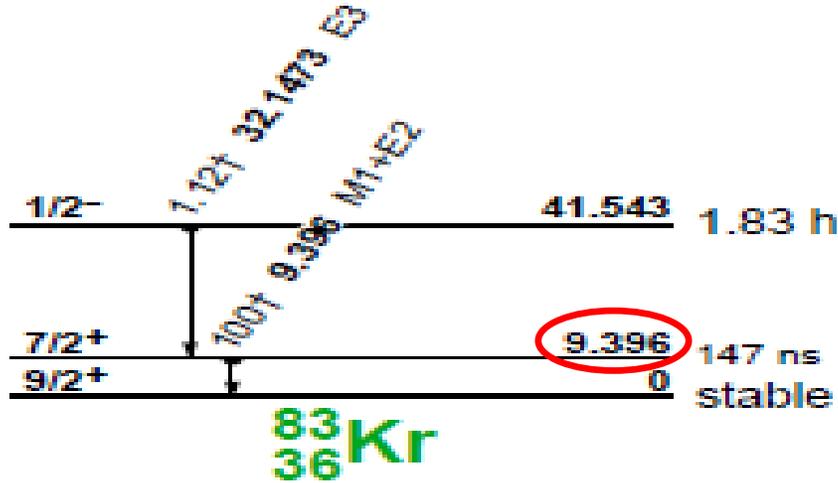
Спектры фононных сигналов за 135 ч.



Кристаллы внутри криогенной установки

Кристаллы были испытаны как болометрические детекторы для поиска резонансного поглощения солнечных аксионов, имеющих непрерывный спектр. Кристаллы были доставлены из ПИЯФ в лабораторию Гран Сассо, смонтированы в криогенной установке вместе с германиевыми термисторами и охлаждены до температуры около **10 мК**. Измерены спектры фононных сигналов с 2-х детекторов.

Search for resonant absorption in ^{83}Kr -nuclei



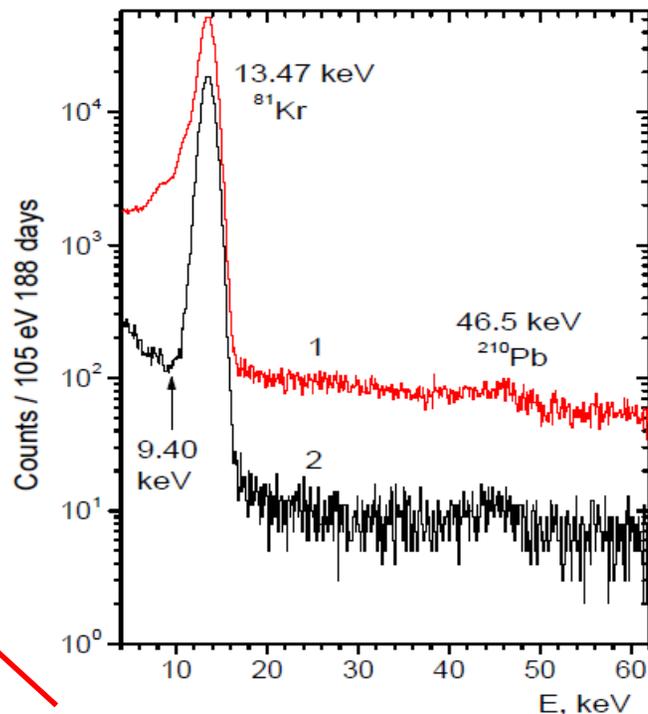
$$\Phi_A = N \frac{2 \exp(-E_\gamma / kT)}{1 + 2 \exp(-E_\gamma / kT)} \frac{\omega_A}{\tau_\gamma \omega_\gamma}$$

The flux of solar axions is attributed to the M1 transition in ^{83}Kr nuclei whose level scheme is shown in Figure. The energy of the first excited nuclear level is equal to 9.4 keV, and the electron conversion coefficient is equal to $\alpha = 17.1$. Owing to the Doppler broadening, the axion spectrum is a Gaussian curve $\Phi_A(E_A)$ with the width $\sigma_S(T) = E_\gamma (kT/M)^{1/2}$, = 1.23 eV. This value is significantly higher than the recoil-nucleus energy (0.5 meV), Doppler broadening of the line at temperature $T = 300$ K of the target nuclei (5.4 meV), and the own width of the level $\Gamma = 3.0 \times 10^{-9}$ eV. Thus, the fraction of axions satisfying the resonant-absorption condition is equal to $\sim \Gamma/\sigma_S \sim 10^{-9}$.



Поиск солнечных аксионов, излучаемых в М1-переходе ядра ^{83}Kr (ИЯИ + ПИЯФ)

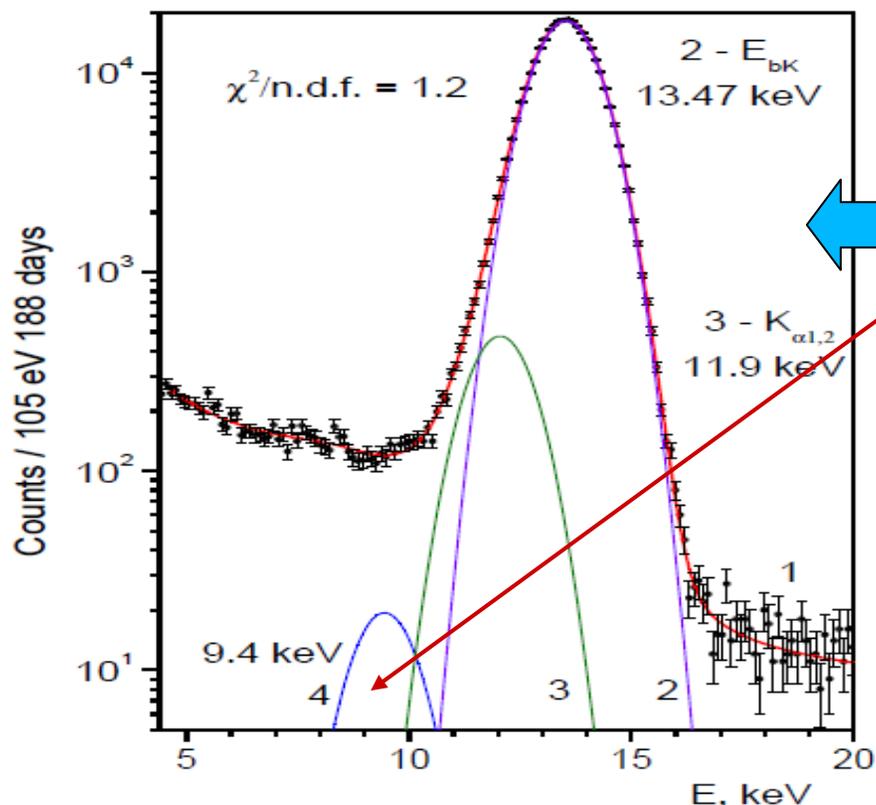
Проведен поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения: $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma (9.4 \text{ кэВ})$. Для регистрации γ -квантов и электронов, возникающих в результате разрядки ядерного уровня, использовалась пропорциональная газовая камера, заполненная криптоном и размещенная в низкофоновой установке в подземной лаборатории **Баксанской нейтринной обсерватории**.



Слева – две пропорциональные Kr-камеры с первым слоем пассивной защиты. В центре - спектр Kr-камеры, измеренный за 188 сут. Справа – гора Андырчи, под которой расположена **БНО ИЯИ** на глубине 4800 м.в.э..

Поиск солнечных аксионов: ^{83}Kr – новое ограничение на массу адронного аксиона

В результате установлено новое ограничение на изоскалярную и изовекторную константы связи аксиона с нуклонами $|g_{\text{AN}}^3 - g_{\text{AN}}^0| \leq 1.29 \times 10^{-6}$, которое в модели адронного аксиона приводит к **новому** верхнему пределу на массу аксиона $m_{\text{A}} \leq 100$ эВ (95% у.д.). Предыдущий предел улучшен в 1.5 раза.



Результаты подгонки спектра Kr-камеры в области «аксионного» пика.

Энергетический спектр в интервале 5-20 кэВ, измеренный Kr-детектором, и его основные компоненты. Ожидаемый вклад от взаимодействия аксионов показан синей сплошной линией 4. Работа выполнена совместно с ИЯИ РАН

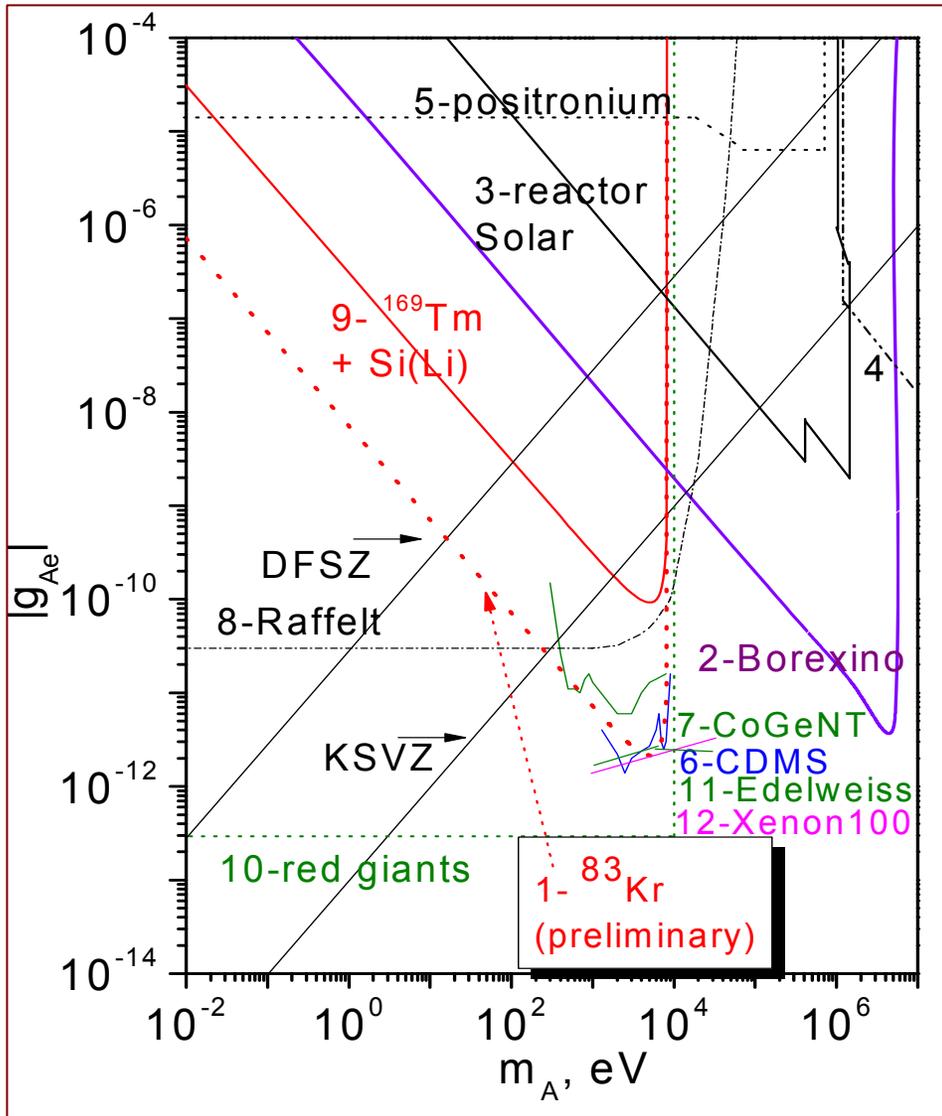
Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 10, с. 739–745

© 2015 г. 25 мая

Новый эксперимент по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов, излучаемых в M1-переходе ядер ^{83}Kr

Ю. М. Гаврилюк[†], А. Н. Гангалшев[†], А. В. Дербин^{*1)}, И. С. Драчнев^{*}, В. В. Казалов[†], В. В. Кобычев[×], В. В. Кузьминов[†], В. Н. Муратова^{*}, С. И. Панасенко⁺⁰, С. С. Раткевич⁺⁰, Д. А. Семенов^{*}, Д. А. Текуева[†], Е. В. Унжаков^{*}, С. П. Якименко[†]

^{83}Kr limits on axion-electron coupling constants and mass



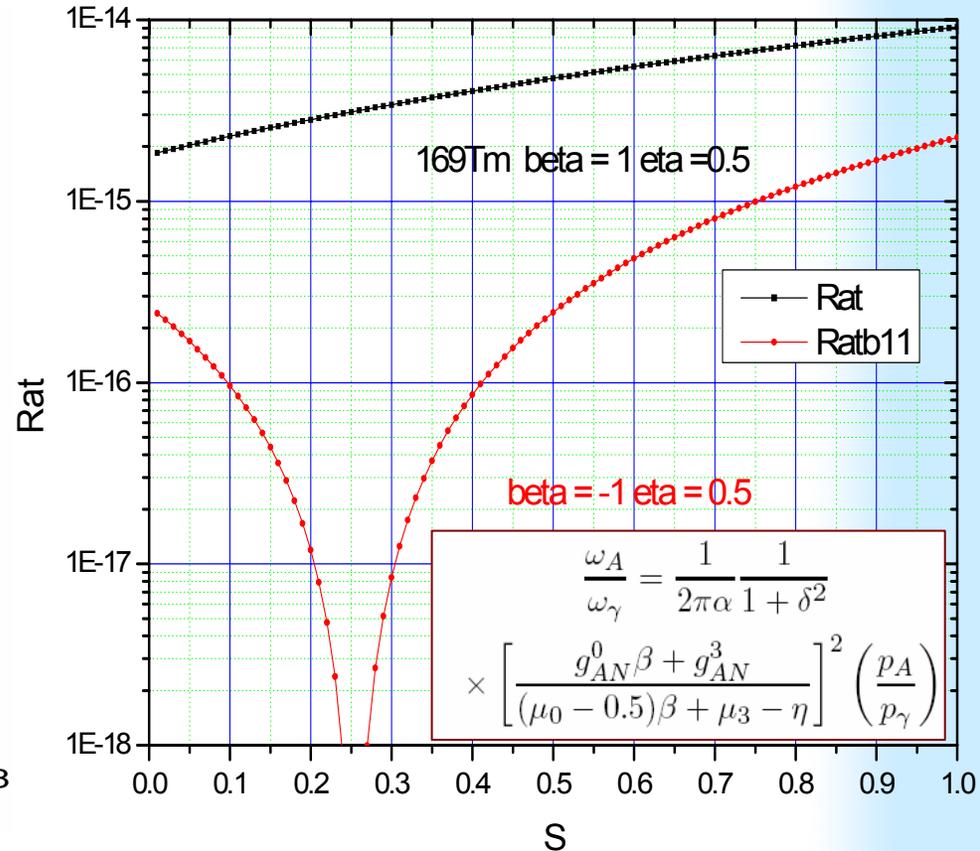
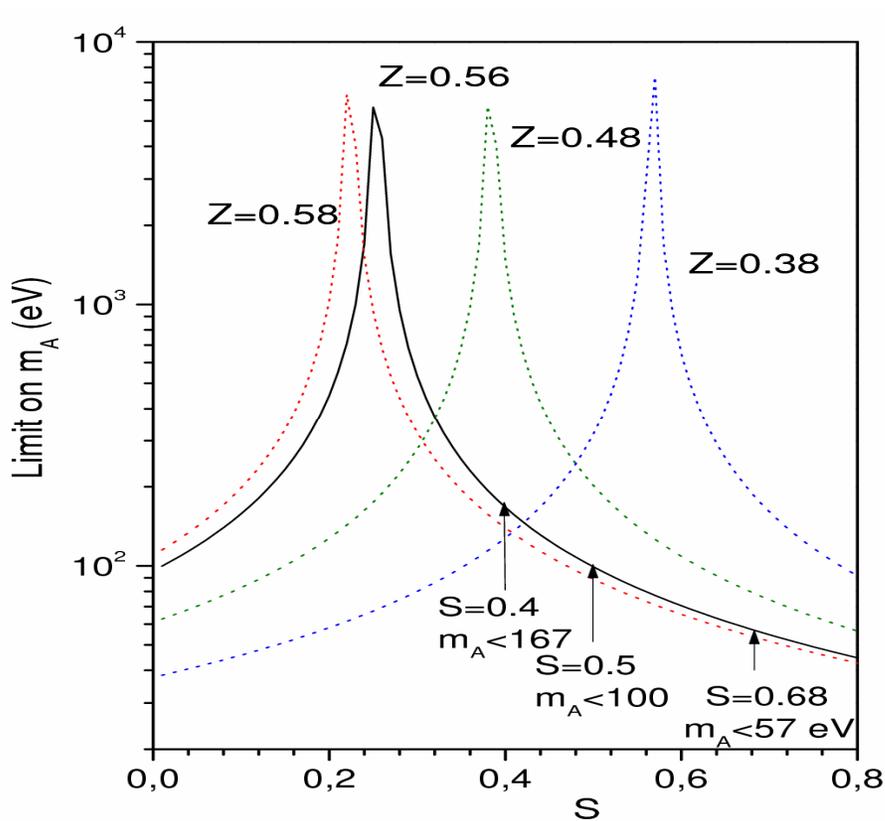
A search for resonant absorption of the solar axion by ^{83}Kr nuclei was performed using the proportional counter installed inside the low-background setup at the Baksan Neutrino Observatory. The obtained model independent upper limit on axion-nucleon couplings allowed us to set the new upper limit on the hadronic axion mass with the generally accepted values $S=0.5$ and $z=0.56$.

$$|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1.29 \times 10^{-6},$$

$$m_A \leq 100 \text{ eV at 95\% C.L.}$$

The obtained limit on axion mass strongly depends on the exact values of the parameters S and z .

Limits on ^{83}Kr axion mass vs S and z



A negative value of the parameter β , together with broad intervals of possible values of S and z , leads to a large uncertainty in the expected probability for axion emission in the 9.4-keV M1 transition in the ^{83}Kr nucleus, and this is a serious flaw in the present searches for such axions. The obtained limit on axion mass strongly depends on the exact values of the parameters S and z . **But this is not the case for the other nucleus - ^{169}Tm .**

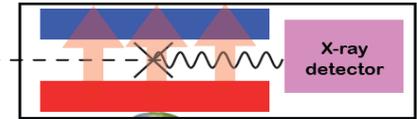


IAXO: International Axion Observatory

CERN Axion Solar Telescope

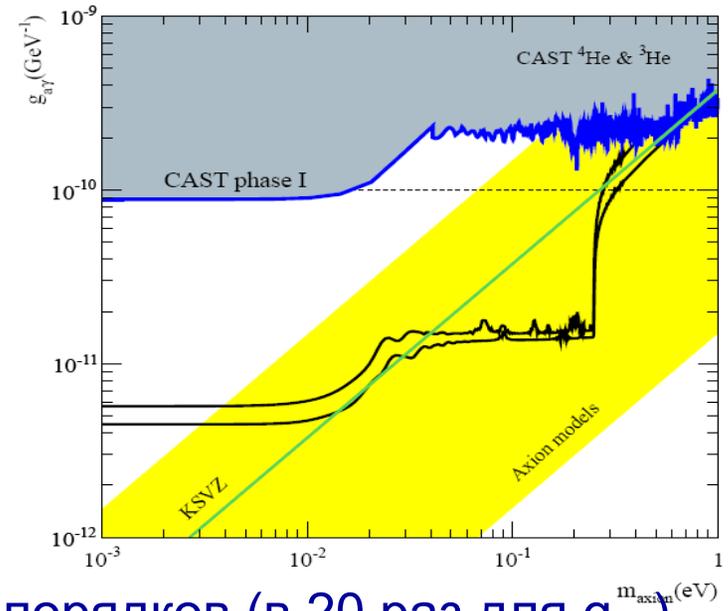
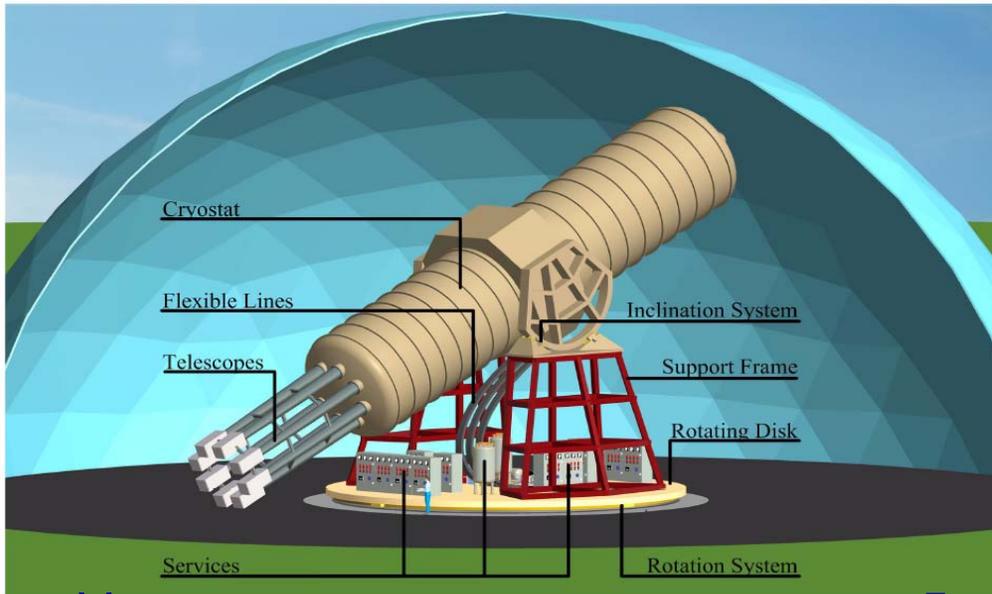


ALPs are produced inside the Sun via the two photon coupling (and others) and scape easily



← **CAST**
IAXO
↓

- B's of order 5 T,
- L's of order 20 m
- order Zero backgrounds



Увеличение чувствительности на 5 - 6 порядков (в 20 раз для $g_{A\gamma}$).
ПИЯФ – axion theory and phenomenology, gAe



IAXO: International AXion Observatory



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Physics Procedia 61 (2015) 193 – 200

Physics

Procedia

The next generation of axion helioscopes: The International Axion Observatory (IAXO)

J. K. Vogel^{a,*}, E. Armengaud^b, F. T. Avignone^c, M. Betz^d, P. Brax^e, P. Brun^b, G. Cantatore^f, J. M. Carmona^g, G. P. Carosi^a, F. Caspers^d, S. Caspi^h, S. A. Cetinⁱ, D. Chelouche^j, F. E. Christensen^k, A. Dael^b, T. Dafni^g, M. Davenport^d, **A.V. Derbin^l**, K. Desch^m, A. Diago^g, B. Döbrichⁿ, **I. Dratchnev^l**, A. Dudarev^d, C. Eleftheriadis^o, G. Fanourakis^p, E. Ferrer-Ribas^b, J. Galán^b, J. A. García^g, J. G. Garza^g, T. Gerialis^p, B. Gimeno^q, I. Giomataris^b, S. Gninenko^r, H. Gómez^g, D. González-Díaz^g, E. Guendelman^s, C. J. Hailey^t, T. Hiramatsu^u, D. H. H. Hoffmann^v, D. Horns^w, F. J. Iguaz^g, I. G. Irastorza^g, J. Isern^x, K. Imai^y, A. C. Jakobsen^k, J. Jaeckel^z, K. Jakovčić^{aa}, J. Kaminski^m, M. Kawasaki^{ab}, M. Karuza^{ac}, M. Krčmar^{aa}, K. Kousouris^d, C. Krieger^m, B. Lakić^{aa}, O. Limousin^b, A. Lindnerⁿ, A. Liolios^o, G. Luzón^g, S. Matsuki^{ad}, **V. N. Muratova^l**, C. Nones^b, I. Ortega^g, T. Papaevangelou^b, M. J. Pivovarov^{aa}, G. Raffelt^{ac}, J. Redondo^{ac}, A. Ringwaldⁿ, S. Russenschuck^d, J. Ruz^a, K. Saikawa^{af}, I. Savvidis^o, T. Sekiguchi^{ab}, Y. K. Semertzidis^{ag}, I. Shilon^d, P. Sikivie^{ah}, H. Silva^d, H. ten Kate^d, A. Tomas^g, S. Troitsky^r, T. Vafeiadis^d, K. van Bibber^{ai}, P. Vedrine^b, J. A. Villar^g, L. Walckiers^d, A. Weltman^{aj}, W. Wester^{ak}, S. C. Yildizⁱ, K. Zioutas^{al}

^aPhysics Division, Physical and Life Sciences Directorate, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

^bCEA Irfu, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

^cPhysics Department, University of South Carolina, Columbia, SC, USA

^dEuropean Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland

^eIPHT, Centre d'Études de Saclay (CEA-Saclay), Gif-sur-Yvette, France

^fIstituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Trieste and Università di Trieste, Trieste, Italy

^gLaboratorio de Física Nuclear y Altas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain

^hLawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

ⁱDogus University, Istanbul, Turkey

^jPhysics Department, University of Haifa, Haifa, 31905 Israel

^kTechnical University of Denmark, DTU Space Kgs. Lyngby, Denmark

^lSt. Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

^mPhysikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

ⁿDeutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

^oAristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

^pNational Center for Scientific Research Demokritos, Athens, Greece

^qInstituto de Ciencias de las Materiales, Universidad de Valencia, Valencia, Spain

^rInstitute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^sPhysics department, Ben Gurion University, Beer Sheva, Israel

^tColumbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, New York, USA

^uYukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

^vTechnische Universität Darmstadt, IKP, Darmstadt, Germany

2015 –
40 институтов

ПИАФ

ИЯИ

Основные результаты работы в 2015 г.

1. Коллаборацией Borexino, при существенном вкладе сотрудников ПИЯФ, получено рекордное ограничение на время жизни электрона относительно распада на нейтрино и фотон - $\tau \geq 6.6 \times 10^{28}$ лет. Результаты опубликованы в журнале *Physical Review Letter* (2015) и включены в *Synopsis APS* и список *Nature News* за декабрь 2015 г.
2. Коллаборацией Borexino, при активном участии сотрудников ПИЯФ, получены новые данные по регистрации гео-нейтрино за 2056 суток. В предположении отношения масс Th/U = 3.9, число зарегистрированных гео-нейтрино составило 24 ± 6 . Отсутствие антинейтрино исключается на уровне 5.9σ . Сигнал гео-нейтрино из мантии получен на 98% у.д. Число реакторных нейтрино (53), зарегистрированных на рекордно далеком расстоянии от реакторов (более 500 км), находится в согласии с осцилляционным решением. (*Physical Review D*. 2015).
3. Продолжен поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{169}Tm и ^{83}Kr . В результате установлено новое ограничение на изоскалярную и изовекторную константы связи аксиона с нуклонами $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1.29 \times 10^{-6}$, которое в модели адронного аксиона приводит к новому верхнему пределу на массу аксиона $m_A \leq 100$ эВ (95% у.д.). Предыдущий предел улучшен в 1.5 раза. (Письма ЖЭТФ (2015)).
4. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, SOX, DarkSide и IAXO.

Планы на 2016 г.

1) ПИЯФ

а) Исследование болометрических и сцинтилляционных характеристик выращенных кристаллов вольфраматов и молибдатов тулия. Выращивание $Tm(XY)$ кристаллов объемом более 1 см^3 (ИНХ, НГУ). Измерения с Tm -болометром в LNGS.

б) Измерения QF для электронов (для SOX)

в) Измерение бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr (для SOX)

г) ^{83}Kr , Lucifer (ZnSe – $\beta\beta$), Poseidon, IAXO – R&D работы .

2) Borexino и SOX – солнечные и стерильные нейтрино

а) участие в работе 7-ти рабочих групп (CNO нейтрино)

И. Драчнев в LNGS → CNO нейтрино

б) корреляция нейтринных сигналов с гамма-всплесками (статья)

в) нестандартные взаимодействия нейтрино,

г) Д. Семенов, Е. Унжаков, Н. Пилипенко → 6 чел./ мес.

3) DarkSide – темная материя

а) Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20K (Ti , SiO_2 , CF_2) + “удаленные дежурства”

б) Е.Унжаков, Д. Семенов → 4 месяца LNGS

4) Новые проекты IAXO, LUCIFER – нейтрино, аксион

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



g_{AN}



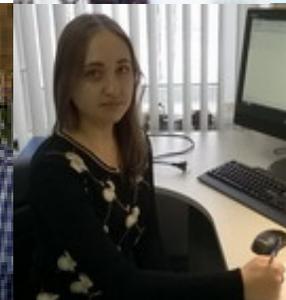
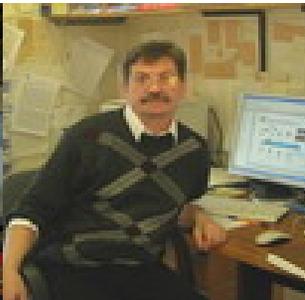
g_{Ae}



g_{Ay}

$g_{Ae} \times g_{Ae}$

$g_{Ae} \times g_{Ay}$



НЕЙТРИНО
АКСИОН
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

BOREXINO
SOX_Ce
POSEIDON
DARKSIDE
IAXO, LUCIFER

Si
(p)
M
D
S



Спасибо за внимание!

Сейчас

Унжаков Е.В.

«Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов с помощью Tm -содержащих болометров»

Семенов Д.А.

«Эксперимент по поиску частиц темной материи DarkSide»

В пятницу

Хусаинов А.Х.

«Полупроводниковые детектирующие системы»