

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) О.И. Коньков, снс, кфмн
- 7) И.С. Драчнев, мнс, PhD
- 8) Н.В. Базлов, нс
- 9) Е.В. Унжаков, мнс.
- 10) Л.М.Тухконен нс
- 11) Н. Пилипенко, 4 курс СПбГУ
- 12) И.П. Филиппов, 2 курс СПбГУ

В отделе - 28 (23.6) чел.
1 дфмн; 7 кфмн; внс – 2;
снс – 3; нс – 3; мнс – 3; асп.
- 0; вед.инж.-7; инж.-5;
рег. ап. -1; сл.мех.-1;
студ. совм. – 2;

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 вед. инж.-эл
- 6) Л.В. Силантьева инж.-эл.
- 7) П.И. Трофимов вед. инж.-эл
- 8) Г.Э. Иващенко вед. инж.-тех.
- 9) Е.В. Федоров вед. инж.-тех.
- 10) Т.А. Филиппова инж.
- 11) Е.А. Чмель инж.-тех.

Гр. радиохимии

- 1) -----
- 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.

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



Состав (12 (10) 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

О.И. Коньков, снс, кфмн

И.С. Драчнев, мнс, PhD

Н.В. Базлов, нс

Л.М. Тукхонен, нс

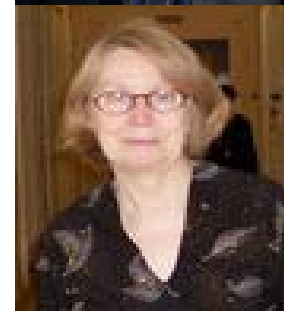
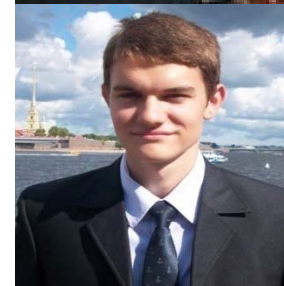
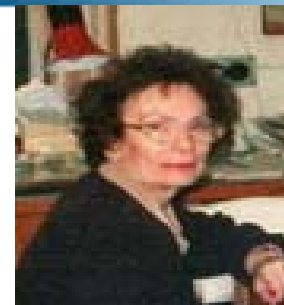
Е.В. Унжаков, мнс

Н. Пилипенко, 5 курс СПбГУ

И.П. Филиппов, 2 курс СПбГУ

2ст+0(1)асп+3мнс+3нс+2(3)снс+1внс

1 дфмн и 5 кфмн



Отдел и Лаборатория в 2016 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**, **Баксан**, **IAХО**, **Гран Сассо**) и эксперимент по поиску WIMPs (**DarkSide**))

3) Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами

(рук. А.Х. Хусаинов)

4) Аморфно-кристаллические (aSi:H/cSi) структуры на кремнии. Ускорение дрейфа Li.

(рук. И.М. Котина)

Содержание доклада (30 мин.)

1) *Наукометрические показатели*

2) *Нейтрино в 2011- 2016 г.г.*

Нейтрино

3) *Эксперимент Борексино в 2016 году. Новые результаты.*

4) *Корреляции гамма-всплесков и сигналов в Борексино*

5) *Временные изменения скорости счета 7Be -нейтрино*

6) *Стерильные нейтрино – проект SOX_Ce. Измерения бета-спектра 144Pr . Измерения характеристик сцинтиллятора.*

Темная материя

7) *Поиск частиц темной материи в эксперименте DarkSide в Гран Сассо (доклад Е. Унжакова).*

8) *Поиск солнечных аксионов с помощью Tm-содержащих болометров.*

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

10) *Планы на 2017 год.*

Публикации в 2016 г. (29+5)

29 публикаций в реферируемых журналах (+ 5 в arXiv)

1. S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, A measurement method of a detector response function for monochromatic electrons based on the Compton scattering, **Nucl. Instrum. Meth.** A821 13 (2016)
2. S. Davini et al., (Borexino coll.) New results of the Borexino experiment: pp solar neutrino detection, **Nuovo Cim.** C38 no.4, 120, (2016)
3. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The DarkSide project, **JINST** 11 no.02, C02051, (2016)
4. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The veto system of the DarkSide-50 experiment, **JINST** 11, P03016, (2016)
5. S. Davini et al., (Borexino coll.) CNO and pep solar neutrino measurements and perspectives in Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 675, no.1, 012040, (2016)
6. G. Ranucci et al., (Borexino coll.) Overview and accomplishments of the Borexino experiment, **J. Phys. Conf. Ser.** 675 no.1, 012036, (2016)
7. L. Di Noto et al., (Borexino-SOX coll.) The high precision measurement of the ^{144}Ce activity in the SOX experiment, **J. Phys. Conf. Ser.** 675 no.1, 012035, (2016)
8. M. Durero et al., (Borexino-SOX coll.) The ^{144}Ce source for SOX, **J. Phys. Conf. Ser.** 675 no.1, 012032, (2016)
9. R. Roncin et al., (Borexino coll.) Geo-neutrino results with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 675, no.1, 012029, (2016)
10. O. Smirnov et al., (Borexino coll.) Measurement of Solar pp-neutrino flux with Borexino: results and implications, **J. Phys. Conf. Ser.** 675, no.1, 012027, (2016)
11. A. Vishneva et al., (Borexino coll.) Measurement of Solar pp-neutrino flux with Borexino: results and implications, **J. Phys. Conf. Ser.** 675, no.1, 012025, (2016)
12. A. Caminata et al., (Borexino-SOX coll.) Understanding the detector behavior through Montecarlo and calibration studies in view of the SOX measurement, **J. Phys. Conf. Ser.** 675 no.1, 012032, (2016)
13. С. В. Бахланов, А. В. Дербин, И. С. Драчнев, А. С. Каюнов, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков, Метод измерения функции отклика детектора для монохроматических электронов, основанный на Комптоновском рассеянии, **Приборы и Техника Эксперимента**, № 3, 13, (2016) (Instrum.Exp.Tech. 59 no.3, 333 (2016))
14. S. Zavatarelli et al., (Borexino coll.) Recent results from Borexino and the first real time measure of solar pp neutrinos, **Nucl. Part. Phys. Proc.** 273-275, 1753, (2016)
15. D. Bravo-Berguño et al., (Borexino-SOX coll.) SOX: Short Distance Neutrino Oscillations with Borexino, **Nucl. Part. Phys. Proc.** 273-275, 1764, (2016)
16. S. Davini et al., (DarkSide coll.) A first walk on the DarkSide, **Nucl. Part. Phys. Proc.** 273-275, 452, (2016)

Публикации 2016 г. (29+5)

29 публикаций в реферируемых журналах (+ 5 в arXiv)

17. T. Dafni et al., (IAXO coll.) An update on the Axion Helioscopes front: current activities at CAST and the IAXO project, **Nucl. Part. Phys. Proc.** 273-275, 244, (2016)
18. A. Ianni et al., (Borexino coll.) High significance measurement of the terrestrial neutrino flux with the Borexino detector, **J. Phys. Conf. Ser.** 718, no.6, 062025, (2016)
19. G. Testera et al., (Borexino coll.) Recent results from Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 718, no.6, 062059, (2016)
21. M. Vivier et al., (Borexino-SOX coll.) SOX: search for short baseline neutrino oscillations with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 718, no.6, 062066, (2016)
22. N. Bazlov, N. Pilipenko, O. Vyvenko, I. Kotina et al., Structural and electrical properties of AlN layers grown on silicon by reactive RF magnetron sputtering, **AIP Conference Proceedings** 1748, 040004 (2016)
23. B. Rossi et al., (DarkSide Coll.) The DarkSide Program, **EPJ Web Conf.** 121, 06010, (2016)
24. A. Caminata et al., (Borexino-SOX coll.) Short distance neutrino oscillations with Borexino, **EPJ Web Conf.** 121 01002, (2016)
25. M. Pallavicini et al., (Borexino Coll.) First real-time detection of solar pp neutrinos by Borexino, **EPJ Web Conf.** 121, 01001, (2016)
26. L. Marini et al., (DarkSide Coll.) Current status of the dark matter experiment DarkSide-50, **Nuovo Cim.** C39 no.1, 247, (2016)
27. A. Caminata et al., (Borexino-SOX coll.) Search for sterile neutrinos with the SOX experiment, **Nuovo Cim.** C39 (2016) no.1, 236
28. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.) Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search, **Phys. Rev. D** 93 no.8, 081101, (2016)
29. M. Agostini, et al., (Borexino coll.) Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts, **Astroparticle Physics**, 86, 11 (2017)

Иные публикации (arXiv)

1. A. Derbin, V. Muratova, et al., (Borexino coll.) The Main Results of the Borexino Experiment, **arXiv:1605.06795**
2. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The veto system of the DarkSide-50 experiment, **arXiv:1512.07896**
3. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The Electronics and Data Acquisition System for the DarkSide-50 Veto Detectors, **arXiv:1606.03316**
4. S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, A measurement method of a detector response function for monochromatic electrons based on the Compton scattering, **arXiv:1604.04128**
5. M. Agostini, et al., (Borexino coll.) A search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts with Borexino, **arXiv:1607.05649**

Доклады на конф. и семинары в 2016 г.(7=5+2)

7 докладов и выступлений на конференциях и семинарах

1. А.В. Дербин, Нобелевская премия по физике 2015 года, ежегодные открытые Нобелевские чтения в Доме Ученых, С. Петербург, февраль 2016 г. семинар .
2. А.В. Дербин, Эксперимент SOX: поиск осцилляций нейтрино в стерильное состояние, Зимняя школа ПИЯФ по физике, март 2016.
3. 1. А.В. Дербин, Нобелевские премии по физике 2015 года, Зимняя школа ПИЯФ по конденсированному состоянию, март 2016.
4. А.В. Дербин, Экспериментальные поиски аксионов, семинар ОФВЭ, октябрь, 2016, ПИЯФ НИЦ КИ
5. А.В. Дербин, Поиски частиц темной материи, Молодежный научный форум «Open Science 2016», ноябрь, 2016, ПИЯФ НИЦ КИ
6. И.С. Драчнев, Borexino Solar Neutrino Detector, PAPAP - Particle & Astroparticle Physics Autumn Programme, LNGS, October, 2016
7. Н.В. Пилипенко, Structural and electrical properties of AlN layers grown on silicon by reactive rf magnetron sputtering, 5th International Scientific Conference STRANN-2016, St. Petersburg, April, 2016

Диссертации, аспирантура (1+1+1)

Защищена 1 кандидатская диссертация (PhD)

«New spectral analysis of solar 8B neutrino with the Borexino detector»

Gran Sasso Science Institute, SISSA-International School for Advanced Studies

(И.С. Драчнев, 2016)

Подготовлена 1 кандидатская диссертация

«Поиск солнечных аксионов с помощью резонансного поглощения ядрами ^{169}Tm »

(Е.В. Унжаков, 2016)

Магистратура СПбГУ -> Аспирантура ПИЯФ

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

(Н.Пилипенко, 2016, рук. И.М.Котина)

3 РФФИ и 1 РНФ в 2016 г. (3 РФФИ+1 РНФ в 2017 г.)

Грант РФФИ - а «Поиск стерильного нейтрино с детектором Borexino: измерение зависимости световыхода сцинтиллятора от энергии электрона» (с 2015 г.)

(рук. А.В. Дербин)

Грант РФФИ – офи-м «Применение детектора Borexino для исследования Солнца, Земли и других астрофизических объектов и явлений с использованием методов нейтринной спектроскопии» (с 2016 г.)

(рук. А.В. Дербин)

Грант РФФИ - а «Поиск взаимодействия аксионов с атомами и атомными ядрами» (с 2017 г.)

(рук. В.Н. Муратова)

Грант РФФИ – а «Поиск солнечных адронных аксионов»

(рук. А. Гапгашев, ИЯИ БНО)

Грант РНФ «Исследование природы темной материи: прямой поисковый эксперимент и разработка аргонного детектора нового поколения»

(рук. М.Д. Скорохватов, НИЦ КИ)

Награды, Премии в 2016 г.

Конкурс им. Курчатова в области научных исследований.

А.В. Дербин, ПИЯФ
Е.А. Литвинович, НИЦ КИ
И.Н. Мачулин, НИЦ КИ
В.Н. Муратова, ПИЯФ
М.Д. Скорохватов, НИЦ КИ

*«10 лет нейтринных исследований в эксперименте
Борексино».*

Конкурс лучших работ ПИЯФ.

А.В. Дербин,
И.С. Драчев,
В.Н. Муратова,
Д.А. Семенов,
Е.В. Унжаков
(+Borexino coll.)

*Третья премия за работу «Поиск распада электрона на
нейтрино и фотон $e \rightarrow \nu + \gamma$ »*

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*

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

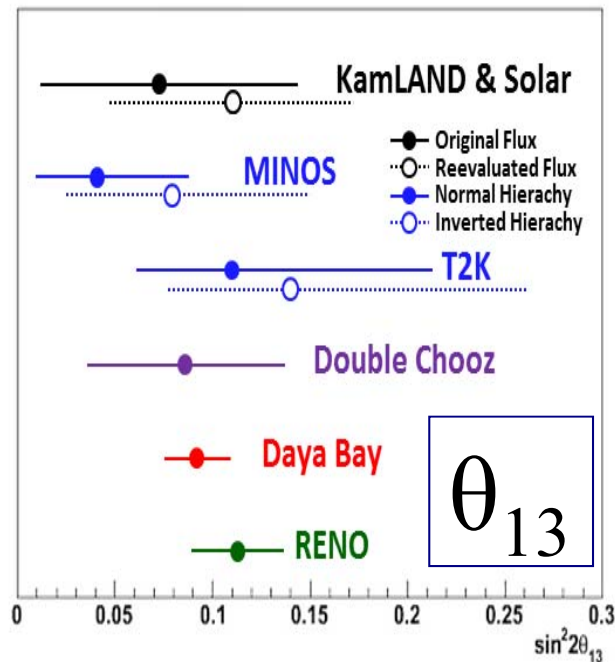
Сентябрь: *пер-нейтрино* $(1.6 \pm 0.3) 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

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

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

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

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)

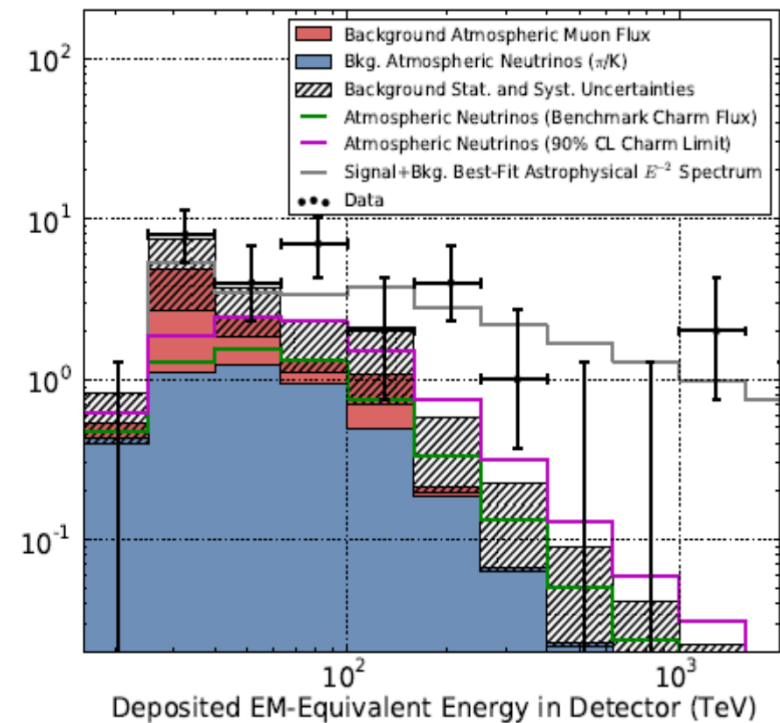
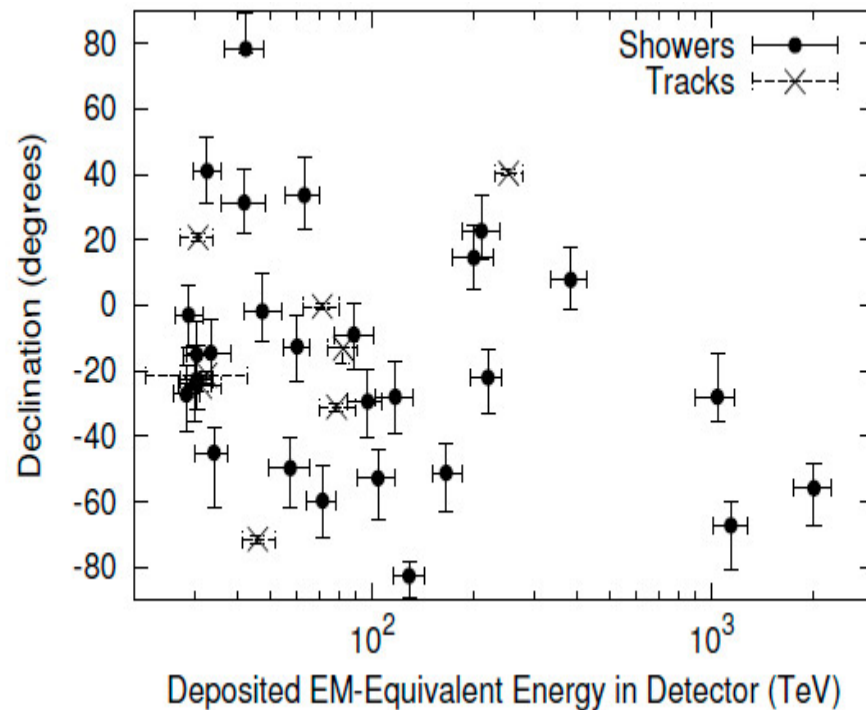
Borexino coll. arXiv:1207.6860

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 , $p\gamma$.

2014 – регистрация солнечных pp-нейтрино

NATURE

«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2014»

ARTICLE

doi:10.1038/nature13702

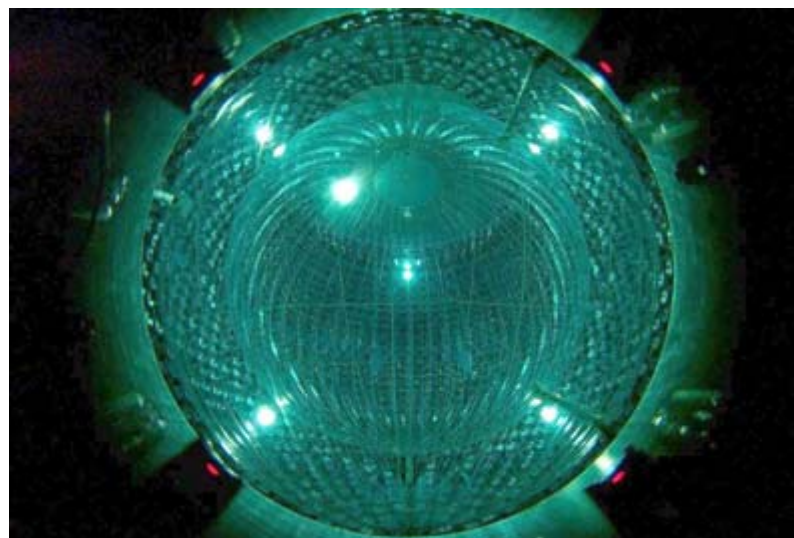
Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

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](#)

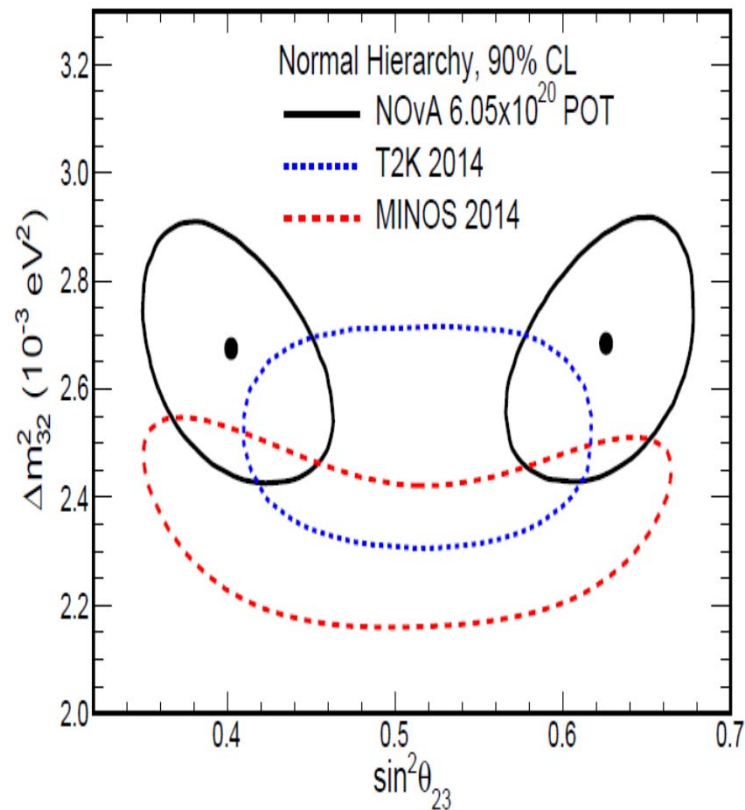
Physicists working on the [Borexino](#) experiment in Italy have successfully detected neutrinos from the main nuclear reaction that powers the Sun. The number of neutrinos observed by the international team agrees with theoretical predictions, suggesting that scientists do understand what is going on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

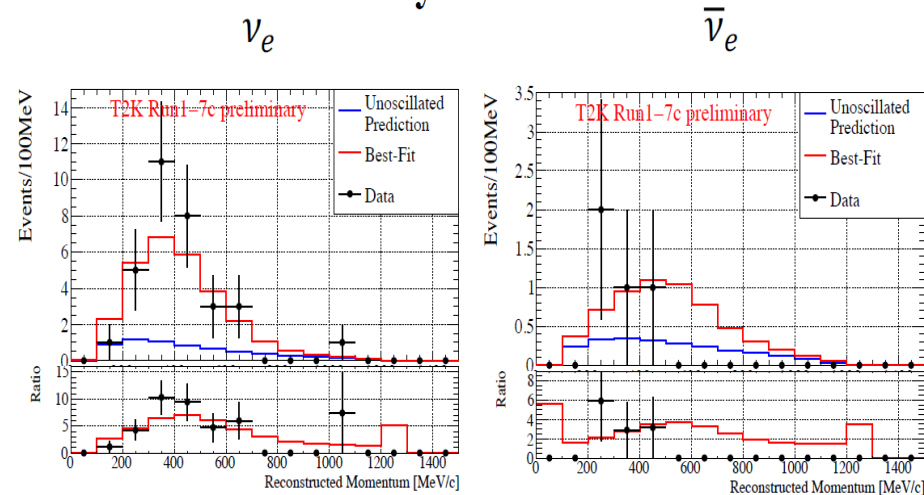
Each second, the Sun converts 600 million tonnes of hydrogen into helium, and 99% of the energy generated arises from the so-called proton–proton chain. And 99.76% of the time, this chain starts when two protons form deuterium (hydrogen-2) by coming close enough together that one becomes a neutron, emitting 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.

2016 г. - ($\Theta_{23} \leftrightarrow 45^\circ$) – $NO\nu A$; ($\delta_{CP} \leftrightarrow 0$) - T2K

arXiv:1701.05891v1 [hep-ex] 20 Jan 2017



Full Joint Fit Analysis



32 events observed
(+0 events since Neutrino 2016)

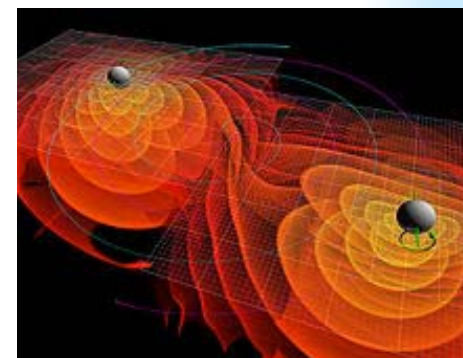
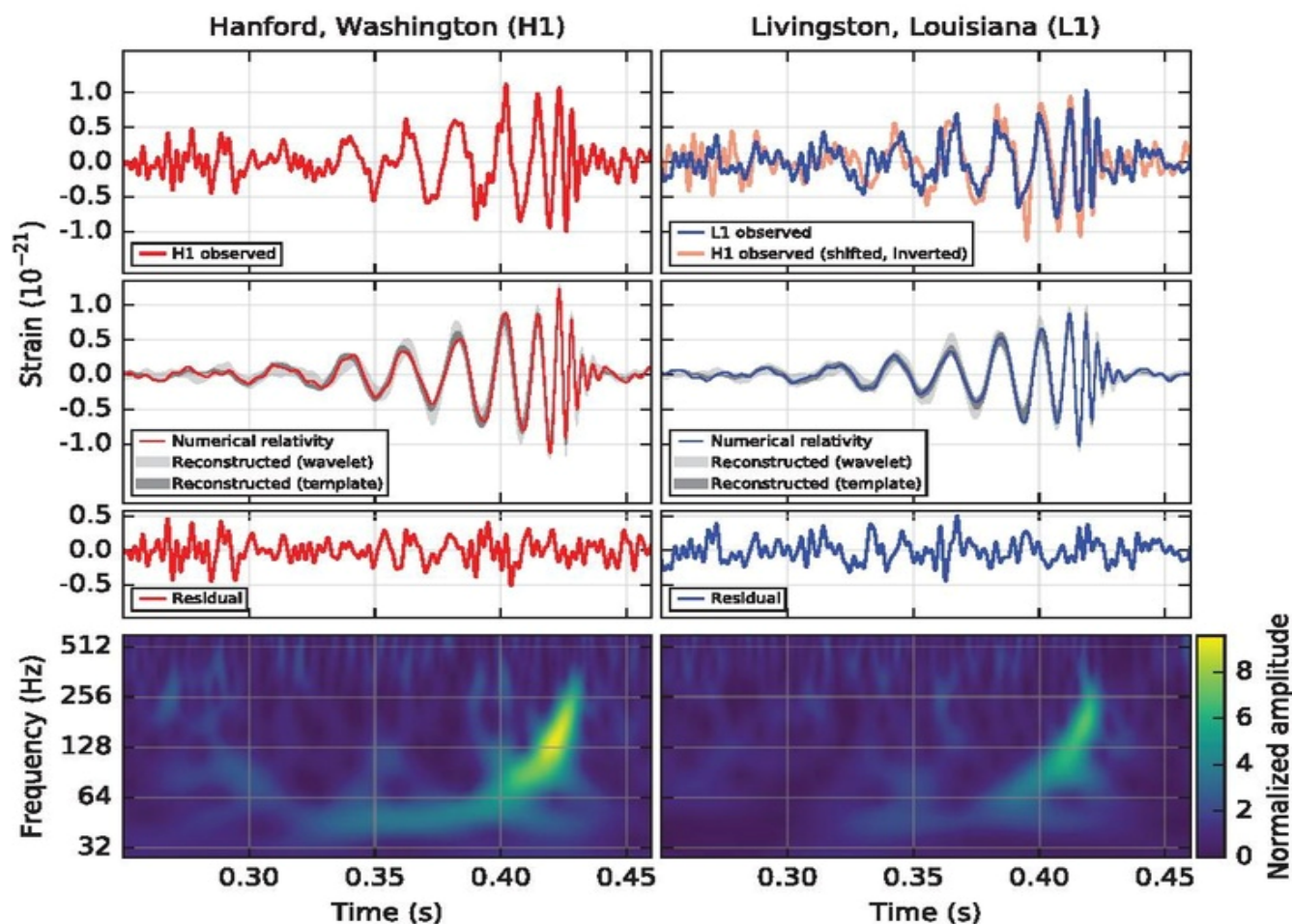
4 events observed

	$\delta_{cp} = -\pi/2$ (NH)	$\delta_{cp} = 0$ (NH)	$\delta_{cp} = +\pi/2$ (NH)	$\delta_{cp} = \pi$ (NH)	Observed
ν_e	28.7	24.2	19.6	24.1	32
$\bar{\nu}_e$	6.0	6.9	7.7	6.8	4

15

NOνA - максимальное смешивание Θ_{23} исключено на уровне 2.6σ . **T2K** - мюнные нейтрино переходят в электронные нейтрино с большей вероятностью, чем ожидалось (32 vs 24), а мюнные анти-ν в электронные анти-ν — с меньшей (4 vs 7). CP-нарушение в лептонном секторе может объяснить барионную асимметрию.

2016 – регистрация гравитационных волн



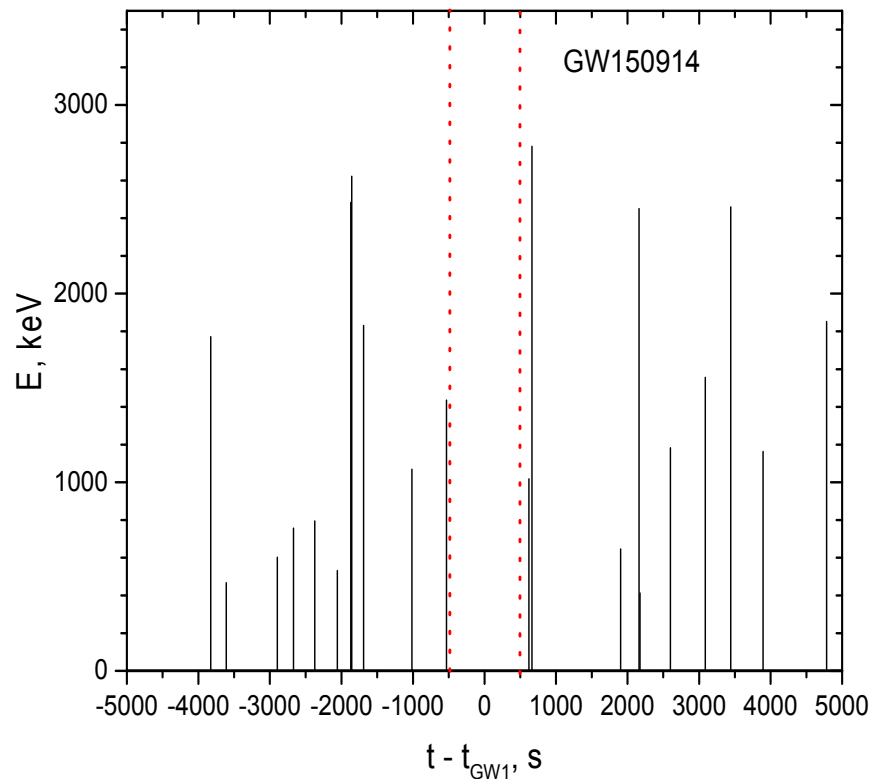
5.1 σ . На расстоянии 410 МПс ($z = 0.09$) слияние двух черных дыр с массами $36 M_{\odot}$ и $29 M_{\odot}$ с образованием $62 M_{\odot}$ и $3.0 M_{\odot}c^2$ излучилось в виде гравитационных волн. .

GW150914
LVT151012
GW151228

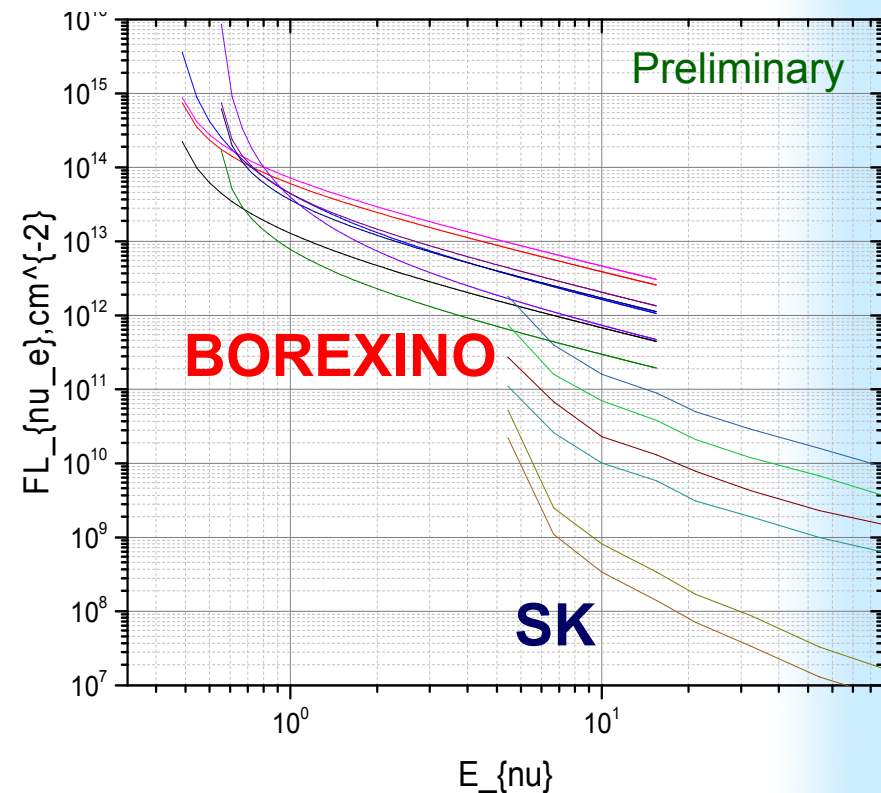
Начало применения комплементарных (multi-messenger) методов в астрофизике – электромагнитные, нейтринные и гравитационные сигналы из Вселенной могут регистрировать детекторы фотонов, нейтрино и гравитационных волн.

Корреляция GW с сигналами Borexino

Fermi GBM
(Gamma-ray Burst Monitor)
0.4 s, $P=0.0022$ (2.9σ)



ANTARES
IceCube
S-KamoiKande
Pierre Auger Observatory



Borexino имеет лучшую чувствительность к потокам низкоэнергетических нейтрино – 0.5 – 5 МэВ. Статья по корреляции готовится группой ПИЯФ.

Новые результаты Борексино (2016 г.)

Корреляции гамма-всплесков и сигналов Борексино Стерильное нейтрино -проект SOX_Ce

2015 год -Стабильность электрона
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 ${}^7\text{Be-}\nu$, $\text{rer-}\nu$, CNO- ν

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

2010 – год антинейтрино

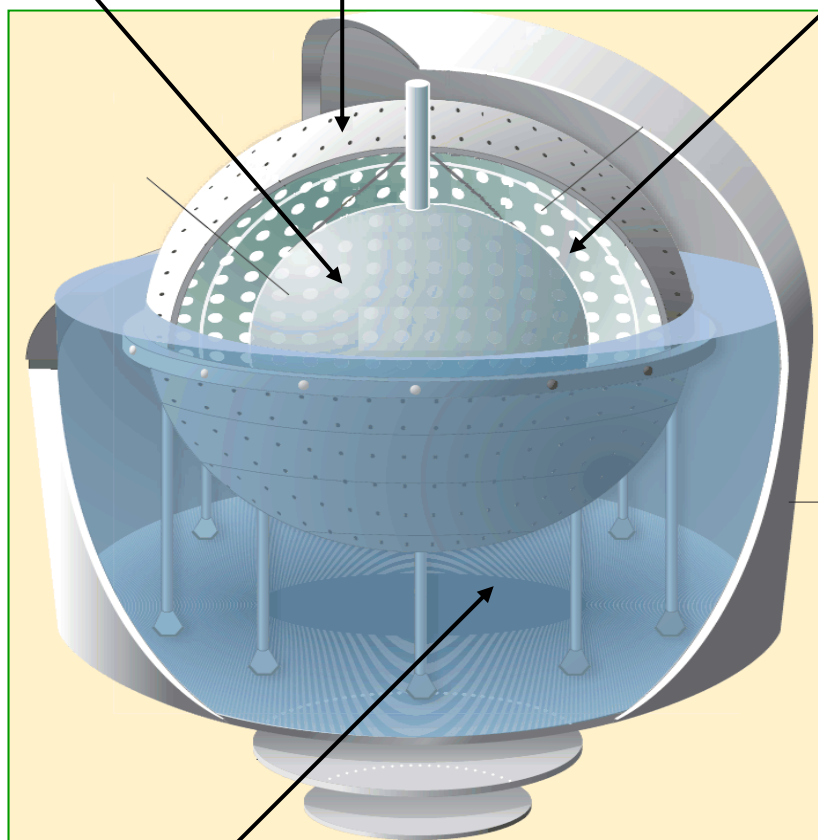
1. Гео-нейтрино
2. Солнечные анти-нейтрино
3. Фоновые анти-нейтрино
4. Переходы в ${}^{12}\text{C}$ с нарушением ПП

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

стальная сфера
диаметр 13,7 м

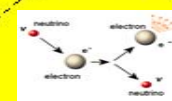
нейлоновая
сфера

2200 8" ФЭУ

200 ФЭУ
мюонного вето

100 т, основ-
ной объем

Rn барьер



Сцинтиллятор
300 т

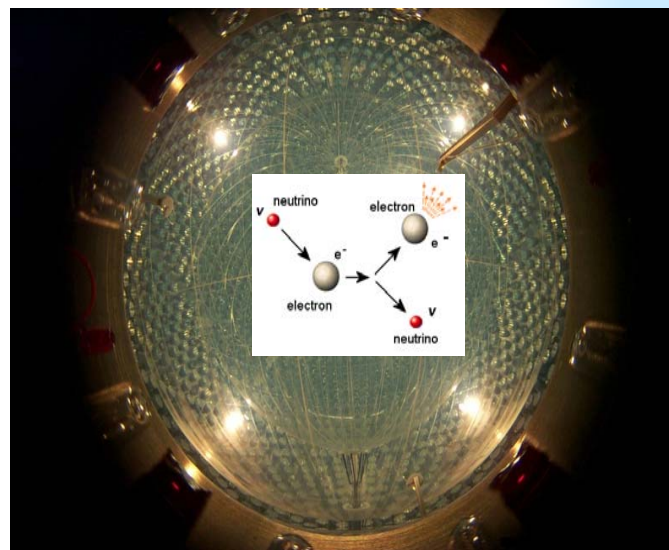
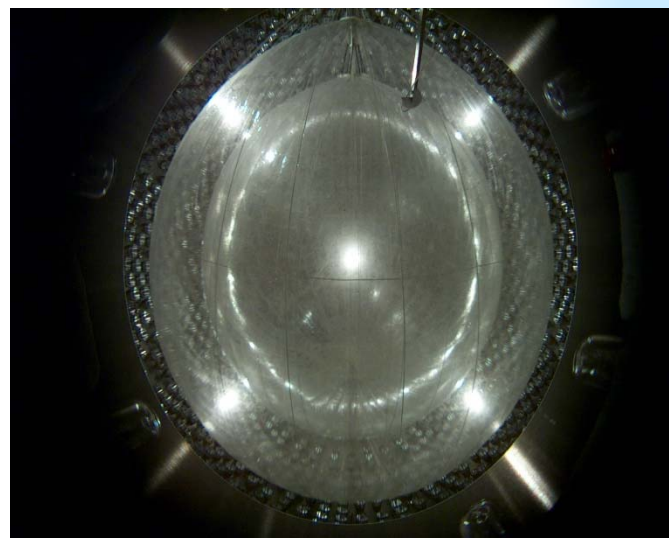
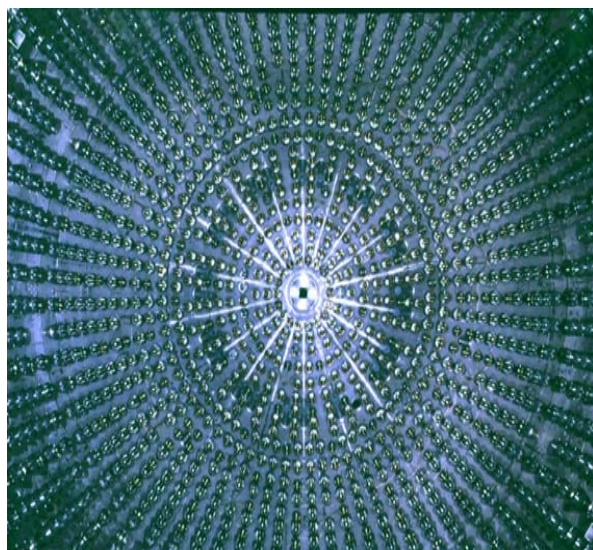
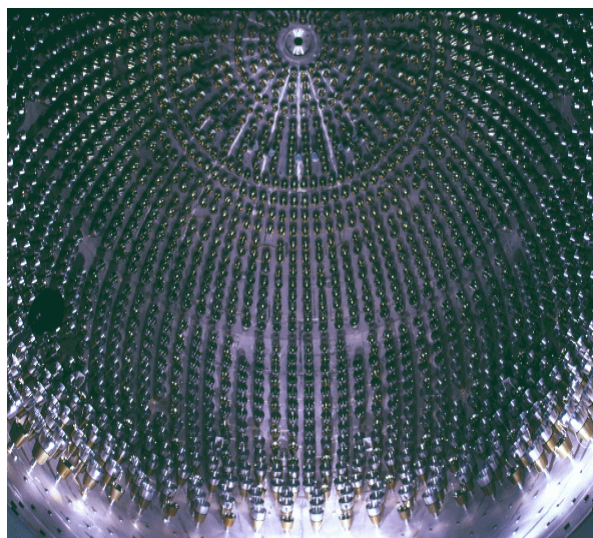
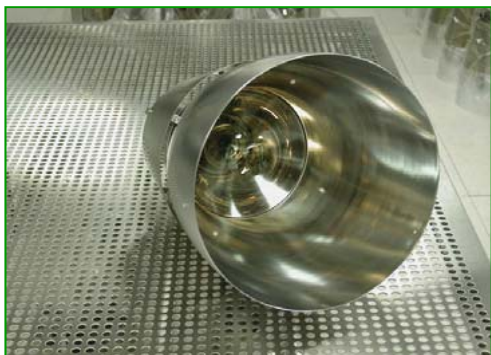
псевдокумол

защита
из воды

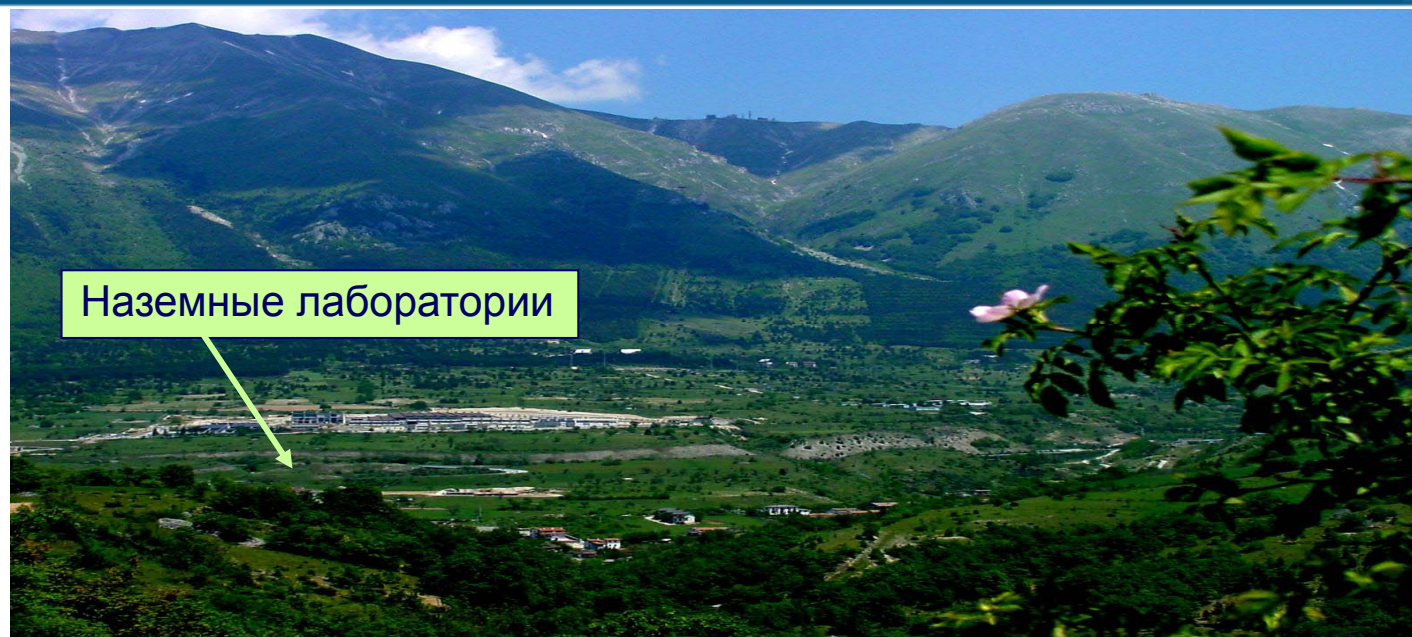
струны
танк с водой, d=18 м

стальная плита, 10 см

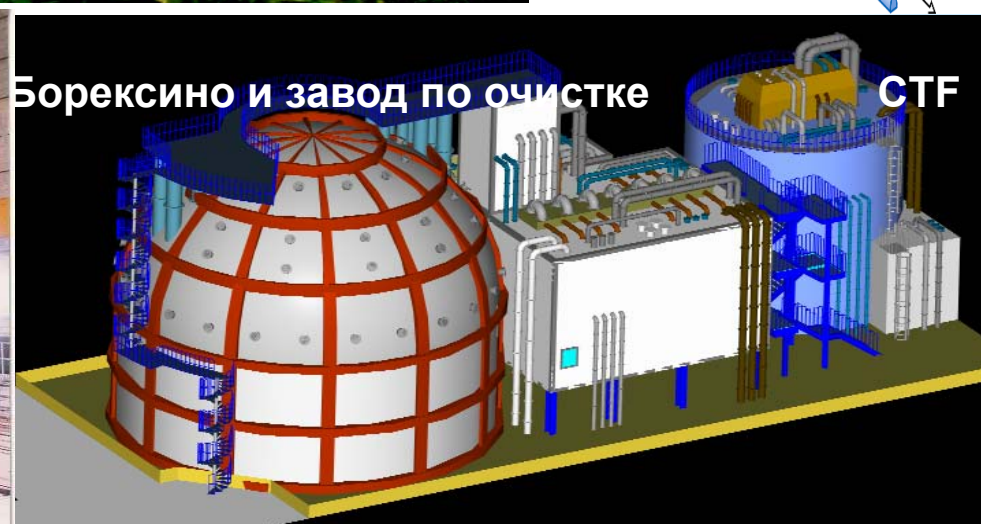
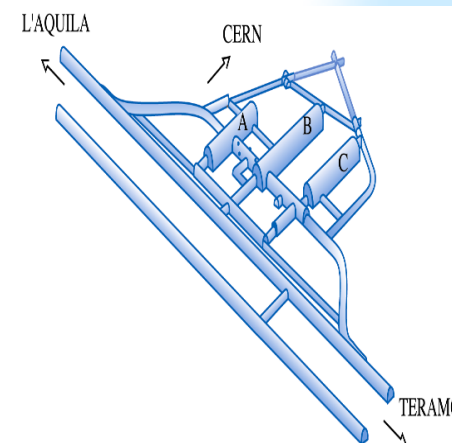
ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы



Национальная лаборатория Гран Сассо

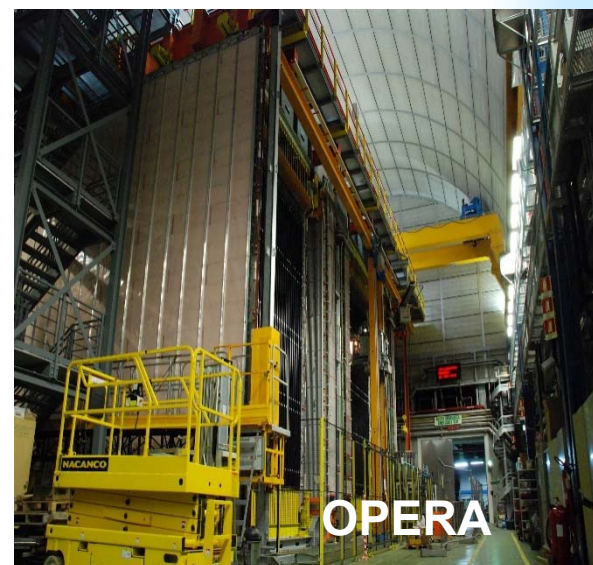
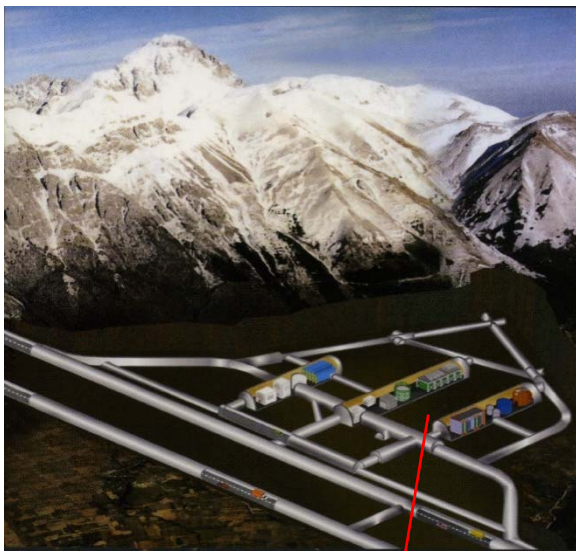


Италия,
120 км от Рима
3500 м.в.э.





Подземная лаборатория Гран-Сассо



Borexino collaboration



Borexino Collaboration



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



PRINCETON
UNIVERSITY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"



St. Petersburg
Nuclear Physics Inst.



Technische Universität
München



University of
Houston



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ



Universität
Hamburg



SKOBELOTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY



Joint Institute for
Nuclear Research



GRAN SASSO
SCIENCE INSTITUTE
CENTRO PER STUDI AVANZATI
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



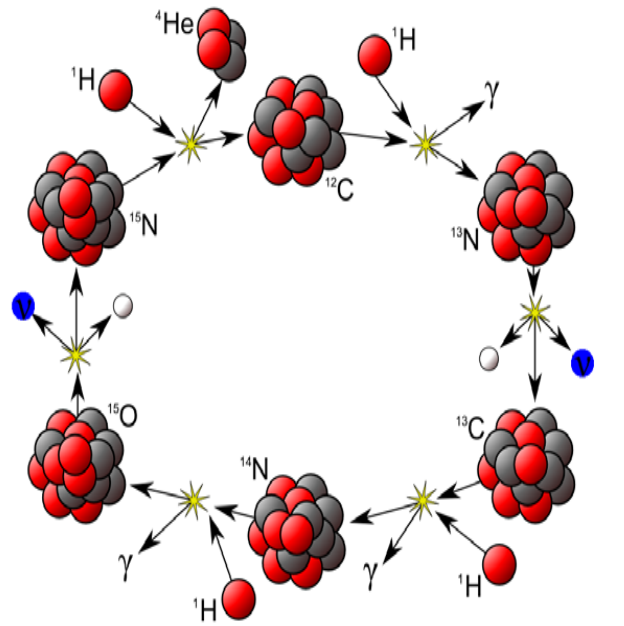
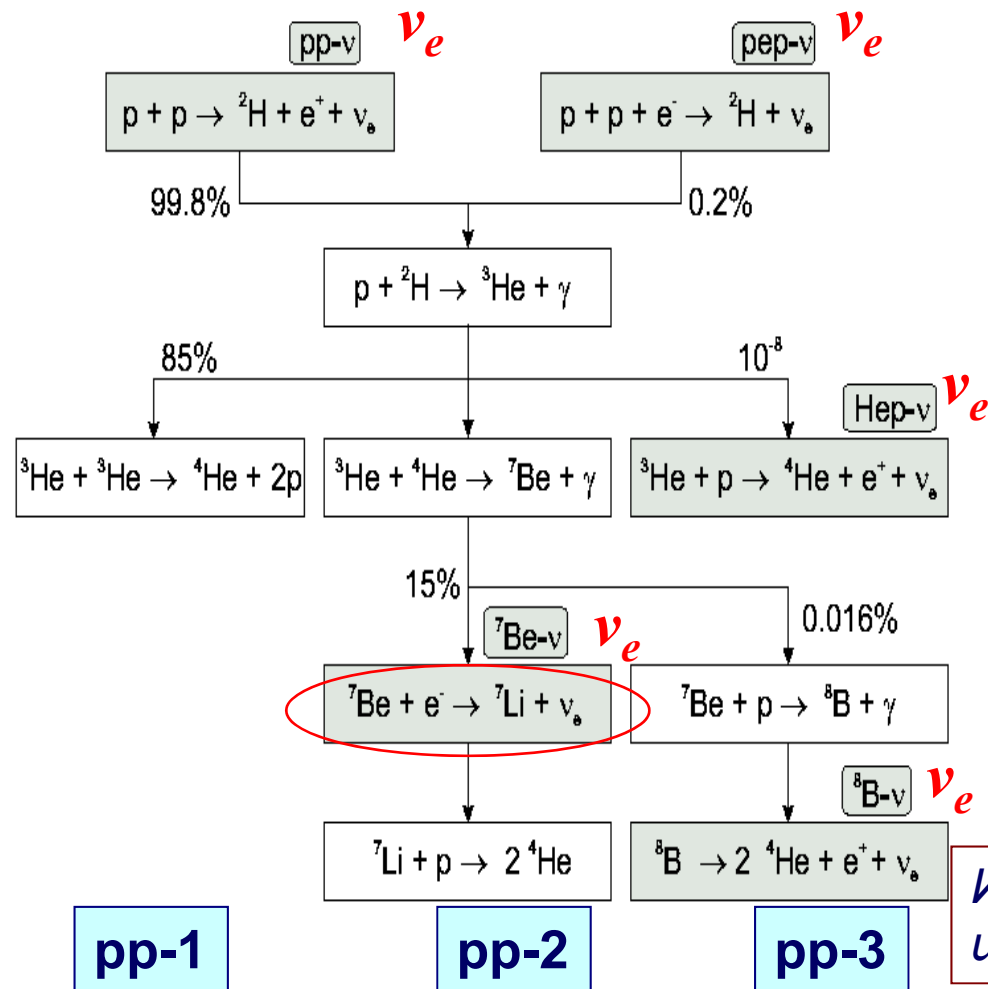
Рабочие группы и вклад ПИЯФ в 2016 г.

Входим в состав 7 (из 13) рабочих групп:

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

1. В составе рабочей группы «анти-нейтрино» подготовили статью по поиску корреляций ν -событий с гамма-всплесками (GRB). По нашему предложению корреляции искали не только с сигналом от анти- ν , но и от ν . Статья опубликована в *Astroparticle Physics*,
2. В составе NuSolar проводится новый анализ данных, полученных на этапе ФАЗА II. Улучшение точности потоков и спектров солнечных ν .
3. Группы ПИЯФ и ОИЯИ (« pp - ν », «RP» и «NS») готовят статью от коллаборации по магнитному моменту солнечных нейтрино.
4. Работа в Гран Сассо – 7(+10) чел./мес. в экспериментах Borexino, SOX и DarkSide

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



$$\begin{aligned}
 {}^{13}\text{N} &\rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV} \\
 {}^{15}\text{O} &\rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV} \\
 {}^{17}\text{F} &\rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

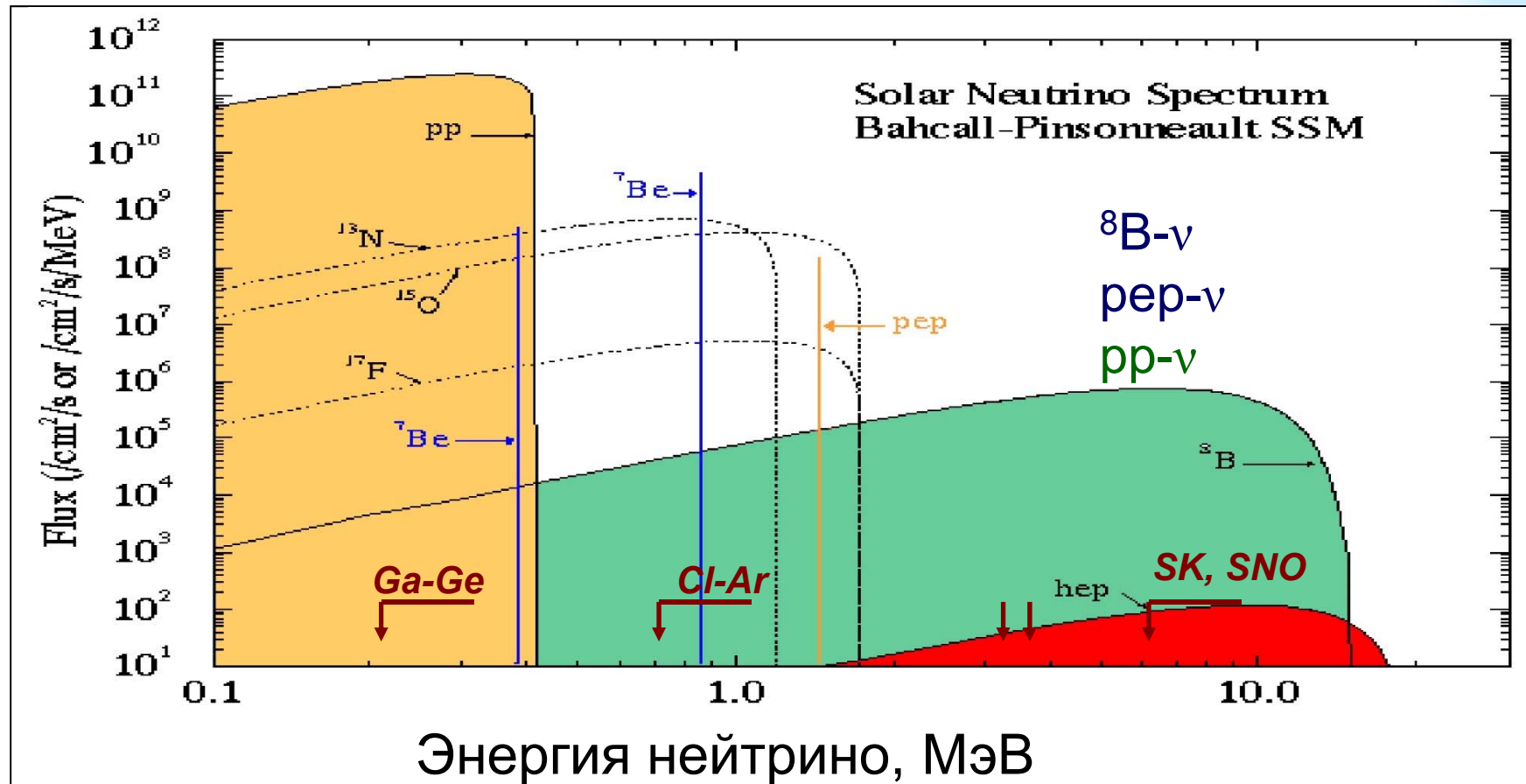
Излучается 5 нейтрино в pp-цепочке и 3 нейтрино в CNO-цикле

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



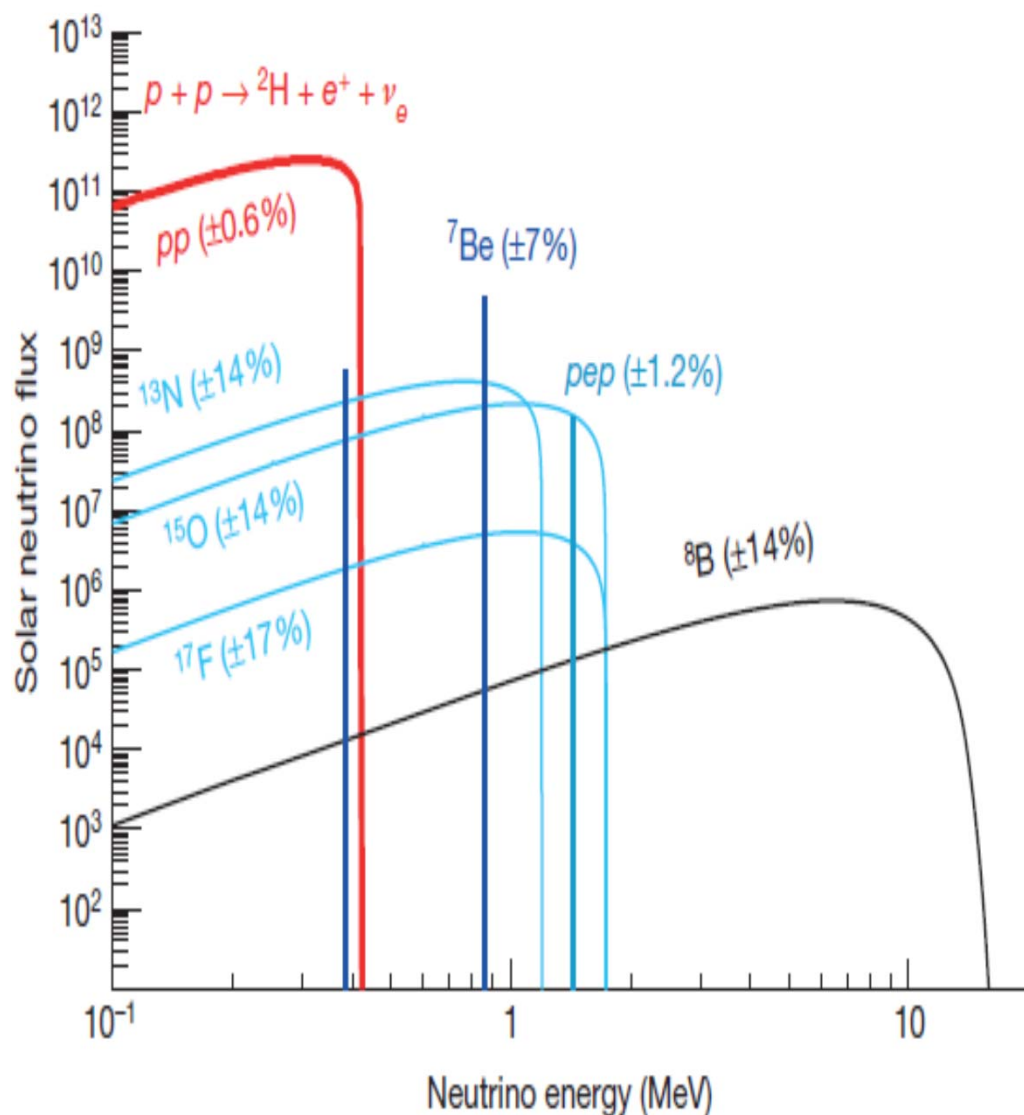
Основная задача БОРЕКСИНО -

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 ^7Be -нейтрино измерен с 4.8%

Precision measurement of the ^7Be 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:

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

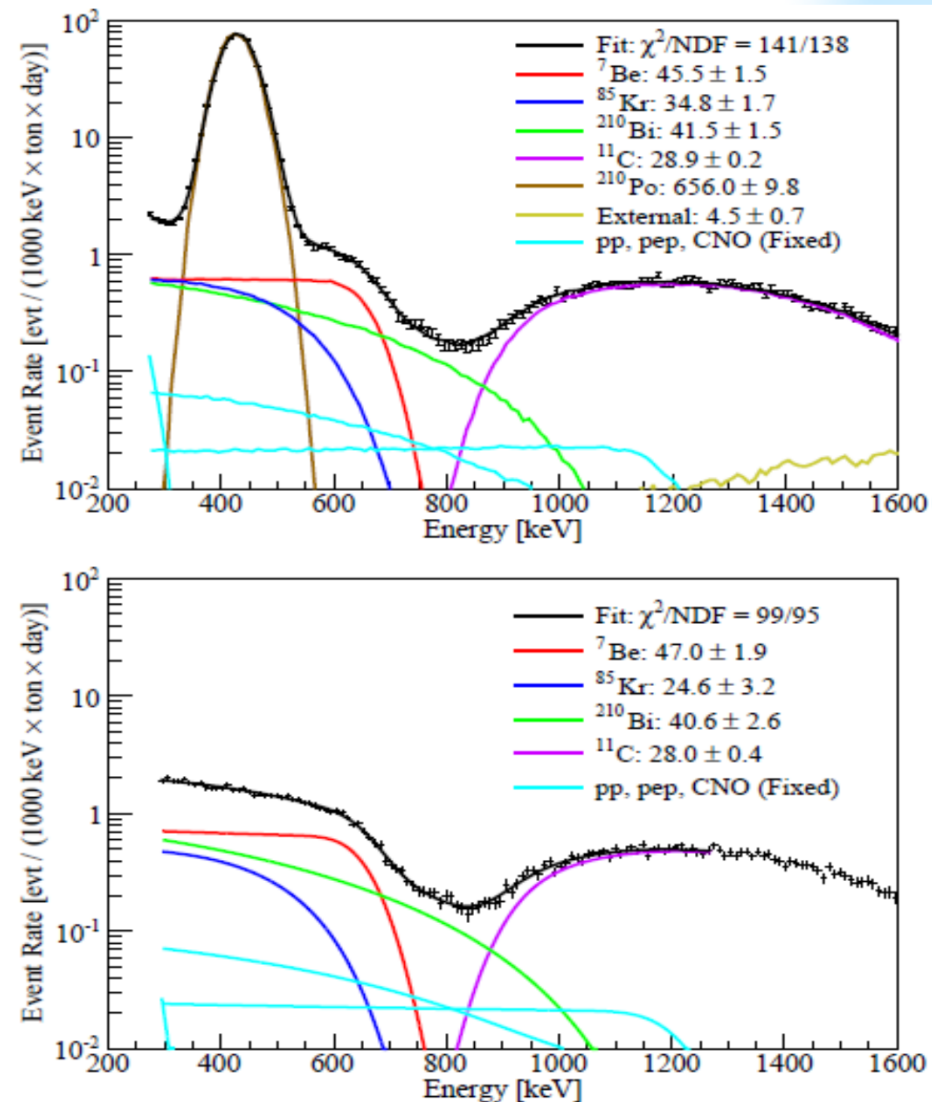
$$f_{\text{pp}} = 1.013^{+0.003}_{-0.010}$$

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

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

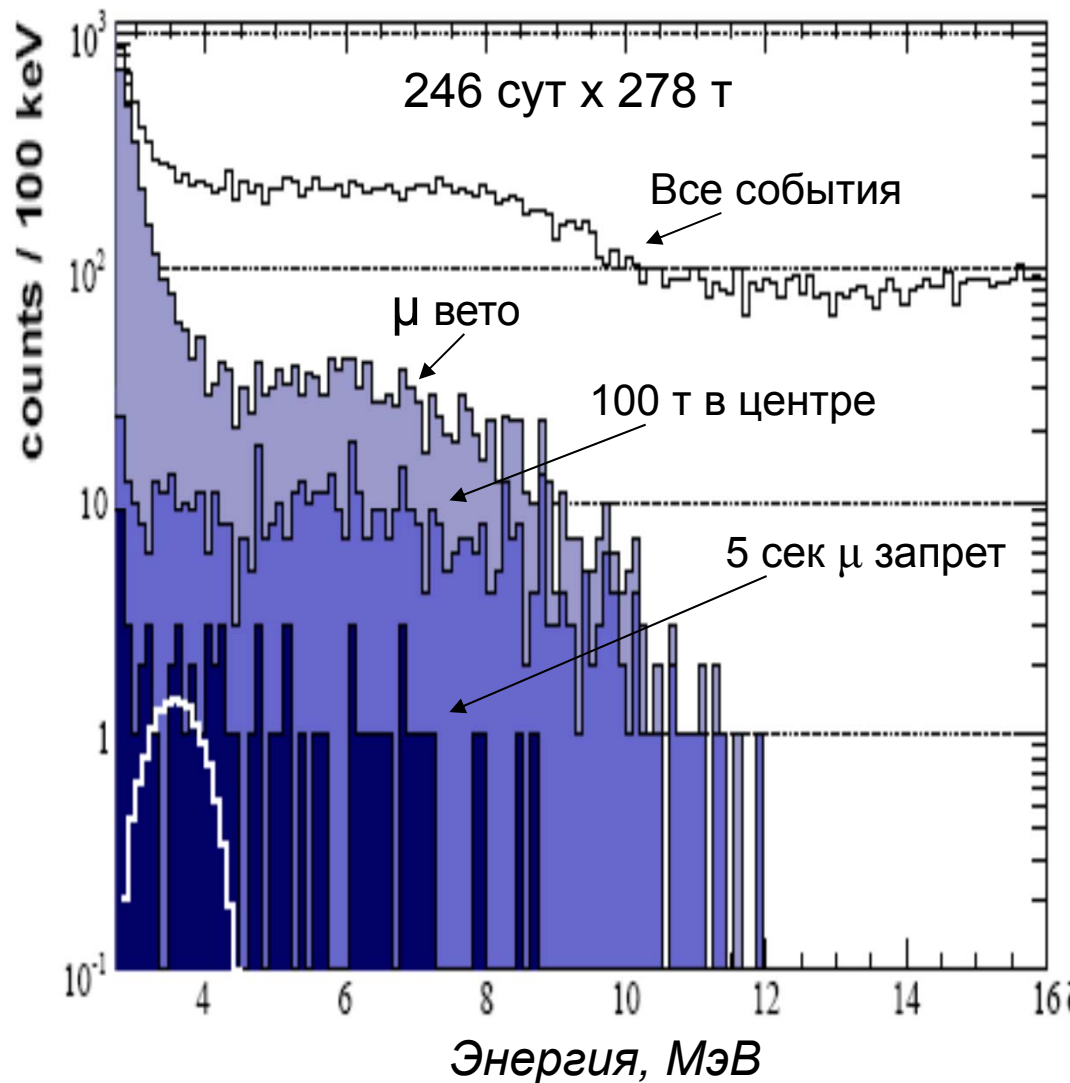
$$\delta m^2 = (7.5^{+0.16}_{-0.24}) 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

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





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



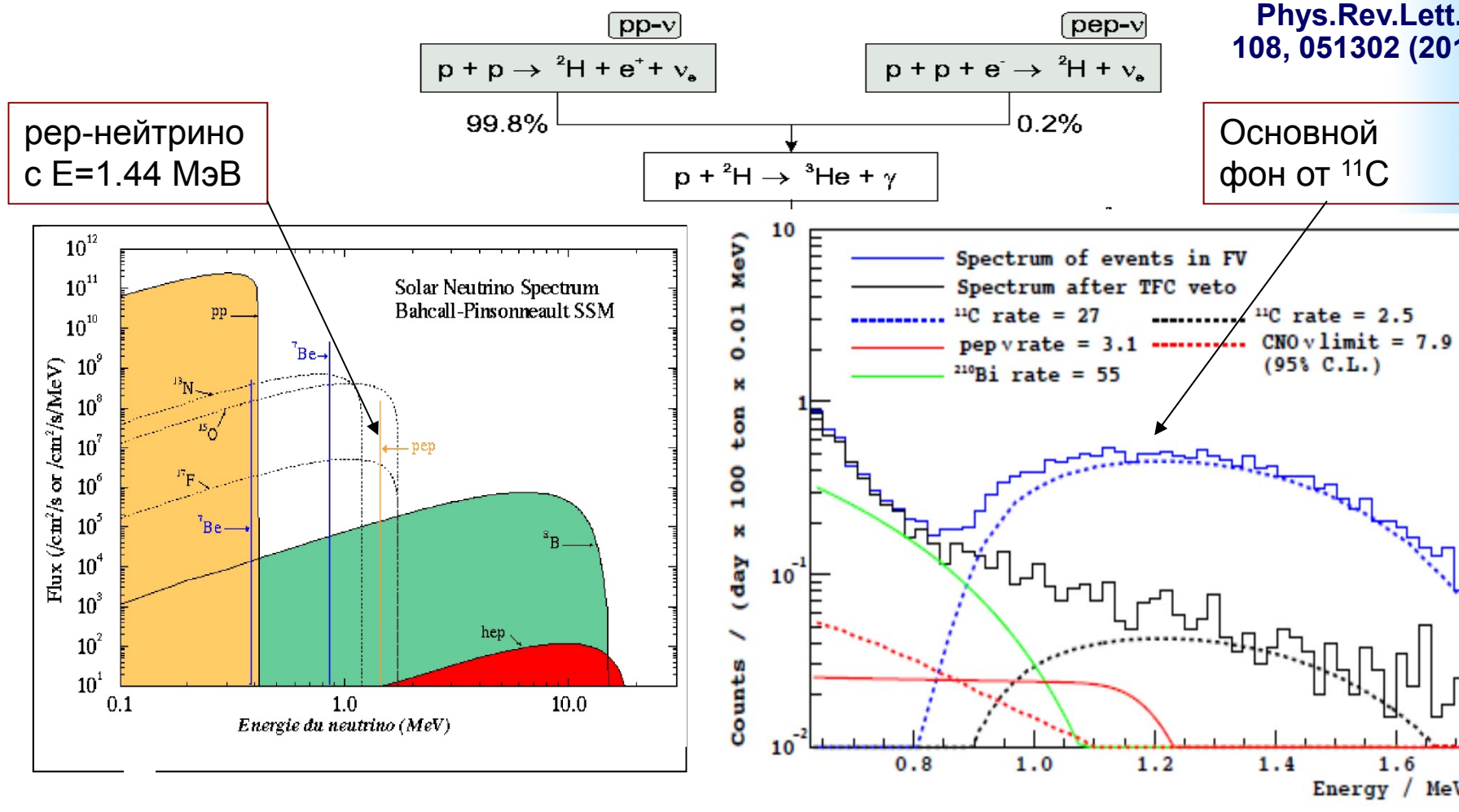
Ожидаемая скорость счета в **200 раз меньше** чем для ^7Be -нейтрино. Порог 3.0 МэВ связан с регистрацией γ -пика 2.614 МэВ.

Отбор событий

1. Мюонное вето
2. **Центральный объем**
массой 100 т
3. Удаление событий в интервале 2 мс после мюонов пересекающих 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 $^{212}\text{Bi-Po}$ совпадений

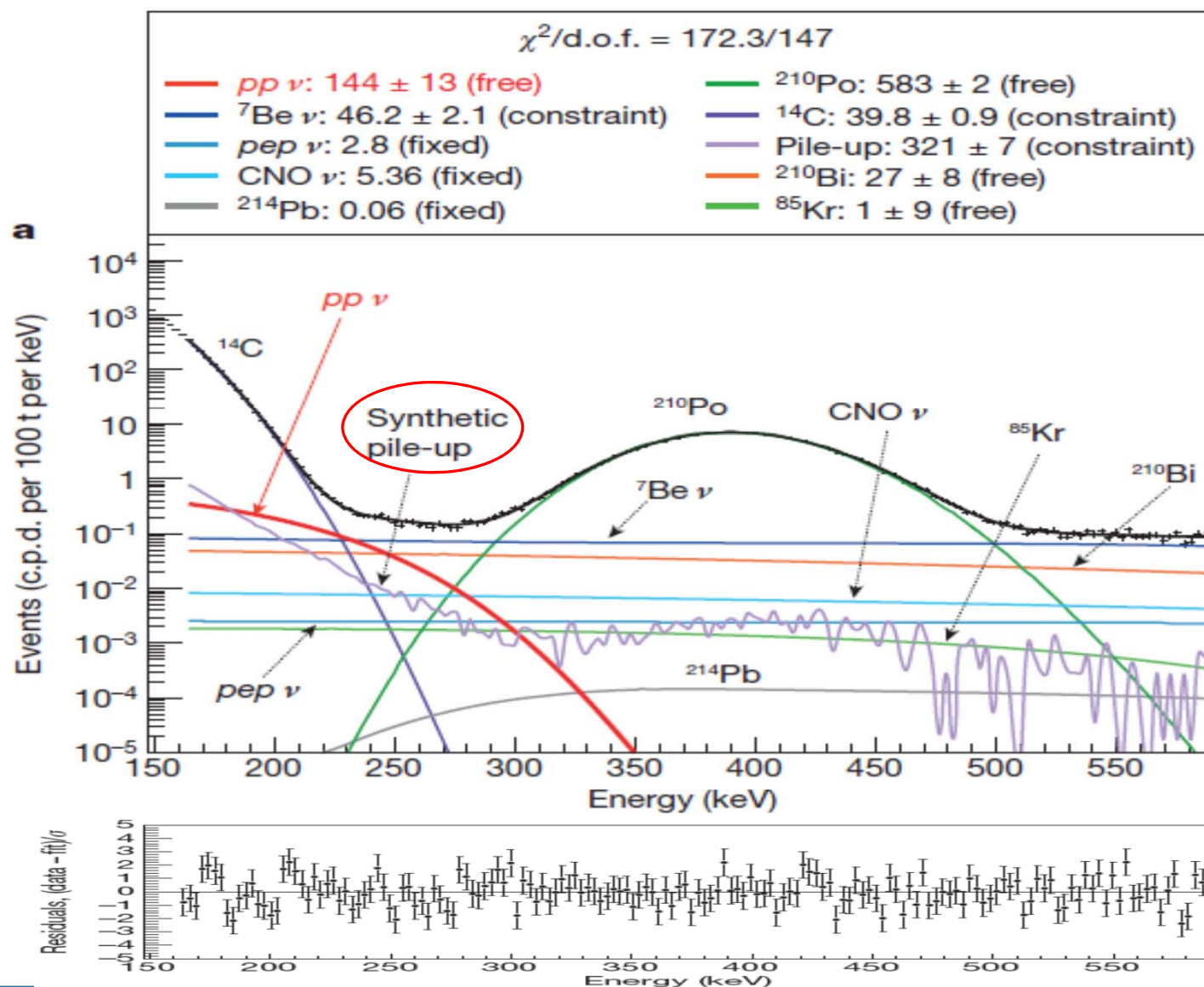
Обнаружение пер-нейтрино: $p+p+e \rightarrow d+\nu$

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



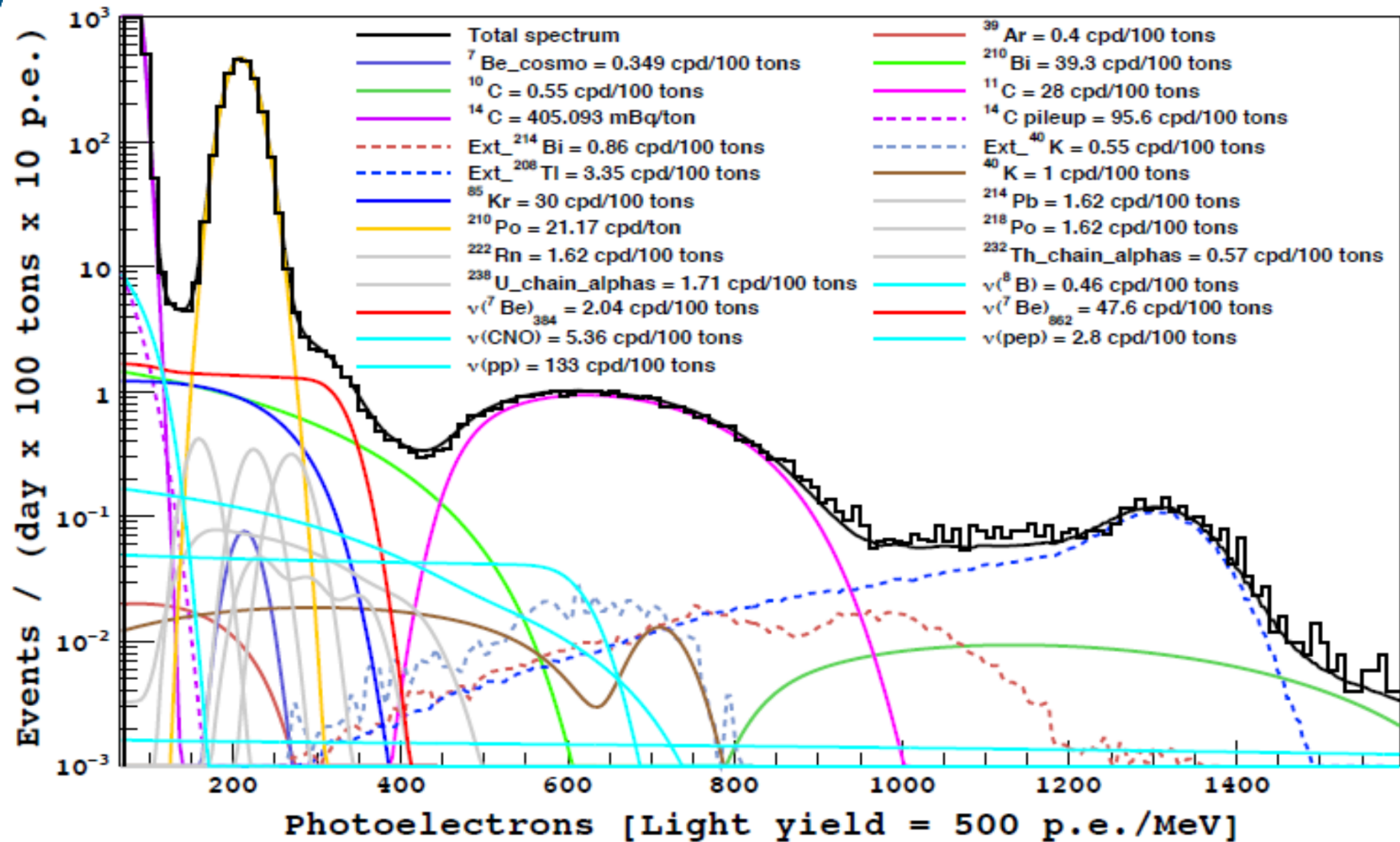
Детекторы солнечных нейтрино показали, что в Солнце действительно происходят ядерные реакции. Поток пер-нейтрино предсказан с точностью 1.2%. CNO нейтрино меняется в ~2 раза для high и low Z.

pp-нейтрино: фит в области 165 – 590 кэВ



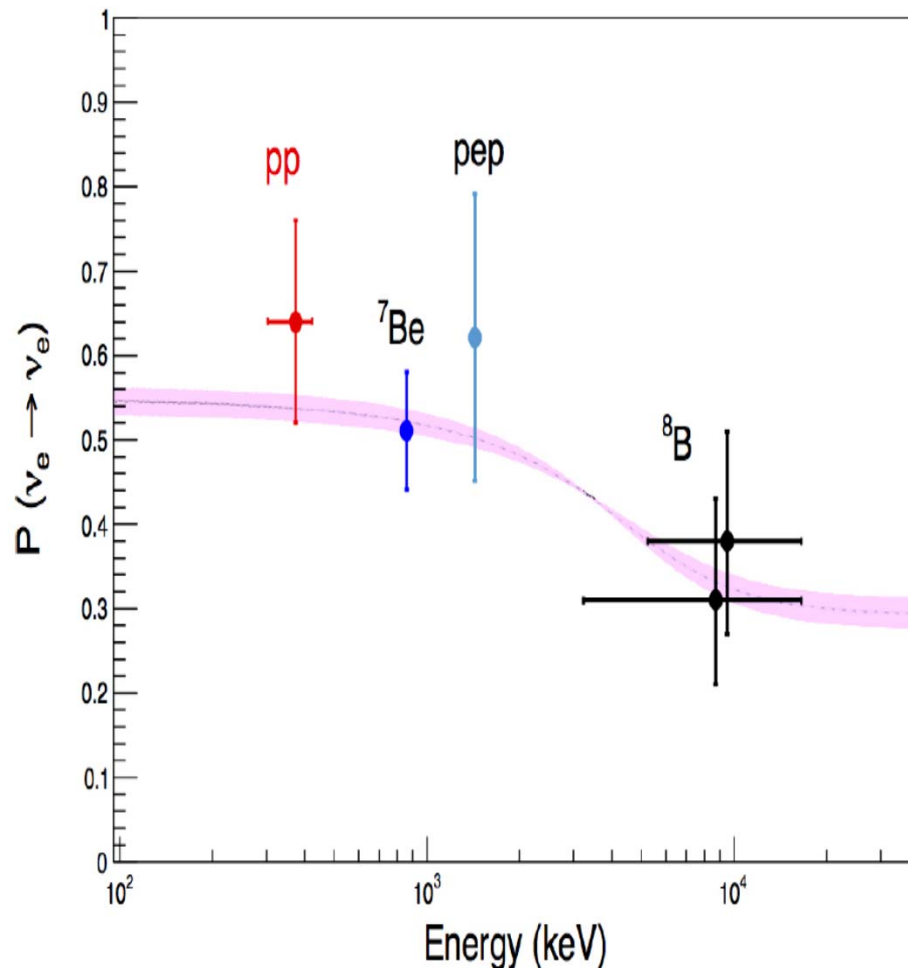
408 суток
живого
времени
январь 2012 –
май 2013:
ФАЗА II
(с окт. 2011)
после очистки
сцинтиллятора
с зимы 2010 с
более низким
содержанием
 ^{75}Kr и ^{210}Bi

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

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

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

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

Измерено (стат. + сист.)

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

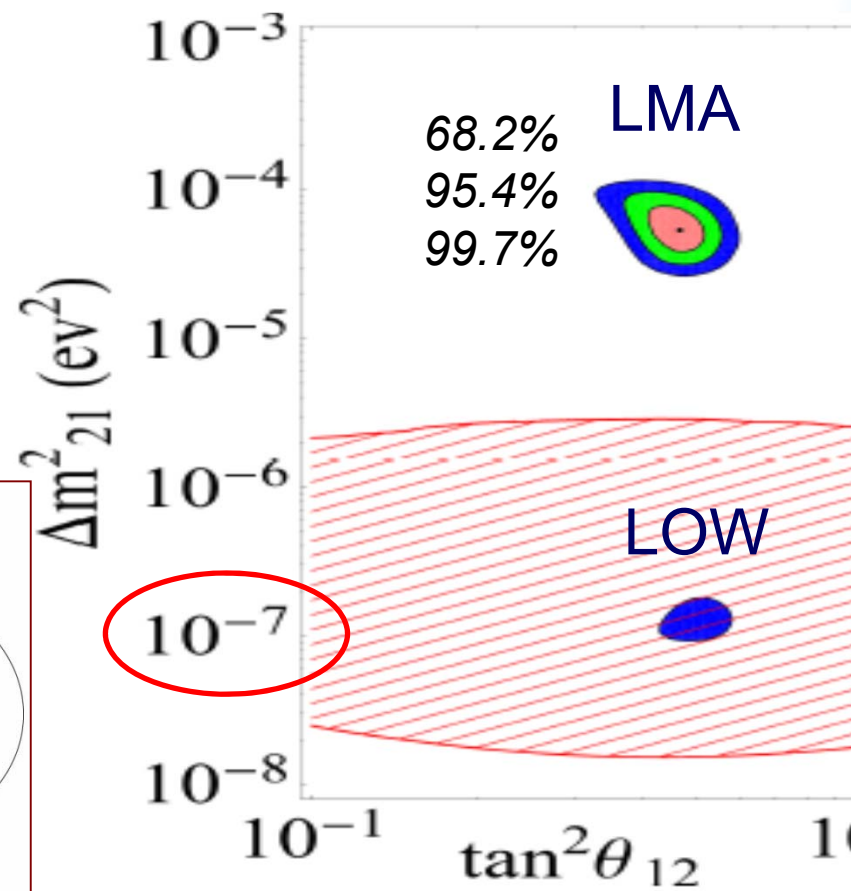
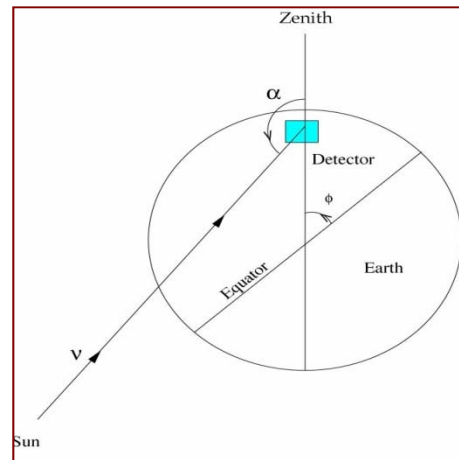
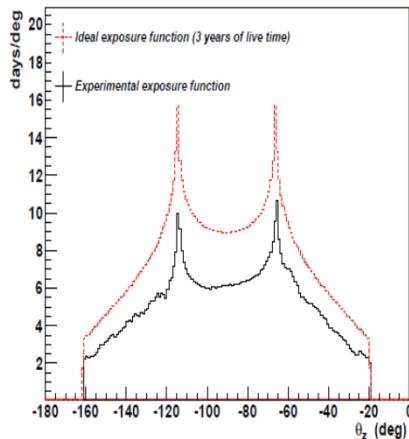
$$\Phi_{pp} = (6.6 \pm 0.7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$$

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

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.

Осцилляции ^7Be -нейтрино в Земле (эффект день-ночь)

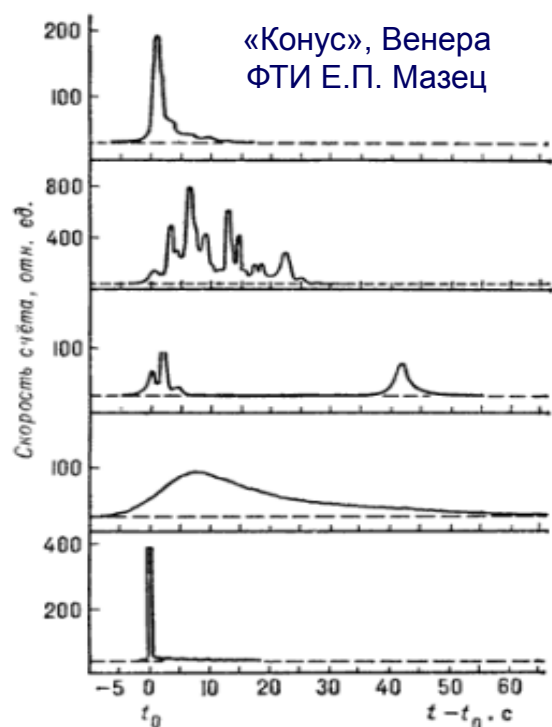
5 решений проблемы
солнечных нейтрино для
механизма MSW –
SMA, LOW, LMA + вакуумные
осцилляции + Just-So.
SK и SNO отвергают SMA и
Just-So. KamLand
подтверждает LMA



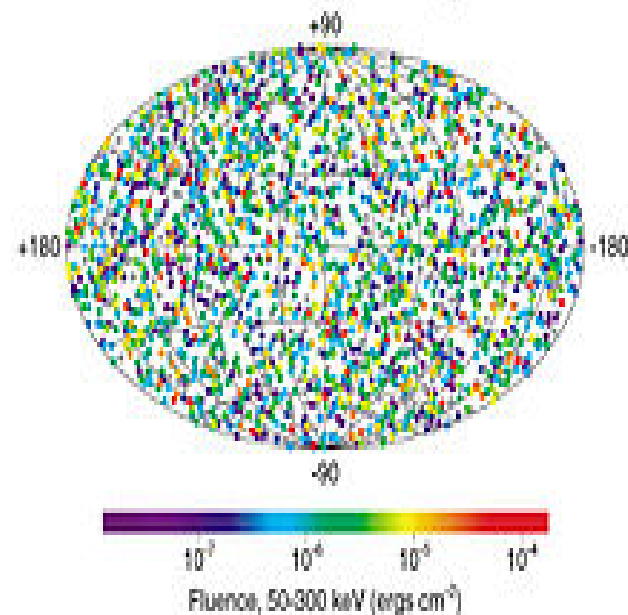
^8B нейтрино **MSW LMA** предсказывает $\sim 2\%$ асимметрию $A_{\text{dn}} = 2(R_n - R_d)/(R_n + R_d)$
Измеренные значения - SNO : $A_{\text{nd}} = 0.037 \pm 0.040$ SKI: $A_{\text{nd}} = 0.021 \pm 0.020$

^7Be нейтрино **MSW LMA** $A_{\text{dn}} = +0.1\%$ **MSW LOW** $A_{\text{dn}} = (11-80)\%$

Гамма-всплески – Gamma-Ray Bursts



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



НЕ нейтрино в совпадении с ГВ искали в экспериментах AMANDA, ANITA, ANTARES, BAIKAL, IceCube, S-K. Нейтрино в МэВ области – S-K, SNO, KamLAND и BUST.

Гамма-всплеск (ГВ) — масштабный космический выброс энергии взрывного характера, наблюдаемый в отдалённых галактиках в жёсткой части электромагнитного спектра. Продолжительность типичного ГВ составляет несколько секунд (короткие < 2 сек, длинные 10 сек). Частота – 1 ГВ в сутки. Наиболее энергетическое событие во Вселенной 10^{54} эрг в предположении изотропного излучения. Наблюдается послесвечение в рентгеновском, оптическом и радиодиапазоне. Космологические расстояния $z = 0.01 \dots 8.2$.

Поиск корреляций ГВ и сигналов анти- ν и ν в Borexino

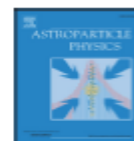
Astroparticle Physics 86 (2017) 11–17



Contents lists available at ScienceDirect

Astroparticle Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/astropartphys



Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts



M. Agostini^a, K. Altenmüller^b, S. Appel^b, V. Atroshchenko^c, G. Bellini^d, J. Benziger^e, D. Bick^f, G. Bonfini^g, D. Bravo^h, B. Caccianiga^d, F. Calapriceⁱ, A. Caminata^j, M. Carlini^g, P. Cavalcante^{g,h}, A. Chepurinov^k, K. Choi^l, D. D'Angelo^d, S. Davini^a, H. de Kerret^m, A. Derbinⁿ, L. Di Noto^j, I. Drachnev^a, A. Etenko^c, K. Fomenko^o, D. Franco^m, F. Gabriele^g, C. Galbiatiⁱ, C. Ghiano^j, M. Giammarchi^d, M. Goeger-Neff^b, A. Gorettiⁱ, M. Gromov^k, C. Hagner^f, E. Hungerford^p, Aldo Ianni^{g,d}, Andrea Ianniⁱ, A. Jany^q, K. Jedrzejczak^q, D. Jeschke^b, V. Kobychew^r, D. Korabely^o, G. Korga^p, D. Kryn^m, M. Laubenstein^g, B. Lehnert^s, E. Litvinovich^{c,t}, F. Lombardi^g, P. Lombardi^d, L. Ludhova^{u,v,w}, G. Lukyanchenko^c, I. Machulin^{c,t}, S. Manecki^{h,w}, W. Manesch^x, G. Manuzio^j, S. Marocci^a, E. Meroni^d, M. Meyer^f, L. Miramonti^d, M. Misiaszek^{q,g}, M. Montuschi^v, P. Mosteiroⁱ, V. Muratovaⁿ, B. Neumair^b, L. Oberauer^b, M. Obolensky^m, F. Ortica^z, M. Pallavicini^j, L. Papp^b, A. Pocar^A, G. Ranucci^d, A. Razeto^g, A. Re^d, A. Romani^z, R. Roncin^{g,m}, N. Rossi^g, S. Schönert^b, D. Semenovⁿ, M. Skorokhvatov^{c,t}, O. Smirnov^o, A. Sotnikov^o, S. Sukhotin^c, Y. Suvorov^{B,c}, R. Tartaglia^g, G. Testera^j, J. Thurn^s, M. Toropova^c, E. Unzhakovⁿ, A. Vishneva^o, R.B. Vogelaar^h, F. von Feilitzsch^b, H. Wang^B, S. Weinz^C, J. Winter^C, M. Wojcik^q, M. Wurm^C, Z. Yokley^h, O. Zaimidoriga^o, S. Zavatarelli^j, K. Zuber^s, G. Zuzel^q, The Borexino Collaboration

^aGran Sasso Science Institute (INFN), 67100 L'Aquila, Italy

^bPhysik-Department and Excellence Cluster Universe, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany

^cNational Research Centre Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

^dDipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 20133 Milano, Italy

^eChemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

^fInstitut für Experimentalphysik, Universität, 22761 Hamburg, Germany

^gINFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi (AQ), Italy

^hPhysics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA

ⁱPhysics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

^jDipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, Genova 16146, Italy

^kLomonosov Moscow State University, Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia

^lDepartment of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA

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

ⁿSt. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188250 Gatchina, Russia

^oJoint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

^pDepartment of Physics, University of Houston, Houston, TX 77204, USA

^qM. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30059 Krakow, Poland

^rInstitute for Nuclear Research, 03680 Kiev, Ukraine

^sDepartment of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany

^tNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

^uIKP-2 Forschungszentrum Jülich, 52428 Jülich, Germany

^vRWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany

^wPhysics Department, Queen's University, Kingston ON K7L 3N6, Canada

^xMax-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg, Germany

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

^zDipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università e INFN, 06123 Perugia, Italy

^AAmherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA

^BPhysics and Astronomy Department, University of California Los Angeles (UCLA), Los Angeles, California 90095, USA

^CInstitute of Physics and Excellence Cluster PRISMA, Johannes Gutenberg University, Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany

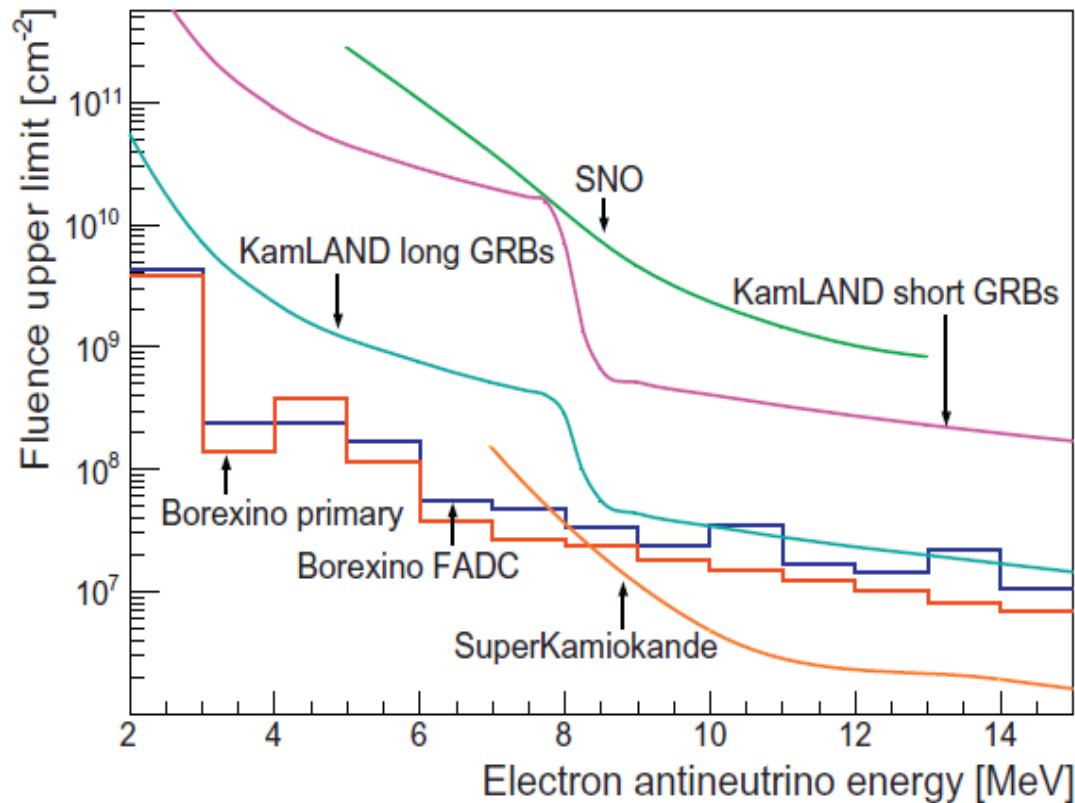
^dLaboratorio Subterráneo de Canfranc, Paseo de los Ayarbe s/n, 22880 Canfranc Estación Huesca, Spain

База данных по ГВ – IceCube включает данные со спутников SWIFT, Fermi, INTEGRAL, AGILE, Suzaki И Konus/WIND.

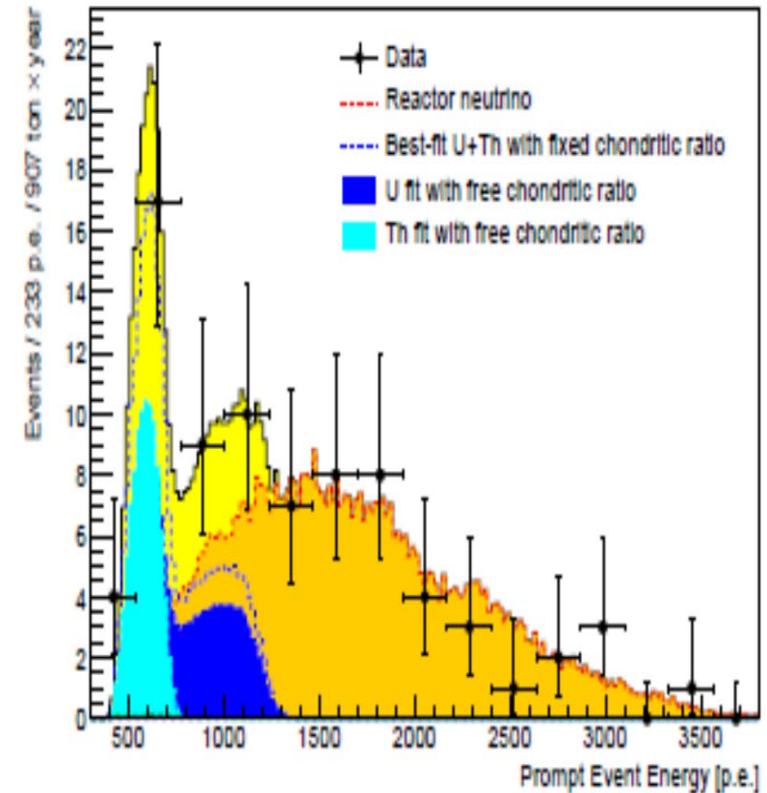
Исходя из максимально разрешенной массы нейтрино 87 эВ (Осцилляции + сумма < 0.23 Plank 2013), для типичного расстояния $z = 2$, задержка сигнала составляет 800 сек.

Опубликовано *Astropart. Phys.* 86, 11 (2017)
(среди авторов 5 из ПИЯФ)

Анти- ν_e - обратный бета-распад: Анти- $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$



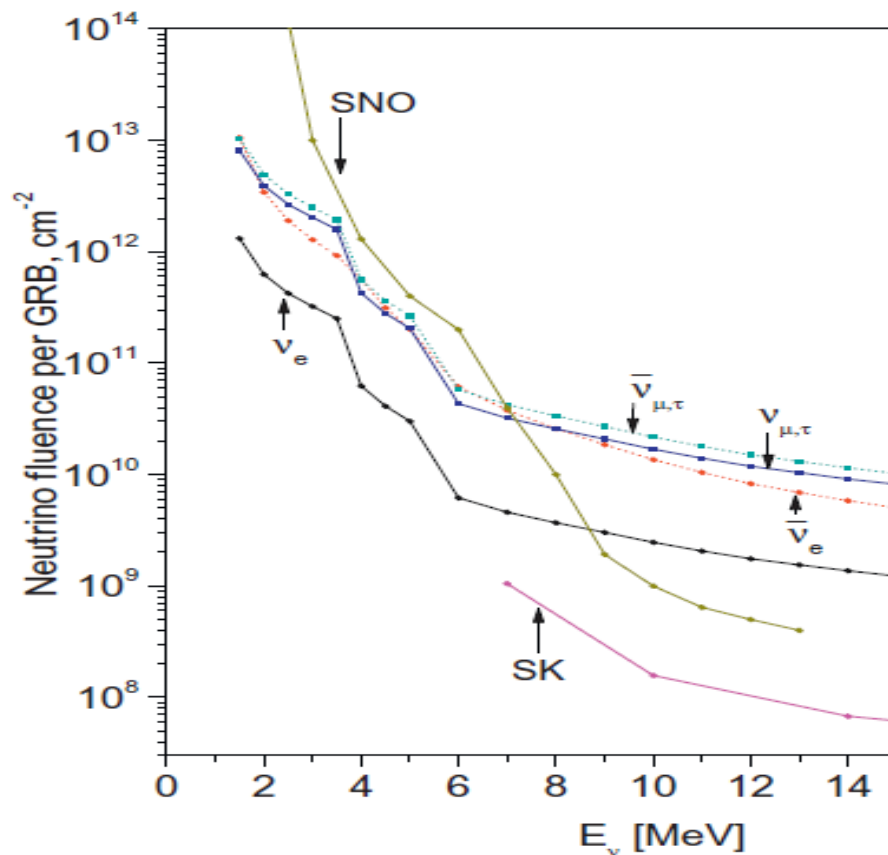
Верхний предел на флюенс **электронных антинейтрино** от ГВ. Результат Borexino (красная и синяя) показан в сравнении с пределами SuperKamiokande, SNO и KamLAND.



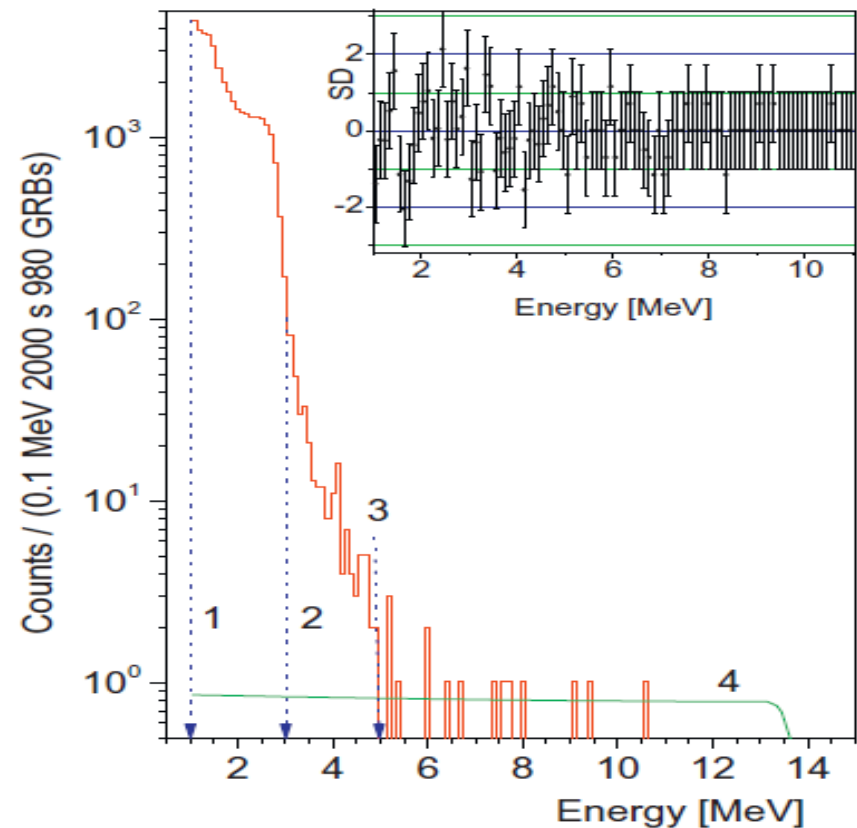
Спектр 77 событий анти-нейтрино за 2056 сут. Светло- и темно-синие области – Th и U- ν . Красная линия – вклад реакторных ν .

Для реакции ОБР использовалось окно ± 5000 сек. Проанализирована корреляция **2350 ГВ** с данными детектора Borexino, собранными в период с **декабря 2007 по ноябрь 2015 г.** Никаких статистически значимых корреляций не обнаружено. Установлены наиболее строгие ограничения на флюенс нейтрино и антинейтрино, связанный с ГВ, при энергиях менее **7-8 МэВ**.

Все нейтрино испытывают рассеяние нейтрино на электроне



Верхний предел на флюенс нейтрино и анти- ν различных флейвов, полученный из отсутствия корреляции ГВ с событиями $p(\nu, e)$ -рассеяния.



Спектр одиночных событий Borexino в корреляции с ГВ. На вставке разность (в SD) между корр. и фоновым спектрами. 4-спектр для $E_\nu = 14$ МэВ и $F = 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ ГВ}^{-1}$.

Для реакции (ν, e) -рассеяния использовалось окно ± 1000 сек. Проанализирована корреляция 2350 ГВ с данными детектора Borexino, собранными в период с декабря 2007 по ноябрь 2015 г. Никаких статистически значимых корреляций не обнаружено. Установлены наиболее строгие ограничения на флюенс нейтрино и антинейтрино разных флэйвов, связанный с ГВ, при энергиях менее 7-8 МэВ.

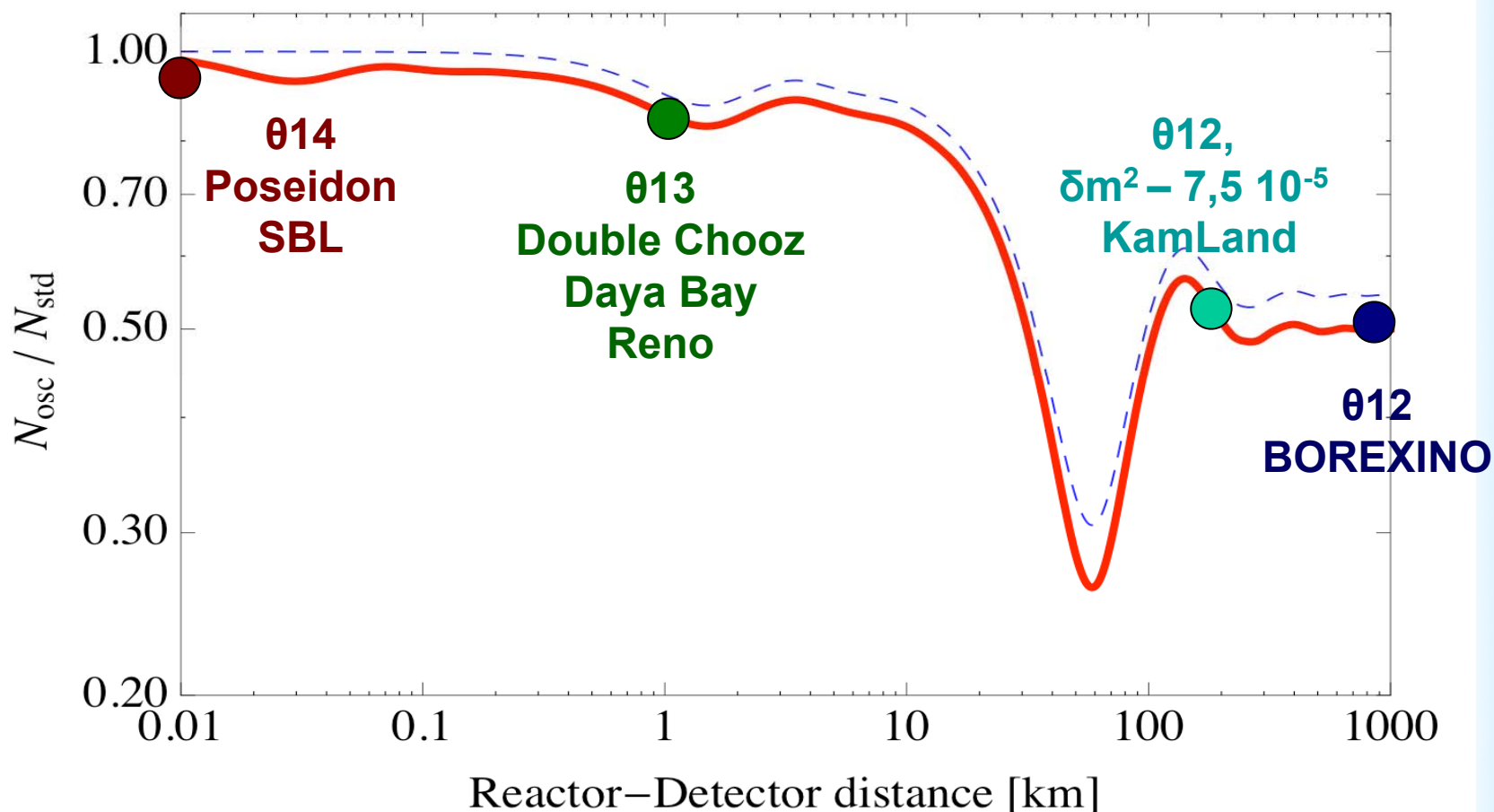
Эксперимент SOX_Ce

**Short baseline Oscillations
with BoreXino.**

**Поиск осцилляций нейтрино в
стерильное состояние**



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.)

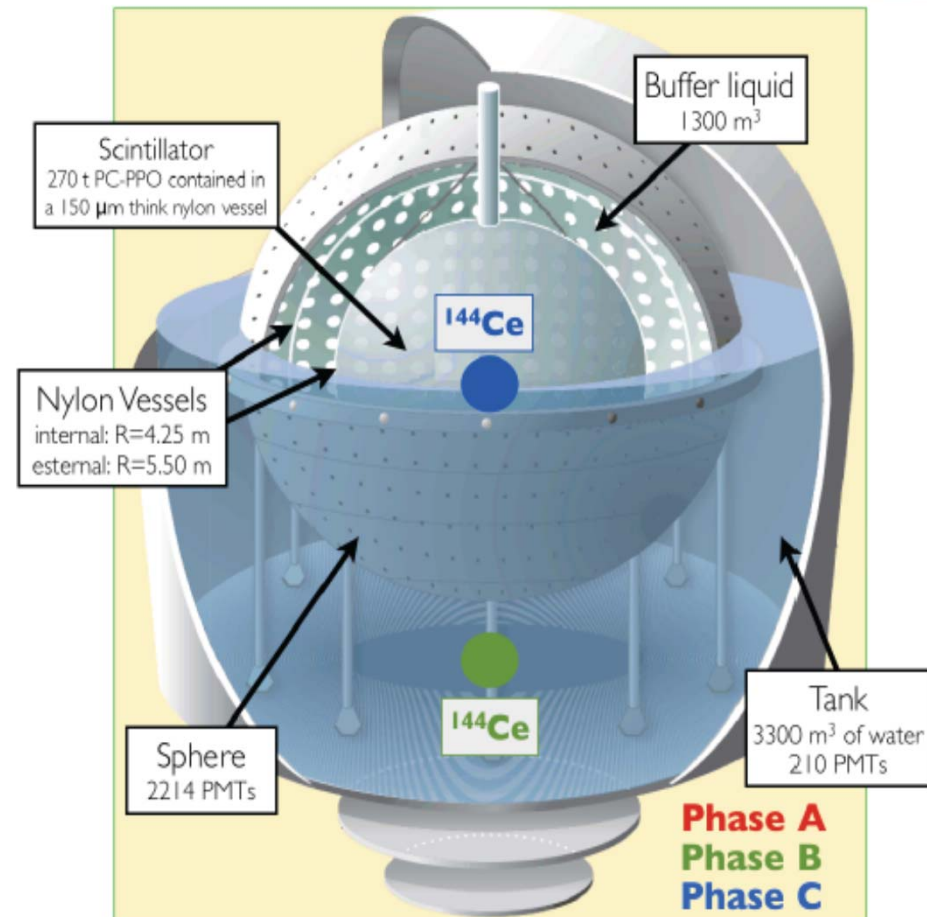
Проект SOX: Short distance Oscillations with BoreXino

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

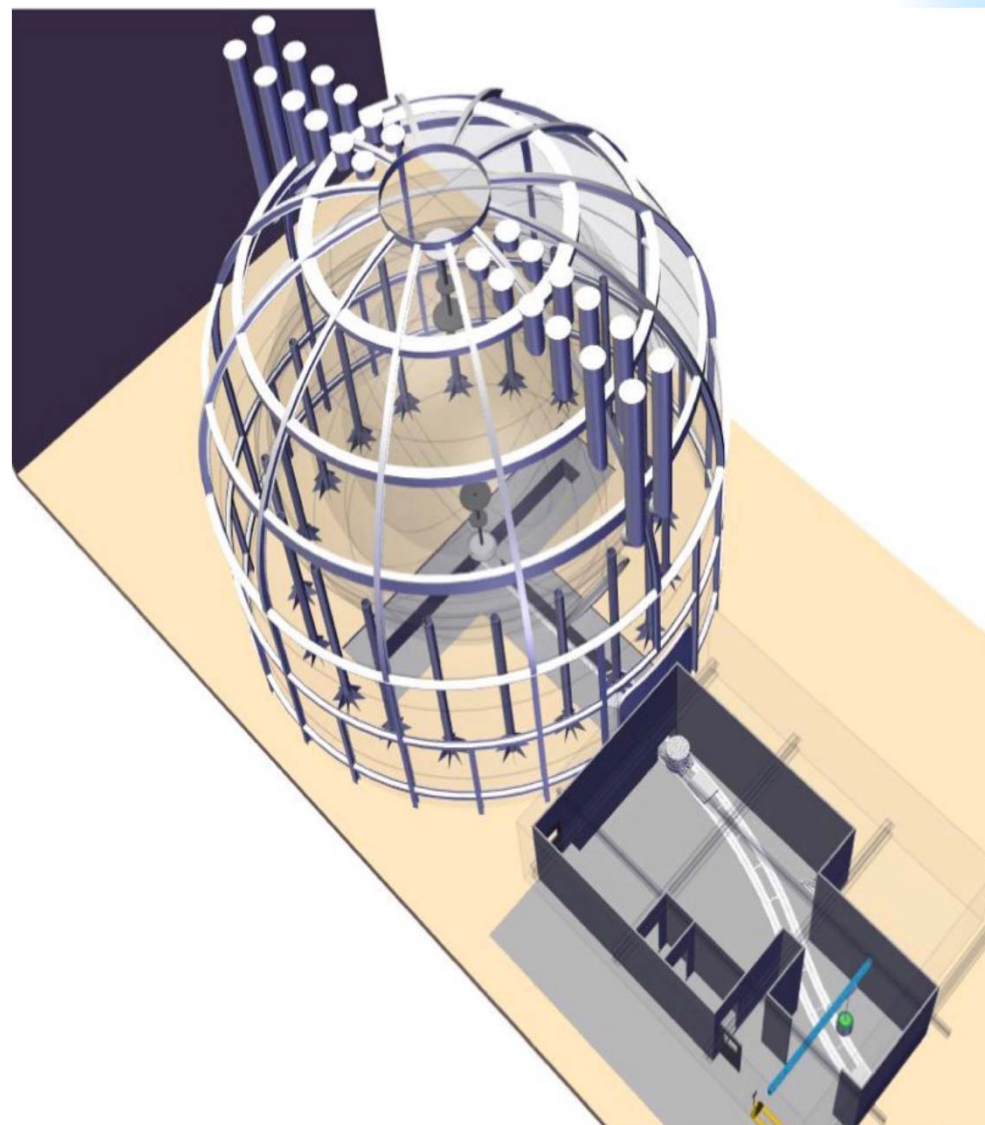


МАЯК vs Oak Ridge.

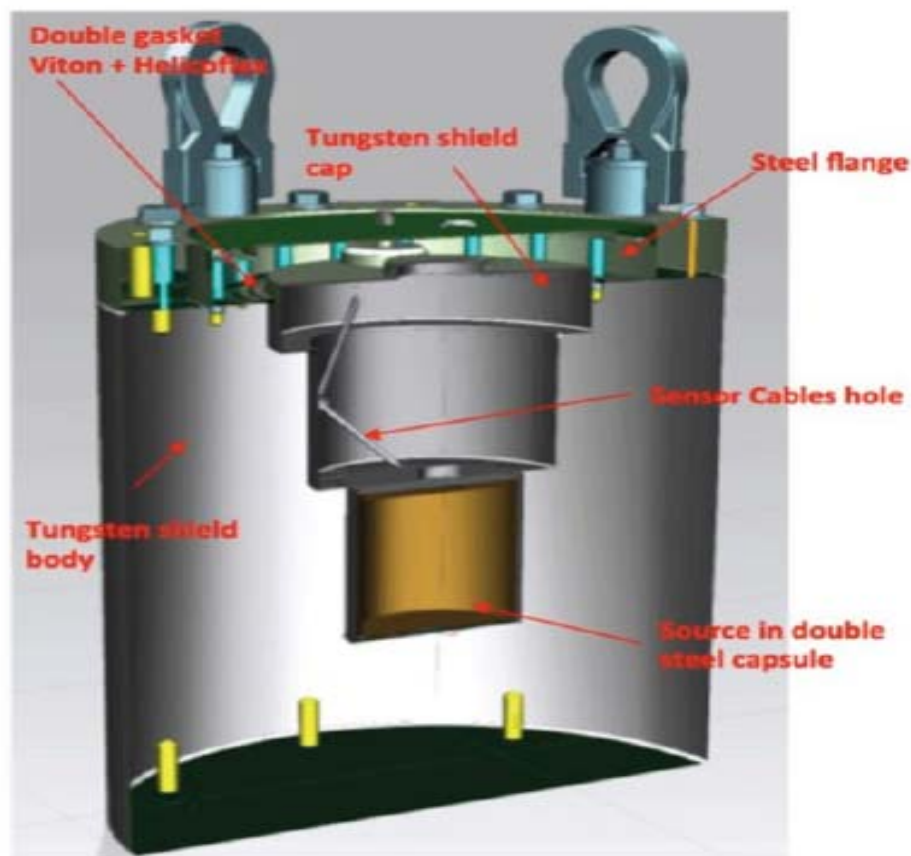
● ⁵¹Cr tunnel beneath detector

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

Транспортная система



Вольфрамовый контейнер



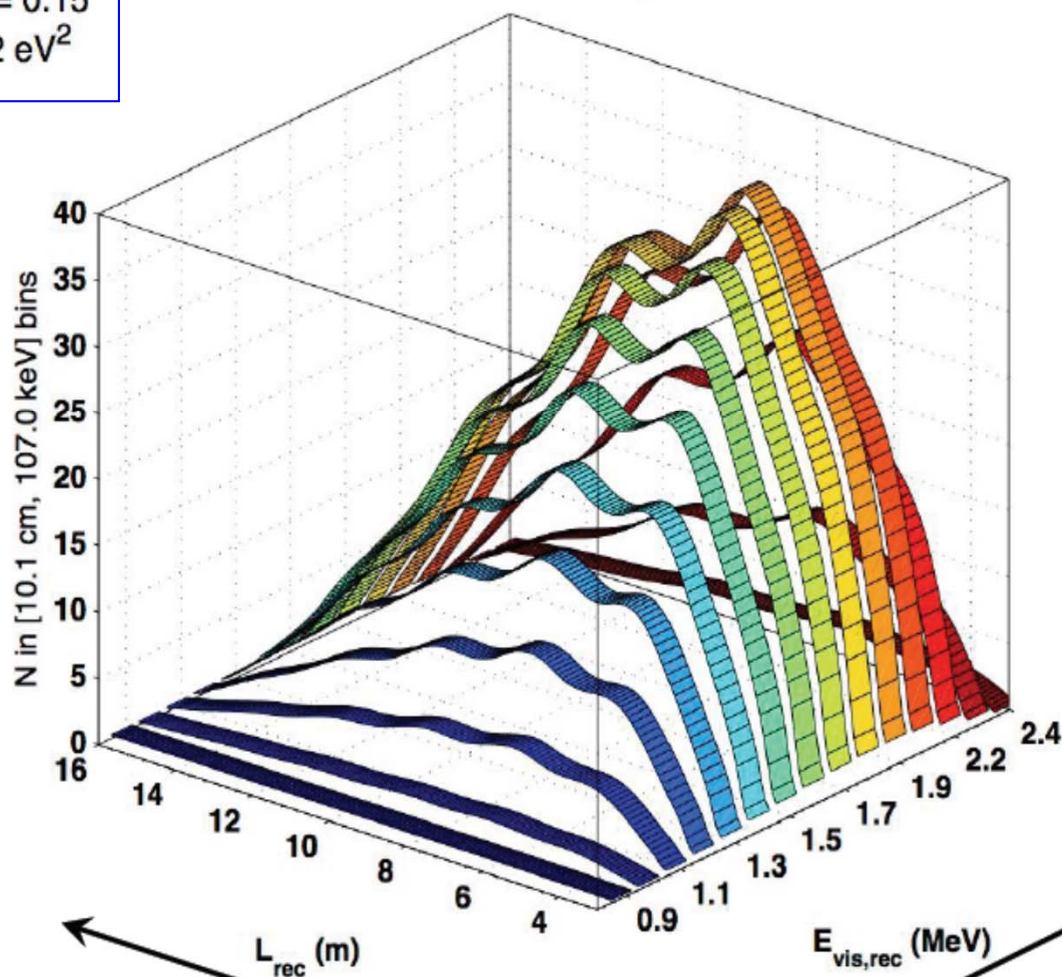
Самая большая вольфрамовая составная защита в мире. Цилиндр высотой **60 см** и диаметром **60 см**. Толщина **19 см**. Масса **2.3 тонны**. Размеры определяются линией 144 Pr с энергией 2.185 кэВ (BR = 0.7%), которую нужно подавить в 10^{12} раз и размерами яма (1 м) под Борексино. Будет произведено в Китае. Температура внутри **500°C**, на поверхности **80°C**.

Скорость счета в зависимости от R и E

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

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

Reconstructed 2D spectrum



100 кКи ¹⁴⁴Ce

8.5 м от центра.

1.5 года измерений.

10⁴ событий.

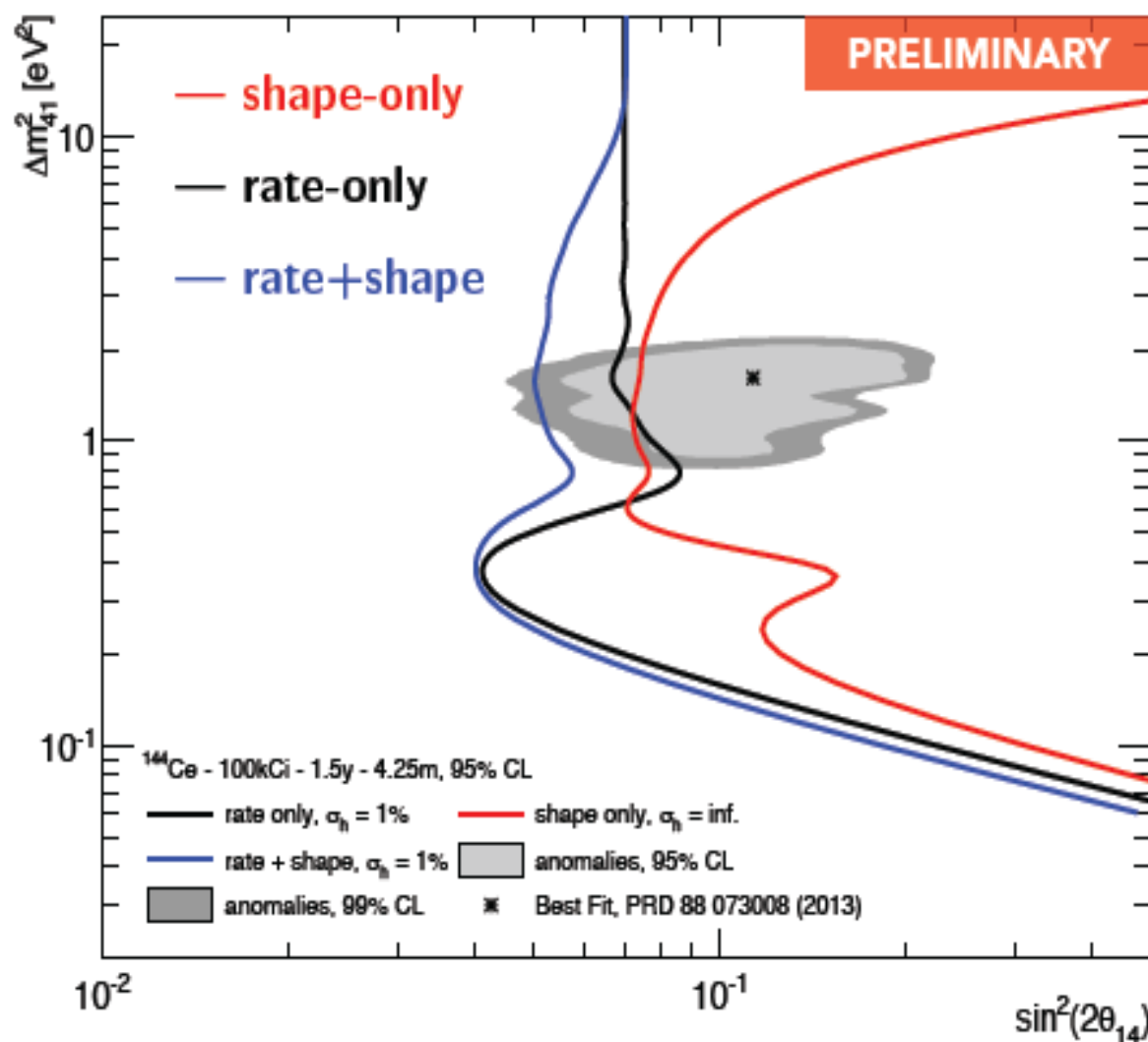
σ_E = 5% (1 МэВ).

σ_R = 15 см (1 МэВ)

Фон = 0

Рабочая группа
Вх_SOX. МК-
симуляции.
Калибровки.

Чувствительность SOX_Ce к стерильному нейтрину



Измерение формы (R, Ev)

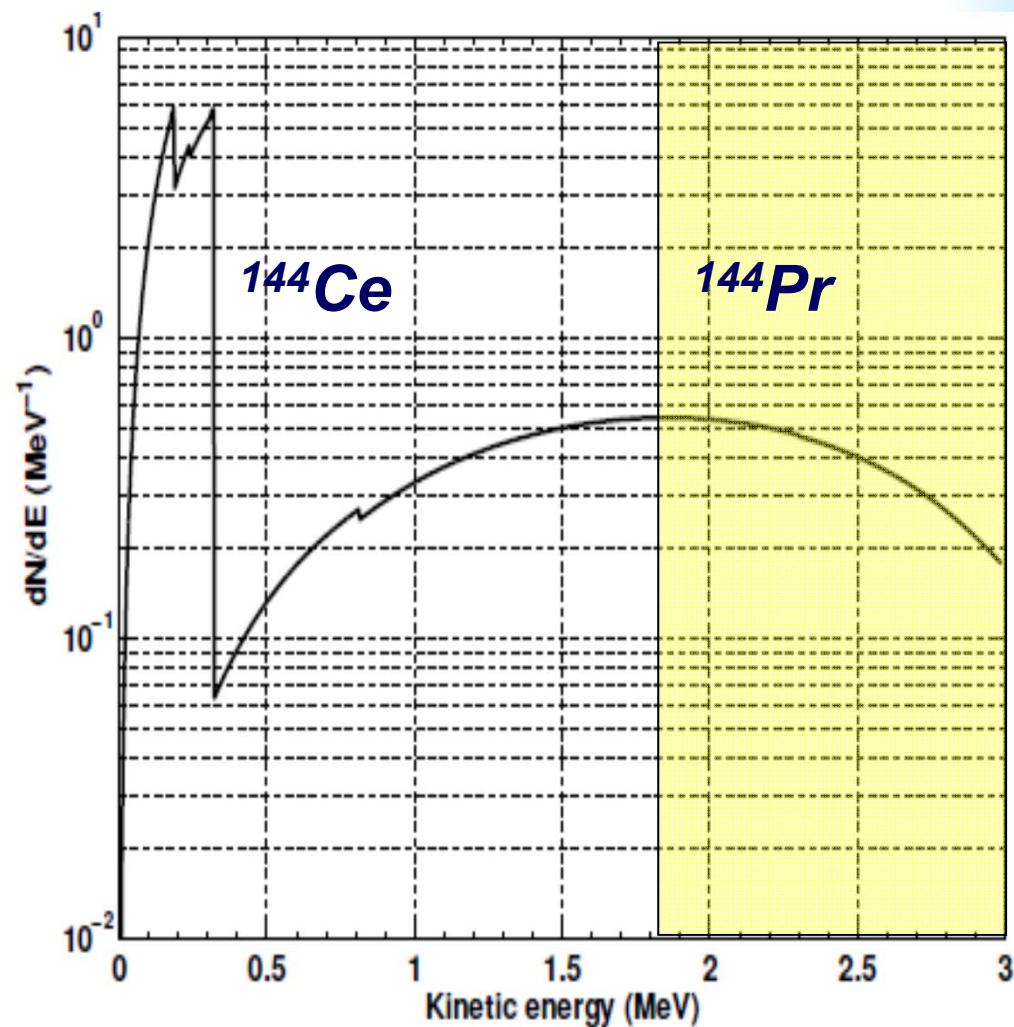
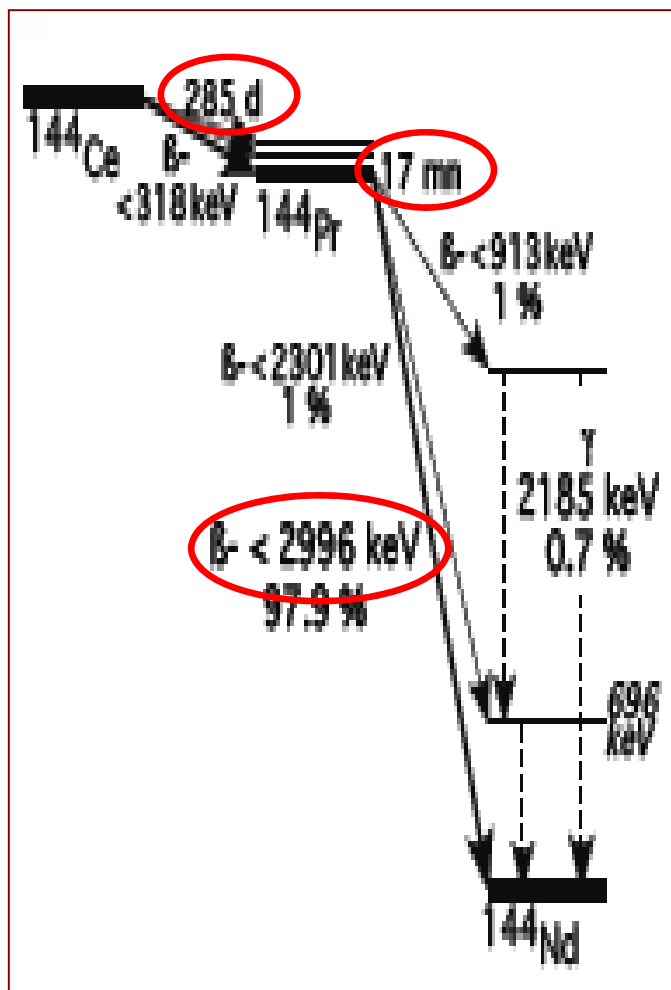
1. Smoking-gun
2. Чувствительны к $\delta m^2 \approx 0.5 - 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимо хорошее энергетическое и пространственное разрешение
4. Чувствительность определяется статистикой

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

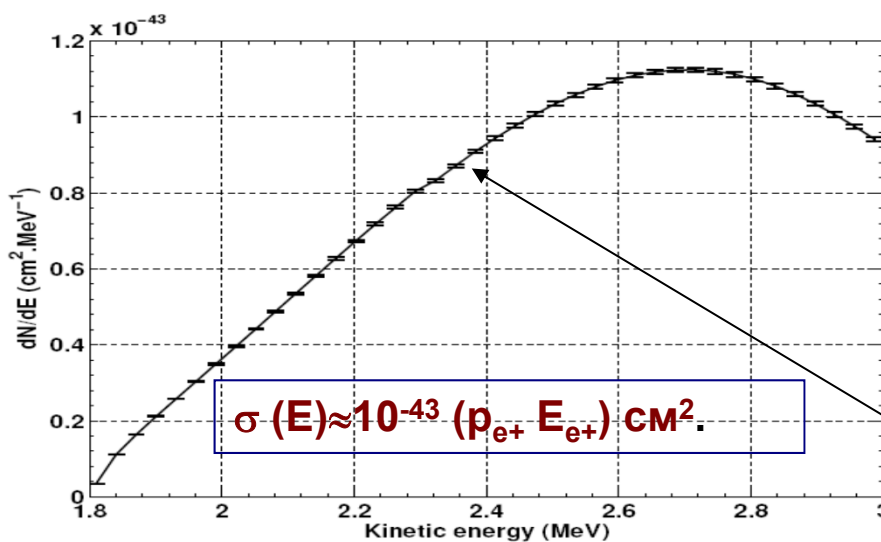
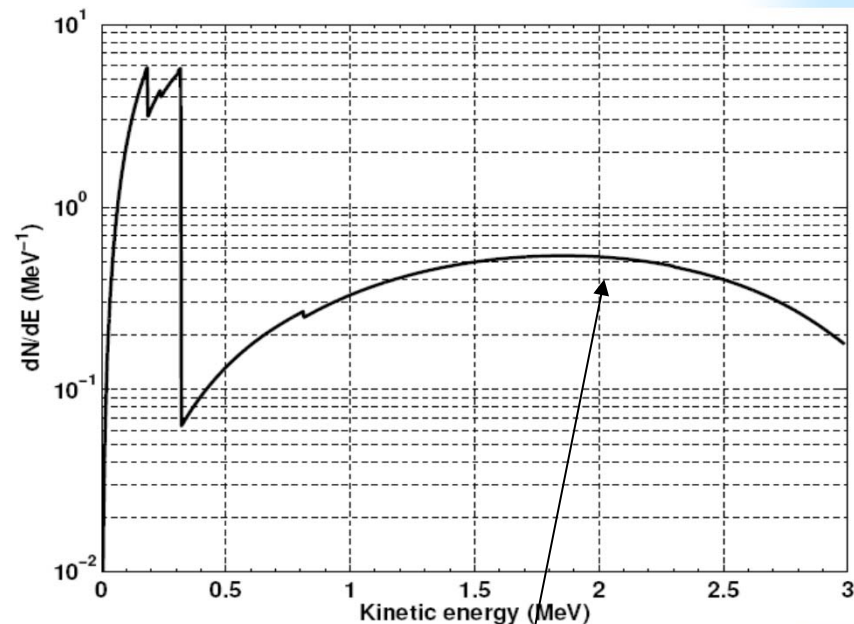
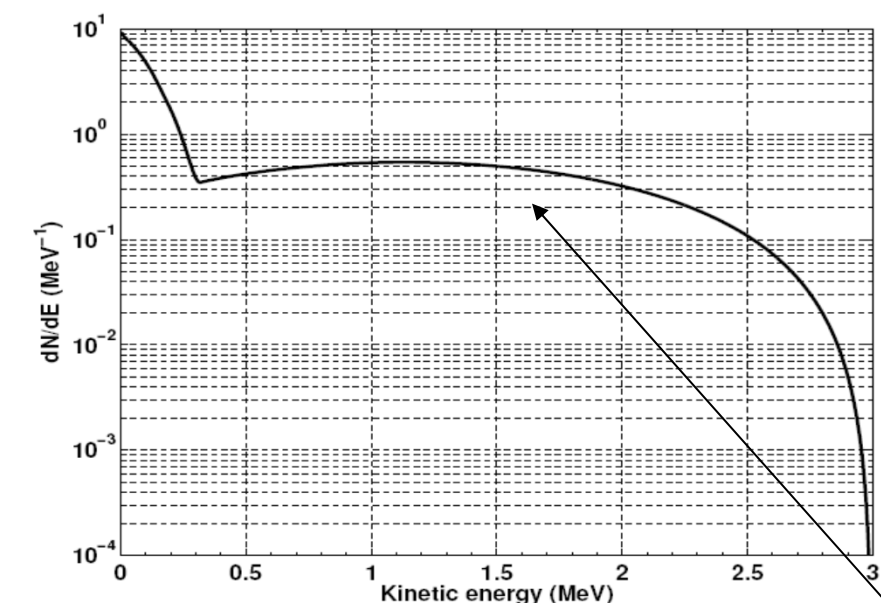
100 кКи на 8.5 м от центра 1.5 года измерений

144Ce-144Pr: спектр антинейтрино



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

Бета-спектры, спектр нейтрино Φ_ν и $\Phi_\nu \times \sigma$ (сечение)

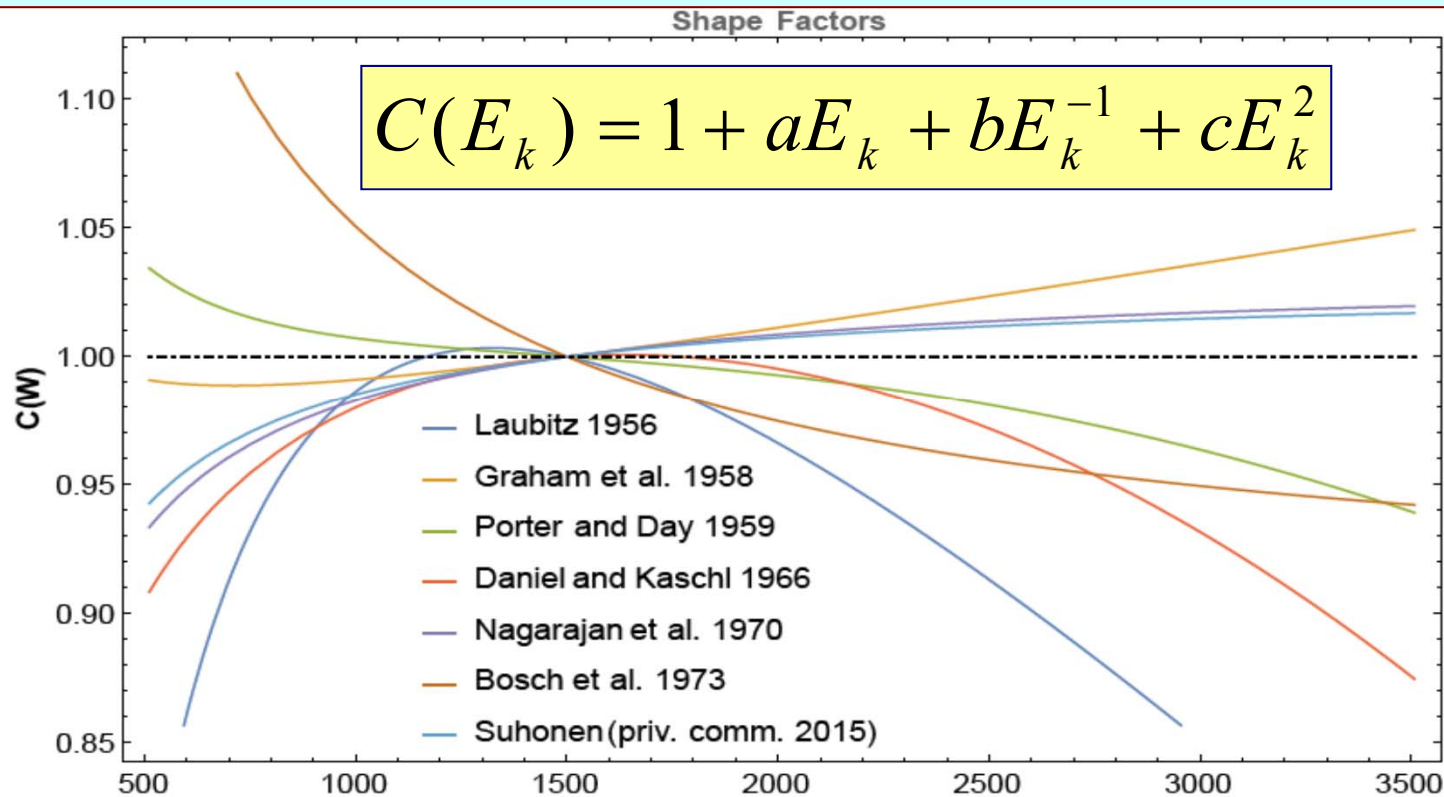


Бета-спектры,
спектр нейтрино Φ_ν
и произведение
 $\Phi_\nu \times \sigma$ (сечение)

нужно
определить
1) $\langle E \rangle$
2) CR
3) Примеси
(α - β - γ)

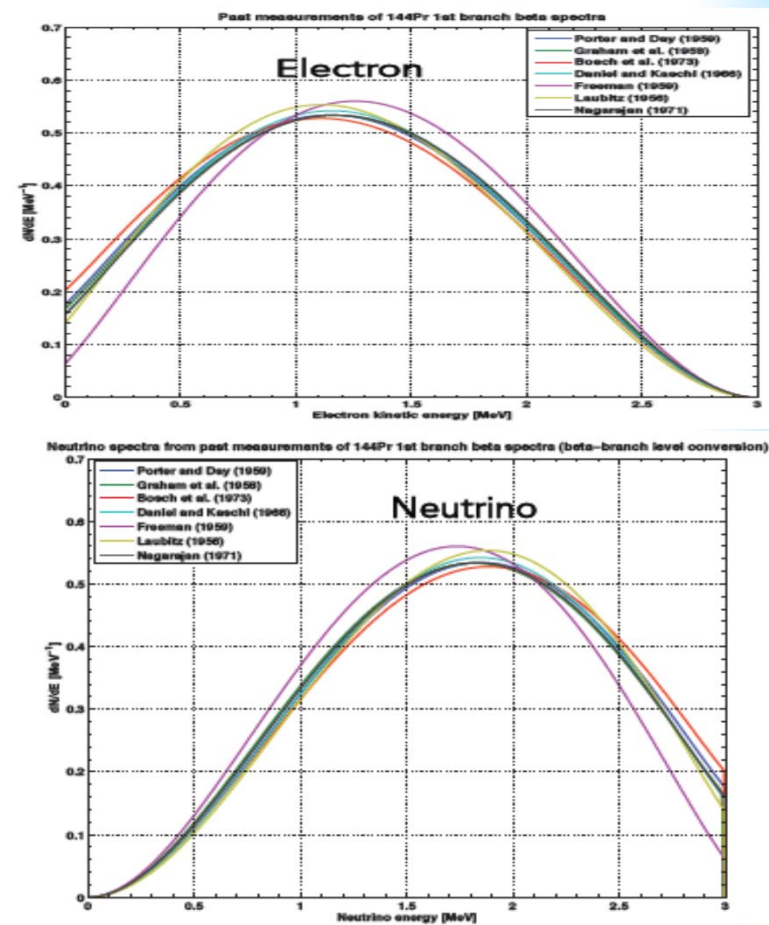
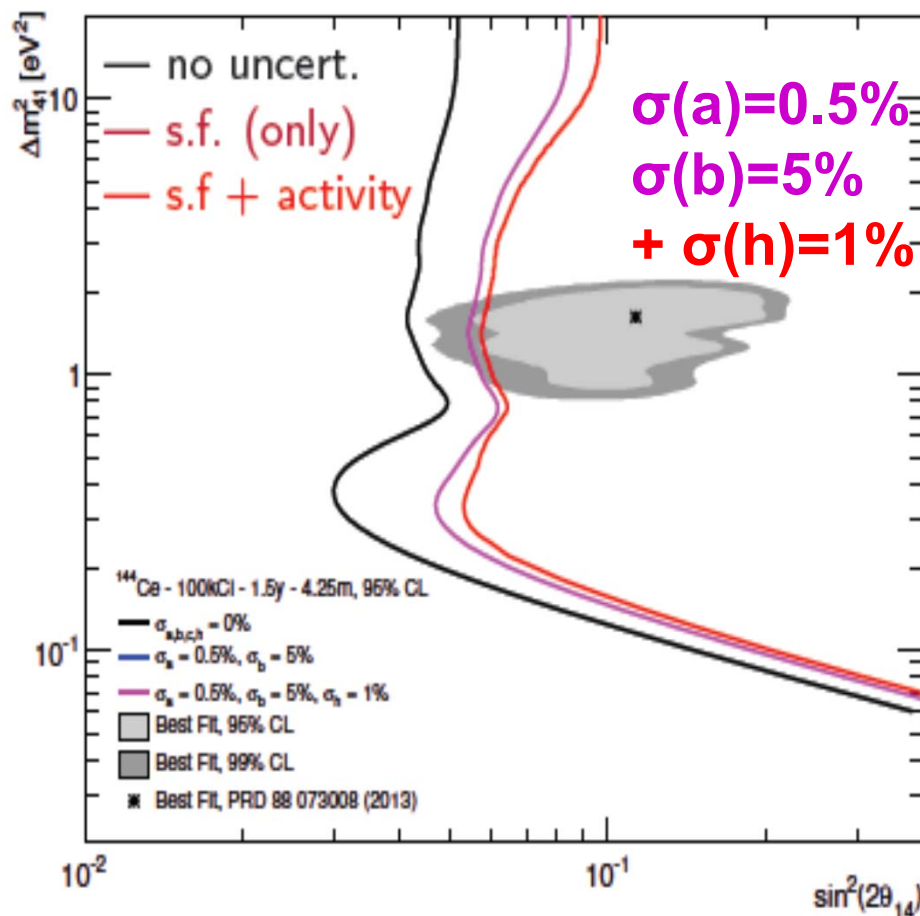
Измерение β -спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr

$$S(E_e, E_0, m_\nu) \propto P_e E_e (E_0 - E_e)^2 F(E_e, Z) C(E_k)$$



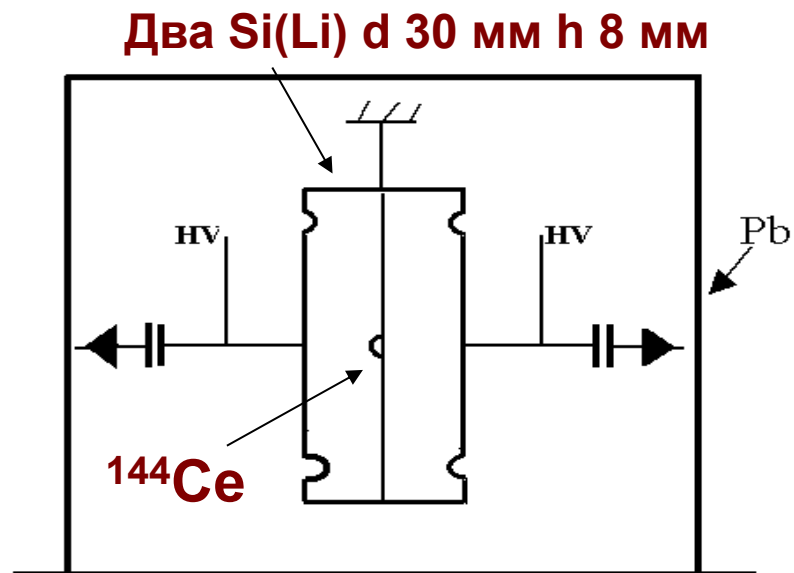
$C(E_k)$ – зависит от конкретного перехода. Shape-фактор для запрещенных переходов ($0 \rightarrow 0$, 1-го порядка, обычно ограничиваются b). Большая неопределенность в измерениях $C(E_k)$. Влияет на среднее $\langle E \rangle$, определение активности и ожидаемой скорости счета. Необходимо точность $\sigma_b = 0.03 m_e$

Спектр нейтрино при распаде ^{144}Pr



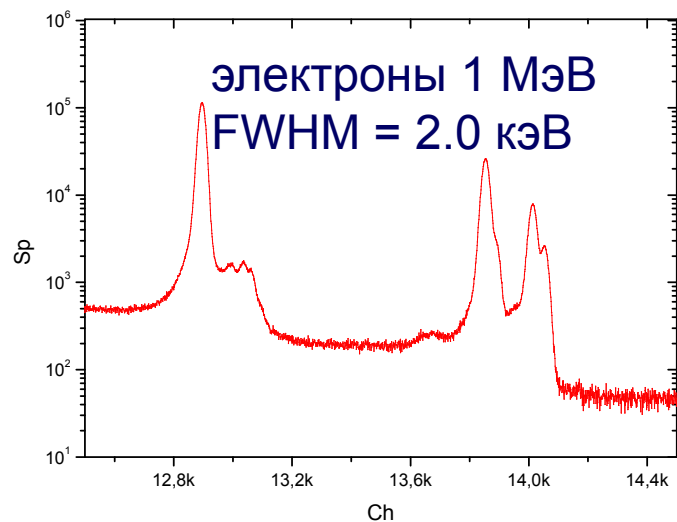
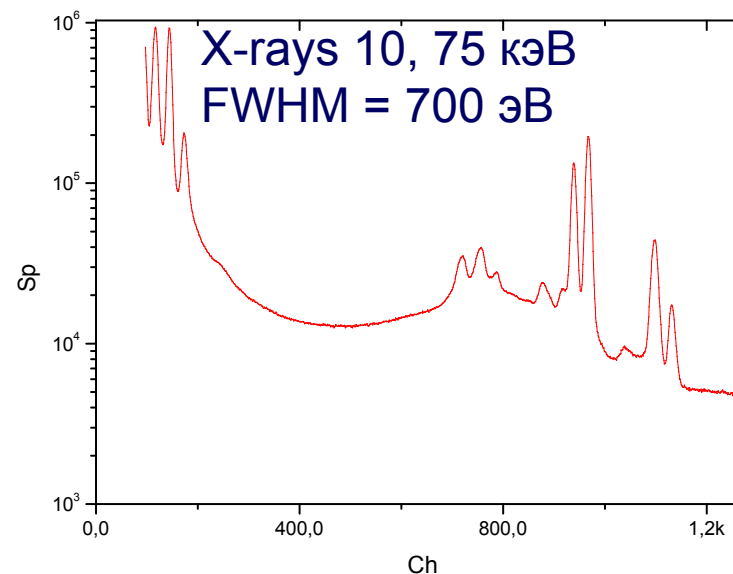
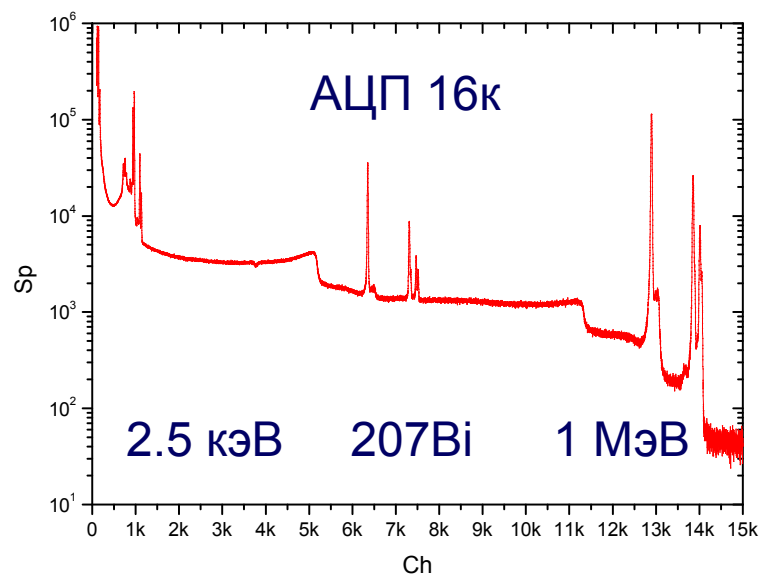
Спектры ^{144}Ce и ^{144}Pr соответствуют неуникальным запрещенным в первом порядке бета-переходам. Форма спектра ^{144}Pr известна с точностью несколько процентов. Необходимы новые измерения бета-спектров ^{144}Pr , чтобы достичь высокой ($<1\%$) точности для коэффициента, связывающего тепловую мощность и активность, и для ожидаемой скорости счета реакции обратного бета распада.

Измерения β -спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr в ПИЯФ



Для измерения энергетического спектра будут использоваться два цилиндрических планарных Si(Li)-детектора. В центре торца одного из детекторов будет вышлифована лунка, глубиной ≈ 0.5 мм и диаметром 3 мм, в которой наносится источник ^{144}Ce - ^{144}Pr . Рабочая область каждого детектора имеет диаметр 30 мм и толщину 9 мм. Детекторы плотно соединяются друг с другом торцевыми плоскостями, устанавливаются в криостат и охлаждаются до температуры жидкого азота. Криостат будет окружен небольшим слоем пассивной защиты из свинца (25 мм) от внешней радиоактивности. Напротив криостата с Si(Li)-детекторами располагается HPGe-детектор диаметром 60 мм и длиной 60 мм, включенный в схему совпадений с Si(Li)-детекторами. Это позволит изучить схему распада и учесть тормозное излучение.

Измерение бета-спектра ^{144}Pr в ПИЯФ



Измерение квантинг фактора для электронов в ЖС

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 821 (2016) 13–16



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in
Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



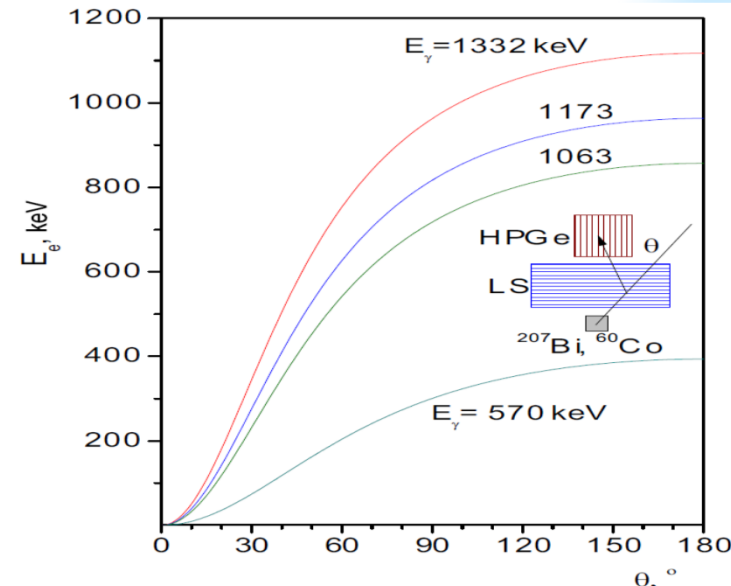
A measurement method of a detector response function for monochromatic electrons based on the Compton scattering

S.V. Bakhlanov^a, N.V. Bazlov^b, A.V. Derbin^{a,*}, I.S. Drachnev^{a,c}, A.S. Kayunov^a,
V.N. Muratova^a, D.A. Semenov^a, E.V. Unzhakov^a

^a St. Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina 188300, Russia

^b Saint-Petersburg State University, Universitetskaja nab. 7/9, Saint-Petersburg 199034, Russia

^c GranSasso Science Institute, INFN, L'Aquila (AQ) I-67100, Italy



ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2016, № 3, с. 13–16

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.07

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ОСНОВАННЫЙ НА КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЯНИИ

© 2016 г. С. В. Бахланов*, А. В. Дербин*, И. С. Драчнев*, **, А. С. Каюнов*,
В. Н. Муратова*, Д. А. Семенов*, Е. В. Унжаков*

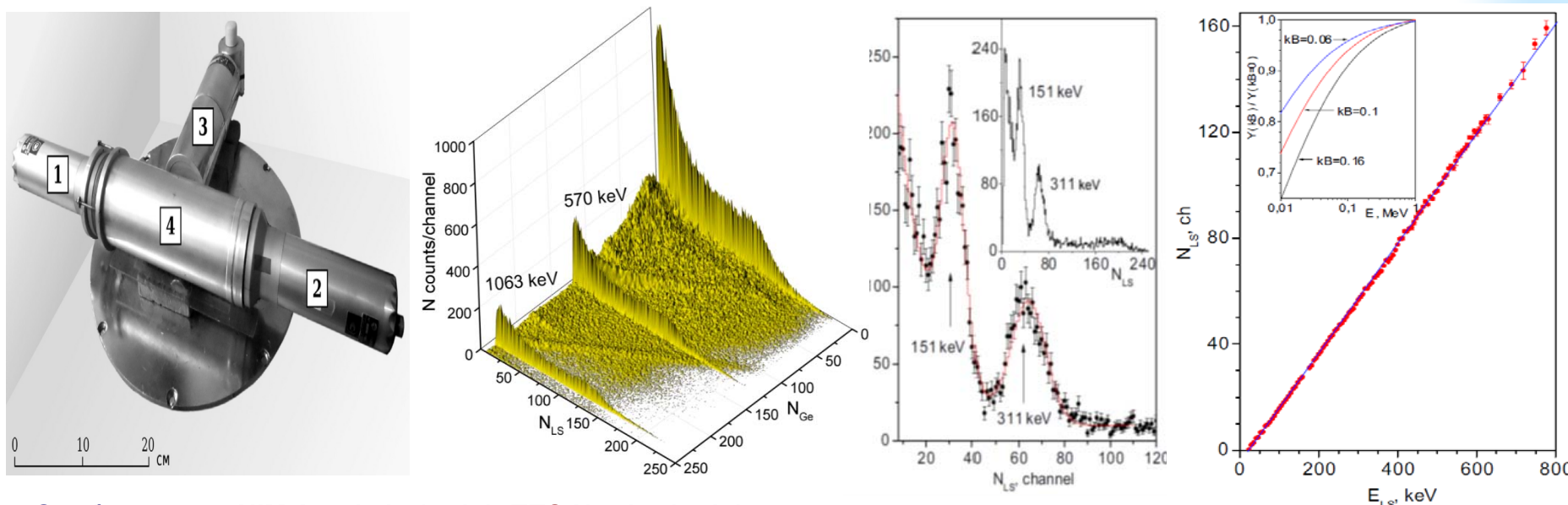
*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
Россия, 188300, Гатчина, Санкт-Петербург, Орлова роща

**Gran Sasso Science Institute, INFN, L'Aquila (AQ) I-67100, Italy

E-mail: derbin@pnpi.spb.ru

Новый метод измерения функции отклика детектора для монохроматических электронов, основанный на комптоновском рассеянии.

Предложен и реализован **метод калибровки** энергетической шкалы сцинтилляционного детектора с помощью гамма-квантов. Методика основана на комптоновском рассеянии в сцинтилляционном детекторе и последующем фотоэлектрическом поглощении рассеянного кванта в Ge-детекторе. **Новизна метода** состоит в том, что **источник гамма-квантов, сцинтилляционный и Ge детекторы располагаются вплотную друг к другу**. Способ является эффективным для детекторов из материала с малым атомным номером, для которых отношение сечений комптоновского рассеяния и фотоэффекта велико, а пробег гамма квантов сравним с размерами детектора. Методика может использоваться для **прецизионного изучения зависимости световыхода в сцинтилляторе от энергии электрона**.



Опубликовано **NIM A 821, 13 (2016), ПТЭ N3, 13, (2016)**

Слева – экспериментальная установка: 1, 2 – два ФЭУ, 3 – HPGe-детектор, 4 – ЖС-детектор. **В центре** – трехмерный спектр, измеренный с источником ^{207}Bi . **Справа** – зависимость световыхода сцинтиллятора от энергии комптоновского электрона..

Планы коллаборации Борексино и новые задачи

1. Измерение (обнаружение)

CNO- нейтрино

2. Магнитный момент

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

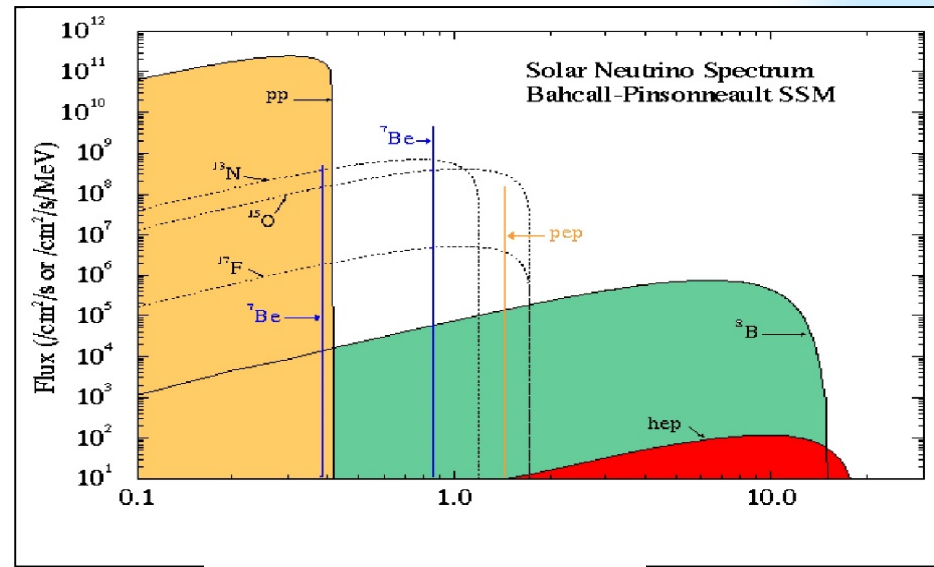
3. Стерильные нейтрино

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

4. Новые данные по pp -, ^7Be -, ^8B -, pep -нейтрино, анти-нейтрино, редким процессам.

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

6. Поиск двойного бета-распада с Борексино (^{130}Xe , ^{150}Nd)



Поиск частиц темной материи в 2016

1. Поиск рассеяния WIMPs (N1) на ядрах Ar в эксперимент DARKSIDE (доклад Е.Унжакова)

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. Новые кристаллы из

2.2 Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром ^{83}Kr в БНО ИЯИ. Измерения с криптоном, обогащенным изотопом ^{83}Kr .

2.3 Участие в коллаборации **IAXO** – International Axion Observatory

DarkSide collaboration

Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search

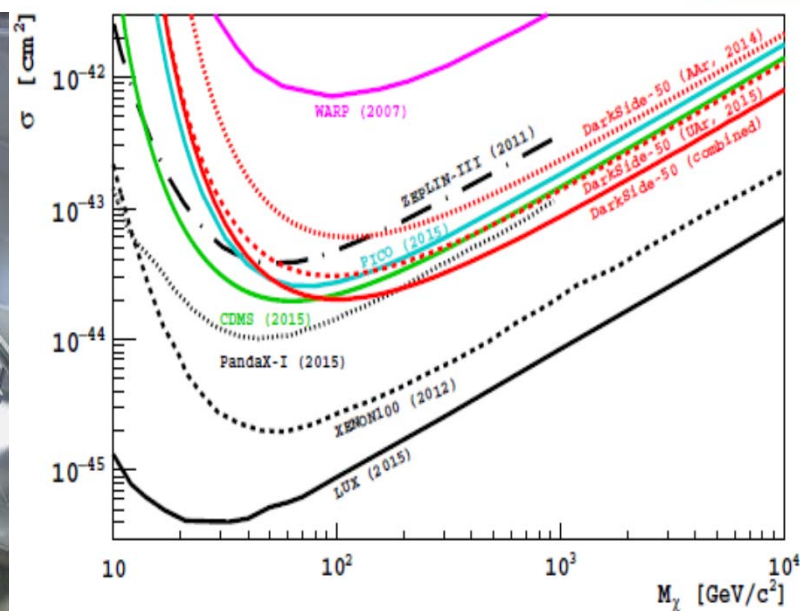
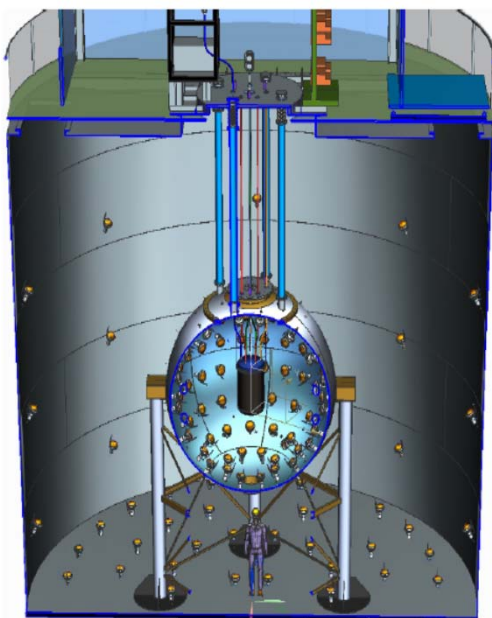
P. Agnes,¹ L. Agostino,² I. F. M. Albuquerque,^{3,4} T. Alexander,^{5,6} A. K. Alton,⁷ K. Arisaka,⁸ H. O. Back,^{3,9} B. Baldin,⁶ K. Biery,⁶ G. Bonfini,¹⁰ M. Bossa,^{11,10} B. Bottino,^{12,13} A. Brigatti,¹⁴ J. Brodsky,³ F. Budano,^{15,16} S. Bussino,^{15,16} M. Cadeddu,^{17,18} L. Cadonati,⁵ M. Cadoni,^{17,18} F. Calaprice,³ N. Canci,^{19,10} A. Candela,¹⁰ H. Cao,³ M. Cariello,¹³ M. Carlini,¹⁰ S. Catalanotti,^{20,21} P. Cavalcante,^{22,10} A. Chepurinov,²³ A. G. Cocco,²¹ G. Covone,^{20,21} L. Crippa,^{24,14} D. D'Angelo,^{24,14} M. D'Incecco,¹⁰ S. Davini,^{11,10} S. De Cecco,² M. De Deo,¹⁰ M. De Vincenzi,^{15,16} **A. Derbin,²⁵** A. Devoto,^{17,18} F. Di Eusanio,³ G. Di Pietro,^{10,14} E. Edkins,²⁶ A. Empl,¹⁹ A. Fan,⁸ G. Fiorillo,^{20,21} K. Fomenko,²⁷ G. Forster,^{5,6} D. Franco,¹ F. Gabriele,¹⁰ C. Galbiati,^{3,14} C. Giganti,² A. M. Goretti,¹⁰ F. Granato,^{20,28} L. Grandi,²⁹ M. Gromov,²³ M. Guan,³⁰ Y. Guardincerri,^{6,29} B. R. Hackett,²⁶ K. Herner,⁶ E. V. Hungerford,¹⁹ Al. Ianni,^{31,10} An. Ianni,^{3,10} I. James,^{15,16} C. Jollet,³² K. Keeter,³³ C. L. Kendziora,⁶ V. Kobychiev,³⁴ G. Koh,³ D. Korablev,²⁷ G. Korga,^{19,10} A. Kubankin,³⁵ X. Li,³ M. Lissia,¹⁸ P. Lombardi,¹⁴ S. Luitz,³⁶ Y. Ma,³⁰ I. N. Machulin,^{37,38} A. Mandarano,^{11,10} S. M. Mari,^{15,16} J. Maricic,²⁶ L. Marini,^{12,13} C. J. Martoff,^{28, a} A. Meregaglia,³² P. D. Meyers,³ T. Miletic,²⁸ R. Milincic,²⁶ D. Montanari,⁶ A. Monte,⁵ M. Montuschi,¹⁰ M. Monzani,³⁶ P. Mosteiro,³ B. J. Mount,³³ **V. N. Muratova,²⁵** P. Musico,¹³ J. Napolitano,²⁸ A. Nelson,³ S. Odrowski,¹⁰ M. Orsini,¹⁰ F. Ortica,^{39,40} L. Pagani,^{12,13} M. Pallavicini,^{12,13} E. Pantic,^{41, b} S. Parmeggiano,¹⁴ K. Pelczar,⁴² N. Pelliccia,^{39,40} S. Perasso,¹ A. Pocar,^{5,3} S. Pordes,⁶ D. A. Pugachev,^{37,38} H. Qian,³ K. Randle,⁵ G. Ranucci,¹⁴ A. Razeto,^{10,3} B. Reinhold,²⁶ A. L. Renshaw,^{8,19} A. Romani,^{39,40} B. Rossi,^{21,3} N. Rossi,¹⁰ D. Rountree,²² D. Sablone,¹⁰ P. Saggese,¹⁴ R. Saldanha,²⁹ W. Sands,³ S. Sangiorgio,⁴³ C. Savarese,^{11,10} E. Segreto,⁴⁴ **D. A. Semenov,²⁵** E. Shields,³ P. N. Singh,¹⁹ M. D. Skorokhvatov,^{37,38} O. Smirnov,²⁷ A. Sotnikov,²⁷ C. Stanford,³ Y. Suvorov,^{8,10,37} R. Tartaglia,¹⁰ J. Tatarowicz,²⁸ G. Testera,¹³ A. Tonazzo,¹ P. Trinchese,²⁰ **E. V. Unzhakov,²⁵** A. Vishneva,²⁷ B. Vogelaar,²² M. Wada,³ S. Walker,^{20,21} H. Wang,⁸ Y. Wang,^{30,8,45} A. W. Watson,²⁸ S. Westerdale,³ J. Wilhelmi,²⁸ M. M. Wojcik,⁴² X. Xiang,³ J. Xu,³ C. Yang,³⁰ J. Yoo,⁶ S. Zavatarelli,¹³ A. Zec,⁵ W. Zhong,³⁰ C. Zhu,³ and G. Zuzel⁴²

(The DarkSide Collaboration)



Первые результаты поиска темной материи с использованием низкорadioактивного аргона в детекторе DarkSide-50

ПИЯФ участвует в работе коллаборации **DarkSide** с момента образования в 2010 г. **DarkSide** - двухфазный жидко-аргоновый 46 кг детектор. В 2016 году впервые в мире в установке использовался подземный аргон, в котором содержание р/а изотопа ^{39}Ar в 1400 раз меньше, чем в атмосферном аргоне. В результате 71-суточных измерений установлены новые, **наиболее строгие для ядер Ar**, ограничения на спин-независимое сечение взаимодействия и массу массивных слабовзаимодействующих частиц WIMPs.



TPC Ar-камера находится внутри водного танка, который выполняет роль пассивной защиты от естественной радиоактивности и роль мюонного вето.

Верхние пределы на сечения взаимодействия **WIMPs** в зависимости от их массы. Пока достигнутая чувствительность в разы хуже, чем в экспериментах XENON 100 и LUX, использующих в качестве мишени ядра Xe.

ПИАФ аксион в Particle Data Group (2016)

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

VALUE	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
• • • 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, $A^0 \rightarrow e e$
$< 1.2 \times 10^{-6}$	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

VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
• • • 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

ПИАФ аксион в Particle Data Group (2016)

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 $\frac{G_{Aee}^2}{4\pi} ((\sigma_1 \cdot \sigma_2) - 3(\sigma_1 \cdot n)(\sigma_2 \cdot n))/r^3$ where $n = r/r$.

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	$m_{A^0} = 0.3-8 \text{ keV}$

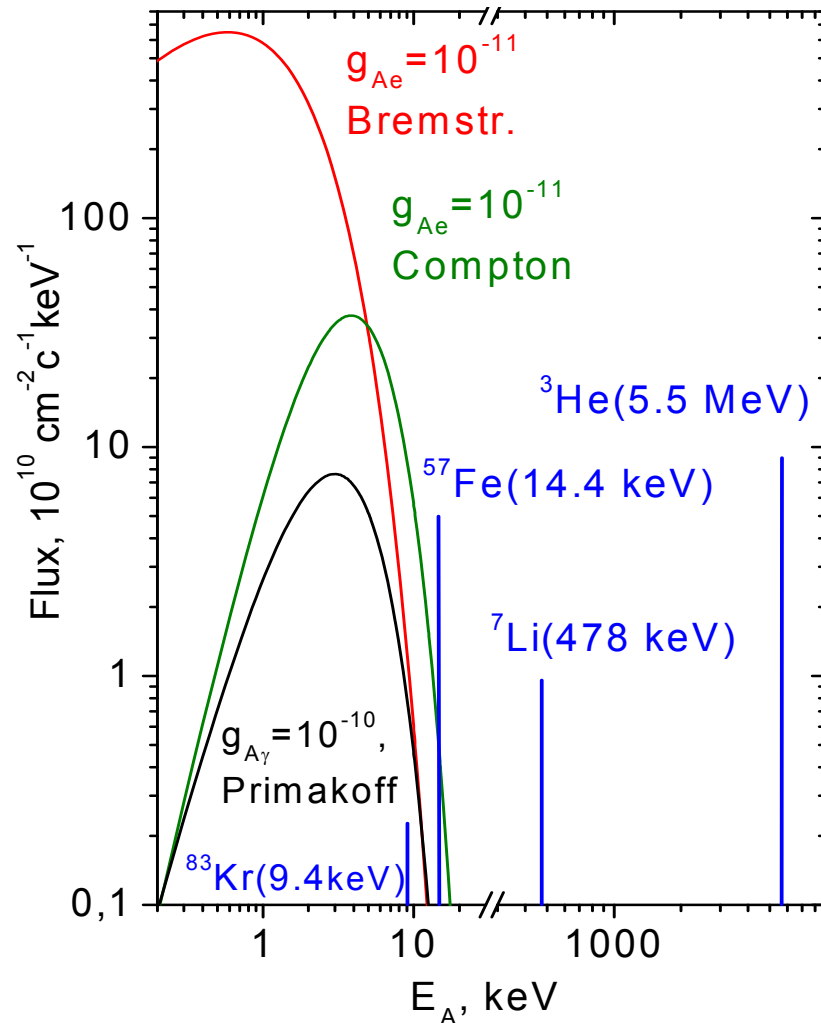
Invisible A^0 (Axion) Limits from Nucleon Coupling

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 BELL	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 ^7Li and ^3He 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 ^7Li -, ^{57}Fe -, ^{169}Tm - and ^{83}Kr -nuclei.



Classification of experiments

Detection

Creation

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

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

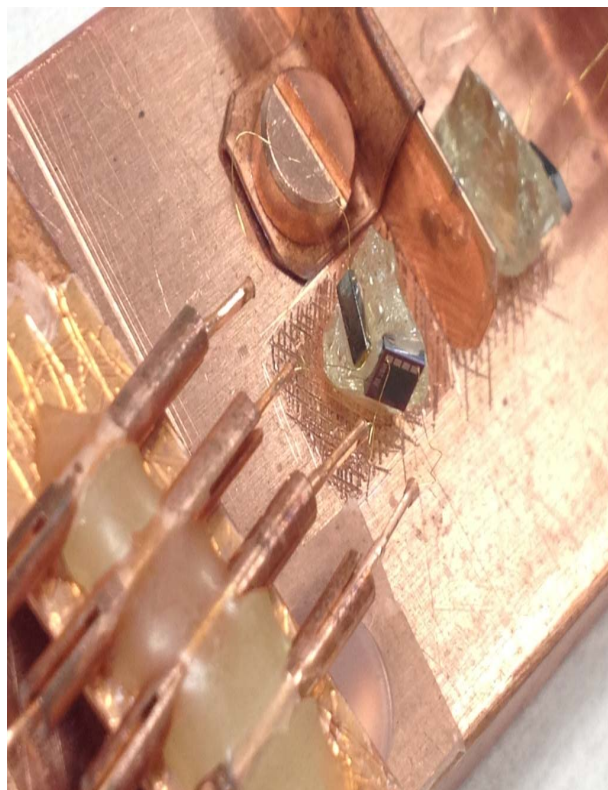
The cross section of the resonant absorption of the axions is given by an expression similar to the one for the γ -ray absorption and corrected by the ω_A/ω_γ ratio

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

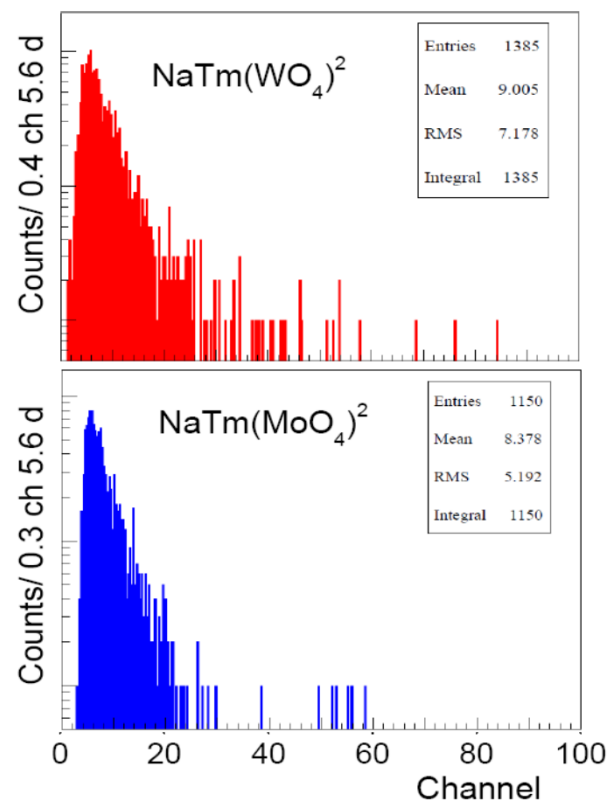
where $\sigma_{0\gamma}$ is the maximum cross section of the γ -ray resonant absorption and $\Gamma = 1/\tau$. The experimentally obtained value of $\sigma_{0\gamma}$ for the ^{57}Fe nucleus is equal to **$2.56 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$** . Due to huge c.s.

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

Тм-содержащие кристаллы как болометры



*Кристаллы внутри
криогенной установки*



*Спектры фоновых
сигналов за 135 ч.*

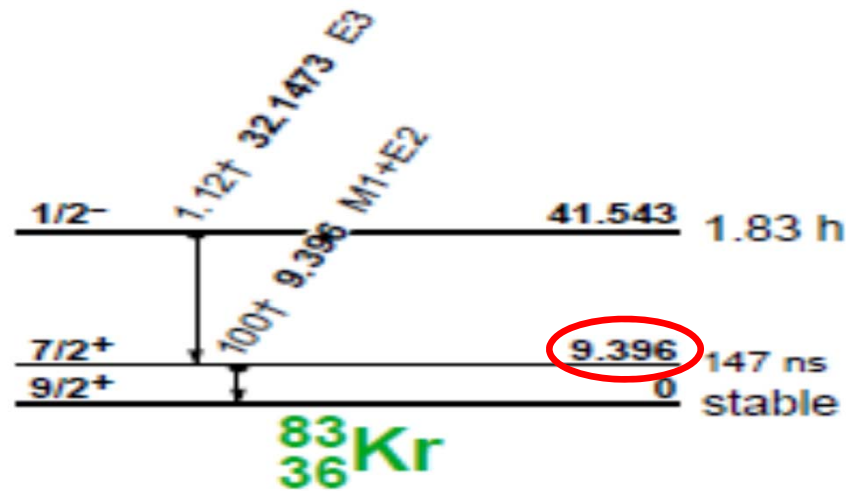


$\text{NaTm(MoO}_4)_2$ и $\text{NaTm(WO}_4)_2$

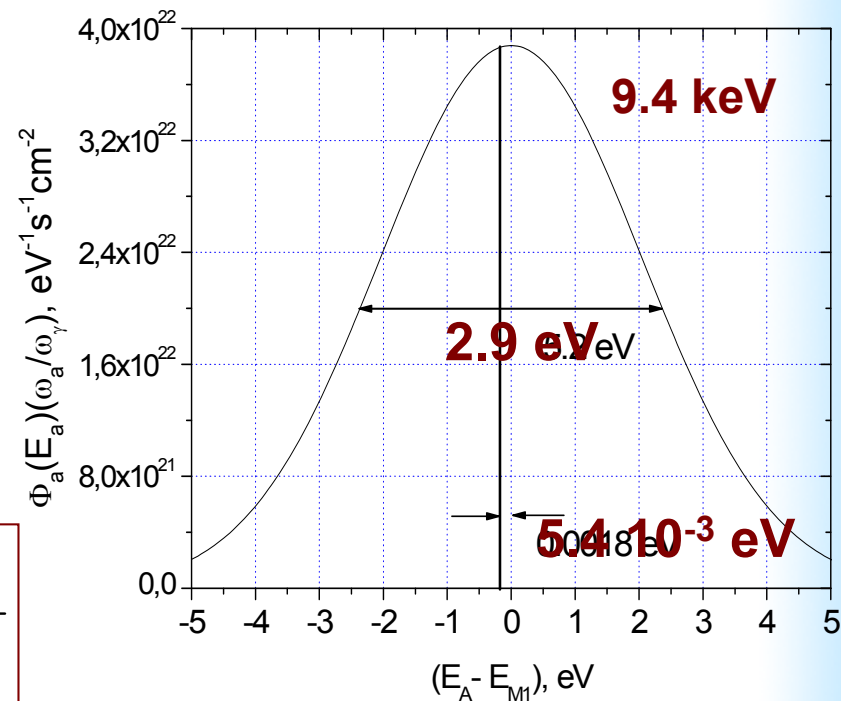
*Кристаллы внутри
криогенной установки*

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 фоновых сигналов с 2-х детекторов.

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



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

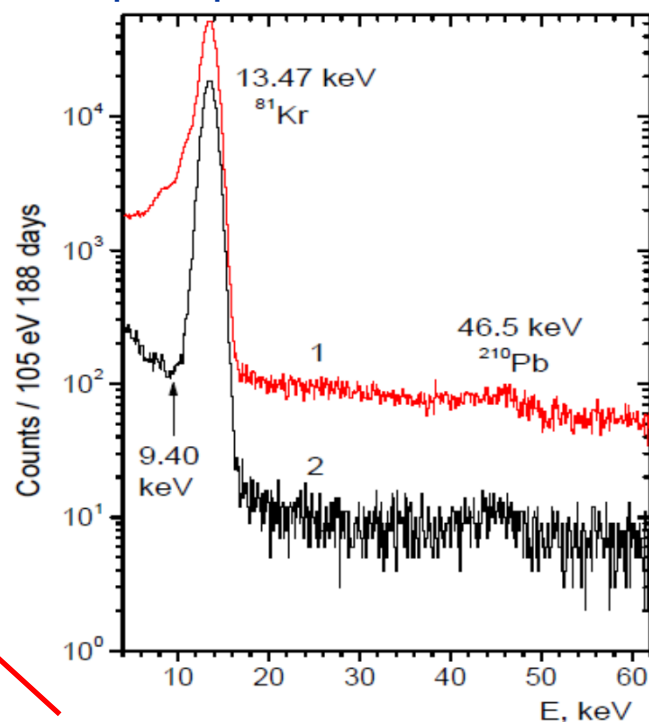


The flux of solar axions is attributed to the M1 transition in ^{83}Kr nuclei whose level scheme is shown in Figure. The energy of the first excited nuclear level is equal to 9.4 keV, and the electron conversion coefficient is equal to $\alpha = 17.1$. Owing to the Doppler broadening, the axion spectrum 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 $T = 300 \text{ K}$ of the target nuclei (5.4 meV), and the own width of the level $\Gamma = 3.0 \times 10^{-9} \text{ eV}$. 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)

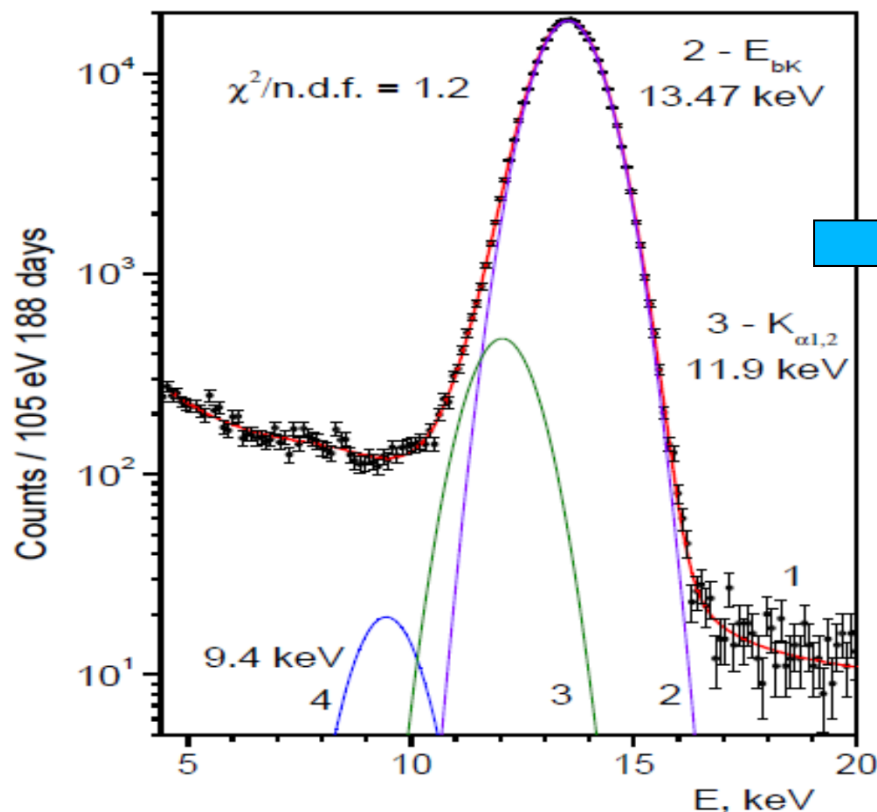
Проведен поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения: $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma$ (9.4 кэВ). Для регистрации γ -квантов и электронов, возникающих в результате разрядки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



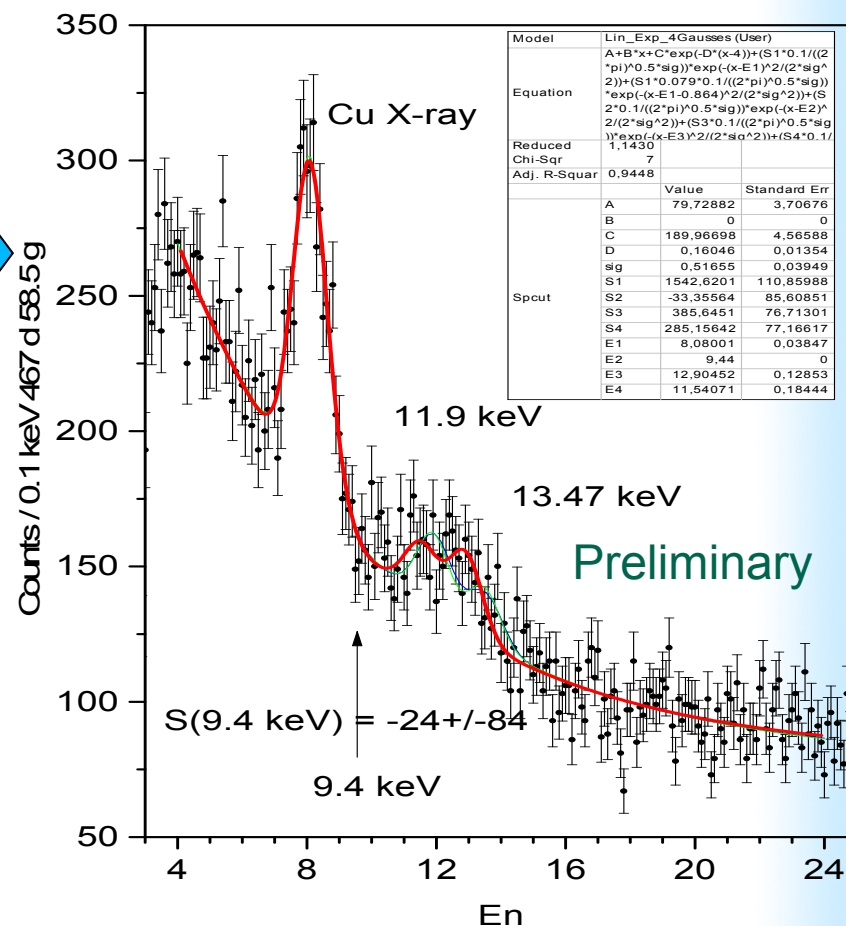
Слева – две пропорциональные Kr-камеры с первым слоем пассивной защиты. **В центре** – спектр Kr-камеры, измеренный за 188 сут. **Справа** – гора Андырчи, под которой расположена **БНО ИЯИ** на глубине 4800 м.в.э..

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

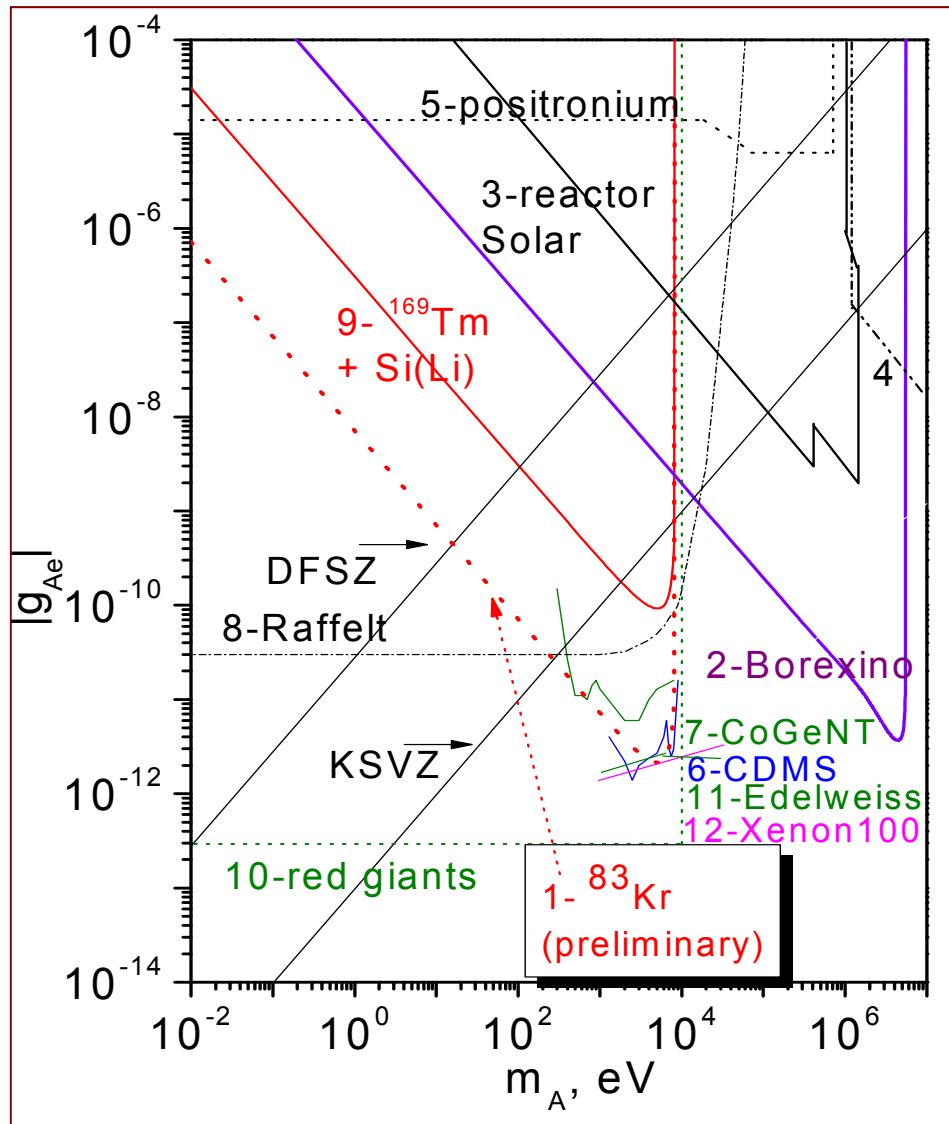
В результате установлено новое ограничение на изоскалярную и изовекторную константы связи аксиона с нуклонами $|g_{\text{AN}}^3 - g_{\text{AN}}^0| \leq 1.29 \times 10^{-6}$, которое в модели адронного аксиона приводит к **новому** верхнему пределу на массу аксиона $m_A \leq 100$ эВ (95% у.д.). Предыдущий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



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



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



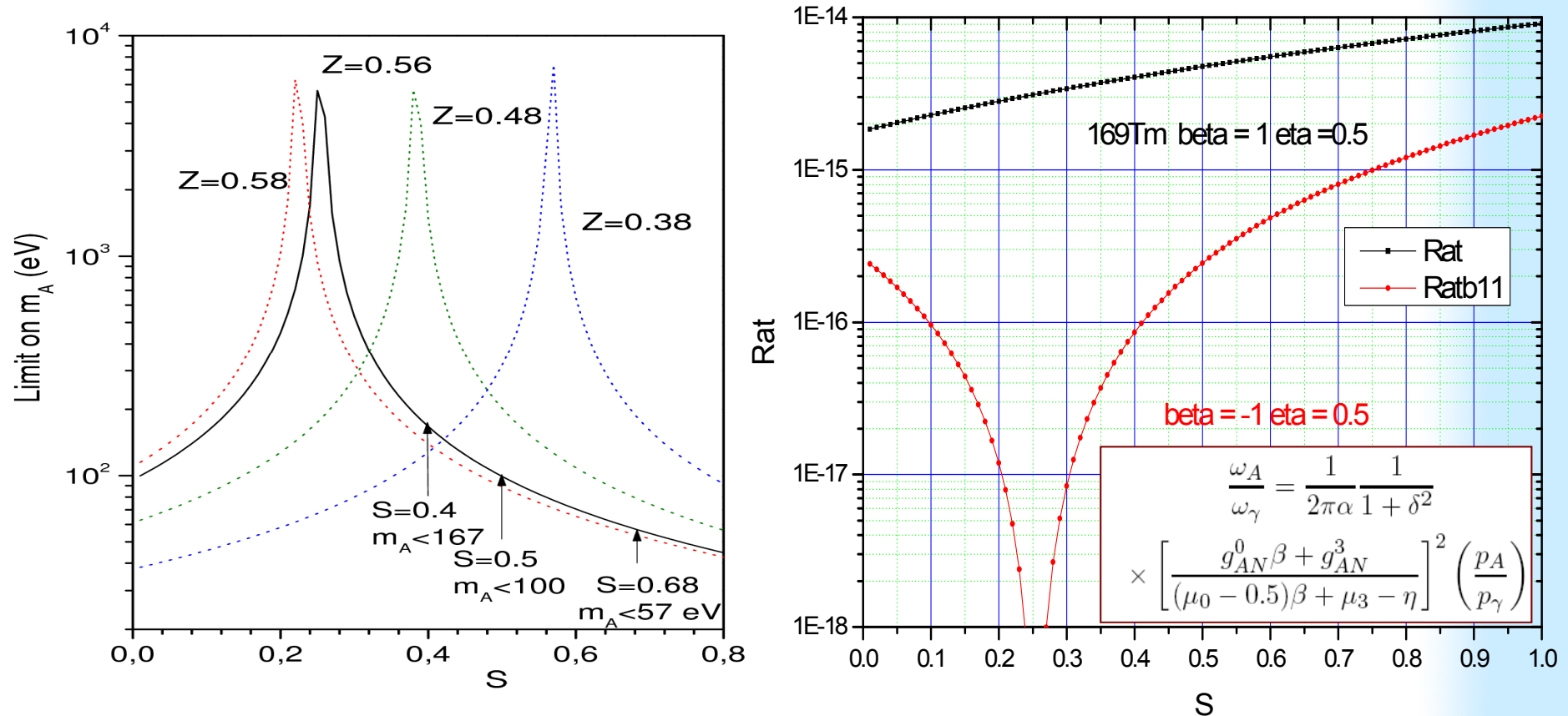
A search for resonant absorption of the solar axion by ^{83}Kr nuclei was performed using the proportional counter installed inside the low-background setup at the Baksan Neutrino Observatory. **The** obtained model independent upper limit on axion-nucleon couplings allowed us to set the new upper limit 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

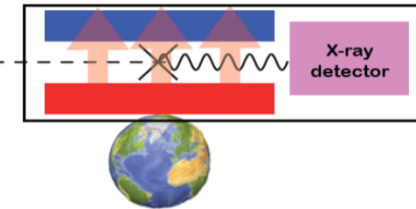
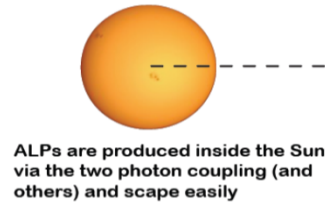


A negative value of the parameter β , together with broad intervals of possible values of S and z , leads to a large uncertainty in the expected probability for axion emission in the 9.4-keV M1 transition in the ^{83}Kr nucleus, and this is a serious flaw in the present searches for such axions. The 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 .



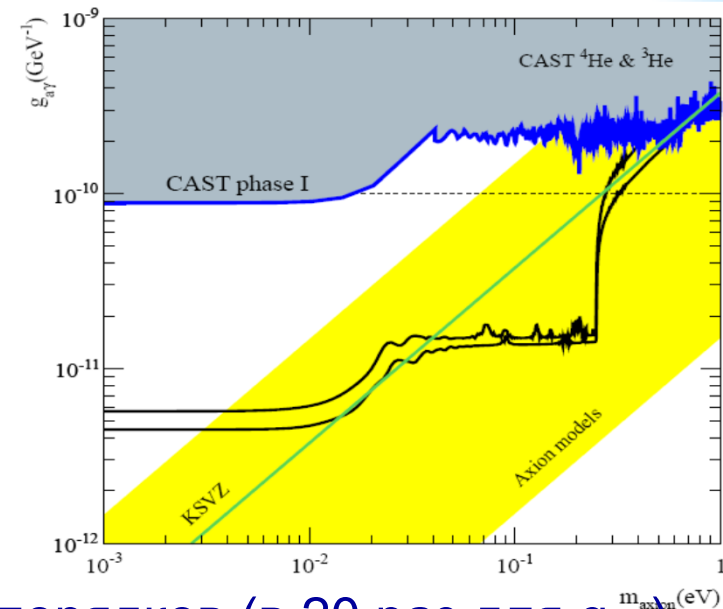
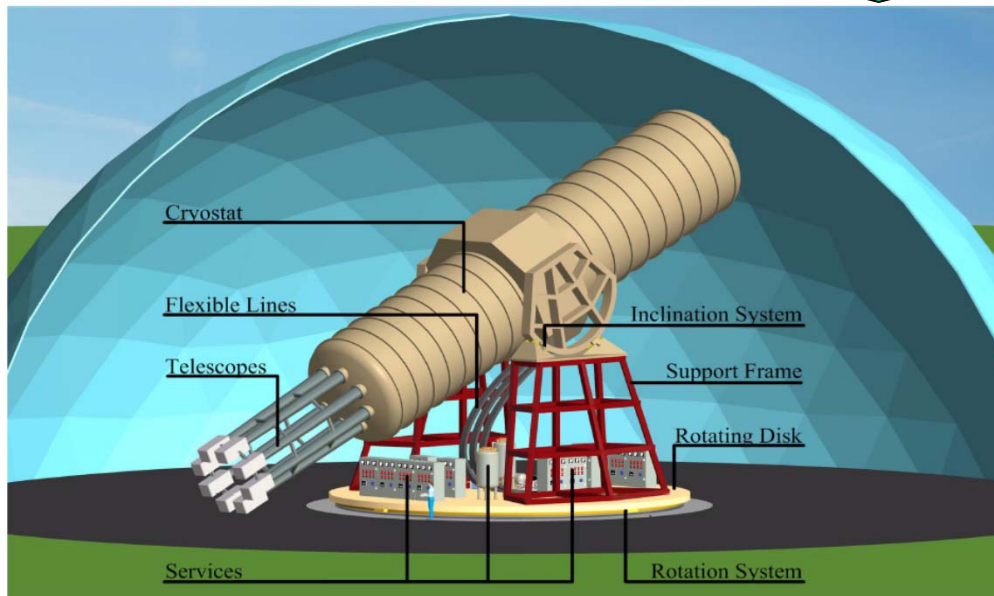
IAXO: International Axion Observatory

CERN Axion Solar Telescope



← **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, g_{Ae}



IA XO: 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 (IA XO)

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. Geralis^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. Jacobsen^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^{fn}, G. Raffelt^{ac}, J. Redondo^{ae}, 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

2016 –
40 институтов

ИЯИ

ПИЯФ

Слово *axion* в названии статей, выложенных в arXiv в 2016 году, встречается всего в 6 (648/113) раз реже чем слово *neutrino*.

Основные результаты работы в 2016 г.

1. Коллаборацией Borexino, при существенном вкладе сотрудников ПИЯФ, получены наиболее строгие ограничения на флюенс нейтрино и антинейтрино, связанный с ГВ, при энергиях менее 7-8 МэВ. Результаты опубликованы в журнале *Astroparticle Physics* 86 (2017).
2. Коллаборация DarkSide, при активном участии сотрудников ПИЯФ, впервые в мире использовала в двухфазном детекторе подземный аргон, в котором содержание р/а изотопа ^{39}Ar в 1400 раз меньше, чем в атмосферном аргоне. В результате 71-суточных измерений установлены новые, наиболее строгие для ядер Ar, ограничения на спин-независимое сечение взаимодействия и массу массивных слабовзаимодействующих частиц WIMPs. (*Physical Review D* 93. 2016).
3. Предложен и реализован метод калибровки энергетической шкалы сцинтилляционного детектора с помощью гамма-квантов. Методика основана на комптоновском рассеянии в сцинтилляционном детекторе и последующем фотоэлектрическом поглощении рассеянного кванта в Ge-детекторе. Методика может использоваться для прецизионного изучения зависимости световых выхода в сцинтилляторе от энергии электрона. (NIM, 2015; ПТЭ, 2016).
4. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, SOX, DarkSide и IAXO. В ПИЯФ начаты работы по измерению бета-спектра ^{144}Pr .

Планы на 2017 г.

1) ПИЯФ

- а) Измерение бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr (для SOX).
- б) Измерения QF для электронов (для SOX)
- в) Выращивание Tm(XY) кристаллов объемом более 1 см^3 (НИИ Материаловедения). Исследование болометрических и сцинтилляционных характеристик выращенных кристаллов
Измерения с Tm-болометром в LNGS
- г) Баксан- ^{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)
- б) магнитный момент нейтрино, NSI нейтрино,
- в) корреляция нейтринных сигналов с LIGO / VIRGO (GW)
- г) И.Драчнев, 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) И. Драчнев, Е. Унжаков, Д. Семенов → 4 месяца LNGS

4) Новые проекты IAXO, LUCIFER – нейтрино, аксион

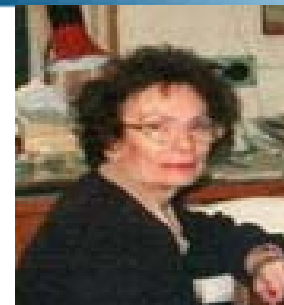
Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



g_{AN}

**НЕЙТРИНО
АКСИОН
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ**

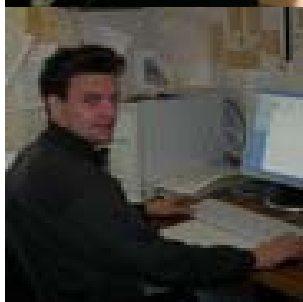
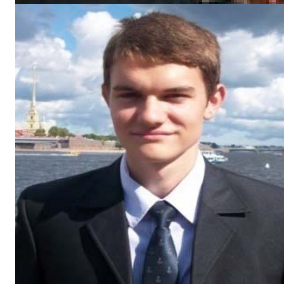
Si



SiAlN

**BOREXINO
SOX_Ce
DARKSIDE
IAXO, LUCIFER
POSEIDON**

Ce-Pr



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

Ge



Спасибо за внимание!

Сейчас

Унжаков Е.В.

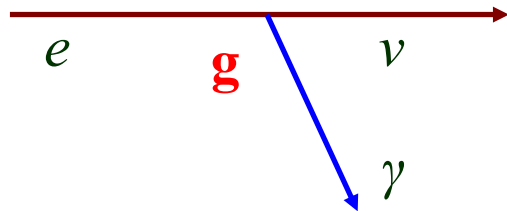
«Новые результаты эксперимента по поиску частиц темной материи DarkSide-50»

В 16:25

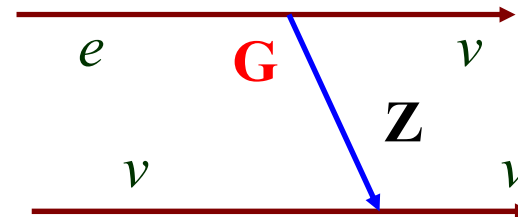
Хусаинов А.Х., И.М. Котина, А.В. Дербин
«Полупроводниковые детектирующие системы»

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

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



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

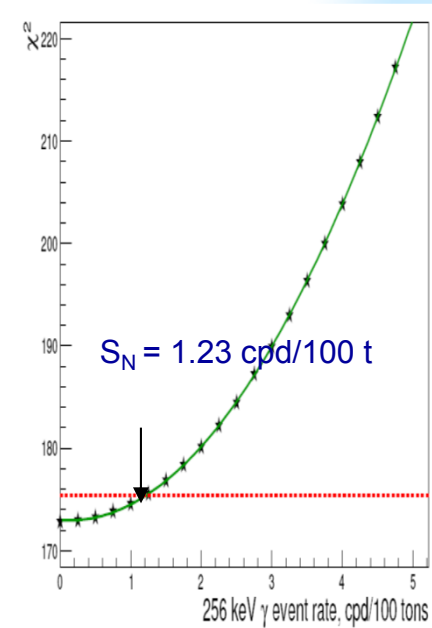
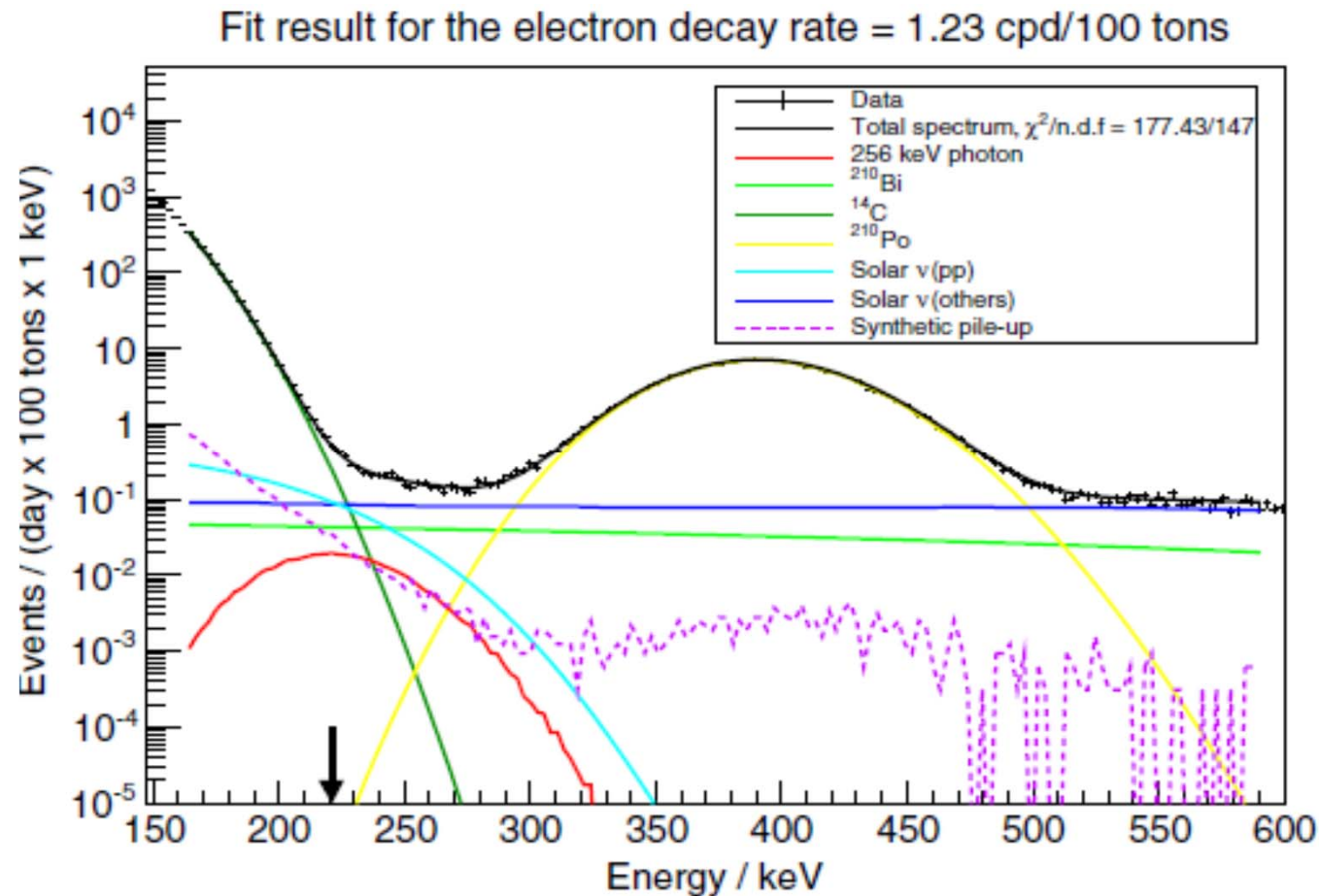


Указанные распады невозможны в СМ. Калибровочная $U(1)$ -симметрия гарантирует сохранение электрического заряда и безмассовость фотона. В работах Зельдовича, Окуня и Волошина и Окуня была показана невозможность спонтанного нарушения $U(1)$ -симметрии с помощью механизма Хиггса. Прямое нарушение должно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

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



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

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

09.12.2015

Physics - Synopsis: Still Waiting For Electron Decay



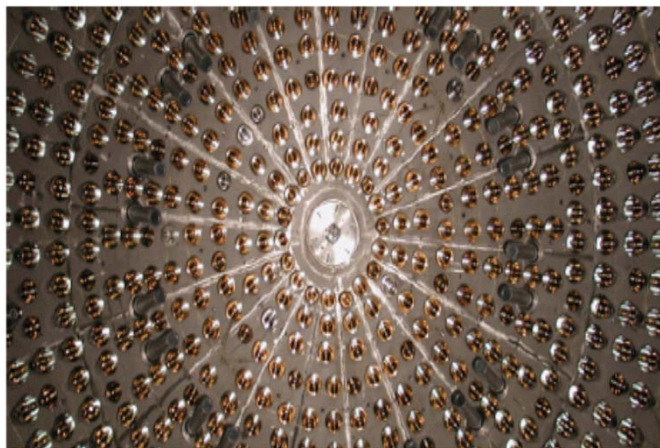
Physics ▼



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 Pellavicini/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