

# Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

## Лаб. низкофоновых измерений

- 1) А.В. Дербин внс, дфмн,
- 2) В.Н. Муратова, снс, кфмн
- 3) С.В. Бахланов вед. инж.
- 4) Д.А. Семенов, нс. кфмн
- 5) И.М. Котина, снс, кфмн
- 6) О.И. Коньков, снс, кфмн
- 7) И.С. Драчнев, нс, PhD
- 8) Н.В. Базлов, нс
- 9) Е.В. Унжаков, нс.
- 10) Л.М.Тухконен нс (М.В. Трушин, снс)
- 11) Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ
- 12) И.П. Филиппов, 3 курс СПбГУ
- 13) Г.С. Изегов, 4 курс СПбГУ

В отделе - 29 (8x0.5) чел.  
1 дфмн; 6 кфмн; внс – 2;  
снс – 3; нс – 5; мнс – 0; асп.  
- 1; вед. инж.-11; инж.-2;  
рег. ап. -1; сл. мех.-1;  
студ. совм. – 3;

## Гр. физики и технологии ППД

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

## Гр. радиохимии

- 1) И.С. Ломская, 5 курс ТУ
- 2) В.М. Тюнис вед. инж.

## Конст. –технологический уч.

- 1) Г.Е. Жихаревич инж.-технолог
- 2) А.Д. Майанцев инженер
- 3) А.П. Михайлов регулировщик р.а.
- 4) В.А. Радаев слесарь мех. сб.р.

# Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



## Состав (14 (6x0.5) чел.):

А.В. Дербин внс, дфмн,

С.В. Бахланов вед. инж.

В.Н. Муратова, снс, кфмн

Д.А. Семенов, нс, кфмн

И.М. Котина снс, кфмн

О.И. Коньков, снс, кфмн

И.С. Драчнев, нс, PhD

Н.В. Базлов, нс

Л.М. Тукхонен, нс

Е.В. Унжаков, нс

Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ

И.П. Филиппов, 3 курс СПбГУ

И.С. Ломская, 5 курс ТУ

Г.А. Изегов, 4 курс СПбГУ

**3ст+1асп+0мнс+5нс+3снс+1внс+ви  
дфмн и 5 кфмн**

# **Отдел и Лаборатория в 2018 году**

Работы проводились по 4 основным направлениям:

## **1) Нейтрино,**

(эксперимент **Borexino**—солнечные и гео-нейтрино, измерение бета спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ )

## **2) Темная материя**

(эксперименты по поиску аксионов (**ПИЯФ, Баксан, IAXO, Гран Сассо, MPI**) и эксперимент по поиску WIMPs (**DarkSide-50, 20k**))

## **3) Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами**

(рук. А.Х. Хусаинов)

## **4) $a\text{Si:H/cSi}$ и $\text{AlN}$ структуры на кремнии. Дрейф $\text{Li}$ на длину $> 8$ мм**

(рук. И.М. Котина)

# Содержание доклада (40 мин.)

1) **Наукометрические показатели**

2) **Нейтрино в 2011- 2018 г.г.**

## **Нейтрино**

3) **Эксперимент Борексино в 2018 году. Новые результаты.**

4) **Комплексные результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино**

5) **Измерения бета-спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  - стерильные нейтрино с массой 0.001– 3.0 МэВ.**

## **Темная материя (WIMPs и аксионы)**

6) **Поиск частиц темной материи в эксперименте *DarkSide* в Гран Сассо.**

7) **Поиск поглощения солнечных аксионов ядром  $^{83}\text{Kr}$  в БНО ИЯИ РАН**

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

9) **Проекты по поиску конверсии аксионов в фотон *IAXO* и *TASTE***

10) **Планы на 2018 год.**

11) **Итоги работы Отдела (10 мин)**

# Публикации в 2018 г. (16+9)

## 16 публикаций в реферируемых журналах

1. I.E. Alexeev, et al., Beta-spectrometer with Si-detectors for the study of  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  decays, **Nuclear Inst. and Methods in Physics Research**, A 890, 64-67, (2018)
2. Н.В. Базлов и др. Бета-спектрометр на основе кремниевых детекторов, **Приборы и техника эксперимента**. № 3, с. 1–5 (2018)
3. А.В. Дербин и др., Поиск нейтрино с массой (0.01–1.0) МэВ в бета-распадах ядер  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$ , **Письма в ЖЭТФ**, том 108, вып. 8, с. 531 – 536
4. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) Status and Perspective of the DarkSide Experiment at LNGS, **Nuovo Cim.** C40 no.5, 164, (2018)
5. B. Caccianiga et al., (Borexino coll.) Short distance neutrino Oscillations with BoreXino: SOX, **Nuovo Cim.** C40 no.5, 162, (2018)
6. Yu.M. Gavriluk et al., Search for resonant absorption of solar axions emitted in M1-transitions in  $^{83}\text{Kr}$  nuclei: Second stage of the experiment, **Phys.Part.Nucl.** 49 no.1, 94-96, (2018) **Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra** 49 no.1, (2018)
7. A.V. Derbin et al., Recent Results of Search for Solar Axions, **J. Phys.: Conf. Ser.** 934 01 (2018)
8. Ю.М. Гаврилюк и др., Новые ограничения на константу связи аксиона с фотоном для солнечных аксионов, **Письма в ЖЭТФ**, том 107, вып. 10, с. 617 – 622, (2018)
9. C.E. Aalseth et al., (DarkSide coll.) DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS, **Eur. Phys. J. Plus** 133, 131, (2018)
10. Z.A. Akhmatov et al., Results of Searching for Solar Hadronic Axions Emitted in the M1 Transition in  $^{83}\text{Kr}$  Nuclei, **Phys. Part. Nucl.** 49, no.4, 599 (2018)
11. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.) Constraints on Sub-GeV Dark Matter-Electron Scattering from the DarkSide-50 Experiment, **Phys. Rev. Lett.** 121, no.11, 111303 (2018) e-Print: arXiv:1802.06998
12. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment **Phys. Rev. Lett.** 121 no.8, 081307 (2018)
13. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Electroluminescence pulse shape and electron diffusion in liquid argon measured in a dual-phase TPC, **Nucl. Instrum. Meth.** A904, 23 (2018)
14. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), DarkSide-50 532-day Dark Matter Search with Low-Radioactivity Argon, **Phys. Rev. D** 98, 102006 (2018)
15. L. Miramonti et al., (Borexino Coll.) Solar Neutrinos Spectroscopy with Borexino Phase-II, **Universe** 2018, 4(11), 118
16. M. Agostini et al., (Borexino Coll.) Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos, **Nature** 562 (2018) no.7728, 505

# Публикации 2018 г. (16+9)

## 9 публикаций в arXiv и в Proceedings

1. P.Agnes et al., Constraints on Sub-GeV Dark Matter-Electron Scattering from the DarkSide-50 Experiment, arXiv:1802.06998
2. P.Agnes et al., Low-mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment, arXiv:1802.06994
3. P.Agnes et al., DarkSide-50 532-day Dark Matter Search with Low-Radioactivity Argon, arXiv:1802.07198
4. P.Agnes et al., Electroluminescence pulse shape and electron diffusion in liquid argon measured in a dual-phase TPC, arXiv:1802.01427
5. X.F. Ding et al., Speeding up complex multivariate data analysis in Borexino with parallel computing based on Graphics Processing Unit, arXiv:1805.11125
6. A.V. Derbin et al., Recent results of search for solar axions using resonant absorption by  $^{83}\text{Kr}$  nuclei, DESY-PROC-2017-02 DOI: 10.3204/DESY-PROC-2017-02/muratova\_valentina Conference: C17-05-15.4, p.79-82 (2018)
7. P. Agnes (Houston U.) et al., (DarkSide Coll.) Constraints on Sub-GeV Dark Matter-Electron Scattering from the DarkSide-50 Experiment, arXiv:1802.06998
8. A. Pocar et al., (Borexino Coll.) Solar Neutrino Physics with Borexino, arXiv:1810.12
9. M. Agostini et al., (Borexino Coll.) Modulations of the Cosmic Muon Signal in Ten Years of Borexino Data, arXiv:1808.04207

# Доклады на конференциях и семинарах в 2018 г.

## 13 докладов (7 чел) и выступлений на конференциях и семинарах

1. **А.В. Дербин**, Эксперимент Борексина: солнечные нейтрино, 52-я Зимняя школа ПИЯФ по физике, март 2018, пленарный
2. **Н.В. Пилипенко**, Measurement of  $^{144}\text{Pr}$  beta-spectrum with Si detectors for the purpose of determining the spectrum of electron antineutrinos, 52-я Зимняя Школа ПИЯФ по физике ядра и элементарных частиц, постер
3. **Н.В. Пилипенко**, Бета-спектрометр на основе Si детекторов для измерения спектров антинейтрино источника  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ , 52-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, устный
4. **A.V. Derbin, I.S. Drachnev, Yu.M. Gavriilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kobuchev, V.V. Kuzminov, V.N. Muratova, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko**, New limits on axion-photon coupling constant for solar axions, Axion Wimp 2018 The 14th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, poster, 18 - 22 June 2018, Hamburg, Germany
5. **A. Derbin, I. Drachnev** and **V. Muratova** for the Borexino collaboration, A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events with the Borexino detector, Neutrino-2018 - The XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics
6. **A.V. Derbin, I.S. Drachnev, Yu.M. Gavriilyuk, A.M. Gangapshev et al.**, Search for resonant absorption of solar axions by  $^{83}\text{Kr}$ -nuclei. New limits on  $g_{A\gamma}$  and  $g_{Ae}$ . Neutrino-2018 - The XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 4–9 June 2018, Heidelberg, Germany
7. **S.V. Bakhlanov, E.A. Chmel, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, V.N. Muratova, N.V. Pilipenko, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov**, Measurement of  $^{144}\text{Pr}$  beta-spectrum with Si detectors for the purpose of determining the spectrum of electron antineutrinos, Neutrino-2018 - The XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics
8. **A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.N. Muratova, N.V. Pilipenko, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov**, Axioelectric effect on argon atoms in DarkSide detector, DarkSide General Meeting
9. **E.V. Unzhakov**, A Search for Solar Axions via the Resonant Absorption by Atomic Nuclei, INFN LNGS SEMINARS, Gran Sasso, 27 September, 2018
10. **D.A. Semenov**, New Tm-containing bolometer for resonant absorption of solar axions, IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2018), poster, 22-26 October 2018, Moscow
11. **I.S. Drachnev**,  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  semiconductor beta-spectrometer for measurement of  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  spectra, IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2018)
12. **I.S. Lomskaia**, New Tm-containing bolometer for resonant absorption of solar axions, IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2018)
13. **N.V. Pilipenko**, Измерение бета-спектров источника электронных антинейтрино  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  с помощью спектрометра с 4-π геометрией, Open Science 2018

# Диссертации, аспирантура, магистратура

**Подготовлена 1 кандидатская диссертация**

**«Поиск солнечных аксионов с помощью резонансного поглощения ядрами  $^{169}\text{Tm}$  и  $^{83}\text{Kr}$ »**

**(Е.В. Унжаков, 201???)**

**Аспирантура ПИЯФ**

**«Поиск осцилляций нейтрино в стерильное состояние: изучение бета-спектров источника электронных антинейтрино  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  с помощью полупроводниковых детекторов.»**

**(Н.Пилипенко, с 2017 г., рук. А.В. Дербин)**

**Магистратура ТУ (2019)**

**«Возможности поиска стерильного нейтрино с источником  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  и жидкими сцинтилляционными детекторами.»**

**(И.Ломская, 2019, рук. И.С. Драчнев)**

**Бакалавриат СПбГУ (2019)**

**«Нейтронный источник для калибровки детектора темной материи  $\text{DarkSide 20k}$ : изучение радиационной стойкости  $\text{Si(Li)}$ -детекторов»**

**(Г.Изегов, 2019, рук. А.В. Дербин)**

## 3(4) РФФИ и 2(2) РНФ в 2018 г.

### 5 грантов: РФФИ (3) и РНФ (2)

1. Грант РНФ 17-12-01009

Поиск осцилляций нейтрино на коротких расстояниях с детектором Борексино и искусственными источниками (анти)нейтрино.

руководитель *Дербин Александр Владимирович* НИЦ КИ ПИЯФ

2. Грант РФФИ А 17-02-00305

Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов атомными ядрами.

руководитель *Муратова Валентина Николаевна* НИЦ КИ ПИЯФ

3. Грант РФФИ 02 офи-м 16-29-13014

Применение детектора *Borexino* для исследования Солнца, Земли и других астрофизических объектов и явлений с использованием методов нейтринной спектроскопии

руководитель *Дербин Александр Владимирович* НИЦ КИ ПИЯФ

4. Грант РФФИ 02 А 16-29-13011

Разработка детектора с высокой чувствительностью для поиска солнечных адронных аксионов

руководитель *Гангапшев Альберт Мусаевич* ИЯИ РАН

от ОПЯД - исполнители

5. Грант РНФ № 16-12-10369

Исследование природы темной материи: прямой поисковый эксперимент и разработка аргонового детектора нового поколения.

Руководитель *Скорухатов Михаил Дмитриевич* НИЦ КИ (планируется продолжение)

от ОПЯД – исполнители

6. Поданы заявки на 2019 г. в РНФ (Д.А. Семенов) и в РФФИ (А.В. Дербин, поддержана)

## 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:** $\theta_{13}$ *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*

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

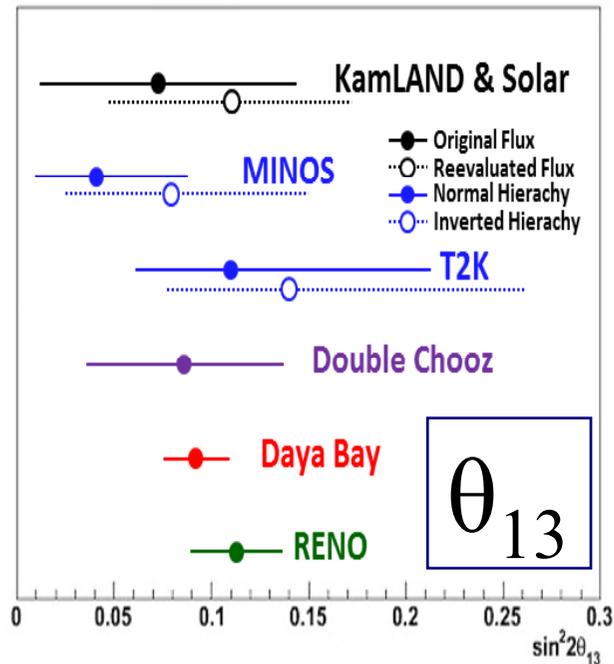
### **Сентябрь:** *пер-нейтрино* $(1.6 \pm 0.3) 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Borexino,

### **Декабрь:** $\theta_{13}$ *Double Chooz*

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

# 2012 – год открытия $\theta_{13}$ 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)

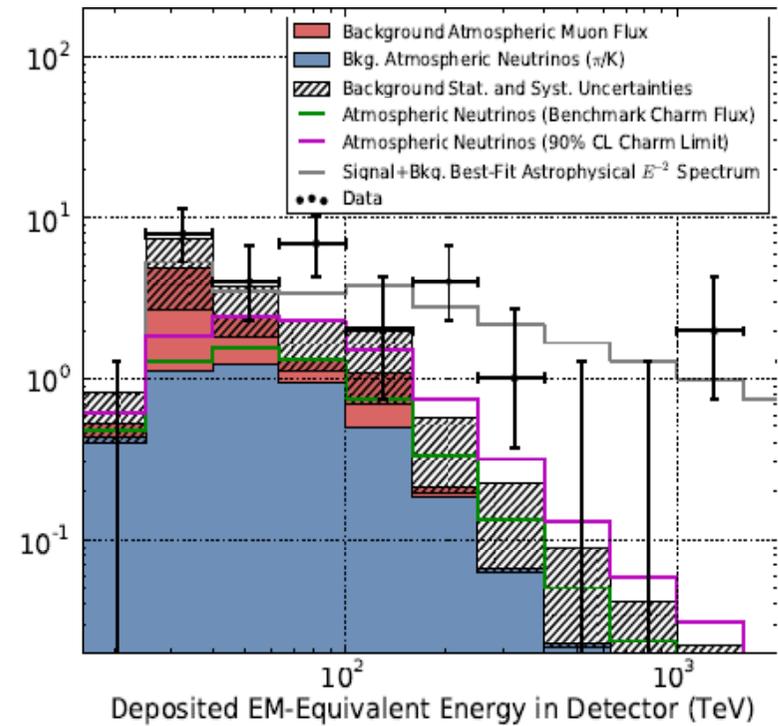
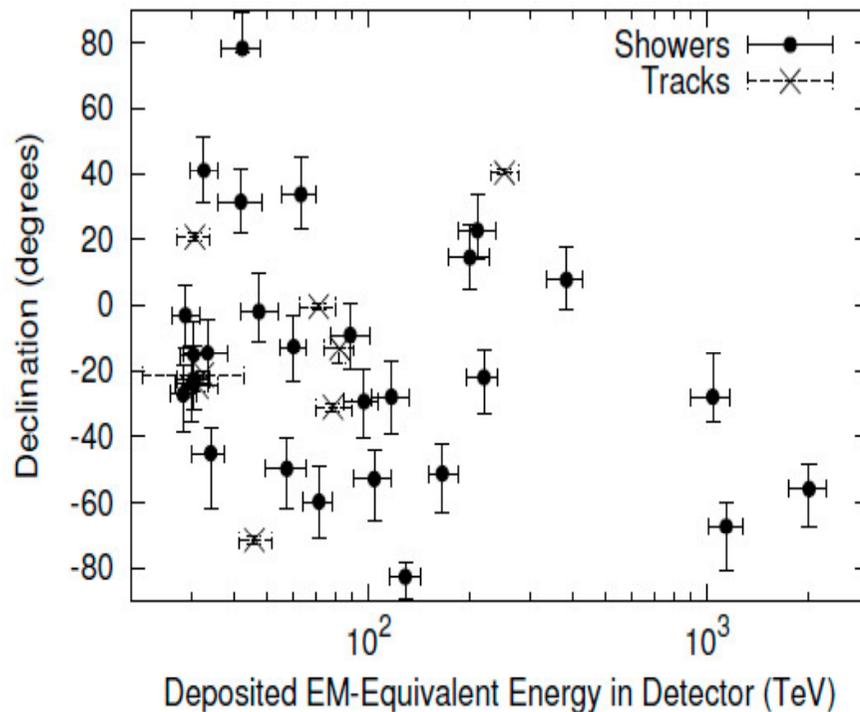
Borexino coll. arXiv:1207.6860

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)  $\sigma$  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

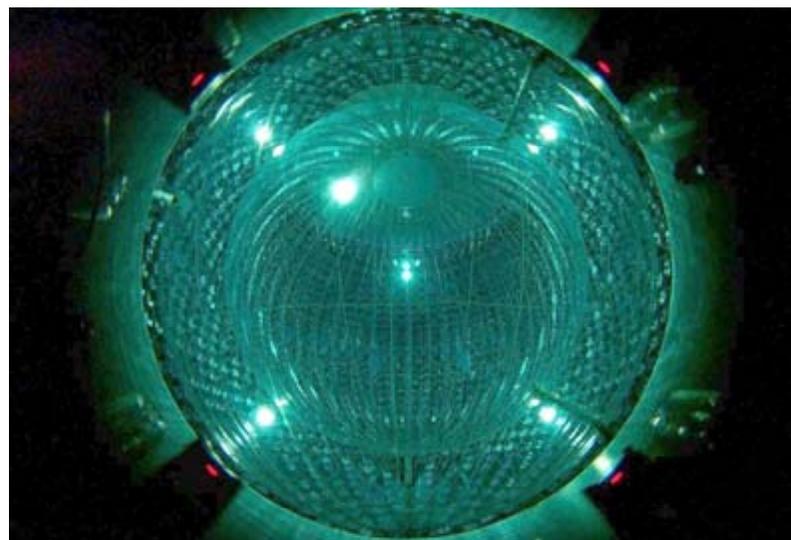
## Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

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,  $3.84 \times 10^{33}$  ergs per second, is generated by the proton–proton fusion process.

## Neutrinos spotted from Sun's main nuclear reaction

Aug 27, 2014 [9 comments](#)



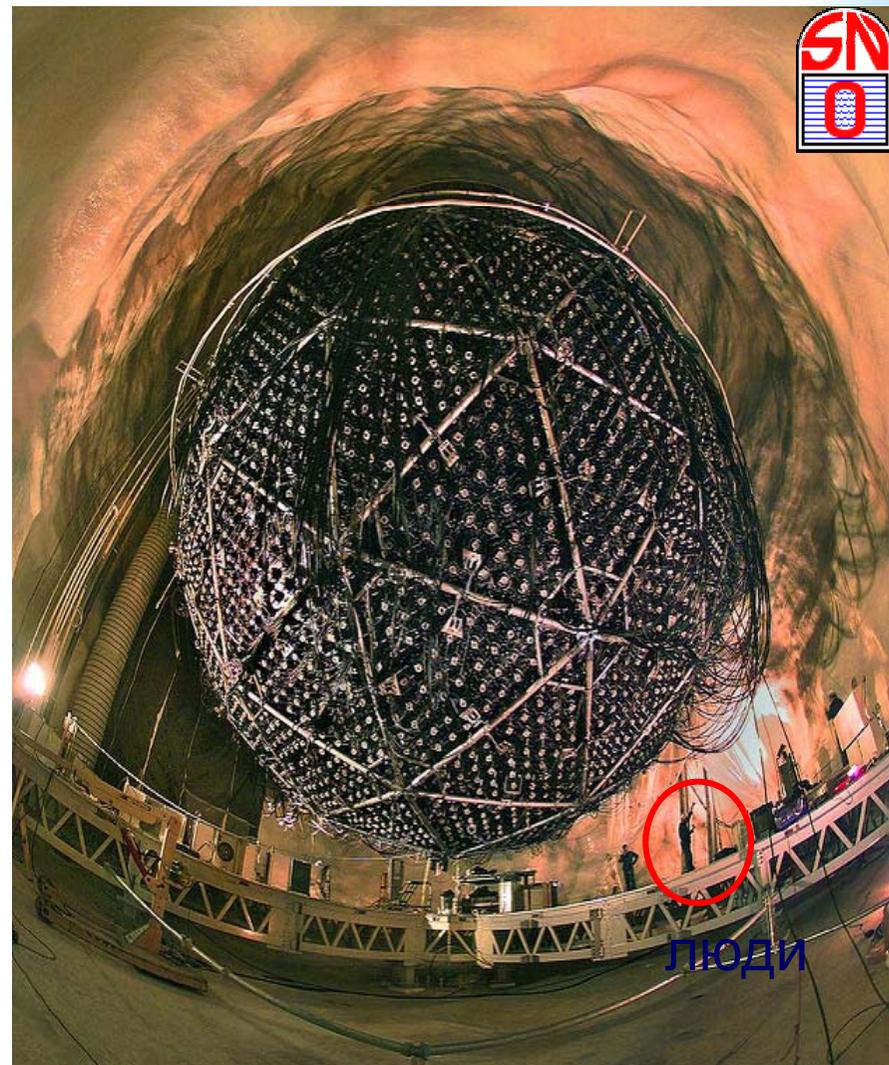
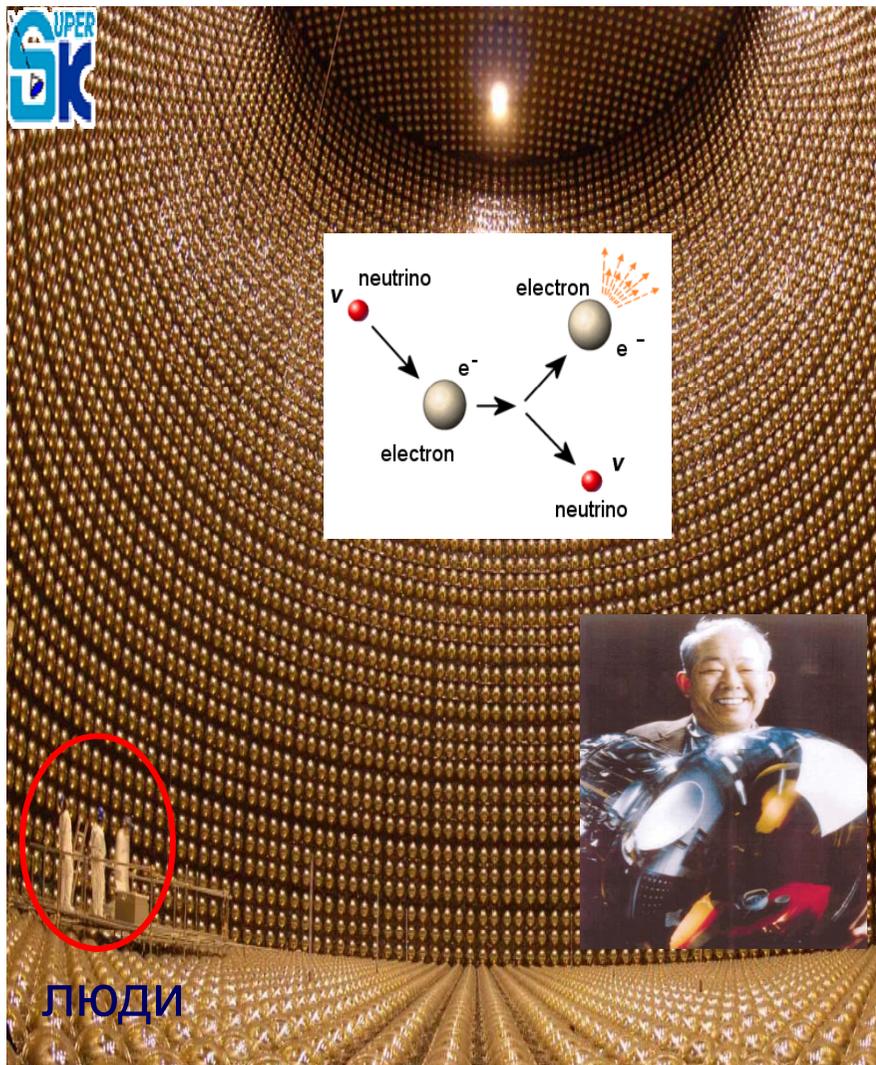
[Solace for solar physicists: Borexino results back theory](#)

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."

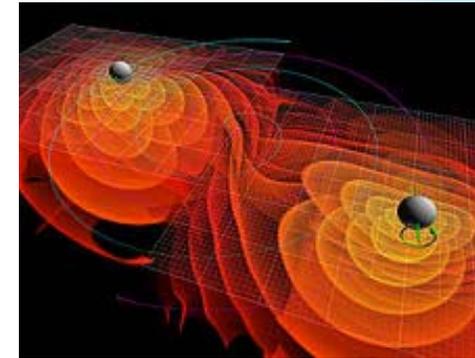
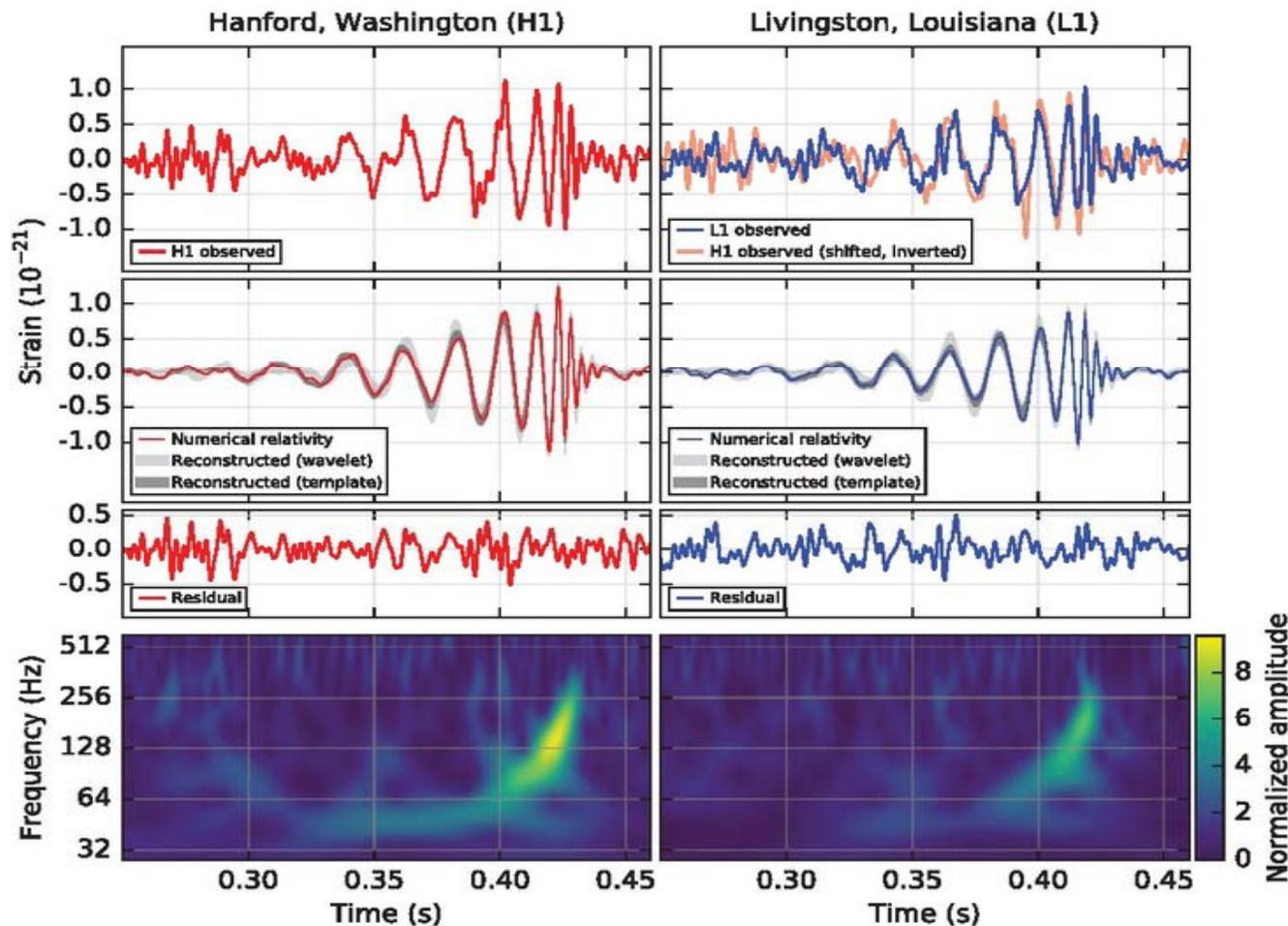
Each second, the Sun converts 600 million tonnes of hydrogen into helium, and 99% of the energy generated arises from the so-called proton–proton chain. And 99.76% of the time, this chain starts when two protons form deuterium (hydrogen-2) by coming close enough together that one becomes a neutron, emitting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

# 2015 – нобелевская S-K и SNO



За открытие нейтринных осцилляций. Работы выполнены на двух крупных экспериментальных установках S-K (1998)  $d = 39$  м и SNO (2002)  $d = 12$  м

# 2016 – регистрация гравитационных волн ВН-ВН

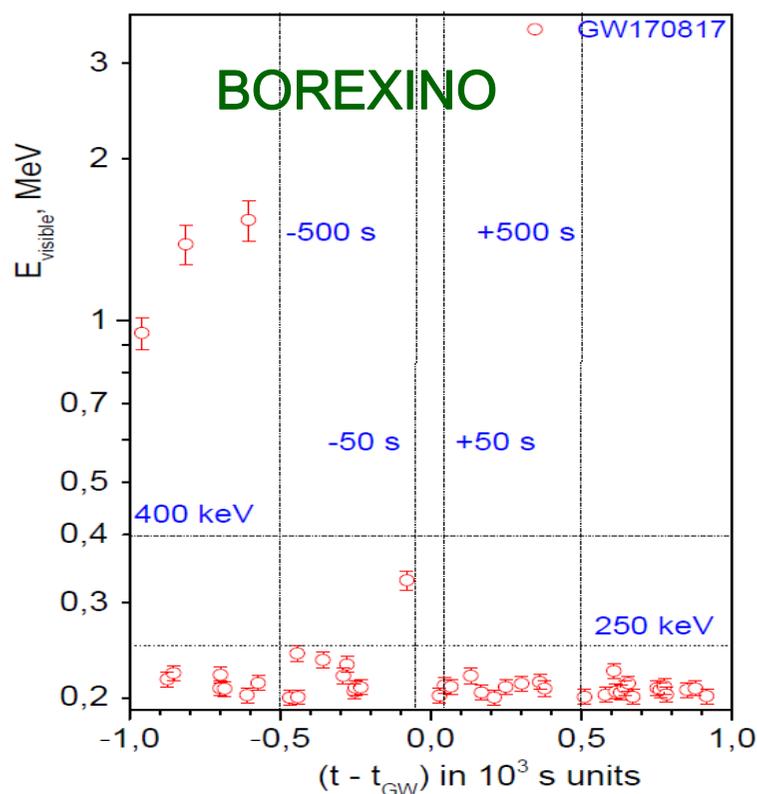


5.1  $\sigma$ . На расстоянии 410 МПс ( $z = 0.09$ ) слияние двух черных дыр с массами  $36 M_{\odot}$  и  $29 M_{\odot}$  с образованием  $62 M_{\odot}$  и  $3.0 M_{\odot}c^2$  излучилось в виде гравитационных волн. .

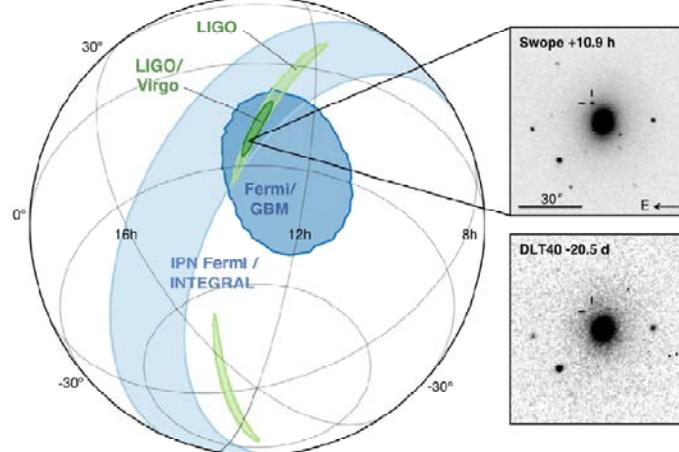
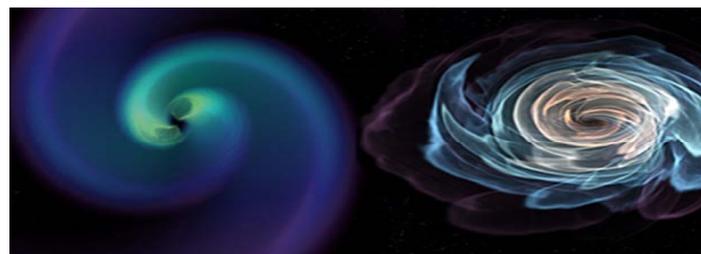
**GW150914**  
**LVT151012**  
**GW151228**  
**GW170104**

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

# 2017-Нобелевская за ГВ + регистрация ГВ от NS-NS



The Physics World 2017 Breakthrough of the Year

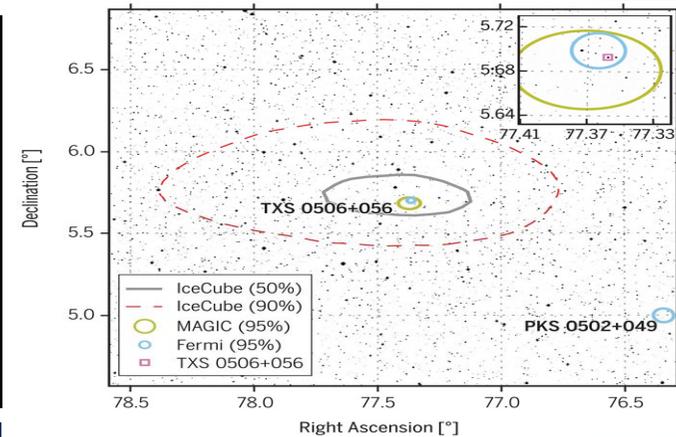
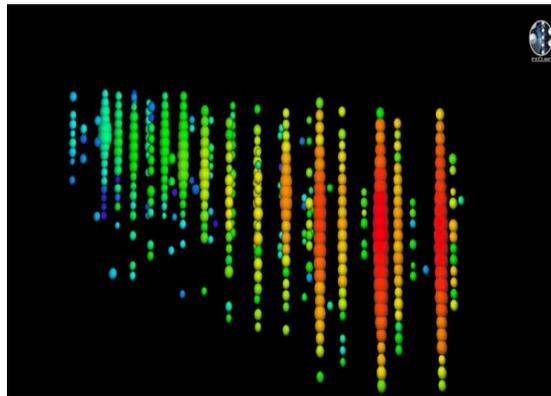


GW150914  
LVT151012  
GW151228  
GW170104  
GW170609  
GW170814  
GW170817

17 августа  
16 октября

На расстоянии 40 МПс слияние двух нейтронных звезд с  $m_1=(1.36-2.26)M$  и  $m_2=(0.86-1.36)M$  и с излучением энергии  $>0.025M$ . Реальное начало применения комплементарных методов в астрофизике – зарегистрированы гравитационные сигналы (LIGO и VIRGO) и электромагнитные **Fermi** и **Integral**  $\gamma$ -ray Monitor гамма (GRB 170817A) с задержкой 1.7 с. Инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения зарегистрированы в различных временных интервалах. По расчетам слияние нейтронных звезд является более мощным источником (относительно) нейтрино, пока не зарегистрировано.

# 2018 - Источником высокоэнергетических нейтрино является блазар TXS 0506



22 сентября 2017 года IceCube зарегистрировал нейтрино с энергией 270 ТэВ. Гамма-телескоп Fermi-LAT и наземный атмосферный черенковский телескоп MAGIC указали с более высокой точностью на блазар TXS 0506+056, удаленный на 3,8 млрд световых лет. Это третий, после Солнца и SN-1987A, внеземной источник нейтрино. Энергия нейтрино указывает, что джеты блазаров содержат протоны с энергиями десятков ПэВ.

# Новые результаты Борексино (2018 г.)

## 2018 год Комплексные результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино

2017 год Корреляции грав. волн и сигналов Борексино  
Временные вариации  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино  
Магнитный момент  $\nu \mu_{\text{eff}} \leq 2.8 \times 10^{-11} \mu_B$

2016 год Корреляции гамма-всплесков и сигналов Борексино  
Стерильное нейтрино -проект SOX\_Ce

2014 год: pp-нейтрино.

2015 год -Стабильность электрона  
гео-нейтрино за 2056 суток  
Проект SOX\_Ce

2012 – год  $A_{\text{solar}}$  и  $V_{\text{neutrino}}$

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

2013 год - Тяжелое стерильное нейтрино.

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

2010 – год антинейтрино

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

2011 – год  ${}^7\text{Be}$ , pep-, CNO- $\nu$

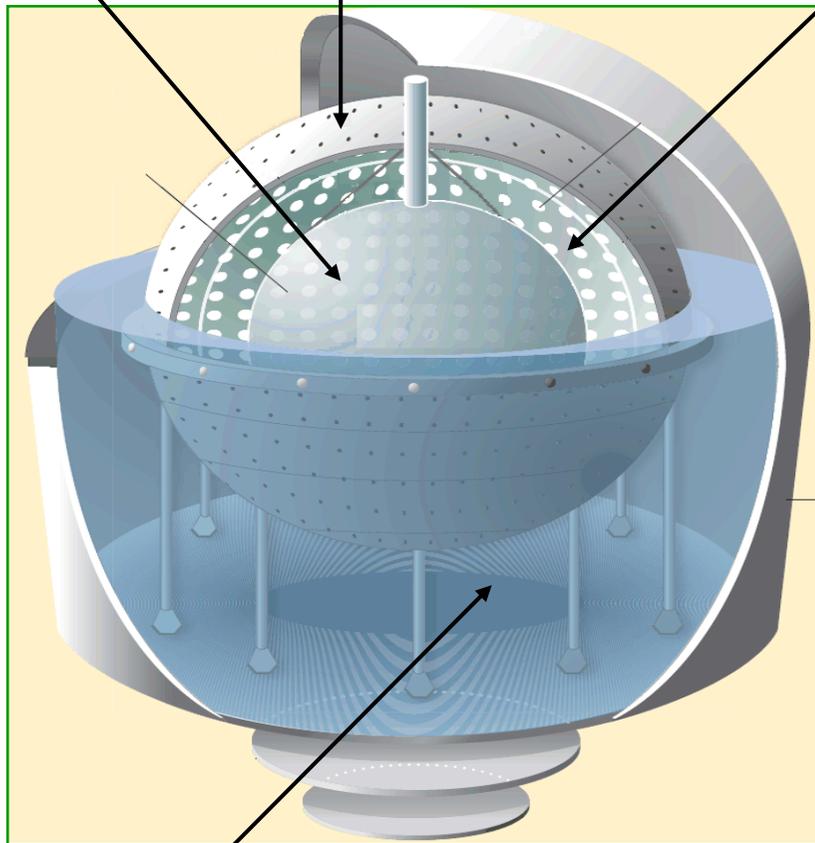
1. Вариации день-ночь для  ${}^7\text{Be}$ - $\nu$
2. Обнаружены pep-нейтрино
3. Поток  ${}^7\text{Be}$ - $\nu$  измерен с 5% точ.

# Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

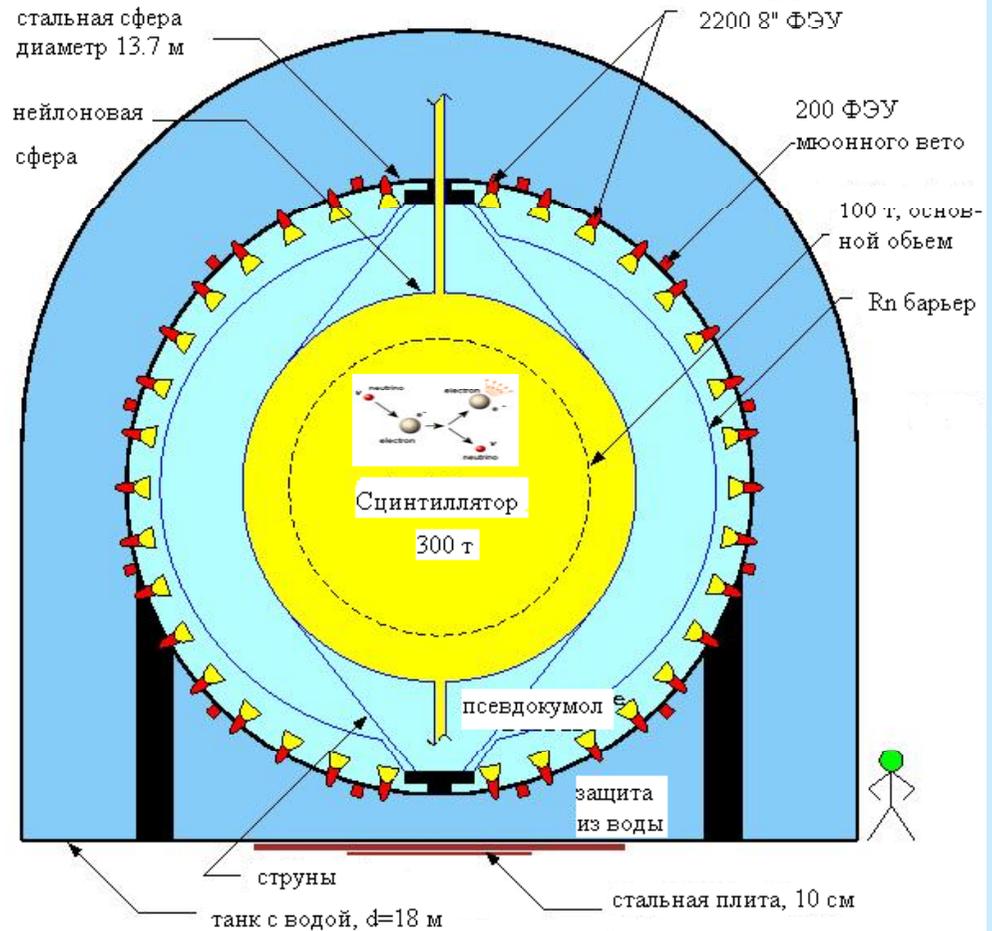
278 т. PC+PPO  
(1,5 г/л)

Стальная сфера (R=6,85 м)  
- 2212 8" ФЭУ;  
- 1350 м<sup>3</sup> PC+DMP (5,0 г/л)

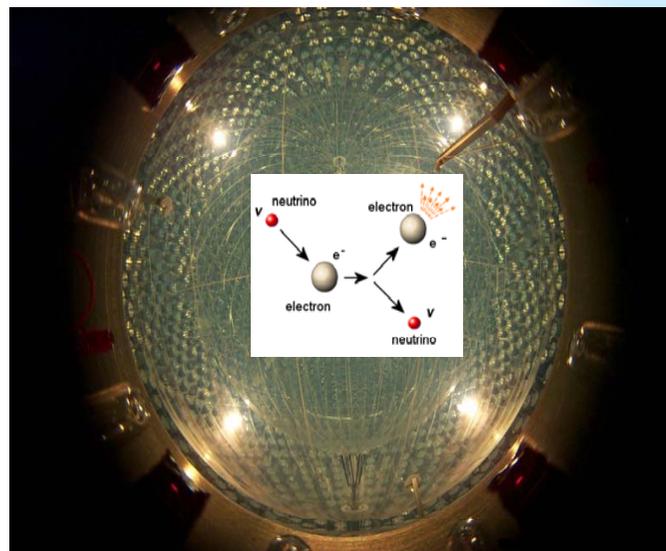
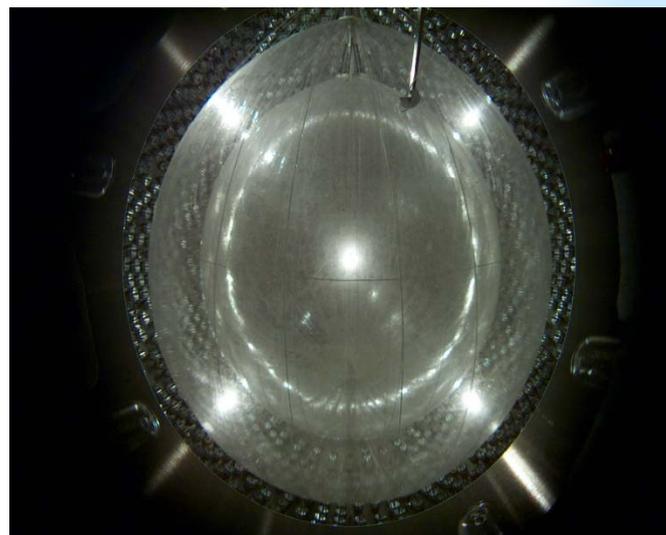
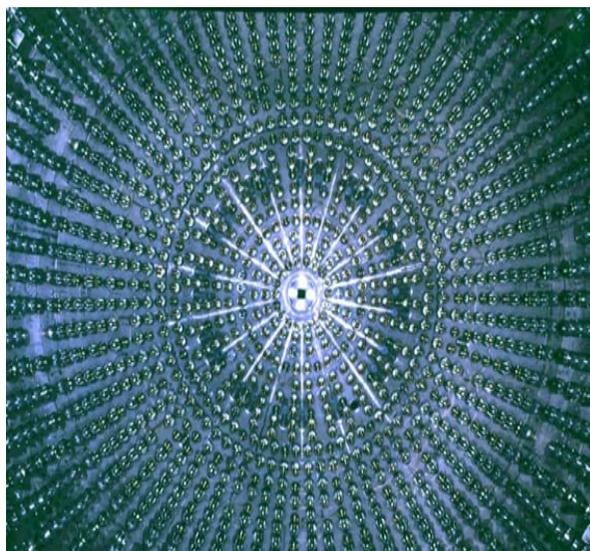
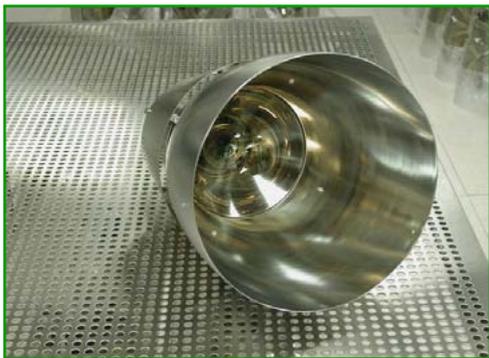
Две 125 мкм нейлоновые сферы:  
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



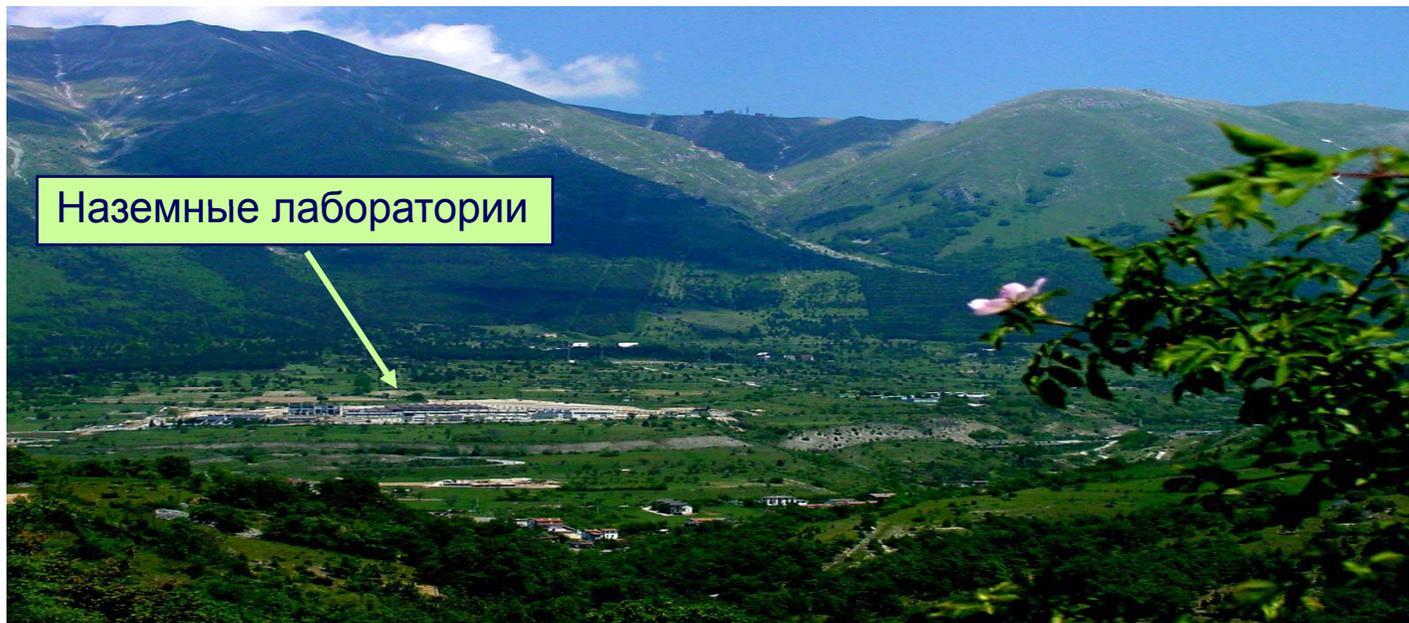
2100 м<sup>3</sup> водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;  
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;  
- защита от  $\mu$ ,  $\gamma$  и  $n$



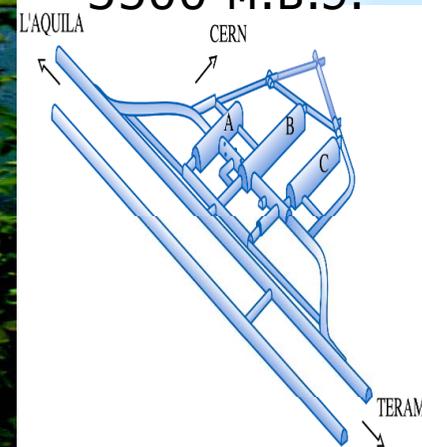
# ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы



# Национальная лаборатория Гран Сассо



Италия,  
120 км от Рима  
3500 м.в.э.



Борексина и завод по очистке

СТФ



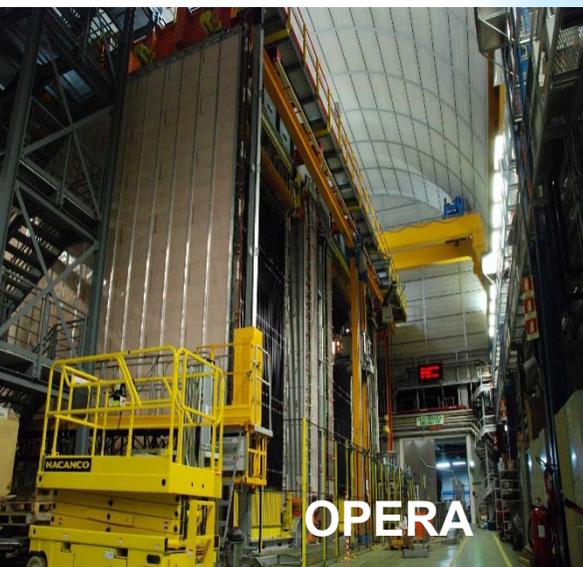
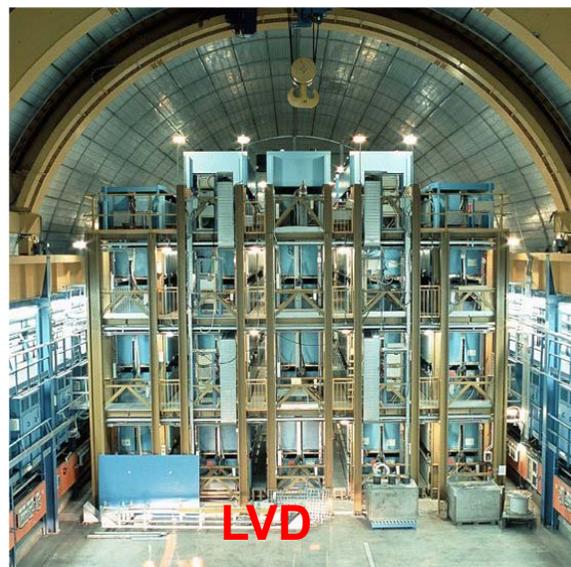
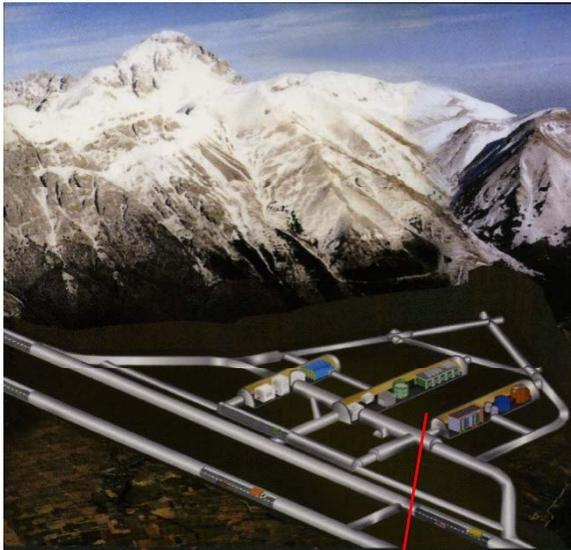
15-16 января

Сессия Ученого совета ОНИ ПИЯФ

21



# Подземная лаборатория Гран-Сассо





# 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

Virginia



Tech



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ



Universität  
Hamburg



НИИЯФ  
МГУ

SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS  
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY



Joint Institute for  
Nuclear Research



GRAN SASSO  
SCIENCE INSTITUTE

CENTER FOR ADVANCED STUDIES  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



## Рабочие группы Вх и вклад ПИЯФ в 2018 г.

Входим в состав 6 (из 12) рабочих групп:

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

**1. В 2018 году ученые НИЦ КИ ПИЯФ и НИЦ КИ, совместно с участниками международной коллаборации Борексино, представили результаты наиболее полного на сегодняшний день анализа нейтринного излучения, сопровождающего термоядерные процессы внутри Солнца. Результаты опубликованы в журнале «Nature» от 24 октября 2018 г.**

**2. Группа ПИЯФ продолжила поиск корреляций  $\nu$ -событий с гравитационными волнами (GW). Корреляции искались с сигналами от анти- $\nu$  и  $\nu$  всех флэйвов.**

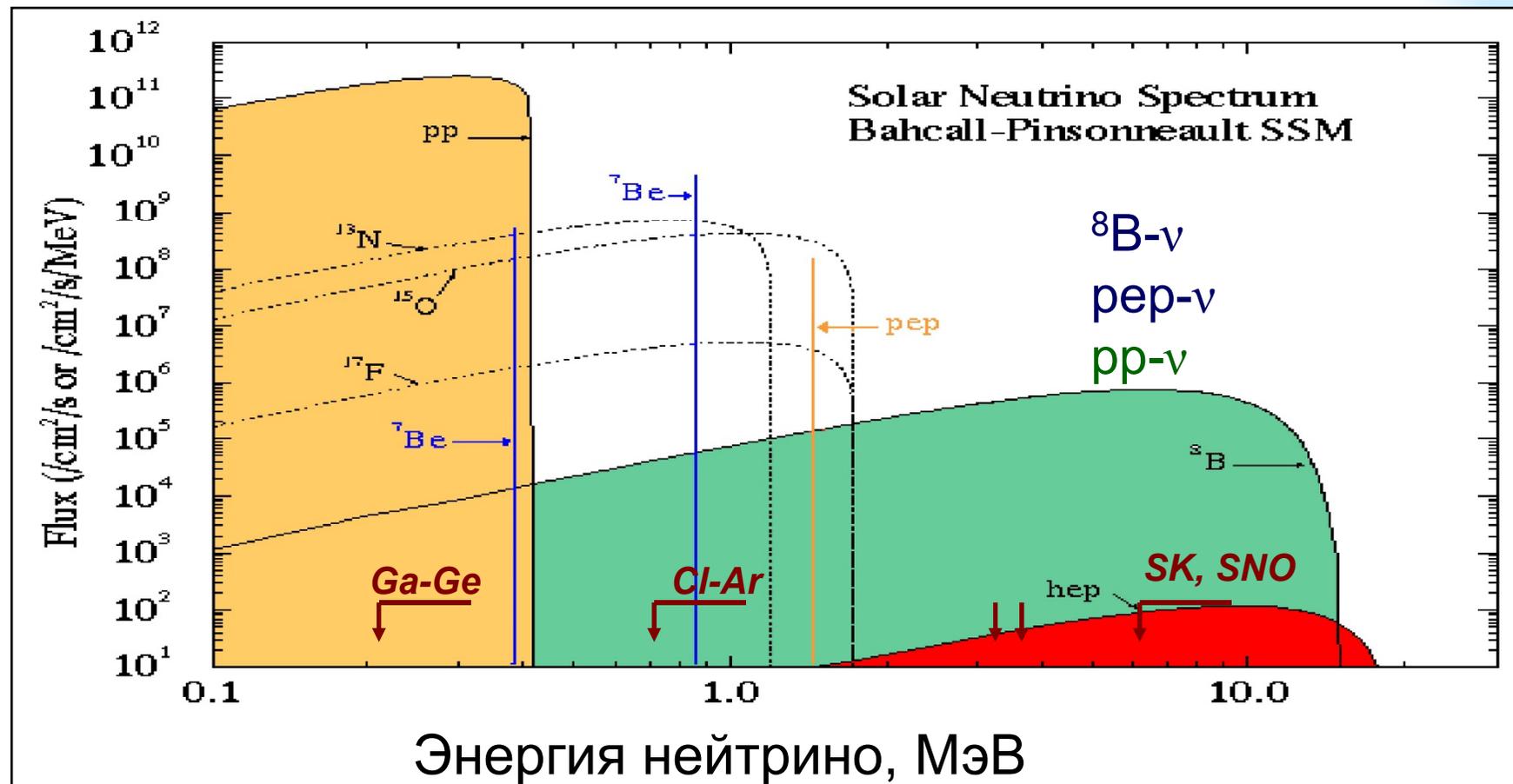
**3. Проводилась работы, инициированные экспериментом Borexino\_SOX, по измерению бета-спектра  ${}^{144}\text{Ce}$ - ${}^{144}\text{Pr}$  с целью определения спектра электронных нейтрино. Получены новые данные по стерильным нейтрино с массой 150-350 кэВ. Результаты опубликованы Письма ЖЭТФ, NIM, ПТЭ.**

**4. Работа в Гран Сассо – 6 чел./мес. в экспериментах Borexino и DarkSide**



# Основная задача БОРЕКСИНО -

регистрация упругого рассеяния  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроне - успешно решена, поток  ${}^7\text{Be}$ - $\nu$  измерен с точностью лучше 3%.



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 –  $10^{13}$   $\nu/\text{cm}^2\text{сек}$

# Совместный фит всех нейтрино из pp-цепочки



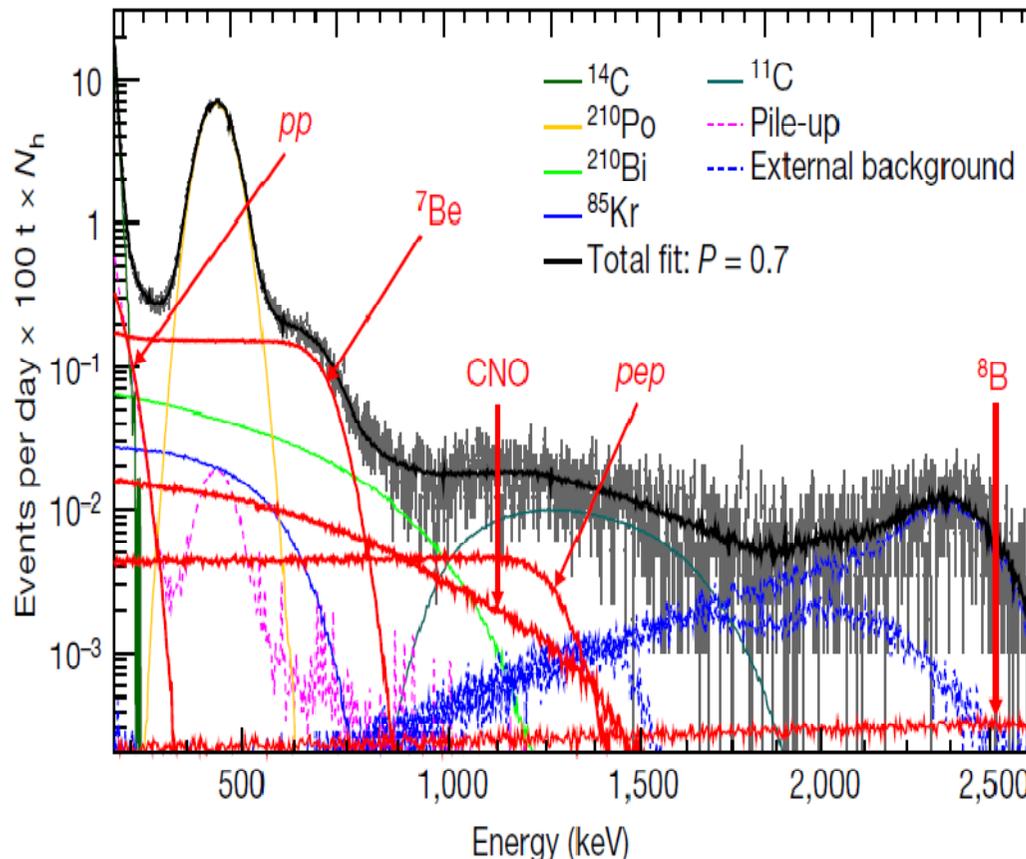
## The Borexino Collaboration

M. Agostini<sup>1</sup>, K. Altenmüller<sup>1</sup>, S. Appel<sup>1</sup>, V. Atroshchenko<sup>2</sup>, Z. Bagdasarian<sup>3</sup>, D. Basilico<sup>4</sup>, G. Bellini<sup>4</sup>, J. Benziger<sup>5</sup>, D. Bick<sup>6</sup>, G. Bonfini<sup>7</sup>, D. Bravo<sup>4,29</sup>, B. Caccianiga<sup>4\*</sup>, F. Calaprice<sup>8</sup>, A. Caminata<sup>9</sup>, S. Caprioli<sup>4</sup>, M. Carlini<sup>7</sup>, P. Cavalcante<sup>7,10</sup>, A. Chepurinov<sup>11</sup>, K. Choi<sup>12</sup>, L. Collica<sup>4</sup>, D. D'Angelo<sup>4</sup>, S. Davini<sup>9</sup>, A. Derbin<sup>13</sup>, X. F. Ding<sup>7,14</sup>, A. Di Ludovico<sup>8</sup>, L. Di Noto<sup>9</sup>, I. Drachnev<sup>13</sup>, K. Fomenko<sup>15</sup>, A. Formozov<sup>4,11,15</sup>, D. Franco<sup>16</sup>, F. Gabriele<sup>7</sup>, C. Galbiati<sup>8,14</sup>, C. Ghiano<sup>7</sup>, M. Giammarchi<sup>4</sup>, A. Goretti<sup>7</sup>, M. Gromov<sup>11</sup>, D. Guffanti<sup>7,14</sup>, C. Hagner<sup>6</sup>, T. Houdy<sup>16</sup>, E. Hungerford<sup>17</sup>, Aldo Ianni<sup>7,18</sup>, Andrea Ianni<sup>8</sup>, A. Jany<sup>19</sup>, D. Jeschke<sup>1</sup>, V. Kobychyev<sup>20</sup>, D. Korablev<sup>15</sup>, G. Korga<sup>17</sup>, D. Kryn<sup>16</sup>, M. Laubenstein<sup>7</sup>, E. Litvinovich<sup>2,21</sup>, F. Lombardi<sup>7,30</sup>, P. Lombardi<sup>4</sup>, L. Ludhova<sup>3,22</sup>, G. Lukyanchenko<sup>2</sup>, L. Lukyanchenko<sup>2</sup>, I. Machulin<sup>2,21</sup>, G. Manuzio<sup>9</sup>, S. Marcocci<sup>7,14,31</sup>, J. Martyn<sup>23</sup>, E. Meroni<sup>4</sup>, M. Meyer<sup>24</sup>, L. Miramonti<sup>4</sup>, M. Misiaszek<sup>19</sup>, V. Muratova<sup>13</sup>, B. Neumair<sup>1</sup>, L. Oberauer<sup>1</sup>, B. Opitz<sup>6</sup>, V. Orekhov<sup>2</sup>, F. Ortica<sup>25</sup>, M. Pallavicini<sup>9</sup>, L. Papp<sup>1</sup>, Ö. Penek<sup>3,22</sup>, N. Pilipenko<sup>13</sup>, A. Pocar<sup>26</sup>, A. Porcelli<sup>23</sup>, G. Raikov<sup>2</sup>, G. Ranucci<sup>4</sup>, A. Razeto<sup>7</sup>, A. Re<sup>4</sup>, M. Redchuk<sup>3,22</sup>, A. Romani<sup>25</sup>, R. Roncin<sup>7,16</sup>, N. Rossi<sup>7,32</sup>, S. Schönert<sup>1</sup>, D. Semenov<sup>13</sup>, M. Skorokhvatov<sup>2,21</sup>, O. Smirnov<sup>15</sup>, A. Sotnikov<sup>15</sup>, L. F. F. Stokes<sup>7</sup>, Y. Suvorov<sup>2,27,33</sup>, R. Tartaglia<sup>7</sup>, G. Testera<sup>9</sup>, J. Thurn<sup>24</sup>, M. Toropova<sup>2</sup>, E. Unzhakov<sup>13</sup>, F. L. Villante<sup>7,28</sup>, A. Vishneva<sup>15</sup>, R. B. Vogelaar<sup>10</sup>, F. von Feilitzsch<sup>1</sup>, H. Wang<sup>27</sup>, S. Weinz<sup>23</sup>, M. Wojcik<sup>19</sup>, M. Wurm<sup>23</sup>, Z. Yokley<sup>10</sup>, O. Zaimidzroga<sup>15</sup>, S. Zavatarelli<sup>9</sup>, K. Zuber<sup>24</sup> & G. Zuzel<sup>19</sup>

Впервые выполнена одновременная подгонка всех нейтрино (кроме  $\text{hep-}\nu$ ) из pp-цепочки в широком энергетическом интервале. До этого подгонки выполнялись отдельно для каждого типа нейтрино.

# Комплексные результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино раскрыли ядерные реакции внутри звезды

Ученые НИЦ КИ ПИЯФ и НИЦ КИ совместно с участниками международной коллаборации Борексино представили результаты наиболее полного на сегодняшний день анализа нейтринного излучения, сопровождающего термоядерные процессы внутри Солнца. Результаты опубликованы в журнале «Nature» от 24 октября 2018 г.



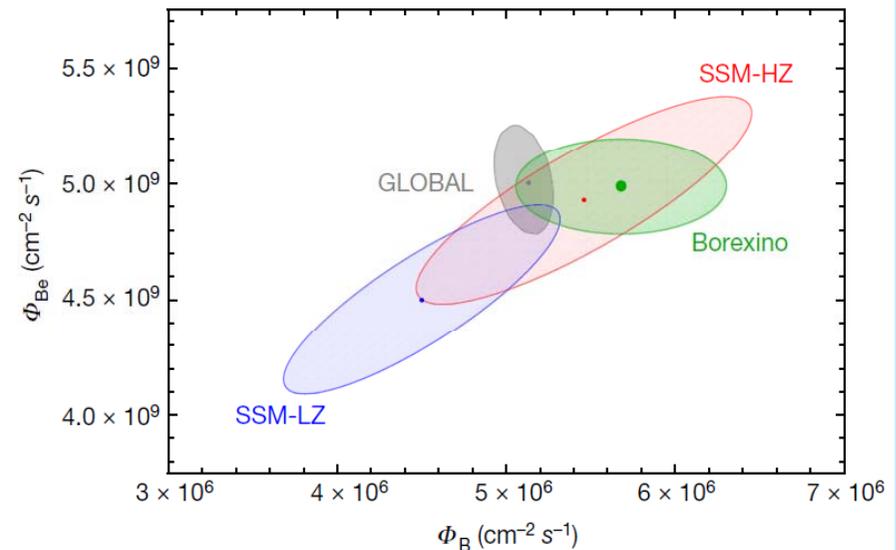
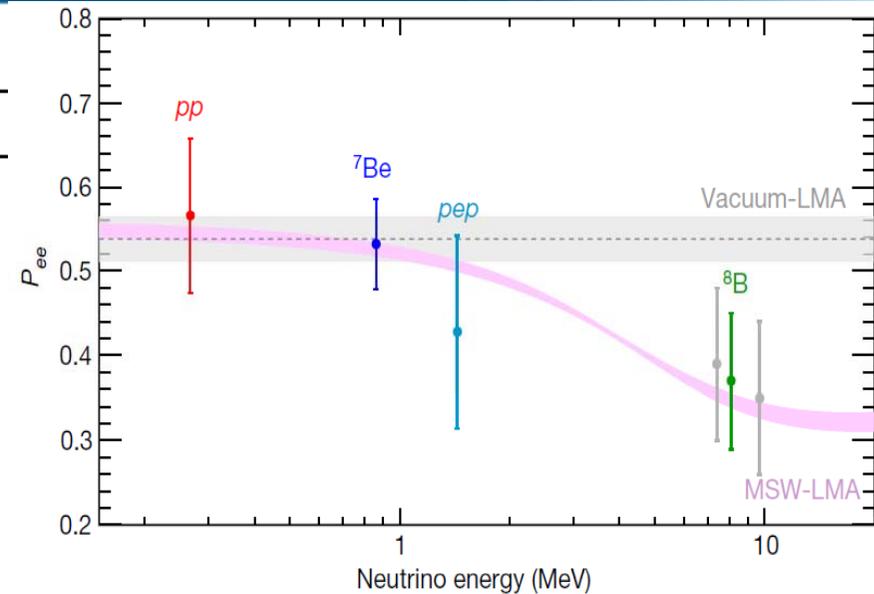
Спектр сигналов, зарегистрированных Борексино. Красные кривые показывают вклад, связанный с рассеянием солнечных нейтрино на электроны.

1. Поток  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино измерен с 2.7 % точностью, превышающей теоретические предсказания.
2. Поток низкоэнергетических и наиболее интенсивных  $pp$ -нейтрино измерен с 10.5% точностью
3. Поток  ${}^8\text{B}$ -нейтрино измерен с рекордно низкого порога 3.0 МэВ
4. Поток  $pep$ -нейтрино зарегистрирован на уровне, отличающемся от нуля на  $5\sigma$
5. Установлен наиболее строгий предел на поток CNO-нейтрино
6. Впервые осцилляционное LMA-решение подтверждено для нейтрино.
7. Впервые получены свидетельства в пользу модели Солнца с высокой металличностью ( $P(LZ)=0.034$ )
8. В одном эксперименте определена доля электронных нейтрино ( $P_{ee}$ ) при разном вкладе вакуумных осцилляций и осцилляций в веществе

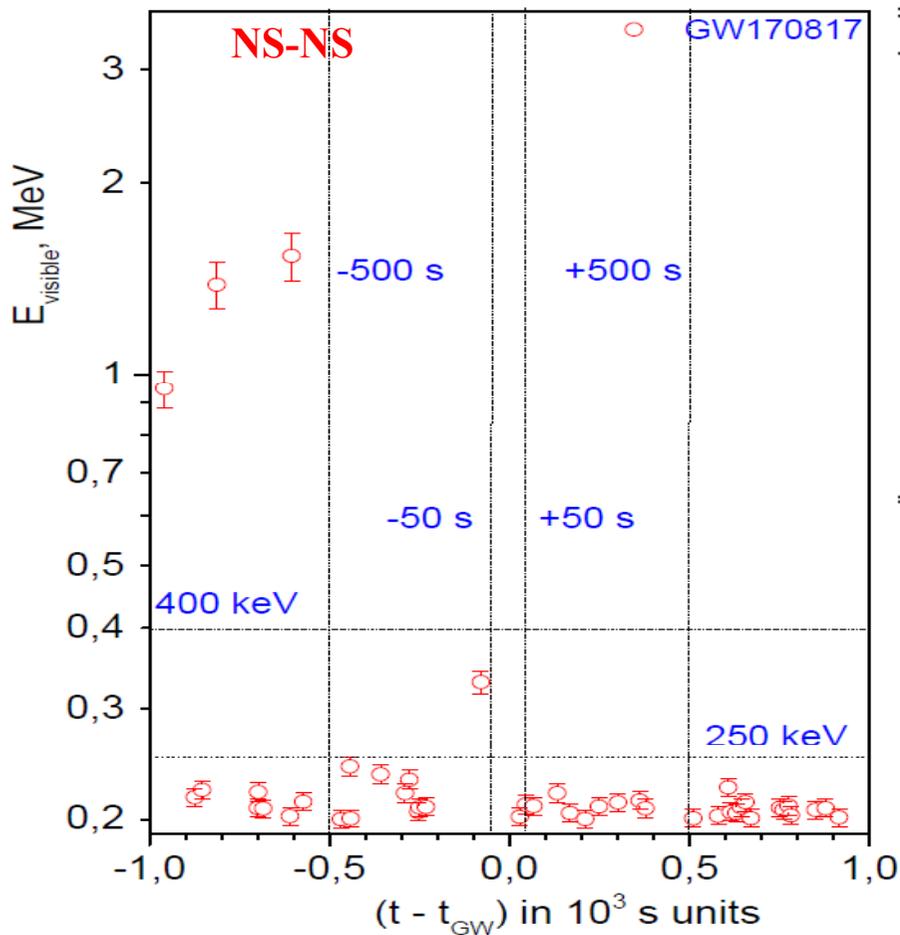
# Результаты Борексино и предсказания ССМ

Table 2 | Borexino experimental solar-neutrino results

Solar neutrino	Rate (counts per day per 100 t)	Flux ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Flux-SSM predictions ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
$pp$	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \times 10^{10}$	$5.98(1.0 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1.0 \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
${}^7\text{Be}$	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.11^{+0.06}_{-0.08}) \times 10^9$	$4.93(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
$pep$ (HZ)	$2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.12}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
$pep$ (LZ)	$2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.13}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
${}^8\text{B}_{\text{HER-I}}$	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$(5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
${}^8\text{B}_{\text{HER-II}}$	$0.087^{+0.080+0.005}_{-0.010-0.005}$	$(5.56^{+0.52+0.33}_{-0.64-0.33}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
${}^8\text{B}_{\text{HER}}$	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$(5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	$< 8.1$ (95% C.L.)	$< 7.9 \times 10^8$ (95% C.L.)	$4.88(1.0 \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.51(1.0 \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	$< 0.002$ (90% C.L.)	$< 2.2 \times 10^5$ (90% C.L.)	$7.98(1.0 \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1.0 \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

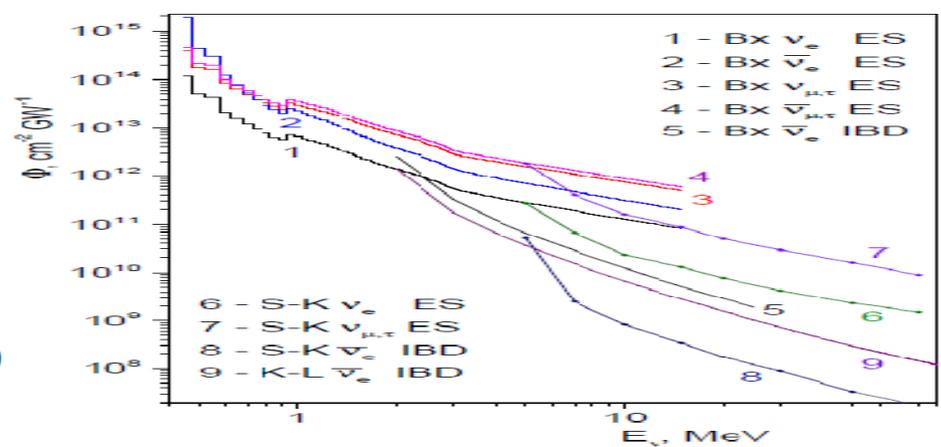


# Поиски сигналов от нейтрино и антинейтрино в детекторе Borexino в корреляции с гравитационными волнами.



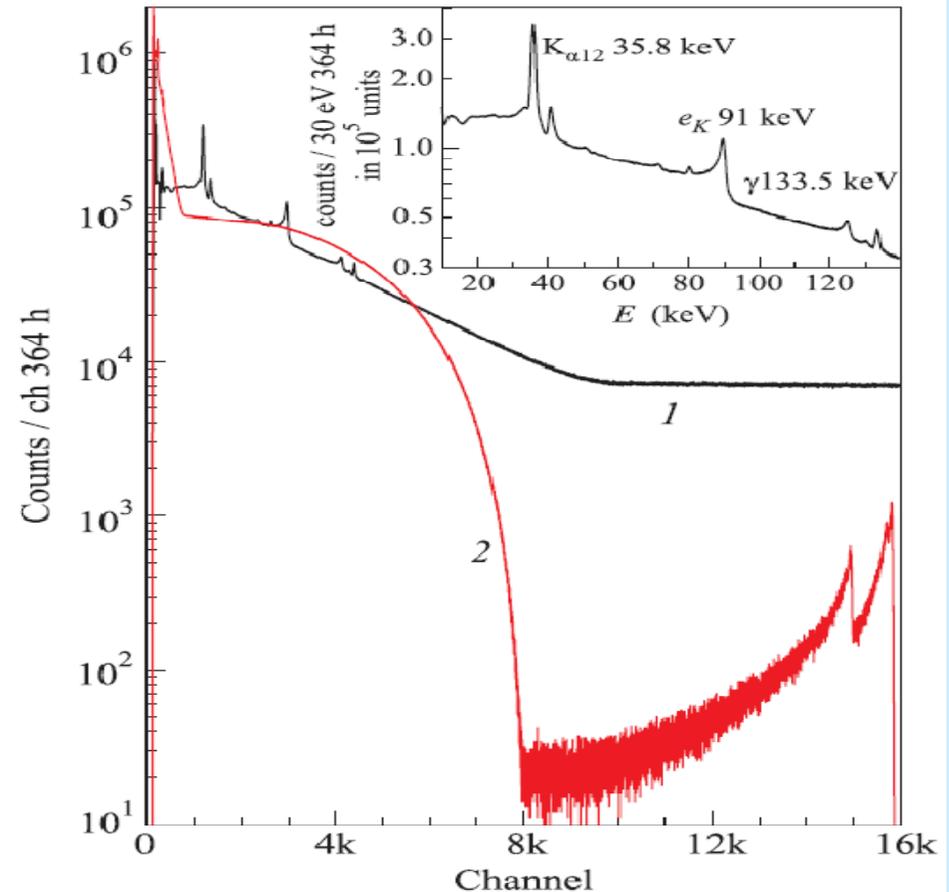
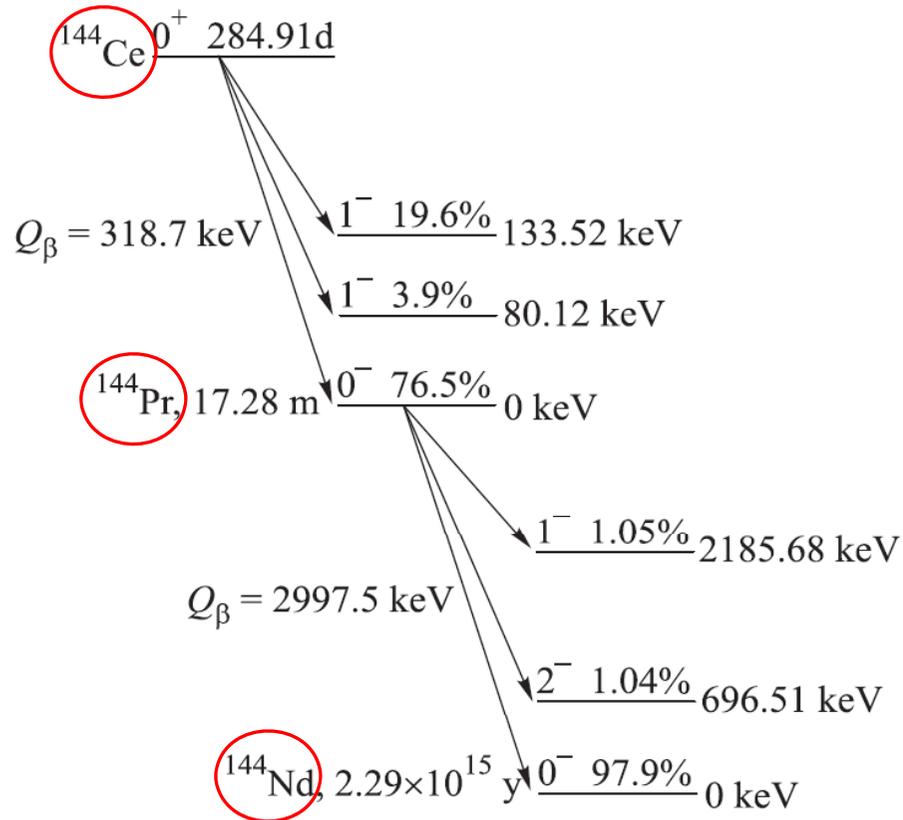
Event	$m_1/M_\odot$	$m_2/M_\odot$	$M/M_\odot$	$\chi_{\text{eff}}$	$M_I/M_\odot$	$a_I$	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$t_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$d_L/\text{Mpc}$	$z$	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	$430^{+170}_{-170}$	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	180
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	$1060^{+540}_{-480}$	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.17}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.1}$	$3.4^{+0.7}_{-0.9} \times 10^{56}$	$440^{+180}_{-190}$	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+1.1}_{-1.7}$	$0.6^{+0.2}_{-0.20}$	$41.1^{+3.9}_{-3.9}$	$0.6^{+0.04}_{-0.10}$	$2.1^{+0.1}_{-0.5}$	$2.1^{+0.1}_{-0.5} \times 10^{56}$	$960^{+430}_{-410}$	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$10.9^{+0.7}_{-0.7}$	$0.03^{+0.19}_{-0.17}$	$17.8^{+3.2}_{-1.7}$	$0.60^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.05}_{-0.05}$	$0.9^{+0.05}_{-0.05} \times 10^{56}$	$320^{+120}_{-110}$	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	$2750^{+1350}_{-1320}$	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	$990^{+320}_{-380}$	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	$580^{+160}_{-210}$	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	$\leq 2.8$	$\leq 0.89$	$\geq 0.04$	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	$40^{+10}_{-10}$	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	$1020^{+430}_{-360}$	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	$1850^{+840}_{-840}$	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

11 событий LIGO O3 с февраля 2019



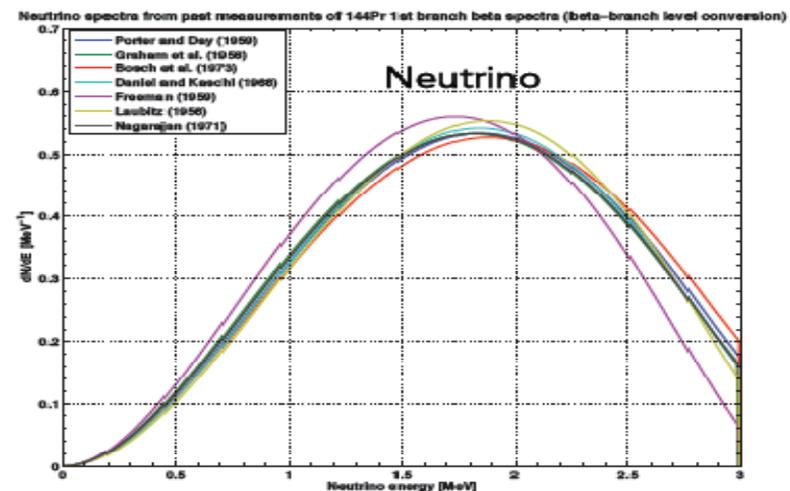
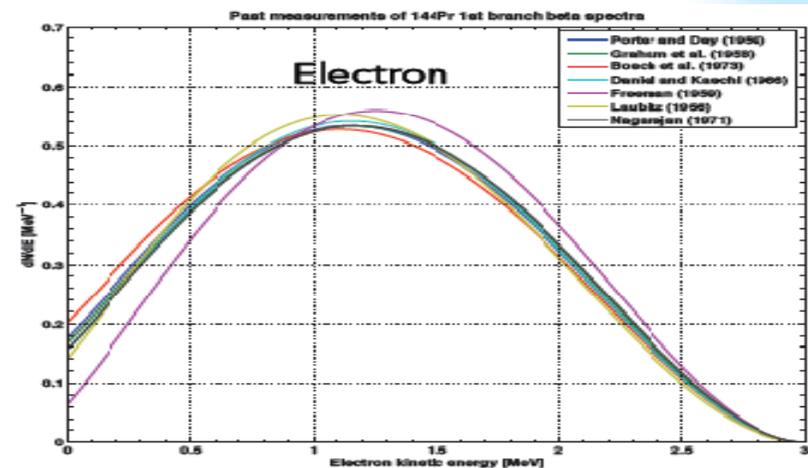
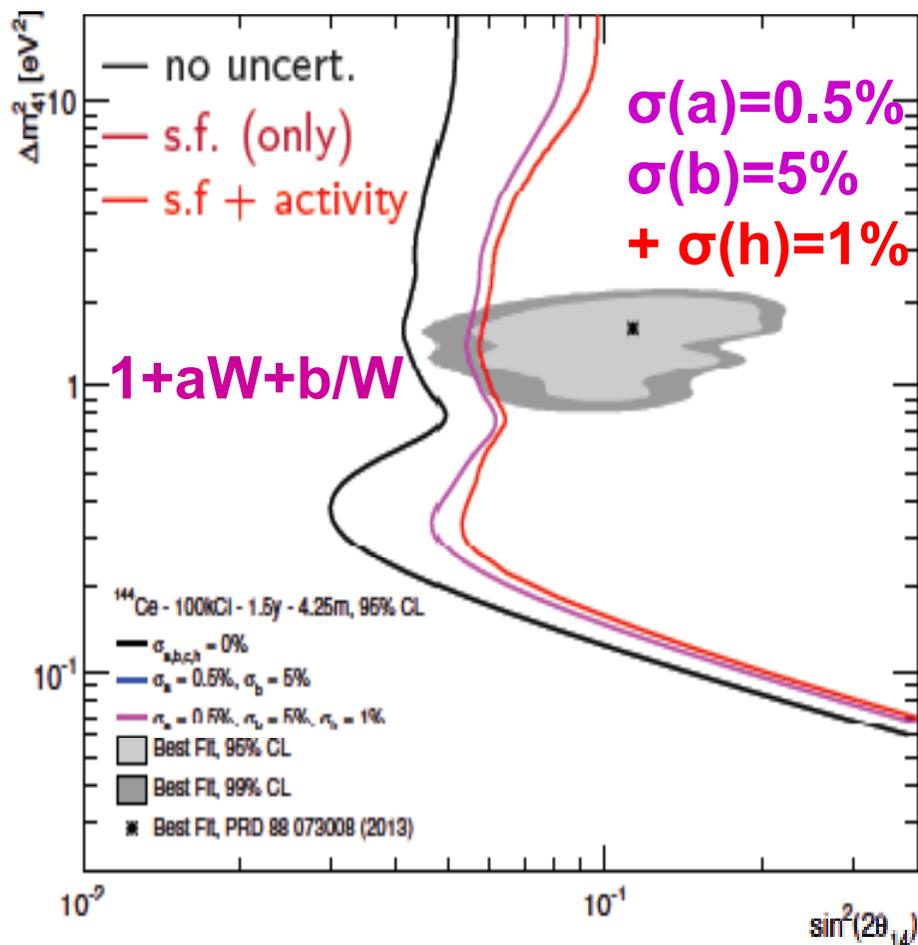
Группой ПИЯФ предложен и проводится анализ сигналов детектора Borexino с энергией более ~250 кэВ во временном окне  $\pm \sim 500$  сек относительно времени регистрации гравитационных волн. Найденные кандидаты реакции  $(\nu, e)$ -рассеяния с учетом событий от солнечных нейтрино и природного фона позволяют выделить вклад от нейтрино, связанных с ГВ, или установить ограничения на флюенсы нейтрино всех флэйвов  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ . Анаог SNEWS создается сейчас.

# Измерения бета-спектров $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ для определения спектра электронных антинейтрино



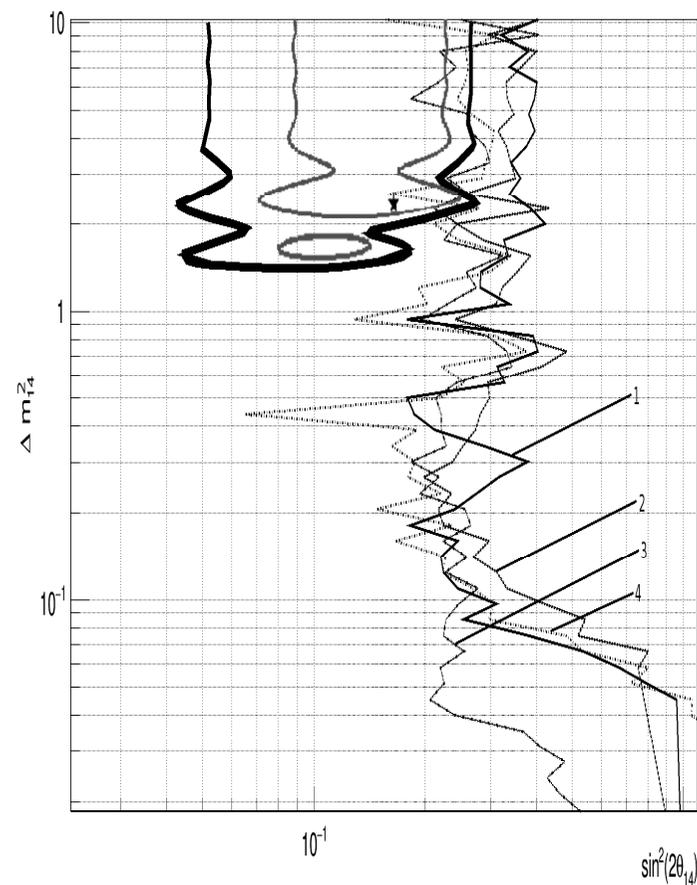
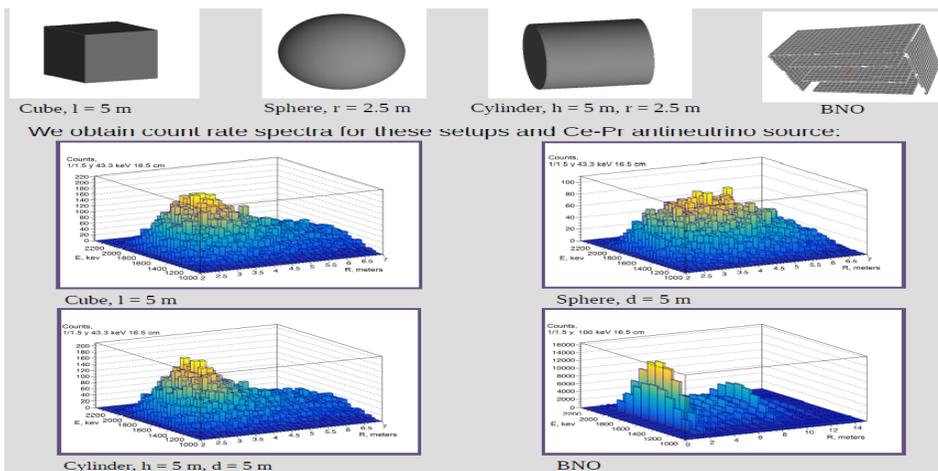
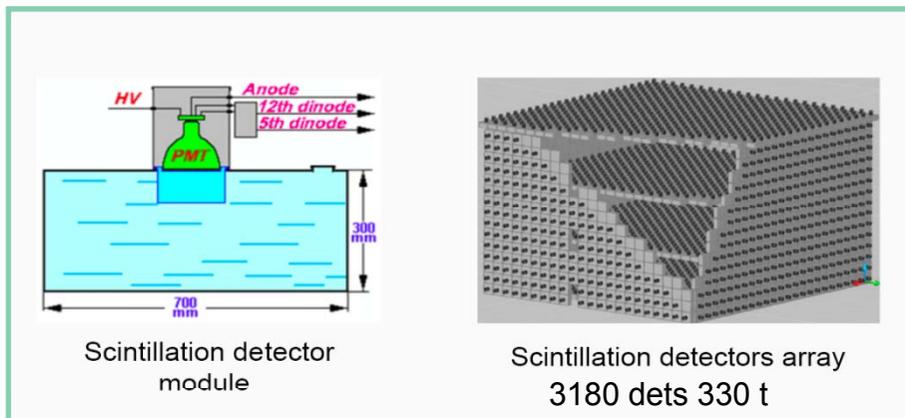
Наиболее подходящий источник нейтрино для поиска осцилляций в стерильное состояние с массой 1 эВ. Ядро  $^{144}\text{Ce}$  испытывает три неуникальных запрещенных бета-перехода 1-го порядка на основное и возбужденные уровни  $^{144}\text{Pr}$ . Распады  $^{144}\text{Pr}$  на основное и первое возбужденное состояние ядра  $^{144}\text{Nd}$  соответствуют неуникальному и уникальному запрещенным переходам 1-го порядка, соответственно. Распад на уровень ( $1^-$  2185 кэВ) является разрешенным переходом.

# Спектр нейтрино при распаде $^{144}\text{Pr}$



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

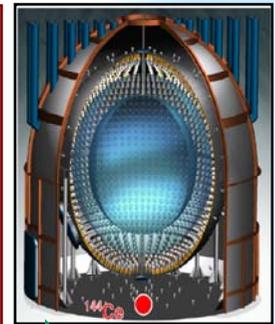
# Моделирование экспериментов с источником $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$



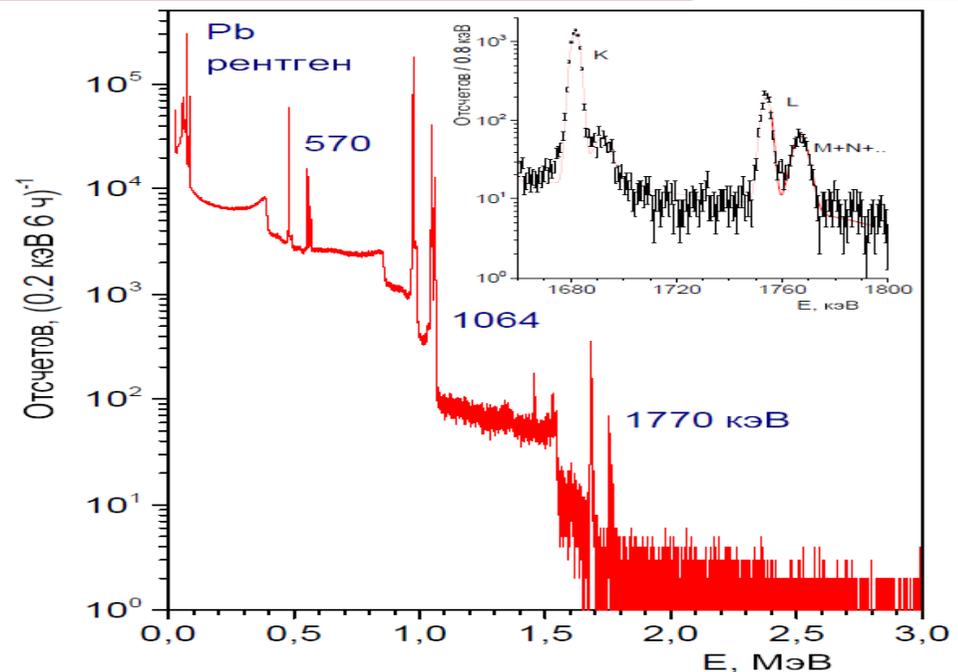
Чувствительность к осцилляционным параметрам стерильного нейтрино в эксперименте с источником  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  активностью 50 кКи при измерениях длительностью 1.5 года с различными детекторами (90% у.д.): 1 - Баксанская подземный нейтринный телескоп, 2 - кубический детектор, 3 - цилиндрический детектор, 4 - сферический детектор. Источник расположен на расстоянии 2 м от поверхности детекторов 2, 3 и 4 с характерным размером 5 м.

# Измерения бета-спектров $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ с целью определения спектра электронных антинейтрино для поиска стерильных нейтрино

В ПИЯФ разработан и создан **бета-спектрометр**, состоящий из Si(Li)-детектора полного поглощения и пролетного Si-детектора, который позволяет эффективно разделять бета-излучение ядер от сопутствующего рентгеновского и гамма-излучения. Метод основан на использовании совпадений между толстым и тонким детекторами. Спектрометр будет использоваться для прецизионного измерения формы бета-спектров различных радиоактивных ядер, в частности для измерения бета спектра  $^{144}\text{Pr}$ , наиболее перспективного источника антинейтрино для поиска осцилляций нейтрино в стерильное состояние в эксперименте **Borexino\_SOX**.



$^{144}\text{Pr}$



**A** - схема спектрометра; **B** – фото центральной части; **C** - спектр электронов  $^{207}\text{Bi}$ . Разрешение для  $480\text{ кэВ}$  электронов ПШПВ=1:8 кэВ; **D** - спектр источника  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ .

# Изучение функции отклика спектрометра (NIM A, 2018)

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 890 (2018) 64–67

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)



## Beta-spectrometer with Si-detectors for the study of $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$ decays

I.E. Alexeev<sup>d</sup>, S.V. Bakhlanov<sup>a</sup>, N.V. Bazlov<sup>a,b</sup>, E.A. Chmel<sup>a</sup>, A.V. Derbin<sup>a,\*</sup>, I.S. Drachnev<sup>a</sup>, I.M. Kotina<sup>a</sup>, V.N. Muratova<sup>a</sup>, N.V. Pilipenko<sup>a</sup>, D.A. Semyonov<sup>a</sup>, E.V. Unzhakov<sup>a</sup>, V.K. Yeremin<sup>c</sup>

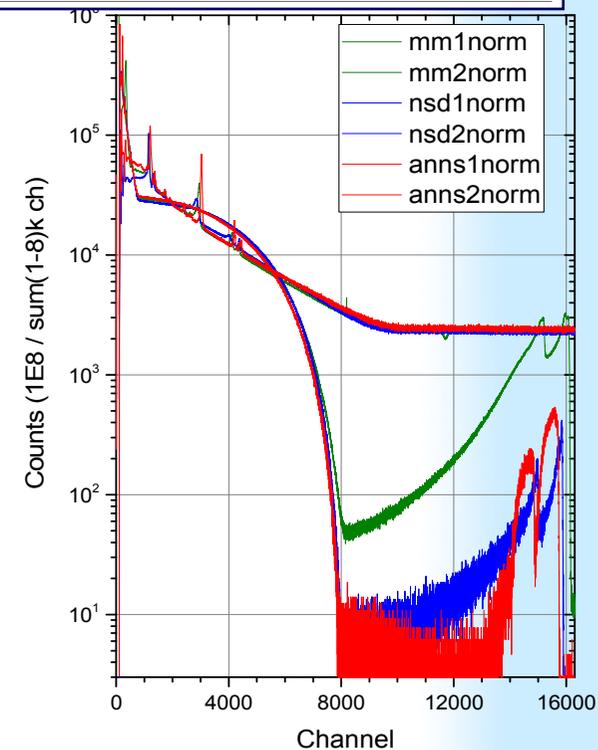
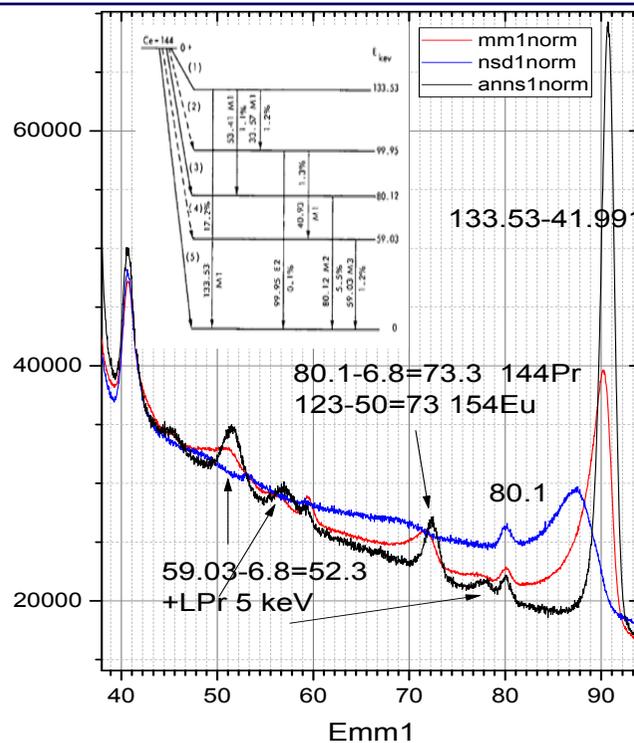
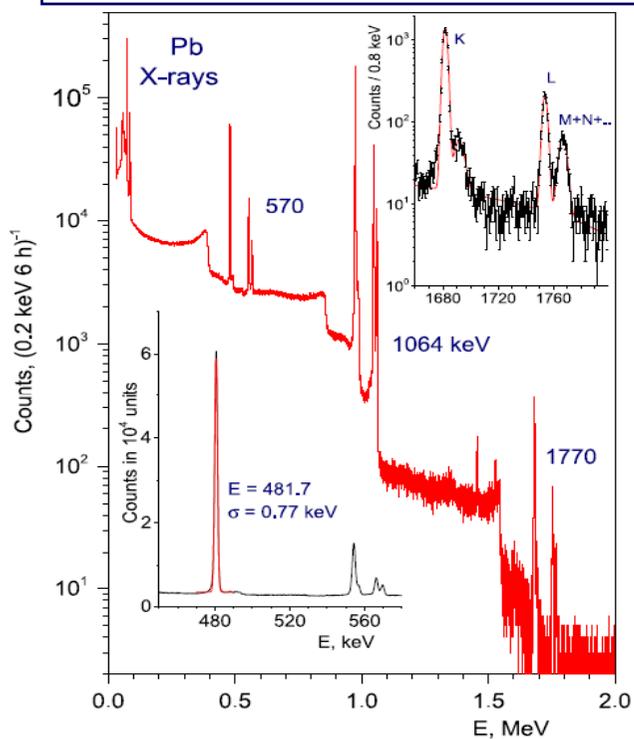


<sup>a</sup> St. Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina 18830, Russia

<sup>b</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia

<sup>c</sup> Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg 194021, Russia

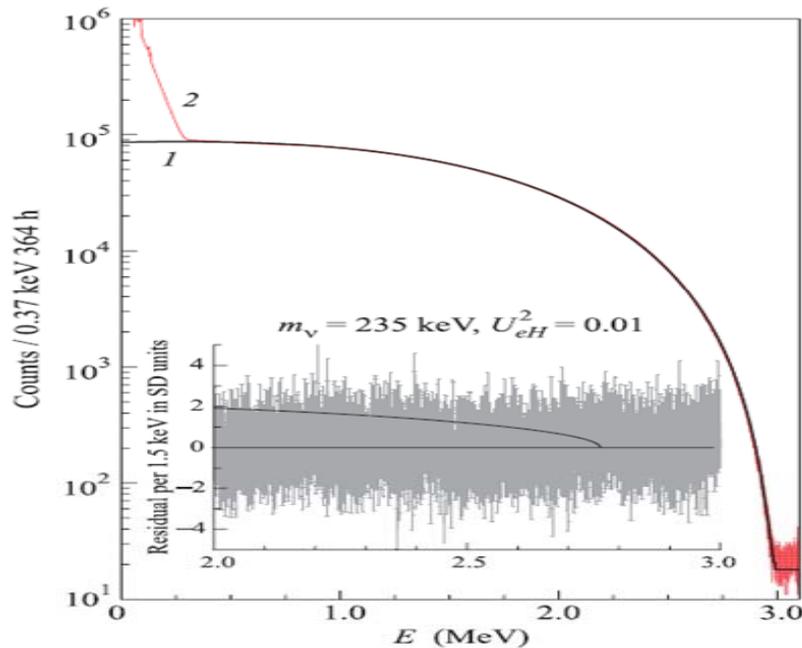
<sup>d</sup> V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg 194021, Russia



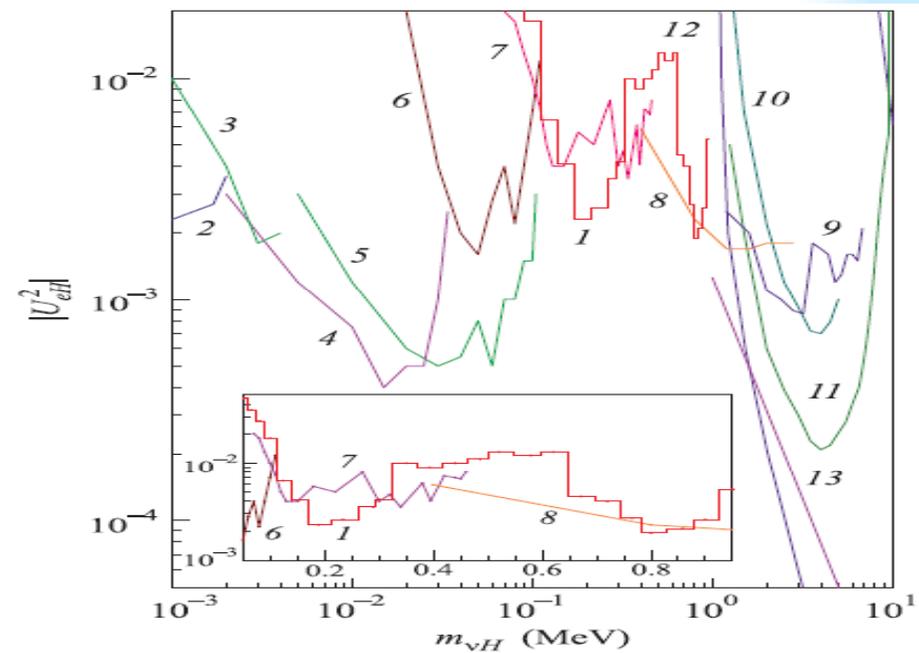
Определены отношения  $\alpha_K/(\alpha_L+\alpha_M+\alpha_N+\alpha_O) = 4.68 \pm 0.22$  и  $\alpha_L/(\alpha_M+\alpha_N+\alpha_O) = 2.25 \pm 0.22$  для 1770 кэВ

# Поиск тяжелого стерильного нейтрино в бета-распадах ядер $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$

В ПИЯФ измерены спектры электронов, возникающих при бета-распадах ядер  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$ . Источник  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  является одним из наиболее подходящих для изучения осцилляций нейтрино в стерильное состояние с массой около 1 эВ. Спектры проанализированы с целью поиска вклада от более тяжелого нейтрино. Для нейтрино с массой  $m_{\nu H}$  в интервале (150–350) кэВ установлены новые верхние ограничения на параметр смешивания на уровне  $|U_{eH}|^2 \leq (2 - 5) \times 10^{-3}$  для 90% у.д. Результаты опубликованы в журнале **Письма в ЖЭТФ 108, 531 (2018)**



Результат подгонки (1) бета-спектра  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  (2). На вставке приведена разница измеренного и теоретического спектров и дополнительный вклад в спектр в случае излучения нейтрино с массой 235 кэВ с вероятностью 1%.



Верхние пределы на параметр смешивания  $|U_{eH}|^2$ : настоящая работа (1) в сравнении с результатами измерений бета-спектров  $^3\text{H}$  (2, 3),  $^{63}\text{Ni}$  (4),  $^{35}\text{S}$  (5),  $^{45}\text{Ca}$  (6),  $^{64}\text{Si}$  (7),  $^{20}\text{F}$  (8, 9) и поиска распадов реакторных (10, 11) и солнечных  $^8\text{B}$ -нейтрино (12) и из распадов  $\pi$ - и  $K$ -мезонов (13)

## 4π бета спектрометр - 2 x 6 мм и 2 x 8 мм



Создана новая схема регистрации событий, основанная на последовательной записи событий с двух Si(Li)-детекторов и NaI-детектора с использованием новой электроники в стандарте VME/VXI (CAEN). Проведены измерения бета-спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  продолжительностью 2 месяца. В схему регистрации включен 6" NaI-детектор с целью выделения распадов ядер  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  на возбужденные уровни дочерних ядер.

# Планы коллаборации Борексино и новые задачи

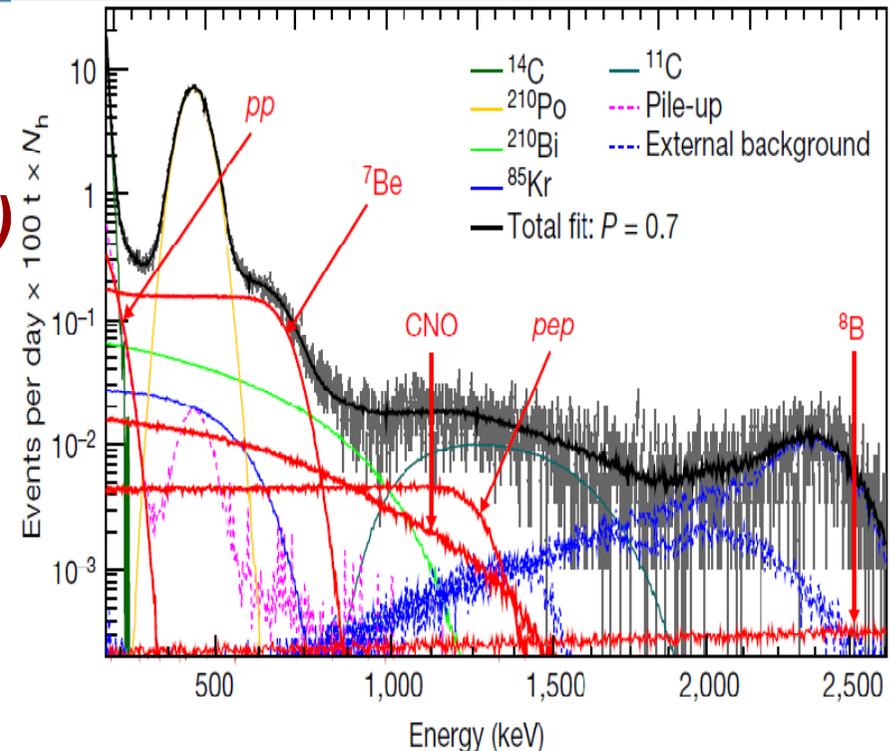
1. Измерение (обнаружение)

**CNO – нейтрино ( $^{210}\text{Bi}$ , ПИЯФ)**

2. Новые данные по гео-нейтрино, анти-нейтрино от Солнца и другим редким процессам.

3. Корреляции с гамма-всплесками, гравитационными волнами, солнечными вспышками, временные вар.

4. Поиск двойного бета-распада с Борексино ( $^{130}\text{Xe}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ )



# Поиск частиц темной материи в 2018

## 1. Поиск рассеяния WIMPs (N1) на ядрах Ar и электронах в эксперимент DARKSIDE-50,20k

(входим в группы Materials+Ti, Analysis+A.E.E., Calibration+252Cf)

## 2. Поиск солнечных и реликтовых аксионов (N2)

2.1 Работы по созданию  $^{169}\text{Tm}$ -содержащего детектора для регистрации резонансного поглощения солнечных аксионов с непрерывным спектром. Новые кристаллы из КИ – тулий содержащий гранат –  $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ .

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

2.3 Участие в коллаборации **IAXO** – International Axion Observatory (Новый проект **TASTE** – Troitsk Axion Solar Telescope Experiment, если будет поддержан)

# DarkSide collaboration

PHYSICAL REVIEW LETTERS 121, 081307 (2018)

Editors' Suggestion

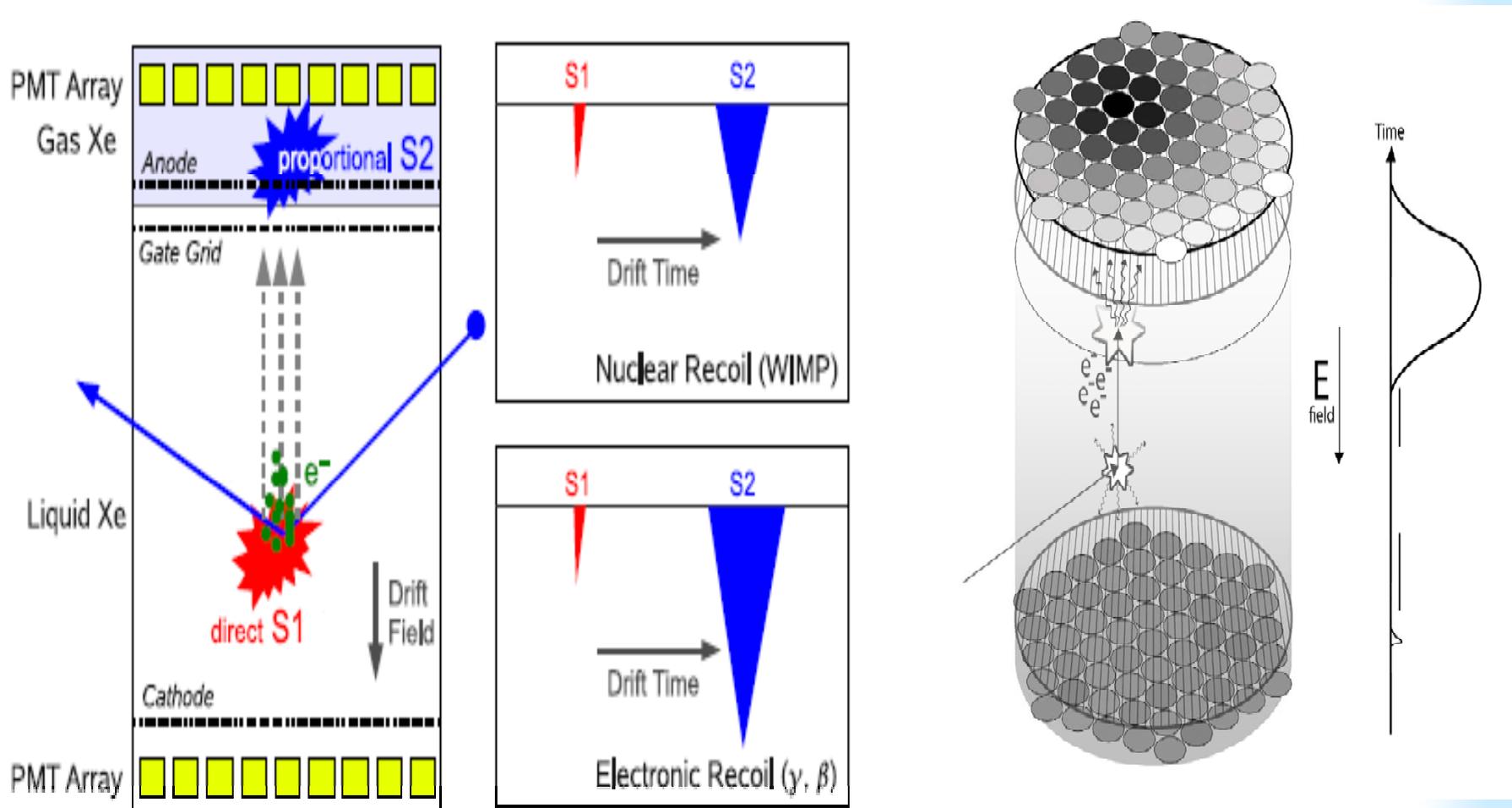
## Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment

P. Agnes,<sup>1</sup> I. F. M. Albuquerque,<sup>2</sup> T. Alexander,<sup>3</sup> A. K. Alton,<sup>4</sup> G. R. Araujo,<sup>2</sup> D. M. Asner,<sup>5</sup> M. Ave,<sup>2</sup> H. O. Back,<sup>3</sup> B. Baldin,<sup>6,4</sup> G. Batignani,<sup>7,8</sup> K. Biery,<sup>6</sup> V. Bocci,<sup>9</sup> G. Bonfini,<sup>10</sup> W. Bonivento,<sup>11</sup> B. Bottino,<sup>12,13</sup> F. Budano,<sup>14,15</sup> S. Bussino,<sup>14,15</sup> M. Cadeddu,<sup>16,11</sup> M. Cadoni,<sup>16,11</sup> F. Calaprice,<sup>17</sup> A. Caminata,<sup>13</sup> N. Canci,<sup>1,10</sup> A. Candela,<sup>10</sup> M. Caravati,<sup>16,11</sup> M. Cariello,<sup>13</sup> M. Carlini,<sup>10</sup> M. Carpinelli,<sup>18,19</sup> S. Catalanotti,<sup>20,21</sup> V. Cataudella,<sup>22,10</sup> P. Cavalcante,<sup>22,10</sup> S. Cavuoti,<sup>20,21</sup> R. Cereseto,<sup>13</sup> A. Chepurinov,<sup>23</sup> C. Cicalò,<sup>11</sup> L. Cifarelli,<sup>24,25</sup> A. G. Cocco,<sup>21</sup> G. Covone,<sup>20,21</sup> D. D'Angelo,<sup>26,27</sup> M. D'Incecco,<sup>10</sup> D. D'Urso,<sup>18,19</sup> S. Davini,<sup>13</sup> A. De Candia,<sup>20,21</sup> S. De Cecco,<sup>9,28</sup> M. De Deo,<sup>10</sup> G. De Filippis,<sup>20,21</sup> G. De Rosa,<sup>20,21</sup> M. De Vincenzi,<sup>14,15</sup> P. Demontis,<sup>18,19,29</sup> **A. V. Derbin,**<sup>30</sup> A. Devoto,<sup>16,11</sup> F. Di Eusanio,<sup>17</sup> G. Di Pietro,<sup>10,27</sup> C. Dionisi,<sup>9,28</sup> M. Downing,<sup>31</sup> E. Edkins,<sup>32</sup> A. Empl,<sup>1</sup> A. Fan,<sup>33</sup> G. Fiorillo,<sup>20,21</sup> K. Fomenko,<sup>34</sup> D. Franco,<sup>35</sup> F. Gabriele,<sup>10</sup> A. Gabrieli,<sup>18,19</sup> C. Galbiati,<sup>17,47</sup> P. Garcia Abia,<sup>36</sup> Chiara Ghiano,<sup>10</sup> S. Giagu,<sup>9,28</sup> C. Giganti,<sup>37</sup> G. K. Giovanetti,<sup>17</sup> O. Gorchakov,<sup>34</sup> A. M. Goretta,<sup>10</sup> F. Granato,<sup>38</sup> M. Gromov,<sup>23</sup> M. Guan,<sup>39</sup> Y. Guardincerri,<sup>6,†</sup> M. Gulino,<sup>40,19</sup> B. R. Hackett,<sup>32</sup> M. H. Hassanshahi,<sup>10</sup> K. Herber,<sup>6</sup> B. Hosseini,<sup>11</sup> D. Hughes,<sup>17</sup> P. Humble,<sup>3</sup> E. V. Hungerford,<sup>1</sup> Al. Ianni,<sup>10</sup> An. Ianni,<sup>17,10</sup> V. Ippolito,<sup>9</sup> I. James,<sup>14,15</sup> T. N. Johnson,<sup>41</sup> Y. Kahn,<sup>17</sup> K. Keeter,<sup>42</sup> C. L. Kendziora,<sup>6</sup> I. Kochanek,<sup>10</sup> G. Koh,<sup>17</sup> D. Korabely,<sup>34</sup> G. Korga,<sup>1,10</sup> A. Kubankin,<sup>43</sup> M. Kuss,<sup>7</sup> M. La Commara,<sup>20,21</sup> M. Lai,<sup>16,11</sup> X. Li,<sup>17</sup> M. Lisanti,<sup>17</sup> M. Lissia,<sup>11</sup> B. Loer,<sup>3</sup> G. Longo,<sup>20,21</sup> Y. Ma,<sup>39</sup> A. A. Machado,<sup>44</sup> I. N. Machulin,<sup>45,46</sup> A. Mandarano,<sup>47,10</sup> L. Mapelli,<sup>17</sup> S. M. Mari,<sup>14,15</sup> J. Maricic,<sup>32</sup> C. J. Martoff,<sup>38</sup> A. Messina,<sup>9,28</sup> P. D. Meyers,<sup>17</sup> R. Milincic,<sup>32</sup> S. Mishra-Sharma,<sup>17</sup> A. Monte,<sup>31</sup> M. Morrocchi,<sup>7</sup> B. J. Mount,<sup>42</sup> **V. N. Muratova,**<sup>30</sup> P. Musico,<sup>13</sup> R. Nania,<sup>25</sup> A. Navrer Agasson,<sup>37</sup> A. O. Nozdrina,<sup>45,46</sup> A. Oleinik,<sup>43</sup> M. Orsini,<sup>10</sup> F. Ortica,<sup>48,49</sup> L. Pagani,<sup>41</sup> M. Pallavicini,<sup>12,13</sup> L. Pandola,<sup>19</sup> E. Pantic,<sup>41</sup> E. Paoloni,<sup>7,8</sup> F. Pazzona,<sup>18,19</sup> K. Pelczar,<sup>10</sup> N. Pelliccia,<sup>48,49</sup> V. Pesudo,<sup>36</sup> A. Pocar,<sup>31</sup> S. Pordes,<sup>6</sup> S. S. Poudel,<sup>1</sup> D. A. Pugachev,<sup>45</sup> H. Qian,<sup>17</sup> F. Ragusa,<sup>26,27</sup> M. Razeti,<sup>11</sup> A. Razeto,<sup>10</sup> B. Reinhold,<sup>32</sup> A. L. Renshaw,<sup>1</sup> M. Rescigno,<sup>9</sup> Q. Riffard,<sup>35</sup> A. Romani,<sup>48,49</sup> B. Rossi,<sup>21</sup> N. Rossi,<sup>9</sup> D. Sablone,<sup>17,10</sup> O. Samoylov,<sup>34</sup> W. Sands,<sup>17</sup> S. Sanfilippo,<sup>15,14</sup> M. Sant,<sup>18,19</sup> R. Santorelli,<sup>36</sup> C. Savarese,<sup>47,10</sup> E. Scapparone,<sup>25</sup> B. Schlitzer,<sup>41</sup> E. Segreto,<sup>44</sup> **D. A. Semenov,**<sup>30</sup> A. Shchagin,<sup>43</sup> A. Sheshukov,<sup>34</sup> P. N. Singh,<sup>1</sup> M. D. Skorokhvatov,<sup>45,46</sup> O. Smirnov,<sup>34</sup> A. Sotnikov,<sup>34</sup> C. Stanford,<sup>17</sup> S. Stracka,<sup>7</sup> G. B. Suffritti,<sup>18,19,29</sup> Y. Suvorov,<sup>20,21,33,45</sup> R. Tartaglia,<sup>10</sup> G. Testera,<sup>13</sup> A. Tonazzo,<sup>35</sup> P. Trinchese,<sup>20,21</sup> **E. V. Unzhakov,**<sup>30</sup> M. Verducci,<sup>9,28</sup> A. Vishneva,<sup>34</sup> B. Vogelaar,<sup>22</sup> M. Wada,<sup>17,\*</sup> T. J. Waldrop,<sup>4</sup> H. Wang,<sup>33</sup> Y. Wang,<sup>33</sup> A. W. Watson,<sup>38</sup> S. Westerdale,<sup>17,8</sup> M. M. Wojcik,<sup>50</sup> M. Wojcik,<sup>51</sup> X. Xiang,<sup>17</sup> X. Xiang,<sup>33</sup> C. Yang,<sup>39</sup> Z. Ye,<sup>1</sup> C. Zhu,<sup>17</sup> A. Zichichi,<sup>24,25</sup> and G. Zuzel<sup>50</sup>

(DarkSide Collaboration)



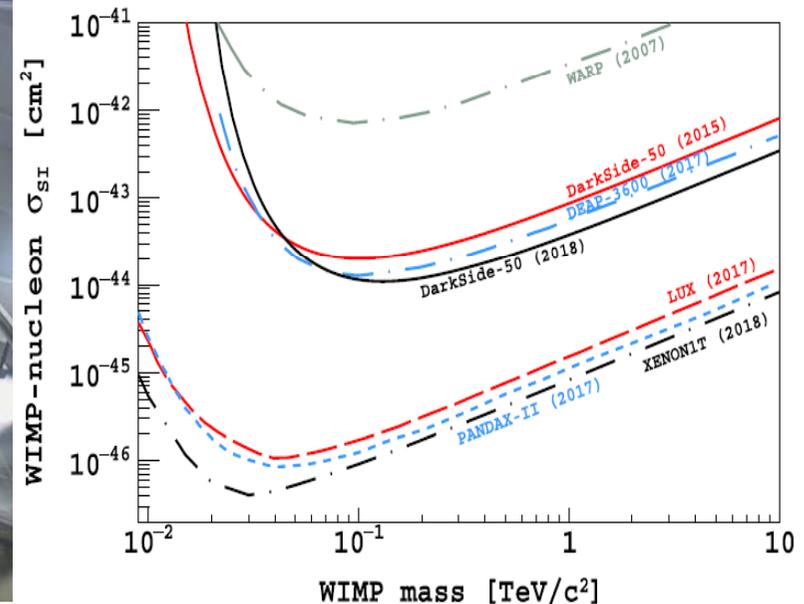
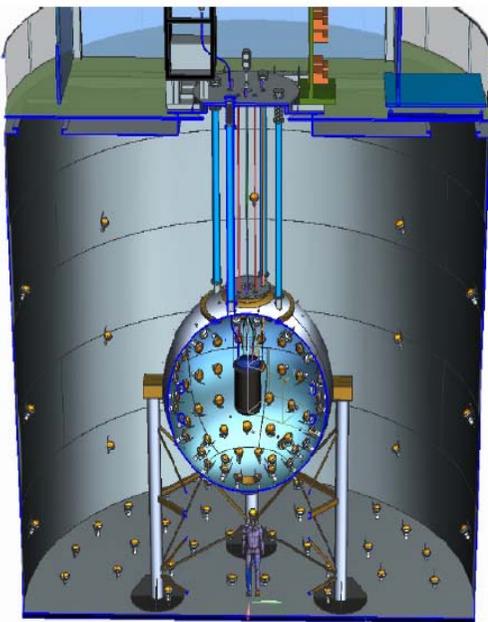
# Двухфазный детектор - 2 phases TPC



*S1 – сцинтилляционный сигнал, S2- сигнал электронов, продрейфовавших к поверхности. Временной интервал между S1 и S2 позволяет определить координату Z. Отношение амплитуд S1 и S2 используется для дискриминации событий от электрона и ядра отдачи. S2 восстановит x,y.*

## Результаты (2018 г) поиска темной материи с использованием низкорadioактивного аргона в детекторе DarkSide-50

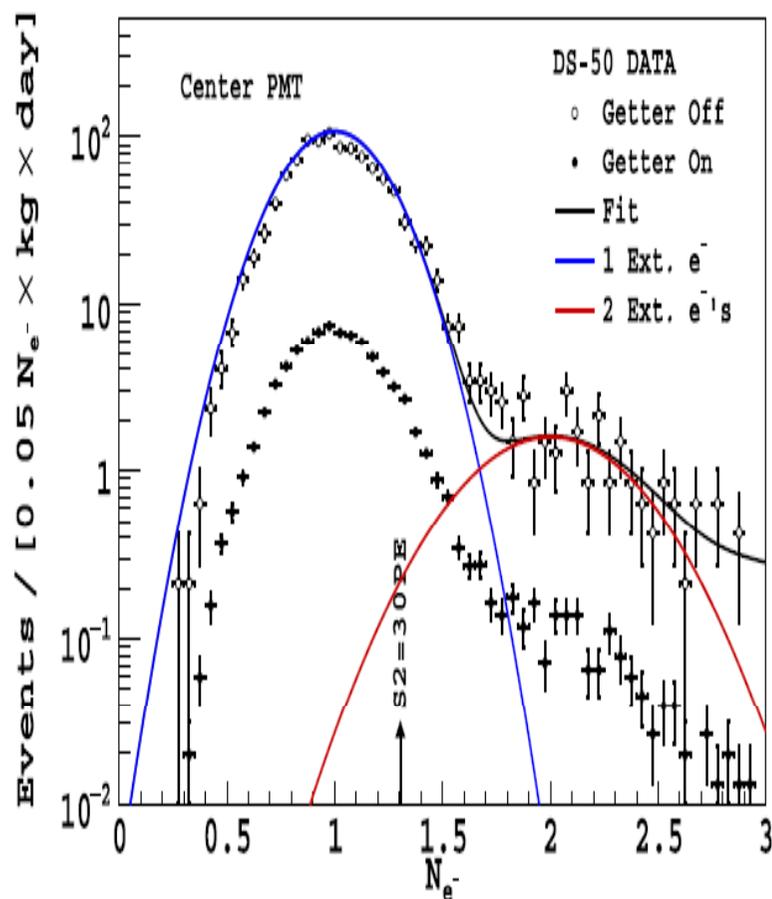
ПИЯФ участвует в работе коллаборации **DarkSide** с момента образования в 2010 г. **DarkSide** - двухфазный жидко-аргоновый 46 кг детектор. В 2016 году впервые в мире в установке использовался подземный аргон, в котором содержание р/а изотопа  $^{39}\text{Ar}$  в 1400 раз меньше, чем в атмосферном аргоне. В результате измерений со статистикой 16660 кг х сут установлены новые, **наиболее строгие для ядер Ar**, ограничения на спин-независимое сечение взаимодействия, которые составляют  $3.43 \times 10^{-43} \text{ см}^2$  для WIMPs с массой 1 ТэВ.



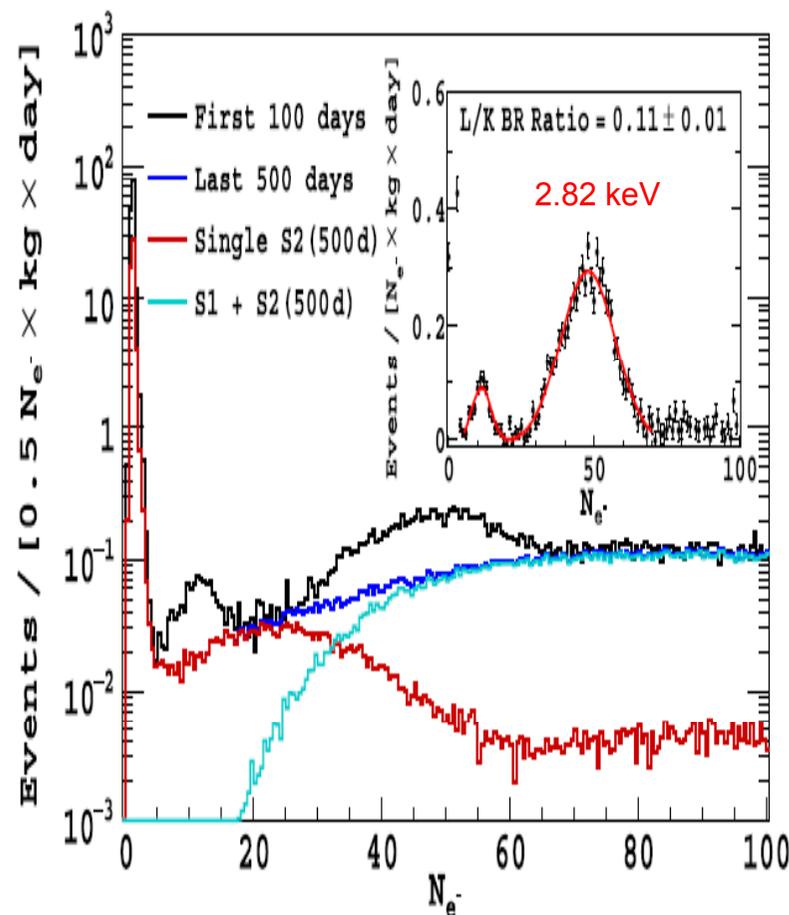
**TPC Ar-камера** находится внутри водного танка, который выполняет роль пассивной защиты от естественной радиоактивности и роль мюонного вето.

Верхние пределы на сечения взаимодействия **WIMPs** в зависимости от их массы. Пока достигнутая чувствительность хуже, чем в экспериментах **XENON1T** и **LUX**, использующих в качестве мишени ядра Хе.

## Эксперимент DarkSide: рекордная чувствительность при регистрации электролюминесцентного сигнала (S2)



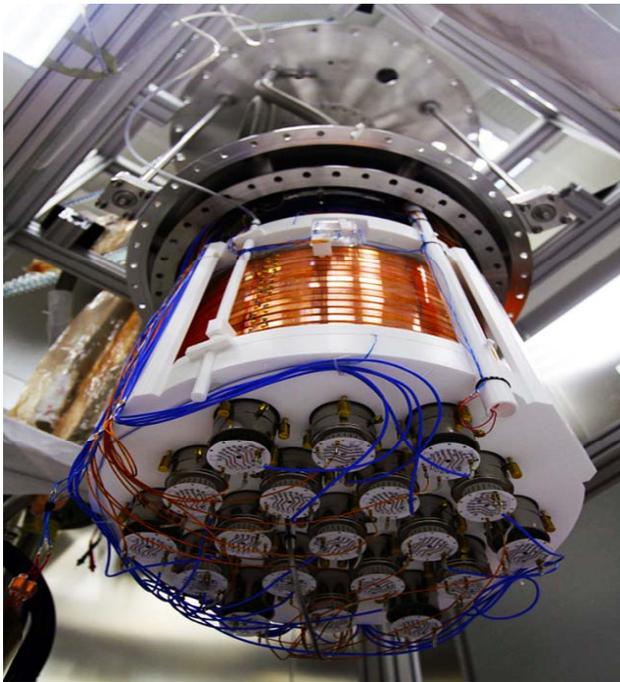
Спектр сигналов S2 DS-50 за 100 последних суток. Одно и двух электронные пики подавлены при отсутствии непрерывной очистки аргона.



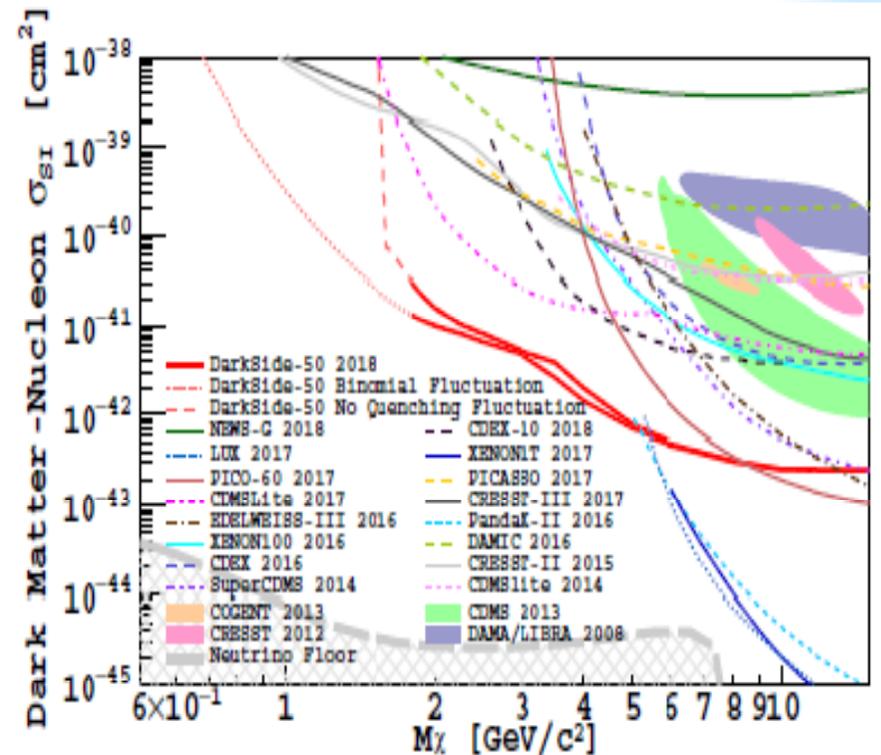
Спектр показывающий вклад  $^{37}\text{Ar}$  за первые 100 дней и последующие 500 суток. Отдельно показаны вклады сигналов S1 и S2.

## Эксперимент DarkSide: рекордная чувствительность при поиске ГэВ-ных частиц темной материи

Ученые НИЦ КИ ПИЯФ и НИЦ КИ совместно с участниками международной коллаборации DarkSide представили новые результаты по поиску частиц темной материи (WIMPs) с массой менее 20 ГэВ с помощью двухфазной жидкоаргоновой камеры. Установлены наиболее строгие пределы на спин-независимое сечение для частиц с массой 1.8-6.0 ГэВ. Также получены новые данные о рассеянии частиц темной материи на электронах. Результаты опубликованы в журналах *Phys. Rev. Lett.* 121, 081307 (2018) и *Phys. Rev. Lett.* 121, 111303 (2018)

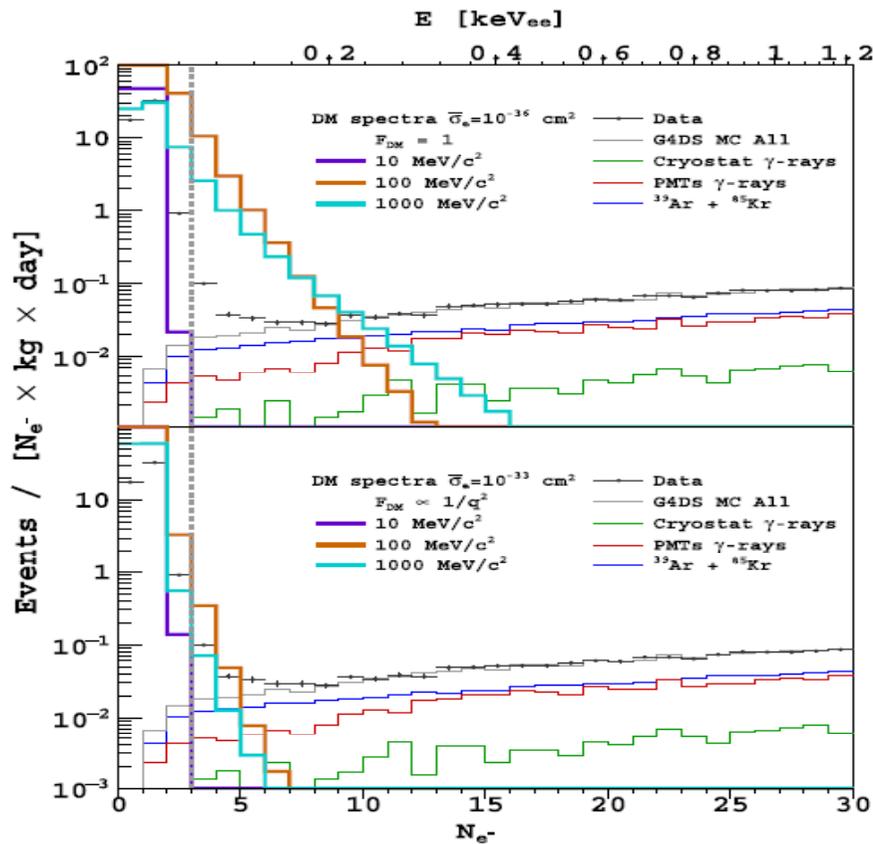


Детектор DarkSide-50, содержащий 46 кг жидкого Ar, расположен в подземной лаборатории Гран Сассо.

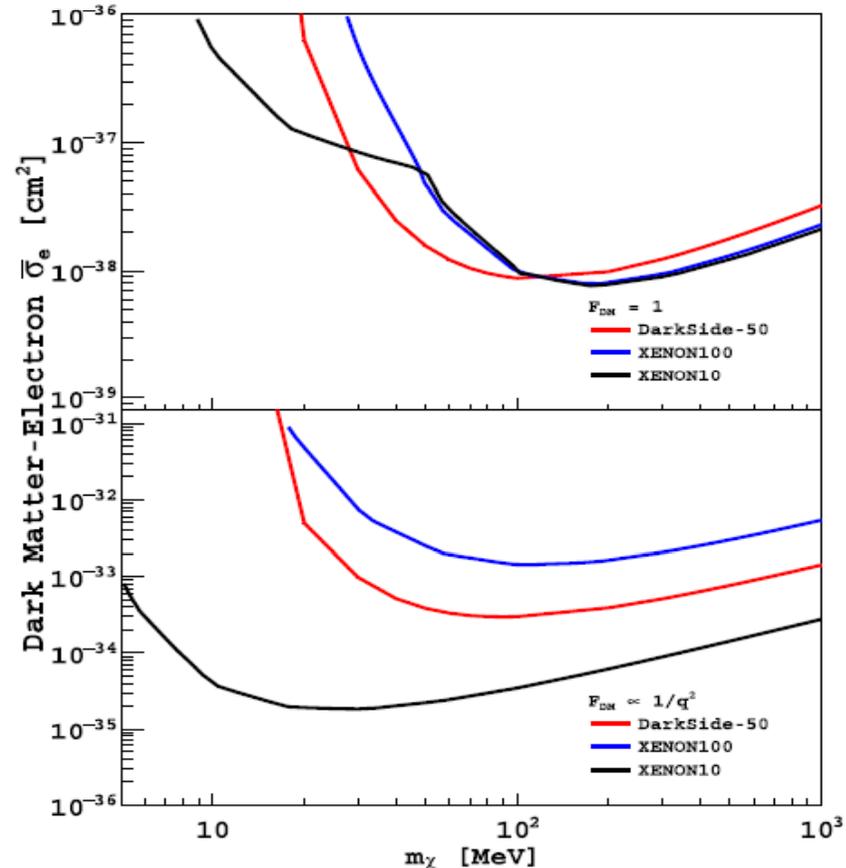


Верхний предел на спин-независимое сечение рассеяния WIMPs на ядрах Ar для 90 % у.д. в сравнении с результатами других экспериментов.

# Эксперимент DarkSide: рекордная чувствительность при поиске взаимодействия частиц темной материи с электроном

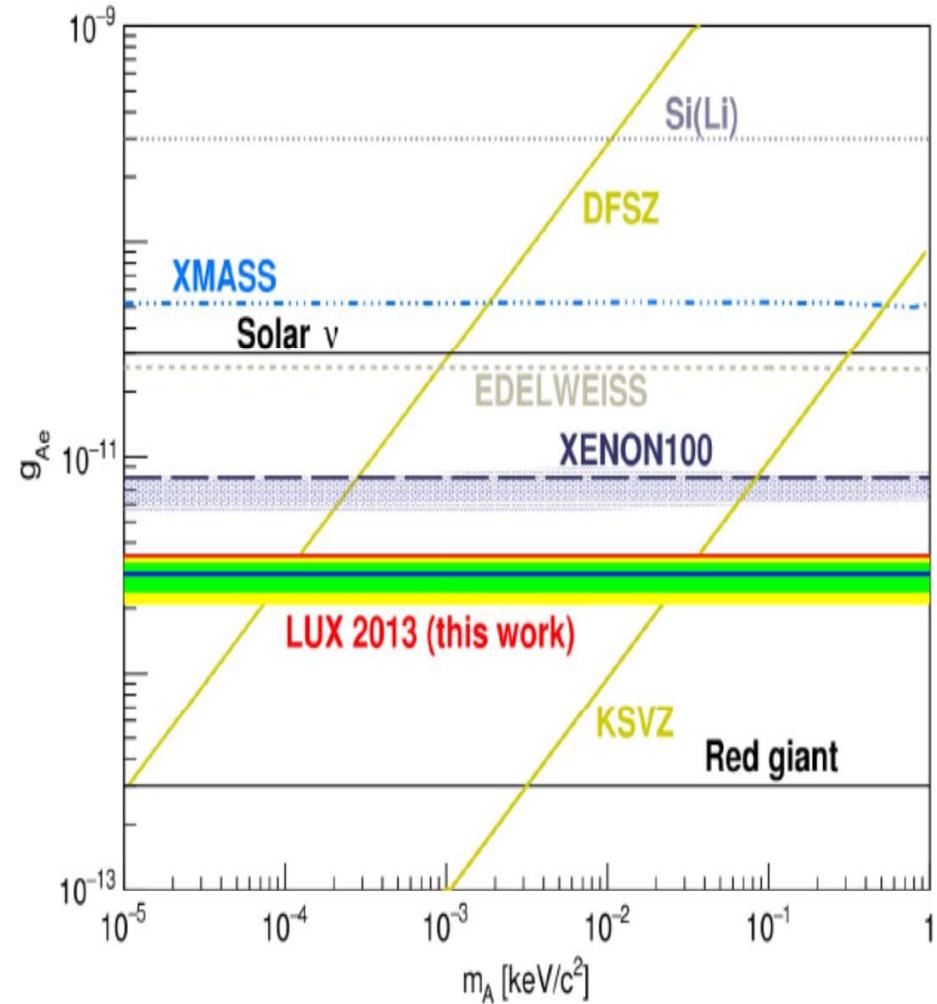
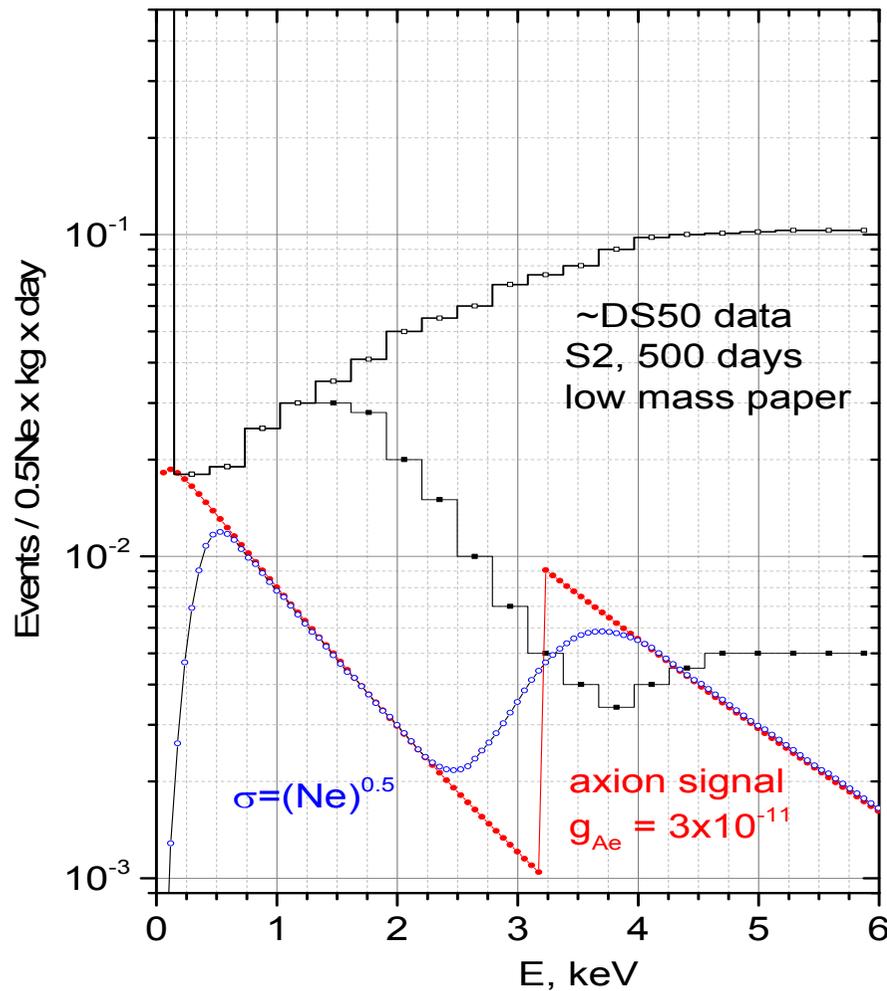


Спектр сигналов S2 DS-50 за 500 суток, в сравнении с ожидаемыми спектрами от рассеяния частиц темной материи с различными массами и сечениями рассеяния  $10^{-36} \text{ см}^2$  (вверху) и  $10^{-33} \text{ см}^2$  (внизу) для двух различных значений фактора  $F_{DM}$ .



Верхние пределы на сечение рассеяние частиц темной материи на электроном в зависимости от фактора  $F_{DM}=1$  (вверху) и  $F_{DM} \sim 1/q^2$  (внизу) в сравнении с результатами XENON

# Axioelectric effect for Ar atoms – DS50 results



Sensitivity to  $g_{\text{Ae}}$  at the level  $10^{-11}$  can be achieved with 500 days data.  $^{252}\text{Cf}$  neutron calibration source on the surface of Si(Li)-detector will be used for calibration.

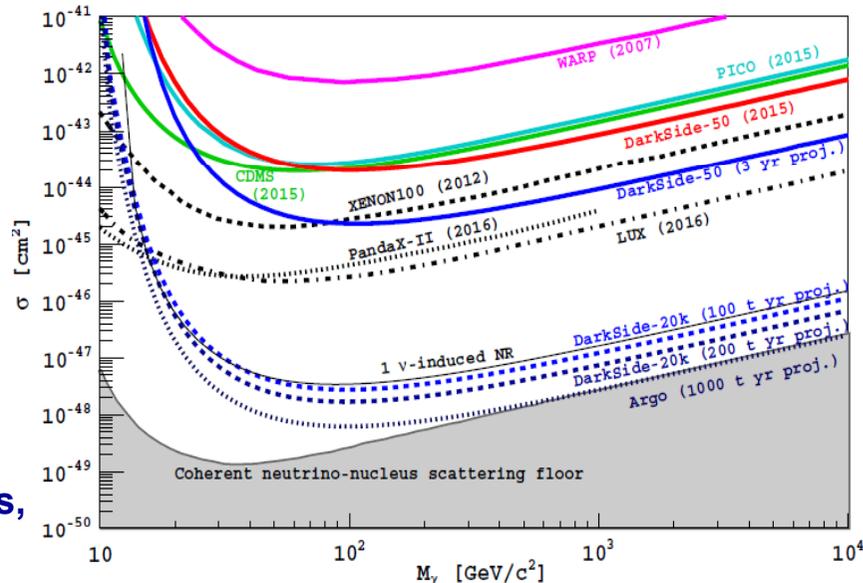
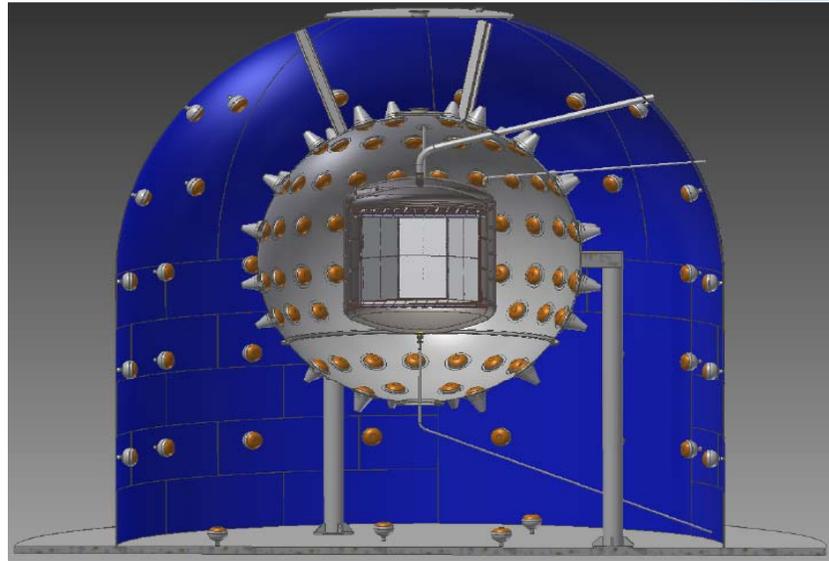
# DarkSide – 20K (прототип DarkSide 1T)

## DarkSide-20k: A 20 Tonne Two-Phase LAr TPC for Direct Dark Matter Detection at LNGS

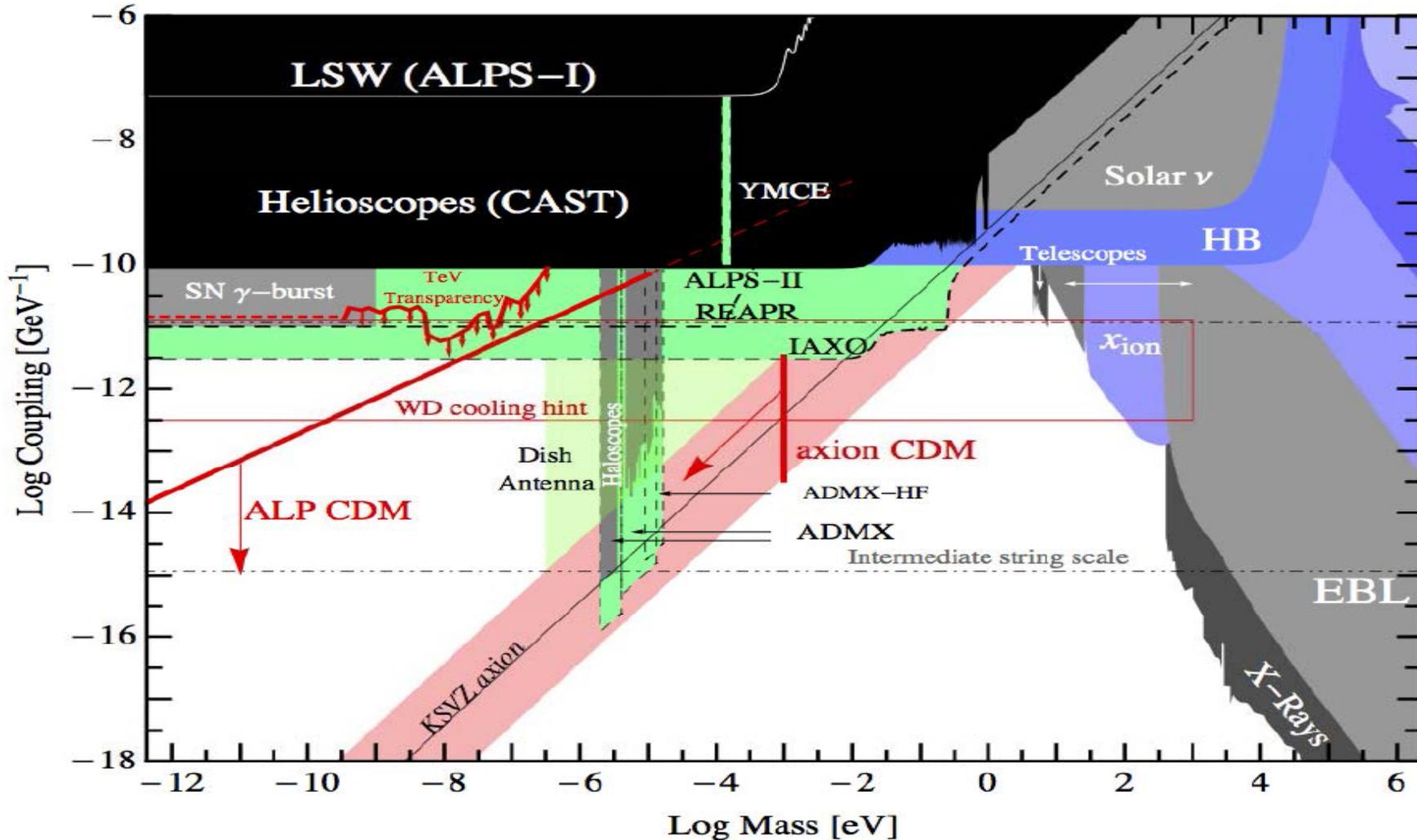
C. E. Aalseth<sup>1</sup>, F. Acerbi<sup>2,3</sup>, P. Agnes<sup>4</sup>, I. F. M. Albuquerque<sup>5</sup>, T. Alexander<sup>1</sup>, A. Alici<sup>6,7,8</sup>, A. K. Alton<sup>9</sup>, P. Antonioni<sup>7</sup>, S. Arelli<sup>7,8</sup>, R. Ardito<sup>10,11</sup>, I. J. Armut<sup>1</sup>, D. M. Asner<sup>1</sup>, M. Ave<sup>6</sup>, H. O. Back<sup>1</sup>, A. I. Barrado Olmedo<sup>12</sup>, G. Batignani<sup>13,14</sup>, E. Bertoldo<sup>15</sup>, S. Bettarini<sup>13,14</sup>, M. G. Bisogni<sup>13,14</sup>, V. Bocci<sup>16</sup>, A. Bondar<sup>17,18</sup>, G. Bonfini<sup>19</sup>, W. Bonivento<sup>20</sup>, M. Bossa<sup>21,19</sup>, B. Bottino<sup>22,23</sup>, M. Boulay<sup>7,2</sup>, R. Bunker<sup>1</sup>, S. Bussino<sup>24,25</sup>, A. Buzulutskov<sup>17,18</sup>, M. Cadeddu<sup>26,20</sup>, M. Cadoni<sup>26,20</sup>, A. Caminata<sup>23</sup>, N. Canci<sup>4,19</sup>, A. Candela<sup>19</sup>, C. Cantini<sup>27</sup>, M. Caravati<sup>26,20</sup>, M. Carli<sup>23</sup>, M. Carlini<sup>19</sup>, M. Carpinelli<sup>28,29</sup>, A. Castellani<sup>10,11</sup>, S. Catalanotti<sup>30,31</sup>, V. Cataudella<sup>30,31</sup>, P. Cavalcante<sup>19,32</sup>, S. Cavuoti<sup>30,31</sup>, R. Cereseto<sup>23</sup>, A. Chepurnov<sup>33</sup>, C. Cicalò<sup>20</sup>, L. Cifarelli<sup>6,7,8</sup>, M. Citterio<sup>11</sup>, A. G. Cocco<sup>31</sup>, M. Colocci<sup>7,8</sup>, S. Corgioli<sup>36,20</sup>, G. Covone<sup>30,31</sup>, P. Crivelli<sup>27</sup>, I. D'Antone<sup>7</sup>, M. D'Incecco<sup>19</sup>, D. D'Urso<sup>28</sup>, M. D. Da Rocha Rolo<sup>35</sup>, M. Daniel<sup>12</sup>, S. Davini<sup>21,19,23</sup>, A. de Candia<sup>30,31</sup>, S. De Cecco<sup>16,43</sup>, M. De Deo<sup>19</sup>, G. De Filippis<sup>30,31</sup>, G. De Guido<sup>38,11</sup>, G. De Rosa<sup>30,31</sup>, G. Dellacasa<sup>35</sup>, M. Della Valle<sup>39,31</sup>, P. Demontis<sup>28,29,40</sup>, **A. Derbin<sup>41</sup>**, A. Devoto<sup>26,20</sup>, F. Di Eusanio<sup>42</sup>, G. Di Pietro<sup>19,11</sup>, C. Dionisi<sup>16,43</sup>, A. Dolgov<sup>18</sup>, I. Dornia<sup>38,11</sup>, S. Dussoni<sup>14,13</sup>, A. Empl<sup>4</sup>, M. Fernandez Diaz<sup>12</sup>, A. Ferri<sup>2,3</sup>, C. Filip<sup>45</sup>, G. Fiorillo<sup>30,31</sup>, K. Fomenko<sup>46</sup>, D. Franco<sup>47</sup>, G. E. Froudakis<sup>48</sup>, F. Gabriele<sup>19</sup>, A. Gabrieli<sup>28,29</sup>, C. Galbiati<sup>42,11</sup>, P. Garcia Abia<sup>12</sup>, A. Gendotti<sup>27</sup>, A. Ghisi<sup>10,11</sup>, S. Giagu<sup>16,43</sup>, P. Giampa<sup>44</sup>, G. Gibertoni<sup>38,11</sup>, C. Giganti<sup>37</sup>, M. A. Giorgi<sup>14,13</sup>, G. K. Giovanetti<sup>42</sup>, M. L. Gligan<sup>45</sup>, A. Gola<sup>2,3</sup>, O. Gorchakov<sup>46</sup>, A. M. Goretto<sup>19</sup>, F. Granato<sup>49</sup>, M. Grassi<sup>13</sup>, J. W. Grate<sup>1</sup>, G. Y. Grigoriev<sup>50</sup>, M. Gromov<sup>33</sup>, M. Guan<sup>51</sup>, M. B. B. Guerra<sup>52</sup>, M. Guerzoni<sup>7</sup>, M. Daniel<sup>53,29</sup>, R. K. Haaland<sup>54</sup>, A. Hallin<sup>73</sup>, B. Harrop<sup>42</sup>, E. W. Hoppe<sup>1</sup>, S. Horiakawa<sup>27</sup>, B. Hossien<sup>20</sup>, D. Hughes<sup>42</sup>, P. Humble<sup>1</sup>, E. V. Hungerford<sup>4</sup>, An. Ianni<sup>42,19</sup>, C. Jillings<sup>74,75</sup>, T. N. Johnson<sup>55</sup>, K. Keeter<sup>52</sup>, C. L. Kendziora<sup>56</sup>, S. Kim<sup>49</sup>, G. Koh<sup>42</sup>, D. Korabely<sup>46</sup>, G. Korga<sup>4,19</sup>, A. Kubankin<sup>57</sup>, M. Kuss<sup>13</sup>, M. Kuźniak<sup>72</sup>, B. Lehnert<sup>72</sup>, X. Li<sup>42</sup>, M. Lissia<sup>20</sup>, G. U. Lodi<sup>38,11</sup>, B. Loer<sup>1</sup>, G. Longo<sup>30,31</sup>, P. Loverre<sup>16,43</sup>, R. Lussana<sup>58,11</sup>, L. Luzzi<sup>59,11</sup>, Y. Ma<sup>51</sup>, A. A. Machado<sup>60</sup>, I. N. Machulin<sup>50,61</sup>, A. Mandarano<sup>21,19</sup>, L. Mapelli<sup>42</sup>, M. Marcante<sup>62,3,2</sup>, A. Margotti<sup>7</sup>, S. M. Mari<sup>24,25</sup>, M. Mariani<sup>59,11</sup>, J. Maricic<sup>63</sup>, C. J. Martoff<sup>49</sup>, M. Mascia<sup>36,20</sup>, M. Mayer<sup>1</sup>, A. B. McDonald<sup>76</sup>, A. Messina<sup>16,43</sup>, P. D. Meyers<sup>42</sup>, R. Milincic<sup>63</sup>, A. Moggi<sup>13</sup>, S. Moiola<sup>38,11</sup>, J. Monroe<sup>65</sup>, A. Monte<sup>65</sup>, M. Morrocchi<sup>14,13</sup>, B. J. Mount<sup>52</sup>, W. Mu<sup>27</sup>, **V. N. Muratova<sup>41</sup>**, S. Murphy<sup>27</sup>, P. Musico<sup>23</sup>, R. Nania<sup>6,7</sup>, A. Navar Agasson<sup>37</sup>, I. Nikulin<sup>57</sup>, V. Novov<sup>17,18</sup>, A. O. Nozdrina<sup>50,61</sup>, N. N. Nurakhov<sup>60</sup>, A. Oleinik<sup>57</sup>, V. Oleynikov<sup>17,18</sup>, M. Orini<sup>19</sup>, F. Ortica<sup>66,67</sup>, L. Pagani<sup>22,23</sup>, M. Pallavicini<sup>22,23</sup>, S. Palmas<sup>36,20</sup>, L. Pandola<sup>29</sup>, E. Pantic<sup>55</sup>, E. Paoloni<sup>13,14</sup>, G. Paternoster<sup>2,3</sup>, V. Pavletcov<sup>33</sup>, F. Pazzona<sup>28,29</sup>, S. Peeters<sup>77</sup>, K. Pelczar<sup>19</sup>, L. A. Pellegrini<sup>38,11</sup>, N. Pelliccia<sup>66,67</sup>, F. Perotti<sup>10,11</sup>, R. Perruzza<sup>19</sup>, V. Pseudo Fortes<sup>12</sup>, C. Piemonte<sup>2,3</sup>, F. Pilo<sup>13</sup>, A. Pocar<sup>65</sup>, T. Pollmann<sup>78</sup>, D. Portaluppi<sup>58,11</sup>, D. A. Pugachev<sup>50</sup>, H. Qian<sup>42</sup>, B. Radics<sup>27</sup>, F. Raffaelli<sup>13</sup>, F. Ragusa<sup>69,11</sup>, M. Razeti<sup>40</sup>, A. Razeto<sup>19</sup>, V. Regazzoni<sup>62,3,2</sup>, C. Regenfus<sup>27</sup>, B. Reinhold<sup>53</sup>, A. L. Renshaw<sup>4</sup>, M. Rescigno<sup>16</sup>, F. Retière<sup>44</sup>, Q. Riffard<sup>47</sup>, A. Rivetti<sup>35</sup>, S. Rizzardini<sup>42</sup>, A. Romani<sup>66,67</sup>, L. Romero<sup>12</sup>, B. Rossi<sup>31</sup>, N. Rossi<sup>19</sup>, A. Rubbia<sup>27</sup>, D. Sablone<sup>42,19</sup>, P. Salatino<sup>70,31</sup>, O. Samoylov<sup>46</sup>, E. Sánchez García<sup>12</sup>, W. Sands<sup>42</sup>, M. Sant<sup>28,29</sup>, R. Santorelli<sup>12</sup>, C. Savarese<sup>21,19</sup>, E. Scapparone<sup>7</sup>, B. Schitzer<sup>55</sup>, G. Scioli<sup>7,8</sup>, E. Segreto<sup>60</sup>, A. Seifert<sup>1</sup>, **D. A. Semenov<sup>41</sup>**, A. Shehagin<sup>57</sup>, L. Shekhtman<sup>17,18</sup>, E. Shemyakina<sup>17,18</sup>, A. Sheshukov<sup>46</sup>, M. Simeone<sup>70,31</sup>, P. N. Singh<sup>4</sup>, P. Skensved<sup>76</sup>, M. D. Skorokhvatov<sup>50,61</sup>, O. Smirnov<sup>46</sup>, G. Sobrero<sup>23</sup>, A. Sokolov<sup>17,18</sup>, A. Sotnikov<sup>46</sup>, F. Speciale<sup>29</sup>, R. Stainforth<sup>72</sup>, C. Stanford<sup>42</sup>, G. B. Suffritti<sup>28,29,40</sup>, Y. Suvorov<sup>71,19,50</sup>, R. Tartaglia<sup>19</sup>, G. Testera<sup>23</sup>, A. Tonazzo<sup>47</sup>, A. Tosi<sup>58,11</sup>, P. Trinchese<sup>30,31</sup>, **E. V. Unzhakov<sup>41</sup>**, A. Vacca<sup>36,20</sup>, E. Vázquez-Jauregui<sup>79</sup>, M. Verducci<sup>16,43</sup>, T. Viant<sup>27</sup>, F. Villa<sup>58,11</sup>, A. Vishneva<sup>46</sup>, B. Vogelaar<sup>32</sup>, M. W. W. Wong<sup>42</sup>, J. W. W. Wong<sup>42</sup>, J. W. W. Wong<sup>42</sup>, J. W. W. Wong<sup>42</sup>, J. W. W. Wong<sup>42</sup>, A. W. Watson<sup>49</sup>, S. Westerdale<sup>5</sup>, R. Williams<sup>5</sup>, M. M. Wojcik<sup>5</sup>, S. Wu<sup>1</sup>, X. Xiang<sup>1</sup>, X. Xiao<sup>1</sup>, C. Yang<sup>51</sup>, Z. Ye<sup>4</sup>, A. Yllera de Llano<sup>12</sup>, F. Zappa<sup>58</sup>, A. Zappalà<sup>58</sup>, A. Zappalà<sup>58</sup>, A. Zappalà<sup>58</sup>, M. Zullo<sup>16</sup>, A. Zullo<sup>16</sup>, and G. Zuzel<sup>68</sup>

arXiv:1707.08145v1 [physics.ins-det] 25 Jul 2017

Входим в группы Materials, Analysis, Calibration+252Cf



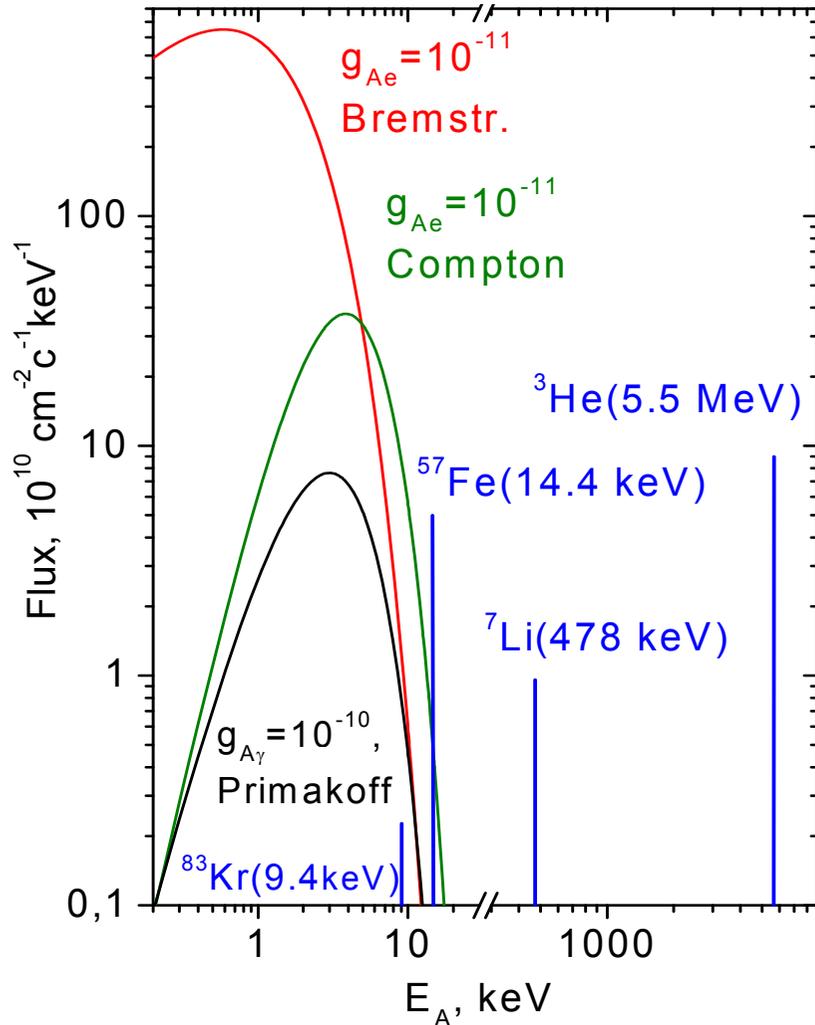
# Аксионы + аксионоподобные частицы ALPs



**Аксионы:** CP-проблема + темная материя. **ALPs** – Axion like particles: Аномальная прозрачность + динамика звезд различных типов. Слово *axion* в названии статей, выложенных в arXiv в 2017 г, встречается всего в 3 (760/232) раз реже чем слово *neutrino*



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

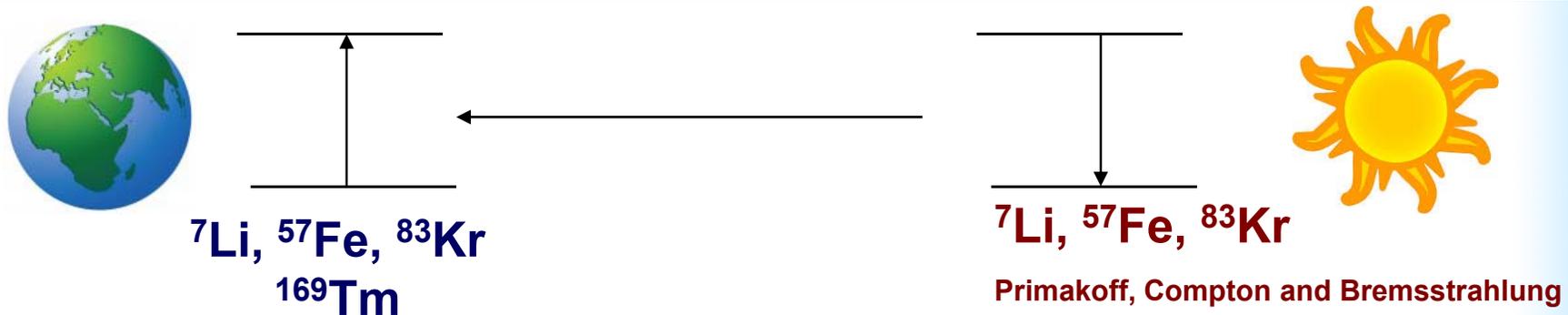
5. Compton process:  $\gamma + e \rightarrow e + A$ . ( $g_{Ae}$ )

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.

## Detection of axions via resonant excitation of nuclear levels

*The axions can be produced when thermally excited nuclei (or excited due to nuclear reactions) in the Sun relaxes by magnetic transition to its ground state and could be detected via resonant excitation of the same nuclide in a laboratory.*



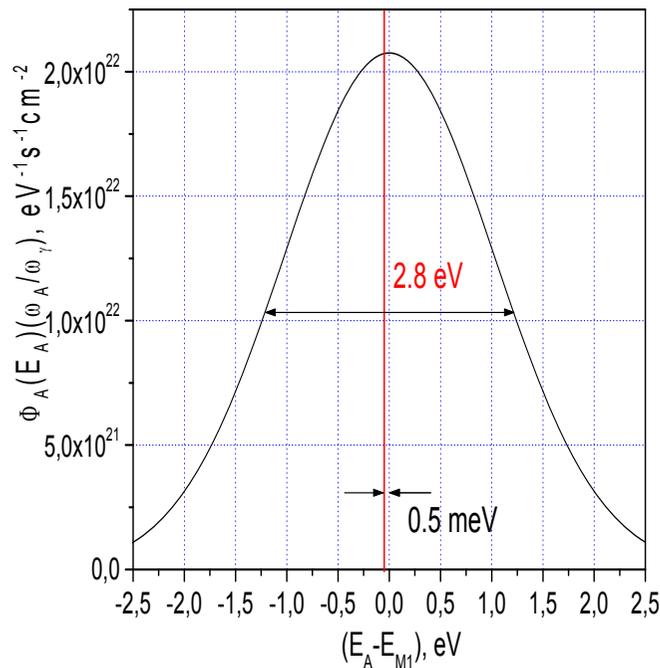
*The monochromatic axions emitted by  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{57}\text{Fe}$  and  ${}^{83}\text{Kr}$  nuclei can excite the same nuclide in a laboratory, because the axions are Doppler broadened due to thermal motion of the axion emitter in the Sun, and thus some axions have needed energy to excite the nuclide.*

*The axions from Primakoff, Compton and bremsstrahlung processes with wide continues energy spectra can also excite low-lying levels of some nuclei. The more suitable isotopes are  ${}^{83}\text{Kr}$  and  ${}^{169}\text{Tm}$ .*

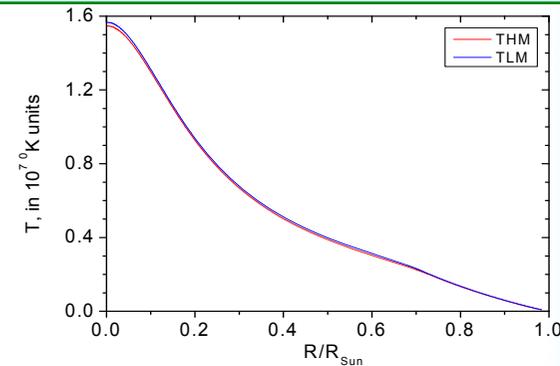
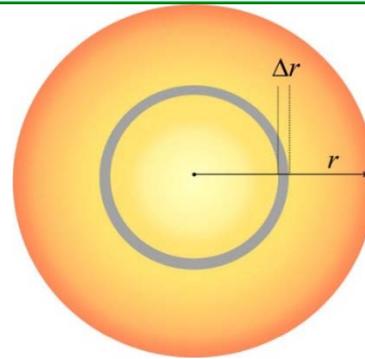


# Flux of solar $^{83}\text{Kr}$ axions

The total axion flux  $\Phi_A$  depends on the level energy  $E_\gamma = 9.4$  keV, temperature  $T$ , nuclear level lifetime  $\tau_\gamma = 3.6$   $\mu\text{s}$ , the abundance of the  $^{83}\text{Kr}$  isotope on the Sun  $N$ , and the branching ratio of axions to photons emission  $\omega_A/\omega_\gamma$ :



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



$$\Phi_A(E_{M1}) = 5.97 \times 10^{23} \left( \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \right) \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$$

Owing to the Doppler broadening, the axion spectrum is a sum of Gaussian curves,  $\Phi_A(E_A)$ , with the dispersion  $\sigma(T) = E_\gamma (kT/M)^{1/2}$ , where  $T$  is the temperature at the point where the axion is emitted and  $M$  is the mass of the  $^{83}\text{Kr}$  nucleus.



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

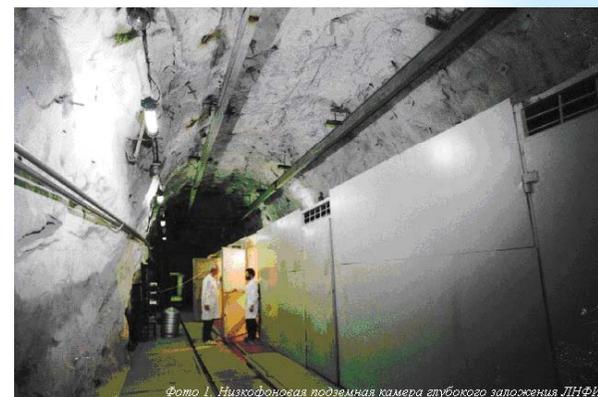


Фото 1. Низкофоновая подземная камера глубокого заложения ЛНФИ.

A large proportional counter (LPC) with a casing of copper is used. The LPC is a cylinder with inner and outer diameters of 137 and 150 mm, respectively. A gold-plated tungsten wire of 10  $\mu\text{m}$  in diameter is stretched along the LPC axis and is used as an anode. The fiducial length of the LPC is 595 mm, and the volume is 8.77 L. Gas pressure is 5.6 bar, and corresponding mass of the  $^{83}\text{Kr}$ -isotope in fiducial volume of the LPC is 101 g. The LPC is surrounded by passive shield made of copper (20 cm), lead (20 cm) and polyethylene (8 cm). The setup is located at the depth of 4700 m w.e., where the cosmic ray flux is reduced by  $\sim 10^7$  times and evaluated as 2.6  $\mu\text{ons m}^{-2} \text{d}^{-1}$ .

# Limits on $^{83}\text{Kr}$ axion mass $\leq 12.7$ eV (95% c.l.)

Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 10, с. 617–622

© 2018 г. 25 мая

## Новые ограничения на константу связи аксиона с фотоном для солнечных аксионов

Ю. М. Гаврилюк<sup>+</sup>, А. Н. Гангапшев<sup>+</sup>, А. В. Дербин<sup>\*1)</sup>, И. С. Драчнев<sup>\*</sup>, В. В. Казалов<sup>+</sup>, В. В. Кобычев<sup>×</sup>,  
В. В. Кузьминов<sup>+</sup>, В. Н. Муратова<sup>\*</sup>, С. И. Панасенко<sup>+</sup>, С. С. Раткевич<sup>+</sup>, Д. А. Текуева<sup>+</sup>, Е. В. Унжаков<sup>\*</sup>,  
С. П. Якименко<sup>+</sup>

<sup>+</sup>Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

<sup>\*</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,  
Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 188300 Гатчина, Россия

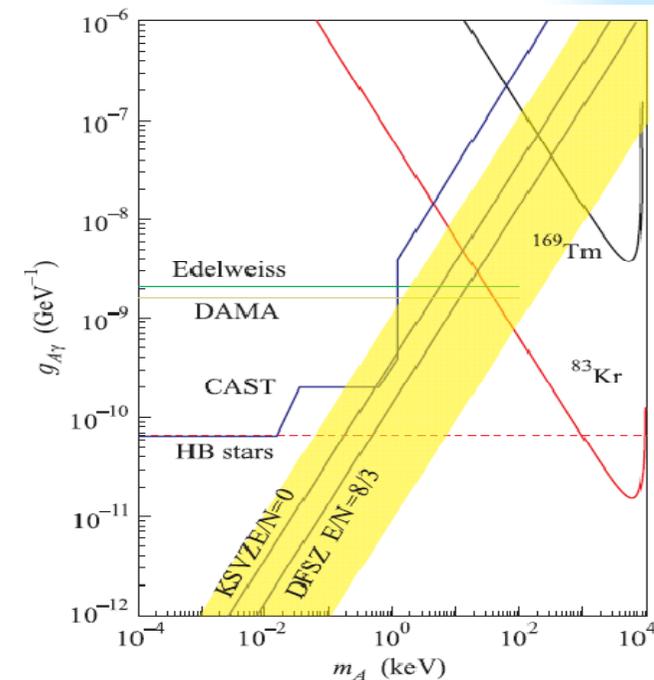
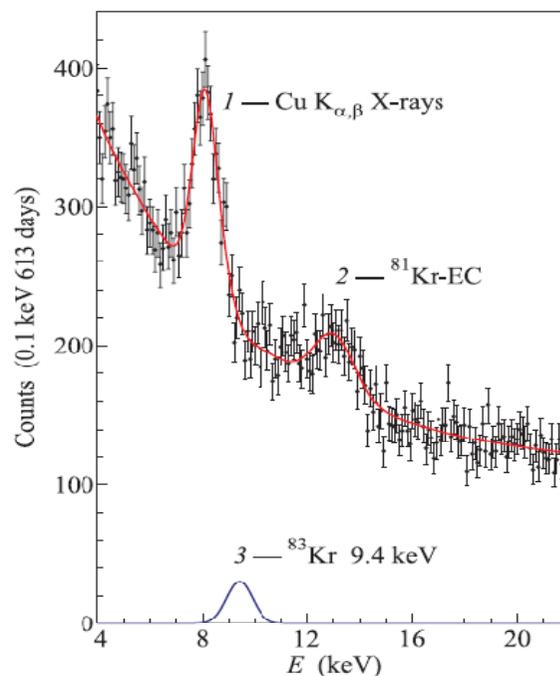
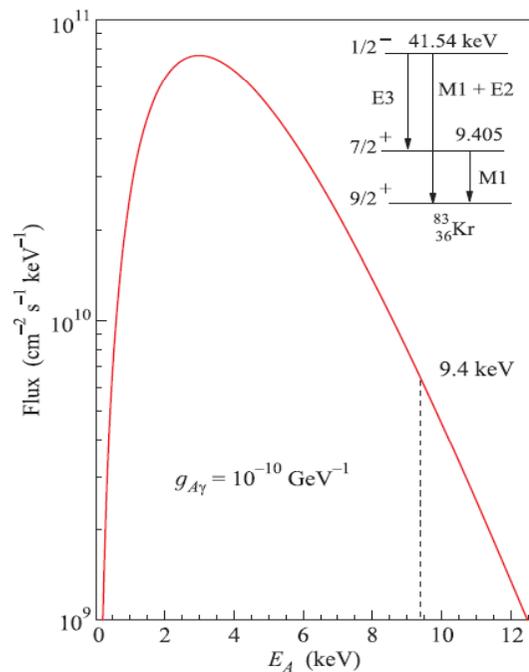
<sup>×</sup>Институт ядерных исследований НАН, 03680 Киев, Украина

Поступила в редакцию 4 апреля 2018 г.

Проведен поиск резонансного возбуждения первого ядерного уровня ядра  $^{83}\text{Kr}$  (9.4 кэВ) аксионами, образующимися на Солнце в результате эффекта Примакова. Для регистрации  $\gamma$ - и рентгеновских квантов, конверсионных и Оже электронов, возникающих при разрядке ядерного уровня, использовался газовый пропорциональный счетчик, расположенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН. В результате получено новое ограничение на константу связи аксиона с фотоном и массу аксиона  $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.3 \times 10^{-17}$ , которое в модели адронного аксиона соответствует новому ограничению на массу аксиона  $m_A \leq 12.7$  эВ для 95% у.д.

# Новые ограничения на константу связи аксиона с фотоном для солнечных аксионов

Сотрудники НИЦ КИ ПИЯФ совместно с коллегами из ИЯИ РАН проводят эксперимент в Баксанской нейтринной обсерватории по поиску резонансного возбуждения первого ядерного уровня ядра  $^{83}\text{Kr}$  (9.4 кэВ) солнечными аксионами. В 2018 году получено новое ограничение на константу связи аксиона с фотоном и массу аксиона  $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.3 \times 10^{-17}$ , которое в модели адронного аксиона соответствует рекордному ограничению на массу аксиона для такого типа экспериментов;  $m_A \leq 12.7$  эВ для 95% у.д. Результаты опубликованы в журнале *Письма в ЖЭТФ* 107, 617 (2018)

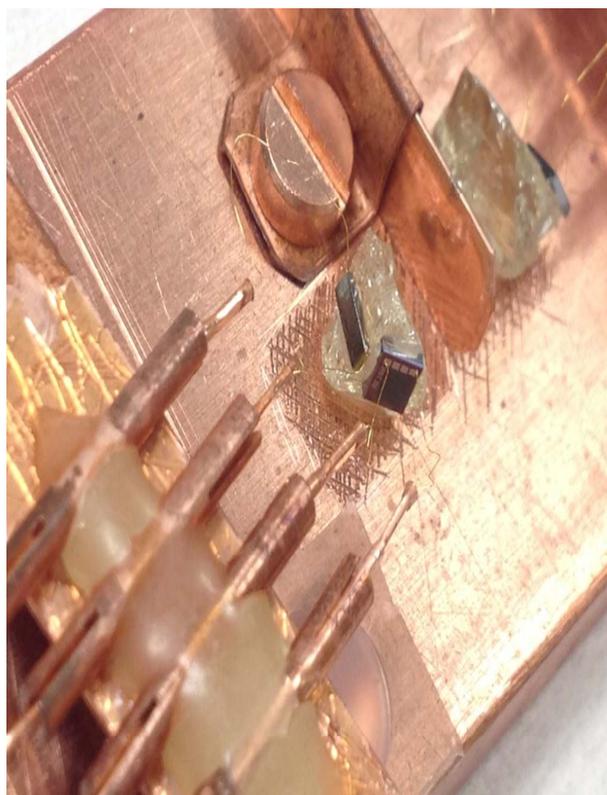


Энергетический спектр аксионов, возникающих при конверсии тепловых фотонов в поле плазмы Солнца.

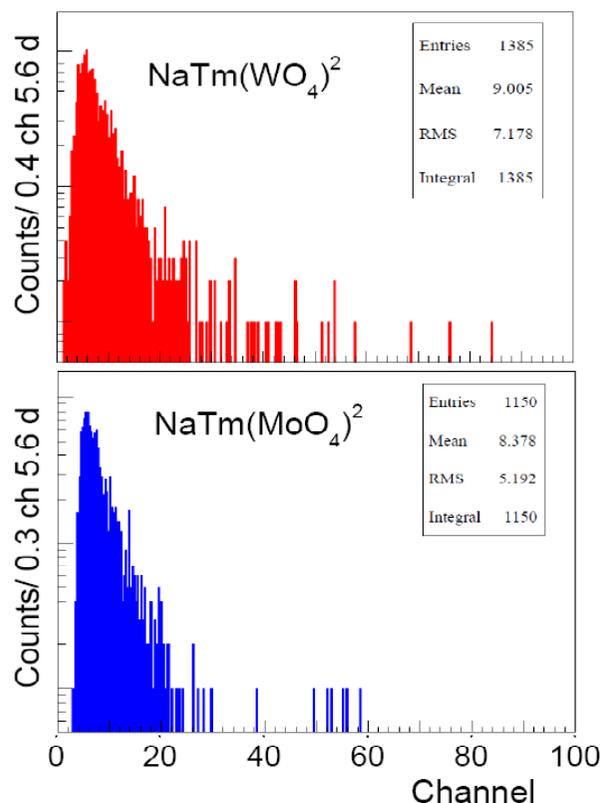
Спектр Кр-счетчика и результаты подгонки. Ожидаемый "аксионный" пик показан кривой 3.

Верхние пределы на  $g_{A\gamma}$  в сравнении с результатами других экспериментов и астрофизическими ограничениями.

# *Тm-содержащие кристаллы как болометры*



*Кристаллы внутри криогенной установки*



*Спектры фоновых сигналов за 135 ч.*

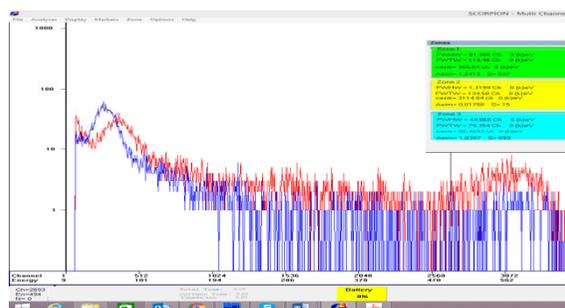
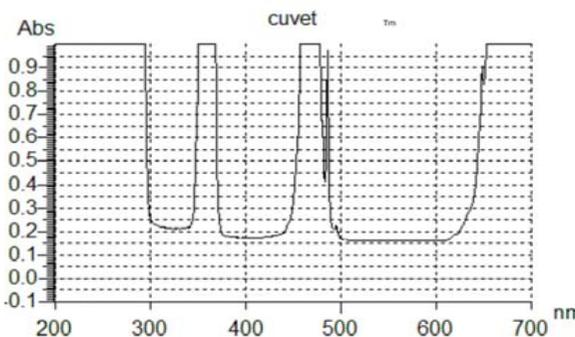
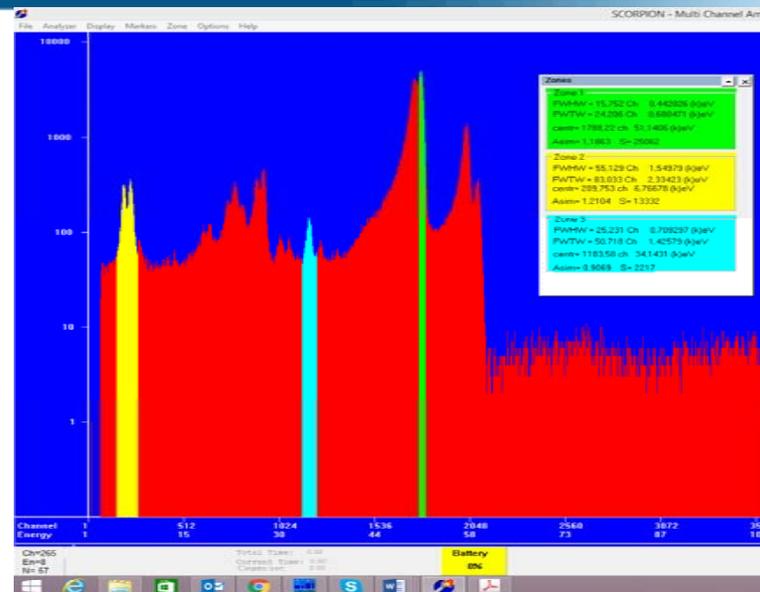
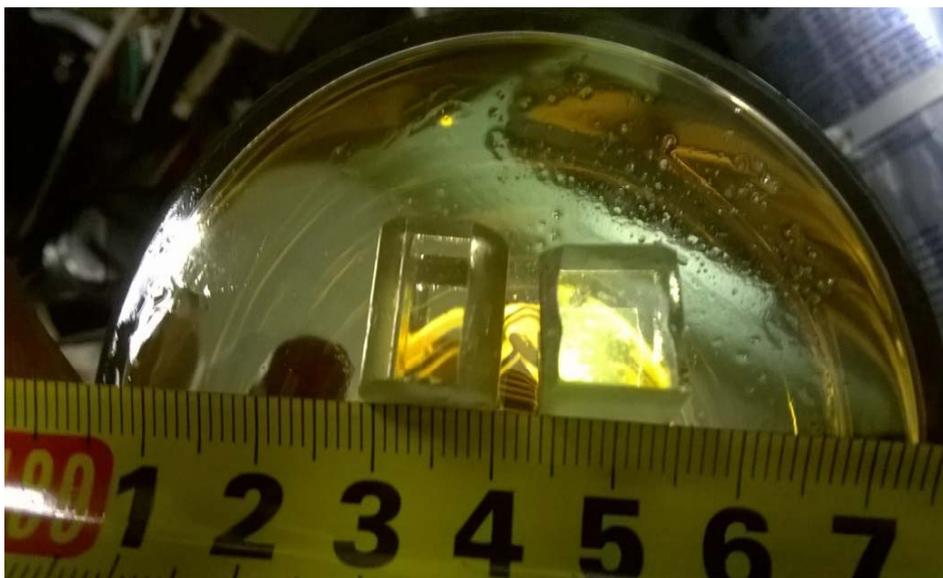


*NaTm(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> и NaTm(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>*

*Кристаллы внутри криогенной установки*

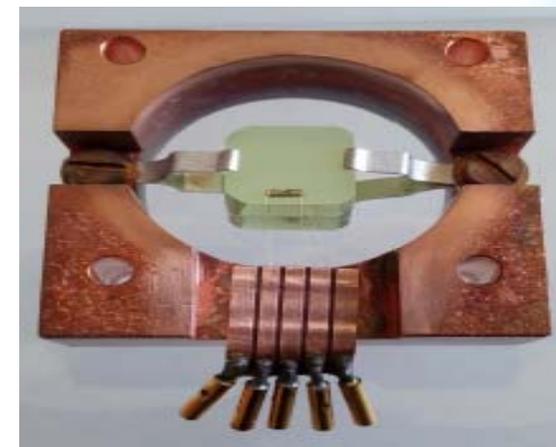
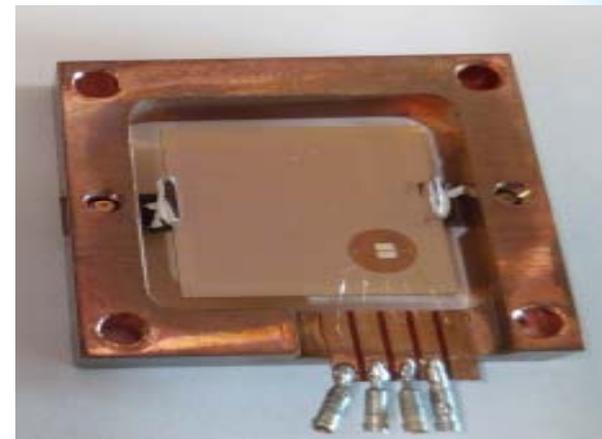
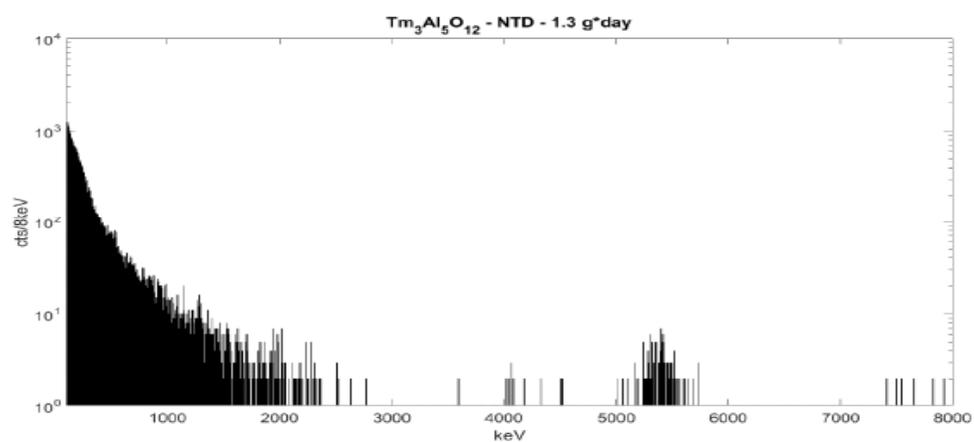
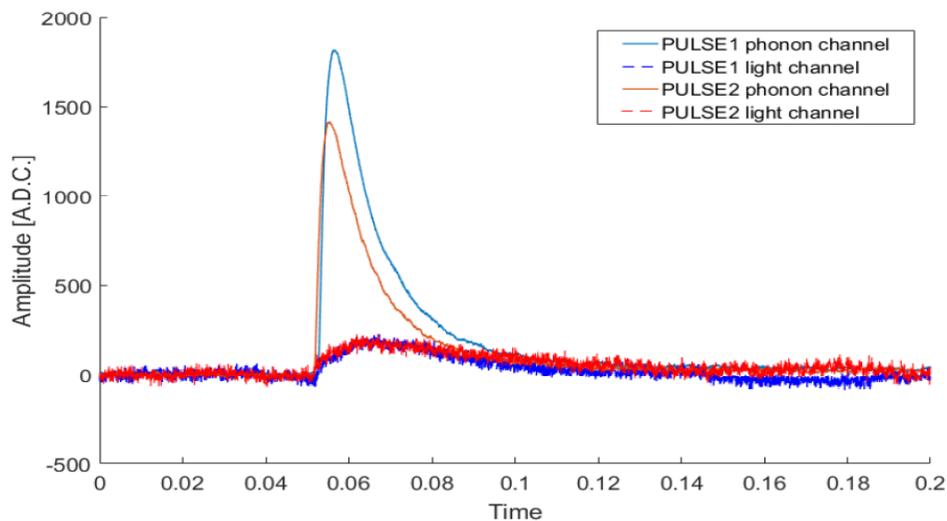
*Кристаллы были испытаны как болометрические детекторы для поиска резонансного поглощения солнечных аксионов, имеющих непрерывный спектр. Кристаллы были доставлены из ПИЯФ в лабораторию Гран Сассо, смонтированы в криогенной установке вместе с германиевыми термисторами и охлаждены до температуры около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

# $Tm_3Al_5O_{12}$ - болометр



Гранат тулия не сцинтиллирует, необходимо допировать Се или Pr. Главная задача проверить кристалл  $Tm_3Al_5O_{12}$  как болометр. В настоящий момент рассматривается 4 потенциальных места для измерений ГранСассо, Modane, Sanfranc, TUM на поверхности Земли

# $Tm_3Al_5O_{12}$ - болометр

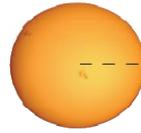


Кристалл  $Al_3Tm_5O_{12}$ , выращенный в КИ, установлен в криогенную установку и охлажден до 10 мК на установке CRESST MPI (Мюнхен). Показано, что кристалл может работать как болометрический детектор. Получен первый фоновый спектр с кристалла с NTD-термистором. Следующий шаг – использование TES-термистора.

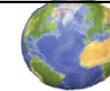
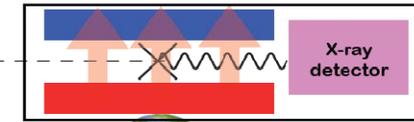


# IAXO: International Axion Observatory

## CERN Axion Solar Telescope

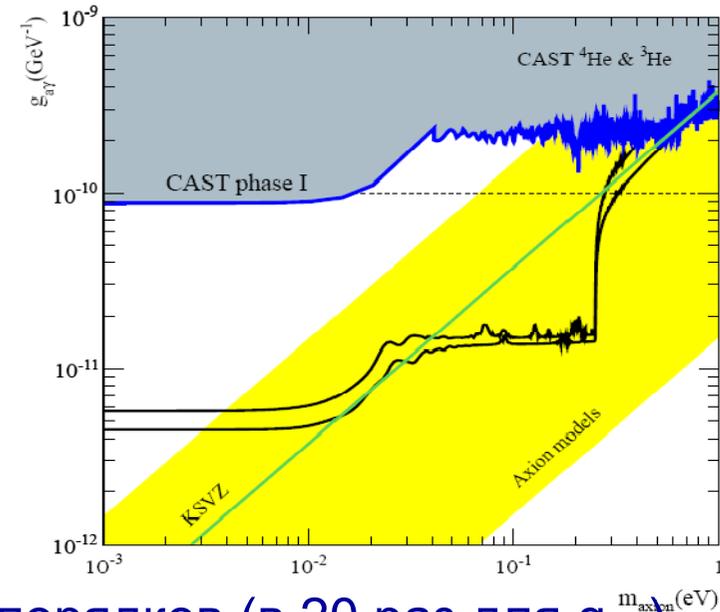
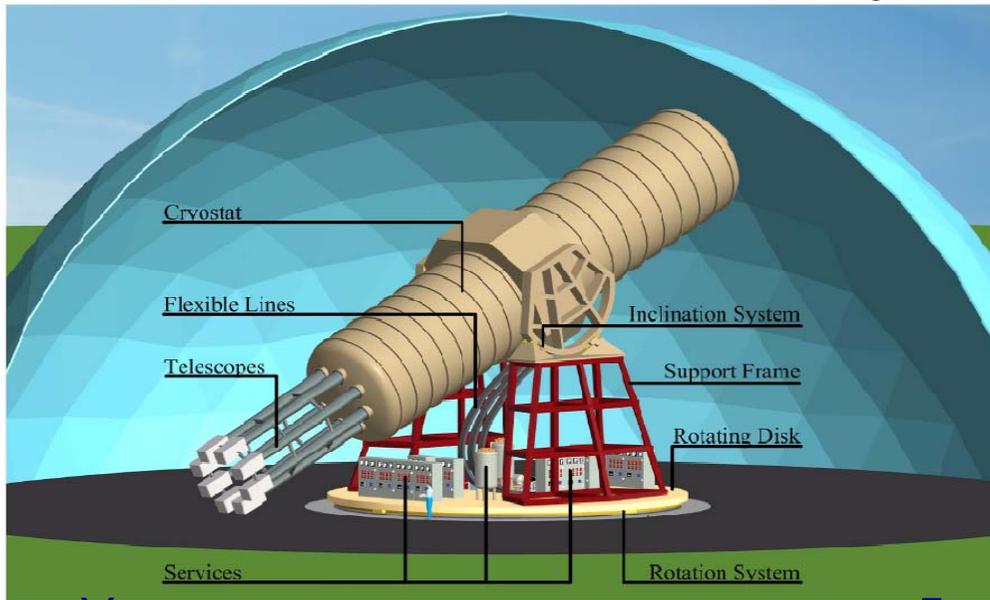


ALPs are produced inside the Sun via the two photon coupling (and others) and scape easily



← **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,  $g_{Ae}$ , Si(Li) активной защиты



# IAXO: International AXion Observatory



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Nuclear and Particle Physics Proceedings 273–275 (2016) 244–249



[www.elsevier.com/locate/nppp](http://www.elsevier.com/locate/nppp)

## An update on the Axion Helioscopes front: current activities at CAST and the IAXO project.

T. Dafni<sup>1,\*</sup>, M. Arik<sup>2</sup>, E. Armengaud<sup>3</sup>, S. Aune<sup>3</sup>, F. T. Avignone<sup>4</sup>, K. Barth<sup>5</sup>, A. Belov<sup>6</sup>, M. Betz<sup>5</sup>, H. Bräuninger<sup>7</sup>, P. Brax<sup>5</sup>, N. Breijnholt<sup>9</sup>, P. Brun<sup>3</sup>, G. Cantatore<sup>8</sup>, J. M. Carmona<sup>1</sup>, G. P. Carosi<sup>9</sup>, F. Caspers<sup>5</sup>, S. Caspi<sup>10</sup>, S. A. Cetin<sup>2</sup>, D. Chelouche<sup>11</sup>, F. E. Christensen<sup>12</sup>, J. I. Collar<sup>13</sup>, A. Dael<sup>3</sup>, M. Davenport<sup>3</sup>, **A. V. Derbin<sup>14</sup>**, K. Desch<sup>15</sup>, A. Diago<sup>1</sup>, B. Döbrich<sup>16</sup>, **I. Dratchnev<sup>14</sup>**, A. Dudarev<sup>5</sup>, C. Eleftheriadis<sup>17</sup>, G. Fanourakis<sup>18</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>3</sup>, P. Friedrich<sup>7</sup>, J. Galán<sup>3</sup>, J. A. García<sup>1</sup>, A. Gardikiotis<sup>19</sup>, J. G. Garza<sup>1</sup>, E. N. Gazis<sup>20</sup>, E. Georgiopoulou<sup>19</sup>, T. Geralis<sup>18</sup>, B. Gimeno<sup>21</sup>, I. Giomataris<sup>3</sup>, S. Gninenko<sup>6</sup>, H. Gómez<sup>1</sup>, D. González-Díaz<sup>1</sup>, E. Gruber<sup>22</sup>, E. Guendelman<sup>23</sup>, T. Guthörl<sup>22</sup>, C. J. Hailey<sup>24</sup>, R. Hartmann<sup>25</sup>, S. Hauf<sup>26</sup>, F. Haug<sup>5</sup>, M. D. Hasinoff<sup>27</sup>, T. Hiramatsu<sup>28</sup>, D. H. H. Hoffmann<sup>26</sup>, D. Horns<sup>29</sup>, F. J. Iguaz<sup>1</sup>, I. G. Irastorza<sup>1</sup>, J. Isern<sup>30</sup>, K. Imai<sup>31</sup>, J. Jacoby<sup>32</sup>, J. Jaeckel<sup>33</sup>, A. C. Jakobsen<sup>12</sup>, K. Jakovčić<sup>34</sup>, J. Kaminski<sup>15</sup>, M. Kawasaki<sup>35</sup>, M. Karuz<sup>36</sup>, K. Königsmann<sup>22</sup>, R. Kotthaus<sup>37</sup>, M. Krčmar<sup>34</sup>, K. Kousouris<sup>5</sup>, C. Krieger<sup>15</sup>, M. Kuster<sup>26</sup>, B. Lakić<sup>34</sup>, J. M. Laurent<sup>1,5</sup>, O. Limousin<sup>3</sup>, A. Lindner<sup>16</sup>, A. Liolios<sup>17</sup>, A. Ljubičić<sup>34</sup>, G. Luzón<sup>1</sup>, S. Matsuki<sup>38</sup>, **V. N. Muratova<sup>14</sup>**, S. Neff<sup>26</sup>, T. Niinikoski<sup>3</sup>, C. Nones<sup>3</sup>, I. Ortega<sup>1</sup>, T. Papaevangelou<sup>3</sup>, M. J. Pivovarov<sup>9</sup>, G. Raffelt<sup>37</sup>, J. Redondo<sup>1</sup>, H. Riege<sup>26</sup>, A. Ringwald<sup>16</sup>, A. Rodríguez<sup>1</sup>, M. Rosu<sup>26</sup>, S. Russenschuck<sup>5</sup>, J. Ruz<sup>9</sup>, K. Saikawa<sup>39</sup>, I. Savvidis<sup>17</sup>, T. Sekiguchi<sup>35</sup>, Y. K. Semertzidis<sup>40</sup>, I. Shilon<sup>1,5</sup>, P. Sikivie<sup>41</sup>, H. Silva<sup>5</sup>, S. K. Solanki<sup>42</sup>, L. Stewart<sup>5</sup>, H. H. J. ten Kate<sup>5</sup>, A. Tomas<sup>1</sup>, S. Troitsky<sup>6</sup>, T. Vafeiadis<sup>5</sup>, K. van Bibber<sup>43</sup>, P. Vedrine<sup>3</sup>, J. A. Villar<sup>1</sup>, J. K. Vogel<sup>9</sup>, L. Walckiers<sup>5</sup>, A. Weltman<sup>1</sup>, W. Wester<sup>45</sup>, S. C. Yildiz<sup>2</sup>, K. Zioutas<sup>19,5</sup>

<sup>a</sup>Physics Division, Physical and Life Sciences Directorate, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

<sup>b</sup>CEA Irfu, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>c</sup>Physics Department, University of South Carolina, Columbia, SC, USA

<sup>d</sup>European Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland

<sup>e</sup>IPHT, Centre d'Études de Saclay (CEA-Saclay), Gif-sur-Yvette, France

<sup>f</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Trieste and Università di Trieste, Trieste, Italy

<sup>g</sup>Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain

<sup>h</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

<sup>i</sup>Dogus University, Istanbul, Turkey

<sup>j</sup>Physics Department, University of Haifa, Haifa, 31905 Israel

<sup>k</sup>Technical University of Denmark, DTU Space Kgs. Lyngby, Denmark

<sup>l</sup>St. Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>m</sup>Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

<sup>n</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

<sup>o</sup>Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

<sup>p</sup>National Center for Scientific Research Demokritos, Athens, Greece

<sup>q</sup>Instituto de Ciencias de las Materiales, Universidad de Valencia, Valencia, Spain

<sup>r</sup>Institute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>s</sup>Physics Department, Ben Gurion University, Beer Sheva, Israel

<sup>t</sup>Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, New York, USA

<sup>u</sup>Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

<sup>v</sup>Technische Universität Darmstadt, IKP, Darmstadt, Germany

подписали  
Bylaws  
17 институтов  
ИЯИ

ПИЯФ

Слово *axion* в названии статей, выложенных в arXiv в 2018 году, встречается всего в 3 (760/232) раз реже чем слово *neutrino*.

# TASTE - Troitsk Axion Solar Telescope Experiment



PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

RECEIVED: July 20, 2017

REVISED: September 29, 2017

ACCEPTED: November 8, 2017

PUBLISHED: November 21, 2017

## Towards a medium-scale axion helioscope and haloscope

V. Anastassopoulos,<sup>a</sup> F. Avignone,<sup>b</sup> A. Bykov,<sup>c</sup> G. Cantatore,<sup>d</sup> S.A. Cetin,<sup>e</sup> A. Derbin,<sup>f</sup> I. Drachnev,<sup>f</sup> R. Djilkibaev,<sup>g</sup> V. Eremin,<sup>c</sup> H. Fischer,<sup>h</sup> A. Gangapshv,<sup>i</sup> A. Gardikiotis,<sup>a</sup> S. Gninenko,<sup>g</sup> N. Golubev,<sup>g</sup> D.H.H. Hoffmann,<sup>f</sup> M. Karuza,<sup>k</sup> L. Kravchuk,<sup>g</sup> M. Libanov,<sup>g</sup> A. Lutovinov,<sup>l</sup> M. Maroudas,<sup>a</sup> V. Matveev,<sup>g,m</sup> S. Molkov,<sup>l</sup> V. Muratova,<sup>f</sup> V. Pantuev,<sup>g</sup> M. Pavlinsky,<sup>l</sup> K. Ptitsyna,<sup>g</sup> G. Rubtsov,<sup>g</sup> D. Semenov,<sup>f</sup> P. Sikivie,<sup>n</sup> A. Spiridonov,<sup>o</sup> P. Tinyakov,<sup>p</sup> I. Tkachev,<sup>g</sup> S. Troitsky,<sup>g</sup> E. Unzhakov,<sup>f</sup> and K. Zioutas<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Patras University, Patras, Greece

<sup>b</sup>University of South Carolina, Columbia, U.S.A.

<sup>c</sup>Joffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>d</sup>University of Trieste, Trieste, Italy

<sup>e</sup>High Energy Physics Research Center, Bilgi University, Istanbul, Turkey

<sup>f</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>g</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

<sup>h</sup>Albert-Ludwigs-Universitaet, Freiburg, Germany

<sup>i</sup>Baksan Neutrino Observatory, INR RAS, Neutrino, Russia

<sup>j</sup>Institut für Kernphysik/Technische Universität, Darmstadt, Germany

<sup>k</sup>University Rijeka, Rijeka, Croatia

<sup>l</sup>Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

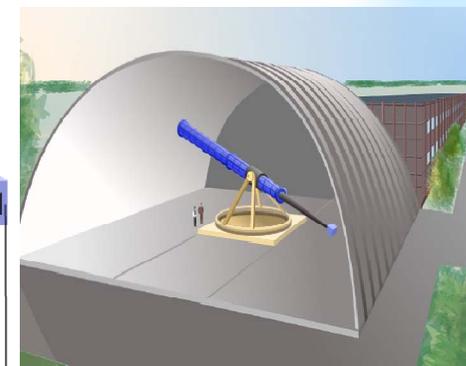
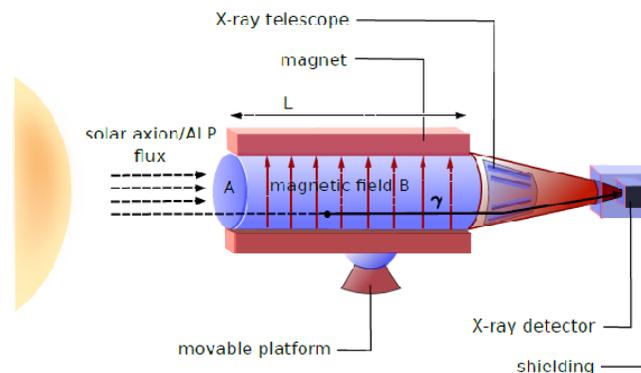
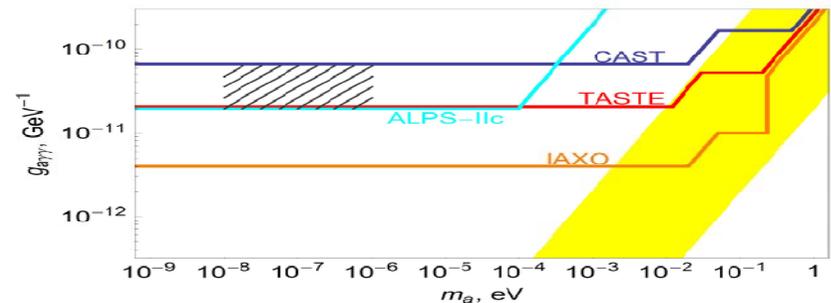
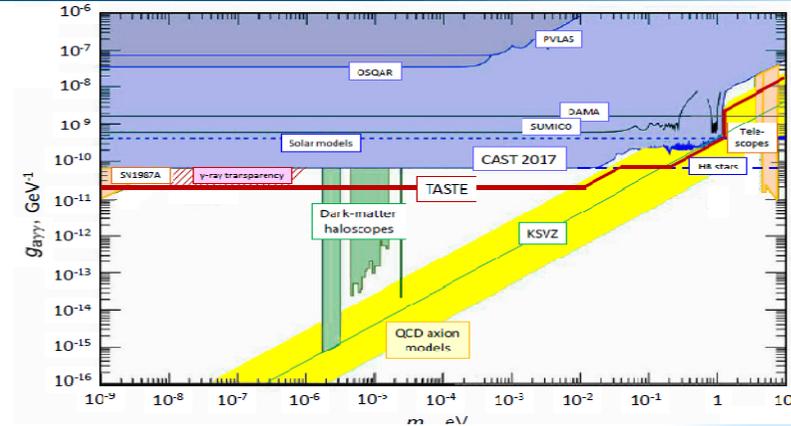
<sup>m</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>n</sup>University of Florida, Gainesville, U.S.A.

<sup>o</sup>Physics Department, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>p</sup>Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

ПИЯФ –  $g_{Ae} + Si(Li)$  детекторы (основной или детекторы активной защиты)



# Основные результаты работы в 2018 г.

1. Совместно с участниками международной коллаборации **Борексино** выполнен наиболее полный на сегодняшний день анализ нейтринного излучения, сопровождающего термоядерные процессы внутри Солнца, и зарегистрированного детектором Борексино. Так, поток  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино измерен с 2.7 % точностью, превышающей теоретические предсказания. Результаты опубликованы в журнале «Nature».
2. Продолжены работы по анализу данных эксперимента **DarkSide-50** и разработке нового двухфазного аргонового детектора частиц темной материи DarkSide-20k. Установлены новые, наиболее строгие верхние пределы на спин-независимое сечение рассеяния частиц темной материи (WIMPs) с массой 1.8 -6.0 ГэВ на нуклонах. Установлены ограничения на сечение рассеяния WIMPs на электронах. Результаты опубликованы в журнале Phys.Rev.Lett. (две статьи) и Phys.Rev.D.
3. В ПИЯФ продолжались работы по измерению бета-спектров ядер  **${}^{144}\text{Ce}$ - ${}^{144}\text{Pr}$**  с целью определения спектра электронных антинейтрино для экспериментов по поиску осцилляций нейтрино в стерильное состояние с массой около 1 эВ. На спектрометре в схеме мишень-детектор измеренные бета спектры анализировались с целью поиска тяжелого стерильного нейтрино с массой от 10 кэВ до 1 МэВ. Получены новые данные для нейтрино с  $m_\nu = 150\text{-}350$  кэВ. Результаты опубликованы в Письмах ЖЭТФ.
4. - Разработан и создан новый бета-спектрометр с **4 $\pi$ -геометрией** на основе Si(Li)-детекторов с толщиной i-области 5-9 мм, который имеет функцию отклика близкую к гауссовой.
5. Продолжены работы, совместно с ИЯИ РАН, по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами  ${}^{83}\text{Kr}$ . Полученный предел на массу адронного аксиона является наиболее строгим для такого типа экспериментов  $m_A \leq 12.7$  эВ для 95 % уровня достоверности. Результаты опубликованы в Письмах ЖЭТФ.
6. Кристалл  **$\text{Al}_5\text{Tm}_3\text{O}_{12}$** , выращенный в КИ, установлен в криогенную установку и охлажден до 10 мК. Показано, что кристалл может работать как болометрический детектор и использоваться для поиска резонансного возбуждения аксионами уровня  ${}^{169}\text{Tm}$ . Получен первый фоновый спектр с кристалла.
5. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, DarkSide и IAXO.

# Планы на 2019 г.

## 1) ПИЯФ

- а) Измерение бета-спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  для определения спектра электронных антинейтрино и поиска стерильного нейтрино массой 1 эВ
- б) Измерение бета-спектров  $^{210}\text{Bi}$  для CNO-нейтрино и др.
- в) Анализ болометрических характеристик выращенных кристаллов  $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ . Измерения с Tm-болометром. Выращивание Tm(XY) кристаллов объемом более 1 см<sup>3</sup> (КИ).
- г) Баксан-  $^{83}\text{Kr}$ , IAXO и TASTE – R&D работы .

## 2) Borexino – солнечные и гео-нейтрино

- а) участие в работе 6-ти рабочих групп ( $^{210}\text{Bi}$  для CNO нейтрино)
- б) распады с  $\Delta B = 3$ , NSI нейтрино
- в) корреляция нейтринных сигналов с LIGO / VIRGO (GW)
- г) И.Драчнев, Д.Семенов, Е.Унжаков, Н.Пилипенко, И.Ломская →6 чел./ мес. LNGS

## 3) DarkSide – темная материя

- а) Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20K,  $^{252}\text{Cf}$  источник, рад. стойкость Si(Li) (Ti, SiO<sub>2</sub>, CF<sub>2</sub>) + “удаленные дежурства”
  - б) И. Драчнев, Е. Унжаков, Д. Семенов → 4 месяца LNGS
- ## 4) Новые проекты IAXO, TASTE – нейтрино, аксион

# Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



$g_{AN}$

**НЕЙТРИНО  
АКСИОН  
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ**

Si



144Pr

**BOREXINO  
 $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ ,  $^{210}\text{Bi}$   
DARKSIDE**

Ce-Pr



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

**IAXO,  
TASTE**

Ge



# Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

## Лаб. низкофоновых измерений

- 1) А.В. Дербин внс, дфмн,
- 2) В.Н. Муратова, снс, кфмн
- 3) С.В. Бахланов вед. инж.
- 4) Д.А. Семенов, нс. кфмн
- 5) И.М. Котина, снс, кфмн
- 6) О.И. Коньков, снс, кфмн
- 7) И.С. Драчнев, нс, PhD
- 8) Н.В. Базлов, нс
- 9) Е.В. Унжаков, нс.
- 10) Л.М.Тухконен нс
- 11) Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ
- 12) И.П. Филиппов, 3 курс СПбГУ

В отделе - 28 (23.6) чел.  
1 дфмн; 6 кфмн; внс – 2;  
снс – 3; нс – 5; мнс – 0; асп.  
- 1; вед.инж.-11; инж.-2;  
рег. ап. -1; сл.мех.-1;  
студ. совм. – 2;

## Гр. физики и технологии ППД

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

## Гр. радиохимии

- 1) И.С. Ломская, 4 курс ТУ
- 2) В.М. Тюнис вед. инж.

## Конст. –технологический уч.

- 1) Г.Е.Жихаревич инж.-технолог
- 2) А.Д. Майанцев инженер
- 3) А.П.Михайлов регулировщик р.а.
- 4) В.А.Радаев слесарь мех.сб.р.

# Основные результаты по п/п структурам

## 1. Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами (в основном, для Ф.И.) (рук. А.Х. Хусаинов)

1.1 Поддержка п/п детекторов в ПИЯФ

1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{44}\text{Pr}$

1.3 Si(Li)-детектор осколков калибровочного источника  $^{252}\text{Cf}$

1.4 CdTe детекторы для диагностики плазмы, Токамак-10, КИ

1.5 Спектрометр с Si(Li) детектором для Мессбауэровской спектрометрии

1.6 CdTe и Si(Li) детекторы АМРТЕС Томск (договор 2018->2019)

1.7 Si(Li) детекторы для IAXO, TASTE

## 2. Аморфно-кристаллические (aSi:H/cSi и AlN) структуры на кремнии (рук. И.М. Котина)

2.1 Детекторы с двухсторонним тонким окном

2.2 МДП структура на Si-детекторах (совместно с СПбГУ)

2.3 Дрейф лития на  $x > 8$  мм

2.4 Анизотропия ионизационных потерь в Si (ОФВЭ)

## Обслуживание и ремонт Ge- и Si- детекторов в ПИЯФ

Детектор фирмы ORTEC из группы Капустина В. К. Детектор предназначен для контроля активности воды.

Восстановлен вакуум в криостате, отремонтирован детектор, испытан и аттестован детектор в криостате (С.В. Бахланов).

В.Л. Василевский «Прометей». Детектор Ge(Li) коаксиальный с резистивной обратной связью. (Л.М. Тукхонен)

Заявленные дефекты: ухудшение вакуума ухудшение разрешения .

Ремонт: перепылен литий, поставлен в криостат и поставлен на выравнивание.

Проверка параметров: измерения проведены при 1200В .

Детектор Ge N-типа коаксиальный.

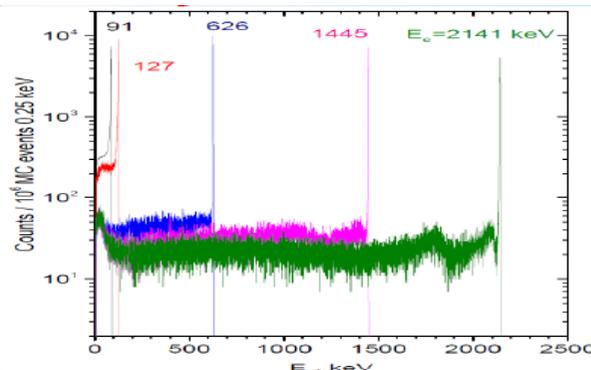
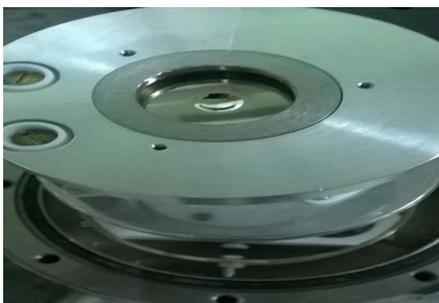
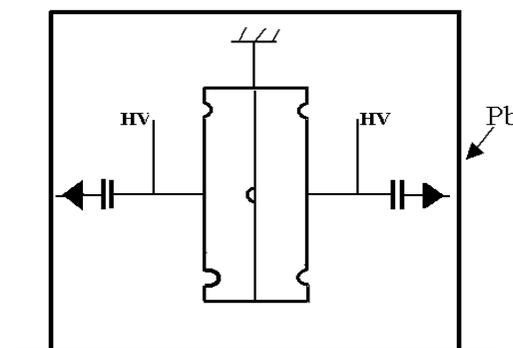
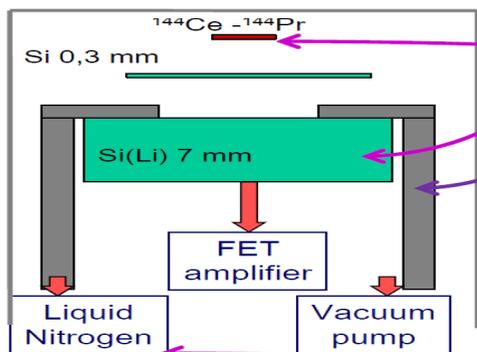
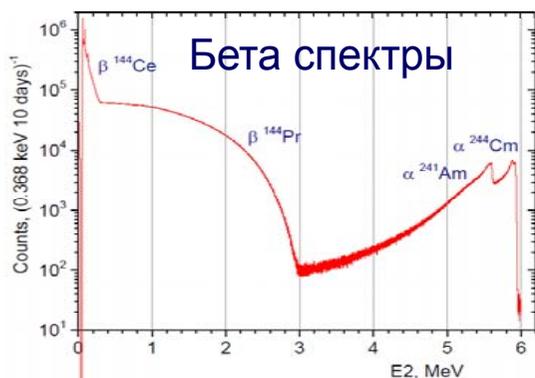
Заявленная неисправность: плохой вакуум.

Ремонт: Вакуумирование в течение 5 суток с циклическим прогревом кожуха хладопровода.

Проверка параметров: измерения проведены при 2000В. Разрешение для энергии 1.33 MeV составляет 2 keV, для энергии 59.6 keV - 0.9 keV. (М.П. Жуков)

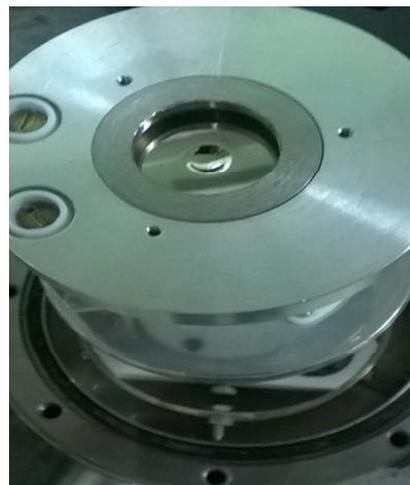


# Детекторы для измерения $\beta$ -спектра $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$



Существует ряд проектов экспериментов с искусственным источником антинейтрино  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  и новым детектором антинейтрино с целью поиска осцилляций нейтрино в **стерильное состояние**. От точности определения **спектра антинейтрино** зависит чувствительность эксперимента к осцилляционным параметрам. Чтобы найти спектр антинейтрино необходимо измерить **бета спектр  $^{144}\text{Pr}$** . В настоящее время мы проводим эти измерения с помощью Si-детекторов, которые имеют существенно более высокое энергетическое разрешение чем пластические сцинтилляторы. Используется несколько вариантов размещения источников  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  и **планарных Si(Li)-детекторов**, подавив таким образом обратное рассеяние электронов от поверхности детектора. В 2019 году планируются работы по измерению бета-спектра  $^{210}\text{Bi}$ .

## *Si(Li)-детекторы с толщиной чувствительного слоя до 10 мм*



## Спектрометрические блоки детектирования для рентгеновской диагностики термоядерной плазмы

Блоки детектирования разработаны на основе  $\text{Si}(\text{Li})$  и р-и-n  $\text{CdTe}$  детекторов и обеспечивают эффективную регистрацию рентгеновского излучения с энергией до 150 кэВ. Энергетическое разрешение составляет 200 эВ для  $\text{Si}(\text{Li})$  детектора и 500 эВ для р-и-n  $\text{CdTe}$  детекторе. Охлаждение детекторов производится миниатюрными термо-электрическими охладителями.



Блок с  $\text{Si}(\text{Li})$  детектором изготовлен и испытан для экспериментов по Мёссбауэровской спектроскопии в лаборатории нейтронных физико-химических исследований.

*$\text{Si}(\text{Li})$  блок детектирования с термоэлектрическим охлаждением с энергетическим разрешением 190 эВ.*

## СТАТЬЯ 2. ОБЛАСТИ СОТРУДНИЧЕСТВА

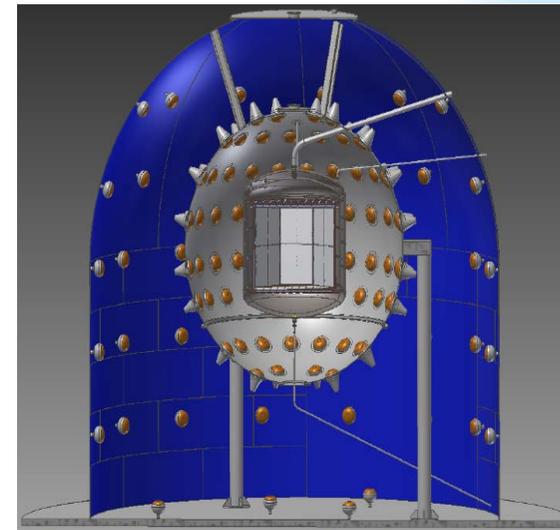
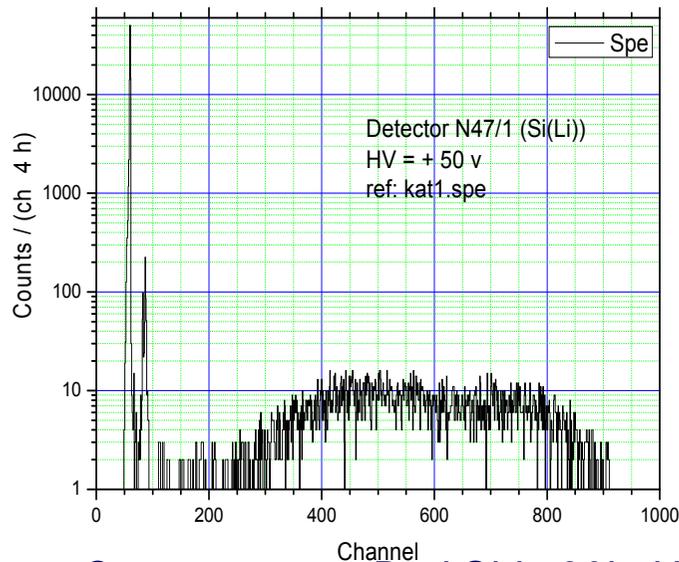
С учетом долгосрочного характера настоящего Соглашения Стороны решили, что их сотрудничество будет осуществляться в следующих областях, но не будет ограничиваться только ими:

2.1. ФГБУ «ПИЯФ», используя имеющиеся наработки, по исследованию и разработкам полупроводниковых детекторов для регистрации и спектрометрии рентгеновского и гамма излучений, активно поддерживает предлагаемые научными сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» программы в области разработки новых типов полупроводниковых детекторов и систем на их основе.

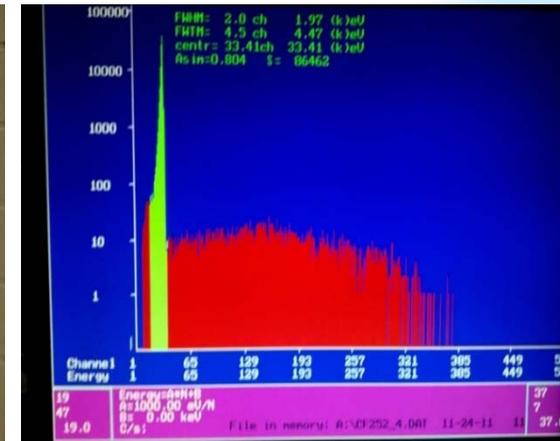
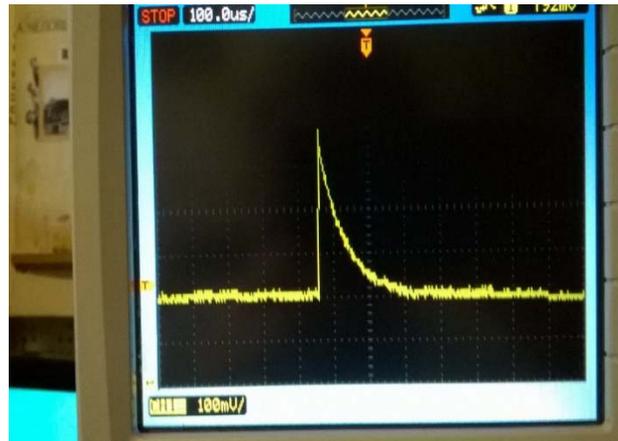
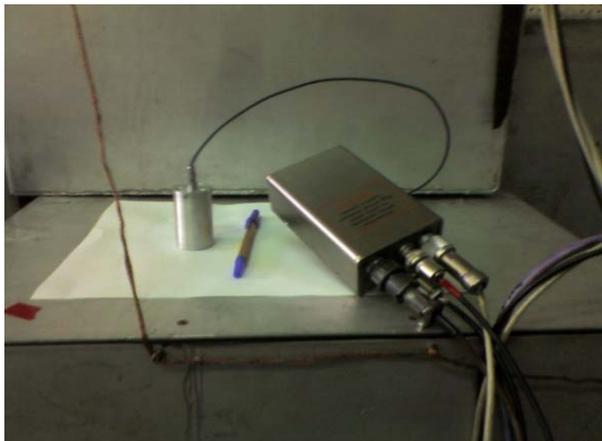
2.2. НИЦ «Курчатовский институт», используя термоядерную установку токамак Т-10 с уникальным комплексом дополнительного нагрева плазмы и развитым диагностическим



# Si(Li)-детектор осколков калибровочного источника $^{252}\text{Cf}$ для экспериментов DarkSide и LVD

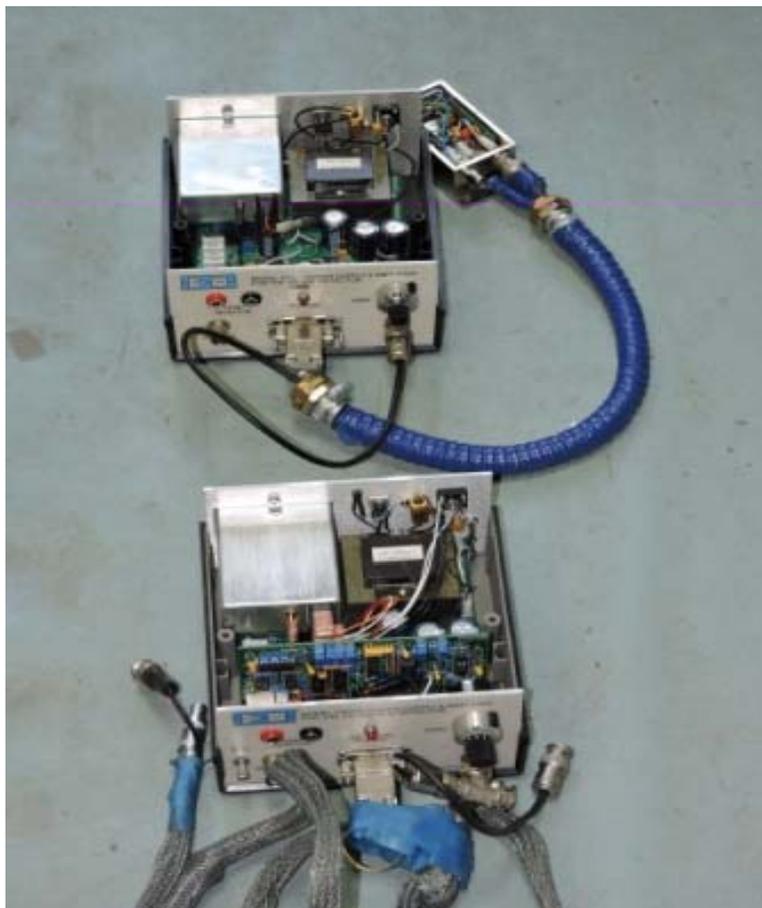


Эксперимент DarkSide 20k. Измерение функция отклика для нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ .



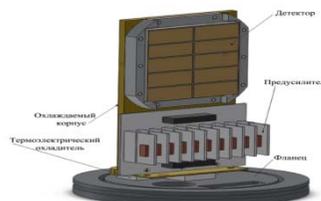
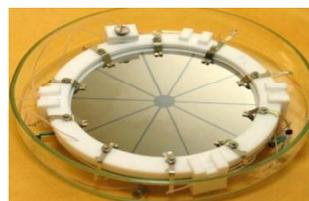
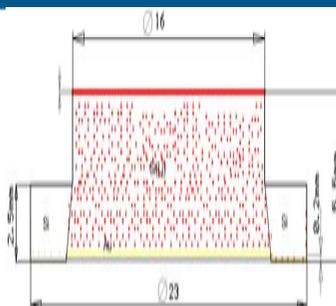
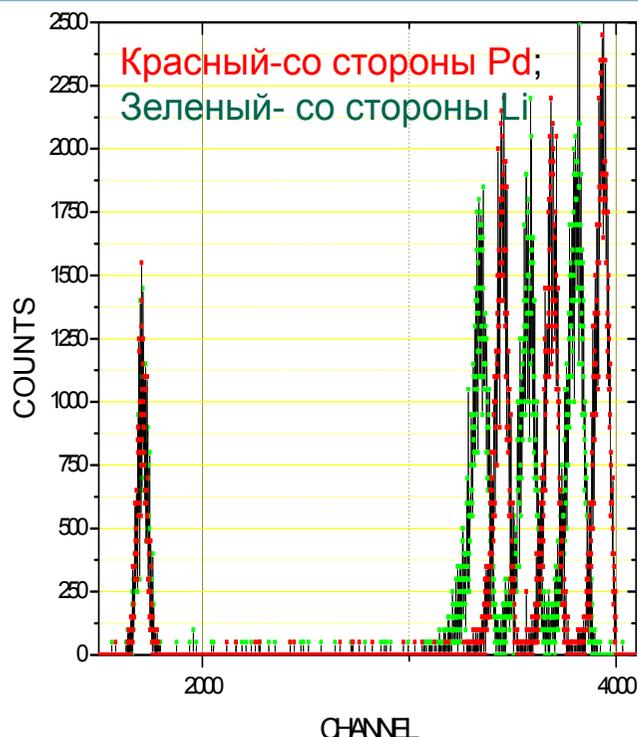
Проблемы с поверхностно-барьерными Si-детекторами. Начаты измерения радиационной стойкости Si(Li)-детекторов.

## CdTe и Si(Li) детекторы АМРТЕС Томск (договор 2018->2019)



Диагностика, исследование технических характеристик и проведение испытаний двух блоков детектирования с CdTe и Si-детекторами и блоков управления анализаторов АМРТЕС.

# Детекторы с контактом из аморфного кремния



Необходимо проведение исследований по зависимости толщины мертвого слоя со стороны  $n+$  контакта от поверхностного удельного сопротивления остающегося после сошлифовки «избыточного» Li в поверхностном слое.  
Совместно с ФТИ и СПбГУ.

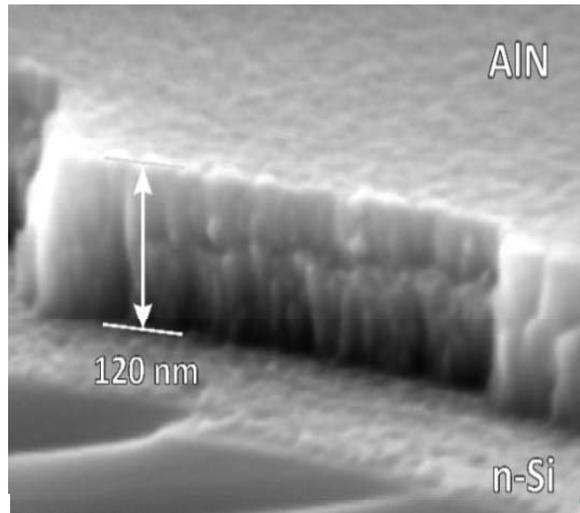
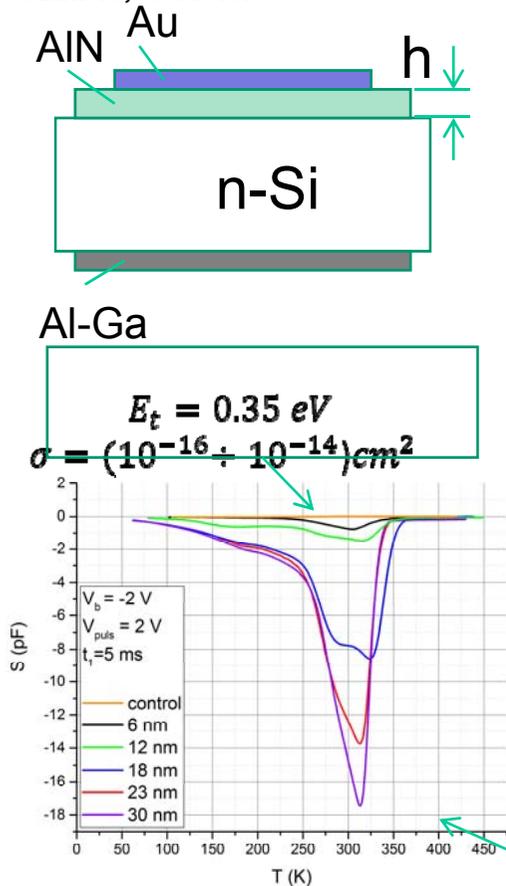


В ПИЯФ созданы технологические установки нанесения аморфного кремния на поверхность кремния компенсированного литием **магнетронным (MASD) методом**. В первую очередь необходима минимизация толщины входного окна со стороны Li ( $n$ -контакт). Обычно это осуществляют путем сошлифовки «избыточного» Li и проведением новой диффузии с резким градиентом лития. В Отделе использовался другой, менее сложный, технологический метод. После сошлифовки «избыточного» Li на оставшуюся Si(Li) структуру напылялась **пленка аморфного гидрированного кремния ( $aSi:H$ )**. Омический контакт к пленке создавался напылением Al. В результате, удастся получить толщину окна  **$\sim 0.2$  мкм**, что сравнимо с толщиной окна со стороны Pd(Au).

# Изучение структур Au-AIN-(n-Si) (+СПбГУ)

**Мотивация** : напыление пленки AIN приводит к  
 + уменьшению величины обратных токов детекторов  
 - высокой плотности ловушек на интерфейсе AIN-Si, что  
 ведет к потере заряда и увеличению нч-шума

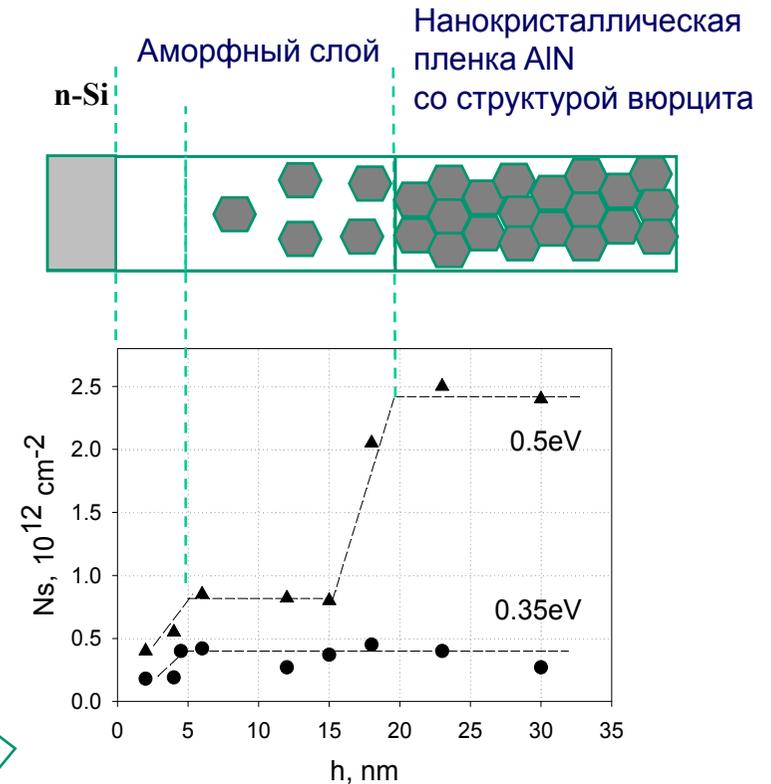
А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, И.М. Котина и др., Письма в ЖТФ, 2009, т.35, вып. 10, с. 41-48.



DLTS спектры образцов структур Au-AIN-(n-Si)

$$E_t = (0.5 \pm 0.6) \text{ eV}$$

$$\sigma = (10^{-16} \div 10^{-14}) \text{ cm}^{-2}$$

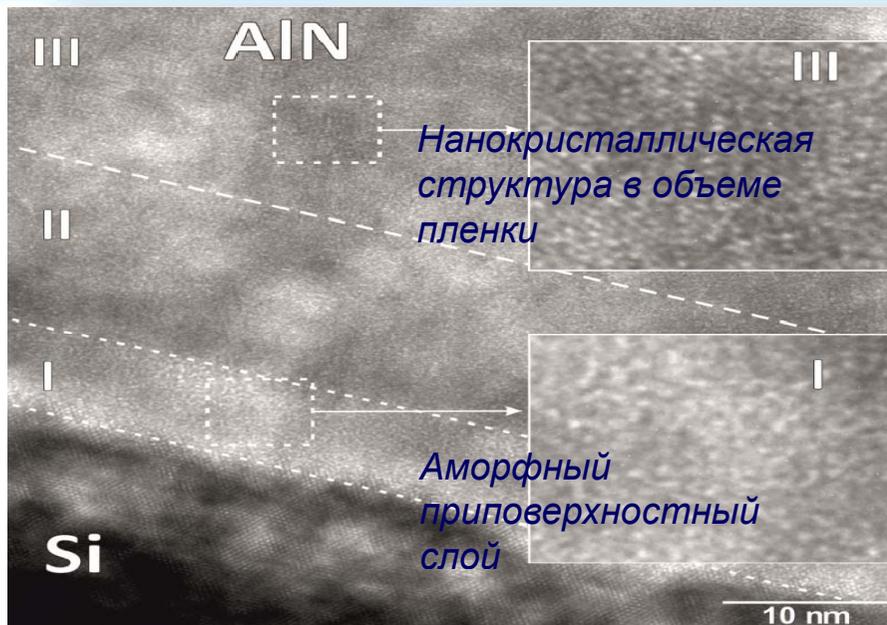


Зависимости величин поверхностной плотности электронных ловушек от толщины пленки AIN

**Выводы :**

- Основная часть ловушек электронов в структуре Au-AIN-(n-Si) располагается в аморфном слое
- Для уменьшения плотности ловушек следует минимизировать толщину аморфного слоя

# Исследование строения и электрических свойств пленок AlN, нанесенных методом реактивного магнетронного напыления на кремниевые подложки

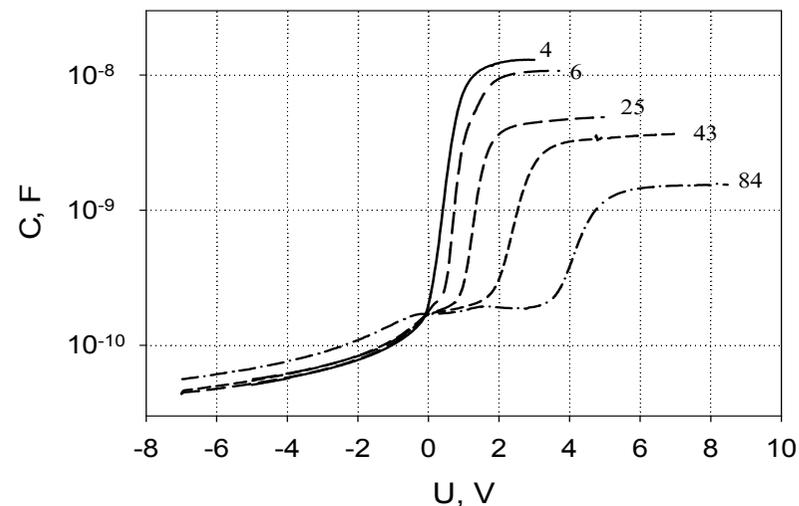


Изображение поперечного сечения структуры в просвечивающем электронном микроскопе LIBRA 200 (Carl Zeiss)

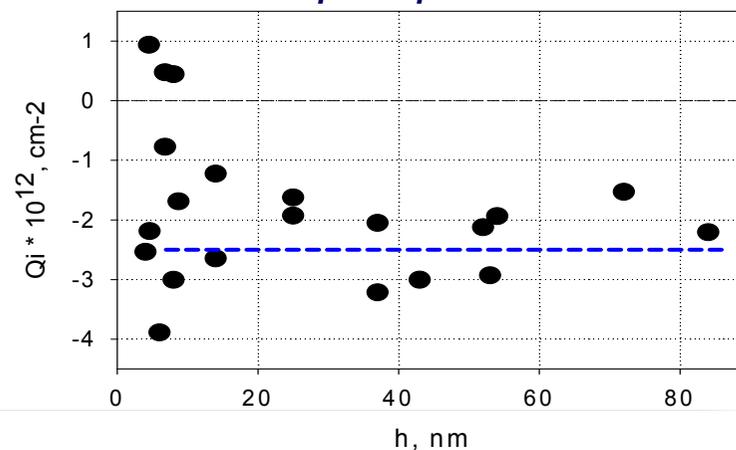
## Выводы :

- напыленные пленки AlN содержат встроенный **отрицательный заряд** с поверхностной плотностью  $Q_i \approx 2.5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , располагающийся в **приповерхностном аморфном слое** толщиной не более 5 нм
- тонкие туннельно прозрачные слои AlN могут быть использованы в барьерных детекторах на основе кремния р- типа **для уменьшения величины обратных токов**

## Высокочастотные CV характеристики структур Au-AlN-(n-Si) с разной толщиной пленки AlN



## Поверхностная плотность встроенного заряда, вычисленная из CV характеристик



# Планы Отдела на 2019 г.

## **1. Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами (в основном, для Ф.И.) (рук. А.Х. Хусаинов)**

1.1 Поддержка п/п детекторов в ПИЯФ

1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$

1.3 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектра  $^{210}\text{Bi}$

1.4 CdTe и Si детекторы для диагностики плазмы, Токамак-10, КИ

1.5 Детектор осколков для DarkSide и LVD. Изучение радиационной стойкости Si(Li)-детекторов.

1.6 Детектор для Мессбауэровского спектрометра.

1.7 Детекторы для РФА анализа ( договор с Томским ГУ)

1.8 Si(Li) для экспериментов IAXO и TASTE (основные или детекторы активной защиты)

## **2. Аморфно-кристаллические (aSi:H/cSi, AlN) структуры на кремнии (рук. И.М. Котина)**

2.1 Детекторы с двухсторонним тонким окном (Совместно с ФТИ)

2.2 МДП (AlN) структура на Si-детекторах (совместно с СПбГУ)

2.3 Дрейф лития на большие глубины: Si(Li) 10 мм T=300 K

2.4 Анизотропия ионизационных потерь в Si (совместно с ОФВЭ)

2.5 Датчики водорода на основе Si-детекторов

***Спасибо за внимание!***