

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 (24.5) 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. – 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.

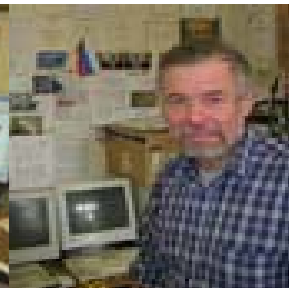
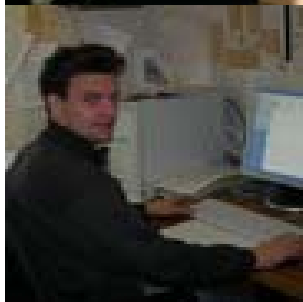
Гр. радиохимии

- 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.

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



Состав (13 (10.5) 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, 4 курс ТУ
2ст+1асп+0(1)мнс+5нс+3снс+1внс
1 дфмн и 5 кфмн

Отдел и Лаборатория в 2017 году

Работы проводились по 4 основным направлениям:

1) *Нейтрино,*

(эксперимент **Borexino**—солнечные и гео-нейтрино, **SOX**-стерильное нейтрино, **$^{144}\text{Pr}-\beta$**)

2) *Темная материя*

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

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

(рук. А.Х. Хусаинов)

4) *aSi:H/cSi и AlN структуры на кремнии. Дрейф Li на длину > 6 мм*

(рук. И.М. Котина)

Содержание доклада (30 мин.)

1) Наукометрические показатели

2) Нейтрино в 2011- 2017 г.г.

Нейтрино

3) Эксперимент Борексино в 2017 году. Новые результаты.

4) Корреляции гравитационных волн и сигналов в Борексино

5) Временные вариации скорости счета ^7Be -нейтрино

6) Новый предел на магнитный момент солнечных нейтрино
(доклад И. Драчнева)

7) Стерильные нейтрино – проект *Borexino_SOX_Ce*.

Измерения бета-спектра ^{144}Pr . (доклад Н. Пилипенко)

Темная материя (WIMPs и аксионы)

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

9) Поиск поглощения солнечных аксионов ядром ^{83}Kr в БНО ИЯИ РАН

10) Поиск солнечных аксионов с помощью Tm -содержащих болометров.

11) Проекты по поиску конверсии аксионов в фотон *IA XO* и *TASTE*

11) Планы на 2018 год.

12) Итоги работы Отдела (10 мин)

Публикации в 2017 г. (17+15)

17 публикаций в реферируемых журналах

1. M. Agostini et al., (Borexino coll.) Seasonal Modulation of the ^7Be Solar Neutrino Rate in Borexino, **Astroparticle Physics** 92 21-29 (2017)
2. D. D'Angelo et al., (DarkSide coll.) The DarkSide physics program and its recent results, **Nuovo Cim.** C39 no.4, 312, (2017)
3. D. Jeschke et al., (Borexino coll.) Recent Results from Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 798 no.1, 012114, (2017)
4. G. Zuzel et al., (DarkSide coll.) The DarkSide Experiment: Present Status and Future, **J. Phys. Conf. Ser.** 798 no.1, 012109, (2017)
5. B. Bottino et al., (DarkSide Coll.), The DarkSide experiment, **Nuovo Cim.** C40 no.1, 52, (2017)
6. S. Marcocci et al., (Borexino coll.), Real-time detection of solar neutrinos with Borexino, **Nuovo Cim.** C40 no.1, 58, (2017)
7. A. Vishneva et al., (Borexino coll.), Test of the electron stability with the Borexino detector, **J. Phys. Conf. Ser.** 888 no.1, 012193, (2017)
8. A. Caminata et al., (Borexino coll.), Improvements in the simulation code of the SOX experiment, **J. Phys. Conf. Ser.** 888 no.1, 012145, (2017)
9. M. Pallavicini et al., (Borexino-SOX coll.), Solar neutrino detectors as sterile neutrino hunters **J. Phys. Conf. Ser.** 888 (2017) no.1, 012018
10. M. Agostini et al., (Borexino coll.), A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector, **Astrophysical Journal**, (2017) arXiv:1706.10176
11. M. Agostini et al., (Borexino coll.), The Monte Carlo simulation of the Borexino detector, **Astroparticle Physics**, (2017), arXiv:1704.02291
12. M. Agostini et al., (Borexino coll.) Limiting neutrino magnetic moments with Borexino Phase-II solar neutrino data, **Phys. Rev. D** 96. 091103(R) (2017)
13. E. Edkins et al., (DarkSide coll.), The DarkSide direct dark matter search with liquid argon, **AIP Conf. Proc.** 1900 (2017) no.1, 040004
14. V. Anastassopoulos et al., Towards a medium-scale axion helioscope and haloscope, **Journal of Instrumentation**, 12, n.11, P11019 (2017)
15. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, A.V. Derbin, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, V.N. Muratova et al., Search for resonant absorption of solar axions emitted in M1-transition in ^{83}Kr nuclei: second stage of the experiment, **Physics of Particles and Nuclei**, 49, 94 (2018)
16. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.M. Gangapshev et al., Recent results of search for solar axions using resonant absorption by ^{83}Kr nuclei, **Journal of Physics: Conf. Series** 934 (2017) 012018
17. I. E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, E.A. Chmel, A.V. Derbin et al., A Silicon Detector Based Beta-spectrometer, **Journal of Physics: Conf. Series** 934 (2017) 012056

Публикации 2017 г. (17+15)

15 публикаций в arXive и в Proceedings

1. C. E. Aalseth et al., (DarkSide coll.) Cryogenic Characterization of FBK RGB-HD SiPMs, [arXiv:1705.07028](#)
2. S. Davini et al., (Borexino coll.) Results From Borexino at LNGS, Proceedings, **17th Lomonosov** Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia.
3. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The Darkside-50 Experiment: a Liquid Argon Target for Dark Matter Particles, Proceedings, **17th Lomonosov** Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia.
4. M. Agostini et al., (Borexino coll.) Improved measurement of 8B solar neutrinos with 1.5 kt y of Borexino exposure, [arXiv:1709.00756](#)
5. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) The Electronics, Trigger and Data Acquisition System for the Liquid Argon Time Projection Chamber of the DarkSide-50 Search for Dark Matter, [arXiv:1707.09889](#)
6. M. Agostini et al., (Borexino coll.) Limiting neutrino magnetic moments with Borexino Phase-II solar neutrino data, [arXiv:1707.09355](#)
7. M. Agostini et al., (Borexino coll.) First Simultaneous Precision Spectroscopy of pp, 7Be, and pep Solar Neutrinos with Borexino Phase-II, [arXiv:1707.09279](#)
8. C.E. Aalseth et al., (DarkSide coll.) DarkSide-20k: A 20 Tonne Two-Phase LAr TPC for Direct Dark Matter Detection at LNGS, [arXiv:1707.08145](#)
9. P. Agnes et al., (DarkSide coll.) Simulation of argon response and light detection in the DarkSide-50 dual phase TPC, [arXiv:1707.05630](#)
10. Marco Battaglieri et al., US Cosmic Visions: New Ideas in Dark Matter 2017: Community Report, [arXiv:1707.04591](#)
11. M. Agostini et al., (Borexino coll.) A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector, [arXiv:1706.10176](#)
12. V. Anastassopoulos et al., (TASTE Collaboration) Towards a medium-scale axion helioscope and haloscope, [arXiv:1706.09378](#)
13. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.M. Gangapshev et al., Recent results of search for solar axions using resonant absorption by 83Kr nuclei, Proceedings of **13th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs**, Thessaloniki. Greece, May (2017) [arXiv 1711](#).
14. A.V. Derbin, S. V. Bakhlanov, I. S. Drachnev et al., Measurement of 144Pr beta-spectrum with Si(Li) detectors for the purpose of determining the spectrum of electron antineutrinos, Proceedings of **13th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs**, Thessaloniki. Greece, May (2017), [arXiv 1711](#).
15. M. Agostini et al., (Borexino coll.) , Physics potential with Borexino Phase-II data, **WSPC Proceedings LP 2017**

Доклады на конференциях и семинар. в 2017 г.

14 докладов и выступлений на конференциях и семинарах

1. **А.В. Дербин**, Прямые поиски частиц темной материи, 51-я Зимняя школа ПИЯФ по физике, март 2017.
2. **Н.В. Пилипенко**, Уровни электронных состояний интерфейса кремния с нитридом алюминия, полученного реактивным магнетронным напылением, 18 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, декабрь 2016 г. С-Петербург.
3. **Н.В. Пилипенко**, Уровни электронных состояний интерфейса в поверхностно-барьерных детекторах Au-AlN-(n-Si), приготовленных методом реактивного магнетронного напыления на переменном токе, 51-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, 11-16 марта 2017, Санкт-Петербург
4. **A.V. Derbin**, Measurement of ^{144}Pr beta-spectrum with Si-detectors for the purpose of determining the spectrum of electron antineutrinos, 13th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Салоники, Греция, 2017
5. **V.N. Muratova**, Search for solar axions using resonant absorption by ^{83}Kr -nuclei, 13th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Салоники, Греция, 2017
6. **I.S. Drachnev**, Beta-spectrum measurements for ^{144}Ce - ^{144}Pr , Borexino General Meeting, Gran Sasso, Italy, June, 2017
7. **I.S. Drachnev**, Search for Low-Energy MeV Neutrinos correlated with Gravitational Wave Events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino Detector, Borexino General Meeting, Gran Sasso, Italy, June, 2017
8. **I.S. Drachnev**, Review on solar neutrino studies with Borexino, 18th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, August, 2017
9. **V.N. Muratova**, Measurement of ^{144}Pr beta-spectrum with Si(Li)-detectors in order to determine the electron antineutrinos spectrum, conf. Recent developments in Neutrino Physics and Astrophysics, L'Aquila, LNGS, Italy, September, 2017.
10. **A.V. Derbin**, A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector, conf. Recent developments in Neutrino Physics and Astrophysics, L'Aquila, LNGS, Italy, September, 2017.
11. **E.V. Unzhakov**, Precision ^{144}Pr spectrum measurement with Si(Li) spectrometer, The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, МИФИ, октябрь 2017
12. **E.V. Unzhakov**, Search for resonant absorption of solar axions with ^{83}Kr nuclei, The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, МИФИ, октябрь 2017
13. **I.S. Drachnev**, Beta-spectrum measurement for ^{144}Ce - ^{144}Pr : status update, Borexino General Meeting, Milan, Italy, December, 2017
14. **N.V. Pilipenko**, Measurement of ^{144}Ce - ^{144}Pr beta-spectra with Si(Li)-detectors, Borexino General Meeting, Milan, Italy, December, 2017

Диссертации, аспирантура (1+1+1)

Защищена 1 кандидатская диссертация (PhD)

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

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

(И.С. Драчнев, 20 декабрь 2016)

Подготовлена 1 кандидатская диссертация

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

(Е.В. Унжаков, 201???)

Магистратура СПбГУ -> Аспирантура ПИЯФ

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

(Н.Пилипенко, 2017, рук. И.М. Котина)

«Поиск осцилляций нейтрино в стерильное состояние с детектором Борексино и искусственными источниками (анти)нейтрино»

(Н.Пилипенко, 2017, рук. А.В. Дербин)

4(3) РФФИ и 2(1) РНФ в 2017 г.

6 грантов: РФФИ (4) 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 15-02-02117

Поиск стерильного нейтрино с детектором Борексино: измерение световыходов сцинтиллятора в зависимости от энергии электрона

руководитель *Дербин Александр Владимирович* НИЦ КИ ПИЯФ

5. 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

6. Грант РНФ № 16-12-10369

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

Руководитель *Скорыхатов Михаил Дмитриевич* НИЦ КИ
от ОПЯД - исполнители

7. Стипендия им. В.М. Лобашева (нс Унжаков Евгений Вадимович)

2011 – год нейтрино

Март: *стерильное нейтрино*

новые вычисления спектра реакторных нейтрино
 $R_{\text{набл}} / R_{\text{пред}} = 0.943 \pm 0.023$ реакторная аномалия

Июль: θ_{13} *отличен от нуля*

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

Сентябрь: – *сверхсветовые нейтрино*

CerN GranSasso OPERA

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

Апрель: *LMA решение для нейтрино*

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

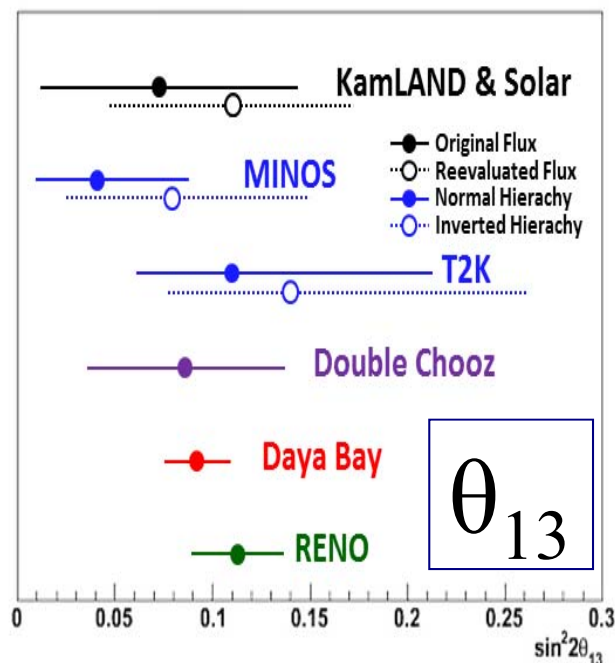
Сентябрь: *пер-нейтрино* $(1.6 \pm 0.3) 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Borexino,

Декабрь: θ_{13} *Double Chooz*

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

LVD coll. PRL 109, 070801 (2012)

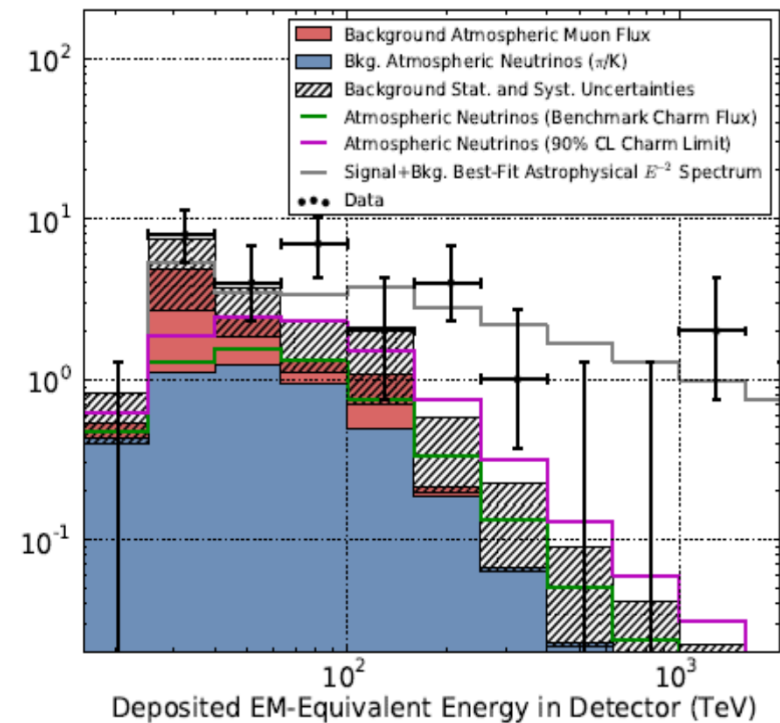
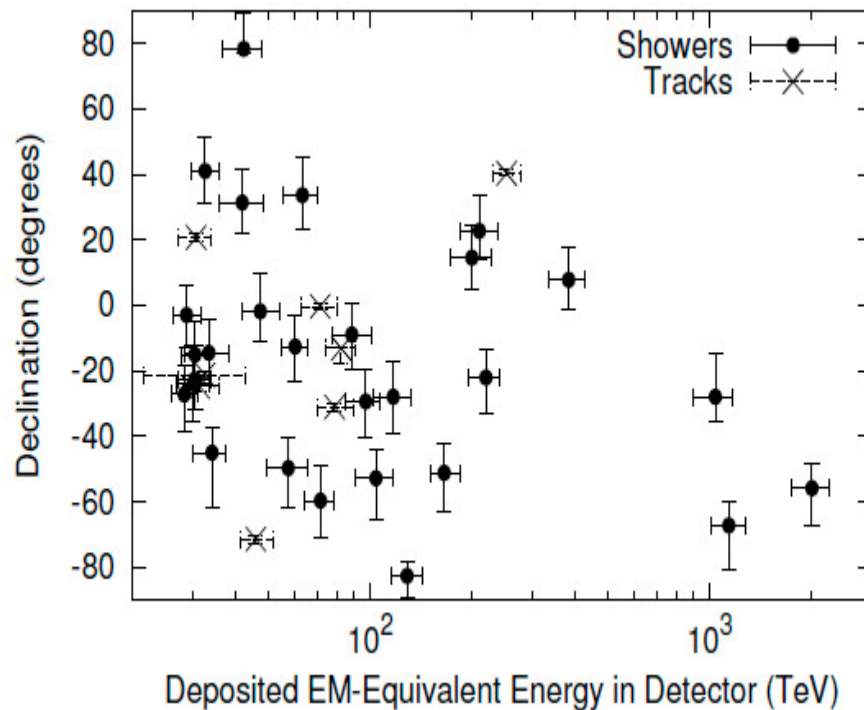
Borexino coll. arXiv:1207.6860

ICARUS coll. arXiv:1208.2629

OPERA coll. arXiv:1212.1276

$$(V - C) / C$$

2013 – год открытия астрофизических нейтрино



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

2014 – регистрация солнечных pp-нейтрино

NATURE

«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2014»

ARTICLE

doi:10.1038/nature13702

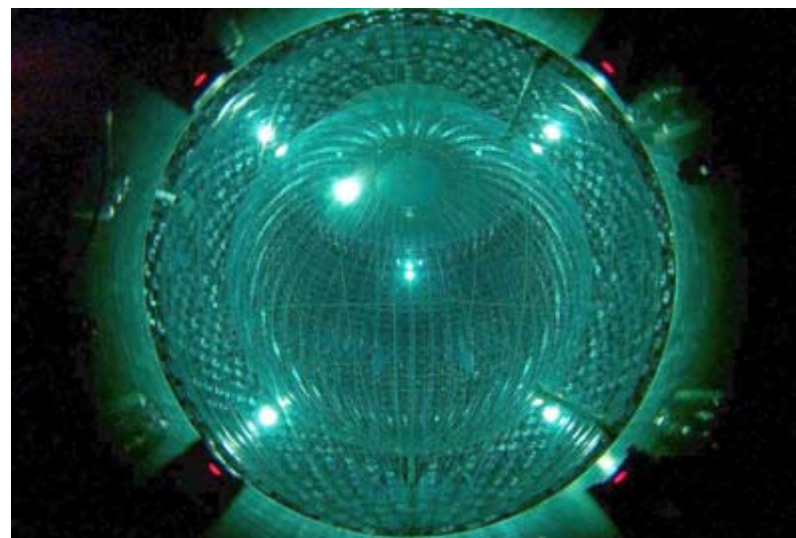
Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

Borexino Collaboration*

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

Neutrinos spotted from Sun's main nuclear reaction

Aug 27, 2014 [9 comments](#)



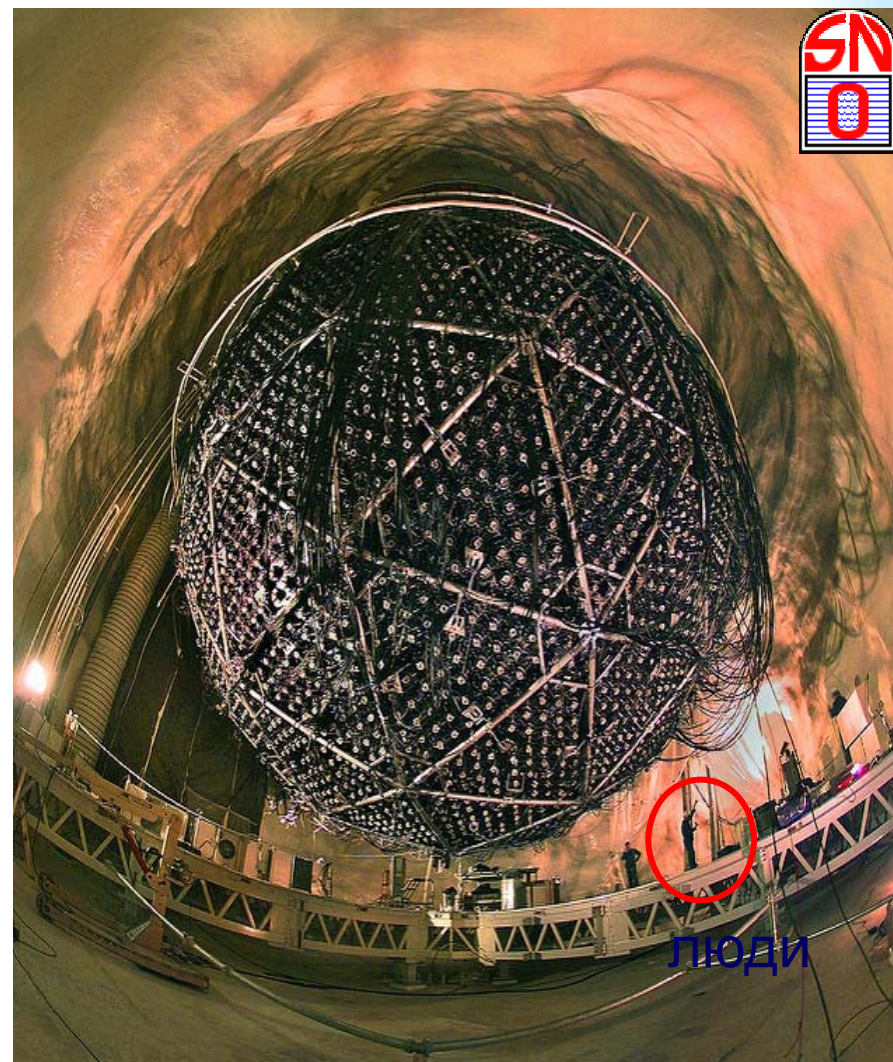
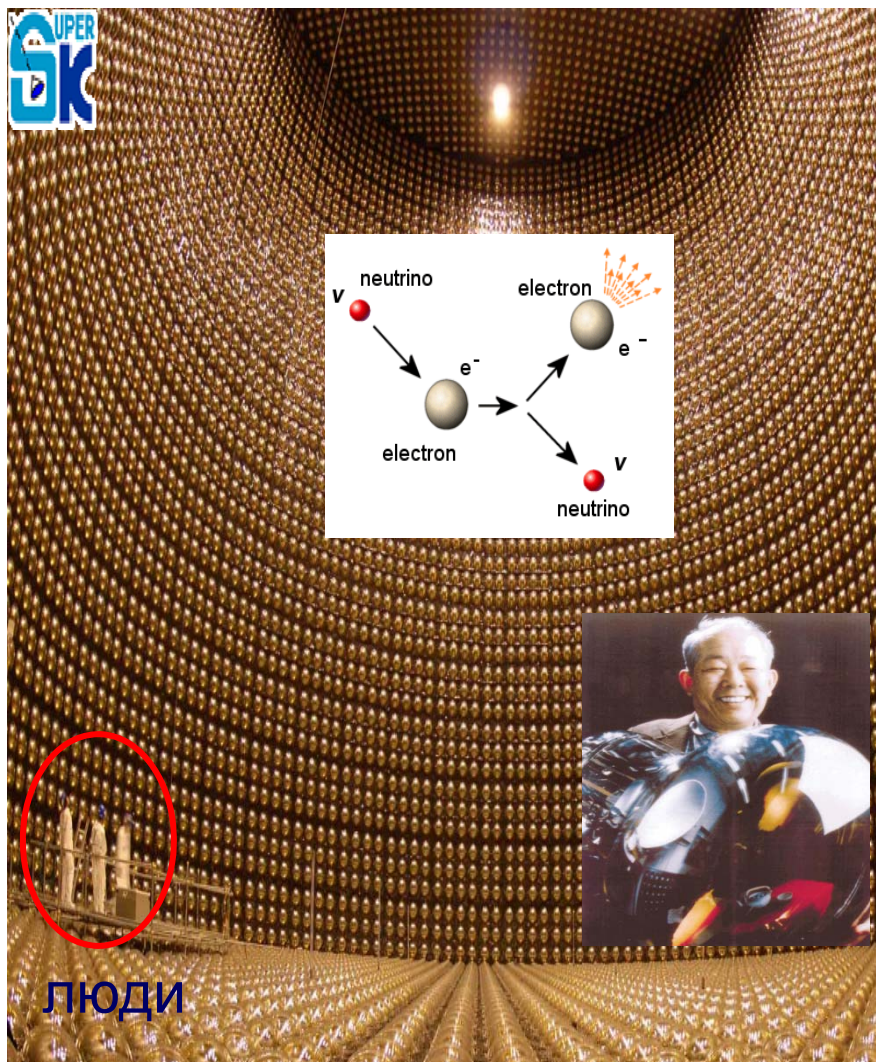
[Solace for solar physicists: Borexino results back theory](#)

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

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

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

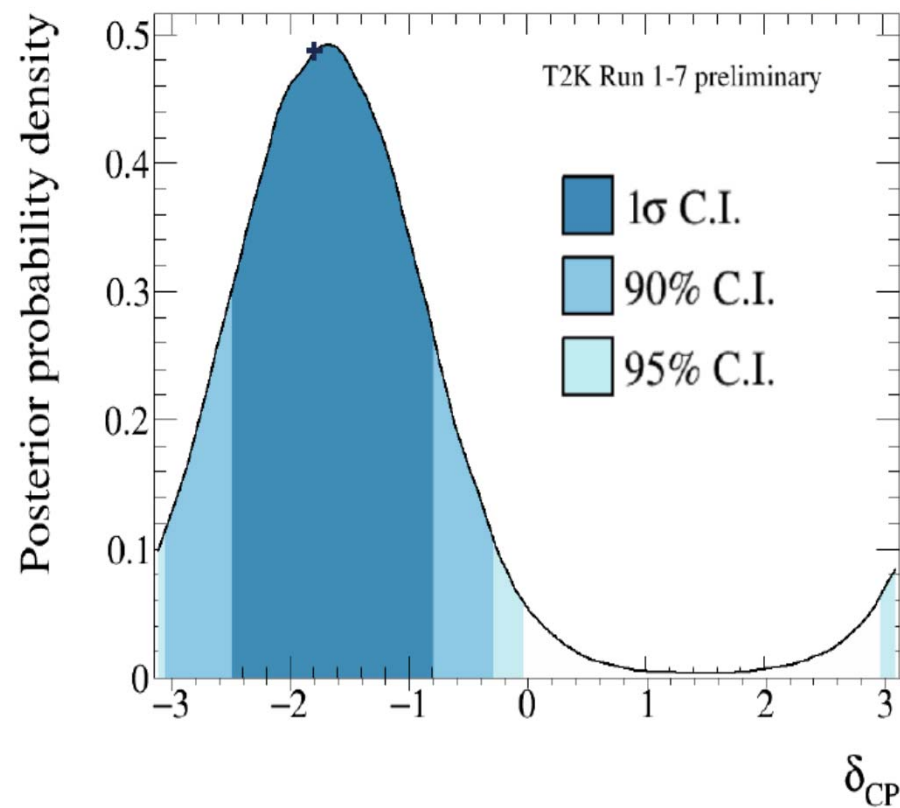
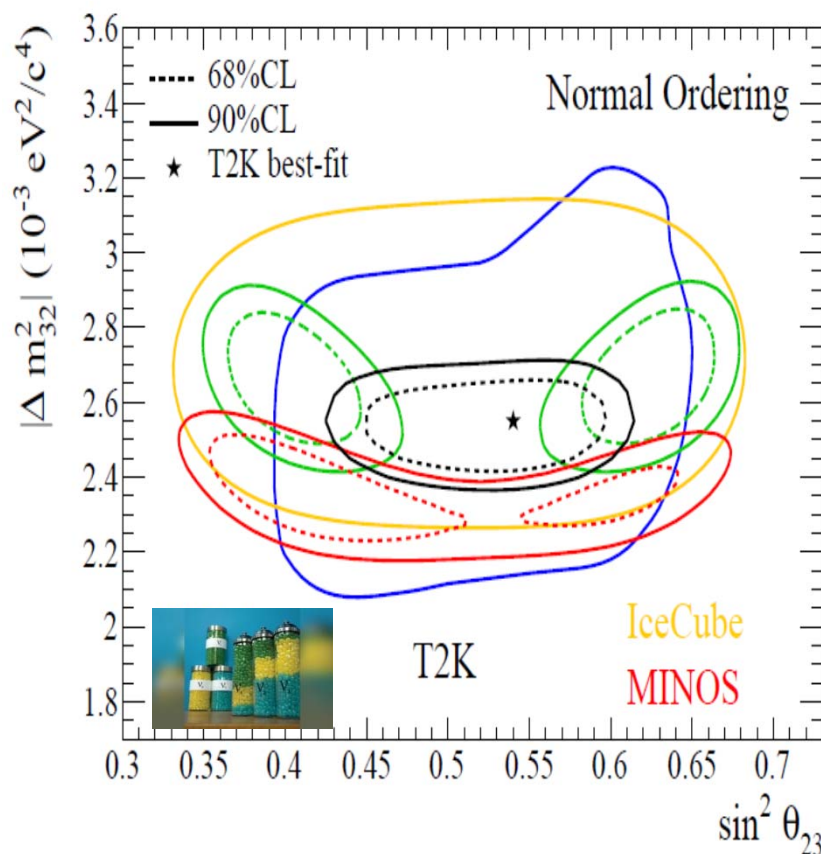
2015 – нобелевская S-K и SNO



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

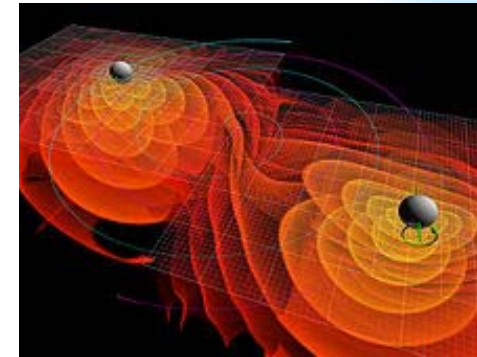
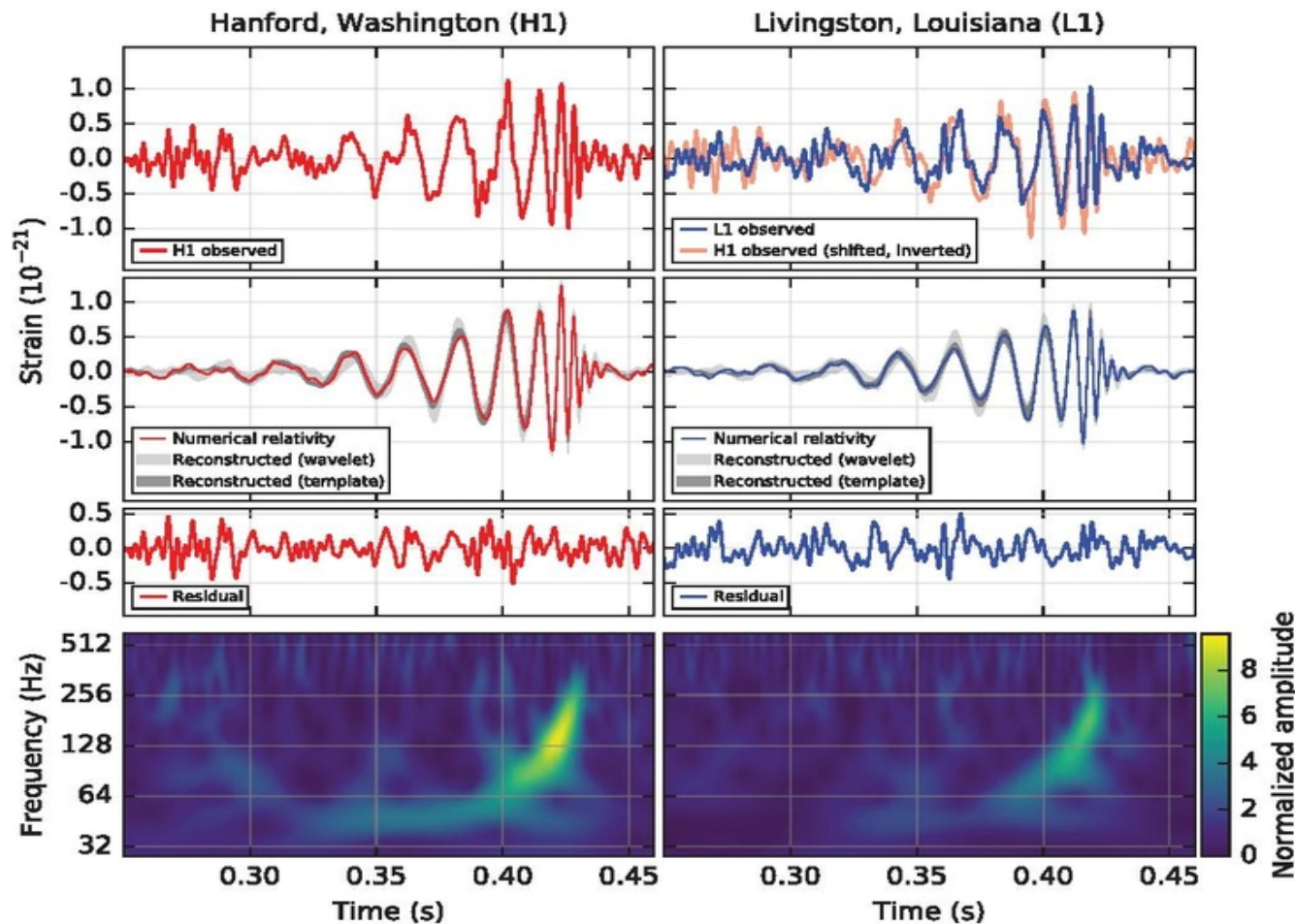
2016-17 г. - ($\Theta_{23} \neq 45^\circ$) – *NOvA*; ($\delta_{CP} \neq 0, \pm\pi$) - *T2K*

arXiv:17091.04180v3 [hep-ex] 29 Sep 2017



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

2016 – регистрация гравитационных волн ВН-ВН

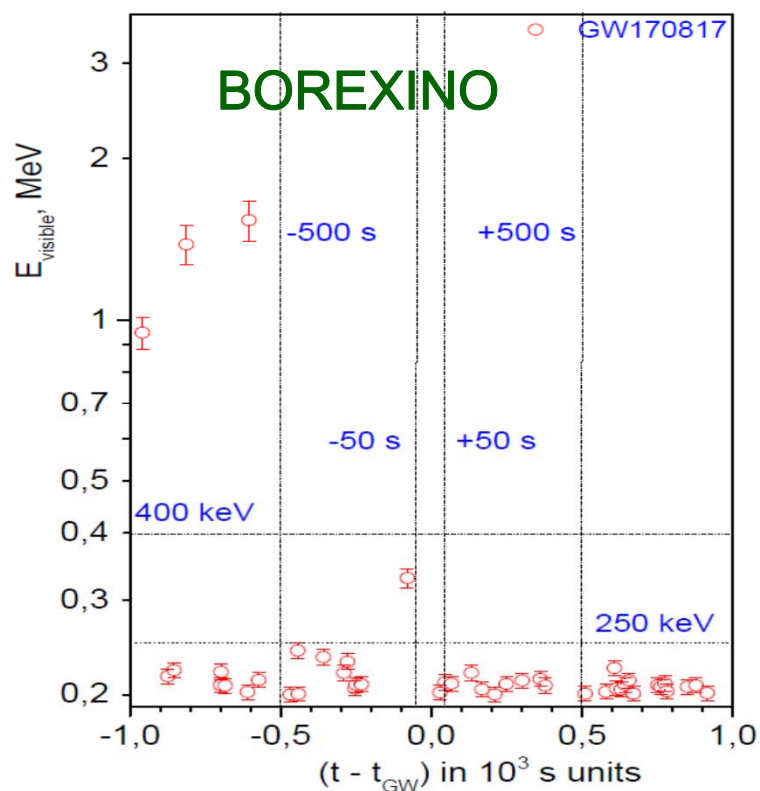


5.1 σ . На расстоянии 410 МПс ($z = 0.09$) слияние двух черных дыр с массами $36 M_{\odot}$ и $29 M_{\odot}$ с образованием $62 M_{\odot}$ и $3.0 M_{\odot}c^2$ излучилось в виде гравитационных волн. .

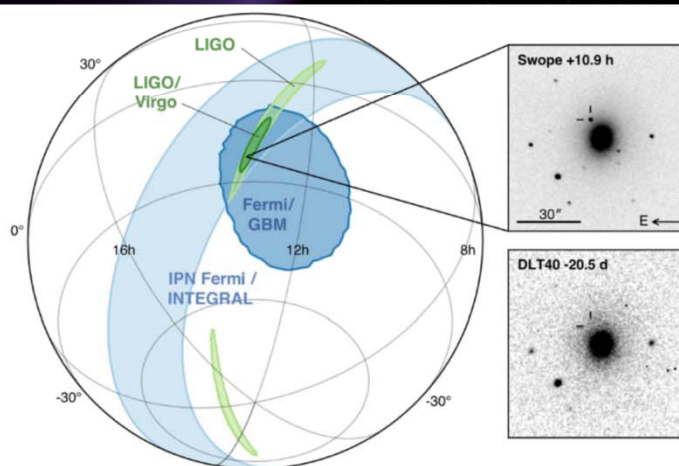
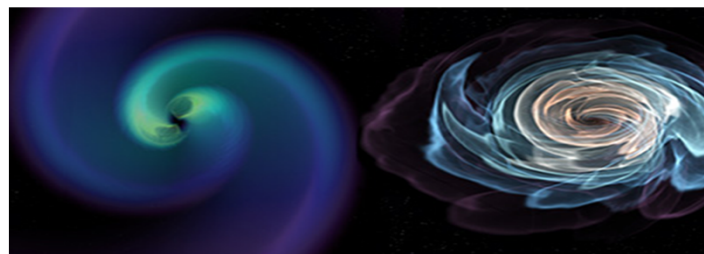
GW150914
LVT151012
GW151228
GW170104

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** γ -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.

Новые результаты Борексино (2017 г.)

**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_{solar} и V_{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 ${}^7\text{Be}$ - ν , pp - ν , CNO- ν

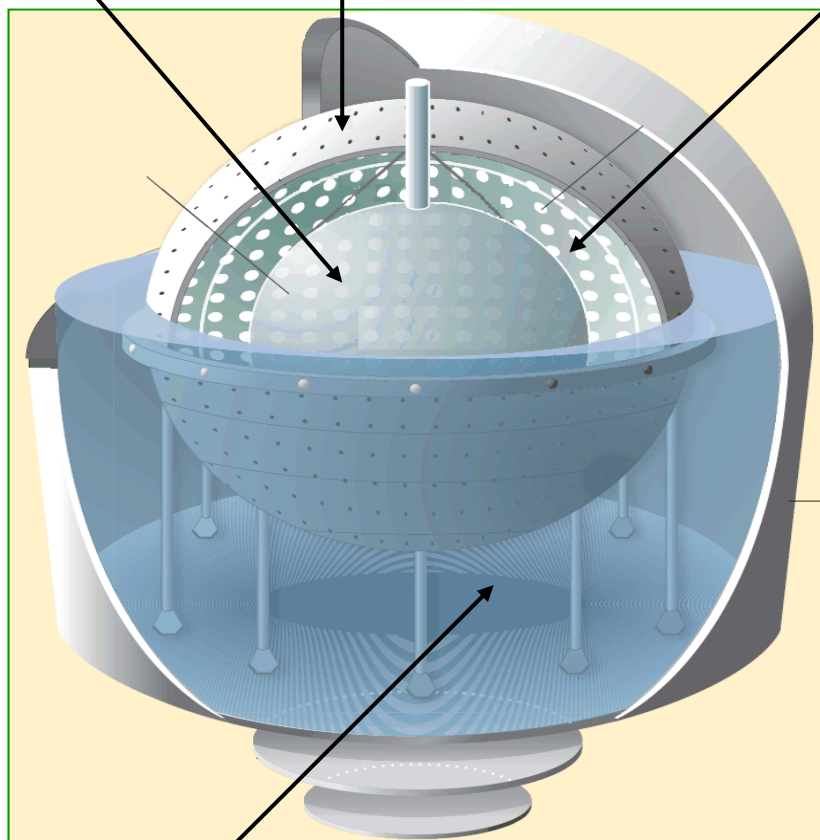
1. Вариации день-ночь для ${}^7\text{Be}$ - ν
2. Обнаружены pp -нейтрино
3. Поток ${}^7\text{Be}$ - ν измерен с 5% точ.

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

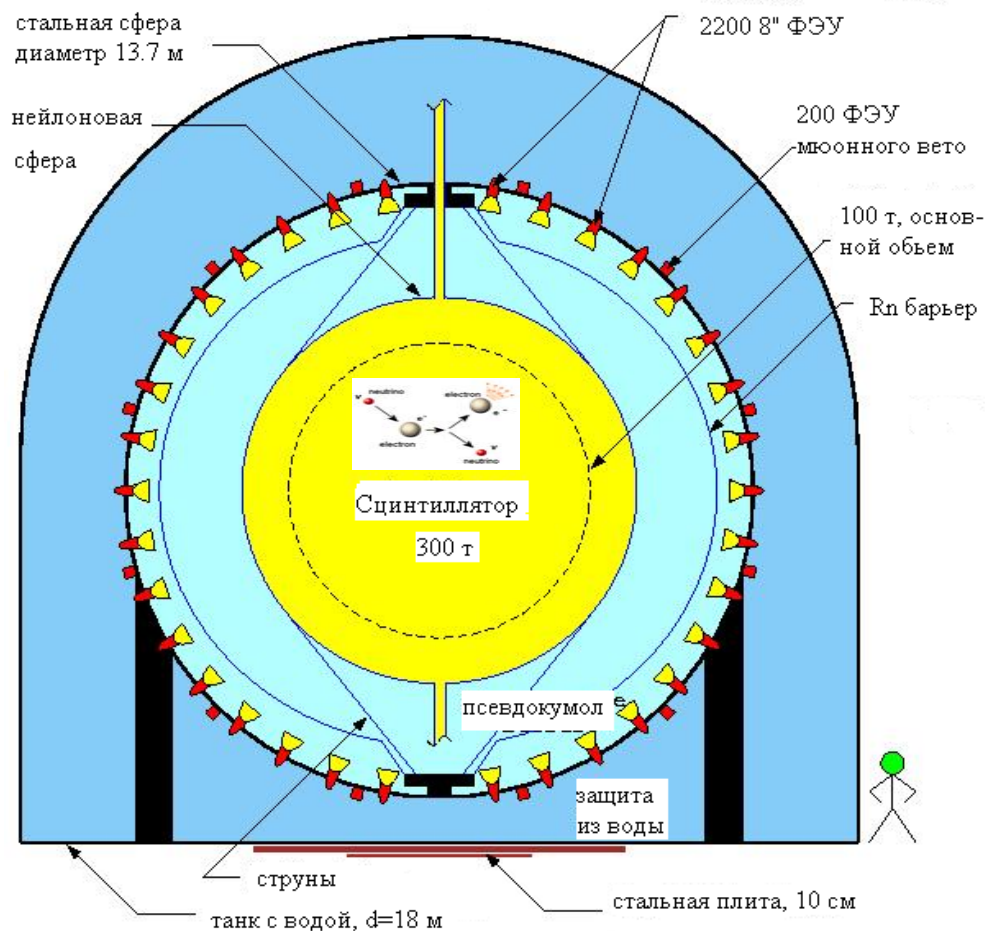
278 т. РС+РРО
(1,5 г/л)

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

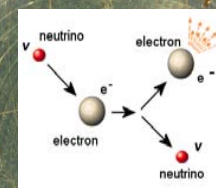
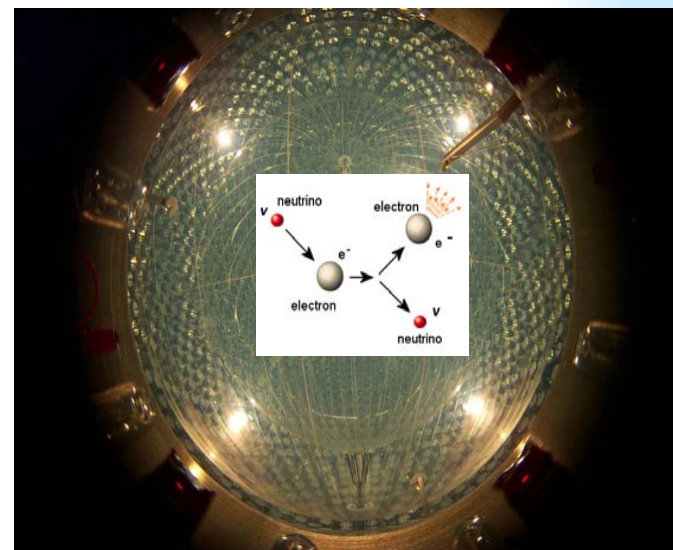
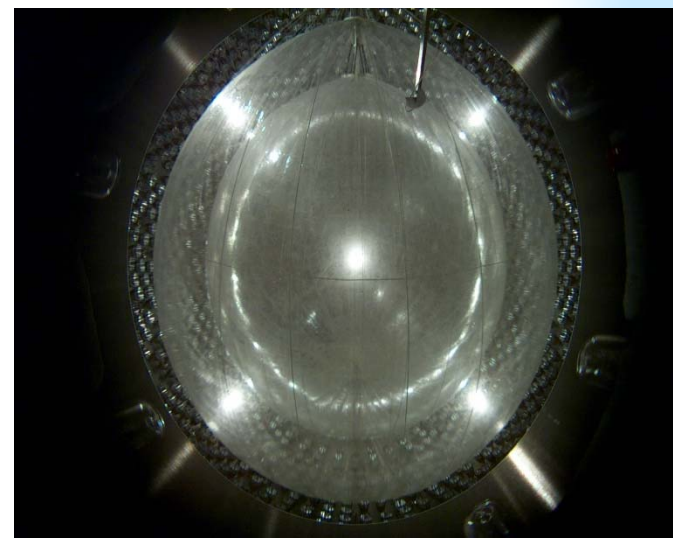
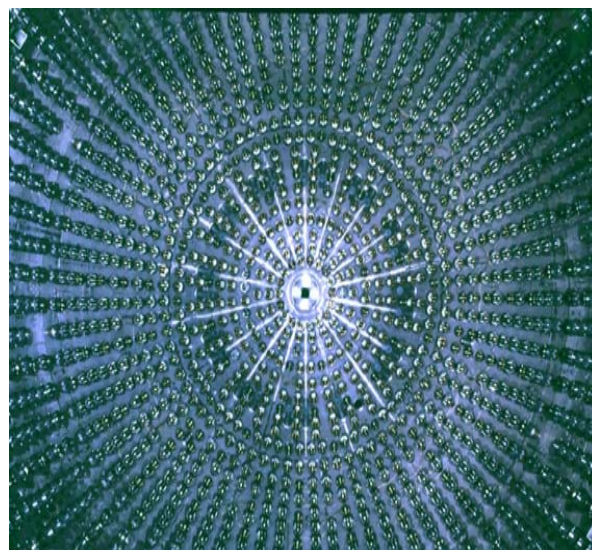
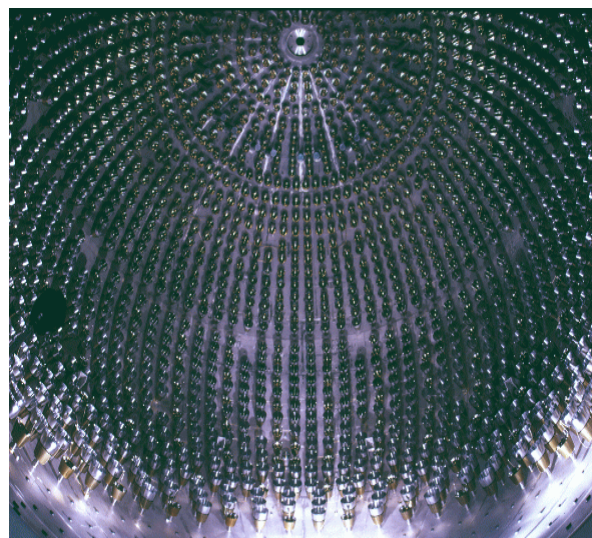
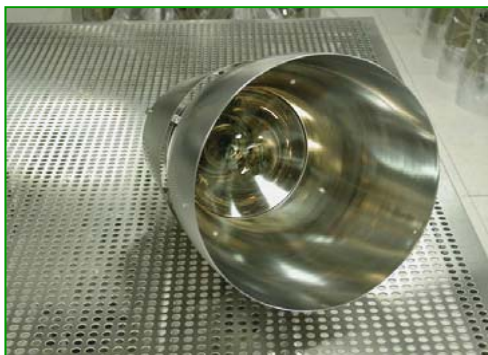
Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



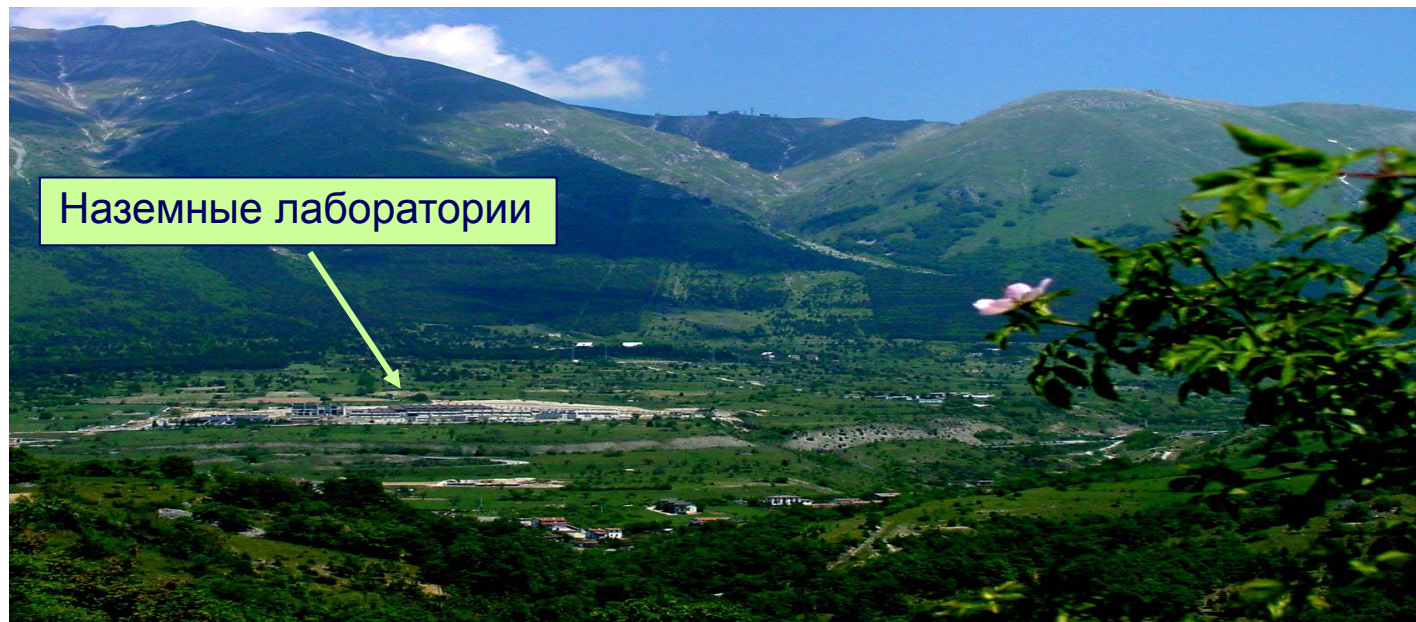
2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



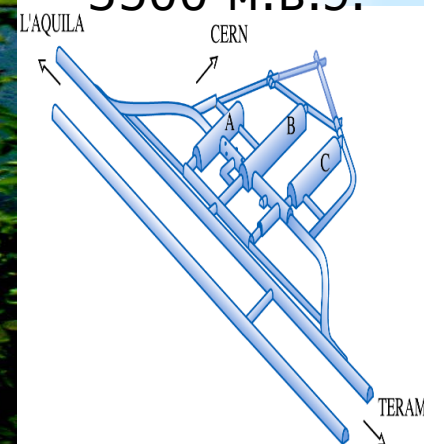
ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы



Национальная лаборатория Гран Сассо



Италия,
120 км от Рима
3500 м.в.э.



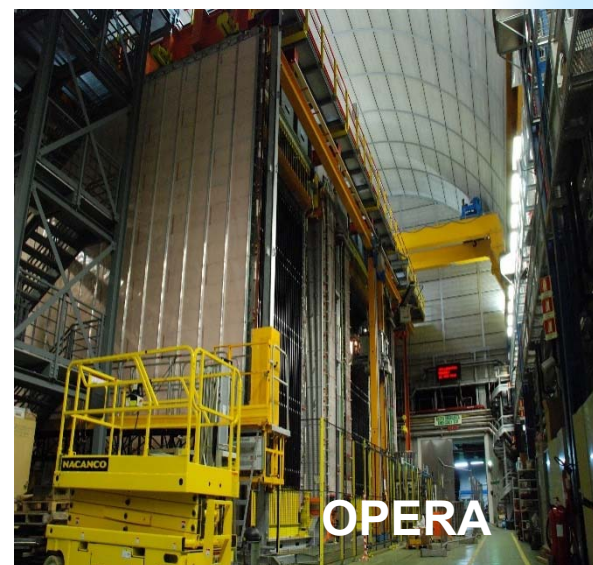
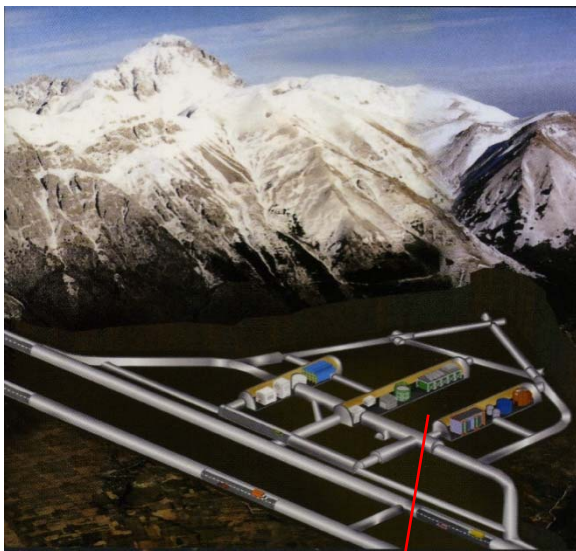
Борексино и завод по очистке

СТГ





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



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 и вклад ПИЯФ в 2017 г.

Входим в состав 7 (из 13) рабочих групп:

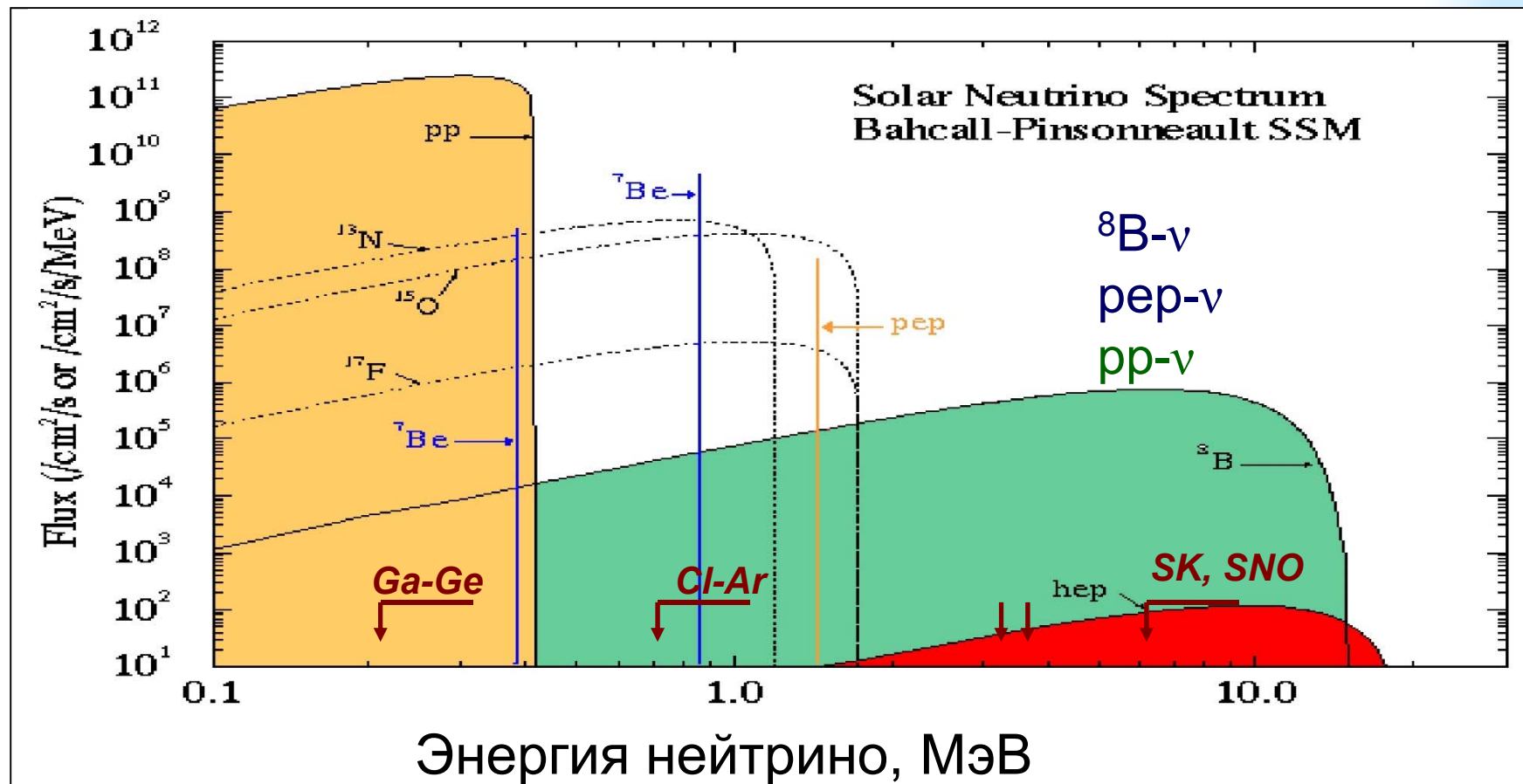
- 1) ${}^7\text{Be}$ -нейтрино,
- 2) Мюоны и нейтроны,
- 3) Анти-нейтрино,
- 4) pp -нейтрино,
- 5) Редкие процессы (председатель)
- 6) Стерильное нейтрино (SOX_Ce и SOX_Cr)
- 7) NuSolar (анализ данных по солнечным ν)

1. Группа ПИЯФ предложила, подготовила и опубликовала статью по поиску корреляций ν -событий с гравитационными волнами (GW). Корреляции искались с сигналами от анти- ν и ν всех флэйвов. Статья опубликована в *Astrophysical Journal*.
2. Группы ПИЯФ и ОИЯИ («pp- ν », «RP» и «NS») подготовили статью от коллаборации по магнитному моменту солнечных нейтрино. Опубликовано в *PRD Rapid Communication*
3. Для эксперимента Borexino_SOX по поиску стерильного нейтрино проводилась работы по измерению бета-спектра ${}^{144}\text{Ce}$ - ${}^{144}\text{Pr}$ с целью определения спектра электронных антинейтрино
4. Работа в Гран Сассо – 7 чел./мес. в экспериментах Borexino, SOX и DarkSide



Основная задача БОРЕКСИНО -

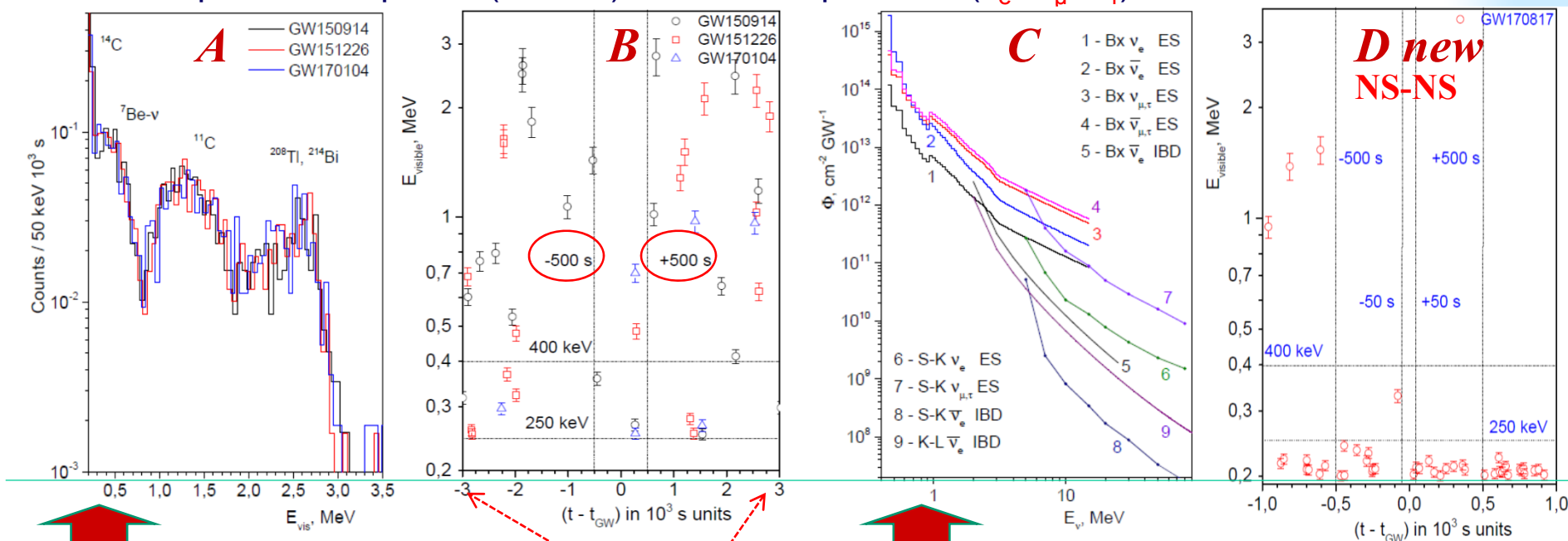
регистрация упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроны -
успешно решена, поток ${}^7\text{Be}$ - ν измерен с точностью лучше 3%.



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} $\nu/\text{cm}^2\text{сек}$

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

Группой ПИЯФ предложен и проведен анализ сигналов детектора Borexino с энергией более **250 кэВ** во временном окне ± 500 сек относительно времени регистрации трех гравитационных волн от слияния черных дыр (ЧД). Найдено **5** кандидатов для реакции (ν, e) -рассеяния, что согласуется с ожидаемым числом событий от солнечных нейтрино и природного фона. Установлены **наиболее строгие** ограничения на флюенсы нейтрино и антинейтрино с энергией **(0.5-5.0) МэВ** всех флэйвов (ν_e, ν_μ, ν_τ), связанные со слиянием



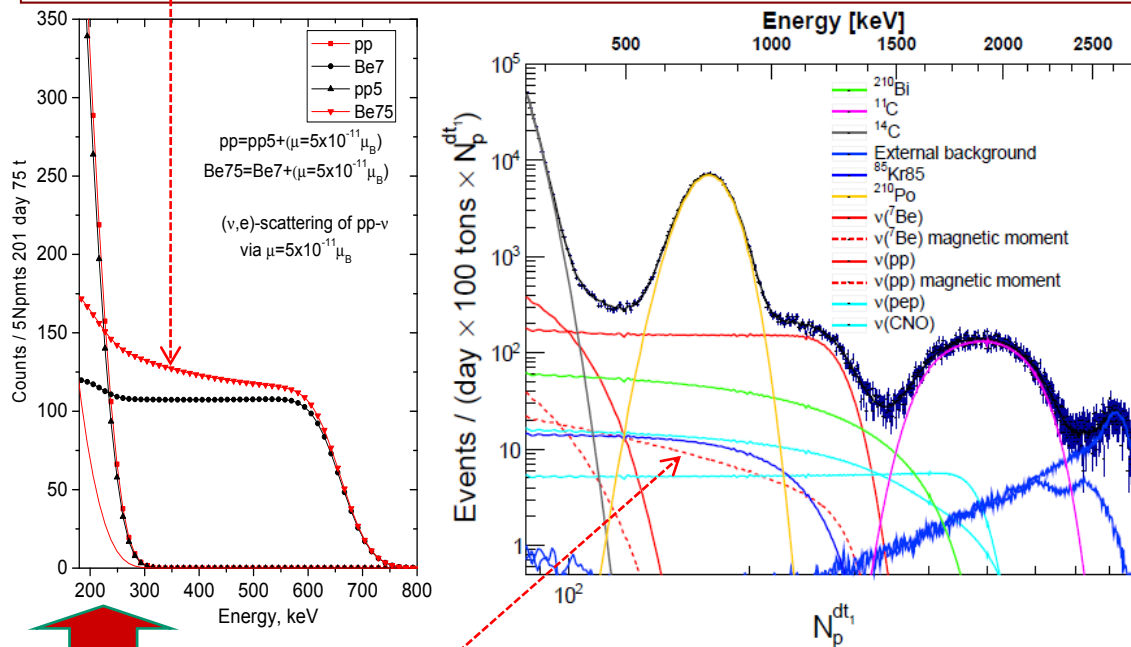
A - три спектра, накопленные за неделю, в которой была зарегистрирована ГВ.
B - события в интервале ± 3000 сек относительно регистрации событий GW150914, GW151226 и GW170104.

C - верхний предел на флюенс нейтрино и анти- ν различных флэйвов (ν_e, ν_μ, ν_τ), в сравнении с результатами Super-Kamiokande и KamLAND. **D** - события в Borexino при слиянии нейтронных звезд.

Новый предел на магнитный момент солнечных нейтрино:

$$\mu_{\text{eff}} \leq 2.8 \times 10^{-11} \mu_B$$

Поиск **эффективного магнитного момента** солнечных нейтрино проведен с использованием данных **Borexino** (фаза II), накопленных за **3.5 года**. ММ приводит к дополнительному вкладу в спектр электронов отдачи. Никаких значимых отклонений формы от ожидаемой не обнаружено. В результате установлен новый верхний предел на ЭММ $\mu_{\text{eff}} \leq 2.8 \times 10^{-11} \mu_B$ для 90 % у.д., с учетом данных Ga-Ge экспериментов. Получены новые ограничения на магнитные моменты электронного (ν_e) мюонного (ν_μ) и тау- (ν_τ) нейтрино, а также на диагональные и переходные магнитные моменты массовых ($\nu_{1,2,3}$) состояний нейтрино.



Эксперимент	Источник ν	Предел
GEMMA	Реактор	$2.9 \times 10^{-11} \mu_B$
TEXONO	Реактор	$7.4 \times 10^{-11} \mu_B$
S-KamiokaNDE	Солнечные $^8\text{B}-\nu$	$36 \times 10^{-11} \mu_B$
S-K+KamLAND	Солнечные ν	$11 \times 10^{-11} \mu_B$
Borexino	Солнечные $^7\text{Be}-\nu$	$2.8 \times 10^{-11} \mu_B$
Астрофизика	Красные гиганты	$0.22 \times 10^{-11} \mu_B$

$$|\mu_{11}| \leq 3.4; |\mu_{22}| \leq 5.1; |\mu_{33}| \leq 18.7;$$

$$|\mu_{12}| \leq 2.8; |\mu_{13}| \leq 3.4; |\mu_{23}| \leq 5.0;$$

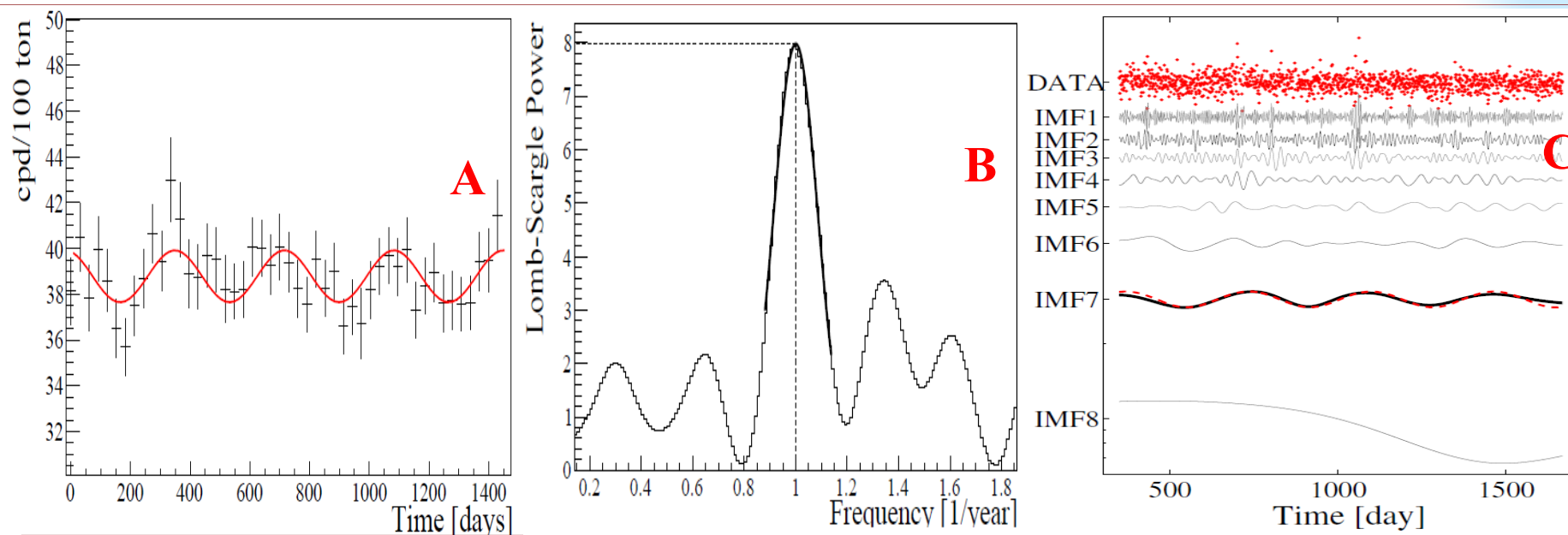
$$|\mu_e| \leq 3.9; |\mu_\mu| \leq 5.8; |\mu_\tau| \leq 5.8;$$

Верхние пределы на магнитные моменты массовых (ν_1, ν_2, ν_3) и флэйворных (ν_e, ν_μ, ν_τ) состояний нейтрино в единицах $10^{-11} \mu_B$.

А- ожидаемые спектры электронов отдачи в случае $\mu_{\text{eff}} = 0$ (черная кривая) и $\mu_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-11} \mu_B$ (красная кривая). **В-** основные компоненты спектра Borexino. Показан вклад для $\mu_{\text{eff}} = 2.8 \times 10^{-11} \mu_B$ (красная штрих)

Изучение временных вариаций потока солнечных ^7Be -нейтрино с помощью детектора Borexino.

Исследована временная модуляция скорости регистрации солнечных ^7Be -нейтрино детектором Borexino за 1456 суток. Период, амплитуда и фаза наблюдаемой модуляции согласуются с ожидаемой **годовой модуляцией**, связанной с изменением расстояния при вращении Земли вокруг Солнца. Таким образом окончательно подтверждается солнечное происхождение регистрируемых ^7Be -нейтрино. Отсутствие модуляции отбрасывается на **99,99%** уровне достоверности.



A – скорость счета электронных событий, усредненная по 30.4-суточным сериям. Красная линия – синусоидальный фит. **B** – Периодограмма Ломба-Скаргла. Пик $P(f)=7.9$ соответствует частоте 1 год. **C** – Метод разложения сигналов на эмпирические моды. Красные точки соответствуют статистике за 1 сутки. IMF7 – черная линия, красная линия ожидаемая годовая модуляция.



A Search for Low-energy Neutrinos Correlated with Gravitational Wave Events GW 150914, GW 151226, and GW 170104 with the Borexino Detector

M. Agostini¹, K. Altenmüller², S. Appel², V. Atroshchenko³, Z. Bagdasarian⁴, D. Basilico⁵, G. Bellini⁵, J. Benziger⁶, D. Bick⁷, G. Bonfini⁸, D. Bravo^{5,9}, B. Caccianiga⁵, F. Calaprice¹⁰, A. Caminata¹¹, S. Caprioli⁵, M. Carlini⁸, P. Cavalcante^{8,9}, A. Chepurinov¹², K. Choi¹³, D. D'Angelo⁵, S. Davini¹¹, **A. Derbin¹⁴**, X. F. Ding¹, A. Di Ludovico¹⁰, L. Di Noto¹¹, **I. Drachnev^{1,14}**, K. Fomenko¹⁵, A. Formozov^{5,15,12}, D. Franco¹⁶, F. Froberg¹⁰, F. Gabriele⁸, C. Galbiati¹⁰, C. Ghiano¹¹, M. Giammarchi⁵, A. Goretti¹⁰, M. Gromov¹², C. Hagner⁷, T. Houdy¹⁶, E. Hungerford¹⁷, Aldo Ianni^{8,27}, Andrea Ianni¹⁰, A. Jany¹⁸, D. Jeschke², V. Kobychiev¹⁹, D. Korablev¹⁵, G. Korga¹⁷, D. Kryn¹⁶, M. Laubenstein⁸, E. Litvinovich^{3,20}, F. Lombardi^{8,28}, P. Lombardi⁵, L. Ludhova^{4,21}, G. Lukyanchenko³, L. Lukyanchenko³, I. Machulin^{3,20}, G. Manuzio¹¹, S. Marcocci^{1,11}, J. Martyn²², E. Meroni⁵, M. Meyer²³, L. Miramonti⁵, M. Misiaszek¹⁸, **V. Muratova¹⁴**, B. Neumair², L. Oberauer², B. Opitz⁷, F. Ortica²⁴, M. Pallavicini¹¹, L. Papp², **N. Pilipenko¹⁴**, A. Pocar²⁵, A. Porcelli²², G. Ranucci⁵, A. Razeto⁸, A. Re⁵, A. Romani²⁴, R. Roncin^{8,16}, N. Rossi⁸, S. Schönert², **D. Semenov¹⁴**, M. Skorokhvatov^{3,20}, O. Smirnov¹⁵, A. Sotnikov¹⁵, L. F. F. Stokes⁸, Y. Suvorov^{3,26}, R. Tartaglia⁸, G. Testera¹¹, J. Thurn²³, M. Toropova³, **E. Unzhakov¹⁴**, A. Vishneva¹⁵, R. B. Vogelaar⁹, F. von Feilitzsch², H. Wang²⁶, S. Weinz²², M. Wojcik¹⁸, M. Wurm²², Z. Yokley⁹, O. Zaimidoroga¹⁵, S. Zavatarelli¹¹, K. Zuber²³, and G. Zuzel¹⁸

The Borexino Collaboration

PHYSICAL REVIEW D **96**, 091103(R) (2017)

Limiting neutrino magnetic moments with Borexino Phase-II solar neutrino data

M. Agostini^{1,8}, K. Altenmüller², S. Appel², V. Atroshchenko³, Z. Bagdasarian⁴, D. Basilico⁵, G. Bellini⁵, J. Benziger⁶, D. Bick⁷, G. Bonfini⁸, D. Bravo^{5,9}, B. Caccianiga⁵, F. Calaprice¹⁰, A. Caminata¹¹, S. Caprioli⁵, M. Carlini⁸, P. Cavalcante^{8,9}, A. Chepurinov¹², K. Choi¹³, L. Collica⁵, D. D'Angelo⁵, S. Davini¹¹, **A. Derbin¹⁴**, X. F. Ding^{1,8}, A. Di Ludovico¹⁰, L. Di Noto¹¹, **I. Drachnev^{1,14,8}**, K. Fomenko¹⁵, A. Formozov^{15,5,16}, D. Franco¹⁷, F. Froberg¹⁰, F. Gabriele⁸, C. Galbiati¹⁰, C. Ghiano⁸, M. Giammarchi⁵, A. Goretti¹⁰, M. Gromov¹⁶, D. Guffanti^{1,8}, C. Hagner⁷, T. Houdy¹⁷, E. Hungerford¹⁸, Aldo Ianni^{8,*}, Andrea Ianni¹⁰, A. Jany¹⁹, D. Jeschke², V. Kobychiev²⁰, D. Korablev¹⁵, G. Korga¹⁸, D. Kryn¹⁷, M. Laubenstein⁸, E. Litvinovich^{3,21}, F. Lombardi^{8,†}, P. Lombardi⁵, L. Ludhova^{4,22}, G. Lukyanchenko³, L. Lukyanchenko³, I. Machulin^{3,21}, G. Manuzio¹¹, S. Marcocci^{1,11,8}, J. Martyn²³, E. Meroni⁵, M. Meyer²⁴, L. Miramonti⁵, M. Misiaszek¹⁹, **V. Muratova¹⁴**, B. Neumair², L. Oberauer², B. Opitz⁷, V. Orekhov³, F. Ortica²⁵, M. Pallavicini¹¹, L. Papp², Ö. Penek^{4,22}, **N. Pilipenko¹⁴**, A. Pocar²⁶, A. Porcelli²³, G. Ranucci⁵, A. Razeto⁸, A. Re⁵, M. Redchuk^{4,22}, A. Romani²⁵, R. Roncin^{8,17}, N. Rossi⁸, S. Schönert², **D. Semenov¹⁴**, M. Skorokhvatov^{3,21}, O. Smirnov¹⁵, A. Sotnikov¹⁵, L. F. F. Stokes⁸, Y. Suvorov^{27,3}, R. Tartaglia⁸, G. Testera¹¹, J. Thurn²⁴, M. Toropova³, **E. Unzhakov¹⁴**, A. Vishneva¹⁵, R. B. Vogelaar⁹, F. von Feilitzsch², H. Wang²⁷, S. Weinz²³, M. Wojcik¹⁹, M. Wurm²³, Z. Yokley⁹, O. Zaimidoroga¹⁵, S. Zavatarelli¹¹, K. Zuber²⁴, and G. Zuzel¹⁹

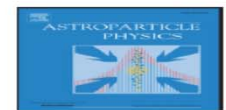
Astroparticle Physics **92** (2017) 21–29



Contents lists available at ScienceDirect

Astroparticle Physics

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



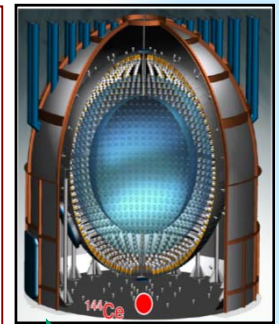
Seasonal modulation of the ⁷Be solar neutrino rate in Borexino



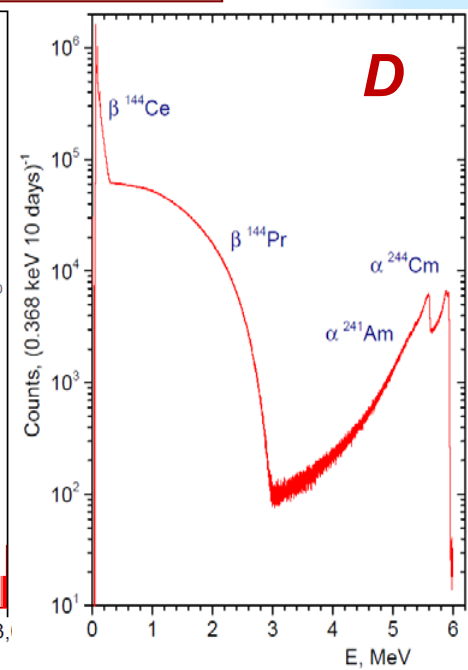
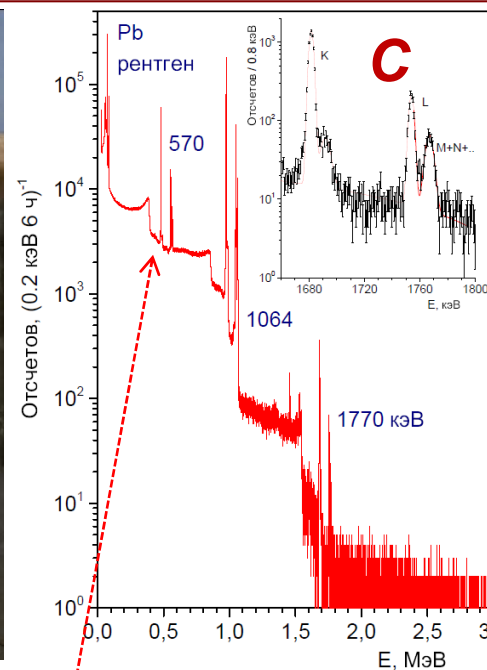
M. Agostini^u, K. Altenmüller^s, S. Appel^s, V. Atroshchenko^h, D. Basilico^k, G. Bellini^k, J. Benziger^o, D. Bick^{d,e}, G. Bonfini^j, L. Borodikhina^h, D. Bravo^{q,k}, B. Caccianiga^k, F. Calapriceⁿ, A. Caminata^c, S. Caprioli^k, M. Carlini^j, P. Cavalcante^{j,q}, A. Chepurinov^t, K. Choi^z, D. D'Angelo^k, S. Davini^{u,c}, **A. Derbin^m**, X. F. Ding^u, L. Di Noto^c, **I. Drachnev^{u,m}**, K. Fomenko^b, D. Franco^a, F. Frobergⁿ, F. Gabriele^j, C. Galbiatiⁿ, C. Ghiano^c, M. Giammarchi^k, M. Goeger-Neff^s, A. Gorettiⁿ, M. Gromov^t, C. Hagner^d, T. Houdy^a, E. Hungerford^v, Aldo Ianni^{j,a,c}, Andrea Ianniⁿ, A. Jany^f, D. Jeschke^s, V. Kobychiev^g, D. Korablev^b, G. Korga^v, D. Kryn^a, M. Laubenstein^j, B. Lehnert^w, E. Litvinovich^{h,i}, F. Lombardi^{j,a,d}, P. Lombardi^k, L. Ludhova^{aa,ab}, G. Lukyanchenko^h, I. Machulin^{h,i}, S. Manecki^{q,ae}, G. Manuzio^c, S. Marcocci^u, J. Martyn^y, E. Meroni^k, M. Meyer^d, L. Miramonti^k, M. Misiaszek^f, M. Montuschi^r, **V. Muratova^m**, B. Neumair^s, L. Oberauer^s, B. Opitz^d, F. Ortica^l, M. Pallavicini^c, L. Papp^s, A. Pocar^p, G. Ranucci^{k,+}, A. Razeto^j, A. Re^k, A. Romani^l, R. Roncin^{j,a}, N. Rossi^j, S. Schönert^s, **D. Semenov^m**, **P. Shakina^m**, M. Skorokhvatov^{h,i}, O. Smirnov^b, A. Sotnikov^b, L. F. F. Stokes^j, Y. Suvorov^{x,h}, R. Tartaglia^j, G. Testera^c, J. Thurn^w, M. Toropova^h, **E. Unzhakov^m**, A. Vishneva^b, R. B. Vogelaar^q, F. von Feilitzsch^s, H. Wang^x, S. Weinz^y, M. Wojcik^r, M. Wurm^y, Z. Yokley^q, O. Zaimidoroga^b, S. Zavatarelli^c, K. Zuber^w, G. Zuzel^r, The Borexino Collaboration

Измерения бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}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}Pr , наиболее перспективного источника антинейтрино для поиска **осцилляций нейтрино в стерильное состояние** в эксперименте **Borexino_SOX**.

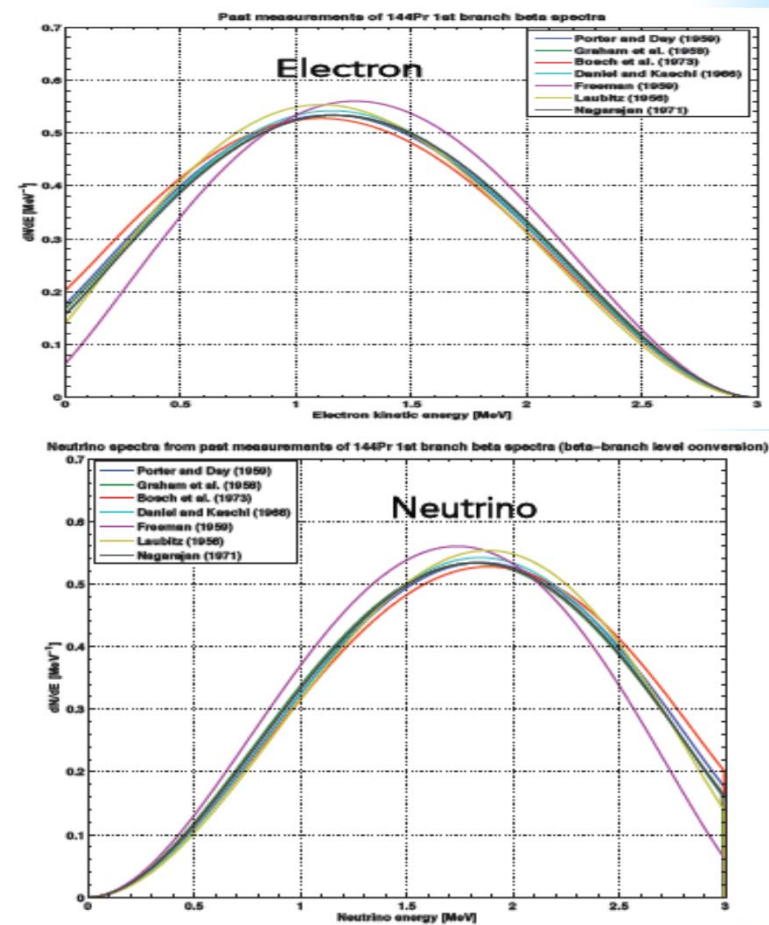
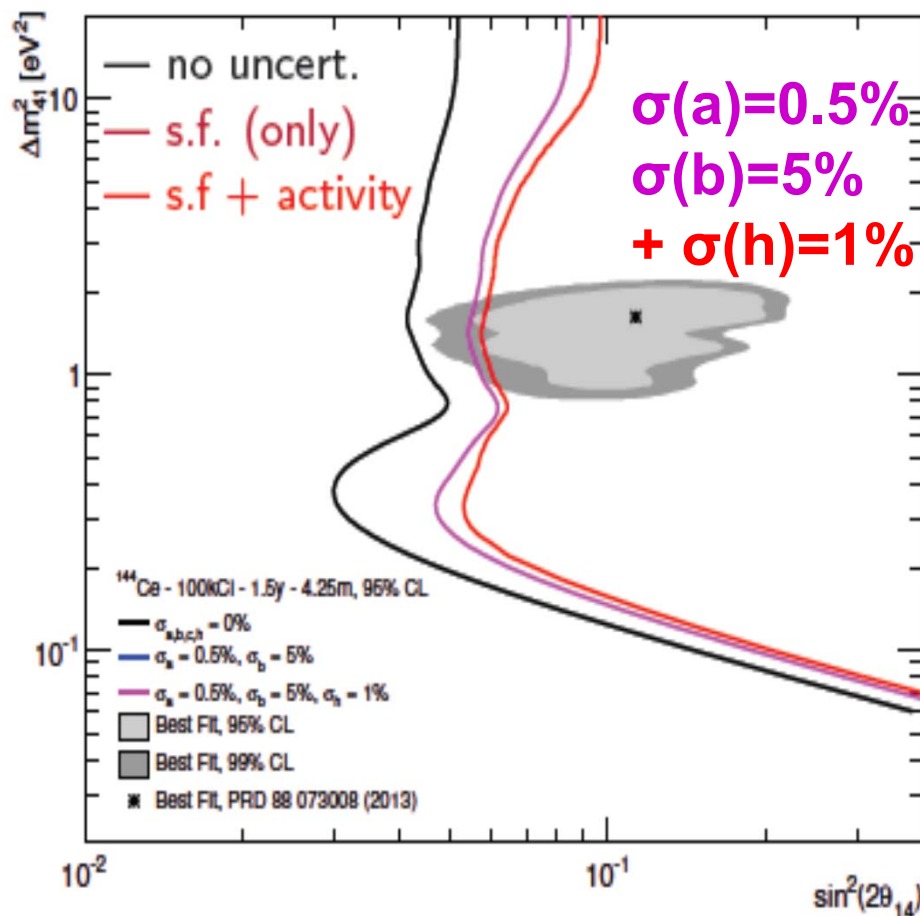


^{144}Pr



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

Спектр нейтрино при распаде ^{144}Pr



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

Планы коллаборации Борексино и новые задачи

1. Измерение (обнаружение)

CNO - нейтрино

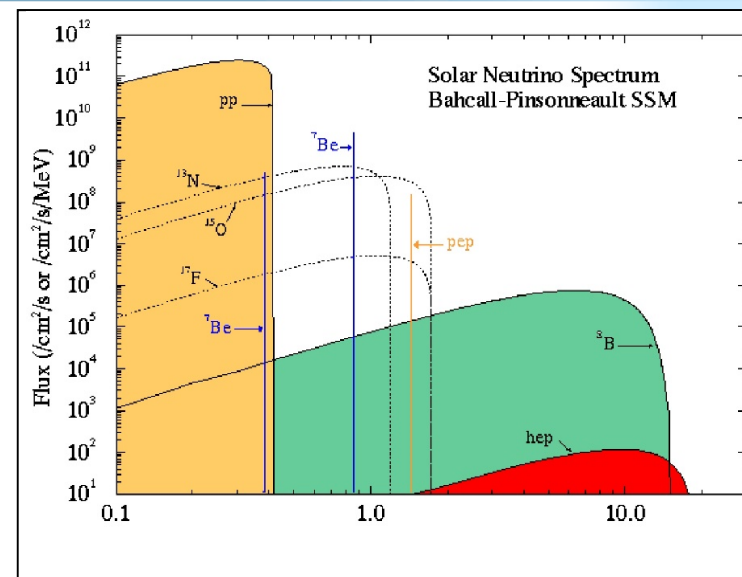
2. Стерильные нейтрино

**(^{144}Ce под детектором -
вместе с программой с.н.)**

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

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

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



Поиск частиц темной материи в 2017

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

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

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

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

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

2.4 Новый проект **TASTE** – Troitsk Axion Solar Telescope Experiment

DarkSide collaboration

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

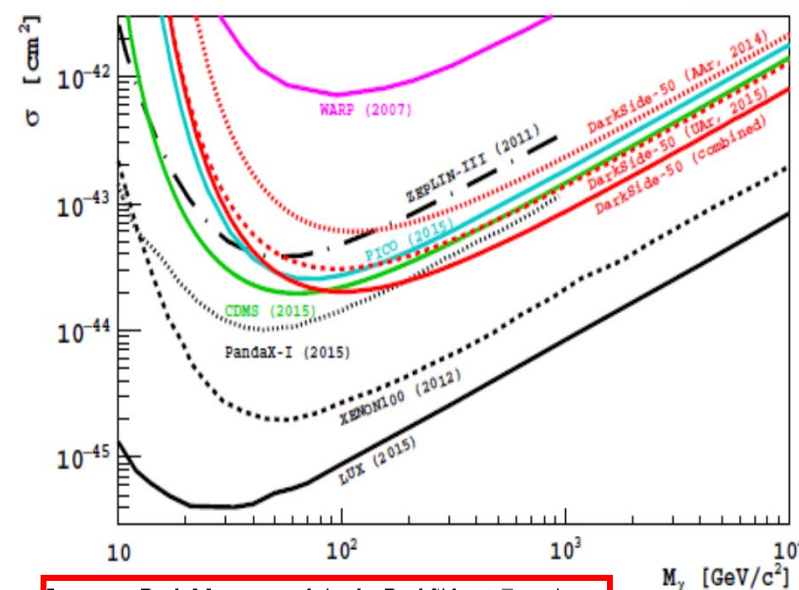
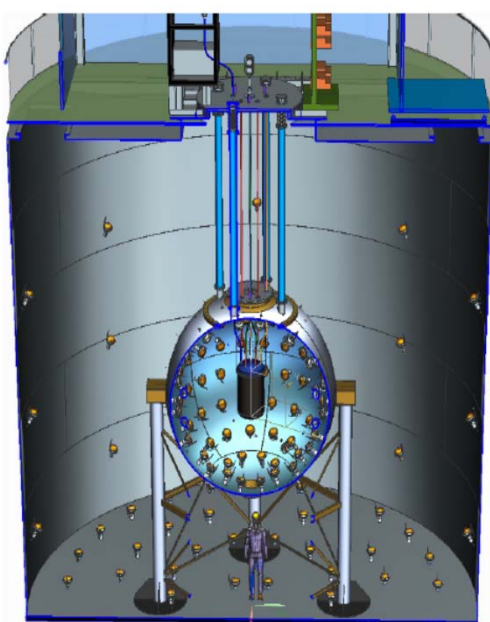
P. Agnes,¹ L. Agostino,² I. F. M. Albuquerque,^{3,4} T. Alexander,^{5,6} A. K. Alton,⁷ K. Arisaka,⁸ H. O. Back,^{3,9} B. Baldin,⁶ K. Biery,⁶ G. Bonfini,¹⁰ M. Bossa,^{11,10} B. Bottino,^{12,13} A. Brigatti,¹⁴ J. Brodsky,³ F. Budano,^{15,16} S. Bussino,^{15,16} M. Cadeddu,^{17,18} L. Cadonati,⁵ M. Cadoni,^{17,18}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

(The DarkSide Collaboration)



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

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



Low-mass Dark Matter search in the DarkSide-50 Experiment

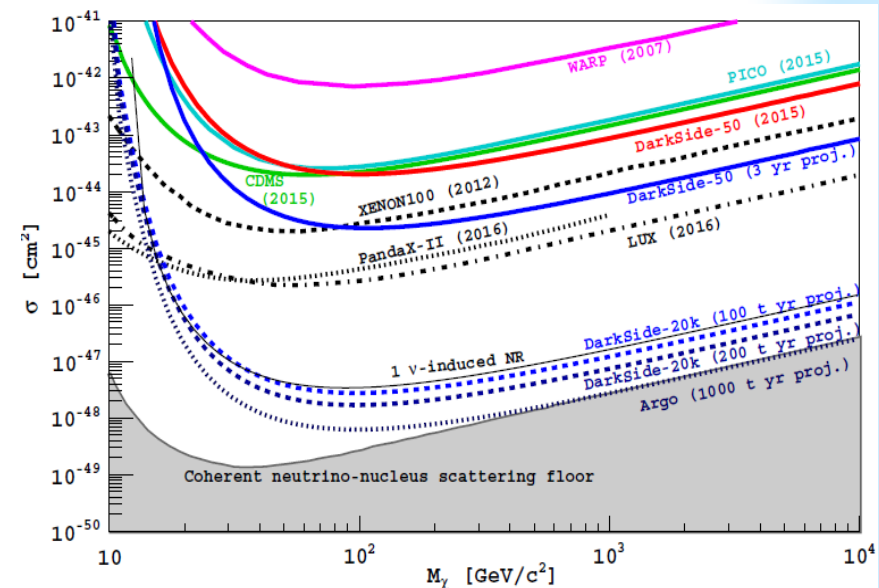
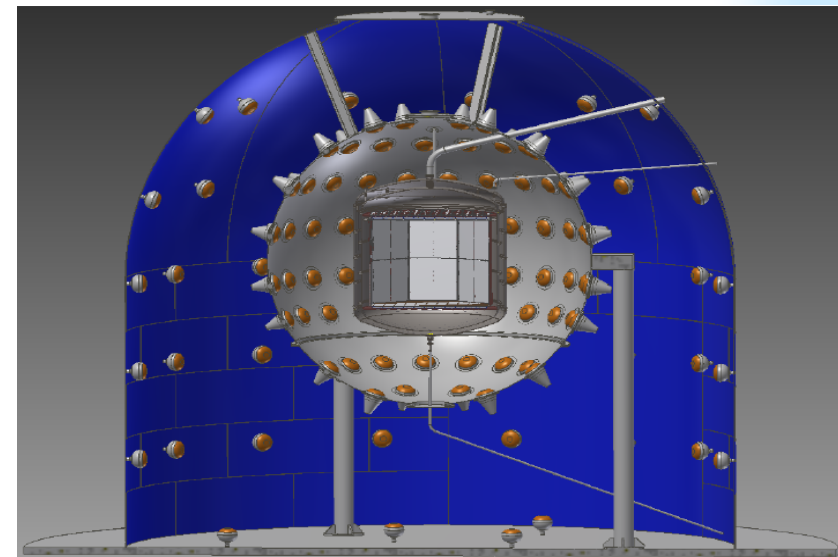
TPC Ar-камера находится внутри водного танка, который выполняет роль пассивной защиты от естественной радиоактивности и роль мюонного вето.

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

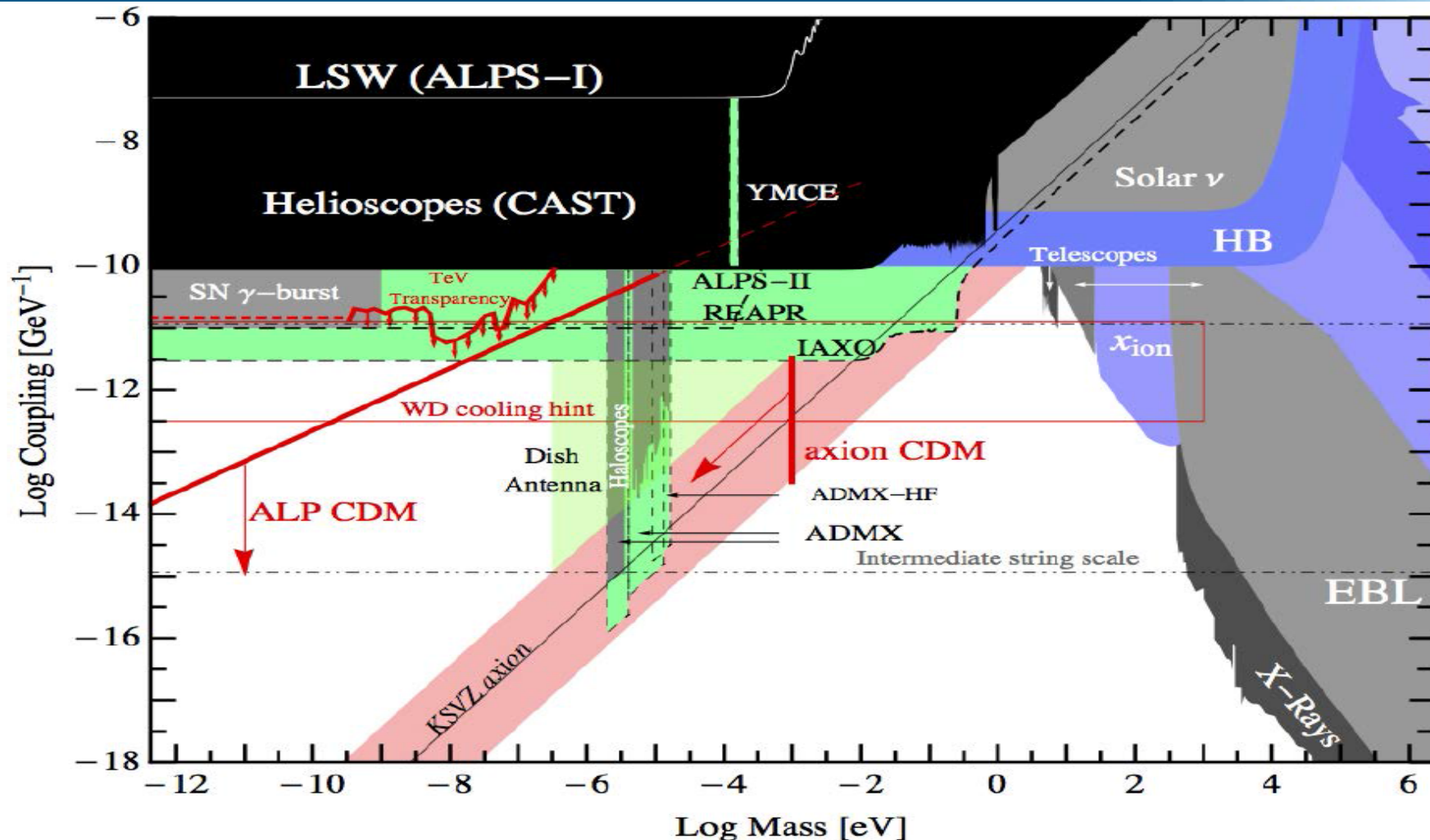
DarkSide – 20K (arXiv:1707.08145v1)

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

C. E. Aalseth¹, F. Acerbi^{2,3}, P. Agnes⁴, I. F. M. Albuquerque⁵, T. Alexander¹, A. Alici^{6,7,8}, A. K. Altom⁹, P. Antonioli⁷, S. Arcelli^{7,8}, R. Ardito^{10,11}, I. J. Arnuquist¹, D. M. Asner¹, M. Ave⁶, H. O. Back¹, A. I. Barrado Olmedo¹², G. Batignani^{13,14}, E. Bertoldo¹⁵, S. Bettarini^{13,14}, M. G. Bisogni^{13,14}, V. Bocci¹⁶, A. Bondar^{17,18}, G. Bonfini¹⁹, W. Bonivento²⁰, M. Bossa^{21,19}, B. Bottino^{22,23}, M. Boulay⁷², R. Bunker¹, S. Bussino^{24,25}, A. Buzulutskov^{17,18}, M. Cadeddu^{26,20}, M. Cadoni^{26,20}, A. Caminata²³, N. Canci^{4,19}, A. Candela¹⁹, C. Cantini²⁷, M. Caravati^{26,20}, M. Carliello²³, M. Carlini¹⁹, M. Carpinelli^{28,29}, A. Castellani^{10,11}, S. Catalanotti^{30,31}, V. Cataudella^{30,31}, P. Cavalcante^{19,32}, S. Cavauti^{30,31}, R. Cerasetto²³, A. Chepurinov³³, C. Cicalò²⁰, L. Cifarelli^{6,7,8}, M. Citterio¹¹, A. G. Cocco³¹, M. Colocci^{7,8}, S. Corgioli^{36,20}, G. Covone^{30,31}, P. Crivelli²⁷, I. D'Antone⁷, M. D'Incecco¹⁹, D. D'Urso²⁸, M. D. De Rocha Rolo³⁵, M. Daniel¹², S. Davini^{21,19,23}, A. de Candia^{30,31}, S. De Cecco^{16,43}, M. De Deo¹⁹, G. De Filippis^{30,31}, G. De Guido^{38,11}, G. De Rosa^{30,31}, G. Dellacasa³⁵, M. Della Valle^{39,31}, P. Demontis^{28,29,40}, A. Derbin⁴¹, A. Devoto^{26,20}, F. Di Eusiano⁴², G. Di Pietro^{19,11}, C. Dionisi^{16,43}, A. Dolgov¹⁸, I. Dornia^{38,11}, S. Dussoni^{14,13}, A. Empl⁴, M. Fernandez Diaz¹², A. Ferri^{2,3}, C. Filip⁴⁵, G. Fiorillo^{30,31}, K. Fomenko⁴⁶, D. Franco⁴⁷, G. E. Froudakis⁴⁸, F. Gabriele¹⁹, A. Gabrieli^{28,29}, C. Galbiati^{42,11}, P. Garcia Abia¹², A. Gendotti²⁷, A. Ghisi^{10,11}, S. Giagu^{16,43}, P. Giampa⁴⁴, G. Gibertoni^{38,11}, C. Giganti³⁷, M. A. Giorgi^{14,13}, G. K. Giovanetti⁴², M. L. Gligan⁴⁵, A. Gola^{2,3}, O. Gorchakov⁴⁶, A. M. Goretti¹⁹, F. Granato⁴², M. Grassi¹³, J. W. Grate¹, G. Y. Grigoriev⁵⁰, M. Gromov³³, M. Guan⁵¹, M. B. B. Guerra⁵², M. Guerzoni⁷, M. Gulino^{53,29}, R. K. Haaland⁵⁴, A. Hallin⁷³, B. Harrop⁴², E. W. Hoppe¹, S. Horikawa²⁷, B. Hosseini²⁰, D. Hughes⁴², P. Humble¹, E. V. Hungerford⁴, An. Ianni^{42,19}, C. Jillings^{74,75}, T. N. Johnson⁵⁵, K. Keeter⁵², C. L. Kendziora⁶⁶, S. Kim⁴⁹, G. Koh⁴², D. Korabely⁴⁶, G. Korga^{4,19}, A. Kubankin⁵⁷, M. Kuss¹³, M. Kuźniak⁷², B. Lehnert⁷², X. Li⁴², M. Lissia⁶⁰, G. U. Lodi^{38,11}, B. Loer¹, G. Longo^{30,31}, P. Loverre^{16,43}, R. Lussana^{58,11}, L. Luzzi^{59,11}, Y. Ma⁵¹, A. A. Machado⁶⁰, I. N. Machulin^{50,61}, A. Mandarano^{21,19}, L. Mapelli⁴², M. Marcante^{62,3,2}, A. Margott¹, S. M. Mari^{24,25}, M. Mariani^{59,11}, J. Maricic⁶³, C. J. Martoff⁴⁹, M. Mascia^{36,20}, M. Mayer¹, A. B. McDonald⁷⁶, A. Messina^{16,43}, P. D. Meyers⁴², R. Milincic⁶³, A. Moggi¹³, S. Moio^{38,11}, J. Monroe⁶⁵, A. Monte⁶⁵, M. Morrocchi^{14,13}, B. J. Mount⁵², W. Mu²⁷, V. N. Muratova⁴¹, S. Murphy²⁷, P. Musico²³, R. Nania^{6,7}, A. Navrer Agasson³⁷, I. Nikulin⁵⁷, V. Nosov^{17,18}, A. O. Nozdrina^{50,61}, N. N. Nurakhov⁵⁰, A. Oleinik⁵⁷, V. Oleynikov^{17,18}, M. Orsini¹⁹, F. Ortica^{66,67}, L. Pagani^{22,23}, M. Pallavicini^{22,23}, S. Palmas^{36,20}, L. Pandola²⁹, E. Pantic⁵⁵, E. Paoloni^{13,14}, G. Paternoster^{2,3}, V. Pavletcov³³, F. Pazzona^{28,29}, S. Peeters⁷⁷, K. Pelczar¹⁹, L. A. Pellegrini^{38,11}, N. Pelliccia^{66,67}, F. Perotti^{10,11}, R. Perruzza¹⁹, V. Pesudo Fortes¹², C. Piemontese^{2,3}, F. Pilo¹³, A. Pocar⁶⁵, T. Pollmann⁷⁸, D. Portaluppi^{58,11}, D. A. Pugachev⁵⁰, H. Qian⁴², B. Radics²⁷, F. Raffaelli¹³, F. Ragusa^{69,11}, M. Ralletti²⁰, A. Rasetto¹⁹, V. Regazzoni^{62,3,2}, C. Regenfur², B. Reinhold⁶³, A. L. Renshaw⁷, M. Rescigno¹⁶, F. Retiere⁴⁴, Q. Riffard⁴⁷, A. Rivetti³⁵, S. Rizzardini⁴², A. Romani^{66,67}, L. Romero¹², B. Rossi³¹, N. Rossi¹⁹, A. Rubbia²⁷, D. Sablone^{42,19}, P. Salatino^{70,31}, O. Samoylov⁴⁶, E. Sánchez García¹², W. Sands⁴², M. Sant^{28,29}, R. Santorelli¹², C. Savarese^{21,19}, E. Scapparone⁷, B. Schlitzer⁵⁵, G. Scioli^{7,8}, E. Segreto⁶⁰, A. Seifert¹, D. A. Semenov⁴¹, A. Shchagin⁵⁷, L. Shekhtman^{17,18}, E. Shemyakina^{17,18}, A. Sheshukov⁴⁶, M. Simeone^{70,31}, P. N. Singh⁴, P. Skensved⁷⁶, M. D. Skorokhvatov^{50,61}, O. Smirnov⁴⁶, G. Sobrero²³, A. Sokolov^{17,18}, A. Sotnikov⁴⁶, F. Spiazzi²⁹, R. Stainforth⁷², C. Stanford⁴², G. B. Suffritti^{28,29,40}, Y. Suvorov^{71,19,50}, R. Tartaglia¹⁹, G. Testera³, A. Tonazzo⁴⁷, A. Tosi^{58,11}, P. Trinchese^{30,31}, E. V. Unzhakov⁴¹, A. Vacca^{36,20}, E. Vázquez-Jáuregui¹⁹, M. Verducci^{16,43}, T. Viant²⁷, F. Villa^{58,11}, A. Vishneva⁴⁶, B. Vogelaar³², M. Wada⁴², J. Wahl¹, J. Walding⁶⁴, S. Walker^{30,31}, H. Wang⁷¹, Y. Wang^{51,71}, A. W. Watson⁴⁹, S. Westerdale⁷², R. Williams⁵¹, M. M. Wojcik⁶⁸, S. Wu²⁷, X. Xiang⁴², X. Xiao⁷¹, C. Yang⁵¹, Z. Ye⁴, A. Yllera de Llano¹², F. Zappa^{58,11}, G. Zappala^{62,3,2}, C. Zhu⁴², A. Zichichi^{6,7,8}, M. Zullo¹⁶, A. Zullo¹⁶ and G. Zuzel⁶⁸



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 arXive в 2017 г, встречается всего в 4 (784/200) раз реже чем слово **neutrino**.



Classification of experiments

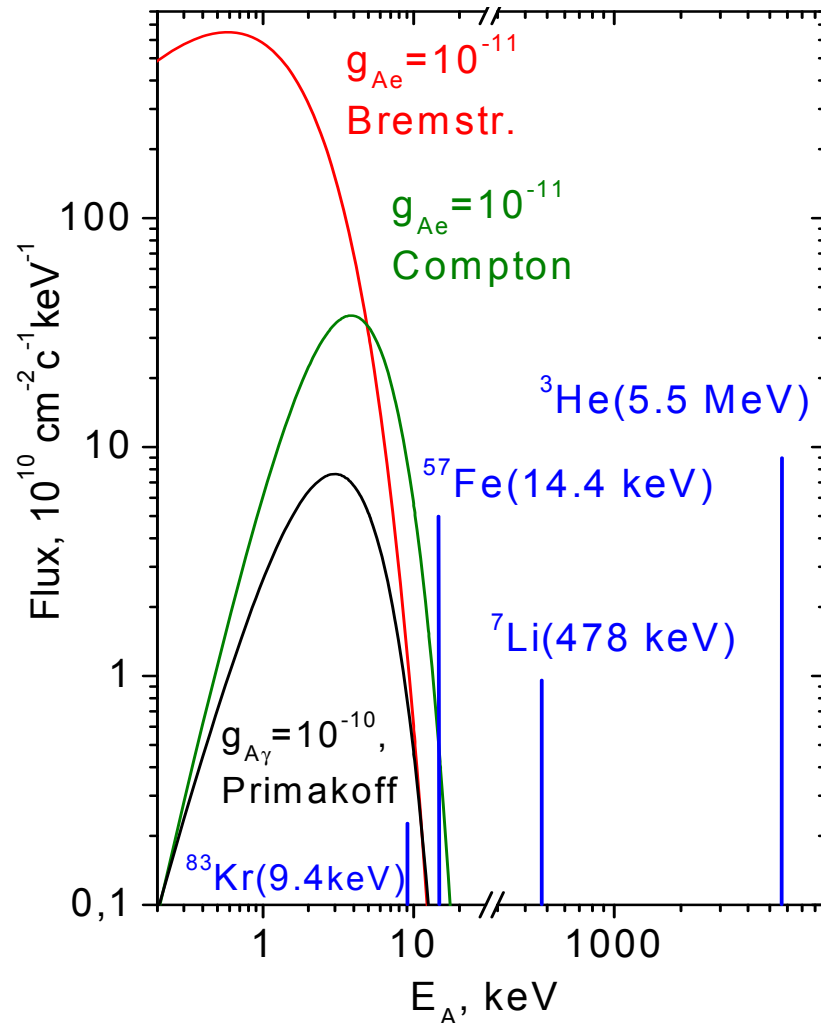
Detection

Creation

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



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



The main sources of solar axions:

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



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

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

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

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

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

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

Axioelectric effect in atoms and resonant absorption by nuclei

Two special reactions with high cross sections:

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

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

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

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

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

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

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

Detection of axions via resonant excitation of nuclear levels

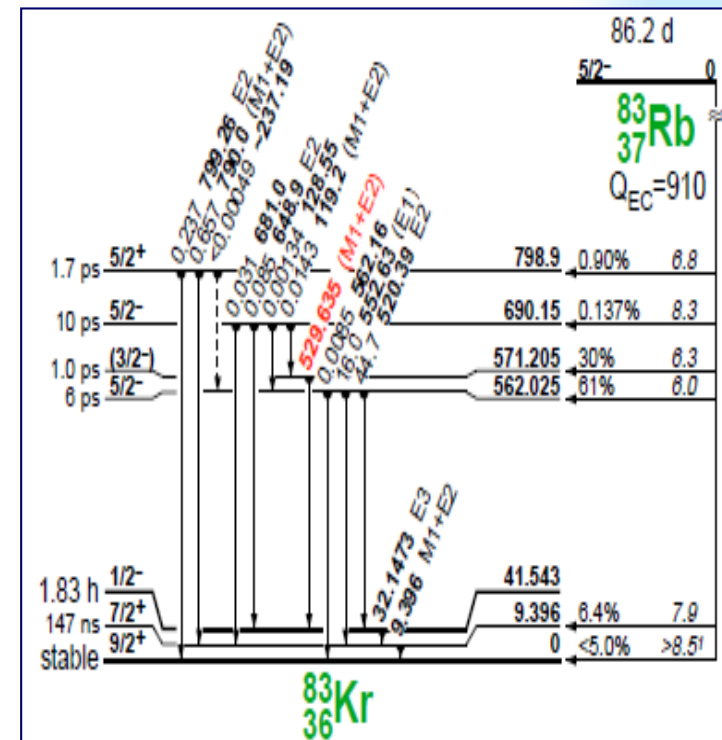
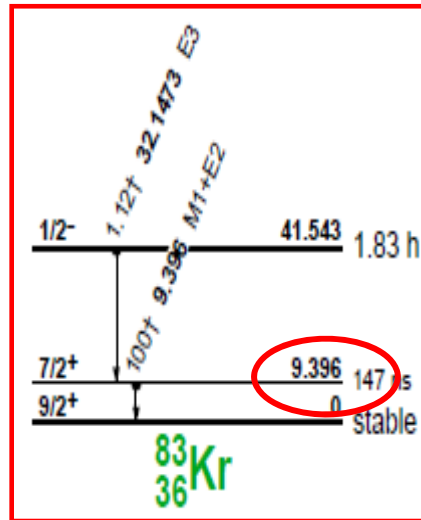
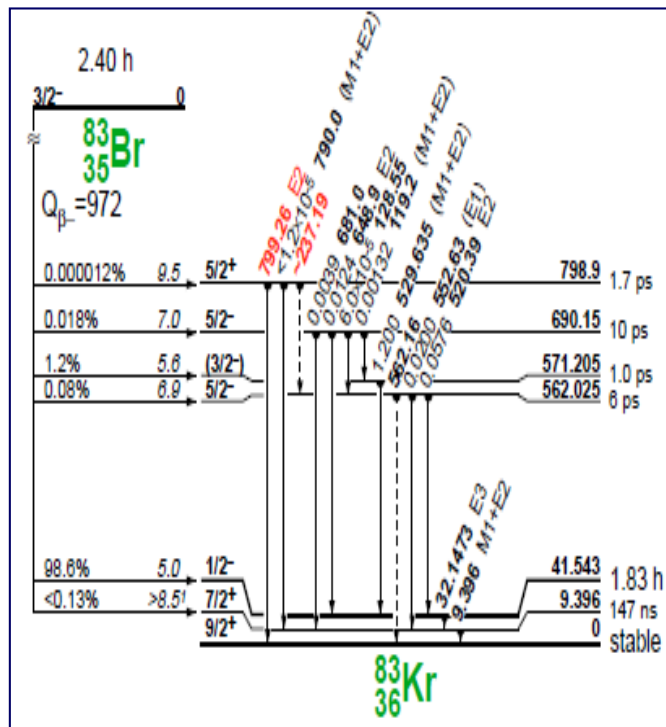
The axions can be produced when thermally excited nuclei (or excited due to nuclear reactions) in the Sun relaxes by magnetic transition to its ground state and could be detected via resonant excitation of the same nuclide in a laboratory.



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 ${}^{169}\text{Tm}$.

^{83}Kr levels scheme

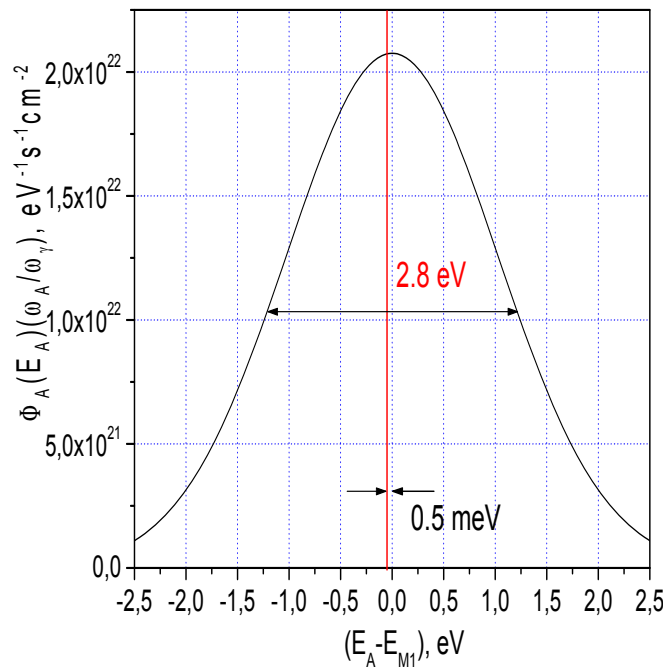


For our experiment we have chosen the ^{83}Kr nucleus as a target. Kr has one stable isotope. Axion absorption should lead to the excitation of low-lying nuclear energy level: $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma(9.4 \text{ keV})$. The energy of the first nuclear level ($7/2^+$) is equal to 9.396 keV, the axion flux at this energy is only 10 times less than at the maximum. The 9.4 keV nuclear level discharges through M1-type transition with E2-transition admixture value of $\delta^2 = 0.0129$. The electron conversion ratio $e/\gamma = 17.1$, maximum cross section of γ -ray absorption is $1.22 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$.

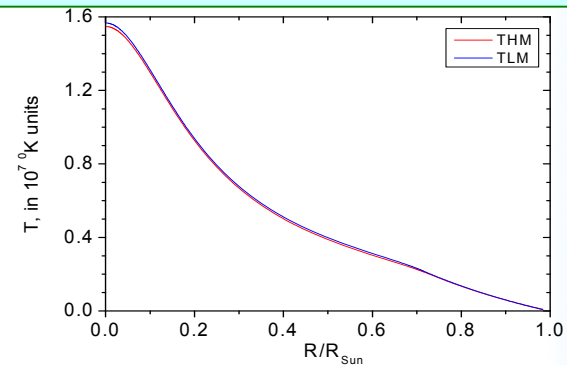
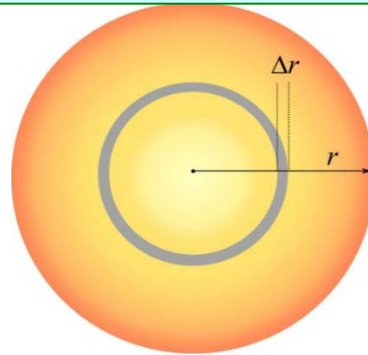


Flux of solar ^{83}Kr axions

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



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



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

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}Kr nucleus.



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

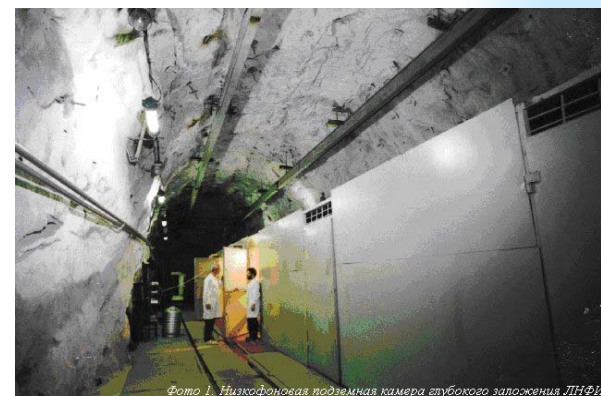
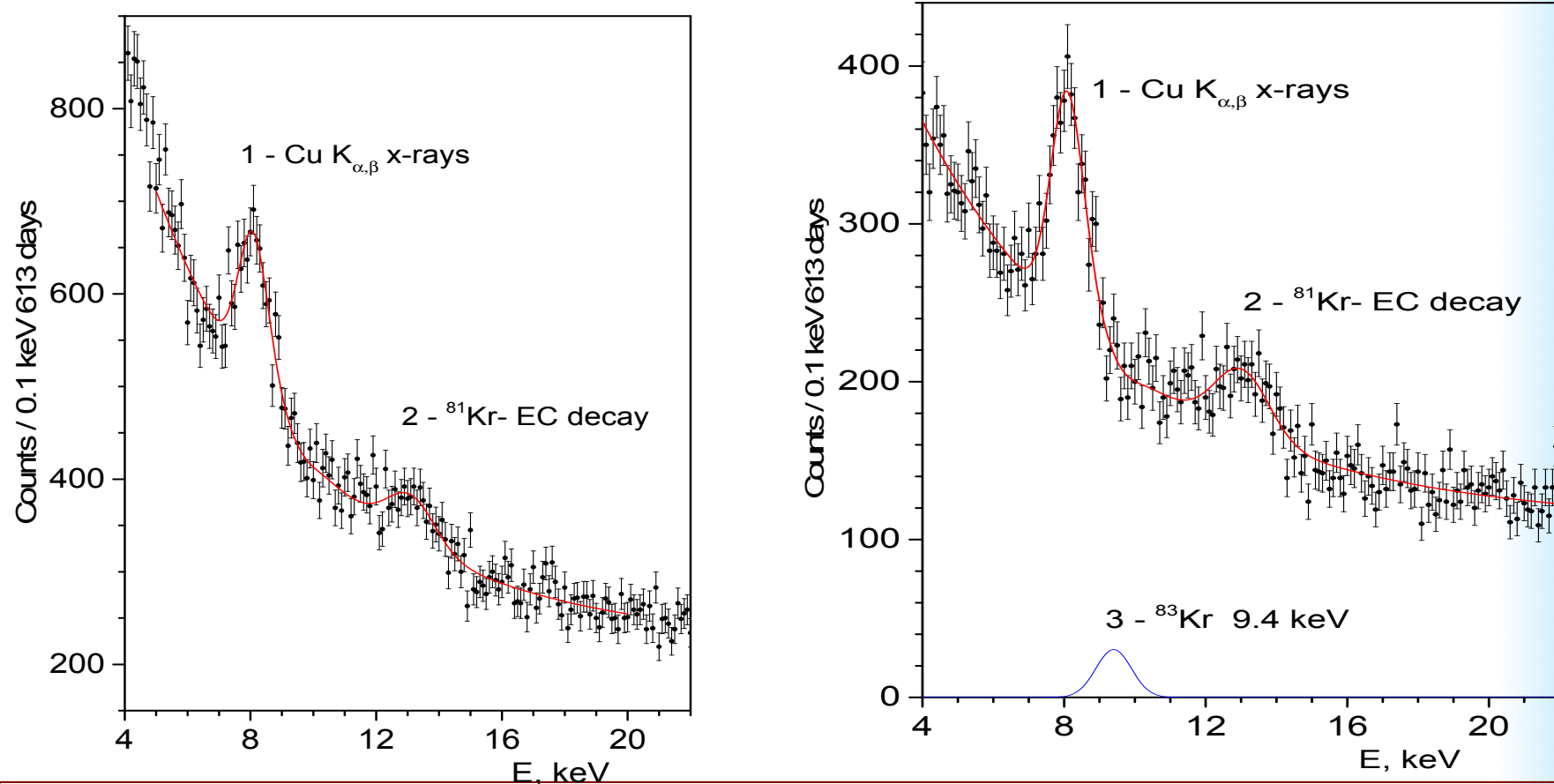


Фото 1. Низкофоновая подземная камера глубокого заложения ЛНФИ.

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}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 **$2.6\ \mu\text{ons m}^{-2}\text{ d}^{-1}$** .

Phase II – 613 days spectrum of 99% ^{83}Kr -detector



Spectra of Kr-chamber measured during 613 days of livetime before (on the left) and after (on the right) cuts taking in to account front of the signal and amplitude of afterpulses. The peak of **13.5 keV** from K-capture of ^{81}Kr is in 1.2×10^3 times less intensive than Phase I results. Since the proportional chamber is prepared from copper and Cu X-rays are clear visible.

Limits on axion-nucleon coupling g_{AN}

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

The flux of monochromatic axions Φ_A emitted by the Sun depends on the energy of the level E_γ , temperature T , lifetime of the nuclear level τ_γ , abundance of the isotope in the Sun N , and the ratio of the probability of the nuclear transition with the emission of the axion ω_A to the probability of the magnetic transition ω_γ

$$\sigma(E_A) = 2\sqrt{\pi}\sigma_{0\gamma} \exp\left[-\frac{4(E_A - E_{M1})}{\Gamma^2}\right] \frac{\omega_A}{\omega_\gamma}$$

The resonance absorption cross section for axions is given by the following expression, which is similar to the expression for the resonance absorption of γ -ray photons corrected by the ratio $2(\omega_A/\omega_\gamma)$

$$\frac{\omega_A}{\omega_\gamma} = \frac{1}{2\pi\alpha} \frac{1}{1 + \delta^2} \left[\frac{g_{AN}^0\beta + g_{AN}^3}{(\mu_0 - 0.5)\beta + \mu_3 - \eta} \right]^2 \left(\frac{p_A}{p_\gamma} \right)^3$$

The probability of the emission of the axion ω_A/ω_γ is given by the expression (3) where μ_0 and μ_3 are the isoscalar and isovector nuclear magnetic moments and β and η are the parameters depending on nuclear matrix elements

The expected rate of the resonance absorption of axions by the ^{83}Kr nucleus as a function of the probability of axion emission in a given transition (ω_A/ω_γ), parameter $(g_3 - g_0)^2$ describing the axion-nucleon interaction, and mass of the axion in the KSVZ model can be represented in the form

The obtained model independent upper limit on axion-nucleon couplings allowed us to set the new upper limit on the hadronic axion mass with the generally accepted values $S=0.5$ and $z=0.56$.

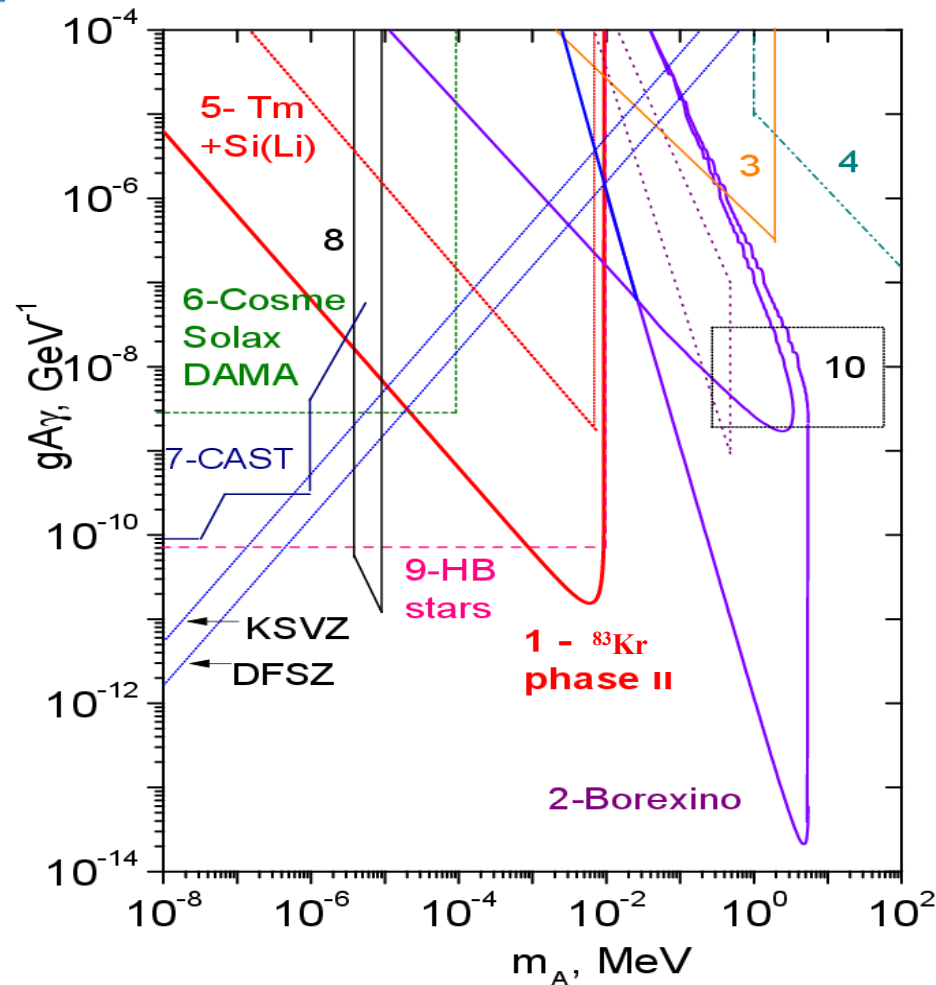
$$\begin{aligned} R[\text{g}^{-1} \text{ day}^{-1}] &= 4.23 \times 10^{21} \omega_A/\omega_\gamma \\ &= 8.53 \times 10^{21} (g_{AN}^3 - g_{AN}^0)^4 (p_A/p_\gamma)^6 \\ &= 2.41 \times 10^{-10} m_A^4 (p_A/p_\gamma)^6. \end{aligned}$$

$$|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 8.4 \times 10^{-7},$$

$$m_A \leq 65 \text{ eV at 95\% C.L.}$$

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

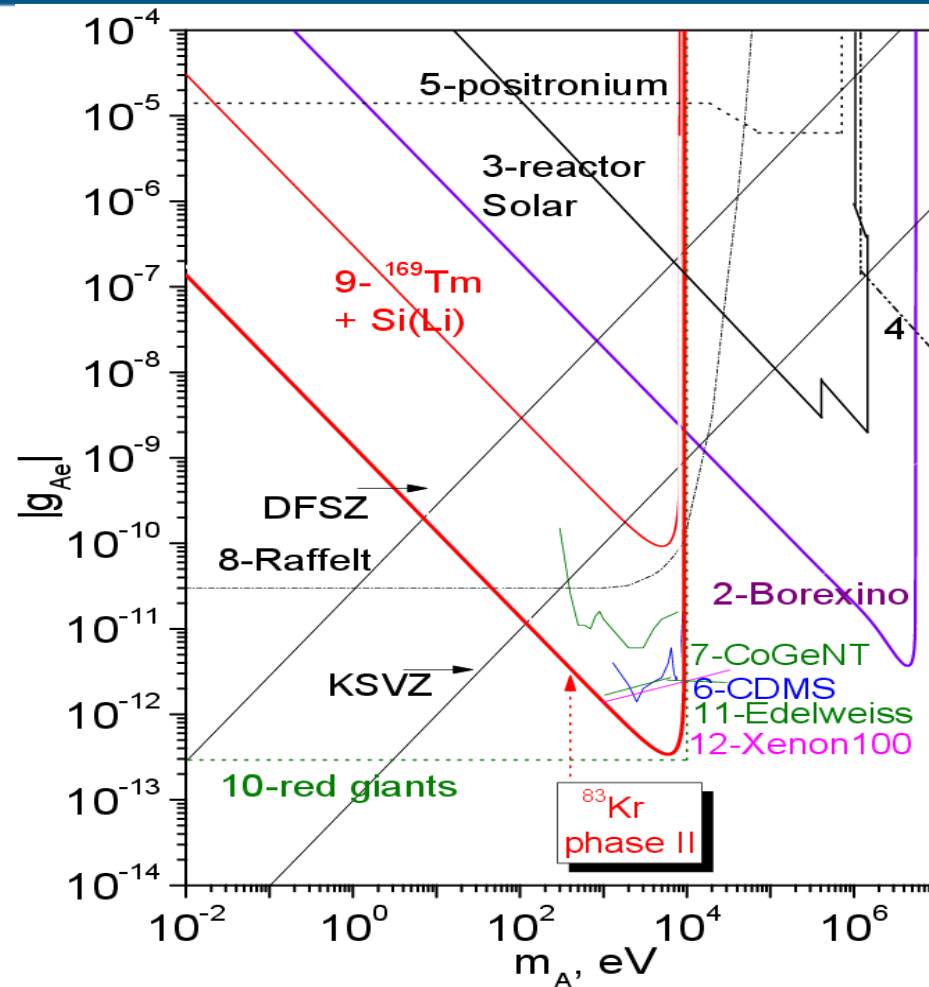
Limits on $g_{A\gamma}$ coupling in 10 meV - 10 MeV mass range



- 1 – ^{83}Kr resonant absorption of Primakoff axions
- 2 – Borexino, 5.5 MeV axions
- 3 – CTF, 478 keV axions
- 4 – Reactor experiments
- 5 – ^{169}Tm resonant absorptions
- 6 – Cosme, Solax, DAMA
- 7 – CAST
- 8 – Tokyo telescope
- 9 – HB-stars He burning LT
- 10 – predictions of SUSY and mirror heavy axion models

1- The limit on $|g_{A\gamma}(\text{in GeV}^{-1}) \times m_A(\text{in eV})| \leq 6.3 \times 10^{-8}$ or $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.3 \times 10^{-17}$ obtained with ^{83}Kr proportional chamber in comparison with the results of others experiments. Expected values of $g_{A\gamma}$ for DFSZ and KSVZ models are shown.

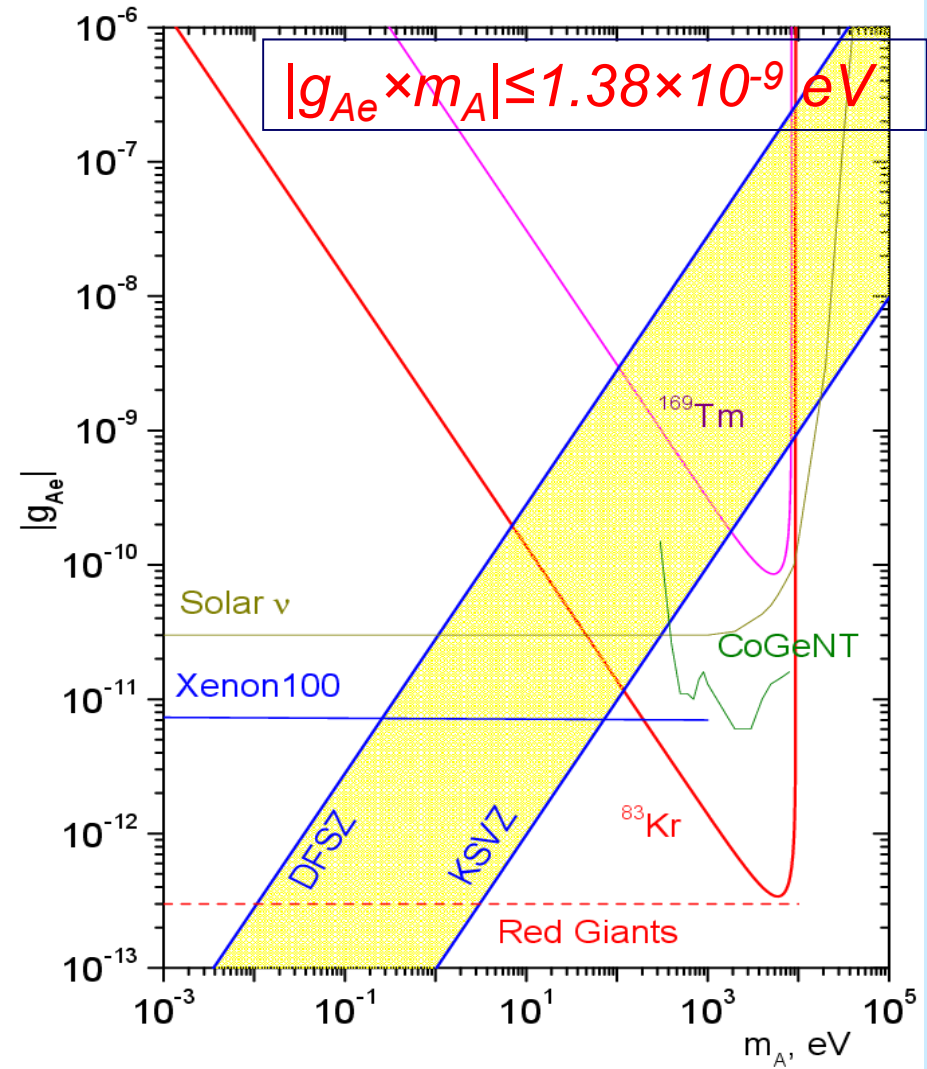
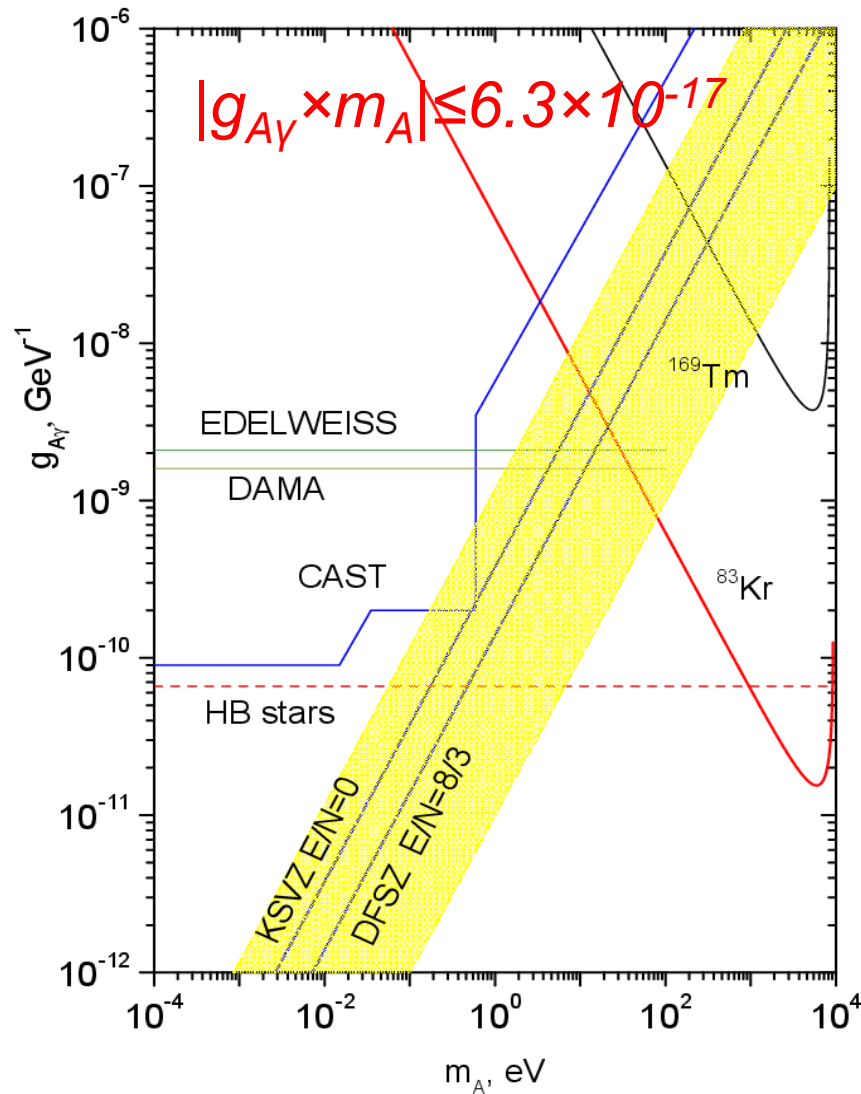
Limits on g_{Ae} coupling in 10 meV - 10 MeV mass range



- 1 – ^{83}Kr resonant absorption of Compton and bremsstrahlung axions
- 2 – Borexino, 5.5 MeV axions
- 3 – CTF, 478 keV axions and Reactor experiments
- 4 – beam dump experiments
- 5 – orthopositronium decay
- 6 – CDMS
- 7 – CoGeNT
- 8 – solar axion luminosity
- 9 – ^{169}Tm resonant absorptions
- 10 – red giants
- 11 – Edelweiss
- 12 – Xenon 100

1- The limit on $|g_{Ae}| \times |g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1.78 \times 10^{-17}$ or $|g_{Ae} \times m_A| \leq 1.38 \times 10^{-9} \text{ eV}$ obtained with ^{83}Kr proportional chamber in comparison with the results of others experiments. Expected values of g_{Av} for DFSZ and KSVZ models are shown.

^{83}Kr limits on $g_{A\gamma}$ and g_{Ae} in 10^{-4} eV - 10^4 eV range



Obtained limits are close or even stronger than astrophysical constraints for axions with mass about 1 keV

Limits on ^{83}Kr axion mass ≤ 65 eV (95% c.l.)

3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA 2017)

IOP Publishing

IOP Conf. Series: **Journal of Physics: Conf. Series** **934** (2017) 012018

doi:10.1088/1742-6596/934/1/012018

Recent Results of Search for Solar Axions Using Resonant Absorption by ^{83}Kr nuclei

A V Derbin¹, I S Drachnev¹, A M Gangapshev², Yu M Gavrilyuk², V V Kazalov², V V Kobychiev³, V V Kuzminov², V N Muratova¹, S I Panashenko⁴, S S Ratkevich⁴, D A Tekueva², E V Unzhakov¹, S P Yakimenko²,

¹ Petersburg Nuclear Physics Institute, NRC “Kurchatov Institute”, St. Petersburg, Russia

² Institute for Nuclear Research, RAS, Moscow, Russia

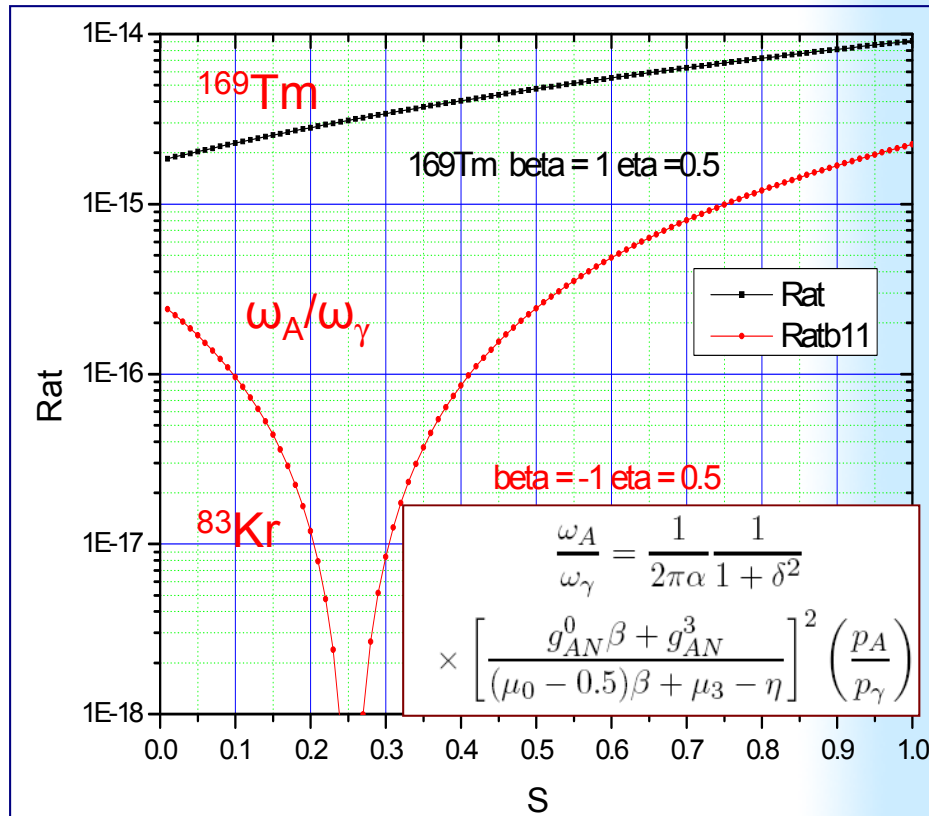
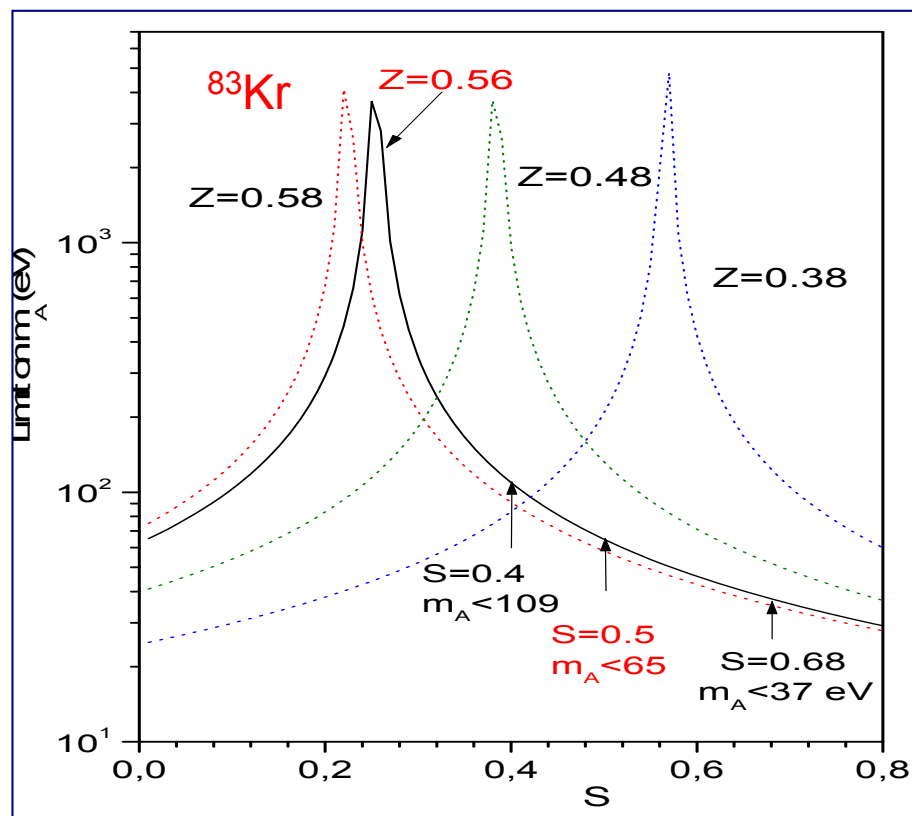
³ Institute for Nuclear Research of NAS Ukraine, Kiev, Ukraine

⁴ Kharkov National University, Kharkov, Ukraine

E-mail: derbin_av@pnpi.nrcki.ru

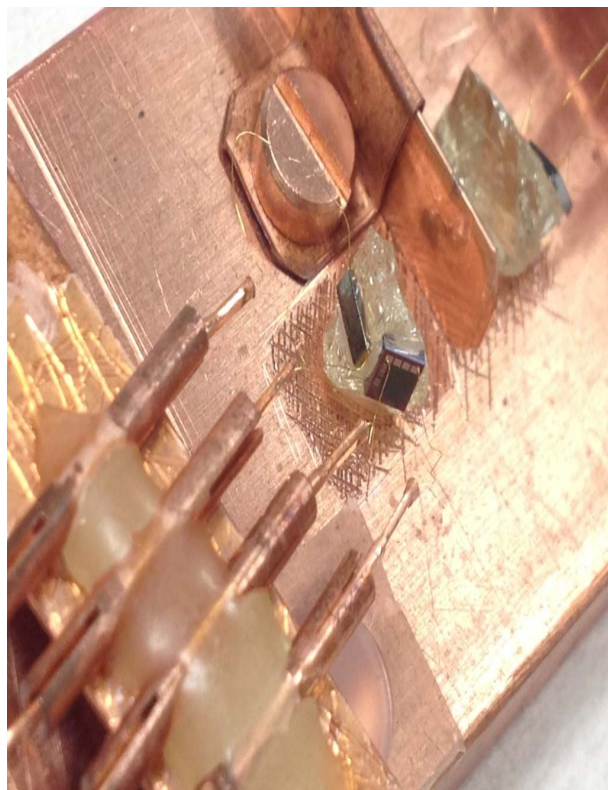
Abstract. A search for resonant absorption of the solar axion by ^{83}Kr nuclei was performed using the proportional counter installed inside the low-background setup at the Baksan Neutrino Observatory. The obtained model independent upper limit on the combination of isoscalar and isovector axion-nucleon couplings $|g_3 - g_0| \leq 8.4 \times 10^{-7}$ allowed us to set the new upper limit on the hadronic axion mass of $m_A \leq 65$ eV (95% C.L.) with the generally accepted values $S=0.5$ and $z=0.56$.

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

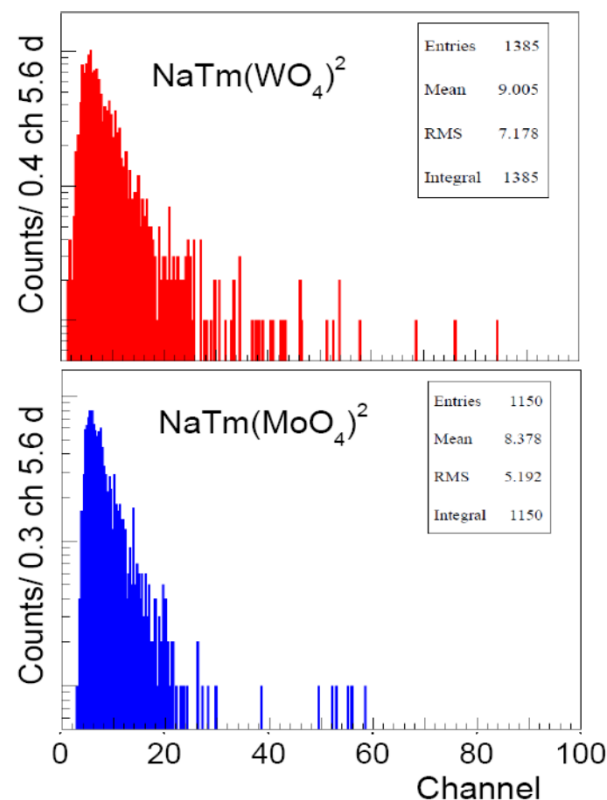


A negative value of the parameter β , together with broad intervals of possible values of S and z , leads to a large uncertainty in the expected probability for axion emission in the 9.4-keV M1 transition in the ^{83}Kr nucleus, and this is a serious flaw in the present searches for such axions. The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

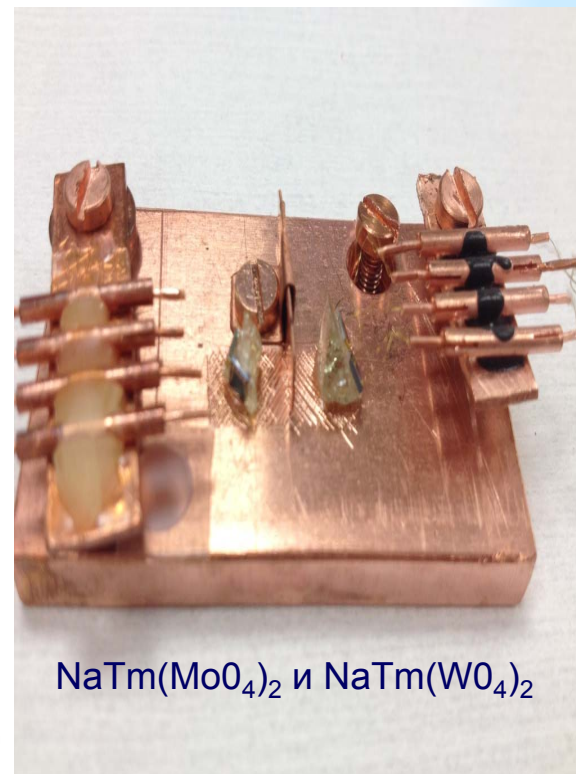
Тм-содержащие кристаллы как болометры



Кристаллы внутри
криогенной установки



Спектры фоновых
сигналов за 135 ч.

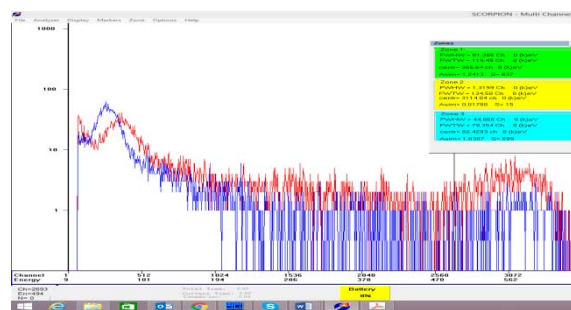
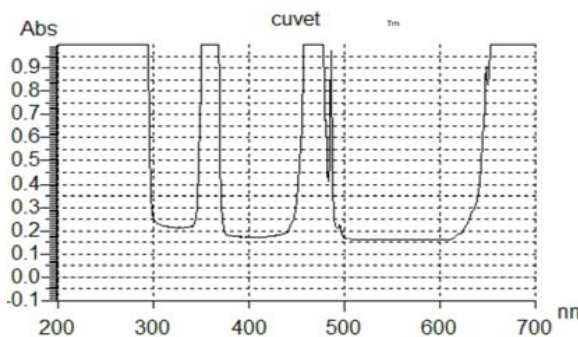
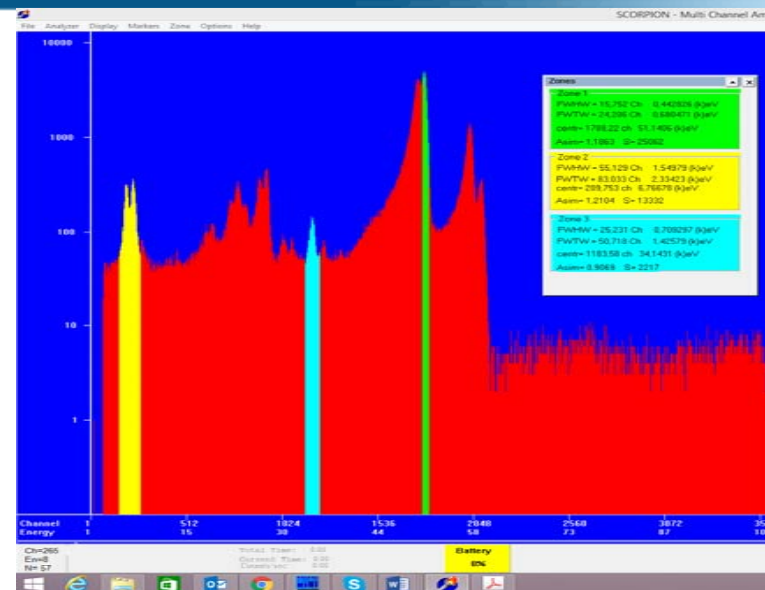
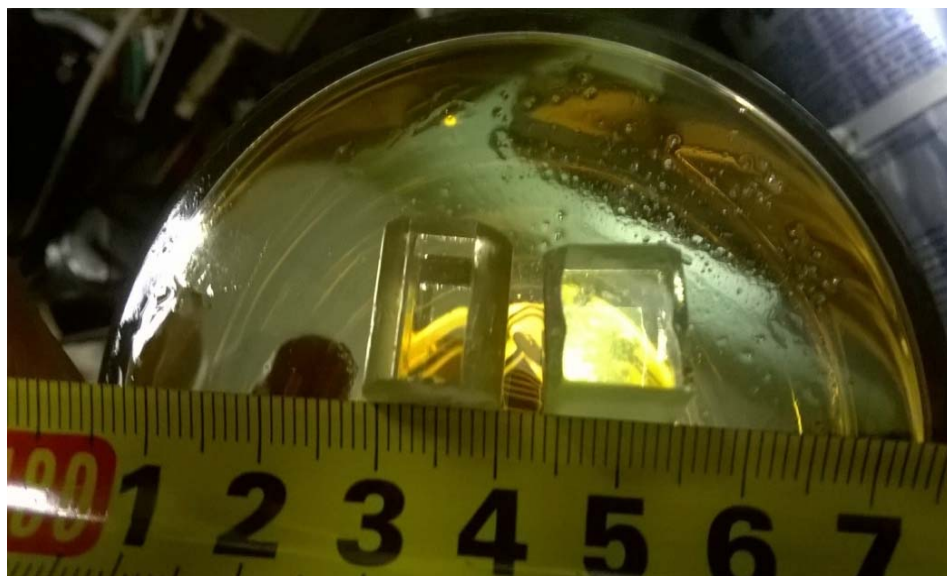


NaTm(MoO₄)₂ и NaTm(WO₄)₂

Кристаллы внутри
криогенной установки

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

$Tm_3Al_5O_{12}$ - болометр

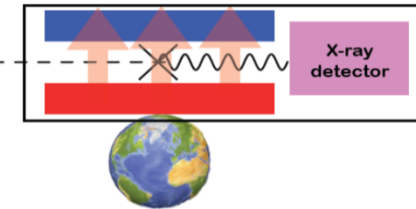
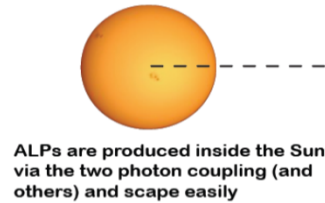


Гранат тулия не сцинтиллирует, необходимо допировать Се или Рr. Главная задача проверить кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ как болометр. В настоящий момент рассматривается 4 потенциальных места для измерений ГранСассо, Modane, Canfranc, TUM на поверхности Земли



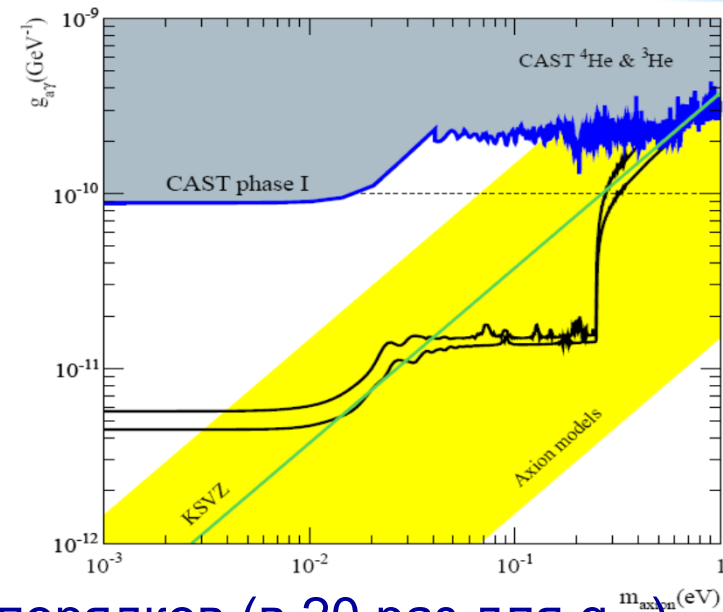
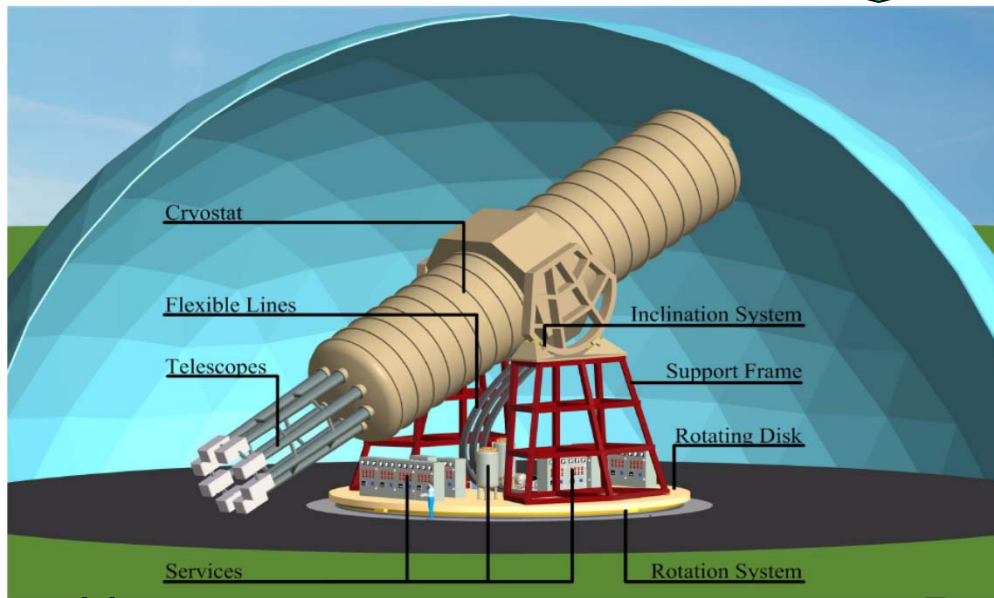
IAXO: International Axion Observatory

CERN Axion Solar Telescope



← **CAST**
IAXO
↓

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



Увеличение чувствительности на 5 - 6 порядков (в 20 раз для $g_{A\gamma}$).
ПИАФ – axion theory and phenomenology, g_{Ae} , $Si(Li)$ активной защиты



IAXO: International AXion Observatory



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

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



www.elsevier.com/locate/nppp

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

T. Dafni^{1,*}, M. Arik², E. Armengaud³, S. Aune³, F. T. Avignone⁴, K. Barth⁵, A. Belov⁶, M. Betz⁵, H. Bräuninger⁷, P. Brax⁵, N. Breijnholt⁹, P. Brun³, G. Cantatore⁸, J. M. Carmona¹, G. P. Carosi⁹, F. Caspers⁵, S. Caspi¹⁰, S. A. Cetin², D. Chelouche¹¹, F. E. Christensen¹², J. I. Collar¹³, A. Dael³, M. Davenport⁵, A. V. Derbin¹⁴, K. Desch¹⁵, A. Diago¹, B. Döbrich¹⁶, I. Dratchnev¹⁴, A. Dudarev⁵, C. Eleftheriadis¹⁷, G. Fanourakis¹⁸, E. Ferrer-Ribas³, P. Friedrich⁷, J. Galán³, J. A. García¹, A. Gardikiotis¹⁹, J. G. Garza¹, E. N. Gazis²⁰, E. Georgiopoulou¹⁹, T. Geralis¹⁸, B. Gimeno²¹, I. Giomataris³, S. Gninenko⁶, H. Gómez¹, D. González-Díaz¹, E. Gruber²², E. Guendelman²³, T. Guthörl²², C. J. Hailey²⁴, R. Hartmann²⁵, S. Hauf²⁶, F. Haug⁵, M. D. Hasinoff²⁷, T. Hiramatsu²⁸, D. H. H. Hoffmann²⁶, D. Horns²⁹, F. J. Iguaz¹, I. G. Irastorza¹, J. Isern³⁰, K. Imai³¹, J. Jacoby³², J. Jaeckel³³, A. C. Jakobsen¹², K. Jakovčić³⁴, J. Kaminski¹⁵, M. Kawasaki³⁵, M. Karuza³⁶, K. Königsmann²², R. Kotthaus³⁷, M. Krčmar³⁴, K. Kousouris⁵, C. Krieger¹⁵, M. Kuster²⁶, B. Lakić³⁴, J. M. Laurent^{1,5}, O. Limousin³, A. Lindner¹⁶, A. Liolios¹⁷, A. Ljubičić³⁴, G. Luzón¹, S. Matsuki³⁸, V. N. Muratova¹⁴, S. Neff²⁶, T. Niinikoski⁵, C. Nones³, I. Ortega¹, T. Papaevangelou³, M. J. Pivovarov⁹, G. Raffelt³⁷, J. Redondo¹, H. Riege²⁶, A. Ringwald¹⁶, A. Rodríguez¹, M. Rosu²⁶, S. Russenschuck⁵, J. Ruz⁹, K. Saikawa³⁹, I. Savvidis¹⁷, T. Sekiguchi³⁵, Y. K. Semertzidis⁴⁰, I. Shilon^{1,5}, P. Sikivie⁴¹, H. Silva⁵, S. K. Solanki⁴², L. Stewart⁵, H. H. J. ten Kate⁵, A. Tomas¹, S. Troitsky⁶, T. Vafeiadis⁵, K. van Bibber⁴³, P. Vedrine³, J. A. Villar¹, J. K. Vogel⁹, L. Walckiers⁵, A. Weltman¹, W. Wester⁴⁵, S. C. Yildiz², K. Zioutas^{19,5}

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

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

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

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

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

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

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

^hLawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

ⁱDogus University, Istanbul, Turkey

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

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

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

^mPhysikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

ⁿDeutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

^oAristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

^pNational Center for Scientific Research Demokritos, Athens, Greece

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

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

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

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

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

^vTechnische Universität Darmstadt, IKP, Darmstadt, Germany

2017 –
Bylaws
17 институтов
ИЯИ

ПИЯФ

Слово *axion* в названии статей, выложенных в arXiv в 2017 году, встречается всего в 4 (784/200) 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,^a F. Avignone,^b A. Bykov,^c G. Cantatore,^d S.A. Cetin,^e A. Derbin,^f I. Drachnev,^g R. Djilkibaev,^g V. Eremin,^c H. Fischer,^h A. Gangapshev,ⁱ A. Gardiklitis,^a S. Gninenko,^g N. Golubev,^g D.H.H. Hoffmann,^j M. Karuza,^k L. Kravchuk,^g M. Libanov,^g A. Lutovinov,^l M. Maroudas,^a V. Matveev,^{g,m} S. Molokov,^l V. Muratova,^f V. Pantuev,^g M. Pavlinsky,^l K. Pititsyna,^g G. Rubtsov,^g D. Semenov,^f P. Sikivie,ⁿ A. Spiridonov,^o P. Tinyakov,^p I. Tkachev,^g S. Troitsky,^g E. Unzhakov,^f and K. Zioutas^a

^aPatras University, Patras, Greece

^bUniversity of South Carolina, Columbia, U.S.A.

^cIoffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

^dUniversity of Trieste, Trieste, Italy

^eHigh Energy Physics Research Center, Bilgi University, Istanbul, Turkey

^fPetersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

^gInstitute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

^hAlbert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany

ⁱBaksan Neutrino Observatory, INR RAS, Neutrino, Russia

^jInstitut für Kernphysik/Technische Universität, Darmstadt, Germany

^kUniversity Rijeka, Rijeka, Croatia

^lSpace Research Institute RAS, Moscow, Russia

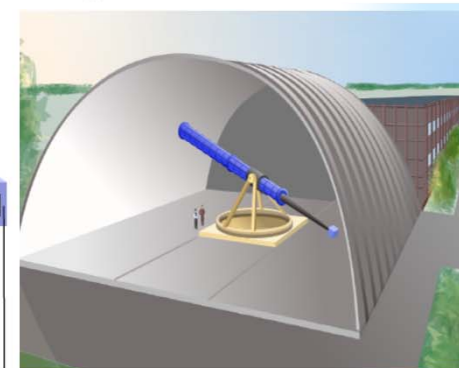
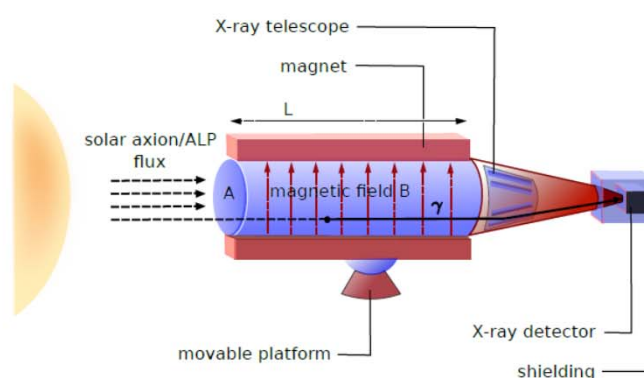
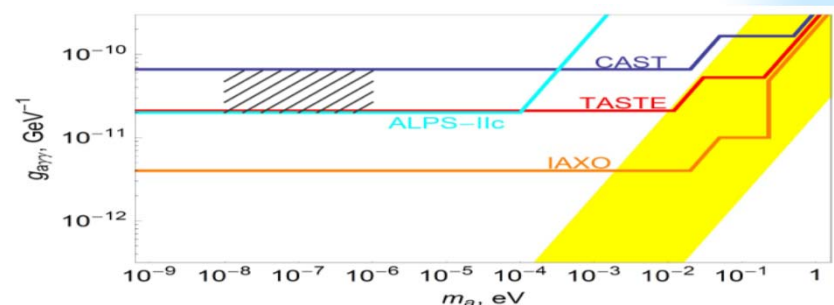
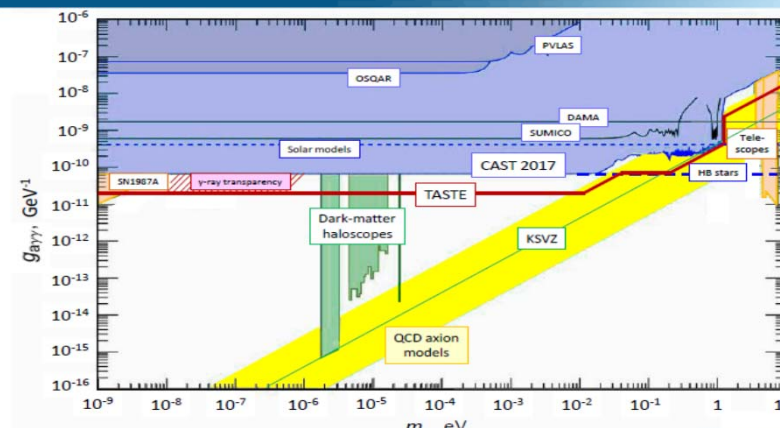
^mJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

ⁿUniversity of Florida, Gainesville, U.S.A.

^oPhysics Department, Moscow State University, Moscow, Russia

^pUniversité Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

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



Основные результаты работы в 2017 г.

1. Коллаборацией Borexino, при определяющем вкладе сотрудников ПИЯФ, получены наиболее строгие ограничения на флюенс нейтрино и антинейтрино, связанный со слиянием черных дыр, при энергиях 0.5-5.0 МэВ. Результаты опубликованы в журнале *Astrophysical Journal* 850 (2017).
2. Коллаборация Borexino, при определяющем вкладе сотрудников ПИЯФ и ОИЯИ, установила наиболее строгое ограничение на эффективный магнитный момент солнечных нейтрино и, как следствие, наиболее строгие ограничения на магнитные моменты мюонного и тау-нейтрино (*Physical Review D* 96, R, 2017).
3. Создан бета-спектрометр, состоящий из Si(Li)-детектора полного поглощения и пролетного Si-детектора. Спектрометр создан для измерения бета-спектра ^{144}Pr , как источника антинейтрино в эксперименте по поиску осцилляций нейтрино в стерильное состояние и может использоваться для прецизионного измерения формы бета-спектров различных радиоактивных ядер. (*J. of Physics* 2017, NIM, 2018; ПТЭ, 2018).
4. В эксперименте по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{83}Kr , проводимого в БНО ИЯИ РАН, получен новый предел на массу адронного аксиона $m_A \leq 65$ эВ для 95% у.д. (*J. of Physics* 2017, PP&N 2018)
5. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, SOX, DarkSide и IAXO.

Планы на 2018 г.

1) ПИЯФ

- а) Измерение бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr (для SOX).
- б) Измерения QF для электронов (для SOX)
- в) Исследование 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^3 (КИ).
- г) Баксан- ^{83}Kr , Lucifer (ZnSe- $\beta\beta$), IAXO и TASTE – R&D работы.

2) Borexino и SOX– солнечные и стерильные нейтрино

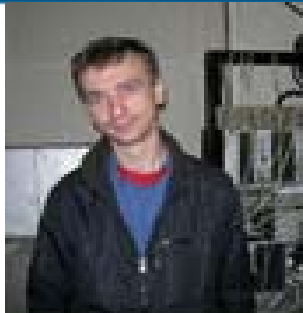
- а) участие в работе 7-ти рабочих групп (CNO нейтрино)
- б) распады с $\Delta B = 3$ NSI нейтрино,
- в) корреляция нейтринных сигналов с LIGO / VIRGO (GW)
- г) И.Драчнев, Д.Семенов, Е.Унжаков, Н.Пилипенко—>6 чел./ мес.

3) DarkSide – темная материя

- а) Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20K (Ti, SiO_2 , CF_2) + “удаленные дежурства”
- б) И. Драчнев, Е. Унжаков, Д. Семенов —> 4 месяца LNGS

4) Новые проекты IAXO, TASTE – нейтрино, аксион

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



g_{AN}

**НЕЙТРИНО
АКСИОН
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ**

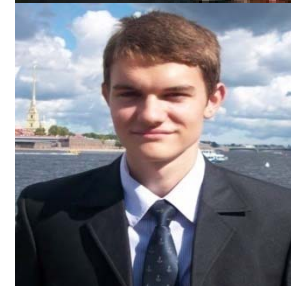
Si



^{144}Pr

**BOREXINO
SOX_Ce, ^{144}Pr
DARKSIDE
IAXO,
TASTE**

Ce-Pr



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

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.

Содержание доклада

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 спектра ^{144}Pr для SOX

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

1.4 CdTe и Si(Li) детекторы AMPTEC Томск (договор 2018)

1.5 Детектор для поиска взаимодействия частиц темной материи с электроном.

1.6 Детекторы для РФА анализа (договора с «СтройБис XXI век»)

1.7 Si(Li) детекторы для IAXO, TASTE, «Троицк-ню масс», ИЯИ

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 $x > 6$ мм

2.4 Анизотропия ионизационных потерь в Si (ОФВЭ)

Обслуживание и ремонт Ge- и Si- детекторов в ПИЯФ

Р. В. Пашук. Детектор Ge(Li) коаксиальный с резистивной обратной связью.

Заявленные дефекты: не держит напряжение.

Ремонт: кристалл потравлен и поставлен на выравнивание в криостат. Изготовлен новый клапан с резиновым кольцом, взамен неисправного.

Проверка параметров: условия выравнивания ток 50-55 ма, напряжение на детекторе 200-250 в. Время выравнивания 3.5 суток

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

Заявленные дефекты: ухудшение вакуума ухудшение разрешения .

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

Проверка параметров: измерения проведены при 1200В .

В. Зиновьев. Детектор PGT Ge планарный с оптосвязью. Площадь 20 мм²

Заявленные дефекты: плохой вакуум, входное окно залито смолой.

Ремонт: крышка демонтирована, на станке удалено старое окно и выточено новое колечко для фиксации бериллиевой фольги. Вклеено новое Ве-окно, крышка смонтирована на новую индиевую прокладку. Вакуумирование в два этапа с прогревом сосуда дюара до +100 С в течении 10 суток. Изготовлен новый клапан с резиновым кольцом, взамен неисправного, под индиевое уплотнение.

Проверка параметров: измерения проведены при напряжении детектора от 1000В до 2250В. Ток детектора 3 рА , разрешение для энергии 5.9 keV FWHM = 171 eV при максимальном напряжении. Сохранённый спектр pgt28.f.

Детектор Ge N-типа коаксиальный погружной горизонтальный.

Заявленная неисправность: плохой вакуум и неприемлемые характеристики.

Ремонт: изготовлен привод вакуумного клапана. Вакуумирование в течение 5 суток с циклическим прогревом кожуха хладопровода и контролем температуры внешнего конца хладопровода с целью не допущения перегрева детектора выше плюс 100 градусов цельсия.

Проверка параметров: измерения проведены при 1800В (паспортное значение) и 2000В на постоянных времени фильтра 1, 2, 3, 6 и 10 микросекунд. Детектор с охлаждаемым полевым транзистором с резистивной обратной связью. Разрешение для энергии 1.33 MeV составляет 2 keV, для энергии 59.6 keV - 0.9 keV. Сохранённый спектр зин3.13 для источника Co-60 с входной нагрузкой 13500 имп/с при постоянной времени фильтра 3 мкс.

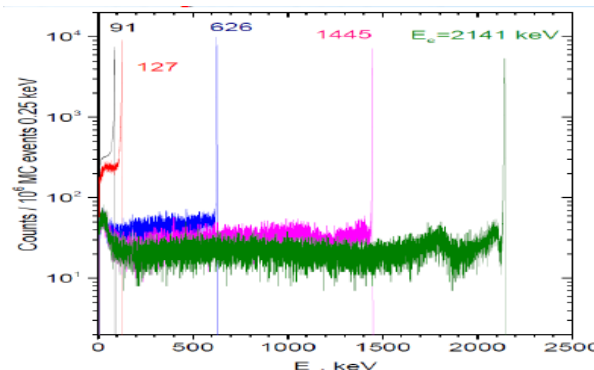
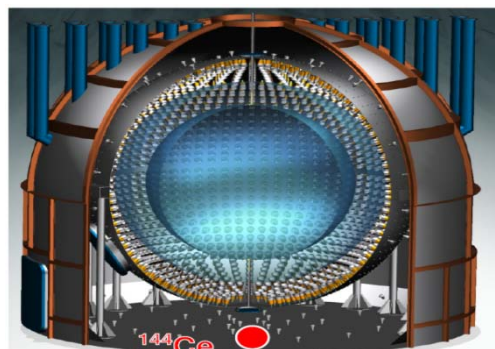
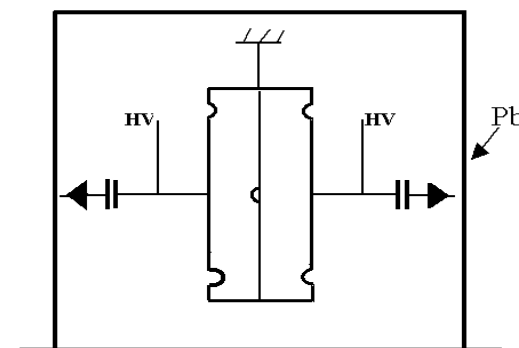
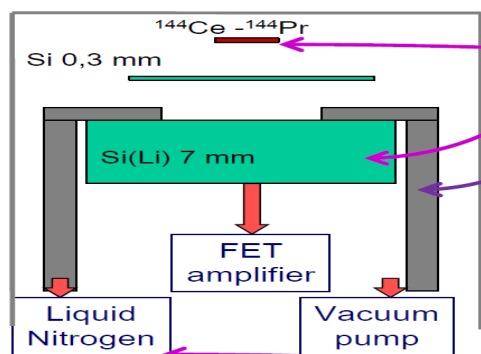
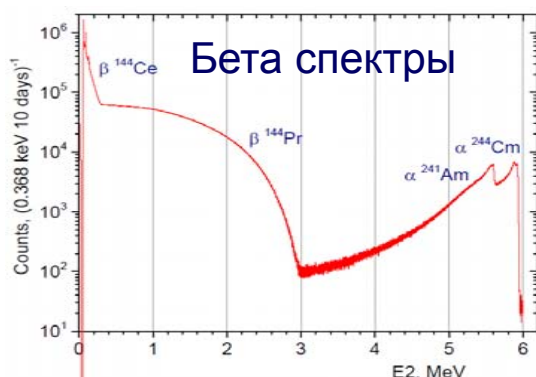
Отделение Перспективных разработок, Лаборатория радиационной физики, зав. лаб. Иванов Н.А.

Заявленная неисправность: Разгерметизация Ge(Li)-детектора.

Ремонт детектора. Криостат прогрет, снят с откачки и поставлен на выравнивание в жидкий азот. Условия выравнивания I = 50 мА U = 200 В R = 24 кОм.

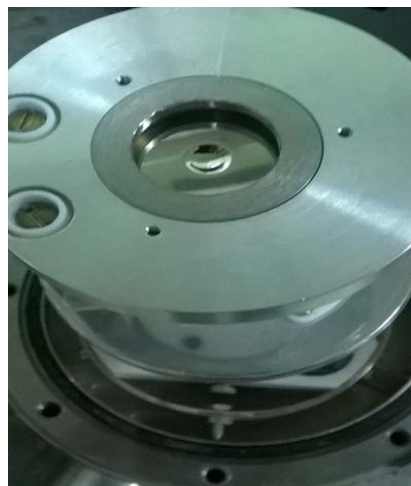
Проверка параметров: Детектор работает. урб = 800 В разрешение 2.6 кэВ по Bi – 3.2 кэВ

Детекторы для измерения β -спектра ^{144}Ce - ^{144}Pr (эксперимент Borexino_SOX_Ce)



В 2018-19 году начнутся измерения с искусственным источником антинейтрино ^{144}Ce - ^{144}Pr и детектором Борексино 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}Pr** . В настоящее время две группы Борексино проводят эти измерения с помощью пластических сцинтилляторов. Si-детекторы имеют существенно более высокое энергетическое разрешение. Мы планируем использовать несколько вариантов размещения разместить источник ^{144}Ce - ^{144}Pr между двумя **цилиндрическими планарными Si(Li)-детекторами**, подавив таким образом обратное рассеяние электронов от поверхности детектора.

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 p-i-n 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 p-i-n CdTe детектора. Охлаждение детекторов производится миниатюрными термо-электрическими охладителями. Два блока с $\text{Si}(\text{Li})$ детекторами поставлены в НИЦ КИ для установки Токамак Т-10.



Блок
Детектирования с
 $\text{Si}(\text{Li})$ -детектором в
НИЦ КИ для
регистрации
рентгеновского
излучения
термоядерной
плазмы (Измерение
температуры
плазмы)

$\text{Si}(\text{Li})$ блок детектирования с термоэлектрическим охлаждением с энергетическим разрешением 190 эВ. Прибор изготовлен и испытан в марте 2017 года. Проверяется регулярно каждый месяц.

Соглашение о научно-техническом сотрудничестве ПИЯФ и НИЦ КИ

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) детекторы для «Троицк ню-масс» В.М. Лобашева



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Адрес: ИЯИ РАН, проспект 60-летия Октября, 7а, Москва, 117312
Телефоны: (499) 135-77-60, (495) 851-00-71, (495) 851-01-79 (канцелярия)
Факс: (499) 135-22-68, (495) 851-07-11

Электронная почта: inr@inr.ac.ru, inr@inr.ru; Интернет: www.inr.ru, www.inr.ac.ru

08.04.16 № 8699/02-25-84-238 Заместителю директора по науке ПИЯФ
На № _____ В.В. Воронину

Глубокоуважаемый Владимир Владимирович!

В течение более чем двадцати лет подразделения наших Институтів успешно сотрудничали в области разработки и использования кремниевых детекторов для регистрации электронов на уникальной установке «Троицк ню-масс». Создаваемые в подразделениях Вашего института детекторы обладали уникальными свойствами, во многом превосходящими по параметрам зарубежные аналоги по уровню шумов и толщине входного окна. Эти детекторы, изготовленные в Отделе нейтронных исследований в группе А.Х. Хусаинова явились важнейшим элементом, позволившим нам провести уникальные измерения по оценке массы нейтрино и получить лучший в мире результат.

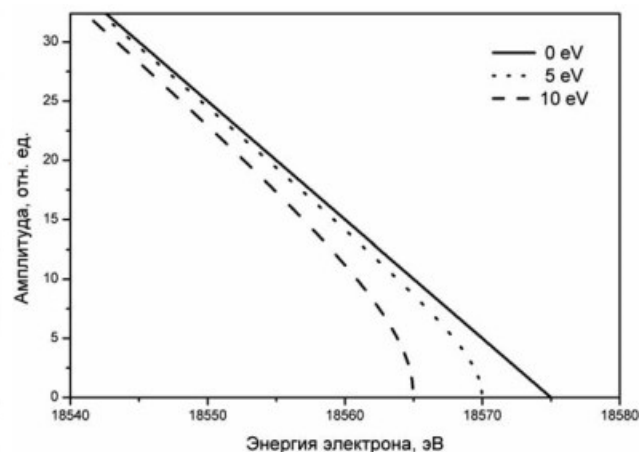
К настоящему времени проведена существенная модернизация установки «Троицк ню-масс». Основной целью планирующихся измерений является поиск нового типа тяжелого нейтрино, которое может оказаться одной из составляющих Тёмной Материи. Однако, кремниевые детекторы, изготовленные более 15 лет назад требуют замены.

В связи с этим, просим Вас, в порядке оказания научно-технической помощи изготовить два кремниевых детектора, аналогичных используемым ранее.

Заместитель директора Института

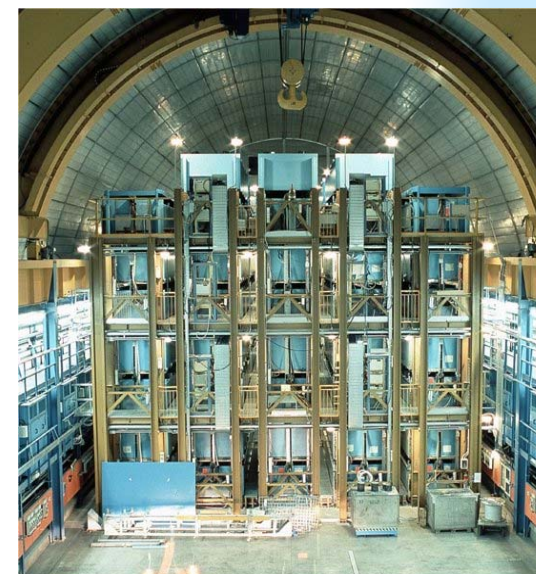
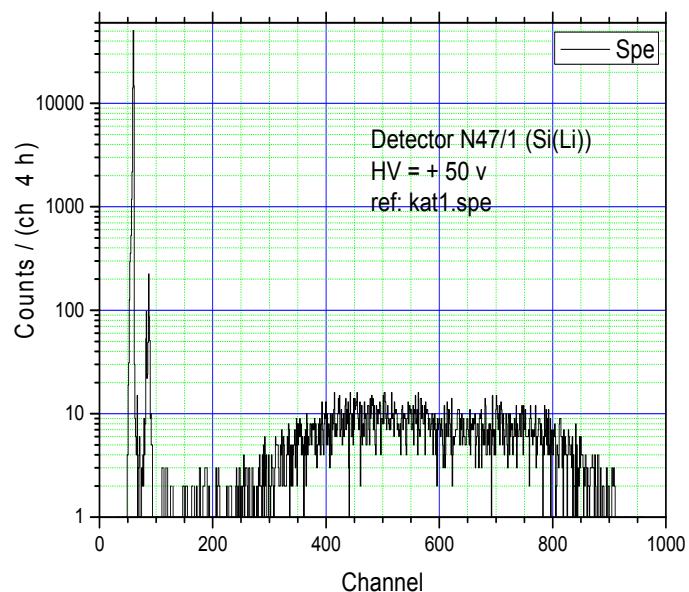
Либанов М.В.

Исп. Пангуев В.С.
Тел. +7 495 8510188

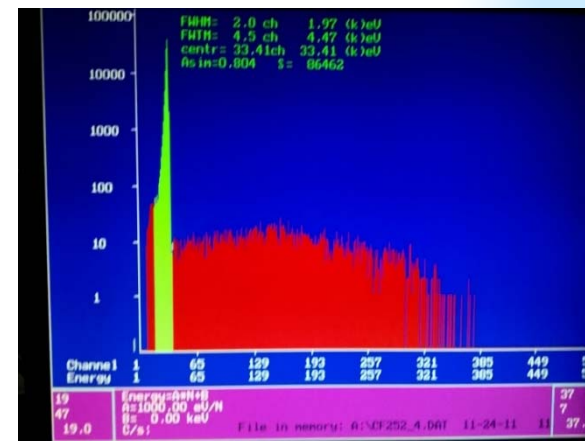
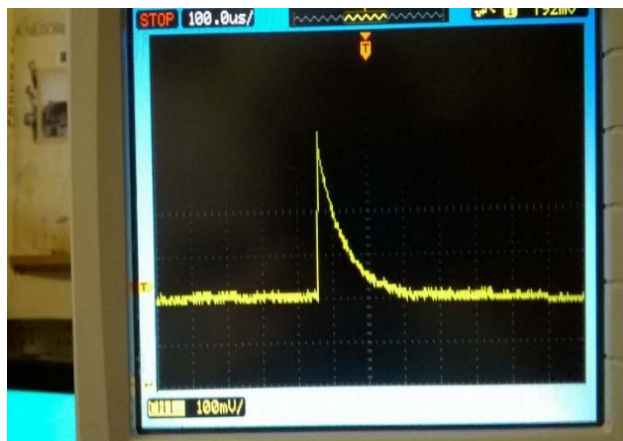
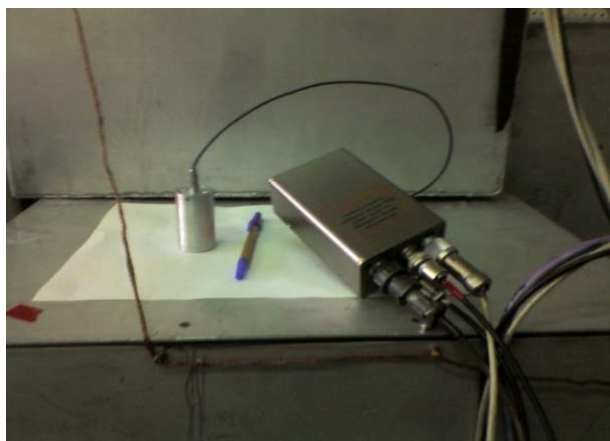


Si(Li) детекторы диаметром 20 мм с разрешением 200 эВ и с толщиной входного (Pd+Au) окна (200+50) А. Потери для 18 кэВ электронов 1.2 эВ/А.

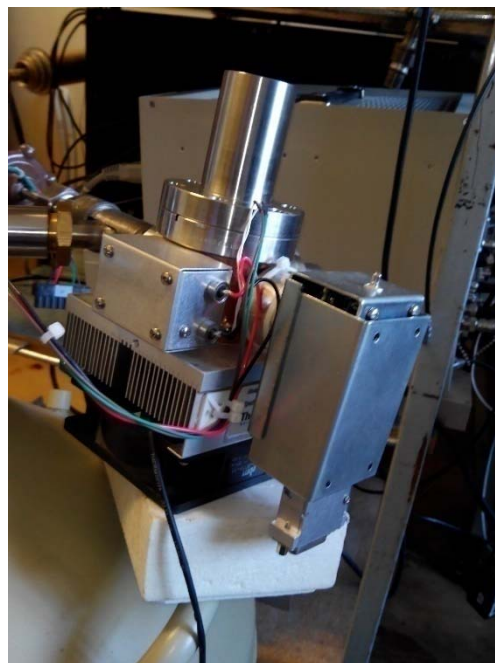
Si(Li)-детектор осколков для старта нейтронов в LVD



LVD 1kt ЖС, 840 модулей 1х1х1.5 м. Измерение функция отклика для нейтронов ^{252}Cf .

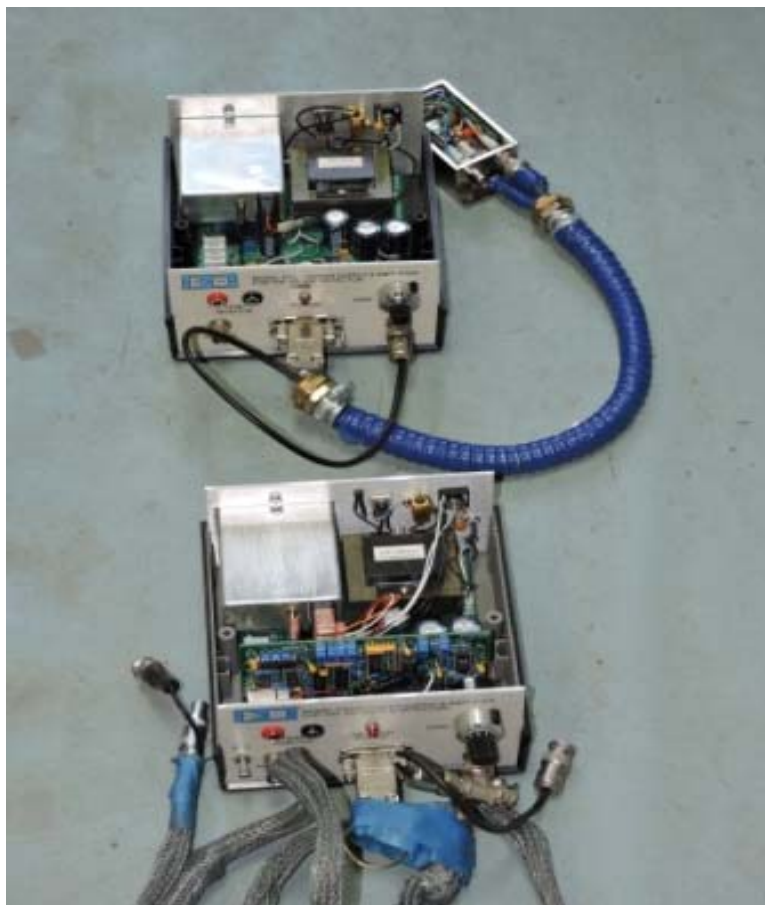


Ремонт анализатора ARL QUANT'X (2017)



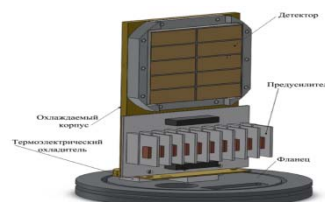
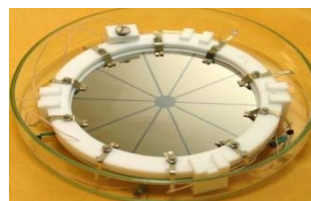
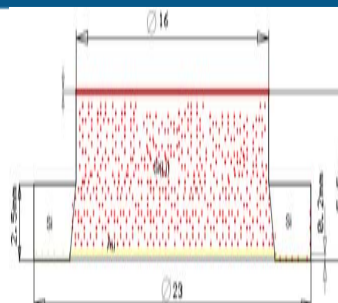
Диагностика, исследование технических характеристик и проведение испытаний Блока детектирования анализатора ARL QUANT'X. Необходимо было создать блок детектирования обеспечивающий энергетическое разрешение **156 эВ** на линии **5,9 кэВ** при термоэлектрическом охлаждении до температуры **-85 С**. Замена бериллиевого окна толщиной **8 мкм**. Восстановлена откачка камеры БД магниторазрядным насосом.

CdTe и Si(Li) детекторы AMPTEC Томск (договор 2018)



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

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.



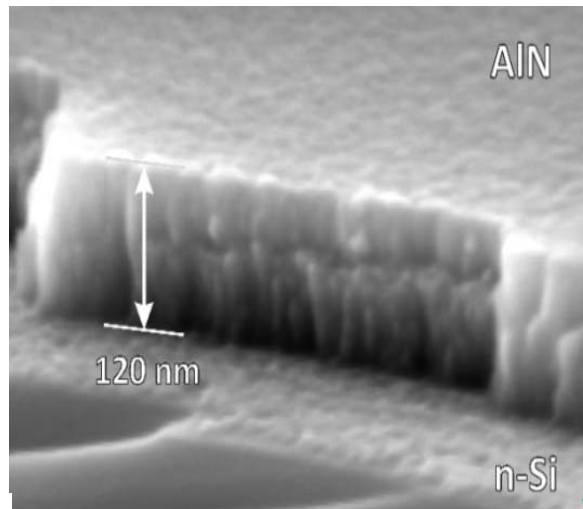
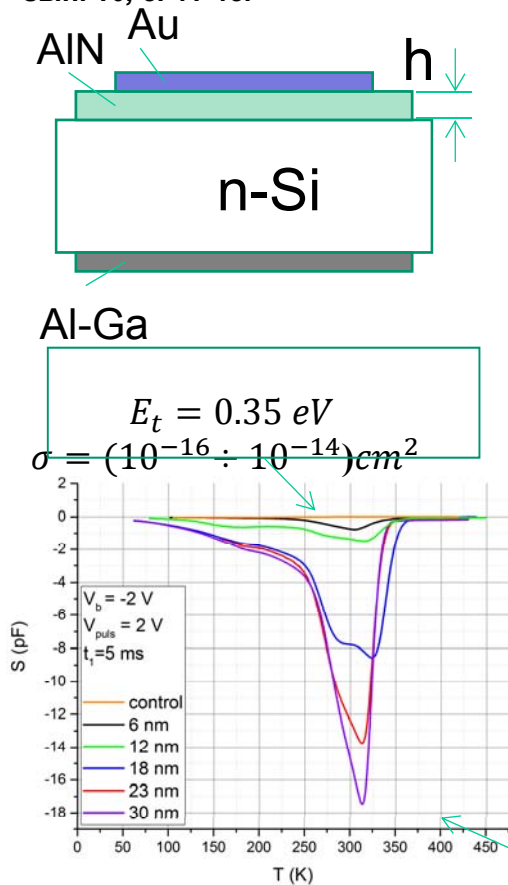
В ПИЯФ созданы технологические установки нанесения аморфного кремния на поверхность кремния компенсированного литием **магнетронным (MASD) методом**. В первую очередь необходима минимизация толщины входного окна со стороны Li (n^+ контакт). Обычно это осуществляют путем сошлифовки «избыточного» Li и 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 **~0.2 мкм**, что сравнимо с толщиной окна со стороны Pd(Au).

Изучение структур Au-AlN-(n-Si) (+СПбГУ)

Мотивация : напыление пленки AlN приводит к

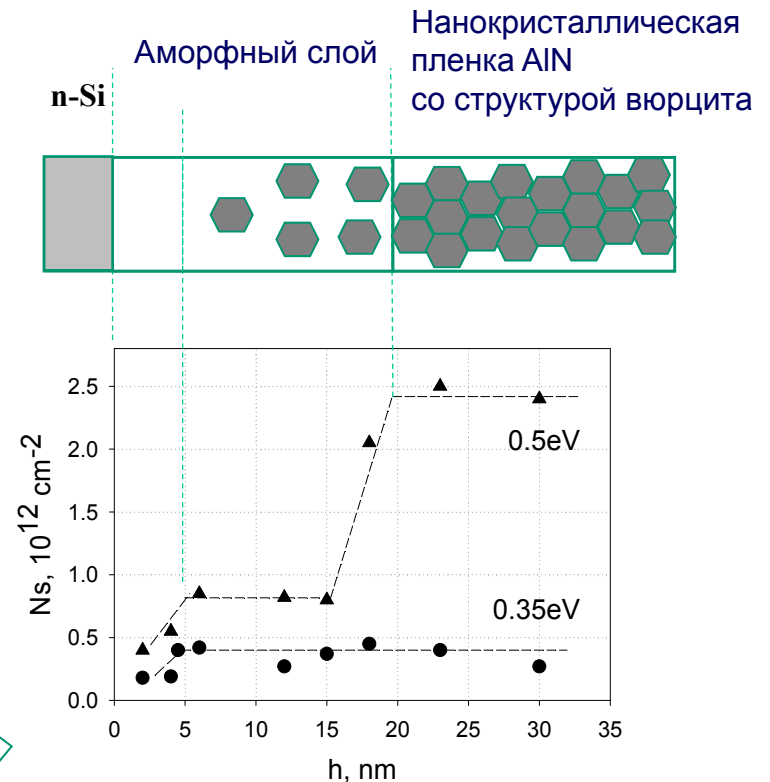
- + уменьшению величины обратных токов детекторов
- высокой плотности ловушек на интерфейсе AlN-Si, что ведет к потере заряда и увеличению нч-шума

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-AlN-(n-Si)

$$E_t = (0.5 \div 0.6) \text{ eV}$$
$$\sigma = (10^{-16} \div 10^{-14}) \text{ cm}^2$$



Зависимости величин поверхностной плотности электронных ловушек от толщины пленки AlN

Выводы :

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

Планы Отдела на 2018 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 спектра ^{144}Pr для SOX

1.3 Si(Li) детекторы для «Троицк-ню масс», ИЯИ

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

1.5 Детектор осколков для LVD, ИЯИ

1.6 Детектор для поиска взаимодействия частиц темной материи с электроном.

1.7 Кристаллы ZnSe для двойного бета распада (совместно с СПбГУ).

1.8 Детекторы для РФА анализа (договор с Томским ГУ)

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

2. Аморфно-кристаллические ($a\text{Si:H/cSi}$, AlN) структуры на кремнии (рук. И.М. Котина)

2.1 Детекторы с двухсторонним тонким окном (Совместно с ФТИ)

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

2.3 Дрейф лития на большие глубины: Si(Li) 5-10 мм $T=300\text{ K}$

2.4 Анизотропия ионизационных потерь в Si (совместно с ОФВЭ)

Спасибо за внимание!

Сейчас

Драчнев Илья

*«Новые результаты эксперимента
BOREXINO»*

Сейчас+15

Пилипенко Нелли

*«Бета-спектрометр на основе Si-
детекторов. Измерение спектра нейтрино в
распаде ^{144}Pr »*