

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) М.В. Трушин, кфмн, снс
- 11) Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ
- 12) И.П. Филиппов, 6 курс СПбГУ->с.л.
- 13) А.М. Кузьмичев, 4 курс АУ
- 14) М.С. Микулич, 5 курс СПбГТУ-ТИ

В отделе - 29 (8x0.5) чел.

1 дфмн; 7 кфмн; внс – 2;
снс – 4; нс – 4; мнс – 0; асп.
- 2; с. лаб. -1, вед. инж. -10;
инж. -2; рег. ап. -1; сл. мех. -
1; студ. совм. – 2; ($\Sigma 15$ нс)

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~~
- 3) Н.Т. Кислицкий вед. инж.-эл
- 4) Л.В. Силантьева вед. инж.-эл.
- 5) П.И. Трофимов вед. инж.-эл
- 6) Г.Э. Иващенко вед. инж.-тех.
- 7) Е.В. Федоров вед. инж.-тех.
- 8) Т.А. Филиппова инж.
- 9) Е.А. Чмель вед. инж.-тех.

Гр. радиохимии

- 1) И.С. Ломская, 6 курс ТУ->аспирант
- 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 (15 (?x0.5) чел.):

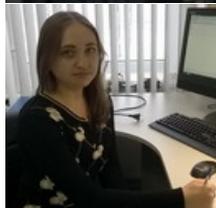
А.В. Дербин внс, дфмн,
С.В. Бахланов вед. инж.
В.Н. Муратова, снс, кфмн
Д.А. Семенов, нс, кфмн
И.М. Котина, снс, кфмн
О.И. Коньков, снс, кфмн
И.С. Драчнев, нс, PhD
М.В. Трушин, снс, кфмн
Н.В. Базлов, нс
Е.В. Унжаков, нс

Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ
И.П. Филиппов, 6 курс СПбГУ->с.лаб.

И.С. Ломская, аспирантка ПИЯФ
А.М. Кузьмичев, 4 курс АУ

М.С. Микулич, 5 курс СПбГТУ-ТИ

**2ст+2асп+1сл+0мнс+4нс+4снс+1внс+ви
1 д.ф.м.н. и 6 к.ф.м.н.**



Отдел и Лаборатория в 2020 году

Работы проводились по 4 основным направлениям:

1) *Нейтрино,*

(эксперимент **Borexino** – солнечные и гео-нейтрино, измерение бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr и ^{210}Bi)

2) *Темная материя*

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

3) *Исследование радиационной стойкости п/п (Si) детекторов. Изучение фото чувствительности МДП структур на Si и влияния пассивации на характеристики п/п детекторов*
(рук. И.М. Котина, М.В. Трушин)

3) *Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами*
(рук. А.Х. Хусаинов)

Содержание доклада (40 мин.)

1) Научометрические показатели

2) Нейтрино в 2011- 2020 г.г.

Нейтрино

3) Эксперимент Борексино в 2020 году. Новые результаты.

4) Первая регистрация нейтрино из CNO-цикла *Nature*

5) Поиск нейтрино от астрофизических источников *Astropart. Phys*

6) Новый анализ сигналов от гео-нейтрино *Phys. Rev. D*

7) Ограничения на нестандартные взаимодействия нейтрино *JHEP*

8) Измерения бета-спектр ^{210}Bi для CNO-нейтрино *Phys. Rev. C.*

9) Измерения бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr с 4π Si(Li)-спектрометром ПТЭ

Темная материя (WIMPs и аксионы)

10) Поиск солнечных аксионов с помощью Tm-болометров. *Eur. Phys. J.*

11) Поиск WIMPs в эксперименте *DarkSide*. Источник $n's$ - $^{252}\text{Cf} + \text{Si(Li)}$

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

13) Физическая программа эксперимента *IAHO*

14) Планы на 2021 год.

15) Итоги работы Отдела (10 мин)

Публикации в 2020 г. (16+8) (+1 РИД)

16 публикаций в реферируемых журналах (WoS & Scopus)

1. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun, **Nature**, 25 November 2020.
2. Н.В. Базлов, С.В. Бахланов, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, Г.А. Изегов, И.М. Котина, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков, Е.А. Чмель, Изменение параметров Si(Li)-детекторов под действием α -частиц, **Приборы и Техника Эксперимента**, 2020, № 1, с. 30–34
3. S.K. Agarwalla et al., (Borexino Coll.), Constraints on flavor-diagonal non-standard neutrino interactions from Borexino Phase-II, **JHEP** 2002 (2020) 038
4. C.E. Aalseth et al., (DarkSide-20K Coll.), Design and Construction of a New Detector to Measure Ultra-Low Radioactive-Isotope Contamination of Argon, **JINST** 15 (2020) no.02, P02024
5. C. Ghiano et al., (Borexino Coll.), Solar Neutrino Results and Future Opportunities with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser** 1137 (2019) 012054
6. S. Marcocci et al., (Borexino Coll.), The Monte Carlo simulation of the Borexino detector, **J. Phys. Conf. Ser** 1342 (2020) 012035
7. N.V. Bazlov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, G.E. Gicharevich, I. M. Kotina, O.I. Konkov, N. V. Pilipenko, E. A. Chmel, S.N. Abolmasov, E. I. Terukov, E.V. Unzhakov, Si(Li) detector with ultra-thin entrance window on the diffusive lithium side, **J. Phys. Conf. Ser** 1400 (2019) 055056
8. A.H. Abdelhameed, S.V. Bakhlanov, P. Bauer, A. Bento, E. Bertoldo, L. Canonica, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, N. Ferreira Iachellini, D. Fuchs, D. Hauff, M. Laubenstein, D.A. Lis, I.S. Lomsкая, M. Mancuso, V.N. Muratova, S. Nagorny, S. Nisi, F. Petricca, F. Proebst, J. Rothe, V.V. Ryabchenkov, S.E. Sarkisov, D.A. Semenov, K.A. Subbotin, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, E.V. Zharikov, New limits on the resonant absorption of solar axions obtained with a ^{169}Tm -containing cryogenic detector, **European Physical J. C** 80 (2020) 5, 376
9. S. Zavatarelli et al., (Borexino Coll.), The study of solar neutrinos and of non-standard neutrino interactions with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 1468 (2020) 1, 012192
10. L. Ludhova et al., (Borexino Coll.), Updated geoneutrino measurement with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 1468 (2020) 1, 012211
11. D. D'Angelo et al., (Borexino Coll.), Ten years of cosmic muons observation with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 1468 (2020) 1, 012080
12. S. Kumaran et al., (Borexino Coll.), Analysis strategies for the updated geoneutrino measurement with Borexino, **J. Phys. Conf. Ser.** 1468 (2020) 1, 012184
13. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Search for low-energy neutrinos from astrophysical sources with Borexino, **Astroparticle Physics** 125 (2021) 102509
14. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino, **Phys. Rev. D** 101, 012009 (2020)
15. E. Bertoldo, A. Derbin et al., A Test of Bolometric Properties of Tm-containing Crystals as a Perspective Detector for the Solar Axion Search, **Nuclear Instruments and Methods A** 949, 162924 (2020)
16. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino, **Eur. Phys. J. C** (2020) 80:1091

Публикации 2020 г. (16+8) (+1 РИД)

8 публикаций в arXiv и в Proceedings

1. P. Agnes et al., (DarkSide-50 Coll.), Effective field theory interactions for liquid argon target in DarkSide-50 experiment, [arXiv:2002.07794](#)
2. I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, Precision measurement of ^{210}Bi β -spectrum, [arXiv:2005.08481](#)
3. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino, [arXiv:2005.12829](#)
4. A. H. Abdelhameed, S. V. Bakhlanov, P. Bauer, A. Bento, E. Bertoldo, L. Canonica, A. V. Derbin, I. S. Drachnev, N. Ferreiro Iachellini, D. Fuchs, D. Hauff, M. Laubenstein, D. A. Lis, I. S. Lomskaya, M. Mancuso, V. N. Muratova, S. Nagorny, S. Nisi, F. Petricca, F. Proebst, J. Rothe, V. V. Ryabchenkov, S. E. Sarkisov, D. A. Semenov, K. A. Subbotin, M. V. Trushin, E. V. Unzhakov, E. V. Zharikov, New limits on the resonant absorption of solar axions obtained with a ^{169}Tm -containing cryogenic detector, [arXiv: 2004.08121](#)
5. C.E. Aalseth et al., (DarkSide Coll.), SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range, [arXiv: 2004.02024](#)
6. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), First Direct Experimental Evidence of CNO neutrinos, [arXiv: 2006.15115](#)
7. A. Abeln et al., (IAXO coll.) Conceptual Design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory, [arXiv:2010.12076](#)
8. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Sensitivity of future liquid argon dark matter search experiments to core-collapse supernova neutrinos, [arXiv:2011.07819v1](#)

1 РИД

1. А.В. Дербин, В.Н. Муратова, **Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2020662942 «Специализированное программное обеспечение для определения содержания урана и плутония по характеристическому рентгеновскому и гамма-излучению»**

17 докладов (9 чел) и выступлений на конференциях и семинарах

1. **А.В. Дербин**, Отчет о работе Отдела п/п ядерных детекторов в 2019 году, Отчетная сессия Отделения нейтронных исследований, ноябрь 2019, устный.
2. **A.V. Derbin**, A search for low-energy Borexino's signals correlated with γ -ray bursts, solar flares and gravitational events, XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics - Neutrino 2020, June, 2020, remote poster
3. **I.S. Drachnev**, I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.M. Kotina, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, Precision measurement of ^{210}Bi beta-spectrum, XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics - Neutrino 2020, June, 2020, remote poster
4. **I.S. Lomskaya**, I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, Precision measurement of ^{144}Ce - ^{144}Pr beta-spectra with 4π geometry Si(Li)-detectors, XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics - Neutrino 2020, June, 2020, remote poster
5. **D. Semenov**, A. Derbin, I. Drachnev, A. Gangapshev, YU. Gavrilyuk, V. Kazalov, V. Kobychiev, V. Kuzminov, V. Muratova, S. Panasenko, S. Ratkevich, D. Tekueva, E. Unzhakov, A search for resonant absorption of solar axions by ^{83}Kr nuclei, XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics - Neutrino 2020, June, 2020, remote poster
6. **A. Derbin**, Experimental searches for solar axions, LXX International conference "NUCLEUS – 2020", 11-17 Oct 2020, St. Petersburg.
7. **V. Muratova**, I. Alekseev, S. Bakhlanov, A. Derbin, I. Drachnev, I. Kotina, I. Lomskaya, N. Niyazova, D. Semenov, E. Unzhakov, Precision measurement of β -spectra of ^{144}Ce - ^{144}Pr nuclei, LXX International conference "NUCLEUS – 2020", 11-17 Oct 2020, St. Petersburg.
8. **Е.В. Унжаков**, А.В. Дербин, И.С. Драчнёв, В.Н. Муратова, Д.А. Семёнов, A Search for Resonant Absorption of Solar Axions via the Tm-containing Bolometer, LXX International conference "NUCLEUS – 2020", 11-17 Oct 2020, St. Petersburg.
9. **I.S. Drachnev**, I.E. Alekseev, A.V. Derbin, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Pilipenko, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Precision beta-spectrum measurement of RaE with semiconductor spectrometers, LXX Intern/ conference "NUCLEUS – 2020", 11-17 Oct 2020, St. Petersburg.
10. **I.S. Lomskaya**, Search for low-energy Borexino's signals correlated with gamma-ray bursts, solar flares and gravitational wave events, LXX International conference "NUCLEUS – 2020", 11-17 Oct 2020, St. Petersburg.
11. **M.V. Trushin**, S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, O.I. Konkov, V.N. Muratova, M.S. Mikulich, E.V. Unzhakov, Degradation of Si-based detectors parameters under the alpha-particle irradiation, LXX International conference "NUCLEUS – 2020", 11-17 Oct 2020, St. Petersburg.
12. **И.С. Ломская** для коллаборации Борексина, Измерение солнечных нейтрино от pp-цепочки с помощью детектора Borexino Open Science 2020, Гатчина, 18-20 ноября, 2020
13. **М.С. Микулич**, Н. В. Базлов, С. В. Бахланов, А. В. Дербин, И. С. Драчнев, И. М. Котина, В. Н. Муратова, Н. В. Ниязова, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков, Е. А. Чмель, Изменение параметров Si(Li)-детекторов под действием α -частиц, Open Science 2020, Гатчина, 18-20 ноября, 2020
14. **А.М. Кузьмичев**, А.В. Дербин, И.С. Драчнёв, В.Н. Муратова, Д.А. Семёнов, Е.В. Унжаков, Тулиевые болометры как перспективные детекторы для поиска солнечных аксионов, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике, 16–19 ноября 2020 года, ИТЭФ, Москва
15. **М.В. Трушин**, Н.В. Базлов, А.М. Данишевский, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, И.М. Котина, О.И. Коньков, А.М. Кузьмичев, Е. В. Унжаков, Транзисторное усиление фототока в МДП-структурах на высокоомном кремнии р-типа с туннельным диэлектриком из нитрида алюминия, international conference Physica - SPb/2020, October, 19-23, 2020, ФТИ, С. Петербург
16. **А.М. Кузьмичев**, Тулиевые болометры как перспективные детекторы для поиска солнечных аксионов, Школа молодых учёных в рамках XXXIV Кикоинских чтений 25-27 ноября 2020, Псков
17. **A.V. Derbin**, **I.S. Drachnev**, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V., D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Status of searches for Borexino signals associated with GW events and FRBs, Borexino General Meeting, 11-12 December 2020, online

Диссертации, аспирантура, магистратура

Давно подготовлена 1 кандидатская диссертация

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

(Е.В. Унжаков, 202?)

Аспирантура ПИЯФ -> к.ф.м.н.

«Изучение бета-спектров источника электронных антинейтрино ^{144}Ce - ^{144}Pr с помощью полупроводниковых детекторов для поиска осцилляций нейтрино в стерильное состояние.»

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

Магистратура ТУ (2020) -> Аспирантура ПИЯФ (2020)

«Возможности поиска стерильного нейтрино с источником ^{144}Ce - ^{144}Pr и жидкими сцинтилляционными детекторами»

«Поиск редких низкоэнергетических событий от астрофизических источников с детектором Борексина»

(И. Ломская, 2019, рук. И.С. Драчнев / А.В. Дербин)

Бакалавриат АУ им. Ж.И. Алферова (2020)

«Поиск солнечных аксионов с помощью тулиевых болометров»

(А.Кузьмичев, 4-й курс, 2019, рук. Е.В. Унжаков)

Курсовая – диплом СПбГТУ (ТИ) (2020)

«Нейтронный источник для калибровки детектора темной материи DarkSide 20k: изучение радиационной стойкости Si(Li)-детекторов»

(М.Микулич, 2019, рук. М.В. Трушин)

2 РФФИ в 2020 г.

2 гранта: РФФИ (2 рук.+0 исп.) и РФФИ (0 рук.+0 исп.)

1. Грант РФФИ А 19-02-00097

Регистрация CNO нейтрино: прецизионное измерение формы бета-спектра ядра ^{210}Bi .

руководитель *Дербин Александр Владимирович* НИЦ КИ ПИЯФ

2. Грант РФФИ А 20-02-00571

Комплексные исследования радиационной стойкости кремний-литиевых Si(Li) детекторов и процессов взаимодействия ионов лития с радиационными дефектами.

руководитель *Трушин Максим Валерьевич* НИЦ КИ ПИЯФ

3. Поданы заявки на 2021 г. в РФФИ (А.В. Дербин)

1. Третья премия на конкурсе лучших работ ПИЯФ «Поиск нейтрино с массой (0.01-1.0) МэВ в бета распадах ядер ^{144}Ce - ^{144}Pr ».

2. Соавторы работы из списка *PhysicsWorld* 10 прорывов года

2011 – год нейтрино

Март: *стерильное нейтрино*

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

Июль: θ_{13} *отличен от нуля*

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

Сентябрь: – *сверхсветовые нейтрино*

CerN GranSasso OPERA

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

Апрель: *LMA решение для нейтрино*

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

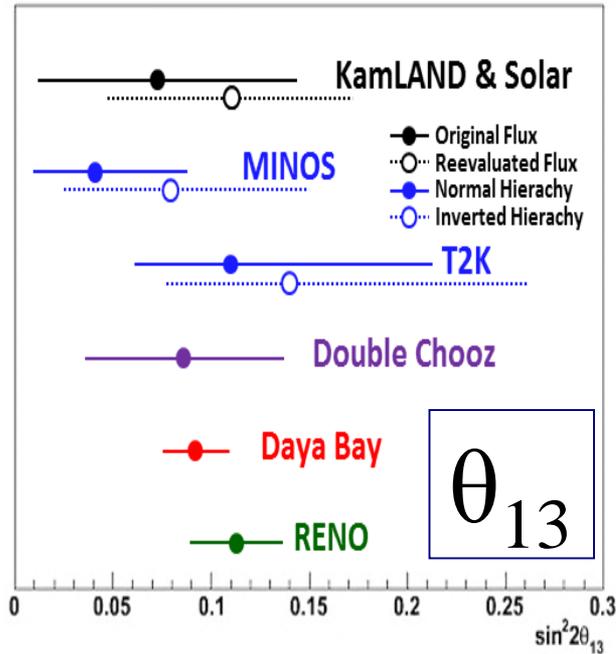
Сентябрь: *пер-нейтрино* $(1.6 \pm 0.3) 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Borexino,

Декабрь: θ_{13} *Double Chooz*

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

LVD coll. PRL 109, 070801 (2012)

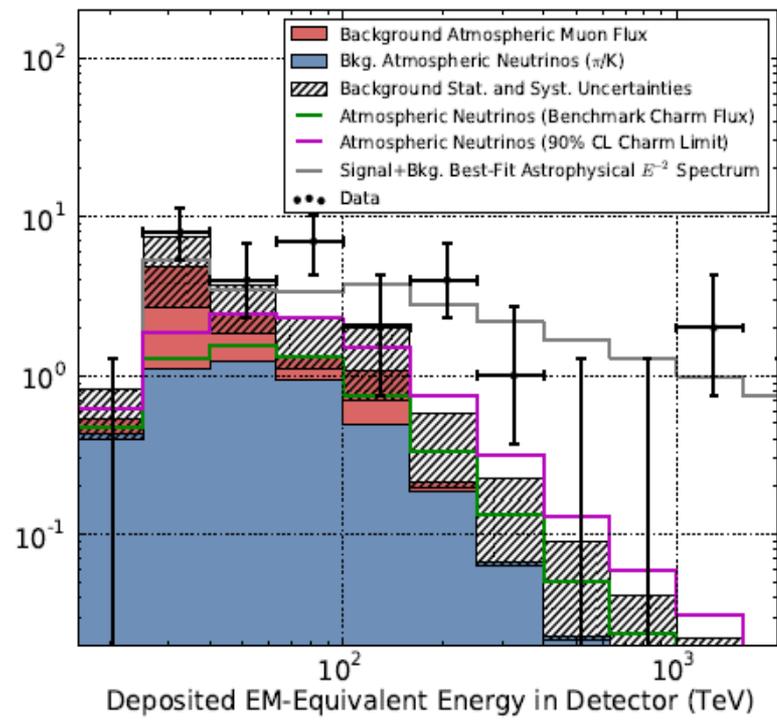
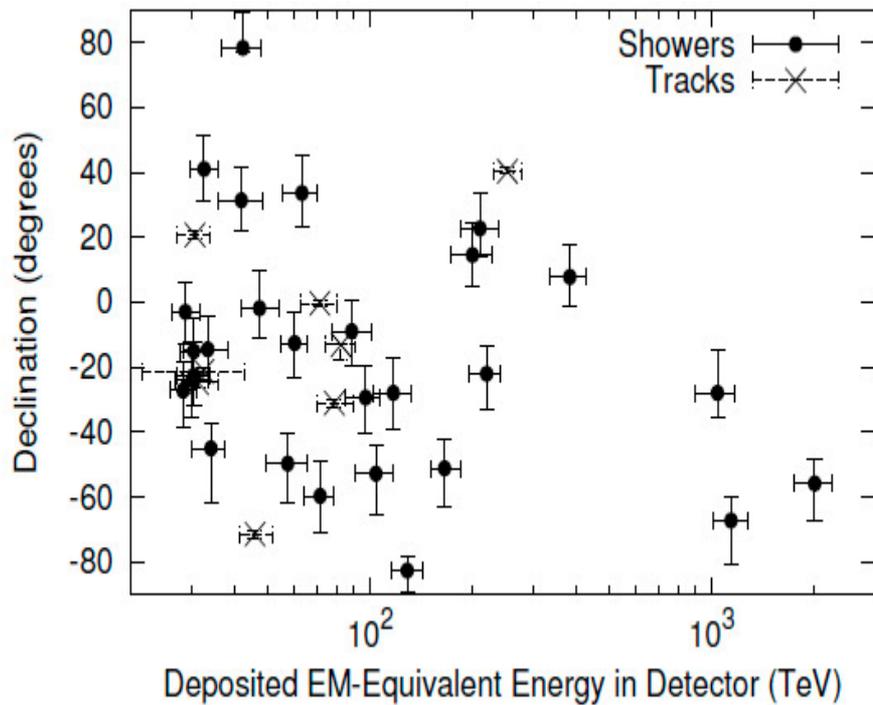
Borexino coll. arXiv:1207.6860

ICARUS coll. arXiv:1208.2629

OPERA coll. arXiv:1212.1276

$$(V - C) / C$$

2013 – год открытия астрофизических нейтрино



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

ARTICLE

doi:10.1038/nature13702

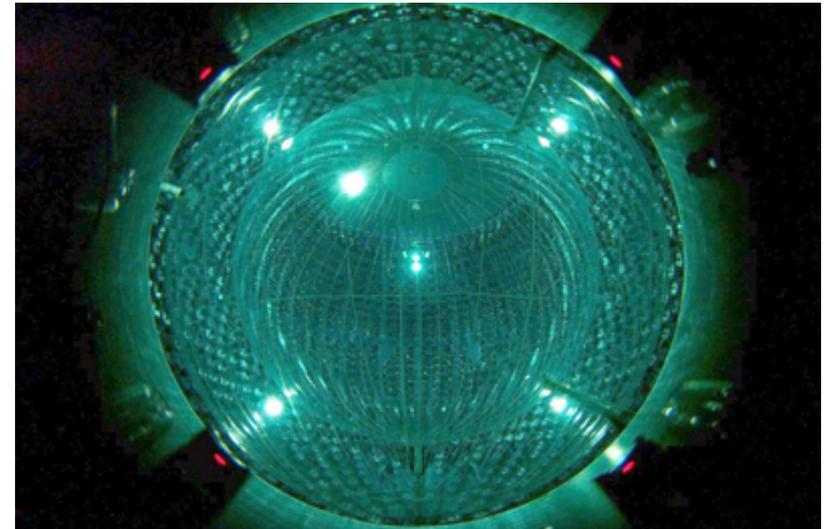
Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

Borexino Collaboration*

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

Neutrinos spotted from Sun's main nuclear reaction

Aug 27, 2014 [9 comments](#)



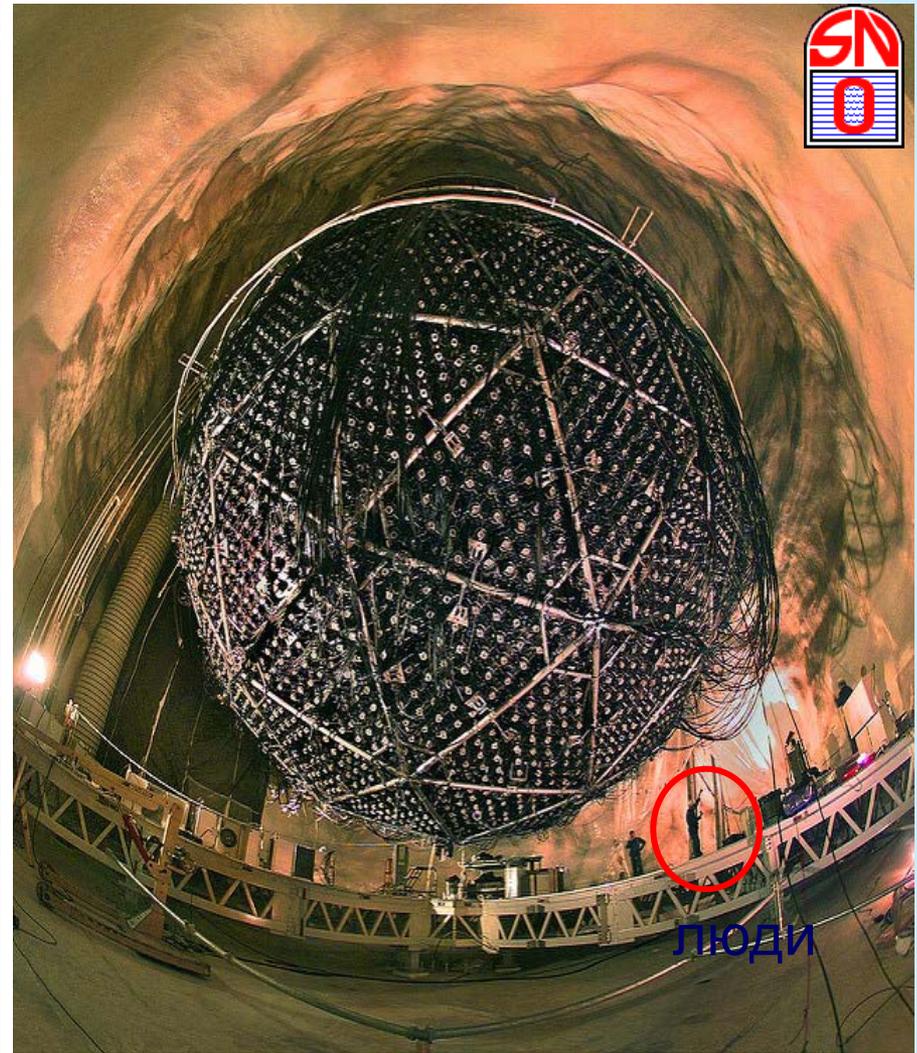
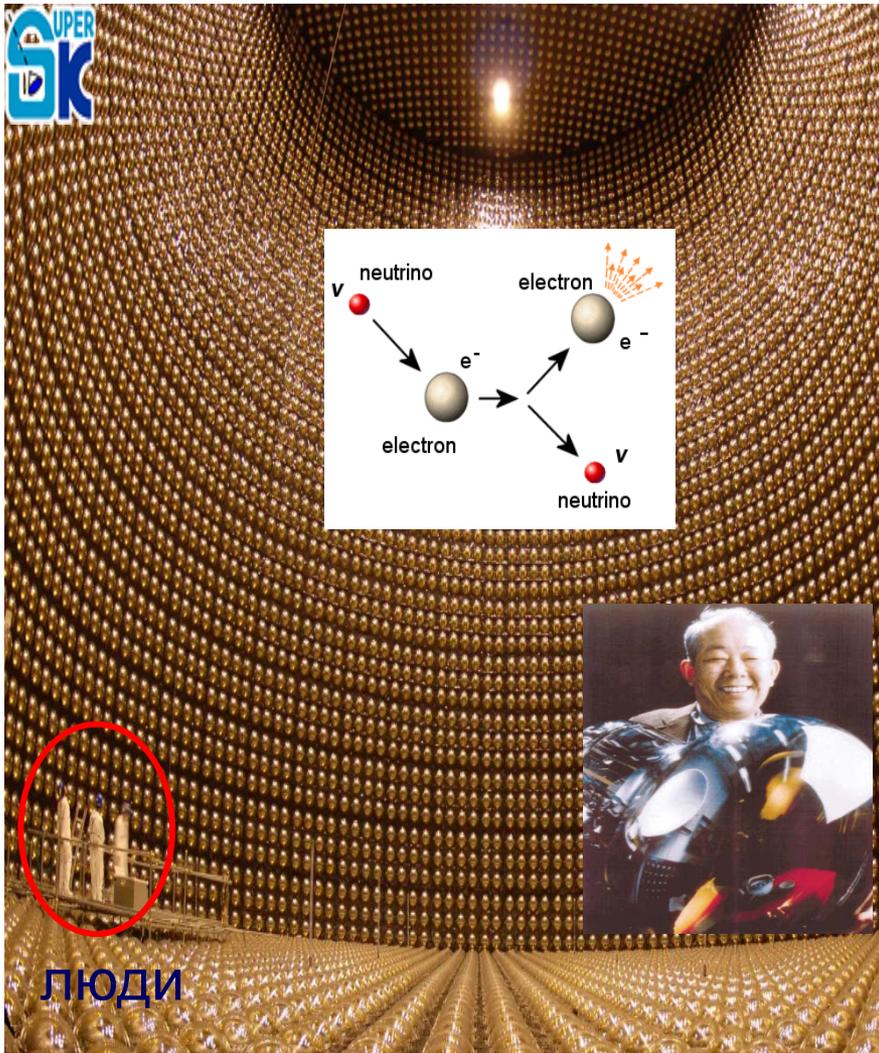
[Solace for solar physicists: Borexino results back theory](#)

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

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

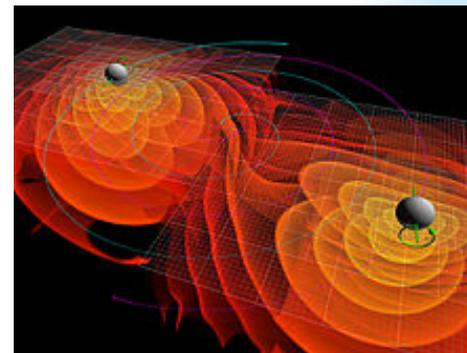
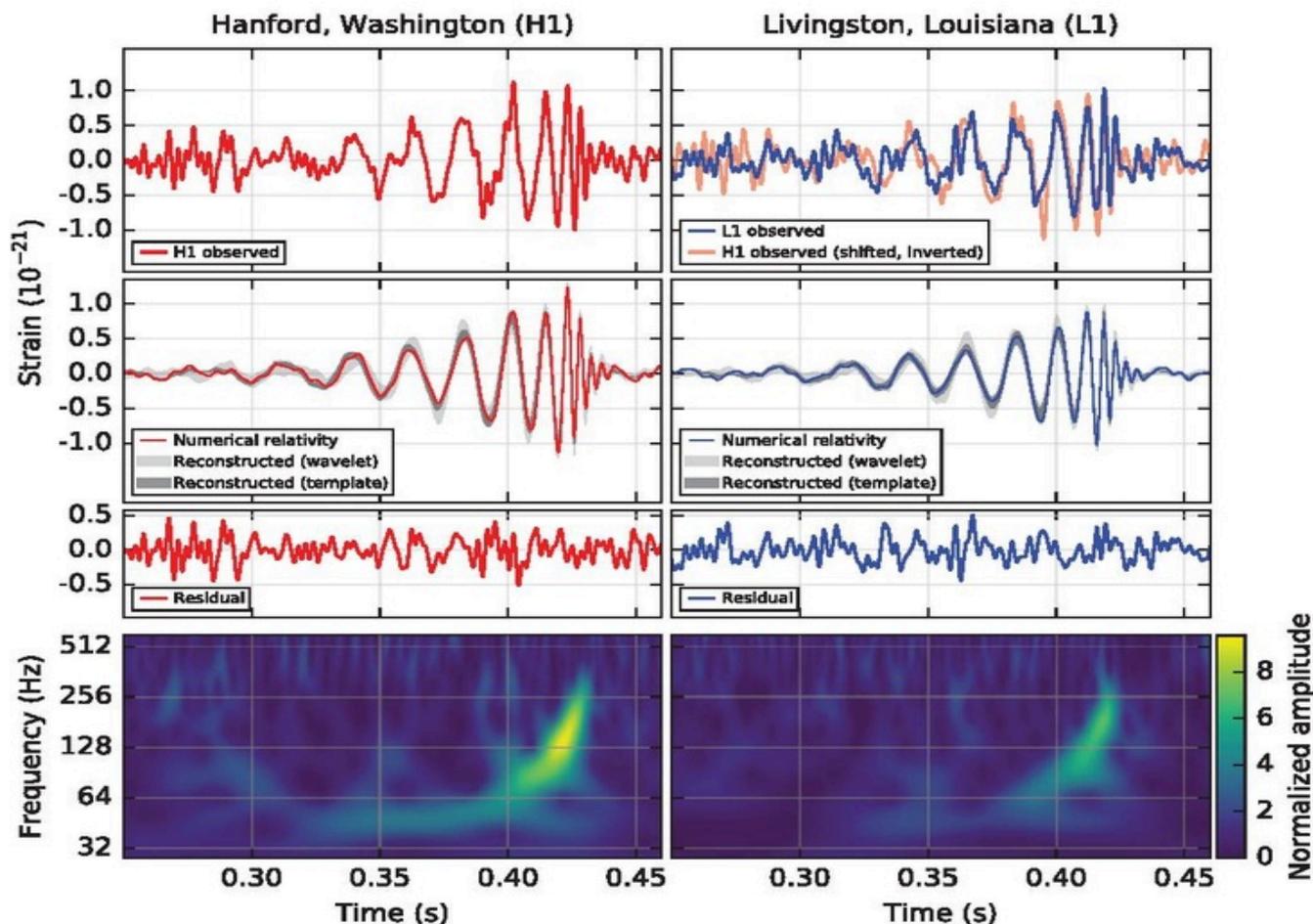
Each second, the Sun converts 600 million tonnes of hydrogen into helium, and 99% of the energy generated arises from the so-called proton–proton chain. And 99.76% of the time, this chain starts when two protons form deuterium (hydrogen-2) by coming close enough together that one becomes a neutron, emitting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

2015 – нобелевская S-K и SNO



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

2016 – регистрация гравитационных волн ВН-ВН

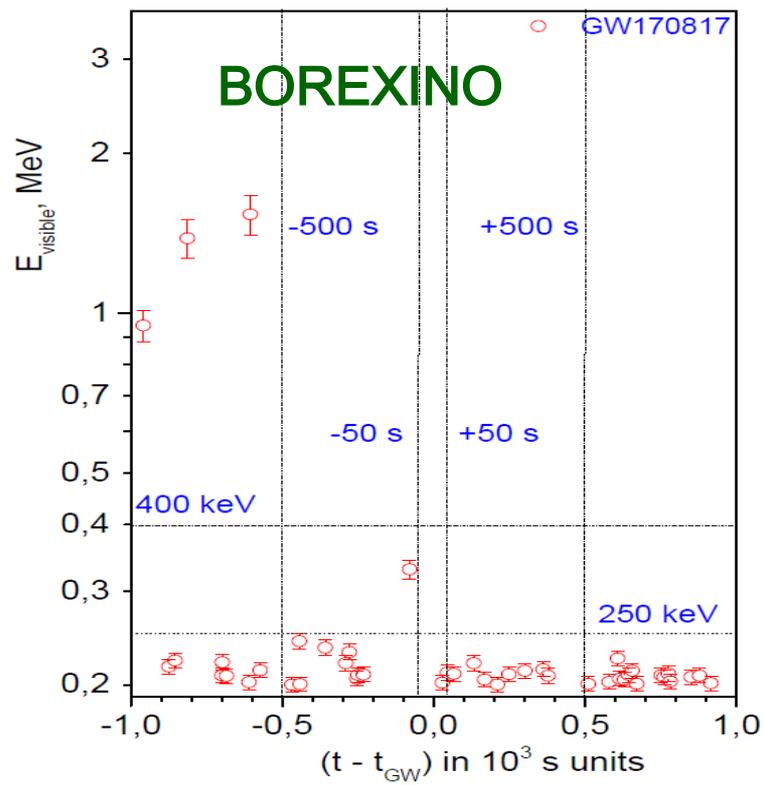


5.1 σ . На расстоянии 410 Мпс ($z = 0.09$) слияние двух черных дыр с массами $36 M_{\odot}$ и $29 M_{\odot}$ с образованием $62 M_{\odot}$ и $3.0 M_{\odot}c^2$ излучилось в виде гравитационных волн. .

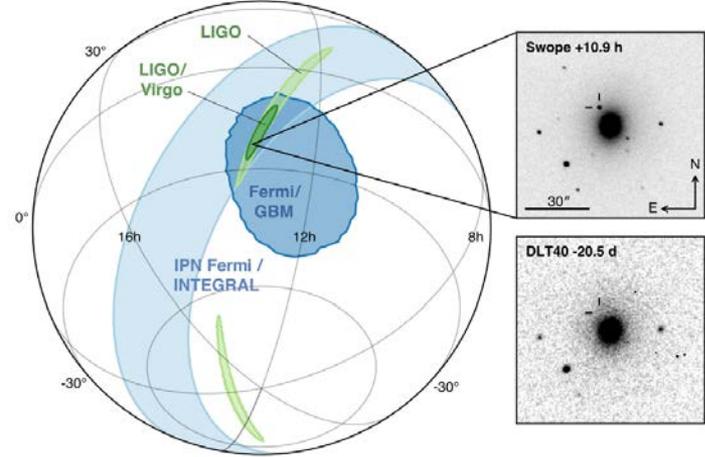
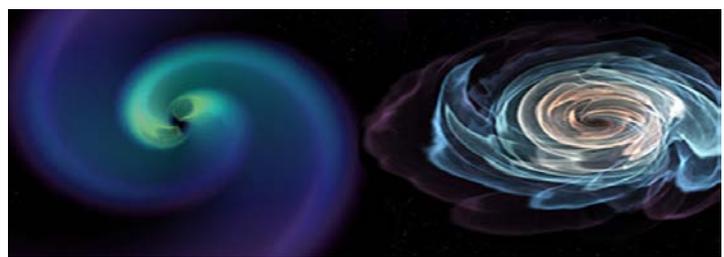
GW150914
LVT151012
GW151228
GW170104

Начало применения комплементарных (multi-messenger) методов в астрофизике – электромагнитные, нейтринные и гравитационные сигналы из Вселенной могут регистрировать детекторы фотонов, нейтрино и гравитационных волн. В 2019 закончены O1 и O2. Начат ран O3, более 30 событий ВН-ВН, ВН-НС, НС-НС.

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



The Physics World 2017 Breakthrough of the Year

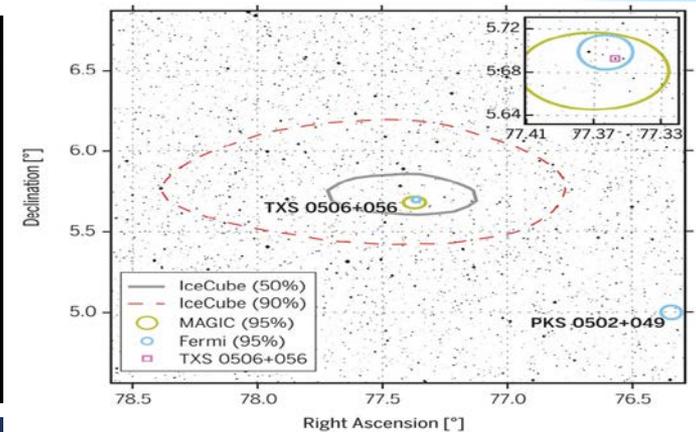
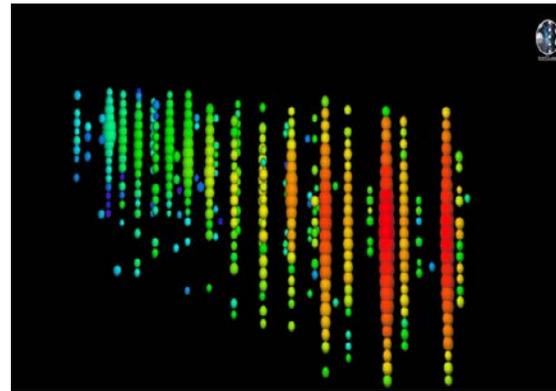


- GW150914
- LVT151012
- GW151228
- GW170104
- GW170609
- GW170814
- GW170817**

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.

2018 - Источником высокоэнергетических нейтрино является блазар TXS 0506



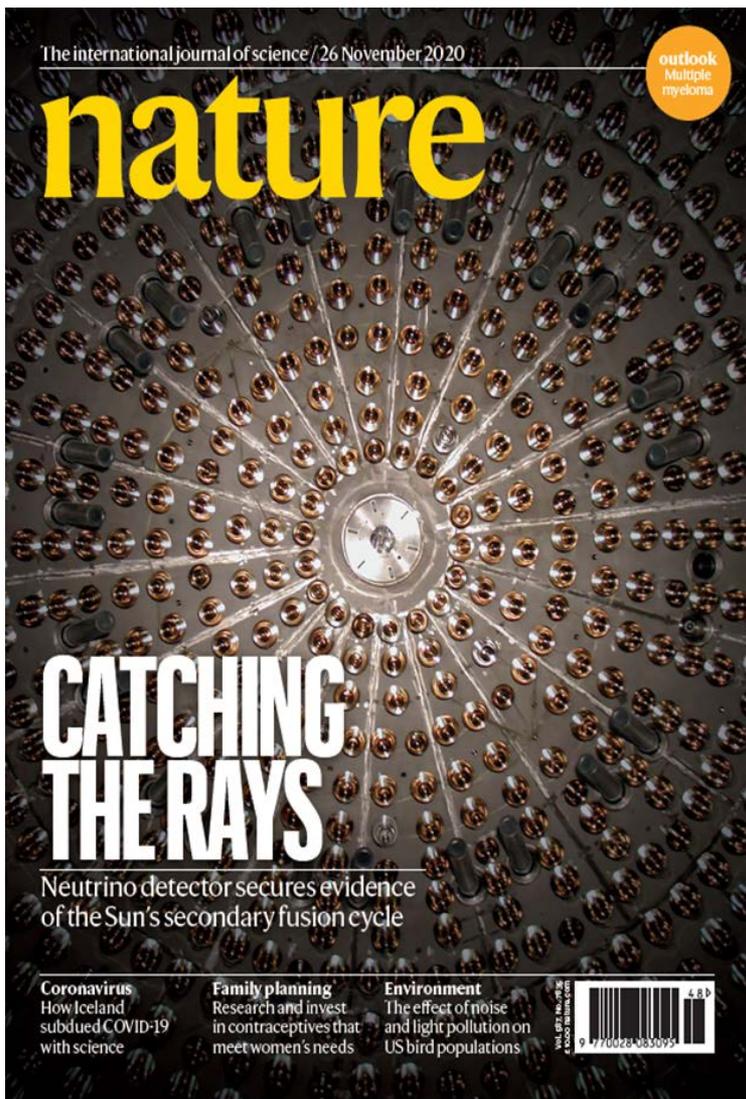
22 сентября 2017 года IceCube зарегистрировал нейтрино с энергией 270 ТэВ. Гамма-телескоп Fermi-LAT и наземный атмосферный черенковский телескоп MAGIC указали с более высокой точностью на блазар TXS 0506+056, удаленный на 3,8 млрд световых лет. Это третий, после Солнца и SN-1987A, внеземной источник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

2019 г. Первый результат KATRIN: $m_\nu < 1.1$ эВ (90% у.д.)

arXiv:1909.06048v1



2020 г. Регистрация солнечных CNO-нейтрино



«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2020»

Article

Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0>

The Borexino Collaboration*

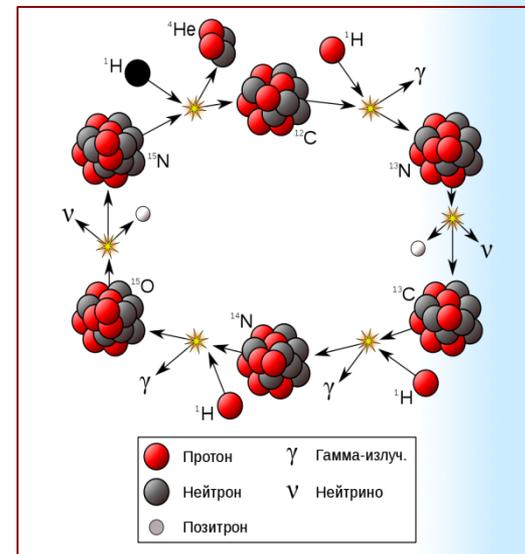
Received: 26 June 2020

Accepted: 2 October 2020

Published online: 25 November 2020

Check for updates

For most of their existence, stars are fuelled by the fusion of hydrogen into helium. Fusion proceeds via two processes that are well understood theoretically: the proton-proton (pp) chain and the carbon-nitrogen-oxygen (CNO) cycle^{1,2}. Neutrinos that are emitted along such fusion processes in the solar core are the only direct probe of the



Новые результаты Борексино (2020 г.)

2020 год: CNO-нейтрино; (PNPI β -спектр ^{210}Bi)

- vs от астрофизических источников; - Гео- vs; - Нестандартные взаимодействия vs

2019 год: Совместный фит pp-, ^7Be - и $\text{p}\bar{\text{p}}$ -нейтрино, Модуляция потока мюонов за 10 лет измерений, Гео-нейтрино, анти- ν от Солнца, солнечные вспышки, NSI

2018 год Комплексные результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино

2017 год Корреляции грав. волн и сигналов Борексино
Временные вариации ^7Be -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}C с нарушением ПП

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

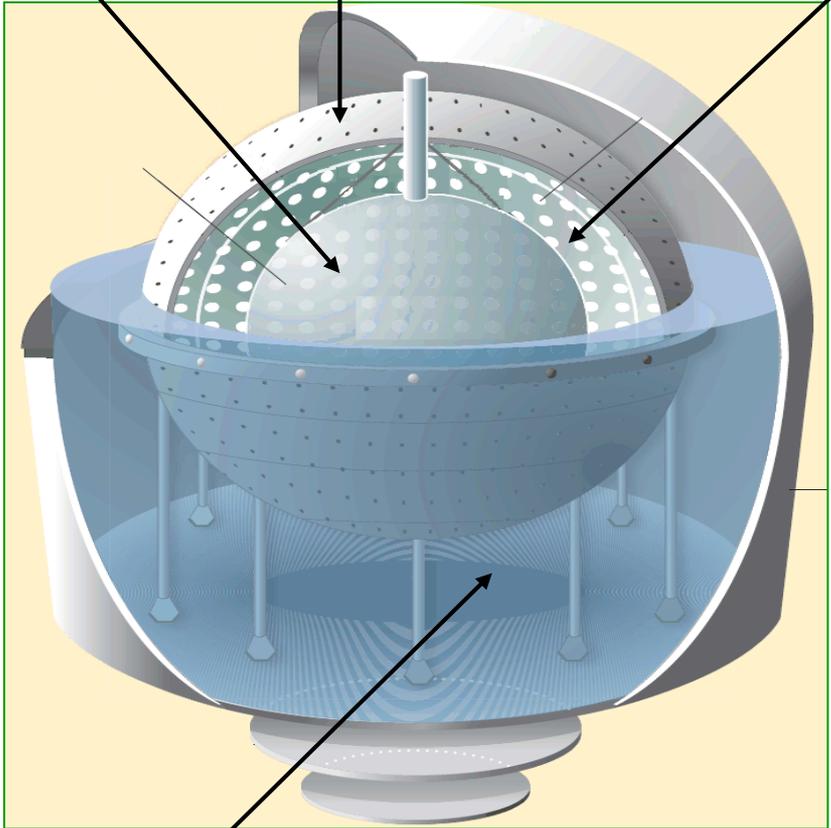
1. Вариации день-ночь для ^7Be - ν
2. Обнаружены $\text{p}\bar{\text{p}}$ -нейтрино
3. Поток ^7Be - ν измерен с 5% точ.

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

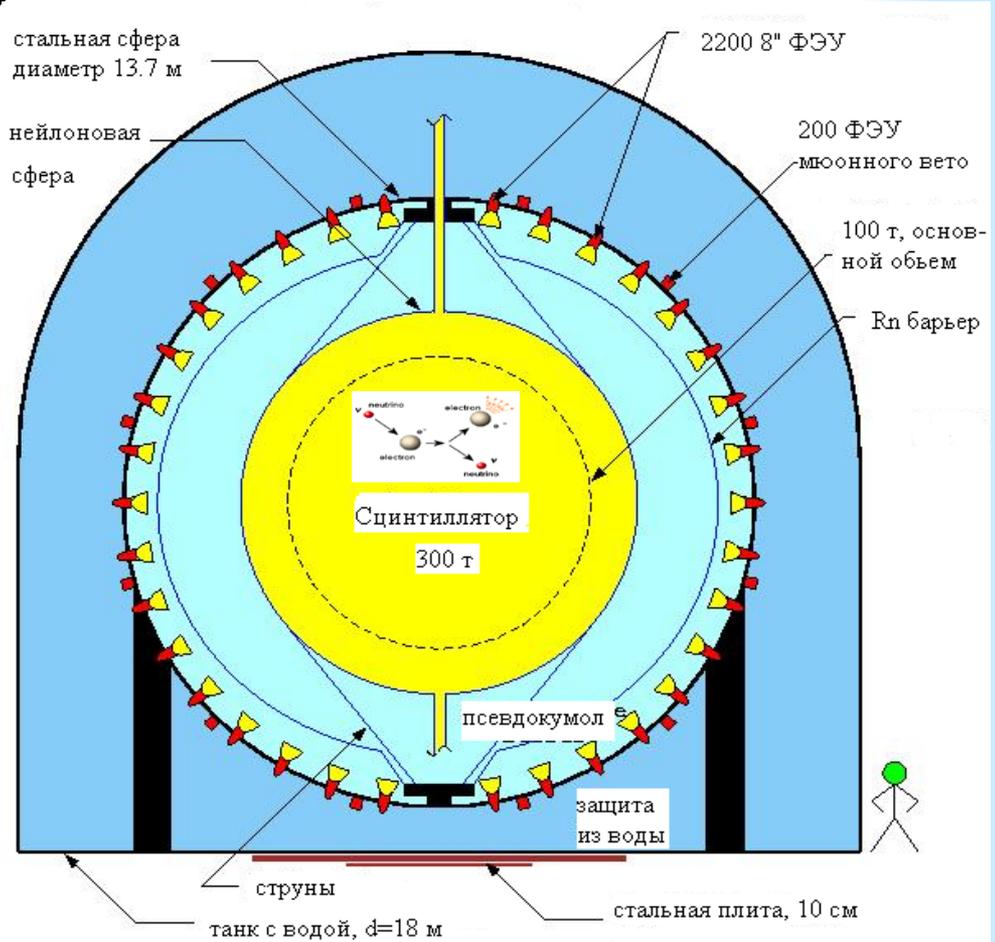
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

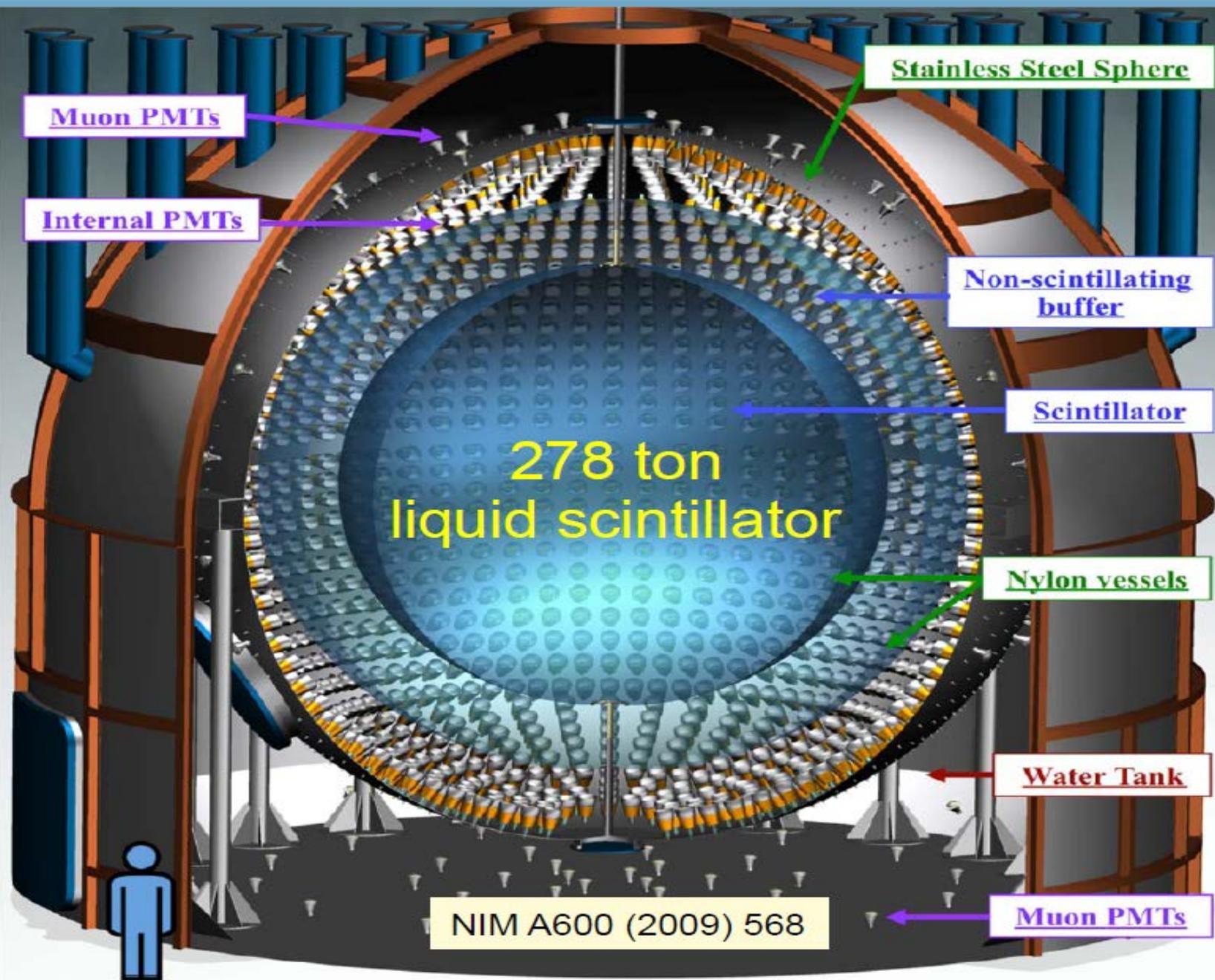
Стальная сфера (R=6,85 м)
- 2212 8" ФЭУ;
- 1350 м³ PC+DMP (5,0 г/л)

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

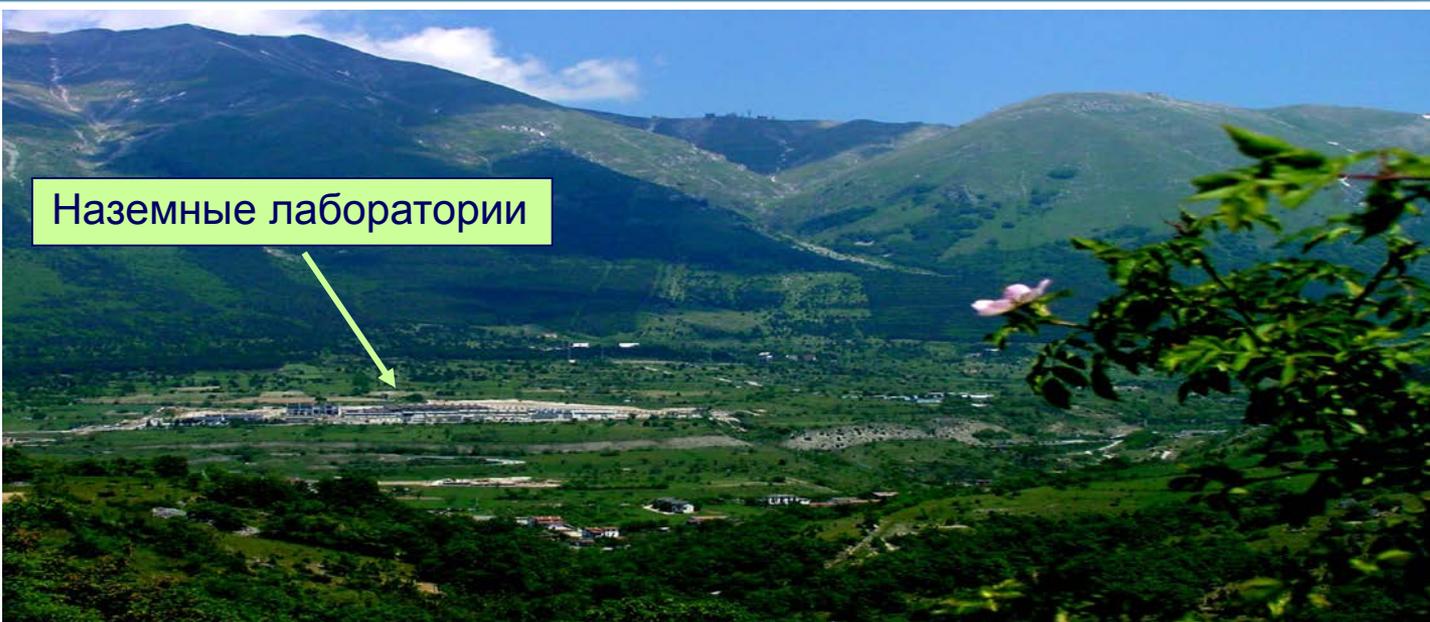


2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n

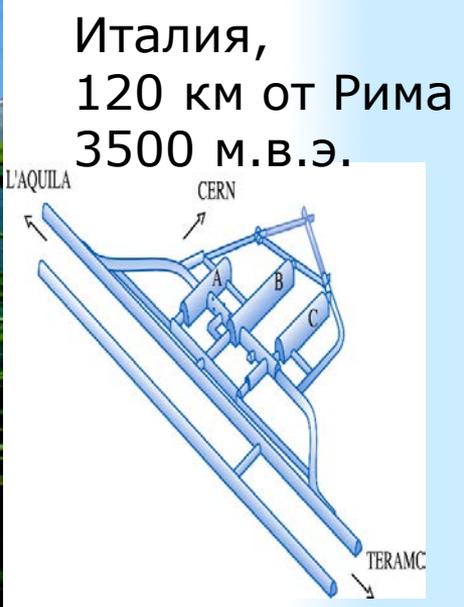




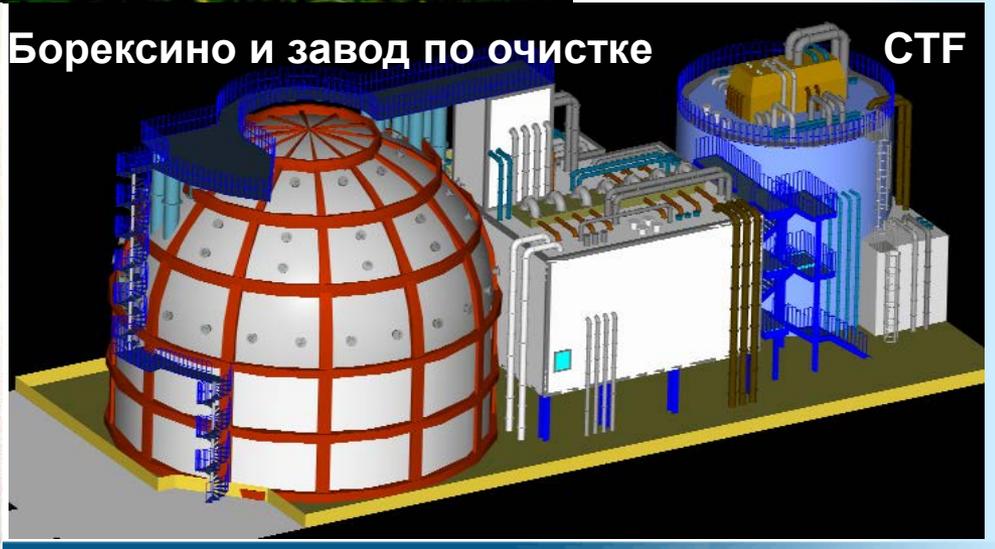
Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории



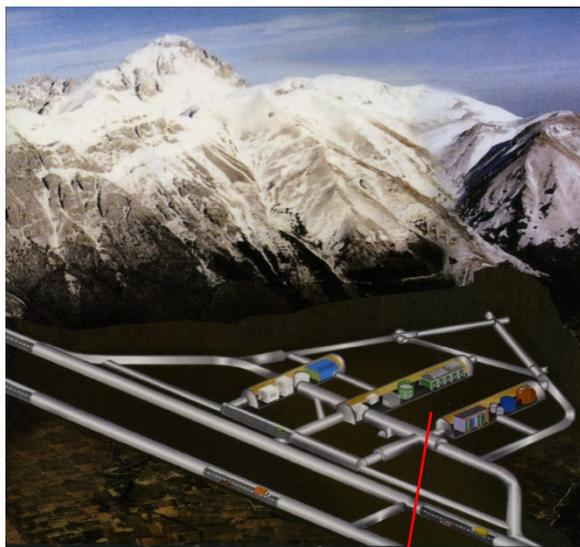
Борексидно и завод по очистке



СТФ



Подземная лаборатория Гран-Сассо





Borexino Collaboration



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



PRINCETON
UNIVERSITY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"



St. Petersburg
Nuclear Physics Inst.



Technische Universität
München



University of
Houston



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Virginia



Tech



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ



Universität
Hamburg



НИИЯФ
МГУ

SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY



Joint Institute for
Nuclear Research



G S

GRAN SASSO
SCIENCE INSTITUTE

S I

CENTER FOR ADVANCED STUDIES
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



Рабочие группы Вх и вклад ПИЯФ в 2020г.

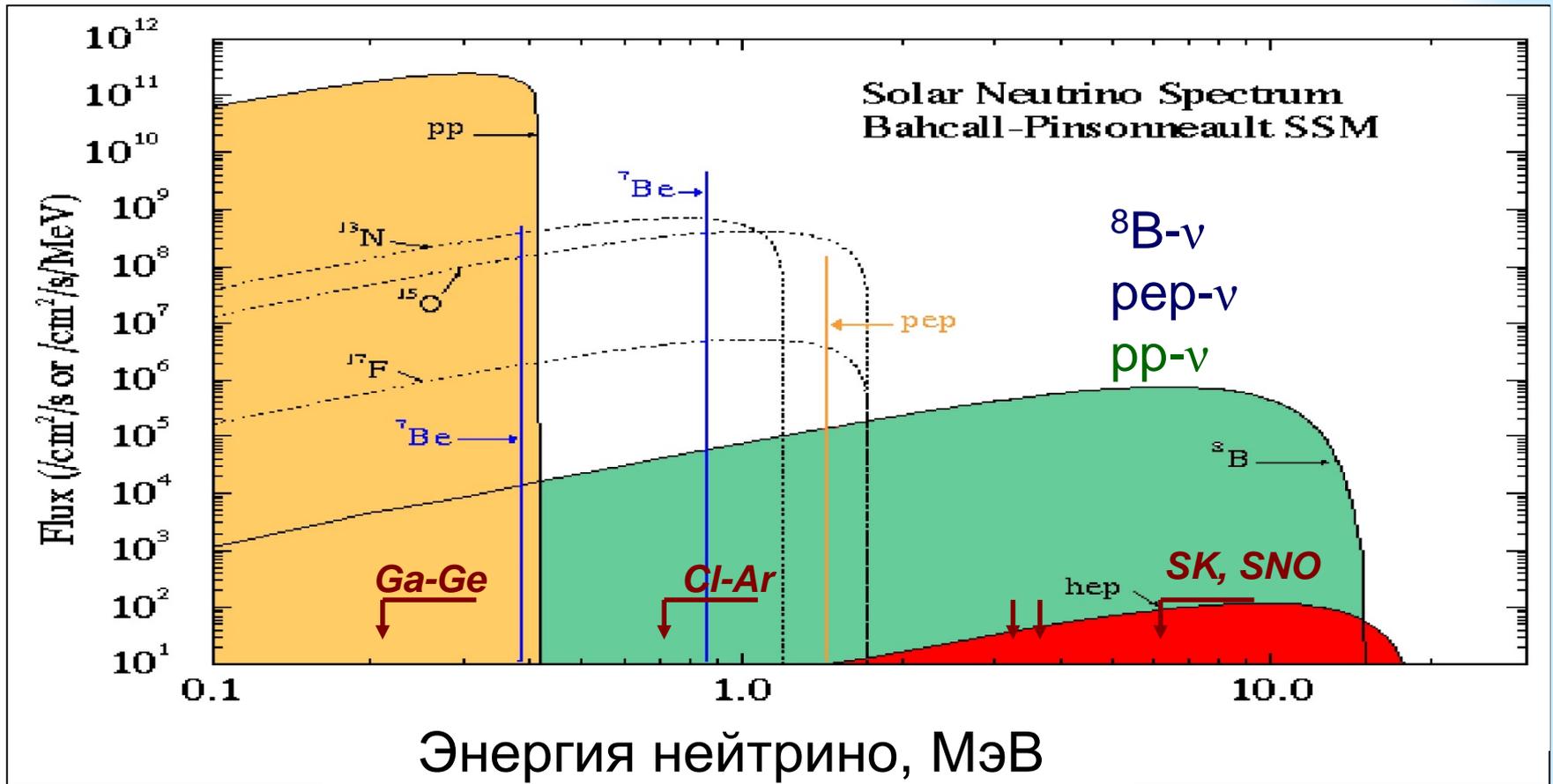
Входим в состав 6 (из 12) рабочих групп:

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

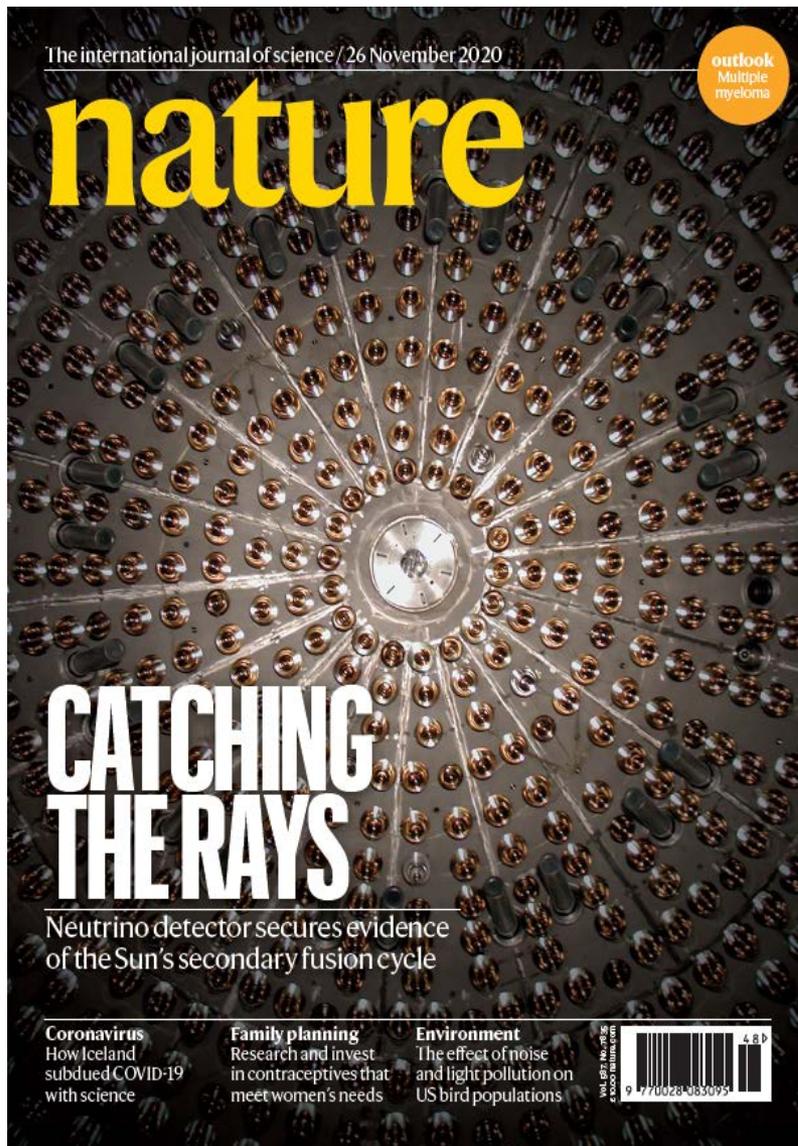
1. В 2020 году коллаборация Borexino представила статистически достоверные результаты регистрации нейтрино из CNO-цикла на Солнце, которые представлены на Нейтрино-2020 и опубликованы в журнале "Nature", 25 ноября 2020 г.
2. Группой ПИЯФ выполнены прецизионные измерения бета-спектра ${}^{210}\text{Bi}$, которые использовались для определения вклада в фон Borexino от ${}^{210}\text{Bi}$ при анализе сигналов от CNO-нейтрино. Результаты опубликованы в Phys. Rev C
3. Группа ПИЯФ, совместно с группой КИ, продолжила поиск корреляций ν -событий с солнечными вспышками (SF). Коллаборацией получены новые данные по потокам антинейтрино от Солнца, новые пределы на магнитный момент и маг. поле Солнца $\mu_N < 6.9 \times 10^{-9} \text{ B[kG]} \mu_B$. Результаты в Astroparticle Physics.
4. Получены новые данные по гео-нейтрино. Результаты опубликованы в Phys.Rev.D
5. Зона ответственности ПИЯФ - корреляции с гравитационными волнами (GW) и быстрыми радио-всплесками (FRBs).
6. Работа в Гран Сассо – в феврале 1 чел./мес. в экспериментах Borexino 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} $\nu/\text{cm}^2\text{сек}$



Article

Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0> The Borexino Collaboration*

M. Agostini^{1,2}, K. Altenmüller², S. Appel², V. Atroshchenko³, Z. Bagdasarian^{4,27}, D. Basilico⁵, G. Bellini⁵, J. Benziger⁶, R. Blondi⁷, D. Bravo^{5,28}, B. Caccianiga⁵, F. Calaprice⁸, A. Caminata⁹, P. Cavalcante^{10,29}, A. Chepurinov¹¹, D. D'Angelo⁵, S. Davini⁹, A. Derbin¹², A. Di Giacinto⁷, V. Di Marcello⁷, X. F. Ding⁸, A. Di Ludovico⁸, L. Di Noto⁹, I. Drachnev¹², A. Formozov^{5,13}, D. Franco¹⁴, C. Galbiati^{8,15}, C. Ghiano⁷, M. Glammarchi⁵, A. Goretti^{8,29}, A. S. Göttel^{4,16}, M. Gromov^{11,13}, D. Guffanti¹⁷, Aldo Ianni⁷, Andrea Ianni⁸, A. Jany¹⁸, D. Jeschke², V. Kobychhev¹⁹, G. Korga^{20,21}, S. Kumaran^{4,16}, M. Laubenstein⁷, E. Litvinovich^{3,22}, P. Lombardi⁵, I. Lomskeya¹², L. Ludhova^{4,16}, G. Lukyanchenko³, L. Lukyanchenko³, I. Machulin^{3,22}, J. Martyn¹⁷, E. Meroni⁵, M. Meyer²³, L. Miramonti⁵, M. Misiaszek¹⁸, V. Muratova¹², B. Neumair², M. Nieslony¹⁷, R. Nugmanov^{3,22}, L. Oberauer², V. Orekhov¹⁷, F. Ortica²⁴, M. Pallavicini⁹, L. Papp², L. Pelicci⁵, Ö. Penek^{4,16}, L. Pietrofaccila⁸, N. Pilipenko¹², A. Pocar²⁵, G. Raikov³, M. T. Ranalli⁷, G. Ranucci⁵, A. Razeto⁷, A. Re⁵, M. Redchuk^{4,16}, A. Romani²⁴, N. Rossi¹⁷, S. Schönert², D. Semenov¹², G. Settanta⁴, M. Skorokhvatov^{3,22}, A. Singhal^{4,16}, O. Smirnov¹³, A. Sotnikov¹³, Y. Suvorov^{3,7,30}, R. Tartaglia⁷, G. Testera⁹, J. Thurn²³, E. Unzhakov¹², F. L. Villante^{7,26}, A. Vishneva¹³, R. B. Vogelaar¹⁰, F. von Felitzsch², M. Wojcik¹⁸, M. Wurm¹⁷, S. Zavatarelli⁹, K. Zuber²³ & G. Zuzel¹⁸



Internal view of the Borexino liquid scintillator containment vessel. From the photo several parts of the detector are visible: the photomultipliers (silver-like color) the mu-metal shielding (brass-like color) the bottom of the outer nylon vessel (upper part of the photo).

From the Borexino collaboration on: Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino



Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino

BOREXINO Collaboration^a

M. Agostini¹, K. Altenmüller¹, S. Appel¹, V. Atroshchenko², Z. Bagdasarian^{3,d}, D. Basilico⁴, G. Bellini⁴, J. Benziger⁵, R. Blondi⁶, D. Bravo^{4,c}, B. Cacchianiga⁴, F. Calaprice⁷, A. Caminata⁸, P. Cavalcante^{9,f}, A. Chepurinov¹⁰, D. D'Angelo⁴, S. Davini⁸, A. Derbin¹¹, A. Di Giacinto⁶, V. Di Marcello⁶, X. F. Ding^{7,b}, A. Di Ludovico⁷, L. Di Noto⁸, I. Drachnev¹¹, A. Formozov^{4,12}, D. Franco¹³, C. Galbiati^{7,14}, C. Ghiano⁶, M. Glammarchi⁴, A. Goretti^{7,f}, A. S. Göttel^{3,15}, M. Gromov^{10,12}, D. Guffanti¹⁶, Aldo Ianni⁶, Andrea Ianni⁷, A. Jany¹⁷, D. Jeschke¹, V. Kobychchev¹⁸, G. Korga¹⁹, S. Kumaran^{3,15}, M. Laubenstein⁶, E. Litvinovich^{2,20}, P. Lombardi⁴, I. Lomsakaya¹¹, L. Ludhova^{3,15}, G. Lukyanchenko², L. Lukyanchenko², I. Machulin^{2,20}, J. Martyn¹⁶, E. Meroni⁴, M. Meyer²¹, L. Miramonti⁴, M. Mistaszek¹⁷, V. Muratova¹¹, B. Neumair¹, M. Nieslony¹⁶, R. Nugmanov^{2,20}, L. Oberauer¹, V. Orekhov², F. Ortica²², M. Pallavicini⁸, L. Papp¹, Ö. Penek^{3,15}, L. Pietrofaccia⁷, N. Pilipenko¹¹, A. Pocar²³, G. Raikov², M. T. Ranalli⁶, G. Ranucci^{4,c}, A. Razeto⁶, A. Re⁴, M. Redchuk^{3,15}, A. Romani²², N. Rossi⁶, S. Schönert¹, D. Semenov¹¹, G. Settanta³, M. Skorokhvatov^{2,20}, O. Smirnov¹², A. Sotnikov¹², Y. Suvorov^{2,6,g}, R. Tartaglia⁶, G. Testera⁸, J. Thurn²¹, E. Unzhakov¹¹, F. L. Villante^{6,24}, A. Vishneva¹², R. B. Vogelaar⁹, F. von Feilitzsch¹, M. Wojcik¹⁷, M. Wurm¹⁶, S. Zavatarelli⁸, K. Zuber²¹, G. Zuzel¹⁷

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

² Nuclear Research Centre Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

³ Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany

⁴ Dipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 20133 Milan, Italy

⁵ Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

⁶ INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso,

67010 Assergi, AQ, Italy

⁷ Physics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

⁸ Dipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 16146 Genoa, Italy

⁹ Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA

¹⁰ Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia

¹¹ St. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188350 Gatchina, Russia

¹² Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

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

¹⁴ Gran Sasso Science Institute, 67100 L'Aquila, Italy

¹⁵ III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany

¹⁶ Institute of Physics and Excellence Cluster PRISMA+, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany

¹⁷ M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30348 Kraków, Poland

¹⁸ Institute for Nuclear Research, 05028 Kyiv, Ukraine

¹⁹ Department of Physics, School of Engineering, Physical and Mathematical Sciences, Royal Holloway, University of London, Egham, UK

²⁰ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

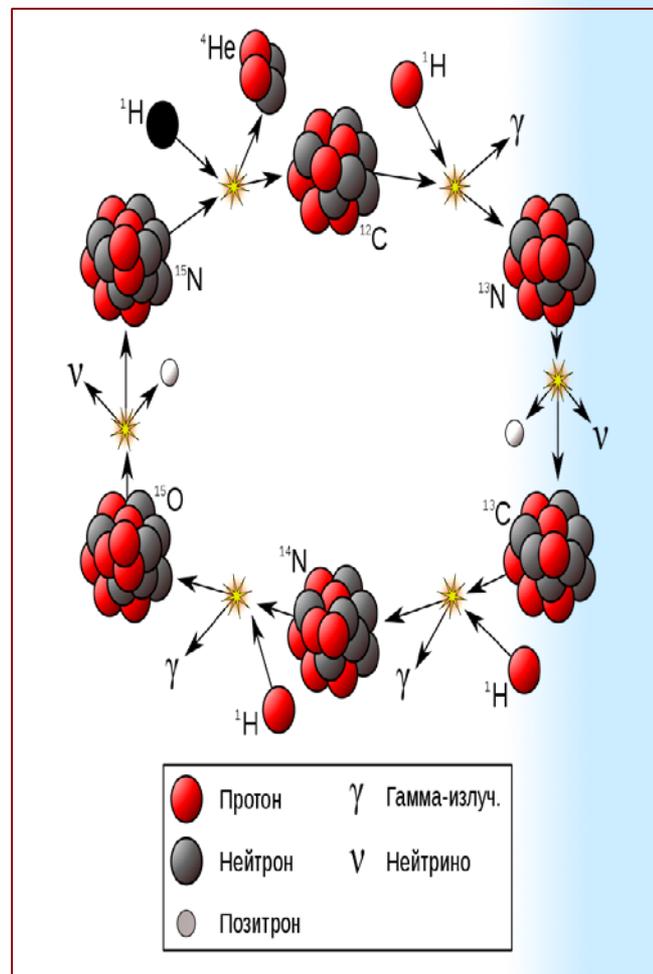
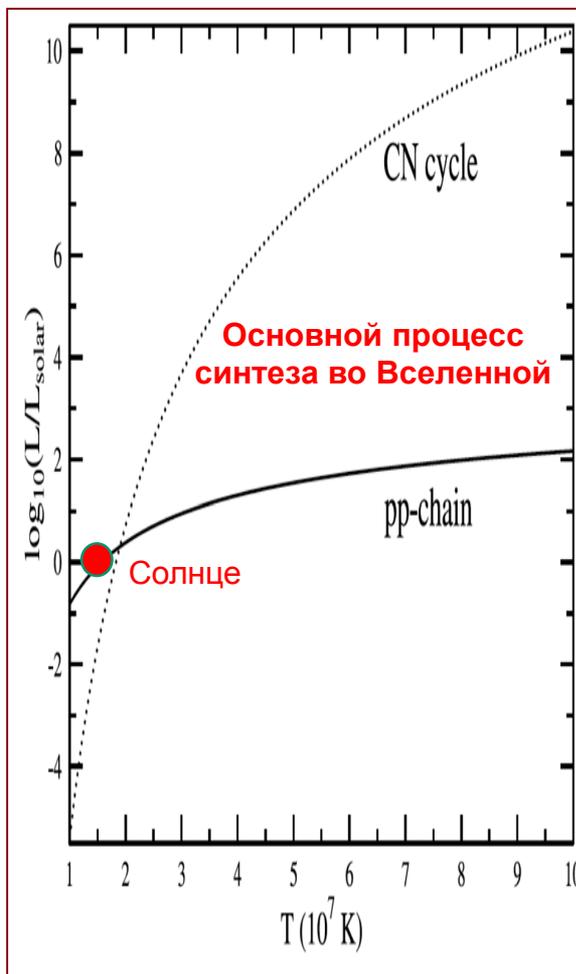
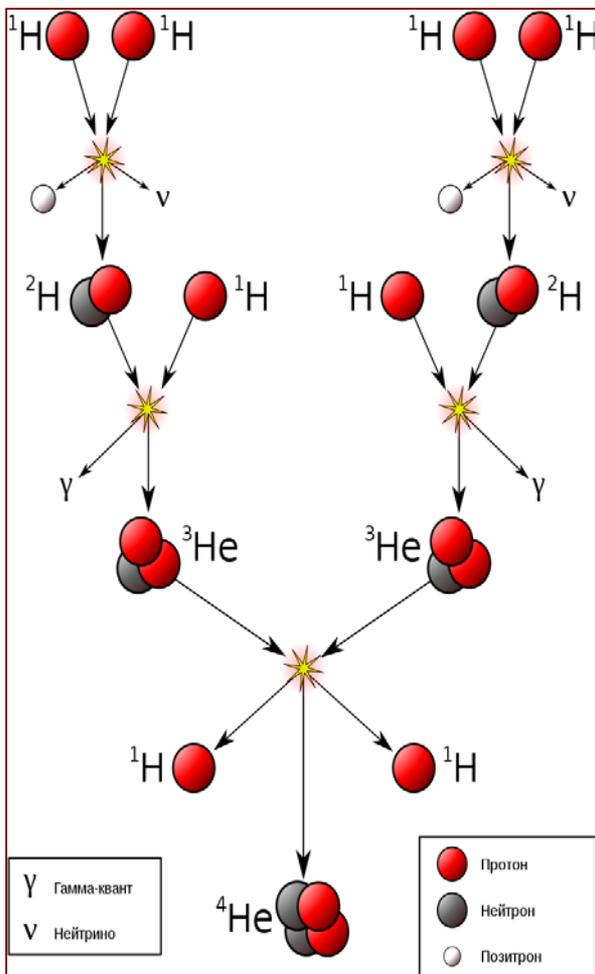
²¹ Department of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany

²² Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi e INFN, 06123 Perugia, Italy

²³ Amherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA

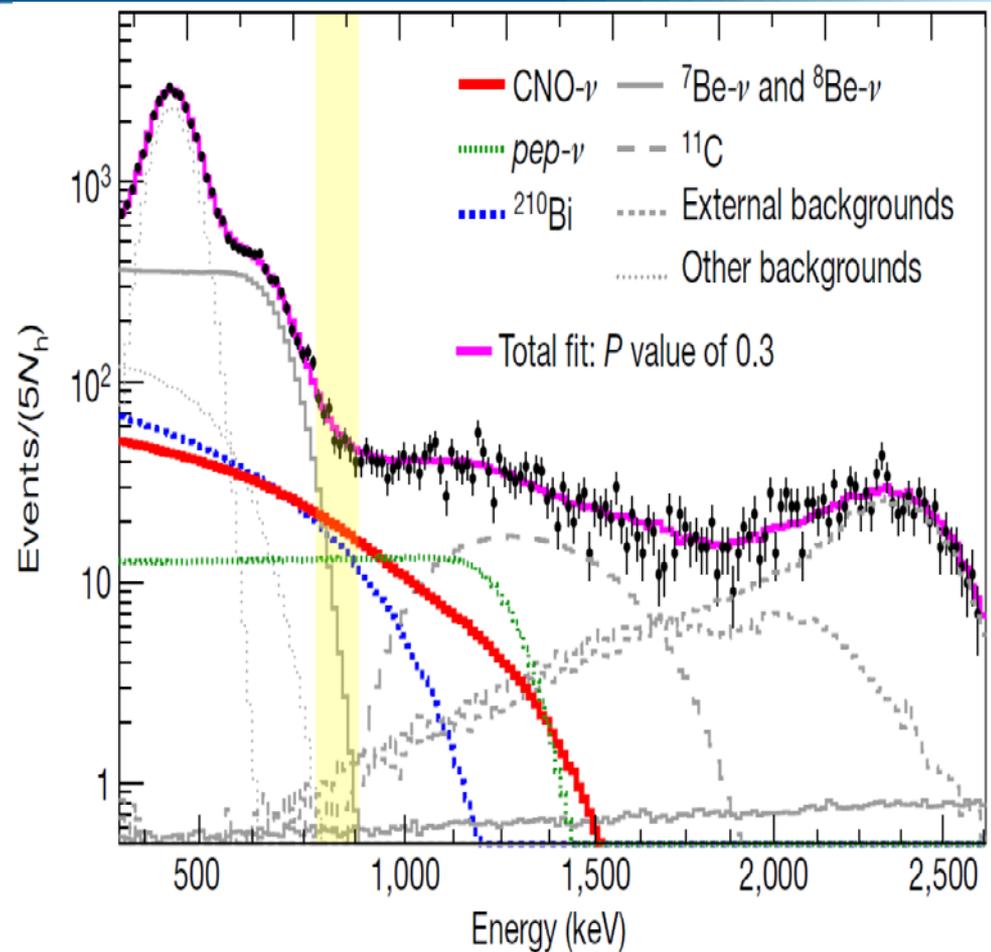
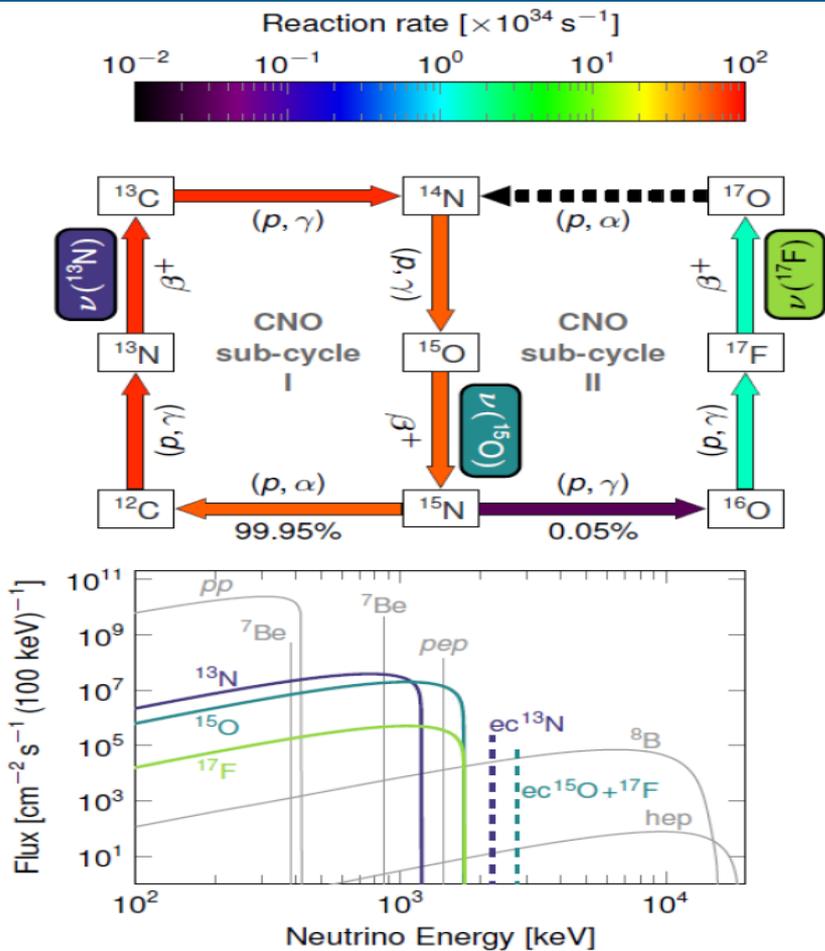
²⁴ Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università dell'Aquila, 67100 L'Aquila, Italy

2020 г. Регистрация CNO-нейтрино



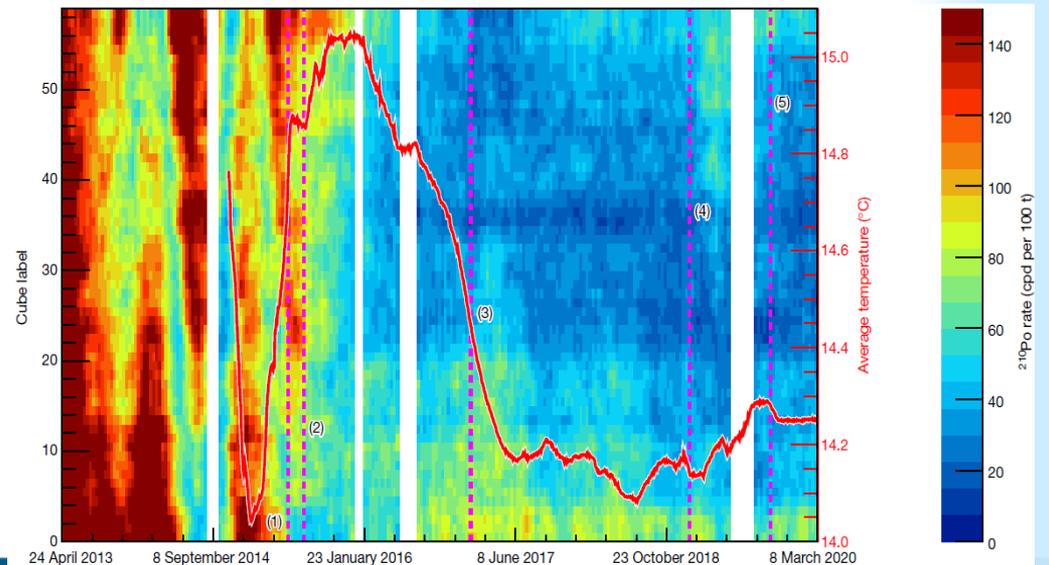
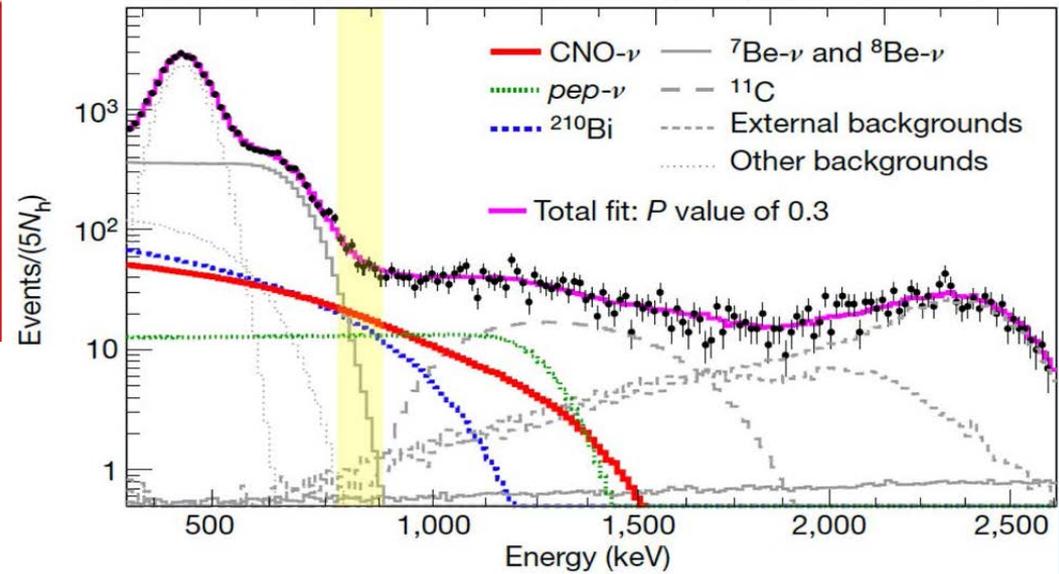
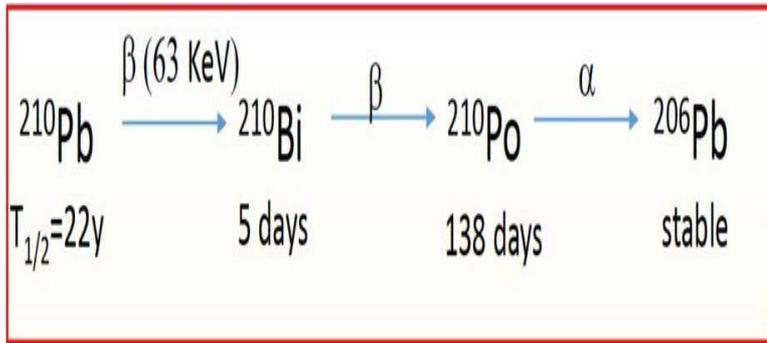
Ядерный синтез H в He в звездах происходит посредством двух процессов: **pp-цепи**, включающей только изотопы H и He, и **цикла углерод-азот-кислород (CNO)**, в котором синтез катализируется ядрами C, N и O. CNO цикл производит лишь 1% энергии Солнца. CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей астрофизики, был предсказан теоретически и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения.

Регистрация CNO-нейтрино

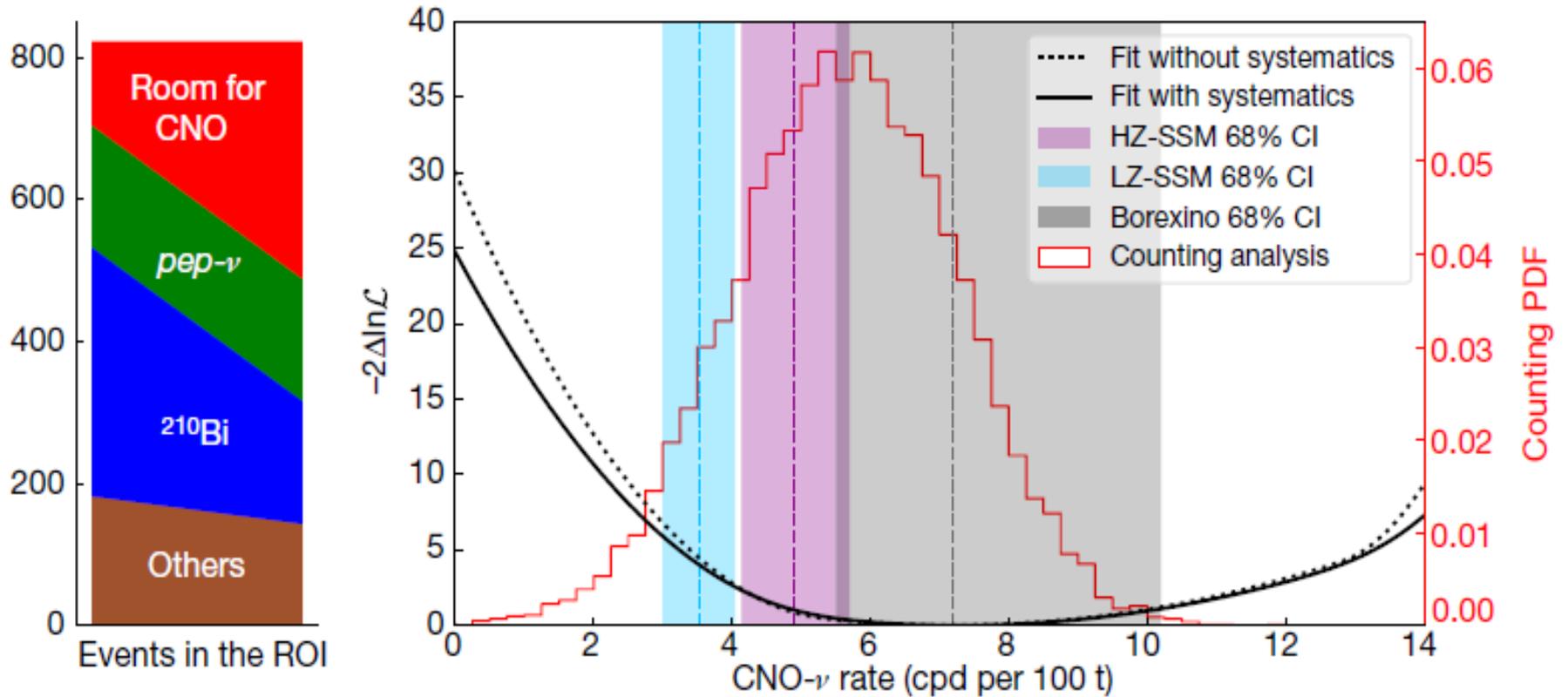


Ядерный синтез H в He в звездах происходит посредством двух процессов: **pp-цепи**, включающей только изотопы H и He, и **цикла углерод-азот-кислород (CNO)**, в котором синтез катализируется ядрами C, N и O. CNO цикл производит лишь 1% всей солнечной энергии и является второстепенным для Солнца. Однако для более массивных и горячих звезд этот цикл является определяющим, так уже для звезд с массой 1.5 Солнца, он отвечает за половину всей вырабатываемой энергии. CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей астрофизики, был предсказан теоретически и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения.

Активность ^{210}Bi по активности ^{210}Po



Регистрация CNO-нейтрино

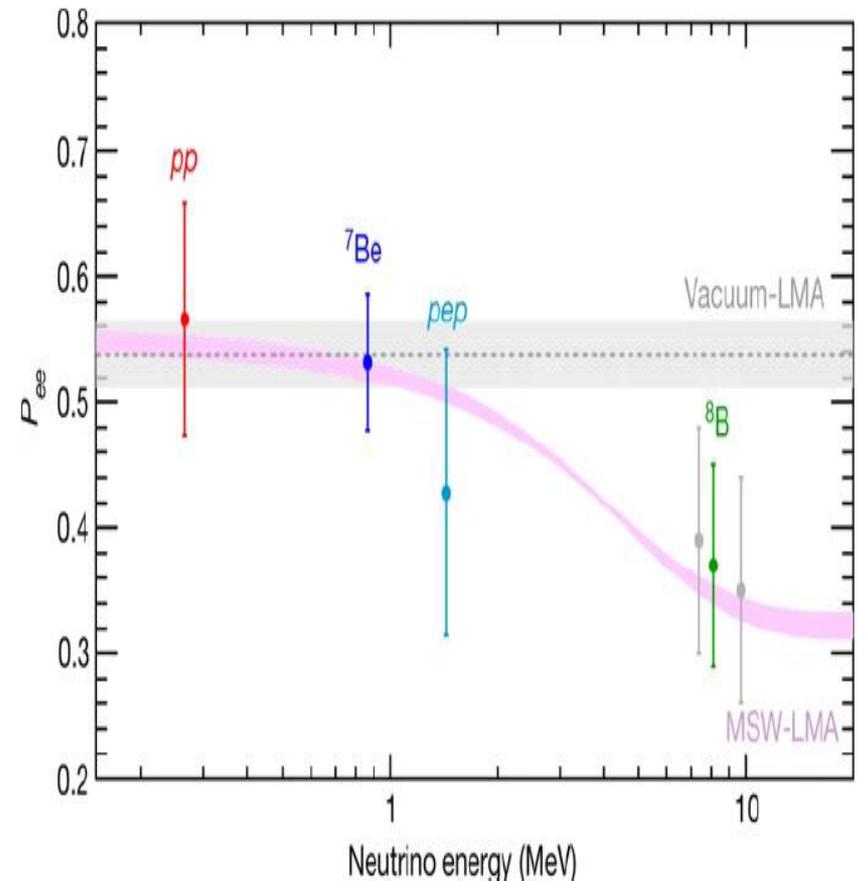


Число событий CNO-нейтрино и фона в ROI. Слева: CNO минимально, а фон - максимальный; справа: CNO - максимум, а фон - минимум. Видно, что вклад CNO не может быть 0. Справа: правдоподобия скорости CNO-нейтрино с учетом статистики и систематики. Гистограмма красного цвета показывает скорость CNO-нейтрино, полученную в результате анализа счета. Синие, фиолетовые и серые вертикальные полосы показывают 68% у.д. для SSM-LZ ($3,52 \pm 0,52$ cpd/ 100 t) и SSM-HZ ($4,92 \pm 0,78$ cpd/100 t) и результат Borexino, соответственно.

Важность CNO-нейтрино

FLUX	B16-GS98	B16-AGSs09met	DIFF. (HZ-LZ)/HZ
pp ($10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.98(1 ± 0.006)	6.03(1 ± 0.005)	-0.8%
pep ($10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.44(1 ± 0.01)	1.46(1 ± 0.009)	-1.4%
${}^7\text{Be}$ ($10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	4.94(1 ± 0.06)	4.50(1 ± 0.06)	8.9%
${}^8\text{B}$ ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.46(1 ± 0.12)	4.50(1 ± 0.12)	17.6%
${}^{13}\text{N}$ ($10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2.78(1 ± 0.15)	2.04(1 ± 0.14)	26.6%
${}^{15}\text{O}$ ($10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2.05(1 ± 0.17)	1.44(1 ± 0.16)	29.7%
${}^{17}\text{F}$ ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.29(1 ± 0.20)	3.26(1 ± 0.18)	38.3%

N. Vinyoles et al., Astrophys. J. 836 (2017) 202



Помимо астрофизики, изучение CNO цикла важно для физики нейтрино и Солнца, поскольку потоки CNO нейтрино наиболее сильно зависят от металличности Солнца, энергия нейтрино лежит в переходной области между вакуумными осцилляциями и осцилляциями в веществе.

Гео-нейтрино

PHYSICAL REVIEW D 101, 012009 (2020)

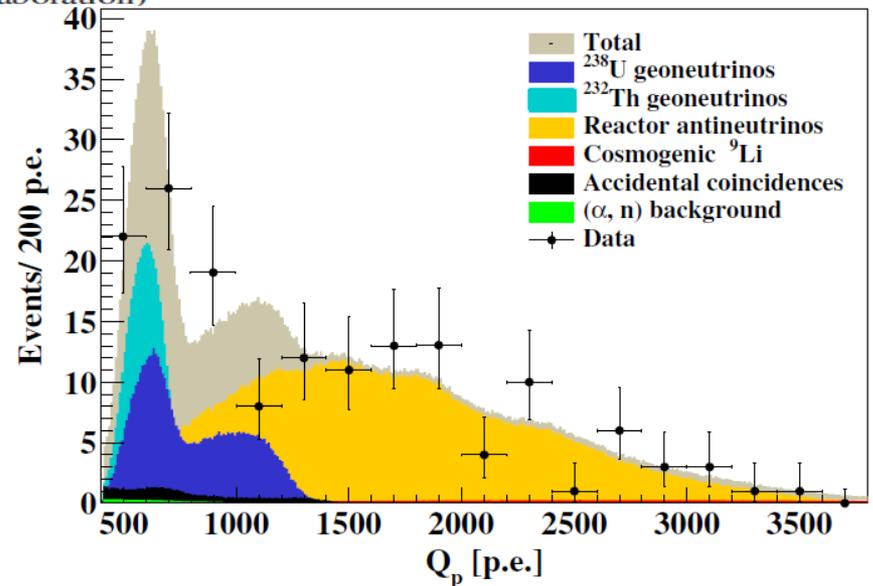
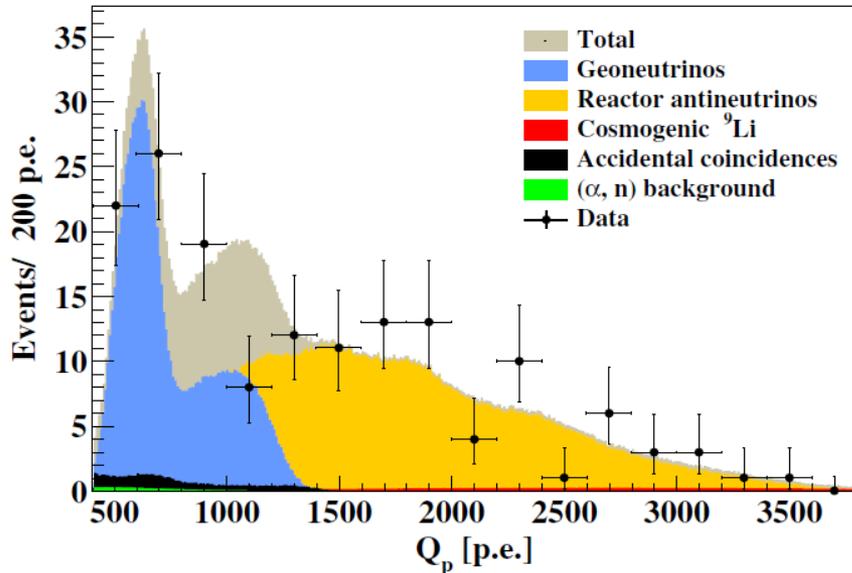
Editors' Suggestion

Featured in Physics

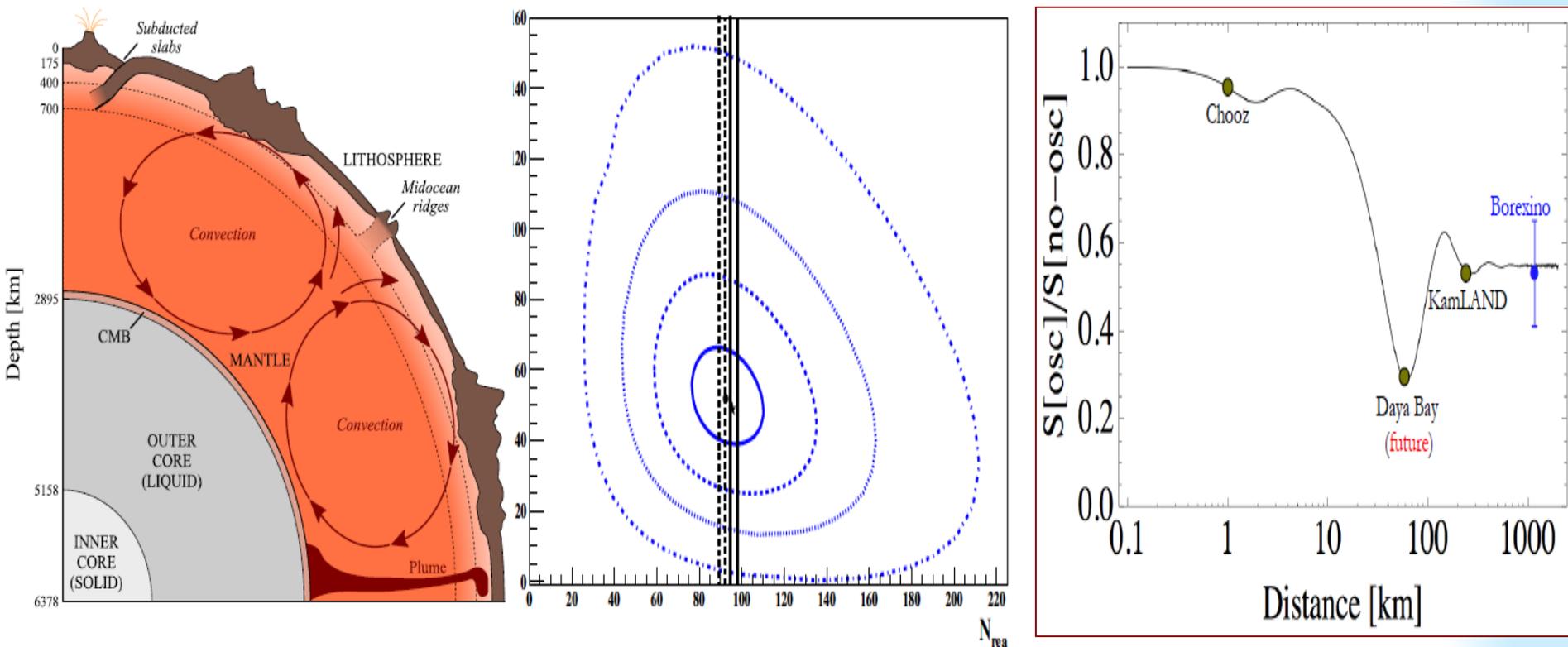
Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino

M. Agostini,¹⁶ K. Altenmüller,¹⁶ S. Appel,¹⁶ V. Atroshchenko,⁶ Z. Bagdasarian,²² D. Basilio,⁹ G. Bellini,⁹ J. Benziger,¹³ D. Bick,²⁶ G. Bonfimi,⁸ D. Bravo,^{9,c} B. Caccianiga,⁹ F. Calaprice,¹² A. Caminata,³ L. Cappelli,⁸ P. Cavalcante,^{15,e} F. Cavanna,³ A. Chepurinov,¹⁷ K. Choi,²¹ D. D'Angelo,⁹ S. Davini,³ A. Derbin,¹¹ A. Di Giacinto,⁸ V. Di Marcello,⁸ X. F. Ding,^{18,8,12} A. Di Ludovico,¹² L. Di Noto,³ I. Drachnev,¹¹ G. Fiorentini,^{28,29} A. Formozov,^{2,9,17} D. Franco,¹ F. Gabriele,⁸ C. Galbiati,¹² M. Gschwendner,²⁴ C. Ghiano,⁸ M. Giammarchi,⁹ A. Goretti,^{12,e} M. Gromov,^{17,2} D. Guffanti,^{18,8,f} C. Hagner,²⁶ E. Hungerford,²⁵ Aldo Ianni,⁸ Andrea Ianni,¹² A. Jany,⁴ D. Jeschke,¹⁶ S. Kumaran,^{22,23} V. Kobychev,⁵ G. Korga,^{25,g} T. Lachenmaier,²⁴ T. Lasserre,²⁷ M. Laubenstein,⁸ E. Litvinovich,^{6,7} P. Lombardi,⁹ I. Lomskaya,¹¹ L. Ludhova,^{22,23} G. Lukyanchenko,⁶ L. Lukyanchenko,⁶ I. Machulin,^{6,7} F. Mantovani,^{28,29} G. Manuzio,³ S. Marcocci,^{18,†,d} J. Maricic,²¹ J. Martyn,^{20,f} E. Meroni,⁹ M. Meyer,¹⁹ L. Miramonti,⁹ M. Misiaszek,⁴ M. Montuschi,^{28,29} V. Muratova,¹¹ B. Neumair,¹⁶ M. Nieslony,^{20,f} L. Oberauer,¹⁶ A. Onillon,²⁷ V. Orekhov,^{20,f} F. Ortica,¹⁰ M. Pallavicini,³ L. Papp,¹⁶ Ö. Penek,^{22,23} L. Pietrofaccia,¹² N. Pilipenko,¹¹ A. Pocar,¹⁴ G. Raikov,⁶ M. T. Ranalli,⁸ G. Ranucci,⁹ A. Razeto,⁸ A. Re,⁹ M. Redchuk,^{22,23} B. Ricci,^{28,29} A. Romani,¹⁰ N. Rossi,^{8,a} S. Rottenanger,²⁴ S. Schönert,¹⁶ D. Semenov,¹¹ M. Skorokhvatov,^{6,7} O. Smimov,² A. Sotnikov,² V. Strati,^{28,29} Y. Suvorov,^{8,6,b} R. Tartaglia,⁸ G. Testera,³ J. Thum,¹⁹ E. Unzhakov,¹¹ A. Vishneva,² M. Vivier,²⁷ R. B. Vogelaar,¹⁵ F. von Feilitzsch,¹⁶ M. Wojcik,⁴ M. Wurm,^{20,f} O. Zaimidoroga,^{2,†} S. Zavatarelli,³ K. Zuber,¹⁹ and G. Zuzel⁴

(Borexino Collaboration)*



154 события ОБР от антинейтрино

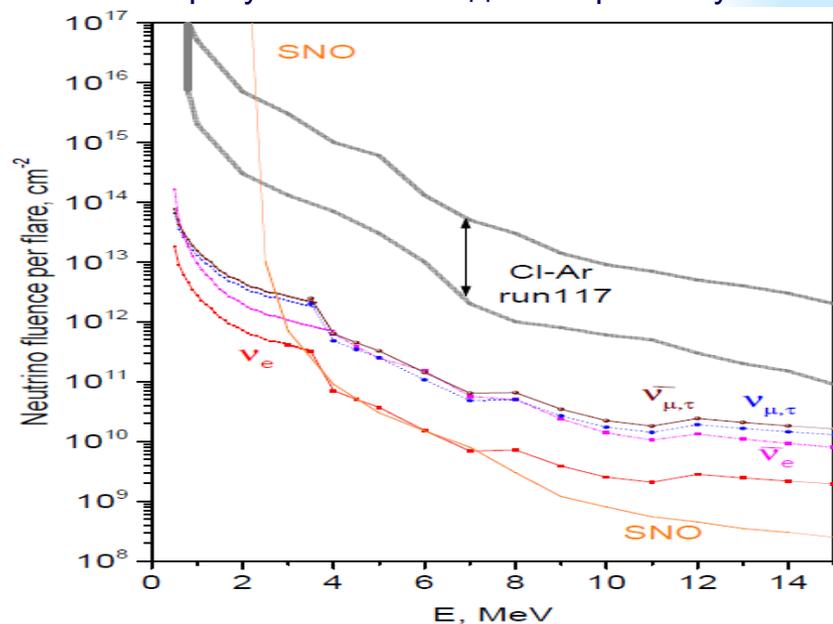
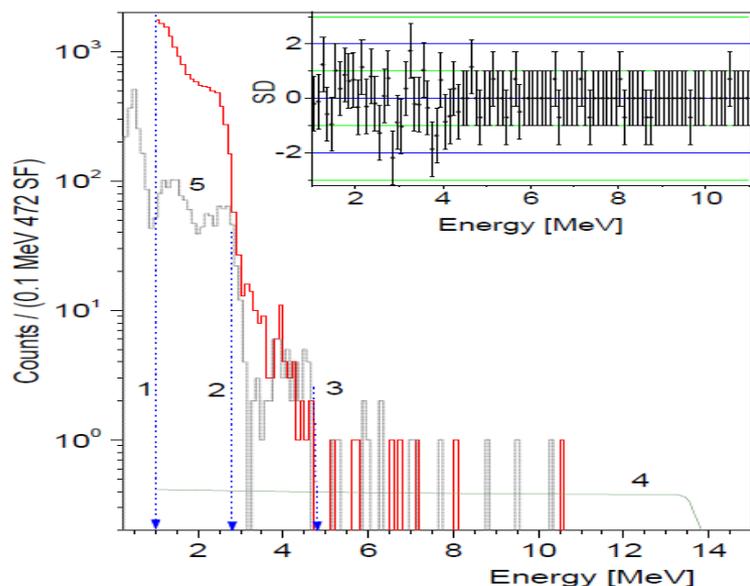


3263 суток между 2007 и 2019 г. с общей экспозицией $(1.29 \pm 0.05) \times 10^{32}$ протонов/год, вдвое больше анализа Borexino 2015 г. Зарегистрировано $52.6^{+9.4}_{-8.6}(\text{stat})^{+2.7}_{-2.1}(\text{cist})$ геонейтрино от ^{238}U и ^{232}Th , что соответствует $47.0^{+8.4}_{-7.7}(\text{stat})^{+2.4}_{-1.9}(\text{cist})$ TNU с общей точностью $(+18.3_{-17.2})\%$. Результат получен для отношения масс Th/U в хондритовых метеоритах и согласуется когда вклады ^{238}U и ^{232}Th были свободными параметрами. Отсутствие сигнала из мантии исключается на уровне 99,0%. Предполагая 18% вклад 40K общее радиогенное тепло Земли $38.2^{+13.6}_{-12.7}$ TWm. Значение совместимо с геологическими прогнозами, однако $\sim 2,4\sigma$ с моделями с низким U и Th в мантии. Мощность геореактора в центре Земли $< 2,4$ TWm (95% C.L.).

Поиск временных корреляций сигналов детектора Borexino с солнечными вспышками

Солнечные вспышки (СВ) — взрывной процесс выделения энергии, связанный с перестройкой магнитного поля, которая вызывает ускорение заряженных частиц. Энерговыведение мощной СВ достигает 15% энергии, выделяемой Солнцем за секунду. Возможность излучения нейтрино в СВ поддерживалась положительными результатами **Cl-Ar** эксперимента, в частности, избыток событий в серии **117**, в течении которой наблюдалась СВ класса **12X**.

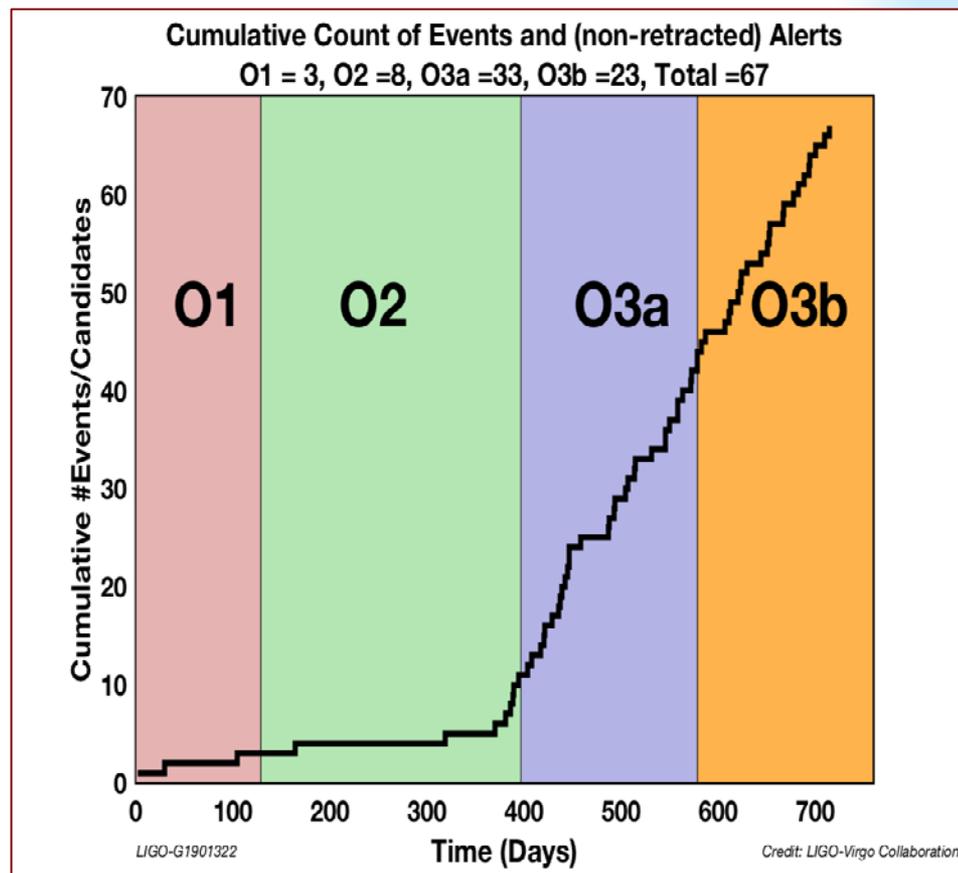
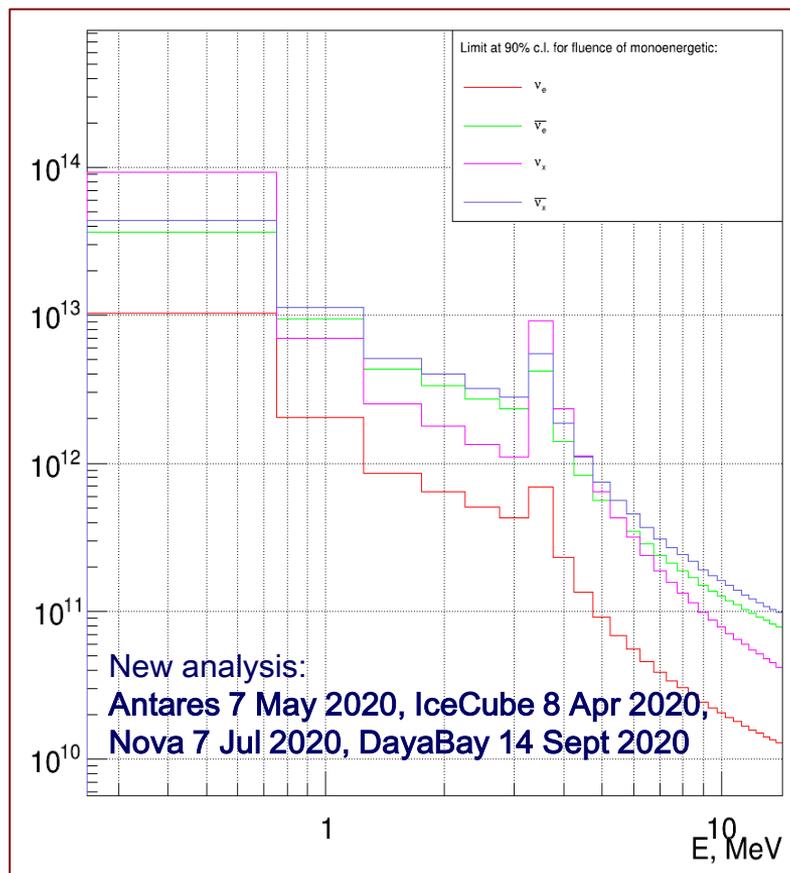
Сотрудники ОПЯД ОНИ ПИЯФ и НИЦ КИ провели анализ сигналов детектора Borexino с энергией более **0.25 (1.0) МэВ** в течении 472-х СВ класса М и X, случившихся в период 2009-2017 г.г. Установлены **наиболее строгие** ограничения на флюенсы нейтрино и антинейтрино с энергией **(0.5-5.0) МэВ** всех флейвов (ν_e, ν_μ, ν_τ), связанные с СВ. Исключено нейтринное объяснение положительного результата **Cl-Ar** детектора. Результаты опубликованы в **Astroparticle Physics, v. 125, 2021, 102509**



Спектры одиночных событий Борексино в корреляции с солнечными вспышками, измеренные системой **FADC** в диапазоне **1–15 МэВ** (красный) и системой **DAQ** в диапазоне **0,25–15 МэВ** (серый) для центрального объема 145 т.

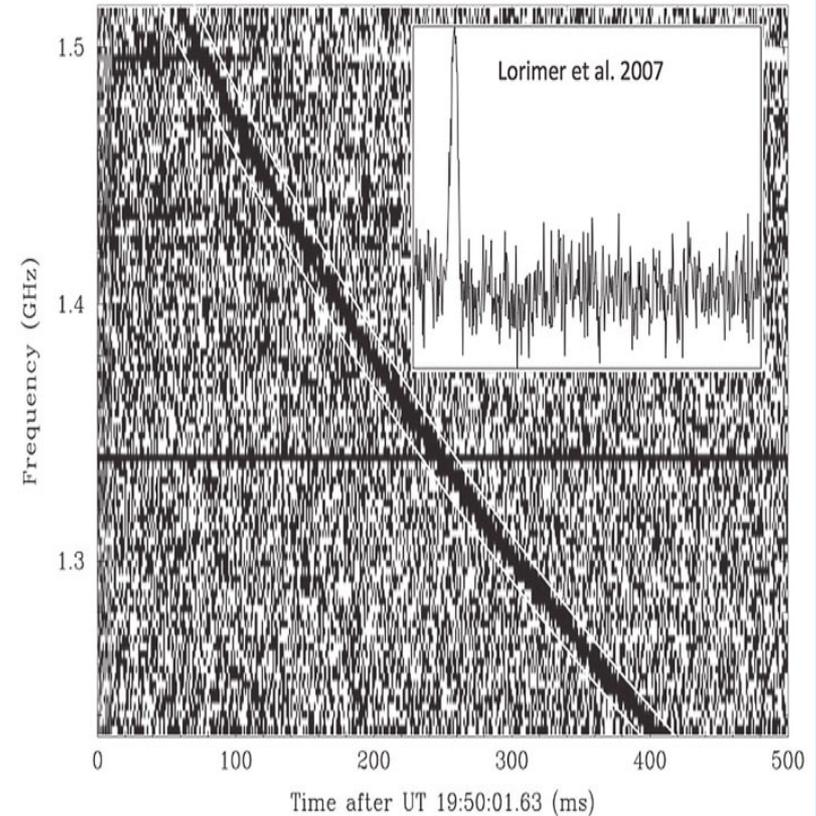
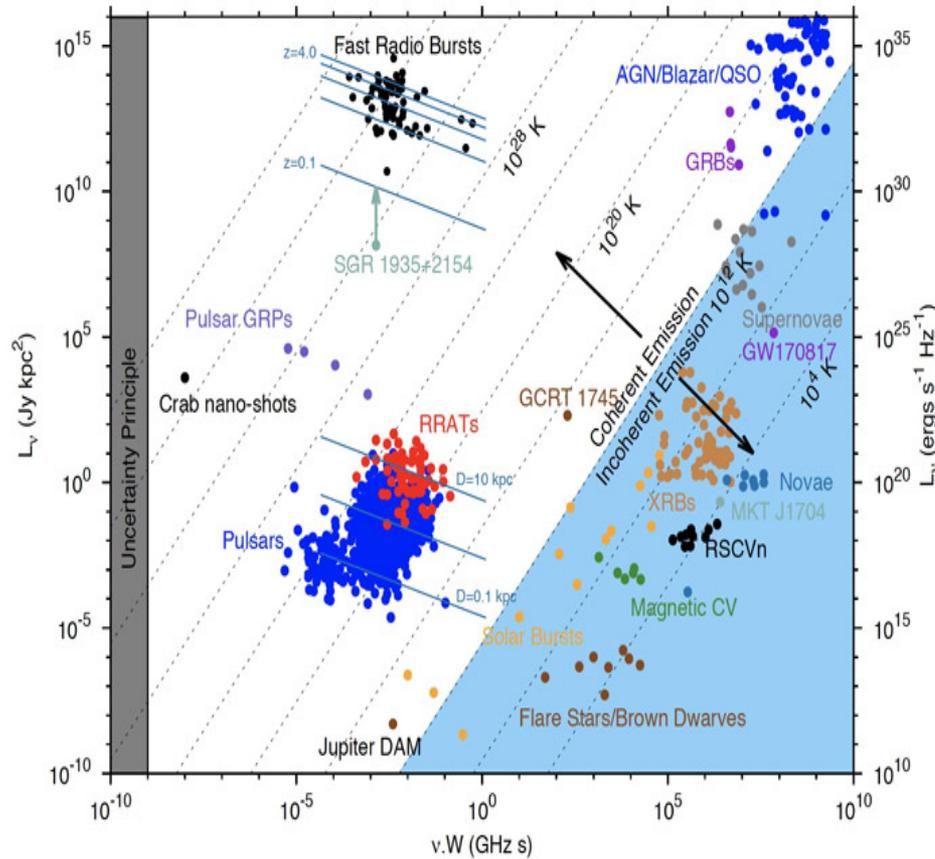
Верхний предел на флюенс **нейтрино и антинейтрино** различных флейвов (ν_e, ν_μ, ν_τ), в сравнении с ограничениями **SNO** и область значений для положительного результата **Cl-Ar** детектора.

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



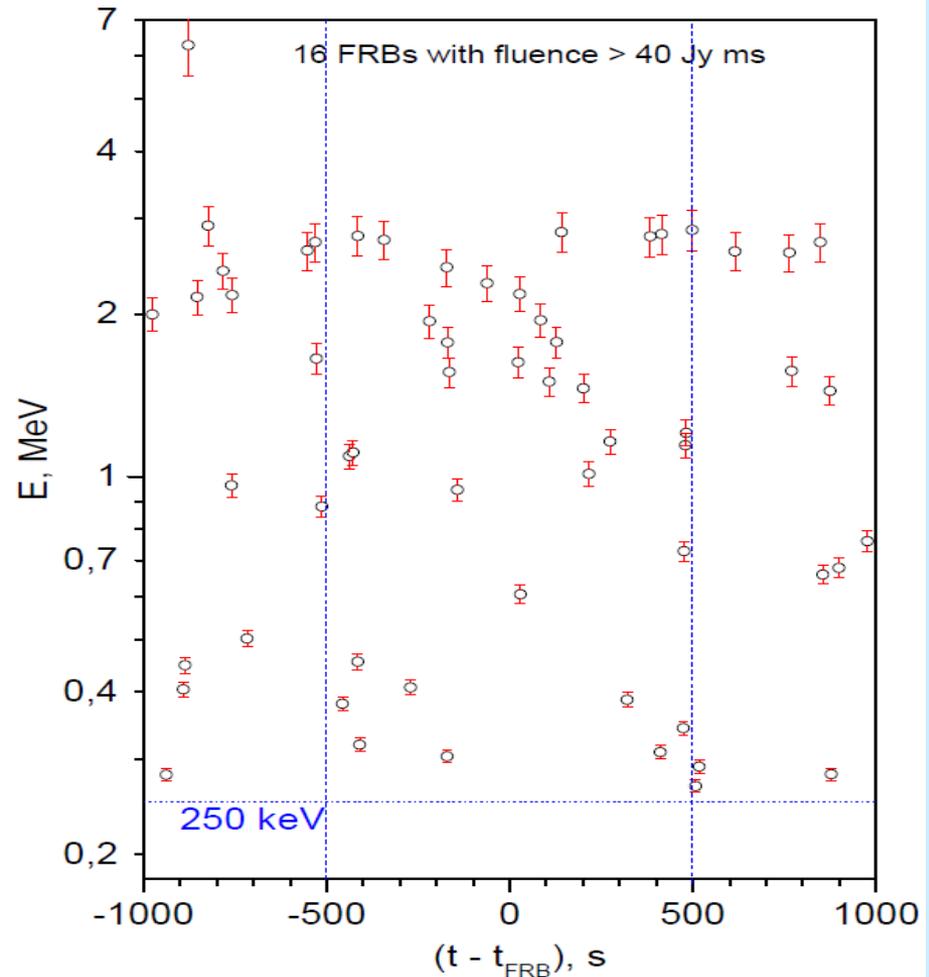
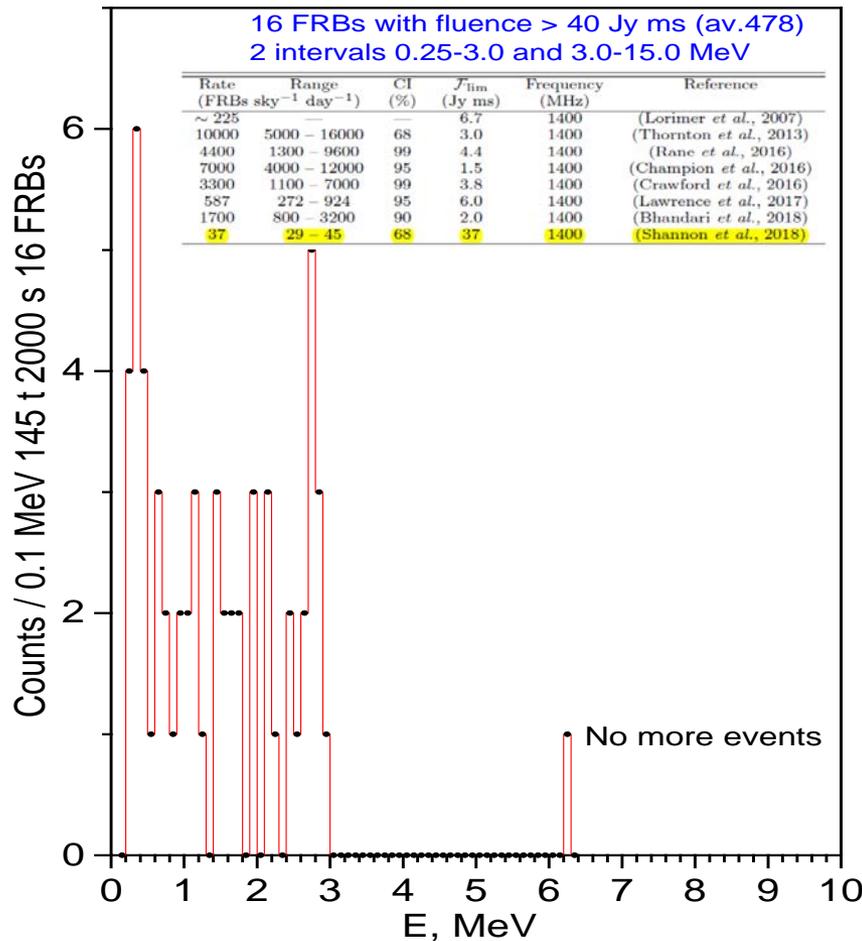
LIGO observed 56 candidates during O3. O1 and O2 yielded 11 GW events. We analyzed 50 GW events, we did not find any excess. The limits normalized to one GW have improved by about a square root of number of GWs. We applied a new method for estimating limits the fluence using the weighing that is proportional to the missing mass and inversely proportional to the square of the distance. We also plan to do a separate analysis for the merger of two black holes, two neutron stars and a black hole and a neutron star. Unfortunately, LIGO data acquisition has been stopped since March 26, 2020.

Быстрые радиовсплески



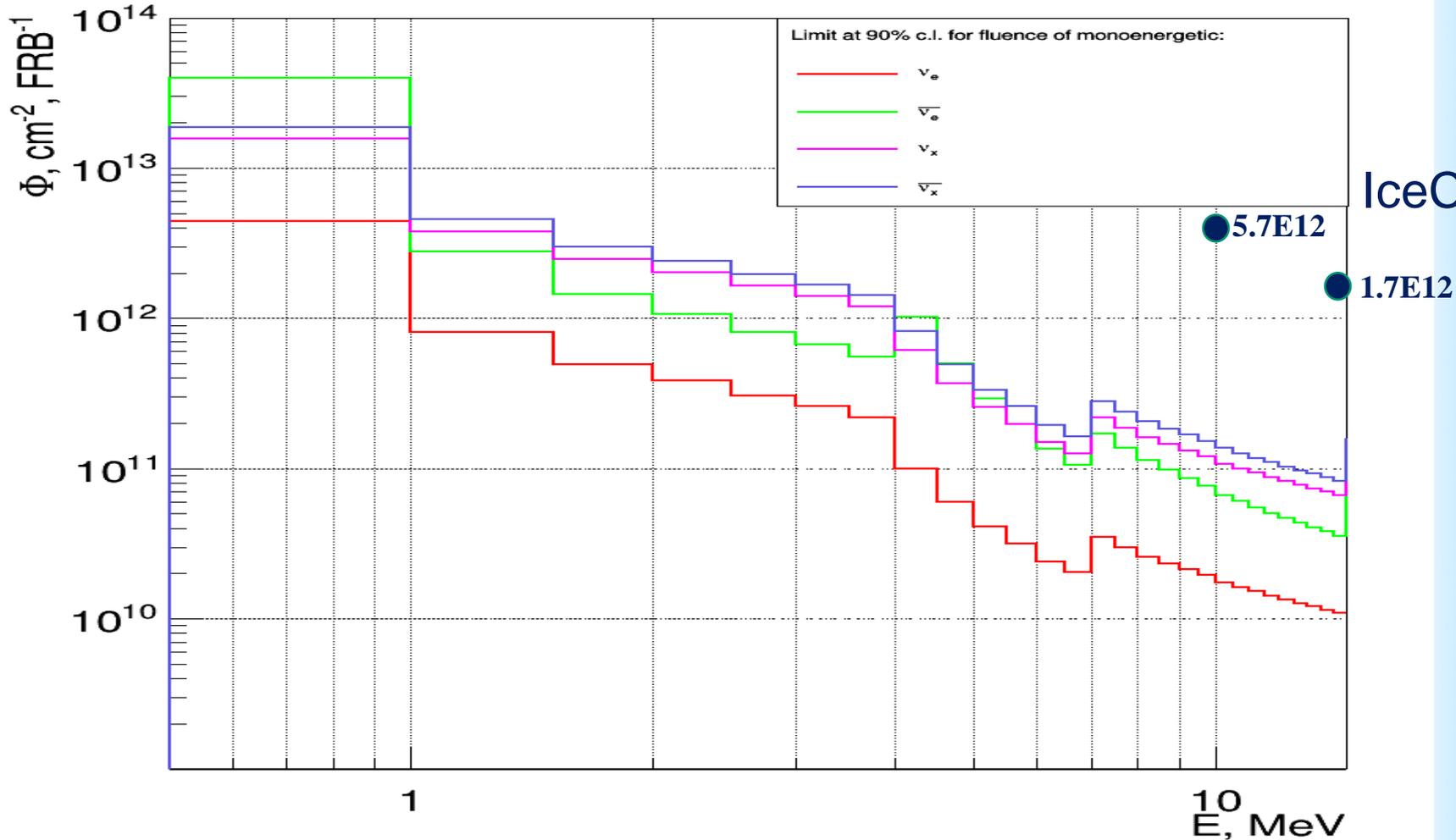
FRB - единичные радиоимпульсы длительностью несколько миллисекунд с очень высокой интенсивностью излучения. Впервые быстрый радиовсплеск был обнаружен в феврале 2007 года. Дисперсия сигнала указывает на внегалактическое происхождение БРП. Существует около 20 моделей БРП, включая конверсию аксионных звезд в магнитном поле. Предпочтение отдается магнетарам. Оцениваемая частота $10^3 - 10^4$ соб /сутки на все небо.

16 FRBs, analysis for 0.25-3.0 and 3.0-15 MeV intervals



Mean fluence for 16 FRBs is 500 Jy ms / 2000 s. Mean fluence for expected (max value) 10^4 FRBs/day with $F > 3$ Jy ms is 700 Jy ms / 2000 s. IF neutrino fluence is proportional FRBs fluence then signal to noise ratio is 5 / 7 that can be verified.

Limits on *mono-E* ν fluence from 16 FRBs with $F_{FRB} > 40 \text{ Jy ms}$



Two intervals of measured spectra (0.25-3.0) MeV and (3.0-15.0) MeV were used for analysis which was performed as in GRBs and SFs papers.

Нестандартные взаимодействия нейтрино

Рассеяние нейтрино на электроны в СМ описывается:

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = -2\sqrt{2}G_F(\bar{\nu}_\alpha\gamma^\mu P_L\nu_\alpha)[g_R(\bar{e}\gamma_\mu P_R e) + g_L(\bar{e}\gamma_\mu P_L e)]$$

Дополнительное взаимодействие, зависящее от флэйва: Z.Berezhiani, R. S. Raghavan, A. Rossi NP B638 (2002) 62

$$\mathcal{L}_{\text{NS}} = -2\sqrt{2}G_F(\bar{\nu}_\alpha\gamma^\mu P_L\nu_\alpha)[\varepsilon_{\alpha R}(\bar{e}\gamma_\mu P_R e) + \varepsilon_{\alpha L}(\bar{e}\gamma_\mu P_L e)] :$$

$$g_R \rightarrow \tilde{g}_{\alpha R} = g_R + \varepsilon_{\alpha R}, \quad g_L \rightarrow \tilde{g}_{\alpha L} = g_L + \varepsilon_{\alpha L}$$

Диагональные члены приводят к изменению спектра e в (ν, e) рассеянии

Более общий случай с изменением флэйва:

$$\mathcal{L}_{\text{NSI}} = -2\sqrt{2}G_F \varepsilon_{\alpha\beta}^{ff'C} (\bar{\nu}_\alpha\gamma^\mu P_L\nu_\beta) (\bar{f}\gamma_\mu P_C f')$$

$C=L, R, P_C=(1\pm\gamma_5)/2, \alpha, \beta = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, f=e, u, d$

$$\varepsilon_{\alpha L} \equiv \varepsilon_{\alpha\alpha}^{eeL}, \quad \varepsilon_{\alpha R} \equiv \varepsilon_{\alpha\alpha}^{eeR}, \quad \alpha = e \text{ or } \tau$$

A. Friedland, C. Lunardini, C. Pena-Garay arXiv/0402266v3
S.K. Agarwalla, F. Lombardi, T. Takeuchi arXiv:1207.3492v2
M.C.Gonzalez-Garcia, M.Maltoni arXiv:1307.3092v1

Нестандартные взаимодействия нейтрино



PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: May 11, 2019

REVISED: December 19, 2019

ACCEPTED: January 20, 2020

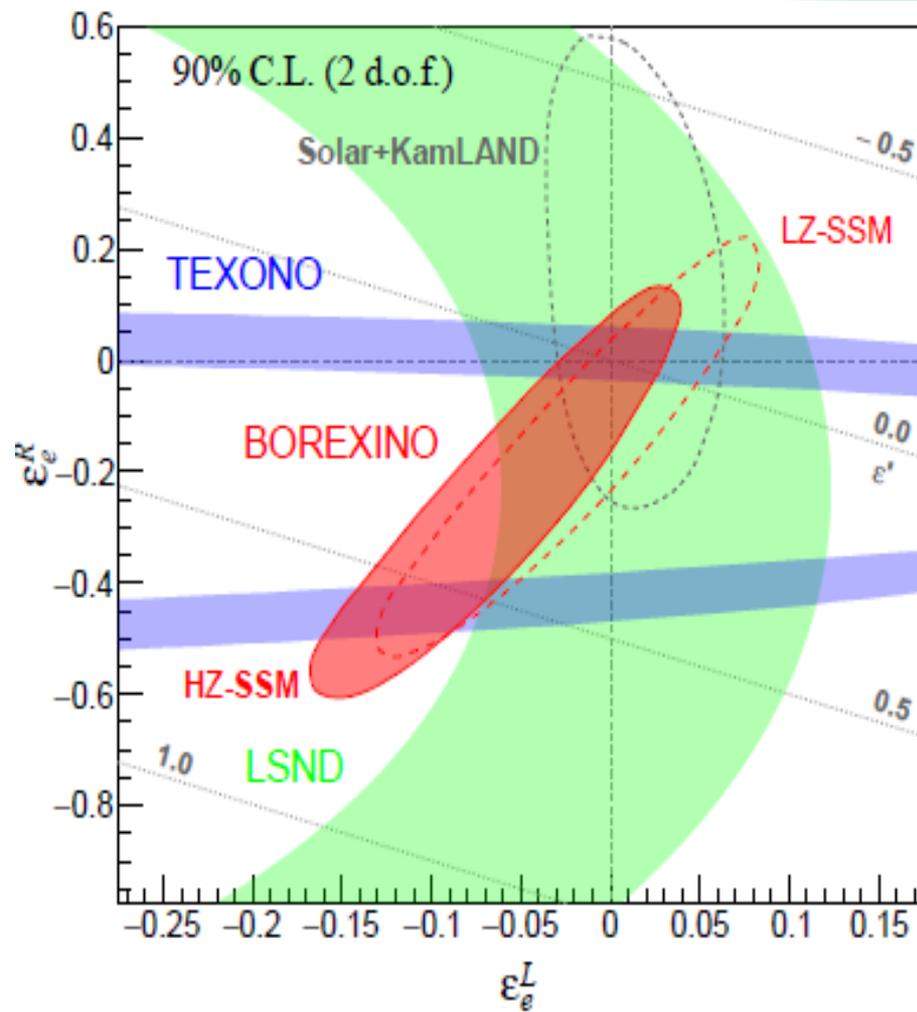
PUBLISHED: February 5, 2020

Constraints on flavor-diagonal non-standard neutrino interactions from Borexino Phase-II



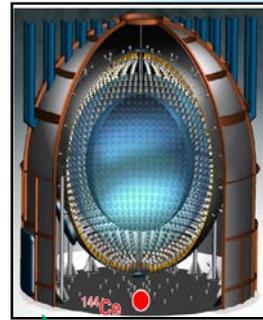
The Borexino collaboration

S.K. Agarwalla,^{1,2,7} M. Agostini,⁴ K. Altenmüller,⁴ S. Appel,⁴ V. Atroshchenko,⁵ Z. Bagdasarian,⁶ D. Basilico,⁷ G. Bellini,⁷ J. Benziger,⁸ D. Bick,⁹ G. Bonfini,¹⁰ D. Bravo,^{7,8} B. Caccianiga,⁷ F. Calaprice,¹¹ A. Caminata,¹² L. Cappelli,¹⁰ P. Cavalcante,^{13,8} F. Cavanna,¹² A. Chepurnov,¹⁴ K. Choi,¹⁵ D. D'Angelo,⁷ S. Davini,¹² **A. Derbin**,¹⁶ A. Di Giacinto,¹⁰ V. Di Marcello,¹⁰ X.F. Ding,^{17,10} A. Di Ludovico,¹¹ L. Di Noto,¹² **I. Drachnev**,¹⁶ K. Fomenko,¹⁸ A. Formozov,^{18,7,14} D. Franco,¹⁹ F. Gabriele,¹⁰ C. Galbiati,¹¹ M. Gschwender,²⁰ C. Ghiano,³⁰ M. Giammarchi,⁷ A. Goretti,^{11,23} M. Gromov,^{14,18} D. Guffanti,²⁶ C. Hagner,⁹ E. Hungerford,²¹ Aldo Ianni,¹⁰ Andrea Ianni,¹¹ A. Jany,²² D. Jeschke,⁴ S. Kumaran,^{6,23} V. Kobychiev,²⁴ G. Korga,^{21,c} T. Lachenmaier,²⁰ M. Laubenstein,¹⁰ E. Litvinovich,^{5,25} P. Lombardi,⁷ L. Ludhova,^{6,23} G. Lukyanchenko,⁵ L. Lukyanchenko,⁵ I. Machulin,^{5,25} G. Manuzio,¹² S. Marocco,^{17,4} J. Maricic,¹⁵ J. Martyn,³⁰ E. Meroni,⁷ M. Meyer,²⁷ L. Miramonti,⁷ M. Misiaszek,²² **V. Muratova**,¹⁶ B. Neumair,⁴ M. Nieslony,²⁶ L. Oberauer,⁴ V. Orekhov,^{5,26} F. Ortica,²⁸ M. Pallavicini,¹² L. Papp,⁴ Ö. Penek,^{6,23} L. Pietrofaccia,¹¹ **N. Pilipenko**,³⁰ A. Pocar,²⁹ G. Raikov,⁵ G. Ranucci,⁷ A. Razeto,¹⁰ A. Re,⁷ M. Redchuk,^{6,23} A. Romani,²⁸ N. Rossi,^{10,8} S. Rottenanger,³⁰ S. Schönert,⁴ **D. Semenov**,³⁰ M. Skorokhvatov,^{5,25} O. Smirnov,¹⁸ A. Sotnikov,¹⁸ C. Sun,^{30,21} Y. Suvorov,^{5,10,7} T. Takeuchi,¹³ R. Tartaglia,¹⁰ G. Testera,¹² J. Thum,²⁷ **E. Unzhakov**,¹⁶ A. Vishneva,¹⁸ R.B. Vogelaar,¹³ F. von Feilitzsch,⁴ M. Wojcik,²² M. Wurm,²⁶ O. Zaimidoroga,¹⁸ S. Zavatarelli,¹² K. Zuber²⁷ and G. Zuzel²²

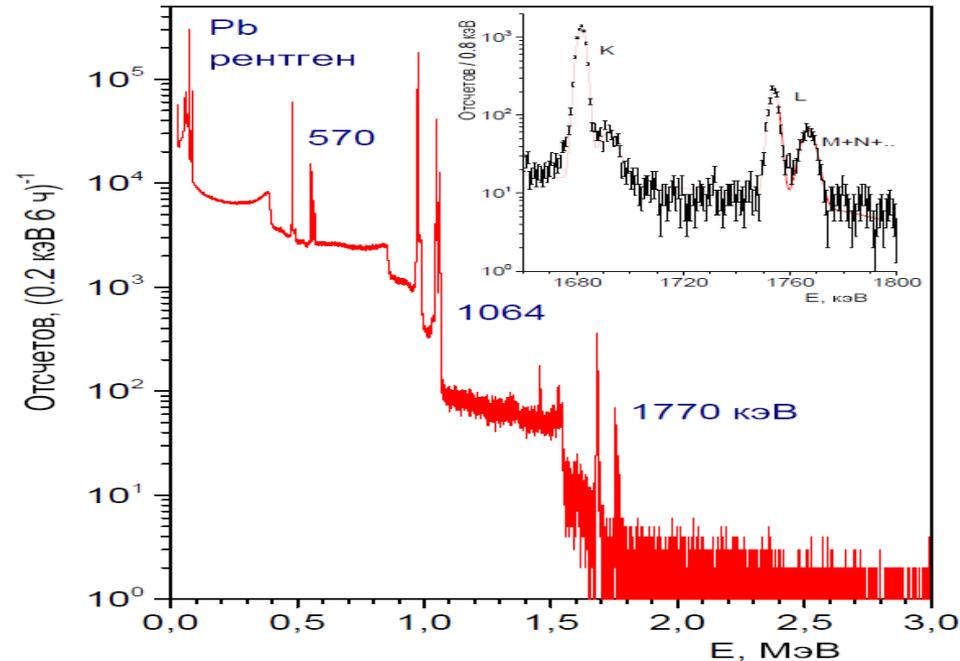


Измерения бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr и ^{210}Bi

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 .

4π бета спектрометр с Si(Li)-детекторами



Создана новая схема регистрации событий, основанная на последовательной записи событий с двух Si(Li)-детекторов и BGO(NaI)-детектора с использованием новой электроники в стандарте VME/VXI (CAEN). Проведены измерения бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr продолжительностью 2 месяца. В схему регистрации включен 3" BGO-детектор с целью выделения распадов ядер ^{144}Ce - ^{144}Pr на возбужденные уровни дочерних ядер.

4π бета спектрометр с Si(Li)-детекторами

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2021, № 4, с. 1–6

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

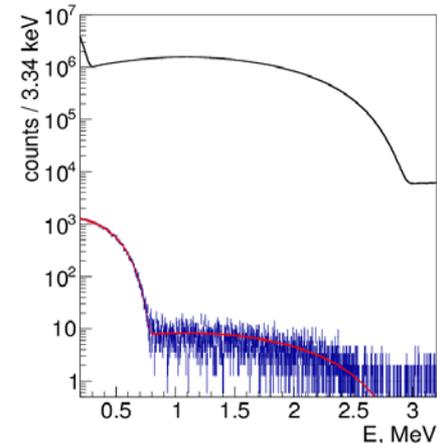
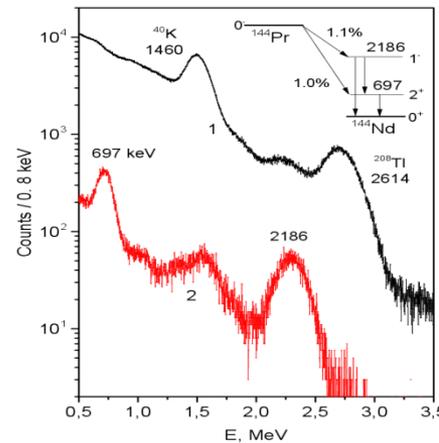
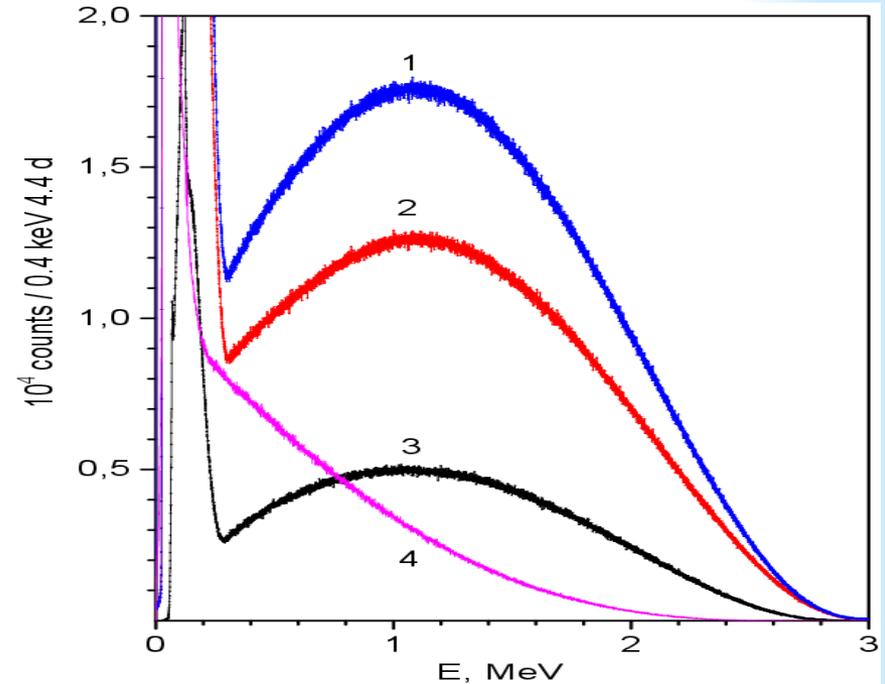
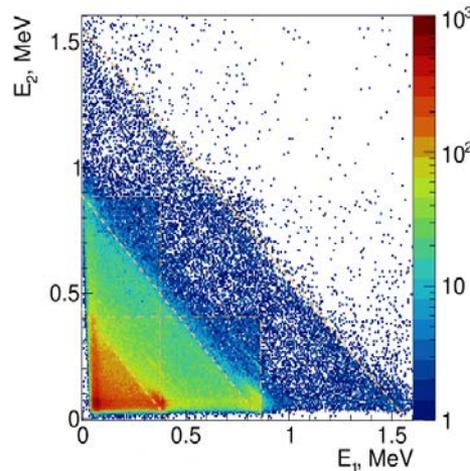
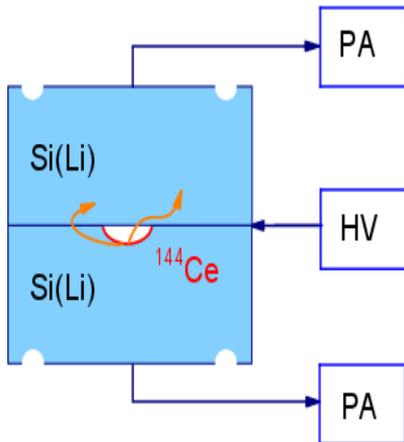
УДК 539.1.074

КРЕМНИЕВЫЙ 4π-СПЕКТРОМЕТР ЭЛЕКТРОНОВ β-РАСПАДА С ЭНЕРГИЕЙ ДО 3 МэВ

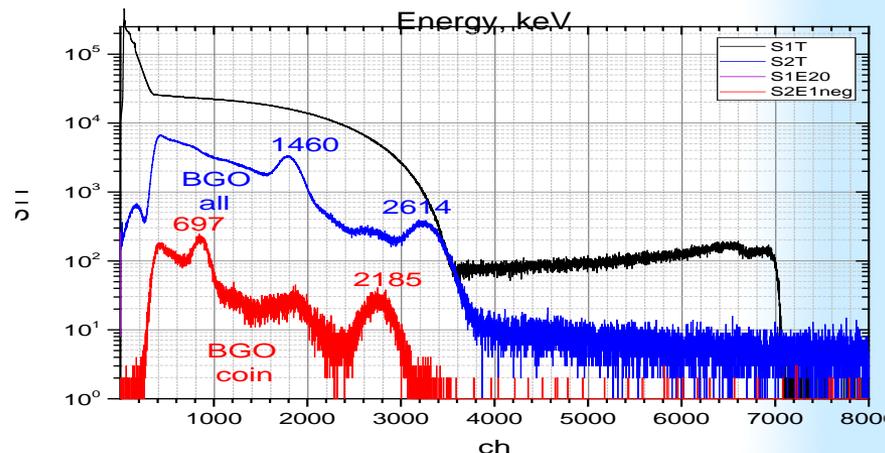
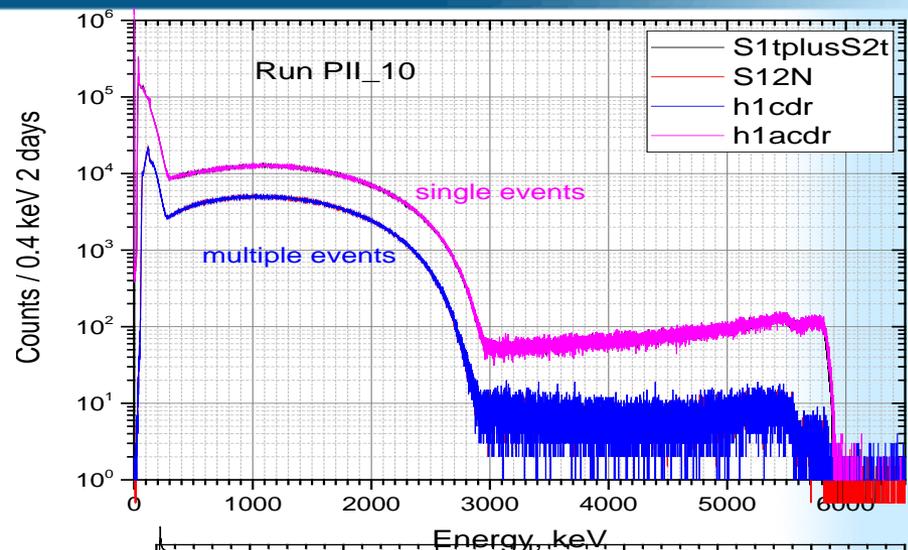
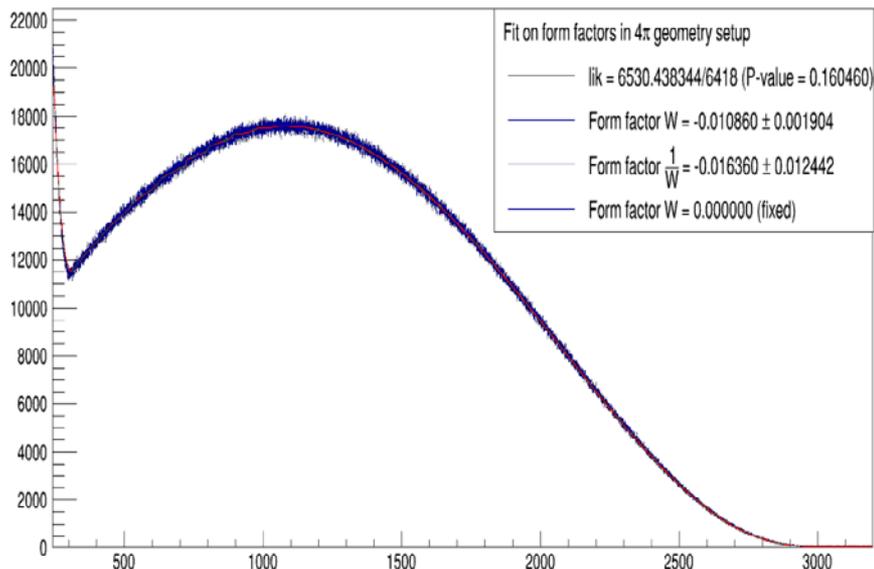
© 2021 г. И. Е. Алексеев^b, С. В. Бахланов^a, А. В. Дербин^{a,*}, И. С. Драчнев^a,
И. М. Котина^a, В. Н. Муратова^a, Н. В. Ниязова^a, Д. А. Семенов^a,
М. В. Трушин^a, Е. В. Унжаков^a, Е. А. Чмель^a

^a Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща

^b Радиовый институт им. В.Г. Хлопина
Россия, 194021, Санкт-Петербург, 2-ой Муриноский просп., 28

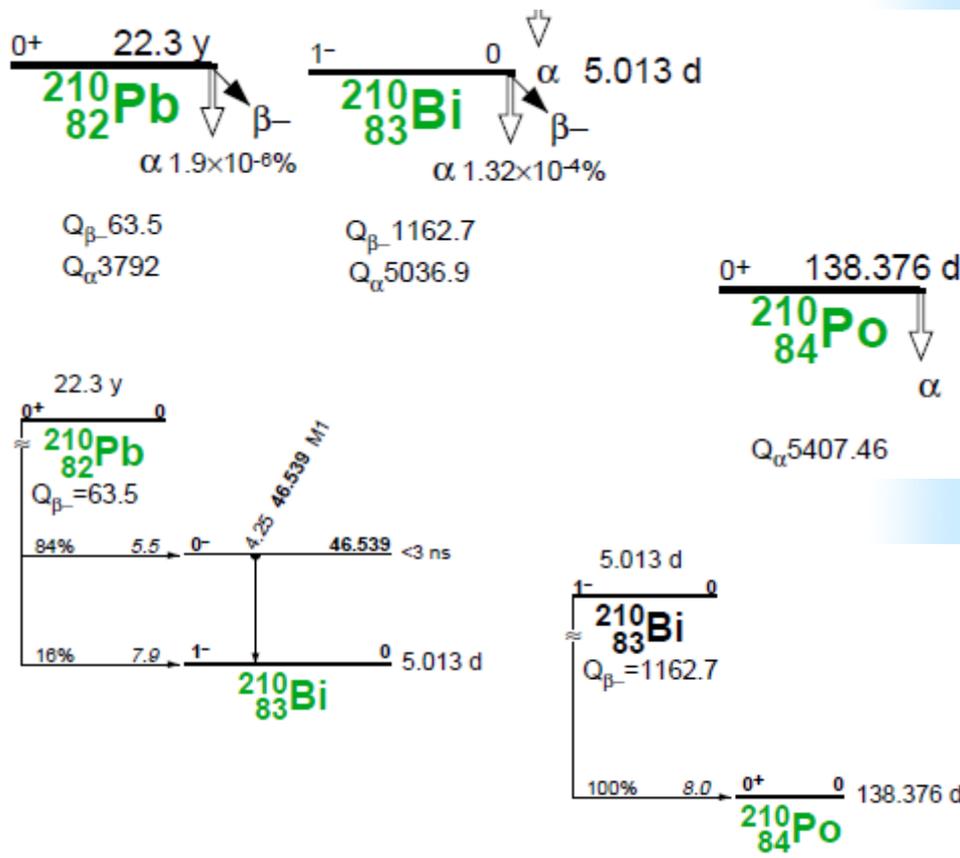
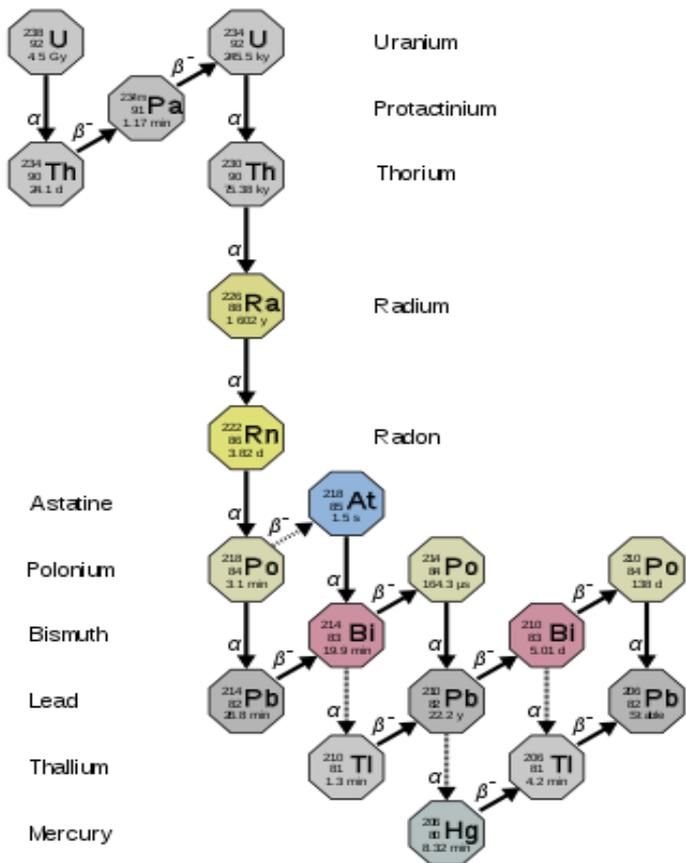


Результаты с 4π β-спектрометра + BGO



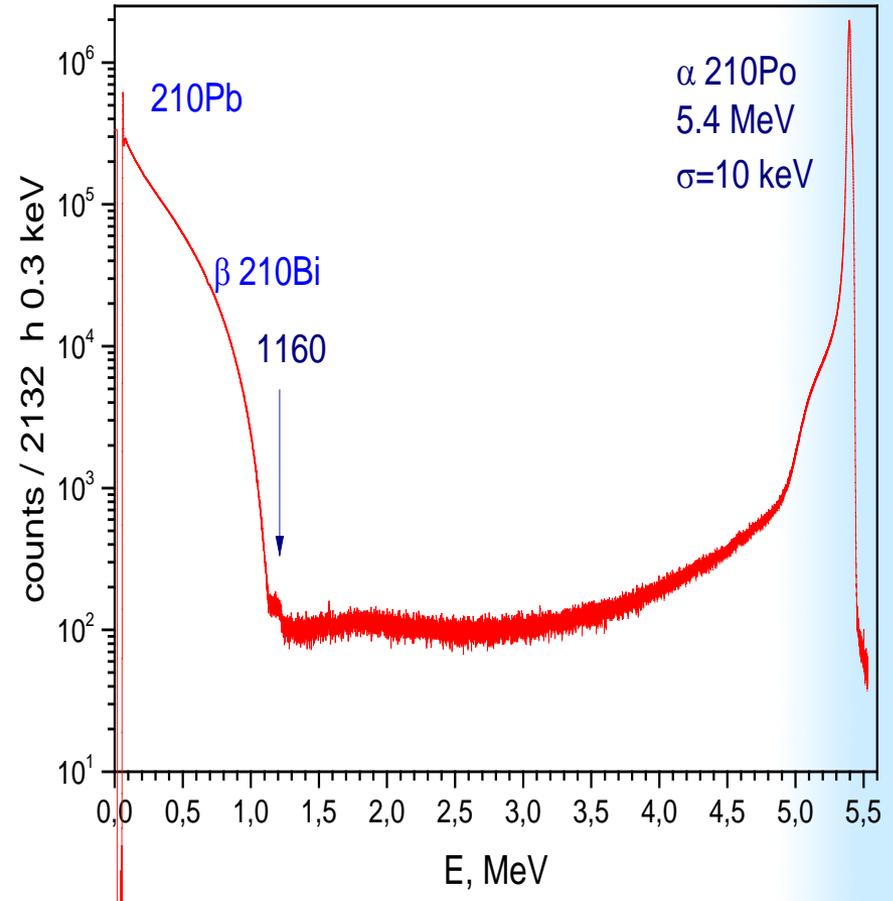
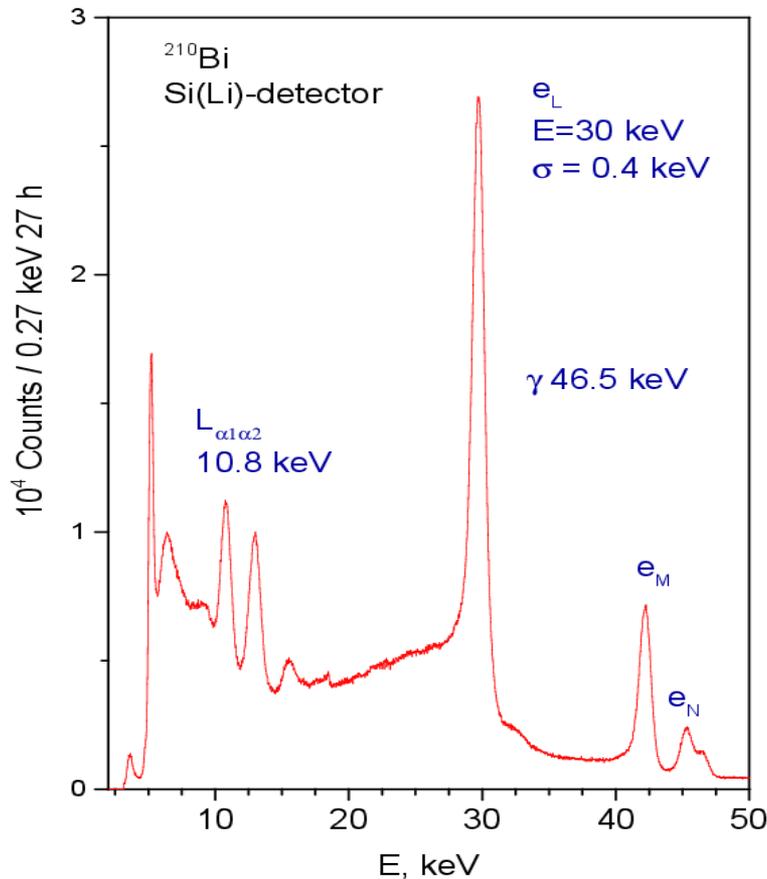
4-π спектрометр с функцией отклика близкой к Гауссовой практически решает проблему нейтринного спектра для $E_e > 320 \text{ keV}$, $E_\nu = 3 \text{ MeV} - E_e$. Конечно, 1% BRs для переходов на возбужденные состояния должны быть учтены. Для определения ниже 320 keV необходимо вычислить поправки и определить формфакторы для ^{144}Pr и ^{144}Ce .

Измерение β -спектра ^{210}Bi – важно для $\text{CNO-}\nu$



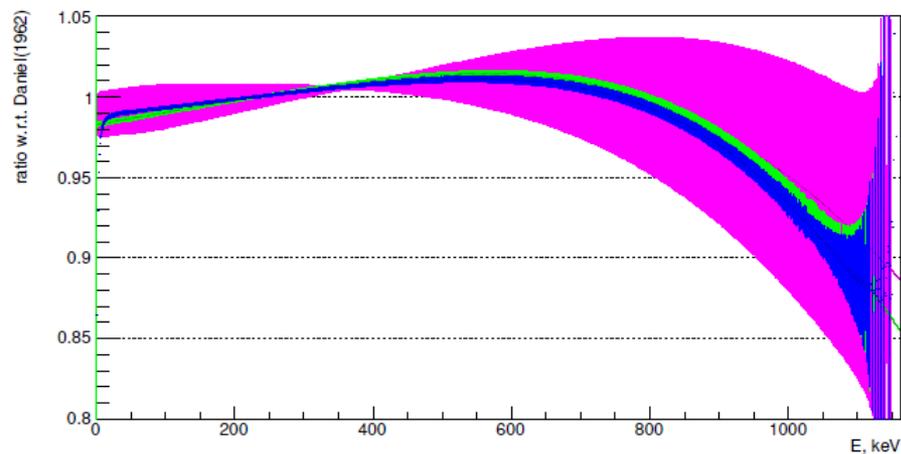
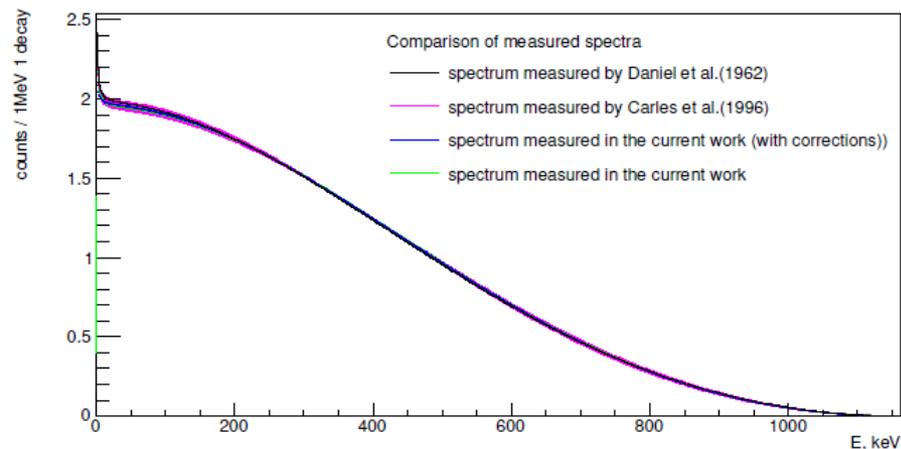
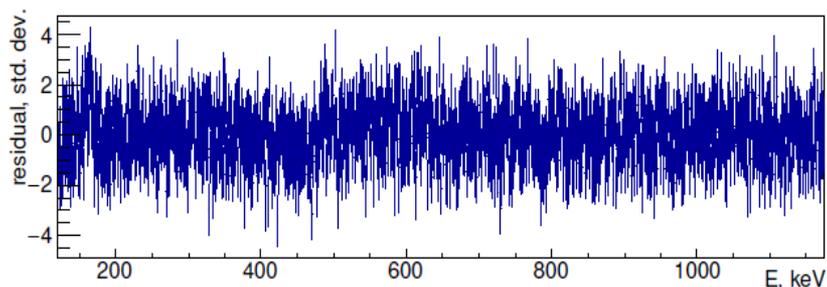
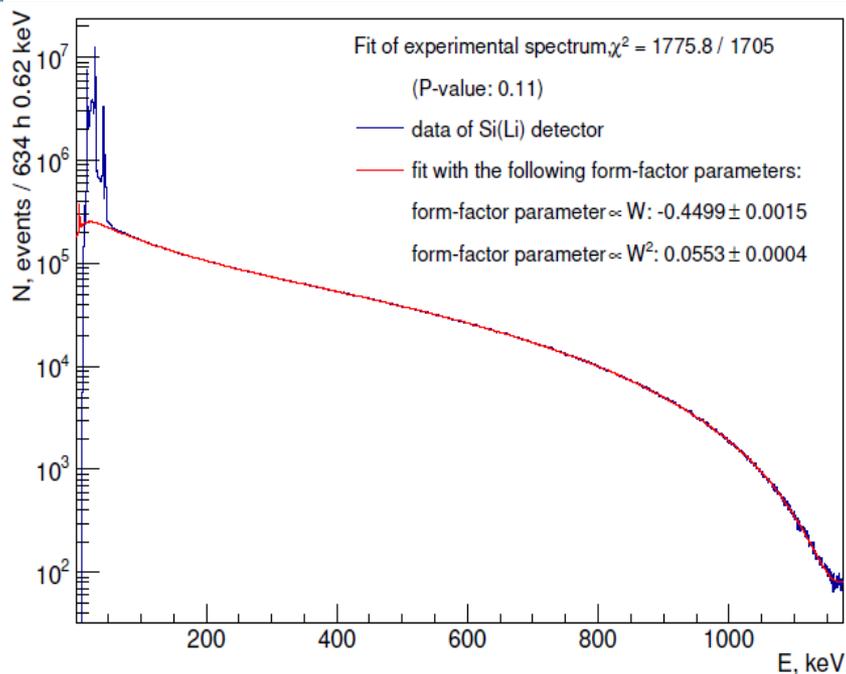
Бета спектр ^{210}Bi присутствует в фоновых спектрах практически всех низкофоновых установок, предназначенных для регистрации нейтрино, частиц темной материи, двойного бета-распада и др. Может быть отделен от ^{238}U через газообразный ^{222}Rn , распады которого ведут к накоплению ^{210}Pb . Детектор *Vorexino* позволяет надежно выделить альфа частицы, таким образом определить скорость счета фонового ^{210}Bi в области сигнала от CNO-нейтрино .

Измерение α -, β -, и γ - спектров ^{210}Pb , ^{210}Bi и ^{210}Po



Измерение α -, β -, и γ - спектров ^{210}Pb , ^{210}Bi и ^{210}Po в схеме «мишень-детектор». Разрешение для конверсионных электронов с энергией 30 кэВ составило $\sigma = 0.4\text{ кэВ}$. Для α -частиц с энергией 5.41 МэВ составило $\sigma = 10\text{ кэВ}$

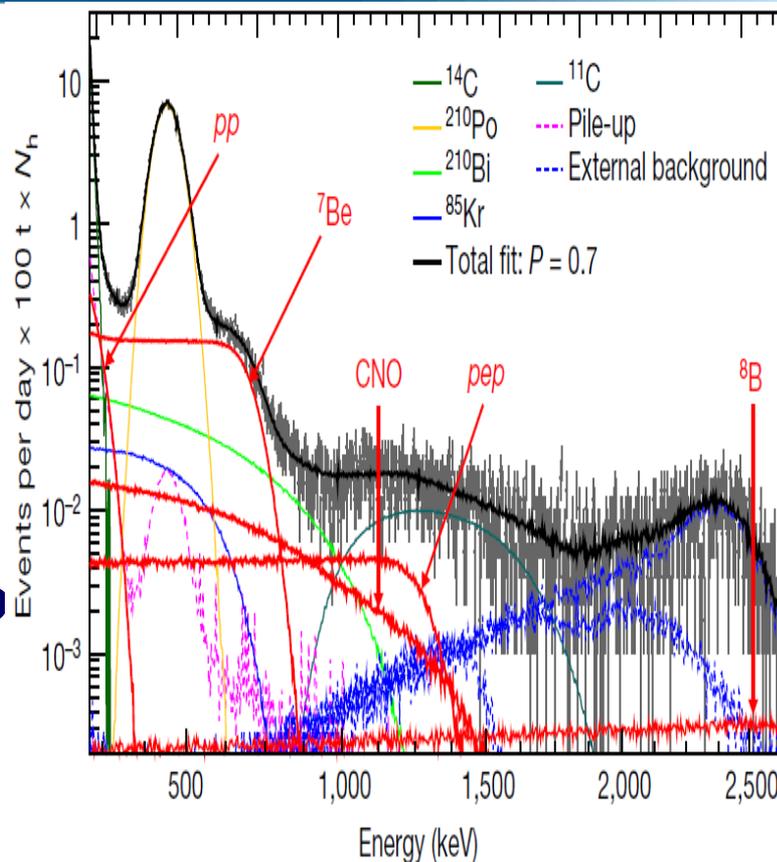
Подгонка бета спектра ^{210}Bi (Phys.Rev. C)



Исследуемый спектр это запрещенный переход первого порядка. Определены параметры формфактора для бета спектра ^{210}Bi с рекордной точностью лучше 1%. Следующая задача измерить спектр с помощью 4π-детектора.

Планы коллаборации Борексино и новые задачи

1. Увеличение статистики **CNO – нейтрино (^{210}Bi , ПИЯФ)**
2. **Заключительные данные по солнечным нейтрино и гео-нейтрино**
3. **Поиск редких процессов, нарушению ПП, аксионам, тяжелое стерильное нейтрино**
4. **Корреляции с γ -всплесками, гравитационными волнами, солнечными вспышками, быстрыми радио-всплесками, сигналами IceCube**



5. **Поиск двойного бета-распада с Борексино (LEGEND ^{76}Ge)**
6. **DARWIN -DARk matter WImp search with liquid xenON**

Поиск частиц темной материи в 2020

1. Поиск рассеяния WIMPs (N1) на ядрах Ar и электронах в эксперимент DARKSIDE-50,20k (входим в группы *Materials*+Ti+ICPMS, *Analysis*+A.E.E., *Calibration*+²⁵²Cf)

1А. Эксперимент DEAP 3600 кг LAr сцинт. детектор в SNO

2. Поиск солнечных и реликтовых аксионов (N2)

2.1 Работы по созданию ¹⁶⁹Tm -содержащего детектора для регистрации резонансного поглощения солнечных аксионов с непрерывным спектром. Первые результаты с новыми тулий содержащими гранатами – **Tm₃Al₅O₁₂**.

2.2 Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром ⁸³Kr в БНО ИЯИ. Продолжение измерений с криптоном, обогащенным изотопом ⁸³Kr.

2.3 Участие в коллаборации **IAXO** – International Axion Observatory. Этап **baby-IAXO**.

DarkSide-50-20k collaboration

Jinst

PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

RECEIVED: December 18, 2019

ACCEPTED: January 27, 2020

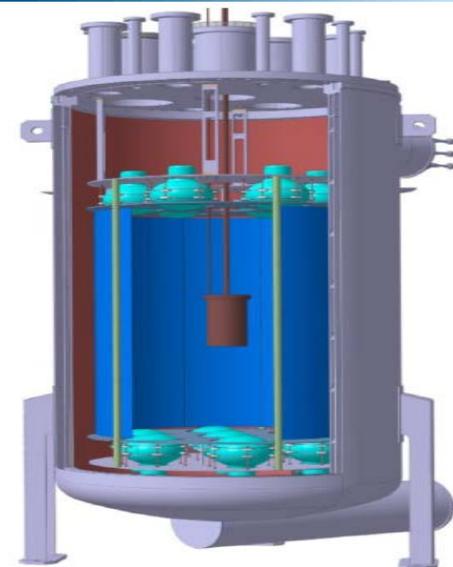
PUBLISHED: February 26, 2020

Design and construction of a new detector to measure ultra-low radioactive-isotope contamination of argon



The DarkSide-20k collaboration

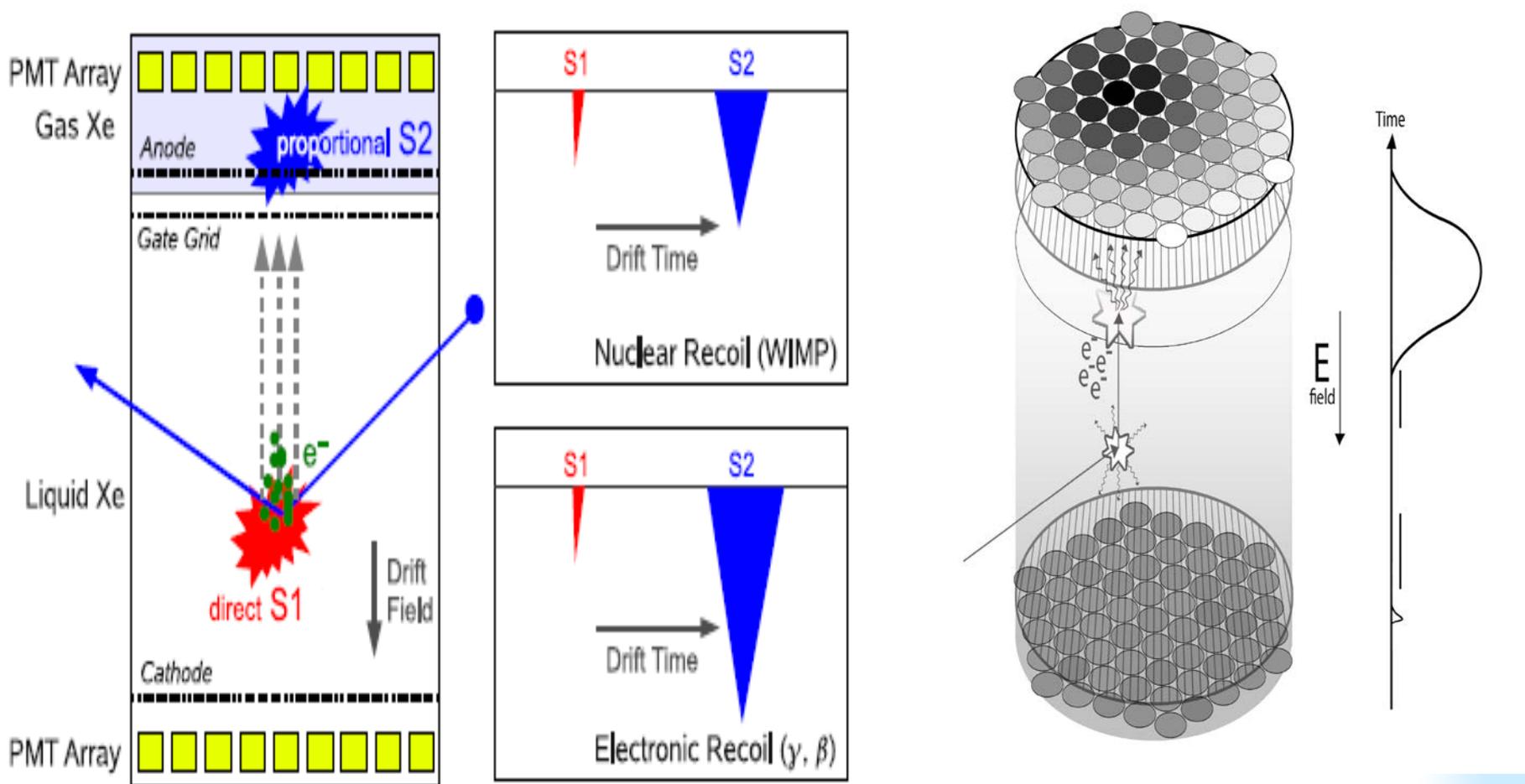
2020 JT



40-80 институтов

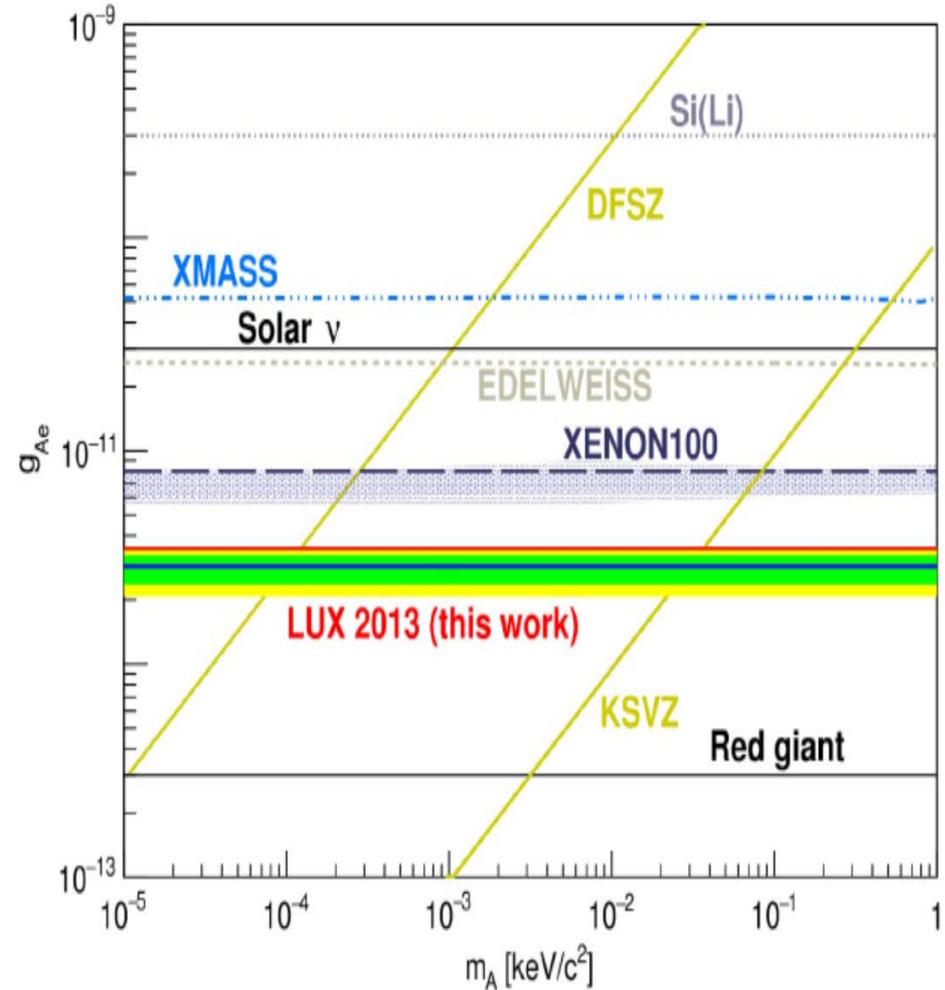
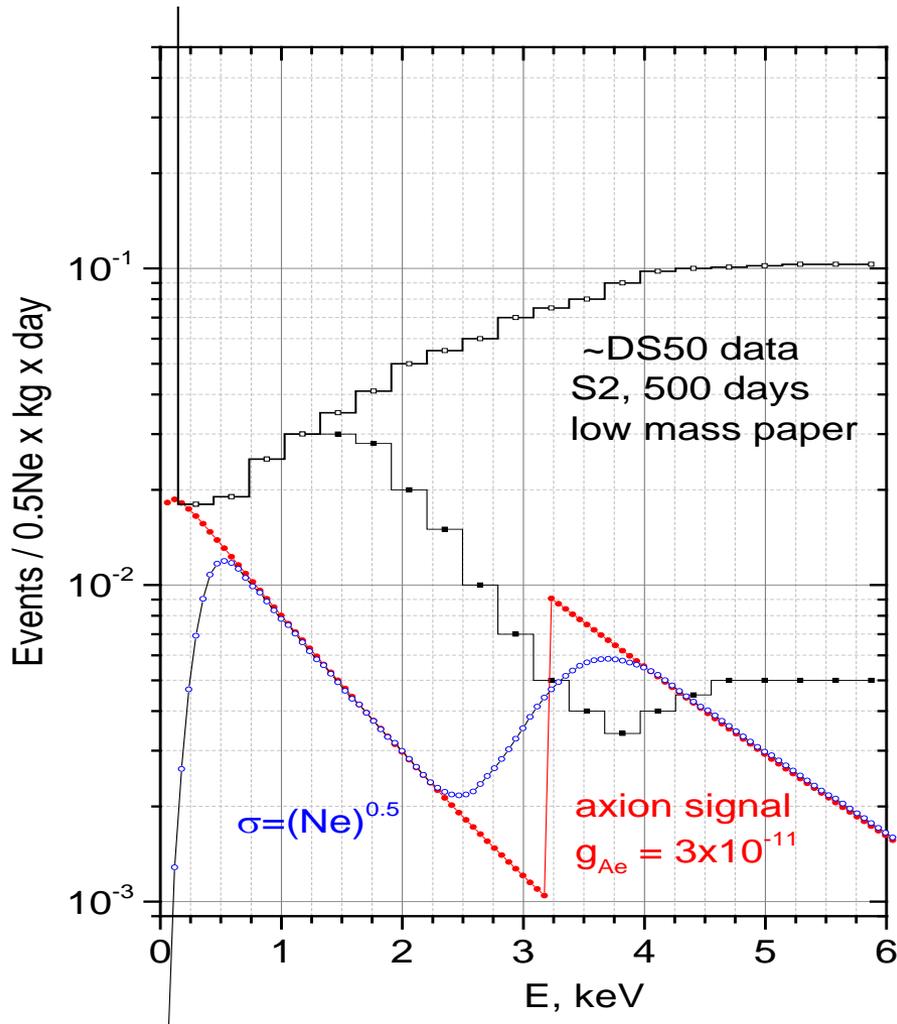
ArDM, DarkSide-50, DEAP-3600 и MiniCLEAN => Global Argon Dark Matter collaboration начиная с DS-20k. Основная проблема активность ^{39}Ar решается Urania (330 кБк/сут, США) и Aria (1 мБк/сут, Сардиния). DArT в ArDM (Canfranc) будет измерять ^{39}Ar .

Двухфазный детектор - 2 phases TPC



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

Axioelectric effect for Ar atoms – DS50 results



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

Источник $^{252}\text{Cf} + \text{Si}(\text{Li})$ для калибровки DS и др.

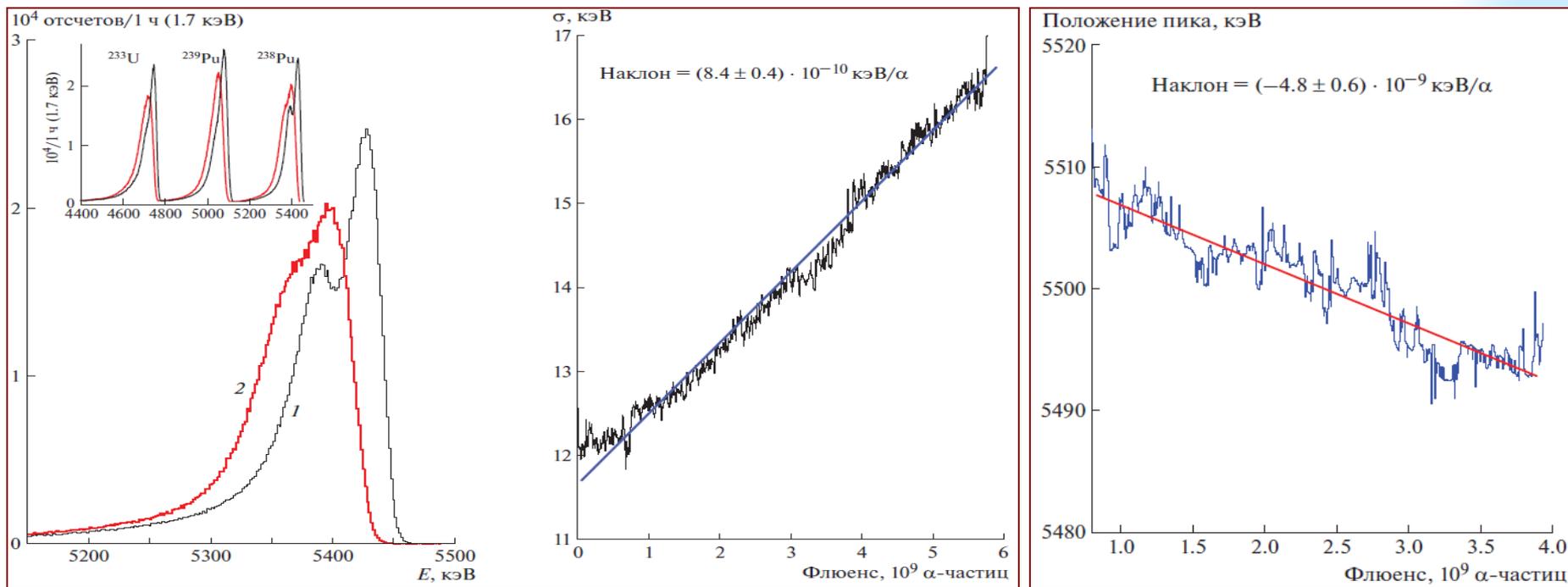
ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 1, с. 30–34

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.128.4.04

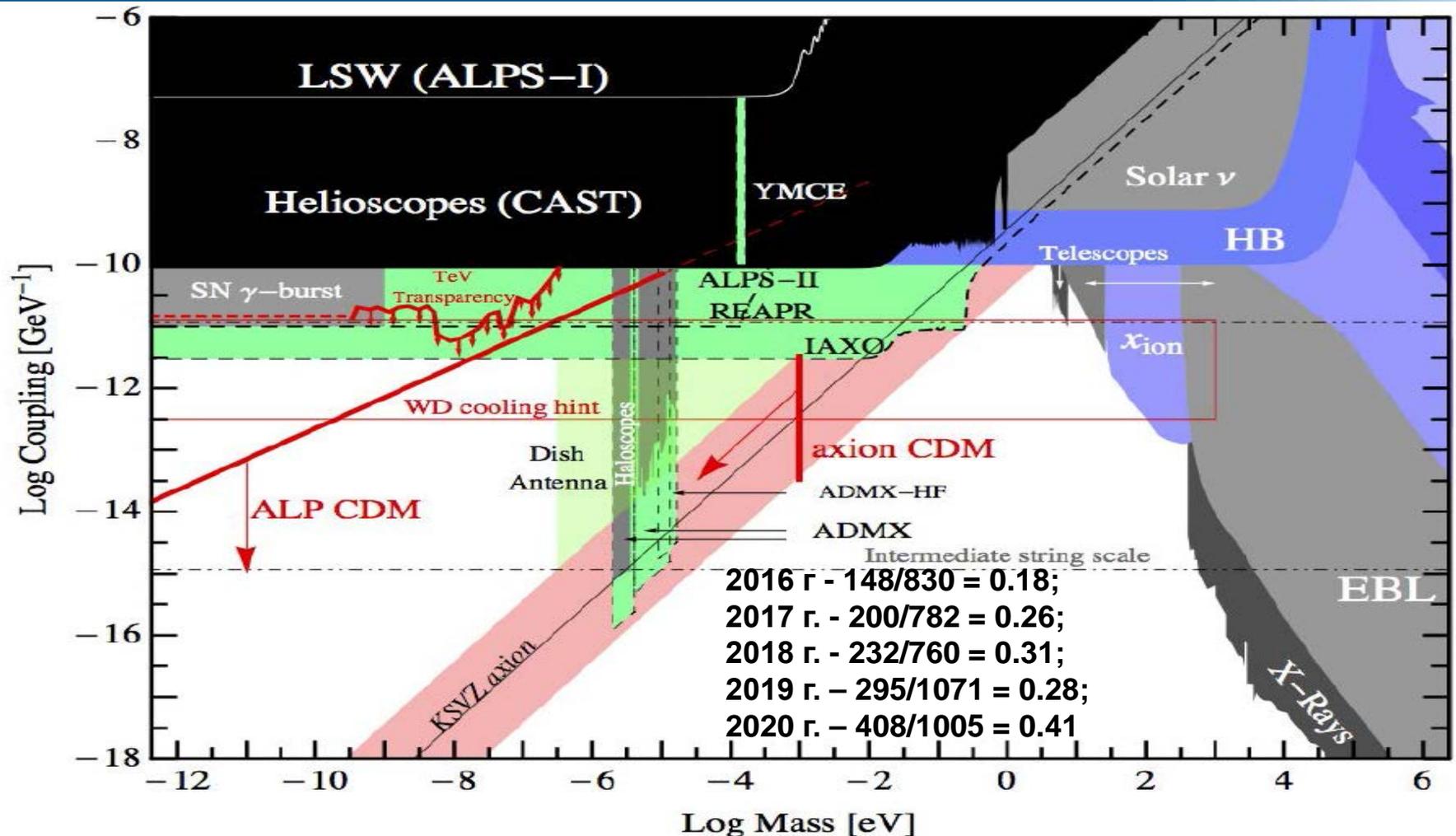
ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ $\text{Si}(\text{Li})$ -ДЕТЕКТОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ α -ЧАСТИЦ

© 2020 г. Н. В. Базлов^{a,b}, С. В. Бахланов^a, А. В. Дербин^{a,*}, И. С. Драчнев^a,
Г. А. Изегов^{a,b}, И. М. Котина^a, В. Н. Муратова^a, Н. В. Ниязова^a, Д. А. Семенов^a,
М. В. Трушин^a, Е. В. Унжаков^a, Е. А. Чмель^a



Продолжены работы по подготовке эксперимента **DarkSide-20k** Начата разработка калибровочного источника нейтронов на основе ^{252}Cf , совмещенного с $\text{Si}(\text{Li})$ -детектором. Проводилось изучение радиационной стойкости $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов при регистрации α -частиц. Статья опубликована в Приборы и Техника Эксперимента.

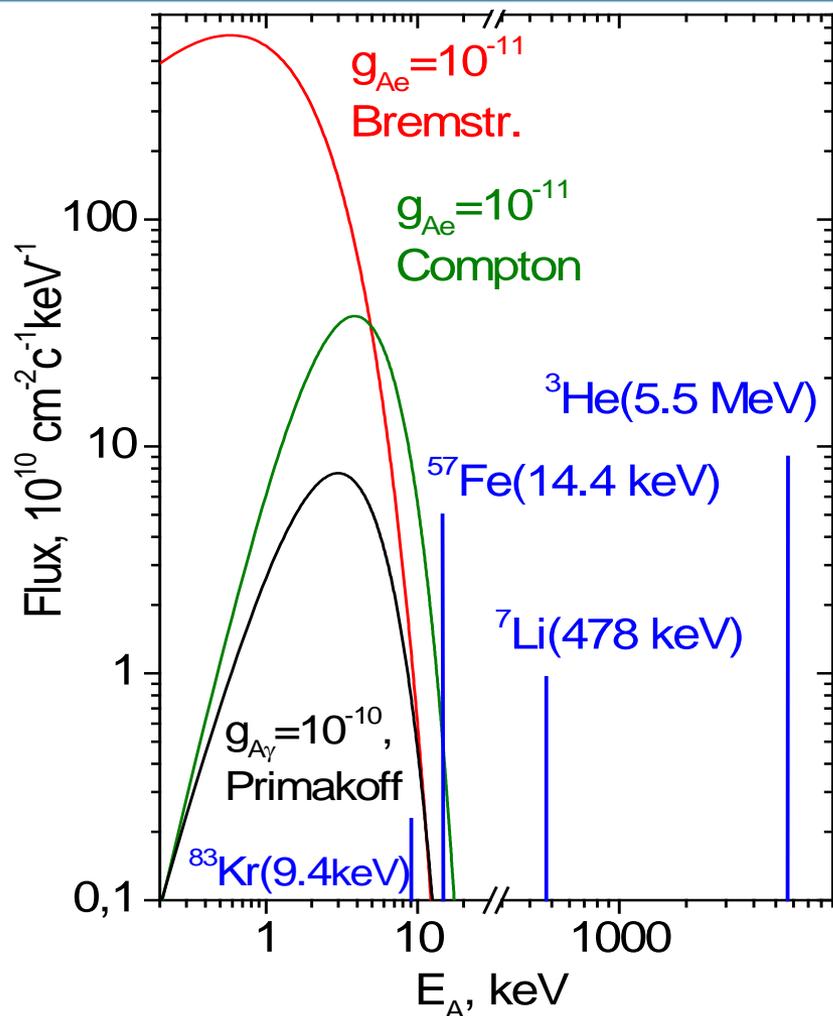
Аксионы + аксионоподобные частицы ALPs



Аксионы: CP-проблема + темная материя. **ALPs** – Axion like particles: Аномальная прозрачность + динамика звезд различных типов. Слово **axion** в названии статей, выложенных в arXive в 2018 г, встречается всего в 3 (760/232) раз реже чем слово **neutrino**



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



The main sources of solar axions:

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



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

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

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

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

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

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

Detection of axions via resonant excitation of nuclear levels

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



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

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



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

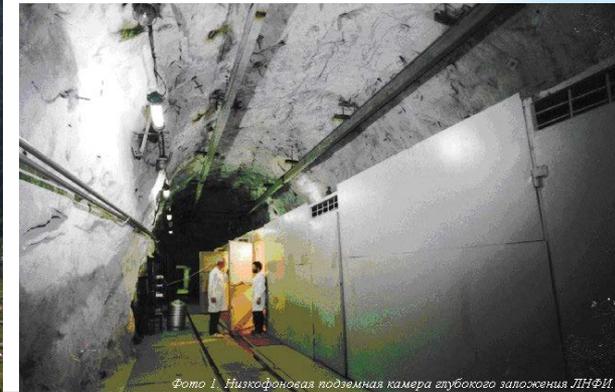
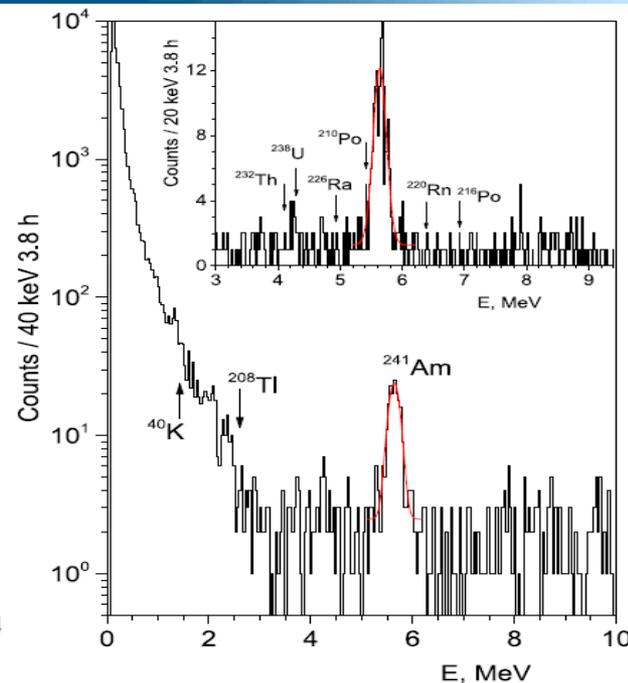
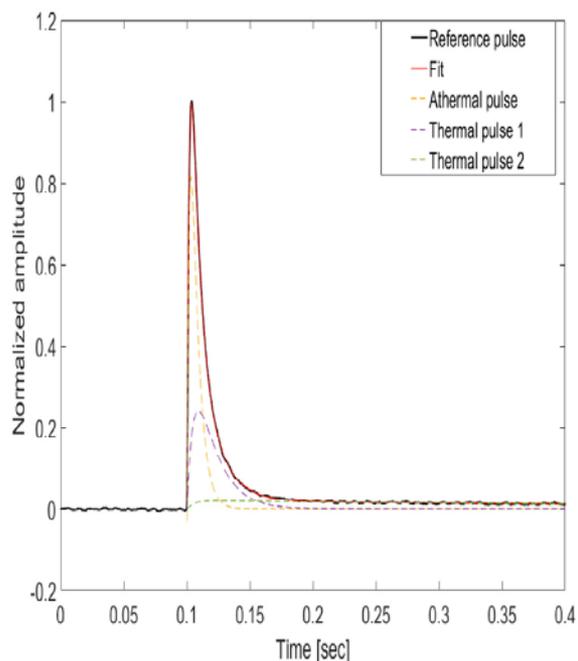


Фото 1. Низкофонная подземная камера глубокого заложения ЛНФИ.

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

$Tm_3Al_5O_{12}$ - новый перспективный болометр для солнечных аксионов $^{169}Tm + A \rightarrow ^{169}Tm^* (8.4 \text{ кэВ})$



Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ внутри медного держателя. Золотые проволочки обеспечивают электрические контакты.

Тепловой импульс при регистрации энергии 1 МэВ в кристалле $Tm_3Al_5O_{12}$, охлажденном до $T = 10 \text{ мК}$.

Спектр Tm -болометра, измеренный с NTD термистором и результаты подгонки альфа пика ^{241}Am .

Сотрудники ОПЯД ОНИ ПИЯФ в сотрудничестве с отечественными и зарубежными институтами провели исследования свойств **тулиевого граната** с целью использовать его для поиска резонансного возбуждения первого ядерного уровня изотопа ^{169}Tm (8.4 кэВ) солнечными аксионами. Исследована радиационная чистота кристалла, его оптические свойства, получен **первый спектр болометрического детектора** с термистором NTD . Результаты опубликованы в журнале **Nuclear Instruments and Methods**, A949, 162924 (2020)

$Tm_3Al_5O_{12}$ – болометр $^{169}Tm + A \rightarrow ^{169}Tm^*$ (8.4 кэВ)

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 949 (2020) 162924

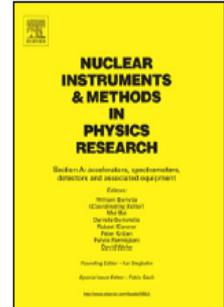


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

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



A test of bolometric properties of Tm-containing crystals as a perspective detector for a solar axion search

E. Bertoldo^a, A.V. Derbin^b, I.S. Drachnev^b, M. Laubenstein^c, D.A. Lis^d, M. Mancuso^a,
V.N. Muratova^b, S. Nagorny^e, S. Nisi^c, F. Petricca^a, V.V. Ryabchenkov^f, S.E. Sarkisov^f,
D.A. Semenov^b, K.A. Subbotin^d, E.V. Unzhakov^{b,*}, E.V. Zharikov^d

^a Max-Planck-Institut für Physik, 80805 München, Germany

^b NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia

^c INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy

^d Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

^e Queen's University, Physics Department, K7L 3N6 Kingston, Canada

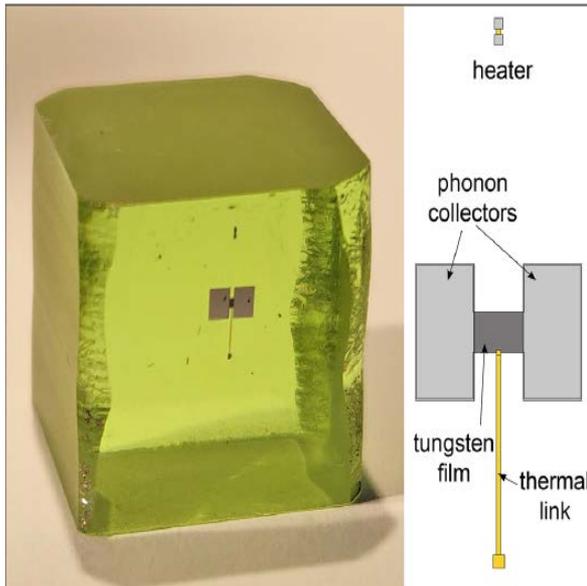
^f NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia



Новый эксперимент по поиску солнечных аксионов с $Tm_3Al_5O_{12}$ криогенным болометром

Сотрудники ОПЯД ОНИ ПИЯФ предложили и, совместно с отечественными и зарубежными институтами, провели поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{169}Tm . Новый подход заключается в использовании кристалла $Tm_3Al_5O_{12}$ как **болометрического криогенного детектора**. Измерения, проведенные с 8 г кристаллом в течении 6.6 сут. позволили установить новые ограничения на константы связи аксиона с фотонами $g_{A\gamma}$ и электронами g_{Ae} : $|g_{A\gamma}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 1.44 \times 10^{-14} GeV^{-1}$ and $|g_{Ae}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 2.81 \times 10^{-16}$.

Результаты опубликованы в журнале **European Physical J. C. (2020) 80:376**



Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ в с нанесенным термистором TES, схема которого приведена справа.

Eur. Phys. J. C (2020) 80:376

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7943-5>

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Experimental Physics

New limits on the resonant absorption of solar axions obtained with a ^{169}Tm -containing cryogenic detector

A. H. Abdelhameed¹, S. V. Bakhlanov², P. Bauer¹, A. Bento^{1,7}, E. Bertoldo¹, L. Canonica¹, A. V. Derbin², I. S. Drachnev², N. Ferreiro Iachellini¹, D. Fuchs¹, D. Hauff¹, M. Laubenstein³, D. A. Lis⁴, I. S. Lomskaya², M. Mancuso¹, V. N. Muratova², S. Nagorny⁵, S. Nisi³, F. Petricca¹, F. Proebst¹, J. Rothe¹, V. V. Ryabchenkov⁶, S. E. Sarkisov⁶, D. A. Semenov², K. A. Subbotin⁴, M. V. Trushin², E. V. Unzhakov^{2,a}, E. V. Zharikov⁴

¹ Max-Planck-Institut für Physik, 80805 Munich, Germany

² NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia

³ INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy

⁴ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

⁵ Physics Department, Queen's University, Kingston, ON K7L 3N6, Canada

⁶ NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

⁷ Departamento de Física, Universidade de Coimbra, P3004 516 Coimbra, Portugal

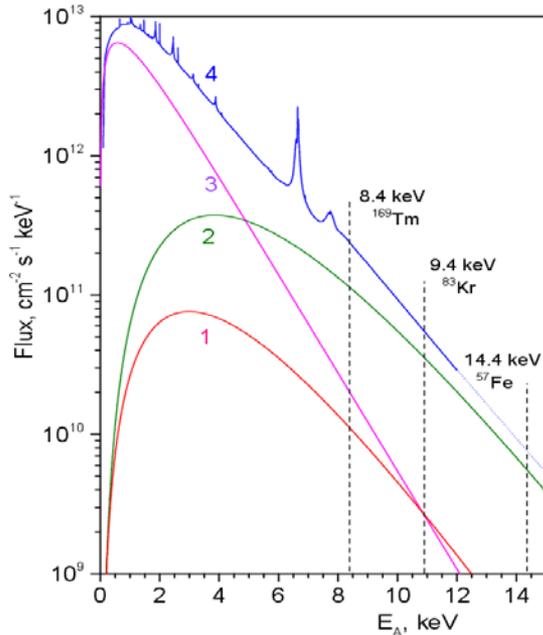
Первые результаты, полученные с $Tm_3Al_5O_{12}$

Новые пределы, из измерений с TES
на константы связи аксиона

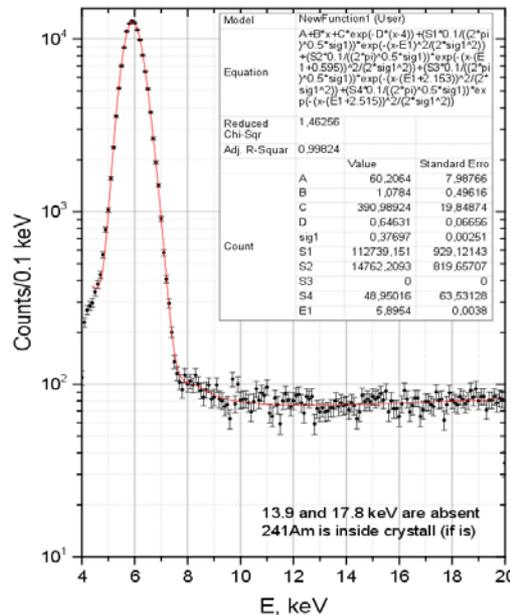
$$|g_{Ae}| \times |g_{AN}^3 + g_{AN}^0| \leq 2.8 \times 10^{-16} \Rightarrow |g_{Ae} \times m_A| \leq 4.6 \times 10^{-9} \text{ eV}$$

$$|g_{Ay}| \times |g_{AN}^3 + g_{AN}^0| \leq 1.4 \times 10^{-14} \Rightarrow |g_{Ay} \times m_A| \leq 2.3 \times 10^{-7}$$

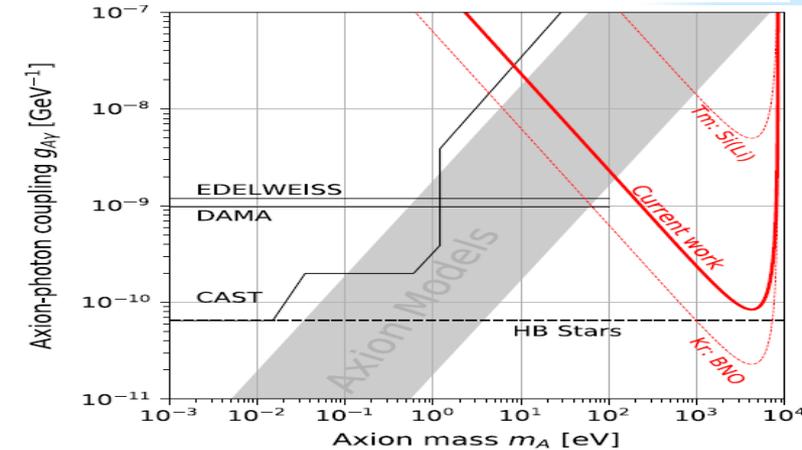
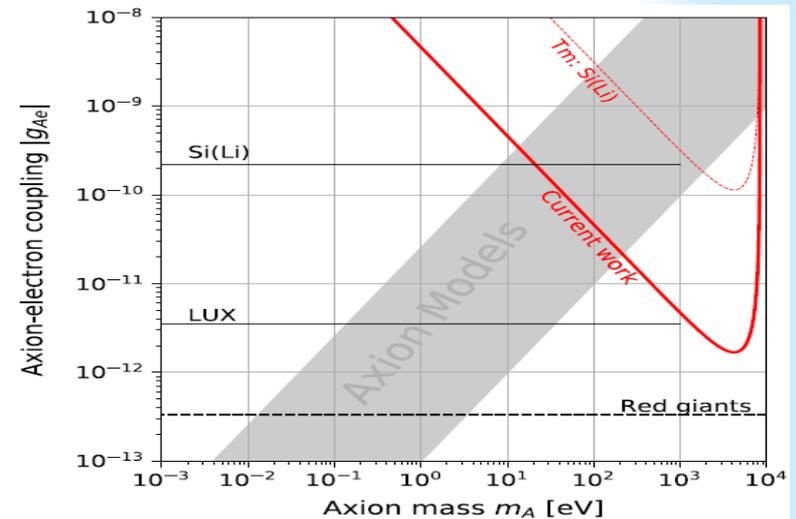
Измерения на поверхности Земли, верхний
предел на число аксионных событий $Slim=128$
Пока уступает результатам ^{83}Kr , но $\omega_A / \omega_\gamma \ll 0$



Энергетический спектр
солнечных аксионов.



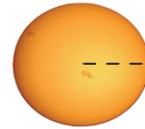
Спектр Tm -болометра и
результаты подгонки.



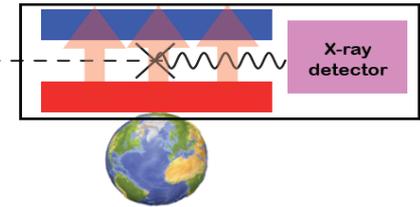
Верхние пределы на g_{Ay} в сравнении
с результатами других экспери-
ментов и астрофизическими
ограничениями.



CERN Axion Solar Telescope

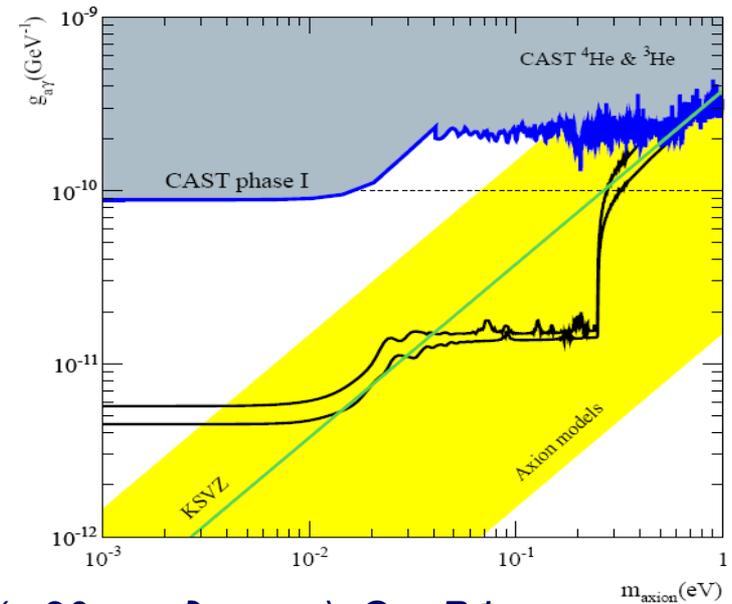
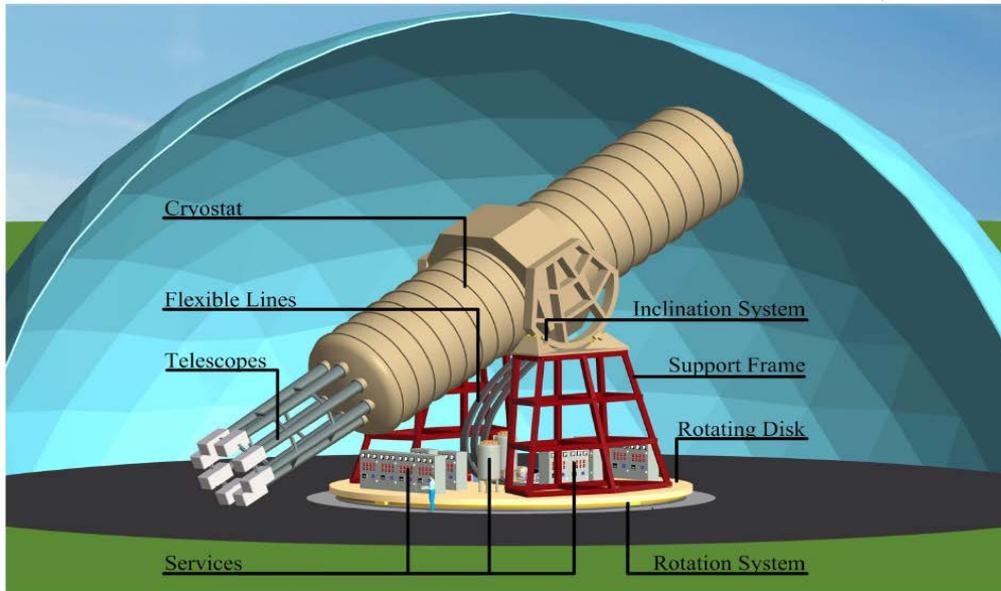


ALPs are produced inside the Sun via the two photon coupling (and others) and scape easily



← **CAST**
IAXO
↓

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



Увеличение чувствительности на 5 - 6 порядков (в 20 раз для $g_{A\gamma}$). От РФ участвую ИЯИ и ПИЯФ – axion theory and phenomenology, gAe , $Si(Li)$ активной защиты

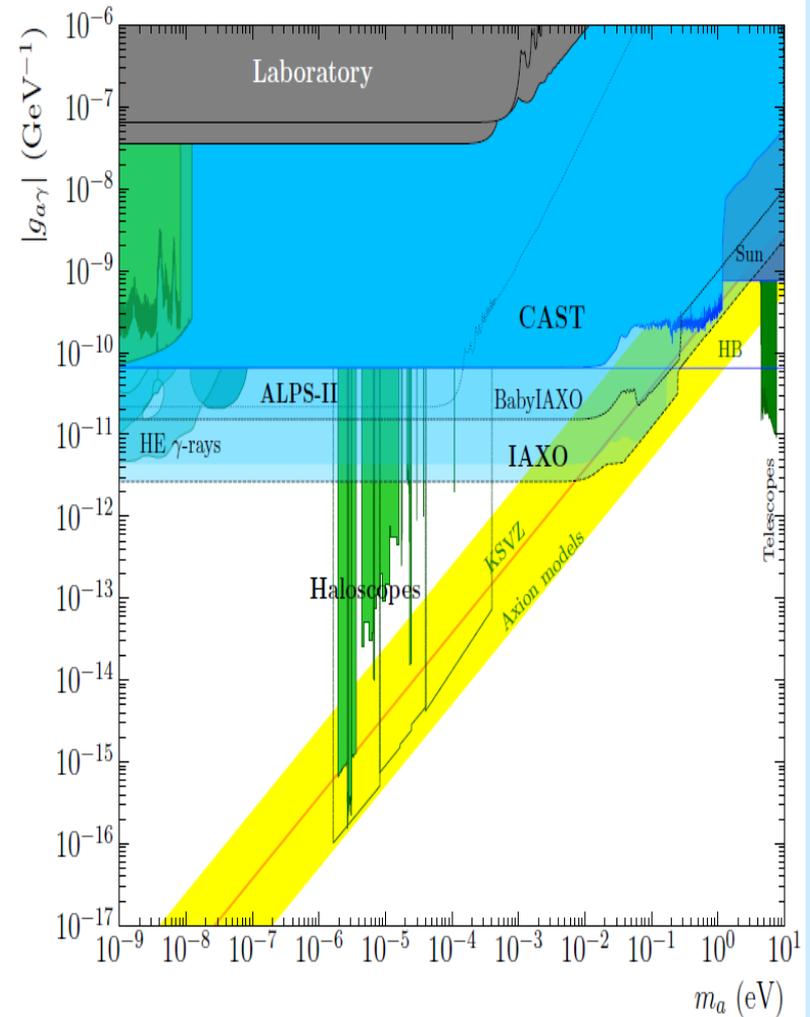
2020 - IAXO: International AXion Observatory

Conceptual Design of **BabyIAXO**, the intermediate stage towards the International Axion Observatory



IAXO collaboration

A. Abeln¹, K. Altenmüller², S. Arguedas Cuendis³, E. Armengaud⁴, D. Attié⁴, S. Aune⁴, S. Basso⁵, L. Bergé⁶, B. Biasuzzi⁴, P. T. C. Borges De Sousa³, P. Brun⁴, N. Bykovskiy³, D. Calvet⁴, J. M. Carmona², J. F. Castel², S. Cebrián², V. Chernov^{7,8}, F. E. Christensen⁹, M.M. Civitani⁵, C. Cogollos^{10,11}, T. Dafni², **A. Derbin**¹², K. Desch¹³, D. Díez², M. Dinter²¹, B. Döbrich³, **I. Drachnev**¹², A. Dudarev³, L. Dumoulin⁶, D. D. M. Ferreira⁹, E. Ferrer-Ribas⁴, I. Fleck¹⁴, J. Galán², D. Gascón^{10,11}, L. Gastaldo¹, M. Giannotti¹⁵, Y. Giomataris⁴, A. Giuliani⁶, S. Gninenko⁸, J. Golm^{9,16}, N. Golubev⁸, L. Hagge²¹, J. Hahn¹⁴, C. J. Hailey¹⁷, D. Hengstler¹, P. L. Henriksen⁹, T. Houdy^{22,23}, R. Iglesias-Marzoa¹⁸, F. J. Iguaz-Gutierrez¹⁹, I. G. Irastorza^{2,*}, C. Iñiguez¹⁸, K. Jakovčić²⁰, J. Kaminski¹³, B. Kanoute¹⁹, S. Karstensen²¹, L. Kravchuk⁸, B. Lakić²⁰, T. Lasserre⁴, P. Laurent⁴, O. Limousin⁴, A. Lindner²¹, M. Loidl²⁴, **I. Lomskaya**¹², G. López-Alegre¹⁸, B. Lubsandorzhiev⁸, K. Ludwig²¹, G. Luzón², C. Malbrunot³, C. Margalejo², A. Marin-Franch¹⁸, S. Marnieros⁶, F. Marutzyk²¹, J. Mauricio^{10,11}, Y. Menesguen²⁴, M. Mentink³, S. Mertens^{22,23}, F. Mescia^{10,11}, J. Miralda-Escudé^{10,25}, H. Mirallas², J. P. Mols⁴, **V. Muratova**¹², X. F. Navick⁴, C. Nones⁴, A. Notari^{10,11}, A. Nozik^{7,8}, L. Obis², C. Oriol⁶, F. Orsini¹⁹, A. Ortiz de Solórzano², S. Oster²¹, H. P. Pais Da Silva³, V. Pantuev⁸, T. Papaevangelou⁴, G. Pareschi⁵, K. Perez²⁶, O. Pérez², E. Picatoste^{10,11}, M. J. Pivovarov^{27,28}, D. V. Poda⁶, J. Redondo², A. Ringwald²¹, M. Rodrigues²⁴, F. Rueda-Teruel¹⁸, E. Ruiz-Choliz²⁹, J. Ruz²⁷, E. O. Saemann²¹, J. Salvado^{10,11}, T. Schiffer¹³, S. Schmidt¹³, U. Schneekloth²¹, M. Schott²⁹, L. Segui⁴, F. Tavecchio⁵, H. H. J. ten Kate³, I. Tkachev⁸, S. Troitsky⁸, D. Unger¹, **E. Unzhakov**¹², N. Ushakov⁸, J. K. Vogel²⁷, D. Voronin⁸, A. Weltman³⁰, U. Werthenbach¹⁴, W. Wuensch³, A. Yanes-Díaz¹⁸



ПІЯФ - Отбор материалов ICP MS+HPGe, монитор VGO, M-K симуляции, gAe

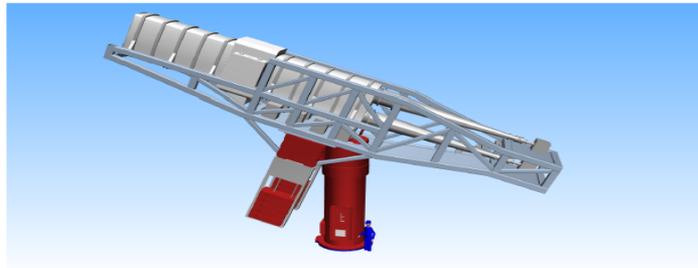
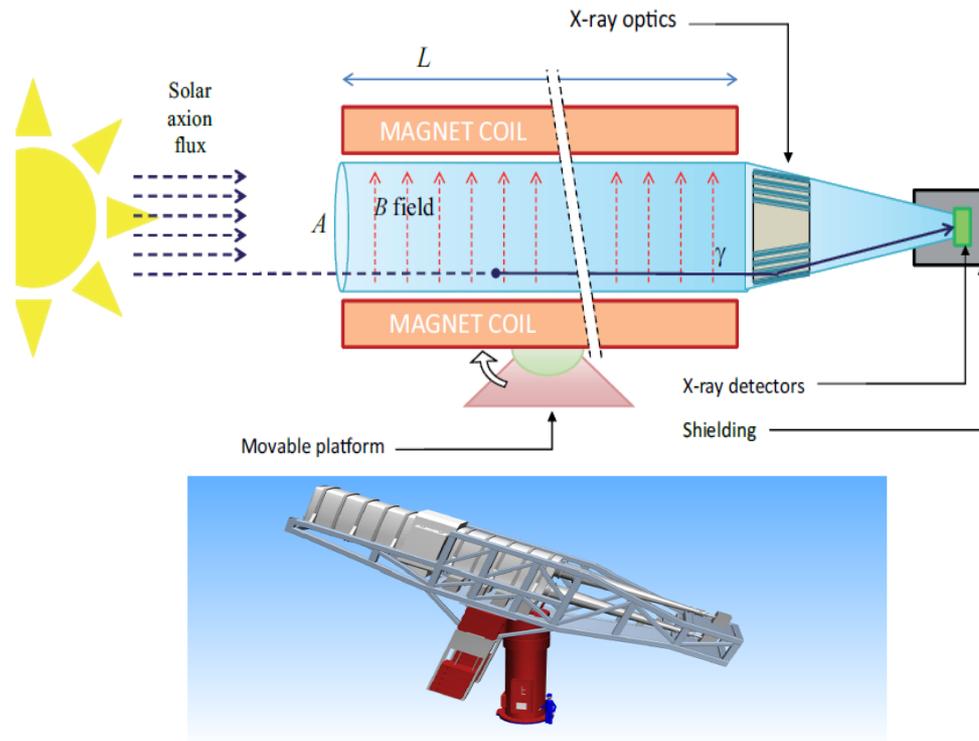


Figure 18. Conceptual design of BabyIAXO.

Parameter	Units	BabyIAXO	IAXO baseline	IAXO upgraded
B	T	~ 2	~ 2.5	~ 3.5
L	m	10	20	22
A	m^2	0.77	2.3	3.9
f_M	$T^2 m^4$	~ 230	~ 6000	~ 24000
b	$keV^{-1} cm^{-2} s^{-1}$	1×10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
ϵ_d		0.7	0.8	0.8
ϵ_o		0.35	0.7	0.7
a	cm^2	2×0.3	8×0.15	8×0.15
ϵ_t		0.5	0.5	0.5
t	year	1.5	3	5

Experiment Proposal to the DESY PRC

BabyIAXO: a first stage of the International Axion Observatory IAXO

E. Armengaud¹, D. Attie¹, S. Basso², P. Brun¹, N. Bykovskiy³, J. M. Carmona⁴, J. F. Castel⁴, S. Cebrián⁴, M. Civitani², C. Cogollos⁵, D. Costa⁵, T. Dafni⁴, A.V. Derbin⁶, M.A. Descalle⁷, K. Desch⁸, B. Döbrich³, I. Dratchnev⁹, A. Dudarev³, E. Ferrer-Ribas¹, I. Fleck¹⁷, J. Galán¹, G. Galanti², D. Gascón⁵, L. Gastaldo⁹, L. Garrido⁵, C. Germani⁵, G. Ghisellini², M. Giannotti¹⁰, I. Giomataris¹, S. Gninenko¹¹, N. Golubev¹¹, R. Graciani⁵, I. G. Irastorza^{4,*}, K. Jakovčić¹², J. Kaminski⁸, M. Krčmar¹², C. Krieger⁸, B. Lakić¹², T. Lasserre¹, P. Laurent¹, I. Lomsakaya⁶, E. Unzhakov⁶, O. Limousin¹, A. Lindner¹³, G. Luzón⁴, C. Melgarejo⁴, F. Mescia⁵, J. Miralda-Escudé⁵, H. Mirallas⁴, V. N. Muratova⁶, X.F. Navick¹, C. Nones¹, A. Notari⁵, A. Nozik¹¹, A. Ortiz de Solórzano⁴, V. Pantuev¹¹, T. Papaevangelou¹, G. Pareschi², E. Picatoste⁵, M. J. Pivovarov⁷, K. Perez¹⁴, J. Redondo⁴, A. Ringwald¹³, J. Ruiz⁷, E. Ruiz-Chóliz⁴, E. O. Saemann¹³, J. Salvadó⁵, M. P. Sampériz⁴, T. Schiffer⁸, S. Schmidt⁸, U. Schneekloth¹³, M. Schott¹⁵, H. Silva³, G. Tagliaferri², F. Tavecchio², H. ten Kate³, I. Tkachev¹¹, S. Troitsky¹¹, P. Vedrine¹, J. K. Vogel⁷, A. Weltman¹⁶.

¹IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

²INAF - Osservatorio astronomico di Brera, Via E. Bianchi 46, Merate (LC), I-23807, Italy

³European Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland

⁴Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain

⁵Institut de Ciències del Cosmos, Universitat de Barcelona, Spain

⁶St. Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

⁷Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

⁸Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

⁹Kirchhoff Institute for Physics, Heidelberg University, INF 227 69120 Heidelberg Germany

¹⁰Physical Sciences, Barry University, 11300 NE 2nd Ave., Miami Shores, FL 33161, USA

¹¹Institute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹²Rudjer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

¹³Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

¹⁴Massachusetts Institute of Technology, USA

¹⁵Johannes Gutenberg University Mainz, Germany

¹⁶University of Cape Town, South Africa

Основные результаты работы в 2020 г.

1. Совместно с участниками международной коллаборации **Борексино** получены статистически достоверные результаты регистрации нейтрино из **CNO-цикла** на Солнце. Скорость счета **CNO-нейтрино** составляет $7.2^{+3.0}_{-1.7}$ отсч. / (100 т сут.), что соответствует потоку $7.0^{+3.0}_{-2.0} \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, в предположении LMA MSW осцилляционного решения. Результаты опубликованы в журнале “Nature”.
2. Группой ПИЯФ выполнены прецизионные измерения бета-спектра ^{210}Bi , результаты которых использовались для определения вклада в фон Borexino от ^{210}Bi при анализе сигналов от CNO-нейтрино. Результаты опубликованы в Phys. Rev C
3. Группа ПИЯФ продолжила поиск корреляций ν -событий с солнечными вспышками (SF). Коллаборацией получены новые данные по потокам антинейтрино от Солнца, новые пределы на магнитный момент и маг. поле Солнца $\mu \times H < 6.9 \times 10^{-9} \text{ B[kG]} \mu_B$. Результаты в Astroparticle Physics.
4. Получены новые данные по гео-нейтрино. Результаты опубликованы в Phys.Rev.D
5. ПИЯФ предложил и проводит поиск корреляций сигналов Borexino с гравитационными волнами (GW) и быстрыми радио-всплесками (FRBs).
6. Продолжена разработка калибровочного источника нейтронов на основе **^{252}Cf** , совмещенного с **Si(Li)**-детектором. Проводилось изучение радиационной стойкости Si-детекторов при регистрации альфа-частиц. Результаты опубликованы в ПТЭ.
7. Разработан и создан новый бета-спектрометр с **4 π -геометрией** на основе Si(Li)-детекторов с толщиной i-области 9 мм, который имеет функцию отклика близкую к гауссовой. Опубликовано ПТЭ.
8. Кристалл **$\text{Al}_5\text{Tm}_3\text{O}_{12}$** , выращенный в КИ и ИОФ РАН, установлен в криогенную установку и охлажден до **10 мК**. Измерены фоновые спектры кристалла на поверхности Земли с термисторами **NTD и TES**. Установлены новые ограничения на скорость резонансного возбуждения аксионами уровня **^{169}Tm** и, как следствие, на константы связи аксиона с фотонами и электронами.
9. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, DarkSide, DEAP и IAXO.

Планы на 2021 г.

1) ПИЯФ

- а) Окончание измерений бета-спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr в схеме мишень-детектор 9 мм для определения спектра электронных антинейтрино
- б) Анализ результатов измерения β -спектра ^{210}Bi с 4 π -спектрометром для CNO-нейтрино и других низкофоновых экспериментов.
- в) Проведение измерений с $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ -боллометром в LNGS. Выращивание новых Tm гранатов объемом более 1 см³ (КИ + ИОФ РАН)
- г) Баксанская НО - аксион ^{83}Kr анализ для gAe, IAXO – R&D работы .

2) Borexino – солнечные нейтрино, редкие процессы, корреляции

- а) Солнечные нейтрино на полном наборе данных
- б) Принцип Паули, аксионы, распады с $\Delta B = 3$,
- в) корреляция Вх сигналов с GWs, GRBs, FRBs, SFs, IceCube
- г) И. Драчнев, Д. Семенов, Е. Унжаков, Н. Ниязова, И. Ломская, А. Кузьмичев, М. Микулич → ???./ мес. LNGS

3) DarkSide – темная материя

- а) Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20K, DEAP, ^{252}Cf источник, рад. стойкость $\text{Si}(\text{Li})$ (ICP MS + Ti, SiO_2 , CF_2) + “удаленные дежурства”
- б) И. Драчнев, Е. Унжаков, Д. Семенов, А. Кузьмичев → 4 месяца LNGS

4) Аксион – baby-IAXO (DESY), Tm (LNGS, MPI), Kr (БНО)

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений

НЕЙТРИНО ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ АКСИОН, WIMPs

DS, Si,

Si

DEAP

Ce-Pr

^{144}Pr

^{210}Bi

BOREXINO
DARKSIDE

DEAP

DS

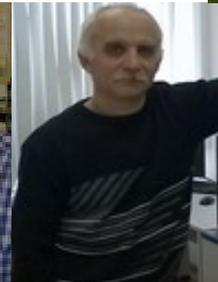
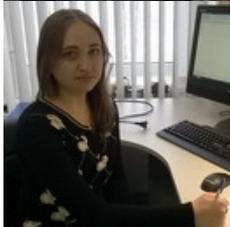
$g_{\text{Ae}}, g_{\text{Ay}}$

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

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

IAXO

^{169}Tm



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) М.В. Трушин, кфмн, снс
- 11) Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ
- 12) И.П. Филиппов, 6 курс СПбГУ->с.л.
- 13) А.М. Кузьмичев, 4 курс АУ
- 14) М.С. Микулич, 5 курс СПбГТУ-ТИ

В отделе - 29 (8x0.5) чел.

1 дфмн; 7 кфмн; внс – 2;
снс – 4; нс – 4; мнс – 0; асп.
- 2; с. лаб. -1, вед. инж.-10;
инж.-2; рег. ап. -1; сл. мех.-
1; студ. совм. – 2; ($\Sigma 15$ нс)

Гр. физики и технологии ППД

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

Гр. радиохимии

- 1) И.С. Ломская, 6 курс ТУ->аспирант
- 2) В.М. Тюнис вед. инж.

Конст. –технологический уч.

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

Основные результаты по п/п структурам

1. **Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами (в основном, для Ф.И.) (рук. А.Х. Хусаинов)**
 - 1.1 Поддержка п/п детекторов в ПИЯФ
 - 1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr и ^{210}Bi
 - 1.3 Si(Li)-детектор осколков калибровочного источника ^{252}Cf
 - 1.4 CdTe детекторы для диагностики плазмы, Токамак-10, КИ
 - 1.5 Si(Li) детекторы для **IAXO, TASTE**
 - 1.6 Детекторы из **высокоомного кремния** по планарной технологии
2. **Изучение характеристик п/п детекторов и МДП структур (рук. И.М. Котина, М.В. Трушин)**
 - 2.1 Исследование радиационной стойкости п/п (Si) детекторов.
 - 2.2 Изучение фото чувствительности МДП структур на Si и влияния пассивации на характеристики п/п детекторов
 - 2.3 Детекторы с двухсторонним тонким окном
 - 2.4 МДП (aSi:H/cSi и AlN) структуры на Si-детекторах (с СПбГУ)
 - 2.5 Дрейф лития на $x > 8$ мм

Обслуживание и ремонт Ge- и Si- детекторов в ПИЯФ

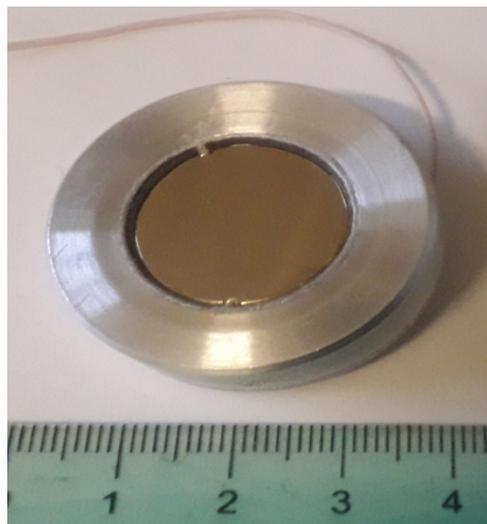
Отдел эксплуатации нейтронных станций .
Кремниевый поверхностно-барьерный детектор с резистивной обратной связью. (Е.А. Чмель, Н.Т. Кислицкий)

Лаборатория ядерной спектроскопии ОНФ
Si(Li)-детектор 200 мм² Заявленная неисправность: плохой вакуум. Восстановлен вакуум в криостате, отремонтирован детектор, испытан и аттестован

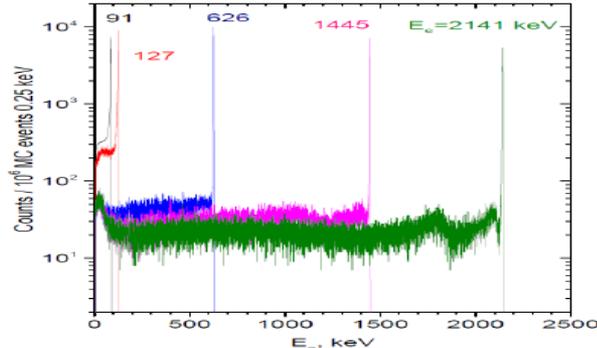
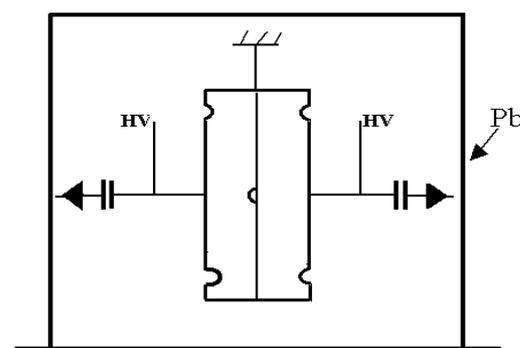
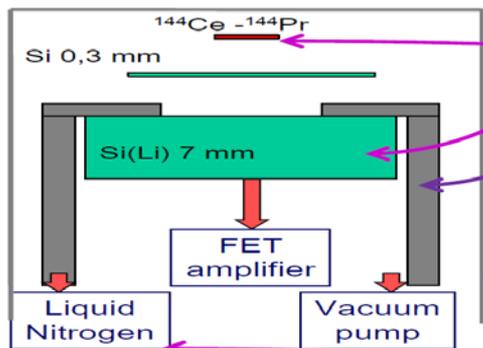
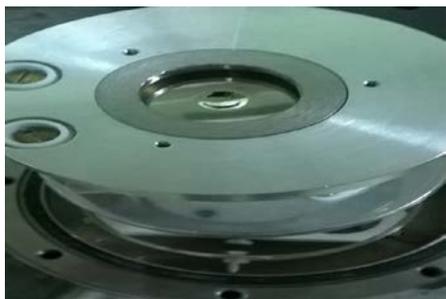
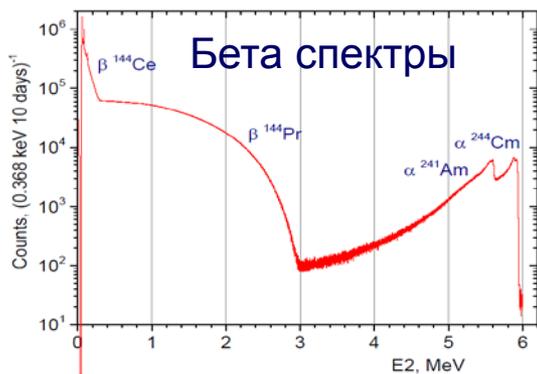
Инжиниринговый центр «Углеродные наноструктуры»
Детекторы HPGe фирмы CANBERA и ORTEC
Заявленная неисправность: плохой вакуум.



Обслуживание и ремонт Ge- и Si- детекторов в ПИЯФ

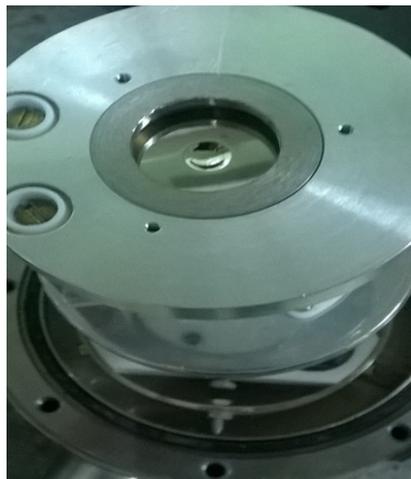
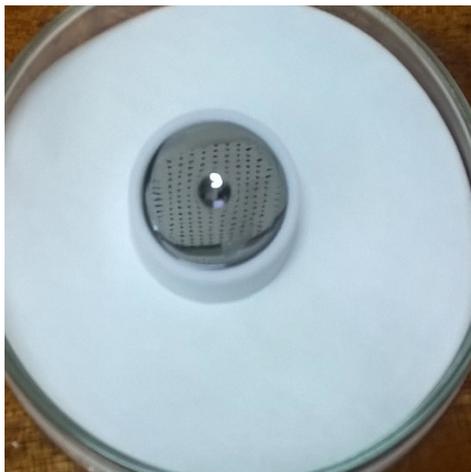


Детекторы для измерения β -спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr и ^{210}Bi



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

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



Спектрометрические блоки детектирования для рентгеновской диагностики термоядерной плазмы



Блоки детектирования разработаны на основе Si(Li) и p-i-n CdTe детекторов и обеспечивают эффективную регистрацию рентгеновского излучения с энергией до 150 кэВ. Разрешение составляет 200 эВ для Si(Li) детектора и 500 эВ для CdTe детекторе. Охлаждение детекторов производится миниатюрными термоэлектрическими охладителями.

Соглашение о научно-техническом сотрудничестве ПИЯФ и НИЦ КИ

СТАТЬЯ 2. ОБЛАСТИ СОТРУДНИЧЕСТВА

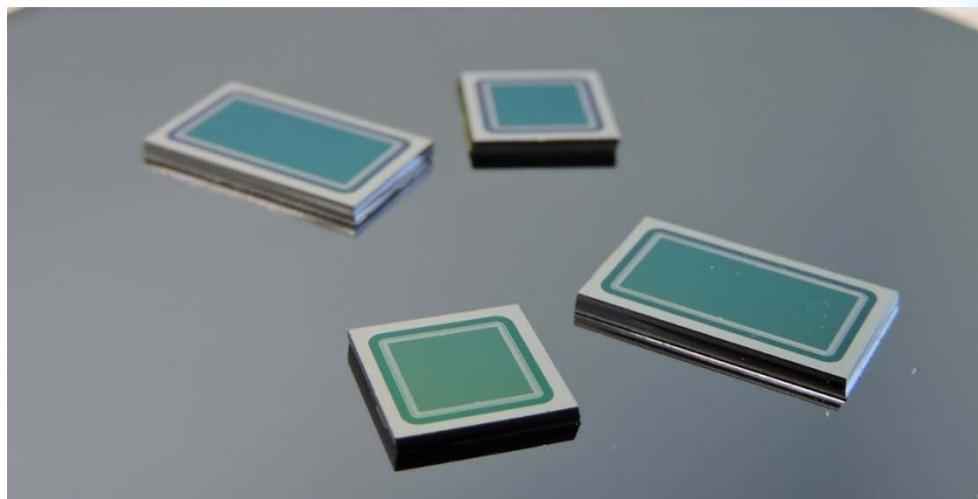
С учетом долгосрочного характера настоящего Соглашения Стороны решили, что их сотрудничество будет осуществляться в следующих областях, но не будет ограничиваться только ими:

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

ФГБУ «Петербургский институт
ядерной физики
им. Б.П. Константинова»
Вх. № 131-01 Дата 26.03.14.

Детекторы из особо чистого кремния



В 2019 в отделе продолжались работы по созданию **детекторов из особо чистого кремния (ОЧК)** по «**планарной технологии**». Основное преимущество этой технологии заключается в том что она обеспечивает очень **низкие темновые токи**. Для изготовления детекторов были использованы базы Зеленоградского НПО «Микроэлектроники» и Минского НПО «Интеграл». Пластины ОЧК с удельным сопротивлением больше 25 ком (концентрация остаточных примесей порядка 10^{11} см⁻³) были приобретены в фирме TOPSIL. Такие кристаллы дают возможность изготовить детекторы с глубиной чувствительной области до 2 мм. Структуры изготовленные по «**планарной технологии**» должны обеспечить малые токи при охлаждении до минус (60-70) С⁰.

p-i-n CdTe большого объема (до 1500 мм³)

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2019, № 2, с. 154–156

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

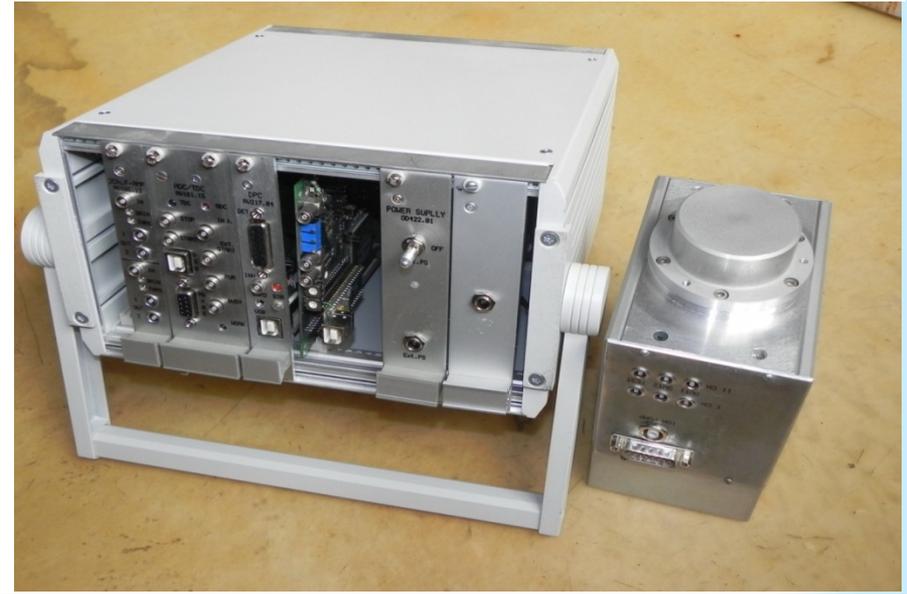
УДК 539.1.074

АНАЛИЗАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО И γ -ИЗЛУЧЕНИЯ “РАДИАНТ” НА ОСНОВЕ *CdTe-p-i-n*-ДЕТЕКТОРОВ

© 2019 г. А. Х. Хусаинов, А. В. Дербин, В. А. Соловей, В. Н. Муратова,
В. Г. Муратов, С. В. Бахланов, М. П. Жуков, Т. А. Антонова, В. В. Лысенко



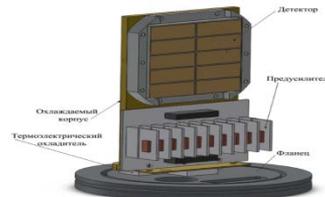
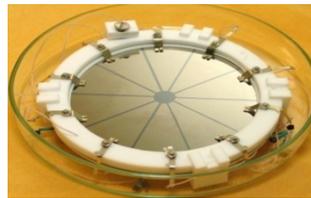
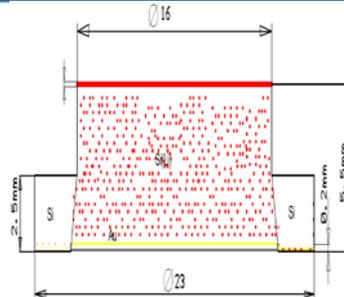
Блок детектирования *p-i-n CdTe*
большого объема



Анализатор импульсов с блоком детекти-
рования

Детекторы разработаны с использованием кристаллов *CdTe* японской фирмы ACROTEC. Для решения широкого круга задач (например, задач контроля МАГАТЭ) необходимо создание специальных малогабаритных блоков электроники. Работы ведутся с соисполнителями.

Детекторы с контактом из аморфного кремния

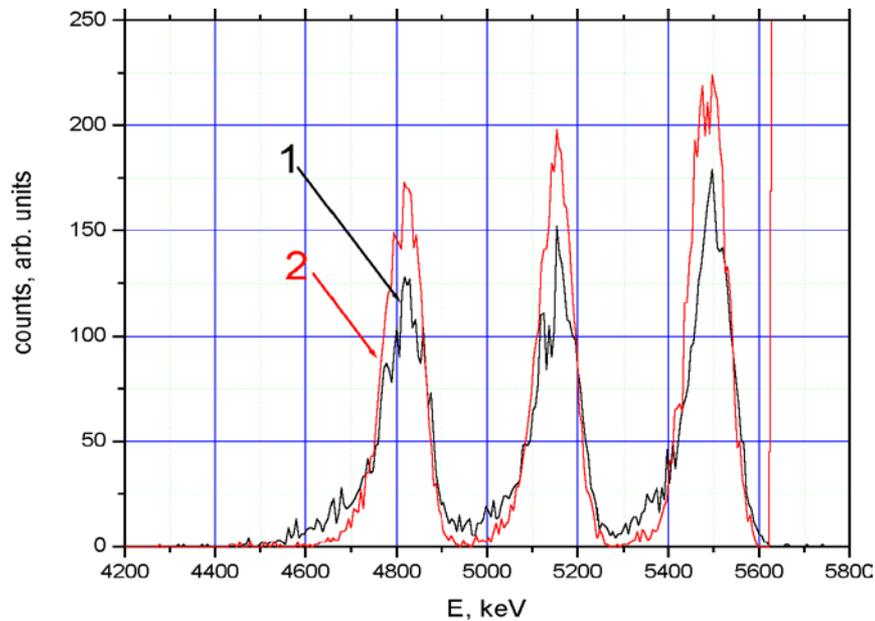


Необходимо проведение исследований по зависимости толщины мертвого слоя со стороны $n+$ контакта от поверхностного удельного сопротивления остающегося после сошлифовки «избыточного» Li в поверхностном слое.
Совместно с ФТИ и СПбГУ.

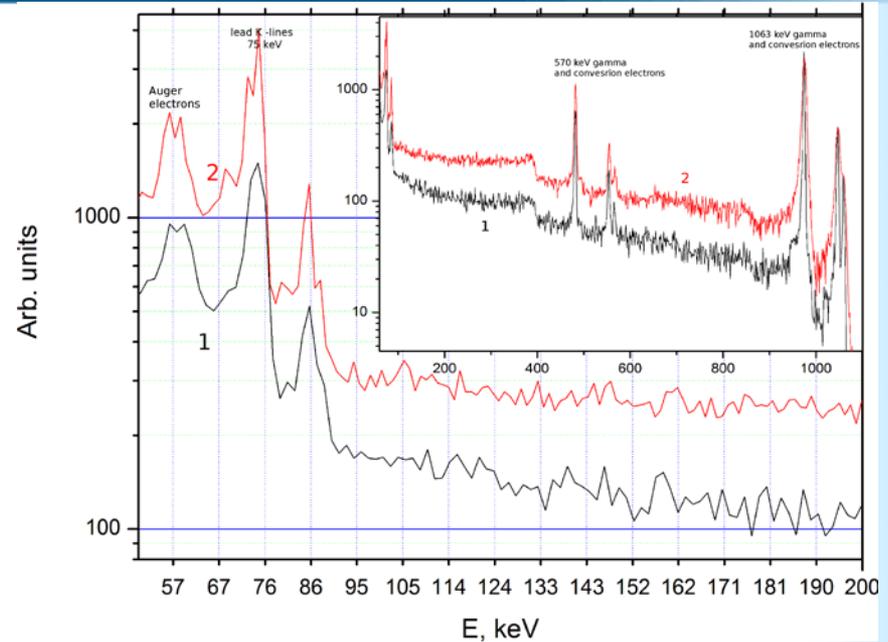


В ПИЯФ созданы технологические установки нанесения аморфного кремния на поверхность кремния компенсированного литием **магнетронным (MASD) методом**. В первую очередь необходима минимизация толщины входного окна со стороны Li ($n+$ контакт). Обычно это осуществляют путем сошлифовки «избыточного» Li и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

Двухсторонние Si(Li) детекторы с ультратонкими мертвыми слоями



α -спектры: $^{239}\text{Pu}(5.15)+^{238}\text{Pu}(5.5)+^{233}\text{U}(4,8)$.
1-облучение со стороны Li-контакта;
2-со стороны Pd-контакта. $T=300\text{K}$, 600V .



Низкоэнергетическая часть спектра ^{207}Bi
1-облучение со стороны Li контакта;
2- со стороны Pd контакта. $T=77\text{K}$, 600V .

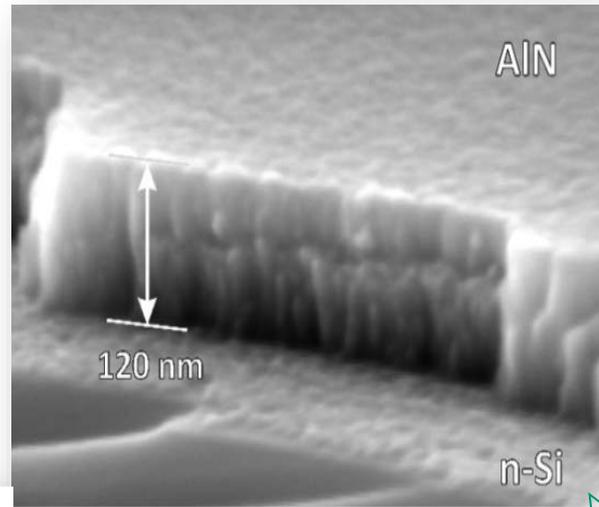
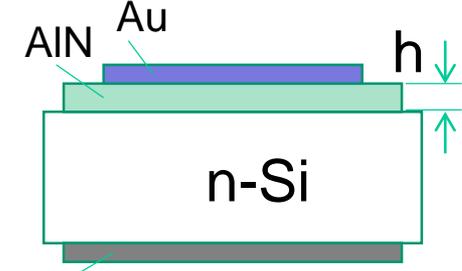
В Отделе разработана и постоянно совершенствуется технология пролетных Si(Li) детекторов с ультратонкими мертвыми слоями со стороны n- и p-контактов. Технология основана на использовании гетероконтакта **a-Si:H/c-Si** со стороны литиевого контакта и специальной жидкохимической обработки со стороны палладиевого контакта.

При температуре жидкого азота толщина входного окна детектора определялась путем регистрации энергетических потерь Оже-электронов источника ^{207}Bi при различных напряжениях обратного смещения. При комнатной температуре регистрировались энергетические потери коллимированного источника α -частиц в зависимости от угла облучения.

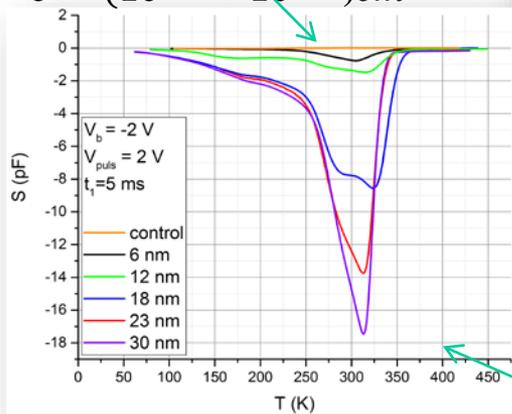
Изучение структур Au-AlN-(n-Si) (+СПБГУ)

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.

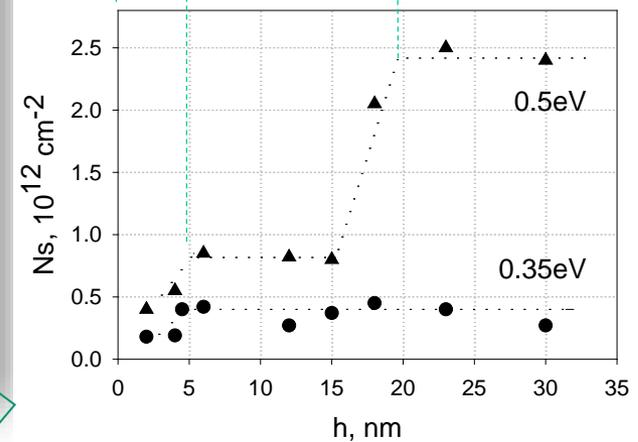
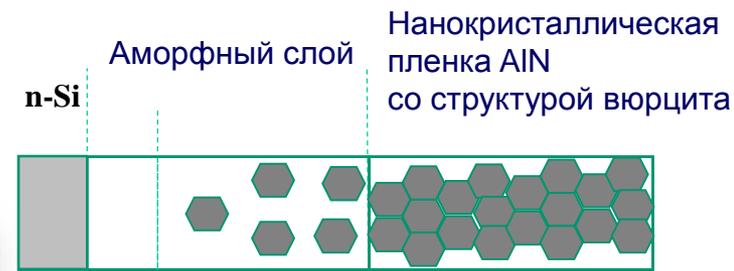


Al-Ga
 $E_t = 0.35 \text{ eV}$
 $\sigma = (10^{-16} : 10^{-14}) \text{ cm}^2$



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

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

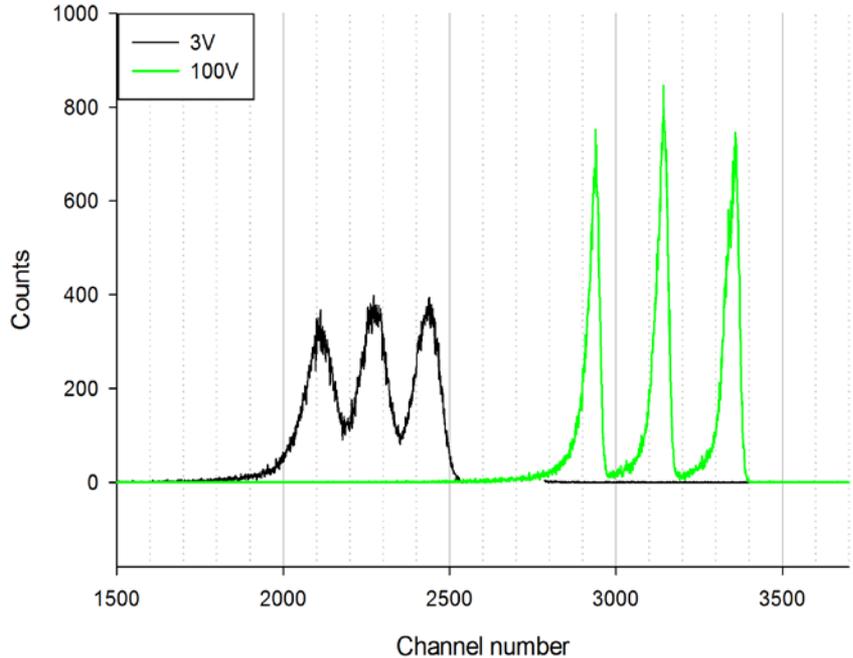
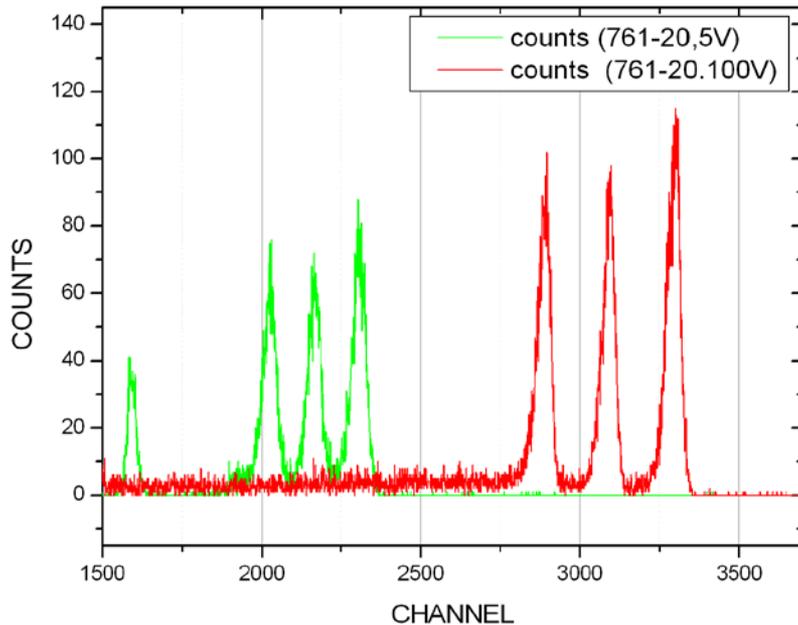


Зависимости величин поверхностной плотности электронных ловушек от толщины пленки AlN

Выводы :

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

МДП структуры на p-Si



$\rho=2\text{кОм}\cdot\text{см}$, $S=90\text{ мм}^2$, окисление в 70% HNO_3 , 300K
HV=5V, $E=5.15\text{ MeV}$ FWHM=94 keV
HV=100V, $E=5.15\text{ MeV}$, FWHM=62keV

$\rho = 2\text{кОм}\cdot\text{см}$, $S=90\text{ мм}^2$, окисление в 70% HNO_3 , 400K
HV=100V, $E=5150\text{ MeV}$ FWHM=65keV

Проведены исследования электрофизических и спектрометрических характеристик структур $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$ с химическими окислами, созданными различными способами: окисление в концентрированной азотной кислоте при комнатной температуре и в кипящей кислоте. α -спектры тройного источника $^{239}\text{Pu}(5.15\text{MeV})+^{238}\text{Pu}(5.4\text{MeV})+^{233}\text{U}(4.8\text{MeV})$. Структуры $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$

Установка для исследования фотоэлектрических свойств широкозонных полупроводников



СПбГУ,
физический факультет,
кафедра электроники твердого тела

- Рабочий диапазон длин волн оптической системы (2500 – 200) нм, соответствующий энергиям квантов (0.5 – 6.2) эВ.
Источник света – ксеноновая лампа сверхвысокого давления ДКсШ-500.
Монохроматор – ЗМР-3.
- Чувствительность по току при измерении проводимости образца 10^{-12} А.
- Азотный прокачной криостат с блоком управления обеспечивает изменение температуры образца с заданной скоростью в диапазоне (80 – 420) К либо стабилизацию температуры с точностью 0.01 К.
- Развертки по длине волны и температуре осуществляются в автоматическом режиме. Программы управления работают в среде LabView.

Планы Отдела на 2021 г.

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

1.1 Поддержка п/п детекторов в ПИЯФ

1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров ^{210}Bi

1.3 Si-детекторы осколков калибровочного источника ^{252}Cf

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

1.5 Si(Li) для экспериментов IAXO (детекторы активной защиты)

1.6 Детекторы из высокоомного кремния по планарной технологии

2. Изучение характеристик п/п детекторов и МДП структур (рук. И.М. Котина, М.В. Трушин)

2.1 Исследование радиационной стойкости п/п (Si) детекторов.

2.2 Изучение фото чувствительности МДП структур на Si и влияния пассивации на характеристики п/п детекторов

2.3 Детекторы с двухсторонним тонким окном

2.4 МДП (aSi:H/cSi и AlN) структуры на Si-детекторах (с СПбГУ)

2.5 Дрейф лития на $x > 8$ мм

Спасибо за внимание!