

# 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, снс. кфмн
- 5) И.М. Котина, снс, кфмн
- 6) О.И. Коньков, снс, кфмн
- 7) И.С. Драчнев, снс, PhD, кфмн
- 8) Н.В. Базлов, нс
- 9) Е.В. Унжаков, снс.
- 10) М.В. Трушин, кфмн, снс
- 11) Н.В. Пилипенко, аспирант лаб.-иссл.
- 12) И.С. Ломская, аспирант лаб.-иссл.
- 13) М.С. Микулич, 5 курс СПбГТУ-ТИ
- 14) Студент 4-го курса СПбГУ

В отделе – 24 (26) чел.

1 дфмн; 7 кфмн; внс – 2; снс – 7; нс – 1; мнс – 0; асп. – 2; вед.инж.-9; инж.-2; рег. ап. - 1; сл.мех.-1; студ. совм. – 2; ( $\Sigma 12$  нс) + группа ОИЯИ

## Группа физики и технологии п/п детекторов

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

## Группа Радиохимии

- 1) С.И. Лашаев, вед. инж.
- 2) В.М. Тюнис вед. инж.

## Конструкторский технологический участок

- 1) А.Д. Майанцев инженер
- 2) А.П. Михайлов регулировщик р.а.
- 3) В.А. Радаев слесарь мех.сб.р.

# Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



## Состав (12 (ставок?) чел.):

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

Н. Ниязова, аспирант ПИЯФ  
И.С. Ломская, аспирант ПИЯФ  
М.С. Микулич, 5 курс СПбГТУ-ТИ  
Студент 4-го курса СПбГУ  
**2ст+2асп+0мнс+1нс+7снс+1внс**  
**1 д.ф.м.н. и 6 к.ф.м.н.**

# Отдел и Лаборатория в 2020-21 году

Работы проводились по 4 основным направлениям:

## 1) *Нейтрино,*

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

## 2) *Темная материя*

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

## 3) *Изучение характеристик п/п детекторов и МДП структур*

(рук. И.М. Котина, М.В. Трушин)

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

# Содержание доклада (40 мин.)

## 1) Наукометрические показатели

### Нейтрино

## 2) Эксперимент Борексино в 2020-21 году. Новые результаты.

2.1 Первая регистрация нейтрино из CNO-цикла

*Nature*

2.2 Поиск нейтрино от астрофизических источников

*Astropart. Phys*

2.3 Новый анализ сигналов от гео-нейтрино

*Phys. Rev. D*

2.4 Ограничения на нестандартные взаимодействия нейтрино

*JHEP*

2.5 Поиск сигналов в Борексино от FRBs

*arXiv->EPJ C*

2.6 Идентификация распадов космогенного  $^{11}\text{C}$

*EPJ C*

2.7 Первое измерение направления  $^7\text{Be}$ -нейтрино в ЖС

*ArXiv->PRD*

3) Измерения бета-спектр  $^{210}\text{Bi}$  для CNO-нейтрино

*Phys. Rev. C.*

4) Измерения бета-спектров  $^{144}\text{Pr}$  и  $^{210}\text{Bi}$  с 4π Si(Li)-спектрометром ПТЭ

### Темная материя (WIMPs и аксионы)

5) Поиск поглощения солн. аксионов ядром  $^{83}\text{Kr}$  в БНО ИЯИ *J.of Phys. CS*

6) Поиск солн. аксионов с помощью Tm-болометров. *EPJ C, NIM*

7) Поиск WIMPs в exper. *DarkSide*. SN. Источник  $n's - ^{252}\text{Cf} + \text{Si}$  *JCAP*

8) Физическая программа эксперимента *IAXO, babyIAXO* *JHEP*

9) Работы по п/п детекторам и МДП структурам *4x J. of Phys.*

10) Планы на 2022 год.

# Публикации в 2020 г. (16+8) (+1 РИД)

## 16 публикаций в индексируемых 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  $\alpha$ -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  $^{169}\text{Tm}$ -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 arXive 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  $^{210}\text{Bi}$   $\beta$ -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  $^{169}\text{Tm}$ -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»**

# Публикации в 2021 г. (15+11)

## 15 публикаций в индексируемых журналах (WoS & Scopus)

1. 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  $^{210}\text{Bi}$   $\beta$ -spectrum, *Phys. Rev. C* 102, 064329 (2020)
2. Z A Akhmatov, S S Berezin, Yu M Gavriluyuk, A M Gangapshev, A V Derbin, I S Drachnev, V V Kazalov3, A Kh Khokonov, V V Kobychhev, V V Kuzminov, V N Muratova, S I Panasenko, S S Ratkevich, D A Tekueva, E V Unzhakov and A Yu Zavrazhnov, Search for hadronic solar axions, *Journal of Physics: Conference Series* 1787 (2021) 012036
3. C. E. Aalseth et al., (DarkSide-20K Coll.), SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range, *Eur. Phys. J. C* (2021) 81:153
4. P. Agnes et al., (DarkSide-20K Coll.), Sensitivity of future liquid argon dark matter search experiments to core-collapse supernova neutrinos, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* JCAP03(2021)043
5. P. Agnes et al., (DarkSide - 20K Coll.) Separating  $^{39}\text{Ar}$  from  $^{40}\text{Ar}$  by cryogenic distillation with Aria for dark-matter searches, *European Physical Journal* C81 (2021) 4, 359
6. И.Е. Алексеев, 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, Кремниевый 4 $\pi$ -спектрометр электронов  $\beta$ -распада с энергией до 3МэВ, *Приборы и Техника Эксперимента*, 2021, № 2, с. 19–24
7. P. Agnes et al. (DarkSide Collaboration), Calibration of the liquid argon ionization response to low energy electronic and nuclear recoils with DarkSide-50, *Phys. Rev. D* 104, 082005 (2021)
8. S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, O.I. Konkov, I.M. Kotina, A.M. Kuzmichev, I.S. Lomskaya, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, Degradation of silicon detectors under long-term irradiation by  $^{252}\text{Cf}$  fission products, *Journal of Physics: Conference series*, 2103 (2021) 012138
9. S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, I.D. Chernobrovkin, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, O.I. Konkov, A.M. Kuzmichev, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, M.V. Trushin and E.V. Unzhakov, Influence of  $\alpha$ -particles irradiation on the properties and performance of silicon semiconductor detectors, *Journal of Physics: Conference series*, 2103 (2021) 012139
10. I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, A.M. Kuzmichev, I.S. Lomskaya, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin and E.V. Unzhakov, New measurement of the  $\beta$ -spectrum of  $^{210}\text{Bi}$  with a silicon 4 $\pi$ -spectrometer, *Journal of Physics: Conference series*, 2103 (2021) 012144
11. A H Abdelhameed1, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.M. Kuzmichev, I.S. Lomskaya, V N Muratova, D A Semenov, M V Trushin, E.V. Unzhakov, A new limit on the resonant absorption of solar axions obtained via  $^{169}\text{Tm}$ -containing bolometer, *Journal of Physics: Conference series*, 2103 (2021) 012142
12. I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, I.S. Lomskaya, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin and E.V. Unzhakov,  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  spectrum measurement with 4 $\pi$  semiconductor-spectrometer, *Journal of Physics: Conference series*, 2103 (2021) 012141
13. M. Agostini et al., (Borexino Coll.) Identification of the cosmogenic  $^{11}\text{C}$  background in large volumes of liquid scintillators with Borexino, *Eur. Phys. J. C* (2021) 81:1075
14. A. Abeln et al., (IAXO Coll.) Conceptual design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory, *Journal of High Energy Physics*, 2021, 2021(5), 137
15. A. Abeln et al., (IAXO Coll.) Axion search with BabyIAXO in view of IAXO, *Proceedings of Science*, 2021, 390, 631

# Публикации 2021 г. (15+11)

## 11 публикаций в arXiv и в Proceedings

1. S.V. Bakhlanov, N. V. Bazlov, D.V. Danilov, A. V. Derbin, I. S. Drachnev, I. M. Kotina, O. I. Konkov, A.M. Kuzmichev, M.S. Mikulich, V. N. Muratova, M. V. Trushin, E. V. Unzhakov, Influence of alpha-particles irradiation on the performance and defect levels structure of Al/SiO<sub>2</sub>/p-type Si surface barrier detector, arXiv:2101.03729
2. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Separating <sup>39</sup>Ar from <sup>40</sup>Ar by cryogenic distillation with Aria for dark matter searches, arXiv:2101.08686v2 [physics.ins-det] 23 Jan 2021
3. A. Abeln et al., (IAXO Coll.), Axion search with BabyIAXO in view of IAXO, arXiv:2012.06634v1 [physics.ins-det] 11 Dec 2020
4. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Identification of the cosmogenic <sup>11</sup>C background in large volumes of liquid scintillators with Borexino, arXiv: 2106.10973
5. S. Kumaran et al., (Borexino Coll.) The Low Polonium Field of Borexino and its significance for the CNO neutrino detection, arXiv: 2105.13209
6. G. Settanta et al., (Borexino Coll.), First detection of CNO neutrinos with Borexino, arXiv:2105.09211
7. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Calibration of the liquid argon ionization response to low energy electronic and nuclear recoils with DarkSide-50, arXiv: 2107.08087
8. P. Agnes et al., (DarkSide -50 Coll.), A study of events with photoelectric emission in the DarkSide-50 liquid argon Time Projection Chamber, arXiv: 2107.08015
9. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), First demonstration of directional measurement of sub-MeV solar neutrinos in a liquid scintillator detector with Borexino, arXiv: 2109.04770
10. S. Appel et al., (Borexino Coll.), Search for Low-Energy Signals from Fast Radio Bursts with the Borexino Detector, arXiv: 2111.14500
11. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), First Directional Measurement of sub-MeV Solar Neutrinos with Borexino, arXiv:2112.11816

# Доклады на конференциях и семинарах в 2020 г.

## 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  $\gamma$ -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  $^{210}\text{Bi}$  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  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  beta-spectra with  $4\pi$  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  $^{83}\text{Kr}$  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  $\beta$ -spectra of  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  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  $\alpha$ -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

# Доклады на конференциях и семинарах в 2021 г.

## 15 докладов (8 чел) и выступлений на конференциях и семинарах

1. **А.В. Дербин**, New experiment searching for solar axions with Tm-containing cryogenic bolometer, 16th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, 14-18 June, 2021
2. **И.С. Драчнев**, Searches for Borexino signals associated with FRBs, Borexino General Meeting, 21-22 June, LNGS, On-line
3. **А.В. Дербин**, Search for heavy sterile neutrinos in beta-decay of  $^{144}\text{Pr}$  nuclei "LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 20-25 Oct, St. Petersburg, on-line
4. **В.Н. Муратова**, Precision measurements of  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  beta-spectra with Si(Li)-spectrometers "LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 20-25 Oct, St. Petersburg, on-line
5. **М.С. Микулич**, Degradation of Si-based detectors parameters under long-term irradiation by  $^{252}\text{Cf}$  fission products at room and liquid nitrogen temperatures "LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 20-25 Oct, St. Petersburg, on-line
6. **I.S. Lomskaya**, I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D. A. Semenov, M.V. Trushin and E.V. Unzhakov,  $^{144}\text{Ce}$  -  $^{144}\text{Pr}$  spectrum measurement with 4pi semiconductor spectrometer, International Conference Physica. SPb/2021, 18-22 Oct 2021.
7. **M.V. Trushin**, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, O.I. Konkov, I.M. Kotina, A.M. Kuzmichev, I.S. Lomskaya, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, and E.V. Unzhakov, Degradation of silicon detectors under long-term irradiation by  $^{252}\text{Cf}$  fission products, International Conference Physica. SPb/2021, 18-22 Oct 2021.
8. **M.S. Mikulich**, S.V. Bakhlanov, N.V. Bazlov, I.D. Chernobrovkin, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, O.I. Konkov, A.M. Kuzmichev, V.N. Muratova, M.V. Trushin and E.V. Unzhakov, Influence of  $\alpha$ -particles irradiation on the properties and performance of silicon semiconductor detectors, International Conference Physica. SPb/2021, 18-22 Oct 2021.
9. **N.V. Niyazova**, I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I S Drachnev, I M Kotina, A M Kuzmichev, I S Lomskaya, M S Mikulich, V N Muratova, D A Semenov, M V Trushin and E V Unzhakov, New measurement of the  $\beta$ -spectrum of  $^{210}\text{Bi}$  with a silicon  $4\pi\beta$ -spectrometer, International Conference Physica. SPb/2021, 18-22 Oct 2021.
10. **E.V. Unzhakov**, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.M. Kuzmichev, I.S. Lomskaya, V N Muratova, D A Semenov, M V Trushin, A new limit on the resonant absorption of solar axions obtained via  $^{169}\text{Tm}$ -containing bolometer, International Conference Physica. SPb/2021, 18-22 Oct 2021.
11. **М.С. Микулич**, И.Е. Алексеев, С.В. Бахланов, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, И.М. Котина, И.С. Ломская, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков, Прецизионные измерения  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$ , VIII Всероссийский научный форум «Open Science 2021», Гатчина, 17-19 ноября, 2021 г.
12. **И.С. Ломская** для коллаборации Борексино, Поиск сигналов от транзитных астрофизических источников в детекторе Borexino, VIII Всероссийский научный форум «Open Science 2021», Гатчина, 17-19 ноября, 2021 г.
13. **И. С. Драчнев**, С. В. Бахланов, А. В. Дербин, И. М. Котина, В. Н. Муратова, Н. В. Ниязова, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков, Е. А. Чмель, Бета-спектрометры на основе полупроводниковых детекторов VIII Всероссийский научный форум «Open Science 2021», Гатчина, 17-19 ноября, 2021 г.
14. **I. Lomskaya**, A. Derbin, I, Drachnev, V, Muratova, N. Pilipenko, D. Semenov, E. Unzhakov, "Updated limits on the fluence of low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events including recent GWTC3 database", Borexino General Meeting, 30 Nov-2 Dec, 2021, LNGS
15. **I. Drachnev**, A. Derbin, I. Lomskaya, V, Muratova, N. Pilipenko, D. Semenov, E. Unzhakov, "Updated result for low-energy Borexino signals in correlation with GRBs", Borexino General Meeting, 30 Nov-2 Dec, 2021, LNGS

# Диссертации, аспирантура, магистратура

**Давно подготовлена 1 кандидатская диссертация**  
**«Поиск солнечных аксионов с помощью резонансного поглощения**  
**ядрами  $^{169}\text{Tm}$  и  $^{83}\text{Kr}$ »**  
**(Е.В. Унжаков, 2022)**

**Получено подтверждение PhD = кфмн (И.С. Драчнев, 2021)**

**Аспирантура ПИЯФ -> к.ф.м.н.**

**«Изучение бета-спектров источника электронных антинейтрино**  
 **$^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  с помощью полупроводниковых детекторов для поиска**  
**осцилляций нейтрино в стерильное состояние.»**  
**(Н. Ниязова, с 2017 г., рук. А.В. Дербин)**

**«Поиск редких низкоэнергетических событий от астрофизических**  
**источников с детектором Борексино»**  
**(И. Ломская, 2019, рук. И.С. Драчнев / А.В. Дербин)**

**Специалитет ТУ (2022) -> Аспирантура ПИЯФ (2022)**  
**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 / А.В. Дербин)**

# **1 грант РФФ и 2РФФИ в 2021 г., 2РФФ и 1РФФИ в 2022 г.**

## **гранты РФФ**

### **1. Грант РФФ 21-12-00063**

**Исследования Солнца, Земли, других астрофизических объектов и редких физических процессов с помощью нейтринной спектроскопии на полном наборе данных детектора Борексино.**

**руководитель *Дербин Александр Владимирович* НИЦ КИ ПИЯФ**

### **2. Получен грант РФФ 22-22-00017**

**Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов атомными ядрами  $^{169}\text{Tm}$**

**руководитель *Муратова Валентина Николаевна* НИЦ КИ ПИЯФ**

## **гранты РФФИ**

### **1. Грант РФФИ А 19-02-00097**

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

**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**

# Премии и награды (2020)



## «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<sup>1,2</sup>. Neutrinos that are emitted along such fusion processes in the solar core are the only direct probe of the

*7 авторов (из 95) работы из списка «PhysicsWorld 10 прорывов года» во всех разделах физики.*

*А.В. Дербин, В.Н. Муратова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков, И.С. Драчнев, Н.В. Ниязова, И.С. Ломская*

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

# Премии и награды (2021)

The EPS European Physical Society has awarded the prestigious "Giuseppe and Vanna Cocconi Prize 2021" to the scientific collaboration Borexino.

*А.В. Дербин, В.Н. Муратова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков, И.С. Драчнев,  
Н.В. Ниязова, И.С. Ломская*



В 2021 году коллаборация была удостоена престижной премии Д.&В. Коккони Европейского физического общества за выдающийся вклад в астрофизику элементарных частиц и космологию, а именно, за новаторское наблюдение солнечных нейтрино из рр-цепочки и CNO-цикла.

*Вторая премия на конкурсе лучших работ ПИЯФ*

*«Новый эксперимент по поиску солнечных аксионов с Tm-содержащим криогенным болометром».*

# Новые результаты Борексино (2020-21)

**2021 год: Сигналы Вх и быстрых радиовсплесков**  
Идентификация космогенного  $^{11}\text{C}$ ; - Выделение направления  $^7\text{Be}$  нейтрино

**2020 год: CNO-нейтрино; (PNCI  $\beta$ -спектр  $^{210}\text{Bi}$ )**  
- vs от астрофизических источников; - Гео- vs; - Нестандартные взаимодействия vs

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

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

**2014 год:** pp-нейтрино.

**2012 – год  $A_{\text{Solar}}$  и  $V_{\text{neutrino}}$**   
• Солнечные аксионы.  
• Скорость нейтрино.  
• Начало Фазы 2

**2010 – год антинейтрино**

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

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

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

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

**2013 год** - Тяжелое стерильное нейтрино.

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

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

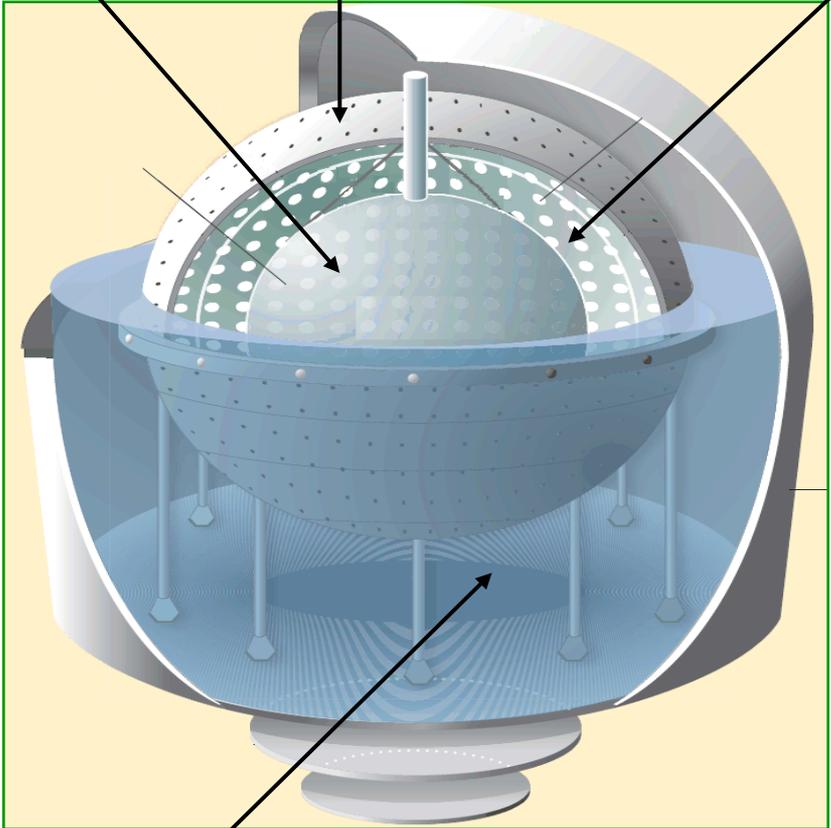
1. Вариации день-ночь для  $^7\text{Be}$ - $\nu$
2. Обнаружены ppe-нейтрино
3. Поток  $^7\text{Be}$ - $\nu$  измерен с 5% точ.

# Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

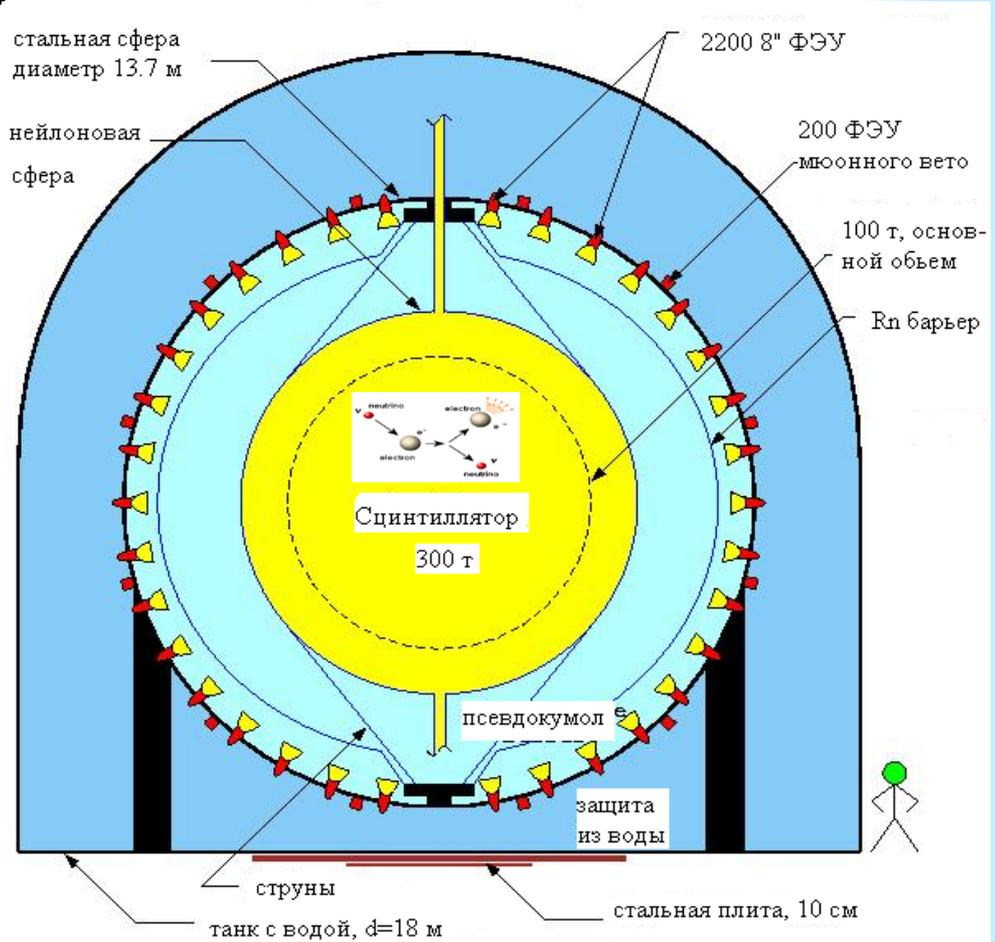
278 т. PC+PPO  
(1,5 г/л)

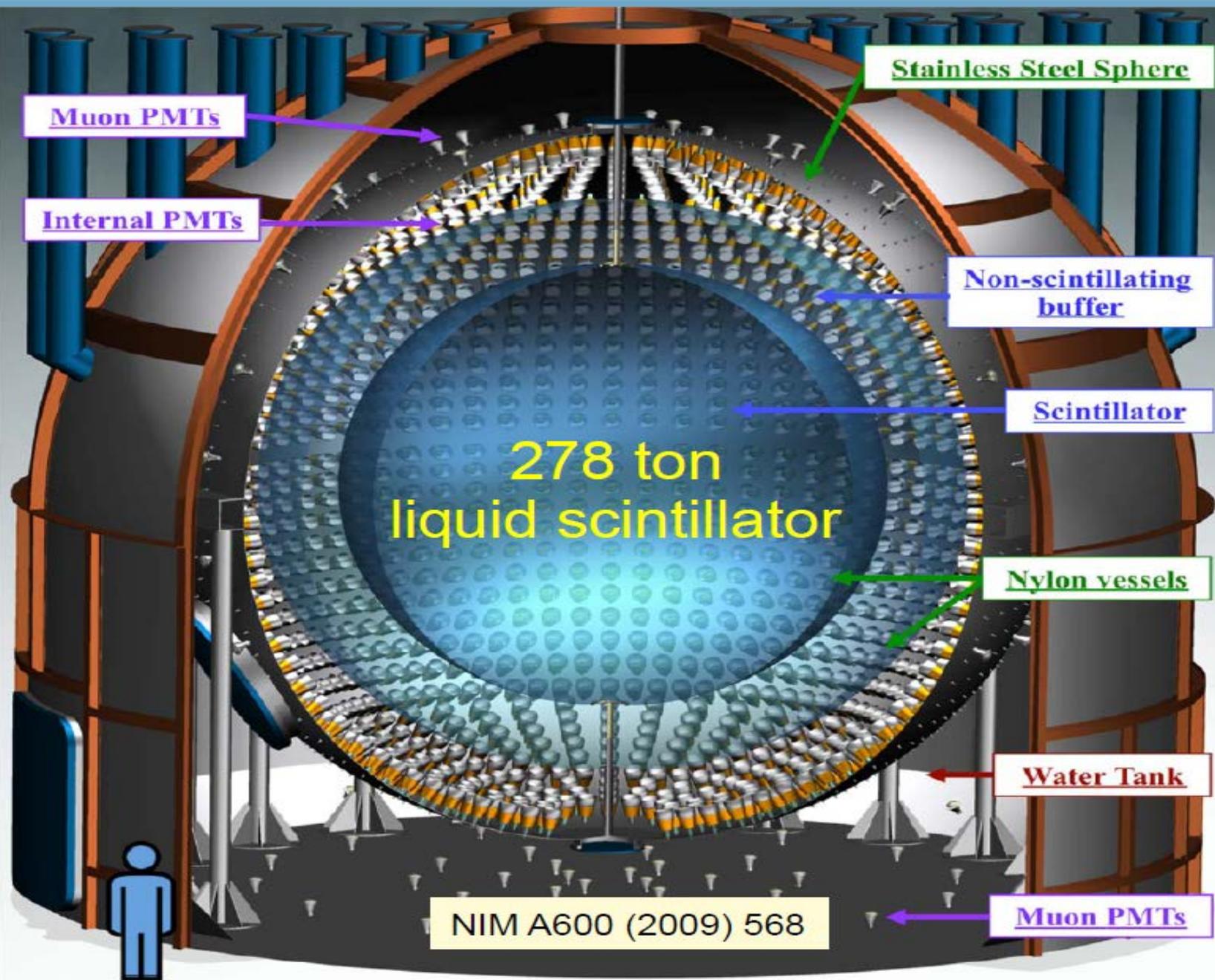
Стальная сфера (R=6,85 м)  
- 2212 8" ФЭУ;  
- 1350 м<sup>3</sup> PC+DMP (5,0 г/л)

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

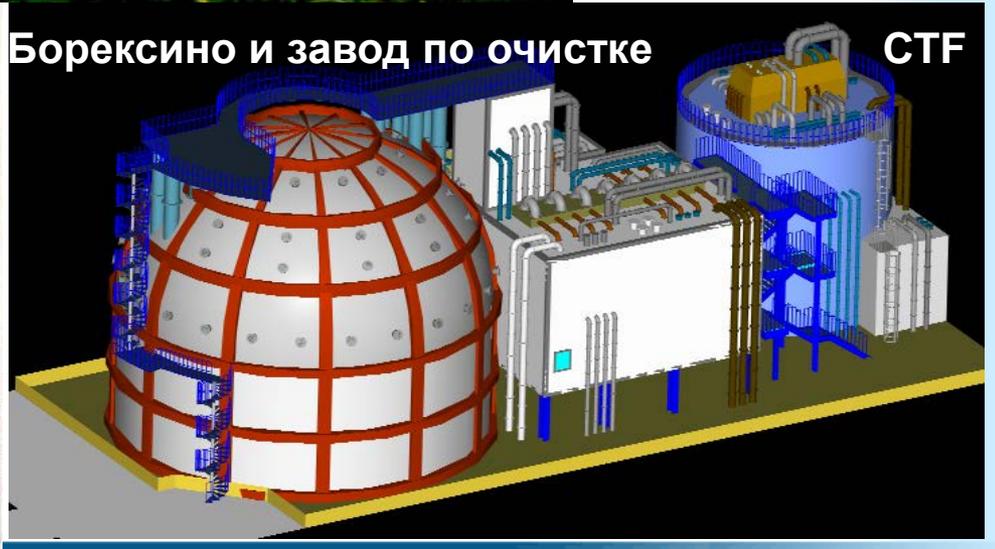
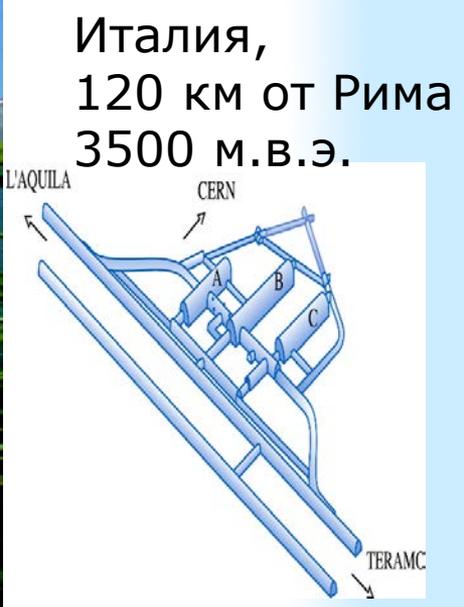
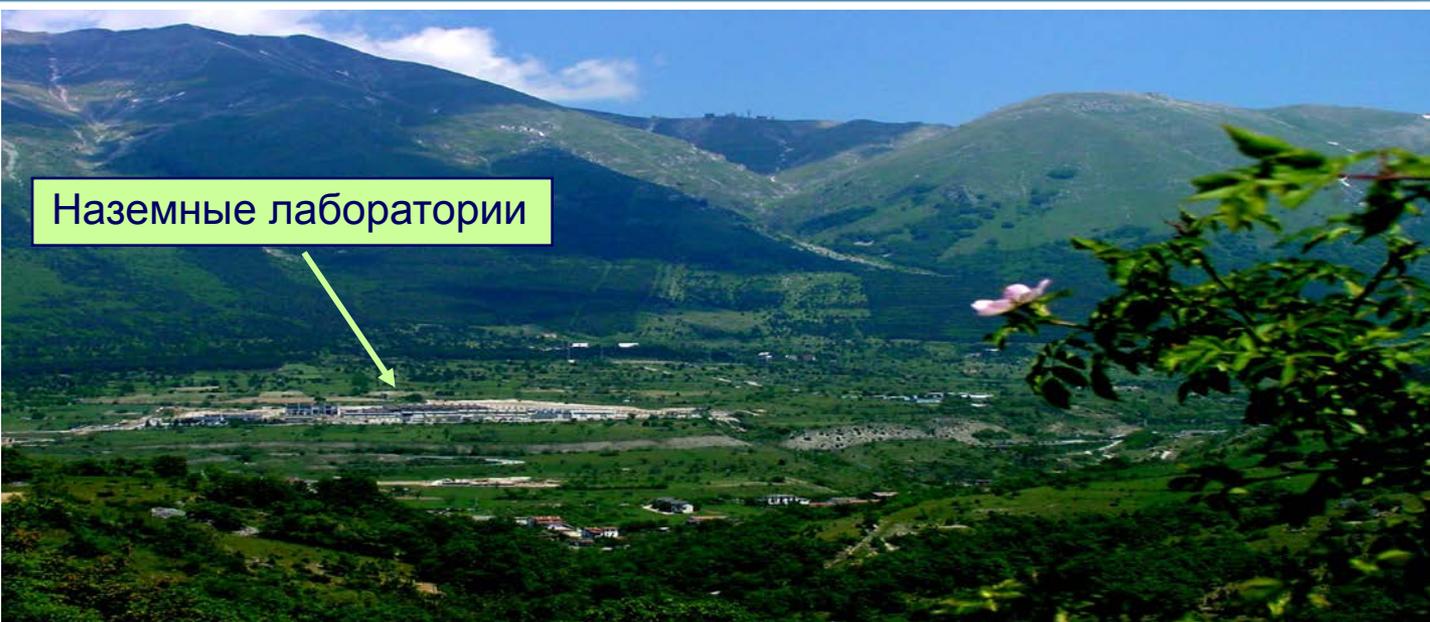


2100 м<sup>3</sup> водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;  
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;  
- защита от  $\mu$ ,  $\gamma$  и  $n$



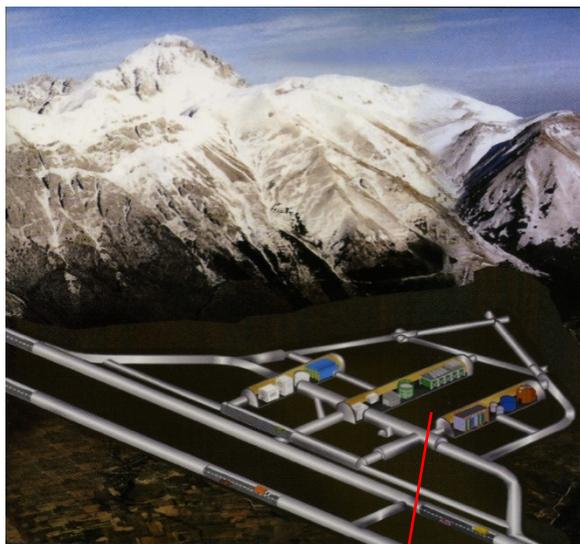


# Национальная лаборатория Гран Сассо





# 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  $\nu$ )

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  $\nu$ -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 2 чел./мес. в экспериментах Borexino и DarkSide

# Рабочие группы Вх и вклад ПИЯФ в 2021г.

Входим в состав 6 (из 12) рабочих групп:

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

1. Группой ПИЯФ выполнены прецизионные измерения бета-спектра  ${}^{210}\text{Bi}$  с новым  $4\pi\beta$ -спектрометром. Параметры ядерного формфактора согласуются с нашими предыдущими результатами, полученными в эксперименте по схеме «мишень-детектор», которые использовались для определения вклада в фон  $\text{Borexino}$  от  ${}^{210}\text{Bi}$  при анализе сигналов от CNO-нейтрино. Результаты опубликованы в *Jour. of Phys.*

2. Группа ПИЯФ продолжила поиск корреляций низкоэнергетических событий в детекторе  $\text{Borexino}$  с быстрыми радиовсплесками (FRBs). Коллаборацией получены новые ограничения на флюенсы нейтрино всех флейвов, связанные FRBs. Результаты опубликованы в arXive и направлены в *European Physical Journal C*.

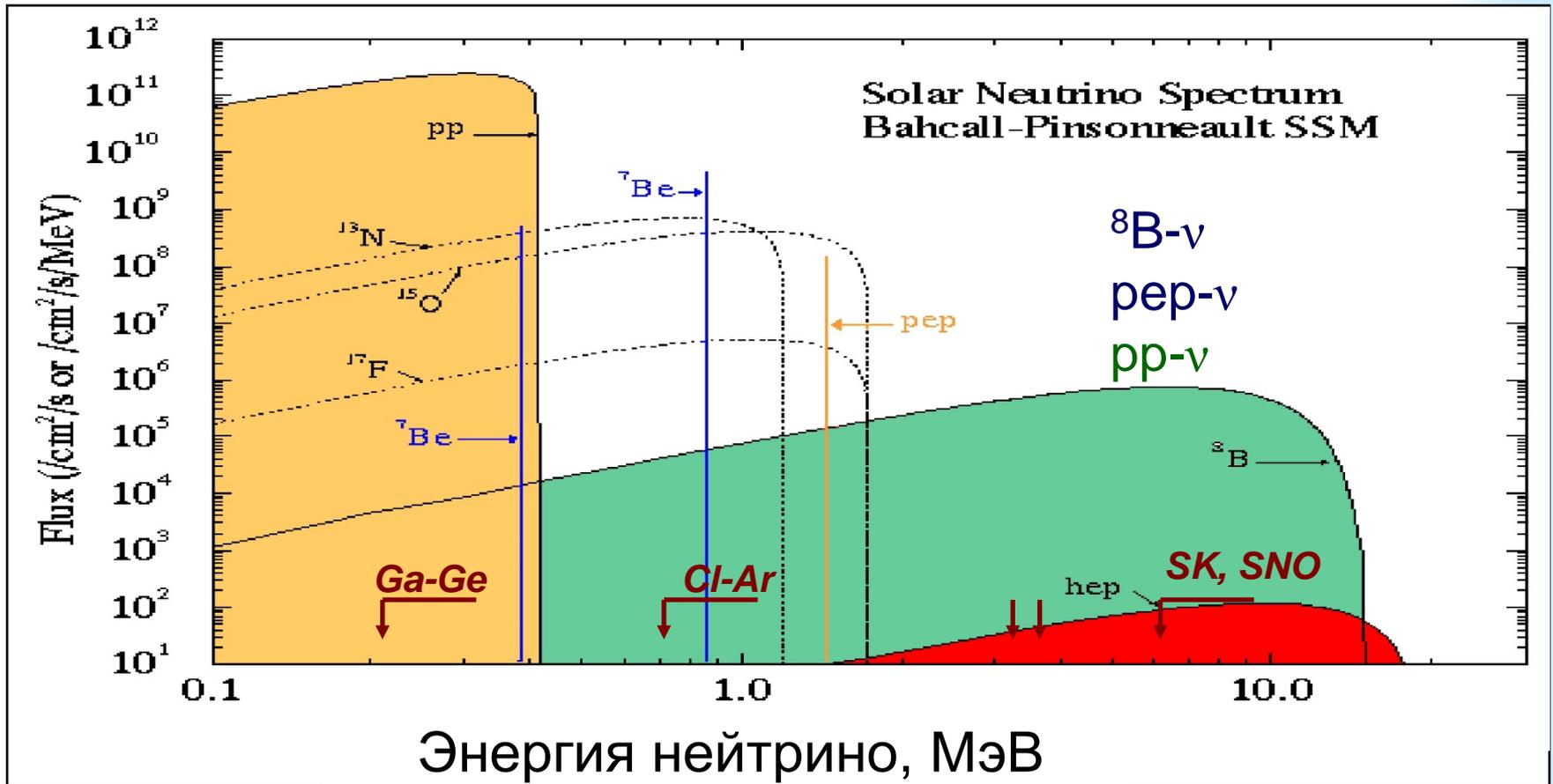
3. Коллаборацией подготовлена статья по идентификации распадов космогенного  ${}^{11}\text{C}$ . Результаты опубликованы в *European Physical Journal C*.

4. Впервые удалось выделить направление солнечных  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино используя черенковское излучение электронов отдачи в ЖС.

5. Удаленная работа в Гран Сассо в экспериментах  $\text{Borexino}$  и  $\text{DarkSide}$

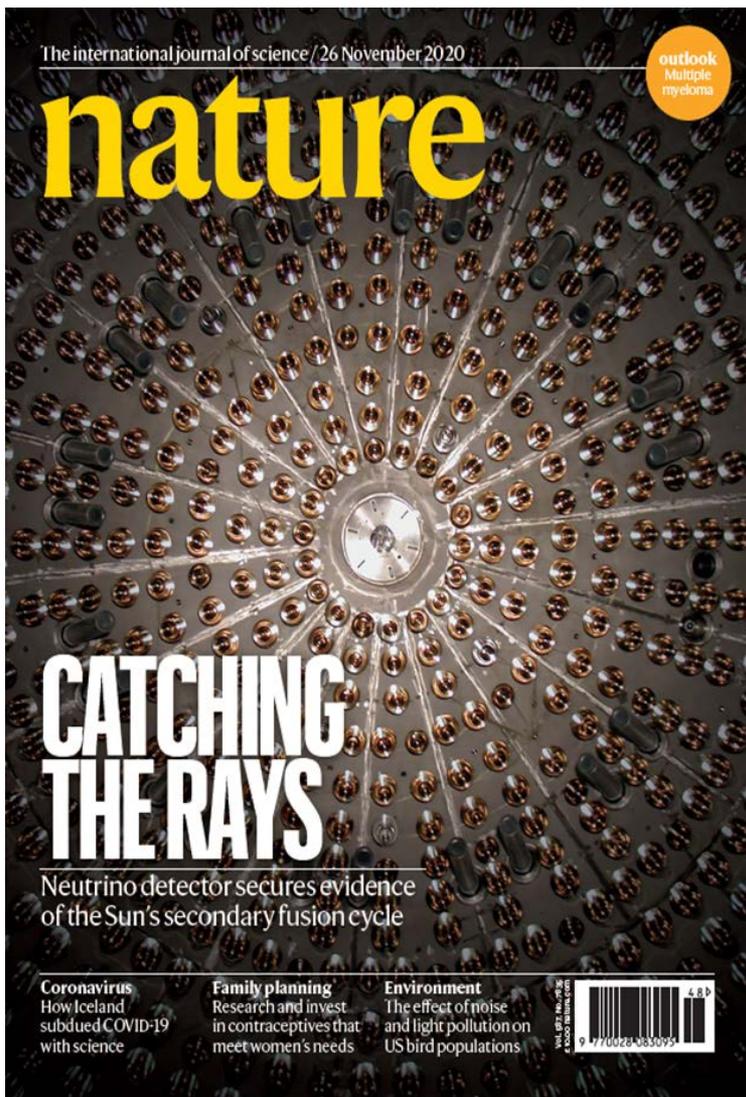
# Основная задача БОРЕКСИНО -

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



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

# 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\*

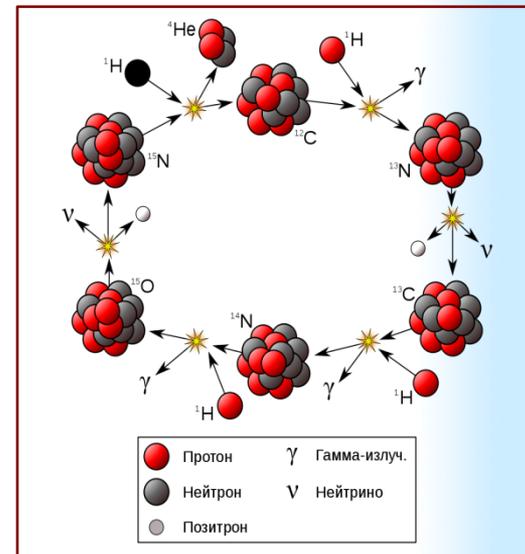
Received: 26 June 2020

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<sup>1,2</sup>. Neutrinos that are emitted along such fusion processes in the solar core are the only direct probe of the



# Регистрация CNO-нейтрино (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\*

M. Agostini<sup>1,2</sup>, K. Altenmüller<sup>2</sup>, S. Appel<sup>2</sup>, V. Atroshchenko<sup>3</sup>, Z. Bagdasarian<sup>4,27</sup>, D. Basilico<sup>5</sup>, G. Bellini<sup>5</sup>, J. Benziger<sup>6</sup>, R. Blondi<sup>7</sup>, D. Bravo<sup>5,28</sup>, B. Caccianiga<sup>5</sup>, F. Calaprice<sup>8</sup>, A. Caminata<sup>9</sup>, P. Cavalcante<sup>10,29</sup>, A. Chepurinov<sup>11</sup>, D. D'Angelo<sup>5</sup>, S. Davini<sup>9</sup>, A. Derbin<sup>12</sup>, A. Di Giacinto<sup>7</sup>, V. Di Marcello<sup>7</sup>, X. F. Ding<sup>8</sup>, A. Di Ludovico<sup>8</sup>, L. Di Noto<sup>9</sup>, I. Drachnev<sup>12</sup>, A. Formozov<sup>5,13</sup>, D. Franco<sup>14</sup>, C. Galbiati<sup>8,15</sup>, C. Ghiano<sup>7</sup>, M. Glammarchi<sup>5</sup>, A. Goretti<sup>8,29</sup>, A. S. Göttel<sup>4,16</sup>, M. Gromov<sup>11,13</sup>, D. Guffanti<sup>17</sup>, Aldo Ianni<sup>7</sup>, Andrea Ianni<sup>8</sup>, A. Jany<sup>18</sup>, D. Jeschke<sup>2</sup>, V. Kobychyev<sup>19</sup>, G. Korga<sup>20,21</sup>, S. Kumaran<sup>4,16</sup>, M. Laubenstein<sup>7</sup>, E. Litvinovich<sup>3,22</sup>, P. Lombardi<sup>5</sup>, I. Lomskaya<sup>12</sup>, L. Ludhova<sup>4,16</sup>, G. Lukyanchenko<sup>3</sup>, L. Lukyanchenko<sup>3</sup>, I. Machulin<sup>3,22</sup>, J. Martyn<sup>17</sup>, E. Meroni<sup>5</sup>, M. Meyer<sup>23</sup>, L. Miramonti<sup>5</sup>, M. Misiaszek<sup>18</sup>, V. Muratova<sup>12</sup>, B. Neumair<sup>2</sup>, M. Nieslony<sup>17</sup>, R. Nugmanov<sup>3,22</sup>, L. Oberauer<sup>2</sup>, V. Orekhov<sup>17</sup>, F. Ortica<sup>24</sup>, M. Pallavicini<sup>9</sup>, L. Papp<sup>2</sup>, L. Pelicci<sup>5</sup>, Ö. Penek<sup>4,16</sup>, L. Pietrofaccia<sup>8</sup>, N. Pilipenko<sup>12</sup>, A. Pocar<sup>25</sup>, G. Raikov<sup>3</sup>, M. T. Ranalli<sup>7</sup>, G. Ranucci<sup>5</sup>, A. Razeto<sup>7</sup>, A. Re<sup>5</sup>, M. Redchuk<sup>4,16</sup>, A. Romani<sup>24</sup>, N. Rossi<sup>17</sup>, S. Schönert<sup>2</sup>, D. Semenov<sup>12</sup>, G. Settanta<sup>4</sup>, M. Skorokhvatov<sup>3,22</sup>, A. Singhal<sup>4,16</sup>, O. Smirnov<sup>13</sup>, A. Sotnikov<sup>13</sup>, Y. Suvorov<sup>3,7,30</sup>, R. Tartaglia<sup>7</sup>, G. Testera<sup>9</sup>, J. Thurn<sup>23</sup>, E. Unzhakov<sup>12</sup>, F. L. Villante<sup>7,26</sup>, A. Vishneva<sup>13</sup>, R. B. Vogelaar<sup>10</sup>, F. von Felitzsch<sup>2</sup>, M. Wojcik<sup>18</sup>, M. Wurm<sup>17</sup>, S. Zavatarelli<sup>9</sup>, K. Zuber<sup>23</sup> & G. Zuzel<sup>18</sup>



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<sup>a</sup>

M. Agostini<sup>1</sup>, K. Altenmüller<sup>1</sup>, S. Appel<sup>1</sup>, V. Atroshchenko<sup>2</sup>, Z. Bagdasarian<sup>3,d</sup>, D. Basilico<sup>4</sup>, G. Bellini<sup>4</sup>, J. Benziger<sup>5</sup>, R. Blondi<sup>6</sup>, D. Bravo<sup>4,c</sup>, B. Cacchaniga<sup>4</sup>, F. Calaprice<sup>7</sup>, A. Caminata<sup>8</sup>, P. Cavalcante<sup>9,f</sup>, A. Chepurinov<sup>10</sup>, D. D'Angelo<sup>4</sup>, S. Davini<sup>8</sup>, A. Derbin<sup>11</sup>, A. Di Giacinto<sup>6</sup>, V. Di Marcello<sup>6</sup>, X. F. Ding<sup>5,b</sup>, A. Di Ludovico<sup>7</sup>, L. Di Noto<sup>8</sup>, I. Drachnev<sup>11</sup>, A. Formozov<sup>4,12</sup>, D. Franco<sup>13</sup>, C. Galbiati<sup>7,14</sup>, C. Ghiano<sup>6</sup>, M. Glammarchi<sup>4</sup>, A. Goretti<sup>7,f</sup>, A. S. Göttel<sup>3,15</sup>, M. Gromov<sup>10,12</sup>, D. Guffanti<sup>16</sup>, Aldo Ianni<sup>6</sup>, Andrea Ianni<sup>7</sup>, A. Jany<sup>17</sup>, D. Jeschke<sup>1</sup>, V. Kobychyev<sup>18</sup>, G. Korga<sup>19</sup>, S. Kumaran<sup>3,15</sup>, M. Laubenstein<sup>6</sup>, E. Litvinovich<sup>2,20</sup>, P. Lombardi<sup>4</sup>, I. Lomskaya<sup>11</sup>, L. Ludhova<sup>3,15</sup>, G. Lukyanchenko<sup>2</sup>, L. Lukyanchenko<sup>2</sup>, I. Machulin<sup>2,20</sup>, J. Martyn<sup>16</sup>, E. Meroni<sup>4</sup>, M. Meyer<sup>21</sup>, L. Miramonti<sup>4</sup>, M. Mistaszek<sup>17</sup>, V. Muratova<sup>11</sup>, B. Neumair<sup>1</sup>, M. Nieslony<sup>16</sup>, R. Nugmanov<sup>2,20</sup>, L. Oberauer<sup>1</sup>, V. Orekhov<sup>2</sup>, F. Ortica<sup>22</sup>, M. Pallavicini<sup>8</sup>, L. Papp<sup>1</sup>, Ö. Penek<sup>3,15</sup>, L. Pietrofaccia<sup>7</sup>, N. Pilipenko<sup>11</sup>, A. Pocar<sup>23</sup>, G. Raikov<sup>2</sup>, M. T. Ranalli<sup>6</sup>, G. Ranucci<sup>4,c</sup>, A. Razeto<sup>6</sup>, A. Re<sup>4</sup>, M. Redchuk<sup>3,15</sup>, A. Romani<sup>22</sup>, N. Rossi<sup>6</sup>, S. Schönert<sup>1</sup>, D. Semenov<sup>11</sup>, G. Settanta<sup>3</sup>, M. Skorokhvatov<sup>2,20</sup>, O. Smirnov<sup>12</sup>, A. Sotnikov<sup>12</sup>, Y. Suvorov<sup>2,6,g</sup>, R. Tartaglia<sup>6</sup>, G. Testera<sup>8</sup>, J. Thurn<sup>21</sup>, E. Unzhakov<sup>11</sup>, F. L. Villante<sup>6,24</sup>, A. Vishneva<sup>12</sup>, R. B. Vogelaar<sup>9</sup>, F. von Feilitzsch<sup>1</sup>, M. Wojcik<sup>17</sup>, M. Wurm<sup>16</sup>, S. Zavatarelli<sup>8</sup>, K. Zuber<sup>21</sup>, G. Zuzel<sup>17</sup>

<sup>1</sup> Physik-Department and Excellence Cluster Universe, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany

<sup>2</sup> National Research Centre Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany

<sup>4</sup> Dipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 20133 Milan, Italy

<sup>5</sup> Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

<sup>6</sup> INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso,

67010 Assergi, AQ, Italy

<sup>7</sup> Physics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

<sup>8</sup> Dipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 16146 Genoa, Italy

<sup>9</sup> Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA

<sup>10</sup> Lomonosov Moscow State University Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia

<sup>11</sup> St. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188350 Gatchina, Russia

<sup>12</sup> Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

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

<sup>14</sup> Gran Sasso Science Institute, 67100 L'Aquila, Italy

<sup>15</sup> III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany

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

<sup>17</sup> M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30348 Kraków, Poland

<sup>18</sup> Institute for Nuclear Research, 05028 Kyiv, Ukraine

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

<sup>20</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

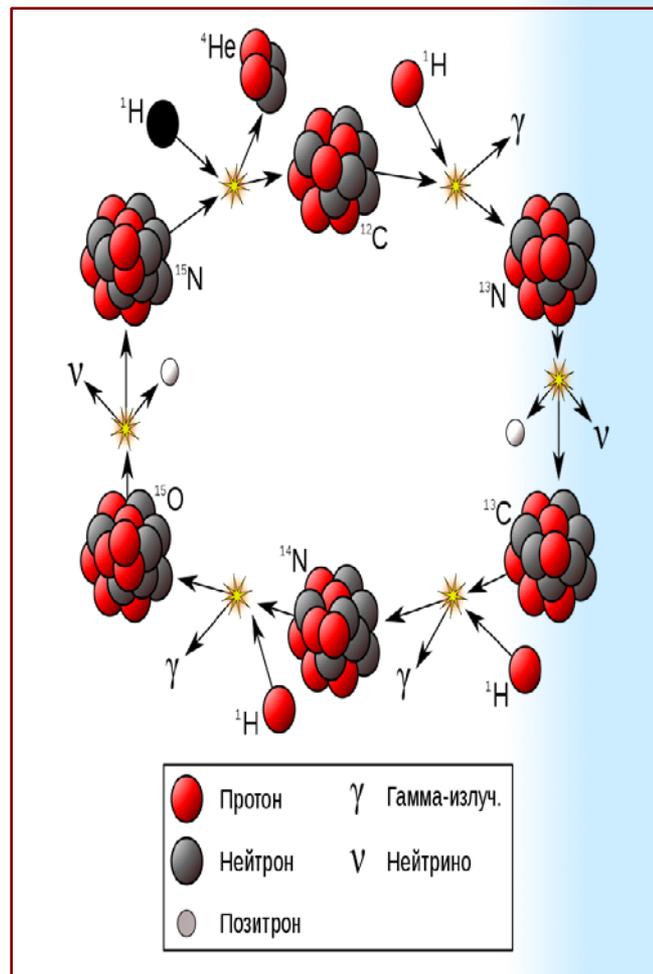
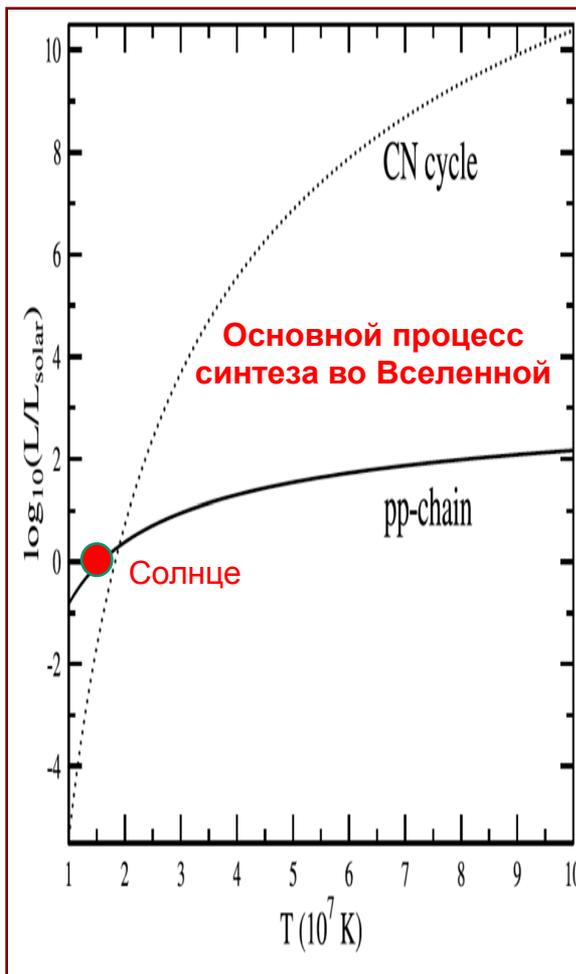
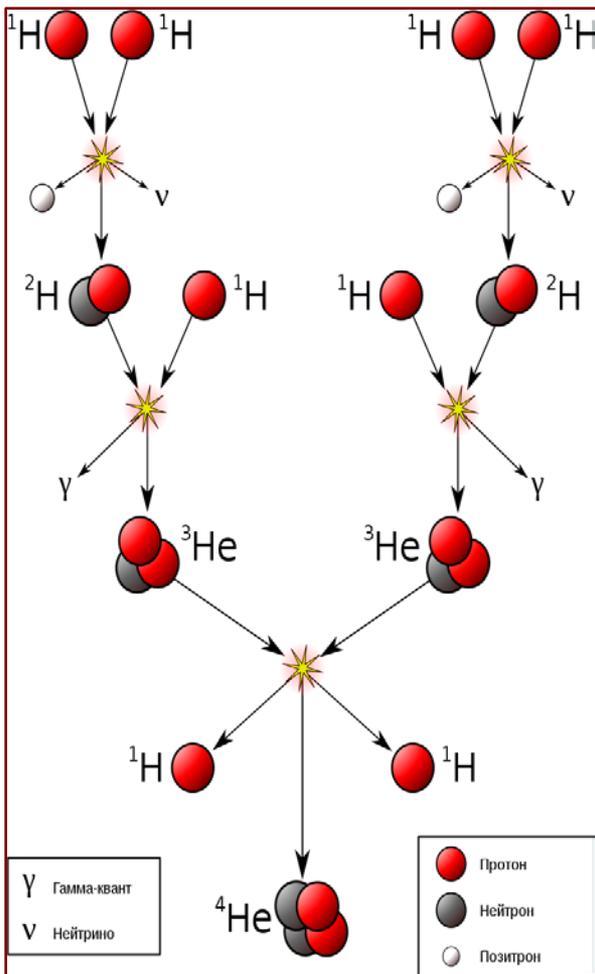
<sup>21</sup> Department of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany

<sup>22</sup> Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi e INFN, 06123 Perugia, Italy

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

<sup>24</sup> Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università dell'Aquila, 67100 L'Aquila, Italy

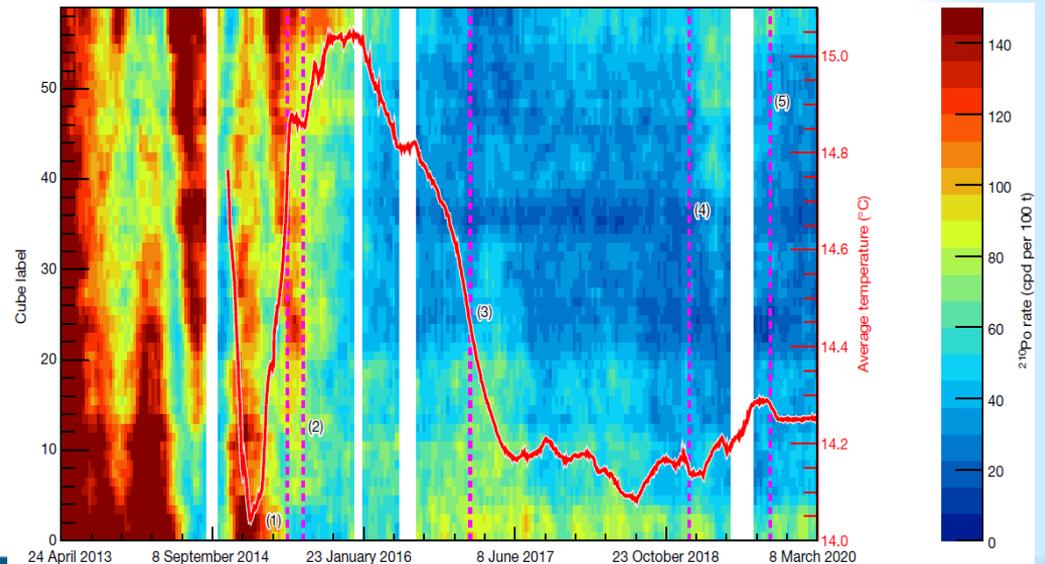
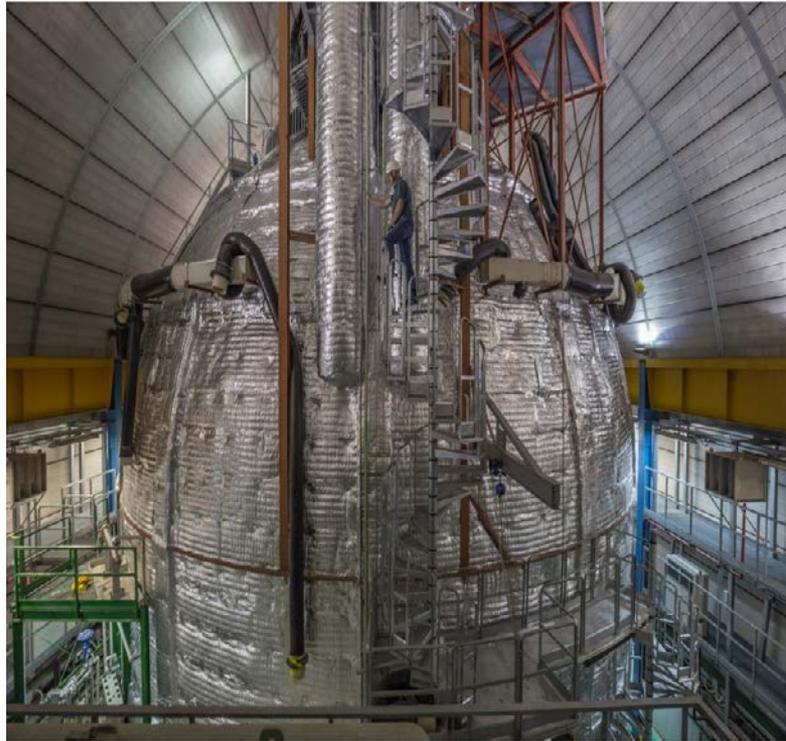
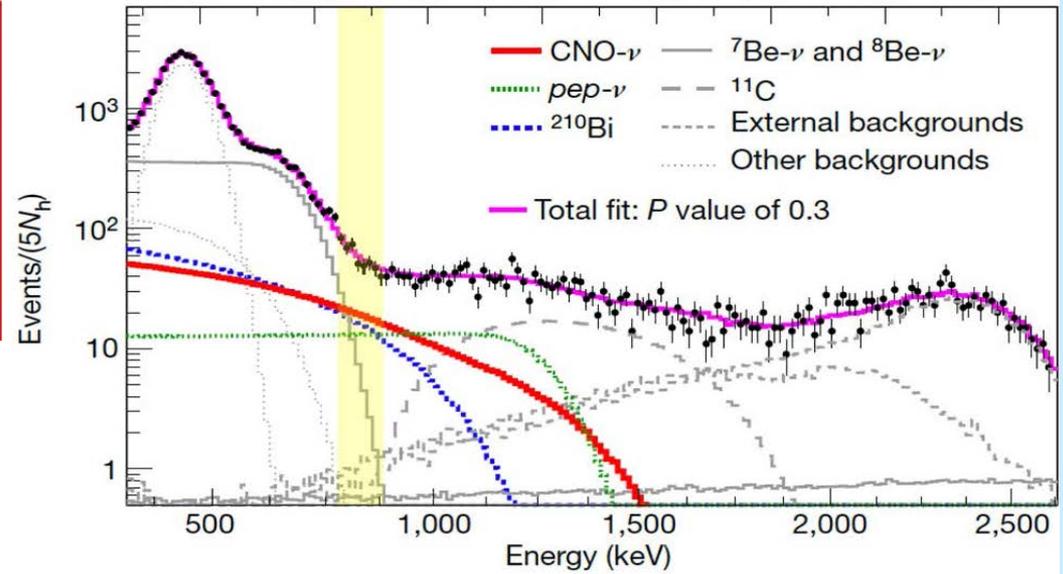
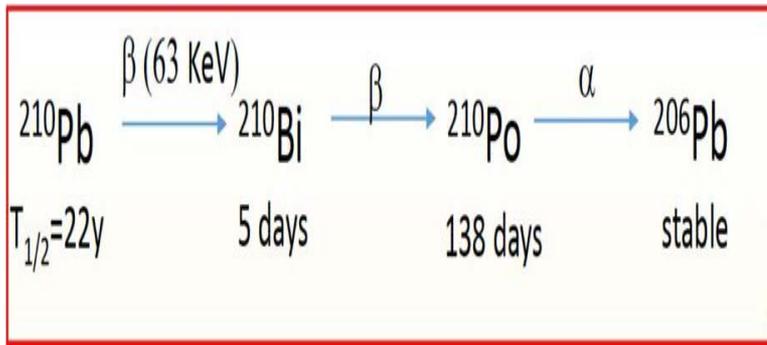
# 2020 г. Регистрация CNO-нейтрино



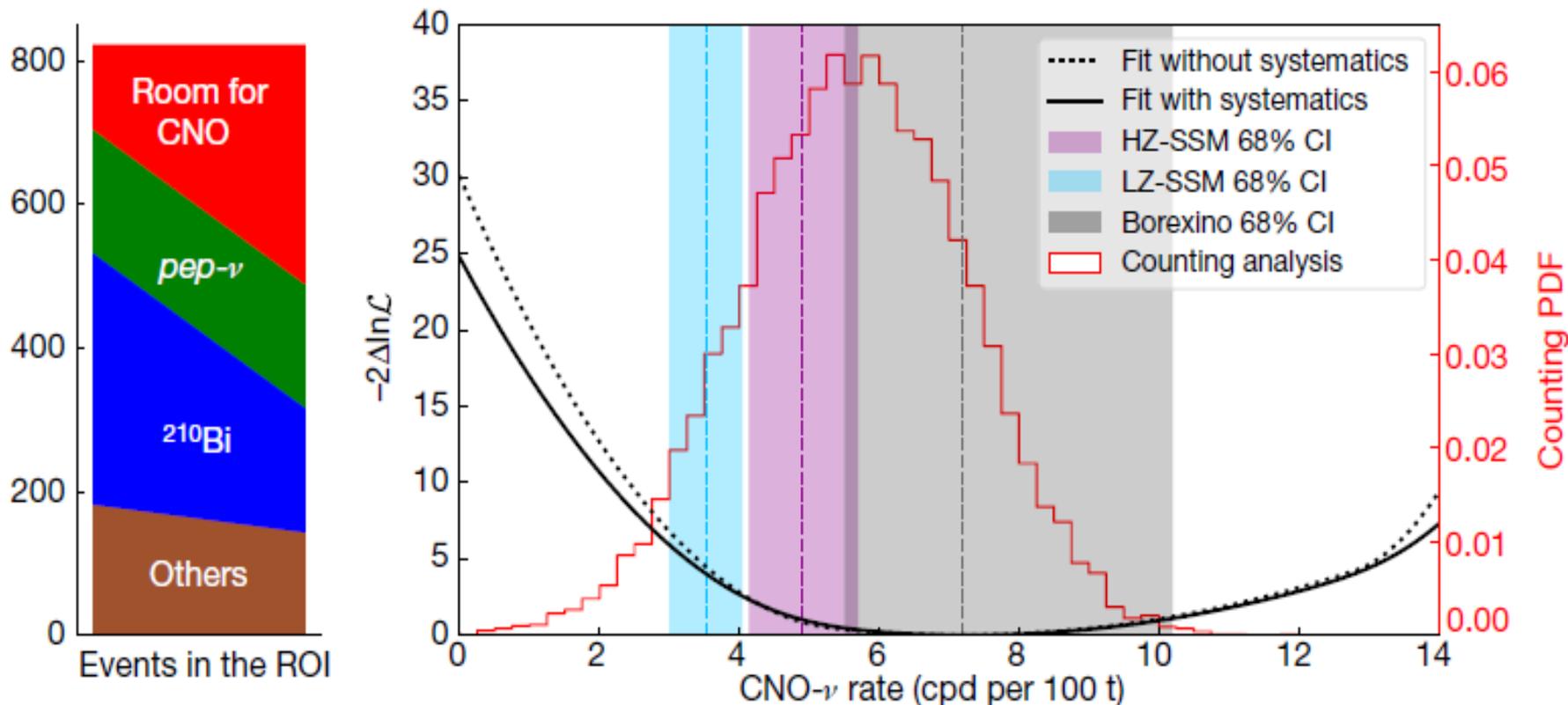
Ядерный синтез H в He в звездах происходит посредством двух процессов: **pp-цепи**, включающей только изотопы H и He, и **цикла углерод-азот-кислород (CNO)**, в котором синтез катализируется ядрами C, N и O. CNO цикл производит лишь 1% энергии Солнца. CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей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



# Активность $^{210}\text{Bi}$ по активности $^{210}\text{Po}$



# Регистрация CNO-нейтрино

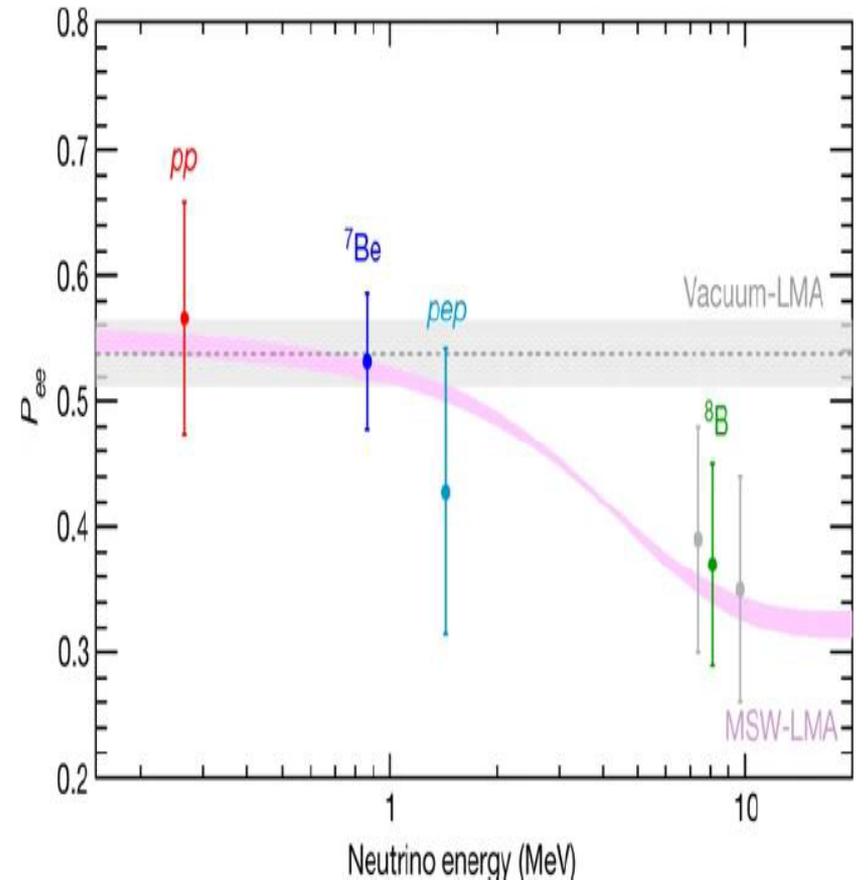


Результаты счетного (слева) и спектрального анализа (справа). Видно, что вклад CNO не может быть 0. Справа: функция правдоподобия скорости счета CNO-нейтрино с учетом статистики и систематики. Гистограмма красного цвета показывает скорость CNO-нейтрино, полученную в результате МК счетного счета. Синие, 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 ( $7.2-1.7+3.0$ ), соответственно. **Анализ на полном наборе данных будет выполнен в 2022-23 гг.**

# Важность CNO-нейтрино

FLUX	B16-GS98	B16-AGSs09met	DIFF. (HZ-LZ)/HZ
pp ( $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	5.98( $1 \pm 0.006$ )	6.03( $1 \pm 0.005$ )	-0.8%
pep ( $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	1.44( $1 \pm 0.01$ )	1.46( $1 \pm 0.009$ )	-1.4%
$^7\text{Be}$ ( $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	4.94( $1 \pm 0.06$ )	4.50( $1 \pm 0.06$ )	8.9%
$^8\text{B}$ ( $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	5.46( $1 \pm 0.12$ )	4.50( $1 \pm 0.12$ )	17.6%
$^{13}\text{N}$ ( $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	2.78( $1 \pm 0.15$ )	2.04( $1 \pm 0.14$ )	26.6%
$^{15}\text{O}$ ( $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	2.05( $1 \pm 0.17$ )	1.44( $1 \pm 0.16$ )	29.7%
$^{17}\text{F}$ ( $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	5.29( $1 \pm 0.20$ )	3.26( $1 \pm 0.18$ )	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 (2020)

PHYSICAL REVIEW D 101, 012009 (2020)

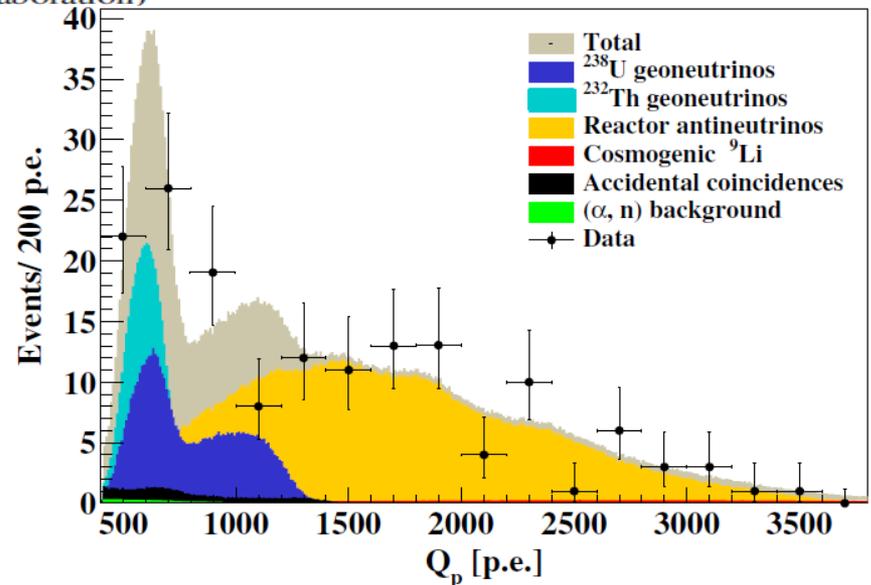
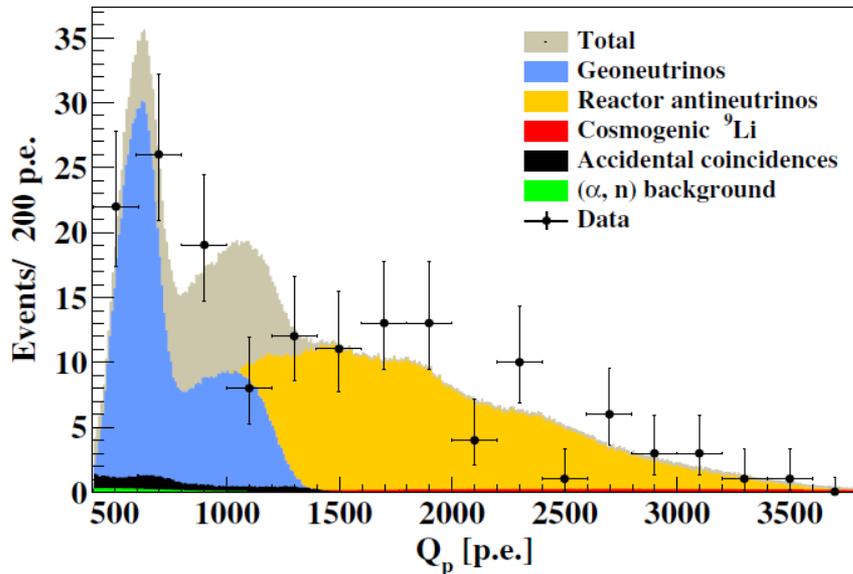
Editors' Suggestion

Featured in Physics

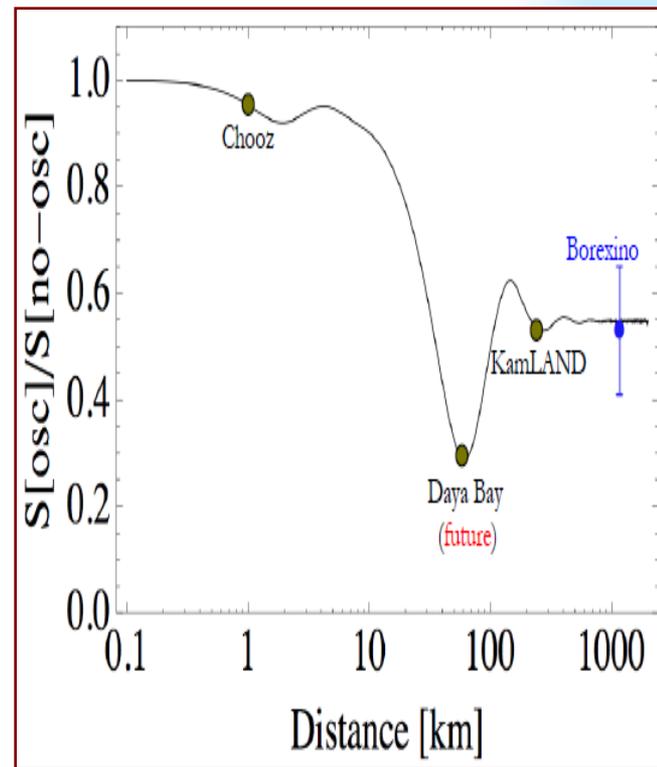
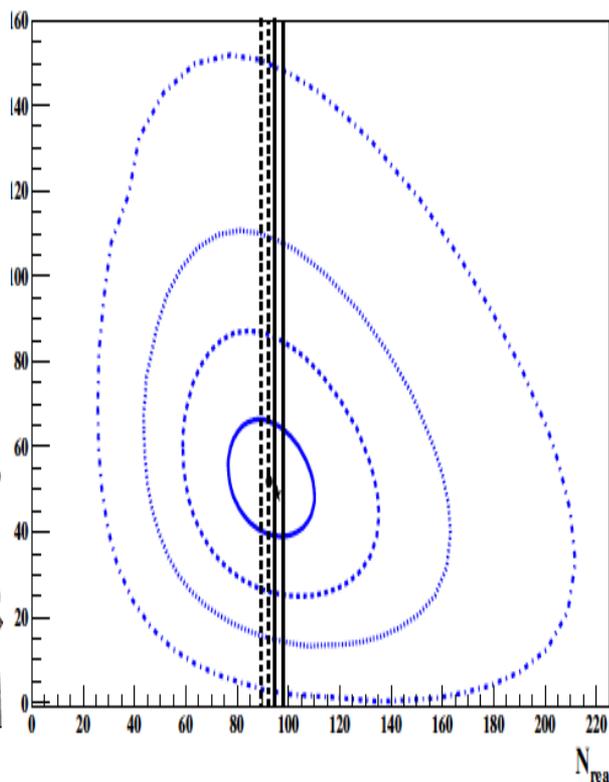
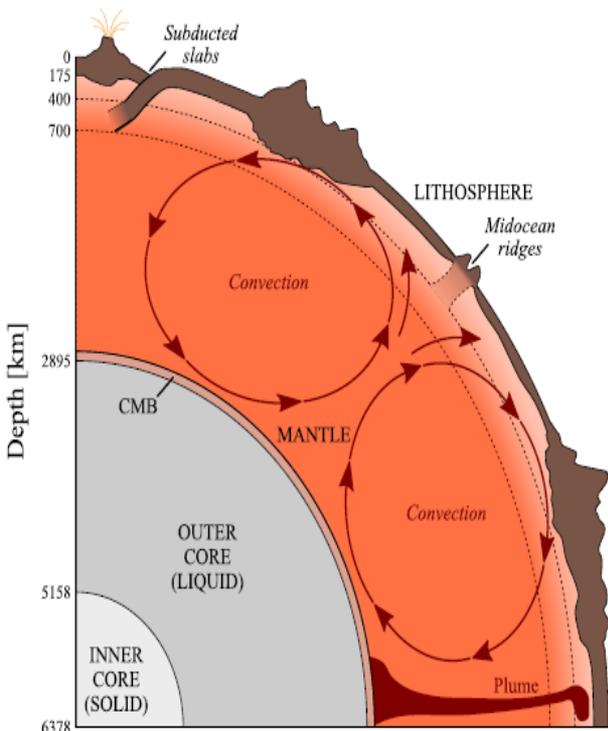
## Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino

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

(Borexino Collaboration)\*



# 154 события ОБР от антинейтрино

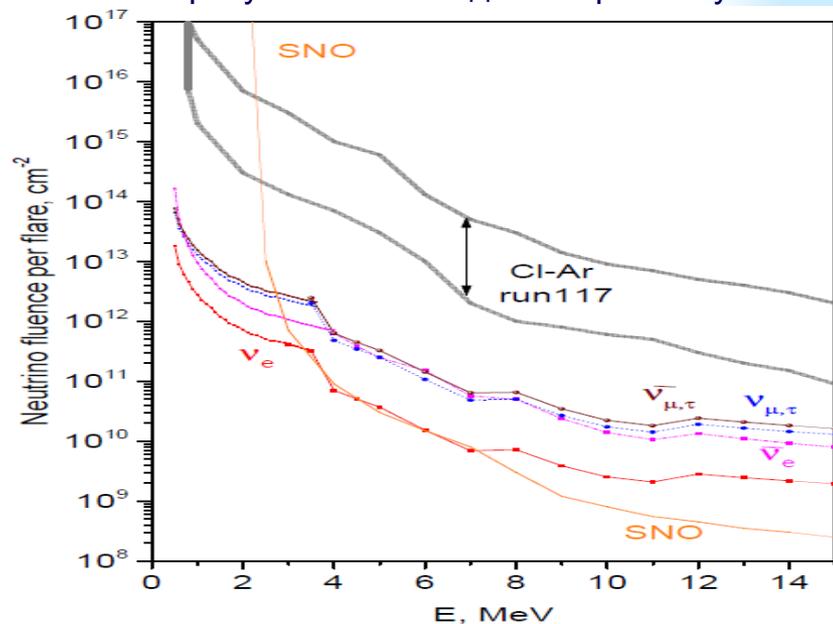
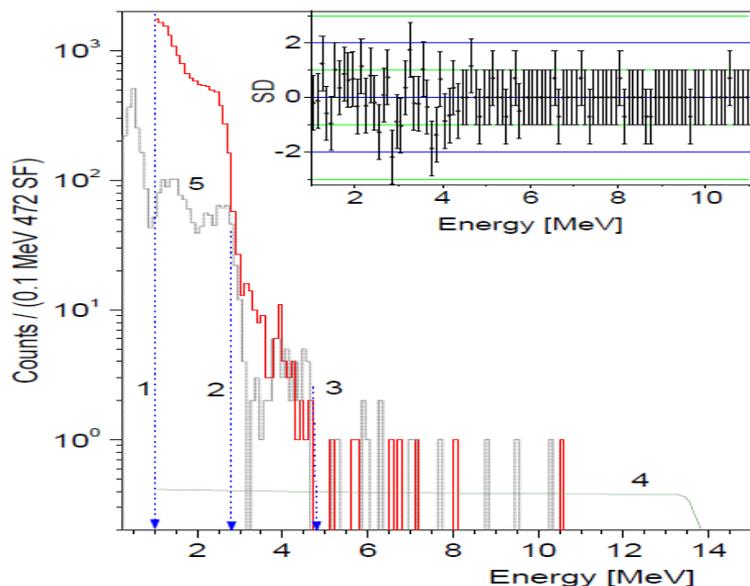


3263 суток между 2007 и 2019 г. с общей экспозицией  $(1.29 \pm 0.05) \times 10^{32}$  протонов-год, вдвое больше анализа Borexino 2015 г. Зарегистрировано  $52.6^{+9.4}_{-8.6}(\text{stat})^{+2.7}_{-2.1}(\text{cism})$  геонейтрино от  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , что соответствует  $47.0^{+8.4}_{-7.7}(\text{stat})^{+2.4}_{-1.9}(\text{cism})$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

# Поиск временных корреляций сигналов детектора Borexino с солнечными вспышками (2020)

Солнечные вспышки (CB) — взрывной процесс выделения энергии, связанный с перестройкой магнитного поля, которая вызывает ускорение заряженных частиц. Энерговыделение мощной CB достигает 15% энергии, выделяемой Солнцем за секунду. Возможность излучения нейтрино в CB поддерживалась положительными результатами **Cl-Ar** эксперимента, в частности, избыток событий в серии **117**, в течении которой наблюдалась CB класса **X12** (4.06.1991).

Сотрудники ОЯД ОНИ ПИЯФ и НИЦ КИ провели анализ сигналов детектора Borexino с энергией более **0.25 (1.0) МэВ** в течении **472-х** CB класса M 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 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), связанные с **CB**. 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 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), в сравнении с ограничениями **SNO** и область значений для положительного результата **Cl-Ar** детектора.

# Нестандартные взаимодействия нейтрино (2020)

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  $(\nu, e)$  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

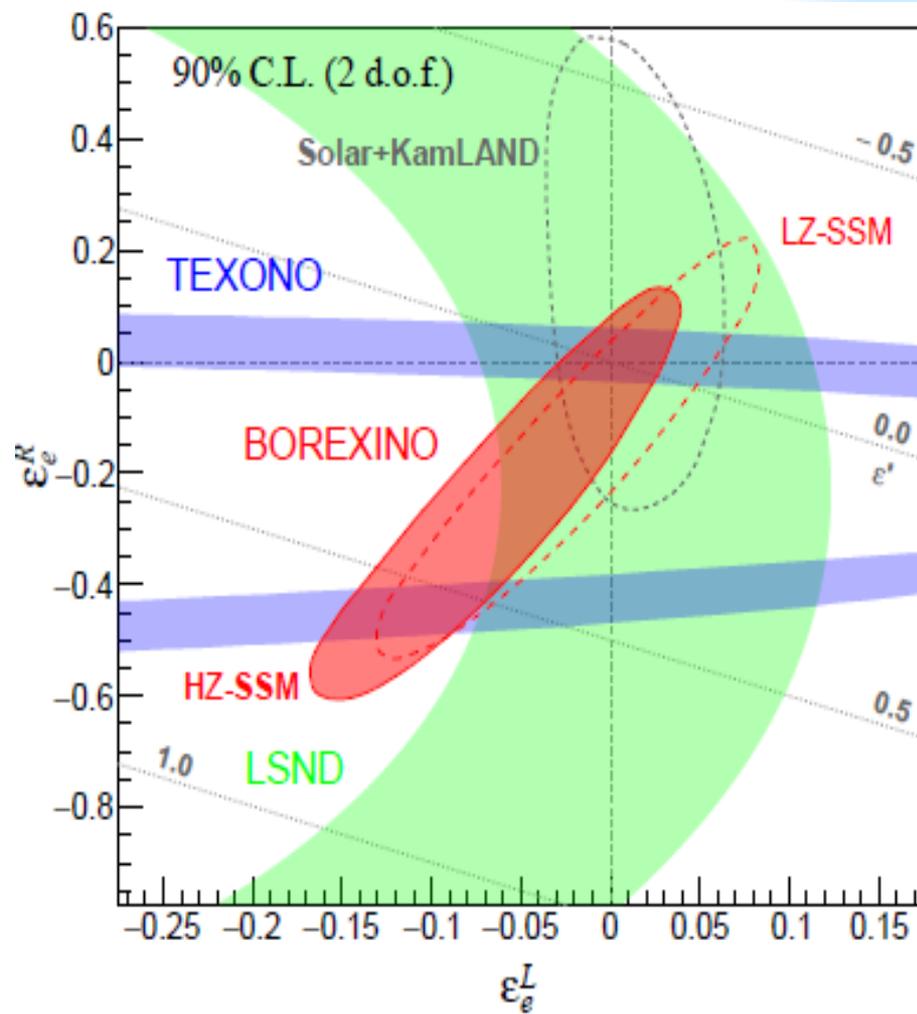
PUBLISHED: February 5, 2020

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

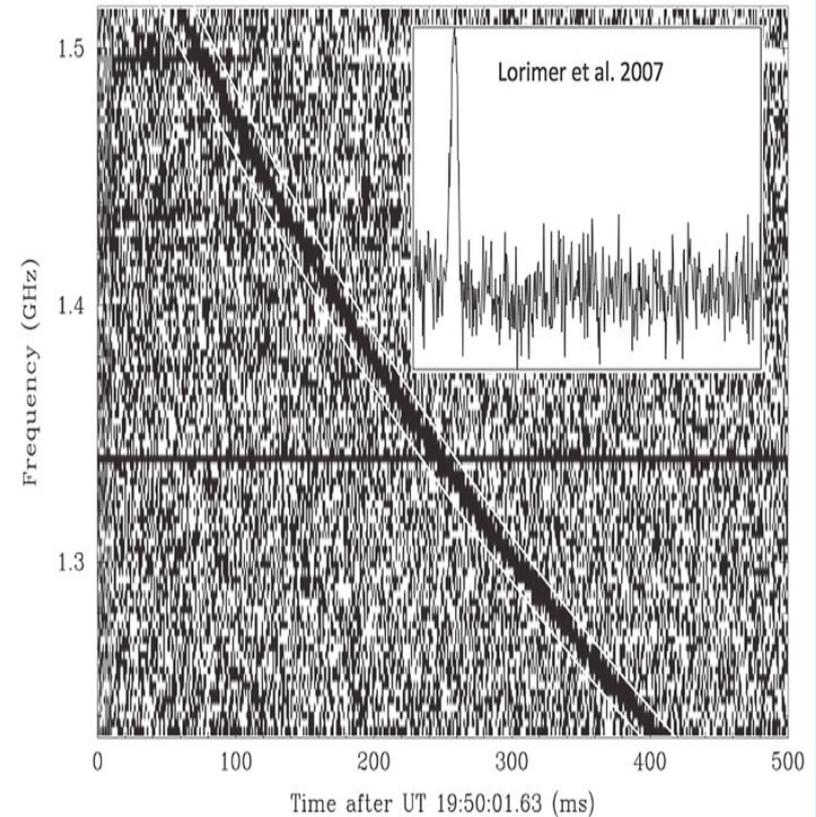
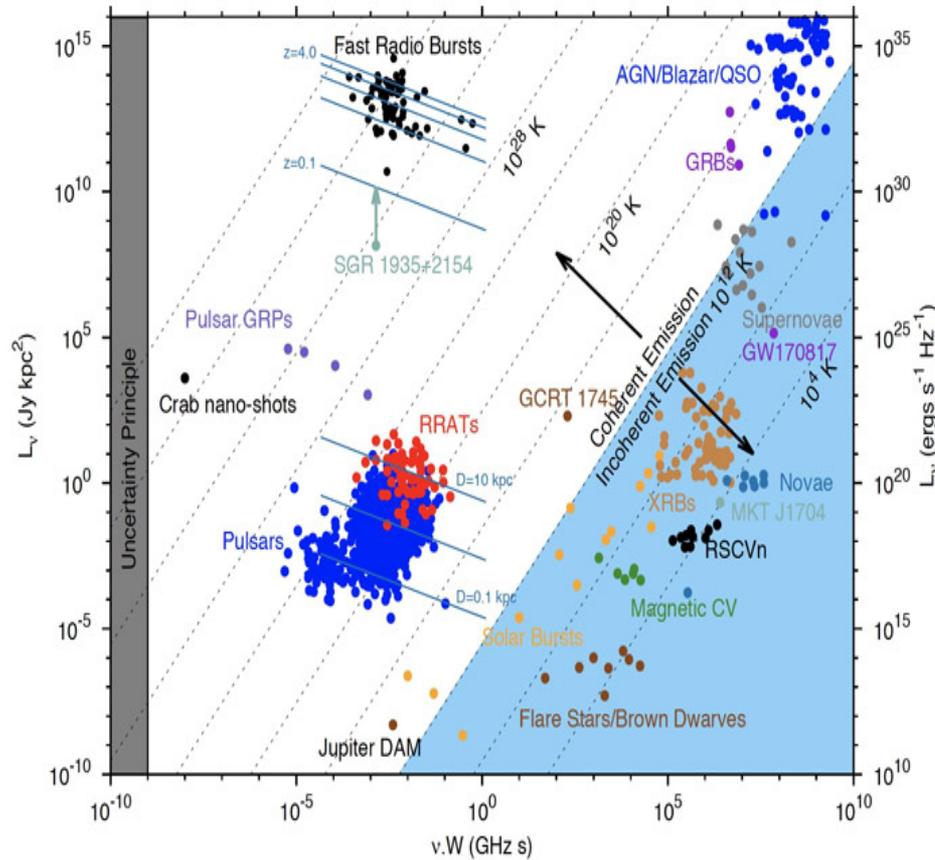


### The Borexino collaboration

S.K. Agarwalla,<sup>1,2,7</sup> M. Agostini,<sup>4</sup> K. Altenmüller,<sup>4</sup> S. Appel,<sup>4</sup> V. Atroshchenko,<sup>5</sup> Z. Bagdasarian,<sup>6</sup> D. Basilico,<sup>7</sup> G. Bellini,<sup>7</sup> J. Benziger,<sup>8</sup> D. Bick,<sup>9</sup> G. Bonfimi,<sup>10</sup> D. Bravo,<sup>7,8</sup> B. Caccianiga,<sup>7</sup> F. Calaprice,<sup>11</sup> A. Caminata,<sup>12</sup> L. Cappelli,<sup>10</sup> P. Cavalcante,<sup>13,8</sup> F. Cavanna,<sup>12</sup> A. Chepurnov,<sup>14</sup> K. Choi,<sup>15</sup> D. D'Angelo,<sup>7</sup> S. Davini,<sup>12</sup> **A. Derbin**,<sup>16</sup> A. Di Giacinto,<sup>10</sup> V. Di Marcello,<sup>10</sup> X.F. Ding,<sup>17,10</sup> A. Di Ludovico,<sup>11</sup> L. Di Noto,<sup>12</sup> **I. Drachnev**,<sup>16</sup> K. Fomenko,<sup>18</sup> A. Formozov,<sup>18,7,14</sup> D. Franco,<sup>19</sup> F. Gabriele,<sup>10</sup> C. Galbiati,<sup>11</sup> M. Gschwender,<sup>20</sup> C. Ghiano,<sup>20</sup> M. Giammarchi,<sup>7</sup> A. Goretti,<sup>11,23</sup> M. Gromov,<sup>14,18</sup> D. Guffanti,<sup>26</sup> C. Hagner,<sup>9</sup> E. Hungerford,<sup>21</sup> Aldo Ianni,<sup>10</sup> Andrea Ianni,<sup>11</sup> A. Jany,<sup>22</sup> D. Jeschke,<sup>4</sup> S. Kumaran,<sup>6,23</sup> V. Kobychiev,<sup>24</sup> G. Korga,<sup>21,c</sup> T. Lachenmaier,<sup>20</sup> M. Laubenstein,<sup>10</sup> E. Litvinovich,<sup>5,25</sup> P. Lombardi,<sup>7</sup> L. Ludhova,<sup>6,23</sup> G. Lukyanchenko,<sup>5</sup> L. Lukyanchenko,<sup>5</sup> I. Machulin,<sup>5,25</sup> G. Manuzio,<sup>12</sup> S. Marocco,<sup>17,4</sup> J. Maricic,<sup>15</sup> J. Martyn,<sup>26</sup> E. Meroni,<sup>7</sup> M. Meyer,<sup>27</sup> L. Miramonti,<sup>7</sup> M. Misiaszek,<sup>22</sup> **V. Muratova**,<sup>16</sup> B. Neumair,<sup>4</sup> M. Nieslony,<sup>26</sup> L. Oberauer,<sup>4</sup> V. Orekhov,<sup>5,26</sup> F. Ortica,<sup>28</sup> M. Pallavicini,<sup>12</sup> L. Papp,<sup>4</sup> Ö. Penek,<sup>6,23</sup> L. Pietrofaccia,<sup>11</sup> **N. Pilipenko**,<sup>26</sup> A. Pocar,<sup>29</sup> G. Raikov,<sup>5</sup> G. Ranucci,<sup>7</sup> A. Razeto,<sup>10</sup> A. Re,<sup>7</sup> M. Redchuk,<sup>6,23</sup> A. Romani,<sup>28</sup> N. Rossi,<sup>10,8</sup> S. Rottenanger,<sup>20</sup> S. Schönert,<sup>4</sup> **D. Semenov**,<sup>16</sup> M. Skorokhvatov,<sup>5,25</sup> O. Smirnov,<sup>18</sup> A. Sotnikov,<sup>18</sup> C. Sun,<sup>30,31</sup> Y. Suvorov,<sup>5,10,7</sup> T. Takeuchi,<sup>13</sup> R. Tartaglia,<sup>10</sup> G. Testera,<sup>12</sup> J. Thum,<sup>27</sup> **E. Unzhakov**,<sup>16</sup> A. Vishneva,<sup>18</sup> R.B. Vogelaar,<sup>13</sup> F. von Feilitzsch,<sup>4</sup> M. Wojcik,<sup>22</sup> M. Wurm,<sup>26</sup> O. Zaimidoroga,<sup>18</sup> S. Zavatarelli,<sup>12</sup> K. Zuber<sup>27</sup> and G. Zuzel<sup>22</sup>

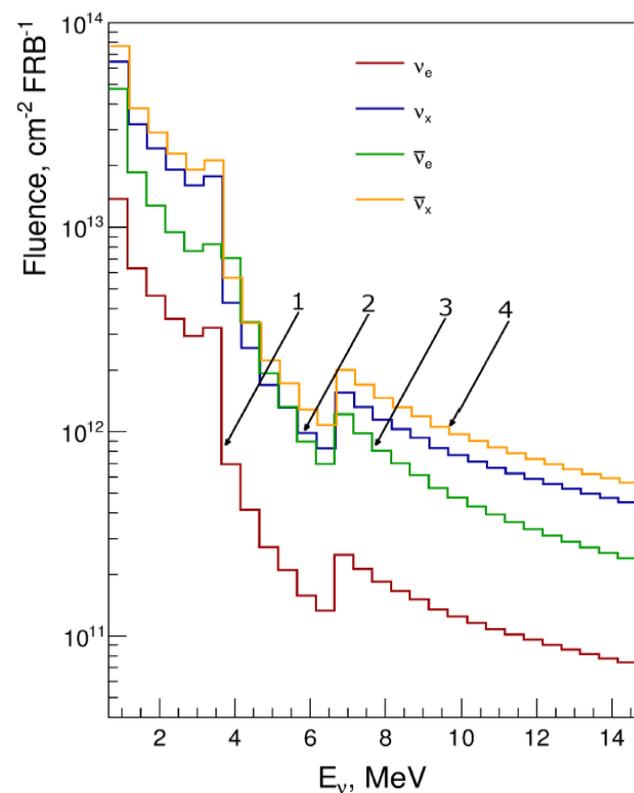
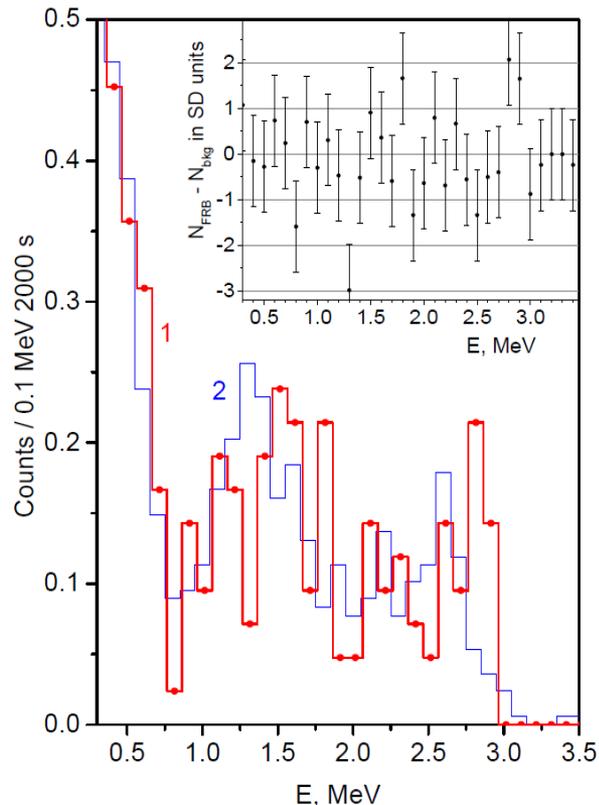
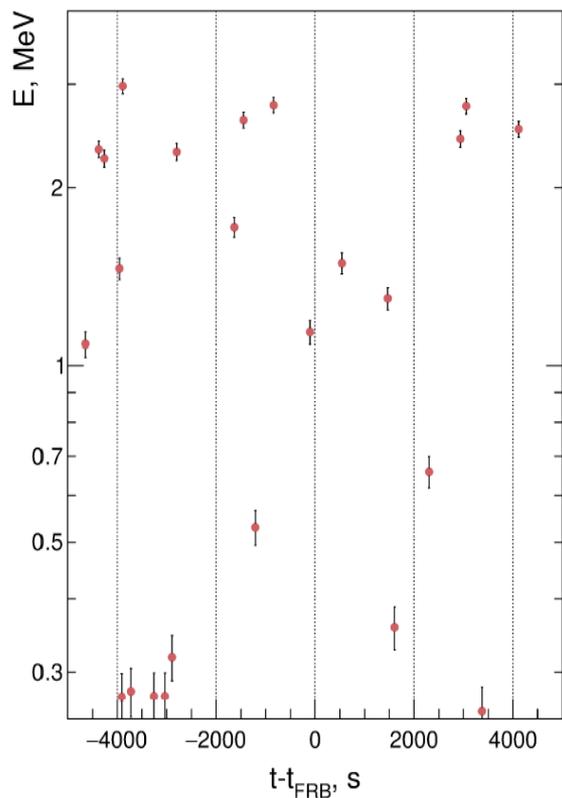


# Поиски сигналов от нейтрино и антинейтрино в детекторе Borexino от быстрых радиовсплесков (FRBs). (2021)



*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  $2 \times 10^3$  соб / сутки на все небо.*

# Поиски сигналов от нейтрино и антинейтрино в детекторе Borexino от быстрых радиовсплесков (FRBs).

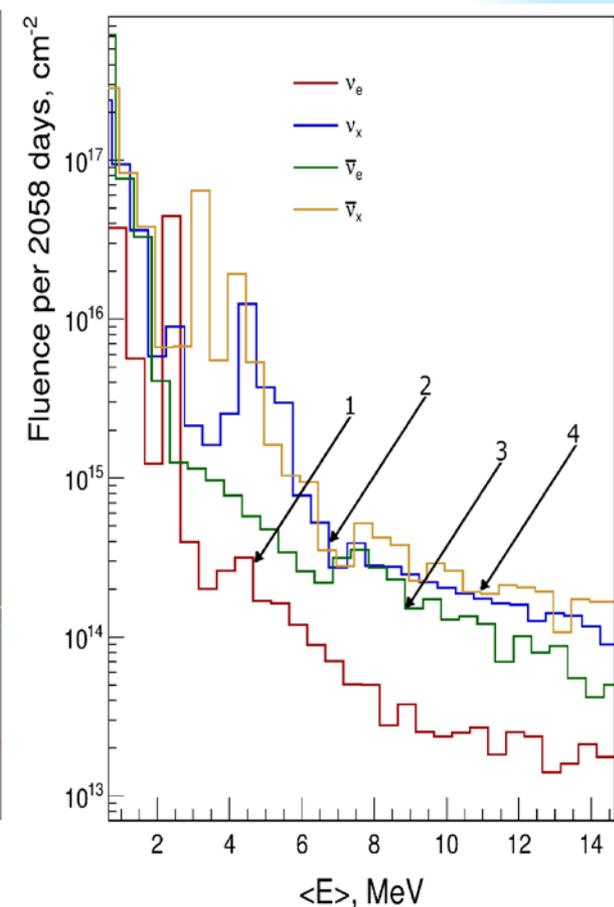
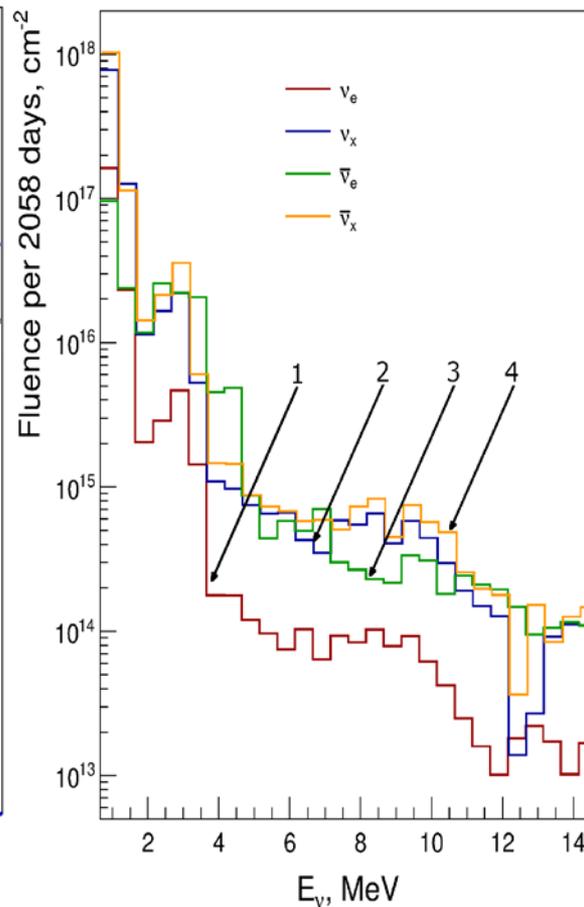
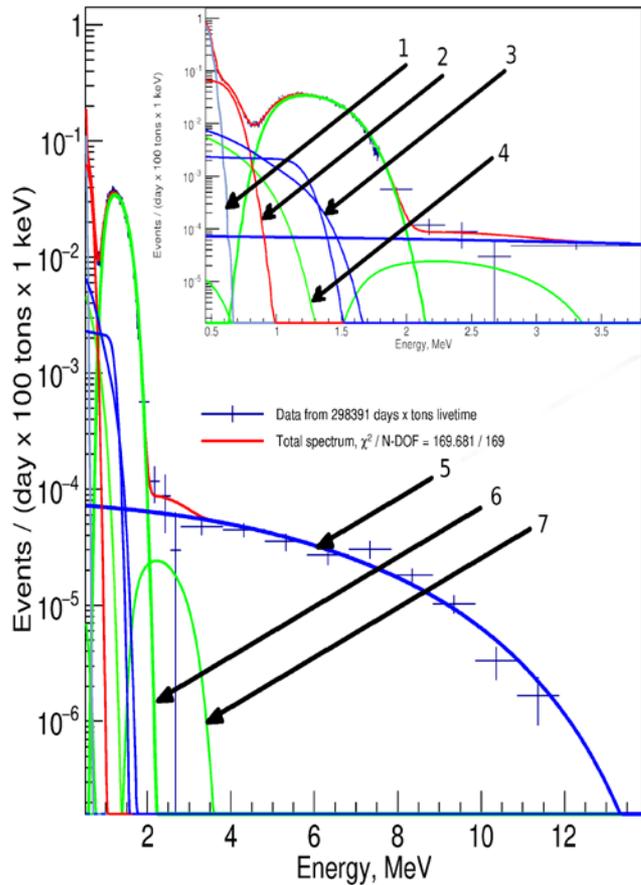


*Borexino events with an energy above 0.25 MeV occurring within  $\pm 5000$  s of FRB 200428 detection time.*

*Borexino energy spectrum of singles in correlation with 42 FRBs in  $\pm 1000$  s time window (Line 1). Line 2 shows the normalized background spectrum measured in  $[-5000 \dots -1000]$  s and  $[1000 \dots 5000]$  s intervals.*

*90% C.L. upper limits on mono-energetic neutrino fluences obtained through the temporal correlation analysis for 42 most intensive FRBs with the fluence  $\Phi_{FRB} \geq 40$  Jy ms.*

# FRBs – анализ формы спектра Borexino

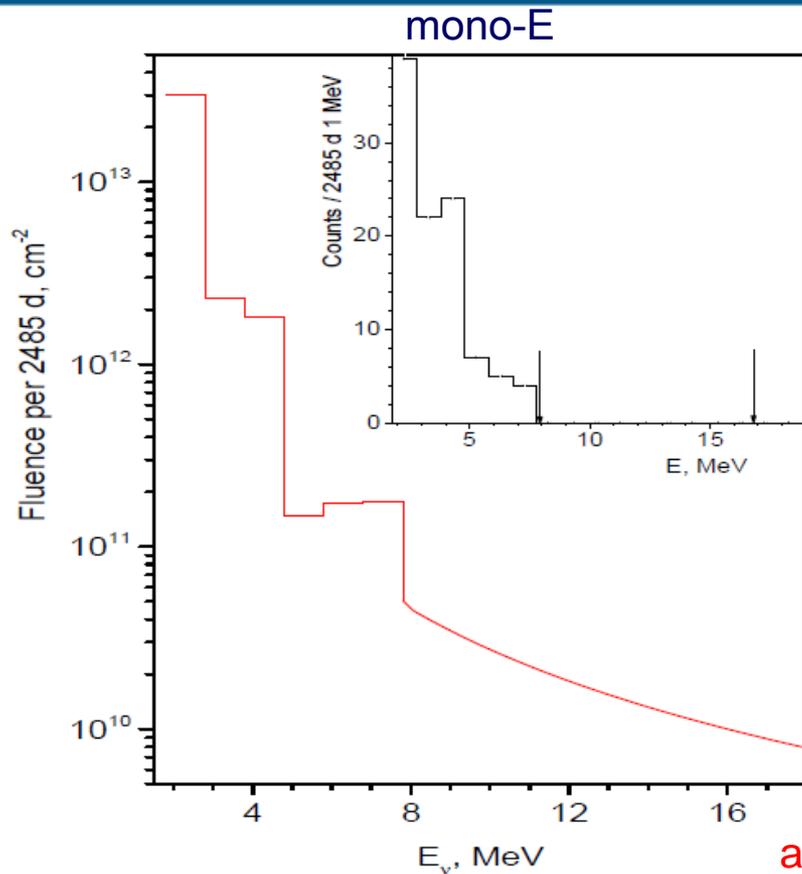


*Spectral fit of the selected Borexino data. The spectral components considered are: 1 –  $^{210}\text{Po}$ , 2 –  $^7\text{Be}$ - $\nu$ , 3 – CNO and  $\text{pep}$ - $\nu$ , 4 –  $^{210}\text{Bi}$ , 5 –  $^8\text{B}$ - $\nu$ , 6 –  $^{11}\text{C}$ , 7 –  $^{10}\text{C}$*

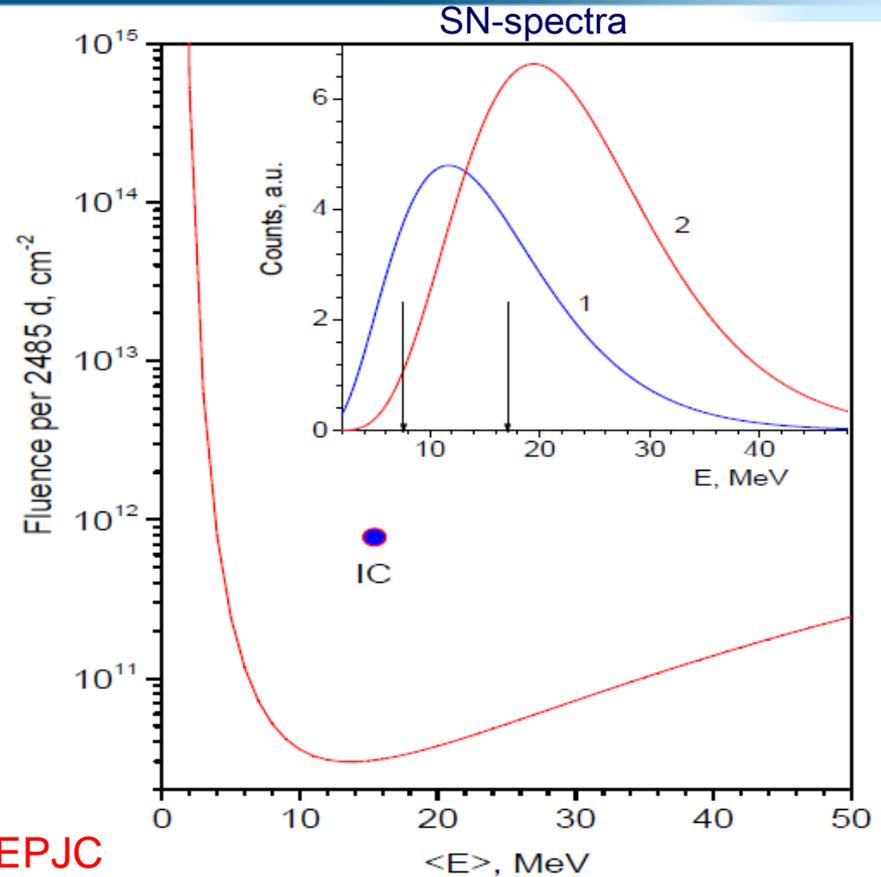
*Upper limits on the fluences of **monoenergetic neutrinos** obtained from the spectral fit (90% C.L.).*

*Upper limits on the fluences of neutrinos **supernova neutrino** spectra with obtained from the spectral fit (90% C.L.):*

# Ограничения на флюенс электронных антинейтрино



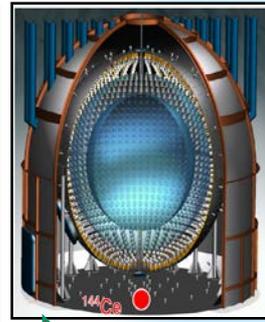
arXiv -> EPJC



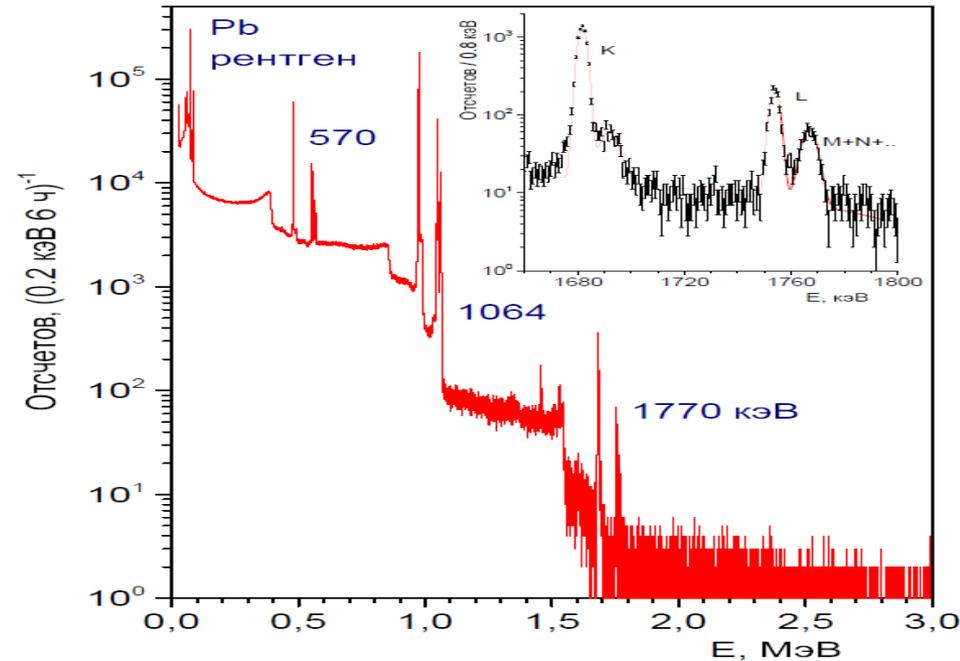
Limits on the total antineutrino fluence (supernova spectrum) over a period of 2485 days. Since the expected number of FRBs during this time is  $\sim 5 \times 10^6$ , the reduced limits per single FRB will be  $5 \times 10^6$  times stronger. **IceCube** upper limit on the fluence of the supernova spectrum with the mean neutrino energy  $\langle E_i \rangle = 15.6 \text{ MeV}$  and pinching the parameter 3 (shown with a circle) based on a collective increase in the rate of hits in the detector in coincidence with 28 FRBs.

# Измерения бета-спектров $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ и $^{210}\text{Bi}$

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 используется для прецизионного измерения формы бета-спектров различных радиоактивных ядер, в частности для измерения бета спектров  $^{144}\text{Ce}$  - $^{144}\text{Pr}$ , и  $^{210}\text{Bi}$  для задач нейтринной физики.



**$^{144}\text{Pr}$**



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

# 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  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  продолжительностью 2 месяца. В схему регистрации включен 3" BGO-детектор с целью выделения распадов ядер  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  на возбужденные уровни дочерних ядер.

# 4π бета спектрометр с Si(Li)-детекторами

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

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

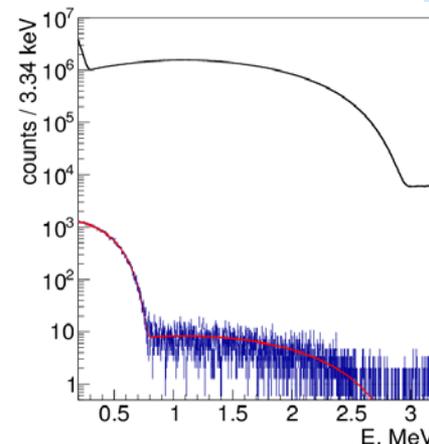
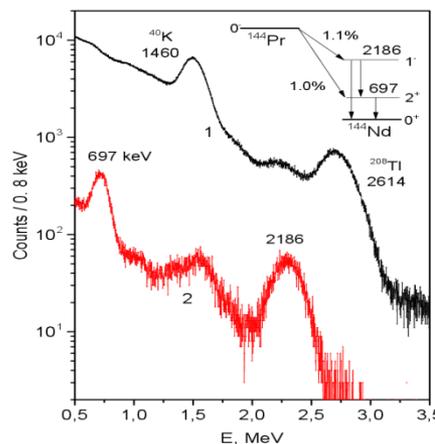
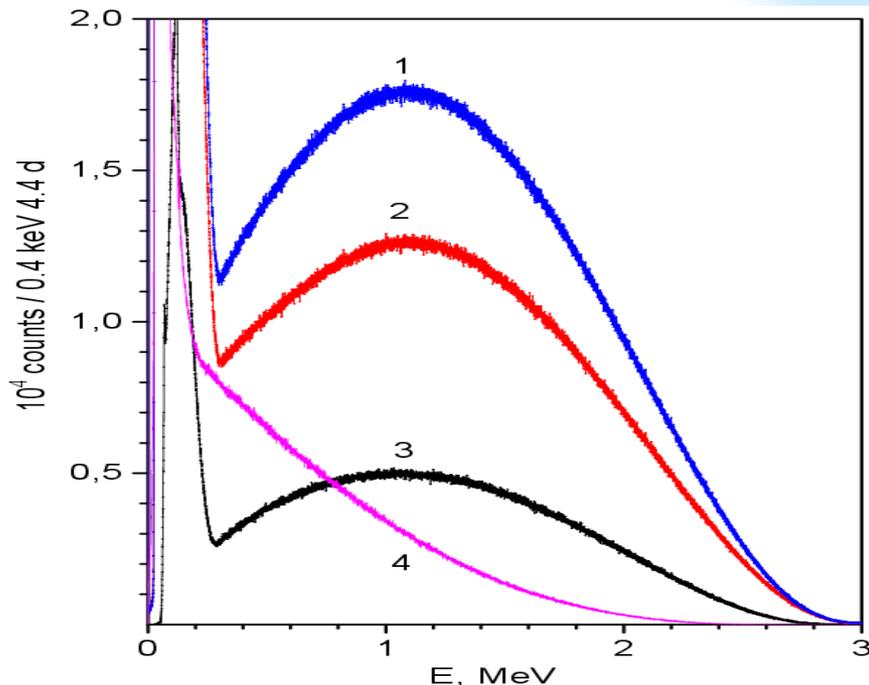
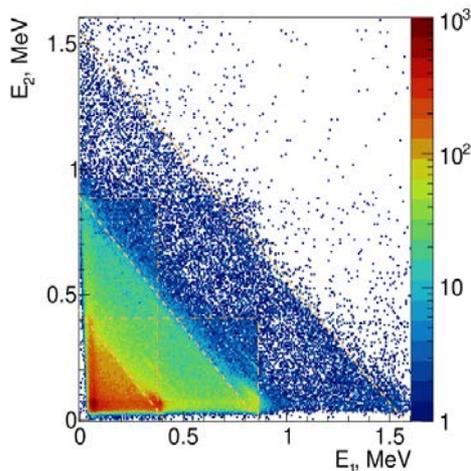
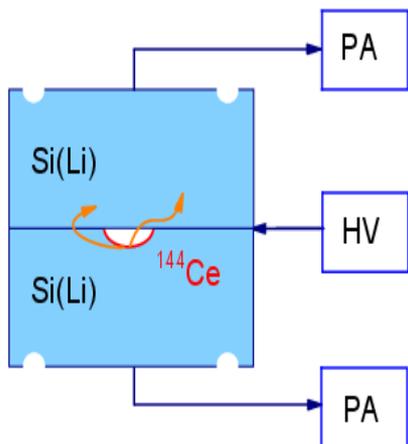
УДК 539.1.074

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

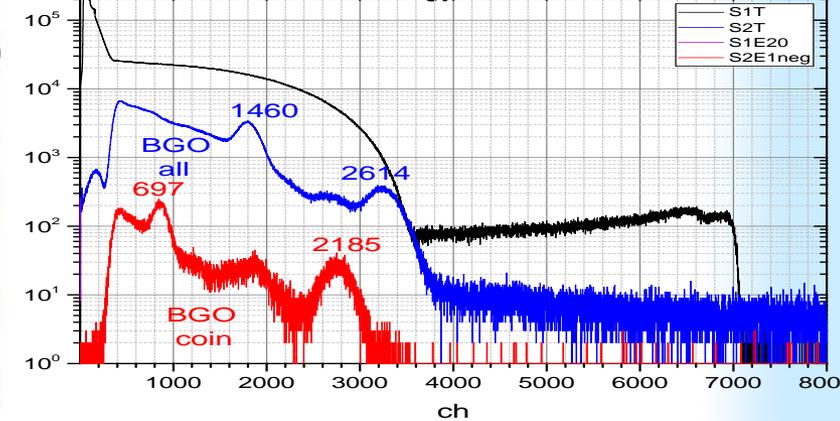
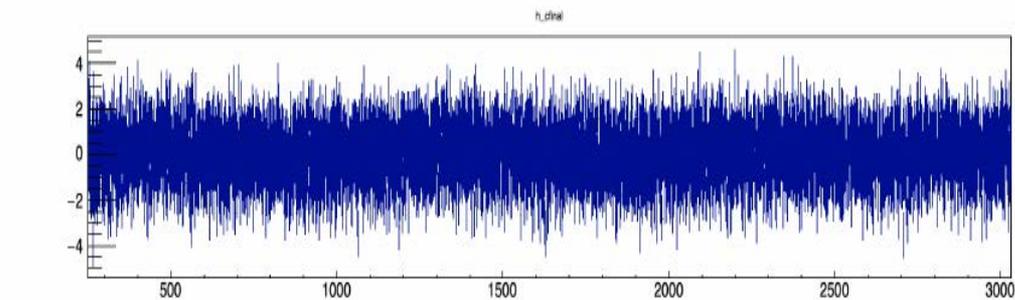
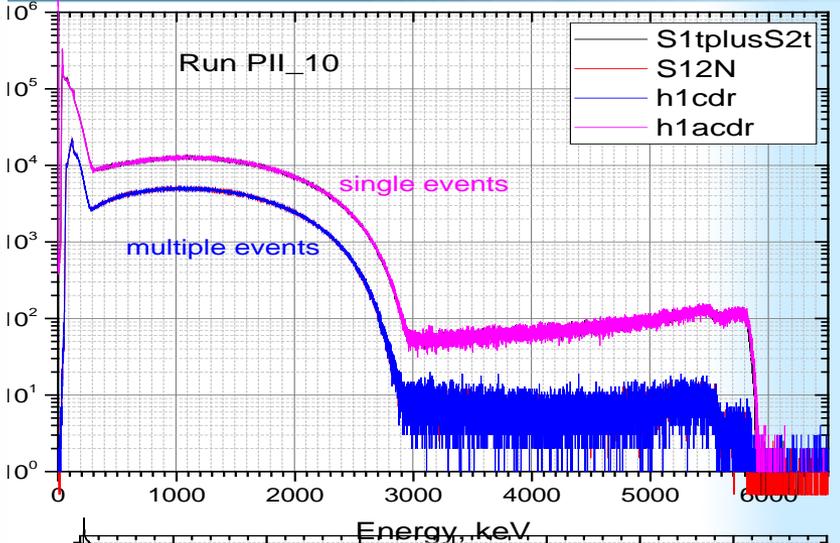
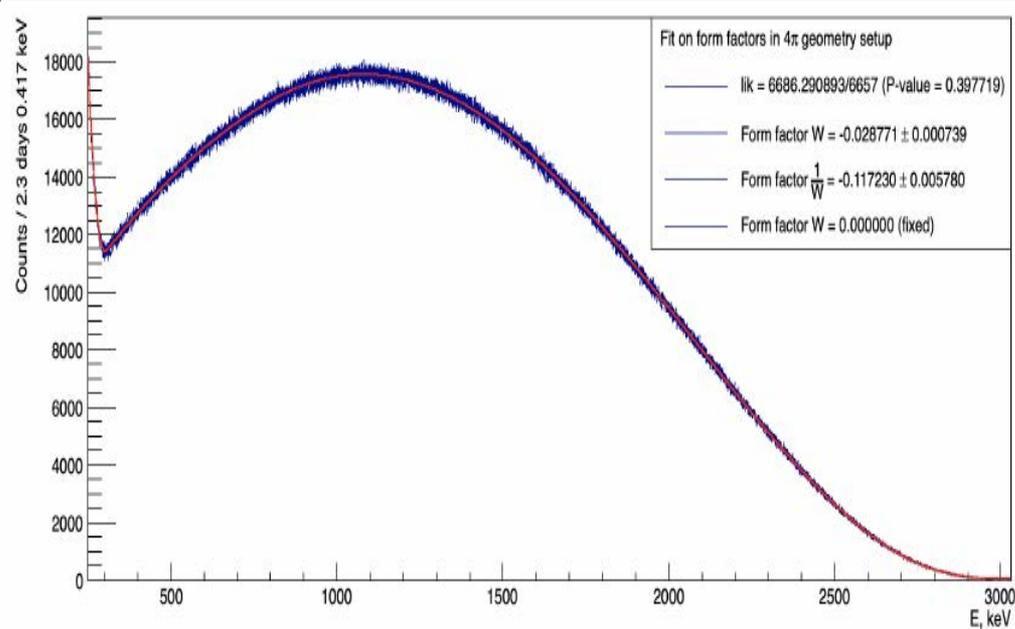
© 2021 г. И. Е. Алексеев<sup>b</sup>, С. В. Бахланов<sup>a</sup>, А. В. Дербин<sup>a,\*</sup>, И. С. Драчнев<sup>a</sup>,  
И. М. Котина<sup>a</sup>, В. Н. Муратова<sup>a</sup>, Н. В. Ниязова<sup>a</sup>, Д. А. Семенов<sup>a</sup>,  
М. В. Трушин<sup>a</sup>, Е. В. Унжаков<sup>a</sup>, Е. А. Чмель<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup> Радиевый институт им. В.Г. Хлопина  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, 2-ой Муриноский просп., 28



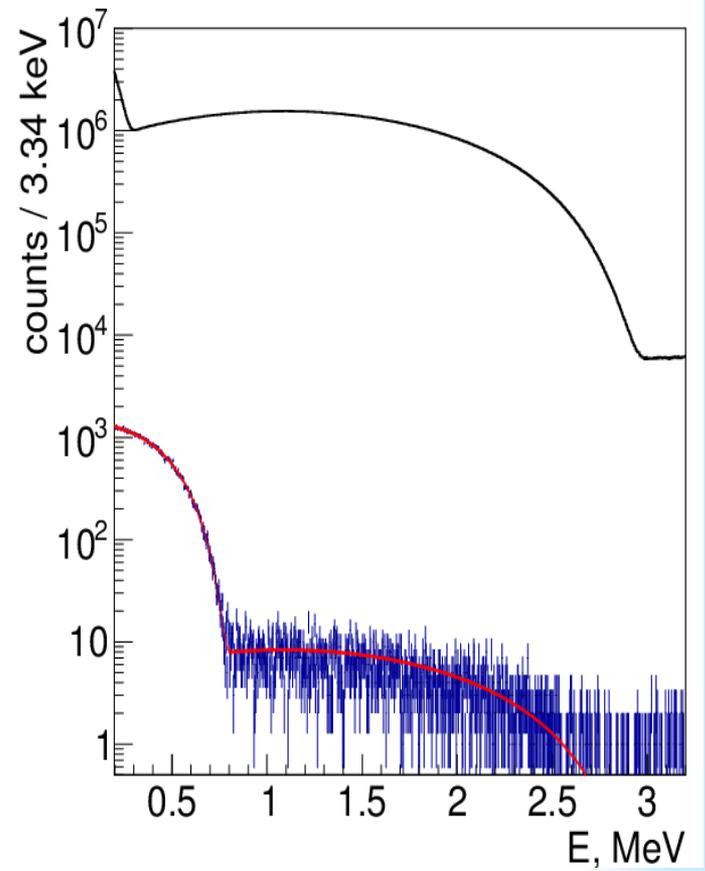
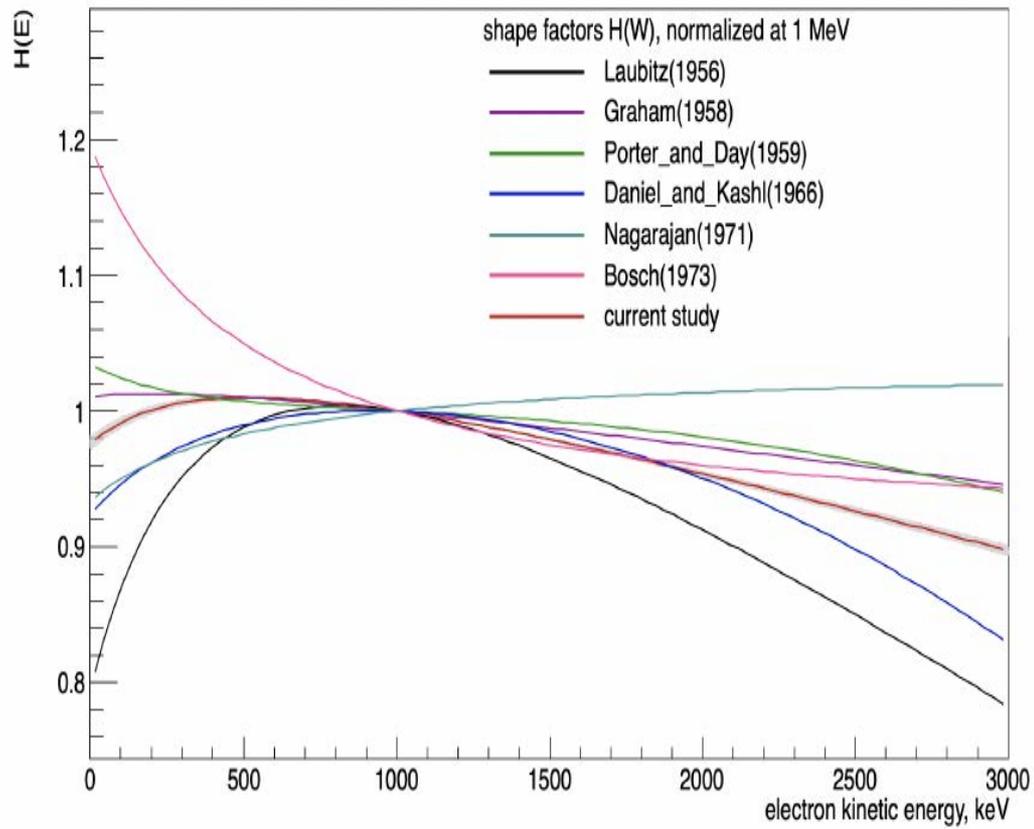
# Результаты для $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ с 4 $\pi$ -спектрометром + BGO



4- $\pi$  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  $^{144}\text{Pr}$  и  $^{144}\text{Ce}$ .

# Результаты для $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ с 4πβ-спектрометром + BGO

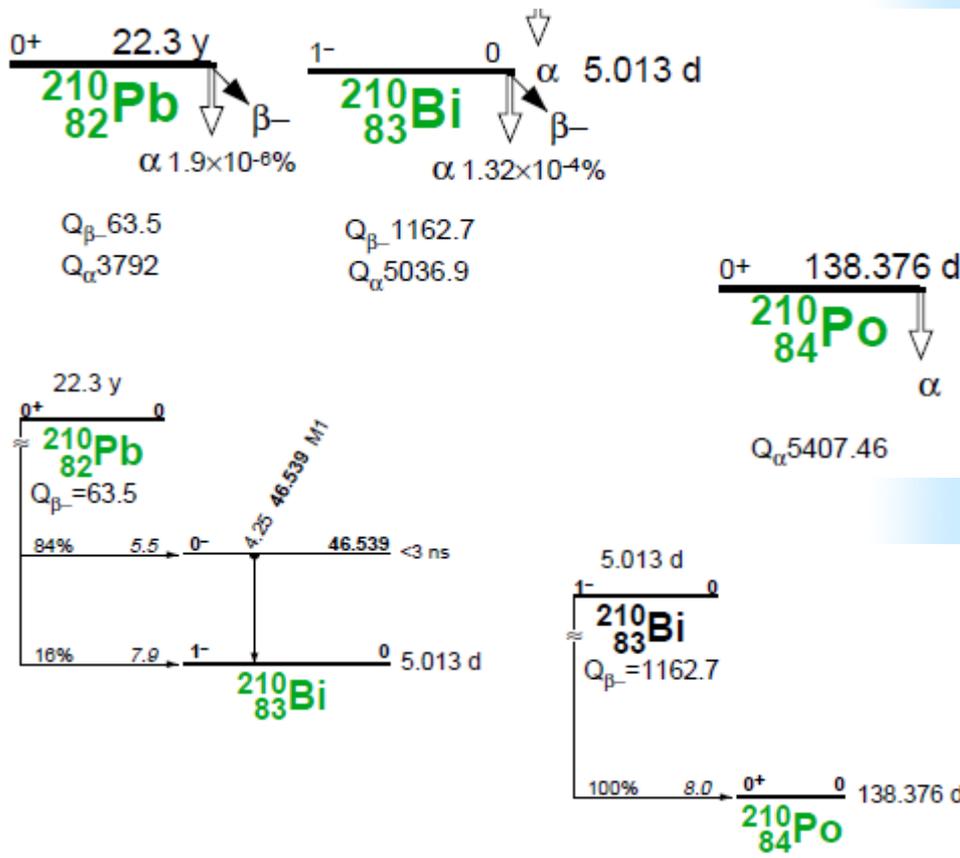
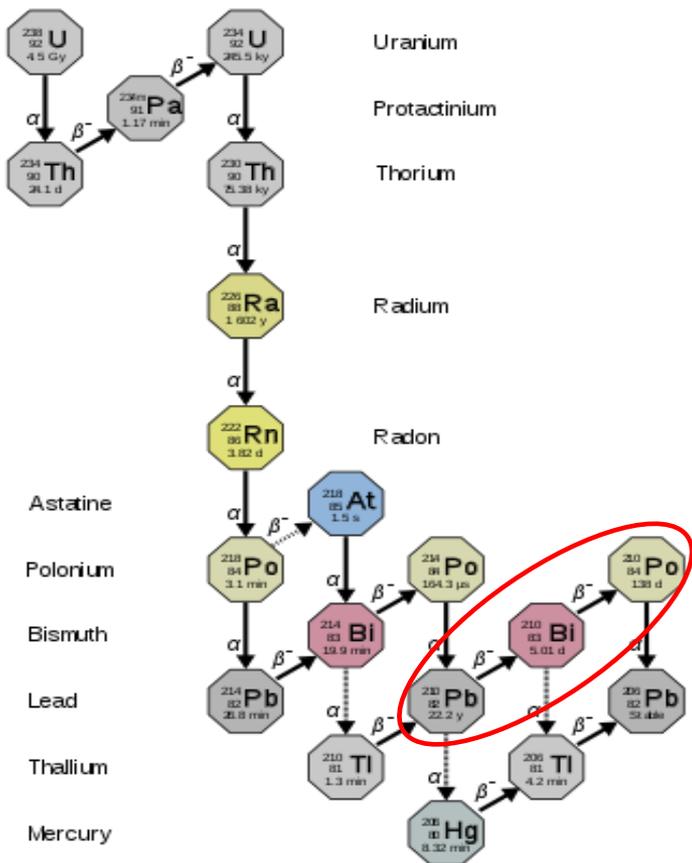
Journal of Physics: Conference Series 2103 (2021) 012141



$$C(W) = 1 + (-0.02877 \pm 0.00028)W + (-0.11722 \pm 0.00297)W^{-1}$$

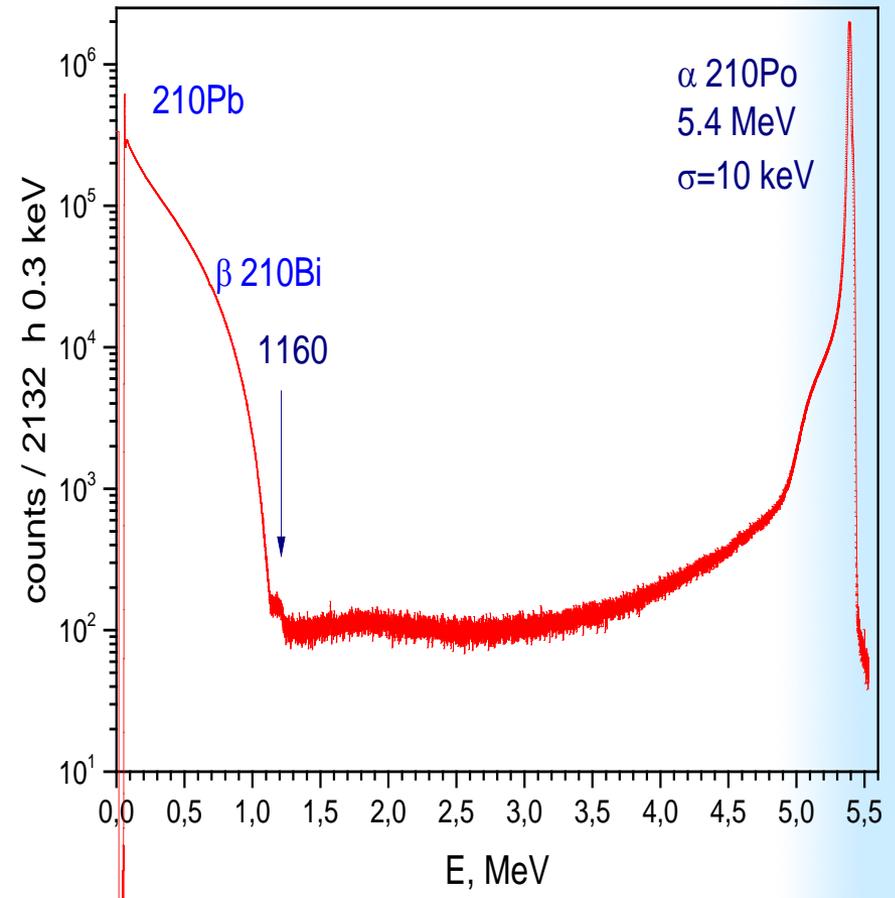
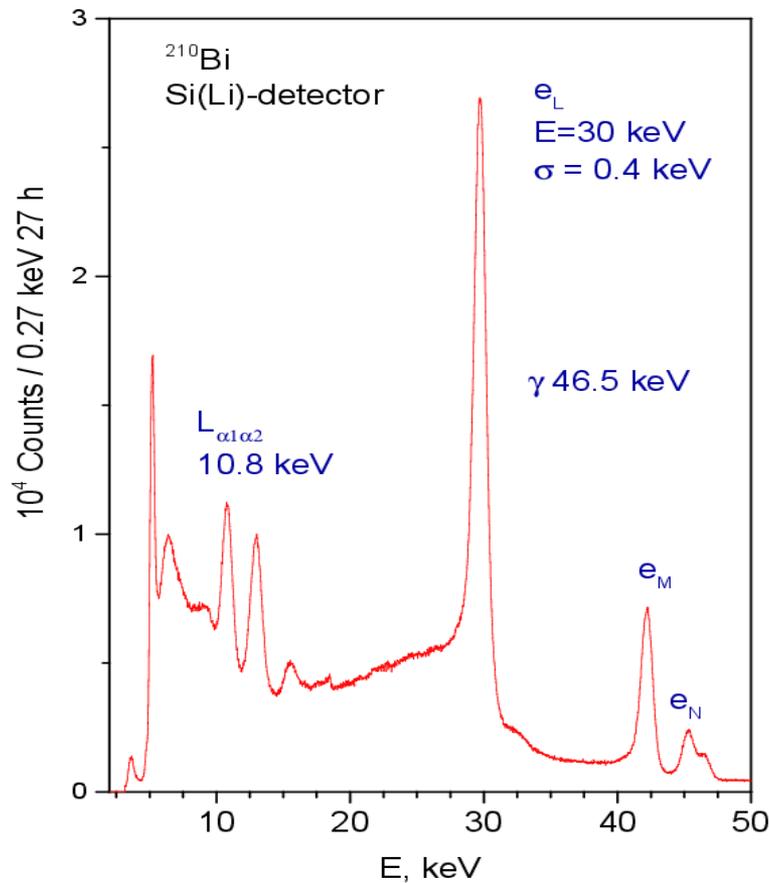
В результат параметры ядерного формфактора  $C(W)$  измерены с 1% точностью, необходимой для проведения эксперимента по поиску стерильного нейтрино..

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



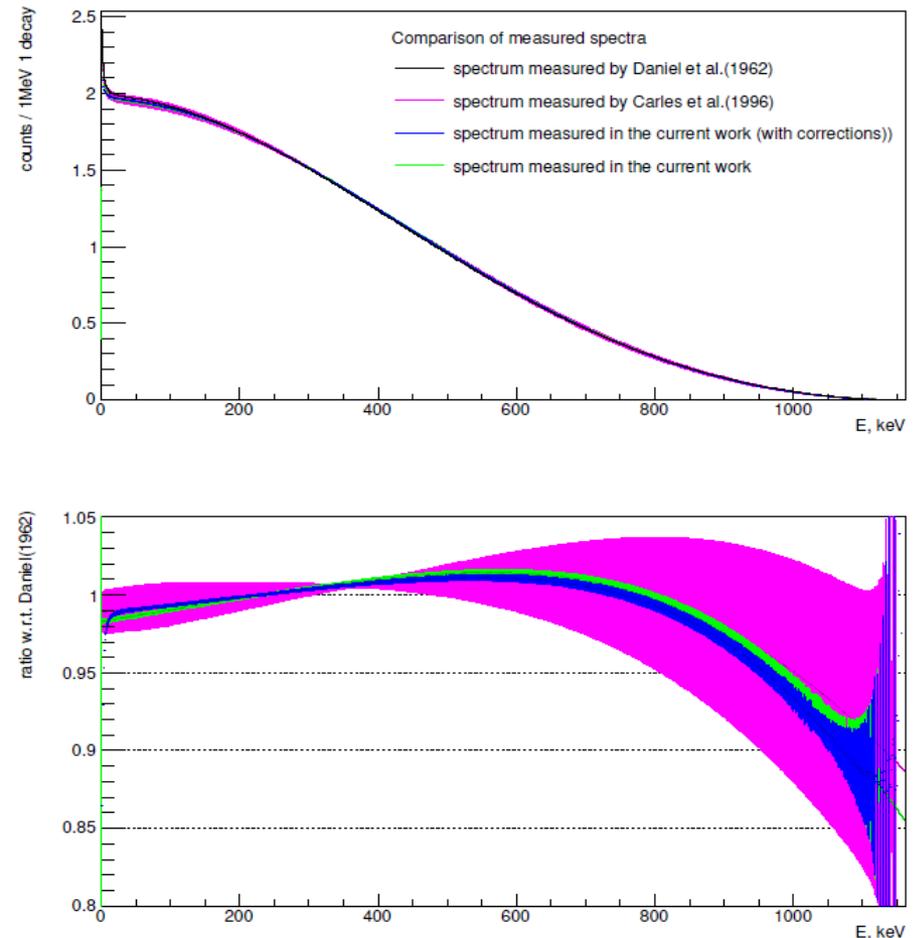
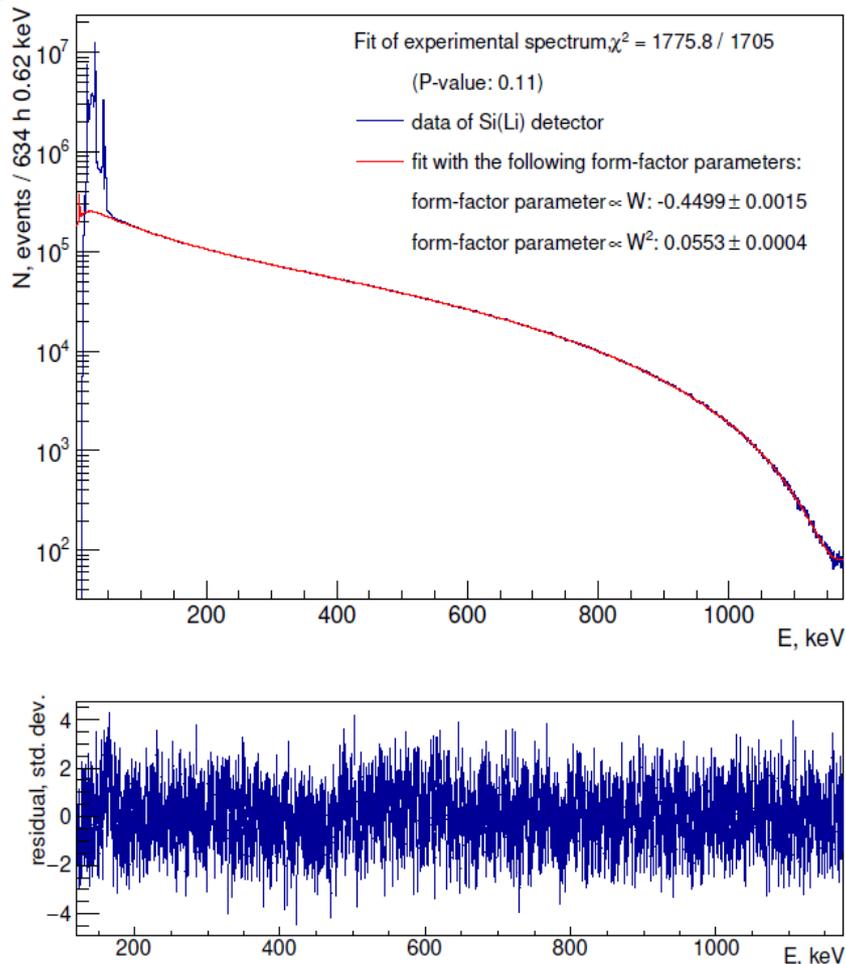
Бета спектр  $^{210}\text{Bi}$  присутствует в фоновых спектрах практически всех низкофоновых установок, предназначенных для регистрации нейтрино, частиц темной материи, двойного бета-распада и др. Может быть отделен от  $^{238}\text{U}$  через газообразный  $^{222}\text{Rn}$ , распады которого ведут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

# Измерение $\alpha$ -, $\beta$ -, и $\gamma$ -спектров $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Bi}$ и $^{210}\text{Po}$



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

# Подгонка бета спектра $^{210}\text{Bi}$ (Phys.Rev. C, 2020)



Изучаемый спектр это запрещенный переход первого порядка. Определены параметры формфактора для бета спектра  $^{210}\text{Bi}$  с рекордной точностью лучше 1%. Следующая задача измерить спектр с помощью 4π-детектора. Спектр использовался коллаборацией *Vorexino* при выделении сигнала от CNO-нейтрино.

# Результаты для $^{210}\text{Bi}$ с $4\pi\beta$ -спектрометром (2021)

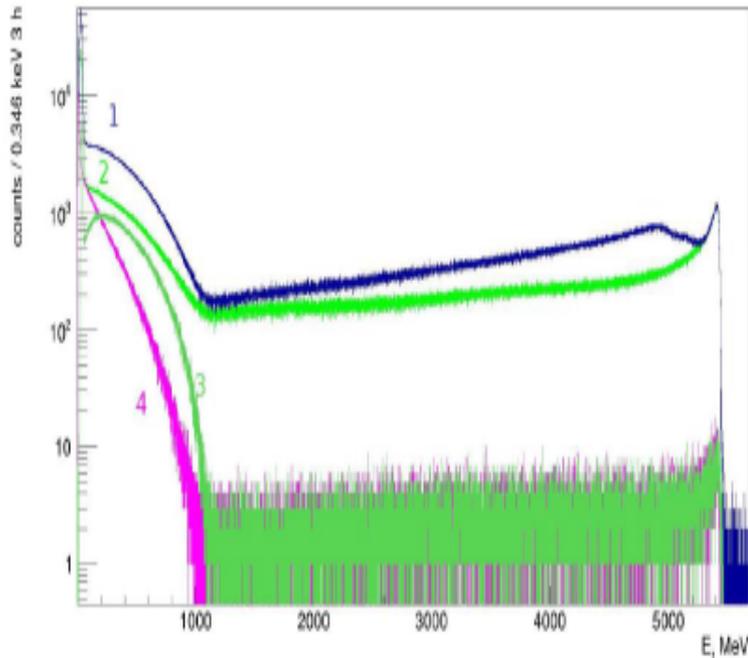
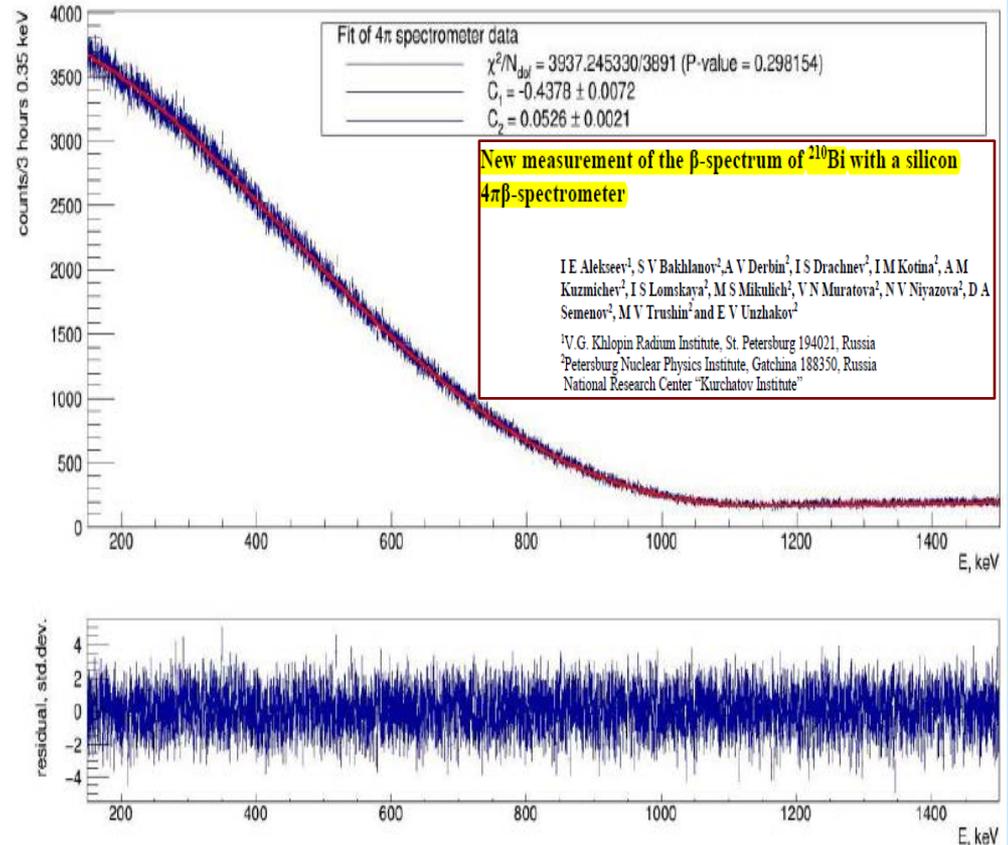


Figure 2. The experimental spectra measured by  $4\pi$   $\beta$ -spectrometer. 1 – total registered energy spectrum; 2 and 4 – spectra of single-detector, recorded in anticoincidence and coincidence, respectively; 3 – spectrum of events recorded by two detectors.

The electron spectrum produced by  $\beta$ -decay of  $^{210}\text{Bi}$  was measured using the new  $4\pi$ -spectrometer, RF close to the Gaussian and does not contain a low-energy part associated with backscattering of electrons from the crystal surface. With  $C(W)=1+C_1W+C_2W^2$  the determined values of the nuclear shape factor parameters  $C_1 = -0.4378 \pm 0.0072$  and  $C_2 = 0.0526 \pm 0.0021$  are in agreement with the results of our previous measurements



IE Alekseev<sup>1</sup>, SV Bakhlanov<sup>2</sup>, AV Derbin<sup>2</sup>, IS Drachnev<sup>2</sup>, IM Kotina<sup>1</sup>, AM Kuzmichev<sup>2</sup>, IS Lomsakaya<sup>2</sup>, MS Mikhlich<sup>2</sup>, VN Muratova<sup>2</sup>, NV Niyazova<sup>2</sup>, D A Semenov<sup>2</sup>, MV Trushin<sup>2</sup> and EV Unzhakov<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg 194021, Russia  
<sup>2</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia  
 National Research Center "Kurchatov Institute"

# Планы коллаборации Борексино и новые задачи

1. **Обработка всей статистики CNO – нейтрино ( $^{210}\text{Bi}$ , ПИЯФ)**

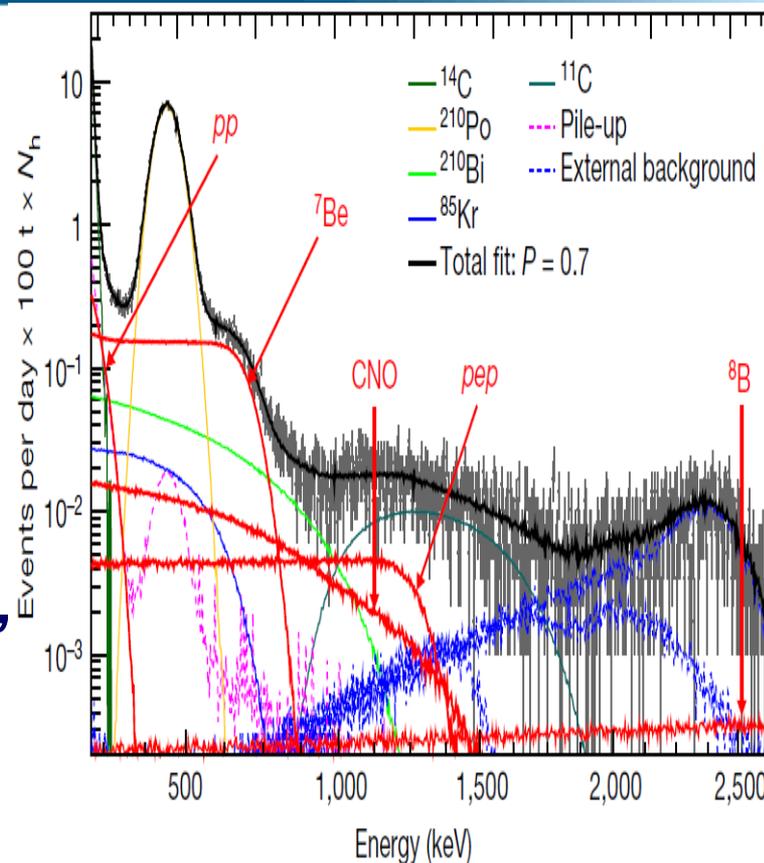
2. **Заключительные данные по солнечным нейтрино и гео-нейтрино**

3. **Поиск редких процессов, нарушение ПП, аксионы, тяжелое стерильное нейтрино, распады с  $\Delta B = \pm 1, 2, 3$**

4. **Корреляции с  $\gamma$ -всплесками, гравитационными волнами, солнечными вспышками, быстрыми радио-всплесками, сигналами IceCube**

5. **Поиск двойного бета-распада с Борексино (LEGEND  $^{76}\text{Ge}$ )**

6. **DARWIN -DARk matter WImp search with liquid xenON**



# Поиск частиц темной материи в 2020-21

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

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

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

2.1 Работы по созданию **<sup>169</sup>Tm** -содержащего детектора для регистрации резонансного поглощения солнечных аксионов с непрерывным спектром. Первые результаты с новыми тулий содержащими гранатами – **Tm<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>**.

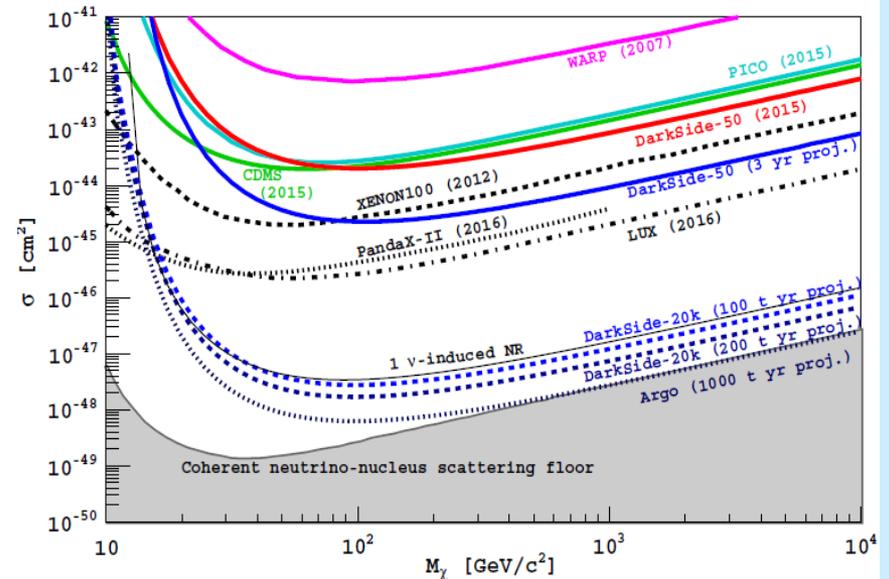
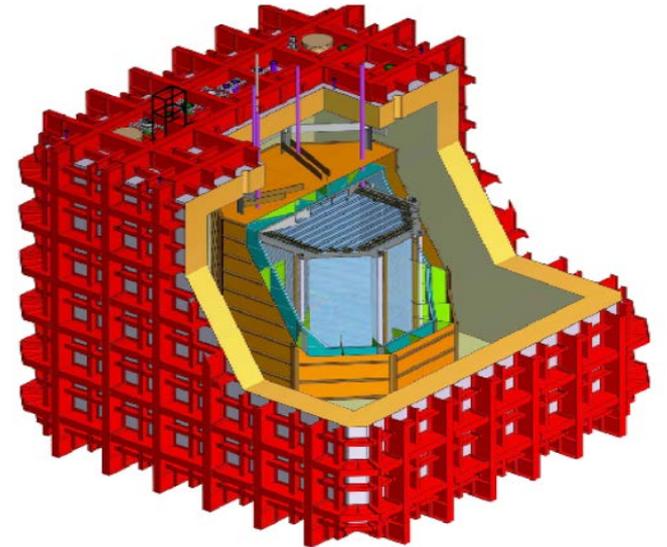
2.2 Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром **<sup>83</sup>Kr** в БНО ИЯИ. Продолжение измерений с криптоном, обогащенным изотопом **<sup>83</sup>Kr**.

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

# DarkSide – 20K (проект DS Proto 1t)

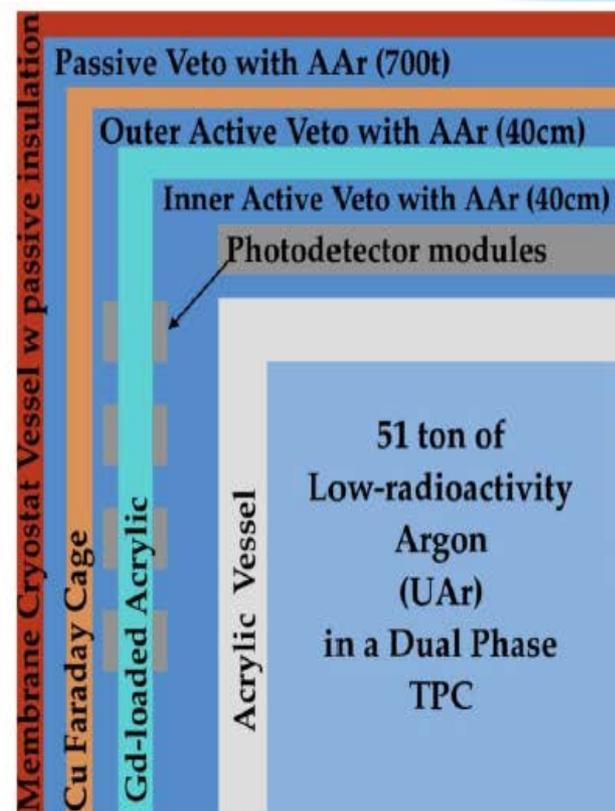
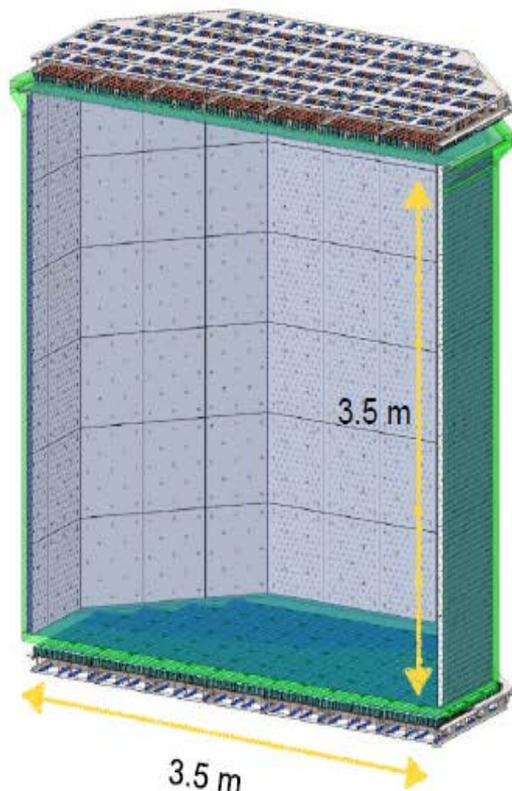
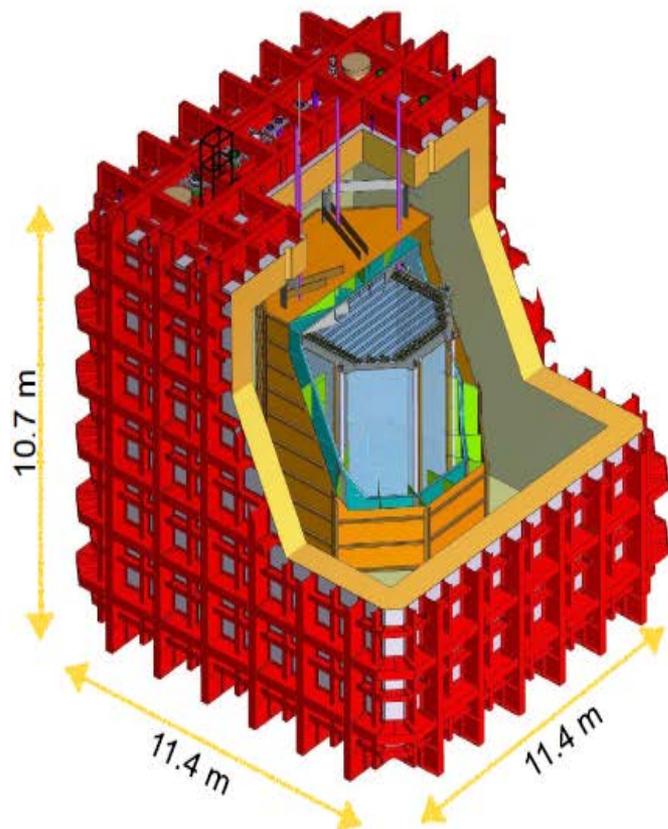
## DarkSide-20k: A 20 Tonne Two-Phase LAr TPC for Direct Dark Matter Detection at LNGS

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



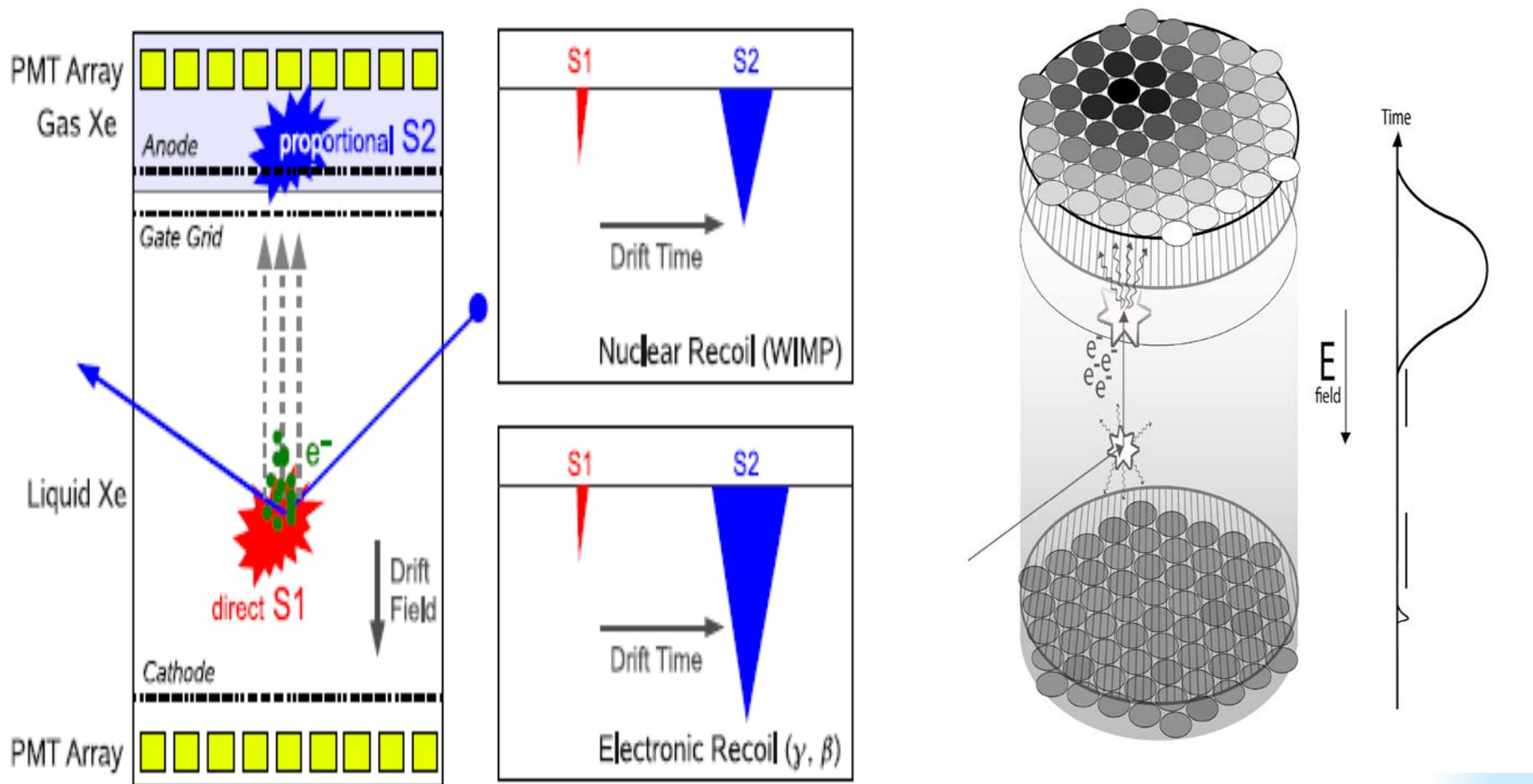
**Входим в группы Materials (ICP MS), Analysis (A.E.E), Calibration (252Cf+Si(Li))**

# Конструкция DarkSide 20K (Гран Сассо)



DarkSide 20K состоит из сверхчистого акриловой полости, заполненной 51 т низко-радиоактивного аргона (без  $^{39}\text{Ar}$ ). Сигнал считывается  $14\text{ м}^2 + 14\text{ м}^2$  массивом SiPM. Внешнее активное вето на основе атмосферного аргона (300 т) имеет слой акрила допированного Gd. Установка будет расположена в зале С лаборатории Гран Сассо 3.800 м.в.э. Сборка начинается в 2022 г, начало измерений 2025 г. Развитие ARGO будет содержать 360 т UAr и располагаться в SNOLab.

# 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.*

# DarkSide-10-50-20k collaboration (2020)

Jinst

PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

RECEIVED: December 18, 2019

ACCEPTED: January 27, 2020

PUBLISHED: February 26, 2020

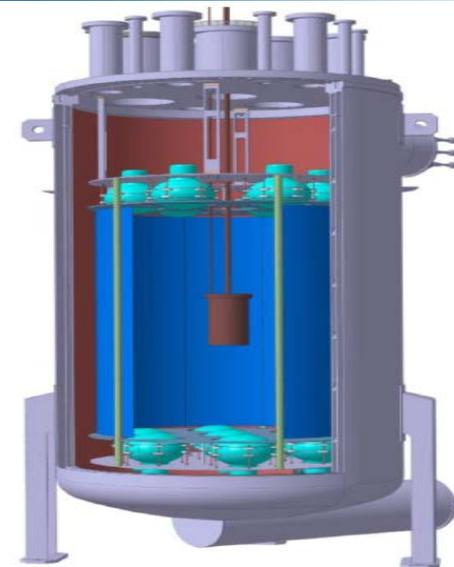
Design and construction of a new detector to measure ultra-low radioactive-isotope contamination of argon



The DarkSide-20k collaboration

DArT in ArDM (Canfranc)

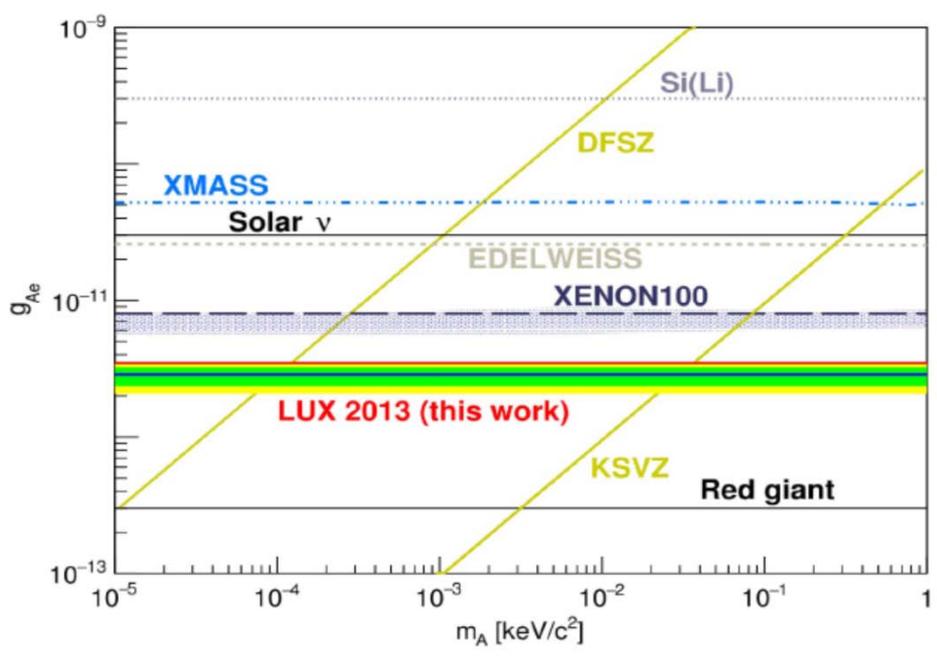
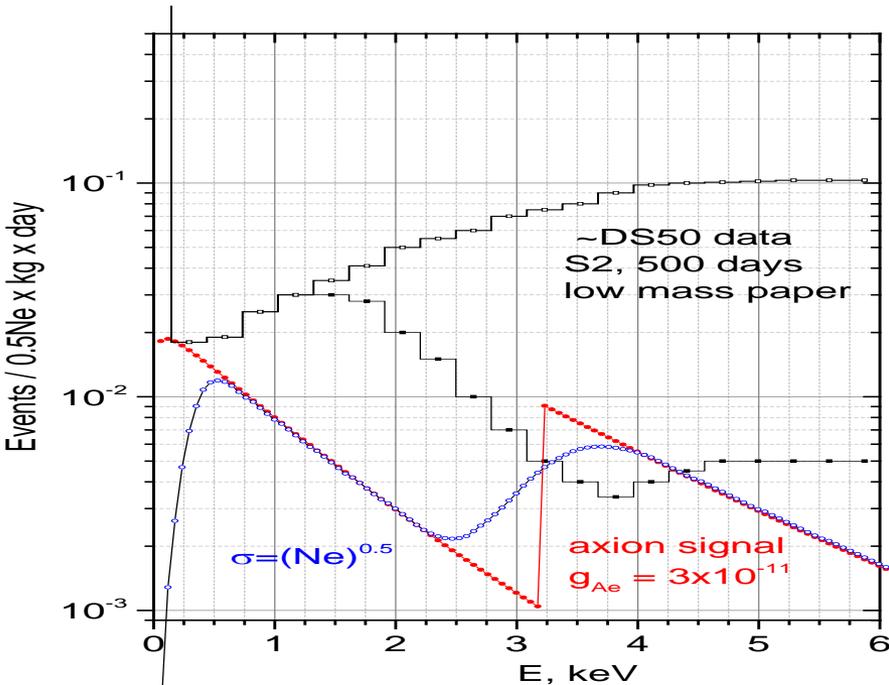
2020 JT



40-80 институтов

ArDM, DarkSide-50, DEAP-3600 и MiniCLEAN => Global Argon Dark Matter collaboration начиная с DS-20k. Основная проблема активность  $^{39}\text{Ar}$  (269 лет) решается Urania (330 кг/сут, США) и Aria (1 т/сут, Сардиния). DArT в ArDM (Canfranc) будет измерять  $^{39}\text{Ar}$ .

# Axioelectric effect for Ar atoms – DS50 results (2020)



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



**DEAP (2021)** Dark matter Experiment using Argon Pulse-shape discrimination. Search for high energy 5.5 MeV solar axions  $p + d \rightarrow 3\text{He} + A$  (5.5 MeV). Sensitivity to  $g_{Ae}$  via axioelectric effect, the paper in preparation.

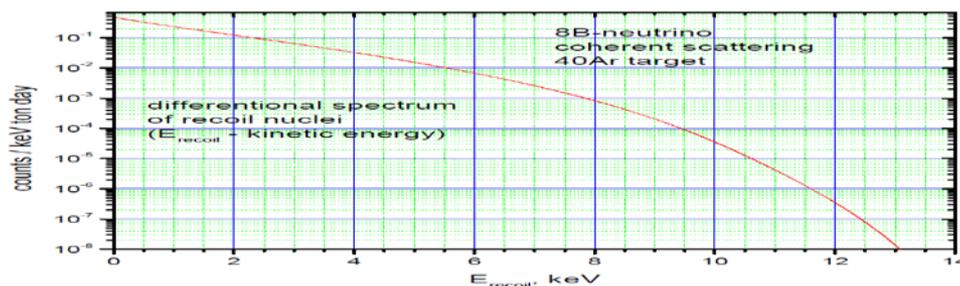
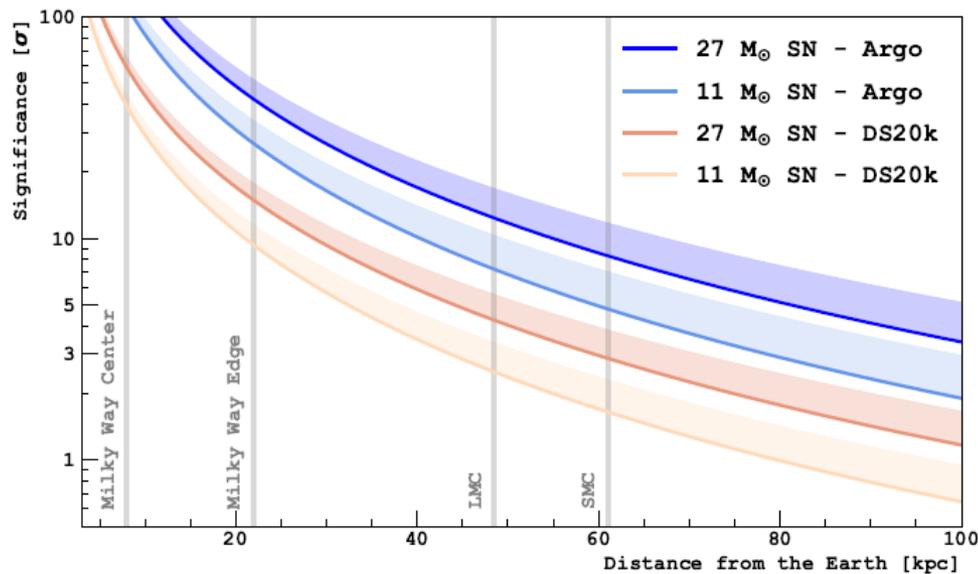
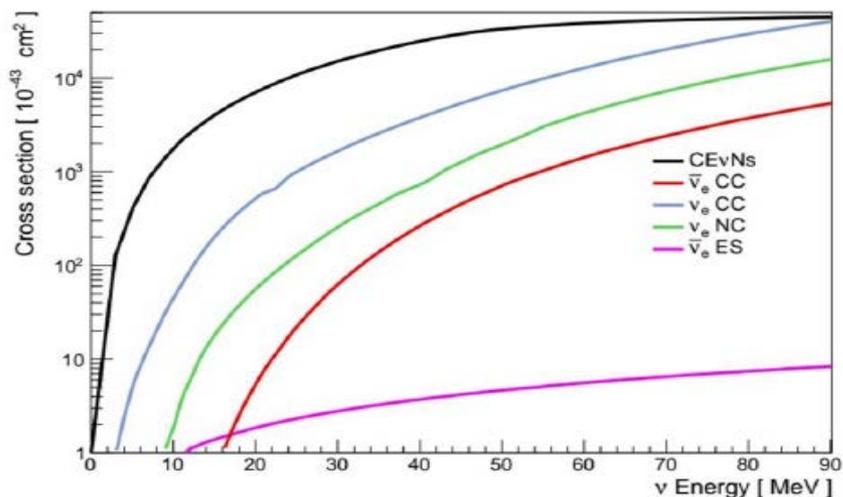
# Чувствительность DS20k к нейтрину от SN (2021)

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics  
An IOP and SISSA journal

Sensitivity of future liquid argon dark matter search experiments to core-collapse supernova neutrinos



The DarkSide-20k collaboration



*DS-20k and Argo detectors, designed for direct dark matter search, will be sensitive also to core-collapse SN neutrinos, via coherent elastic neutrino-nucleus scattering. This interaction channel is flavor-insensitive with a high-cross section, enabling for a high-statistics neutrino detection with target masses of 50 t and 360 t for DarkSide-20k and Argo respectively. Thanks to low-energy threshold of 0.5 keVnr achievable by exploiting the ionization channel, DarkSide-20k and Argo have the potential to discover supernova bursts throughout our galaxy and up to the Small Magellanic Cloud, respectively, assuming a 11-M progenitor star.*

# n-источник + Si-детектор для калибровки DS (2020)

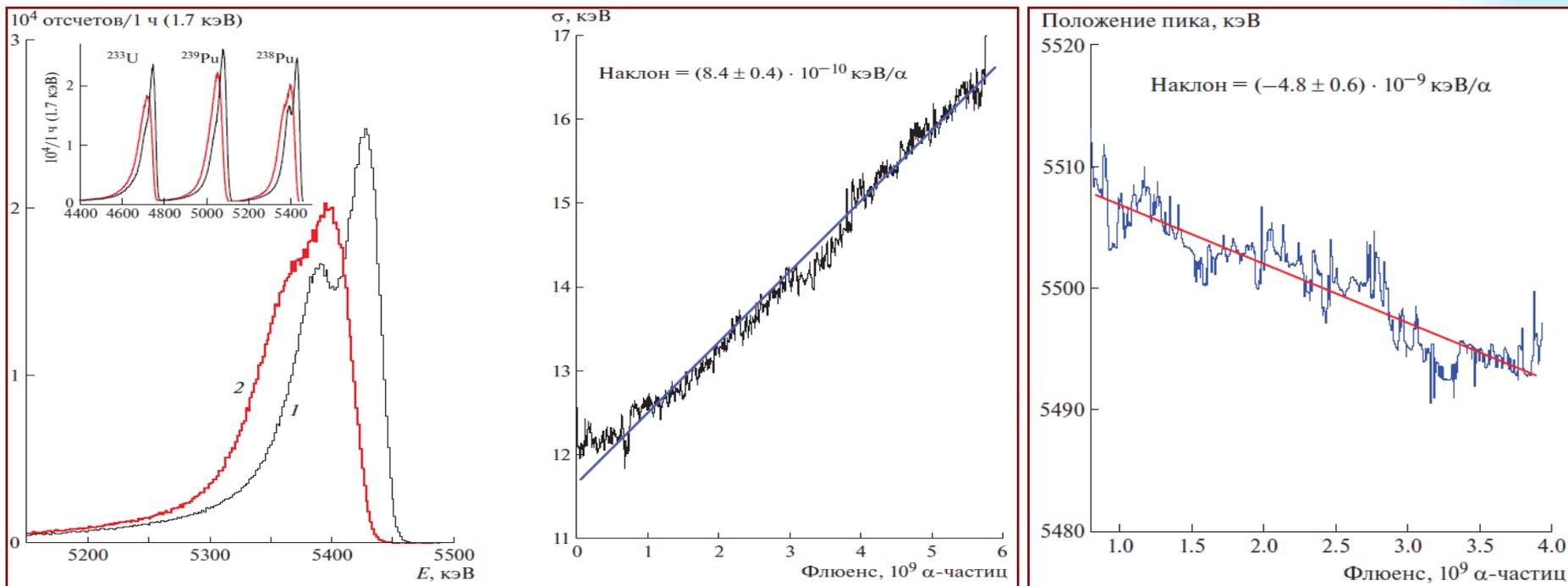
ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 1, с. 30–34

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.128.4.04

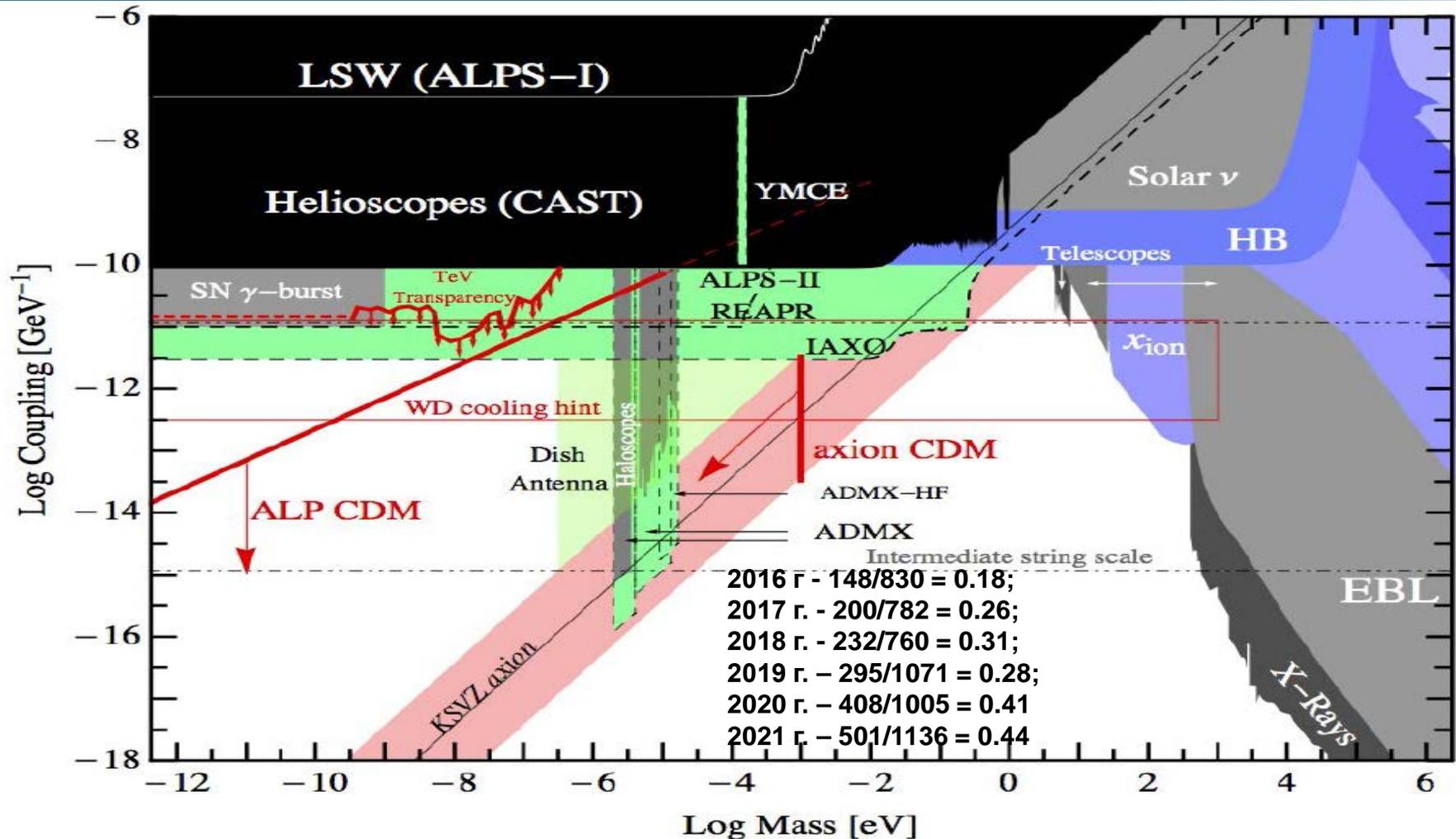
## ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ Si(Li)-ДЕТЕКТОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ $\alpha$ -ЧАСТИЦ

© 2020 г. Н. В. Базлов<sup>a,b</sup>, С. В. Бахланов<sup>a</sup>, А. В. Дербин<sup>a,\*</sup>, И. С. Драчнев<sup>a</sup>,  
Г. А. Изегов<sup>a,b</sup>, И. М. Котина<sup>a</sup>, В. Н. Муратова<sup>a</sup>, Н. В. Ниязова<sup>a</sup>, Д. А. Семенов<sup>a</sup>,  
М. В. Трушин<sup>a</sup>, Е. В. Унжаков<sup>a</sup>, Е. А. Чмель<sup>a</sup>



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

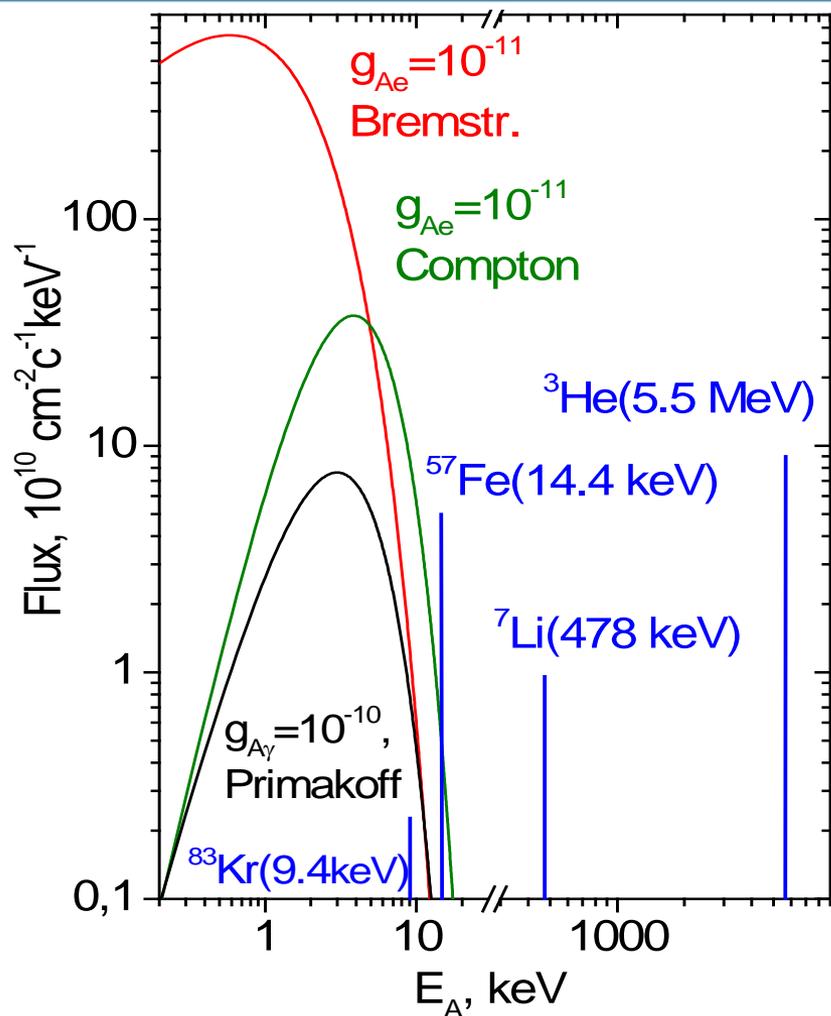
# Аксионы + аксионоподобные частицы ALPs



**Аксионы:** CP-проблема + темная материя. **ALPs** – Axion like particles: Аномальная прозрачность + динамика звезд различных типов. Слово **axion** в названии статей, выложенных в *arXiv* в 2021 г, встречается всего в 2.3 раза реже чем слово **neutrino**

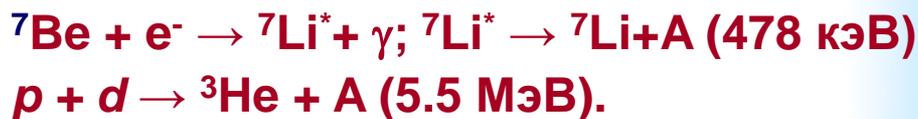


# Solar axions spectra vs $g_{A\gamma}$ , $g_{Ae}$ and $g_{AN}$



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.*

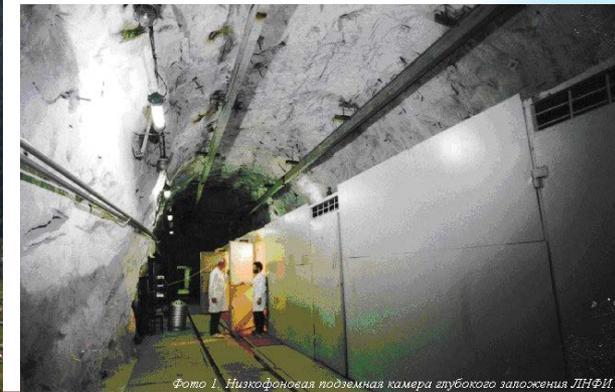


*The monochromatic axions emitted by  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{57}\text{Fe}$  and  ${}^{83}\text{Kr}$  nuclei can excite the same nuclide in a laboratory, because the axions are Doppler broadened due to thermal motion of the axion emitter in the Sun, and thus some axions have needed energy to excite the 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  ${}^{169}\text{Tm}$ .*

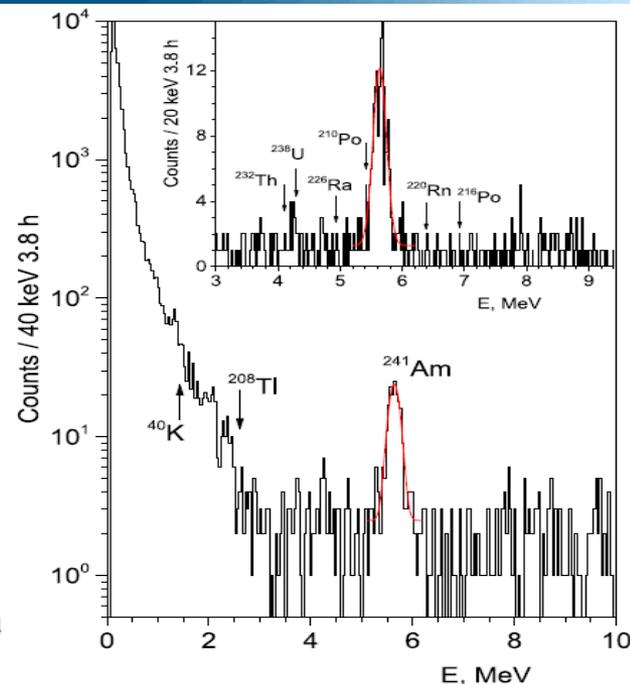
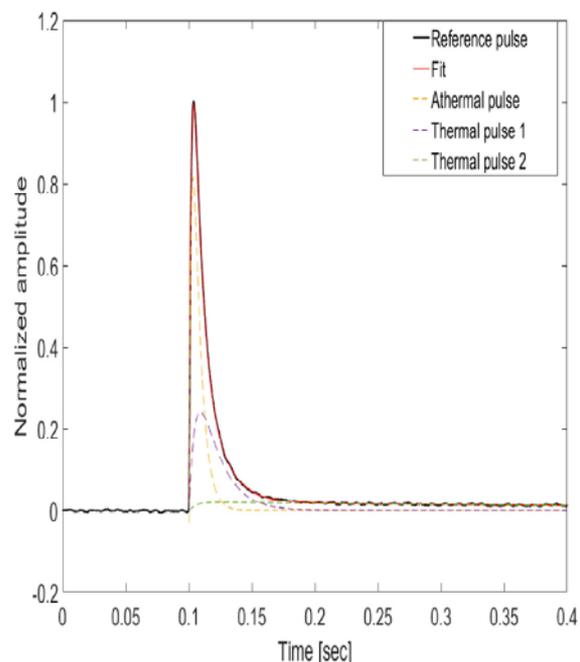


# Поиск солнечных аксионов, излучаемых в М1-переходе ядра $^{83}\text{Kr}$ (ИЯИ + ПИЯФ)



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

# $Tm_3Al_5O_{12}$ - новый перспективный болометр для солнечных аксионов $^{169}Tm + A \rightarrow ^{169}Tm^* (8.4 \text{ кэВ}) (2020)$



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

Тепловой импульс при регистрации энергии  $1 \text{ МэВ}$  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  $^{169}Tm$  ( $8.4 \text{ кэВ}$ ) 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

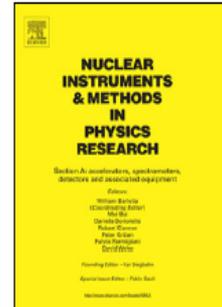


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://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<sup>a</sup>, A.V. Derbin<sup>b</sup>, I.S. Drachnev<sup>b</sup>, M. Laubenstein<sup>c</sup>, D.A. Lis<sup>d</sup>, M. Mancuso<sup>a</sup>,  
V.N. Muratova<sup>b</sup>, S. Nagorny<sup>e</sup>, S. Nisi<sup>c</sup>, F. Petricca<sup>a</sup>, V.V. Ryabchenkov<sup>f</sup>, S.E. Sarkisov<sup>f</sup>,  
D.A. Semenov<sup>b</sup>, K.A. Subbotin<sup>d</sup>, E.V. Unzhakov<sup>b,\*</sup>, E.V. Zharikov<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Max-Planck-Institut für Physik, 80805 München, Germany

<sup>b</sup> NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia

<sup>c</sup> INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy

<sup>d</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

<sup>e</sup> Queen's University, Physics Department, K7L 3N6 Kingston, Canada

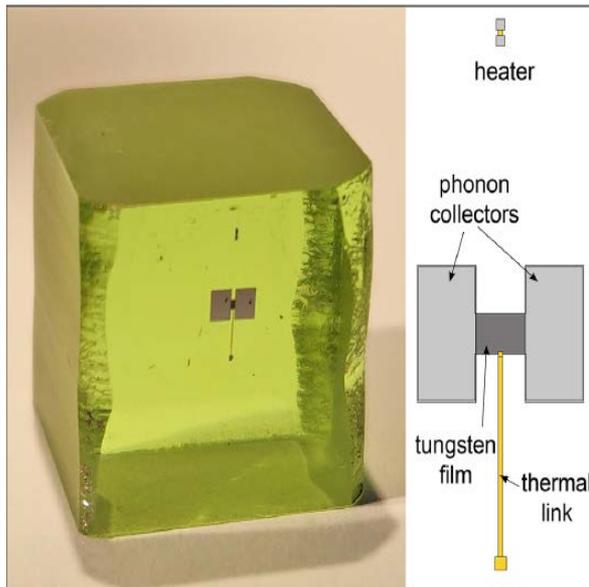
<sup>f</sup> NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia



# 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  $g_{Ae}$ :  $|g_{A\gamma}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 1.44 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$  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. Abdelhameed<sup>1</sup>, S. V. Bakhlanov<sup>2</sup>, P. Bauer<sup>1</sup>, A. Bento<sup>1,7</sup>, E. Bertoldo<sup>1</sup>, L. Canonica<sup>1</sup>, A. V. Derbin<sup>2</sup>, I. S. Drachnev<sup>2</sup>, N. Ferreiro Iachellini<sup>1</sup>, D. Fuchs<sup>1</sup>, D. Hauff<sup>1</sup>, M. Laubenstein<sup>3</sup>, D. A. Lis<sup>4</sup>, I. S. Lomskaya<sup>2</sup>, M. Mancuso<sup>1</sup>, V. N. Muratova<sup>2</sup>, S. Nagorny<sup>5</sup>, S. Nisi<sup>3</sup>, F. Petricca<sup>1</sup>, F. Proebst<sup>1</sup>, J. Rothe<sup>1</sup>, V. V. Ryabchenkov<sup>6</sup>, S. E. Sarkisov<sup>6</sup>, D. A. Semenov<sup>2</sup>, K. A. Subbotin<sup>4</sup>, M. V. Trushin<sup>2</sup>, E. V. Unzhakov<sup>2,a</sup>, E. V. Zharikov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Max-Planck-Institut für Physik, 80805 Munich, Germany

<sup>2</sup> NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia

<sup>3</sup> INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy

<sup>4</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

<sup>5</sup> Physics Department, Queen's University, Kingston, ON K7L 3N6, Canada

<sup>6</sup> NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

<sup>7</sup> Departamento de Física, Universidade de Coimbra, P3004 516 Coimbra, Portugal

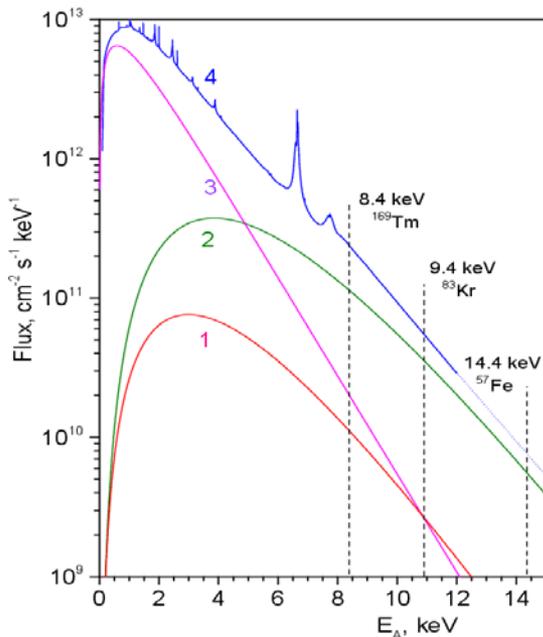
# Первые результаты, полученные с $Tm_3Al_5O_{12}$

Новые пределы, из измерений с TES  
на константы связи аксиона

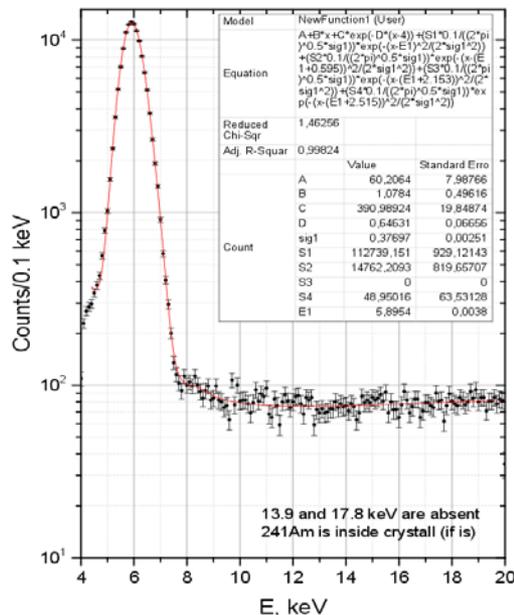
$$|g_{Ae}| \times |g_{AN}^3 + g_{AN}^0| \leq 2.8 \times 10^{-16} \Rightarrow |g_{Ae} \times m_A| \leq 4.6 \times 10^{-9} \text{ eV}$$

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

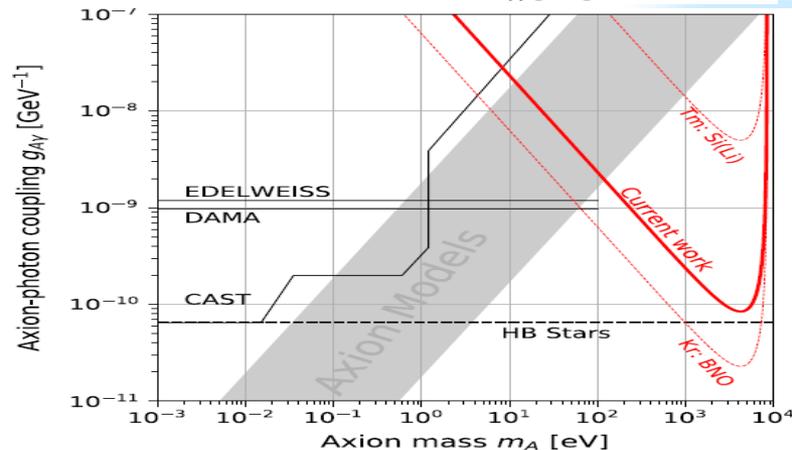
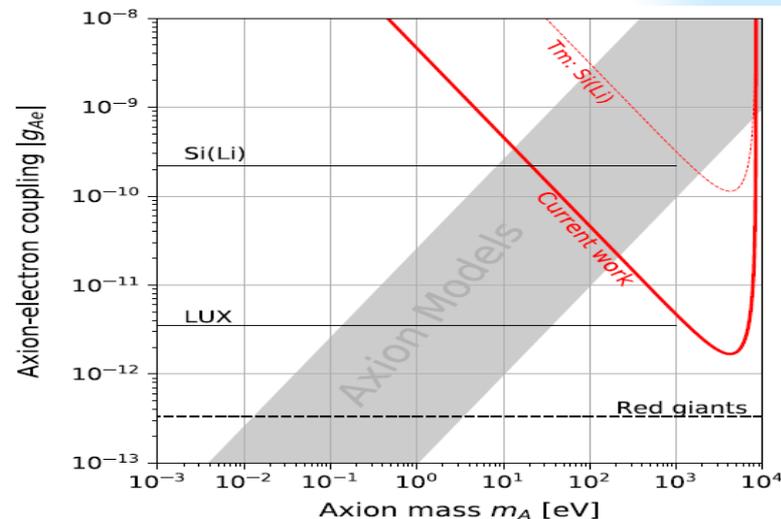
Измерения на поверхности Земли, верхний  
предел на число аксионных событий  $Slim=128$   
Пока уступает результатам  $^{83}Kr$ , но  $\omega_A / \omega_\gamma \ll 0$



Энергетический спектр  
солнечных аксионов.

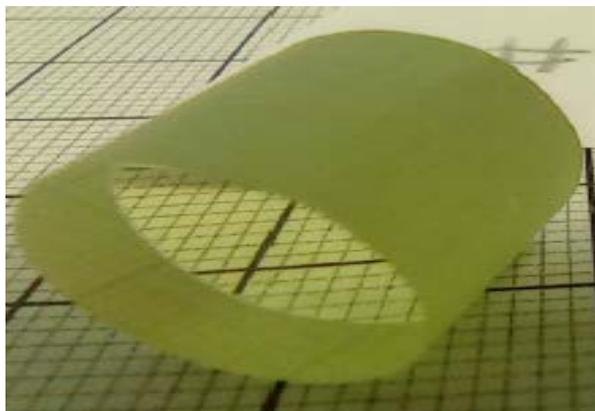
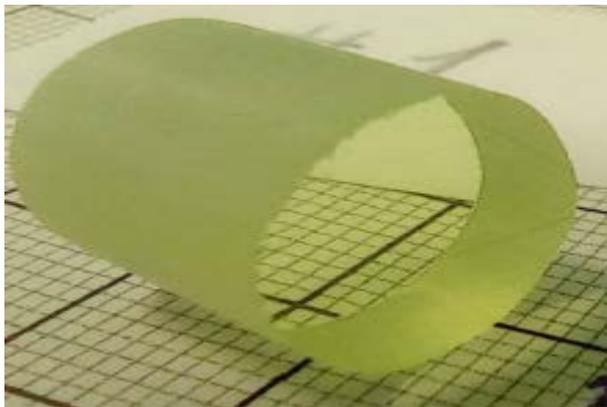


Спектр  $Tm$ -болометра и  
результаты подгонки.

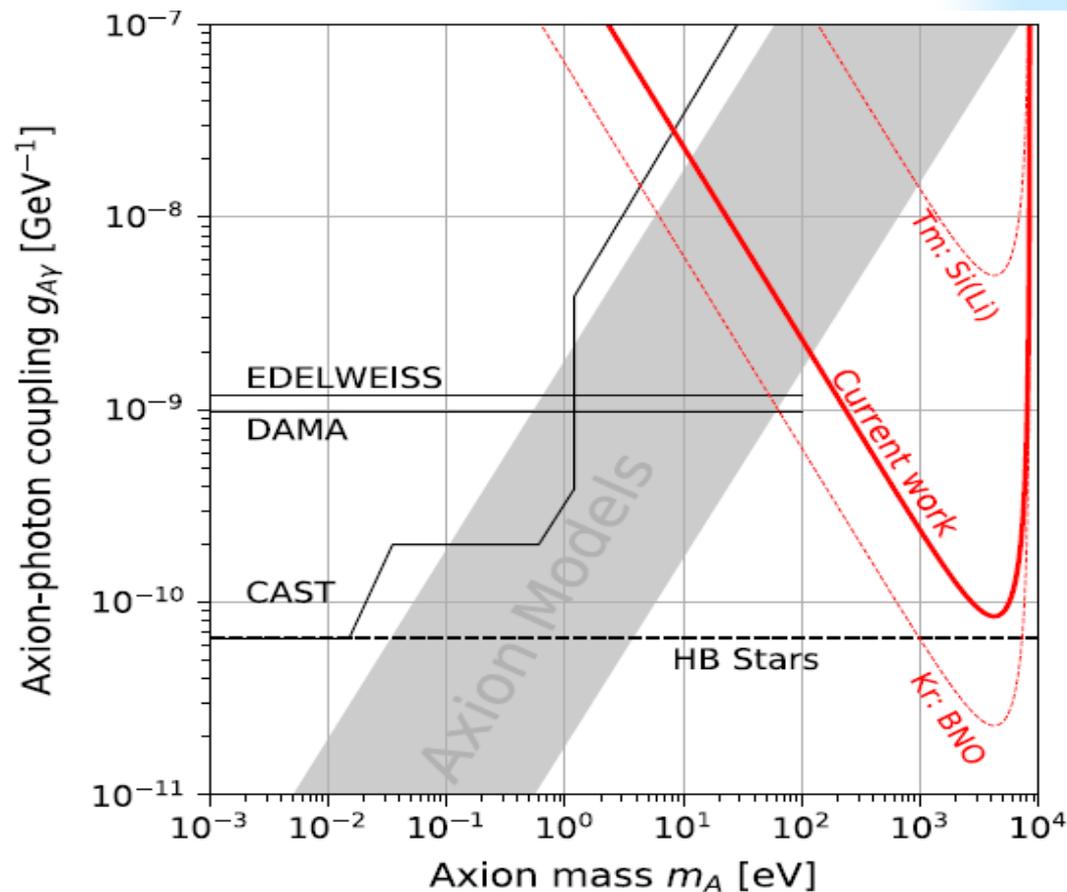


Верхние пределы на  $g_{Ay}$  в сравнении  
с результатами других экспериментов и астрофизическими  
ограничениями.

# Новые кристаллы $Tm_3Al_5O_{12}$ (2021)



4 кристалла, масса 10 г  
диаметр 12 мм, высота 12 мм



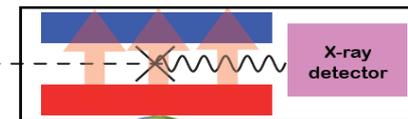
Можно ожидать, что с новыми кристаллами в подземной лаборатории Гран-Сассо чувствительность к  $g_{Ay}$  и  $g_{Ae}$  будет сравнима с результатами  $^{83}Kr$ -эксперимента. При этом для  $Tm$  отсутствует неопределенность в ЯМЭ, которая может привести к существенному уменьшению вероятности регистрации аксиона в  $Kr$ -эксперименте.



## CERN Axion Solar Telescope

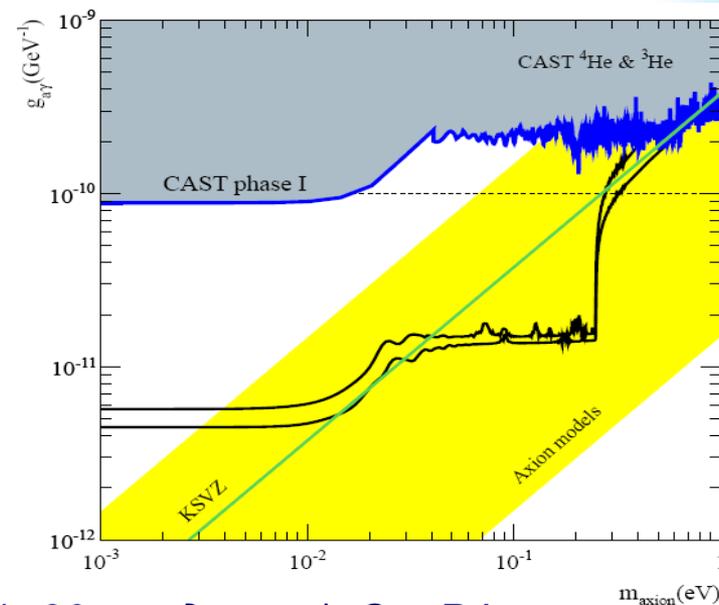
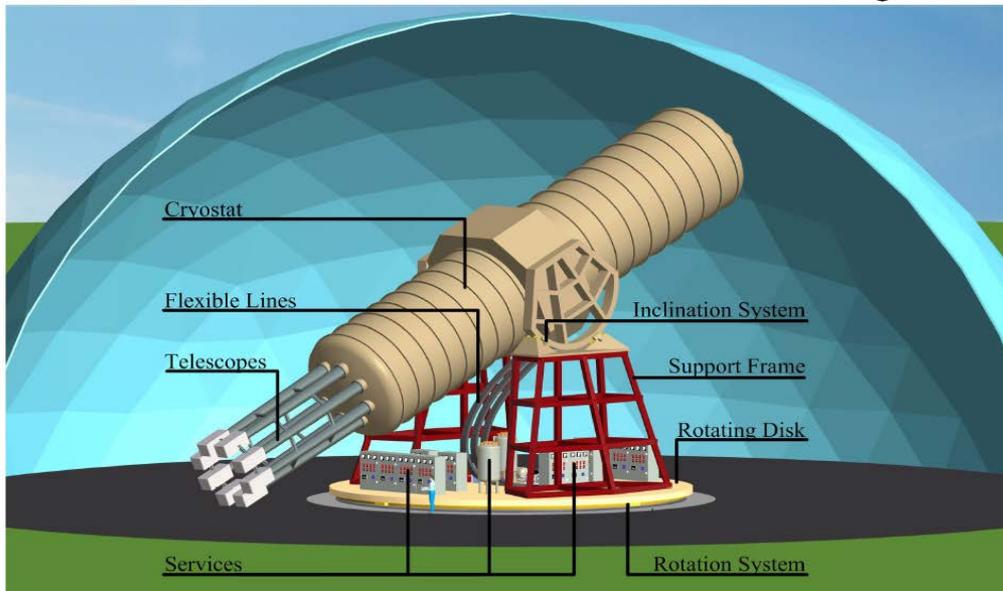


ALPs are produced inside the Sun via the two photon coupling (and others) and scape easily



← **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

# 2021 - IAXO: International AXion Observatory



PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: October 26, 2020

REVISED: March 5, 2021

ACCEPTED: April 16, 2021

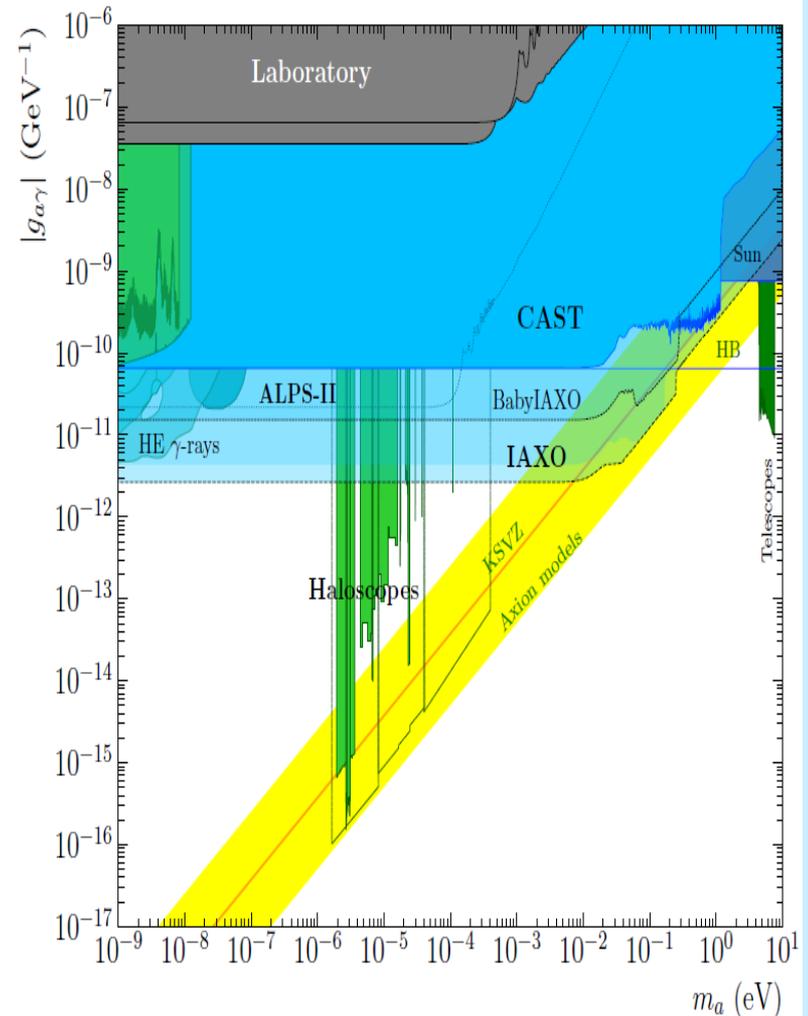
PUBLISHED: May 17, 2021

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



## The IAXO collaboration

A. Abeln<sup>1</sup>, K. Altenmüller<sup>2</sup>, S. Arguedas Cuendis<sup>3</sup>, E. Armengaud<sup>4</sup>, D. Attié<sup>4</sup>, S. Aune<sup>4</sup>, S. Basso<sup>5</sup>, L. Bergé<sup>6</sup>, B. Biasuzzi<sup>4</sup>, P.T.C. Borges De Sousa<sup>3</sup>, P. Brun<sup>4</sup>, N. Bykovskiy<sup>3</sup>, D. Calvet<sup>4</sup>, J.M. Carmona<sup>2</sup>, J.F. Castel<sup>2</sup>, S. Cebrián<sup>2</sup>, V. Chernov<sup>7,8</sup>, F.E. Christensen<sup>9</sup>, M.M. Civitani<sup>5</sup>, C. Cogollos<sup>10,11</sup>, T. Dafni<sup>2</sup>, A. Derbin<sup>12</sup>, K. Desch<sup>13</sup>, D. Díez<sup>2</sup>, M. Dinter<sup>21</sup>, B. Döbrich<sup>3</sup>, I. Drachnev<sup>12</sup>, A. Dudarev<sup>3</sup>, L. Dumoulin<sup>6</sup>, D.D.M. Ferreira<sup>9</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>4</sup>, I. Fleck<sup>14</sup>, J. Galán<sup>2</sup>, D. Gascón<sup>10,11</sup>, L. Gastaldo<sup>1</sup>, M. Giannotti<sup>15</sup>, Y. Giomataris<sup>4</sup>, A. Giuliani<sup>6</sup>, S. Gninenko<sup>8</sup>, J. Golm<sup>3,16</sup>, N. Golubev<sup>8</sup>, L. Hagge<sup>21</sup>, J. Hahn<sup>14</sup>, C.J. Hailey<sup>17</sup>, D. Hengstler<sup>1</sup>, P.L. Henriksen<sup>9</sup>, T. Houdy<sup>22,23</sup>, R. Iglesias-Marzoa<sup>18</sup>, F.J. Iguez<sup>15</sup>, I.G. Irastorza<sup>2,α</sup>, C. Iniguez<sup>18</sup>, K. Jakovčić<sup>20</sup>, J. Kaminski<sup>13</sup>, B. Kanoute<sup>19</sup>, S. Karstensen<sup>21</sup>, L. Kravchuk<sup>8</sup>, B. Lakić<sup>20</sup>, T. Lasserre<sup>4</sup>, P. Laurent<sup>4</sup>, O. Limousin<sup>4</sup>, A. Lindner<sup>21</sup>, M. Loidl<sup>24</sup>, I. Lomskaya<sup>12</sup>, G. López-Alegre<sup>18</sup>, B. Lubsandorzhev<sup>8</sup>, K. Ludwig<sup>21</sup>, G. Luzón<sup>2</sup>, C. Malbrunot<sup>3</sup>, C. Margalejo<sup>2</sup>, A. Marin-Franch<sup>18</sup>, S. Marnieros<sup>6</sup>, F. Marutzky<sup>21</sup>, J. Mauricio<sup>10,11</sup>, Y. Menesguen<sup>24</sup>, M. Mentink<sup>3</sup>, S. Mertens<sup>22,23</sup>, F. Mescia<sup>10,11</sup>, J. Miralda-Escudé<sup>10,25</sup>, H. Mirallas<sup>2</sup>, J.P. Mols<sup>4</sup>, V. Muratova<sup>12</sup>, X.F. Navick<sup>4</sup>, C. Nones<sup>4</sup>, A. Notari<sup>10,11</sup>, A. Nozik<sup>7,8</sup>, L. Obis<sup>2</sup>, C. Oriol<sup>6</sup>, F. Orsini<sup>19</sup>, A. Ortiz de Solórzano<sup>2</sup>, S. Oster<sup>21</sup>, H.P. Pais Da Silva<sup>3</sup>, V. Pantuev<sup>8</sup>, T. Papaevangelou<sup>4</sup>, G. Pareschi<sup>5</sup>, K. Perez<sup>26</sup>, O. Pérez<sup>2</sup>, E. Picatoste<sup>10,11</sup>, M.J. Pivovarov<sup>27,28</sup>, D.V. Poda<sup>6</sup>, J. Redondo<sup>2</sup>, A. Ringwald<sup>21</sup>, M. Rodrigues<sup>24</sup>, F. Rueda-Teruel<sup>18</sup>, S. Rueda-Teruel<sup>18</sup>, E. Ruiz-Choliz<sup>29</sup>, J. Ruz<sup>27</sup>, E.O. Saemann<sup>21</sup>, J. Salvado<sup>10,11</sup>, T. Schiffer<sup>13</sup>, S. Schmidt<sup>13</sup>, U. Schneekloth<sup>21</sup>, M. Schott<sup>29</sup>, L. Seguí<sup>4</sup>, F. Tavecchio<sup>5</sup>, H.H.J. ten Kate<sup>3</sup>, I. Tkachev<sup>8</sup>, S. Troitsky<sup>8</sup>, D. Unger<sup>1</sup>, E. Unzhakov<sup>12</sup>, N. Ushakov<sup>8</sup>, J.K. Vogel<sup>27</sup>, D. Voronin<sup>8</sup>, A. Weltman<sup>30</sup>, U. Werthenbach<sup>14</sup>, W. Wuensch<sup>3</sup>, A. Yanes-Díaz<sup>18</sup>



ПЯФ - Отбор материалов ICP MS+HPGe, монитор ВГО, М-К симуляции, gAe

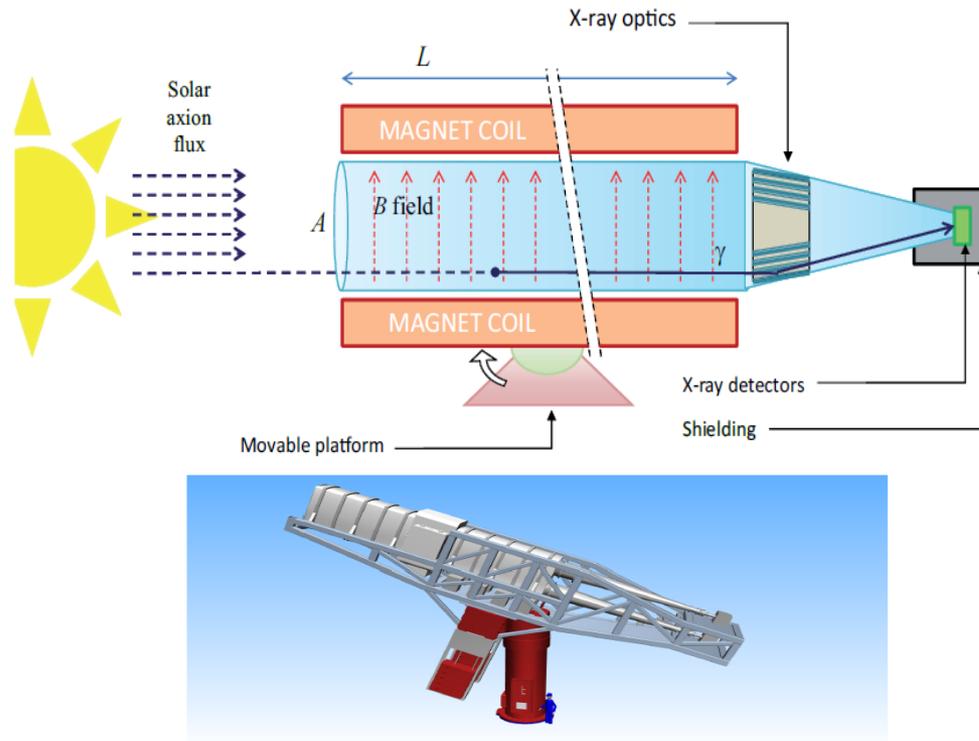


Figure 18. Conceptual design of BabyIAXO.

Parameter	Units	BabyIAXO	IAXO baseline	IAXO upgraded
$B$	T	$\sim 2$	$\sim 2.5$	$\sim 3.5$
$L$	m	10	20	22
$A$	$\text{m}^2$	0.77	2.3	3.9
$f_M$	$\text{T}^2\text{m}^4$	$\sim 230$	$\sim 6000$	$\sim 24000$
$b$	$\text{keV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$1 \times 10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$
$\epsilon_d$		0.7	0.8	0.8
$\epsilon_o$		0.35	0.7	0.7
$a$	$\text{cm}^2$	$2 \times 0.3$	$8 \times 0.15$	$8 \times 0.15$
$\epsilon_t$		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. Armengaud<sup>1</sup>, D. Attie<sup>1</sup>, S. Basso<sup>2</sup>, P. Brun<sup>1</sup>, N. Bykovskiy<sup>3</sup>, J. M. Carmona<sup>4</sup>, J. F. Castel<sup>4</sup>, S. Cebrián<sup>4</sup>, M. Civitani<sup>2</sup>, C. Cogollos<sup>5</sup>, D. Costa<sup>5</sup>, T. Dafni<sup>4</sup>, A.V. Derbin<sup>6</sup>, M.A. Descalle<sup>7</sup>, K. Desch<sup>8</sup>, B. Döbrich<sup>3</sup>, I. Dratchnev<sup>9</sup>, A. Dudarev<sup>3</sup>, E. Ferrer-Ribas<sup>1</sup>, I. Fleck<sup>17</sup>, J. Galán<sup>1</sup>, G. Galanti<sup>2</sup>, D. Gascón<sup>5</sup>, L. Gastaldo<sup>9</sup>, L. Garrido<sup>5</sup>, C. Germani<sup>5</sup>, G. Ghisellini<sup>2</sup>, M. Giannotti<sup>10</sup>, I. Giomataris<sup>1</sup>, S. Gninenko<sup>11</sup>, N. Golubev<sup>11</sup>, R. Graciani<sup>5</sup>, I. G. Irastorza<sup>4,\*</sup>, K. Jakovčić<sup>12</sup>, J. Kaminski<sup>8</sup>, M. Krčmar<sup>12</sup>, C. Krieger<sup>8</sup>, B. Lakić<sup>12</sup>, T. Lasserre<sup>1</sup>, P. Laurent<sup>1</sup>, I. Lomsikaya<sup>6</sup>, E. Unzhakov<sup>6</sup>, O. Limousin<sup>1</sup>, A. Lindner<sup>13</sup>, G. Luzón<sup>4</sup>, C. Melgarejo<sup>4</sup>, F. Mescia<sup>5</sup>, J. Miralda-Escudé<sup>5</sup>, H. Mirallas<sup>4</sup>, V. N. Muratova<sup>6</sup>, X.F. Navick<sup>1</sup>, C. Nones<sup>1</sup>, A. Notari<sup>5</sup>, A. Nozik<sup>11</sup>, A. Ortiz de Solórzano<sup>4</sup>, V. Pantuev<sup>11</sup>, T. Papaevangelou<sup>1</sup>, G. Pareschi<sup>2</sup>, E. Picatoste<sup>5</sup>, M. J. Pivovarov<sup>7</sup>, K. Perez<sup>14</sup>, J. Redondo<sup>4</sup>, A. Ringwald<sup>13</sup>, J. Ruz<sup>7</sup>, E. Ruiz-Chóliz<sup>4</sup>, E. O. Saemann<sup>13</sup>, J. Salvadó<sup>5</sup>, M. P. Sampériz<sup>4</sup>, T. Schiffer<sup>8</sup>, S. Schmidt<sup>8</sup>, U. Schneekloth<sup>13</sup>, M. Schott<sup>15</sup>, H. Silva<sup>3</sup>, G. Tagliaferri<sup>2</sup>, F. Tavecchio<sup>2</sup>, H. ten Kate<sup>3</sup>, I. Tkachev<sup>11</sup>, S. Troitsky<sup>11</sup>, P. Vadrine<sup>1</sup>, J. K. Vogel<sup>7</sup>, A. Weltman<sup>16</sup>.

<sup>1</sup>IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

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

<sup>3</sup>European Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland

<sup>4</sup>Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain

<sup>5</sup>Institut de Ciències del Cosmos, Universitat de Barcelona, Spain

<sup>6</sup>St. Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>7</sup>Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

<sup>8</sup>Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

<sup>9</sup>Kirchhoff Institute for Physics, Heidelberg University, INF 227 69120 Heidelberg Germany

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

<sup>11</sup>Institute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>12</sup>Rudjer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

<sup>13</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

<sup>14</sup>Massachusetts Institute of Technology, USA

<sup>15</sup>Johannes Gutenberg University Mainz, Germany

<sup>16</sup>University 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  $^{210}\text{Bi}$ , результаты которых 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 продолжила поиск корреляций  $\nu$ -событий с солнечными вспышками (SF). Коллаборацией получены новые данные по потокам антинейтрино от Солнца, новые пределы на магнитный момент и маг. поле Солнца  $\mu \times H < 6.9 \times 10^{-9} \text{ В[kG]} \mu_{\text{B}}$ . 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  **$^{252}\text{Cf}$** , 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 $\pi$ -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  **$^{169}\text{Tm}$**  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.

# Основные результаты работы в 2021 г.

1. Группой ПИЯФ выполнены прецизионные измерения бета-спектра  $^{210}\text{Bi}$  с новым  $4\pi\beta$ -спектрометром. Параметры ядерного формфактора согласуются с нашими предыдущими результатами, полученными в эксперименте по схеме «мишень-детектор», которые использовались для определения вклада в фон Borexino от  $^{210}\text{Bi}$  при анализе сигналов от CNO-нейтрино. Результаты опубликованы в *J. Phys.: Conf. Ser.*
2. Группа ПИЯФ продолжила поиск корреляций низкоэнергетических событий в детекторе Borexino с быстрыми радиовсплесками (FRBs). Получены новые ограничения на флюенсы нейтрино всех флейвов, связанные FRBs. Результаты опубликованы в arXive и направлены в *European Physical Journal C*.
3. Коллаборацией подготовлена статья по идентификации распадов космогенного  $^{11}\text{C}$ . Результаты опубликованы в *European Physical Journal C*.
4. Впервые удалось выделить направление солнечных  $^7\text{Be}$ -нейтрино используя черенковское излучение электронов отдачи в жидком сцинтилляторе детектора Borexino. Направлено в *Phys. Rev. D*.
5. ПИЯФ предложил и проводит поиск корреляций сигналов Borexino с гравитационными волнами (GW) и сигналами IceCube и другими транзиентными источниками.
6. Продолжена разработка калибровочного источника нейтронов на основе  $^{252}\text{Cf}$ , совмещенного с Si-детектором. Проводилось изучение радиационной стойкости Si-детекторов при регистрации альфа-частиц и осколков деления. Результаты опубликованы в *J. Phys.: Conf. Ser.*
7. Выращены новые кристаллы  $\text{Al}_5\text{Tm}_3\text{O}_{12}$  в ИОФ РАН для поиска резонансного поглощения солнечных аксионов. Начаты измерения фоновых спектров трех кристаллов в MPI на поверхности Земли в установке с пассивной защитой.
8. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, DarkSide, DEAP и IAXO.

# Планы по нейтрино и ТМ на 2022 г.

## 1) ПИЯФ

а) Продолжение обработки результатов измерений бета-спектра  $^{210}\text{Bi}$  с 4π-спектрометром для CNO-нейтрино и других низкофоновых экспериментов.

б) Проведение измерений с  $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ -боллометрами в MPI / LNGS. Выращивание новых Tm гранатов общей массой > 100 г (КИ + ИОФ РАН)

в) Баксанская НО - аксион  $^{83}\text{Kr}$  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 Vx сигналов с GWs, GRBs, FRBs, SFs, IceCube

## 3) DarkSide и DEAP – темная материя

а) Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20K, DEAP,  $^{252}\text{Cf}$  источник, рад. стойкость  $\text{Si}(\text{Li})$  (ICP MS + Ti,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CF}_2$ ) + “удаленные дежурства”

б) И. Драчнев, М. Трушин, Д. Семенов, Е. Унжаков, И. Ломская, М. Микулич → ???./ мес. LNGS

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

# Основные результаты по п/п структурам (2020-21)

## **1. 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. Влияния пассивации на характеристики п/п детекторов.
- 2.3 Детекторы с двухсторонним тонким окном.
- 2.4 Si-детекторы на основе МДП (aSi:H/cSi и AlN) структур (СПБГУ, ФТИ)
- 2.5 Дрейф лития на  $x > 8$  мм.

## **2. 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 и СПБГУ
- 1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  и  $^{210}\text{Bi}$
- 1.3 Si(Li)-детекторы  $\alpha$ - и осколков калибровочного источника  $^{252}\text{Cf}$
- 1.4 CdTe детекторы для диагностики плазмы, Токамак-10, КИ
- 1.5 Подготовка Si(Li) детекторов для **IAXO**, **babyIAXO**

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

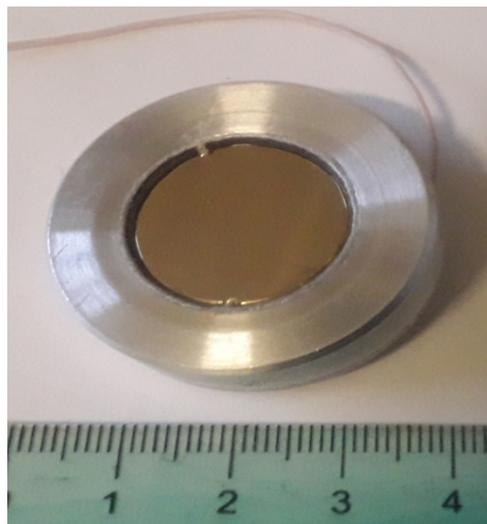
**Отдел эксплуатации нейтронных станций .**  
Кремниевый поверхностно-барьерный детектор с резистивной обратной связью. (Е.А. Чмель, Н.Т. Кислицкий)

**Лаборатория ядерной спектроскопии ОНФ**  
Si(Li)-детектор 200 мм<sup>2</sup> Заявленная неисправность: плохой вакуум. Восстановлен вакуум в криостате, отремонтирован детектор, испытан и аттестован

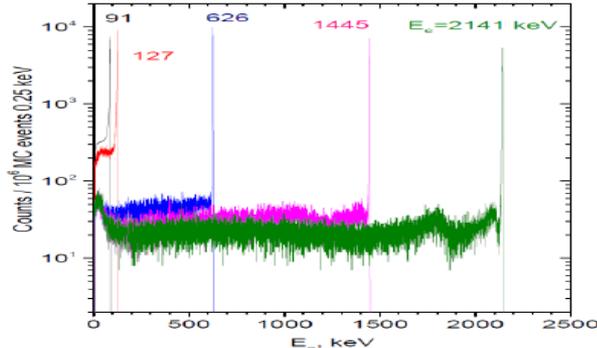
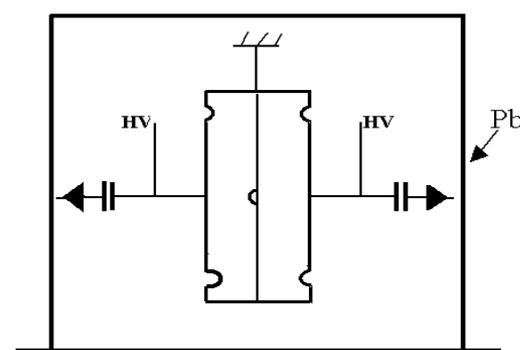
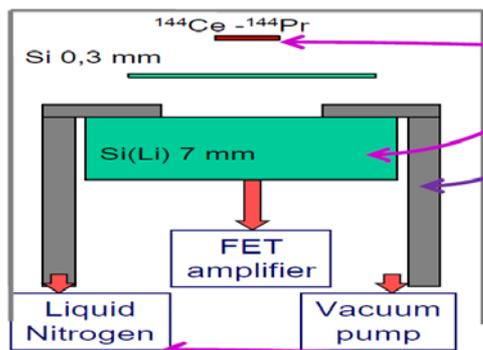
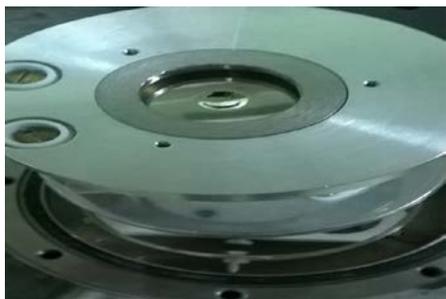
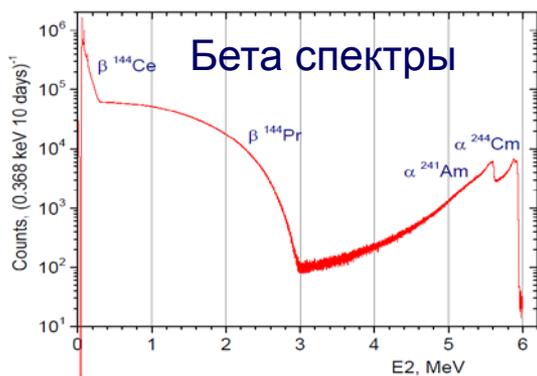
**Инжиниринговый центр «Углеродные наноструктуры»**  
Детекторы HPGe фирмы CANBERA и ORTEC  
Заявленная неисправность: плохой вакуум.



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

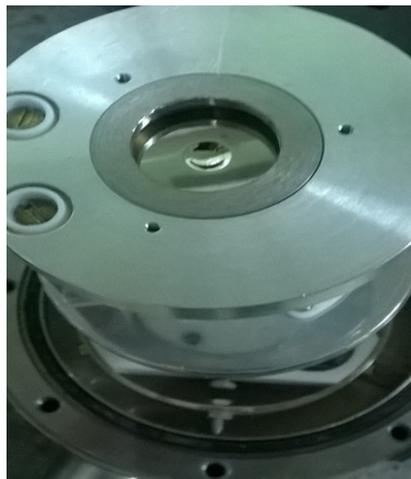
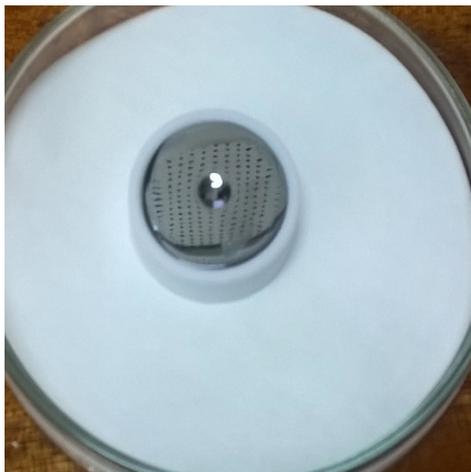


# Детекторы для измерения $\beta$ -спектров $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ и $^{210}\text{Bi}$

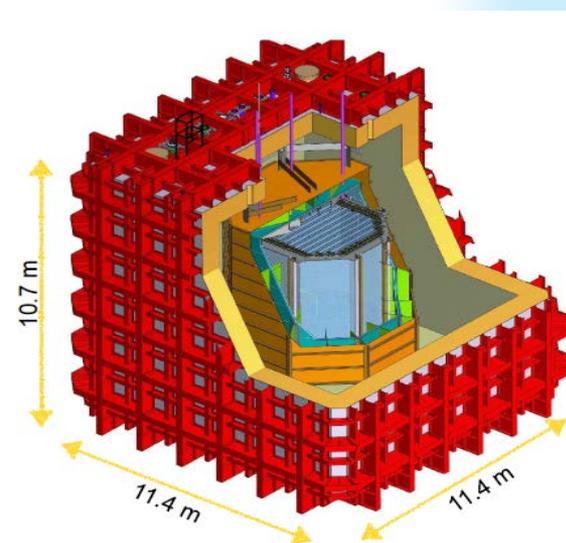
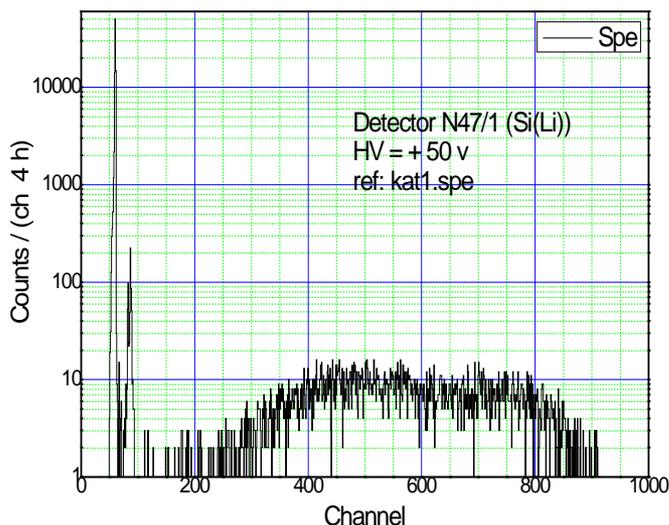


Существует ряд проектов экспериментов с искусственным источником антинейтрино  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  и новым детектором антинейтрино с целью поиска осцилляций нейтрино в **стерильное состояние**. От точности определения **спектра антинейтрино** зависит чувствительность эксперимента к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

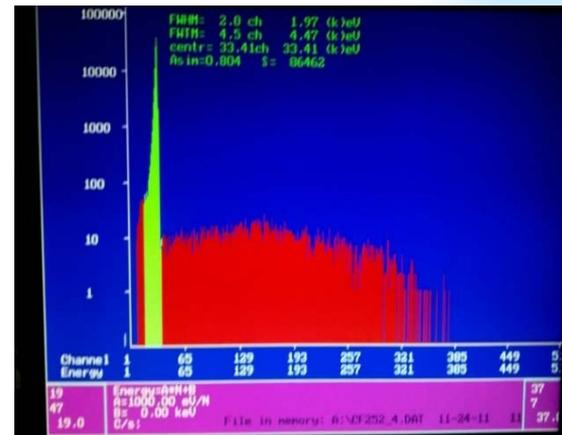
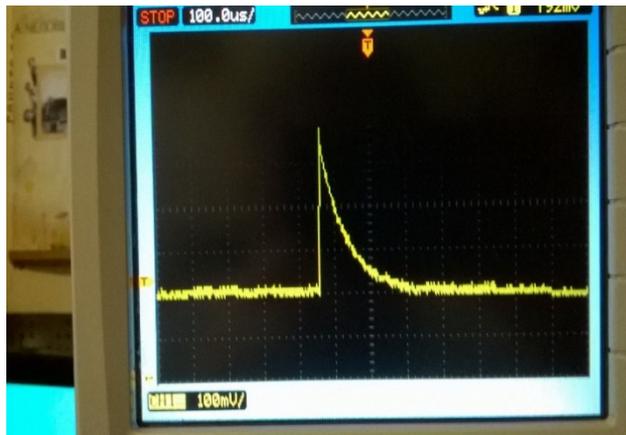
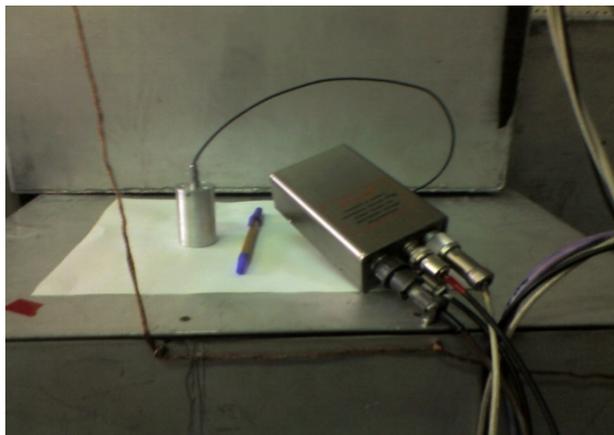
# Si(Li)-детекторы с толщиной чувствительного слоя до 10 мм



# Si(Li)- и SB-детекторы $\alpha$ - и осколков $n$ -калибровочного источника для экспериментов DarkSide и iDREAM



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



Дрейфовые Si(Li) и поверхностно-барьерные детекторы. Проводятся измерения радиационной стойкости Si-детекторов.

# 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.

# *p-i-n CdTe* большого объема (до 1500 мм<sup>3</sup> )

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

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 539.1.074

## АНАЛИЗАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО И $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ “РАДИАНТ” НА ОСНОВЕ *CdTe-p-i-n*-ДЕТЕКТОРОВ

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



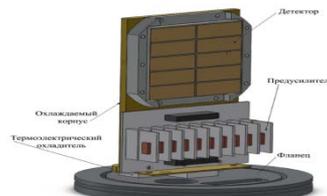
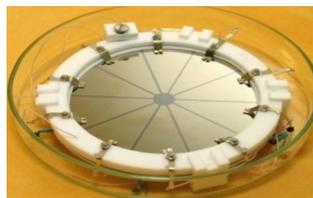
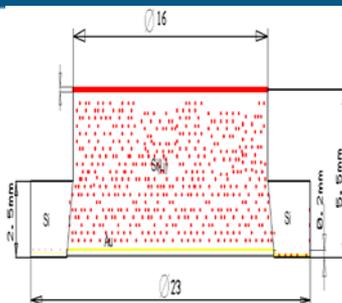
Блок детектирования *p-i-n CdTe*  
большого объема



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



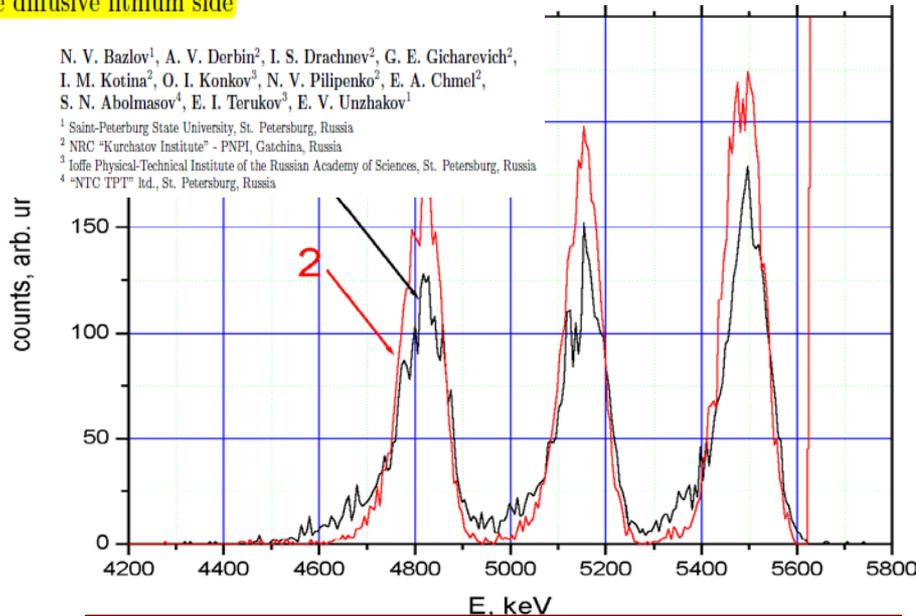
Проведено исследование зависимости толщины мертвого слоя со стороны  $n+$ -контакта от поверхностного удельного сопротивления остающегося после сошлифовки «избыточного» Li в поверхностном слое.  
Совместно с ФТИ и СПбГУ.



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).

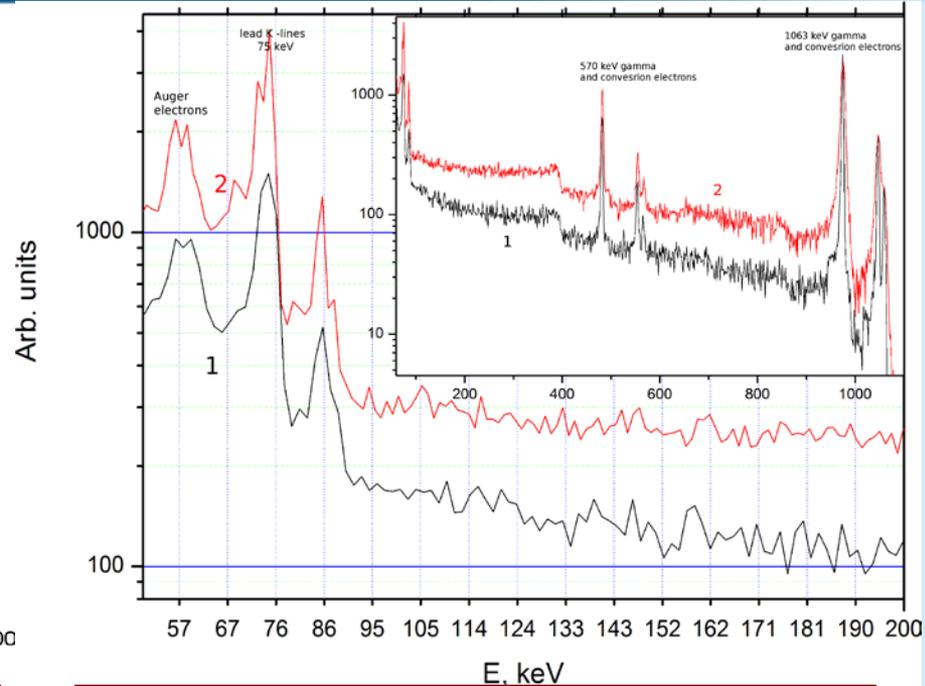
# Двухсторонние Si(Li) детекторы с ультратонкими мертвыми слоями (2020)

Si(Li) detector with ultra-thin entrance window on the diffusive lithium side



N. V. Bazlov<sup>1</sup>, A. V. Derbin<sup>2</sup>, I. S. Drachnev<sup>2</sup>, G. E. Gicharevich<sup>2</sup>,  
I. M. Kotina<sup>2</sup>, O. I. Konkov<sup>2</sup>, N. V. Pilipenko<sup>2</sup>, E. A. Chmel<sup>2</sup>,  
S. N. Abolmasov<sup>4</sup>, E. I. Terukov<sup>3</sup>, E. V. Unzhakov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia  
<sup>2</sup> NRC "Kurchatov Institute" - PNPI, Gatchina, Russia  
<sup>3</sup> Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia  
<sup>4</sup> "NTC TPIT" Ltd., St. Petersburg, Russia

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=300K, 600V.



Низкоэнергетическая часть спектра  $^{207}\text{Bi}$   
**1**-облучение со стороны Li контакта;  
**2**- со стороны Pd контакта. T=77K, 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  $^{207}\text{Bi}$  при различных напряжениях обратного смещения. При комнатной температуре регистрировались энергетические потери коллимированного источника α-частиц в зависимости от угла облучения.

# *n*-источник+Si-детектор для калибровки DarkSide20k (2021)

Journal of Physics: Conference Series 2103 (2021) 012139

## Influence of $\alpha$ -particles irradiation on the properties and performance of silicon semiconductor detectors

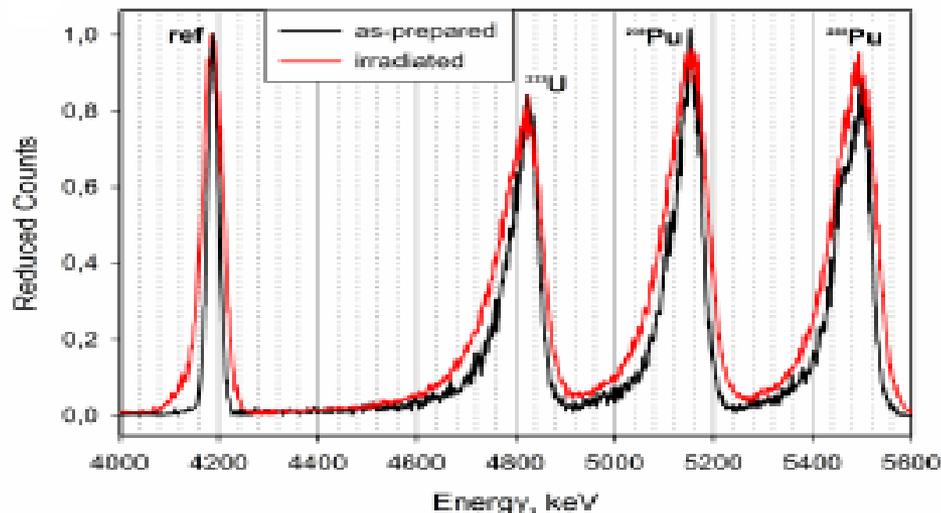
S V Bakhlanov<sup>1</sup>, N V Bazlov<sup>1,2</sup>, I D Chernobrovkin<sup>2</sup>, A V Derbin<sup>1</sup>, I S Drachnev<sup>1</sup>, I M Kotina<sup>1</sup>, O I Konkov<sup>1,3</sup>, A M Kuzmichev<sup>1</sup>, M S Mikulich<sup>1</sup>, V N Muratova<sup>1</sup>, M V Trushin<sup>1</sup> and E V Unzhakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC "Kurchatov Institute" - PNPI, Gatchina, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7/9, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Petersburg, Russia



Изменение функции отклика SB после флюенса 6.5E9( $\alpha$ )

Journal of Physics: Conference Series 2103 (2021) 012138

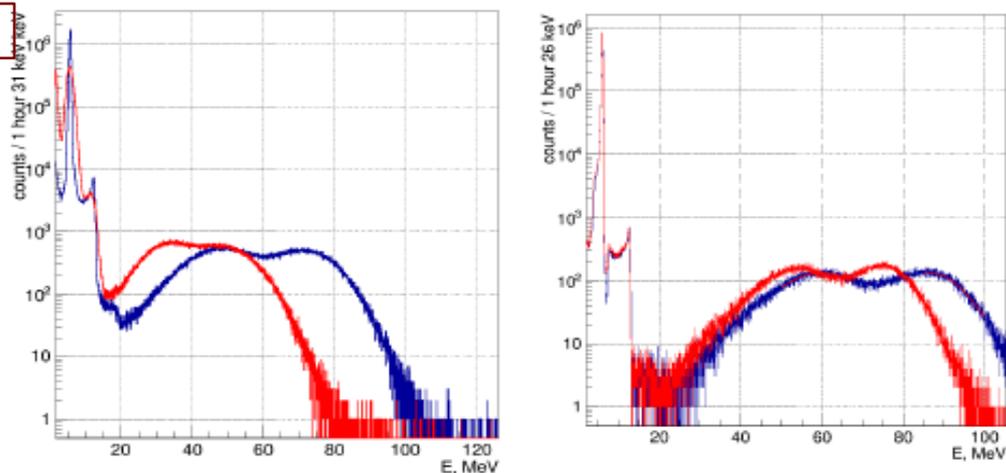
## Degradation of silicon detectors under long-term irradiation by <sup>252</sup>Cf fission products

S V Bakhlanov<sup>1</sup>, A V Derbin<sup>1</sup>, I S Drachnev<sup>1</sup>, O I Konkov<sup>1,2</sup>, I M Kotina<sup>1</sup>, A M Kuzmichev<sup>1</sup>, I S Lomsкая<sup>1</sup>, M S Mikulich<sup>1</sup>, V N Muratova<sup>1</sup>, N V Niyazova<sup>1</sup>, D A Semenov<sup>1</sup>, M V Trushin<sup>1</sup> and E V Unzhakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia, National Research Center "Kurchatov Institute"

<sup>2</sup>Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

E-mail: trushin\_mv@pnp1.nrcki.ru



Слева Si(Li) флюенс 4.6E8 (ff). Справа- SB для 3.6E7

# Планы Отдела по п/п структурам на 2022 г.

## **1. 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

2.3 Секционированные Si(Li)-детекторы с толщиной i-области 8-10 мм и площадью 75 см<sup>2</sup>. Дрейф лития на  $x > 8$  мм

2.4 Детекторы с двухсторонним тонким окном для регистрации e

2.5 Si-детекторы на основе МДП(aSi:H/cSi и AlN) струк. (СПБГУ, ФТИ)

## **2. 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 и СПБГУ

1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров (<sup>210</sup>Pb и др.)

1.3 Si-детекторы α- и осколков деления калибровочного источника

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

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

1.6 Детекторы из высокоомного кремния по планарной технологии

***Спасибо за внимание!***

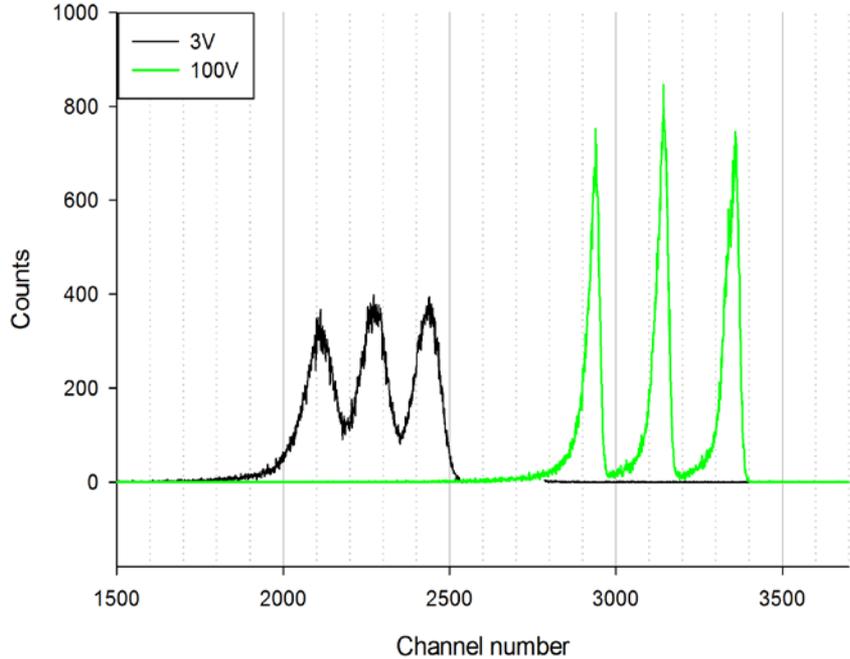
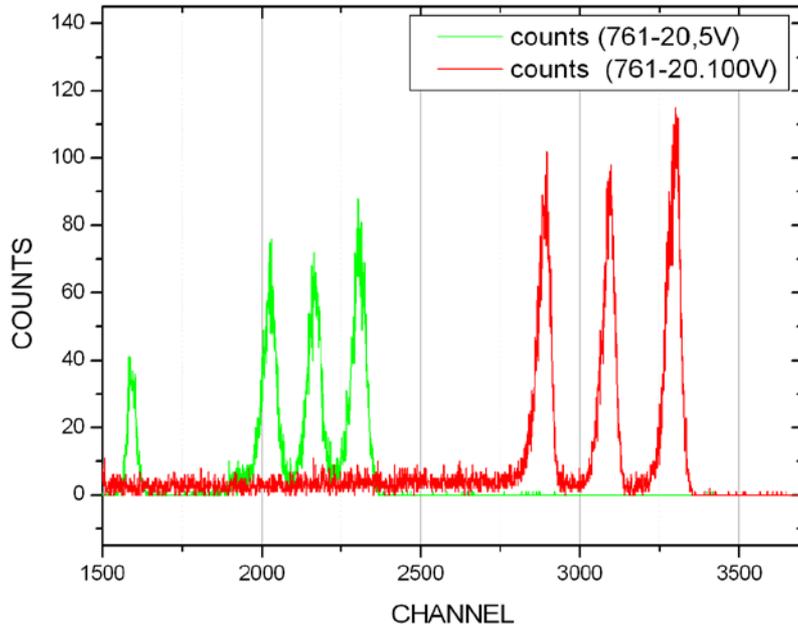
# Установка для исследования фотозлектрических свойств широкозонных полупроводников



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 0.01К.
- Развертки по длине волны и температуре осуществляются в автоматическом режиме. Программы управления работают в среде LabView.

# МДП структуры на p-Si



$\rho=2\text{кОм}\cdot\text{см}$ ,  $S=90\text{ мм}^2$ , окисление в 70%  $\text{HNO}_3$ , 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%  $\text{HNO}_3$ , 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.  $\alpha$ -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  $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$

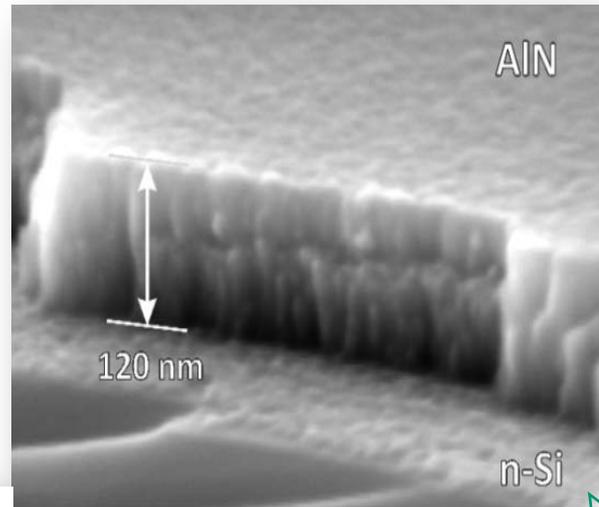
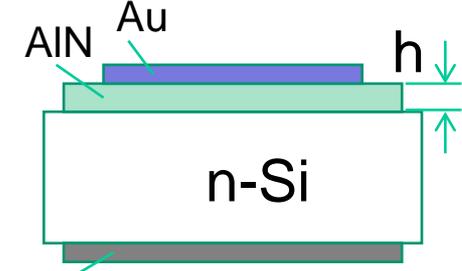
# Изучение структур Au-AlN-(n-Si) (+СПБГУ)

**Мотивация** : напыление пленки AlN приводит к

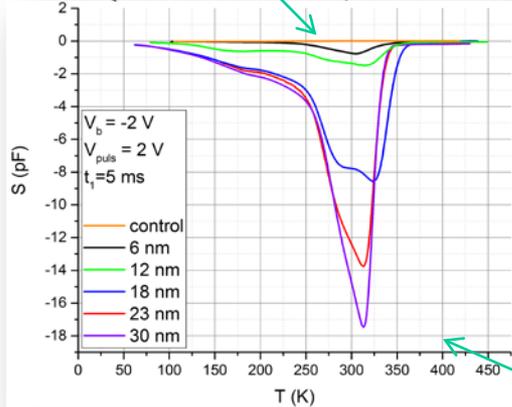
+ уменьшению величины обратных токов детекторов

- 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.

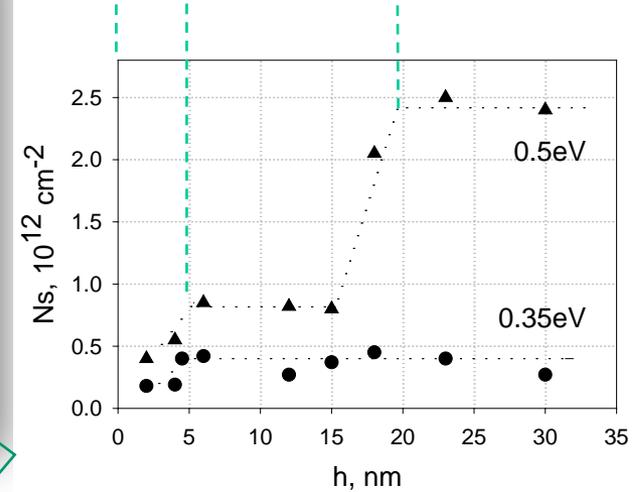
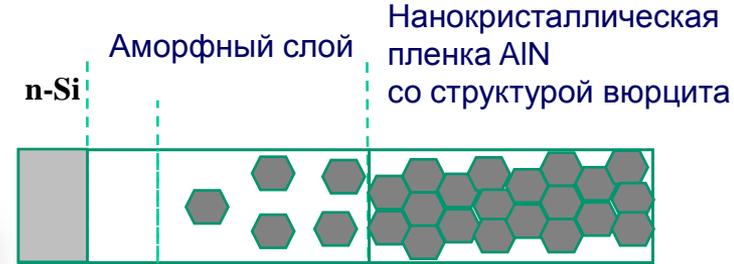


Al-Ga  
 $E_t = 0.35 \text{ eV}$   
 $\sigma = (10^{-16} : 10^{-14}) \text{ cm}^2$



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

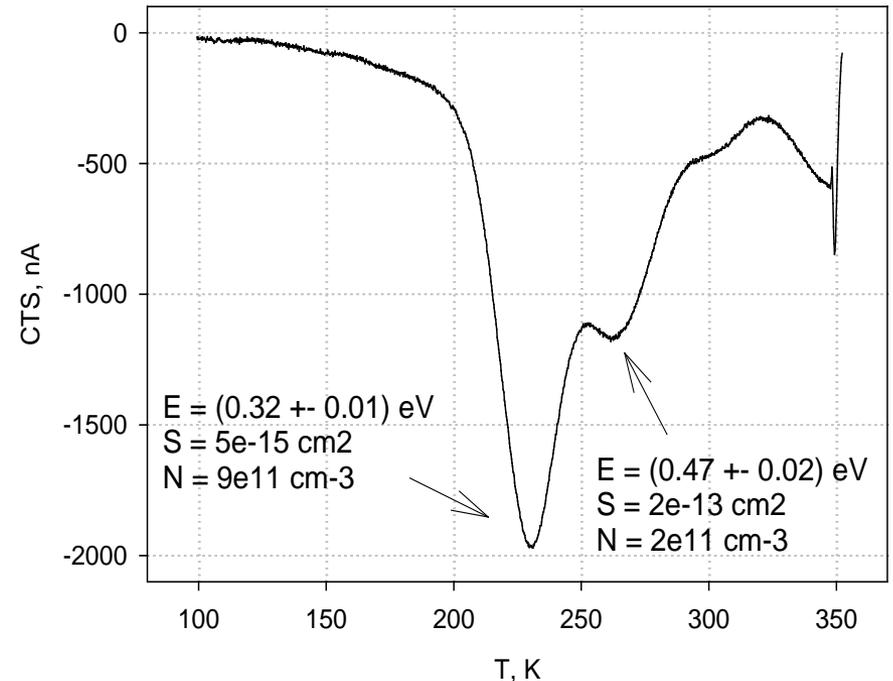
**Выводы :**

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

Установка нестационарной спектроскопии глубоких центров в полупроводниках

DLTS-спектрометр

Гелиевый криостат замкнутого цикла 10 – 450К



Измеренный спектр глубоких уровней в поверхностно-барьерном детекторе Al-(aSi:H)-(p-Si) после облучения альфа-частицами и осколками деления с дозами  $4 \cdot 10^9$  и  $1 \cdot 10^8$ , соответственно. Спектр записан в режиме токового DLTS.