

# Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

## Лаб. низкофоновых измерений

- 1) А.В. Дербин внс, дфмн,
- 2) В.Н. Муратова, снс, кфмн
- 3) Д.А. Семенов, снс. кфмн
- 4) И.М. Котина, снс, кфмн
- 5) О.И. Коньков, снс, кфмн
- 6) И.С. Драчнев, снс, PhD, кфмн
- 7) Н.В. Базлов, нс
- 8) Е.В. Унжаков, снс.
- 9) М.В. Трушин, кфмн, снс
- 10) Н.В. Ниязова, аспирант лаб.-иссл.
- 11) И.С. Ломская, аспирант лаб.-иссл.
- 12) М.С. Микулич, лаб.-иссл.
- 13) Д. Иванов, 4 курс СПбГТУ-ТИ
- 14) Е. Бубнов, 4 курс СПбГТУ-ТИ

## Группа физики и технологии п/п детекторов

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

## Группа Радиохимии

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

В отделе – 26 чел.

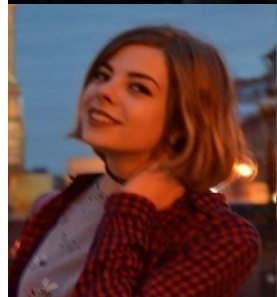
1 дфмн; 6 кфмн; 1 ктн, внс – 1; снс – 7; нс – 1; мнс – 0; асп. – 2; студ. – 2; вед.инж.-8; инж.-2; рег. ап. -1; сл. мех.-1; ( $\Sigma 12$  нс) + 14 ИТР + ОИЯИ (3)

## 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 (14 (ставок?) чел.):

А.В. Дербин внс, дфмн,

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, лаб.-иссл.

Д. Иванов 4 курс СПбГТУ-ТИ

Е. Бубнов 4 курс СПбГТУ-ТИ

**2ст+2 асп+0мнс+1нс+7снс+1внс**

**1 д.ф.м.н. и 6 к.ф.м.н.**



# Отдел и Лаборатория в 2022 году

Работы проводились по 4 основным направлениям:

## 1) Нейтрино,

эксперимент **Borexino** – 1) CNO-нейтрино, 2) измерения бета-спектра  $^{210}\text{Bi}$  3) направление  $7\text{Be}-\nu$ , 4) корреляции с GW и FRBs

## 2) Темная материя

эксперименты по поиску аксионов (ПИАФ, Баксан- 5)  $g_{\text{Ae}}$ ,  
Н.Новгород - 6)  $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , IAXO, MPI) и  
и по поиску **WIMPs** (DarkSide20k 7)  $n\text{Si}$ , DEAP-8) 5.5 МэВ axion)

## 3) Изучение радиационной стойкости кремниевых п/п детекторов

(разработка  $n+\text{Si}$ -источника для нейтринных экспериментов)  
(рук. М.В. Трушин)

## 4) Изучение параметров п/п детекторов и МДП структур

(разработка Si-мультидетектора для измерения  $\beta$ -спектров осколков деления для восстановления спектра реакторных антинейтрино)  
(рук. И.М. Котина, М.В. Трушин)

# Содержание доклада (20 мин.)

## 1) Наукометрические показатели

### Нейтрино

## 2) Эксперимент Борексино в 2022 году. Новые результаты.

2.1 Новые данные по регистрации CNO-нейтрино *Phys. Rev. Lett.*

2.2 Измерение черенковского излучения в ЖС и направления солнечных  ${}^7\text{Be}$ -нейтрино *Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. D*

2.3 Поиск нейтрино от быстрых радиовсплесков *Europ. Phys. J. C*

2.4 Поиск корреляций с гравитационными событиями *подготовлено*

3) Измерения бета-спектр  ${}^{210}\text{Bi}$  для CNO-нейтрино *Phys. Part. Nucl.*

4) Измерения бета-спектров с  $4\pi$  Si(Li)-спектрометром *направлено NIM*

### Темная материя (WIMPs и аксионы)

5) Поиск поглощения солн. аксионов ядром  ${}^{83}\text{Kr}$  в БНО ИЯИ Письма ЖЭТФ

6) Поиск солнечных аксионов с помощью Tm-болометров. Н. Новгород

7) Поиск WIMPs в экспериментах DarkSide и DEAP. Источник  $n's$  -  ${}^{252}\text{Cf}+Si$ , солнечный 5.5 МэВ аксион

8) Физическая программа эксперимента IAXO, babyIAXO

9) Планы по  $\nu$ - и ТМ на 2023 год.

10) Работы по п/п детекторам и МДП структурам (М.Трушин).

# Публикации в 2022 г. (10 + 9)

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

1. M. Agostini et al., (Borexino coll.), First Directional Measurement of Sub-MeV Solar Neutrinos with Borexino, **Phys. Rev. Lett.** 128 (2022) 9, 091803
2. M. Agostini et al., (Borexino coll.), Correlated and integrated directionality for sub-MeV solar neutrinos in Borexino, **Phys. Rev. D** 105 (2022) 5, 052002
3. Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кузьминов, М.С. Микулич, В.Н. Муратова, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П.Якименко, Новые ограничения на константу связи аксиона с электроном для солнечных аксионов, **Письма в ЖЭТФ**, том 116, вып. 1, с. 13 – 19 (2022)
4. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Pilipenko, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Precision Beta-Spectrum Measurement of RaE with Semiconductor Spectrometers, **Phys. Part. Nucl.** 53, 2, 497 (2022)
5. I. Lomskaya et al., (Borexino Coll.), Search for Low-Energy Borexino's Signals Correlated with Gamma-Ray Bursts, Solar Flares and Gravitational Wave Events, **Phys.Part.Nucl.**53,2, 255 (2022)
6. S. Zavatarelli et al., (Borexino Coll.), Geoneutrino Detection and Other Non-Solar Neutrino Physics Achievements of Borexino, **Moscow Univ. Phys.Bull.** 77 (2022) 2, 431-433
7. N. Rossi et al., (Borexino Coll.), First Detection of Solar Neutrinos from the CNO Cycle with Borexino, **Moscow Univ. Phys. Bull.** 77 (2022) 2, 395-398
8. S. Appel et al., (Borexino Coll.), Improved Measurement of Solar Neutrinos from the Carbon-Nitrogen-Oxygen Cycle by Borexino and Its Implications for the Standard Solar Model, **Phys. Rev. Lett.**, 129, 252701 (2022)
9. S. Appel et al., (Borexino Coll.), Search for low-energy signals from fast radio bursts with the Borexino detector, **Eur. Phys. J. C** 82 (2022) 3, 278
10. S. Appel et al., (Borexino Coll.), Independent determination of the Earth's orbital parameters with solar neutrinos in Borexino, **Astropart. Phys.** 145 (2023) 102778

# Публикации 2022 г. (10 + 9)

## 9 публикаций в arXiv и в Proceedings

1. S. Appel et al., (Borexino Coll.), Independent determination of the Earth's orbital parameters with solar neutrinos in Borexino, [arXiv:2204.07029v1](#)
2. D. Antypas et al., New Horizons: Scalar and Vector Ultralight Dark Matter, [arXiv:2203.14915](#)
3. C.B. Adams et al., Axion Dark Matter, [arXiv:2203.14923](#)
4. S. Appel et al., (Borexino Coll.), Improved measurement of solar neutrinos from the Carbon-Nitrogen-Oxygen cycle by Borexino and its implications for the Standard Solar Model, [arXiv:2205.15975](#)
5. P. Agnes et al., (DarkSide-50 Coll.), Search for low-mass dark matter WIMPs with 12 ton-day exposure of DarkSide-50, [arXiv: 2207.11966](#)
6. P. Agnes et al., (DarkSide-50 Coll.), Search for dark matter-nucleon interactions via Migdal effect with DarkSide-50, [arXiv: 2207.11967](#)
7. P. Agnes et al., (DarkSide-50 Coll.), Search for dark matter particle interactions with electron final states with DarkSide-50, [arXiv: 2207.11968](#)
8. P. Agnes et al., (Global Argon Dark Matter Coll.), Sensitivity projections for a dual-phase argon TPC optimized for light dark matter searches through the ionization channel, [arXiv:2209.01177](#)
9. I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, E.A. Chmel, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Nyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, Silicon  $4\pi$  spectrometer for  $\beta$ -decay electrons with energies up to 3~MeV, [arXiv:2210.13192v1](#)

# Доклады на конференциях и семинарах в 2022 г.

## 12 докладов и выступлений на конференциях и семинарах

1. **А.В. Дербин**, Отчет о работе Отдела п/п ядерных детекторов в 2020-21 гг, Отчетная сессия Отделения нейтронных исследований, 20 января 2022, устный.
2. **А.В. Дербин**, Precision measurements of  $^{210}\text{Bi}$   $\beta$ -spectrum for neutrino physics tasks, LXXII International conference Nucleus-2022, 11-16 июля 2022, Moscow, постер
3. **И.С. Драчев**, Precision measurement of  $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$  beta-spectrum, LXXII International conference Nucleus-2022, 11-16 июля 2022, Moscow, постер
4. **М.В. Трушин**, Compact neutron calibration source based on  $^{252}\text{Cf}$  radionuclide and a silicon semiconductor detector, LXXII International conference Nucleus-2022, 11-16 июля 2022, Moscow, постер
5. **М.В. Трушин**, Исследование радиационных дефектов в кремниевых полупроводниково-вых детекторах p-типа проводимости облученных продуктами распада радионуклида  $^{252}\text{Cf}$ , XIV Международная конференция КРЕМНИЙ 2022, 26-30 сентября 2022 г., Новосибирск
6. **А.В. Дербин**, Ограничение на константу связи аксиона с электроном из эксперимента по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов ядром  $^{83}\text{Kr}$ , International conference PhysicA. SPb / 2022, St. Petersburg, 17-20 Oct 2022, постерный доклад + 3 мин.
7. **М.В. Трушин**, Исследование радиационной стойкости кремниевых полупроводниковых детекторов при облучении продуктами деления изотопа  $^{252}\text{Cf}$ , International conference PhysicA. SPb/2022, 17-20 Oct 2022, St. Petersburg, постер
8. **I.S. Drachnev**, Thulium-containing bolometer for solar axion resonant absorption search, 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, ICPPA-2022, Moscow, from 29 November 2022 to 2 December 2022, постерный доклад + 5 мин.
9. **I. Lomskaaya**, Search for Low-Energy Signals from Fast Radio Bursts with the Borexino Detector, 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, ICPPA-2022, Moscow, from 29 November 2022 to 2 December 2022, постерный доклад + 5 мин.
10. **I. Drachnev**, "New limits on the Pauli-forbidden transitions in  $^{12}\text{C}$  nucleus obtained with the Borexino detector; status of GW paper and other future papers" Borexino general meeting, online, 5 October, 2022, 20 min presentation
11. **Д.В. Иванов**, Сравнение методов по измерению толщин входного окна полупроводниковых кремниевых детекторов, Open Science, IX Всероссийский с международным участием Молодежный научный форум, Гатчина, 16-18 ноября 2022
12. **Е.Ф. Бубнов**, Методы измерения толщины входного окна полупроводниковых кремниевых детекторов, Open Science, IX Всероссийский с международным участием Молодежный научный форум, Гатчина, 16-18 ноября 2022

# 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)**

**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)**

**«Изучение радиационной стойкости полупроводниковых детекторов для задач нейтринной физики»**

**(2022, рук. М.В. Трушин / А.В. Дербин)**

**Специалитет ТУ (2024) -> Аспирантура ПИЯФ (2024)**

**Курсовая – диплом СПбГТУ (ТИ) (2021-24)**

**Д.Ф. Бубнов «Анализ формы бета-спектра с целью поиска реликтовых нейтрино»**

**Е.В. Иванов «Изучение особенностей дефекта амплитуды сигнала в п/п детекторах при регистрации осколков деления»**



# 2 гранта РФФ и 1 РФФИ в 2022 г., заявка на 2023 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. Грант РФФ 22-22-00017

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

руководитель *Муратова Валентина Николаевна* НИЦ КИ ПИЯФ

## Грант РФФИ

### 3. 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

## Заявка на грант РФФ

Разработка и создание бета-спектрометра на основе Si-детекторов для проведения прецизионных измерений бета-спектров с энергией электронов до 10 МэВ для задач нейтринной физики.

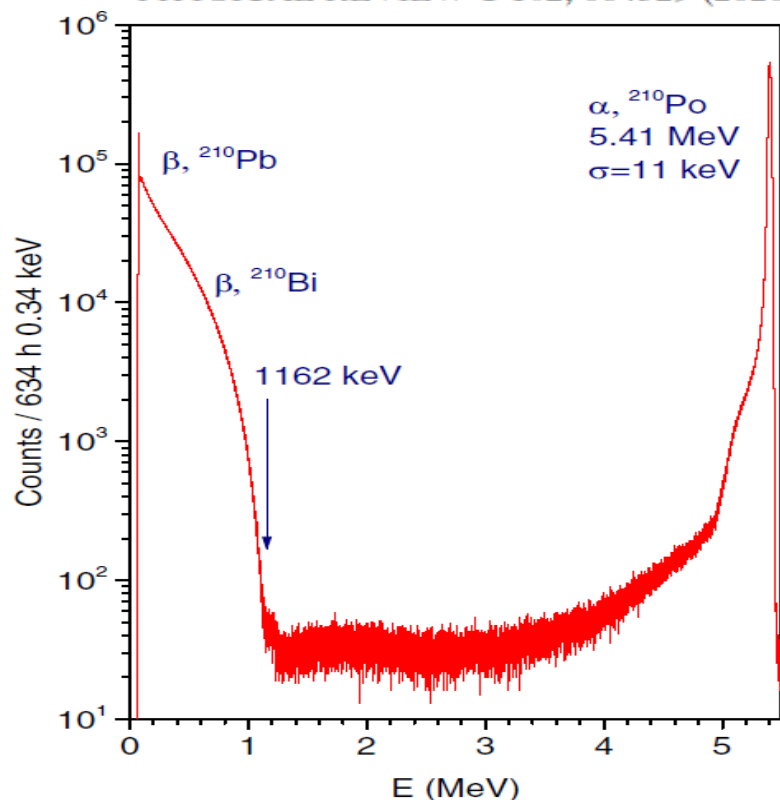
руководитель *Трушин Максим Валерьевич* НИЦ КИ ПИЯФ

# Премии и награды (2022)

Третья премия на конкурсе лучших работ ПИЯФ  
«Прецизионные измерения бета-спектра  $^{210}\text{Bi}$  для задач  
нейтринной физики»

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, Е. А. Чмель (11 человек)

PHYSICAL REVIEW C 102, 064329 (2020)



Изотоп  $^{210}\text{Bi}$  является элементом естественного радиоактивного ряда  $^{238}\text{U}$ . Как продукт распадов газа  $^{222}\text{Rn}$  и последующего долгоживущего  $^{210}\text{Pb}$ , изотоп  $^{210}\text{Bi}$  присутствует внутри и на поверхности всех конструкционных материалов. В настоящее время, точное измерение  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  необходимо для моделирования фона современных детекторов нейтрино и частиц темной материи, а также для других низкофоновых экспериментов. В частности, форма  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  очень похожа на спектр электронов отдачи, возникающих при рассеянии **солнечных СНО-нейтрино**. Международная коллаборация **Борексино**, в которой участвуют сотрудники НИЦ КИ ПИЯФ, представила результаты обнаружения нейтрино, испускаемых в реакциях **СНО-цикла на Солнце**. Весомый вклад сотрудников ОНИ ПИЯФ связан с измерением с высокой точностью  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$ , знание которого необходимо для анализа потока **солнечных СНО-нейтрино**.

# Новые результаты Борексино (2022)

**2022 год:** 1) Выделение черенковского излучения в сцинтилляторе и направления  ${}^7\text{Be}$  нейтрино  
2) Новые данные по CNO-нейтрино +  ${}^{210}\text{Bi}$  ПИЯФ  
3) Сигналы  $\text{Borexino}$ , быстрые радиовсплески и гравитационные события NS-NS, NS-BH и BH-BH

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

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

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

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

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

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

**2014 год:**  $\text{pp}$ -нейтрино.

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

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

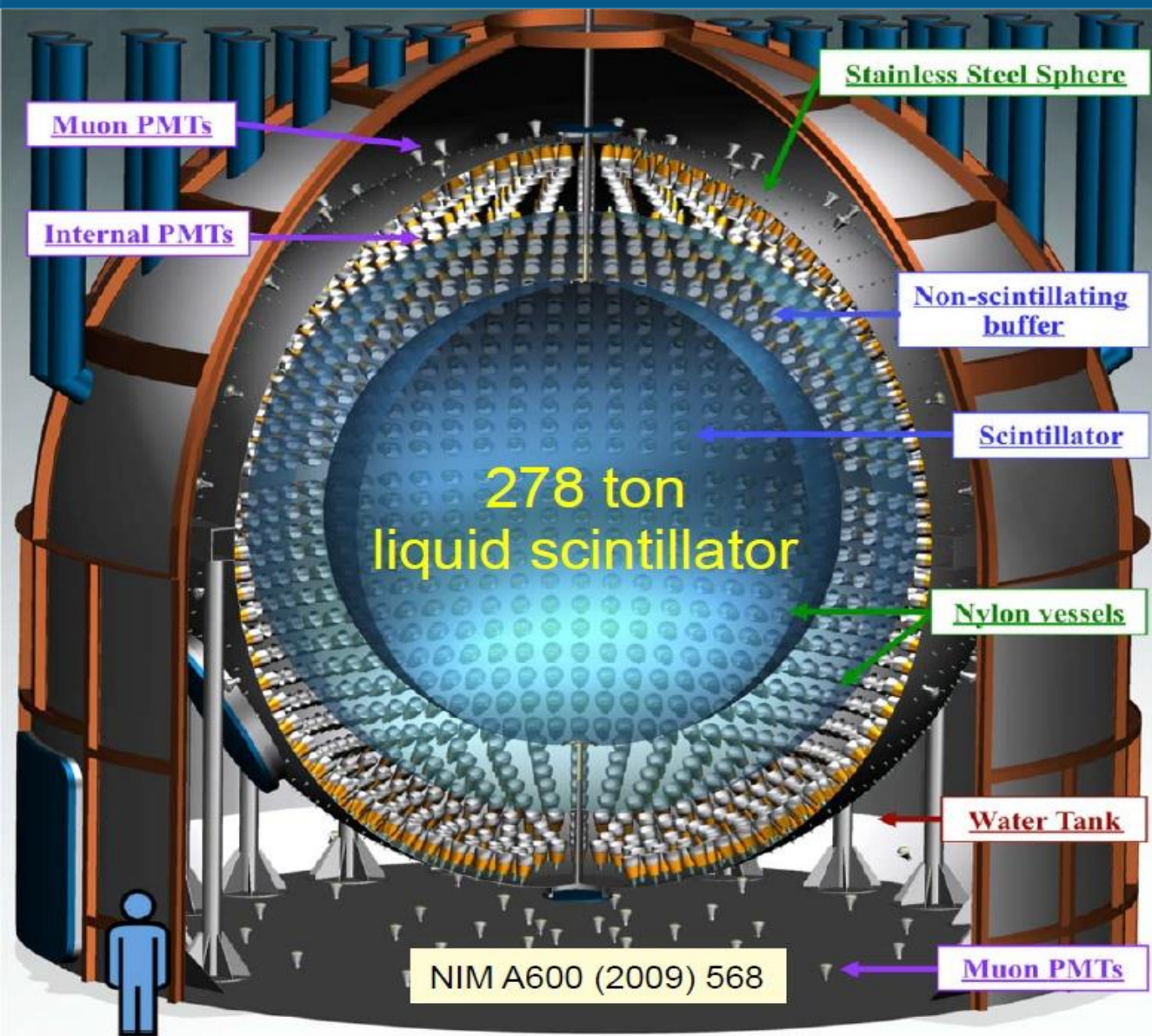
**2013 год** - Тяжелое стерильное нейтрино.  
• Новые данные по гео нейтрино.  
• Подготовка - стерильное нейтрино SOX  
• Возможность регистрации  $\text{pp}$ -нейтрино, магнитного момента, ..

**2010 – год антинейтрино**

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

**2011 – год  ${}^7\text{Be}$ -,  $\text{re}$ -, CNO- $\nu$**   
1. Вариации день-ночь для  ${}^7\text{Be}$ - $\nu$   
2. Обнаружены  $\text{re}$ -нейтрино  
3. Поток  ${}^7\text{Be}$ - $\nu$  измерен с 5% точ.

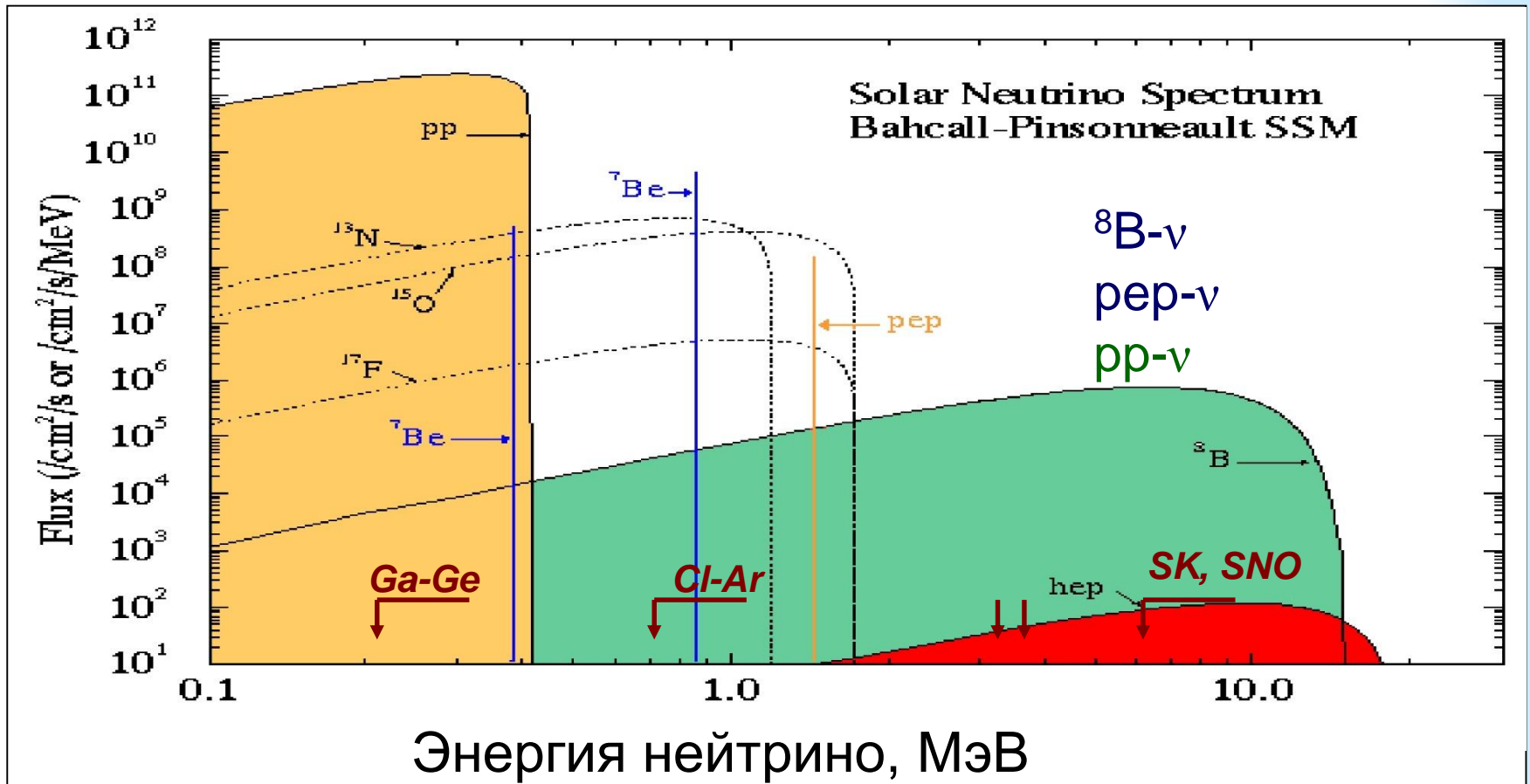
# Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)



120 км от Рима, 3500 м.в.э.

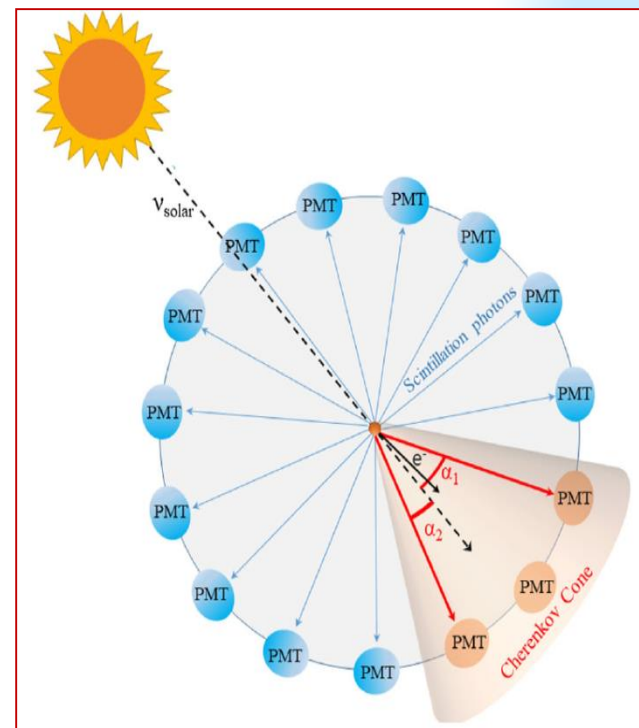
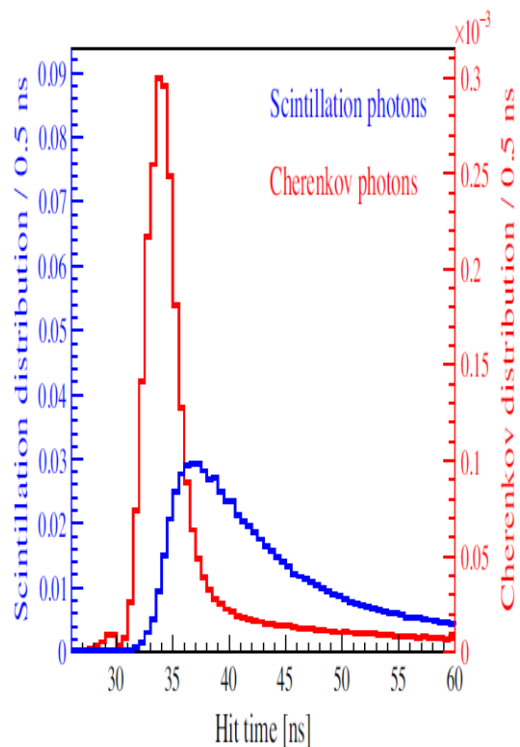
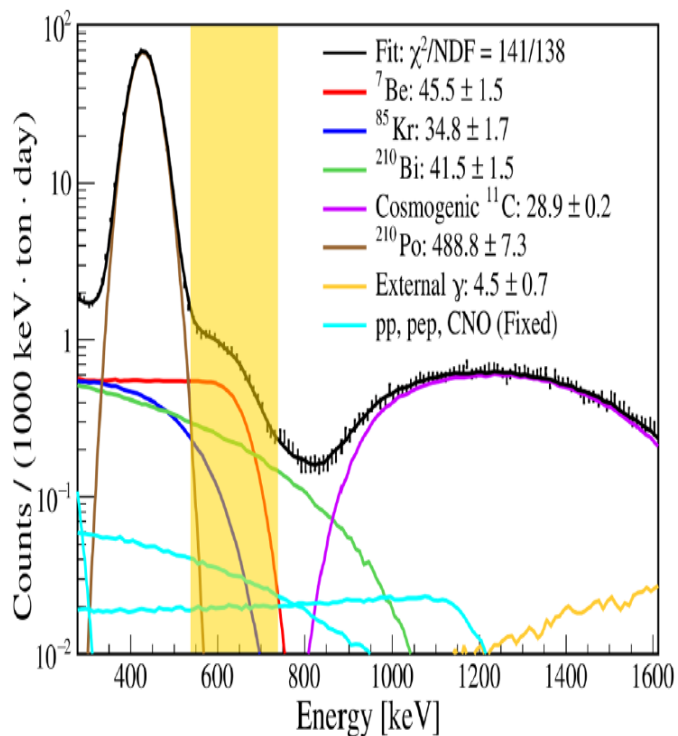
# Основная задача БОРЕКСИНО -

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

# Выделение направления $^7\text{Be}$ -нейтрино



Выполнены измерения солнечных нейтрино с энергией менее 1 МэВ с помощью черенковского излучения в сцинтилляторе детектора Borexino. Результат достигнут с помощью нового метода, который сопоставляет зарегистрированную позицию отдельных фотонов с известным положением Солнца. В энергетическом окне от 0,54 до 0,74 МэВ получено  $10887 \pm 2386$  (68% у.д.) солнечных нейтрино из 19904 полных событий, что соответствует скорости взаимодействия нейтрино  $^7\text{Be}$   $51,6 \pm 13$  имп/день 100 т, что согласуется с предсказаниями ССМ и предыдущими спектроскопическими результатами Borexino. Гипотеза отсутствия нейтрино исключена с уровнем достоверности  $>5\sigma$ . Впервые продемонстрирована возможность использования направленного черенковского излучения для субмэВных солнечных нейтрино в большом сцинтилляционном детекторе с высоким световым выходом. Получено экспериментальное доказательство возможности будущей гибридной реконструкции событий с одновременным использованием как черенковских, так и сцинтилляционных фотонов.

# Выделение направления 7Ве-нейтрино

PHYSICAL REVIEW LETTERS **128**, 091803 (2022)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

## First Directional Measurement of Sub-MeV Solar Neutrinos with Borexino

M. Agostini,<sup>25,16</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> R. Biondi,<sup>8</sup> D. Bravo,<sup>9,‡</sup> B. Caccianiga,<sup>9</sup> F. Calaprice,<sup>12</sup> A. Caminata,<sup>3</sup> P. Cavalcante,<sup>15</sup> A. Chepurinov,<sup>17</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>12</sup> A. Di Ludovico,<sup>12</sup> L. Di Noto,<sup>3</sup> **I. Drachnev,<sup>11</sup>** A. Formozov,<sup>2,9</sup> D. Franco,<sup>1</sup> C. Galbiati,<sup>12,18</sup> C. Ghiano,<sup>8</sup> M. Giammarchi,<sup>9</sup> A. Goretti,<sup>12,4,§</sup> A. S. Göttel,<sup>22,23</sup> **M. Gromov,<sup>17,2</sup>** D. Guffanti,<sup>20</sup> Aldo Ianni,<sup>8</sup> Andrea Ianni,<sup>12</sup> A. Jany,<sup>4</sup> D. Jeschke,<sup>16</sup> V. Kobychyev,<sup>5</sup> G. Korga,<sup>24,26</sup> S. Kumaran,<sup>22,23</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> J. Martyn<sup>Ⓞ</sup>,<sup>20</sup> E. Meroni,<sup>9</sup> M. Meyer,<sup>19</sup> L. Miramonti,<sup>9</sup> M. Misiaszek,<sup>4</sup> **V. Muratova,<sup>11</sup>** B. Neumair,<sup>16</sup> M. Nieslony,<sup>20</sup> R. Nugmanov,<sup>6,7</sup> L. Oberauer,<sup>16</sup> V. Orekhov,<sup>20</sup> F. Ortica,<sup>10</sup> M. Pallavicini,<sup>3</sup> L. Papp,<sup>16</sup> L. Pelicci,<sup>22,23</sup> Ö. Penek,<sup>22</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> A. Romani,<sup>10</sup> N. Rossi,<sup>8</sup> S. Schönert,<sup>16</sup> **D. Semenov,<sup>11</sup>** G. Settanta,<sup>22,¶</sup> M. Skorokhvatov,<sup>6,7</sup> A. Singhal,<sup>22,23</sup> **O. Smirnov,<sup>2</sup>** A. Sotnikov,<sup>2</sup> Y. Suvorov,<sup>8,6,†</sup> R. Tartaglia,<sup>8</sup> G. Testera,<sup>3</sup> J. Thurn,<sup>19</sup> **E. Unzhakov,<sup>11</sup>** **A. Vishneva,<sup>2</sup>** R. B. Vogelaar,<sup>15</sup> F. von Feilitzsch,<sup>16</sup> A. Wessel,<sup>21,22,23</sup> M. Wojcik,<sup>4</sup> B. Wonsak,<sup>27</sup> M. Wurm,<sup>20</sup> S. Zavatarelli,<sup>3</sup> K. Zuber,<sup>19</sup> and G. Zuzel<sup>4</sup>

(Borexino Collaboration)\*\*

PHYSICAL REVIEW D **105**, 052002 (2022)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

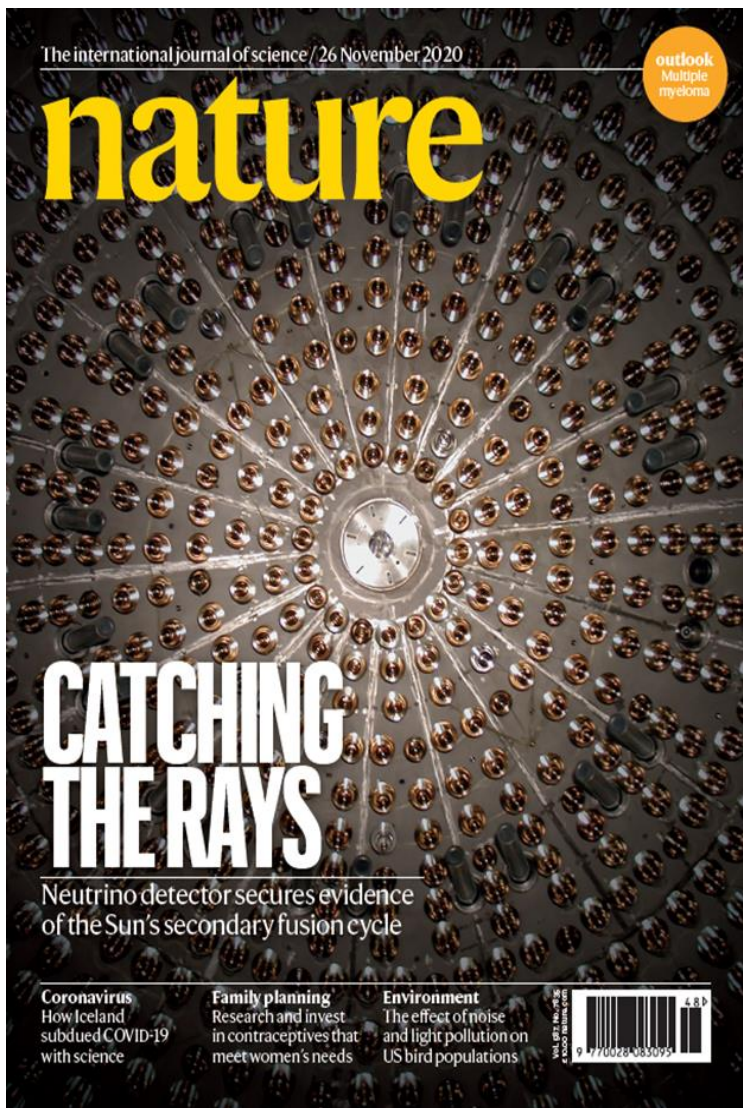
## Correlated and integrated directionality for sub-MeV solar neutrinos in Borexino

M. Agostini,<sup>25,16</sup> K. Altenmüller,<sup>16</sup> S. Appel,<sup>16</sup> V. Atroshchenko,<sup>6</sup> Z. Bagdasarian,<sup>22,a</sup> D. Basilico,<sup>9</sup> G. Bellini,<sup>9</sup> J. Benziger,<sup>13</sup> R. Biondi,<sup>8</sup> D. Bravo,<sup>9,c</sup> B. Caccianiga,<sup>9</sup> F. Calaprice,<sup>12</sup> A. Caminata,<sup>3</sup> P. Cavalcante,<sup>15,d</sup> A. Chepurinov,<sup>17</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>12</sup> A. Di Ludovico,<sup>12</sup> L. Di Noto,<sup>3</sup> **I. Drachnev,<sup>11</sup>** A. Formozov,<sup>2,9</sup> D. Franco,<sup>1</sup> C. Galbiati,<sup>12,18</sup> C. Ghiano,<sup>8</sup> M. Giammarchi,<sup>9</sup> A. Goretti,<sup>12,d</sup> A. S. Göttel,<sup>22,23</sup> **M. Gromov,<sup>17,2</sup>** D. Guffanti,<sup>20</sup> Aldo Ianni,<sup>8</sup> Andrea Ianni,<sup>12</sup> A. Jany,<sup>4</sup> D. Jeschke,<sup>16</sup> V. Kobychyev,<sup>5</sup> G. Korga,<sup>24,26</sup> S. Kumaran,<sup>22,23</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> J. Martyn<sup>Ⓞ</sup>,<sup>20</sup> E. Meroni,<sup>9</sup> M. Meyer,<sup>19</sup> L. Miramonti,<sup>9</sup> M. Misiaszek,<sup>4</sup> **V. Muratova,<sup>11</sup>** B. Neumair,<sup>16</sup> M. Nieslony,<sup>20</sup> R. Nugmanov,<sup>6,7</sup> L. Oberauer,<sup>16</sup> V. Orekhov,<sup>20</sup> F. Ortica,<sup>10</sup> M. Pallavicini,<sup>3</sup> L. Papp,<sup>16</sup> L. Pelicci,<sup>22,23</sup> Ö. Penek,<sup>22</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,e</sup> A. Romani,<sup>10</sup> N. Rossi,<sup>8</sup> S. Schönert,<sup>16</sup> **D. Semenov,<sup>11</sup>** G. Settanta,<sup>22,f</sup> M. Skorokhvatov,<sup>6,7</sup> A. Singhal,<sup>22,23</sup> **O. Smirnov,<sup>2</sup>** A. Sotnikov,<sup>2</sup> Y. Suvorov,<sup>8,6,b</sup> R. Tartaglia,<sup>8</sup> G. Testera,<sup>3</sup> J. Thurn,<sup>19</sup> **E. Unzhakov,<sup>11</sup>** **A. Vishneva,<sup>2</sup>** R. B. Vogelaar,<sup>15</sup> F. von Feilitzsch,<sup>16</sup> A. Wessel,<sup>21,22,23</sup> M. Wojcik,<sup>4</sup> B. Wonsak,<sup>27</sup> M. Wurm,<sup>20</sup> S. Zavatarelli,<sup>3</sup> K. Zuber,<sup>19</sup> and G. Zuzel<sup>4</sup>

(Borexino Collaboration)\*

# 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

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





# Новые данные по СНО-нейтрино (2022 г.)

PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 252701 (2022)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

## Improved Measurement of Solar Neutrinos from the Carbon-Nitrogen-Oxygen Cycle by Borexino and Its Implications for the Standard Solar Model

S. Appel,<sup>16</sup> Z. Bagdasarian,<sup>21,\*</sup> D. Basilico,<sup>9</sup> G. Bellini,<sup>9</sup> J. Benziger,<sup>13</sup> R. Biondi,<sup>8</sup> B. Caccianiga,<sup>9</sup> F. Calaprice,<sup>12</sup> A. Caminata,<sup>3</sup> P. Cavalcante,<sup>15,†</sup> A. Chepurinov,<sup>17</sup> D. D'Angelo,<sup>9</sup> A. Derbin,<sup>11</sup> A. Di Giacinto,<sup>8</sup> V. Di Marcello,<sup>8</sup> X. F. Ding,<sup>12</sup> A. Di Ludovico,<sup>12,†</sup> L. Di Noto,<sup>3</sup> I. Drachnev,<sup>11</sup> D. Franco,<sup>1</sup> C. Galbiati,<sup>12,18</sup> C. Ghiano,<sup>8</sup> M. Giammarchi,<sup>9</sup> A. Goretti,<sup>12,†</sup> A. S. Göttel,<sup>21,22</sup> M. Gromov,<sup>17,2</sup> D. Guffanti,<sup>20,||</sup> Aldo Ianni,<sup>8</sup> Andrea Ianni,<sup>12</sup> A. Jany,<sup>4</sup> V. Kobychiev,<sup>5</sup> G. Korga,<sup>23,24</sup> S. Kumaran,<sup>21,22</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>Ⓞ</sup>,<sup>21,22</sup> G. Lukyanchenko,<sup>6</sup> I. Machulin,<sup>6,7</sup> J. Martyn,<sup>20</sup> E. Meroni,<sup>9</sup> L. Miramonti,<sup>9</sup> M. Misiaszek,<sup>4</sup> V. Muratova,<sup>11</sup> R. Nugmanov,<sup>6,7</sup> L. Oberauer,<sup>16</sup> V. Orekhov,<sup>20</sup> F. Ortica,<sup>10</sup> M. Pallavicini,<sup>3</sup> L. Papp,<sup>16</sup> L. Pelicci,<sup>21,22</sup> Ö. Penek,<sup>21</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>21,22,‡</sup> N. Rossi,<sup>8</sup> S. Schönert,<sup>16</sup> D. Semenov,<sup>11</sup> G. Settanta,<sup>21,§</sup> M. Skorokhvatov,<sup>6,7</sup> A. Singhal,<sup>21,22</sup> O. Smirnov,<sup>2</sup> A. Sotnikov,<sup>2</sup> R. Tartaglia,<sup>8</sup> G. Testera,<sup>3</sup> E. Unzhakov,<sup>11</sup> F. L. Villante,<sup>8,25</sup> A. Vishneva,<sup>2</sup> R. B. Vogelaar,<sup>15</sup> F. von Feilitzsch,<sup>16</sup> M. Wojcik,<sup>4</sup> M. Wurm,<sup>20</sup> S. Zavatarelli,<sup>3</sup> K. Zuber,<sup>19</sup> and G. Zuzel<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*AstroParticule et Cosmologie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/IRFU, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, 75205 Paris Cedex 13, France*

<sup>2</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia*

<sup>3</sup>*Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 16146 Genova, Italy*

<sup>4</sup>*M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30348 Krakow, Poland*

<sup>5</sup>*Kiev Institute for Nuclear Research, 03680 Kiev, Ukraine*

<sup>6</sup>*National Research Centre Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia*

<sup>7</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia*

<sup>8</sup>*INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67100 Assergi (AQ), Italy*

<sup>9</sup>*Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 20133 Milano, Italy*

<sup>10</sup>*Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi e INFN, 06123 Perugia, Italy*

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

<sup>12</sup>*Physics Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA*

<sup>13</sup>*Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA*

<sup>14</sup>*Amherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003, USA*

<sup>15</sup>*Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA*

<sup>16</sup>*Physik-Department, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany*

<sup>17</sup>*Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia*

<sup>18</sup>*Gran Sasso Science Institute, 67100 L'Aquila, Italy*

<sup>19</sup>*Department of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany*

<sup>20</sup>*Institute of Physics and Excellence Cluster PRISMA+, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany*

<sup>21</sup>*Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany*

<sup>22</sup>*III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany*

<sup>23</sup>*Department of Physics, Royal Holloway University of London, Egham, Surrey, TW20 0EX, United Kingdom*

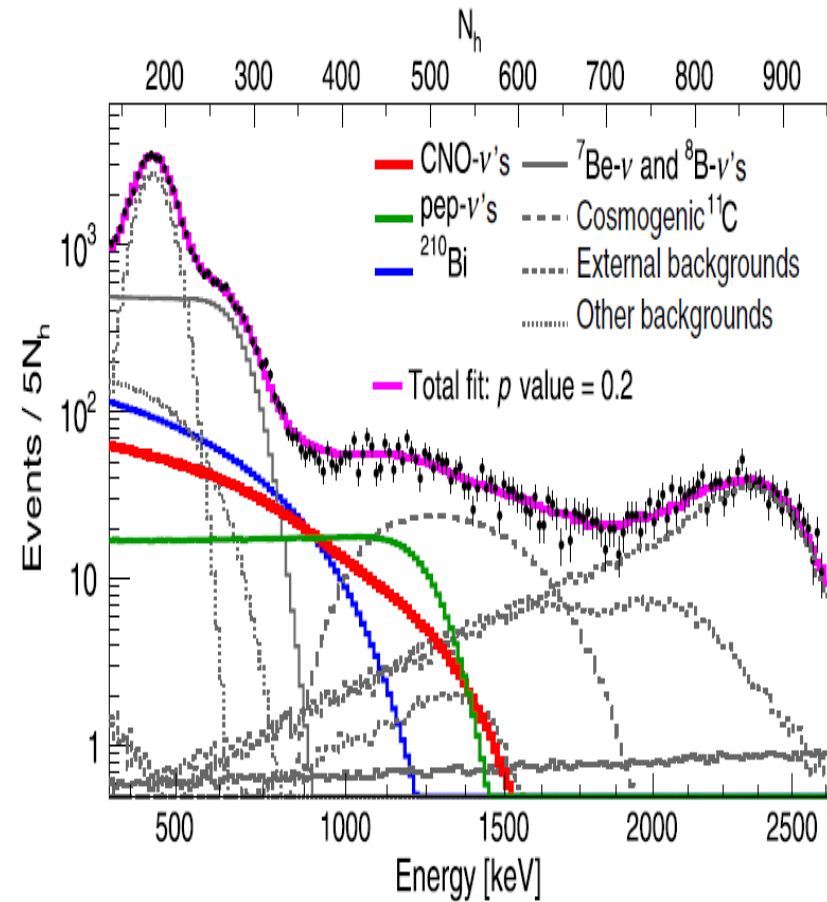
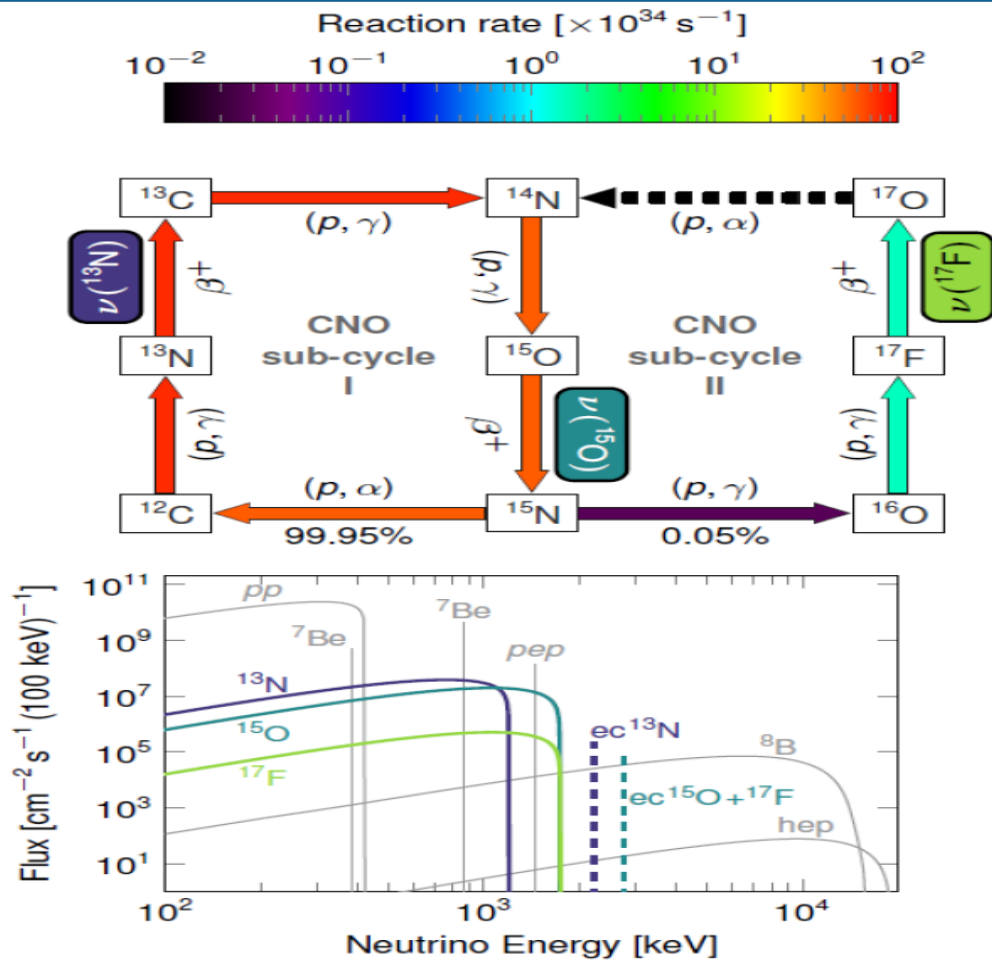
<sup>24</sup>*Institute of Nuclear Research (Atomki), Debrecen, Hungary*

<sup>25</sup>*Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università dell'Aquila, 67100 L'Aquila, Italy*



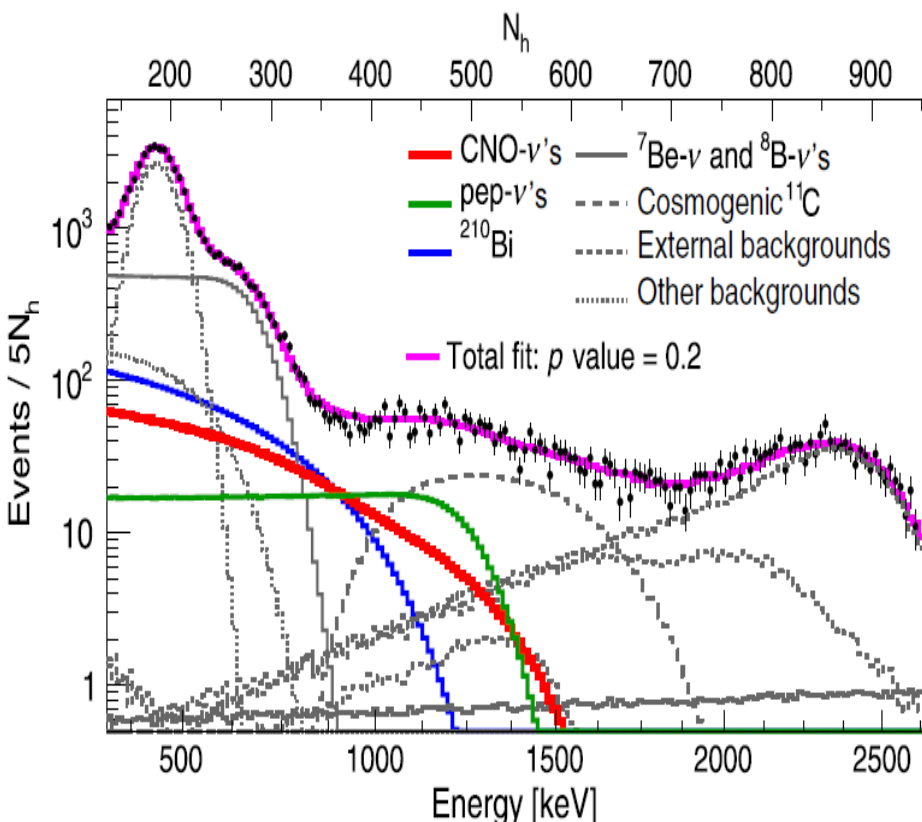
(Received 14 June 2022; revised 1 September 2022; accepted 5 October 2022; published 12 December 2022)

# CNO-нейтрино

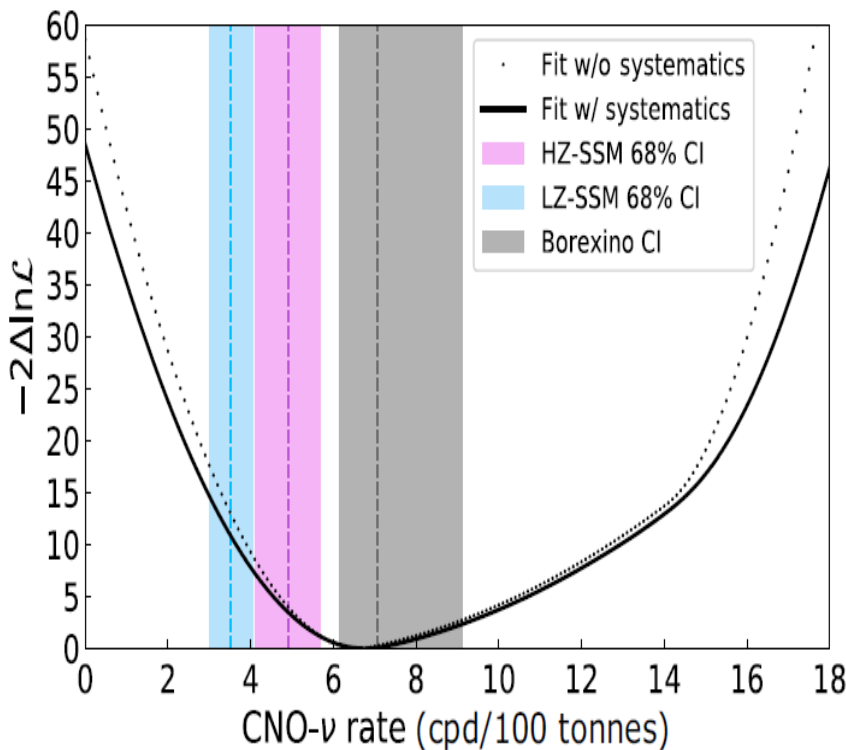


Ядерный синтез H в He в звездах происходит посредством двух процессов: **pp-цепи**, включающей только изотопы H и He, и **цикла углерод-азот-кислород (CNO)**, в котором синтез катализируется ядрами C, N и O. CNO цикл производит лишь 1% всей солнечной энергии и является второстепенным для Солнца. Однако для более массивных и горячих звезд этот цикл является определяющим, так уже для звезд с массой 1.3 Солнца, он отвечает за половину всей вырабатываемой энергии. CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей астрофизики, был предсказан теоретически и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения.

# Регистрация CNO-нейтрино – результат 2022 г.



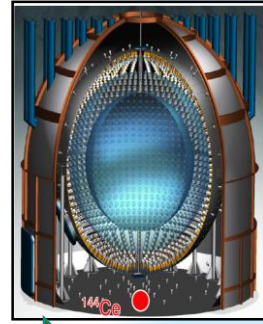
PRL 129, 259701 (2022)



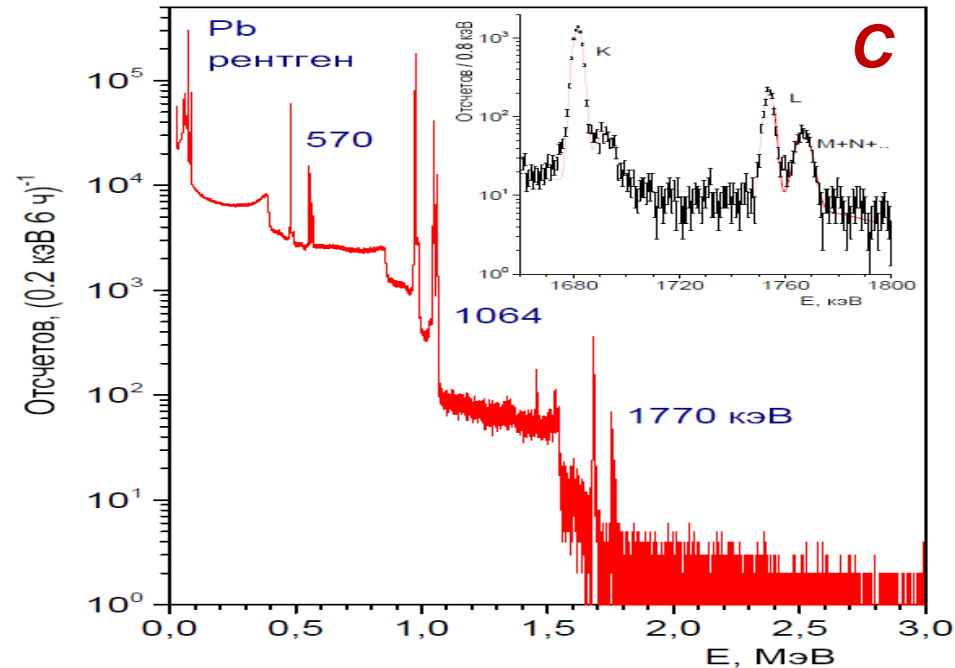
Результаты спектрального анализа данных с января 2017 г. по октябрь 2021 г. подавленным вкладом космогенного фона  $^{11}\text{C}$  (слева). Справа: функция правдоподобия ( $-2\Delta\ln L$ ) скорости счета CNO-нейтрино с учетом статистики и систематики. Гистограмма красного цвета показывает скорость 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 ( $6.8-0.8+2.0$  cpd/ 100 m), соответственно.

# Измерения бета-спектра $^{210}\text{Bi}$

В ПИЯФ разработаны и созданы **бета-спектрометры двух типов**. Первый состоит из Si(Li)-детектора полного поглощения и пролетного Si-детектора, который позволяет эффективно разделять бета-излучение ядер от сопутствующего рентгеновского и гамма-излучения. Второй, состоящий из двух Si(Li)-детекторов, представляет спектрометр с 4π-геометрией. Спектрометры используются 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** ;

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



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

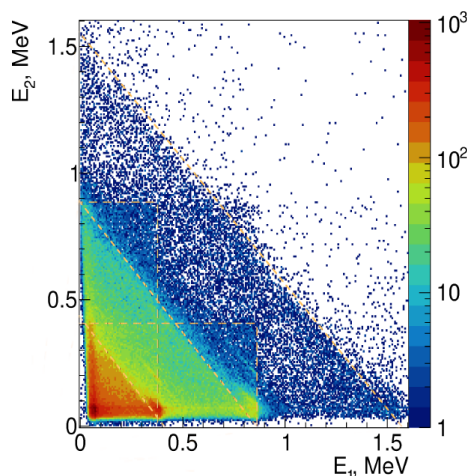
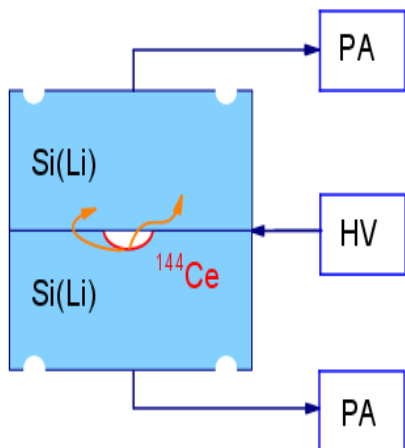
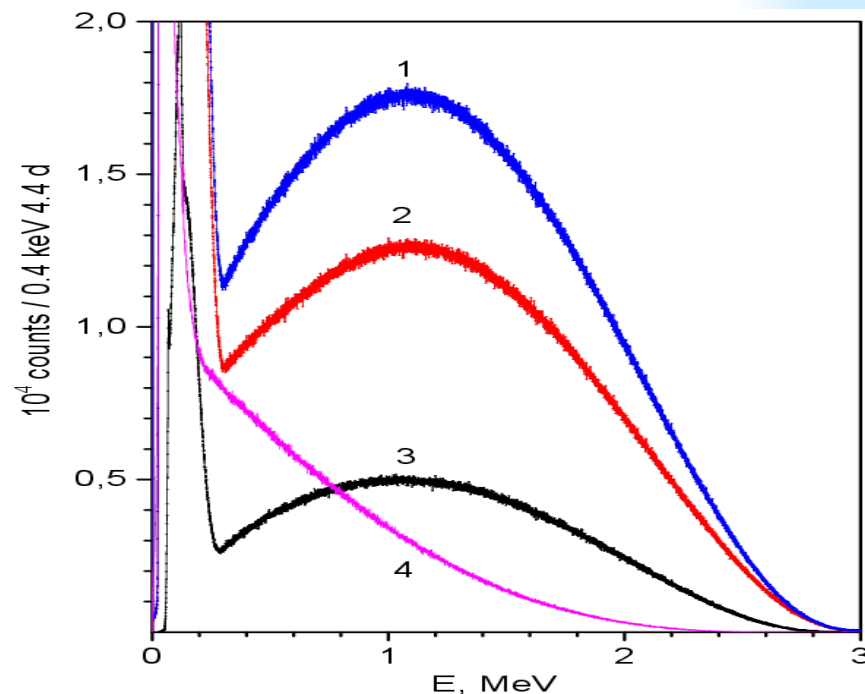
# 4π бета спектрометр с Si(Li)-детекторами

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА  
2022. Т. 53, вып. 2. С. 450–463

## ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ $\beta$ -СПЕКТРА RaE ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

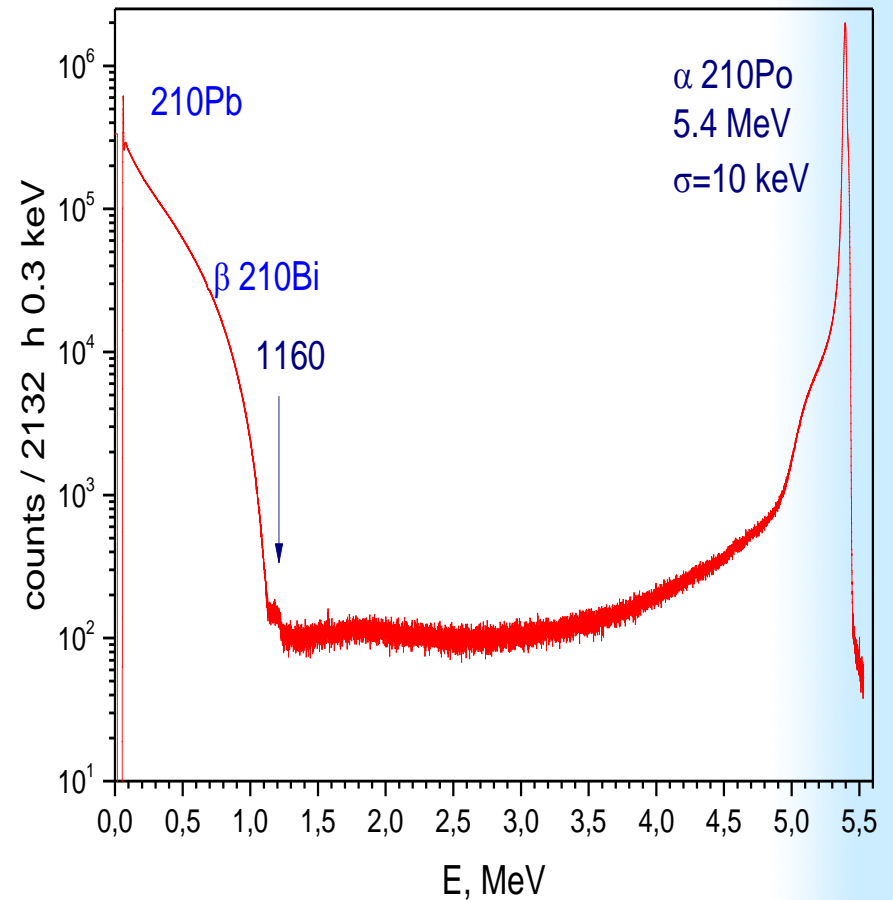
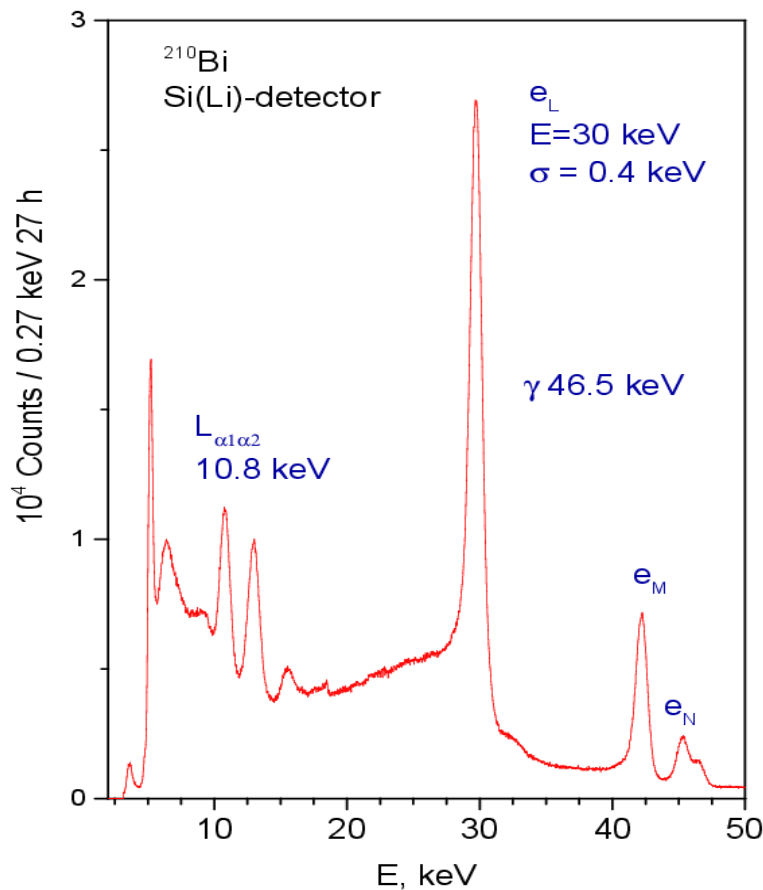
А. В. Дербин, И. С. Драчнев\*, И. С. Ломская,  
В. Н. Муратова, Н. В. Пилипенко, Д. А. Семенов,  
Е. В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
Гатчина, Россия



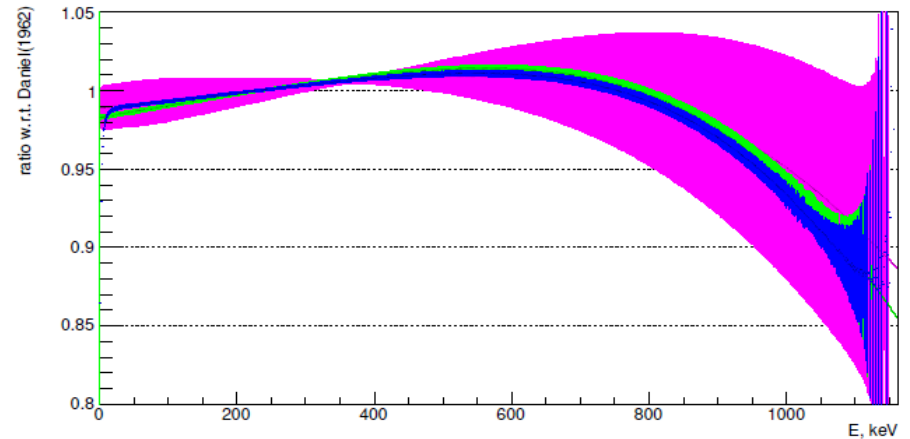
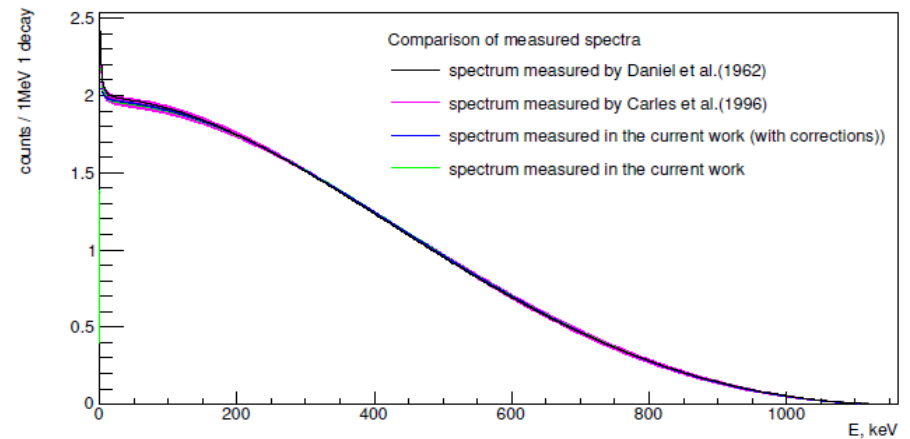
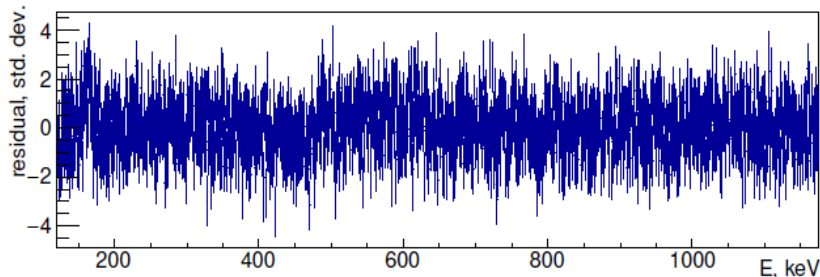
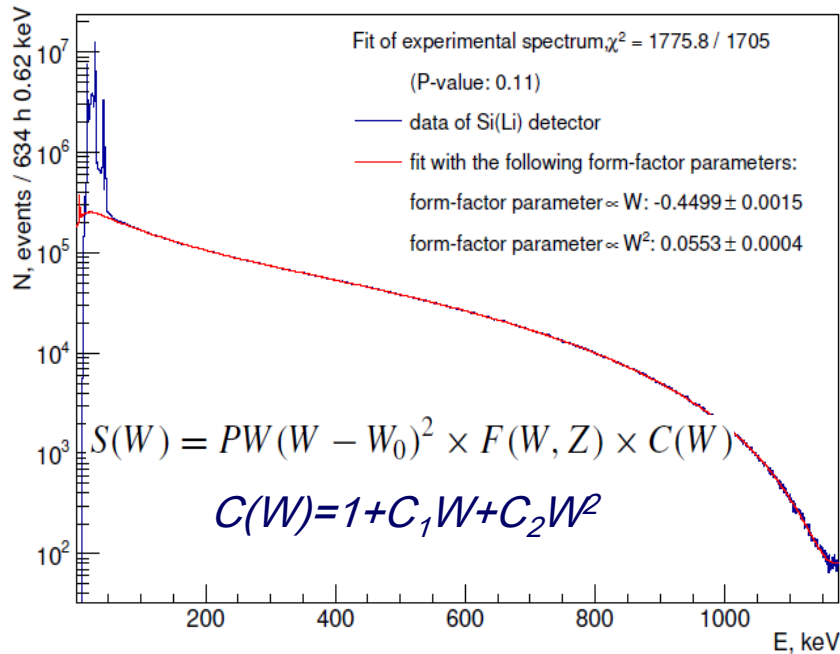
Бета спектр  $^{210}\text{Bi}$  присутствует в фоновых спектрах практически всех низкофоновых установок, предназначенных для регистрации нейтрино, частиц темной материи, двойного бета-распада и др. Может быть отделен от  $^{238}\text{U}$  через газообразный  $^{222}\text{Rn}$ , распады которого ведут 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 CNO-нейтрино.

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



Измерение  $\alpha$ -,  $\beta$ -, и  $\gamma$ - спектров  $^{210}\text{Pb}$  (22.3 лет),  $^{210}\text{Bi}$  (5.0 сут.) и  $^{210}\text{Po}$  (138 сут.) в схеме «мишень-детектор». Безносительный источник  $^{210}\text{Pb}$ . Разрешение для конверсионных электронов с энергией 30 кэВ составило  $\sigma = 0.4$  кэВ. Для  $\alpha$ -частиц с энергией 5.41 МэВ составило  $\sigma = 10$  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 $\pi$ -спектрометром (2022)

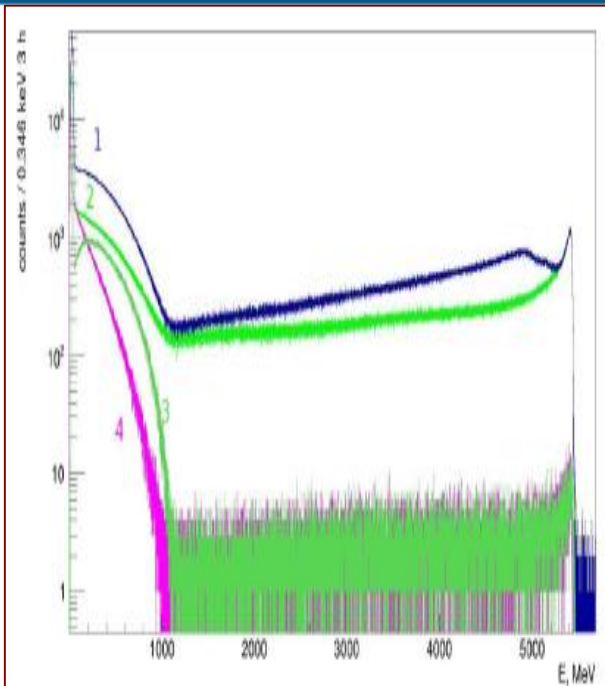
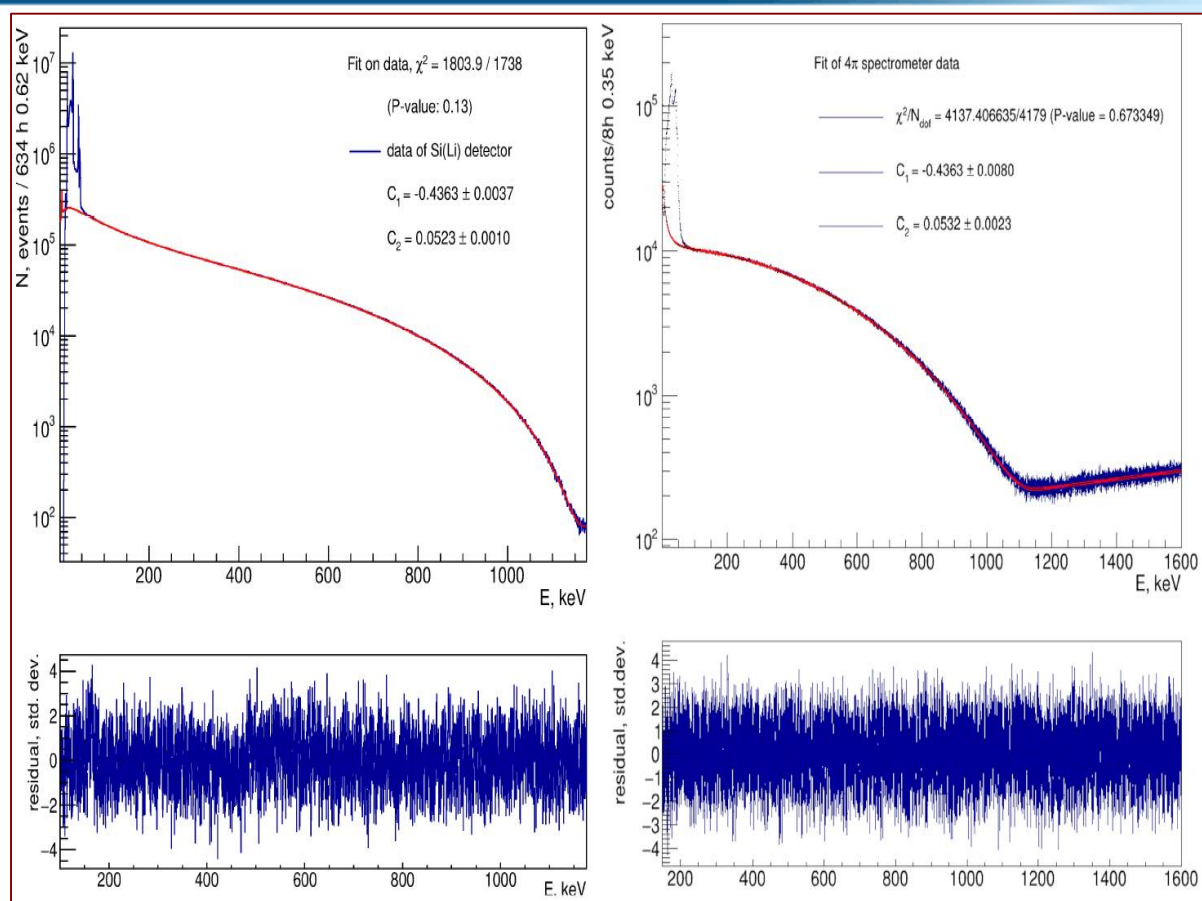


Figure 2. The experimental spectra measured by 4 $\pi$   $\beta$ -spectrometer. 1 - total registered energy spectrum; 2 and 4 - spectra of single-detector, recorded in anticoincidence and coincidence, respectively; 3 - spectrum of events recorded by two detectors.



Спектр электронов  $^{210}\text{Bi}$  был измерен с новым 4 $\pi$ -спектрометром, функция отклика которого близка к гауссовой и не содержит низкоэнергетического хвоста, связанного с обратным рассеянием электронов от поверхности кристалла. Определенные параметры ядерного формфактора  $C(W)=1+C_1W+C_2W^2$   $C_1 = -0.4363 \pm 0.0080$  and  $C_2 = 0.0532 \pm 0.0023$  находятся в согласии с результатами измерений в схеме «мишень-детектор».

# Поиски низкоэнергетических сигналов в Borexino от быстрых радиовсплесков (FRBs).

Eur. Phys. J. C (2022) 82:278  
https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10197-0

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Experimental Physics

## Search for low-energy signals from fast radio bursts with the Borexino detector

ПИЯФ -авторы  
по переписке

Borexino Collaboration

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

<sup>1</sup> Physik-Department, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany

<sup>2</sup> Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany

<sup>3</sup> Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 20133 Milan, Italy

<sup>4</sup> Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

<sup>5</sup> INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, AQ, Italy

<sup>6</sup> Physics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

<sup>7</sup> Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 16146 Genoa, Italy

<sup>8</sup> Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia

<sup>9</sup> St. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188350 Gatchina, Russia

<sup>10</sup> National Research Centre Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia

<sup>11</sup> APC, Université de Paris, CNRS, Astroparticule et Cosmologie, 75013 Paris, France

<sup>12</sup> Gran Sasso Science Institute, 67100 L'Aquila, Italy

<sup>13</sup> Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

<sup>14</sup> Institute of Physics and Excellence Cluster PRISMA+, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany

<sup>15</sup> M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30348 Kraków, Poland

<sup>16</sup> Institute for Nuclear Research of NAS Ukraine, 03028 Kyiv, Ukraine

<sup>17</sup> RWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany

<sup>18</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

<sup>19</sup> Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi e INFN, 06123 Perugia, Italy

<sup>20</sup> Amherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, UMass, Amherst, MA 01003, USA

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

<sup>22</sup> Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA

<sup>23</sup> Department of Physics, Royal Holloway, University of London, Department of Physics, School of Engineering, Physical and Mathematical Sciences, Egham, Surrey TW20 OEX, UK

<sup>24</sup> Institute of Nuclear Research (Atomki), Debrecen, Hungary

<sup>25</sup> Present address: Department of Physics, University of California, Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA

<sup>26</sup> Present address: INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, AQ, Italy

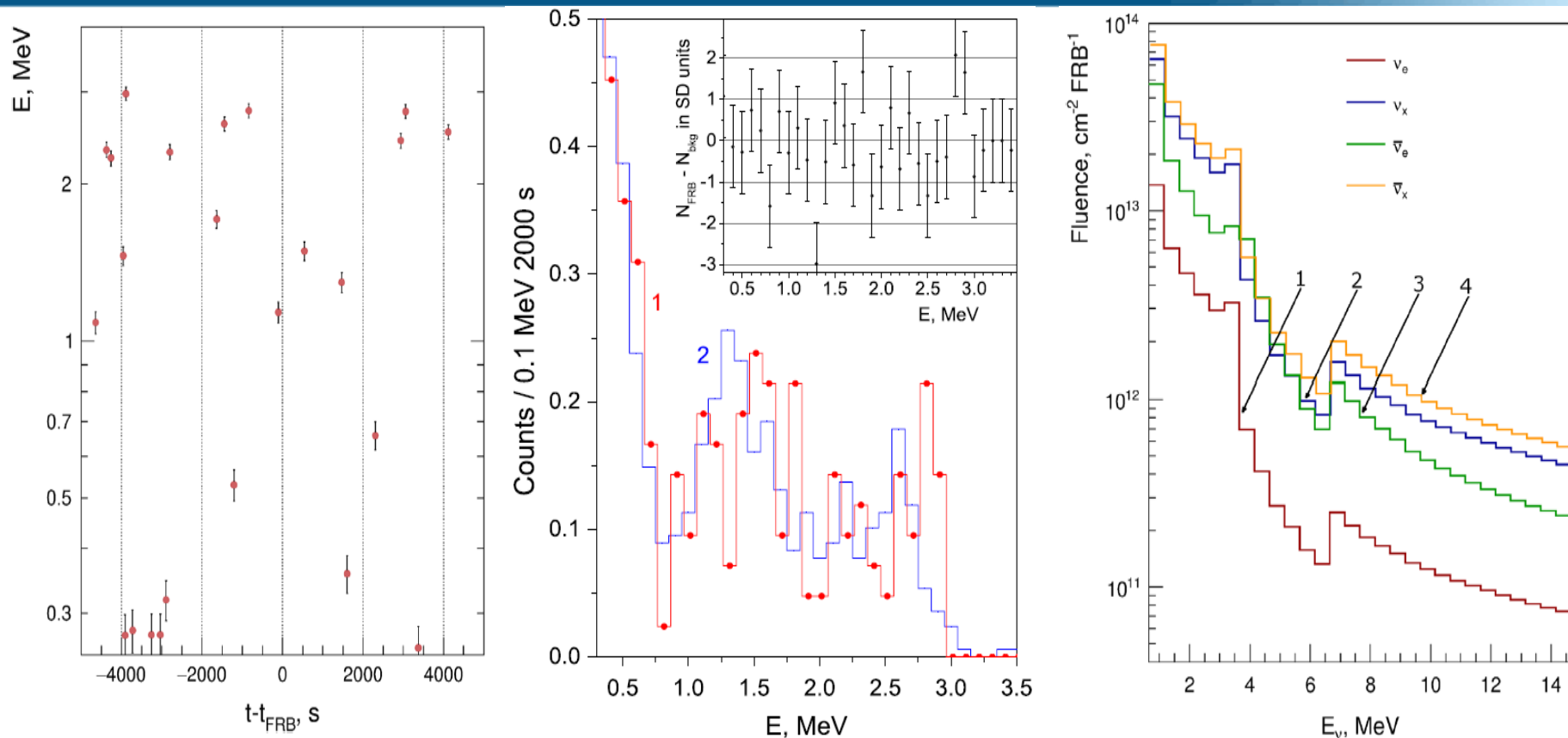
<sup>27</sup> Present address: Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN Milano-Bicocca, 20126 Milan, Italy

<sup>28</sup> Present address: Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova and INFN Sezione di Padova, Padua, Italy

<sup>29</sup> Present address: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 00144 Rome, Italy

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).

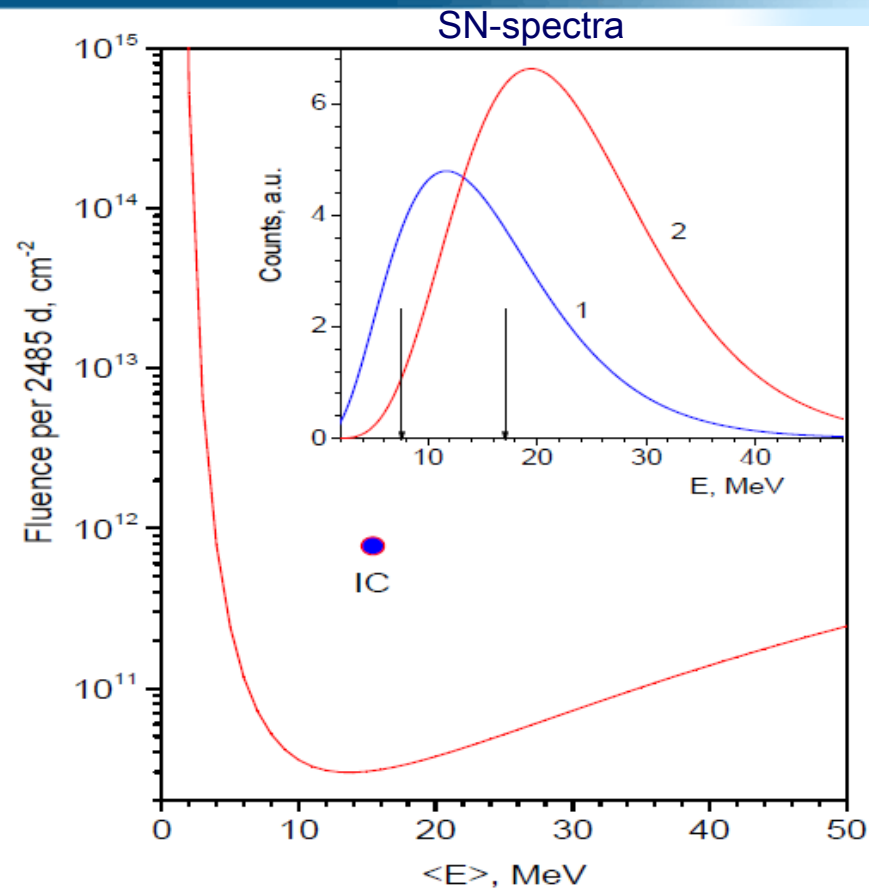
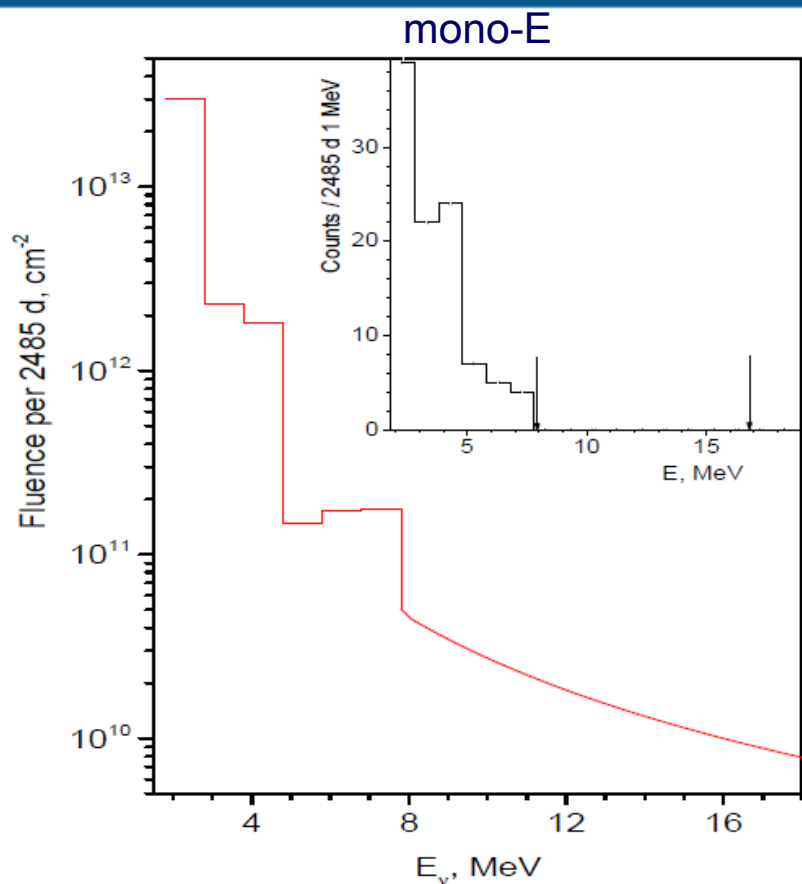


*Borexino events with an energy above 0.25 MeV occurring within  $\pm 5000$  s of FRB 200428 detection time.*

*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.*

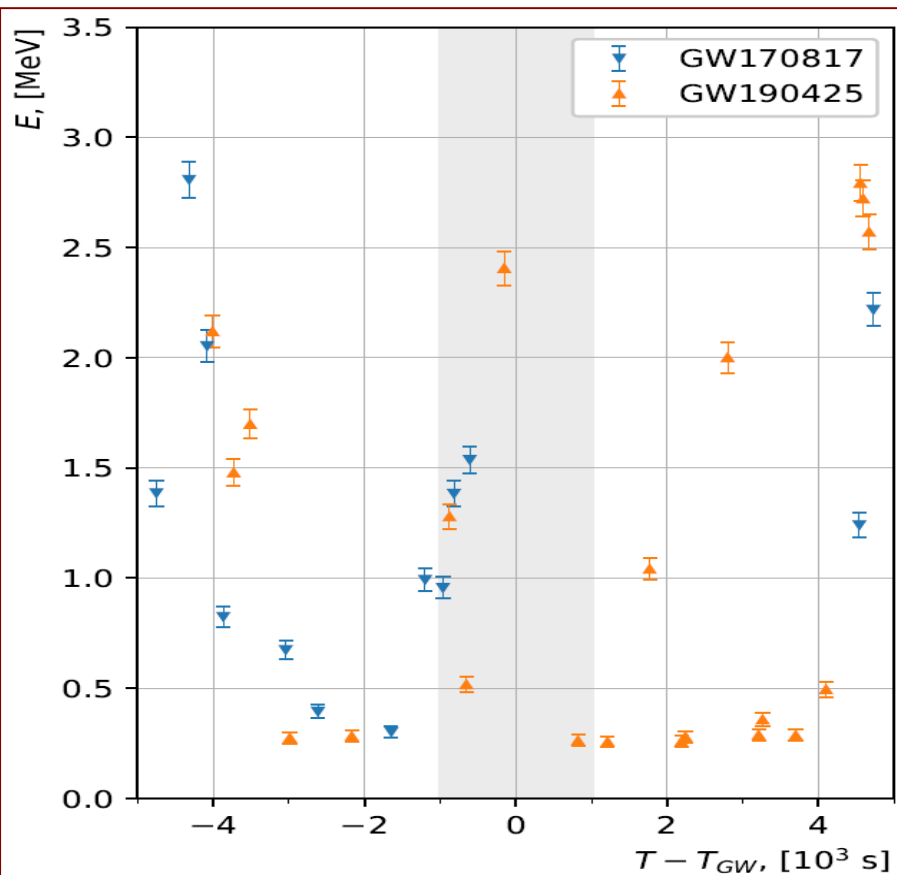
*90% C.L. upper limits on mono-energetic neutrino fluences obtained through the temporal correlation analysis for 42 most intensive FRBs with the fluence  $\Phi_{FRB} \geq 40$  Jy ms.*

# Ограничения на флюенс электронных антинейтрино



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  $\langle E \rangle = 15.6 \text{ MeV}$  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.

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



GW event	Mode	$M1$	$M2$	$R$	$M_{rad}$
GW 170817	NSNS	1.46	1.27	40	$\leq 0.04$
GW 190425	NSNS	2.0	1.40	160	–
GW 190426	NSBH	5.7	1.5	370	–
GW 191219	NSBH	31.1	1.17	550	0.1
70 GW BHs	BHBH	36.7	23.0	2127	2.4

Детектор Borexino находился в режиме сбора данных, когда произошло 70 (из 87) слияний черных дыр, 2 слияния нейтронных звезд и 2 (из 4) слияний нейтронных звезд с черными дырами. Три разных варианта бинарных слияний во временном совпадении с данными Борексино анализировались отдельно. Некоторые параметры ГВ событий с участием нейтронных звезд, которые являются очевидными источниками нейтрино, показаны в таблице.

Мы использовали базу данных *GWTC-3*, составленную LIGO и VIRGO для O1, O2 и O3 серий. Эта база содержит информацию о GW событиях, времени регистрации, массах  $M1$  и  $M2$ , чирп массе  $\delta M$ , конечной массе  $M_f$  и красном смещении  $z$ . За интересующий период с сентября 2015 г. по март 2020 г. наблюдалось 93 события GW, 87 из которых представляют собой слияния черных дыр (BHBH), 2 события слияние нейтронных звезд (NSNS) и 4 события слияния нейтронных звезд и черных дыр (NSBH). Ближайшее GW-событие — самое известное слияние двух нейтронных звезд *GW170817*, произошедшее на  $R=40+7-15$  Мпк.

# Наши планы в коллаб. Борексино и новые задачи

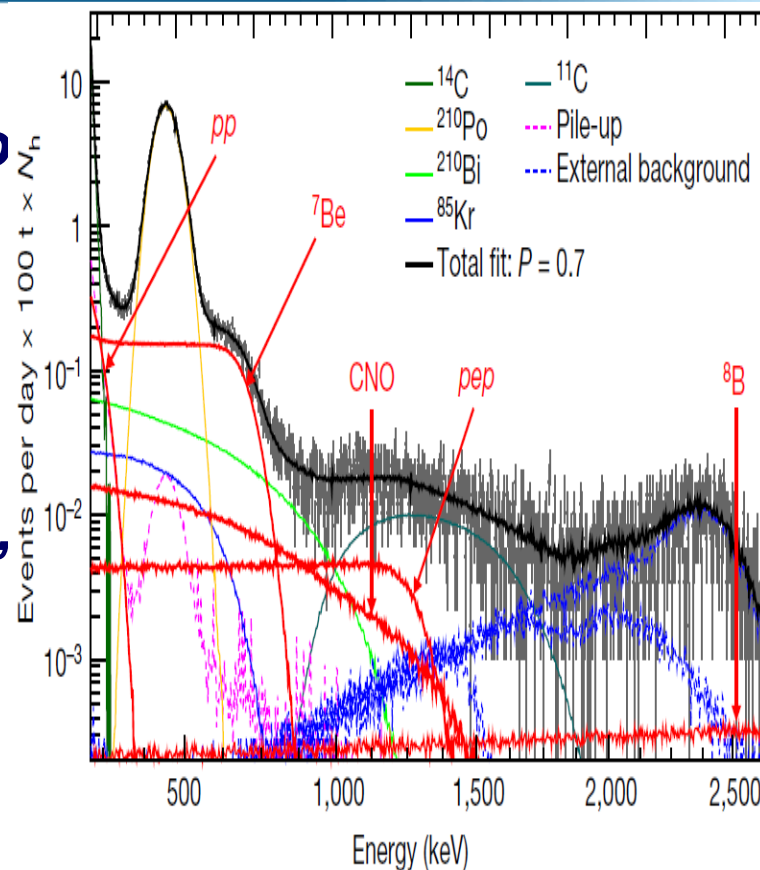
1. Получение заключительных данных по солнечным нейтрино гео-нейтрино

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

3. Корреляции с  $\gamma$ -всплесками, гравитационными волнами, солнечными вспышками, гамма-всплесками, сигналами IceCube

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

5. DARWIN -DARk matter WImp search with liquid xenon



# Поиск частиц темной материи в 2022 г.

**1. Поиск рассеяния WIMPs (N1) на ядрах Ar и электронах в экспериментах DARKSIDE** (входим в группы *Materials, Analysis, Calibration*) **и DEAP** (3600 кг LAr детектор в SNO, ПИЯФ – 5.5 МэВ аксионы)

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

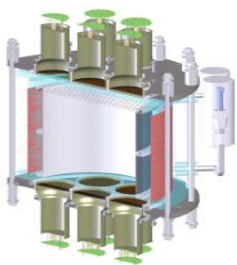
2.1 Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром  $^{83}\text{Kr}$  в Баксанской Нейтринной Обсерватории ИЯИ. Новые данные по константе связи аксиона с электроном (опубликовано в *Письмах ЖЭТФ*, 2022).

2.2 Начаты совместные работы с Нижегородским ГТУ по созданию болометров на основе тулий содержащего граната  $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  для регистрации резонансного поглощения солнечных аксионов с непрерывным спектром.

2.3 Участие в коллаборации **IA XO** – International Axion Observatory. Этап **baby-IA XO**. Пока заморожено. С MPI (Мюнхен) по  $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  также.

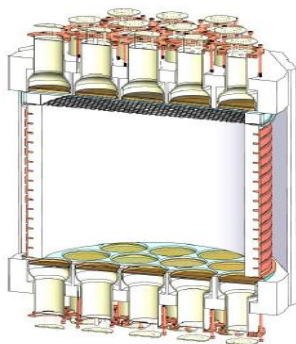
# Двухфазный детектор DarkSide -10-50-20K

2012



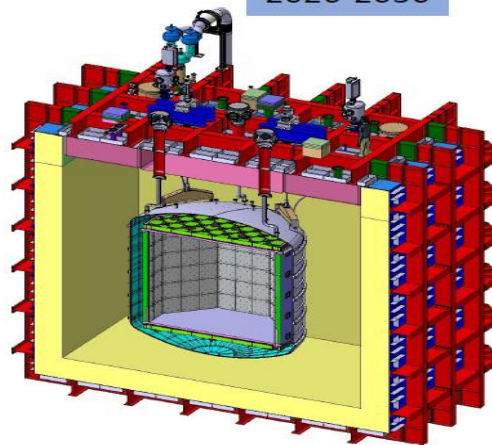
DarkSide-10

2013-2018



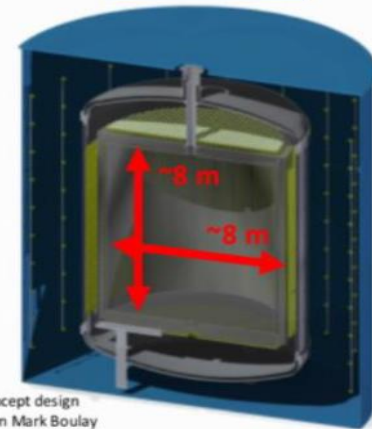
DarkSide-50

2026-2036



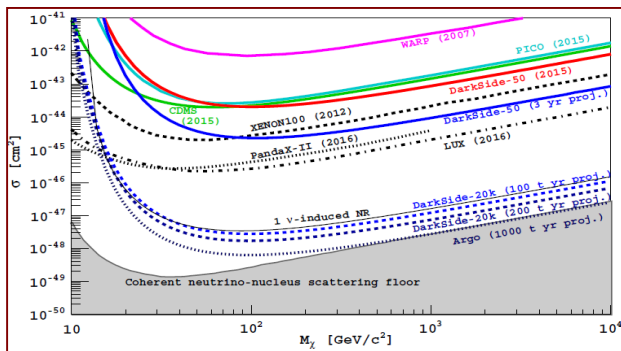
DarkSide-20k @LNGS

2030s-...



Concept design from Mark Boulay

Argo@SNOLAB



ПИАФ участвует в коллаборации DS с момента образования. DarkSide 20K состоит из акриловой полости, заполненной 51 т низко-радиоактивного аргона (без  $^{39}\text{Ar}$ ). Сигнал считывается 14  $\text{m}^2$  + 14  $\text{m}^2$  массивом SiPM. Внешнее активное veto на основе атмосферного аргона (300 т) имеет слой акрила допированного Gd. Установка монтируется в зале С лаборатории Гран Сассо. Сборка началась в 2022 г, начало измерений 2026 г. ARGO будет содержать 360 т UAr и располагаться в SNOLab. Входим в группы Materials (ICP MS), Analysis (A.E.E), Calibration ( $^{252}\text{Cf} + \text{Si}(\text{Li})$ ). ArDM, DarkSide-50, DEAP-3600 и MiniCLEAN => Global Argon Dark Matter collaboration начиная с DS-20k. Проблема  $^{39}\text{Ar}$  (269 лет) решается Urania (330 кг/сут, США) и Aria (1 т/сут, Сардиния).

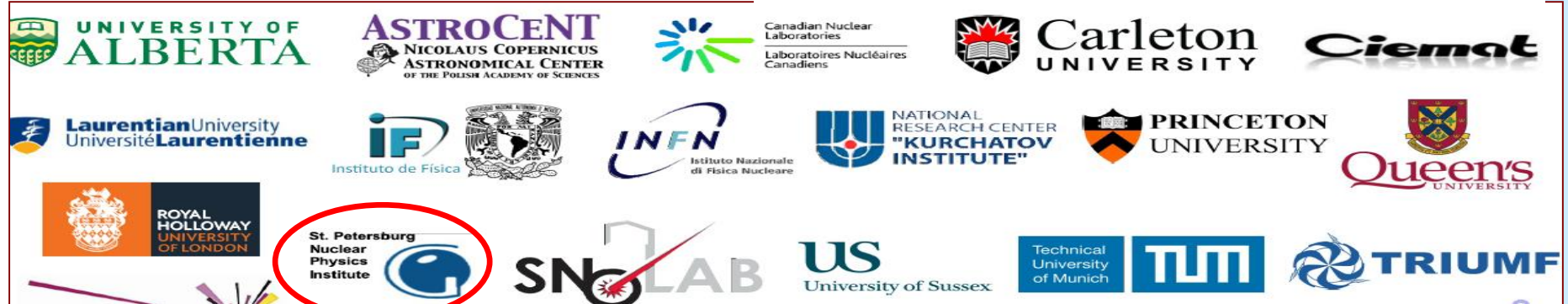
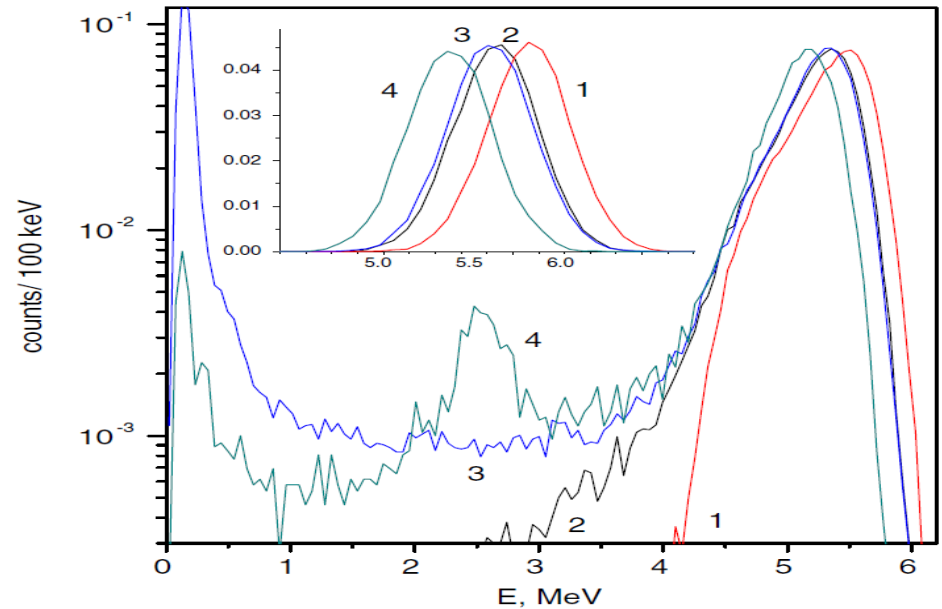


## ***n-источник + Si-детектор для DS-20k и iDREAM (КАЭ)***



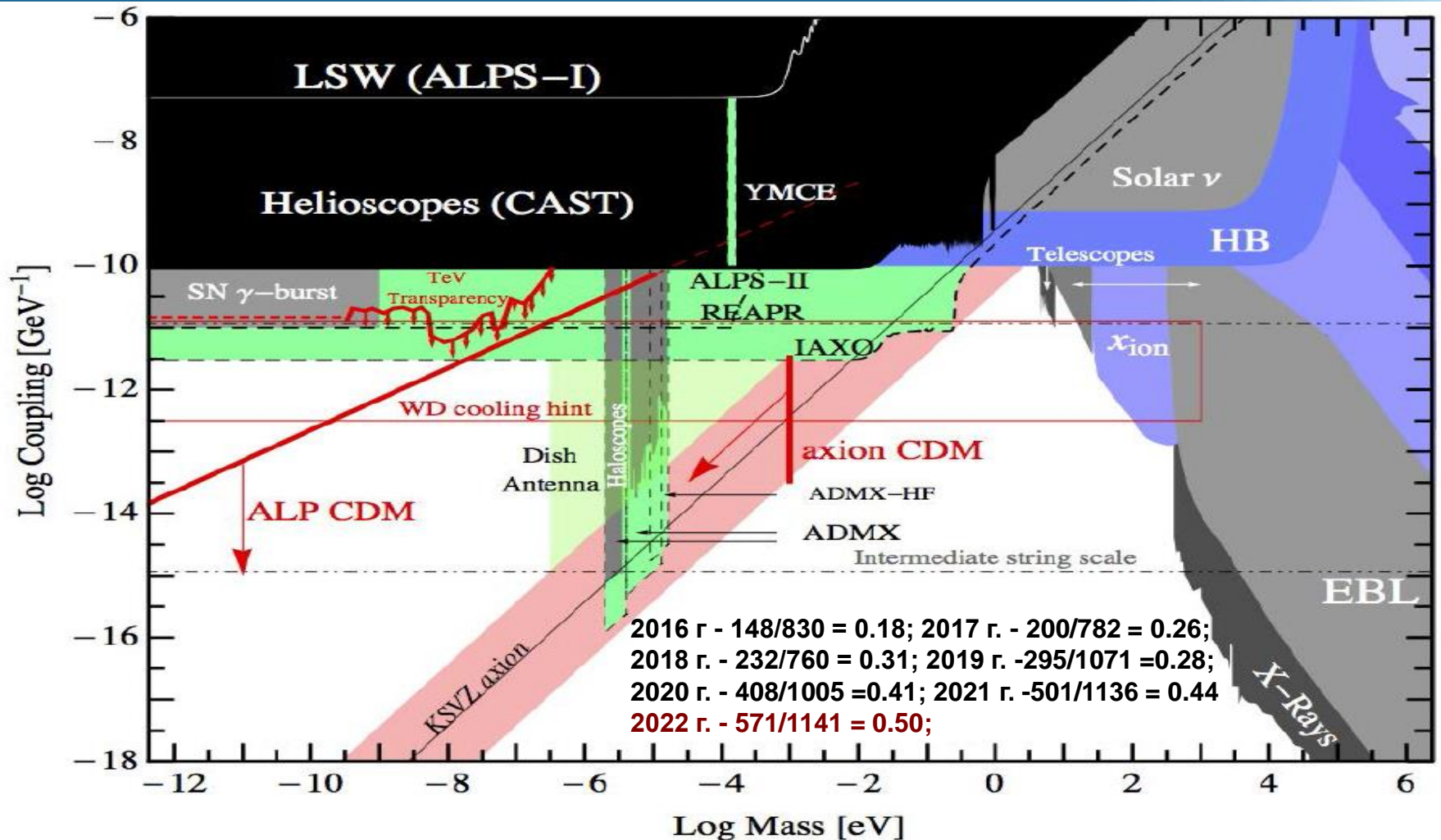
*Продолжены работы по подготовке Si-детекторов калибровочного источника нейтронов для **DarkSide-20k** и **iDREAM** (КИ, Калининская АЭС). Проводилось изучение рад. стойкости Si(Li)- и SiSB-детекторов при регистрации  $\alpha$ -частиц и осколков деления. Создана установка тройных ff-n- $\gamma$  совпадений. **Статья 2022 г принята в печать.***

# Поиск $p+d \rightarrow {}^3\text{He}+A$ (5.5 МэВ) аксионов с DEAP (2022)



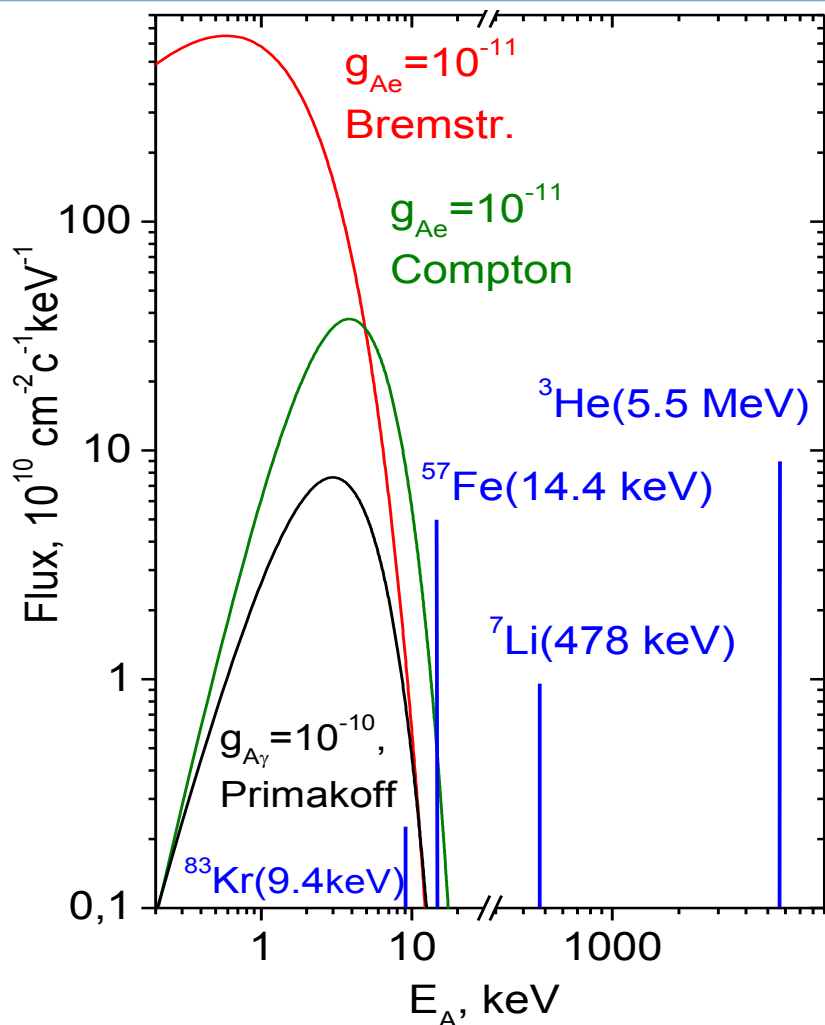
**DEAP (2022)** (Dark matter Experiment using Argon Pulse-shape discrimination) однофазный жидкоаргоновый детектор массой 3.6 т в подземной лаборатории Садбери (SNO) использовался для поиска солнечных аксионов из реакции  $p+d \rightarrow {}^3\text{He}+A$  (5.5 MeV).

# Аксионы + аксионоподобные частицы ALPs



**Аксионы:** CP-проблема + темная материя. **ALPs** – Axion like particles: Аномальная прозрачность + динамика звезд различных типов. Слово **axion** в названии статей, выложенных в *arXive* в 2022 г, встречается всего в 2.0 раза реже чем слово **neutrino**

# Спектры солнечных аксионов vs $g_{A\gamma}$ , $g_{Ae}$ и $g_{AN}$



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 ( $g_{AN}$ ):

$^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li}^* + \gamma; ^7\text{Li}^* \rightarrow ^7\text{Li} + A$  (478 кэВ)  
 $p + d \rightarrow ^3\text{He} + A$  (5.5 МэВ).

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 ( $g_{A\gamma}$ ).

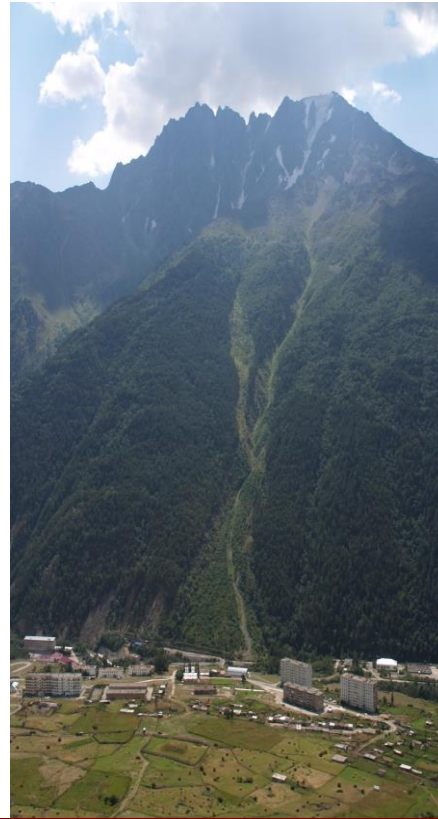
4. Bremsstrahlung:  $e + Z(e) \rightarrow Z + A$ . ( $g_{Ae}$ )

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.

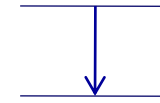
# Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром $^{83}\text{Kr}$ (ИЯИ + ПИЯФ)



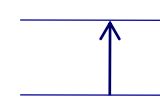
$^7\text{Li}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{83}\text{Kr}$

Primakoff, Compton and

Bremsstrahlung



9.4 кэВ



$^7\text{Li}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{83}\text{Kr}$   
 $^{169}\text{Tm}$



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 muons  $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ .

# Новый предел на константу $g_{Ae}$ (2022)

Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 1, с. 13–19

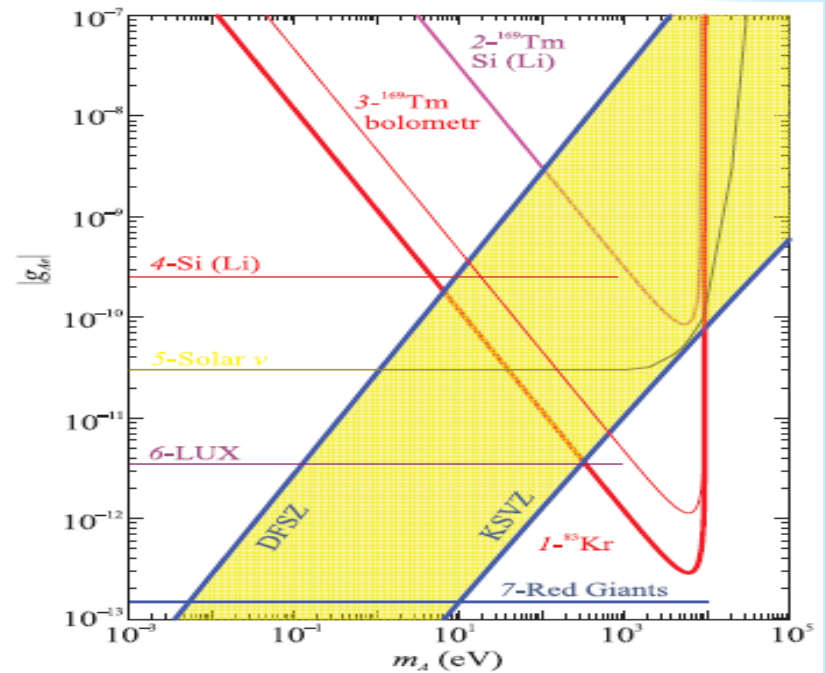
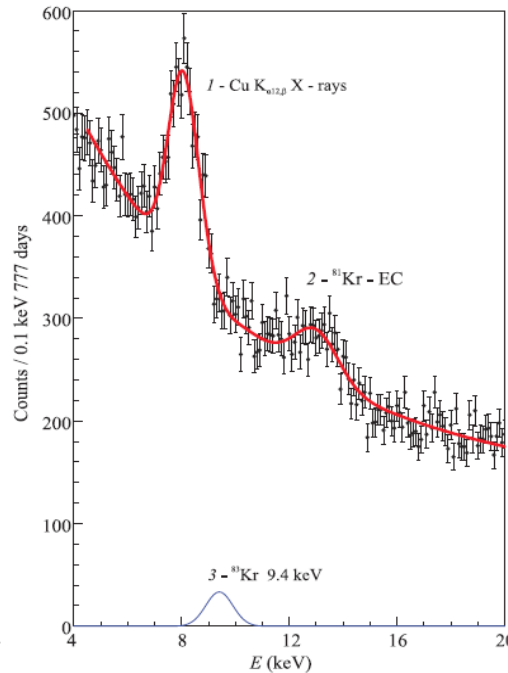
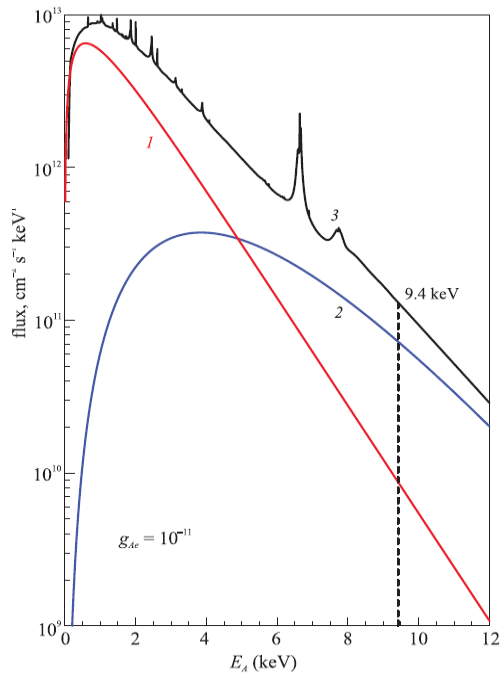
© 2022 г. 10 июля

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

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

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

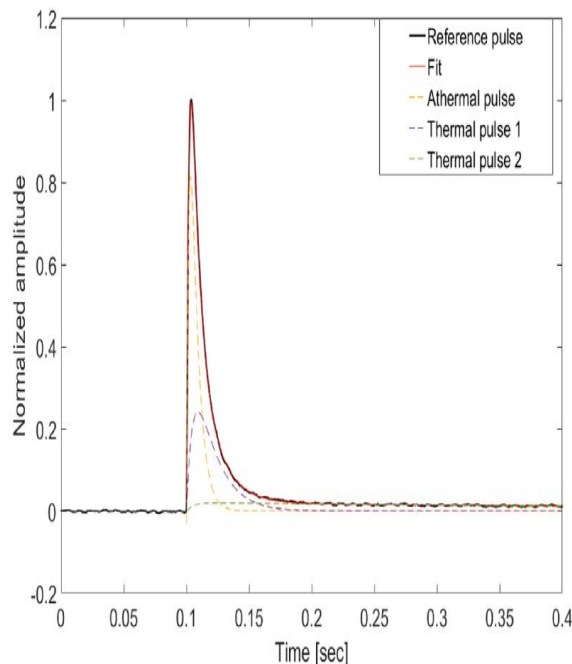
<sup>\*</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова,  
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 188300 Гатчина, Россия



Выполнен поиск резонансного возбуждения 1-го ядерного уровня  $^{83}\text{Kr}$  с энергией 9.4 кэВ солнечными аксионами, потоки которых зависят от  $g_{Ae}$ . Для регистрации использовался газовый пропорциональный счетчик, расположенный в низкофоновой установке в БНО ИЯИ РАН. В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с электроном и нуклонами  $|g_{Ae}(g_{AN}^3 - g_{AN}^0)| \leq 1.50 \times 10^{-17}$  (90% у.д.), которое соответствует новым ограничениям на массу аксиона  $m_A \leq 320$  эВ и  $m_A \leq 4.6$  эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

# $Tm_3Al_5O_{12}$ - 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 МэВ** в кристалле  $Tm_3Al_5O_{12}$ , охлажденном до  $T = 10 \text{ мК}$ .

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

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

ELSEVIER

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>f</sup>, F. Petricca<sup>a</sup>, V.V. Ryabchenkov<sup>f</sup>, S.E. Sarkisov<sup>f</sup>, D.A. Semenov<sup>g</sup>, K.A. Subbotin<sup>h</sup>, E.V. Unzhakov<sup>h</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

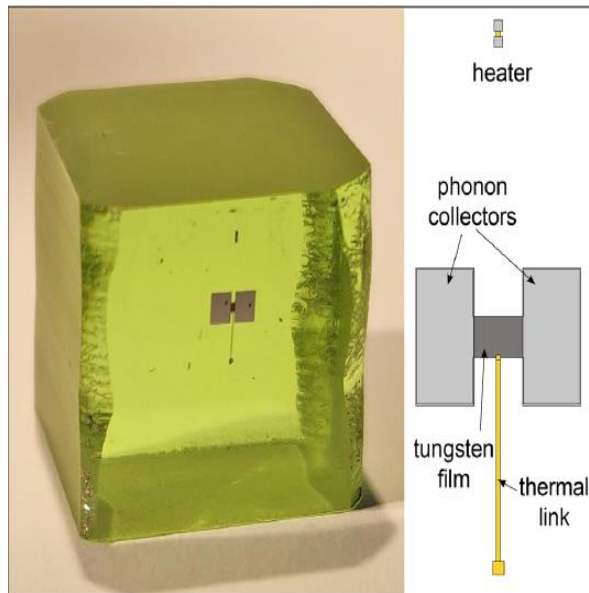
**ПИЯФ - авторы по переписке**

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

# 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  $g_{Ae}$ :  $|g_{A\gamma}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 1.44 \times 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$  и  $|g_{Ae}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 2.81 \times 10^{-16}$ .

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

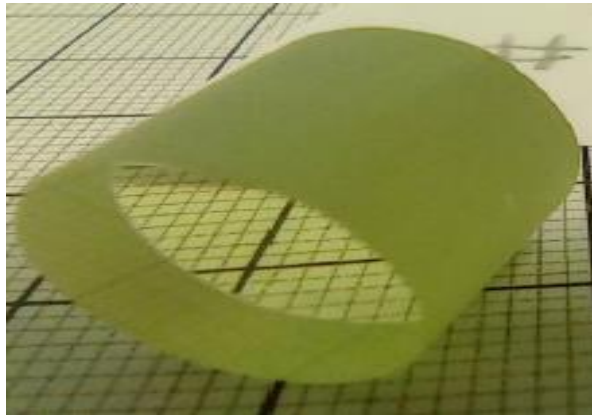
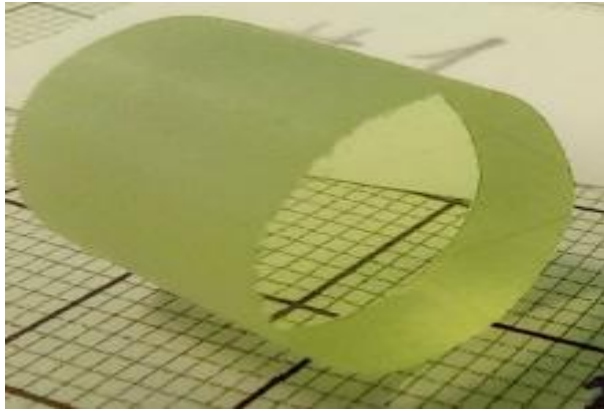
<sup>7</sup> Departamento de Fisica, Universidade de Coimbra, P3004 516 Coimbra, Portugal

ПИЯФ -авторы  
по переписке

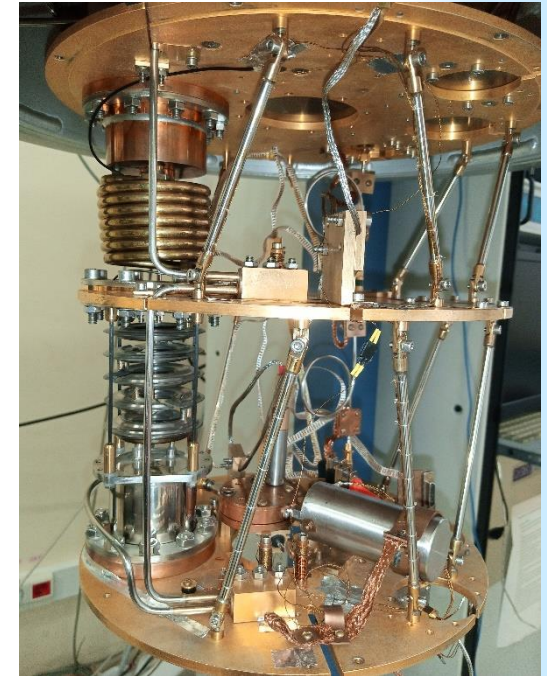
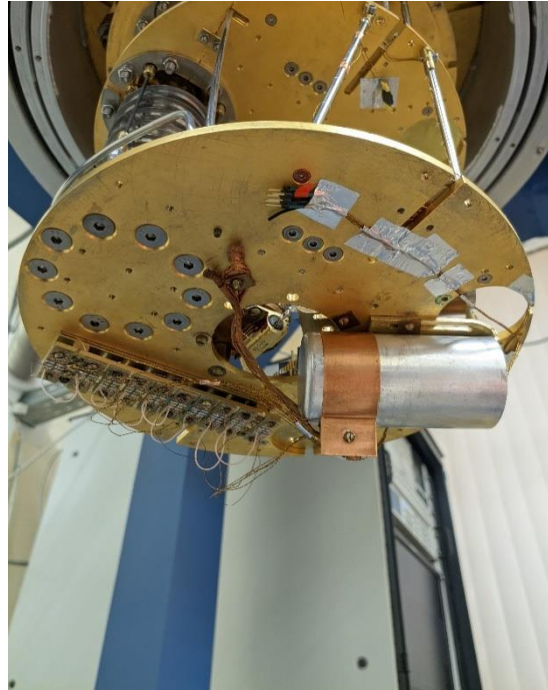


# Новые кристаллы $Tm_3Al_5O_{12}$ (2022) и криогенная установка в НГТУ

*Лаборатория сверхпроводниковой наноэлектроники  
Нижегородский технический университет*



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



*Лаборатория сверхпроводниковой наноэлектроники  
обладает уникальным оборудованием для проведения  
исследований при температурах до 10 мК.*

*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.*

# IAXO: International Axion Observatory



PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: October 26, 2020

REVISED: March 5, 2021

ACCEPTED: April 16, 2021

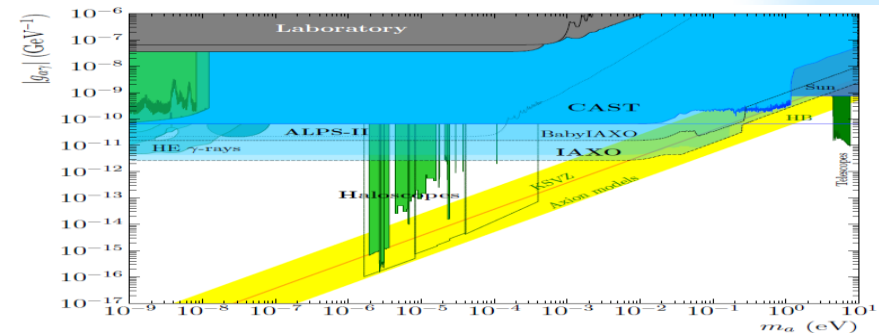
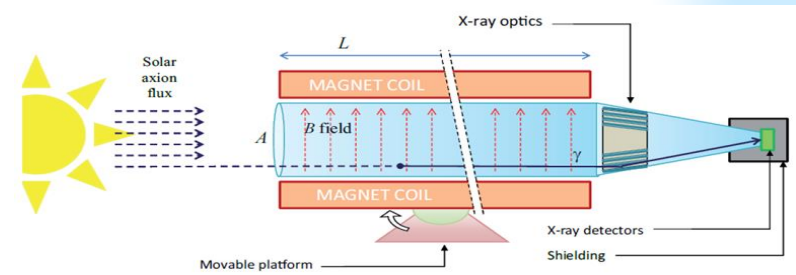
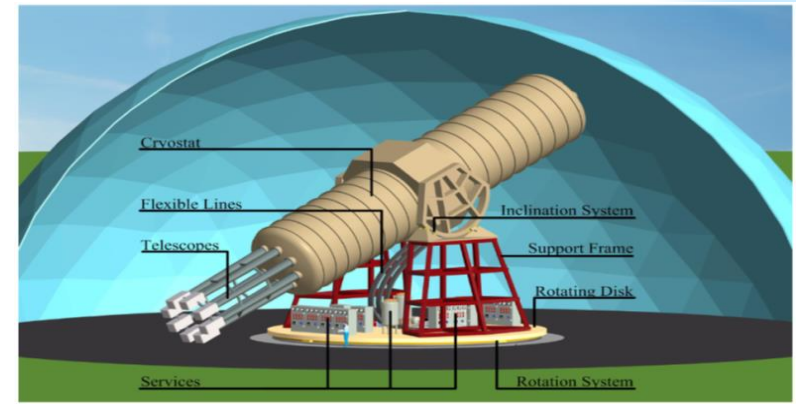
PUBLISHED: May 17, 2021

## 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. Draehnev<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>19</sup>, I.G. Irastorza<sup>2,a</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. Lomszkaya<sup>12</sup>, G. López-Alegre<sup>18</sup>, B. Lubasandorzhiev<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.P. 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>



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

# Основные результаты работы в 2022 г.

1. Совместно с участниками международной коллаборации **Борексино** получены новые результаты по регистрации нейтрино из **CNO-цикла** на Солнце. Скорость счета **CNO-нейтрино** составляет  $6.7^{+2.0}_{-0.8}$  **отсч. / (100 т сут.)**, что соответствует потоку  $6.6^{+2.0}_{-0.9} \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , в предположении LMA MSW осцилляционного решения. Результаты опубликованы в журнале **“Phys. Rev. Lett.”**.
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 получены с использованием бета-спектрометров двух типов и опубликованы в журналах **Phys. Rev C (2020)** и **Phys. Part. Nucl. (2022)**
3. Коллаборация **Борексино** выделила черенковское излучения в сцинтилляторе от электронов с энергией 0.5- 1.0 МэВ подтвердила направление регистрируемых  **$^7\text{Be}$  нейтрино** на Солнце. Результаты опубликованы в **Phys. Rev. Lett.**, и **Phys. Rev. D (2022)**.
4. Группа ПИЯФ подготовила и опубликовала статью от коллаборации **Борексино** по поиску нейтринного излучения от быстрых радиовсплесков. Результаты опубликованы в **Euror.Phys.J. C (2022)**.
5. Группа ПИЯФ продолжила поиск корреляций  **$\nu$ -событий** с гравитационными событиями. Получены новые данные по потокам нейтрино и антинейтрино от событий, связанных со слиянием нейтронных звезд (2 - NS-NS), нейтронной звезды и черной дыры (2 - NS-BH) и 70 черных дыр (70 - BH-BH).
6. Совместно с ИЯИ РАН получены новые данные для константы связи аксиона с электроном на основе результатов эксперимента в БНО. Достигнутая чувствительность для масс аксиона  $\sim 1$  кэВ является рекордной и близка к астрофизическим ограничениям.
7. Выращена новая буля и изготовлены 4 новых кристалла  **$\text{Al}_5\text{Tm}_3\text{O}_{12}$**  в ИОФ РАН для поиска резонансного поглощения солнечных аксионов. Начаты работы по подготовке болометрических детекторов совместно с НГТУ им. П.Е. Алексеева.
8. Продолжена разработка калибровочного источника нейтронов на основе  **$^{252}\text{Cf}$** , совмещенного с **Si(Li)-** и **SiSB** детекторами для нейтринных экспериментов. Проводилось изучение радиационной стойкости Si-детекторов при регистрации альфа-частиц и осколков деления. Результаты приняты в ИПИ.
9. Проводились изучения п/п и МДП структур с целью создания толстых, до 10 мм, **Si(Li)-детекторов** с двухсторонними тонкими окнами для секционированного мультidetектора для измерения электронов с энергией до 8 МэВ.

# Планы по нейтрино и ТМ на 2023 г.

## 1) ПИЯФ

а) Подготовка кремниевого мультidetектора для регистрации электронов с энергией до 8 МэВ для измерения бета-спектров осколков деления с целью восстановления спектра антинейтрино от реактора. Подготовка калибровочного источника для детектора iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) (совместно КИ).

б) Проведение работ с кристаллами  $Tm_3Al_5O_{12}$  с целью создания болометрического детектора для поиска солнечных аксионов (совместно с НГТУ).

в) Баксанская НО - аксион  $^{83}Kr$ , анализ результатов измерений.

## 2) Borexino – солнечные нейтрино, редкие процессы, корреляции

а) Солнечные нейтрино на полном наборе данных, магнитный момент

б) Принцип Паули, аксионы, распады с  $\Delta B = 3$ ,

в) корреляция Вх сигналов с GWs, GRBs, FRBs, SFs, IceCube

## 3) DarkSide и DEAP – темная материя

Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20K, DEAP, n+Si-источник, рад. стойкость Si(Li) + “удаленные дежурства”

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

## **Группа физики и технологии полупроводниковых детекторов**

# Содержание доклада

Работы в 2022 году проводились по 3 основным направлениям:

1) разработка комбинированного нейтронного источника  $^{252}\text{Cf} + \text{Si}$  п/п детектор для задач нейтринной физики

*Изучение радиационной стойкости кремниевых п/п детекторов*

2) разработка Si-мультidetектора для измерения  $\beta$ -спектров осколков деления с энергией электронов до 10 МэВ

*SiLi детектор с тонкими входными окнами*

3) установка НСГУ для исследования радиационных дефектов в полупроводниках для ПИЯФ

4) поддержание работоспособности п/п детекторов в лабораториях ПИЯФ, СПбГУ

# Компактный калибровочный источник нейтронов (совместно с РИАН)

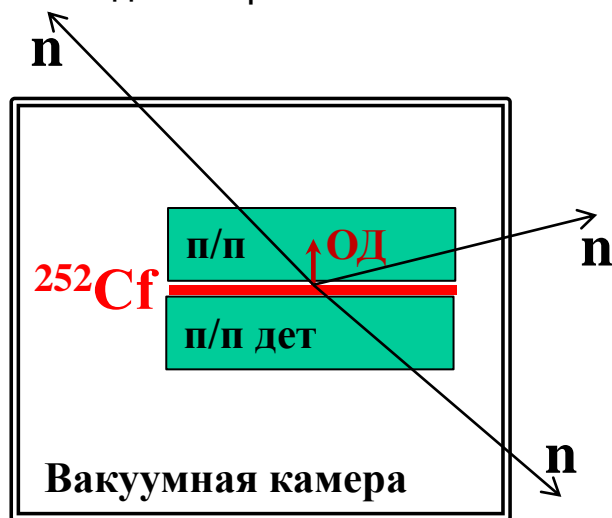
Необходим для калибровки нейтринных детекторов iDREAM (РФ) и DarkSide (Италия)

- $^{252}\text{Cf}$  распадается по двум каналам:  $\alpha$ -распад и спонтанное деление на два осколка + 3.8 нейтронов + гамма.

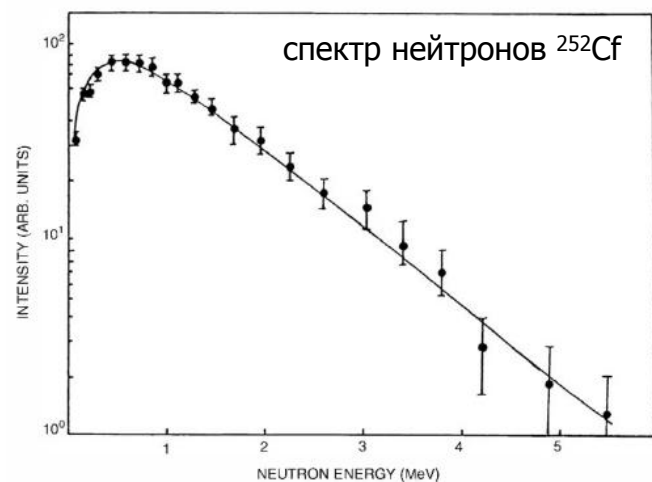
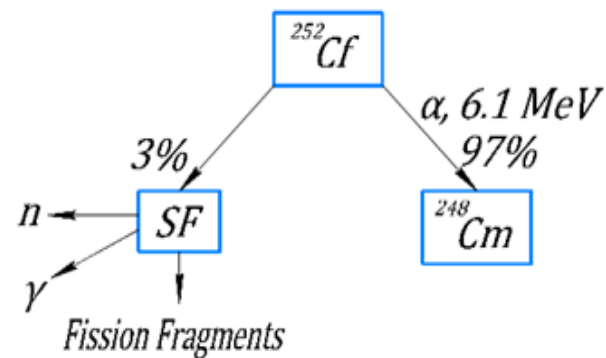
"легкие" ОД: 104 МэВ и 106 а.е.м.

"тяжелые" ОД: 79 МэВ и 142 а.е.м.

- момент образования  $n$  – может определяться по регистрации сигнала ОД полупроводниковым детектором



Выдержит ли  
п/п детектор  
облучение  
ОД?

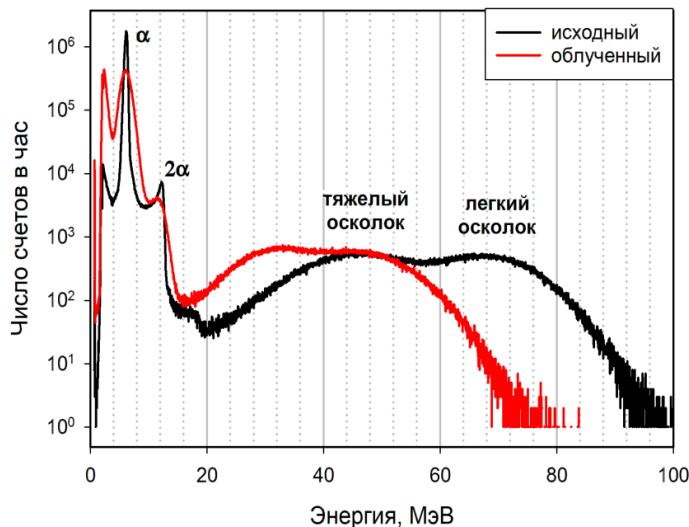


Грант РФФИ 2020-2022 гг.

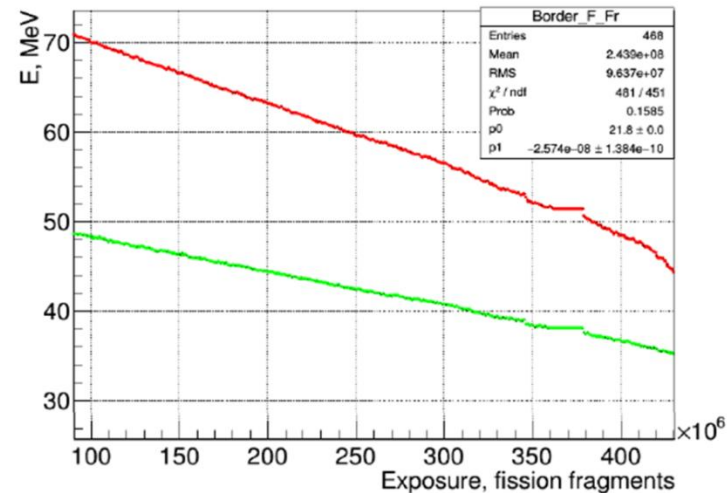
# Изучение радиационной стойкости кремниевых п/п детекторов

- Исследовались: различных типы кремниевых полупроводниковых детекторов: поверхностно-барьерные детекторы и кремний-литиевые детекторы (ПИЯФ), кремниевые планарные  $p^+n$  детекторы (ФТИ)
- Основное проявление деградации работы п/п детекторов при длительном облучении ОД – сдвиг положения пиков ОД в сторону низких энергий =>

перекрытие сигналов от ОД и альфа-частиц сделает детектор непригодным для использования в составе калибровочного  $n$  источника



Спектры  $^{252}\text{Cf}$ , измеренные на исходном и облученном Si(Li) детекторе.



Сдвиг положения максимумов **легкого** и **тяжелого** осколков деления, может быть описан линейной функцией



# Изучение радиационной стойкости кремниевых п/п детекторов

- Исследовались: кремниевые планарные p<sup>+</sup>n детекторы, кремниевые поверхностно-барьерные (ПБ) детекторы и кремний-литиевые детекторы

## Обнаружено

- различный темп деградации у п/п детекторов разных типов
- сильная зависимость темпа деградации от эл. поля, слабая – от температуры
- Выданы рекомендации по выбору наиболее радиационно стойкого п/п детектора

	p <sup>+</sup> n	ПБ1	ПБ2	Si(Li)
эл. поле, кВ/см	8,5	40	17	1,5
сдвиг ЛО, 10 <sup>-5</sup> кэВ/ОД	-1,9	-3,9	-20	-6,2
сдвиг ТО, 10 <sup>-5</sup> кэВ/ОД	-0,9	-1,8	-8,9	-3,6
роста тока утечки, 10 <sup>-16</sup> А/ион	9	14	8	4,5
“критическая” экспозиция, ОД	22 · 10 <sup>8</sup>	12 · 10 <sup>8</sup>	1,2 · 10 <sup>8</sup>	3,5 · 10 <sup>8</sup>

Статьи: Научно-технические ведомости СПбГПУ + arXive +...

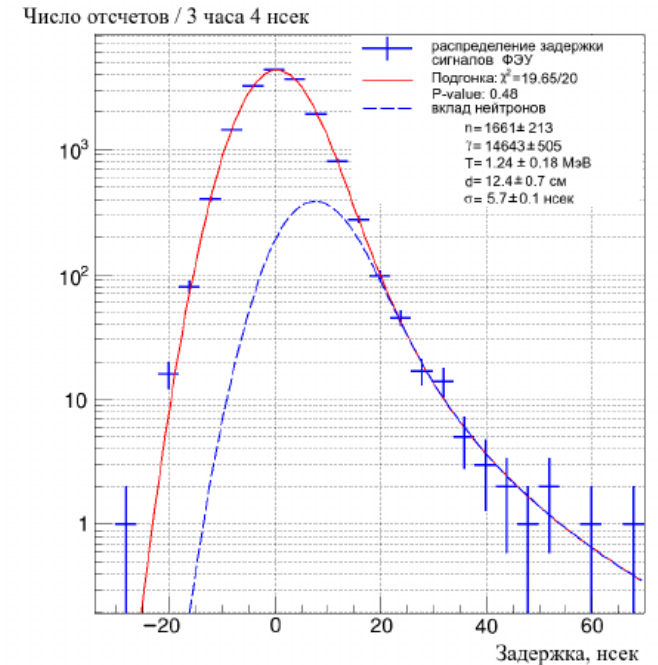
# Демонстрация рабочей модели калибровочного нейтронного источника



- 1) вакуумный колпак с п/п детектором и источником  $^{252}\text{Cf}$
- 2) “калибруемый” детектор нейтронов – РММА сцинтиллятор
- 3) ФЭУ-97
- 4) \* опционально - *BGO-детектор* гамма-излучения

Временное распределение (задержка) сигнала ФЭУ относительно момента регистрации ОД п/п детектором: верно определяем ядерную температуру и характерные размеры установки.

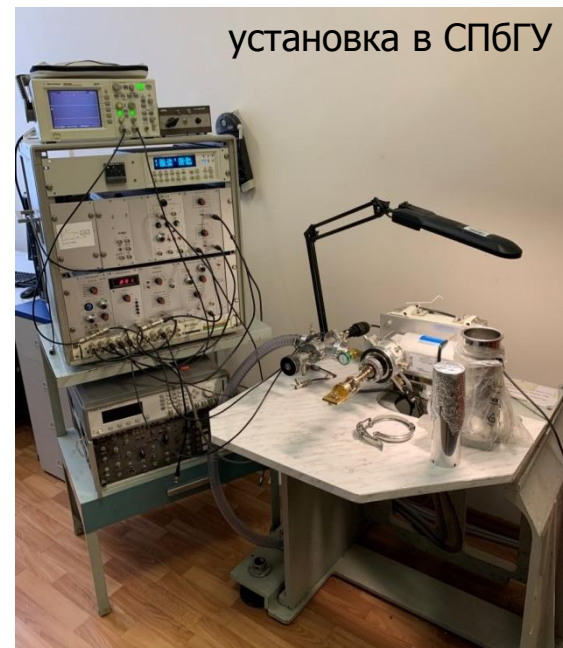
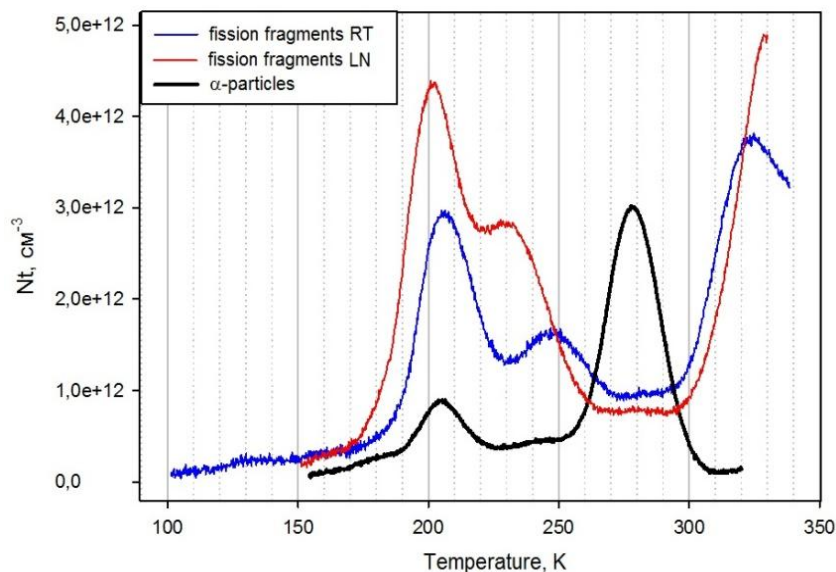
Статья в журнале Ядерная Физика



# Радиационные дефекты в облученных детекторах

метод Нестационарной Спектроскопии Глубоких Уровней (НСГУ) в п/п

- концентрация и параметры уровней в запрещенной зоне п/п, их пространственное распределение



облученные детекторы: уровни  $V_2$ ,  $C_i$ ,  $?$ ,  $V_2O$ , **ПС**

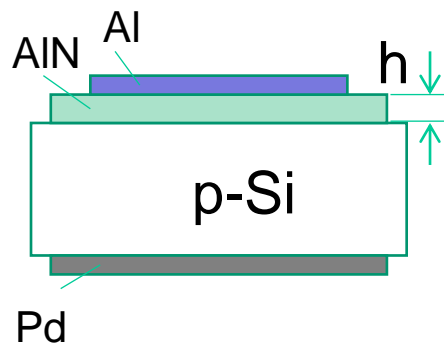
Ведутся работы по созданию НСГУ спектрометра для ПИЯФ:

+ электронные блоки, криостат, АЦП

- софт

# Радиационно-стойкие детекторы для $n$ источника

- пассивирующие покрытия для детекторов: аморфный Si и нитрид алюминия AlN



установка для напыления слоев аморфного Si (ПИАФ)



установка для напыления слоев AlN (СПБГУ)

# Планы работ на 2023-... г.: $\beta$ -спектрометр осколков деления

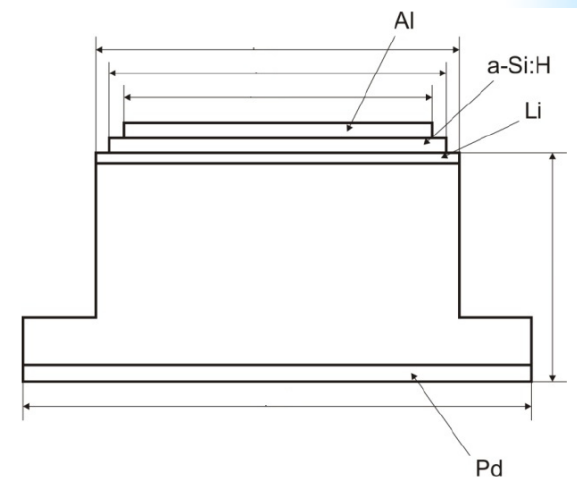
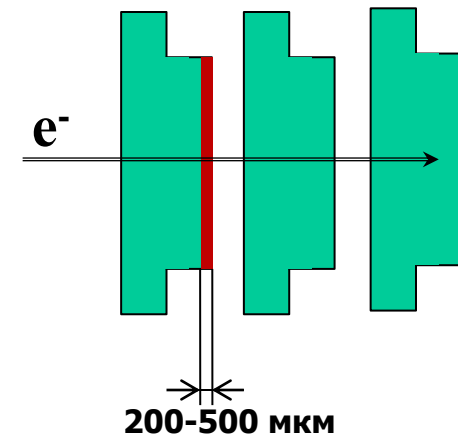
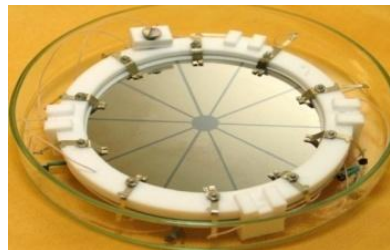
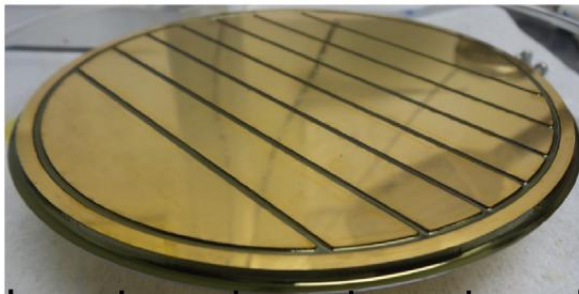
$E_{e^-}$  до 10 МэВ  $\Rightarrow$   $d_{10\text{MeV}}$  до 3 см в Si  $\Rightarrow$  сборка из 3х SiLi детекторов

SiLi детекторы

- + толщина активной области до 1 см
- толстое входное окно  $\sim$  100 мкм.  
Но знаем как уменьшить.

Желаемый размер детектора -  $\varnothing$  10 см

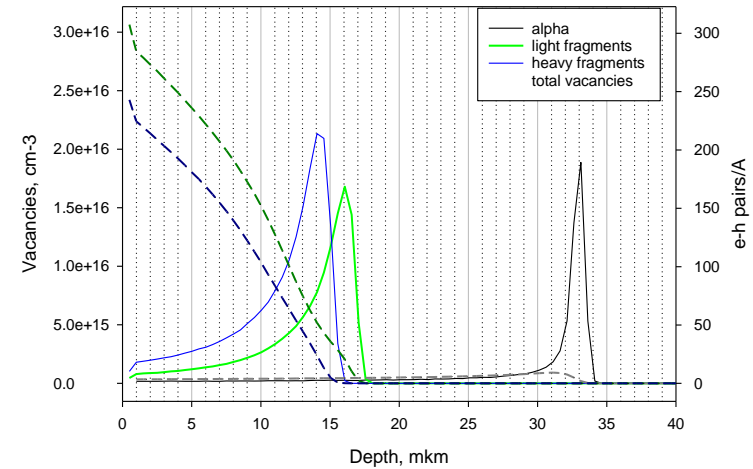
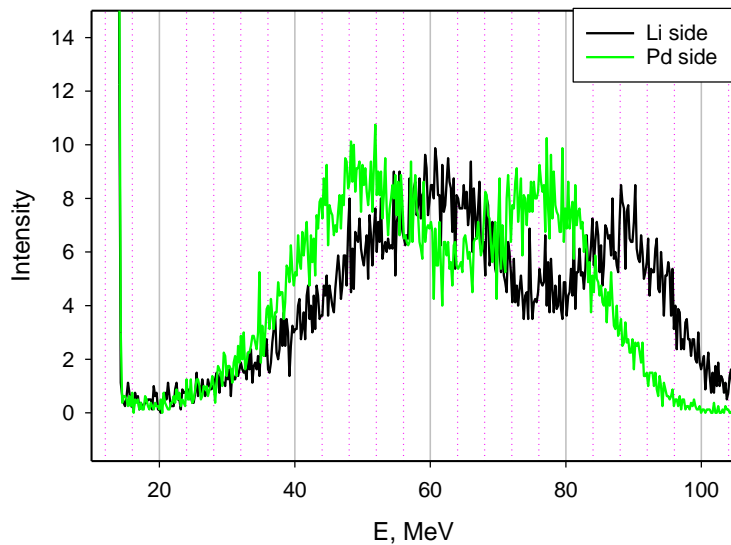
- большая емкость детектора  $\Rightarrow$  требуется секционирование
- слитки Si  $\varnothing$  10 см ???



# SiLi детектор с тонким входным окном

ОД изотопа  $^{252}\text{Cf}$ :

- область генерации  $e^-h^+$  пар 0-15 мкм

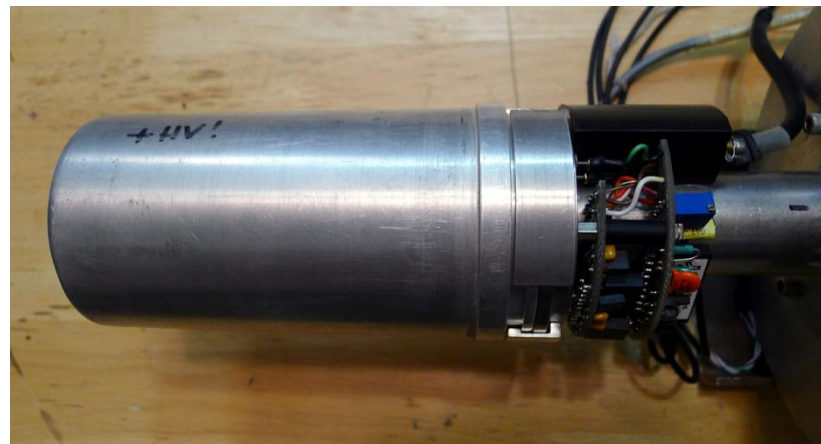


Двусторонний SiLi детектор с ультратонкими входными окнами со стороны Li и Pd:

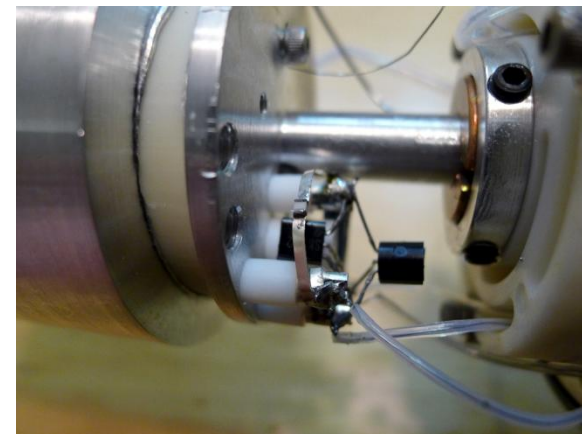
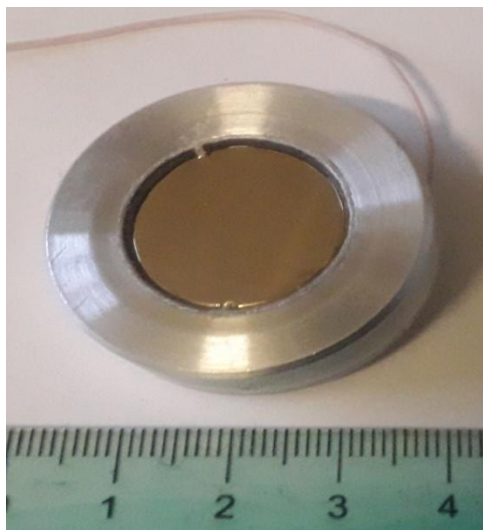
- спектр ОД четко различим
- окно со стороны Li < окно со стороны Pd

# Обслуживание и ремонт Ge- и Si- детекторов

**ORTEC GEM10P4** для СПбГУ, РИАН



**ПБ** для ПИЯФ



***Спасибо за внимание!***