Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

Лаб. низкофоновых измерений

1) А.В. Дербин внс, дфмн,

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

В отделе - 29 (8х0.5) чел. 1 дфмн; 7 кфмн; внс – 2; снс – 4; нс – 4; мнс – 0;асп. - 1; вед.инж.-11; инж.-2; рег. ап. -1; сл.мех.-1; студ. совм. – 3; (Σ13 нс) Гр. физики и технологии ППД 1) А.Х. Хусаинов внс, кфмн 2) А.А. Афанасьев вед. инж.-эл 3) М.П. Жуков вед. инж.-эл 4) Н.Т. Кислицкий вед. инж.-эл 5) Л.В. Силантьева вед. инж.-эл 6) П.И. Трофимов вед. инж.-эл 7) Г.Э. Иващенко вед. инж.-тех. 8) Е.В. Федоров вед. инж.-тех. 9) Т.А. Филиппова инж. 10) Е.А. Чмель вед. инж.-тех.

Гр. радиохимии 1) И.С. Ломская, 6 курс ТУ 2) В.М. Тюнис вед. инж.

Конст. – технологический уч.

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

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов **Лаборатория низкофоновых измерений**



Состав (14 (6х0.5) чел.):

А.В. Дербин внс, дфмн, С.В. Бахланов вед. инж. В.Н. Муратова, снс, кфмн Д.А. Семенов, нс, кфмн И.М. Котина снс, кфмн О.И. Коньков, снс, кфмн И.С. Драчнев, нс, PhD М.В. Трушин, снс, кфмн Н.В. Базлов, нс Е.В. Унжаков, нс Н. Пилипенко, аспирантка ПИЯФ И.П. Филиппов, 5 курс СПбГУ И.С. Ломская, 6 курс ТУ А.М. Кузьмичев, 3 курс АУ Зст+1асп+0мнс+4нс+4снс+1внс+ви 1 д.ф.м.н. и 6 к.ф.м.н.



Отдел и Лаборатория в 2019 году

Работы проводились по 4 основным направлениям: 1) Нейтрино,

(эксперимент **Borexino** – солнечные и гео-нейтрино, измерение бета-спектров ¹⁴⁴**Се-**¹⁴⁴**Рг** и ²¹⁰**Ві**)

2) Темная материя

(эксперименты по поиску аксионов (ПИЯФ, Баксан, IAXO, Гран Сассо, MPI) и

эксперименты по поиску WIMPs (DarkSide-50, 20k, DEAP)

3) Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами

(рук. А.Х. Хусаинов)

4) Разработка методов пассивации поверхности кремниевых детекторов. Изучение радиационной стойкости Si(Li)-детекторов

(рук. И.М. Котина)

Содержание доклада (40 мин.)

- 1) Наукометрические показатели
- 2) Нейтрино в 2011- 2019 г.г.

Нейтрино

- 3) Эксперимент Борексино в 2019 году. Новые результаты.
- 4) Одновременный фит pp-, 7Be- и pep-нейтрино Phys.Rev. D
- 5) Модуляция потока мюонов за 10 лет измерений Borexino JCAP
- 6) Поиск нейтрино от астрофизических источников arXiv->Astr.Phys
- 7) Новый анализ сигналов от гео-нейтрино arXiv -> PRD
- 8) Измерения бета-спектров 144Се-144Pr с 4π Si(Li)-спектрометром
- 9) Измерения бета-спектр 210Ві для СПО-нейтрино

Темная материя (WIMPs и аксионы)

- 10) Поиск WIMPs в эксперименте DarkSide. Источник n's 252Cf+Si(Li)
- 11) Поиск солнечных аксионов с помощью Тт-содержащих болометров.
- 12) Поиск поглощения солнечных аксионов ядром 83Kr в БНО ИЯИ РАН
- 13) Физическая программа эксперимента ІАХО
- 14) Планы на 2020 год.
- 15) Итоги работы Отдела (10 мин)

Публикации в 2019 г. (10+13) (+2 РИД)

10 публикаций в реферируемых журналах

1. M. Agostini et al., (Borexino Coll.) Simultaneous precision spectroscopy of pp, 7Be, and pep solar neutrinos with Borexino Phase-II, Physical Review D 100, 082004 (2019)

2. А.Х. Хусаинов, А.В. Дербин, В.А. Соловей, В.Н. Муратова, В.Г. Муратов, С.В. Бахланов, М.П. Жуков, Т.А. Антонова, В.В. Лысенко, Анализатор рентгеновского и γ-излучения «Радиант» на основе CdTe-p–i–nдетекторов, Приборы и Техника Эксперимента 2019, № 2, с. 154–156

3. E. Armengaud et al., (IAXO coll.) Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO), Journal of Cosmology and Astro-particle Physics, JCAP 1906 (2019) 047

4. M. Agostini et al., (Borexino Coll.) Modulations of the cosmic muon signal in ten years of Borexino data, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics JCAP 02 (2019) 046

5. S. Sanfilippo et al., (DarkSide Coll.), DarkSide status and prospects, Nuovo Cimento 42 C (2019) 79

6. 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 альфа-частиц, Приборы и Техника Эксперимента 2020, № 1.

7. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino, Phys. Rev. D, arXiv:1909.02257 (принято в Phys. Rev. D)

8. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Search for low-energy neutrinos from astrophysical sources with Borexino, направлено в Astroparticle Physics, arXiv:1909.02422

9. 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)

10. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Measurement of the ion fraction and mobility of 218Po produced in 222Rn decays in liquid argon, Journal of Instrumentation, v. 14, P11018 (2019)

1. А.В. Дербин, В.Н. Муратова, Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2018665272 «Специализированное программное обеспечение для определения интенсивности слабых гамма-пиков на большом фоне.»

2. А.В. Дербин, В.Н. Муратова, Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2018665295 «Программное обеспечение для визуализации и предварительной обработки данных, полученных от многоканального анализатора»

Публикации 2019 г. (10+13) (+2 РИД)

13 публикаций в arXive и в Proceedings

1. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Pilipenko, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Monte-Carlo sensitivity study for sterile neutrino search with 144Ce - 144Pr source and liquid scintillation detectors of various geometries arXiv:1905.06670

2. A. Pocar et al., (Borexino Coll.) Solar Neutrino Measurements, arXiv:1812.02326

3. I. Drachnev et al., (Borexino coll.) Review on Solar Neutrino Studies Borexino, Proceedings 18-th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics : Particle Physics at the Silver Jubilee of Lomonosov Conferences, pp. 27-31 (2019)

4. E. Bertoldo, A. Derbin et al. A Test of Bolometric Properties of Tm-containing Crystals as a Perspective Detector for the Solar Axion Search arXiv:1905.12952

5. L. Miramonti et al., (Borexino Coll.) Recent results on pp-chain solar neutrinos with the Borexino detector, arXiv:1901.09965

6. A. Vishneva et al., (Borexino coll.), Limit on the effective magnetic moment of solar neutrinos using Borexino data Proceedings 5th International Solar Neutrino Conference : Dresden, Germany, June 11-14, 2018

7. M. Wurm et al., (Borexino coll.) Solar neutrino spectroscopy in Borexino Proceedings, 5th International Solar Neutrino Conference : Dresden, Germany, June 11-14, 2018

8. D. Guffanti et al., (Borexino coll.) Perspectives for CNO neutrino detection in Borexino Proceedings, 5th International Solar Neutrino Conference : Dresden, Germany, June 11-14, 2018

9. S.K. Agarwalla et al., (Borexino coll.) Constraints on Non-Standard Neutrino Interactions from Borexino Phase-II, arXiv:1905.03512

10. E. Armengaud et al., (IAXO coll.) Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO), arXiv:1904.09155

11. P. Agnes et al., (DarkSide Coll.), Measurement of the ion fraction and mobility of 218Po produced in 222Rn decays in liquid argon, arXiv:1907.09332v1

12. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino, arXiv:1909.02257

13. M. Agostini et al., (Borexino Coll.), Search for low-energy neutrinos from astrophysical sources with Borexino, arXiv:1909.02422

Доклады на конференциях и семинарах в 2019 г.

16 докладов (7 чел) и выступлений на конференциях и семинарах

1. А.В. Дербин, Отчет о работе Отдела п/п ядерных детекторов в 2018 году, Отчетная сессия Отделения нейтронных исследований, январь 2019, устный.

2. А.В. Дербин, И.С. Драчнев, И.С. Ломская, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков, Поиск нейтрино с массой (0.01–1.0) МэВ в бета-распадах ядер 144Се-144Рг, Зимняя Школа ФКС-2018, Сестрорецк, Санкт-Петербург, 11 - 16 марта 2019 г. устный

3. S.V. Bakhlanov A.V. Derbin I.S. Drachnev, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, A Search for Solar Axions via the Resonant Absorption by Atomic Nuclei, The 15th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Freiburg, Germany, June 3-7, 2019.

4. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Pilipenko, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Search for low-energy Borexino signal in correlation with GRB, Borexino General Meeting, Gran Sasso, Italy, 26-28 июнь, 2019

5. A. Derbin, I. Drachnev, I. Kotina, I. Lomskaya, V. Muratova, N. Niyazova, D. Semenov, E. Unzhakov. Precision measuring of 210Bi beta spectrum, Borexino General Meeting, Gran Sasso, Italy, 26-28 июнь, 2019

6. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, A search for low-energy neutrinos correlated with Gravitational wave events from runs 01/02 and solar flares with the Borexino detector, Borexino General Meeting, Gran Sasso, Italy, 26-28 июнь, 2019

7. A.V. Derbin, I.S. Drachnev. 144Ce -144Pr beta-spectra measurement and MC study of sterile neutrino search with an LS detector, Совещание по совместным проектам в области нейтринной физики, проводимым в лабораториях БНО ИЯИ РАН и ГранСассо, Москва, 3-4 окт, 2019 8. Н.В. Ниязова «Прецизионное измерение бета-спектра 210Ві для определения потока CNO-нейтрино в эксперименте Borexino», форум Open Science 2019, Гатчина, 13-15 ноября, 2019

9. Е.В. Унжаков «Поиск солнечных аксионов с помощью резонансного поглощения ядрами 169Tm», форум Open Science 2019, Гатчина, 13-15 ноября, 2019

10. И.С. Драчнев за коллаборацию Borexino, Поиск низкоэнергетических нейтрино от астрофизических источников при помощи детектора Borexino, форум Open Science 2019, Гатчина, 13-15 ноября, 2019

11. А.В. Дербин, И.С. Драчнев, И.С.Ломская, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков, Исследование различных геометрий жидкого сцинтилляционного детектора для поиска стерильного нейтрино от источника 144Се — 144Ргметодом Монте-Карло, форум Open Science 2019, Гатчина, 13-15 ноября, 2019

12. И.С. Ломская за коллаборацию Борексино, Поиск корреляций сигналов детектора Борексино и событий гравитационных волн и солнечных вспышек, форум Open Science 2019, Гатчина, 13-15 ноября, 2019

13. A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, New limits on low-energy neutrinos flux correlated with Gravitational wave events from recent data O3 run of LIGO / VIRGO, Borexino General Meeting, Milan, Italy, 10-13 December, 2019

14. A. Derbin, I. Drachnev, I. Kotina, I. Lomskaya, V. Muratova, N. Niyazova, D. Semenov, E. Unzhakov. Precision measuring of 210Bi beta spectrum using 4π -spectrometer, Borexino General Meeting, Milan, Italy, 10-13 December, 2019

15. I. Alexeev, S. Bakhlanov, A. Derbin, I. Drachnev, I. Kotina, I. Lomskaya, V. Muratova, N. Niyazova, D. Semenov, E. Unzhakov, Measurement of 144Ce - 144Pr beta-spectra in order to determine the spectrum of electron antineutrinos and search for heavy neutrino with mass of 0.01–1.0 MeV, NuPhys2019: Prospects in Neutrino Physics, London, 16-18 December, 2019

16. 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, Международная конференция ФизикА. С. Петербург, Октябрь, 22-24, 2019, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Диссертации, аспирантура, магистратура

Давно подготовлена 1 кандидатская диссертация «Поиск солнечных аксионов с помощью резонансного поглощения ядрами 169Tm и 83Kr» (Е.В. Унжаков, 202?) Аспирантура ПИЯФ -> к.ф.м.н. «Изучение бета-спектров источника электронных антинейтрино 144Ce-144Pr с помощью полупроводниковых детекторов для поиска осцилляций нейтрино в стерильное состояние.» (Н.Пилипенко, с 2017 г., рук. А.В. Дербин) Магистратура ТУ (2019) -> Аспирантура ПИЯФ (2020) «Возможности поиска стерильного нейтрино с источником 144Се-144Pr и жидкими сцинтилляционными детекторами» (И.Ломская, 2019, рук. И.С. Драчнев) Бакалавриат СПбГУ (2019) «Нейтронный источник для калибровки детектора темной материи DarkSide 20k: изучение радиационной стойкости Si(Li)-детекторов» (Г.Изегов, 2019, рук. А.В. Дербин) -Бакалавриат АУ им. Ж.И. Алферова (2019) «Изучение радиационной стойкости Si(Li)-детекторов» (А.Кузьмичев, 3-й курс, 2019, рук. Е.В. Унжаков)

3 РФФИ и 1 РНФ в 2019 г.

6 грантов: РФФИ (3 рук.+1 исп.) и РНФ (1 рук.+1 исп.) 1. Грант РФФИ А 19-02-00097 Регистрация СОО нейтрино: прецизионное измерение формы бета-спектра ядра 210Ві. руководитель Дербин Александр Владимирович НИЦ КИ ПИЯФ 2. Грант РНФ 17-12-01009 Поиск осцилляций нейтрино на коротких расстояниях с детектором Борексино и искусственными источниками (анти)нейтрино. руководитель Дербин Александр Владимирович НИЦ КИ ПИЯФ 3. Грант РФФИ А 17-02-00305 Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов атомными ядрами. руководитель Муратова Валентина Николаевна НИЦ КИ ПИЯФ 4. Грант РФФИ 02 офи-м 16-29-13014 Применение детектора Borexino для исследования Солнца, Земли и других и явлений с астрофизических объектов использованием методов нейтринной спектрометрии руководитель Дербин Александр Владимирович НИЦ КИ ПИЯФ 5. Грант РНФ № 16-12-10369 Исследование природы темной материи: прямой поисковый эксперимент и разработка аргонового детектора нового поколения. Руководитель Скорохватов Михаил Дмитриевич НИЦ КИ (продолжение) от ОПЯД – исполнители 6. Грант РФФИ 02 офи-м16-29-13011 Разработка детектора с высокой чувствительностью для поиска солнечных адронных аксионов руководитель Гангапшев Альберт Мусаевич ИЯИ РАН от ОПЯД – исполнители 7. Поданы заявки на 2020 г. в РНФ (А.В. Дербин) и в РФФИ А (В.Н. Муратова)

2011 – год нейтрино

Март: стерильное нейтрино

новые вычисления спектра реакторных нейтрино R_{набл} / R_{пред} = 0.943±0.023 реакторная аномалия

Июль: θ_{13} отличен от нуля T2K (Tokai to Kamioka) эксперимент $0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$ at 90% C.L. Сентябрь: – сверхсветовые нейтрино CerN GranSasso OPERA $v-c/c = (2.48 \pm 0.58) \times 10^{-5}$ Апрель: LMA решение для нейтрино $A_{dn} = 0.001 \pm 0.012(stat) \pm 0.007 (syst)$ Сентябрь: *рер-нейтрино* (1.6±0.3)10⁸ ст⁻²s⁻¹ Borexino, **Декабрь:** θ_{13} Double Chooz 0.015< sin²2θ₁₃ <0.16 at 90% C.L.

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



T2K coll., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 041804 0.03(0.04) $< \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$ MINOS coll., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 181892 0.01 $< 2\sin^2 2\theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} < 0.088$ Double Chooze coll., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 131801 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{syst}).$ Daya Bay coll., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 171803 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{syst.})$ $\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \pm 0.005 \ \delta m_{ee}^2 = (2.44 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (2014) RENO coll., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 191802 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.113 \pm 0.013(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst})$

 $-1.8 \times 10^{-6} < (v - c)/c < 2.3 \times 10^{-6}$ LVD coll. PRL 109, 070801 (2012) Borexino coll. arXiv:1207.6860 ICARUS coll. arXiv:1208.2629 OPERA coll. arXiv:1212.1276



2013 – год открытия астрофизических нейтрино



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

2014 – регистрация солнечных рр-нейтрино

NATURE

«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2014»

ARTICLE

doi:10.1038/nature1370/

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

Borexino Collaboration*

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

Neutrinos spotted from Sun's main nuclear reaction

Aug 27, 2014 <u>9 comments</u>



Solace for solar physicists: Borexino results back theor

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

"It's terrific," says <u>Wick Haxton</u> of the University of California, Berkeley, a solar-neutrino expert who was not involved in the experiment. "It's been a long, long, long time coming." Each second, the Sun converts 600 million tonnes of hydrogen into helium, and 99% of the energy generated arises from the so-called proton–proton chain. And 99.76% of the time, this chain starts when two protons form deuterium (hydrogen-2) by coming close enough together that one becomes a neutron, emitting a positron and a low-energy neutrino. It is this low-energy neutrino that physicists have now detected. Once this reaction occurs, two more quickly follow: a proton converts the newly minted deuterium into helium-3, which in most cases joins another helium-3 nucleus to yield helium-4 and two protons.

2015 – нобелевская S-К и SNO



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

2016 – регистрация гравитационных волн ВН-ВН





5.1 *о*. На расстоянии 410 МПс (*z* = 0.09) слияние двух черных дыр с массами 36 М⊙ и 29 М⊙ с образованием 62 М⊙ и 3.0 М⊙с2 излучилось в виде гравитационных волн. .

> GW150914 LVT151012 GW151228 GW170104

Начало применения комплементарных (multi-messenger) методов в астрофизике – электромагнитные, нейтринные и гравитационные сигналы из Вселенной могут регистрировать детекторы фотонов, нейтрино и гравитационных волн. В 2019 закончены О1 и О2. Начат ран О3, более 30 событий ВН-ВН, ВН-NS, NS-NS.

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



На расстоянии 40 МПс слияние двух нейтронных звезд с m1=(1.36–2.26)М и m2=(0.86– 1.36)М и с излучением энергии >0.025М. Реальное начало применения комплементарных методов в астрофизике – зарегистрированы гравитационные сигналы (LIGO и VIRGO) и электромагнитные Fermi и Integral γ-ray Monitor гамма (GRB 170817A) с задержкой 1.7 с. Инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения зарегистрированы в различных временных интервалах. По расчетам слияние нейтронных звезд является более мощным источником (относительно) нейтрино, пока не зарегистрировано.

2018 - Источником высокоэнергетических нейтрино является блазар TXS 0506



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

2019 г. -(θ₂₃<>45°); (δ_{CP} <> 0,±π); T2K @ NOvA



NOvA - максимальное смешивание Θ_{23} исключено на уровне 2.6 с. **T2K** - мюонные нейтрино переходят в электронные нейтрино с большей вероятностью, чем ожидалось (32 vs 24), а мюонные анти-v в электронные анти-v — с меньшей (4 vs 7). СР-нарушение в лептонном секторе может объяснить барионную асимметрию. Предпочтительнее мах СР-нарушение. Значения $\delta_{CP}=0$ (2 π) исключаются на 96% у.д.

2019 г. Первый результат KATRIN: m, < 1.1 эВ (90% у.д.)



Новые результаты Борексино (2019 г.)

2019 год: Совместный фит pp-, 7Ве-, и рер-нейтрино Модуляция потока мюонов за 10 лет измерений Гео-нейтрино, антинейтрино от Солнца, солнечные вспышки, NSI 2018 год Комплексные результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино 2017 год Корреляции грав. волн и сигналов Борексино Временные вариации 7Ве-нейтрино Магнитный момент ν μ_{eff} ≤ 2.8×10⁻¹¹ μ_в 2016 год Корреляции гамма-всплесков и сигналов Борексино Стерильное нейтрино -проект SOX Ce 2015 год -Стабильность электрона 2014 год: рр-нейтрино. гео-нейтрино за 2056 суток Проект SOX Се 2013 год - Тяжелое стерильное нейтрино. 2012 — год Acolar И V. Солнечные аксионь Новые данные по гео нейтрино. Подготовка - стерильное нейтрино SOX Скорость нейтрино. Возможность регистрации рр-Начало Фазы 2 нейтрино, магнитного момента, .. 2010 - год антинейтрино 1. Гео-нейтрино 2011 – год ⁷Ве-, рер-, СNO-у Вариации день-ночь для 7Ве-v 2. Солнечные анти-нейтрино Обнаружены *рер*-нейтрино Поток 7Ве-у <u>измерен с 5% точ.</u> 3. Фоновые анти-нейтрино 4. Переходы в ¹²С с нарушением

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)





Internal PMTs

Stainless Steel Sphere

Non-scintillating buffer

Scintillator

Nylon vessels

Water Tank

Muon PMTs

278 ton liquid scintillator

NIM A600 (2009) 568

25-26 ноября 2019

Сессия Ученого совета ОНИ ПИЯФ

Национальная лаборатория Гран Сассо





Подземная лаборатория Гран-Сассо





Borexino Collaboration



Рабочие группы Вх и вклад ПИЯФ в 2019г.

Входим в состав 6 (из 12) рабочих групп: 1) ⁷Ве-нейтрино, 2) Мюоны и нейтроны, 3) Анти-нейтрино, 4) *pp*-нейтрино, 5) Редкие процессы (председатель) 6) NuSolar (анализ данных по солнечным v)

1. В 2019 году коллаборация Borexino представила подробное описание анализа pp-, ⁷Be- и pep - нейтринного излучения в области 0.19–2.93 МэВ. Результаты опубликованы вначале в "Nature", затем в журнале «Physical Review D» 100, 2019 г.

2. Группа ПИЯФ совместно с группой КИ продолжила поиск корреляций v-событий с гравитационными волнами (GW) и солнечными вспышками (SF). Корреляции искались с сигналами от анти-v и v всех флэйвов. Результаты по SF направлены в Astroparticle Physics.

3. Получены новые данные по антинейтрино. Геонейтрино, антинейтрино от Солнца, новые пределы на магнитный момент и маг. поле Солнца µ×H<6.9×10⁻⁹ B[kG] µ_в

4. Продолжались работы по измерению бета-спектра ¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr с целью определения спектра электронных антинейтрино.

5. Проведены измерения бета-спектра ²¹⁰Ві для определения вклада в фон Borexino при анализе сигналов от СОО-нейтрино.

6. Работа в Гран Сассо – 5 чел./мес. в экспериментах Borexino и DarkSide



Основная задача БОРЕКСИНО -

регистрация упругого рассеяния ⁷Ве-нейтрино на электроне успешно решена, поток ⁷Ве-v измерен с точностью лучше 3%.



Наиболее интенсивный поток pp-нейтрино составляет 6 10¹⁰ v/см²сек, ⁷Be – нейтрино – 5 10⁹, ⁸B-нейтрино - 6 10⁶. Реактор – 10¹³ v/см²сек

Совместный фит pp-, ⁷Ве- и pep-нейтрино

PHYSICAL REVIEW D 100, 082004 (2019)

Simultaneous precision spectroscopy of *pp*, ⁷Be, and *pep* solar neutrinos with Borexino Phase-II

M. Agostini,¹ K. Altenmüller,¹ S. Appel,¹ V. Atroshchenko,² Z. Bagdasarian,³ D. Basilico,⁴ G. Bellini,⁴ J. Benziger,⁵ G. Bonfini,⁶ D. Bravo,^{4,†} B. Caccianiga,⁴ F. Calaprice,⁷ A. Caminata,⁸ L. Cappelli,⁶ S. Caprioli,⁴ M. Carlini,⁶ P. Cavalcante,^{9,‡} F. Cavanna,⁸ A. Chepurnov,¹⁰ K. Choi,¹¹ L. Collica,⁴ D. D'Angelo,⁴ S. Davini,⁸ A. Derbin,¹² X. F. Ding,^{13,6} A. Di Ludovico,⁷ L. Di Noto,⁸ I. Drachnev,¹² K. Fomenko,¹⁴ A. Formozov,^{14,4,10} D. Franco,¹⁵ F. Gabriele,⁶ C. Galbiati,^{7,13} M. Gschwender,¹⁶ C. Ghiano,⁶ M. Giammarchi,⁴ A. Goretti,^{7,‡} M. Gromov,^{10,14} D. Guffanti,^{13,6} T. Houdy,¹⁵ E. Hungerford,¹⁷ Aldo Ianni,⁶ Andrea Ianni,⁷ A. Jany,¹⁸ D. Jeschke,¹ S. Kumaran,^{3,19} V. Kobychev,²⁰ G. Korga,^{17,§} T. Lachenmaier,¹⁶ M. Laubenstein,⁶ E. Litvinovich,^{2,21} P. Lombardi,⁴ L. Ludhova,^{3,19} G. Lukyanchenko,² L. Lukyanchenko,² I. Marchulin,^{2,21} G. Manuzio,⁸ S. Marcocci,^{13,||} J. Martici,¹¹ J. Martyn,²² E. Meroni,⁴ M. Meyer,²³ L. Miramonti,⁴ M. Misiaszek,¹⁸ V. Muratova,¹² B. Neumair,¹ M. Nieslony,²² L. Oberauer,¹ V. Orekhov,² F. Ortica,²⁴ M. Pallavicini,⁸ L. Papp,¹ Ö. Penek,^{3,19} L. Pietrofaccia,⁷ N. Pilipenko,¹² A. Pocar,²⁵ A. Porcelli,²² G. Raikov,² G. Ranucci,⁴ A. Razeto,⁶ A. Re,⁴ M. Redchuk,^{3,19} A. Romani,²⁴ N. Rossi,^{6,†} S. Rottenanger,¹⁶ S. Schönert,¹ D. Semenov,¹² M. Skorokhvatov,^{2,21} O. Smirnov,¹⁴ A. Sotnikov,¹⁴ L. F. F. Stokes,⁶ Y. Suvorov,^{6,2,**} R. Tartaglia,⁶ G. Testera,⁸ J. Thurn,²³ E. Unzhakov,¹² F. Villante,^{6,26} A. Vishneva,¹⁴ R. B. Vogelaar,⁹ F. von Feilitzsch,¹ S. Weinz,²² M. Wojcik,¹⁸ M. Wurm,²² O. Zaimidoroga,¹⁴ S. Zavatarelli,⁸ K. Zuber,²³ and G. Zuzel¹⁸

(Borexino Collaboration)*

Впервые выполнена одновременная подгонка всех нейтрино (кроме hep-v) из pp-цепочки в широком энергетическом интервале. До этого подгонки выполнялись отдельно для каждого типа нейтрино.

Совместный фит pp-, ⁷Ве- и рер-нейтрино в интервале (0.19 – 2.9) МэВ

Ученые НИЦ КИ ПИЯФ и НИЦ КИ совместно с участниками международной коллаборации Борексино представили результаты наиболее полного на сегодняшний день анализа нейтринного излучения, сопровождающего термоядерные процессы внутри Солнца. Результаты опубликованы в журналах «Nature» от 24 октября 2018 г. и Physical Review D 100 (2019).



1. Поток ⁷Ве-нейтрино измерен с 2.7 % точностью, превышающей теоретические предсказания.

2. Поток низкоэнергетических и наиболее интенсивных рр-нейтрино измерен с 10.5% точностью

3. Поток ⁸В-нейтрино измерен с рекордно низкого порога 3.0 МэВ

4. Поток рер–нейтрино зарегистрирован на уровне, отличающемся от нуля на 5о 5. Установлен наиболее строгий предел на поток СNO-нейтрино

6. Впервые осцилляционное LMA-решение подтверждено для нейтрино. 7. Впервые получены свидетельства в пользу модели Солнца с высокой металличностью (P(LZ)=0.034)

8. В одном эксперименте определена доля электронных нейтрино (Рее) при раз-личном вкладе вакуумных осцилляций и осцилляций в веществе

Результаты Борексино и предсказания ССМ

Table 2 Borexino ex	perimental solar-neutrino results			
Solar neutrino	Rate (counts per day per 100 t)	Flux (cm ⁻² s ⁻¹)	Flux–SSM predictions (cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	
рр	$134{\pm}10^{+6}_{-10}$	$(6.1{\pm}0.5^{+0.3}_{-0.5}){\times}10^{10}$	$\begin{array}{ll} 5.98(1.0\pm0.006)\times10^{10} & (HZ) \\ 6.03(1.0\pm0.005)\times10^{10} & (LZ) \end{array}$	0.6 Pep Vacuum-LMA
⁷ Be	$48.3{\pm}1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99{\pm}0.11^{+0.06}_{-0.08})\times10^9$	$\begin{array}{ll} 4.93(1.0\pm0.06)\times10^9 & (HZ) \\ 4.50(1.0\pm0.06)\times10^9 & (LZ) \end{array}$	
pep (HZ)	$2.43{\pm}0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27{\pm}0.19^{+0.08}_{-0.12})\times10^8$	$\begin{array}{ll} 1.44(1.0\pm0.01)\times10^8 & (\text{HZ}) \\ 1.46(1.0\pm0.009)\times10^8 & (\text{LZ}) \end{array}$	0.3
pep (LZ)	$2.65{\pm}0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39{\pm}0.19^{+0.08}_{-0.13})\times10^8$	$\begin{array}{ll} 1.44(1.0{\pm}0.01){\times}10^8 & (\text{HZ}) \\ 1.46(1.0{\pm}0.009){\times}10^8 & (\text{LZ}) \end{array}$	0.2 0.2 1 1 10 10 Neutrino energy (MeV)
⁸ B _{HER-I}	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$(5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15})\times10^6$	$\begin{array}{lll} 5.46(1.0\pm0.12)\times10^6 & (\text{HZ}) \\ 4.50(1.0\pm0.12)\times10^6 & (\text{LZ}) \end{array}$	5.5 × 10 ⁹ SSM-HZ
⁸ B _{HFR-II}	0.087 +0.080+0.005 0.005	$(5.56^{+0.52}_{-0.64}{}^{+0.33}_{-0.33})\times10^{6}$	$\begin{array}{ll} 5.46(1.0\pm0.12)\times10^6 & (\text{HZ}) \\ 4.50(1.0\pm0.12)\times10^6 & (\text{LZ}) \end{array}$	€ 5.0 × 10 ⁹ GLOBAL
⁸ B _{HER}	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$(5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03})\times 10^{6}$	$\begin{array}{ll} 5.46(1.0\pm0.12)\times10^6 & (\text{HZ}) \\ 4.50(1.0\pm0.12)\times10^6 & (\text{LZ}) \end{array}$	Borexino $\frac{1}{9}^{\text{B}}$ 4.5 × 10 ⁹
CNO	<8.1 (95% C.L.)	<7.9×10 ⁸ (95% C.L.)	$\begin{array}{ll} 4.88(1.0\pm0.11)\times10^8 & (\text{HZ}) \\ 3.51(1.0\pm0.10)\times10^8 & (\text{LZ}) \end{array}$	4.0 × 10 ⁹ SSM-LZ
hep	<0.002 (90% C.L.)	<2.2×10 ⁵ (90% C.L.)	$\begin{array}{ll} 7.98(1.0\pm0.30)\times10^3 & (HZ) \\ 8.25(1.0\pm0.12)\times10^3 & (LZ) \end{array}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

Solar ν	Borexino experimental results		B16(GS98)-HZ		B16(AGSS09)-LZ	
	Rate [cpd/100 ton]	Flux [cm ⁻² s ⁻¹]	Rate [cpd/100 ton]	Flux $[cm^{-2} s^{-1}]$	Rate [cpd/100 ton]	Flux [cm ⁻² s ⁻¹]
рр	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1\pm0.5^{+0.3}_{-0.5}) imes10^{10}$	131.1 ± 1.4	$5.98(1\pm0.006)\times10^{10}$	132.2 ± 1.4	$6.03(1\pm0.005)\times10^{10}$
⁷ Be	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99\pm0.11^{+0.06}_{-0.08})\times10^9$	47.9 ± 2.8	$4.93(1\pm 0.06)\times 10^9$	43.7 ± 2.5	$4.50(1\pm 0.06)\times 10^{9}$
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36 \substack{+0.15 \\ -0.22}$	$(1.27\pm0.19^{+0.08}_{-0.12})\times10^8$	2.74 ± 0.04	$1.44(1\pm 0.009)\times 10^{8}$	2.78 ± 0.04	$1.46(1\pm 0.009)\times 10^{8}$
pep (LZ)	$2.65\pm0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39\pm0.19\substack{+0.08\\-0.13})\times10^8$	2.74 ± 0.04	$1.44(1\pm 0.009)\times 10^{8}$	2.78 ± 0.04	$1.46(1\pm 0.009)\times 10^{8}$
CNO	<8.1(95% C.L.)	${<}7.9\times10^8(95\%C.L.)$	4.92 ± 0.55	$4.88(1\pm 0.11)\times 10^8$	3.52 ± 0.37	$3.51(1\pm 0.10)\times 10^{8}$

25-26 ноября 2019

Сессия Ученого совета ОНИ ПИЯФ

Borexino: модуляции потока мюонов за 10 лет

J. of Cosmology and Astroparticle Physics, 02 (2019) 046



В результате 10-летних измерений в период 2007-2017 г.г. определен поток мюонов в лаборатории Гран Сассо на глубине 3800 м.в.э, который равен (3.432 \pm 0.003) 10⁻⁴ м⁻² с⁻¹. Сезонная вариация потока мюонов имеет период (366.3 \pm 0.6) сут и амплитуду (1.36 \pm 0.04) %. Фаза равна (181.7 \pm 0.4) сут., что соответствует максимуму 1-го июля. Определенный эффективный температурный коэффициент составил 0.90 \pm 0.02. Все данные находятся в согласии с результатами предыдущих измерений детекторов МАСRO, LVD, GERDA и BOREXINO-I. Обнаружена модуляция с периодом 3000

3000-суточная модуляция потока мюонов



Другая временная вариация потока мюонов имеет период **(3010 ± 299) сут = (8.25 ± 0.82) г** и амплитуду **(0.34 ± 0.04) %.** Фаза равна **(1993 ± 271)** сут., что соответствует максимуму в июне 2012 г. Периоды, близкие к солнечному циклу, наблюдались в эксперименте DAMA и при совместном анализе MACRO, LVD и Bx1. Важно, что в периодограмме Ламба-Скрагла для потока мюонов пик при 3000 сут. наблюдается, а в изменениях эффективной температуры его нет. Корреляция с солнечной активностью требует проверки возможной корреляции с солнечными вспышками.

Поиск временных корреляций сигналов детектора Borexino с солнечными вспышками

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 положительным результатами CI-Ar эксперимента, в частности, избытк событий в серии 117, в течении которой наблюдалась CB класса 12X.

Сотрудники ОПЯД ОНИ ПИЯФ и НИЦ КИ провели анализ сигналов детектора Borexino с энергией более 0.25 (1.0) МэВ в течении 472-х СВ класса М и Х, случившихся в период 2009-2017 г.г. Установлены наиболее строгие ограничения на флюенсы нейтрино и антинейтрино с энергией (0.5-5.0) МэВ всех флэйвов (v_e, v_µ, v₇), связанные с СВ. Исключено нейтринное объяснение положительного результата CI-Ar детектора. Результаты направлены в Astroparticle Physics.



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 (v_e, v_u, v_r), в сравнении с ограничениями SNO и областью значений для положительного результата *CI-Ar* детектора.

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



Группой ПИЯФ предложен и проводится анализ сигналов детектора Borexino с энергией более ~250 кэВ во временном окне \pm ~500 (1500) сек относительно времени регистрации гравитационных волн. Найденные кандидаты реакции (v,e)-рассеяния с учетом событий от солнечных нейтрино и природного фона позволяют выделить вклад от нейтрино, связанных с ГВ, или установить ограничения на флюенсы нейтрино всех флэйвов (v_e, v_µ, v_γ).

Нестандартные взаимодействия нейтрино

Рассеяние нейтрино на электроне в СМ описывается:

$$\mathcal{L}_{\rm SM} = -2\sqrt{2}G_F(\overline{\nu}_{\alpha}\gamma^{\mu}P_L\nu_{\alpha})\left[g_R(\overline{e}\gamma_{\mu}P_Re) + g_L(\overline{e}\gamma_{\mu}P_Le)\right]$$

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

$$\mathcal{L}_{\rm NS} = -2\sqrt{2}G_F(\overline{\nu}_{\alpha}\gamma^{\mu}P_L\nu_{\alpha})\left[\varepsilon_{\alpha R}(\overline{e}\gamma_{\mu}P_Re) + \varepsilon_{\alpha L}(\overline{e}\gamma_{\mu}P_Le)\right]$$

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

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

Более общий случай с изменением флэйва:

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

L

C=L, R, P_C=(1±
$$\gamma$$
5)/2, α , β = ve, v μ , v τ , f =e, u, d
 $\varepsilon_{\alpha L} \equiv \varepsilon_{\alpha \alpha}^{eeL}$, $\varepsilon_{\alpha R} \equiv \varepsilon_{\alpha \alpha}^{eeR}$, $\alpha = e \text{ or } \tau$

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



Измерения бета-спектров ¹⁴⁴Се-¹⁴⁴Рг для определения спектра электронных антинейтрино



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



arXiv:1905.06670v1 16 May 2019

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

Измерения бета-спектров ¹⁴⁴Се-¹⁴⁴Pr с целью определения спектра электронных антинейтрино для поиска стерильных нейтрино

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





А - схема спектрометра; В – фото центральной части; С - спектр электронов ²⁰⁷Ві. Разрешение для 480 кэВ электронов ПШПВ=1.8 кэВ ; D - спектр источника ¹⁴⁴Се-¹⁴⁴Pr.

25-26 ноября 2019

Опубликовано Journat a OPMySids, ФагХіv, принято NIM A, ПТЭ 38

4π бета спектрометр с Si(Li)-детекторами



Создана новая схема регистрации событий, основанная на последовательной записи событий с двух Si(Li)-детекторов и BGO(Nal)-детектора с использованием новой электроники в стандартеVME/VXI(CAEN). Проведены измерения бета-спектров 144Се-144Рпродолжительностью 2 месяца. В схему регистрации включен 3" BGO-детектор с целью выделения распадов ядер 144Се-144Рг на возбужденные уровни дочерних ядер.

Результаты с 4π β-спектрометра + BGO



4-рі спектрометр с функцией отклика близкой к Гауссовой практически решает проблему нейтринного спектра для **Ee > 320 keV, Ev = 3 MeV - Ee**. Конечно, **1%** BRs для переходов на возбужденные состояния должны быть учтены. Для определения ниже 320 keV необходимо вычислить поправки и определить формфакторы для¹⁴⁴Pr и ¹⁴⁴Ce.

Измерение β-спектра ²¹⁰Ві – важно для СNO-ν



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

Измерение а-, β-, и γ- спектров ²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi и ²¹⁰Po



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

Подгонка бета спектра 210Ві



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

Планы коллаборации Борексино и новые задачи

1. Измерение (обнаружение) СNО – нейтрино (²¹⁰Ві,ПИЯФ) 2. Заключительные данные по нейтрино и гео-нейтрино, анти-нейтрино от Солнца, нарушению ПП, аксионам, корреляции с у-всплесками, гравитационными волнами, солнечными вспышками,



временные вариациям и другим редким процессам.

4. Поиск двойного бета-распада с Борексино (¹³⁰Xe, ¹⁵⁰Nd)

5. DARWIN -DARk matter WImp search with liquid xenoN

Поиск частиц темной материи в 2019

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

2. Поиск солнечных и реликтовых аксионов (N2)

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

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

2.3 Участие в коллаборации IAXO – International Axion Observatory. Этап baby-IAXO. (Новый проект TASTE – Troitsk Axion Solar Telescope Experiment, пока не поддержан)

DarkSide collaboration

PHYSICAL REVIEW LETTERS **121.** 081307 (2018)

Editors' Suagestic

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

P. Agnes,¹ I. F.M. Albuquerque,² T. Alexander,³ A. K. Alton,⁴ G. R. Araujo,² D. M. Asner,⁵ M. Ave,² H. O. Back,³ B. Baldin,⁶⁴ G. Batignani,^{7,8} K. Biery,⁶ V. Bocci,⁹ G. Bonfini,¹⁰ W. Bonivento,¹¹ B. Bottino,^{12,13} F. Budano,^{14,15} S. Busisno,^{14,15} M. Cadedu, ^{16,11} M. Cardoni,^{16,11} F. Calaprice,¹⁷ A. Caminata,¹³ N. Canci,¹¹⁰ A. Candela,¹⁰ M. Caravati,^{16,11} M. Cartiello,¹³ M. Cardini,¹⁰ M. Cardinelli,^{18,19} S. Catalanotti,^{20,21} V. Cataudella,^{20,21} P. Cavateante,^{22,10} S. Cavuoti,^{20,21} R. Cereseto,¹³ A. Chepurnov,²³ C. Cicalò,¹¹ L. Cifarelli,^{14,25} A. G. Cocco,²¹ G. Covone,^{20,31} D. D'Angelo,^{29,27} M. D'Incecco,¹⁰ D. D'Urso,^{18,19} S. Davini,¹³ A. De Candia,^{20,21} S. De Cecco,^{9,28} M. De Deo,¹⁰ G. De Filippis,^{20,21} G. De Rosa,^{20,22} M. De Vincenzi,^{14,15} P. Demontis,^{18,19,29} A. V Derbin,¹⁰ A. Devoto,^{16,11} F. Di Eusanio,¹⁷ G. Di Pietro,^{10,27} C. Cionis,^{9,28} M. Do vorti,^{10,41} P. Garcia Abia,³⁶ C. Chiara Ghiano,¹⁰ S. Giagu,^{9,28} C. Giganti,²⁷ G.K. Giovanetti,¹⁷ O. Gorchakov,³⁴ A. M. Goretti,¹⁰ F. Granato,³⁸ M. Gromov,²³ M. Guardinceri,⁶⁴ M. Gulino,^{40,19}
B. R. Hackett,²² M. H. Hassanshahi,¹⁰ K. Hemer,⁶ B. Hosseini,¹¹ D. Hughes,¹⁷ P. Humble's E. V. Hungerford,¹ A. Lanni,¹⁰ G. Kofra,¹¹ D. Krogaa,¹¹⁰ A. Kubankin,⁴³ M. Kuss,⁷ M. La Commara,^{20,21} M. Lai,^{16,11} X. Li,¹⁷ M. Lisani,¹⁷ M. Lisani,¹¹ B. Loer,³ G. G. Longo,^{20,21} Y. Ma,²⁹ A. A. Machado,⁴⁴ I. N. Machulin,^{5,46} A. Mandarano,^{47,10} L. Mapelli,⁷ M. Lisani,¹⁴ B. Loer,³ G. Longo,^{20,21} Y. Ma,²⁹ A. A. Machado,⁴⁴ I. N. Machulin,^{5,46} A. Mandarano,^{47,10} K. Keeter,⁴ C. L. Kendziora,⁶ I. Kochanek,¹⁰ G. Koh,¹⁷ D. Korablev,³⁴ G. Korga,¹¹⁰ A. Legani,⁴⁴ M. Pesino,³⁴ A. Mandarano,^{57,16} P. Jonot,⁴¹ E. Paoloni,^{7,8} M. Garcia,⁴¹ C. J. Martofi,³⁴ A. Megsina,²²⁸ P. D. Meyer,⁴⁷ R. Millincic,³² S. Mishra-Shama,¹⁷ A. Monte,³⁴ M. Morriocci,⁷ G. J. Martofi,³⁴ A. Lagan P. Agnes,¹ I. F. M. Albuquerque,² T. Alexander,³ A. K. Alton,⁴ G. R. Araujo,² D. M. Asner,⁵ M. Ave,² H. O. Back,³

(DarkSide Collaboration)



Двухфазный детектор -2 phases TPC



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

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

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



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



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

Axioelectric effect for Ar atoms – DS50 results



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

25-**26 ноября** 2019 Сессия Ученого совета ОНИ ПИЯФ

DarkSide – 20К (прототип DS Proto 1t)

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

C. E. Aalseth¹, F. Acerbi^{2,3}, P. Agnes⁴, I. F. M. Albuquerque⁵, T. Alexander¹, A. Alici^{6,7,8}, A. K. Alton⁹ P. Antonioli⁷, S. Arcelli^{7,8}, R. Ardito^{10,11}, I. J. Arnquist¹, D. M. Asner¹, M. Ave⁵, H. O. Back¹, A. I. Barrado Olmedo¹², G. Batignani^{13,14}, E. Bertoldo¹⁵, S. Bettarini^{13,14}, M. G. Bisogni^{13,14}, V. Bocci¹⁶, A. Bondar^{17,18}, G. Bonfini¹⁹, W. Bonivento²⁰, M. Bossa^{21,19}, B. Bottino^{22,23}, M. Boulay⁷² R. Bunker¹, S. Bussino^{24,25}, A. Buzulutskov^{17,18}, M. Cadeddu^{26,20}, M. Cadoni^{26,20}, A. Caminata²³ N. Canci^{4,19}, A. Candela¹⁹, C. Cantini²⁷, M. Caravati^{26,20}, M. Cariello²³, M. Carlini¹⁹, M. Carpinelli^{28,29} \sim A. Castellani^{10,11}, S. Catalanotti^{30,31}, V. Cataudella^{30,31}, P. Cavalcante^{19,32}, S. Cavuoti^{30,31}, R. Cereseto²³, A. Castenian¹⁵⁷⁷, S. Catalanotti¹⁵⁷⁷, V. Catandella¹⁵⁷⁷, P. Cavalcante¹⁵⁷⁷, S. Cavlot¹⁵⁷⁷, R. Cereseto¹⁵⁷, A. Chepurnov³³, C. Cicalò²⁰, L. Cifarelli^{6,78}, M. Citterio¹¹, A. G. Cocco³¹, M. Colocci^{7,8}, S. Corgiolu^{36,20}, G. Covone^{30,31}, P. Crivelli²⁷, I. D'Antone⁷, M. D'Incecco¹⁵, D. D'Urso²⁸, M. D. Da Rocha Rolo³⁵, M. Daniel¹², S. Davini^{21,19,23}, A. de Candia^{30,31}, S. De Cecco^{16,43}, M. De Deo¹⁹, G. De Filippis^{30,31}, G. De Guido^{38,11}, G. De Rosa^{30,31}, G. Dellacasa³⁵, M. Della Valle^{39,31}, P. Demontis^{28,29,40}, A. Derbin⁴¹, A. Devoto^{26,20}, F. Di Eusani⁴², G. Di Pietro^{19,11}, C. Dionisi^{16,43}, A. Dolgov¹⁸, I. Dormia^{38,11}, S. Dussoni^{14,13}, A. Empl⁴, M. Fernandez Diaz¹², A. Ferri^{2,3}, C. Filip⁴⁵, G. Fiorillo^{30,31}, K. Fomenko⁴⁶. D. Franco⁴⁷, G. E. Froudakis⁴⁸, F. Gabriele¹⁹, A. Gabrieli^{28,29}, C. Galbiati^{42,11}, P. Garcia Abia¹². ⁷ A. Gendotti²⁷, A. Ghisi^{10,11}, S. Giagu^{16,43}, P. Giampa⁴⁴, G. Gibertoni^{38,11}, C. Giganti³⁷, M. A. Giorgi^{14,13}, ¹ G. K. Giovanetti⁴², M. L. Gligan⁴⁵, A. Gola^{2,3}, O. Gorchakov⁴⁶, A. M. Goretti¹⁹, F. Granato⁴⁹, M. Grassi¹³, J. W. Grate¹, G. Y. Grigoriev⁵⁰, M. Gromov³³, M. Guan⁵¹, M. B. B. Guerra⁵², M. Guerzoni⁷ M. Gulino^{53,29}, R. K. Haaland⁵⁴, A. Hallin⁷³, B. Harrop⁴², E. W. Hoppe¹, S. Horikawa²⁷, B. Hosseini²⁰ ⁽²⁾ D. Hughes⁴², P. Humble¹, E. V. Hungerford⁴, An. Ianni^{42,19}, C. Jillings^{74,75}, T. N. Johnson⁵⁵, K. Keeter⁵² ² C. L. Kendziora⁵⁶, S. Kim⁴⁹, G. Koh⁴², D. Korablev⁴⁶, G. Korga^{4,19}, A. Kubankin⁵⁷, M. Kuss¹³ ²⁰ M. Kuźniak⁷², B. Lehnert⁷², X. Li⁴², M. Lissia²⁰, G. U. Lodi^{38,11}, B. Loer¹, G. Longo^{30,31}, P. Loverre^{16,43} R. Lussana^{58,11}, L. Luzzi^{59,11}, Y. Ma⁵¹, A. A. Machado⁶⁰, I. N. Machulin^{50,61}, A. Mandarano^{21,19}, L. Mapelli⁴², M. Marcante^{62,3,2}, A. Margotti⁷, S. M. Mari^{24,25}, M. Mariani^{59,11}, J. Maricic⁶³ C. J. Martoff⁴⁹, M. Mascia^{36,20}, M. Mayer¹, A. B. McDonald⁷⁶, A. Messina^{16,43}, P. D. Meyers⁴², R. Milincic⁶³, A. Moggi¹³, S. Moioli^{38,11}, J. Monroe⁶⁵, A. Monte⁶⁵, M. Morrocchi^{14,13}, B. J. Mount⁵² W. Mu²⁷, V. N. Muratova⁴¹, S. Murphy²⁷, P. Musico²³, R. Nania^{6,7}, A. Navrer Agasson³⁷, I. Nikulin⁵⁷ V. Nosov^{17,18}, A. O. Nozdrina^{50,61}, N. N. Nurakhov⁵⁰, A. Oleinik⁵⁷, V. Olevnikov^{17,18}, M. Orsini¹⁹ F. Ortica^{66,67}, L. Pagani^{22,23}, M. Pallavicini^{22,23}, S. Palmas^{36,20}, L. Pandola²⁹, E. Pantic⁵⁵, E. Paoloni^{13,14}
 G. Paternoster^{2,3}, V. Pavletcov³³, F. Pazzona^{28,29}, S. Peeters⁷⁷, K. Pelczar¹⁹, L. A. Pellegrini^{38,11}, N. Pelliccia^{66,67}, F. Perotti^{10,11}, R. Perruzza¹⁹, V. Pesudo Fortes¹², C. Piemonte^{2,3}, F. Pilo¹³, A. Pocar⁵⁰ T. Pollmann⁷⁸, D. Portaluppi^{58,11}, D. A. Pugachev⁵⁰, H. Qian⁴², B. Radics²⁷, F. Raffaelli¹³, F. Ragusa^{69,11} M. Razeti²⁰, A. Razeto¹⁹, V. Regazzoni^{62,3,2}, C. Regenfus²⁷, B. Reinhold⁶³, A. L. Renshaw⁴, M. Rescigno¹⁶, F. Retière⁴⁴, Q. Riffard⁴⁷, A. Rivetti³⁵, S. Rizzardini⁴², A. Romani^{66,67}, L. Romero¹², B. Rossi³¹ N. Rossi¹⁹, A. Rubbia²⁷, D. Sablone^{42,19}, P. Salatino^{70,31}, O. Samoylov⁴⁶, E. Sánchez García¹², W. Sands⁴², M. Sant^{28,29}, R. Santorelli¹², C. Savarese^{21,19}, E. Scapparone⁷, B. Schlitzer⁵⁵, G. Scioli^{7,8}, E. Segreto⁶⁰ ^{*} A. Scifert¹, D. A. Semenov⁴¹, A. Shchagin⁵⁷, L. Shchkhtman^{17,18}, E. Shemyakina^{17,18}, A. Shcshukov⁴⁶, M. Simeone^{70,31}, P. N. Singh⁴, P. Skensved⁷⁶, M. D. Skorokhvatov^{50,61}, O. Smirnov⁴⁶, G. Sobrero²³, A. Sokolov^{17,18}, A. Sotnikov⁴⁶, F. Speziale²⁹, R. Stainforth⁷², C. Stanford⁴², G. B. Suffritti^{28,29,40}, Y. Suvorov^{71,19,50}, R. Tartaglia¹², G. Testera²², A. 10nazzo¹¹, A. 10si¹¹, I. 111, K. 111, K Y. Suvorov^{71,19,50}, R. Tartaglia¹⁹, G. Testera²³, A. Tonazzo⁴⁷, A. Tosi^{58,11}, P. Trinchese^{30,31} A. Vishneva⁴⁶ BXOANM^{MBV}FDYHTHU Material's (CPI.MS), Y. Wang^{51,71}, A. W. Watson³⁵ S. Westerdale', R. Williams', M. M. Wojcik⁶⁸, S. Wu', X. Xiang⁴², X. Xiao⁷¹, C. Yang⁵And YS¹⁵ r(A.E.E.); Galibration⁶ (252Cf²+Si((Lif))^{7,8}, W. Wille¹⁶ A. 2019 M. Zullo¹⁶, A. Zullo



Источник ²⁵²Cf +Si(Li) для калибровки DS и др.



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

Аксионы + аксионоподобные частицы ALPs



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

Solar axions spectra vs g_{Ay} , g_{Ae} and g_{AN}



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

Поиск солнечных аксионов, излучаемых в М1-переходе ядра ⁸³Кг (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 μ 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 83Kr-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 ~10⁷ times and evaluated as 2.6 muons m⁻² d⁻¹.

Тт₃АІ₅О₁₂ - болометр



Гранат тулия не сцинтиллирует, необходимо допировать Се или Pr. Главная задача проверить кристалл Tm₃Al₅O₁₂ как болометр. В настоящий момент рассматривается 4 потенциальных места для измерений ГранСассо, Modane, Canfranc, TUM на поверхности Земли

Тт₃АІ₅О₁₂ – болометр ¹⁶⁹Тт+А->¹⁶⁹Тт* (8.4 кэВ)







Кристалл AI3Tm5O12, выращенный в КИ, установлен в криогенную установку и охлажден до 10 мК на установке CRESST MPI. Показано, что кристалл может работать как болометрический детектор. Получен первый фоновый спектр с кристалла с NTD-термистором. Следующий шаг – использование TES-термистора. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 949 (2020) 162924



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

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

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

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

- ^b NRC Kurchatov Institute, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188309 Gatchina, Russia
- ^c INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi, Italy
- ^d Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia
- ^e Queen's University, Physics Department, K7L 3N6 Kingston, Canada
- ^f NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia



NUCLEAR

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

Tm₃Al₅O₁₂ - новый перспективный болометр для поиска солнечных аксионов

Проблема экспериментального обнаружения аксионов и аксионо-подобных частиц продолжает оставаться крайне актуальной, что связано как с тем, что их обнаружение свидетельствовало бы в пользу предложенного решения СР-проблемы сильных взаимодействий, так и с возможностями аксиона составлять всю или существенную часть темной материи.

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 ¹⁶⁹Tm (8.4 кэВ) солнечными аксионами. Исследована радиационная чистота кристалла, его оптические свойства, получен первый спектр болометрического детектора с термистором NTD. Ожидаема чувствительность эксперимента с экспозиций 1 кг х год превысит достигнутую на 4-5 порядков. Результаты опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods, А949, 162924 (2020)



Кристалл Тт₃Al₅O₁₂ внутри медного держателя. Золотые проволочки обеспечивают электрические контакты.



термистором и результаты

подгонки альфа пика ²⁴¹Ат.

кристалле $Tm_3Al_5O_{12}$, охлажденном до T = 10 мК.

Предварительные результаты, полученные с Tm₃Al₅O₁₂

10-4 Новые пределы, из измерений с TES на константы связи аксиона 10⁻⁶ $|g_{Ae}| \times |g_{AN}^3 + g_{AN}^0| \le 8.4 \times 10^{-16} \Longrightarrow |g_{Ae} \times m_A| \le 1.4 \times 10^{-8} \text{ eV}$ $|g_{A_{\gamma}}| \times |g^{3}_{AN} + g^{0}_{AN}| \le 3.3 \times 10^{-14} \Longrightarrow |g_{A_{\gamma}} \times m_{A}| \le 7.0 \times 10^{-8}$ *-00 G Измерения на поверхности Земли, верхний _, } **10**⁻¹⁰ предел на число аксионных событий Slim=128 Пока уступает результатам 83Kr, но $\omega_A / \omega_y <>0$



25-26 ноября 2019

Сессия Ученого совета ОНИ ПИЯФ

5

10

2ь

2a

з

Present

work

6

KSVZ

DESZ

IAXO: International Axion Observatory





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

2019 - IAXO: International AXion Observatory

Ournal of Cosmology and Astroparticle Physics

Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO)

E. Armengaud,^a D. Attié,^a S. Basso,^b P. Brun,^a N. Bykovskiy,^c J.M. Carmona,^d J.F. Castel,^d S. Cebrián,^d M. Cicoli,^{e,f} M. Civitani,^b C. Cogollos,^g J.P. Conlon,^h D. Costa,^g T. Dafni,^d R. Daido,^{*i*} A.V. Derbin,^{*j*} M.A. Descalle.^{*k*} K. Desch.^{*l*} I.S. Dratchnev, ^j B. Döbrich, ^c A. Dudarev, ^c E. Ferrer-Ribas, ^a I. Fleck,^m J. Galán,^d G. Galanti,^b L. Garrido,^g D. Gascon,^g L. Gastaldo,ⁿ C. Germani,^g G. Ghisellini,^b M. Giannotti,^o I. Giomataris,^a S. Gninenko,^p N. Golubev,^p R. Graciani,^g I.G. Irastorza,^{d,1} K. Jakovčić,^q J. Kaminski,¹ M. Krčmar,^q C. Krieger,¹ B. Lakić,^q T. Lasserre,^a P. Laurent,^a O. Limousin,^a A. Lindner,^{*r*} I. Lomskaya,^{*j*} B. Lubsandorzhiev,^{*p*} G. Luzón.^{*d*} M. C. D. Marsh,^s C. Margalejo,^d F. Mescia,^g M. Meyer,^t J. Miralda-Escudé, ^{g,u} H. Mirallas, ^d V.N. Muratova, ^j X.F. Navick, ^a C. Nones,^a A. Notari,^g A. Nozik,^{p,v} A. Ortiz de Solórzano,^d V. Pantuev,^p T. Papaevangelou,^a G. Pareschi,^b K. Perez,^w E. Picatoste,^g M.J. Pivovaroff,^k J. Redondo,^{d,x} A. Ringwald,^r M. Roncadelli,^y E. Ruiz-Chóliz,^d J. Ruz,^k K. Saikawa,^x J. Salvadó,^g M.P. Samperiz,^d T. Schiffer,¹ S. Schmidt,¹ U. Schneekloth,^r M. Schott,^z H. Silva,^c G. Tagliaferri,^b F. Takahashi,^{i,aa} F. Tavecchio,^b H. ten Kate,^c I. Tkachev,^p S. Troitsky,^p E. Unzhakov,^j P. Vedrine,^a J.K. Vogel,^k C. Weinsheimer.^z A. Weltman^{ab} and W. Yin^{ac,ad}



Прототип - babyIAXO





Figure 18. Conceptual design of BabyIAXO.

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

Experiment Proposal to the DESY PRC

BabyIAXO: a first stage of the International Axion Observatory IAXO

E. Armengaud¹, D. Attie¹, S. Basso², P. Brun¹, N. Bykovskiy³, J. M. Carmona⁴, J. F. Castel⁴,
S. Cebrián⁴, M. Civitani², C. Cogollos⁵, D. Costa⁵, T. Dafni³, A.V. Derbin⁹, N.A. Descalle⁷,
K. Desch⁸, B. Döbrich³, I. Dratchnev⁹, A. Dudarev³, E. Ferrer-Ribas¹, I. Fleck¹⁷, J. Galán¹,
G. Galanti², D. Gascón⁵, L. Gastaldo⁹, L. Garrido⁵, C. Germani⁵, G. Ghisellini²,
M. Giannotti¹⁰, I. Giomataris¹, S. Gninenko¹¹, N. Golubev¹¹, R. Graciani⁵, I. G. Irastorza^{4,*},
K. Jakovčić¹², J. Kaminski⁸, M. Krčmar¹², C. Krieger⁸, B. Lakić¹², T. Lasserre¹, P. Laurent¹,
I. Lomskaya⁹, E. Unzhakov⁶, O. Limousin¹, A. Lindner¹³, G. Luzón⁴, C. Melgarejo⁴,
F. Mescia⁵, J. Miralda-Escudé⁵, H. Mirallas⁴, W. N. Muratova⁶, X.F. Navick¹, C. Nones¹,
A. Notari⁵, A. Nozik¹¹, A. Ortiz de Solórzano⁴, V. Pantuev¹¹, T. Pagaevangelou¹, G. Pareschi²,
E. Ficatoste⁵, M. J. Pivovaroff⁷, K. Perez¹⁴, J. Redondo⁴, A. Ringwald¹³, J. Ruz⁷,
E. Ruiz-Chóliz⁴, E. O. Saemann¹³, J. Salvadó⁵, M. P. Sampériz⁴, T. Schiffer⁸, S. Schmidt⁸,
U. Schneekloth¹³, M. Schott¹⁵, H. Silva³, G. Tagliaferri², F. Tavecchio², H. ten Kate³,
I. Tkachev¹¹, S. Toistky¹¹, P. Vedrine¹, J. K. Vogel⁷, A. Weltma¹⁰

¹IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France ²INAF - Osservatorio astronomico di Brera, Via E. Bianchi 46, Merate (LC), I-23807, Italy ³European Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland ⁴Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain ⁸Institut de Ciències del Cosmos, Universitat de Barcelona, Spain ⁶St. Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia 7 Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA ⁸Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany ⁹Kirchhoff Institute for Physics, Heidelberg University, INF 227 69120 Heidelberg Germany 10 Physical Sciences, Barry University, 11300 NE 2nd Ave., Miami Shores, FL 33161, USA ⁴¹Institute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia 12 Rudjer Bošković Institute, Zagreb, Croatia 13 Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany 14 Massachusetts Institute of Technology, USA 18 Johannes Gutenberg University Mainz, Germany 16 University of Cape Town, South Africa

Основные результаты работы в 2019 г.

1. Совместно с участниками международной коллаборации Борексино выполнен наиболее полный на сегодняшний день анализ нейтринного излучения, сопровождающего термоядерные процессы внутри Солнца, и зарегистрированного детектором Борексино. Так, поток 7Ве-нейтрино измерен с 2.7 % точностью, превышающей теоретические предсказания. Результаты опубликованы в журнале «Nature» (2018) и Physical Review D (2019).

2. Проведен анализ сигналов детектора Borexino с энергией более 0.25 (1.0) МэВ в течении 472-х солнечных вспышек класса М и Х, случившихся в период 2009-2017 г.г. Установлены наиболее строгие ограничения на флюенсы нейтрино и антинейтрино с энергией (0.5-5.0) МэВ всех флэйвов (v_e, v_µ, v₁), связанные с СВ. Исключено нейтринное объяснение положительного результата CI-Ar детектора. 3. Продолжены работы по подготовке эксперимента DarkSide-20k Начата разработка калибровочного источника нейтронов на основе 252Cf, совмещенного с Si(Li)-детектором. Проводилось изучение радиационной стойкости Si(Li)- детекторов при регистрации альфа-частиц. Результаты приняты в журнал Приборы и Техника Эксперимента.

4. Разработан и создан новый бета-спектрометр с 4π-геометрией на основе Si(Li)-детекторов с толщиной i-области 9 мм, который имеет функцию отклика близкую к гауссовой. В ПИЯФ продолжались измерения бета-спектров ядер 144Ce-144Pr с целью определения спектра электронных антинейтрино для экспериментов по поиску осцилляций нейтрино в стерильное состояние с массой около 1 эВ.

5. Проведены прецизионные измерения бета-спектра 210Ві в схеме «мишень-детектор» с целью определения вклада в фон детектора Borexino в области сигнала от CNO-нейтрино

6. Кристалл Al₅Tm₃O₁₂, выращенный в КИ и ИОФ РАН, установлен в криогенную установку и охлажден до 10 мК. Измерен фоновый спектр кристалла на поверхности Земли с термисторами NTD и TES. Кристаллы будут использоваться для поиска резонансного возбуждения аксионами уровня ¹⁶⁹Tm.

7. Сотрудники Лаборатории и Отдела продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, DarkSide и IAXO.

Планы на 2020 г.

1) ПИЯФ

a) Окончание измерений бета-спектров ¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr для определения спектра электронных антинейтрино

б) Измерение бета-спектров ²¹⁰Ві с 4π–спектрометром для CNOнейтрино и других низкофоновых экспериментов.

в) Анализ результатов измерений с Tm₃Al₅O₁₂-болометром. Выращивание новых Tm гранатов объемом более 1 см³ (КИ + ИОФ РАН)

г) Баксан-⁸³Кг анализ для gAe, IAXO – R&D работы.

2) Borexino – СNО-нейтрино и редкие процессы

- а) ²¹⁰Ві для СNO нейтрино
- б) распады с $\Delta B = 3$, NSI нейтрино
- в) корреляция нейтринных сигналов с LIGO / VIRGO (GW)

г) И.Драчнев, Д.Семенов, Е.Унжаков, Н. Ниязова, И.Ломская, -> 4 чел./ мес. LNGS

3) DarkSide – темная материя

а) Работы в ПИЯФ по подготовке DarkSide 20К, 252Cf источник, рад. стойкость Si(Li) (ICP MS + Ti, SiO₂, CF₂) + "удаленные дежурства"

б) И. Драчнев, Е. Унжаков, Д. Семенов, А. Кузьминов –> 4 месяца LNGS
 4) Новые проекты IAXO – нейтрино, аксион

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



Сессия Ученого совета ОНИ ПИЯФ

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

Лаб. низкофоновых измерений

1) А.В. Дербин внс, дфмн,

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

В отделе - 29 (8х0.5) чел. 1 дфмн; 7 кфмн; внс – 2; снс – 4; нс – 4; мнс – 0;асп. - 1; вед.инж.-11; инж.-2; рег. ап. -1; сл.мех.-1; студ. совм. – 3; (Σ13 нс) Гр. физики и технологии ППД 1) А.Х. Хусаинов внс, кфмн 2) А.А. Афанасьев вед. инж.-эл 3) М.П. Жуков вед. инж.-эл 4) Н.Т. Кислицкий вед. инж.-эл 5) Л.В. Силантьева вед. инж.-эл 6) П.И. Трофимов вед. инж.-эл 7) Г.Э. Иващенко вед. инж.-тех. 8) Е.В. Федоров вед. инж.-тех. 9) Т.А. Филиппова инж. 10) Е.А. Чмель вед. инж.-тех.

Гр. радиохимии 1) И.С. Ломская, 6 курс ТУ 2) В.М. Тюнис вед. инж.

Конст. – технологический уч.

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

Основные результаты по п/п структурам

- Разработка уникальных спектрометрических приборов с п/п детекторами (в основном, для Ф.И.) (рук. А.Х. Хусаинов)
 1.1 Поддержка п/п детекторов в ПИЯФ
- 1.2 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектров ¹⁴⁴Ce-¹⁴⁴Pr и ²¹⁰Bi 1.3 Si(Li)-детектор осколков калибровочного источника ²⁵²Cf 1.4 CdTe детекторы для диагностики плазмы, Токамак-10, КИ 1.5 Si(Li) детекторы для IAXO, TASTE

1.6 Детекторы из высокоомного кремния по планарной технологии

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

2.1 Детекторы с двухсторонним тонким окном 2.2 МДП структура на Si-детекторах (совместно с СПбГУ) 2.3 Дрейф лития на x > 8 мм

Обслуживание и ремонт Ge- и Si-детекторов в ПИЯФ

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

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

Детектор Ge N-типа коаксиальный. Заявленная неисправность: плохой вакуум. Ремонт: Вакуумирование в течение 5 суток с циклическим прогревом кожуха хладопровода. Проверка параметров: измерения проведены при 2000В. Разрешение для энергии 1.33 MeV составляет 2 keV

Инжиниринговый центр «Углеродные наноструктуры»

Лаборатория ядерной спектроскопии ОНФ







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



Существует ряд проектов экспериментов с искусственным источником антинейтрино 144Се-144Pr 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 144Pr. В настоящее время мы проводим эти измерения с помощью Siдетекторов, которые имеют существенно более высокое энергетическое разрешение чем пластические сцинтилляторы. Используется несколько вариантов размещения источников 144Се-144Pr и планарных Si(Li)-детекторов, подавив таким образом обратное рассеяние электронов от поверхности детектора. В 2019 году проводились работы по измерению бетаспектра 210Bi, знание которого необходимо для анализа фона при регистрации CNO-нейтрино.

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



25-26 ноября 2019

Спектрометрические блоки детектирования для рентгеновской диагностики термоядерной плазмы



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 разработокам 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



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.
Si(Li)-детектор осколков калибровочного источника ²⁵²Cf для экспериментов DarkSide и LVD



Эксперимент DarkSide 20k. Измерение функция отклика для нейтронов 252Cf.



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

Детекторы из особо чистого кремния



В 2019 в отделе продолжались работы по созданию детекторов из особо чистого кремния (ОЧК) по «планарной технологии». Основное преимущество этой технологии заключается в том что она обеспечивает очень низкие темновые токи. Для изготовление детекторов были использованы базы Зеленоградского НПО «Микроэлектроники» и Минского НПО «Интеграл». Пластины ОЧК с удельным сопротивлением больше 25 ком (концентрация остаточных примесей порядка 10¹¹ см⁻³) были приобретены в фирме TOPSIL. Такие кристаллы дают возможность изготовить детекторы с глубиной чувствительной области до 2 мм. Структуры изготовленные по «планарной технологии» должны обеспечить малые токи при охлаждении до минус (60-70) С⁰.



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

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 539.1.074

АНАЛИЗАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО И γ-ИЗЛУЧЕНИЯ "РАДИАНТ" НА ОСНОВЕ CdTe-*p—i—n-*ДЕТЕКТОРОВ

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



Блок детектирования p-i-n CdTe большого объема



Анализатор импульсов с блоком детектирования

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

25-26 ноября 2019

Детекторы с контактом из аморфного кремния



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 AI. В результате, удается получить толщину окна ~0.2 мкм, что сравнимо с толщиной окна со стороны Pd(Au).



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 207Ві при различных напряжениях обратного смещения. При комнатной температуре регистрировались энергетические потери коллимированного источника α-частиц в зависимости от угла облучения.

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

Мотивация : напыление пленки AIN приводит к

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

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





Зависимости величин поверхностной плотности электронных ловушек от толшины пленки AIN

Выводы:

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

МДП структуры на p-Si



Проведены исследования электрофизических и спектрометрических характеристик структур AI/SiO2/p-Si с химическими окислами, созданными различными способами: окисление в концентрированной азотной кислоте при комнатной температуре и в кипящей кислоте. α-спектры тройного источника ²³⁹Pu(5.15MeV)+²³⁸Pu(5.4Mev)+²³³U(4.8MeV). Структуры AI/SiO2/p-Si

Установка для исследования фотоэлектрических свойств широкозонных полупроводников



СПбГУ, физический факультет, кафедра электроники твердого тела

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

Планы Отдела на 2020 г.

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

1.1 Детекторы на основе высокомного кремния

1.2 Поддержка п/п детекторов в ПИЯФ

1.3 Si(Li)-детекторы для измерения бета спектра 210Bi

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

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

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

2.1 Детекторы с двухсторонним тонким окном (Совместно с ФТИ) 2.2 МДП (AIN – SiO2-aC:H) структура на Si-детекторах (совместно с ФТИ и СПбГУ)

2.3 Анизотропия ионизационных потерь в Si (совместно с ОФВЭ) 2.4 Детектор осколков для DarkSide и IBD. Изучение радиационной стойкости Si(Li)-детекторов.

Спасибо за внимание!