

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов

Лаб. низкофоновых измерений

- 1) А.В. Дербин внс, дфмн,
- 2) В.Н. Муратова, нс, кфмн
- 3) С.В. Бахланов вед. инж.
- 4) Д.А. Семенов, мнс. кфмн
- 5) Е.В. Унжаков, мнс.
- 6) А.С. Каюнов, аспирант
- 7) И.М. Котина снс кфмн
- 8) Г.В. Пацекина нс
- 9) Л.М. Тухконен нс
- 10) И.С. Драчнев 6 курс->асп.
- 11) К.М. Жеронкин 4-5 курс
- 12) И.С. Патраков 4-5 курс

В отделе 32 (26) чел.
внс – 3; снс – 2; нс – 3;
мнс – 2; асп. -2;
вед.инж.-12; инж. тех.-4;
рег. ап. -1; сл.мех.-1;
студ.совм. – 2;

Гр. физики и технологии ППД

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

Гр. радиохимии

- 1) А.И. Егоров внс, кфмн
- 2) Р.И. Крутова вед. инж.
- 3) В.М. Тюнис вед. инж.

Конст. –технологический уч.

- 1) Г.Е.Жихаревич инж.-технолог
- 2) А.Д. Майанцев инж.
- 3) А.П.Михайлов сл.мех.с
- 4) В.А.Радаев сл.мех.сб.р.
- 5) А.И.Терентьева вед. инж

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



Состав (12 (8) чел.):

А.В. Дербин внс, дфмн,

С.В. Бахланов вед. инж.

В.Н. Муратова, нс, кфмн

Д.А. Семенов, мнс, кфмн

Е.В. Унжаков, мнс

А.С. Каюнов, аспирант

И.А. Патраков, 5 курс ЛЭТИ

К.М. Жеронкин, 5 курс ЛЭТИ

И.С. Драчнев, 6 курс СПбГУ->аспир.

И.М. Котина снс, кфмн

Г.В. Пацекина, нс

Л.М. Тукхонен, нс

2ст+2асп+2мнс+3нс+1снс+1внс



Лаборатория в 2013 году

Работы проводились по 3 основным направлениям:

1) Нейтрино,

(эксперимент Борексино, Италия +ПИЯФ Poseidon, SOX-стерильное нейтрино)

2) Темная материя

(Солнечные аксионы + аксионы темной материи (работы выполняются в ПИЯФ) + аксионы в Борексино и WIMPs в DarkSide)

3) МДП (HQ) структуры на кремнии

(+монитор нейтронов, рук. И.М. Котина доклад А.Х. Хусаинова 17.01.14)

Содержание доклада (30 мин.)

- 1) **Наукометрические показатели лаборатории**
- 2) **Нейтрино в 2011- 2013 г.г.**
- 3) **Эксперимент Борексино в 2013 году. Новые и почти новые результаты.**
- 4) **Поиск тяжелого стерильного нейтрино в ^8B -распаде**
- 5) **Новые данные по регистрации гео нейтрино**
- 6) **Стерильные нейтрино в Борексино – проект SOX**
- 7) **Поиск солнечных аксионов с энергией 5.5 МэВ с помощью VGO в ПИЯФ**
- 8) **Поиск низкоэнергетических солнечных аксионов и аксионов темной материи в ПИЯФ. Сцинтилляционный болометр и новый эксперимент IAXO.**
- 9) **Планы на 2014 год.**
- 10) **Поиск частиц темной материи в эксперименте DarkSide в Гран Сассо (доклад Е. Унжакова).**

Список публикаций в 2013 г.(21)

1. A.V. Derbin, S.V. Bakhlanov, I.S. Dratchnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, Search for axioelectric effect of 5.5 MeV solar axions using BGO detectors, *Europ. Phys. J. C* 73 (2013) 2490
2. A.V. Derbin, I.S. Dratchnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Search for solar axions produced by Compton process and bremsstrahlung using the resonant absorption and axioelectric effect, contributed to the 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Mainz, June 24-28, (2013), arXiv:1312.0187
3. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin, I. Dratchnev,...V. Muratova,...) New limits on heavy sterile neutrino mixing in 8B -decay obtained with the Borexino detector, accepted for publication *Phys. Rev. D* 88, (2013) 072010. (Corresponding authors A. Derbin, V.Muratova).
4. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino, *Phys. Lett. B* 722 (2013) 295
5. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Lifetime measurements of ^{214}Po and ^{212}Po with the CTF liquid scintillator detector at LNGS, *Eur. Phys. J. A* 49 (2013) 92
6. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Solar neutrino results from Borexino, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* (2013) 104-106
7. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Recent results and future development of Borexino, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* (2013) 55
8. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino, *JHEP* 1308 (2013) 038
9. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Cosmogenic Backgrounds in Borexino at 3800 m water-equivalent depth, *JCAP* 1308 (2013) 049
10. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Neutrinos from the sun and from radioactive sources, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* (2013) 77
11. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Study of Solar and Geo-Neutrinos with the BOREXINO Detector, 10.1142/9789814436830_0038, *Proceedings 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics*, p.173-176
12. Borexino Collaboration (A. Derbin,...V. Muratova,...et al.,) Study of the Rare Processes with the BOREXINO Detector, DOI:10.1142/9789814436830_0037 *Proceedings 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics*, p.173-176
13. Borexino Collaboration (G. Bellini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Final results of Borexino Phase-I on low energy solar neutrino spectroscopy, arXiv:1308.0443 (2013)
14. Borexino Collaboration (G. Testera, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Solar and geo neutrinos in Borexino: summary of the Phase-I measurements and recent results, *Proceeding of Science, XV workshop on Neutrino Telescopes* (2013)
15. Borexino Collaboration (M. Pallovicini, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) The SOX project: a search for sterile neutrino with BoreXino, *Proceeding of Science, XV workshop on Neutrino Telescopes* (2013)
16. Borexino Collaboration (L. Ludkhova, ... A. Derbin,...V. Muratova,...) Solar neutrino results with Borexino I, arXiv:1308.0443 (2013) *PoS ICHEP2012* (2013) 392
17. DarkSide Collaboration (... A. Derbin, I. Dratchnev,...V. Muratova,... D. Semenov,...E. Unzhakov et al.,) Light yield in DarkSide-10: A prototype two-phase argon TPC for dark matter searches, *Astroparticle Physics* 49 (2013) 44-51
18. DarkSide Collaboration (T. Alexander A. Derbin, I. Dratchnev,...V. Muratova,... D. Semenov,...E. Unzhakov et al.,) DarkSide search for dark matter, *JINST* 8 (2013) C11021
19. IAXO Collaboration (Biljana Laki,...A.V. Derbin, ...I. Dratchnev, V.N.Muratova,...) IAXO - the Future Axion Helioscope, *proceedings of 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs*, 24 - 28 June 2013, Mainz Germany
20. I.G. Irastorza,...A.V. Derbin,..., et al., IAXO - The International Axion Observatory, arXiv:1302.3273 (2013)
21. I.G. Irastorza,..., A.V. Derbin,..., et al., Future axion searches with the International Axion Observatory (IAXO), *J. Phys. Conf. Ser.* 460 (2013) 012002

Доклады на конференциях в 2013 г.(4)

Зимняя школа ПИЯФ, 2013

А.В. Дербин,

Поиск частиц темной материи

**The 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs 24 - 28 June 2013,
Mainz Germany**

V. N. Muratova,

Search for axioelectric effect of 5.5 MeV solar axions using BGO detectors,

**The 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISP 24 - 28 June 2013,
Mainz Germany**

A. V. Derbin,

Search for solar axions produced by Compton process and bremsstrahlung.

Научная сессия ОФН РАН “Перспективы исследований в области нейтринной физи-ки частиц и астрофизики”, посвященная 100-летию со дня рождения академика Б.М. Понтекорво, 2 -3 сентября 2013 г, Дубна

А.В. Дербин,

Эксперименты с солнечными нейтрино

+ доклады от коллабораций *BOREXINO, DARKSIDE*

Диссертации, аспирантура (1+1+1+1)

Подтверждена 1 кандидатская диссертация
«Поиск солнечных аксионов, излучаемых в M1-переходе
ядер ^{57}Fe »
(Д.А. Семенов, 2012)

Подготовлена 1 кандидатская диссертация «Поиск
солнечных аксионов с помощью резонансного
поглощения ядрами ^{169}Tm »
(Е.В. Унжаков, 2014)

Защищена 1 магистерская диссертация
«Поиск аксионов с энергией 5.5 МэВ, возникающих в
реакции $p(d, ^3\text{He})\text{A}$ с помощью ВГО детекторов»
(И.С. Драчнев. 2013)

Международная аспирантура GSSI & LNGS,
Италия+Россия
И. С. Драчнев (2013)

3 гранта РФФИ в 2013 г и 4 гранта в 2014 г.

Грант РФФИ - а «Поиск взаимодействия аксионов с атомами и атомными ядрами»
(рук. В.Н. Муратова)

Грант РФФИ – офи-м «Поиск аксионов темной материи и солнечных аксионов»
(рук. В.Н. Муратова)

Грант РФФИ – а «Поиск солнечных адронных аксионов»
(рук. А. Гапгашев, ИЯИ БНО)

Грант РФФИ_ASPERA «Программа совместных разработок детекторов нейтрино низких энергий»
(рук. Л.Б. Безруков, ИЯИ)

2011 – год нейтрино

Март: *стерильное нейтрино*

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

Июль: θ_{13} *отличен от нуля*

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

Сентябрь: – *сверхсветовые нейтрино*

CerN GranSasso OPERA

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

Апрель: *LMA решение для нейтрино*

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

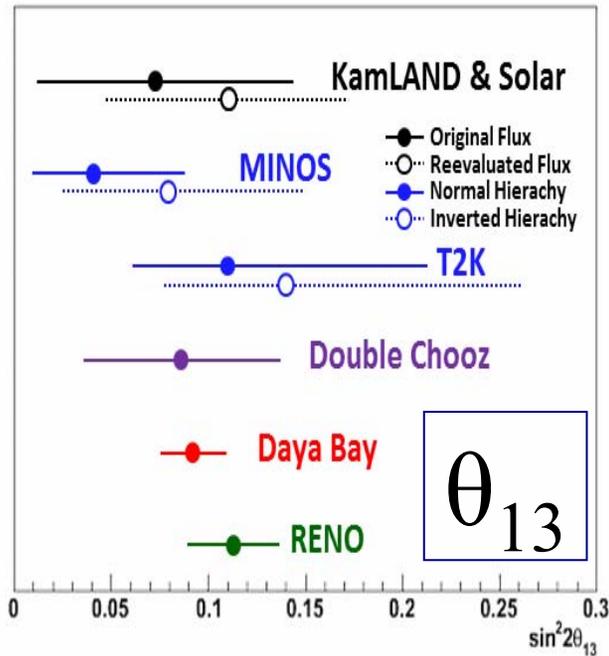
Сентябрь: *пер-нейтрино* $(1.6 \pm 0.3) 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Borexino,

Декабрь: θ_{13} *Double Chooz*

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

LVD coll. PRL 109, 070801 (2012)

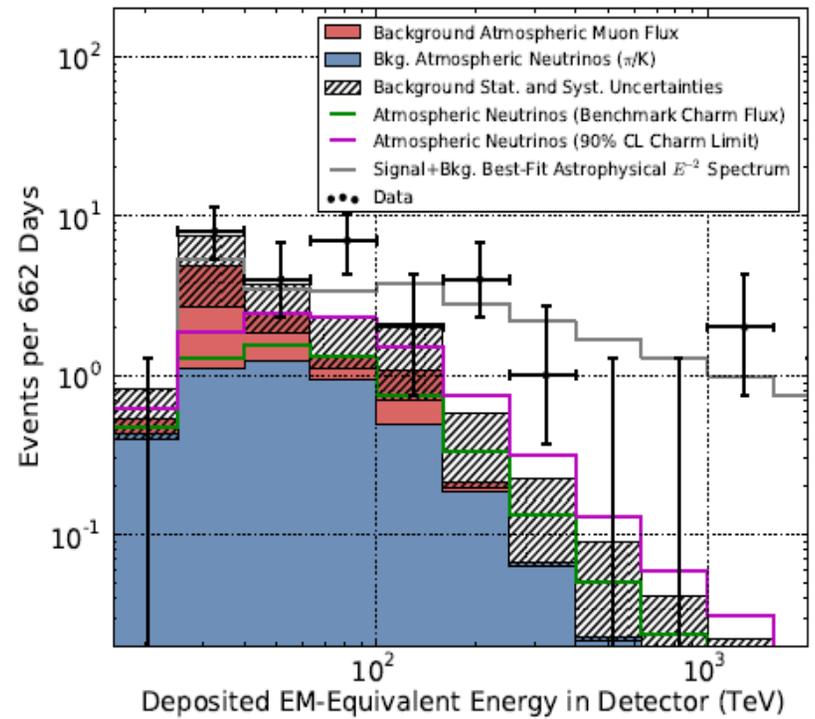
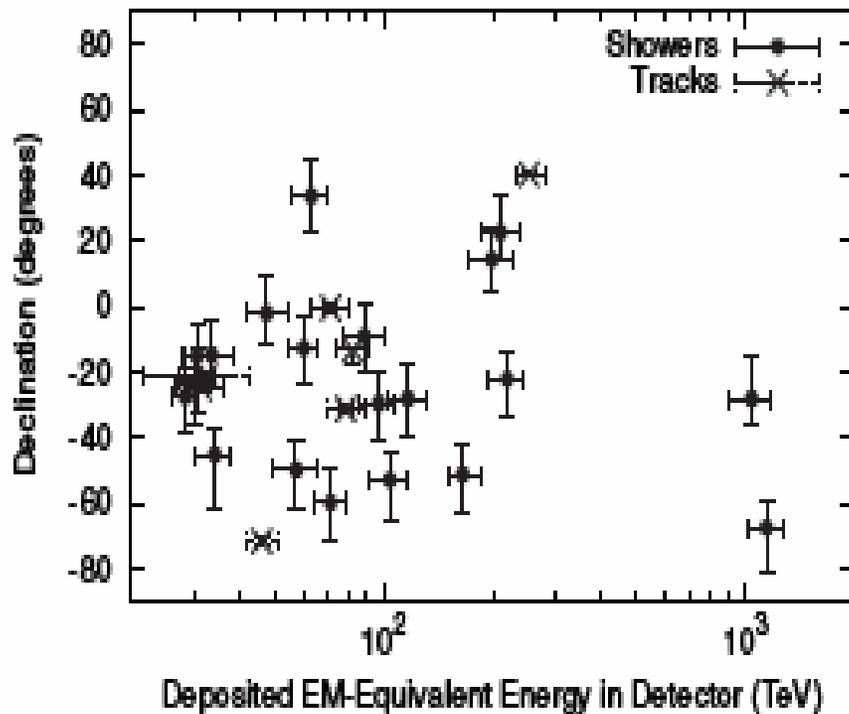
Borexino coll. arXiv:1207.6860

ICARUS coll. arXiv:1208.2629

OPERA coll. arXiv:1212.1276

$$(V - C) / C$$

2013 – год открытия астрофизических нейтрино



28 событий с энергией выше 30 ТэВ зарегистрированы детектором IceCube. Это значение на 4.3σ отличается от ожидаемого для мюонных нейтрино. В тоже время значение согласуется с предсказаниями для рождения нейтрино высокоэнергетическими космическими лучами.

Новые результаты Борексино (2013 г.)

1. Тяжелое стерильное нейтрино.
2. Новые данные по гео нейтрино.
3. Подготовка - стерильное нейтрино SOX
4. Возможность регистрации $\bar{\nu}$ -нейтрино, магнитного момента, ..
5. Happy new year

2012 – год A_{solar} и V_{neutrino}

- Солнечные аксионы.
- Скорость нейтрино.
- Начало Фазы 2

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

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

2010 – год антинейтрино

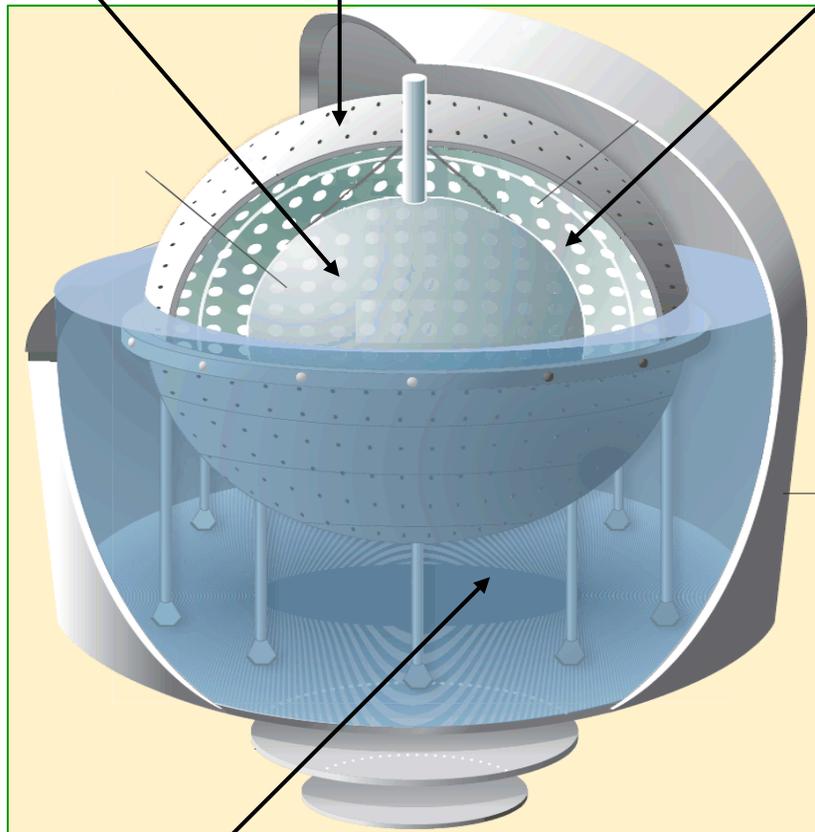
1. Гео-нейтрино
2. Солнечные анти-нейтрино
3. Фоновые анти-нейтрино
4. Переходы в ${}^{12}\text{C}$ с нарушением ПП

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

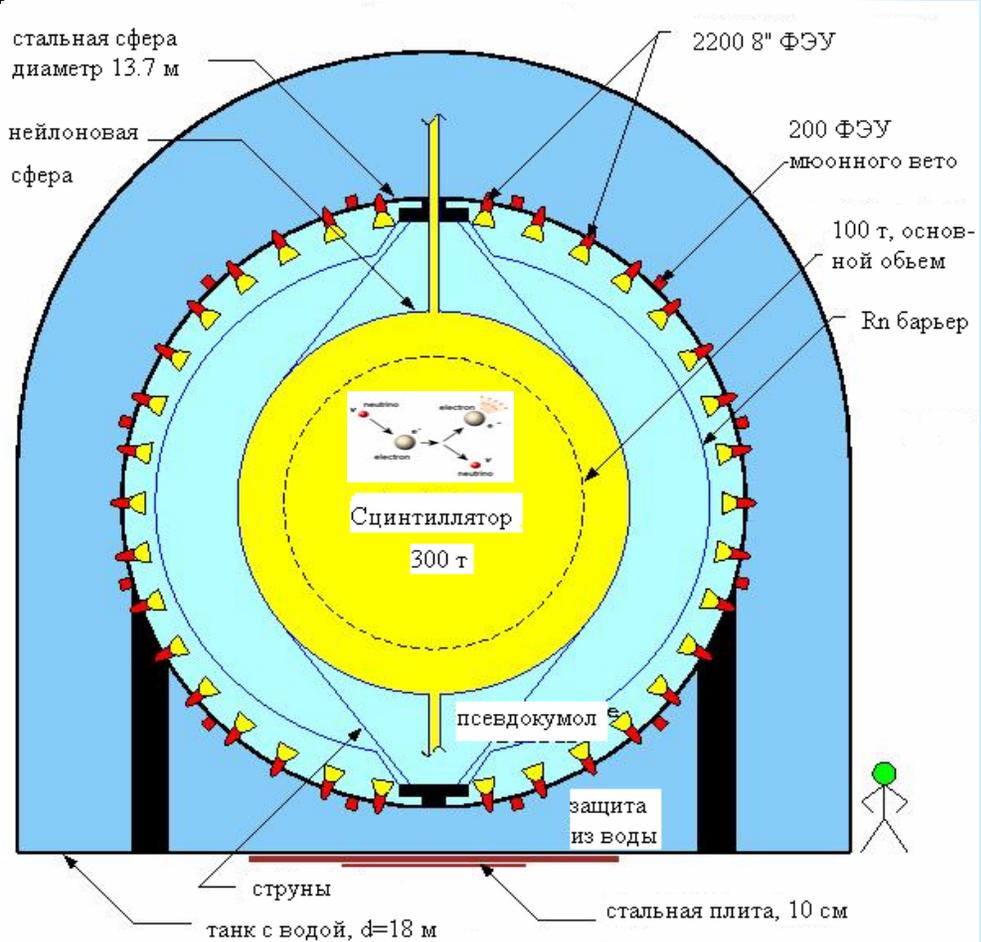
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

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

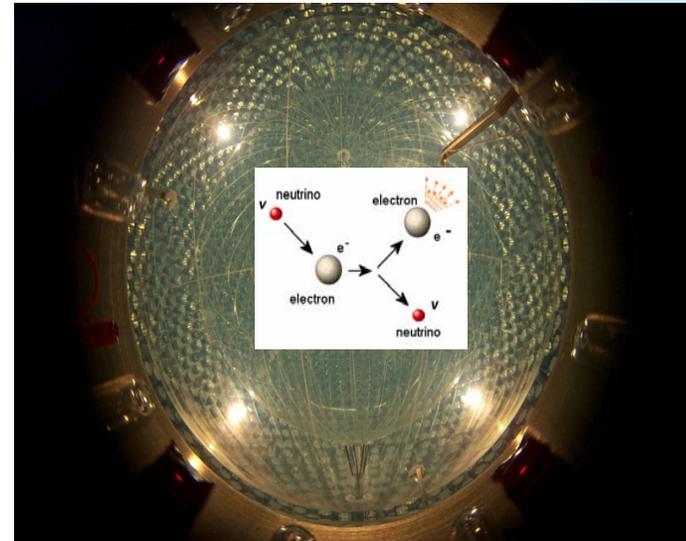
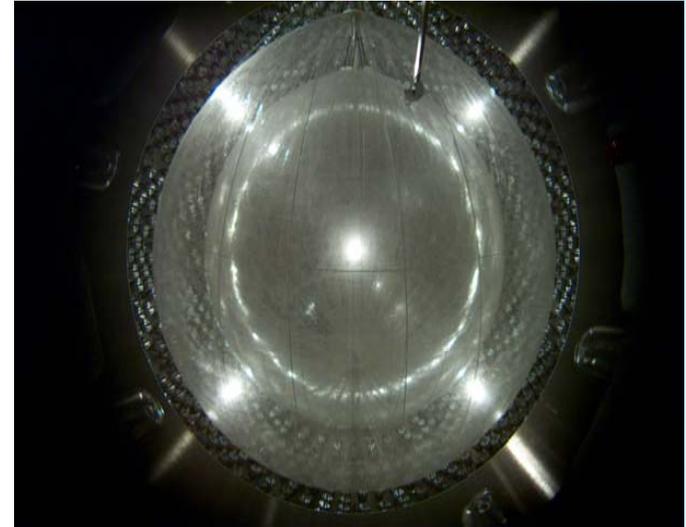
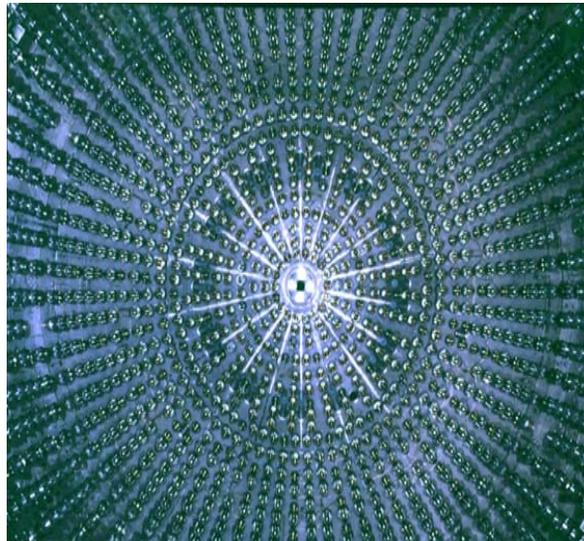
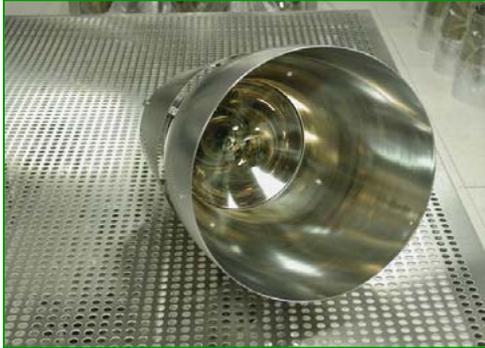
Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



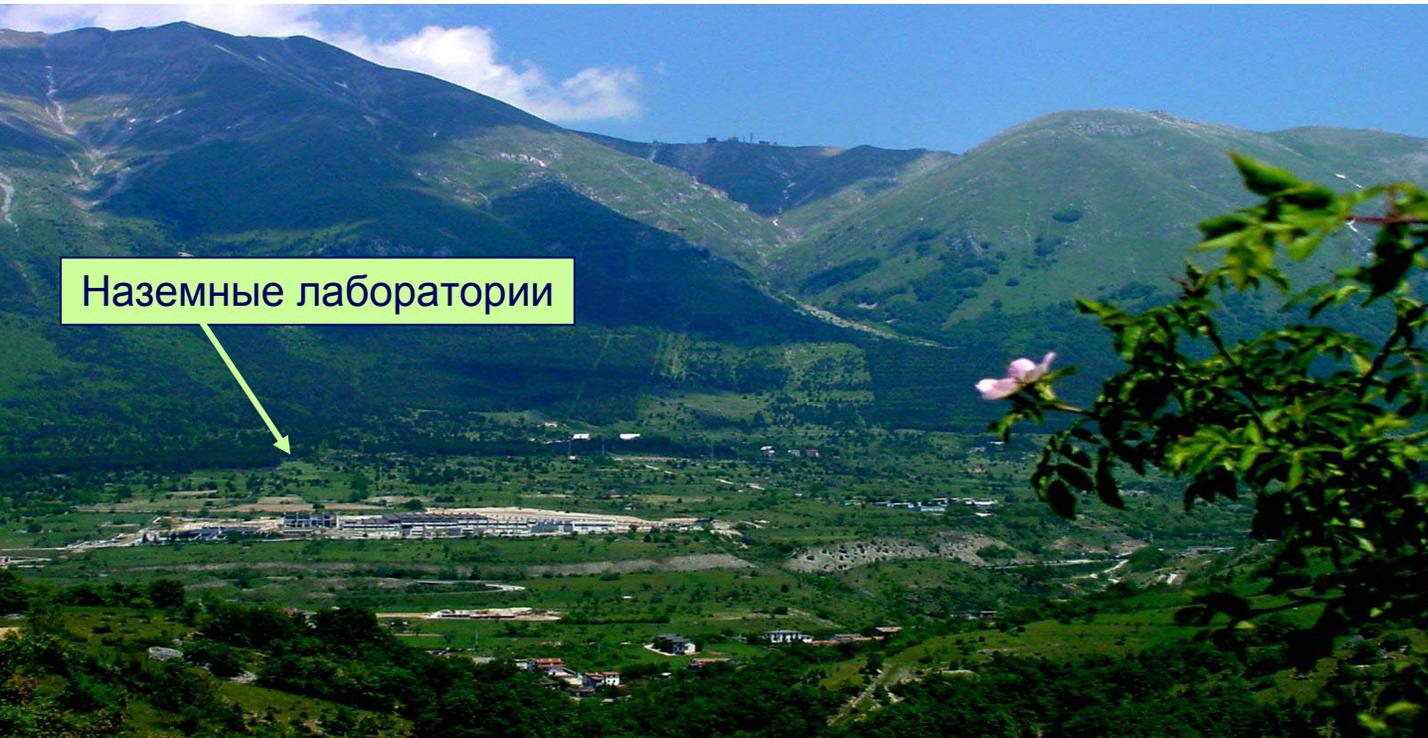
2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы

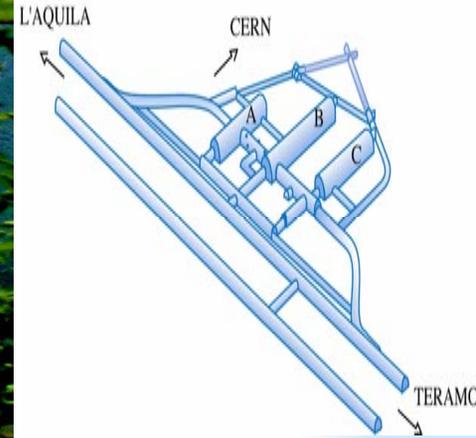


Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории

Италия,
120 км от Рима
3500 м.в.э.



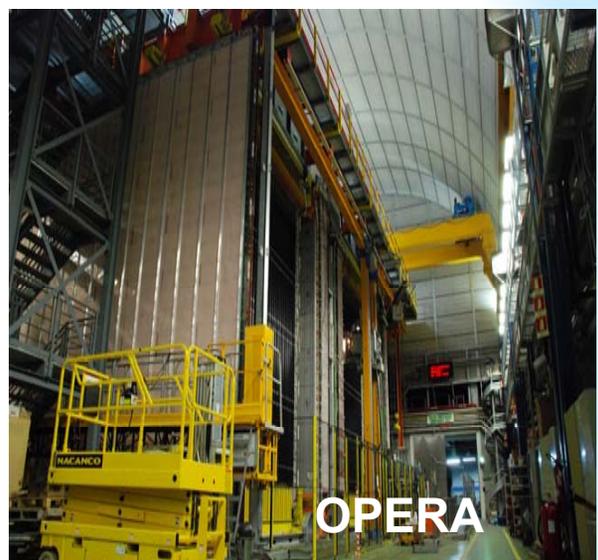
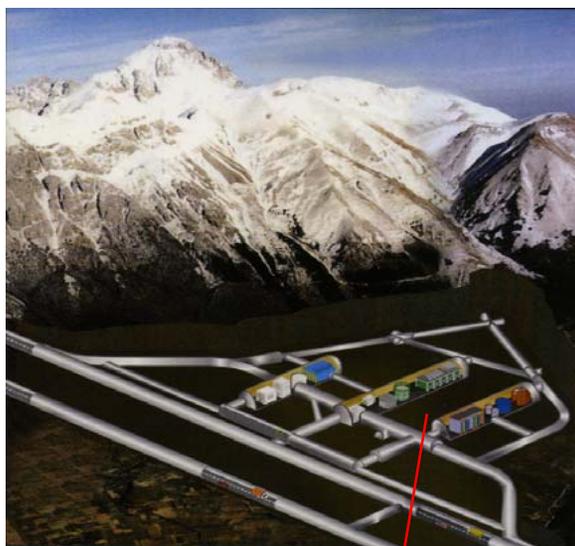
Борексидно и завод по очистке



СТФ



Подземная лаборатория Гран-Сассо



Borexino collaboration



Milano



Genova



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR KERNPHYSIK

Heidelberg



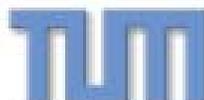
Paris



Gran Sasso



Perugia



München



Kraków



Hamburg



JINR
Dubna



the Borexino Collaboration



Virginia Tech



Princeton



UMass
Amherst



Kurchatov
Moscow



St. Petersburg



Ucla
Los Angeles

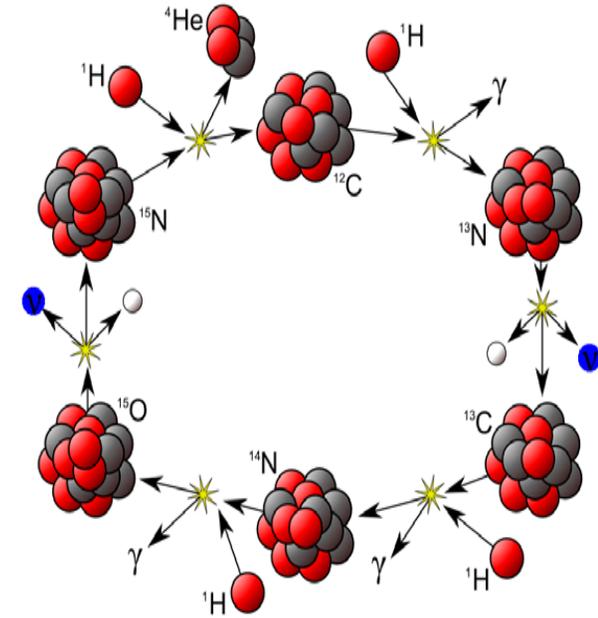
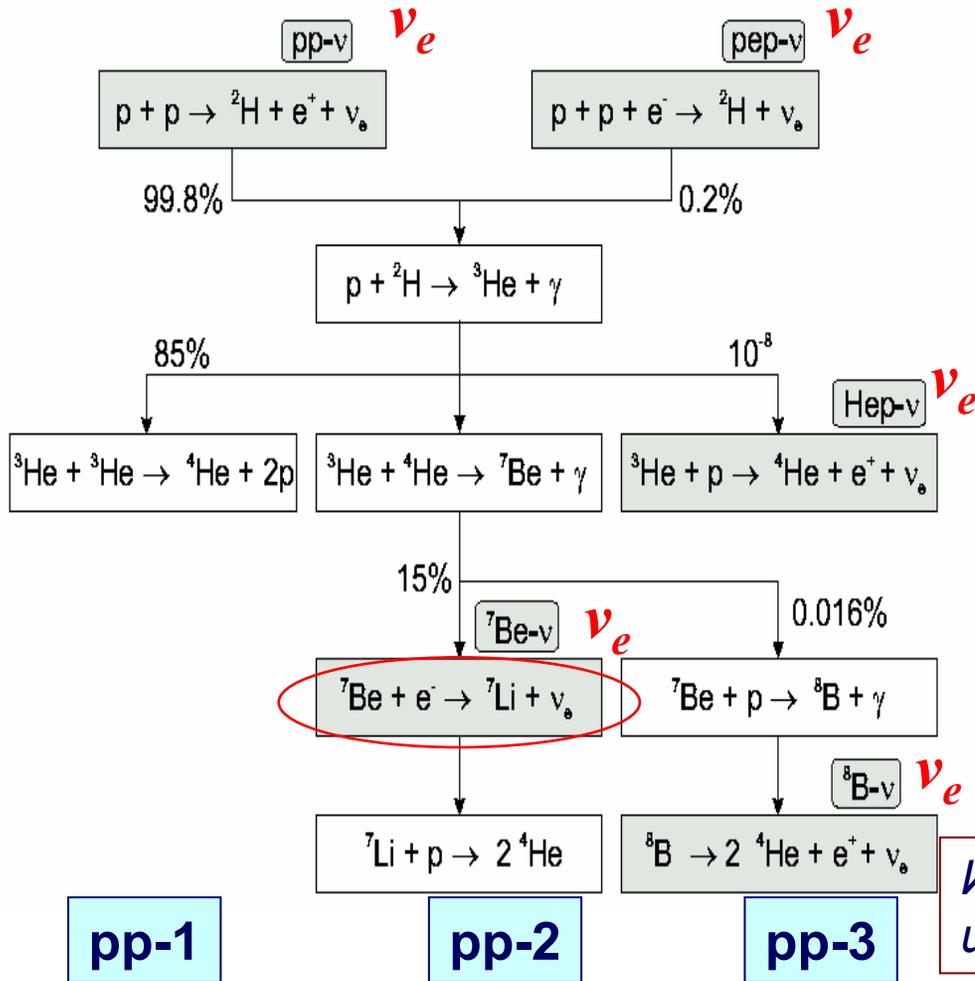


University of Houston
Houston



Moscow State

pp-: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + (26.7 \text{ МэВ})$ и CNO-цикл



$${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$$

$${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

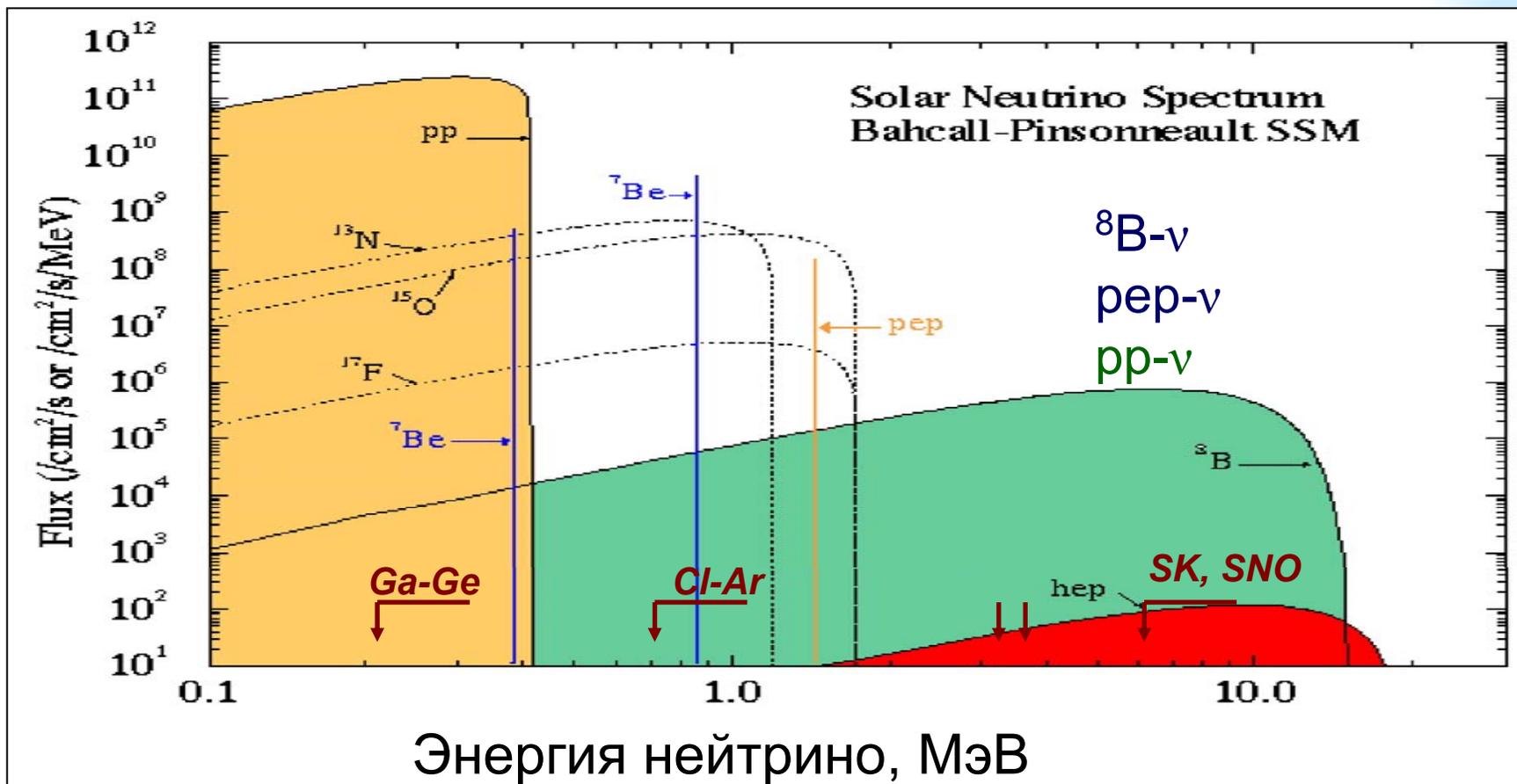
$${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

Излучается 5 нейтрино в pp-цепочке и 3 нейтрино в CNO-цикле

Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Полная выделяемая энергия 26.7 МэВ, из которой 0.6 МэВ уносят нейтрино.

Основная задача БОРЕКСИНО -

регистрация упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроны - успешно решена, поток ${}^7\text{Be}$ - ν измерен с точностью 5%.



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 – $10^{13} \nu/\text{cm}^2\text{сек}$

Рабочие группы и вклад ПИЯФ в 2013 г.

Входим в состав 6 (из 13) рабочих групп:

- 1) ${}^7\text{Be}$ -нейтрино,
- 2) Мюоны и нейтроны,
- 3) Анти-нейтрино,
- 4) pp -нейтрино,
- 5) редкие процессы (председатель)
- 6) Стерильное нейтрино

1. авторы по переписке статьи от колл. опубликованной в 2013 г.

PHYSICAL REVIEW D 88, 072010 (2013)

New limits on heavy sterile neutrino mixing in ${}^8\text{B}$ decay obtained with the Borexino detector

- 2. Участие в подготовке статей по pp -, гео- и стерильного ν**
- 3. Работа в Гран Сассо - 9 чел./мес. на Borexino и DarkSide**
- 4. Группа РП готовит статью от коллабораци по нестандартным взаимодействиям нейтрино («барионное» нейтрино)**

Production (in β -decay) and decays of heavy sterile neutrino

For two-neutrinos mixing approximation

$$\nu_e = \cos\theta\nu_1 + \sin\theta\nu_2 \quad \nu_H = -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2$$

for small $\sin\theta$ (U_{eH}) $\nu_H \approx \nu_2$ is mostly sterile neutrino.

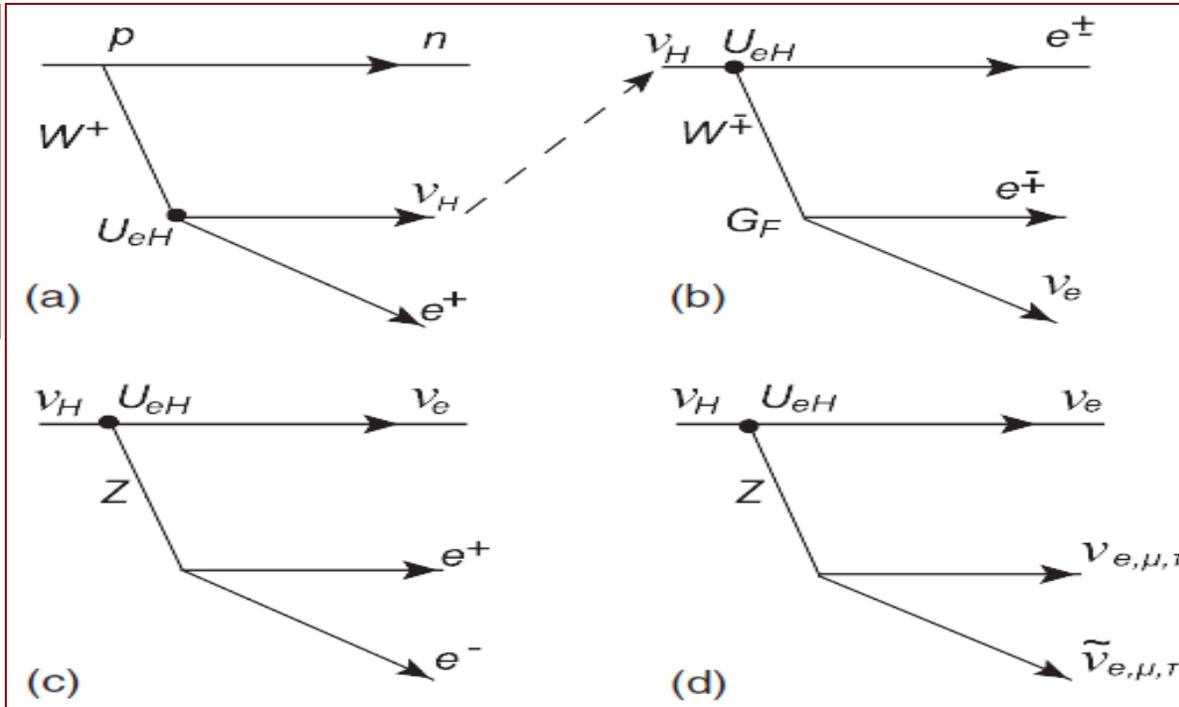
The simplest detectable decay modes are radiative decay

$$\nu_H \rightarrow \nu_e + \gamma$$

and decay into an electron, a positron and a light neutrino:

$$\nu_H \rightarrow \nu_e + e^+ + e^-.$$

HSN appears in the Sun due to β -decay ($E_0=16$ MeV)

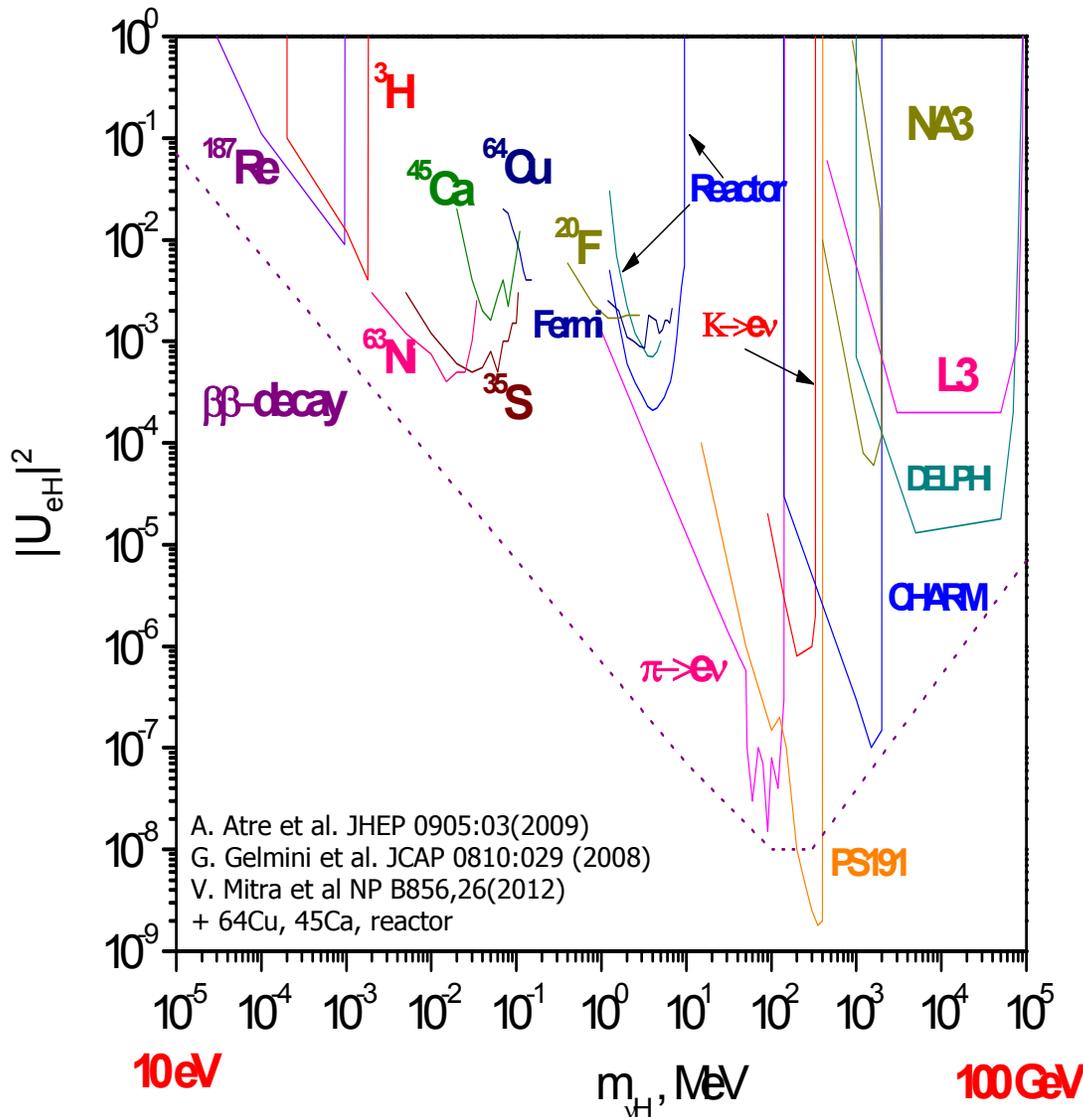


HSN decays inside Borexino

HSN decays in invisible mode

Shaposhnikov
Gorbunov

The existing experimental limits on $|U_{eH}|^2$



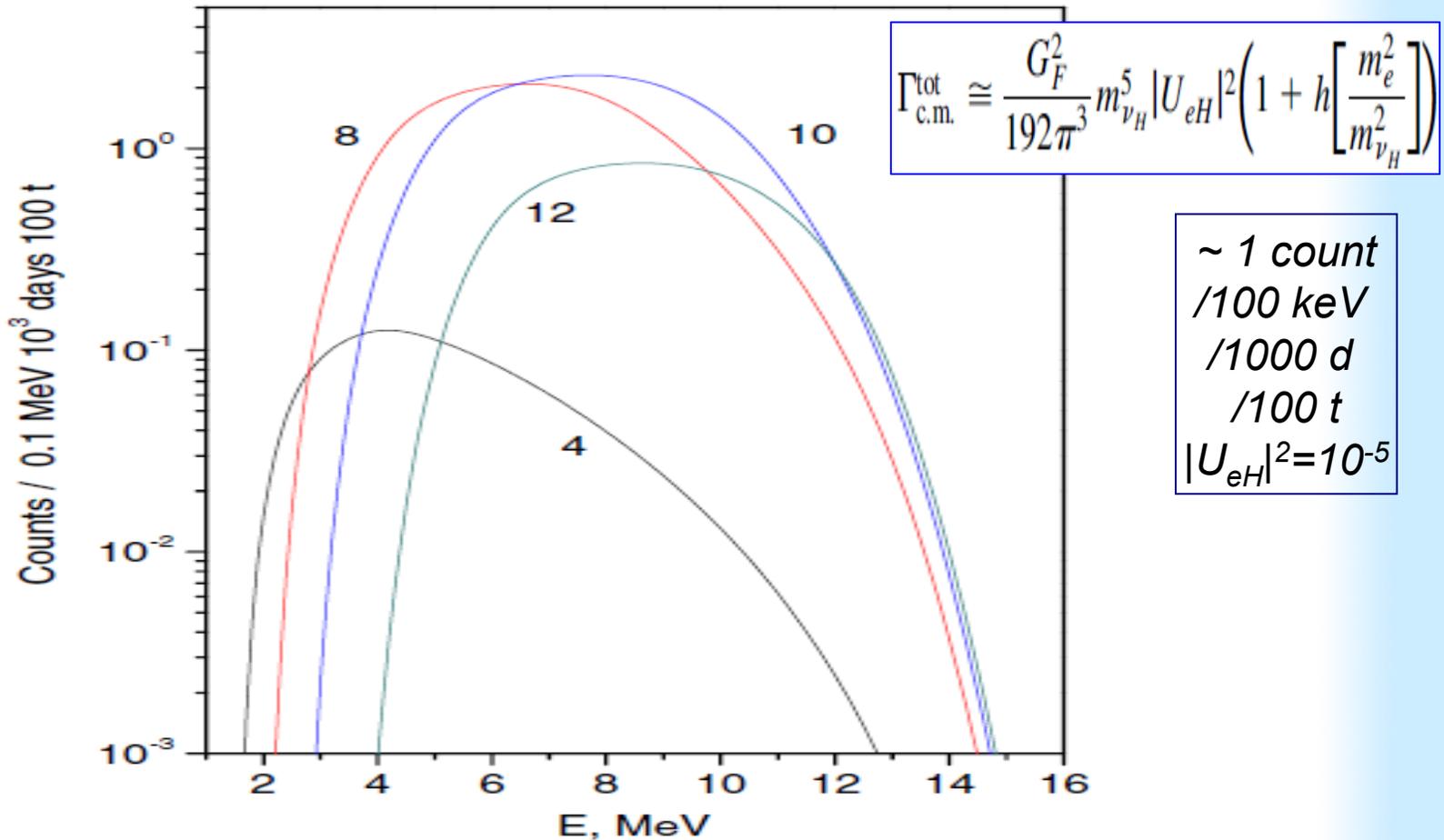
1. For masses $m_{\nu_H} < 1 \text{ MeV}$ the most sensitive probe is the search for kinks in the β -decay spectra ($^{187}\text{Re} - ^{20}\text{F}$ β -decays)

2. The decay of ν_H from a reactor ($\nu_H \rightarrow \nu_L + e^+ + e^-$) has been studied at Rovno, Gesgen and Bugey NPP. It gives the restrictions ($|U_{eH}|^2 < (0.3-5) \times 10^{-3}$ in the mass region $m_{\nu_H} \sim (1.1 - 9.5) \text{ MeV}$).

3. For heavier neutrinos, a test of the mixing with ν_e and ν_μ is peak searches in leptonic decays of π 's and K 's. Another way is searches of the products of HNs decays including K , η , etc .

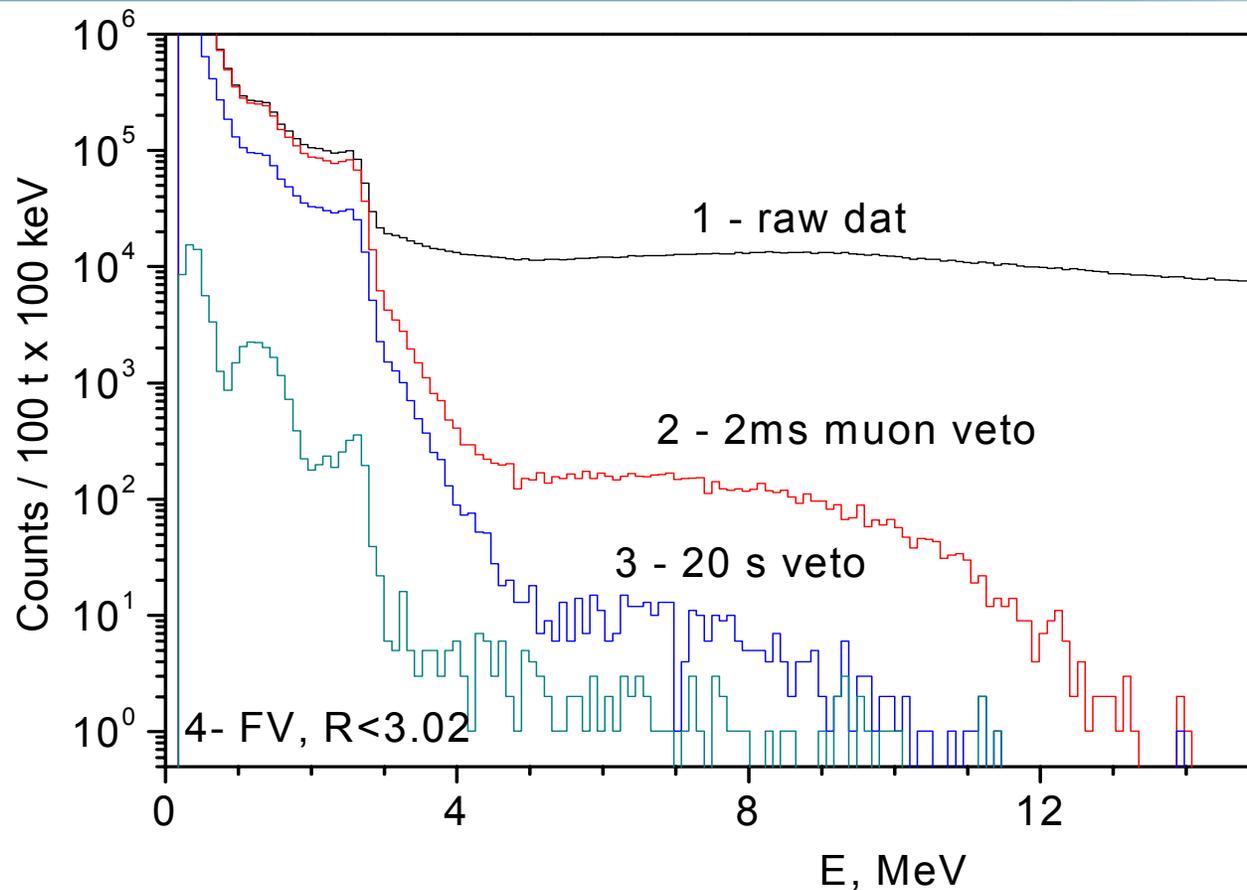
4. Cosmological and astrophysical bounds SN1987A data considerations ($|U_{eH}|^2 m_{\nu_H}^4 < 5 \times 10^{-7}$)

The expected spectra due to $\nu_H \rightarrow \nu_L + e^+ + e^-$ decays



The obtained spectra for some values of neutrino mass m_ν and mixing parameter $|U_{eH}|^2 = 1 \times 10^{-5}$. The energy spectra for Borexino was obtained by convolutions over the response $S^{2 \times 511}(E)$ and $\sigma(E)$.

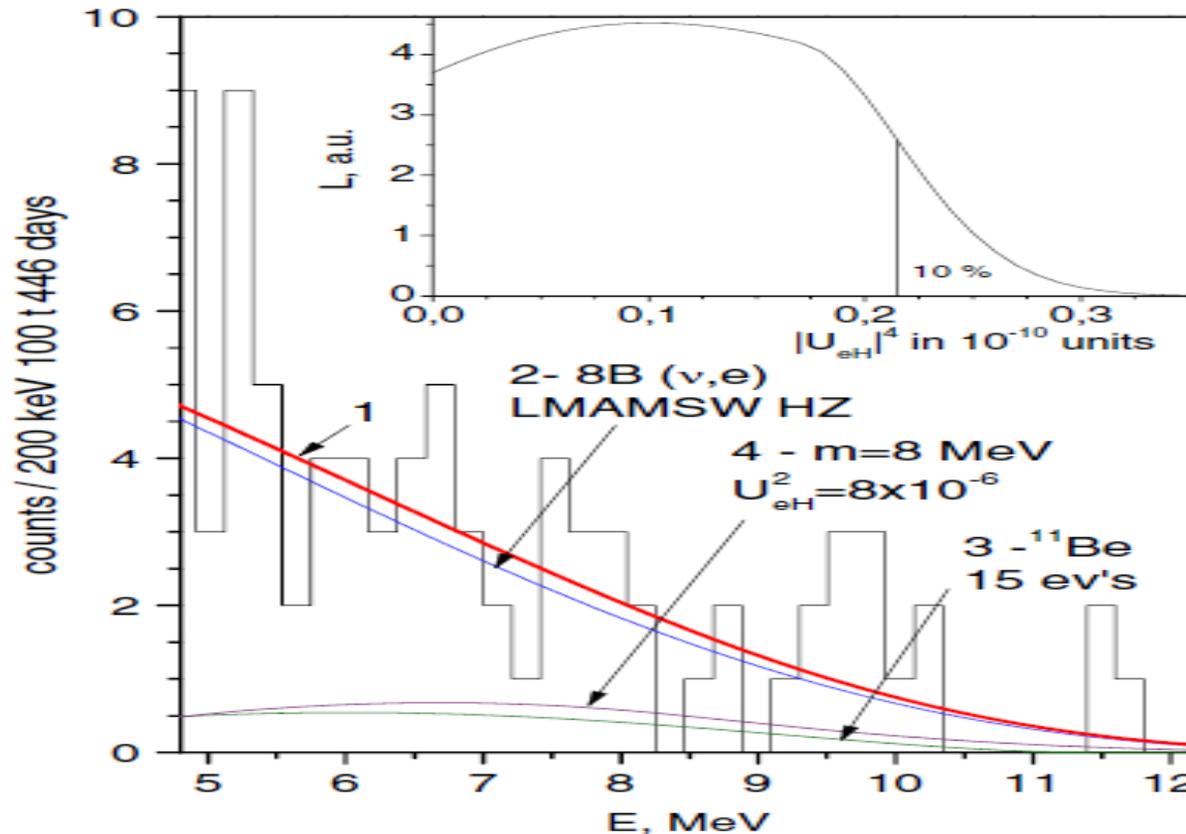
Borexino data spectra, 1192.0 (446.2) days



Energy spectra of the events and effect of the selection cuts. From top to bottom: (1) raw spectrum; (2) with 2 ms muon veto cut; (3) 20 s veto after a muon crossing the SSS; (4) events inside FV . Because the shapes of e^+e^- spectra are similar ^{11}Be spectrum, 20 s veto was applied to reduce the number of ^{11}Be events. The total time is 1192 d and the live time is 446 d or 37%.

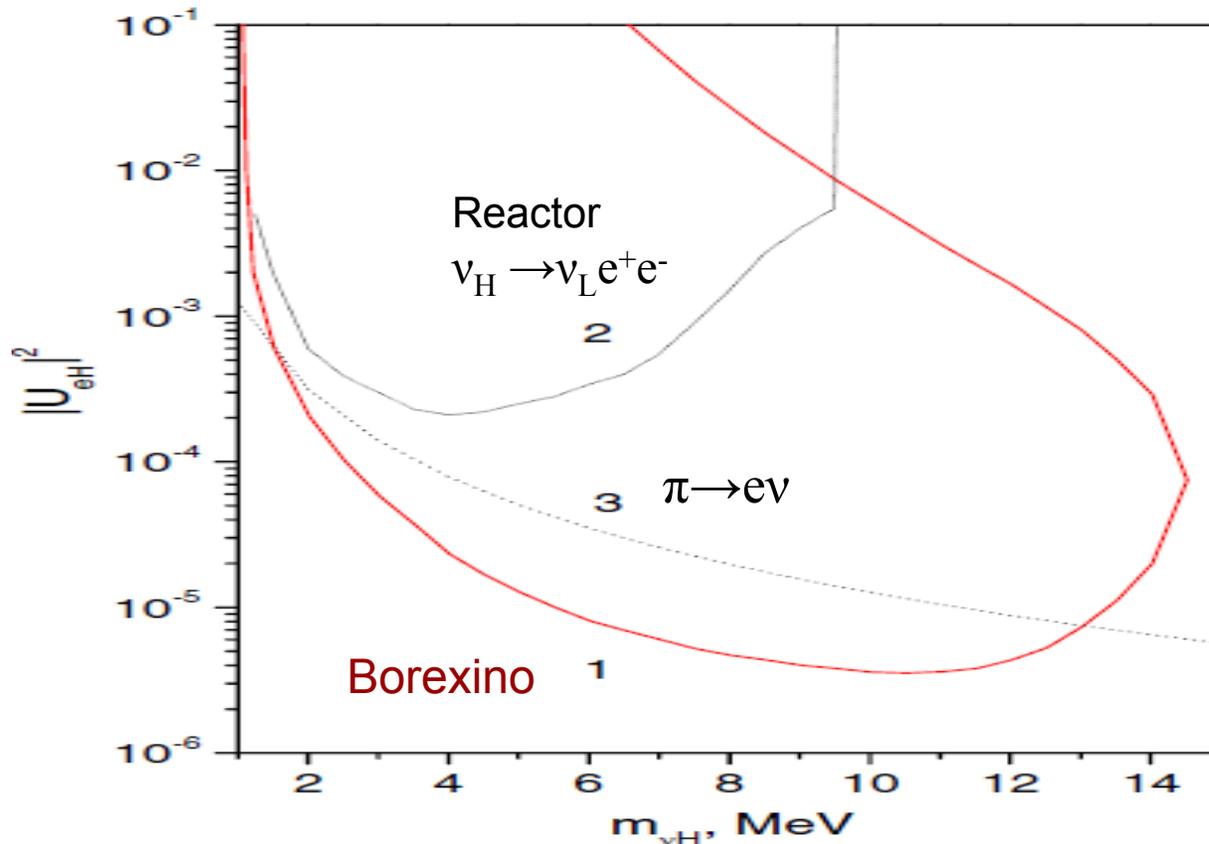
Results of the fit for $m_{\nu H} = 8 \text{ MeV}$

All 74
HZ 64
Lim 28



The fit results, corresponding to the maximum of L at $m_{\nu H} = 8 \text{ MeV}$. The value of modified $\chi^2 = \sum (N_i^{\text{exp}} - N_i^{\text{th}})^2 / N_i^{\text{th}}$ is $\chi^2 = 70.5/76$. Because of the low statistics, a MC simulation of is used to find the probability of $\chi^2 \geq 70.5$. The goodness-of-fit ($p = 56\%$) No statistically deviations of $|U_{eH}|^2$ from zero were observed for all tested $m_{\nu H}$. The upper limits were found using the L profile for fixed U_{eH} while two others parameters were free. In inset L vs $|U_{eH}|^4$ for $m_{\nu H} = 8 \text{ MeV}$ is shown.

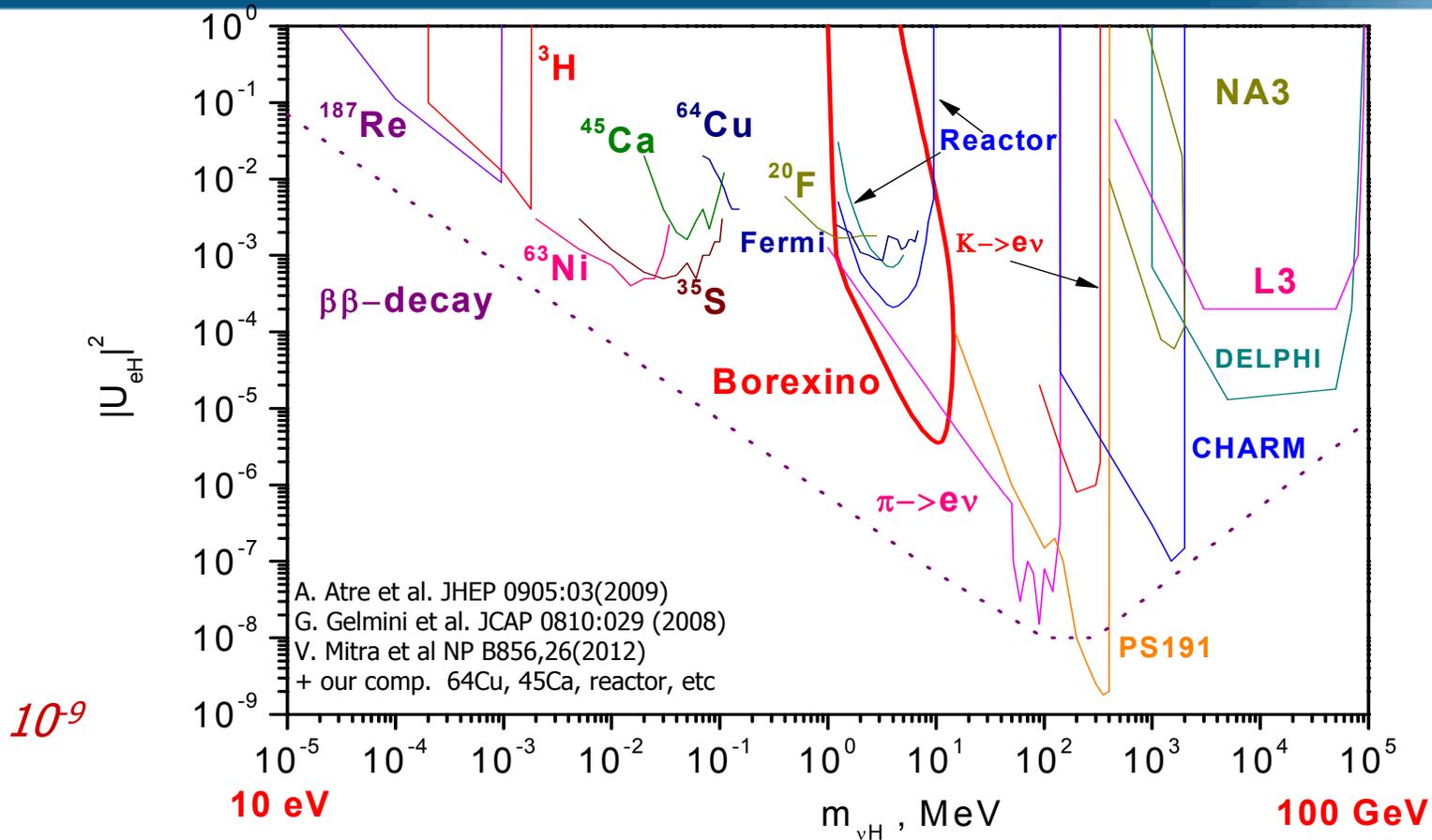
Borexino limits on U_{eH} and $m_{\nu H}$ in (1.1 – 14) MeV range



For the neutrino mass region 1.9-13 MeV the obtained limits on the mixing parameter are stronger than those obtained in previous experiments using nuclear reactors and accelerators.

Limits on the mixing parameter $|U_{eH}|^2$ as a function of neutrino mass $m_{\nu H}$ (90% c.l.). **1:** Borexino data excludes values of $|U_{eH}|^2$ and $m_{\nu H}$ inside region 1. **2:** upper limits from reactor experiments on the search for $\nu_H \rightarrow \nu_L + e^+ + e^-$ decay **3:** upper limits from $\pi \rightarrow e + \nu$ decay. The Borexino detector is not as sensitive for low U_{eH} (due to the low probability of decay) as for the high values of U_{eH} , because in this case HN decays during its flight from the Sun.

Present limits on U_{eH} and m_{ν} in (10 eV – 100 GeV) range



Constraints on $|U_{eH}|^2$ versus $m_{\nu H}$ in the mass range 10 eV–100 GeV from different experiments. If sterile neutrinos are Majorana particles, they would contribute to the probability of $2\nu_0\nu$ decay. The limit on the half-life time of this process can be translated into a bound on the mixing parameter $|U_{eH}|^2$, which scales as $m_{\nu H}^{-1}$ for $m_{\nu H} \leq 300$ MeV and as $m_{\nu H}$ for $m_{\nu H} \geq 400$ MeV, with $|U_{eH}|^2 \approx 10^{-8}$ at $m_{\nu H} = 100$ MeV

1. Реакторные антинейтрино
2. Гео-анти-нейтрино
3. Солнечные анти-нейтрино
4. Фоновые анти-нейтрино (от SN)

Для регистрации используется реакция обратного бета-распада



Два последовательных события в интервале 1 мс с энергиями $E=0.768$ МэВ и 2.2 МэВ являются четким указателем реакции.

Порог реакции составляет 1.8 МэВ

Гео-нейтрино – анти- ν от распадов U, Th, ^{40}K

Physics Letters B 722 (2013) 295–300



ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

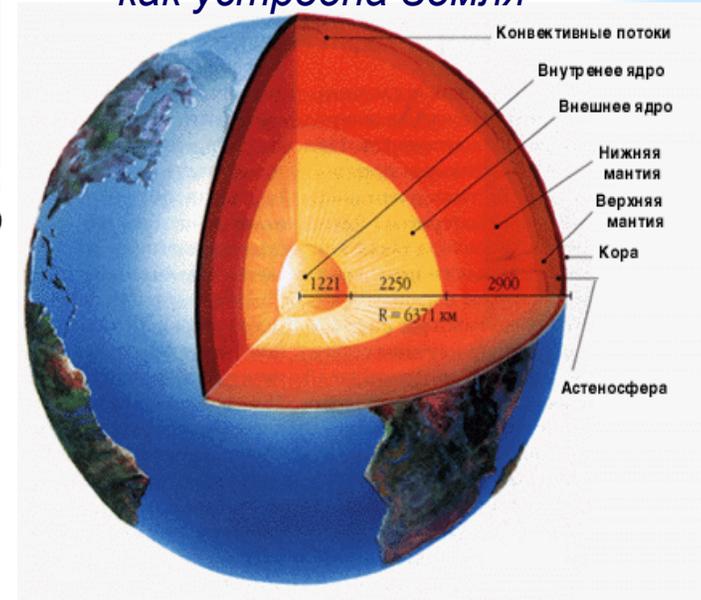


Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino

Borexino Collaboration*

- ^a Dipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 20133 Milano, Italy
- ^b Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA
- ^c University of Hamburg, 22761 Hamburg, Germany
- ^d INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, SS 17 bis Km 18+910, 67010 Assergi (AQ), Italy
- ^e Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA
- ^f APC, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/Irfu, Obs. de Paris, Sorbonne Paris Cité, France
- ^g Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA
- ^h Physics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA
- ⁱ Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow 119234, Russia
- ^j Department of Physics, University of Houston, Houston, TX 77204, USA
- ^k St. Petersburg Nuclear Physics Institute, 188350 Gatchina, Russia
- ^l NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia
- ^m Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi and INFN, Ferrara I-44122, Italy
- ⁿ Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia
- ^o Physik Department, Technische Universität Muenchen, 85748 Garching, Germany
- ^p Institute for Nuclear Research, 03680 Kiev, Ukraine
- ^q Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69029 Heidelberg, Germany
- ^r Dipartimento di Fisica, Università and INFN, Genova 16146, Italy
- ^s M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30059 Cracow, Poland
- ^t Dipartimento di Chimica, Università e INFN, 06123 Perugia, Italy
- ^u Physics and Astronomy Department, University of California Los Angeles, Los Angeles, CA 90095, USA

Новая возможность узнать как устроена Земля



Тепловой поток (30 – 46) ТВт

Природа неясна

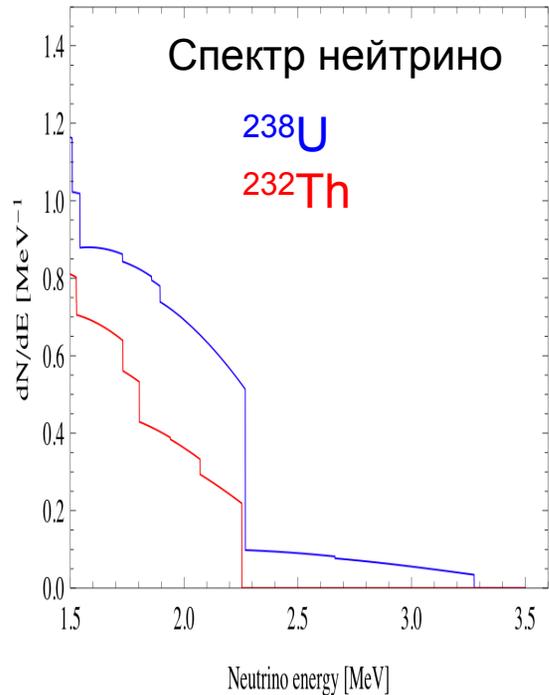
Гравитация, яд реактор, фазовые переходы, химические реакции

Какова доля радиогенного (U, Th, ^{40}K) тепла?

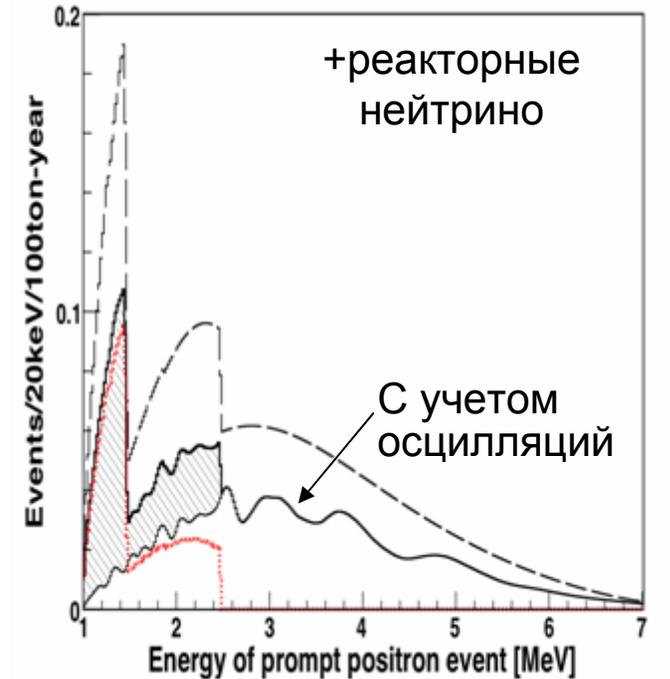
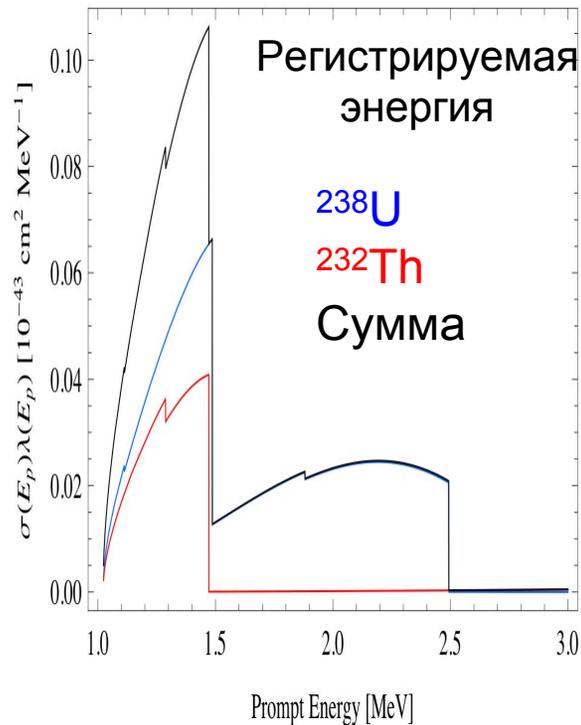
Стандартная BSE модель предсказывает 19 ТВт

Ожидаемый спектр позитронов

Decay	E_{\max} [MeV]	Q [MeV]	Q - $\langle E_\nu \rangle$ [MeV]	$\text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$	W kg^{-1}
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e^- + 6\nu_e$	3.25	51.7	47.7	7.41×10^7	0.94×10^{-4}
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e^- + 4\nu_e$	2.25	42.7	40.4	1.62×10^7	0.26×10^{-4}
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \nu_e$ (89%)	1.311	1.311	0.59	2.30×10^8	0.22×10^{-4}
$^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar} + e^- + \nu_e$ (11%)	0.044	1.505	1.461	0.28×10^8	0.67×10^{-5}

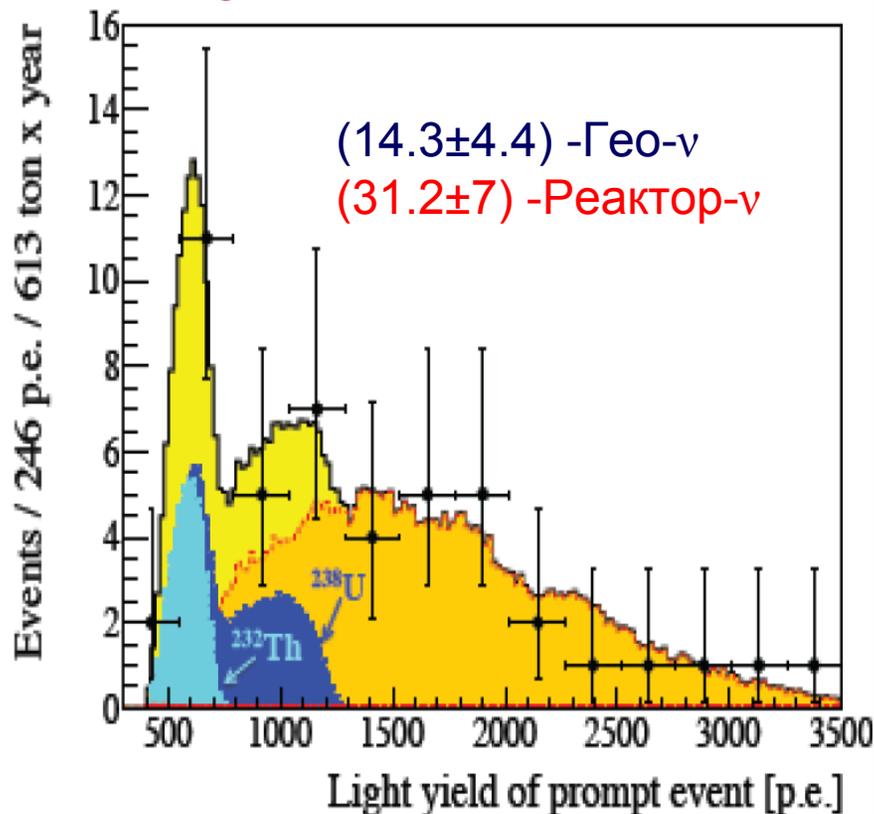


$$\Phi_{\nu\text{-geo}} \sim 10^6 \text{ v/cm}^2 \text{ c}$$

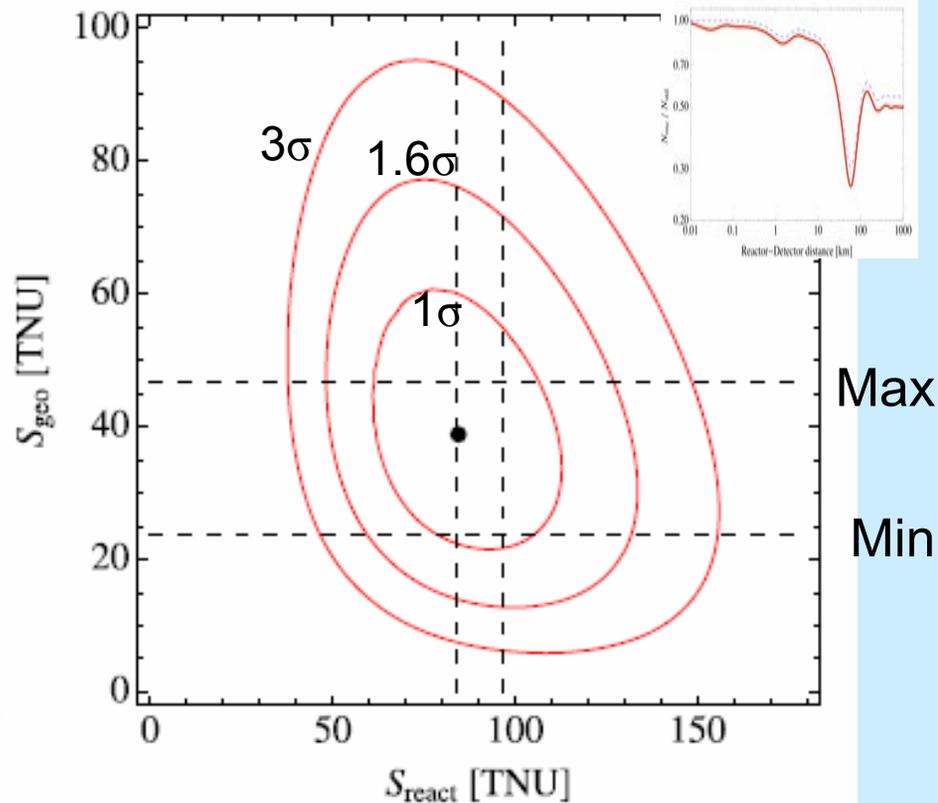


Результат Борексино 2013 г. за 1353 суток

$$S_{\nu\text{-geo}} = 38.8 \pm 12 \text{ TNU}$$

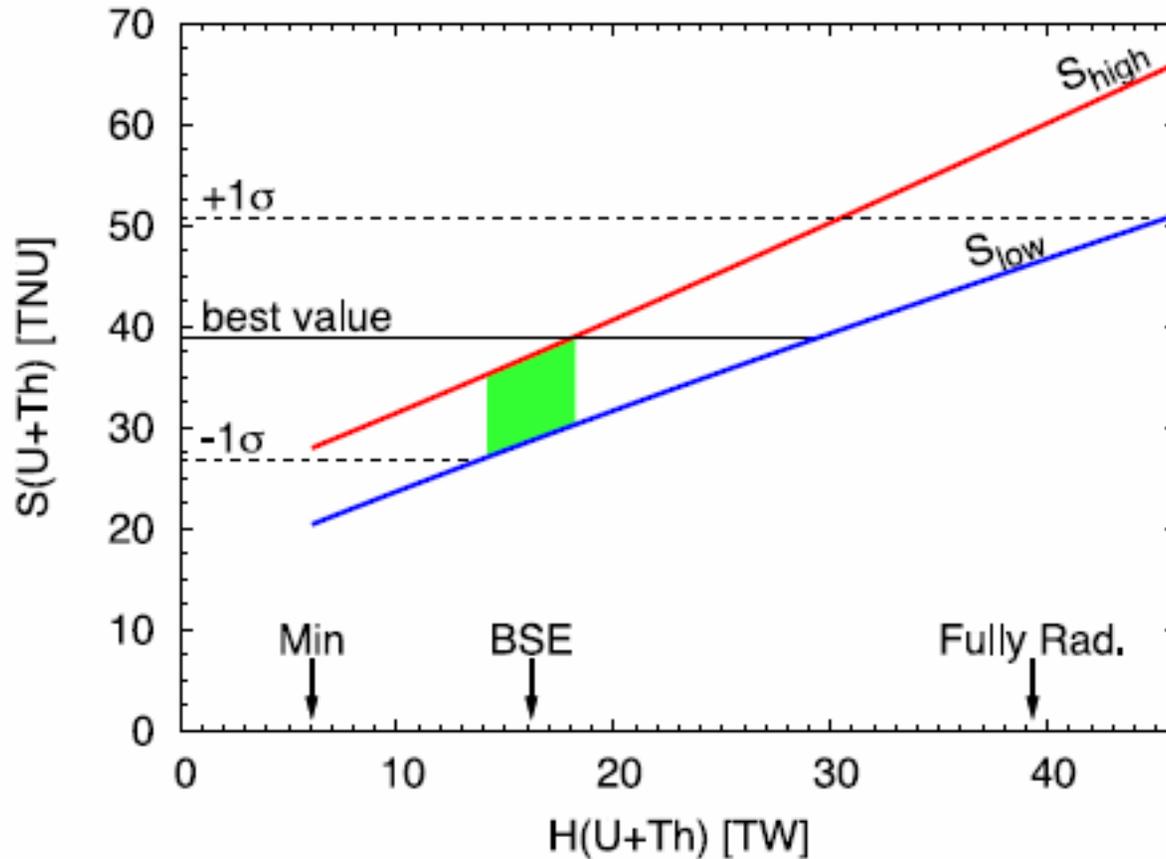


$$S_{\nu\text{-reac}} = 84.5 \pm 18 \text{ TNU}$$



1. Мощность ядерного реактора в центре Земли <4.5 ТВт (95% у.д.)
2. 21 событие (E>1300 p.e.) от реакторных ν при фоне (0.24 ± 0.13) .
Без осцилляций (39.9 ± 2.7) с -- (22.0 ± 1.6) P_{ee} = (55.1 ± 5.5)% = const для L > 300 км. Ближайший реактор 416 км, <L>=1200 км..

Поток нейтрино vs радиогенное тепло (U,Th)



Модель максимального радиогенного тепла $H(U+Th+K) = 47 \pm 2$ ТВт, что отличается на $\sim 1\sigma$. С параметрами BSE распределение U, Th и K = 19.1, 20.2 и 7.7 ТВт. Красная – максимальная разрешенная гео-моделями концентрация в коре, остальное в мантии, синяя – наоборот. Хорошее согласие с BSE.



RECEIVED: May 24, 2013

ACCEPTED: July 9, 2013

PUBLISHED: August 8, 2013

SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino

^a APC, Univ. Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/Irfu, Obs. de Paris, Sorbonne Paris Cité, France

^b Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

^c Dipartimento di Fisica, Università e INFN, Genova 16146, Italy

^d M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagellonian University, Krakow, 30059, Poland

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

^f Kiev Institute for Nuclear Research, Kiev 06380, Ukraine

^g NRC Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia

^h Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, Milano 20133, Italy

ⁱ Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg 69029, Germany

^j Dipartimento di Chimica, Università e INFN, Perugia 06123, Italy

^k Physics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, U.S.A.

^l St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia

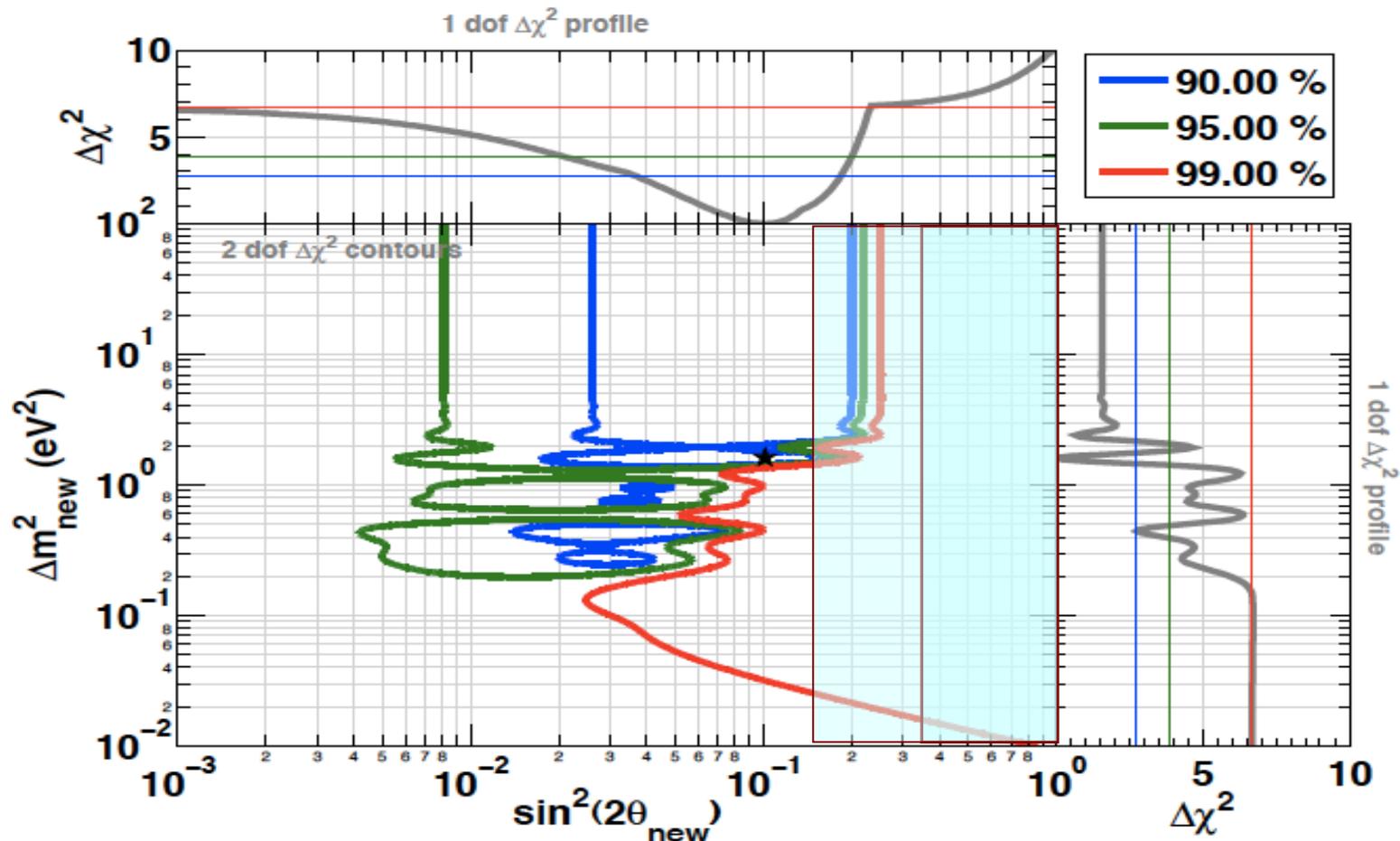
^m Physik Department, Technische Universität München, Garching 85747, Germany

ⁿ Physics Department, University of Massachusetts, Amherst MA 01003, U.S.A.

^o Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, U.S.A.

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

Ограничение на θ_{14} из солнечных нейтрино



A. Palazzo, arXiv:1201.4280v1

$\text{Sin}^2(2\theta_{14}) < 0.36$ для $\theta_{13} = 0$ и $\text{Sin}^2(2\theta_{14}) < 0.14$ для $\text{Sin}^2(\theta_{13}) = 0.025$

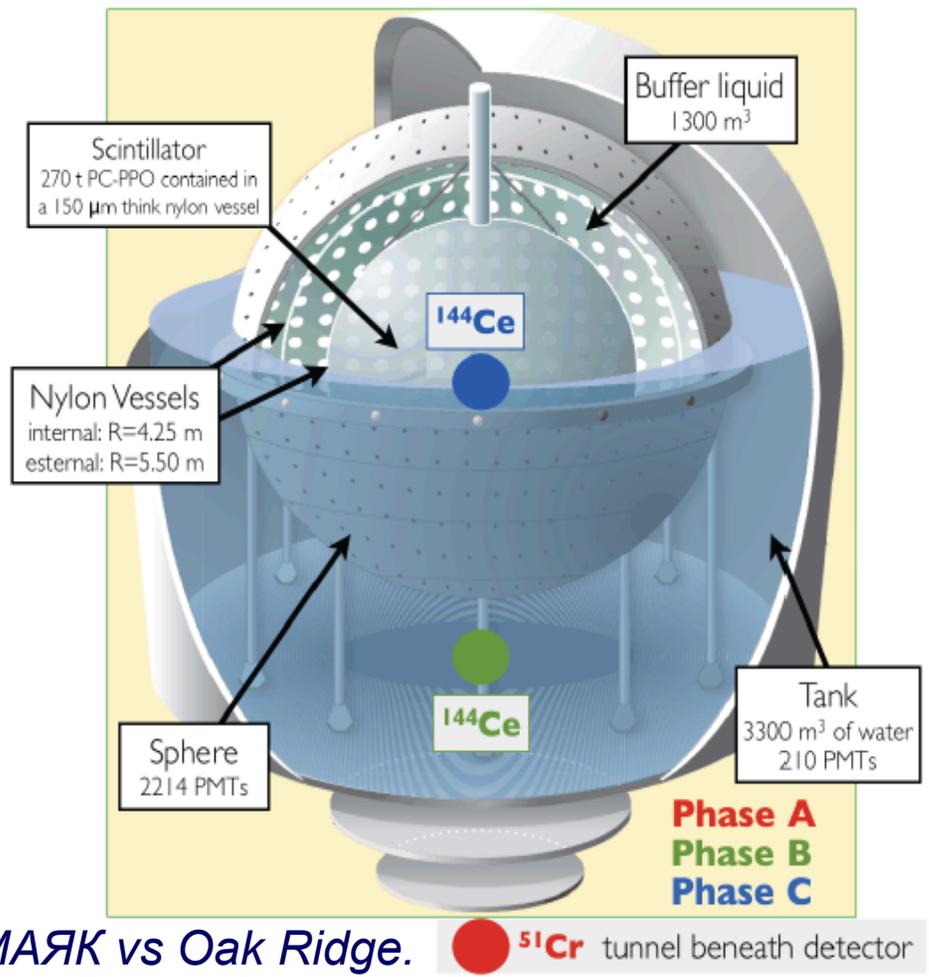
Проект SOX: Short distance Oscillations with BoreXino

Источники нейтрино:

- 1) Калибровки детектора по энергии и эффективности
- 2) Поиска магнитного момента

Стерильное нейтрино:

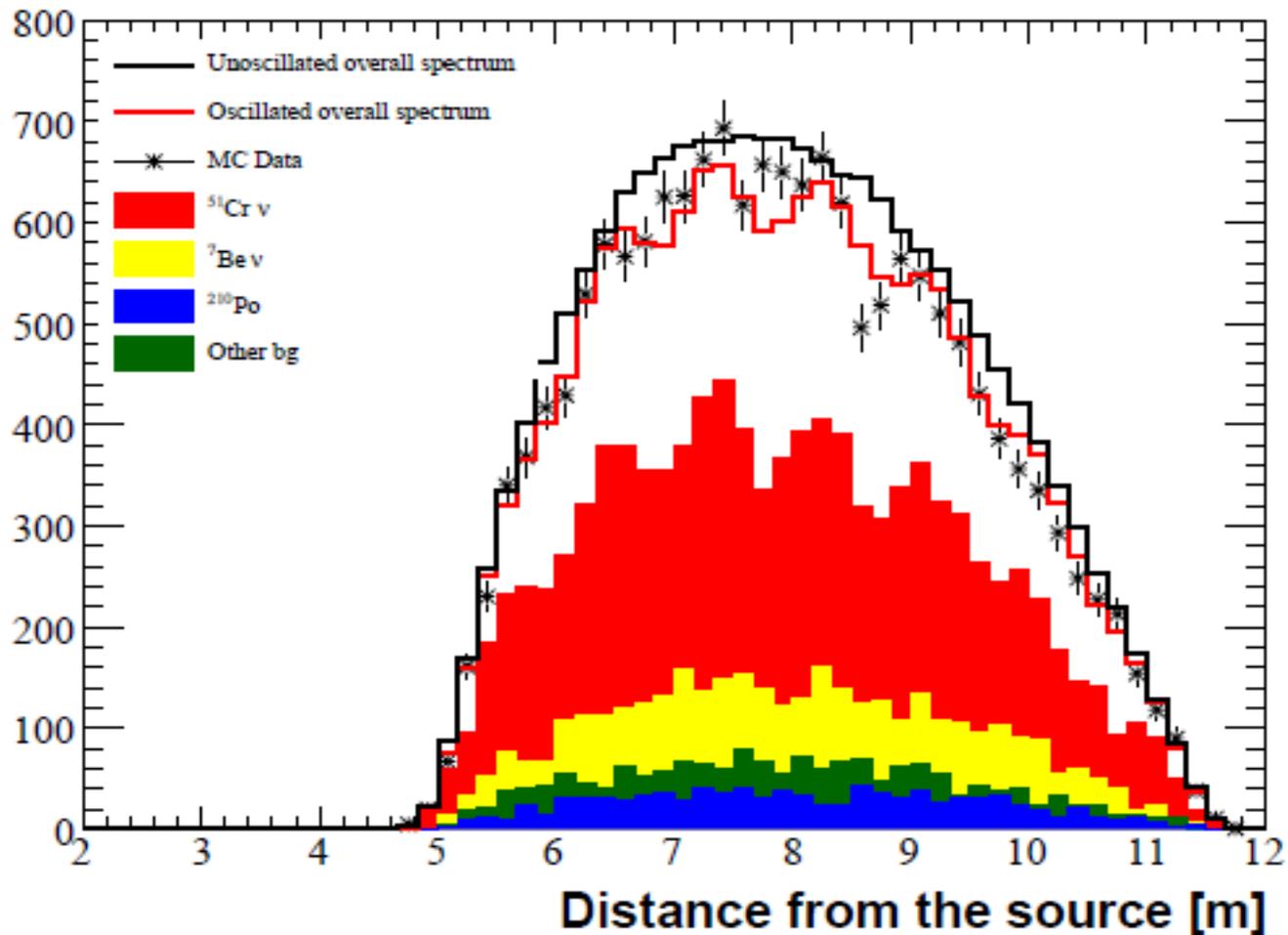
- 1) разрешение по координате **14 см при 1 МэВ**
- 2) по энергии **5% при 1 МэВ**
два подхода к поиску осцилляций на короткой базе
- 1) Использовать абсолютную интенсивность
- 2) использовать зависимость скорости счета от расстояния



МАЯК vs Oak Ridge. ^{51}Cr tunnel beneath detector

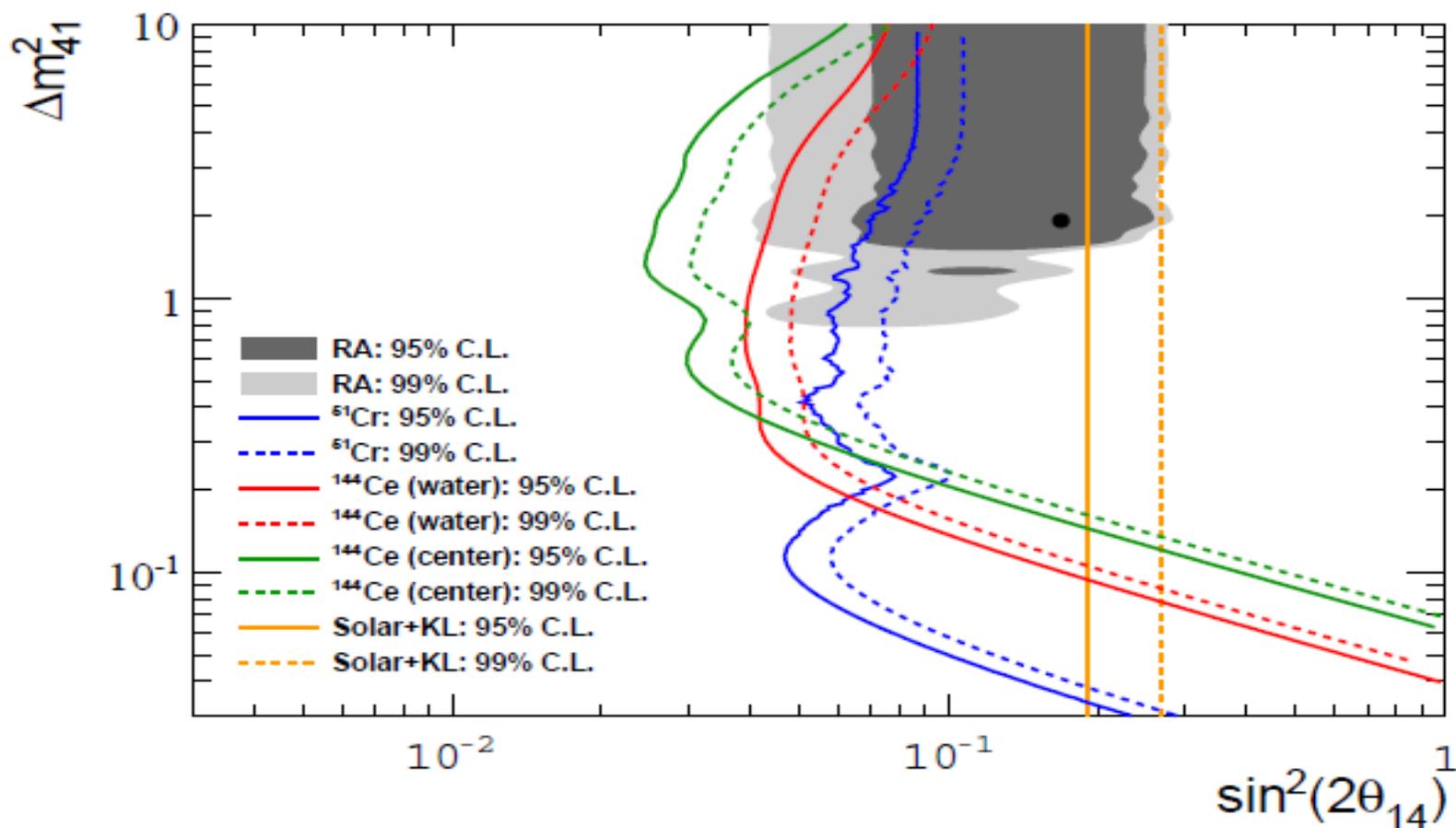
Три этапа поиска осцилляций нейтрино с источниками нейтрино ^{51}Cr и ^{144}Ce

Сигнал от ^{51}Cr -нейтрино (750 кэВ)



Ожидаемое распределение скорости счета в зависимости от расстояния до источника ^{51}Cr для $dm^2 = 2 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta = 0.3$. При МС симуляции используются реально измеренный фон детектора.

Чувствительность SOX к стерильному нейтрину



^{51}Cr : 370 PBq на расстоянии 8.25 м. 100 суток накопления при 90 % живого времени. 15 недель до этого измерение фона. Центральный детектор 133 т. **^{144}Ce :** анти- ν с $E_0=3.0$ МэВ. Фаза В. 75 PBq (75 kCi) на поверхности СС. Радиус сцинтиллятора увеличен с 4.25 до 5.5 м.

Планы коллаборации Борексино и новые задачи

0. ФАЗА II (с окт 2011) после очистки сцинтиллятора с зимы 2010 с более низким содержанием ^{75}Kr и ^{210}Bi

1. Измерение pp – нейтрино

$$(\mu_{\text{eff}}, e \rightarrow \nu \gamma, \nu_H \rightarrow \nu_L \gamma)$$

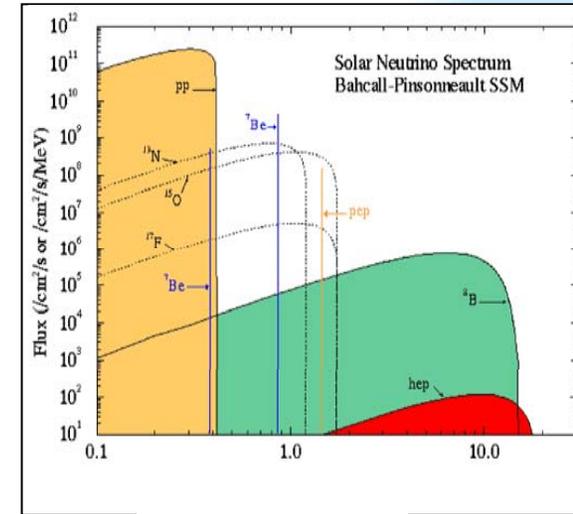
3. Измерение CNO- нейтрино

4. Стерильные нейтрино (^{51}Cr по

готовности источника. ^{144}Ce в центре – по окончанию программы с.н.)

4. Увеличение статистики для антинейтрино, ^7Be -, ^8B -, pep -нейтрино, редких процессов

5. Поиск двойного бета-распада с Борексино (^{130}Xe , ^{125}Nd)



Поиск солнечных аксионов и аксионов темной материи

Классификация экспериментов

Детектирование

Образование

	$g_{A\gamma}$	g_{AN}	g_{Ae}
$g_{A\gamma}$	Конверсия в магнитном поле CAST, PVLAS, Tokyo Helioscope,	резонансное поглощение аксионов ядрами ^{169}Tm 2008-11	Аксиоэлектрический эффект в Si-, Ge-детекторах 2014
g_{AN}	Конверсия в поле ядра 2014	Поиск резонансного поглощения аксионов ядрами ^{57}Fe 2008-10	Аксиоэлектрический эффект Bi (5.5 МэВ) 2010-13
g_{Ae}	Конверсия в магнитном поле	резонансное поглощение аксионов ядрами ^{169}Tm 2010-2012	Аксиоэлектрический эффект в Si-, Ge-детекторах 2012

ПИЯФ аксион в Particle Data Group (2013)

A^0 (Axion) and Other Light Boson (X^0) Searches in Nuclear Transitions

<u>VALUE</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
$< 8.5 \times 10^{-6}$	90	90 DERBIN	02 CNTR	^{125m}Te decay
		91 DEBOER	97C RVUE	M1 transitions
$< 5.5 \times 10^{-10}$	95	92 TSUNODA	95 CNTR	^{252}Cf fission, $A^0 \rightarrow ee$
$< 1.2 \times 10^{-6}$	95	93 MINOWA	93 CNTR	$^{139}\text{La}^* \rightarrow ^{139}\text{La}A^0$
$< 2 \times 10^{-4}$	90	94 HICKS	92 CNTR	^{35}S decay, $A^0 \rightarrow \gamma\gamma$
$< 1.5 \times 10^{-9}$	95	95 ASANUMA	90 CNTR	^{241}Am decay
$< (0.4-10) \times 10^{-3}$	95	96 DEBOER	90 CNTR	$^8\text{Be}^* \rightarrow ^8\text{Be}A^0,$ $A^0 \rightarrow e^+e^-$
$< (0.2-1) \times 10^{-3}$	90	97 BINI	89 CNTR	$^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{16}\text{O}X^0,$

Invisible A^0 (Axion) MASS LIMITS from Astrophysics and Cosmology

<u>VALUE (eV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
none $0.7-3 \times 10^5$		166 CADAMURO	11 COSM	D abundance
<105	90	167 DERBIN	11A CNTR	D, solar axion
		168 ANDRIAMON..10	CAST	K, solar axions
< 0.72	95	169 HANNESTAD	10 COSM	K, hot dark matter
		170 ANDRIAMON..09	CAST	K, solar axions
<191	90	171 DERBIN	09A CNTR	K, solar axions
< 334	95	172 KEKEZ	09 HPGE	K, solar axions
< 1.02	95	173 HANNESTAD	08 COSM	K, hot dark matter

ПИЯФ аксион в Particle Data Group (2013)

Limit on Invisible A^0 (Axion) Electron Coupling

The limit is for $G_{Aee} \partial_\mu \phi A \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 e$ in GeV^{-1} , or equivalently, the dipole-dipole potential $\frac{G_{Aee}^2}{4\pi} ((\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) - 3(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{n})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{n}))/r^3$ where $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$.

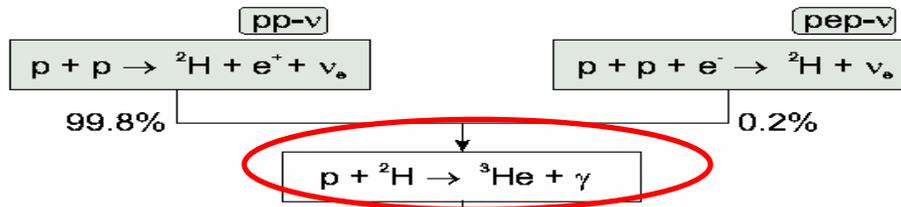
<u>VALUE (GeV^{-1})</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
$< 7 \times 10^{-10}$	95	1 CORSICO	12 ASTR	White dwarf cooling
$< 2.2 \times 10^{-7}$	90	2 DERBIN	12 CNTR	Solar axions
$< 0.02 - 1 \times 10^{-7}$	90	3 AALSETH	11 CNTR	$m_{\Delta 0} = 0.3 - 8 \text{ keV}$

Invisible A^0 (Axion) Limits from Nucleon Coupling

Limits are for the axion mass in eV.

<u>VALUE (eV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
$< 8.6 \times 10^3$	90	1 BELLI	12 CNTR	Solar axion
$< 1.41 \times 10^2$	90	2 BELLINI	12B BORX	Solar axion
$< 1.45 \times 10^2$	95	3 DERBIN	11 CNTR	Solar axion
		4 BELLINI	08 CNTR	Solar axion
		5 ADELBERGER 07		Test of Newton's law

Аксионы, возникающие в реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ (5.5 МэВ)



Search for Solar Axions Produced in the $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ Reaction

A.V. Derbin^a, A.S. Kayunov^b and V. N. Muratova^c

arXiv:1007.3387v1 [hep-ex] 20 Jul 2010

St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Gatchina, Russia 188300

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2010, том 74, № 6, с. 848–853

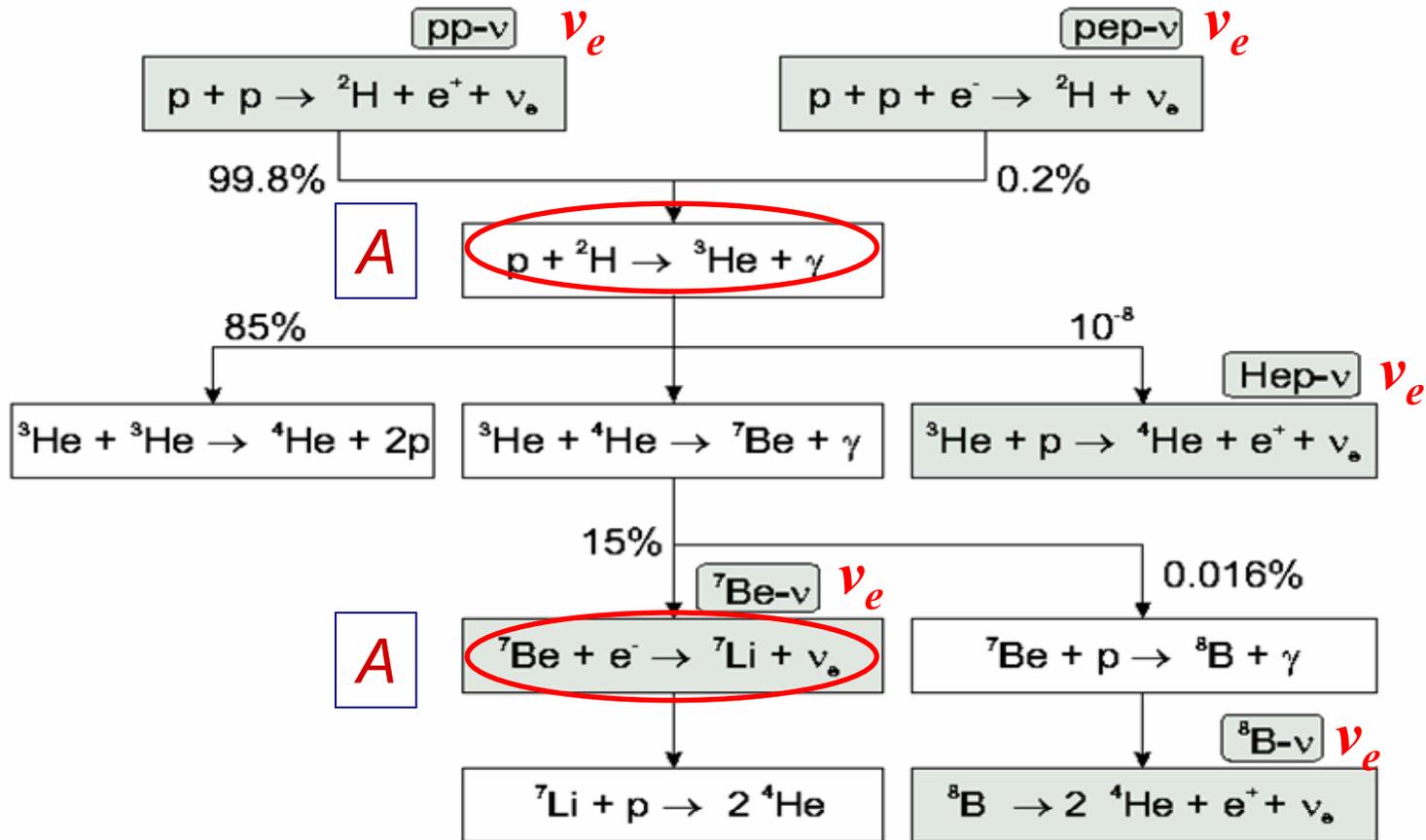
ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ АКСИОНОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕАКЦИИ $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$

© 2010 г. А. В. Дербин, А. С. Каюнов, В. Н. Муратова

Учреждение Российской академии наук Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константина РАН



Солнечный pp-цикл: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + (26.7 \text{ МэВ})$



Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Полная выделяемая энергия 26.7 МэВ, из которой 0.6 МэВ уносят нейтрино. Мы искали аксионы, излучаемые в 2-х реакциях, которые прямо связаны с реакциями в которых производятся **pp-** и **${}^7\text{Be-}$** нейтрино.

The fluxes of axions at the Earth in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

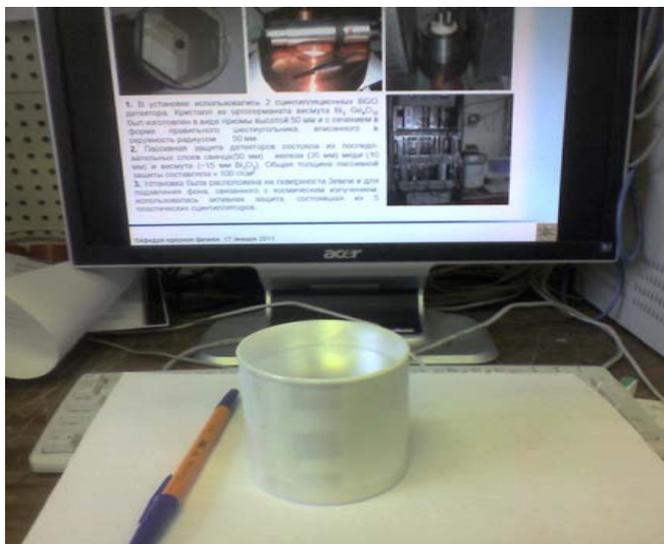
$$\begin{aligned}\Phi_{A0}(7\text{Be}) &\cong 0.1 \times \Phi_{\nu 7\text{Be}} (g_{AN}^0 + g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3 \\ &\cong 5 \times 10^8 (g_{AN}^0 + g_{AN}^3)^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{A0}(pd) &\cong 0.54 \times \Phi_{\nu pp} (g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3 \\ &\cong 3.3 \times 10^{10} (g_{AN}^3)^2\end{aligned}$$

The expected solar axion flux can thus be expressed in terms of the ${}^7\text{Be}$ - and pp -neutrino fluxes, which are 4.9×10^9 and $6.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The flux of 5.5 MeV axions is in 60 times more than 478 keV axions. The additional advantage to look for 5.5 MeV axions is that a background level is lower usually for higher energy. 4 reactions were selected to detect axions.



Экспериментальная установка с 3" BGO (Гатчина)



1. В установке использовались сцинтилляционный BGO детектор. Кристалл из ортогерманата висмута **2.5 кг $Bi_3Ge_4O_{12}$** был изготовлен в виде цилиндра высотой **76 мм** и диаметром **76 мм**.
2. Пассивная защита детекторов состояла из слоев свинца (100 мм), висмута (~20 мм Bi_2O_3) и меди (10 мм). Общая толщина пассивной защиты составляла \approx **130 г/см²**.
3. Установка была расположена на поверхности Земли и для подавления фона, связанного с космическим излучением, использовалась активная защита, состоявшая из **5 пластиковых сцинтилляторов**.



Аксиоэлектрический эффект на атомах Bi

Eur. Phys. J. C (2013) 73:2490
DOI 10.1140/epjc/s10052-013-2490-y

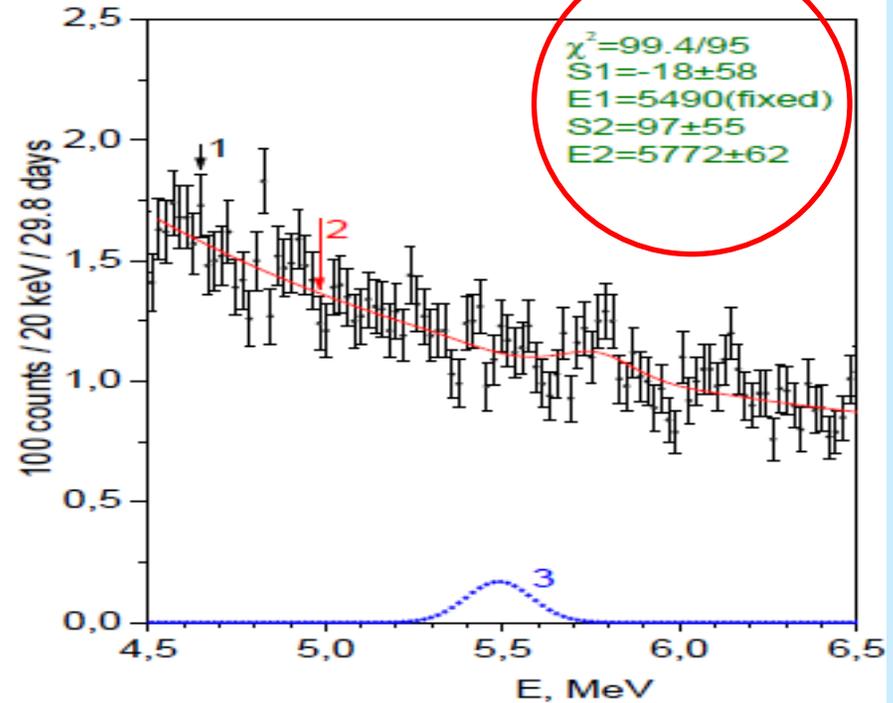
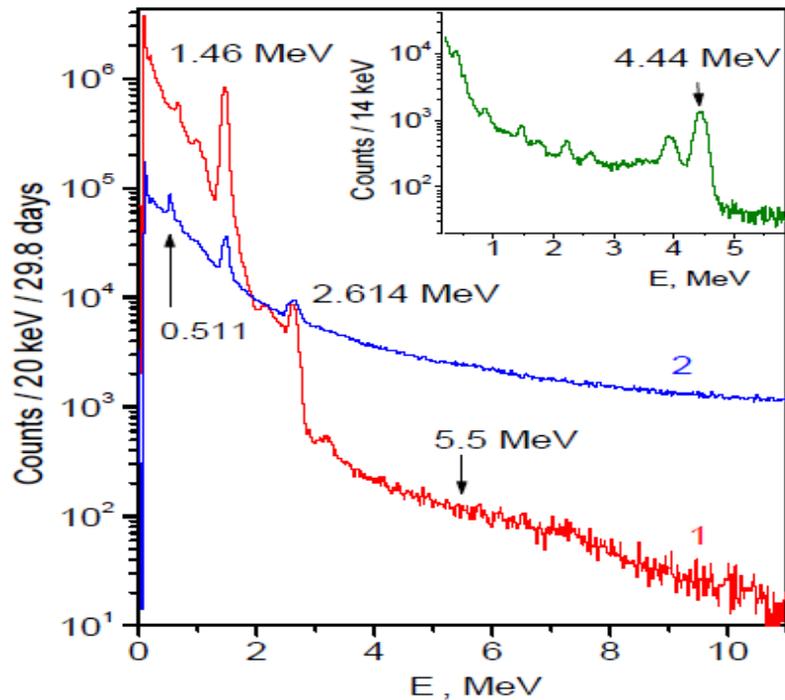
THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL C

Regular Article - Experimental Physics

2013

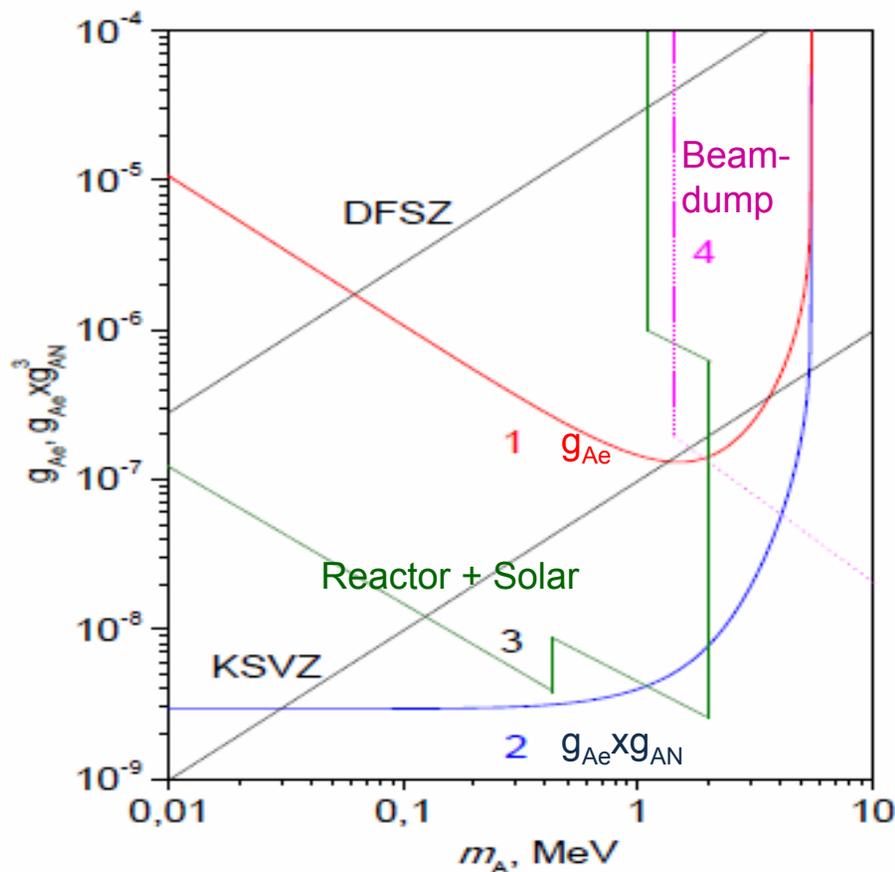
Search for axioelectric effect of 5.5 MeV solar axions using BGO detectors

A.V. Derbin^a, S.V. Bakhlanov, I.S. Dratchnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova
St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188300, Russia



Калибровка по линии 4.44 от AmBe. Предел $S2 < 85$ соб. (90% у.д.)

Сравнение с результатами других экспериментов



Наиболее строгий верхний предел на константу g_{Ae} в области масс $m_A \approx 1$ МэВ получен коллаборацией **Texono**, изучавшей комптоновскую конверсию аксиона вблизи ядерного реактора, и колл. **BOREXINO** в эксперименте с солнечными аксионами. Планируем подземные болометрические измерения, что позволит поднять чувствительность в ~ 20 раз.

Солнечные аксионы с энергией 1-10 кэВ

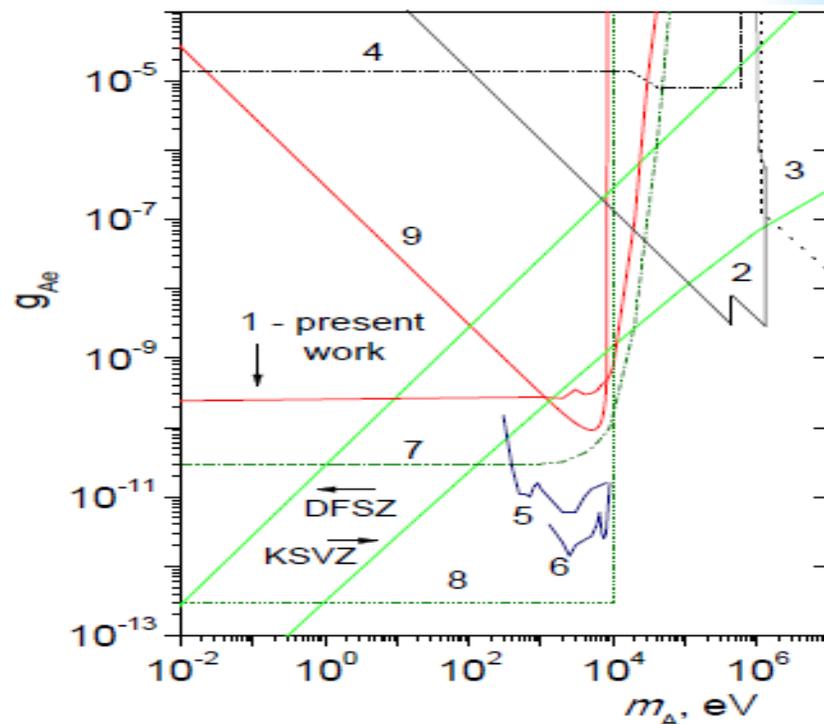
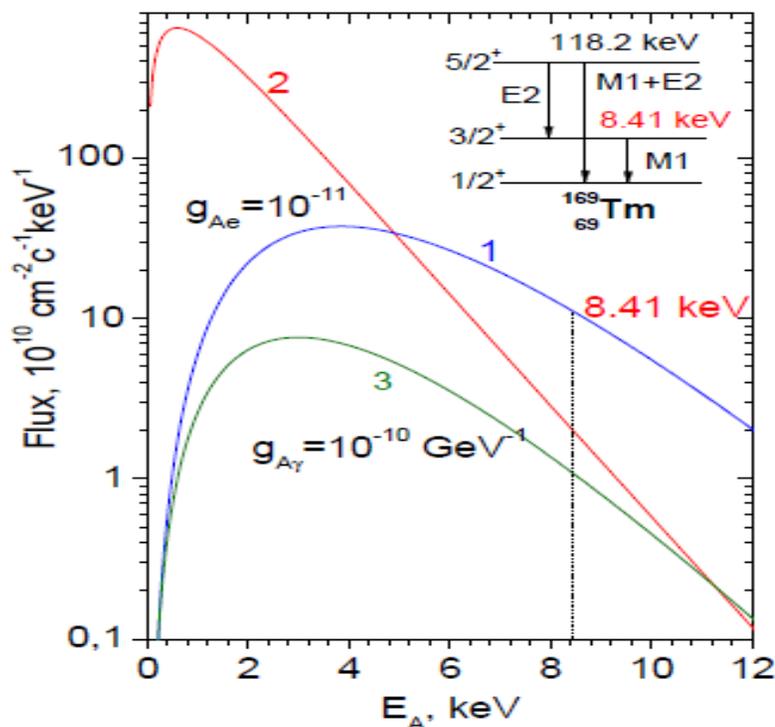
9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs

Search for solar axions produced by **Compton** process and **bremsstrahlung** using the **resonant** absorption and **axioelectric** effect

arXiv:1312.0187

A.V. Derbin, I.S. Dratchnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov

St.Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia 188300



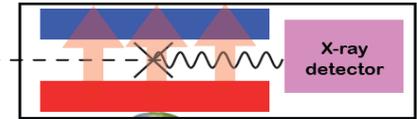
Начато выращивание кристалла, содержащего Tm. Создание сч. болометра позволит поднять чувствительность в 10^6 раз при массе детектора 1 грамм

IAXO: International Axion Observatory

CERN Axion Solar Telescope

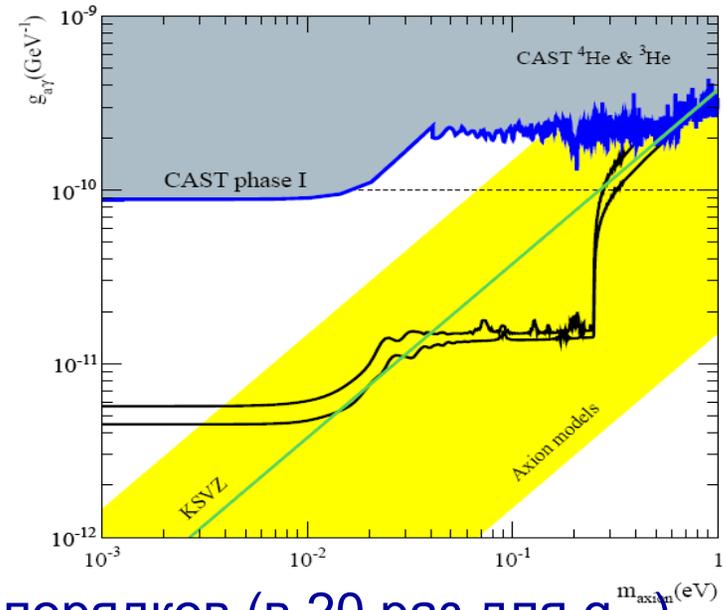
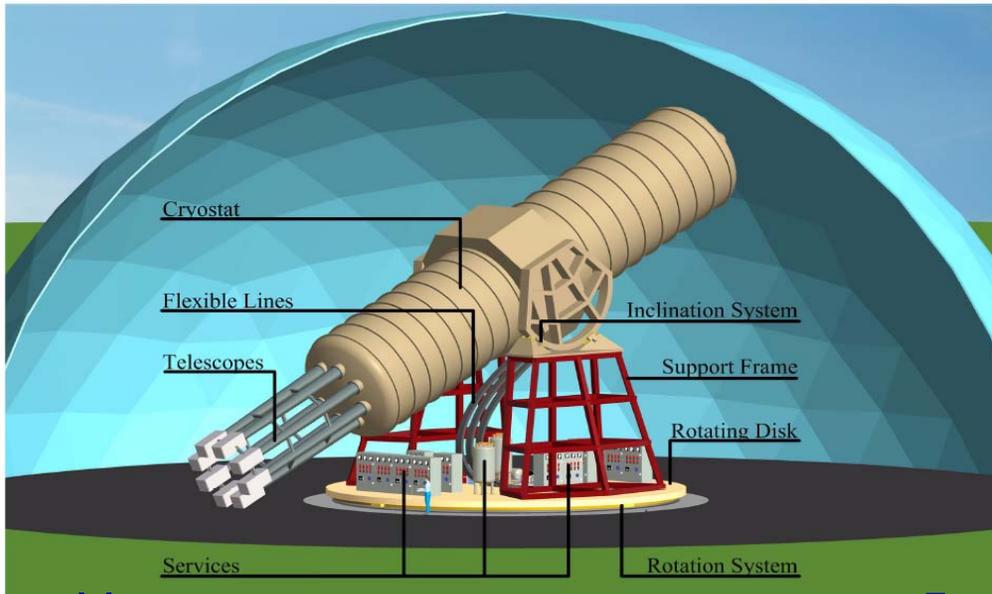


ALPs are produced inside the Sun via the two photon coupling (and others) and scape easily



← **CAST**
IAXO
↓

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



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

IAXO: International AXion Observatory

The International Axion Observatory (IAXO)

J. K. Vogel¹, F. T. Avignone², G. Cantatore³, J. M. Carmona⁴, S. Caspi⁵, S. A. Cetin⁶, F. E. Christensen⁷, A. Dael⁸, T. Dafni⁴, M. Davenport⁵, A. V. Derbin⁹, K. Desch¹⁰, A. Diago⁴, A. Dudarev⁵, C. Eleftheriadis¹¹, G. Fanourakis¹², E. Ferrer-Ribas⁸, J. Galán⁸, J. A. García⁴, T. Geralis¹², B. Gimeno¹³, I. Giomataris⁸, S. Gninenko¹⁴, H. Gómez⁴, J. G. Garza⁴, C. J. Hailey¹⁵, T. Hiramatsu¹⁶, D. H. H. Hoffmann¹⁷, F. J. Igua⁴, I. G. Irastorza⁴, J. Isern¹⁸, J. Jaeckel¹⁹, K. Jakovčić²⁰, J. Kaminski¹⁰, M. Kawasaki²¹, M. Krčmar²⁰, C. Krieger¹⁰, B. Lakić²⁰, A. Lindner²², A. Lioliosa¹¹, G. Luzón⁴, I. Ortega⁴, T. Papaevangelou⁸, M. J. Pivovarov⁴, G. Raffelt²³, J. Redondo²³, A. Ringwald²¹, S. Russenschuck⁵, J. Ruz¹, K. Saikawa²¹, I. Savvidis¹¹, T. Sekiguchi²¹, I. Shilon⁵, P. S. Silva⁵, H. Ten Kate⁵, A. Tomas⁴, S. Troitsky¹⁴, K. van Bibber²⁵, P. Vedrín⁸, J. A. Villar⁴, L. Walckiers⁵, W. Wester²⁶, S. C. Yildiz⁶, K. Zioutas^{5,27}

¹Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, California, USA

²Physics Department, University of South Carolina, Columbia, SC, USA

³Instituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Trieste and Università di Trieste, Trieste, Italy

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

⁵European Organization for Nuclear Research (CERN), Genève, Switzerland

⁶Dogus University, Istanbul, Turkey

⁷National Space Institute (DTU Space), Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark

⁸IRFU, Centre d'Études Nucléaires de Saclay (CEA-Saclay), Gif-sur-Yvette, France

⁹St.Petersburg Nuclear Physics Institute, St.Petersburg, Russia

ПЯФ

¹⁰Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany

¹¹Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

¹²National Center for Scientific Research Demokritos, Athens, Greece

¹³Instituto de Ciencias de las Materiales, Universidad de Valencia, Valencia, Spain

¹⁴Institute for Nuclear Research (INR), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ИЯИ

¹⁵Columbia University Astrophysics Laboratory, New York, NY, USA

¹⁶Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

¹⁷Technische Universität Darmstadt, IKP, Darmstadt, Germany

¹⁸Institut de Ciències de l'Espai (CSIC), Facultat de Ciències, Campus UAB, Bellaterra, Spain

¹⁹Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham, United Kingdom

²⁰Rudjer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

²¹Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan

²²Deutsches Elektronen Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

²³Max-Planck-Institut für Physik, Munich, Germany

²⁴Department of Nuclear Engineering, University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA

²⁵Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, USA

²⁶Physics Department, University of Patras, Patras, Greece

2013 – 38 институтов

Основные результаты работы лаборатории в 2013

1. В лаборатории низкофоновых измерений проведен поиск аксиоэлектрического эффекта для солнечных аксионов с энергией 5.5 МэВ на атомах висмута с помощью сцинтилляционных детекторов BGO. Впервые из данной реакции установлены пределы на константы связи аксиона с электронами и нуклонами $|g_{\text{Ae}} \times g_{\text{zAN}}| < 2.9 \times 10^{-9}$ (90% у.д.). Результаты опубликованы в журнале *European Physical Journal*, C73 2490 (2013)

2. Сотрудниками лаборатории низкофоновых измерений ОНИ ПИЯФ, участвующими в эксперименте Борексино, получены новые ограничения на параметры смешивания тяжелого стерильного нейтрино $|U_{eH}|^2 < (10^{-3} - 4 \times 10^{-6})$, которые в (1.5-1000) раз, в зависимости от массы нейтрино, более строгие, чем достигнутые в реакторных и ускорительных экспериментах. Результаты опубликованы в журнале *Physical Review D* 88 072010 (2013).

3. Сотрудники лаборатории продолжали работы по поиску солнечных и реликтовых аксионов с использованием реакций аксиоэлектрического эффекта и резонансного поглощения и продолжали участвовать в работах коллабораций Borexino, DarkSide и IAXO.

Планы лаборатории на 2014 г.

1) ПИЯФ

- а) Выращивание $Tm(XY)$ кристаллов (ИНХ, НГУ) и создание сцинтилляционных $Tm(XY)$ детекторов -> болометров.
- б) Измерения с $Tm(XY)$ -, BGO- и Si-детекторами
- в) Poseidon, IAXO, Lucifer, ^{83}Kr – R&D работы в к. и. г.

2) Борексино – нейтрино

- а) нестандартные взаимодействия нейтрино
- б) участие в работе 6-ти рабочих групп (pp-нейтрино)
Драчнев в LNGS -> CNO нейтрино
- в) Семенов, Унжаков -> 6 чел./ мес.на постдок

3) DarkSide – темная материя

- а) Работы в ПИЯФ (Ti, SiO_2 , CF_2)
- б) Унжаков, Семенов -> 4 месяца LNGS

4) Новые IAXO, LUCIFER – нейтрино, аксион

DarkSide collaboration

D. Akimov^k, T. Alexander^d, D. Alton^a, K. Arisaka^v, H.O. Back^m, P. Beltrame^v, J. Benziger^l, A. Bolozdynya^k, G. Bonfiniⁱ, A. Brigatti^r, J. Brodsky^m, L. Cadonati^s, F. Calaprice^m, A. Candela^l, H. Cao^m, P. Cavalcante^l, A. Chavarria^m, A. Chepurinov^j, S. Chidzik^m, D. Cline^v, A.G. Cocco^s, C. Condon^m, D. D'Angelo^r, S. Davini^w, E. De Haas^m, A. Derbinⁿ, G. Di Pietro^r, I. Dratchnevⁿ, D. Durben^b, A. Empl^w, A. Etenko^k, A. Fan^v, G. Fiorillo^s, K. Fomenkoⁱ, F. Gabriele^m, C. Galbiati^m, S. Gazzana^l, C. Ghag^p, C. Ghianoⁱ, A. Goretti^m, L. Grandi^m, M. Gromov^l, M. Guar^f, C. Guo^f, G. Guray^m, E. V. Hungerford^w, Al. Ianni^r, An. Ianni^m, A. Kayunovⁿ, K. Keeter^b, C. Kendziora^d, S. Kidner^r, V. Kobychiev^f, G. Koh^m, D. Korablev^b, G. Korga^w, E. Shields^m, P. Lf^r, B. Loer^d, P. Lombardi^r, C. Love^o, L. Ludhova^r, L. Lukyanchenko^l, A. Lund^x, K. Lung^v, Y. Ma^f, I. Machulin^k, J. Maricic^c, C.J. Martoff^o, Y. Meng^v, E. Meroni^r, P.D. Meyers^m, T. Mohayai^d, D. Montanari^d, M. Montuschiⁱ, P. Mosteiro^m, B. Mount^b, V. Muratovaⁿ, A. Nelson^m, A. Nemptow^s, N. Nurakhov^k, M. Orsiniⁱ, F. Ortica^l, M. Pallavicini^q, E. Pantic^v, S. Parmeggiano^r, R. Parsells^m, N. Pelliccia^l, L. Perasso^d, F. Perfetto^s, L. Pinsky^w, A. Pocar^s, S. Pordes^d, G. Ranucci^r, A. Razetoⁱ, A. Romani^k, N. Rossi^{h,m}, P. Saggeseⁱ, R. Saldanha^l, C. Salvo^q, W. Sands^m, M. Seigar^r, D. Semenovⁿ, M. Skorokhvatov^k, O. Smimov^b, A. Sotnikov^b, S. Sukhotin^k, Y. Suvorov^v, R. Tartagliaⁱ, J. Tatarowicz^o, G. Testera^d, A. Teymourian^v, J. Thompson^b, E. Unzhakovⁿ, R.B. Vogelaar^r, H. Wang^v, S. Westerdale^m, M. Wojcik^a, A. Wright^m, J. Xu^m, C. Yang^e, S. Zavatarelli^q, M. Zehfus^b, W. Zhong^e, G. Zuzel^l

(DarkSide Collaboration)

^aPhysics and Astronomy Department, Augustana College, Sioux Falls, SD 57197, USA

^bSchool of Natural Sciences, Black Hills State University, Spearfish, SD 57799, USA

^cDepartment of Physics, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA

^dFermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL 60510, USA

^eInstitute of High Energy Physics, Beijing 100049, China

^fInstitute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev 03680, Ukraine

^gSmoluchowski Institute of Physics, Jagellonian University, Krakow 30059, Poland

^hJoint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

ⁱLaboratori Nazionali del Gran Sasso, SS 17 bis Km 18+910, Assergi (AQ) 67010, Italy

^jSkobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

^kNational Research Centre Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia

^lChemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

^mPhysics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

ⁿSt. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia

^oPhysics Department, Temple University, Philadelphia, PA 19122, USA

^pDepartment of Physics and Astronomy, University College London, London WC1E 6BT, United Kingdom

^qPhysics Department, Università degli Studi and INFN, Genova 16146, Italy

^rPhysics Department, Università degli Studi and INFN, Milano 20133, Italy

^sPhysics Department, Università degli Studi Federico II and INFN, Napoli 80126, Italy

^tChemistry Department, Università degli Studi and INFN, Perugia 06123, Italy

^uDepartment of Physics and Astronomy, University of Arkansas, Little Rock, AR 72204, USA

^vPhysics and Astronomy Department, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA

^wDepartment of Physics, University of Houston, Houston, TX 77204, USA

^xPhysics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA

^yPhysics Department, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA

25 ИНСТИТУТОВ

ПИЯФ

Astr.P. 49(2013)44



Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений



g_{AN}



$g_{A\gamma}$



g_{Ae}



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

$g_{Ae} \times g_{A\gamma}$

НЕЙТРИНО
АКСИОН
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

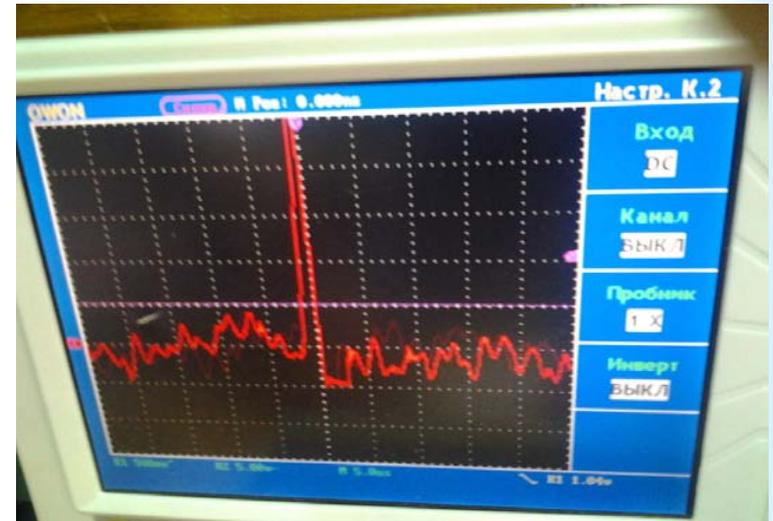
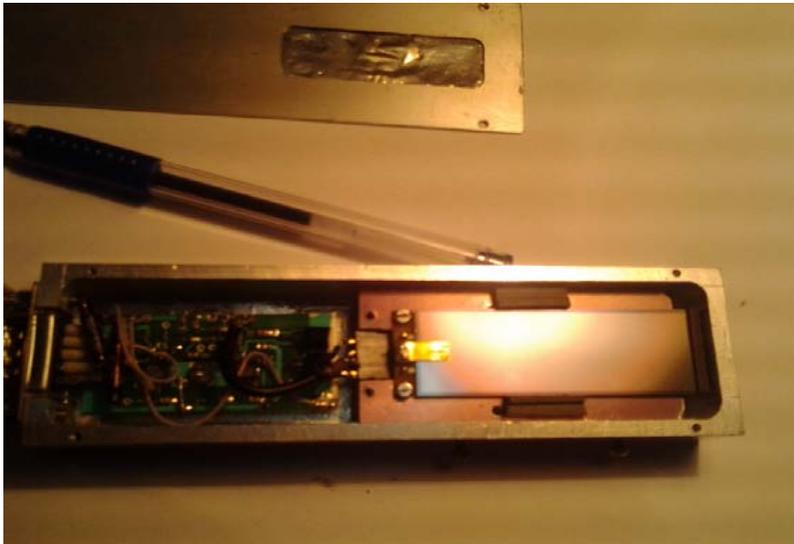
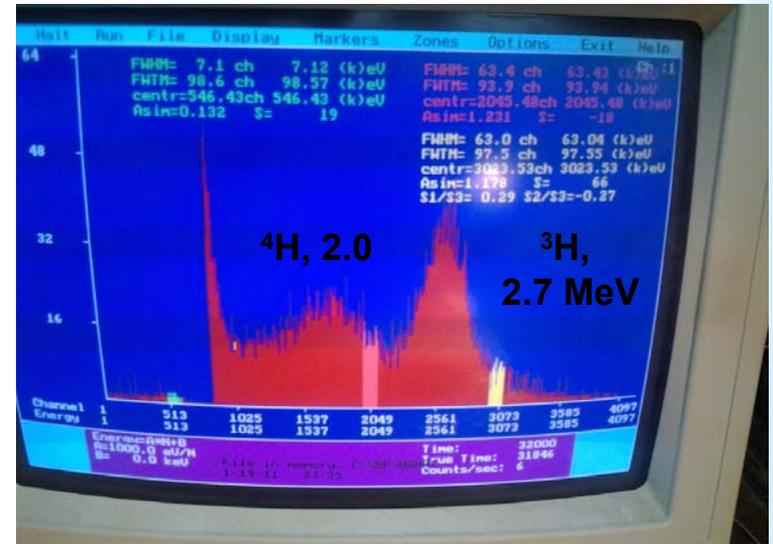
BOREXINO
POSEIDON
DARKSIDE
IAXO, LUCIFER
(LENA, РЭД)

Si
(p)
M
D
S



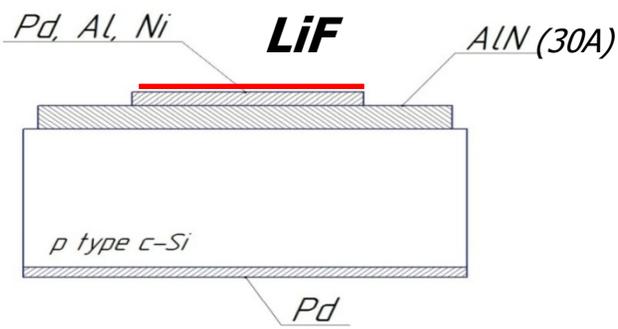
EXTRA SLIDES

Монитор нейтронов (ОПЯД+ЛНФ+ОАЭР)

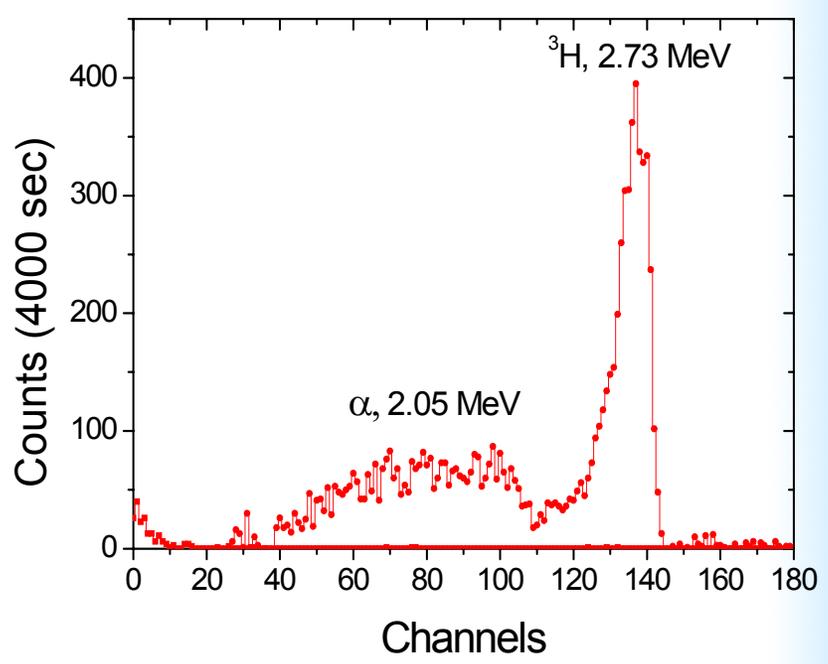
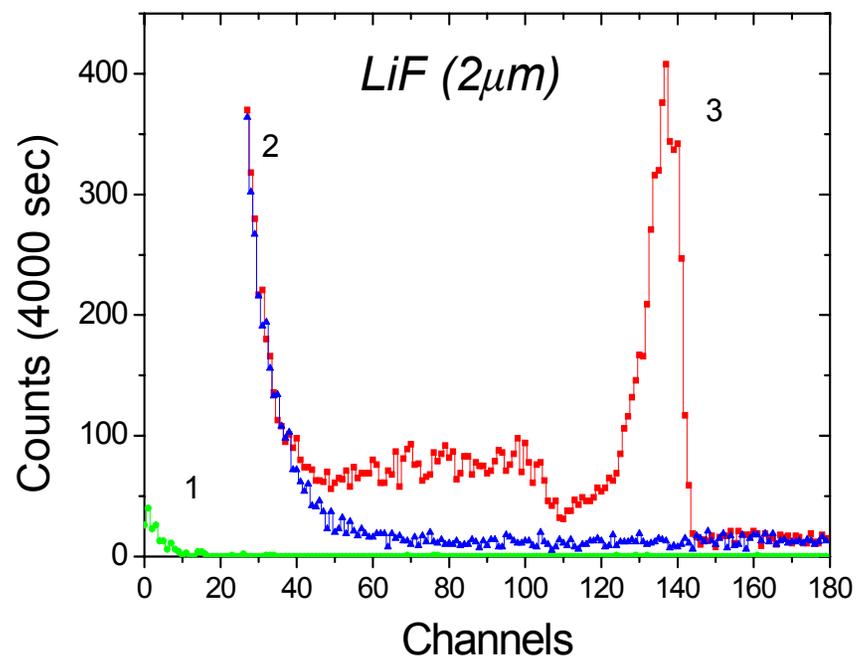


Si(p)-детекторы с МДП структурой для регистрации нейтронов

И.М.Котина, М.С.Ласаков, Л.М.Тухконен, А.И.Терентьева

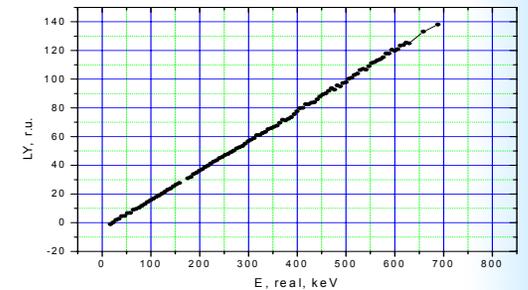
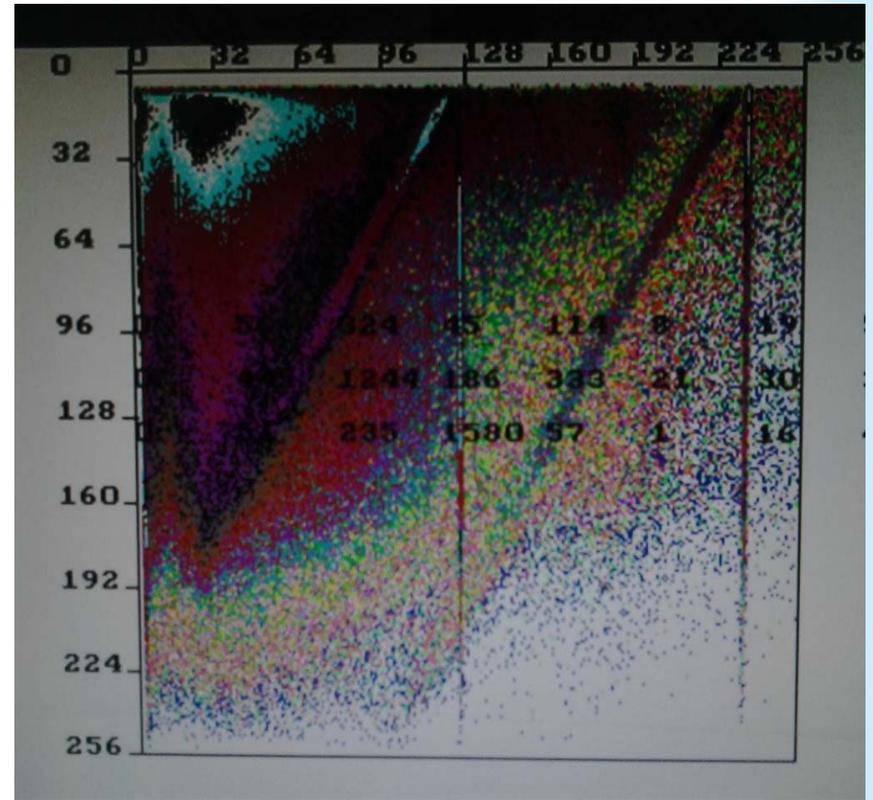
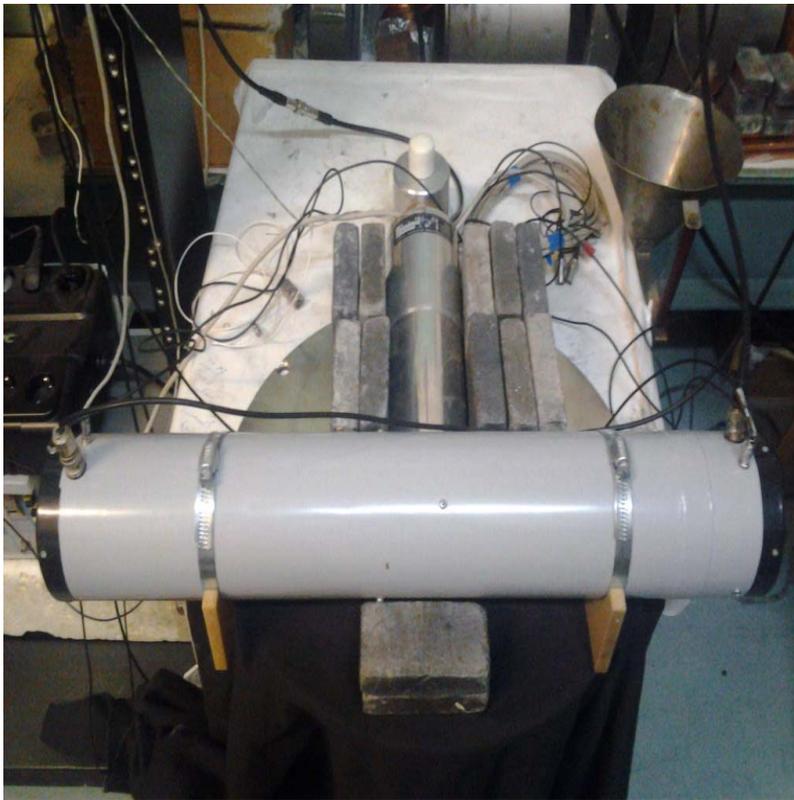


$S = 3 \text{ cm}^2$
 $H = (100-150) \text{ }\mu\text{m}$
 $C = (300 - 200) \text{ pF (50 кэВ)}$
 $I = (2 - 4) \text{ }\mu\text{A (40 кэВ)}$
 $\text{FWHM} = (60 - 80) \text{ кэВ}$



Эффективность регистрации тепловых n's <1%. Мониторирование и бхн

Quenching factor measurements (2013)



Состав коллаборации



Германия:

- Институт Макса Планка, Гейдельберг;
- Технический университет Мюнхена;

Италия:

Отделения Национального института ядерной физики в:

- Генуе;
- Милане;
- Перудже;

+ Лаборатория Гран Сассо;

Польша:

- Ягеллонский университет, Краков;

Россия:

- ОИЯИ, Дубна;
- Курчатовский Институт, Москва;
- ПИЯФ, Гатчина;
- НИИЯФ МГУ, Москва;

США:

- Принстонский университет;
- Технологический университет шт. Вирджиния;
- Массачусетский технологический институт

Франция:

- Седьмой Парижский университет.

Поток ${}^7\text{Be}$ -нейтрино измерен с 4.8%

Precision measurement of the ${}^7\text{Be}$ solar neutrino interaction rate in Borexino" PRL 107 141302 (2011)

Результат Борексино:

$$R = 46.0 \pm 1.5^{+1.5}_{-1.6} \text{ c / (100 t day)}$$

Без осцилляций SSM high Z:

$$R = 74 \pm 5 \text{ cpd/100 t}$$

SSM MSW-LMA:

$$47.3 \pm 3.4 \text{ cpd/100 t}$$

В предположении ограничений на светимость Солнца получены потоки:

$$\Phi(\text{pp}) = (6.02^{+0.02}_{-0.06}) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

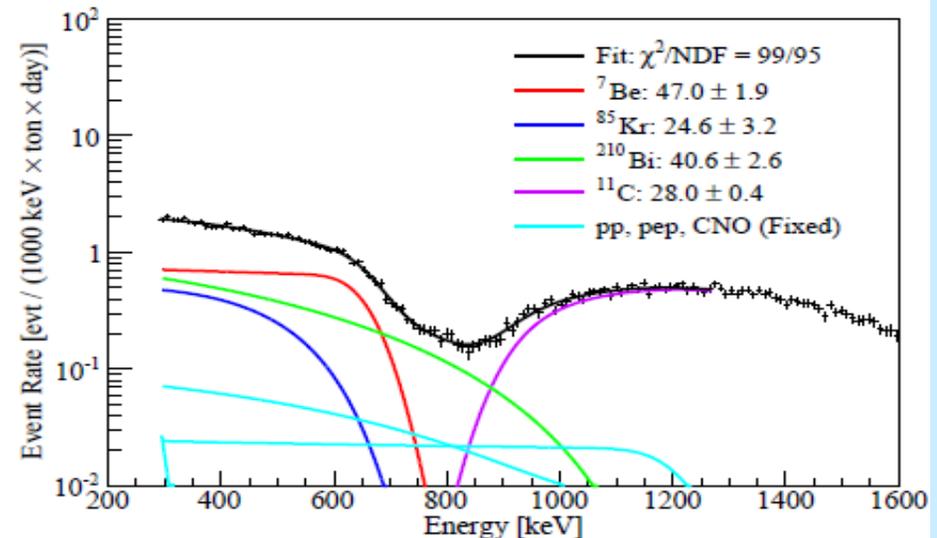
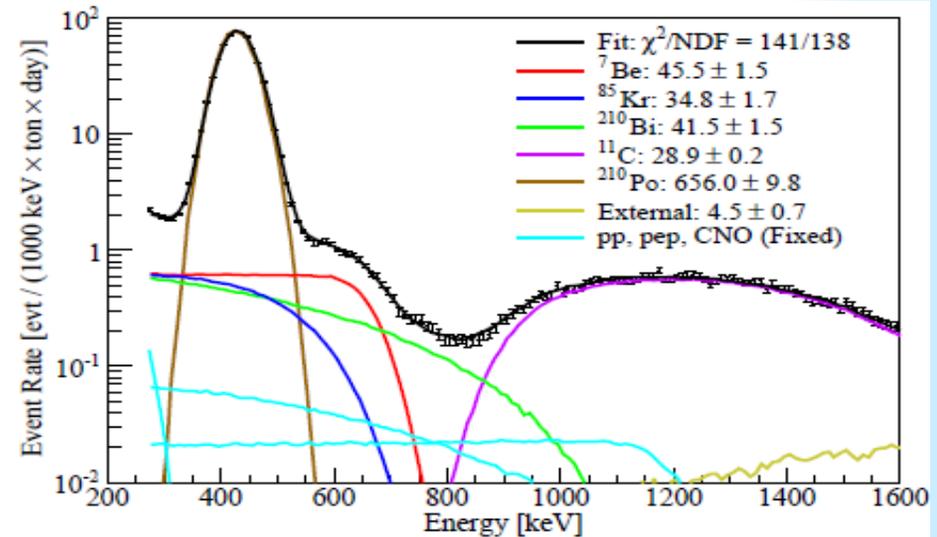
$$f_{\text{pp}} = 1.013^{+0.003}_{-0.010}$$

$$\Phi(\text{CNO}) < 1.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \text{ (95\% у.д.)}$$

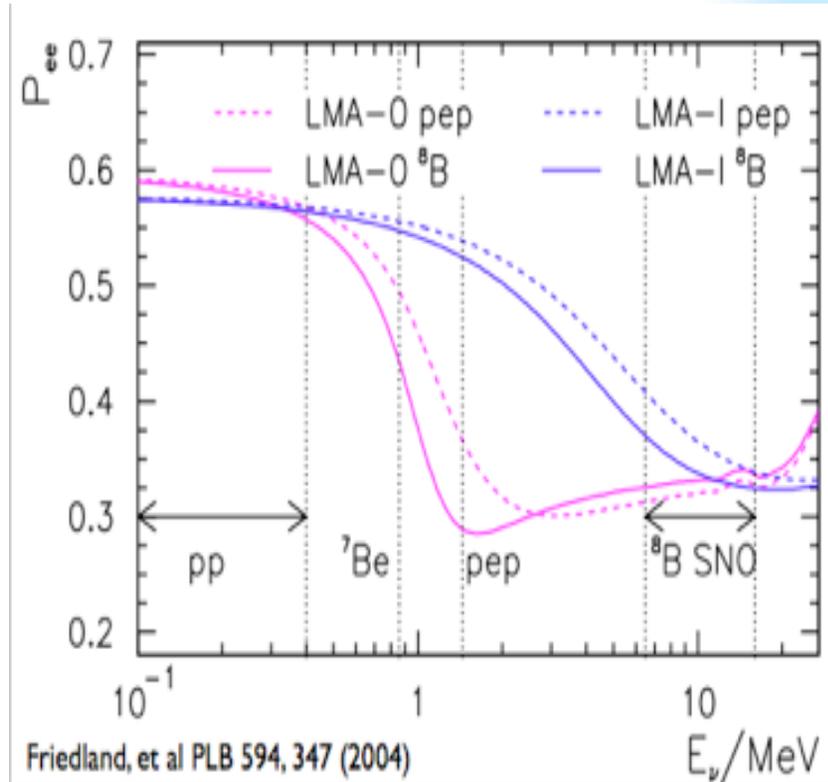
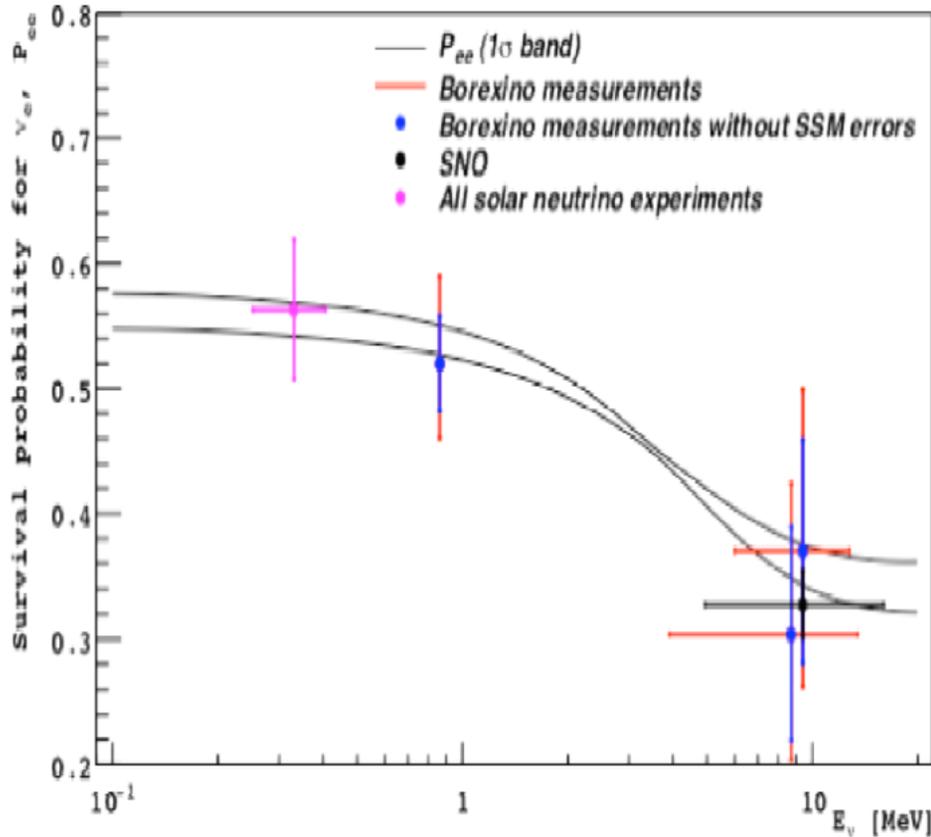
$$f_{\text{CNO}} < 2.5 \text{ (95\% у.д.)}$$

$$\delta m^2 = (7.5^{+0.16}_{-0.24}) 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$\tan^2\theta = 0.457^{+0.033}_{-0.025}$$



Вероятность выживания электронных нейтрино

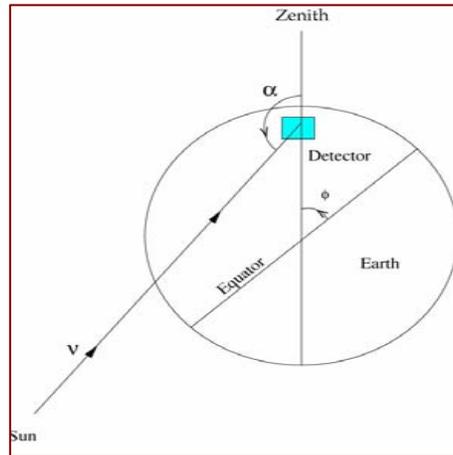
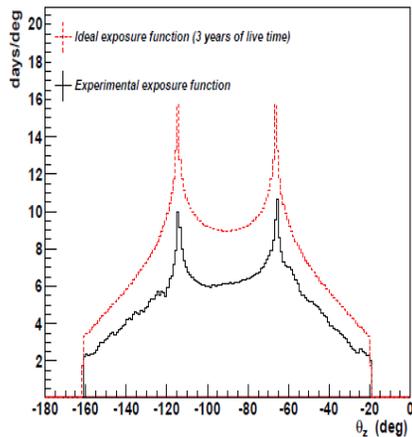


$$P_{ee}(0.862) = 0.51 \pm 0.07$$

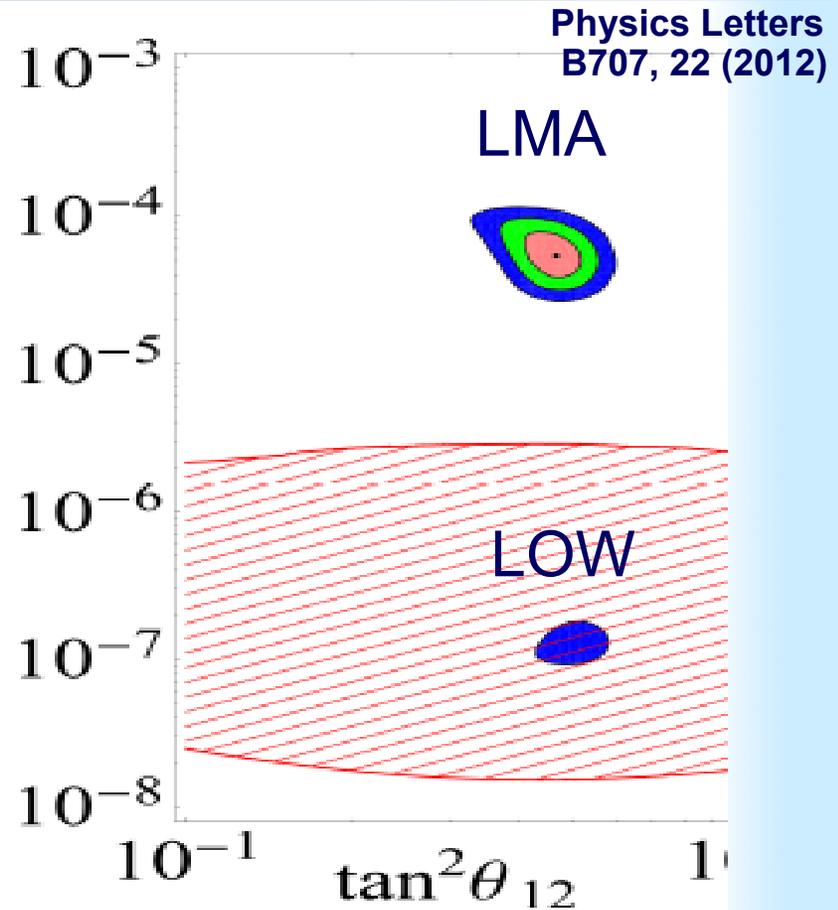
Вероятность выживания ^7Be - и ^8B -нейтрино находится в согласии с LMA MSW. $P_{ee}(^8\text{B}, 8.9) = 0.29 \pm 0.10$ для модели BS07(GS98) SSM в согласии с результатами черенковских детекторов. Отвергнуты модели с нестандартным поведением P_{ee} в переходной области.

Осцилляции нейтрино в Земле (эффект день-ночь)

Три решения проблемы солнечных нейтрино для механизма MSW – SMA, LOW, LMA + вакуумные осцилляции Just-So. SK и SNO отвергают SMA и Just-So. KamLand подтверждает LMA



Δm^2_{21} (eV²)



⁸B нейтрино MSW LMA предсказывает ~2% асимметрию $A_{dn} = 2(R_n - R_d)/(R_n + R_d)$
Измеренные значения - SNO : $A_{dn} = 0.037 \pm 0.040$ SKI: $A_{dn} = 0.021 \pm 0.020$

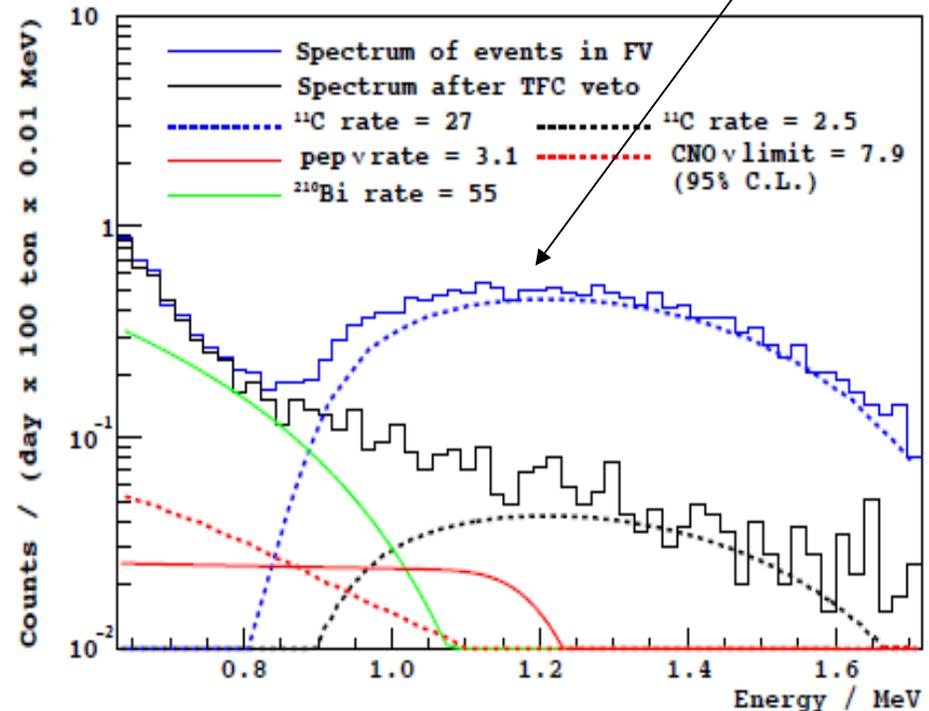
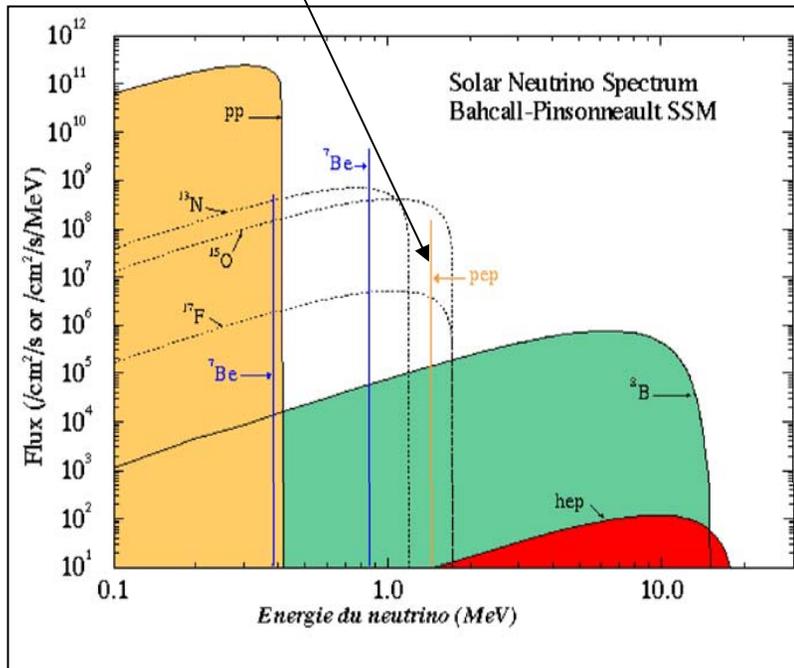
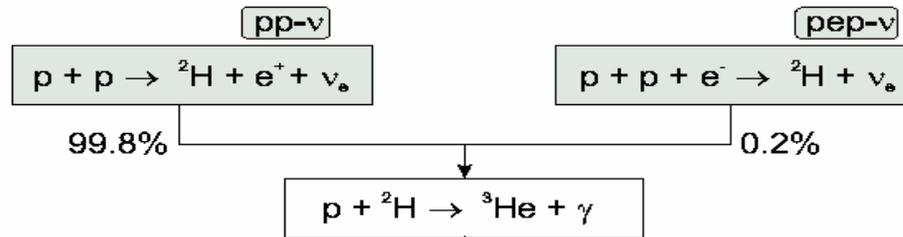
⁷Be нейтрино MSW LMA $A_{dn} = +0.1\%$ **MSW LOW** $A_{dn} = (11-80)\%$

Обнаружение пер-нейтрино: $p+p+e \rightarrow d+\nu$

Phys.Rev.Lett.
108, 051302 (2012)

пер-нейтрино
с $E=1.44$ МэВ

Основной
фон от ^{11}C



Детекторы солнечных нейтрино показали, что в Солнце действительно происходят ядерные реакции. Поток пер-нейтрино предсказан с точностью 1.2%. CNO нейтрино меняется в ~2 раза для high и low Z.

Пределы на константу связи аксиона с e^-

Для нерелятивистских аксионов сечение аксио-электрического эффекта пропорционально сечению фотоэффекта для фотонов с энергией равной массе аксиона (Pospelov et al.)

$$\sigma_{ae}(E_A) = \sigma_{pe}(E_\gamma = m_A) \times g_{Ae}^2 \frac{1}{\beta} \left(\frac{3m_A^2}{16\pi\alpha m_e^2} \right)$$

