

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, асп./ст.лаб.
- 5) Е.В. Унжаков, асп./ст.лаб.
- 6) А.С. Каюнов, аспирант
- 7) И.М. Котина снс кфмн
- 8) Г.В. Пацекина нс
- 9) Л.М. Тухконен нс
- 10) З.М. Крот инж.-техн
- 12) И.С. Драчнев 5 курс
- 13) К.М. Жеронкин 4 курс
- 14) И.С. Патраков 4 курс

В отделе 34 чел.

внс – 3; снс – 2; нс – 3;
ст. лаб. 2; асп. -1;
вед.инж.-12; инж. тех.-5;
рег. ап. -1; сл.мех.-1;
студ.совм. – 3;

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) 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) В.К.Бойцов В.К. вед.инж.-конст.
- 2) Г.Е.Жихаревич инж.-технолог
- 3) А.П.Михайлов сл.мех.с
- 4) В.А.Радаев сл.мех.сб.р.
- 5) Л.Ф.Гусенкова лаб.
- 6) А.И.Терентьева вед. инж

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений

Состав (12 чел.):

А.В. Дербин внс, дфмн,

С.В. Бахланов вед. инж.

В.Н. Муратова, нс, кфмн

Д.А. Семенов, ст. лаб.

Е.В. Унжаков, ст. лаб.

А.С. Каюнов, аспирант

И.А. Патраков, 4 курс ЛЭТИ

К.М. Жеронкин, 4 курс ЛЭТИ

И.С. Драчнев, 5 курс СПбГУ

И.М. Котина снс, кфмн

З.М. Крот, вед.инж.

Г.В. Пацекина, нс

Л.М. Тукхонен, нс



Лаборатория в 2011 году

Работы проводились по 3 основным направлениям:

1) Аксион

(Солнечные + Темная материя (работы выполняются в ПИЯФ) + Борексино)

2) Нейтрино,

(эксперимент Борексино, Италия + ПИЯФ стерильное нейтрино)

3) МДП структуры на кремнии

(монитор нейтронов, рук. И.М. Котина доклад А.Х. Хусаинова 19.01.12)

Содержание доклада (30 мин.)

- 1) Эксперимент Борексико в 2011 году
- 2) Рассеяние нейтрино на электроны
- 3) Точность измерения 7Be -нейтрино 5% и потоки pp- , CNO нейтрино
- 4) Осцилляции нейтрино в веществе Земли и вариации скорости счета день-ночь.
- 5) Решение $\text{LOW } \delta m^2 \sim 10^{-7} \text{ eV}^2$ отклонено для нейтрино без привлечения данных *KamLand*.
- 6) Обнаружение p-p -нейтрино. Верх мастерства отбора событий.
- 7) Поиск солнечных аксионов с энергией 5.5 МэВ в Борексико
- 8) Поиск аксионов с энергией 5.5 МэВ с помощью *BGO* в *ПИЯФ*
- 9) Поиск солнечных аксионов в *ПИЯФ* (доклад Е. Унжакова)
- 10) Стерильные нейтрино в Борексико
- 11) Стерильные нейтрино на исследовательском реакторе
- 12) Поиски темной материи в экспериментах *DARK SIDE* и *RED*
- 13) Поиски темной материи в эксперименте в *ПИЯФ*. Аксионы с массой 1-10 кэВ как частицы темной материи. Результаты *ПИЯФ*.
- 14) Будущее нейтринной (астро)физики. Эксперимент *LENA*.
- 15) Планы на 2012 год

Список публикаций и докладов в 2011 г.(20)

1. Derbin A.V., Kauynov A.S., Muratova V.N., Semenov D.A., Unzhakov E.V. , Constraints on the axion-electron coupling for solar axions produced by Compton process and bremsstrahlung, Phys. Review, D83, p. 023505, (2011).
2. Дербин А.В., Муратова В.Н., Семенов Д.А., Унжаков Е.В., Новое ограничение на массу солнечных аксионов с энергией 14.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{57}Fe , Ядерная Физика, Т. 74, №4, с. 620-626, (2011).
3. Дербин А.В., Каюнов А.С., Муратова В.Н., Антонов Н.Е., Драчнев И.С., Новые ограничения на константу связи аксиона с электроном для аксионов, возникающих в результате тормозного излучения и комптоновского процесса на Солнце, препринт ПИЯФ, 2865, 3-15, 2011
4. Derbin A., Kauynov A., Muratova V., Semenov D., Unzhakov E., A Search for the Resonant Absorption of Solar Axions by Atomic Nuclei, DESY, proceeding of the Axion-WIMP-WISP- 2011 workshop, June 2011
5. Derbin A.V and Muratova V.N. for Borexino coll., Search for 5.5 MeV Solar Axions Produced in $p(d; ^3\text{He})\alpha$ Reaction with Borexino Detector, DESY, proceeding of the Axion-WIMP-WISP- 2011 workshop, June 2011.
6. А.В. Дербин, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова, Е.В. Унжаков, Д.А. Семенов, Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов атомными ядрами , научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Москва, (2011)
7. А.В. Дербин, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова, С.В. Бахланов, И.С. Драчнев ,Поиск солнечных аксионов в реакции $p+d^3\text{He}+\alpha$, научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Москва, (2011)
8. Боллоздыня А.И., .. , Дербин А.В., Драчнев И.С., , Муратова В.Н., (Коллаборация РЭД) , Проект эмиссионного детектора на жидком благородном газе для наблюдения редких процессов рассеяния /нейтрино и частиц темной материи на атомных ядрах, Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2011. Актуальные проблемы физики ядра, частиц, астрофизики и космологии, Москва, 2011
9. Акимов Д.Ю., Дербин А.В., , Муратова В.Н., Эксперимент по измерению отклика жидкого ксенона для ядер отдачи низких энергий на реакторе ИРТ МИФИ, Научная сессия НИЯУ МИФИ. Актуальные проблемы физики ядра, частиц, астрофизики и космологии, Москва, 2011
10. Derbin A., Fomenko K. for Borexino coll., Study of rare processes with the Borexino detector, 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Proceedings will be published by World Scientific Publ. Co., Singapore., 2011.
11. Derbin A., Fomenko K. for Borexino coll., Study of rare processes with the Borexino detector, workshop "Speakable in quantum mechanics: atomic, nuclear and sub nuclear physics tests", Trento, Italy, Proceedings will be published, 2011
12. А.В. Дербин, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова , Поиск осциллирующий нейтрино на исследовательском реакторе, научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» , Москва, (2011)
13. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), Study of solar and other unknown anti-neutrino fluxes with Borexino at LNGS, Phys. Letters, B696, 191, (2011).
14. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), Precision Measurement of the ^7Be Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino, Phys. Rev. Lett. 107, 141302 (2011).
15. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), First evidence of pep solar neutrinos by direct detection in Borexino, . arXiv:1110.3230 Submitted to Phys. Rev. Lett., (2011)
16. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), Absence of day-night asymmetry of 862 keV ^7Be solar neutrino rate in Borexino and MSW oscillation parameters , . arXiv:1104.2150, accepted by Phys. Rev. Lett., (2011)
17. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), Muon and Cosmogenic Neutron Detection in Borexino, Journal-ref: JINST 6:P05005, (2011).
18. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), The Recent Results of the Solar Neutrino Measurement in Borexino. arXiv:1106.3055, Proceedings of the Recontres de Moriond EW session 2011
19. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), Search for solar axions produced in the $p(d, \alpha)^3\text{He}$ reaction with Borexino detector , Submitted to Physical Review D (2011).
20. Borexino collaboration (Bellini G.,..., Derbin A.V.,..., Muratova V.N. et al.), Precision measurement of the ^7Be solar neutrino flux and its day-night asymmetry with Borexino, proceeding of TAUP conference in Munich, September 2011..

Доклады на конференциях в 2011 г.(7)

Axion - Dark Matter - WIMP-WISP- 2011 workshop, Greece, June 2011

Derbin A., Kayunov A., Muratova V., Semenov D., Unzhakov E.,

A Search for the Resonant Absorption of Solar Axions by Atomic Nuclei,

Derbin A.V and Muratova V.N. for Borexino coll.,

Search for 5.5 MeV Solar Axions Produced in $p(d; 3\text{He})\text{A}$ Reaction with Borexino Detector

15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow

. Derbin A., Fomenko K. for Borexino coll.,

Study of rare processes with the Borexino detector,

Speakable in quantum mechanics: atomic, nuclear physics tests, Trento, Italy

Derbin A., Fomenko K. for Borexino coll.,

Study of rare processes with the Borexino detector,

Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» , Москва, (2011)

А.В. Дербин, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова ,

Поиск осцилляций нейтрино на исследовательском реакторе,

А.В. Дербин, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова, Е.В. Унжаков, Д.А. Семенов,

Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов атомными ядрами ,

А.В. Дербин, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова, С.В. Бахланов, И.С. Драчнев

Поиск солнечных аксионов в реакции $p+d^3\text{He}+A$

+ доклады от кол. BOREXINO, RED, DARKSIDE

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*

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

Смешивание и осцилляции нейтрино, LMA MSW

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

2 угла смешивания и 2 Δm^2 масс измерены:

В веществе Солнца

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47 \pm 0.06, \quad \theta_{12} = (34 \pm 2)^\circ,$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.5 \pm 0.15, \quad \theta_{23} = (45 \pm 10)^\circ$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.025 \pm 0.007, \quad \theta_{13} = (9 \pm 3)^\circ$$

$$|m^2_2 - m^2_1| = (7.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|m^2_3 - m^2_2| = (2.3 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

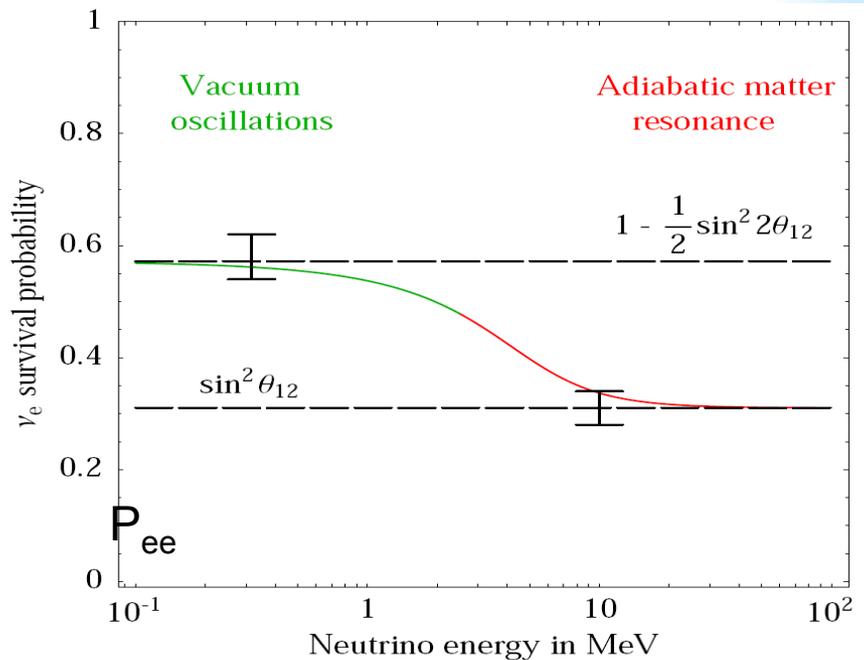
Осцилляции в вакууме

$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta_{12} + \nu_2 \sin \theta_{12}$$

$$\text{Амплитуда} = \sin^2 2\theta_{12}$$

Длина =

$$L = (2.5 \text{ km}) \times E [\text{ГэВ}] / \Delta m^2 [\text{эВ}^2].$$



Решение = Смешивание нейтрино + осцилляции в веществе = LMA+MSW

Новые результаты Борексино (2011 г.)

1. Вариации день-ночь для 7Be нейтрино. LMA установлен для нейтрино. Пока нет CPT нарушения в ν -секторе.
2. Обнаружены *рер*-нейтрино
3. Поток 7Be -нейтрино измерен с 5% точ.
4. Солнечные аксионы с $E = 5.5 \text{ МэВ}$

2010 – год антинейтрино

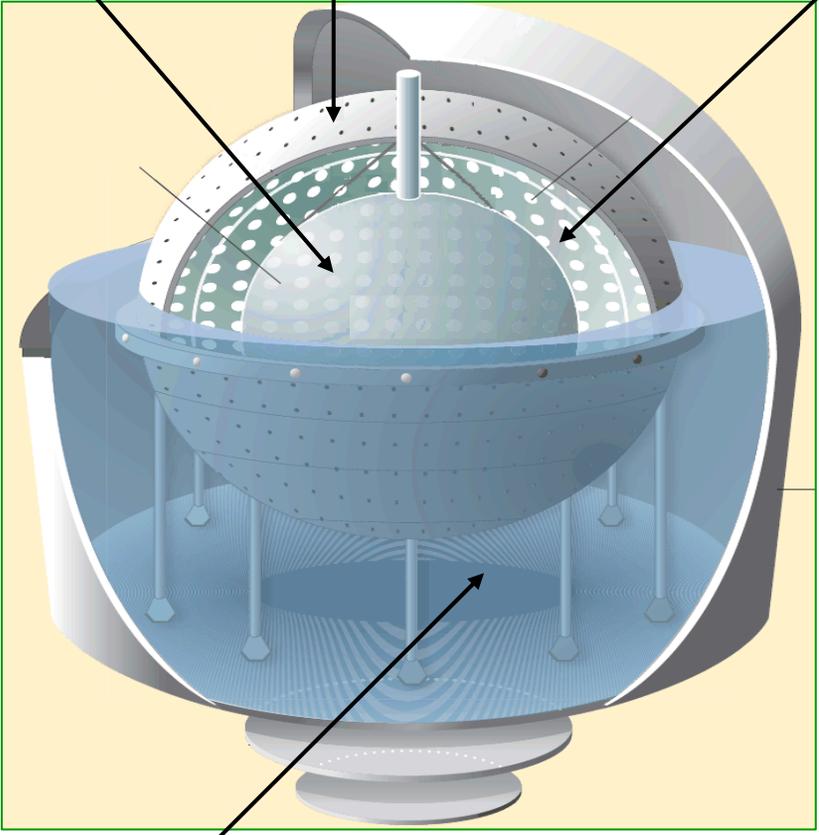
1. Гео-нейтрино
2. Солнечные анти-нейтрино
3. Фоновые анти-нейтрино
4. Переходы в ^{12}C с нарушением ПП

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

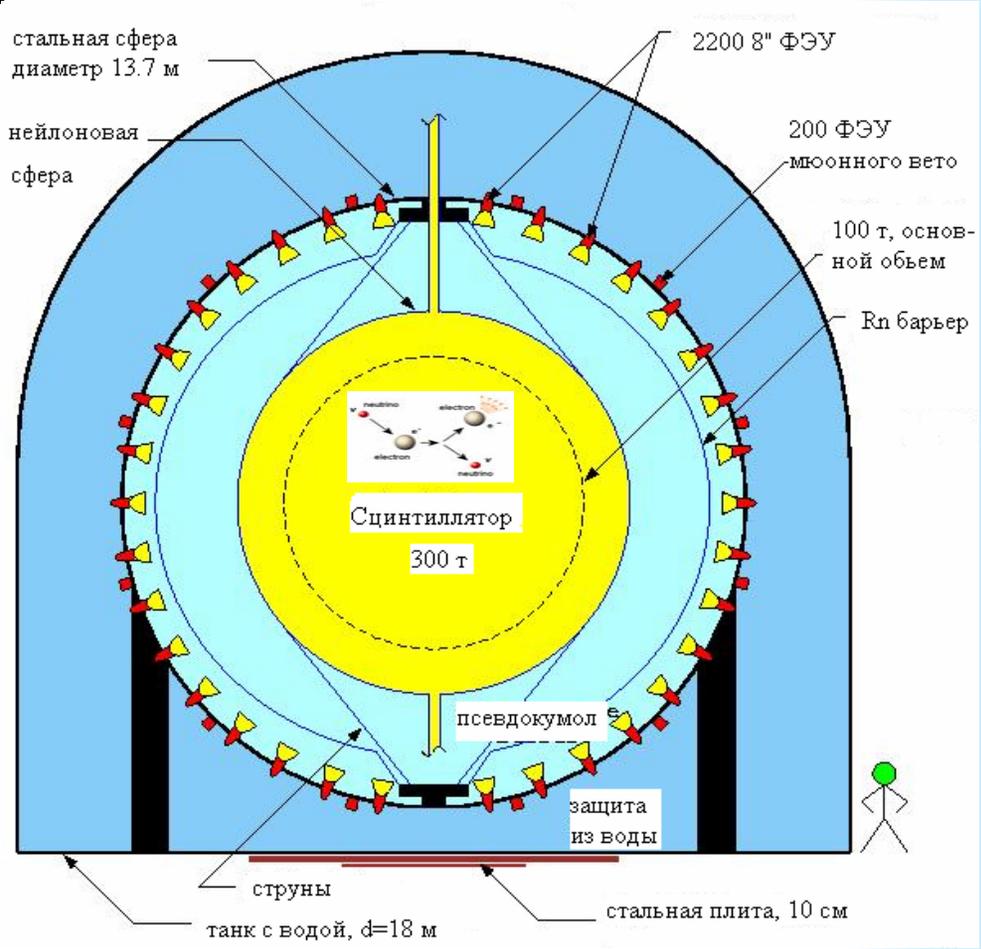
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

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

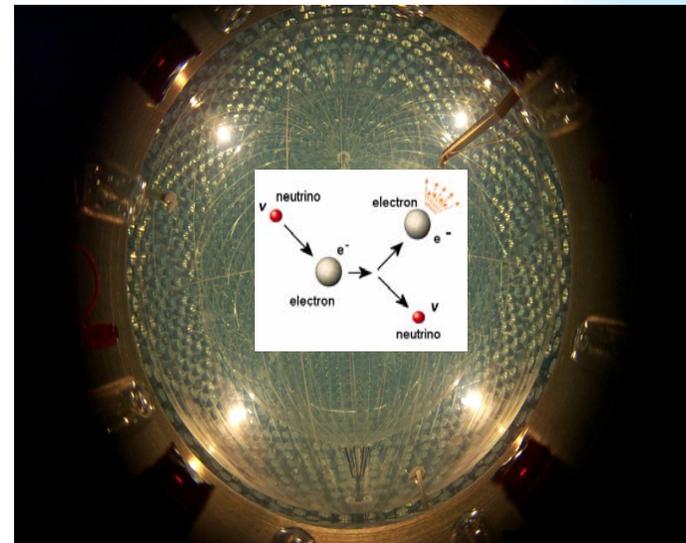
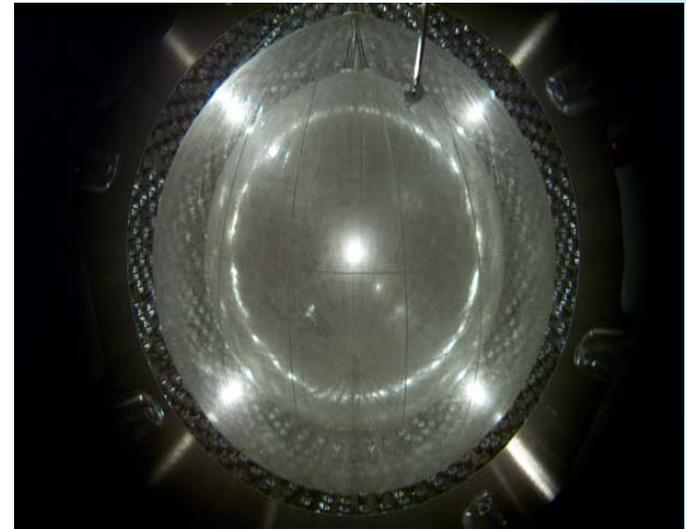
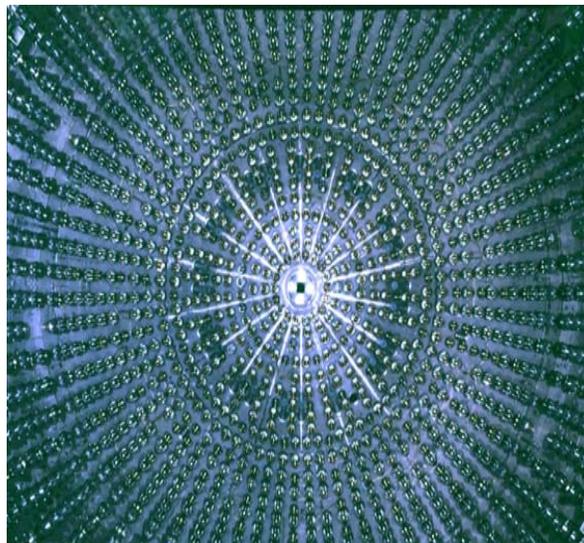
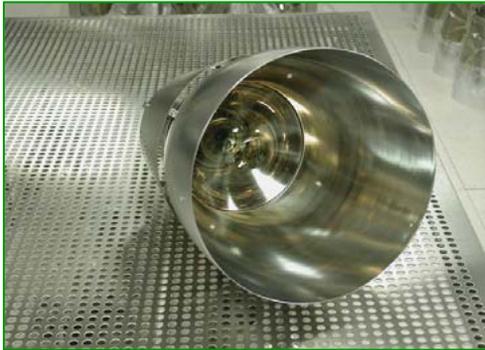
Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



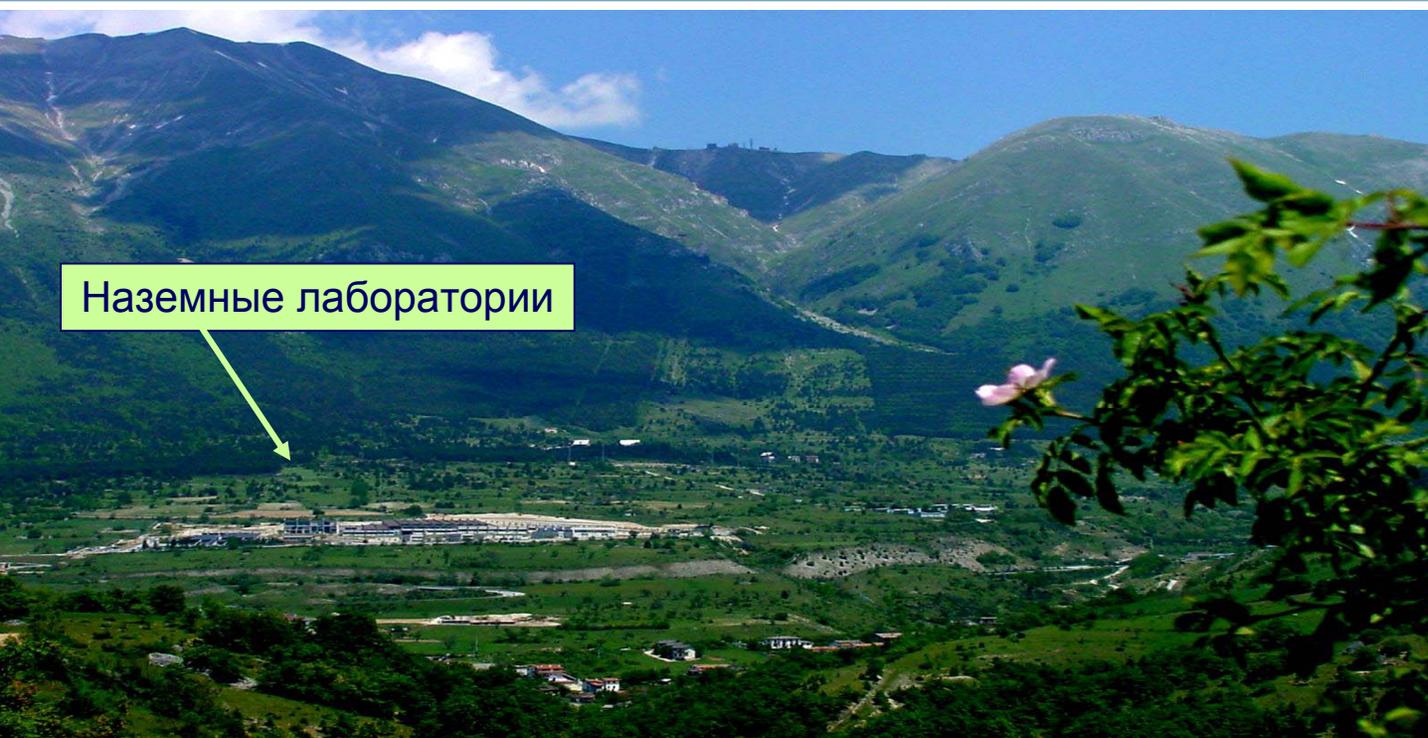
2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы

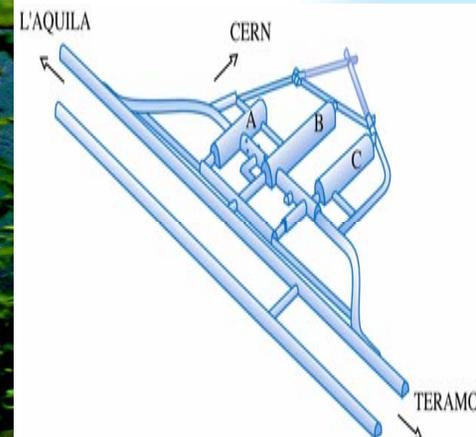


Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории

Италия,
120 км от Рима
3500 м.в.э.



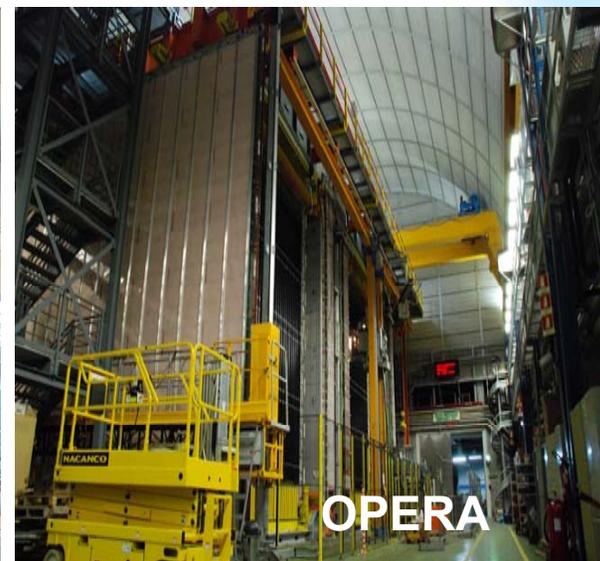
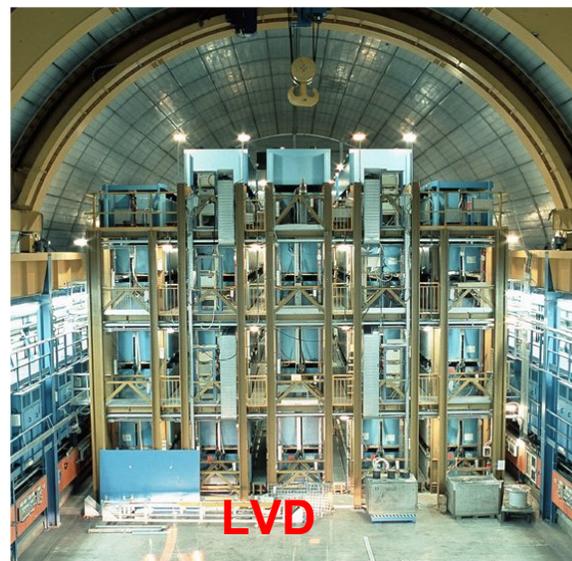
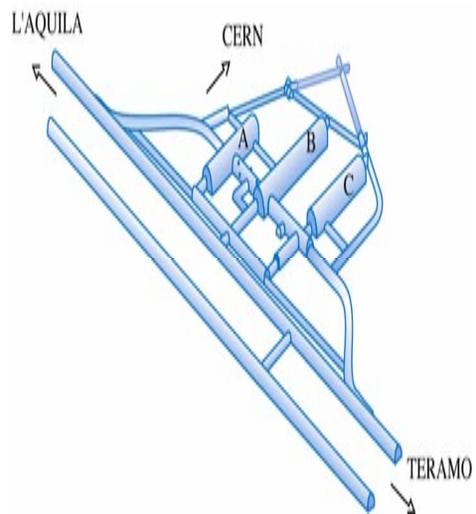
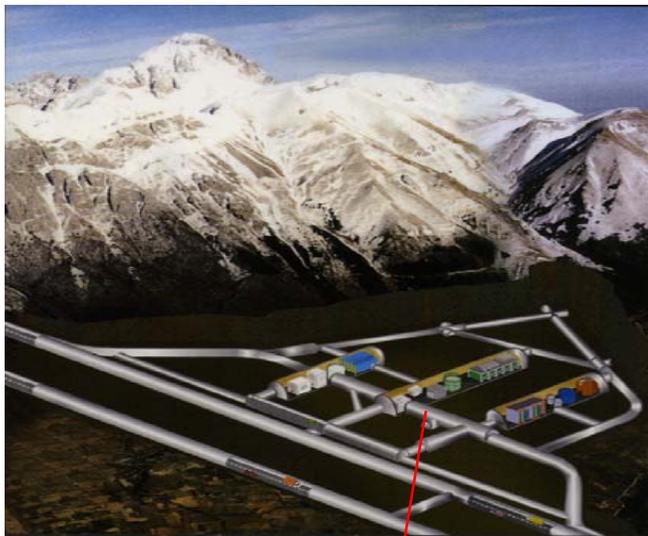
Борексина и завод по очистке



СТФ



Подземная лаборатория Гран-Сассо



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;
- РНЦ «Курчатовский Институт», Москва;
- ПИЯФ РАН, Гатчина;
- НИИЯФ МГУ, Москва;

США:

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

Франция:

- Седьмой Парижский университет.

Borexino collaboration



Gran Sasso



Perugia



Heidelberg



Hamburg



Budapest



Milano



Genova



München



Kraków



**Kurchatov
Moscow**



the Borexino Collaboration



JINR Dubna



Princeton



Virginia Tech



**UMass
Amherst**



Paris



St. Petersburg

Рабочие группы и вклад ПИЯФ в 2011 г.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2010, том 73, № 11, с. 1987–1993

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА БОРЕКСИНО

© 2010 г. А. В. Дербин *

(от имени Коллаборации БОРЕКСИНО¹⁾)

Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина

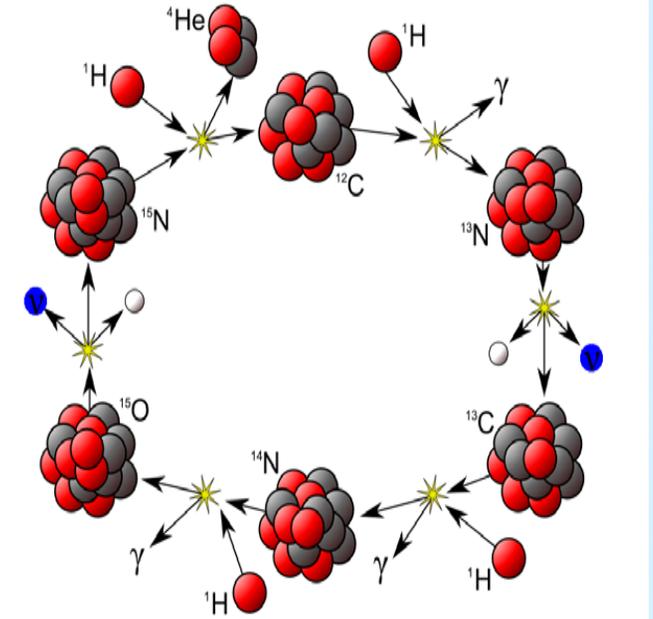
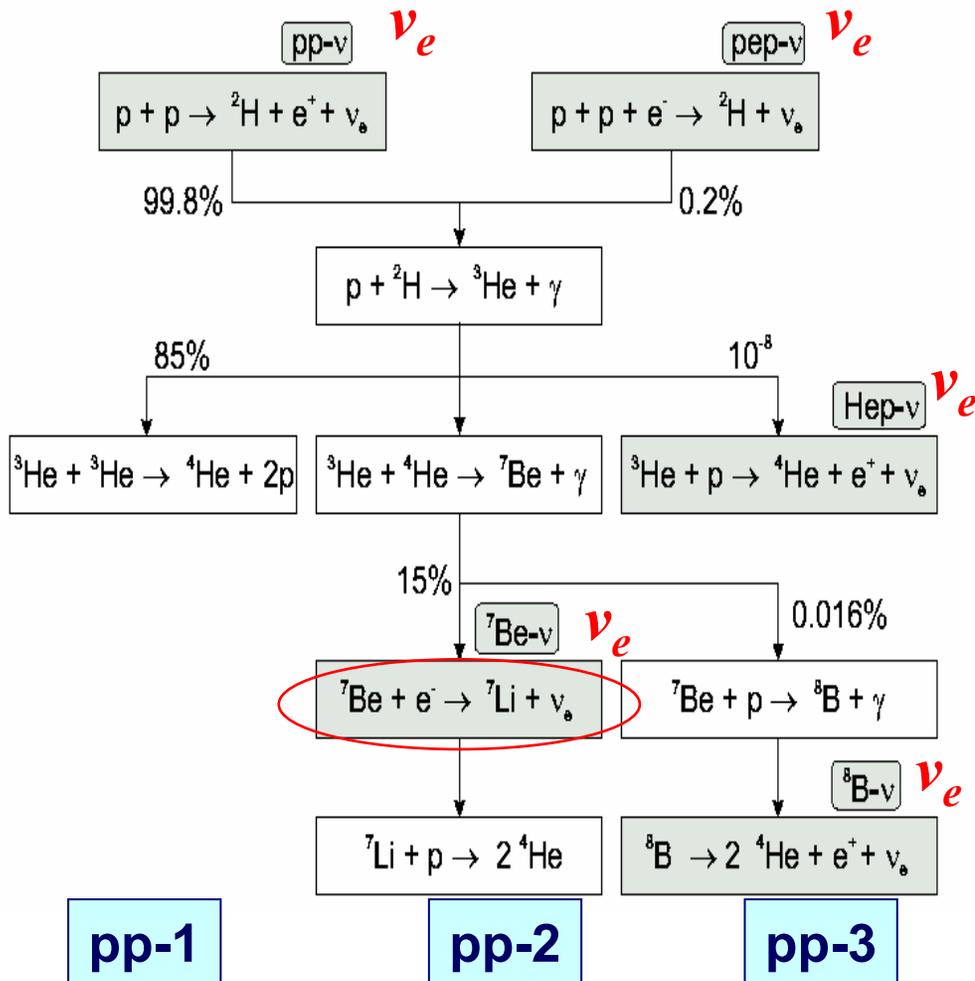
Входим в состав 5 (из 12) рабочих групп:

- 1) ${}^7\text{Be}$ -нейтрино,
 - 2) Мюоны и нейтроны,
 - 3) Анти-нейтрино,
 - 4) $\nu\bar{\nu}$ -нейтрино,
 - 5) редкие процессы (председатель)
- авторы по переписке 1 статьи от колл. в 2011 г.

Две новые РГ образованы в 2011 г.

- 6) Стерильное нейтрино
- 7) Скорость нейтрино

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



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

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

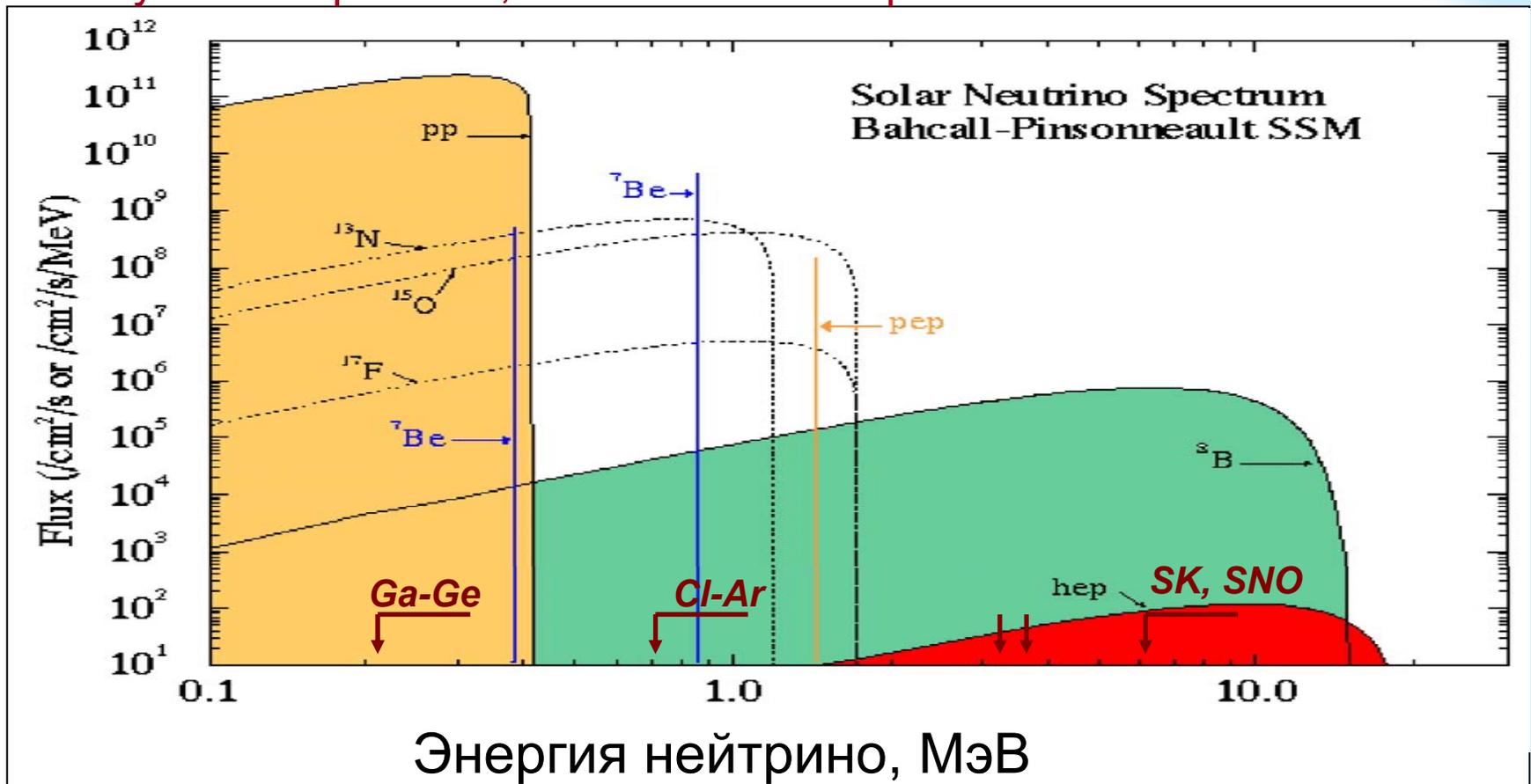
$${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

Излучается 5 нейтрино в pp-цикле 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 электроне - 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} $\nu/\text{cm}^2\text{сек}$

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:

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

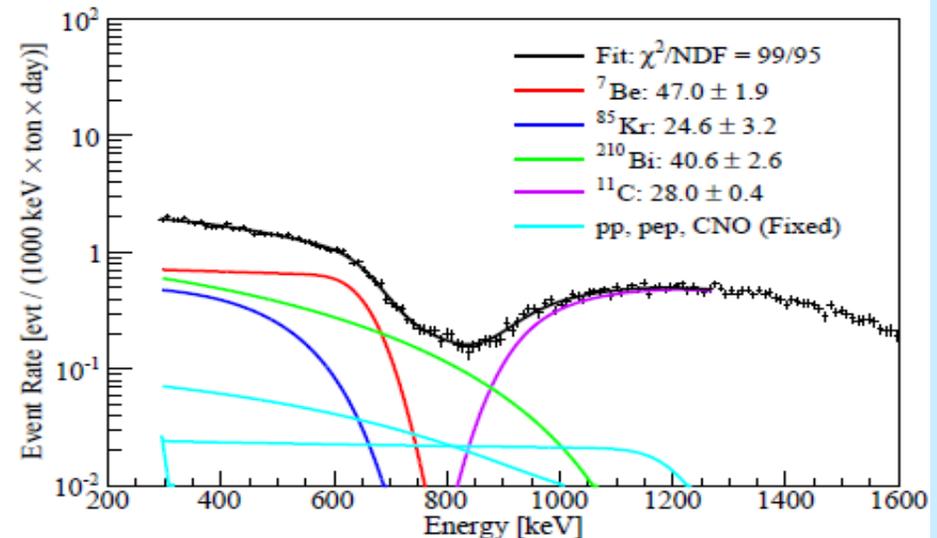
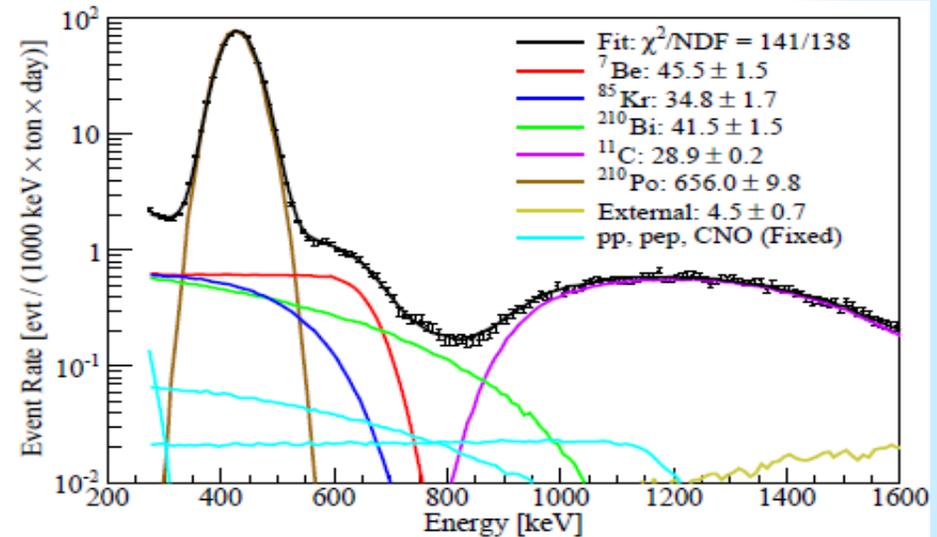
$$f_{\text{pp}} = 1.013^{+0.003}_{-0.010}$$

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

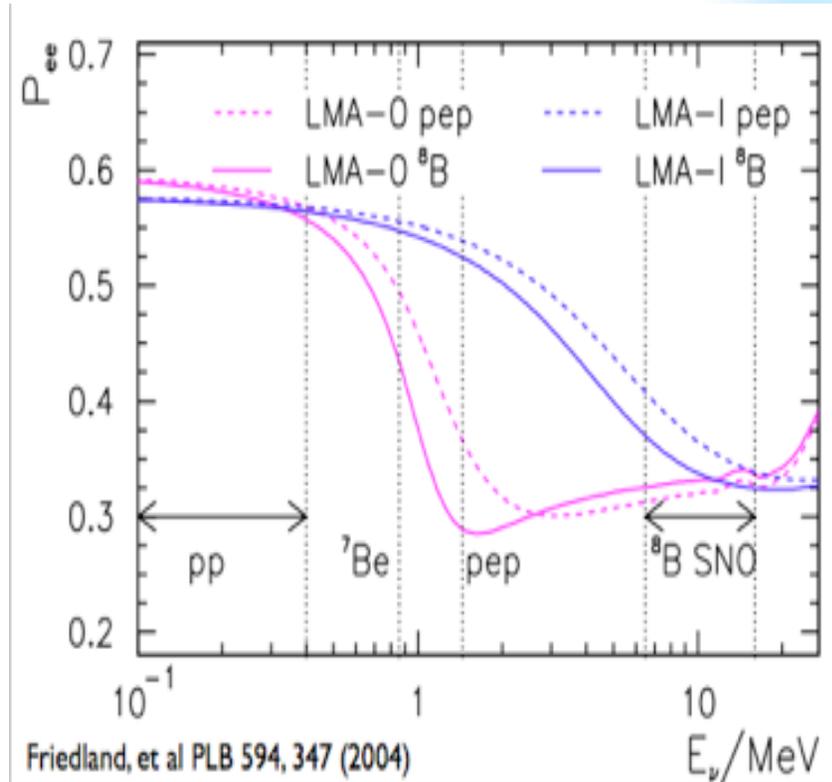
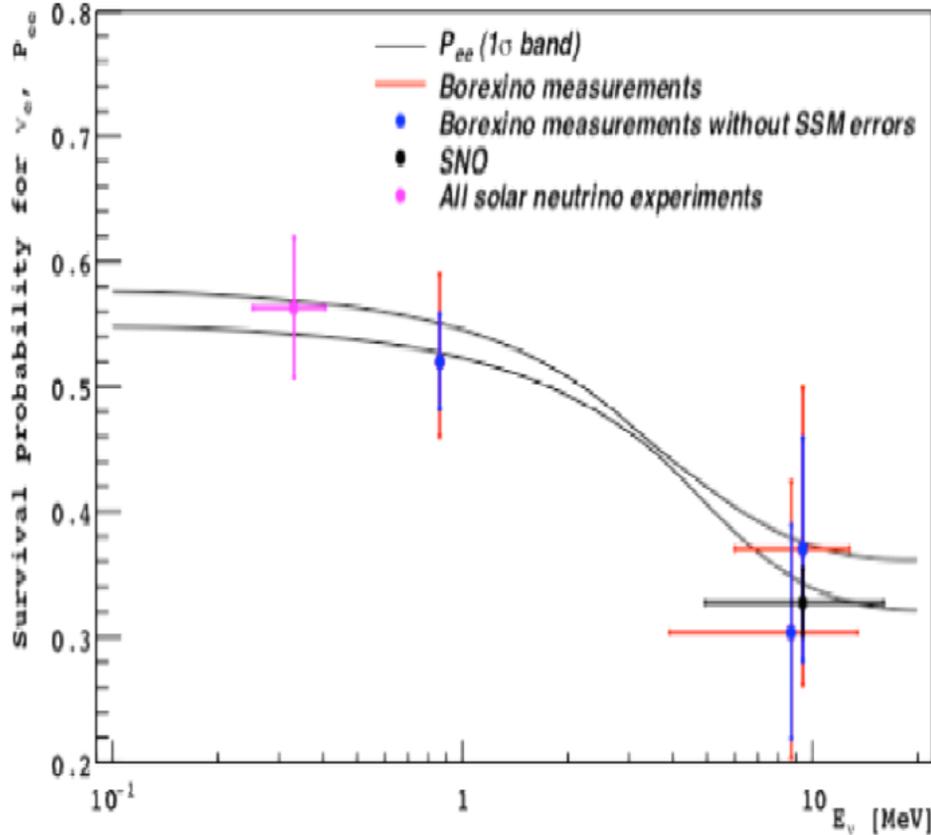
$$f_{\text{CNO}} < 2.5 \text{ (95\% у.д.)}$$

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

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



Вероятность выживания электронных нейтрино

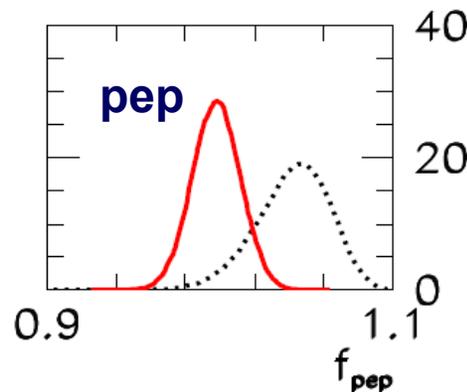
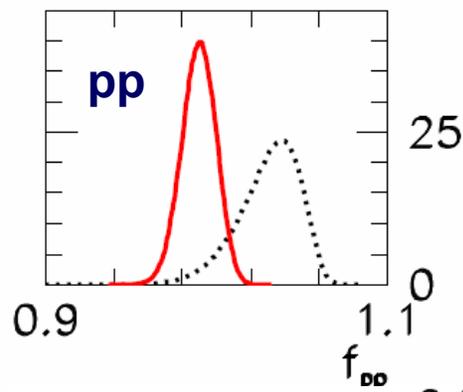
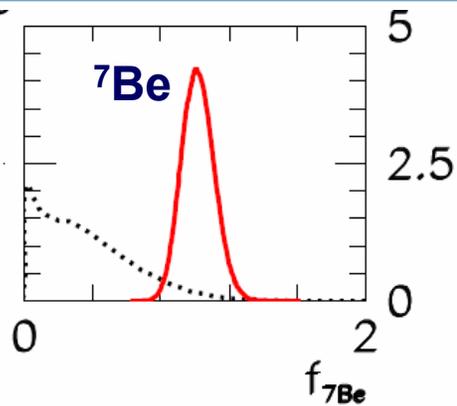


$$P_{ee}(0.862) = 0.51 \pm 0.07$$

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.

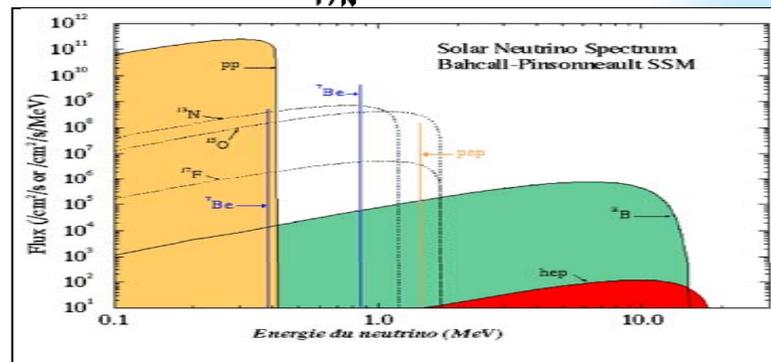
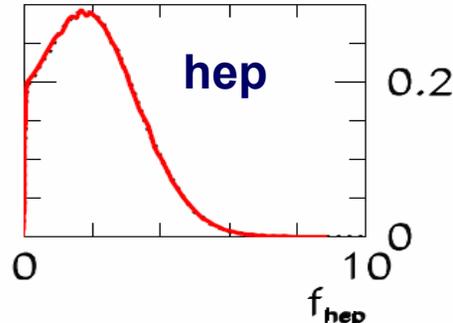
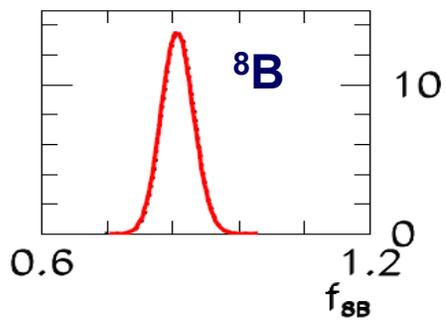
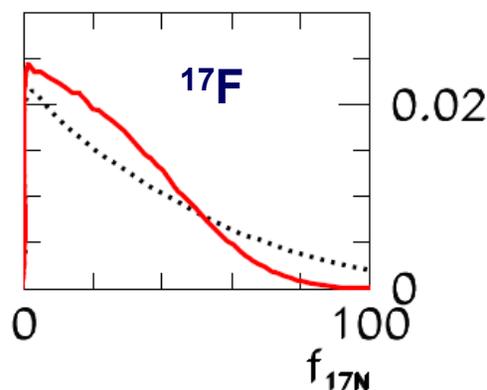
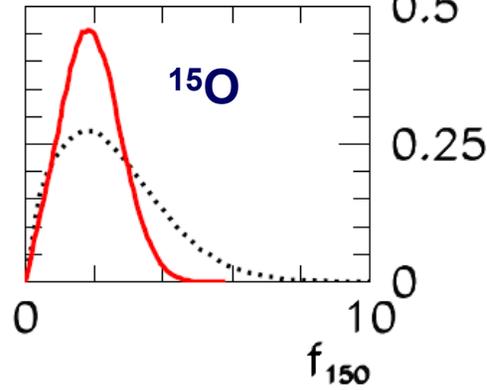
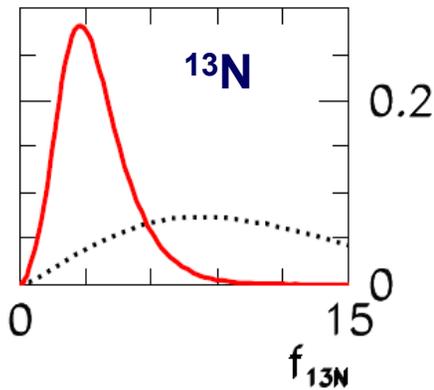


Солнечные нейтрино: до и после Борексино



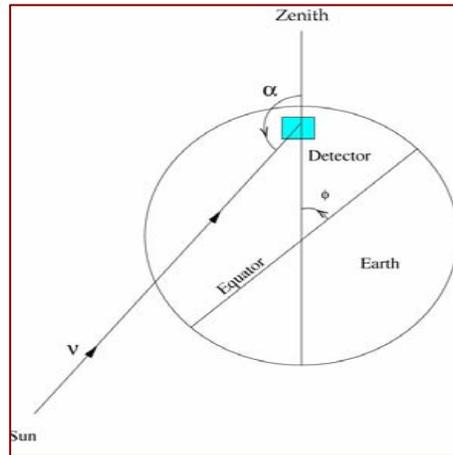
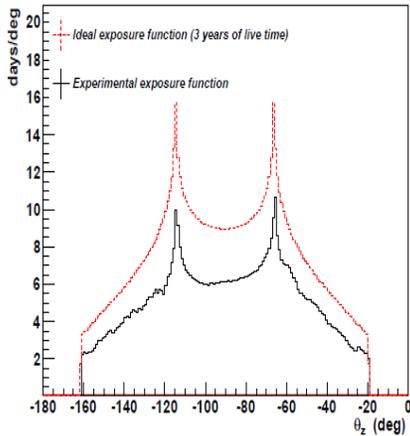
M.C.Gonzalez-Garcia
M. Maltoni, J.Salvado
arXiv:0910.4584

$$f_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_i^{\text{BPS08(GS)}}$$

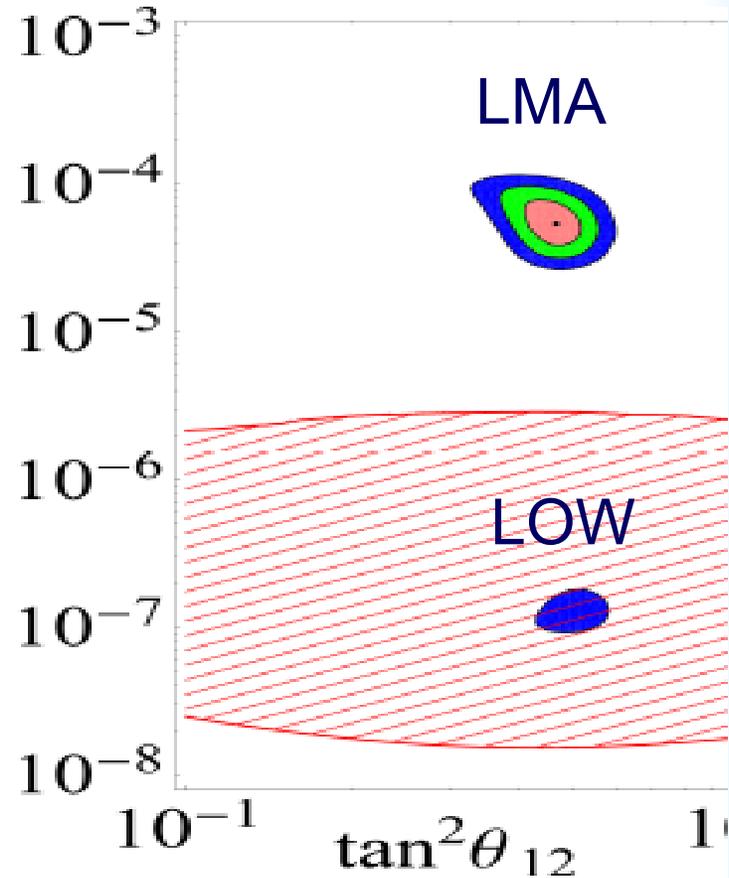


Осцилляции нейтрино в Земле (эффект день-ночь)

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



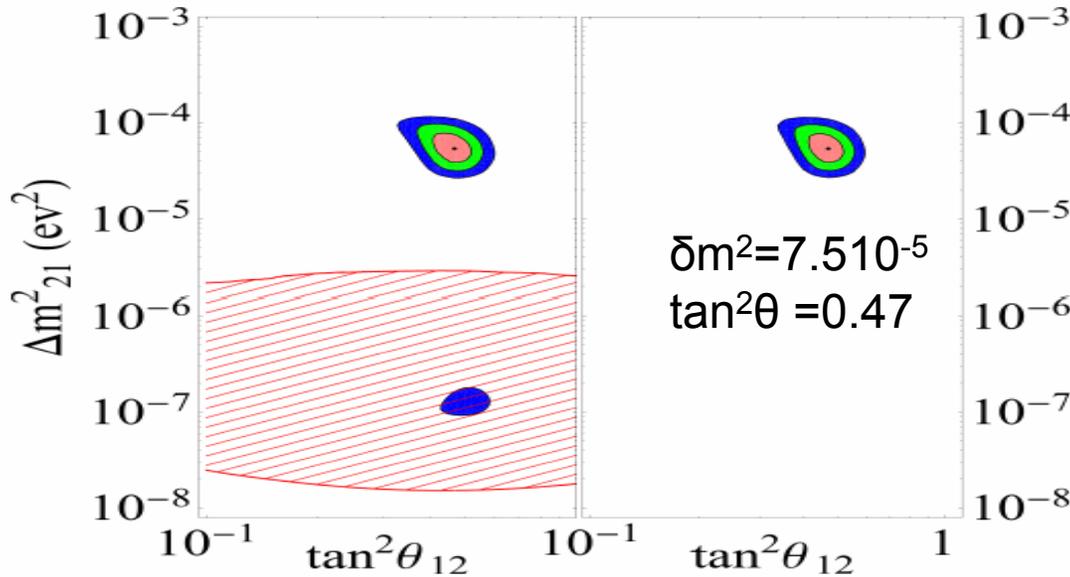
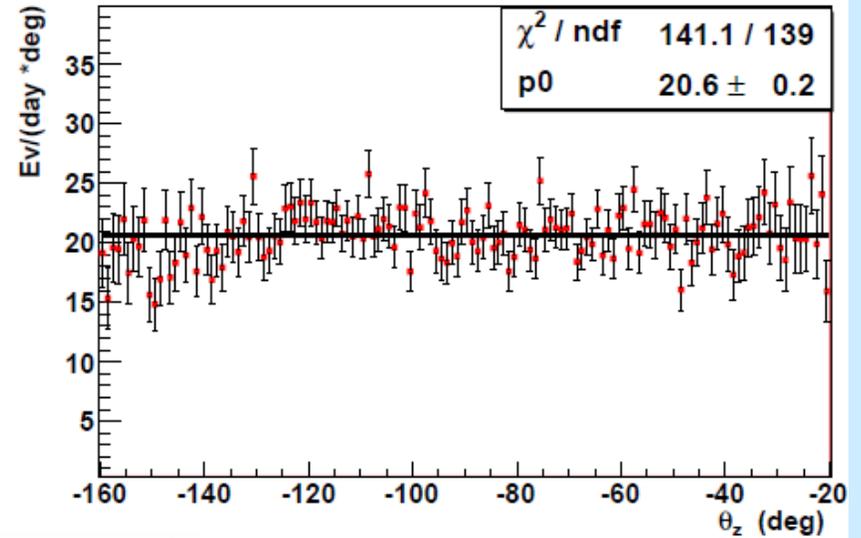
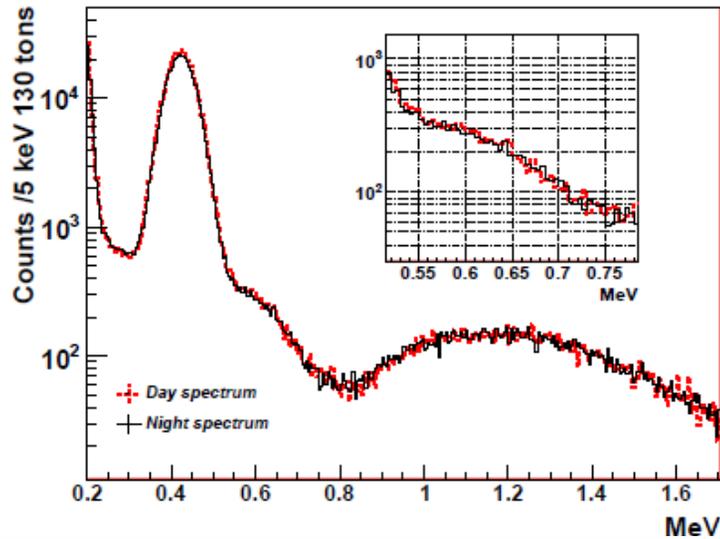
$\Delta m^2_{21} \text{ (eV}^2\text{)}$



^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: $A_{dn} = 0.021 \pm 0.020$

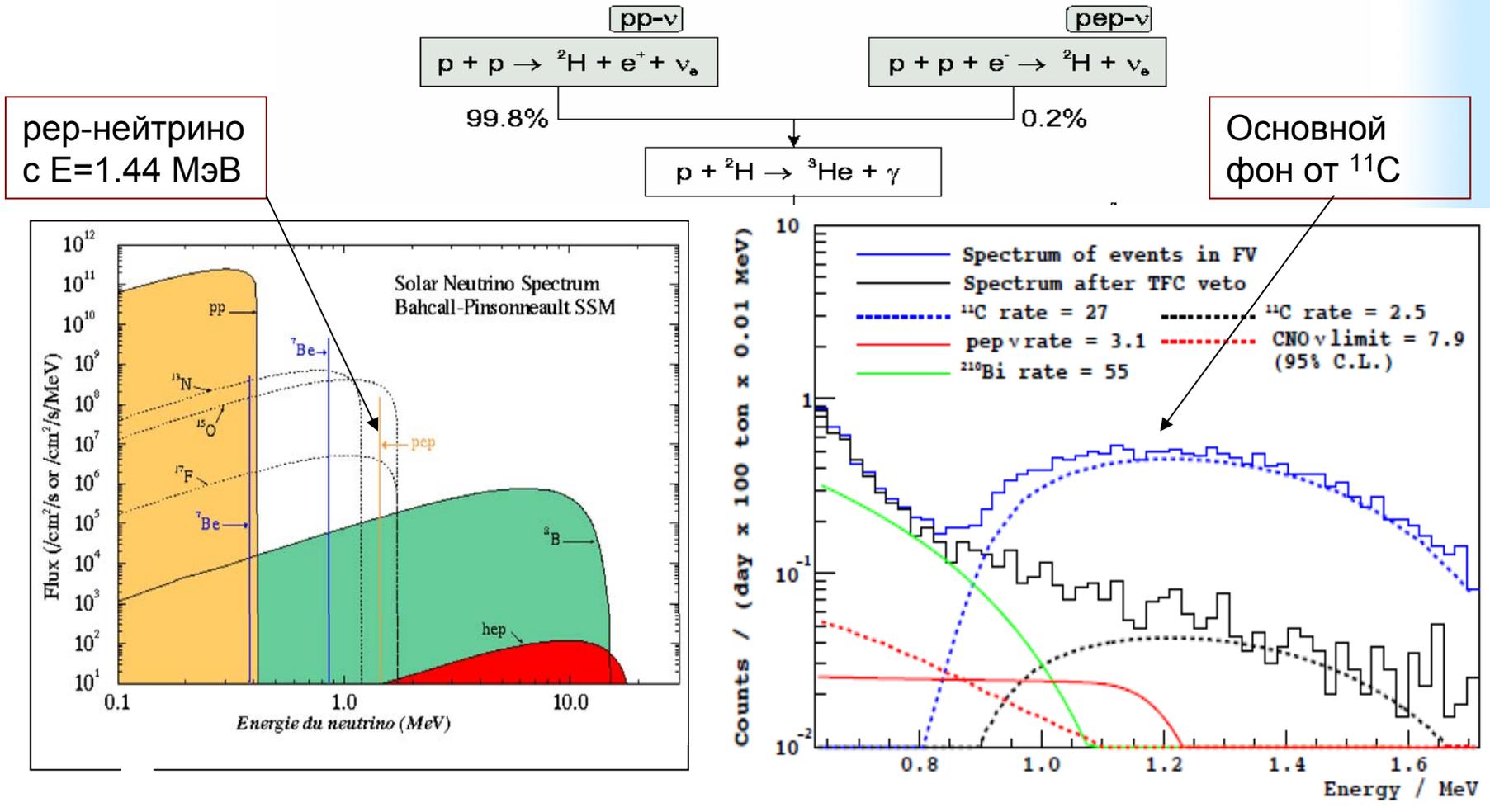
^7Be нейтрино MSW LMA $A_{dn} = +0.1\%$ **MSW LOW** $A_{dn} = (11-80)\%$

${}^7\text{Be}$ - ν : асимметрия день-ночь $A_{dn} = 0.001 \pm 0.012 \pm 0.007$



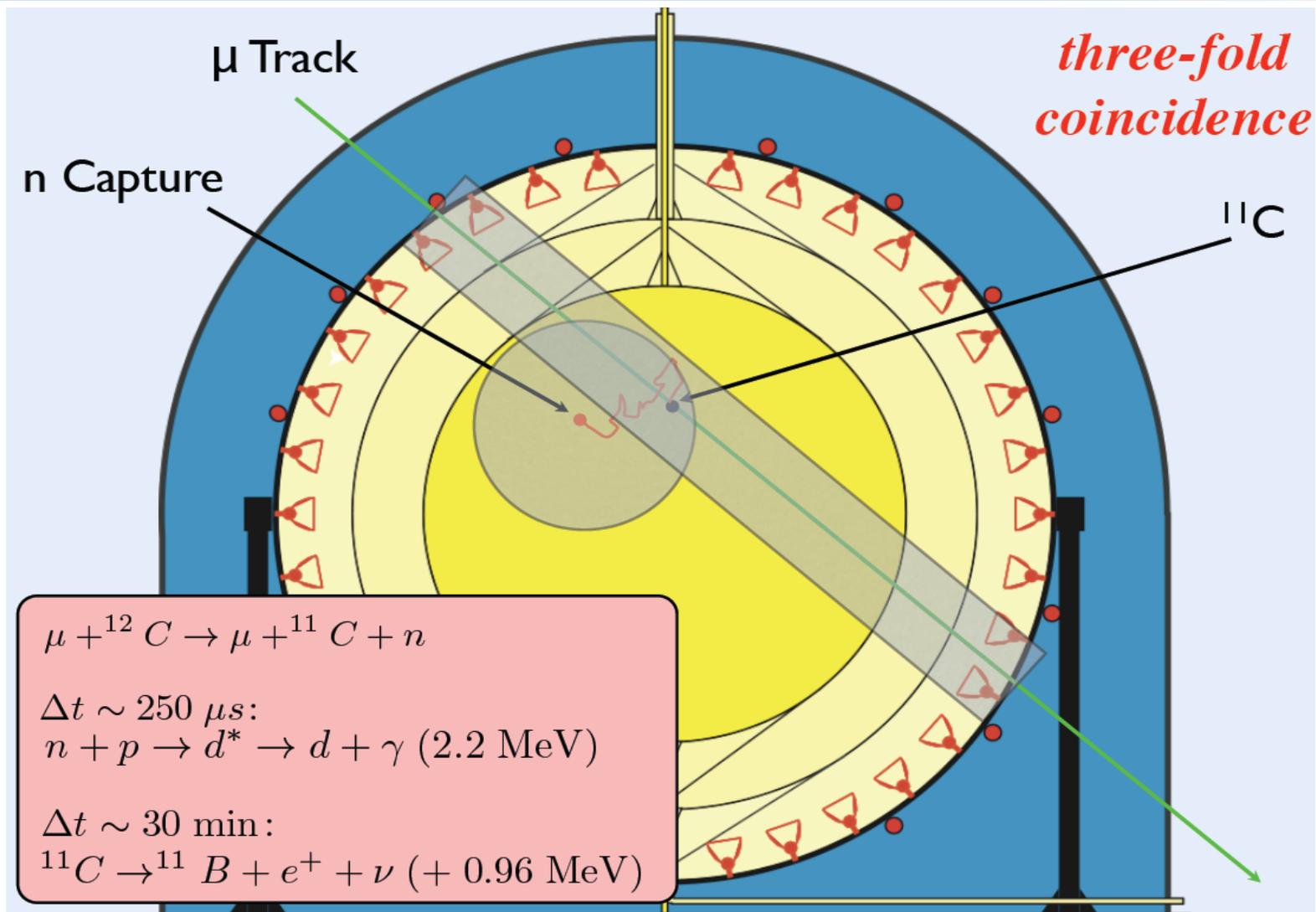
Не обнаружено
асимметрии в
энергетическом и
угловом
распределении.
Решение LOW
отвергается на 8.5σ .

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



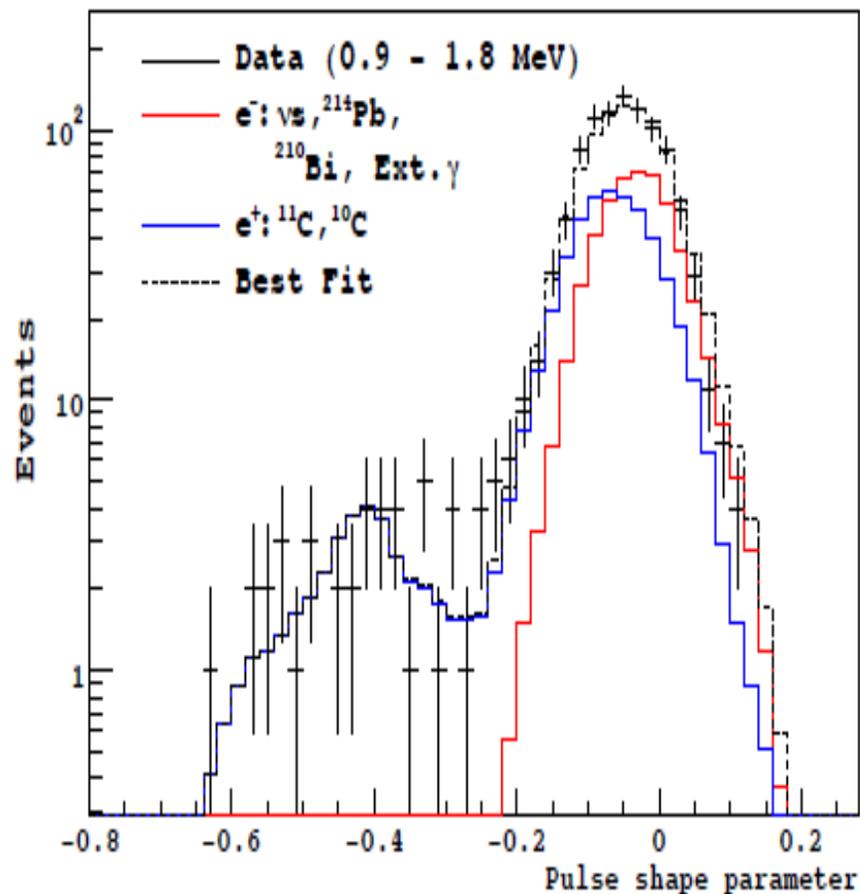
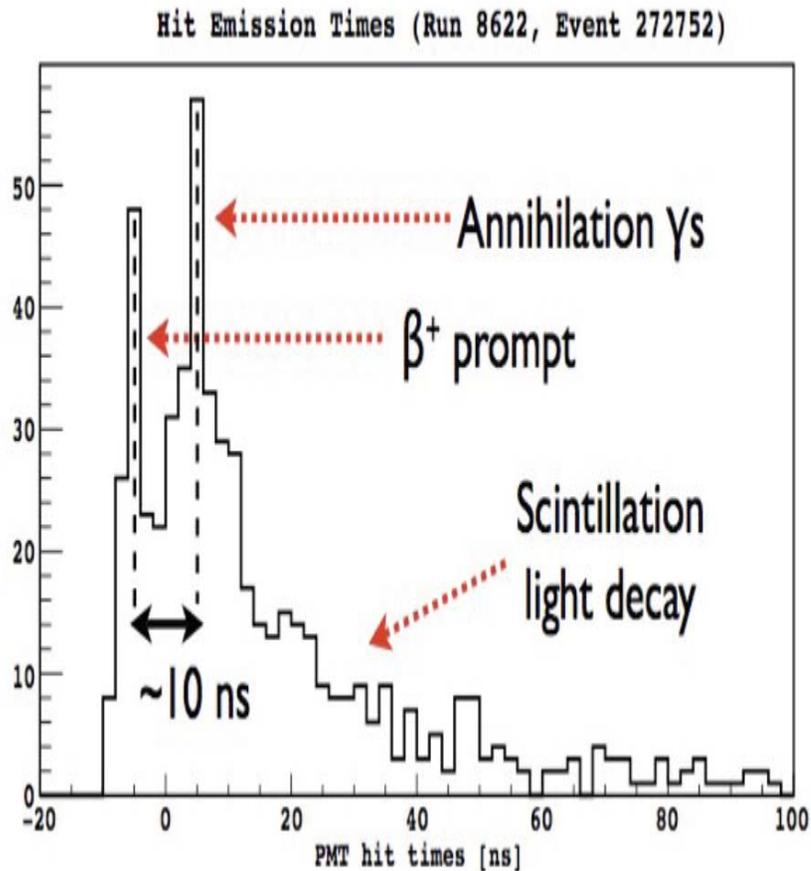
Детекторы солнечных нейтрино показали, что в Солнце действительно происходят ядерные реакции. Поток пер-нейтрино предсказан с точностью 1.2%. CNO нейтрино меняется в ~2 раза для high и low Z.

Три последовательных совпадения



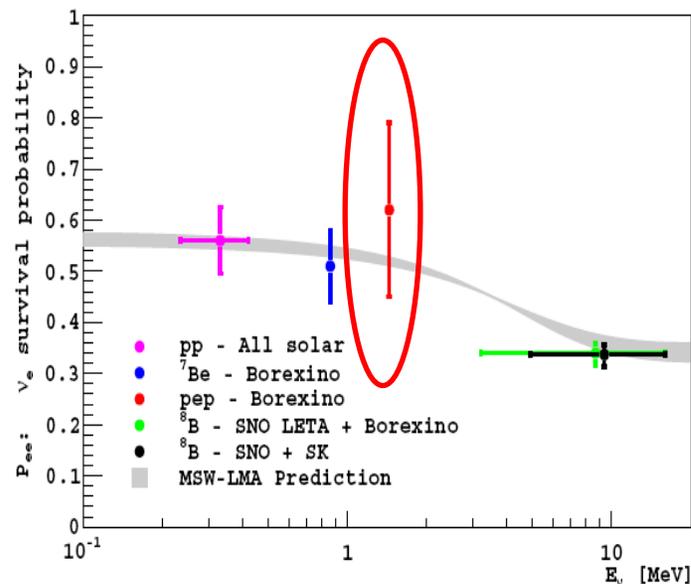
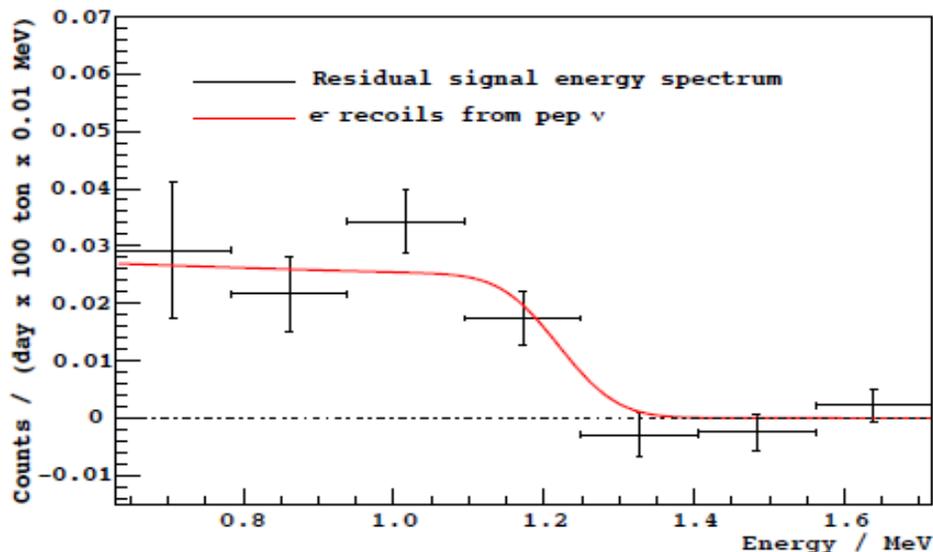
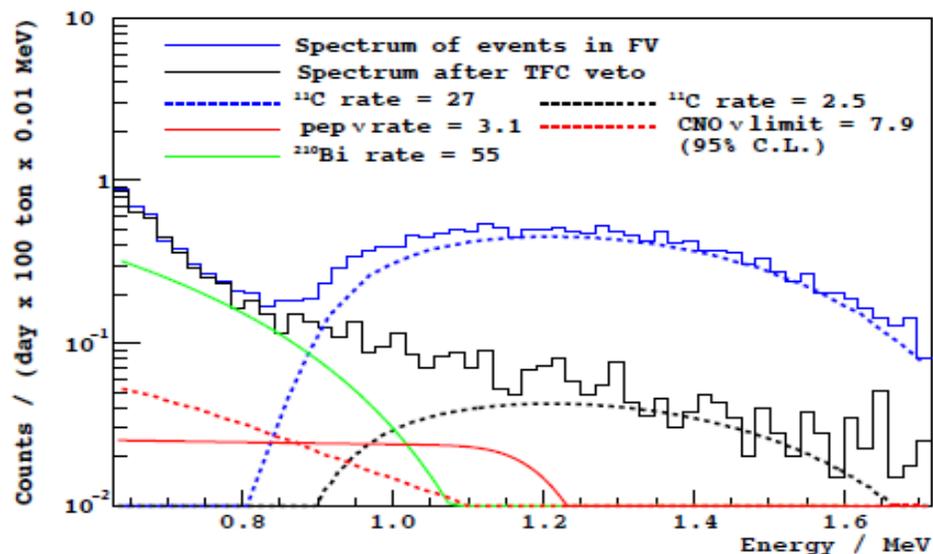
Подавление фона ^{11}C в 11 раз при потере 50% живого времени

+ образование позитрония



В $\sim 50\%$ распадов формируется ортопозитроний со временем жизни $T_{1/2} = 3$ ns, что предоставляет возможность дополнительной дискриминации фона

Результат для рер- и CNO нейтрино



пер:

$R = 3.1 \pm 0.6 \text{ stat} \pm 0.3 \text{ sys} / (\text{d } 100\text{t})$
 $\Phi (\text{пер}) = (1.6 \pm 0.3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
 эксперимент/SSM = 1.1 (MSW-LMA)

CNO:

$R < 7.9 / (\text{d } 100\text{t})$ (95% C.L.)
 $\Phi (\text{CNO}) < 7.7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
 Эксперимент/SSM(hZ) < 1.5

First evidence of pep solar neutrino

PHYSICAL REVIEW LETTERS



First Evidence of *pep* Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino

G. Bellini,¹ J. Benziger,² D. Bick,³ S. Bonetti,¹ G. Bonfini,⁴ D. Bravo,⁵ M. Buizza Avanzini,¹ B. Caccianiga,¹ L. Cadonati,⁶ F. Calaprice,⁷ C. Carraro,⁸ P. Cavalcante,⁴ A. Chavarria,⁷ D. D'Angelo,¹ S. Davini,⁸ A. Derbin,⁹ A. Etenko,¹⁰ K. Fomenko,^{11,4} D. Franco,¹² C. Galbiati,⁷ S. Gazzana,⁴ C. Ghiano,⁴ M. Giammarchi,¹ M. Goeger-Neff,¹³ A. Goretti,⁷ L. Grandi,⁷ E. Guardincerri,⁸ S. Hardy,⁵ Aldo Ianni,⁴ Andrea Ianni,⁷ D. Korabely,¹¹ G. Korga,⁴ Y. Koshio,⁴ D. Kryn,¹² M. Laubenstein,⁴ T. Lewke,¹³ E. Litvinovich,¹⁰ B. Loer,⁷ F. Lombardi,⁴ P. Lombardi,¹ L. Ludhova,¹ I. Machulin,¹⁰ S. Manecki,⁵ W. Maneschg,¹⁴ G. Manuzio,⁸ Q. Meindl,¹³ E. Meroni,¹ L. Miramonti,¹ M. Misiaszek,^{15,4} D. Montanari,^{4,7} P. Mosteiro,⁷ V. Muratova,⁹ L. Oberauer,¹³ M. Obolensky,¹² F. Ortica,¹⁶ K. Otis,⁶ M. Pallavicini,⁸ L. Papp,⁵ L. Perasso,¹ S. Perasso,⁸ A. Pocar,⁶ J. Quirk,⁶ R. S. Raghavan,⁵ G. Ranucci,¹ A. Razeto,⁴ A. Re,¹ A. Romani,¹⁶ A. Sabelnikov,¹⁰ R. Saldanha,⁷ C. Salvo,⁸ S. Schönert,¹³ H. Simgen,¹⁴ M. Skorokhvatov,¹⁰ O. Smimov,¹¹ A. Sotnikov,¹¹ S. Sukhotin,¹⁰ Y. Suvorov,⁴ R. Tartaglia,⁴ G. Testera,⁸ D. Vignaud,¹² R. B. Vogelaar,⁵ F. von Feilitzsch,¹³ J. Winter,¹³ M. Wojcik,¹⁵ A. Wright,⁷ M. Wurm,³ J. Xu,⁷ O. Zaimidoroga,¹¹ S. Zavatarelli,⁸ and G. Zuzel¹⁵

(Borexino Collaboration)

¹*Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, 20133 Milano, Italy*

²*Chemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA*

³*Institut für Experimentalphysik, Universität, 22761 Hamburg, Germany*

⁴*INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, SS 17 bis Km 18+910, 67010 Assergi, Italy*

⁵*Physics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA*

⁶*Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003, USA*

⁷*Physics Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA*

⁸*Dipartimento di Fisica, Università e INFN, Genova 16146, Italy*

⁹*St. Petersburg Nuclear Physics Institute, 188350 Gatchina, Russia*

¹⁰*NRC Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia*

¹¹*Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia*

¹²*Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, 75205 Paris cedex 13, France*

¹³*Physik Department, Technische Universität München, 85747 Garching, Germany*

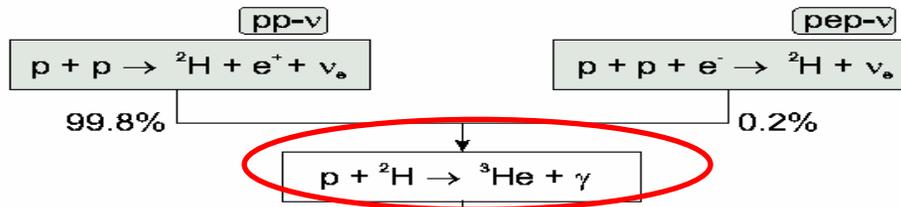
¹⁴*Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg, Germany*

¹⁵*M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30059 Krakow, Poland*

¹⁶*Dipartimento di Chimica, Università e INFN, 06123 Perugia, Italy*

(Received 14 October 2011)

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

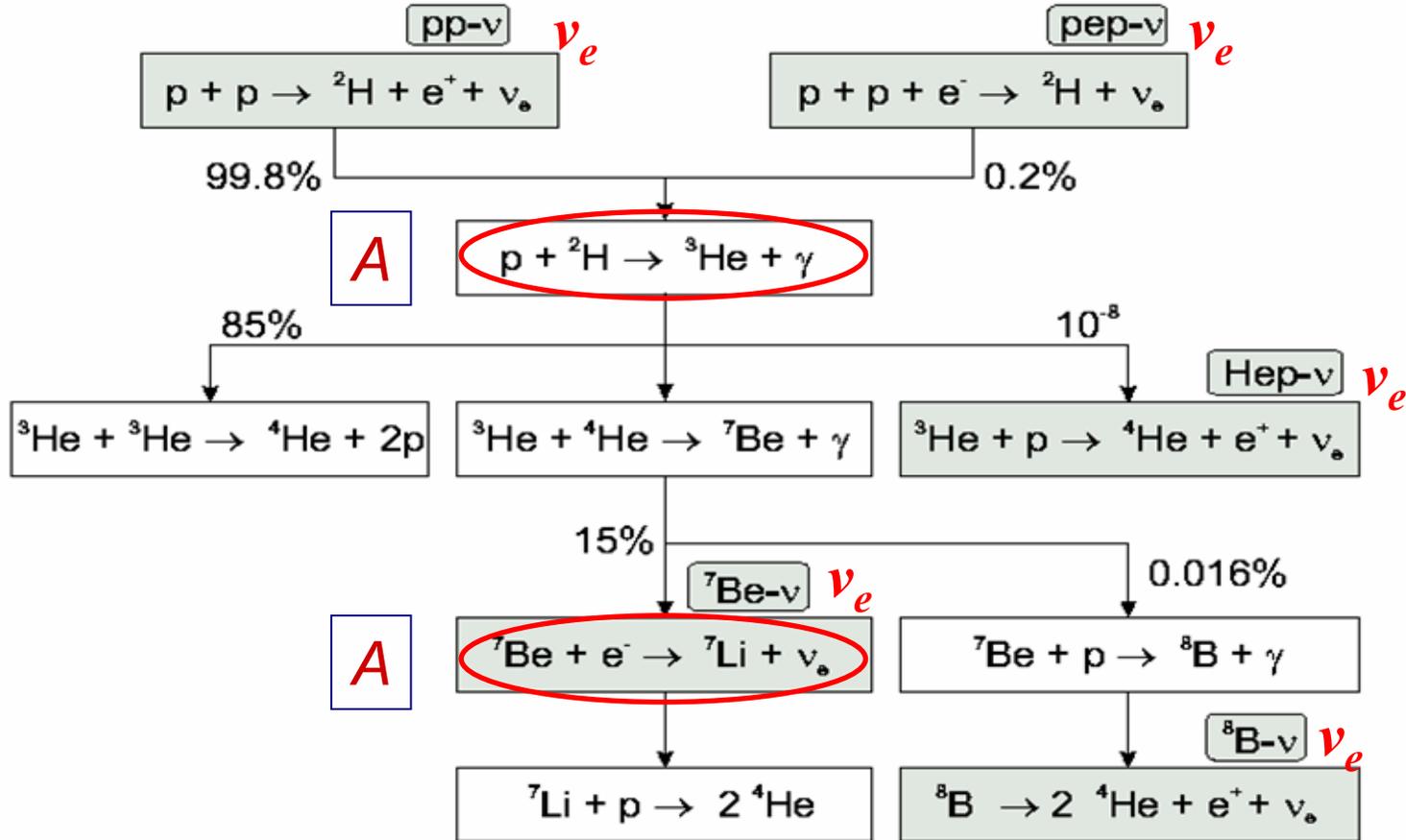
ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ АКСИОНОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕАКЦИИ $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$

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

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

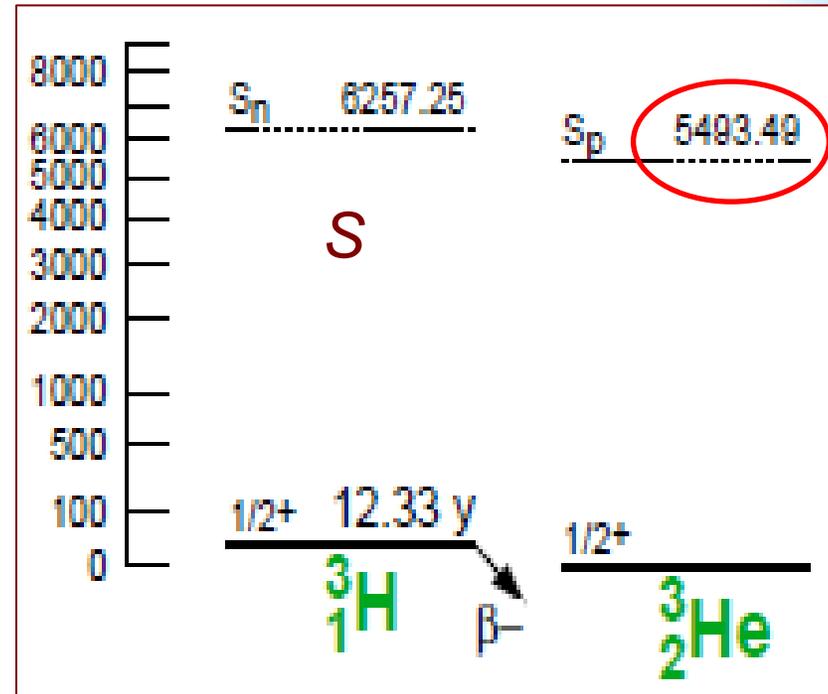
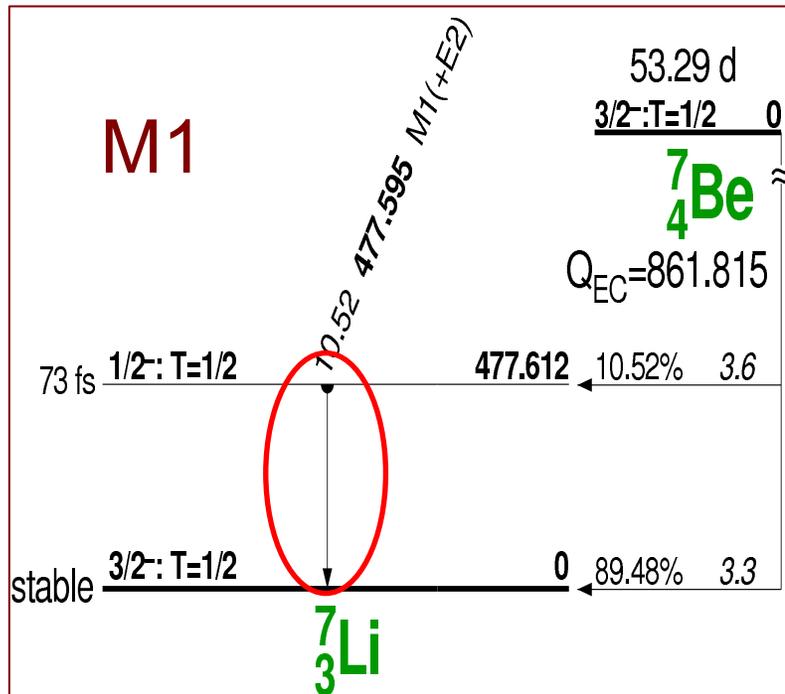
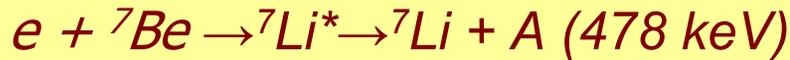


Солнечный pp-цикл: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + (26.7 \text{ МэВ})$



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.

Солнечные аксионы с энергией 478 кэВ и 5.5 МэВ



Аксионы могут излучаться в M1-переходе ядра ${}^7\text{Li}$, после электронного захвата в ${}^7\text{Be}$, и после захвата протона ядром дейтрона. Вследствии большой энергии перехода область исследуемых масс аксиона увеличивается до 5 МэВ. Некоторые модели основанные на концепции зеркального мира [Bereziani, et al., 2001] или суперсимметрии [Hall and Watari, 2004] разрешают существование аксиона с ассой около 1 МэВ.

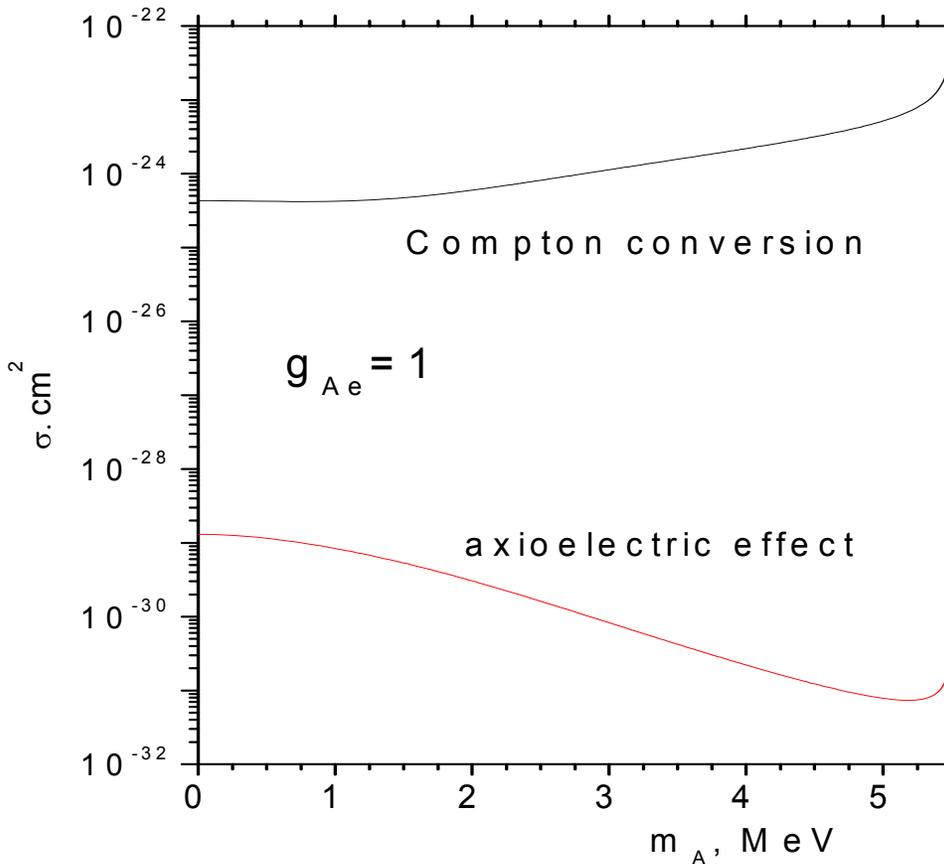
The fluxes of axions at the Earth in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

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

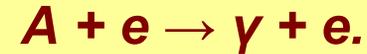
$$\begin{aligned}\Phi_{A0}(pd) &\cong 0.54 \times \Phi_{\nu pp} (g_{AN}^3)^2 (p_A / p_\gamma)^3 \\ &\cong 3.3 \times 10^{10} (g_{AN}^3)^2\end{aligned}$$

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.

Detection via axion-electron coupling



1. Compton conversion:



both e and γ are detected.

C.S. has a complex form,
the total CS for 5.5 MeV axions

$$\sigma_{CC} \approx g_{Ae}^2 \times 4.3 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

at $m_A < 1 \text{ MeV}$

2. Axioelectric effect:



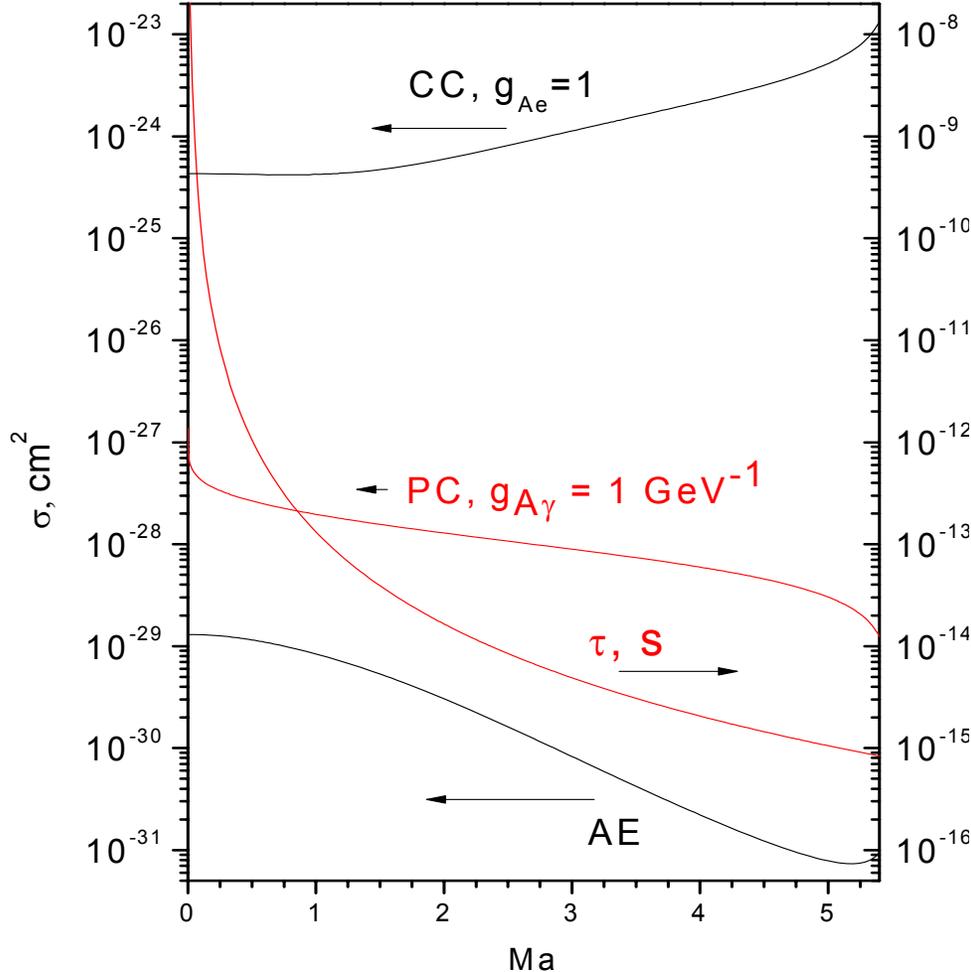
is analog of photo effect

CS is proportional Z^5 , for C atom
and $E_A = 5.5 \text{ MeV}$

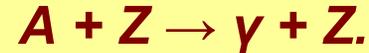
$$\sigma_{AE} \approx g_{Ae}^2 \times 1.3 \times 10^{-29} \text{ cm}^2$$

The AE CS is more than 4 orders of magnitude lower than for Compton process, so the AE effect can not be taken into account. However, using the different energy dependence $\sigma_{CC} \sim E_A$, $\sigma_{Ae} \sim E_A^{-3/2}$ and Z^5 dependence, the AE effect is more effective to search for low energy axions with detectors having high Z .

Detection via axion-photon coupling



1. inv. Primakoff conversion:



on nuclei, $E_\gamma \approx E_A$ and γ is detected.

C.S. has a complex form, the total CS for 5.5 MeV axions

$$\sigma_{CC} \approx g_{A\gamma}^2 \times 4.7 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ at } m_A < 1 \text{ MeV}$$

2. Axion decay:



the axion lifetime is

$$\Gamma [\text{s}^{-1}] = 1/\tau = g_{A\gamma}^2 m_A^3 / 64\pi = 0.8 \times 10^{-5} (g_{A\gamma} [\text{GeV}^{-1}])^2 (m_A [\text{eV}])^3$$

and lifetime have to be $< 500 \text{ s}$

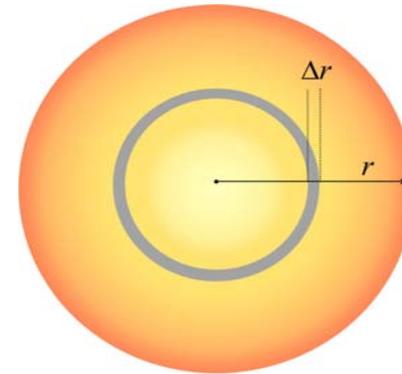
We also consider the possible signals from the decay of axion into two γ -quanta and from Primakoff conversion on nuclei. The amplitudes of the reactions depend on $g_{A\gamma}$.

Escape axions from the Sun

There are 2 main disadvantages of experiments with solar axions: the Sun can not be switched off and axions must to escape from the Sun and reach the Earth

particle	e	p	^4He	^{12}C	^{14}N	^{16}O	Fe	Pb
in 10^{35} cm^{-2}	6.8	5	0.9	6×10^{-4}	7×10^{-4}	2.3×10^{-3}	1.5×10^{-4}	5×10^{-10}

Constant	g_{Ae}	g_{Ay}	g_{AN}
Limit	$<10^{-6}$	$<10^{-4}$	$<10^{-3}$
Process	CC	PC	PD



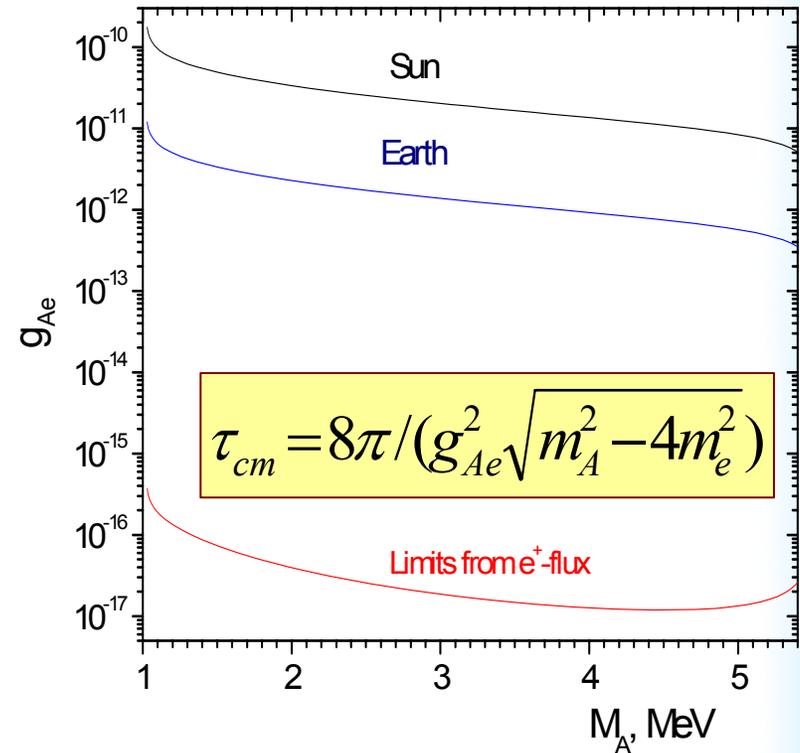
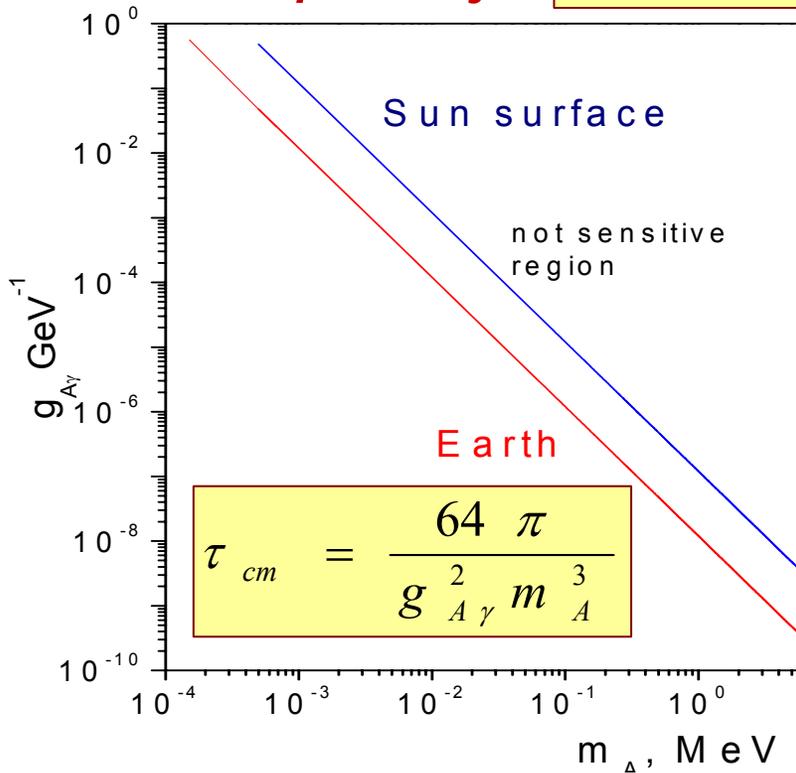
The axions produced inside the Sun must pass through a layer of $6.8 \times 10^{35} \text{ e}'\text{s}/\text{cm}^2$, $5 \times 10^{35} \text{ p}'\text{s}$ and $1 \times 10^{35} \alpha'\text{s}$ in order to reach the Sun's surface. The Compton conversion of an axion into a photon imposes an upper limit on the sensitivity of Earth surface experiments to the constant g_{Ae} . For g_{Ae} values below 10^{-6} , the axion flux is not substantially suppressed. The similar limitations are for axion-photon (Primakoff conversion) and axion-nucleon couplings (photodisintegration).

Axions decay during the flight

$A \rightarrow 2\gamma$ decay

$$\Phi_A = \exp\left(-\frac{\tau_f}{\tau_{cm}}\right)\Phi_{A0}$$

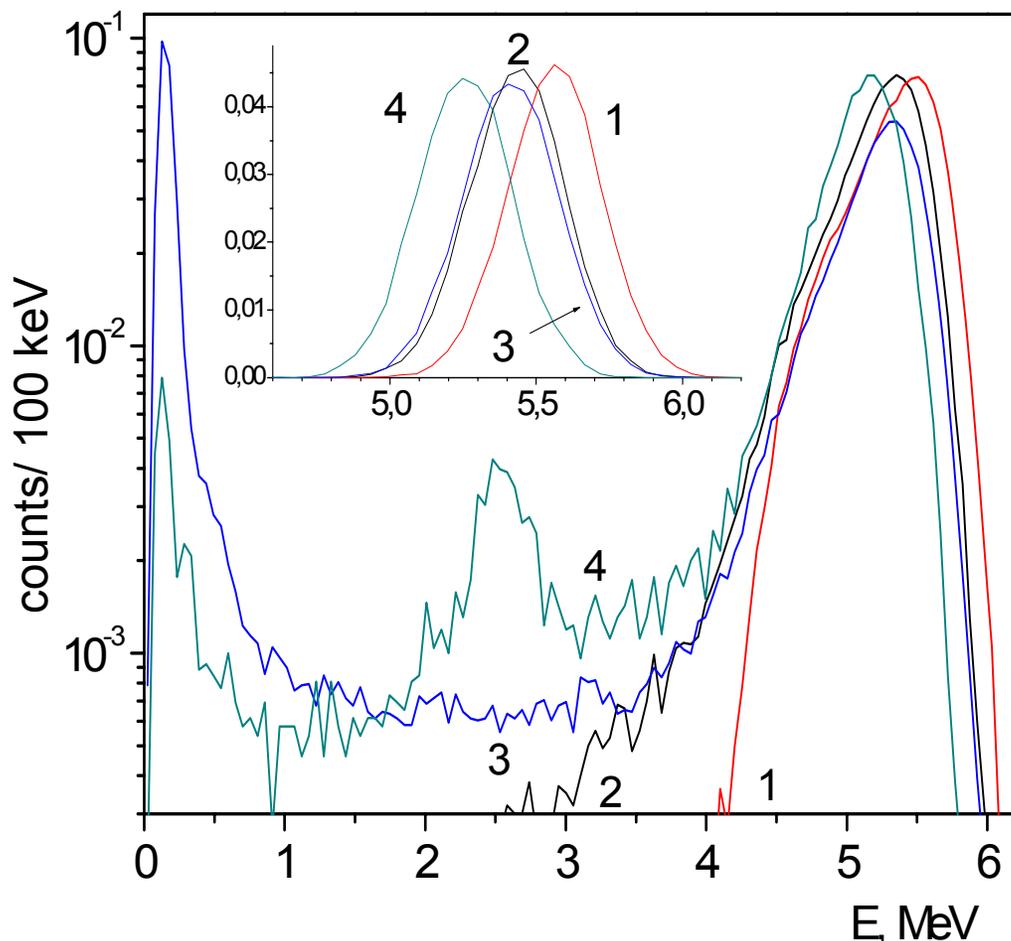
$A \rightarrow e^+ e^-$ decay ($m_A > 2m_e$)



For axions with a mass above $2m_e$, the main decay mode is into an e^+e^- pair. If $m_A < 2m_e$ the axion can decay into 2 γ 's. The condition $\tau_f < 0.1 \times \tau_{cm}$ (in this case 90% of all axions reach Earth) yields the sensitivity limits for the constants g_{Ae} and $g_{A\gamma}$ vs m_A .



Borexino response functions for axion processes

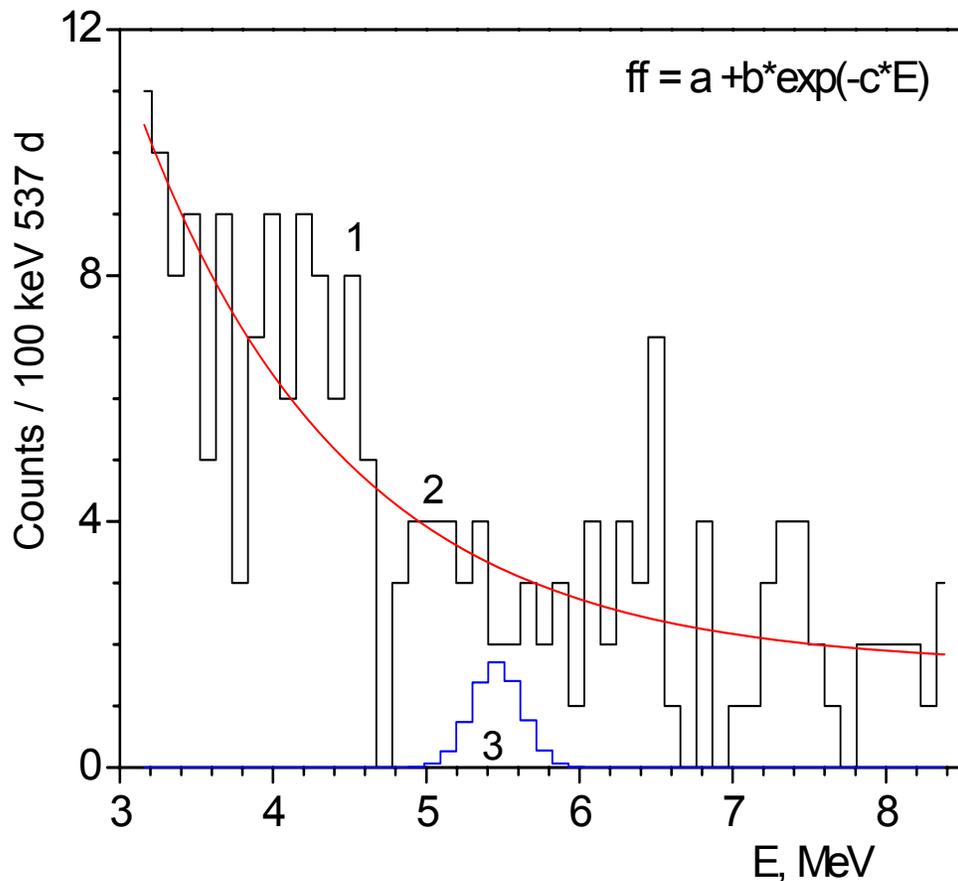


- 1 – axioelectric effect
- 2 – Compton conversion
- 3 – Primakoff conversion
- 4 – Axion decay $A \rightarrow 2\gamma$

The Monte Carlo method has been used to simulate the Borexino response to electrons and γ -quanta appearing in axion interactions. The response function of the Borexino to the axion's was found by MC simulations based on **GEANT4 code**, taking into account the effect of ionization quenching and the dependence of the registered charge on the distance from the detector's center.

The uniformly distributed γ 's and e 's were simulated inside the inner vessel, but the response functions were obtained for events restored inside the FV. The MC candidate events are selected by the same cuts that was applied for real data selection. The signature of all reactions is peak at 5.5 MeV energy.

Fitting procedure



The spectrum was fitted by a sum of exp and Gaussian functions, the position and dispersion of the later was found from the MC response:

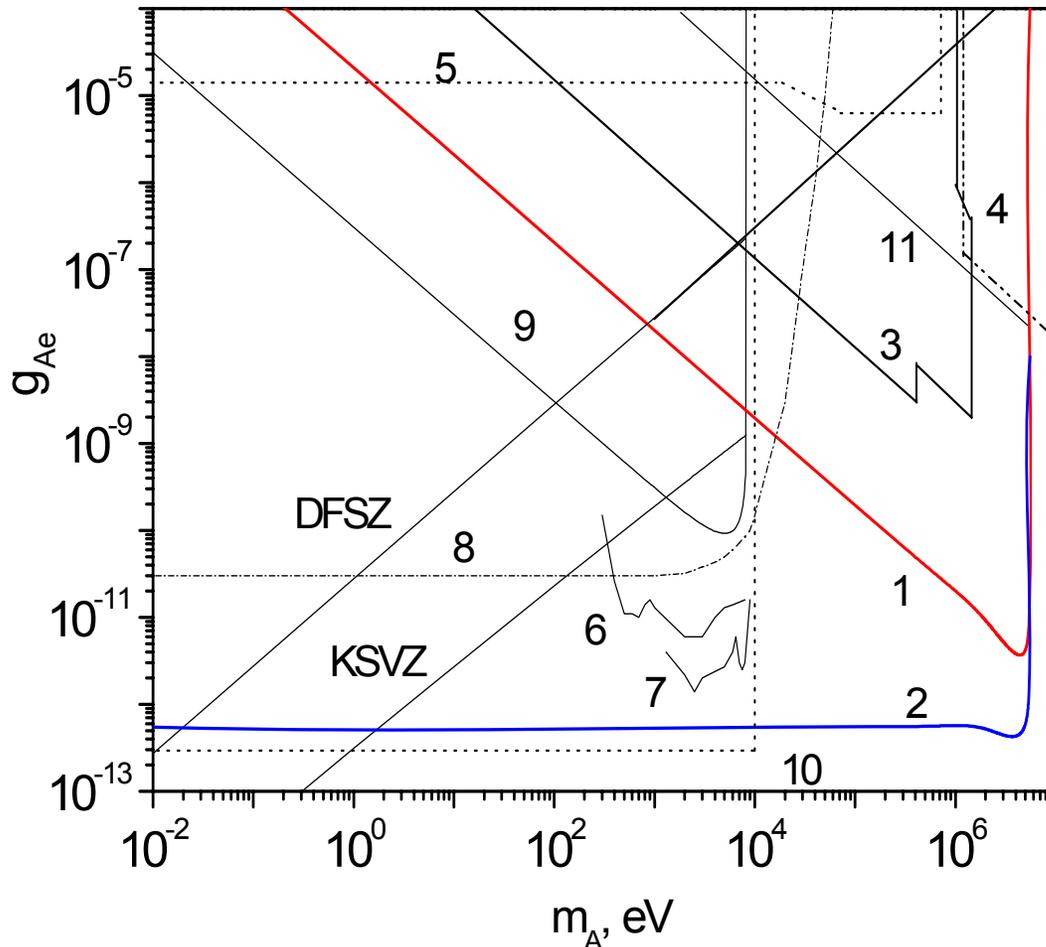
$$N_{th}(E) = a + b \exp(-cE) + \frac{S}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(E_0 - E)^2}{2\sigma^2}\right]$$

The number of counts in the axion peak S was calculated using the maximum likelihood method for Poisson distribution.

$$L = \prod_i \exp(-N_i^{th}) (N_i^{th})^{N_i^{exp}} / N_i^{exp}!$$

The upper limit on the number of counts in the peak was found using the profile of maximal values of L for different fixed S when all others parameters were free. The obtained values of $L_{max}(S)$ were normalized to unit for $S < 0$ that allows to select the given confidence level. The goodness-of-fit was found by MC ($p = 52\%$)

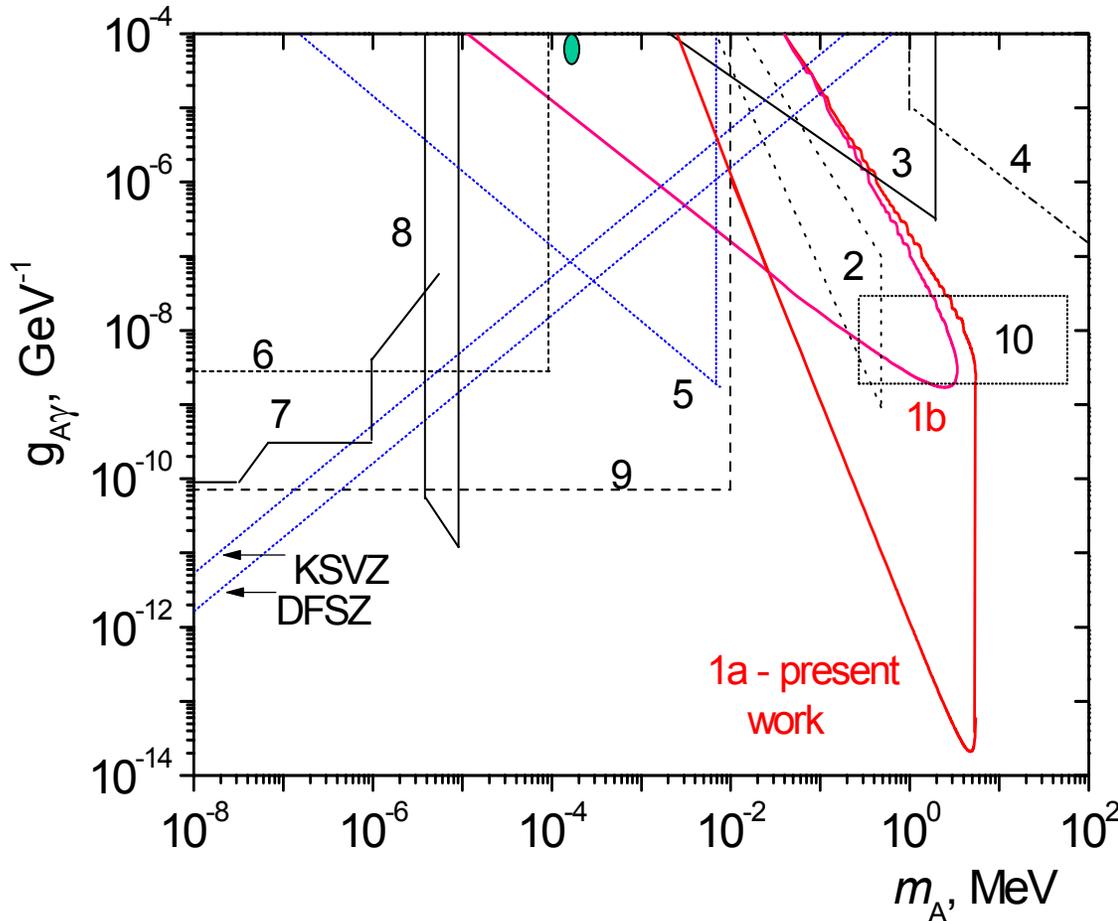
Limits on $g_{Ae} \times g_{AN}$ vs m_A and g_{Ae} vs m_A



- 1- Borexino limits on g_{Ae}**
- 2- Borexino limits on $g_{Ae} \times g_{AN}$**
- 3 – Reactor experiments and ^{64}Cu source
- 4 – beam-dump experiments
- 5 – ortopositronium decay
- 6 – CoGeNT coll.
- 7 – CDMS coll.
- 8 – Solar axion luminosity
- 9 – Resonant absorption by ^{169}Tm nuclei (tomorrow talk of E.Unzhakov, g_{Ae} -axion spectra)
- 10 – Red giant
- 11 – Axioelectric effect in BGO

Borexino results exclude the new large regions of axion masses (0.01-1) MeV and coupling constants $g_{Ae} \sim (10^{-11}-10^{-9})$. For hadronic axion with $m_A = 1$ MeV, $g_{Ae} < 2 \times 10^{-11}$. Figure also shows the constraints on g_{Ae} that were obtained in the experiments with reactor, accelerator and solar axions as well from astrophysical arguments.

Limits on g_{AY} vs m_A for $g_{AN}^3 = 2.8 \times 10^{-8} m_A$ (KSVZ)

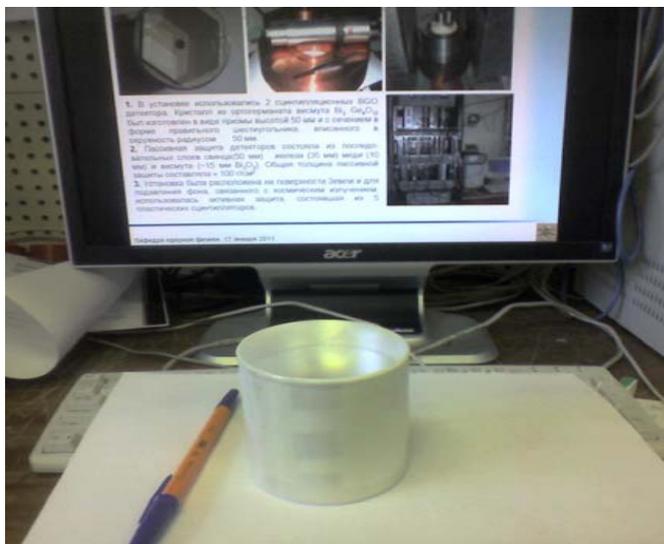


- 1a – Borexino $A \rightarrow 2\gamma$ decay**
- 1b – Borexino PC**
- 2 – CTF results
- 3 – Reactor experiments
- 4 – beam-dump experiments
- 5 – Resonant absorption (*E. Unzhakov's talk tomorrow*)
- 6 – Cosme, Solax, DAMA
- 7, 11 – CAST
- 8 – Telescopes
- 9 – HB stars
- 10 – SUSY and mirror axions allowed region

The Borexino results exclude the new large regions of axion masses 10 keV - 5 MeV and coupling constants g_{AY} (2×10^{-14} - 10^{-7}) GeV^{-1} . For higher values $g^2 m^3$ axions decay before they reach the detector, for lower one the probability of axion decay inside Borexino is too low. Borexino limits are more than 2-4 orders magnitude stronger than obtained by laboratory-based experiments using nuclear reactors. New region available for heavy axions is excluded.



Экспериментальная установка с 3" BGO (Гатчина)

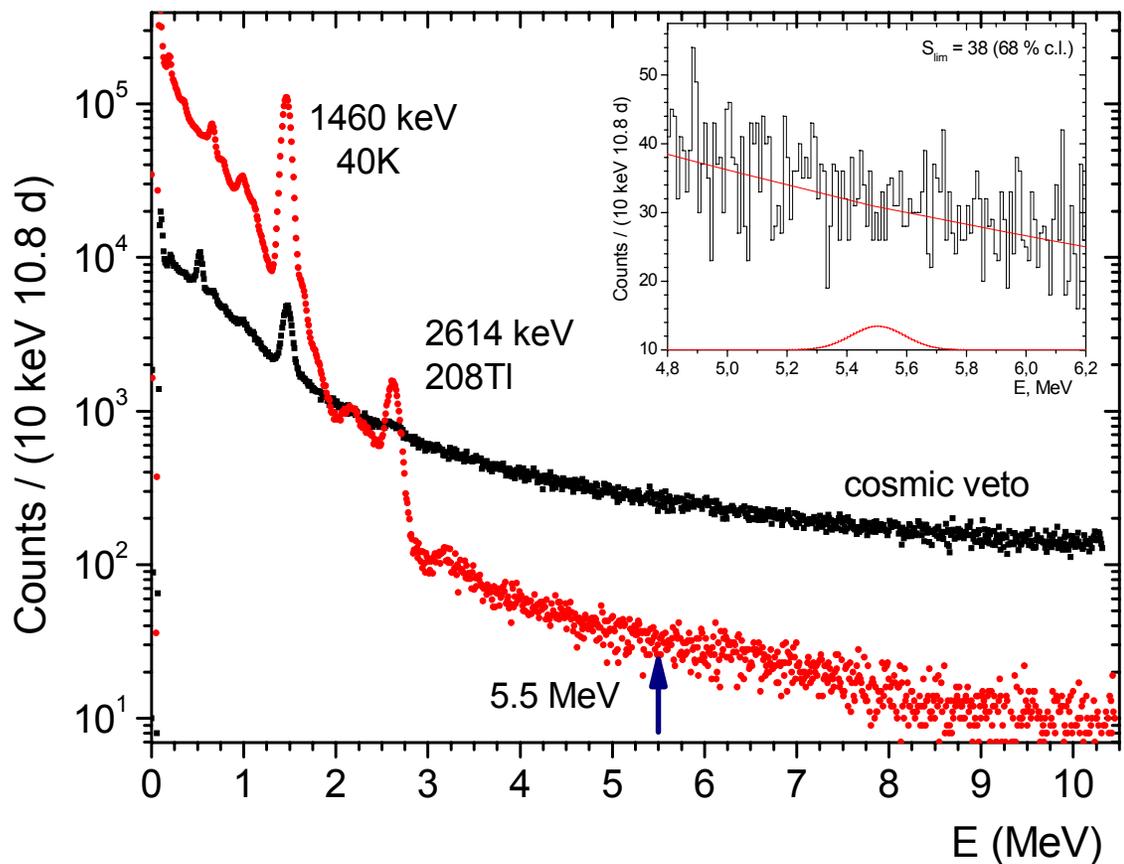


1. В установке использовались сцинтилляционный BGO детектор. Кристалл из ортогерманата висмута **2.5 кг $Bi_3Ge_4O_{12}$** был изготовлен в виде цилиндра высотой **76 мм** и диаметром **76 мм**.
2. Пассивная защита детекторов состояла из слоев свинца (100 мм), висмута (~20 мм Bi_2O_3) и меди (10 мм). 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**.





Спектр ВГО детектора, измеренный за 11 суток



В спектре идентифицируется 4 ярко выраженных пика. Пик с энергией **1460 кэВ** связан с ^{40}K . Пик **2614 кэВ** связан с ^{208}Tl из семейства ^{238}U . Аннигиляционный пик 511 кэВ. Пик 2103 кэВ связан с вылетом 511 кэВ γ -кванта из детектора. Уровень фона при энергиях > 4 МэВ обусловлен γ -квантами, возникающими при захвате нейтронов, и проникающими через неполную пассивную защиту.

Энергетическое разрешение ($\sigma = 3.5\% / (E, \text{MeV})^{1/2}$) при энергии 1460 кэВ составило 100 кэВ.

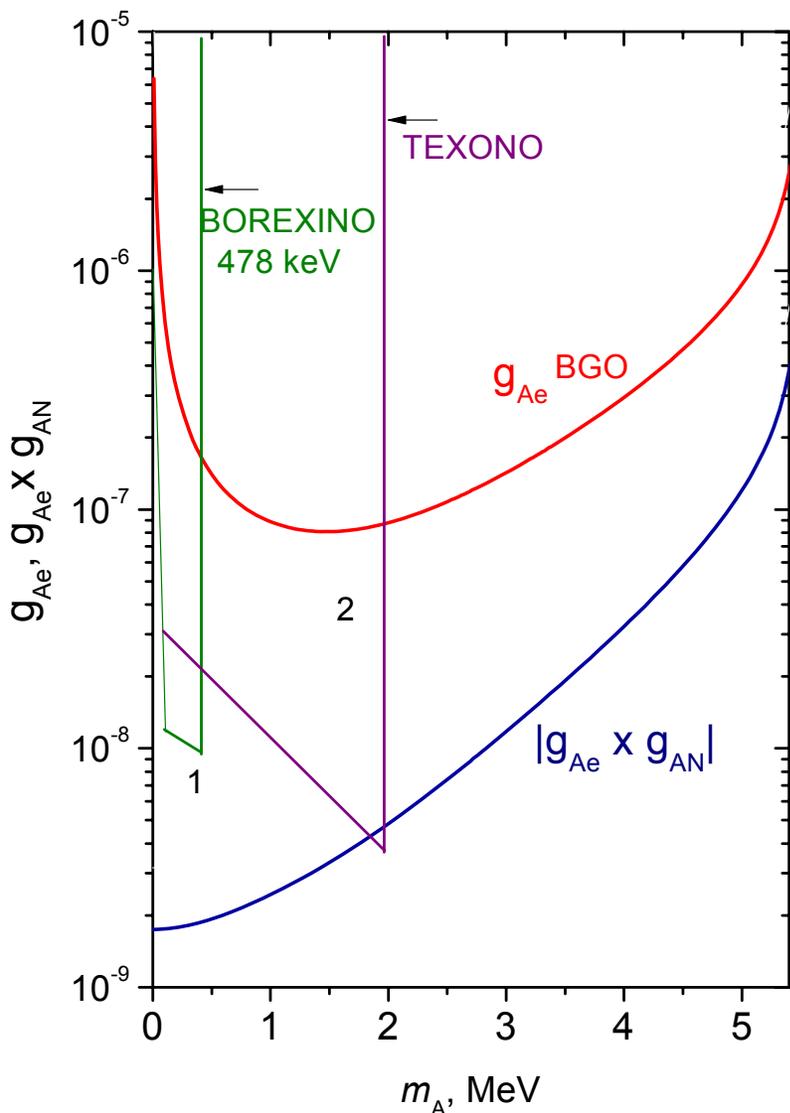
Уровень фона при энергии 5.5 МэВ составил

0.1 отсчета / (кэВ кг сутки).

Энергетический спектр ВГО – детектора, измеренный в совпадении и антисовпадении с активной защитой.

Масса детектора увеличена в 4.5 раза. Уровень фона понижен в 2.5 раза. Разрешение лучше в 1.8 раза.

Сравнение с результатами других экспериментов



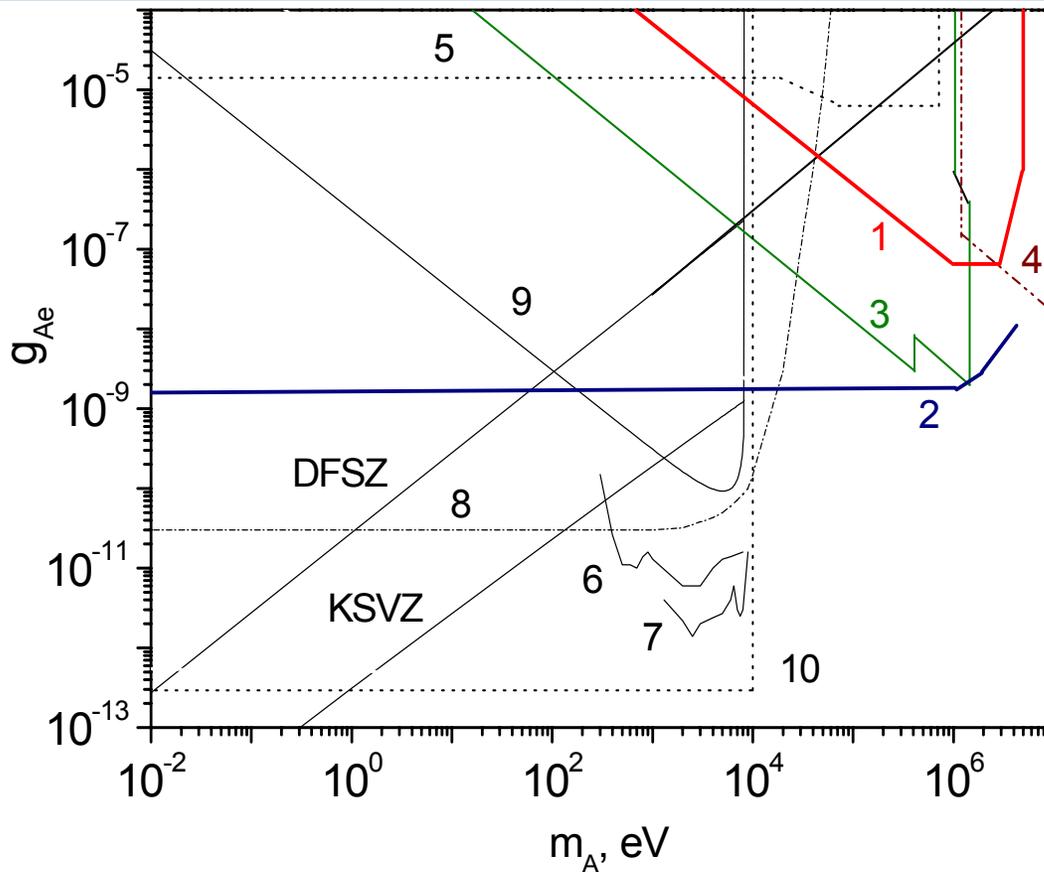
Наиболее строгий верхний предел на константу g_{Ae} в области масс $m_A \approx 1$ МэВ получен коллаборацией **Texono**, изучавшей комптоновскую конверсию аксиона вблизи ядерного реактора, и колл. **BOREXINO** в эксперименте с солнечными ${}^7\text{Li}$ 478 кэВ аксионами. Полученный предел $g_{Ae} \leq 10^{-8}$ менее чем на порядок превосходит наш результат. Чувствительность эксперимента зависит от массы мишени M (кг), уровня фона B ($\text{кэВ}^{-1} \text{кг}^{-1} \text{сут}^{-1}$) и разрешения детектора σ (кэВ) и времени измерений T следующим образом

$$\varepsilon = \frac{\text{эффект}}{\text{sqrt(фон)}} = \frac{MT}{\text{sqrt}(B\sigma MT)} = \sqrt{MT / \sigma B}$$

Для улучшения достигнутого результата необходимо увеличить массу детектора в 4 раза, понизить уровень фона на порядок и увеличить время измерений в 4 раза. Все эти меры позволят поднять чувствительность эксперимента к константе g_{Ae} до уровня превосходящего уровень, достигнутый в современных экспериментах.



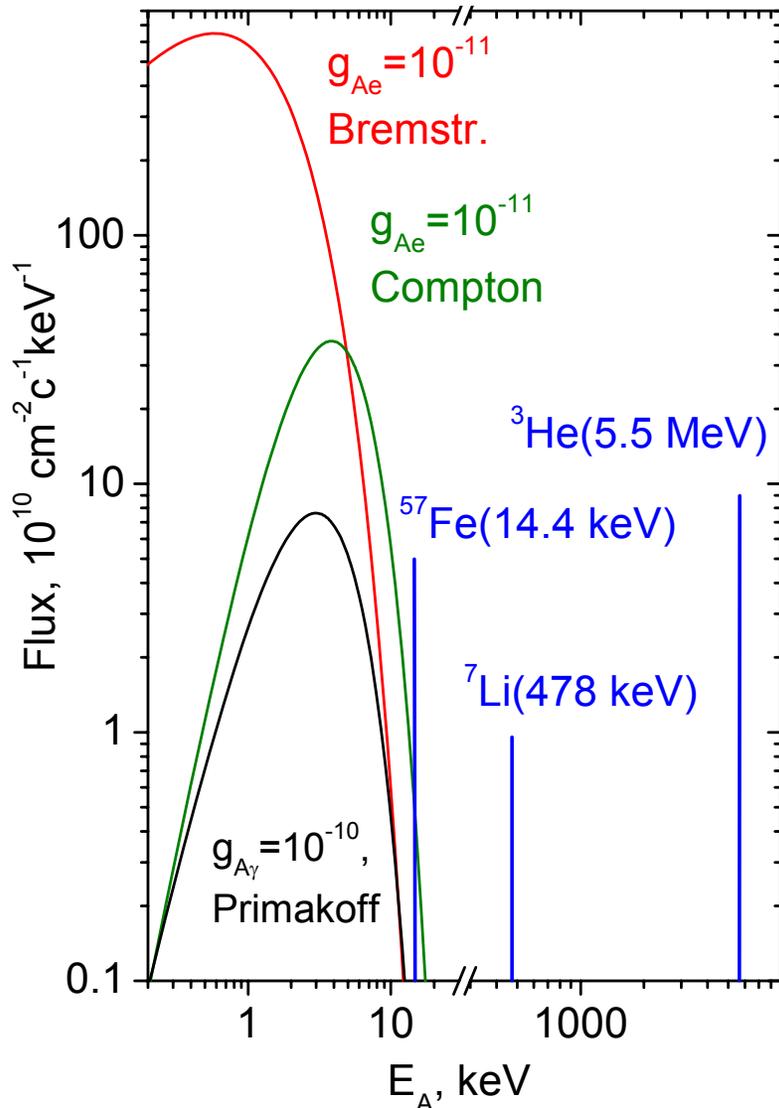
Ограничения на $g_{Ae} \times g_{AN}$ от m_A и g_{Ae} от m_A



- 1 - BGO предел на g_{Ae}
- 2 - BGO предел на $g_{Ae} \times g_{AN}$
- 3 - реакторные эксперименты и источник ^{64}Si
- 4 - ускорительные beam-dump
- 5 - распад ортопозитрония
- 6 - CoGeNT коллаборация
- 7 - CDMS коллаборация
- 8 - 10% от нейтринной светимости Солнца
- 9 - Резонансное поглощение ядрами ^{169}Tm (доклад Е. Унжакова на этой секции)
- 10 - красные гиганты

На рисунке показаны современные ограничения на константу связи аксиона с электроном для широкого диапазона масс аксион, полученные в экспериментах на реакторах и ускорителях (3, 4), из распада ортопозитрония с испусканием аксиона, в предположении, что аксионы составляют темную материю (7, 8), при поиске резонансного поглощения солнечных аксионов (9) и из динамики звезд (10).

Поиск солнечных аксионов в ПИЯФ



Если аксион существует, Солнце должно быть мощным источником этих частиц. Существует 5 основных источников аксионов:

1. Реакции основного ядерного цикла. Наиболее интенсивный поток ожидается для M1-перехода в ядре ${}^7\text{Li}$:

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

2. Магнитные переходы в ядрах, низколежащие уровни которых возбуждаются за счёт высокой температуры Солнца (${}^{57}\text{Fe}$, 14.4 кэВ).

3. Аксионы, возникающие в результате конверсии тепловых фотонов в электромагнитном поле плазмы.

4. Тормозное излучение электронов в виде аксионов: $e + Z(e) \rightarrow Z + \text{A}$.

5. Комптоновский процесс: $\gamma + e \rightarrow e + \text{A}$.

Вычисление спектров солнечных аксионов, связанных с процессами $e+Z \rightarrow Z+A+e$ и $\gamma+e \rightarrow e+A$

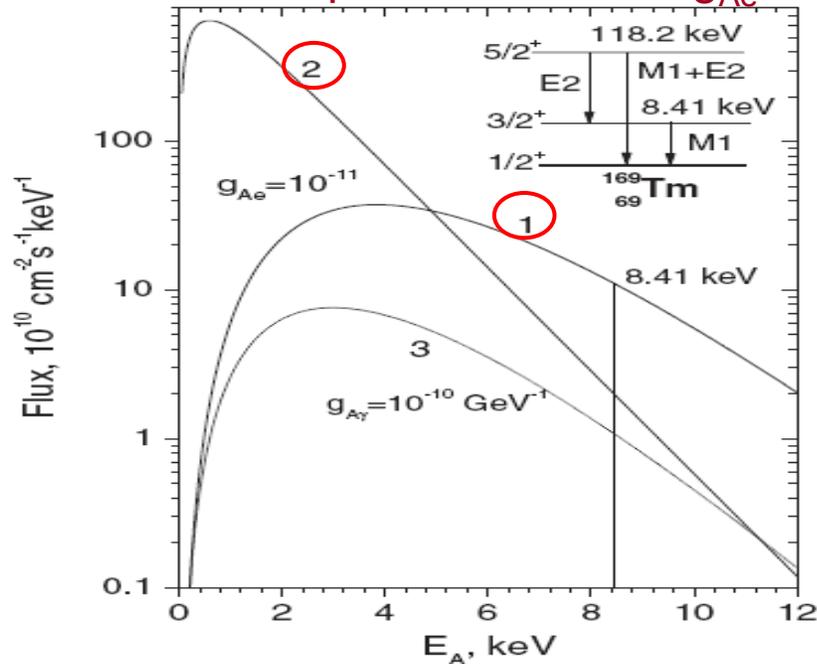
PHYSICAL REVIEW D 83, 023505 (2011)

Constraints on the axion-electron coupling for solar axions produced by a Compton process and bremsstrahlung

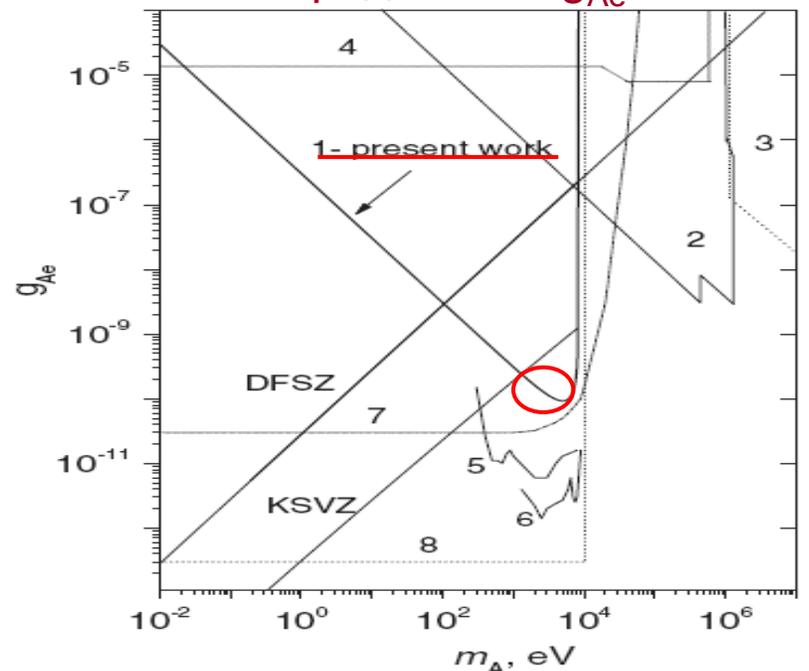
A. V. Derbin,* A. S. Kayunov, V. V. Muratova, D. A. Semenov, and E. V. Unzhakov

St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia 188300

Спектры аксионов от g_{Ae}



Пределы на g_{Ae}

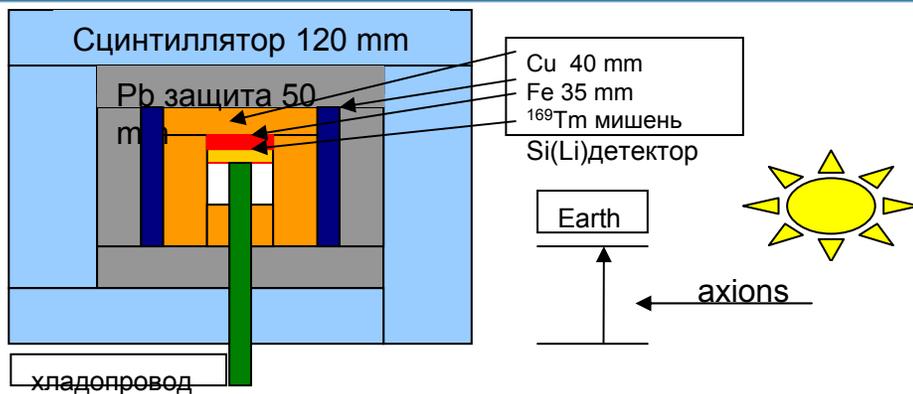


$$g_{Ae} \times |(g_{AN}^0 + g_{AN}^3)| \leq 2.1 \times 10^{-14},$$

$$g_{Ae} \times m_A \leq 3.1 \times 10^{-7} \text{ eV.}$$

$$m_A \leq 1.3 \text{ keV} \quad m_A \leq 105 \text{ eV}$$

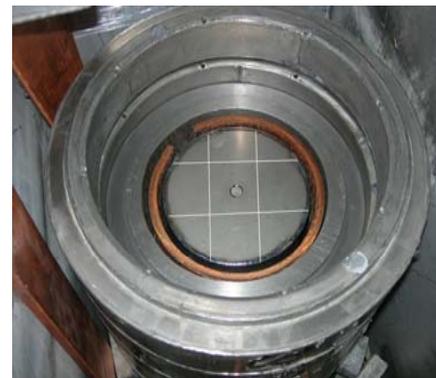
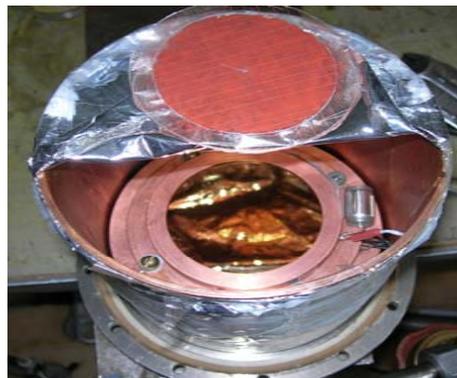
Три установки с Si(Li)-детекторами для поиска резонансного поглощения аксионов



I. $s=0.35 \text{ см}^2$
FWHM=150 эВ
 фон=30
 $\text{см}^{-2}\text{сут}^{-1}\text{кэВ}^{-1}$
 при 14.4 кэВ



II. 2.0 см^2
300 эВ
5
 $\text{см}^{-2}\text{сут}^{-1}\text{кэВ}^{-1}$



III. 34 см^2
1.5 кэВ
2.6
 $\text{см}^{-2}\text{сут}^{-1}\text{кэВ}^{-1}$

Эксперименты по поиску аксиона и константы связи

Детектирование

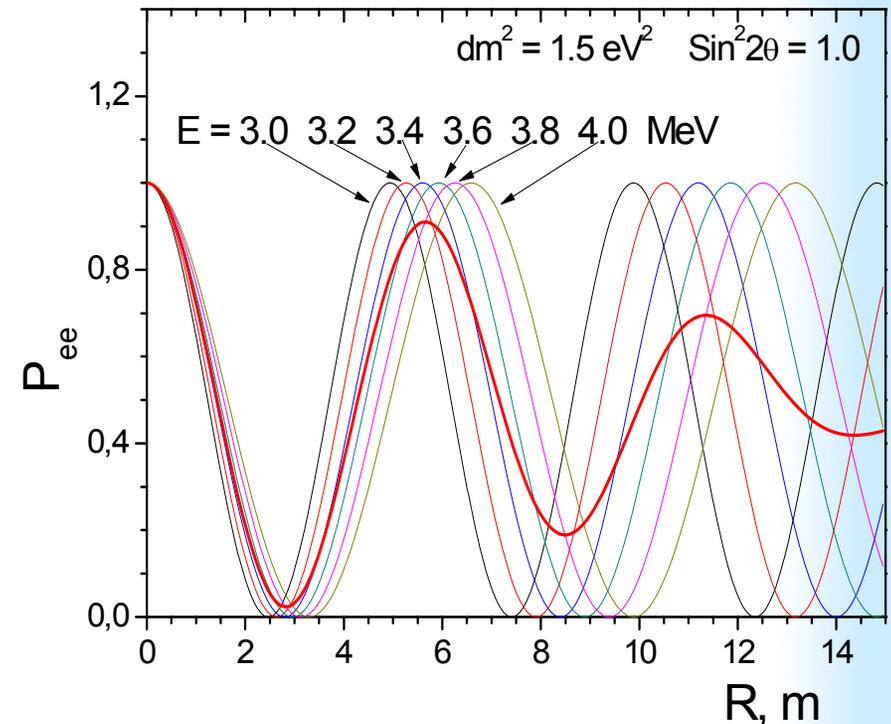
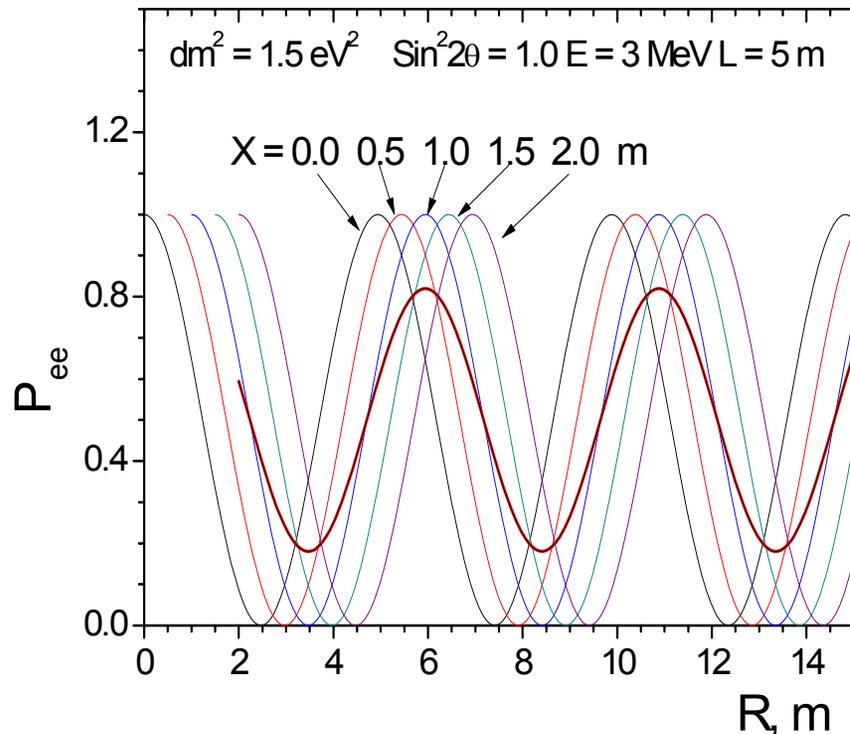
Образование

	$g_{A\gamma}$	g_{AN}	g_{Ae}
$g_{A\gamma}$	Конверсия в магнитном поле CAST, PVLAS, Токуо Helioscope,	резонансное поглощение аксионов ядрами ^{169}Tm	Аксиоэлектрический эффект в Ge-детекторе
g_{AN}	Конверсия в поле ядра	Поиск резонансного поглощения аксионов ядрами ^{57}Fe	Аксиоэлектрический эффект Bi (5.5 МэВ)
g_{Ae}	Конверсия в магнитном поле	резонансное поглощение аксионов ядрами ^{169}Tm	Аксиоэлектрический эффект в Ge-детекторе

Стерильное нейтрино: осцилляции на длине детектора

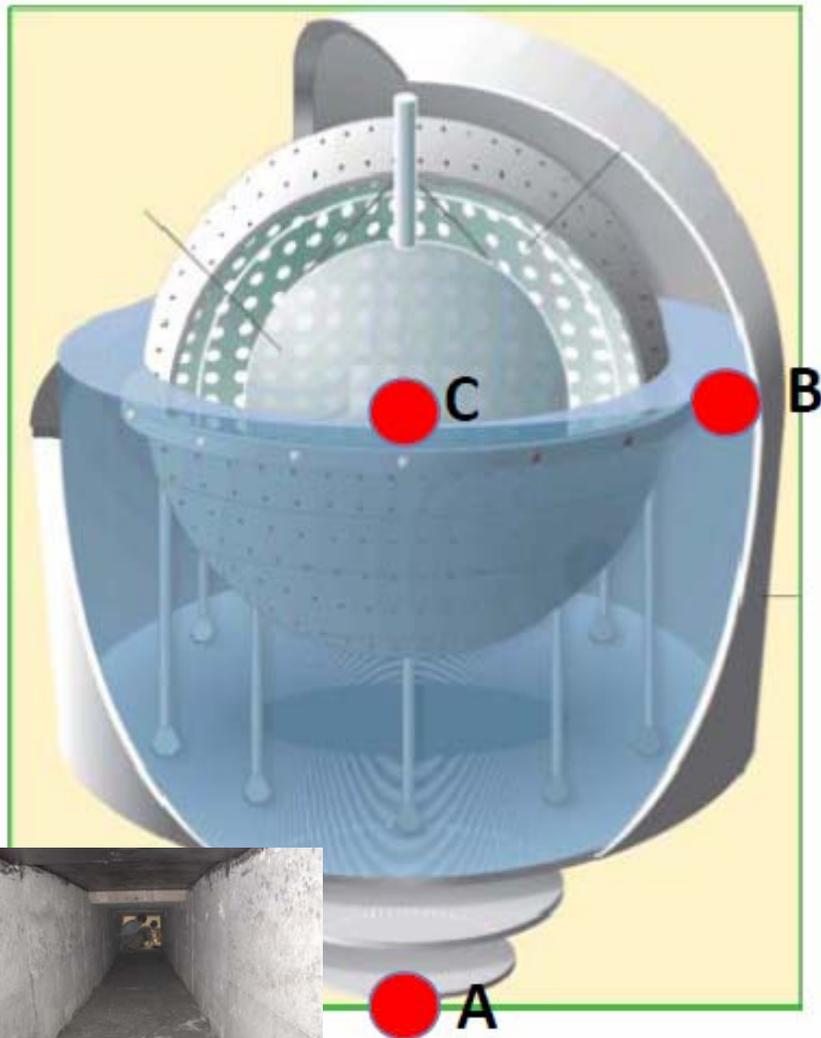
Чтобы увидеть осцилляции скорости счета нейтрино различных энергий, связанные с переходами $\nu_e \rightarrow \nu_s$ и $\nu_s \rightarrow \nu_e$, прямо на размере детектора необходимо:

1. *иметь источник нейтрино с размерами меньше длины осцилляций*



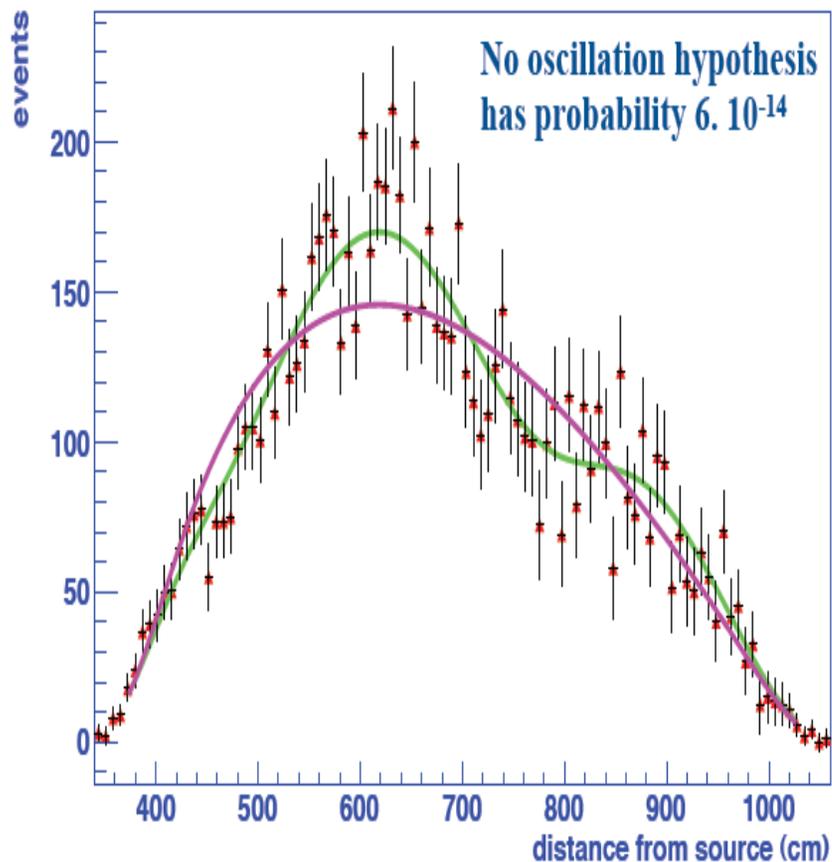
2. *для непрерывного спектра нейтрино энергетическое разрешение детектора должно быть не хуже чем 0.5 МэВ.*

Стерильное нейтрино: Борексино

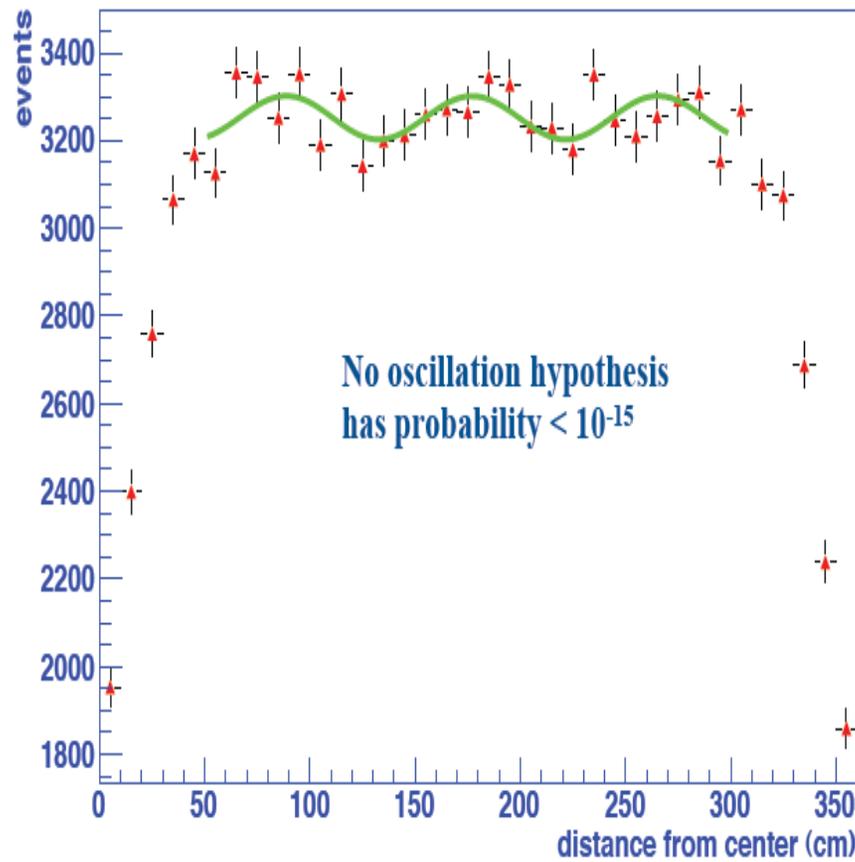


Source	decay	τ [days]	Energy [MeV]	Kg/MCi	W/kCi
^{51}Cr	e-capture ($E_\gamma=0.32$ MeV 10%)	40	0.746 81%	0.011	0.19
^{90}Sr - ^{90}Y	Fission product β^-	15160	<2.28 MeV 100%	7.25	6.7
^{144}Ce - ^{144}Pr	Fission product β^-	411	<2.9975 MeV 97.9%	0.314	7.6

Результаты моделирования Борексино

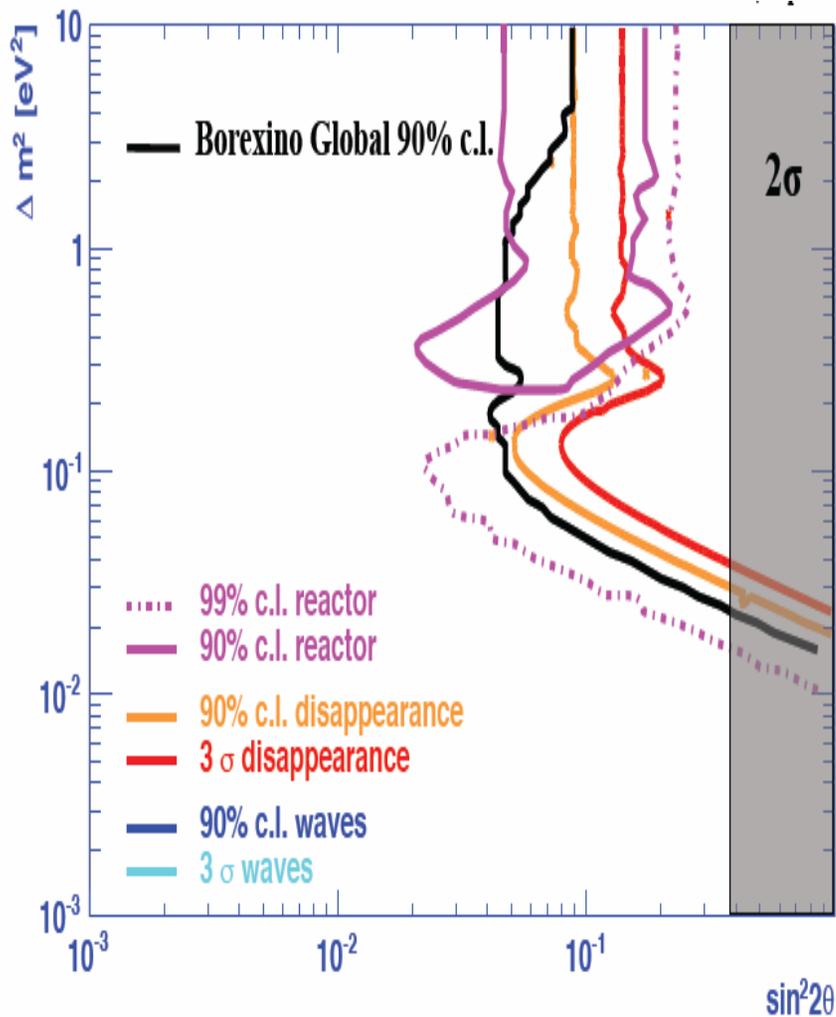


^{51}Cr , 10 MCi, точка B,
 $\delta m^2 = 0.6 \text{ эВ}^2 \text{ Sin}^2(2\theta) = 0.3$

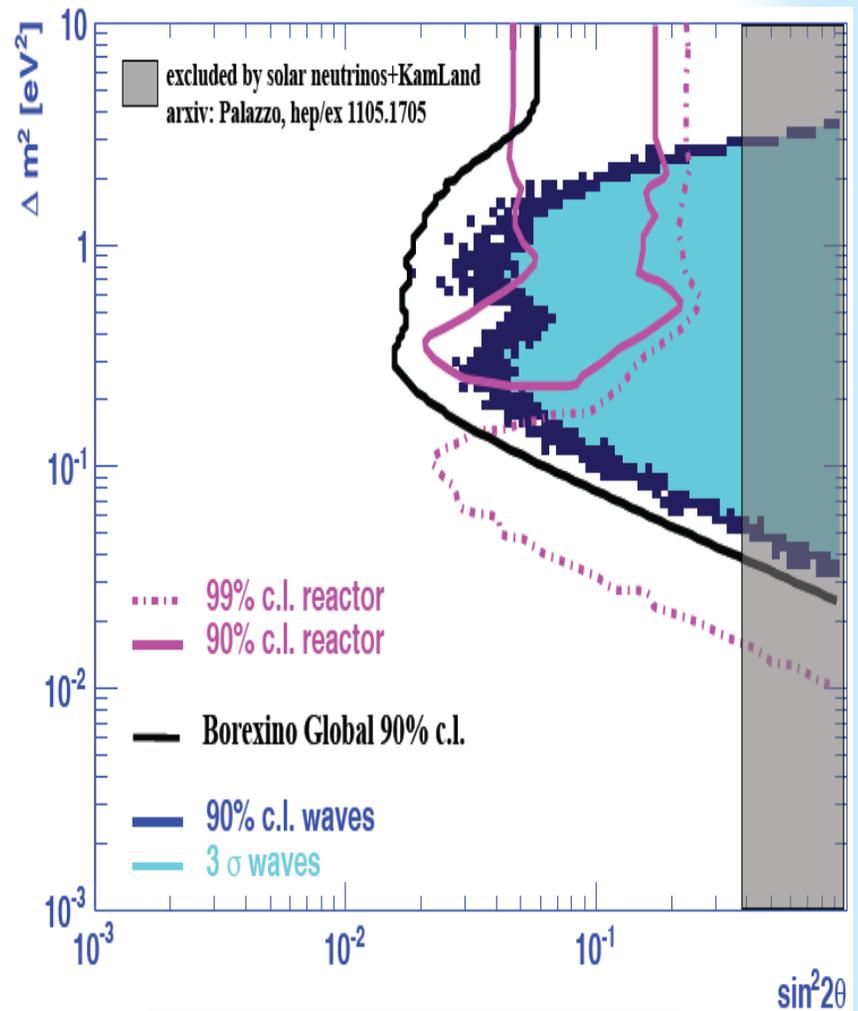


^{51}Cr , 5 MCi, точка C,
 $\delta m^2 = 1.3 \text{ эВ}^2 \text{ Sin}^2(2\theta) = 0.15$

Чувствительность Борексино

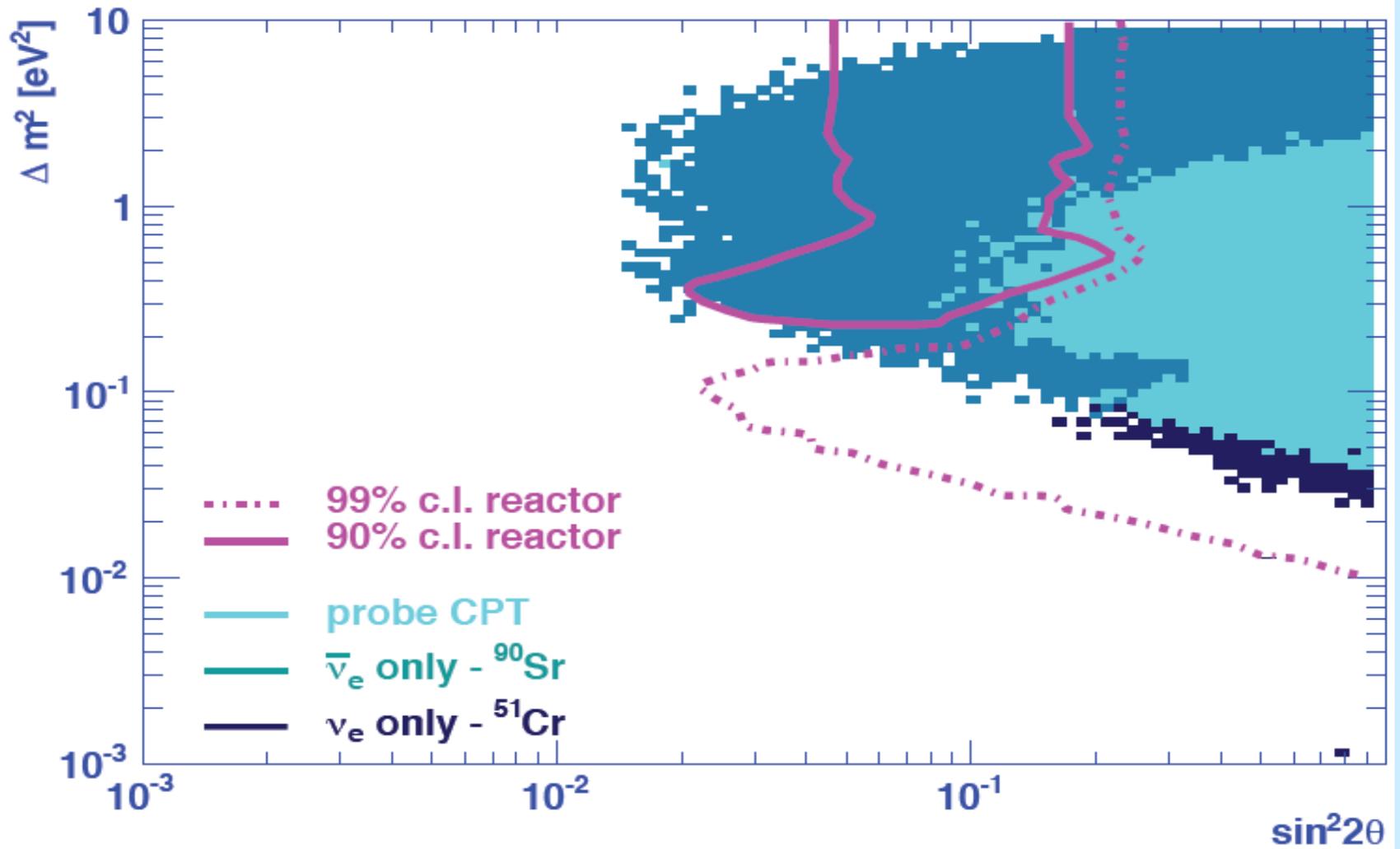


^{51}Cr , 10 MCi, точка B



^{51}Cr , 5 MCi, точка C,

Проверка CPT для нейтрино



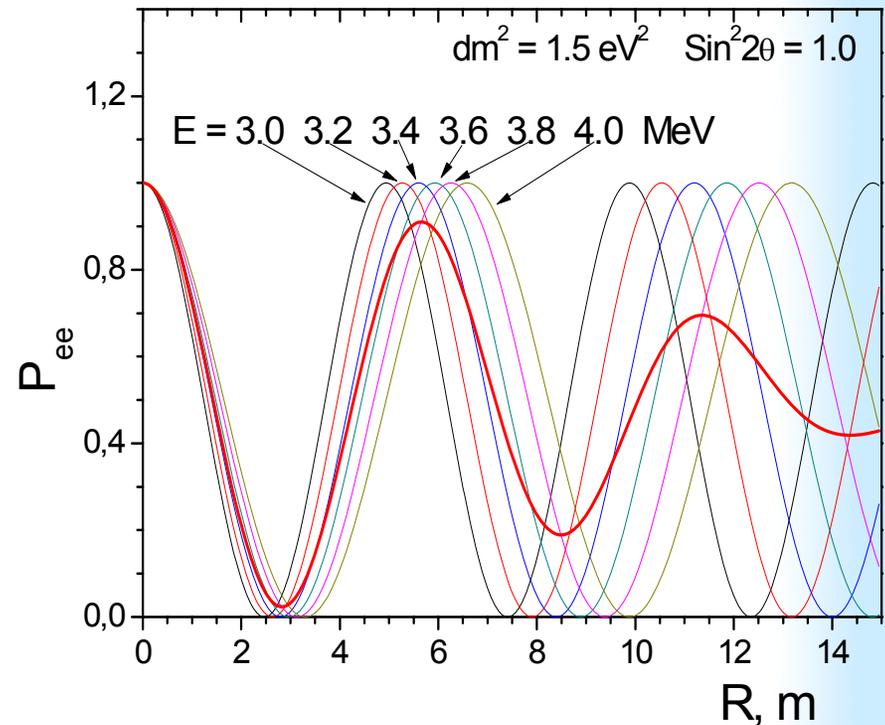
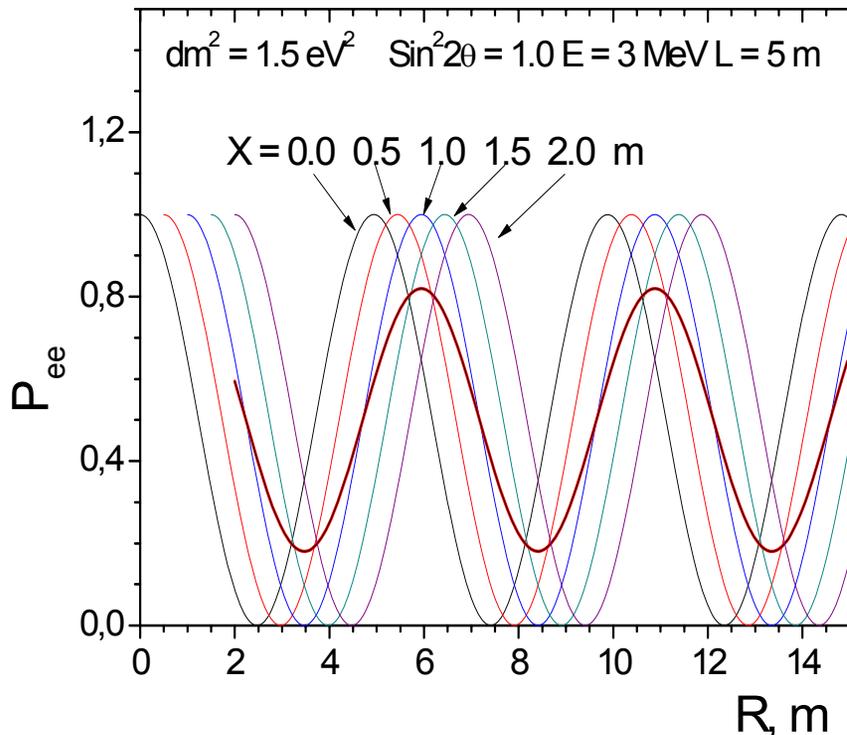
Планы коллаборации Борексино и новые задачи

1. Продолжение очистки сцинтиллятора от ^{210}Bi и ^{85}Kr
2. Проверка 7% сезонных изменений скорости счета
3. Измерение CNO- и pp – нейтрино
4. Увеличение статистики для антинейтрино, 8B , пер..
5. Измерение скорости нейтрино
6. Стерильные нейтрино (^{51}Cr , ^{37}Ar по готовности источника. ^{90}Y - ^{90}Sr , в центре – по окончании программы с.н.)
8. Поиск двойного бета-распада с Борексино или STF (^{130}Xe , ^{125}Nd)

Эксперимент на реакторе

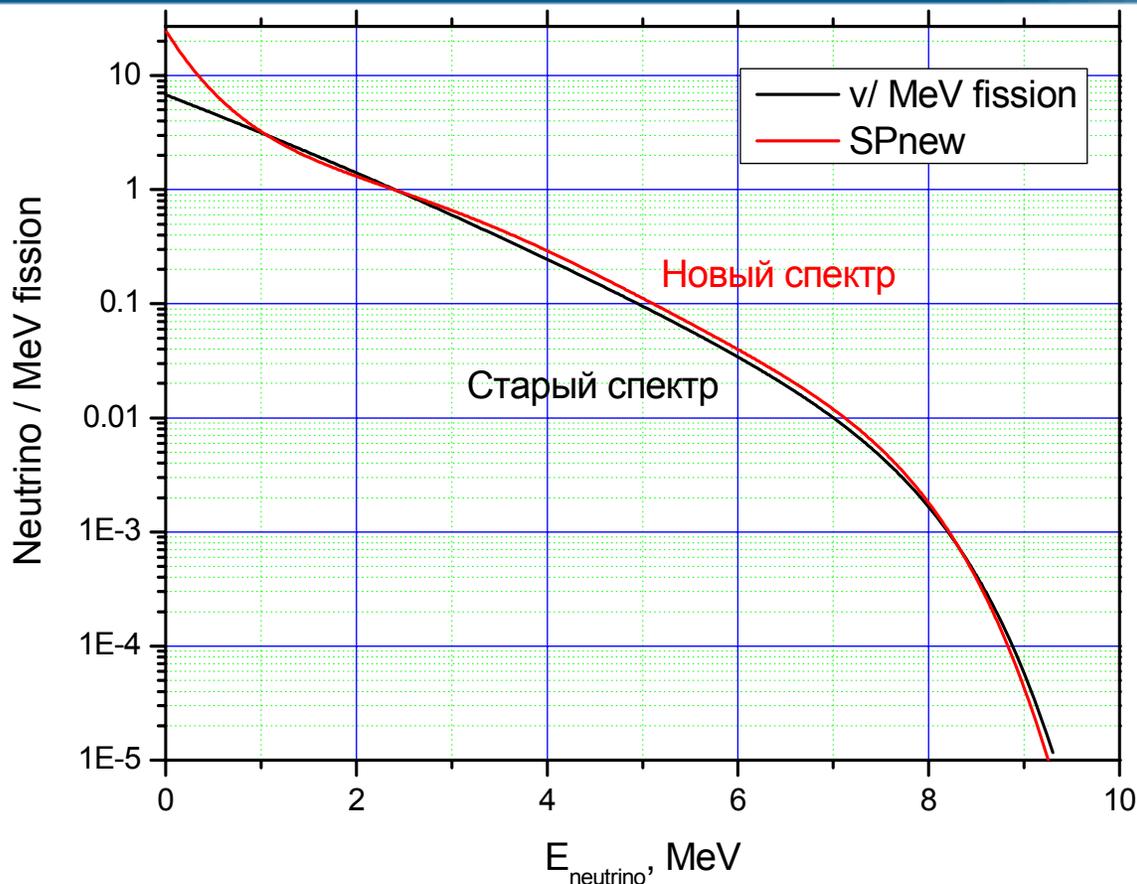
В настоящем проекте предлагается увидеть осцилляции скорости счета нейтрино различных энергий, связанные с переходами $\nu_e \rightarrow \nu_s$ и $\nu_s \rightarrow \nu_e$ **прямо на размере детектора**. Для этого необходимо:

1. *иметь источник нейтрино с размерами меньше длины осцилляций*



2. *для непрерывного спектра нейтрино энергетическое разрешение детектора должно быть не хуже чем 0.5 МэВ.*

Спектр реакторных нейтрино



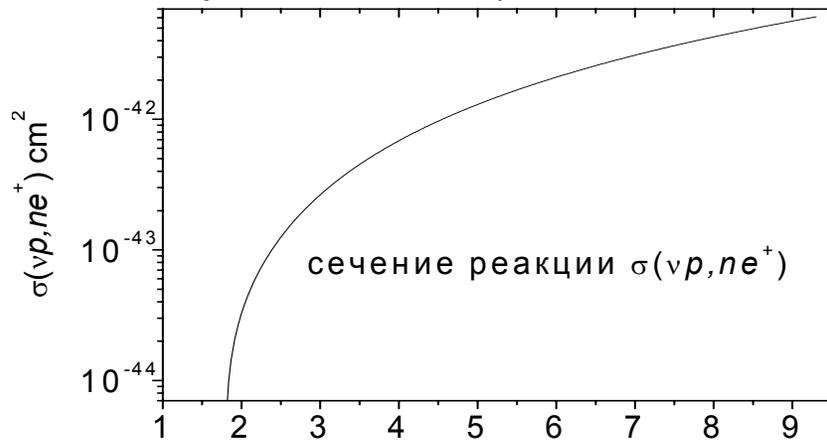
Спектр реакторных нейтрино, это, в основном, сумма нейтринных спектров бета- активных осколков. Испускается ~ 6 нейтрино на деление. Интенсивность падает на **3 порядка** при увеличении энергии нейтрино с **2** до **8** МэВ. Только **30%** реакторных нейтрино имеют энергию выше порога реакции обратного бета распада.

Реакция обратного бета-распада

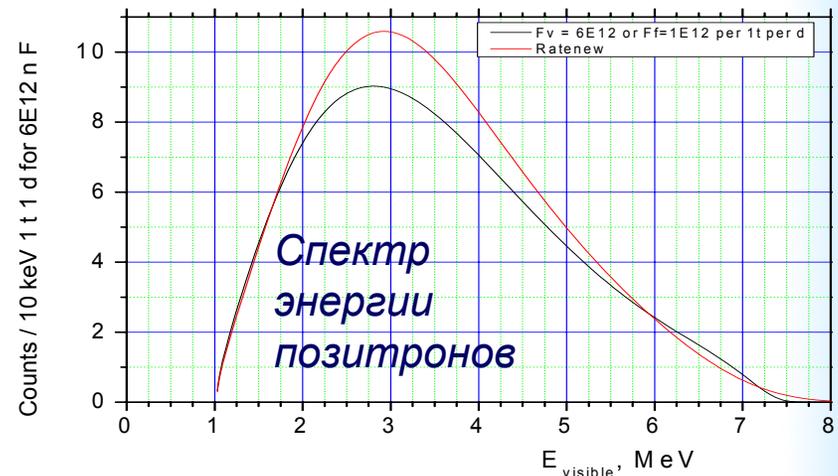
Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного бета распада:



Два последовательных события от позитрона и захвата нейтрона во временном окне, определяемом временем жизни нейтрона в сцинтилляторе (25 мкс при концентрации Gd 0.1%), позволяют надежно выделить данную реакцию.



Сечение реакции в зависимости от энергии нейтрино равно: $\sigma(E) \approx 10^{-43} (p_{e^+} E_{e^+})$ см². Для реакторных нейтрино полное сечение равно $\sigma \approx 6 \times 10^{-43}$ см²/деление



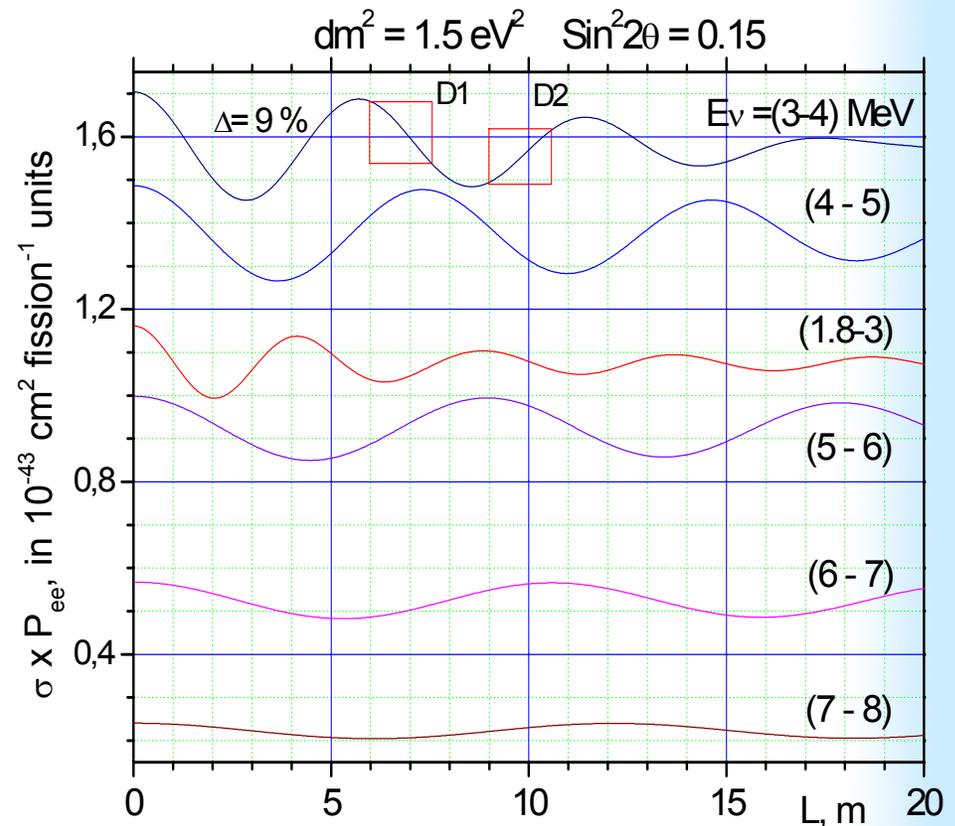
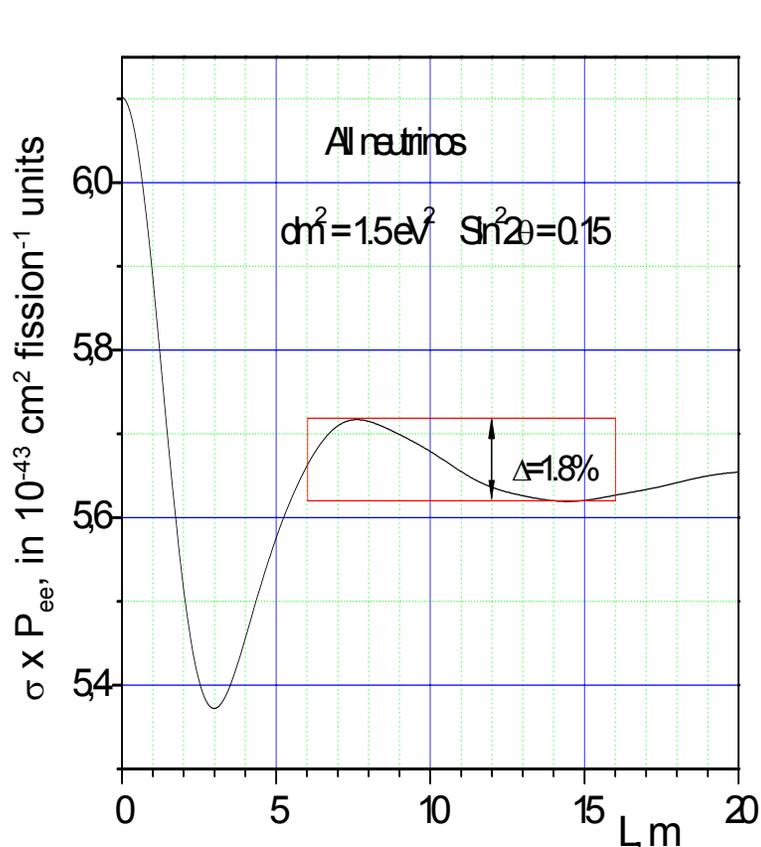
Максимальная скорость счета соответствует энергии нейтрино 3.6 МэВ

Ожидаемое число событий на расстоянии 5 метров от зоны реактора мощностью 100 МВт составляет

3 события/ (кг сутки)

для мишени, содержащей 6×10^{25} протонов (1 кг $C_{n3}H_{n4}$).

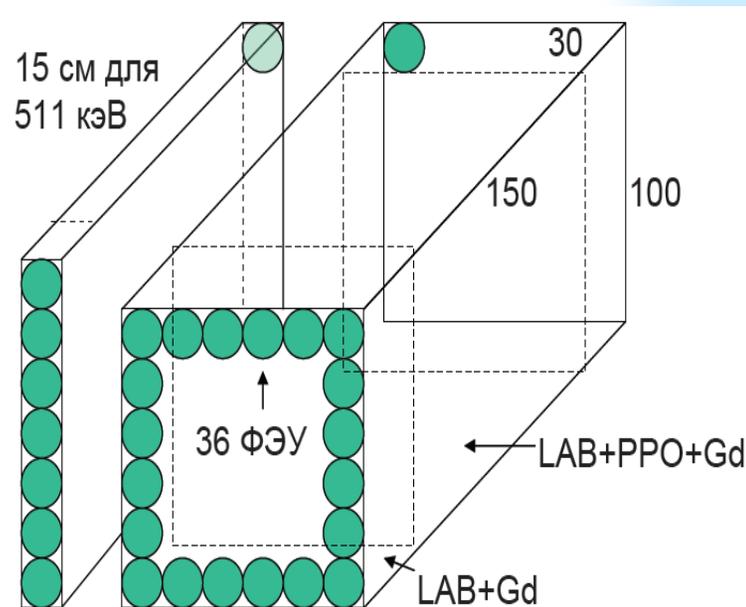
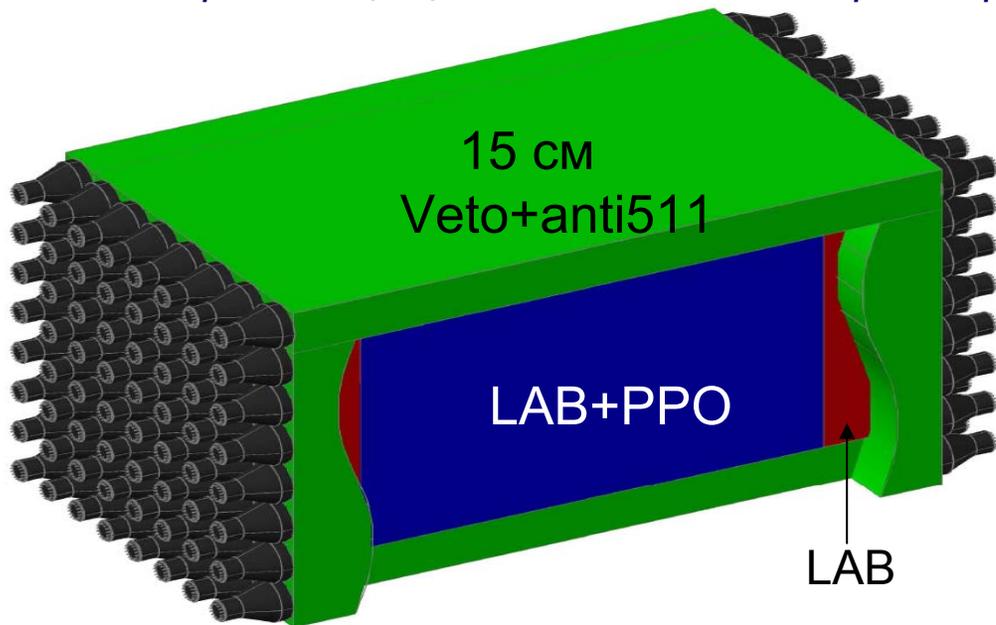
Осцилляции нейтрино с различными энергиями



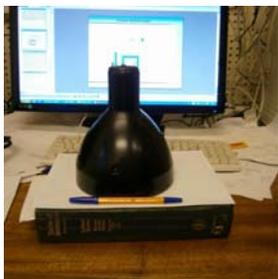
При регистрации всех нейтрино, имеющих энергию выше порога реакции, отклонения скорости счета от закона $1/R^2$ не превышают **1.8 %**, если установка находится далее 6 м. В то же время, для интервала энергий нейтрино **3-4 МэВ** изменения в скорости счета составляет **9 %** на длине детектора 1.5 м.

Детектор нейтрино POSEIDON

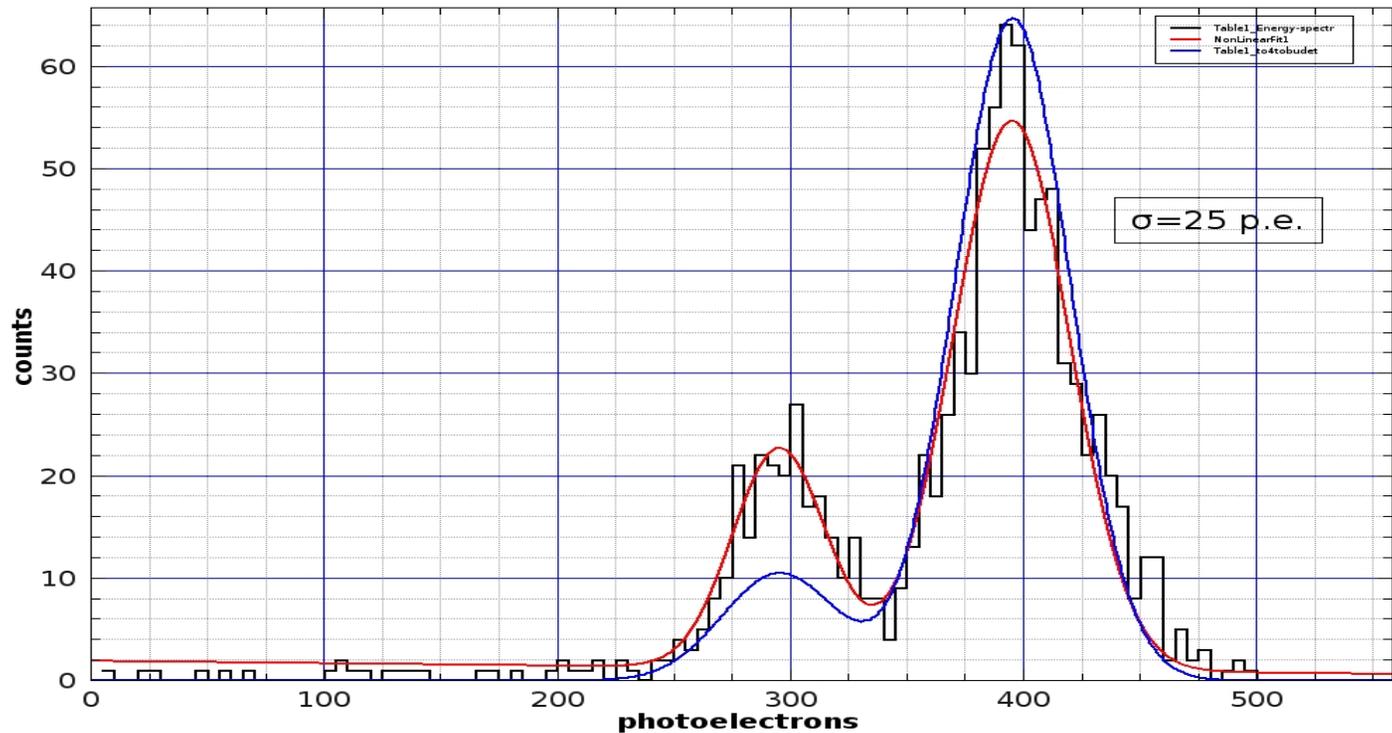
Детектор представляет собой параллелепипед с размерами **1.5x1.0x1.0 м³**, просматриваемый с двух сторон (по длине 1.5 м) 72 фотозлектронными умножителями (ФЭУ125). ФЭУ отделены от объема сцинтиллятора буфером (не сцинтиллирующим) толщиной 30 см, который играет роль "разравнивателя" светосбора и защищает объем детектора от радиоактивности ФЭУ.



Для подавления фона, связанного с внешней γ -активностью, будет использоваться пассивная **защита из свинца**, общей толщиной **200 г/см²**, что позволит практически полностью подавить внешнюю гамма-активность. Водородсодержащая защита, внутренний слой которой будет изготовлен из борированного полиэтилена, предназначена для уменьшения потока быстрых и тепловых нейтронов внутрь детектора. Сравнительно небольшие размеры детектора допускают использование 2-х слоев активной защиты, до и после защиты из свинца.

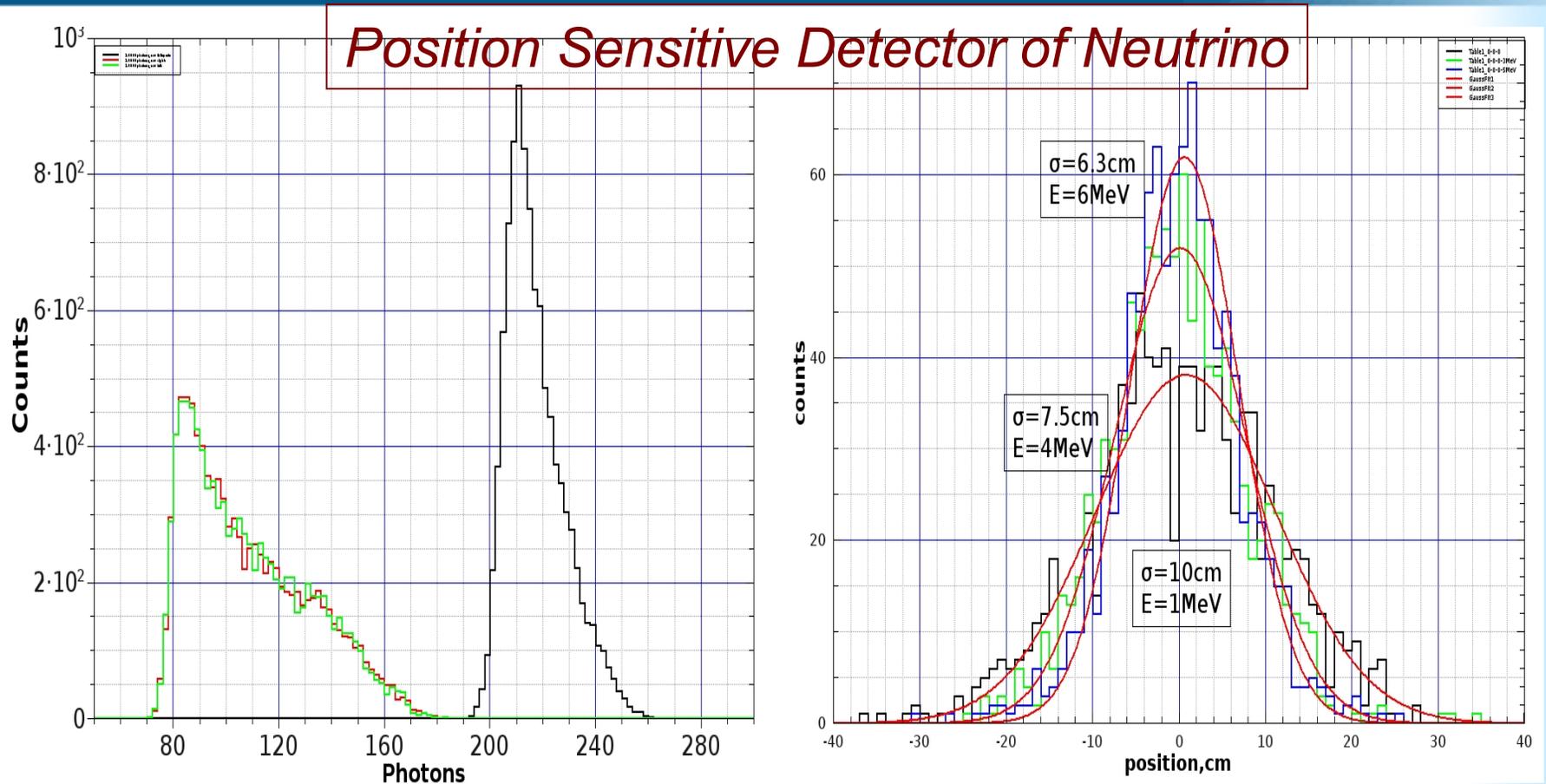


Энергетическое разрешение



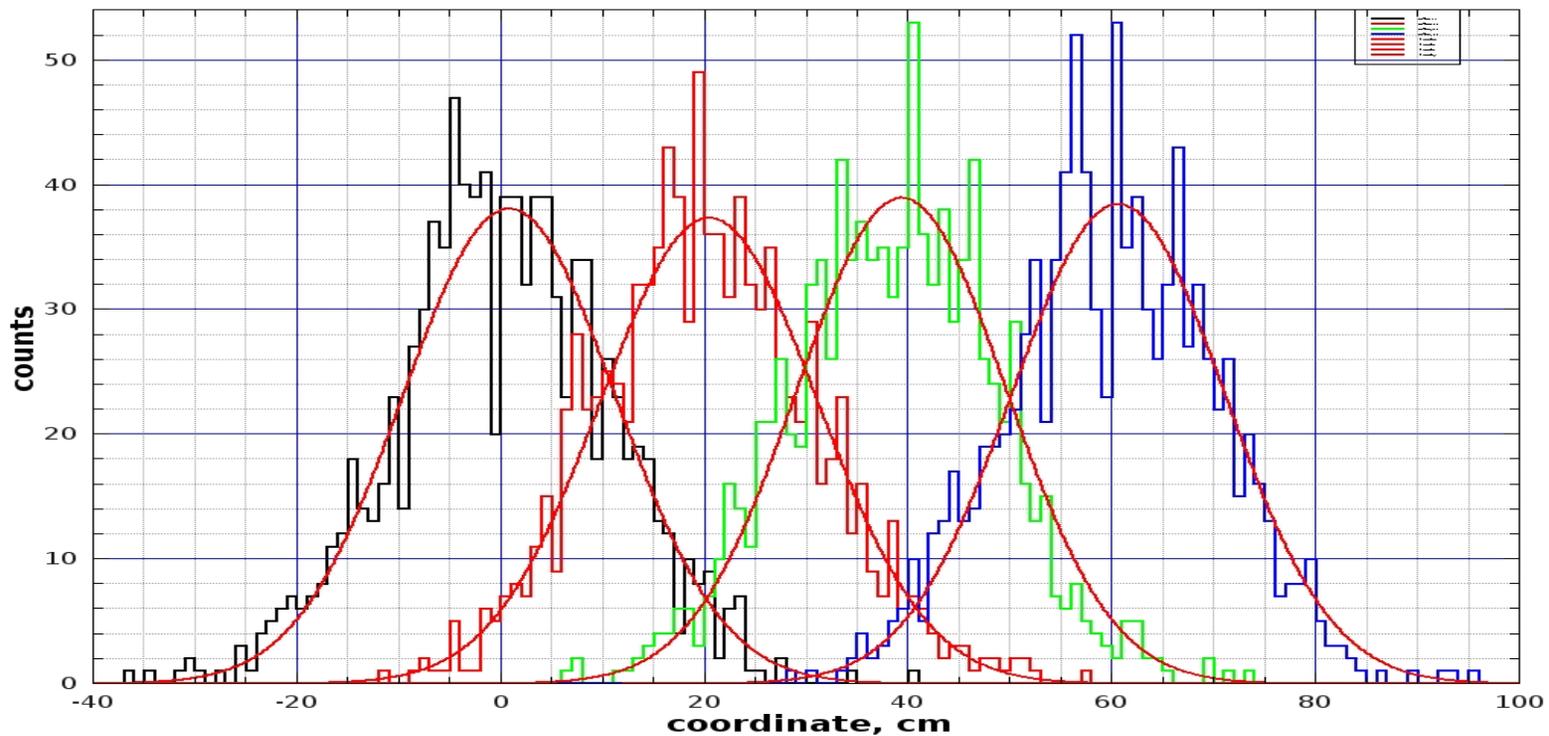
Расчеты, проведенные с использованием GEANT4, показывают, что энергетическое разрешение, определяемое пространственной неоднородностью, составит $\sim 5\%$ (1σ). Для световых выходов 10^4 фотонов/МэВ (LAB или PXE) и 10 % квантовой эффективности фотокатода (ФЭУ125) регистрируется 210 фотоэлектронов на 1 МэВ, что обеспечивает энергетическое разрешение $\sim 7/(E[\text{МэВ}]^{1/2})\%$ (1σ).

Пространственное разрешение для e^+



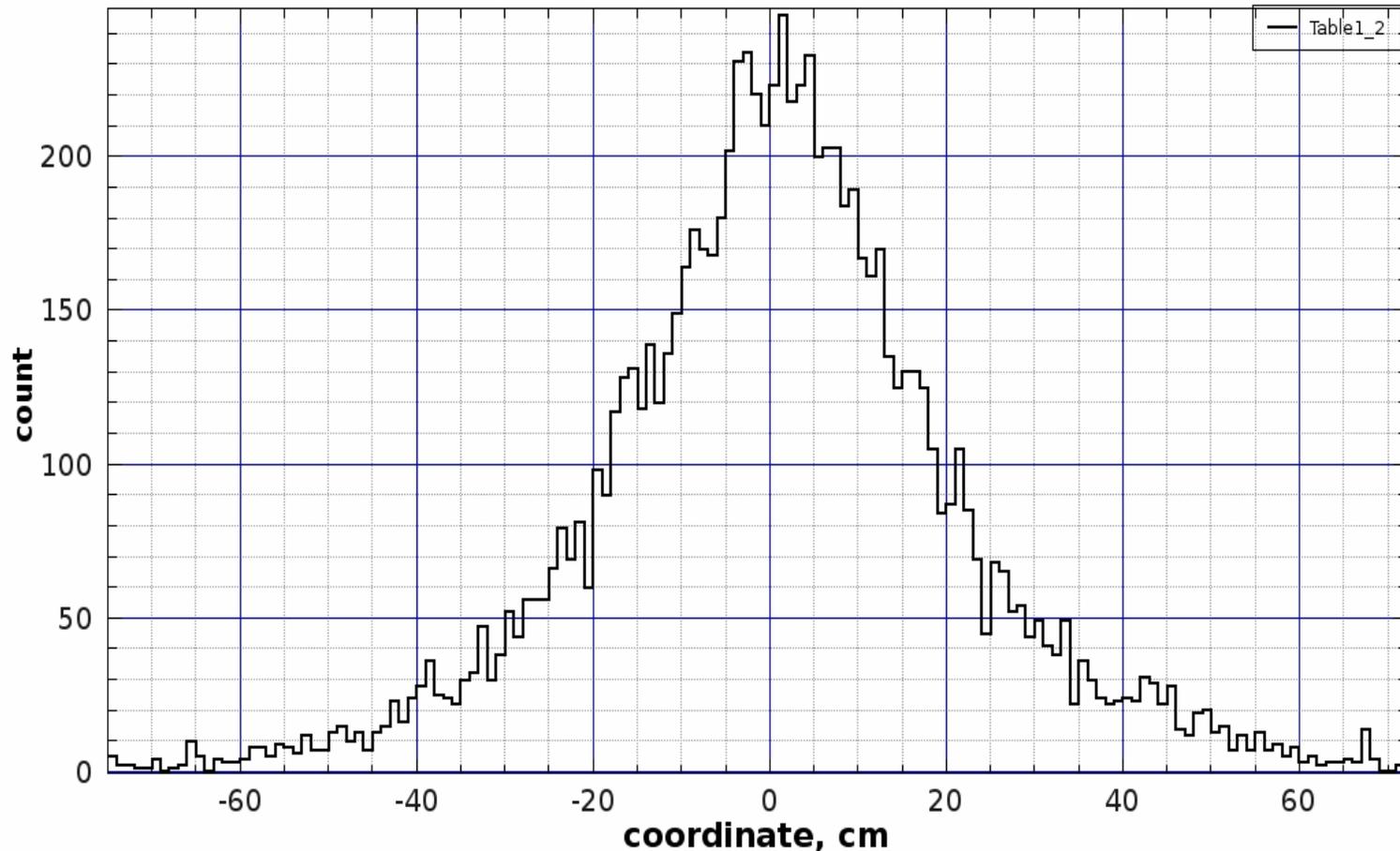
Для восстановления координат события используется распределение заряда, собранного передней и задней стенками детектора. Разрешение по X в центре детектора составит **10 см** (σ) для позитронов с энергией 1 МэВ. При более высоких энергиях разрешение составит **$10[\text{см}] / (E[\text{МэВ}]/2)^{1/2}$**

Пространственное разрешение по длине детектора



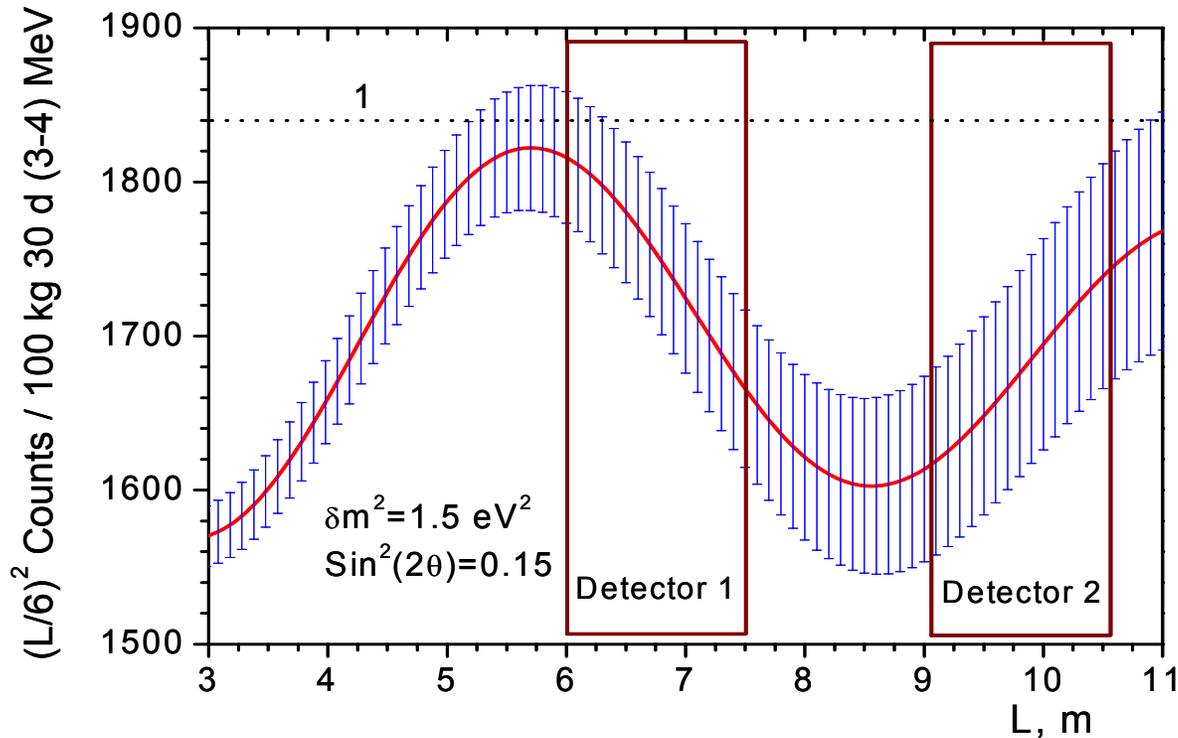
Восстановление координаты события по линии перпендикулярной плоскости ФЭУ (в направлении зоны реактора) с точностью лучше, чем 10 см позволит выделить осцилляции нейтрино на длине детектора. Одновременно это позволит улучшить энергетическое разрешение, связанное с пространственной неоднородностью светосбора и компенсировать потери эффективности регистрации на краю детектора. Времена срабатывания, записываемые для каждого ФЭУ, позволят выполнить $\alpha/\beta/p$ –дискриминацию.

Восстановление координаты нейтрона



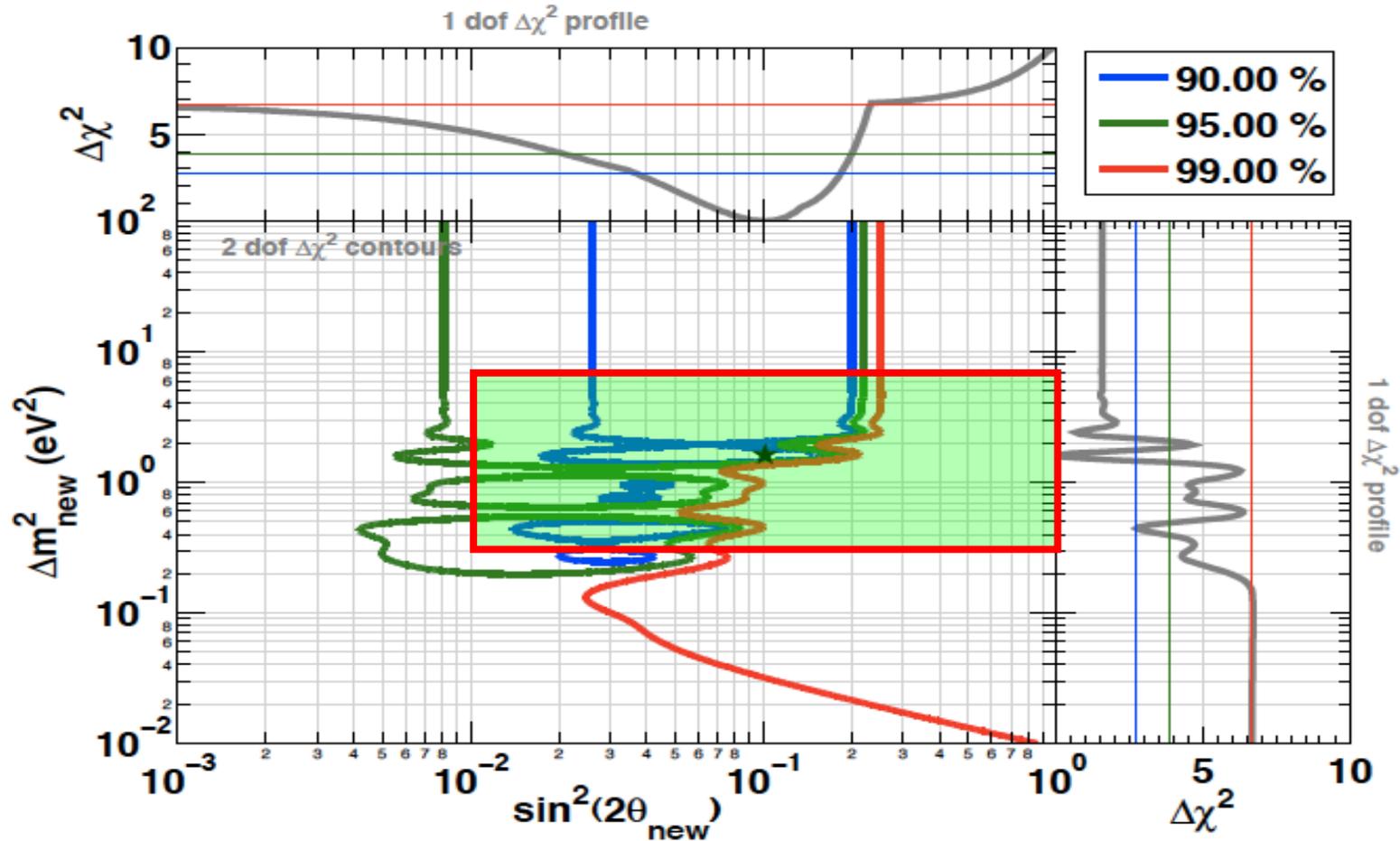
Пространственное разрешение для нейтрона ($\sigma = 20$ см) существенно хуже чем для позитрона, однако может быть использовано в качестве дополнительного критерия при отборе событий обратного β -распада.

Чувствительность эксперимента



Для интервала $E_\nu = (3 - 4) \text{ МэВ}$, скорость счета составляет **900 соб.** в сутки. Для **$\text{Sin}^2(2\theta) = 0.15$** разница в счете переднего (6-6.75 м) и заднего (6.75-7.5 м) объема детектора составит 4%. Для измерения $\text{Sin}^2(2\theta)$ с точностью **0.015**, необходимо **100 суток** накопления данных. Оценка сделана в пренебрежении фоном детектора. В интервале 3-4 МэВ находится только **0.28** полной статистики. Чувствительность и надежность эксперимента повышаются при использовании двух идентичных детекторов Д1 и Д2 на расстояниях 6 и 9 метров.

Чувствительность эксперимента



Значения параметров осцилляций нейтрино, которые предполагается исследовать в эксперименте по поиску отклонений скорости счета от $1/R^2$, лежат в области $\delta m^2 = (0.3 - 6) \text{ эВ}^2$ и $\text{Sin}^2(2\theta) > 0.01$.

Поиск темной материи

DarkSide(50, 1к, 20 к) и RED (100, 3т) для регистрации WIMPs



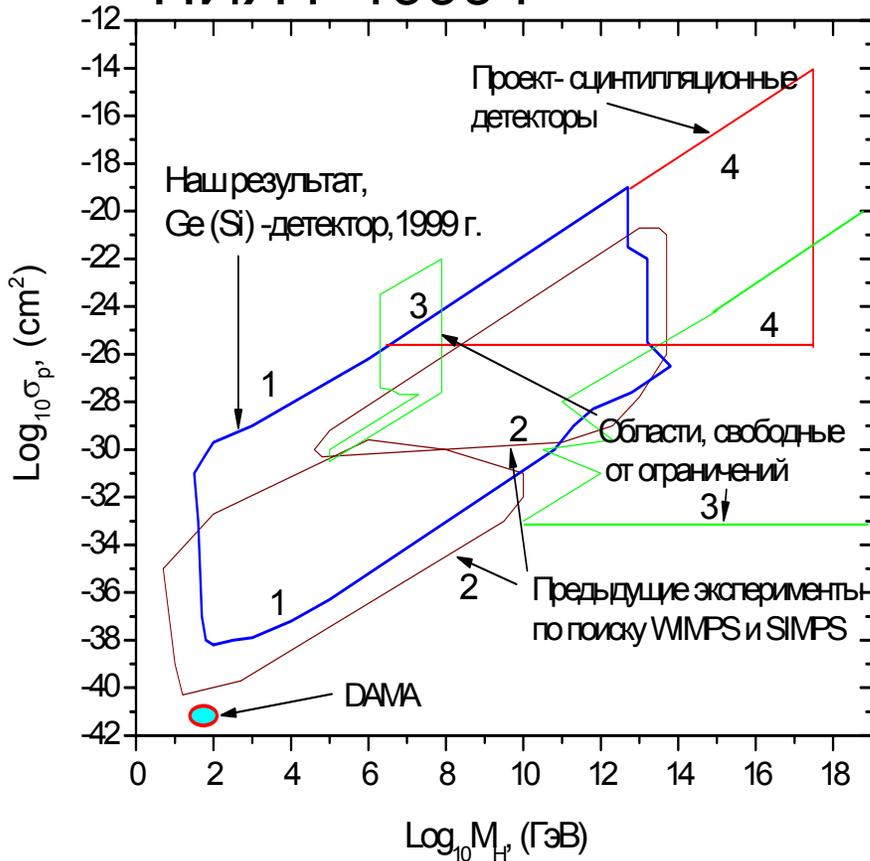
РОССИЙСКИЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

DarkSide

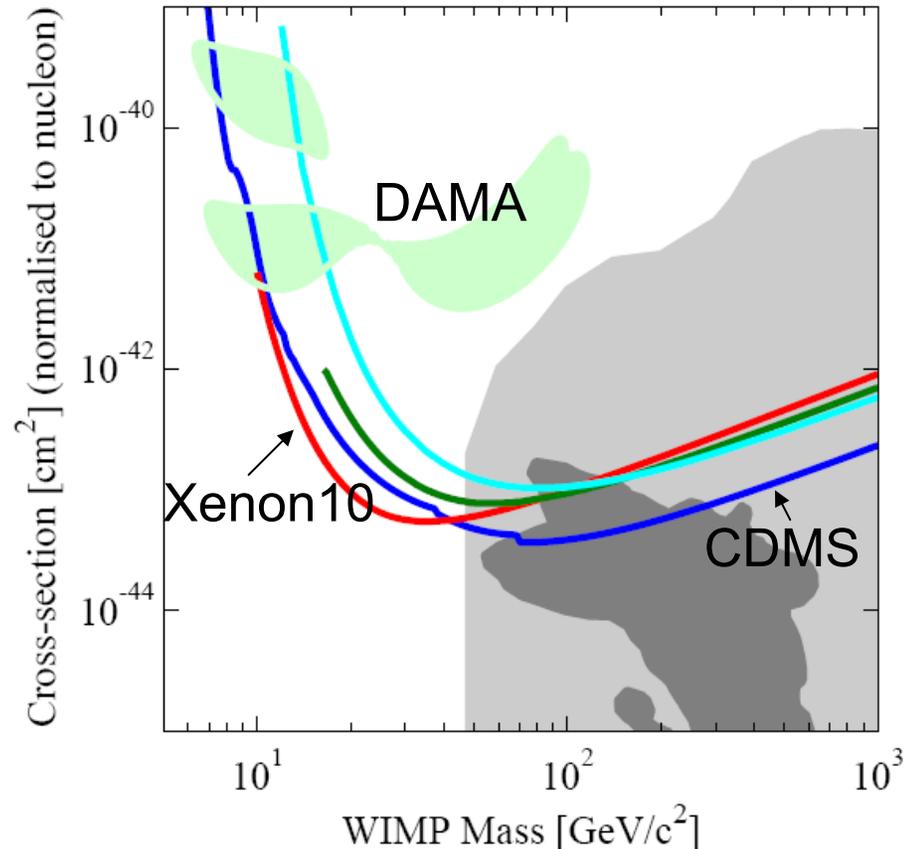
- Augustana College – SD, USA 
- Black Hills State University – SD, USA 
- Fermilab – IL, USA 
- IHEP – Beijing, China 
- INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso – Assergi, Italy 
- INFN and Università degli Studi Genova, Italy 
- INFN and Università degli Studi Milano, Italy 
- INFN and Università degli Studi Napoli, Italy 
- INFN and Università degli Studi Perugia, Italy 
- Joint Institute for Nuclear Research – Dubna, Russia 
- Princeton University, USA 
- RRC Kurchatov Institute – Moscow, Russia 
- St. Petersburg Nuclear Physics Institute – Gatchina, Russia 
- Temple University – PA, USA 
- University of California, Los Angeles, USA 
- University of Houston, USA 
- University of Massachusetts at Amherst, USA 

Рассеяние WIMPs на ядрах

ПИЯФ 1999 г



Xenon 2010



Чувствительность экспериментов за 10 лет возросла на 4-6 порядков

Particle Data Group - WIMPs

Citation: K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), *JPG* **37**, 075021 (2010) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

WIMPs and Other Particles Searches for

OMITTED FROM SUMMARY TABLE

A REVIEW GOES HERE – Check our WWW List of Reviews

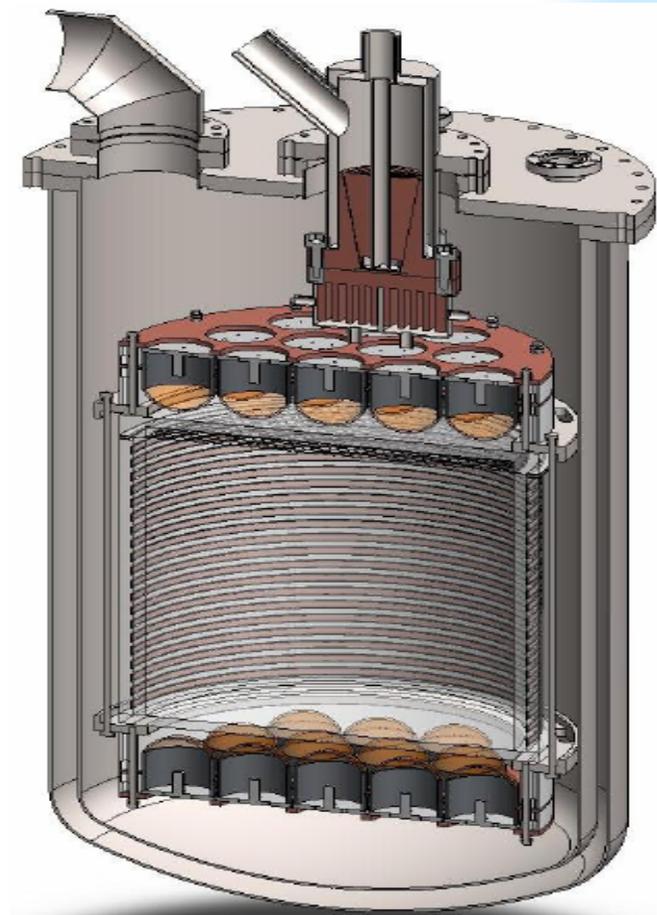
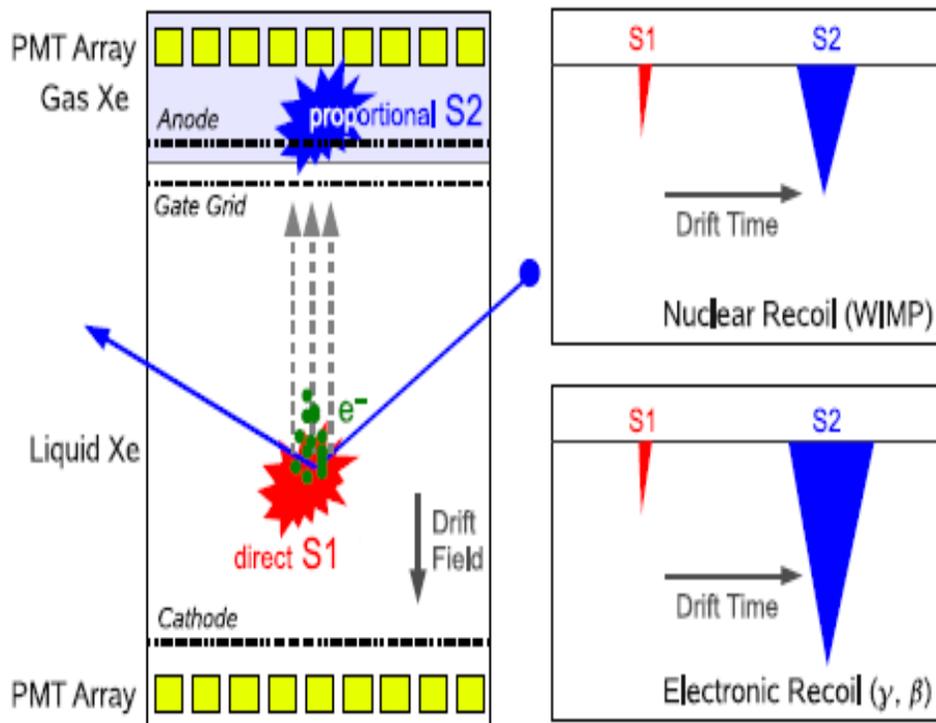
GALACTIC WIMP SEARCHES

Cross-Section Limits for Dark Matter Particles (χ^0) on Nuclei

<u>VALUE (nb)</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. • • •				
		1 ABBASI	09B ICCB	H, solar ν
		2 AHMED	09 CDMS	Ge
		3 ARCHAMBAU..09	PICA	F
		4 LEBEDENKO	09A ZEP3	Xe
		5 ANGLE	08A XE10	Xe
		6 BEDNYAKOV	08 RVUE	Ge
		7 ALNER	07 ZEP2	Xe
		8 LEE	07A KIMS	CsI
		9 MIUCHI	07 CNTR	F (CF ₄)
		10 AKERIB	06 CDMS	⁷³ Ge, ²⁹ Si
		11 ALNER	05 NAIA	NaI
		12 BARNABE-HE..05	PICA	F (C ₄ F ₁₀)
		13 BENOIT	05 EDEL	⁷³ Ge
		14 GIRARD	05 SMPL	F (C ₂ ClF ₅)
		15 KLAPDOR-K...05	HDMS	⁷³ Ge (enriched)
		16 MIUCHI	03 BOLO	LiF
		17 TAKEDA	03 BOLO	NaF
< 3	90	18 ANGLOHER	02 CRES	Al
		19 BENOIT	00 EDEL	Ge
		20 BERNABEI	99D CNTR	SIMP
		21 DERBIN	99 CNTR	SIMP

Эксперимент *DARKSIDE* в Гран Сассо

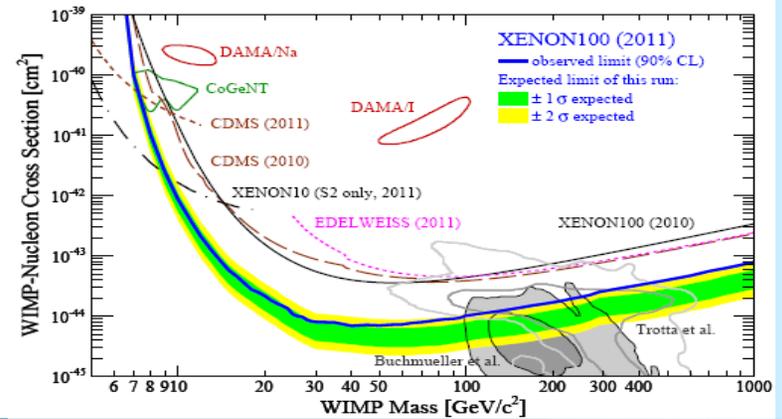
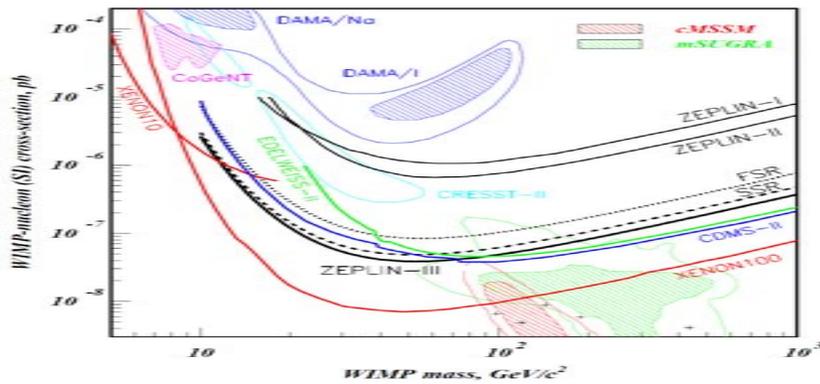
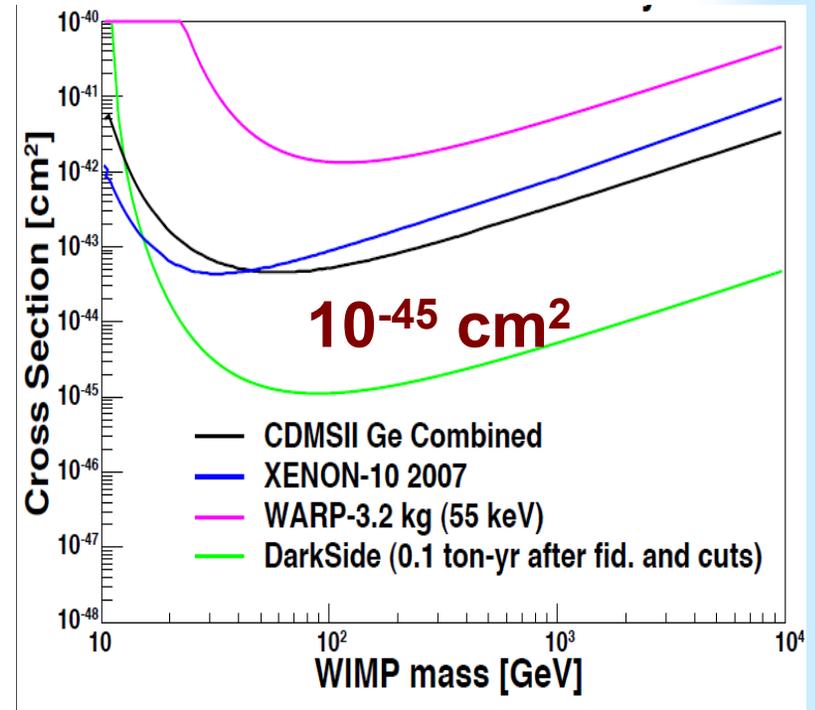
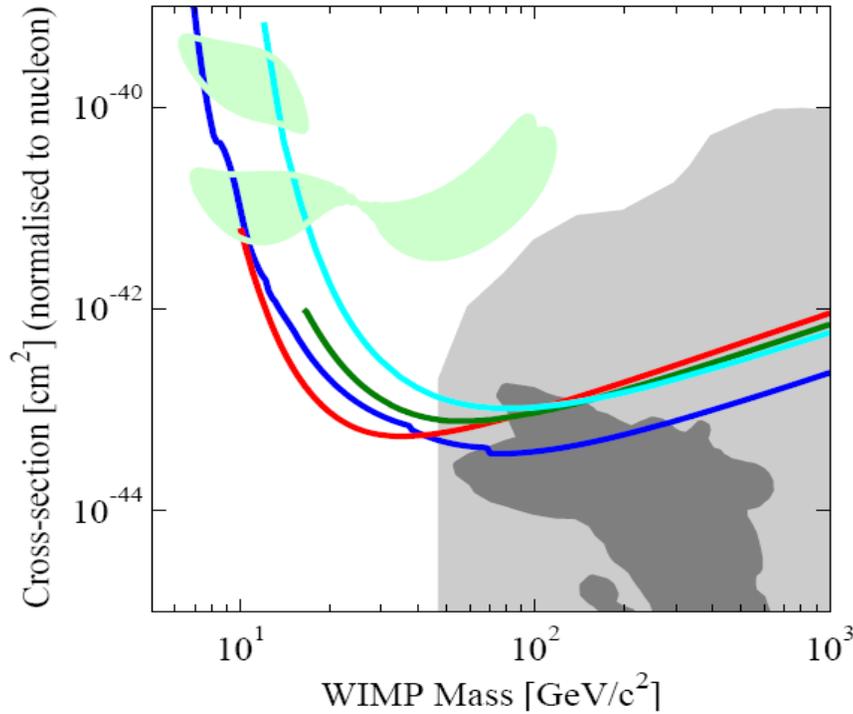
Двухфазный эмиссионный детектор



Позволяет эффективно разделить сигналы от электронов и ядер

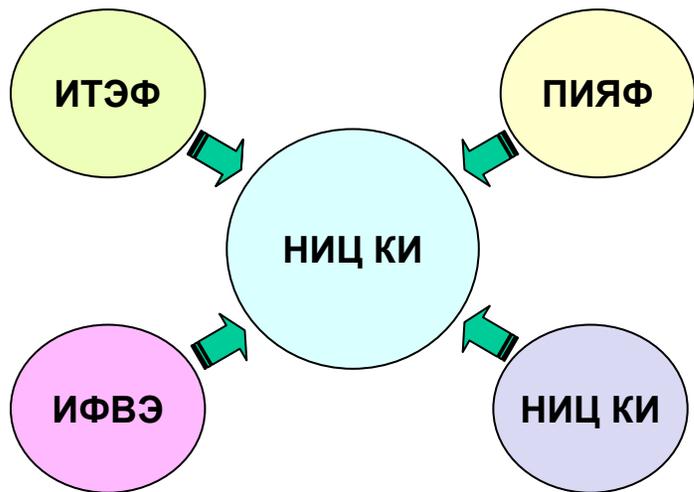
ПИЯФ – тестирование конст. материалов (Ti)

Ожидаемая чувствительность DARKSIDE50



Российский Эмиссионный Детектор

ПИЯФ – источник 8Li
 β^- - распад с $Q = 16 \text{ МэВ}$



Коллаборация РЭД:
ИТЭФ, ПИЯФ, НИЦ КИ – НИЦ КИ
МИФИ, ИЯФ, НИИЯФ МГУ

В настоящее время идет
разработка детекторов

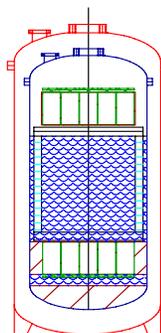
РЭД



РОССИЙСКИЙ ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

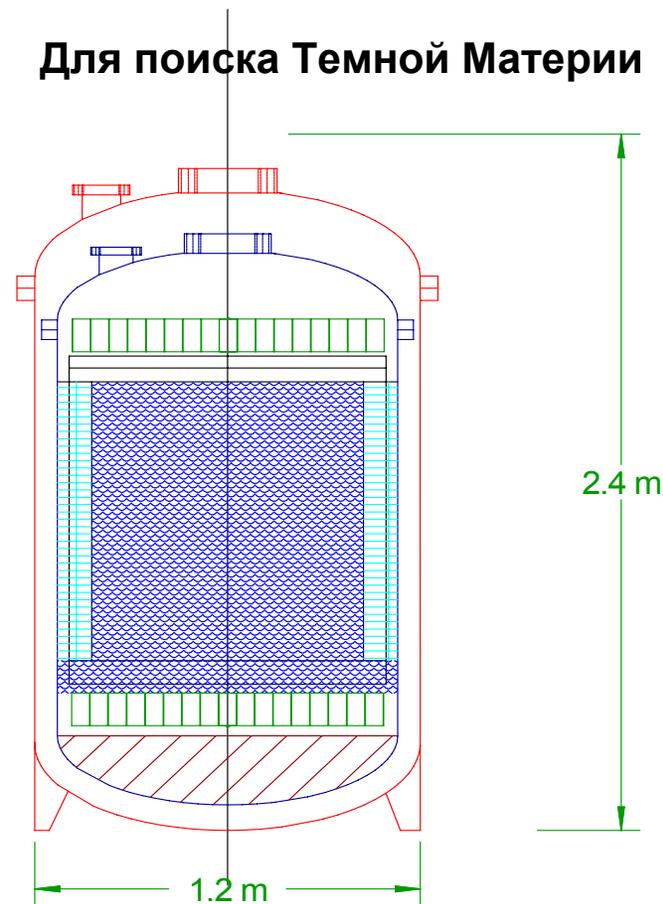
Для поиска ν -N
когерентного
рассеяния

RED-100



RED-3000

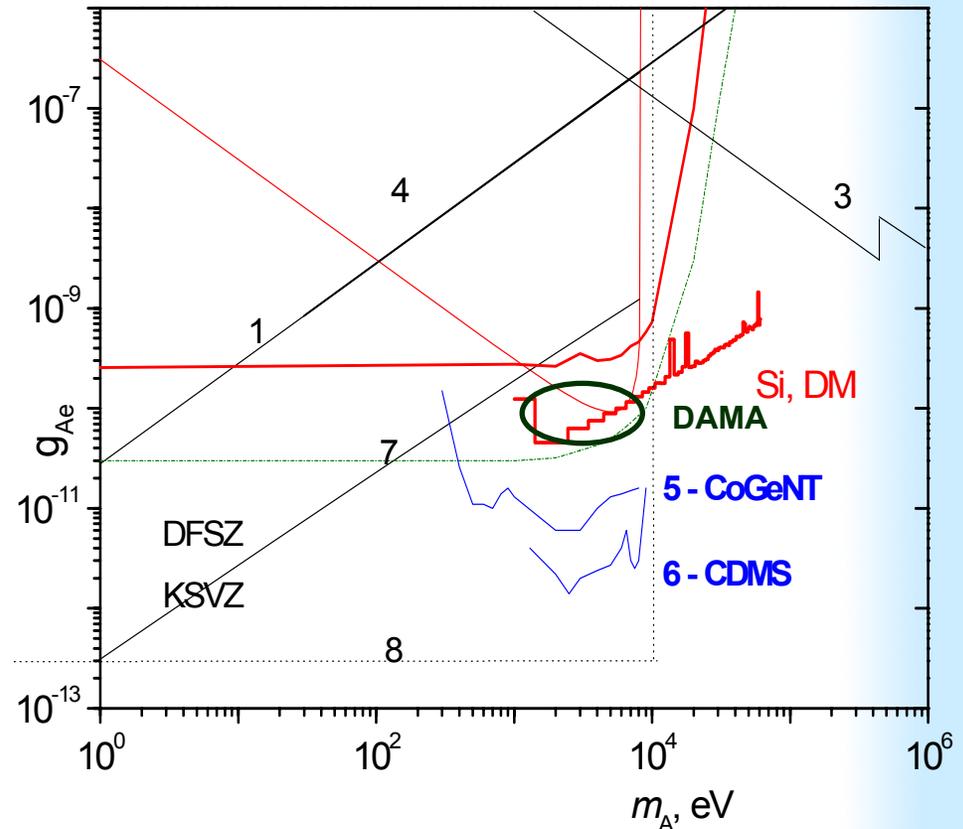
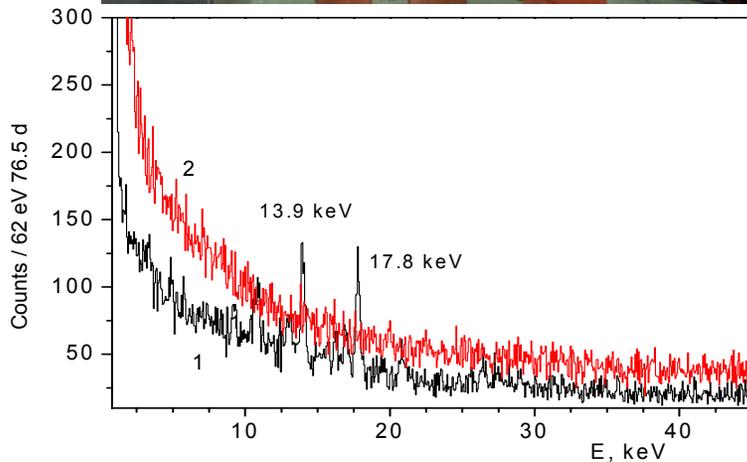
Для поиска Темной Материи



Аксионы – кандидаты на темную материю

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

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



Particle Data Group data

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. • • •				
		178 ANDRIAMON..09	CAST	K, solar axions
<191	90	179 DERBIN	09A	CNTR K, solar axions
<334	95	180 KEKEZ	09	HPGE K, solar axions
< 1.02	95	181 HANNESTAD	08	COSM K, hot dark matter
< 1.2	95	182 HANNESTAD	07	COSM K, hot dark matter
< 0.42	95	183 MELCHIORRI	07A	COSM K, hot dark matter
< 1.05	95	184 HANNESTAD	05A	COSM K, hot dark matter
3 to 20		185 MOROI	98	COSM K, hot dark matter

Invisible A^0 (Axion) Limits from Nucleon Coupling

<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. • • •				
<159	95	242 DERBIN	09	CNTR Solar axion
< 1.39×10^4	90	243 BELLI	08A	CNTR Solar axion
		244 BELLINI	08	CNTR Solar axion
		245 ADELBERGER	07	Test of Newton's law
<360	90	246 DERBIN	07	CNTR Solar axion
<216	95	247 NAMBA	07	CNTR Solar axion
< 1.6×10^4	90	248 DERBIN	05	CNTR Solar axion
<400	95	249 LJUBICIC	04	CNTR Solar axion
< 3.2×10^4	95	250 KRCMAR	01	CNTR Solar axion
<745	95	251 KRCMAR	02	CNTR Solar axion

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. • • •				
< 8.5×10^{-6}	90	90 DERBIN	02	CNTR ^{125m}Te decay
		91 DEBOER	97C	RVUE M1 transitions
< 5.5×10^{-10}	95	92 TSUNODA	95	CNTR ^{252}Cf fission, $A^0 \rightarrow ee$
< 1.2×10^{-6}	95	93 MINOWA	93	CNTR $^{139}\text{La}^* \rightarrow ^{139}\text{La}A^0$
< 2×10^{-4}	90	94 HICKS	92	CNTR ^{35}S decay, $A^0 \rightarrow \gamma\gamma$
< 1.5×10^{-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 $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{16}\text{O}X^0,$

LENA: Low Energy Neutrino Astronomy

The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA

Michael Wurm,¹ John F. Beacom,² Leonid B. Bezrukov,³ Daniel Bick,⁴ Johannes Blumer,⁵ Sanchaya Choubey,⁶ Christian Cierniak,¹ Davide D'Angelo,⁷ Basudeb Dasgupta,⁸ Alexander Derbin,⁸ Amol Dighe,⁹ Grigoriy Domogatsky,⁴ Steve Dye,¹⁰ Sergey Eliseev,⁸ Timo Enqvist,¹¹ Alexey Erykalov,⁸ Franz von Feilitzsch,¹ Gianni Fiorentini,¹² Tobias Fischer,¹³ Marianne Göger-Neff,¹ Peter Grabmayr,¹⁴ Caren Hagner,² Dominikus Hellgartner,¹ Johannes Hiss,¹¹ Shunsaku Horiuchi,³ Hans-Thomas Janka,¹⁵ Claude Janpart,¹⁶ Josef Jochum,¹⁴ Tuomo Kalliokoski,¹⁷ Alexei Kayunov,⁹ Pasi Kuusiniemi,¹¹ Tobias Lachenmaier,¹⁴ Ionel Lazanu,¹⁸ John G. Learned,¹⁹ Timo Lewke,¹ Paolo Lombardi,⁷ Sebastian Lorenz,² Bayarto Lubsandorzhev,^{4,14} Livia Ludhova,⁷ Kai Loo,¹⁷ Jukka Maalampi,¹⁷ Fabio Mantovani,¹² Michela Marafini,²⁰ Jelena Maricic,²¹ Teresa Marrodán Undagoitia,²² William F. McDonough,²³ Lino Miramonti,⁷ Alessandro Mirizzi,²⁴ Quirin Meindl,¹ Olga Mena,²⁵ Randolph Möllenberg,¹ Valentina Muratova,⁸ Rolf Nahnhauser,²⁶ Dmitry Nesterenko,⁸ Yuri N. Novikov,⁸ Guido Nuijten,²⁷ Lothar Oberauer,¹ Sandip Pakvasa,¹⁹ Sergio Palomares-Ruiz,²⁸ Marco Pallavicini,²⁹ Silvia Pascoli,³⁰ Thomas Patzak,²⁰ Juha Peltoniemi,³¹ Walter Potzel,¹ Tomi RiihÄ,¹¹ Georg G. Raffelt,³² Gioacchino Ranucci,⁷ Soebur Razzaque,³³ Kari Rummukainen,³⁴ Juho Sarkamo,¹¹ Valerij Sinev,⁴ Christian Spiering,²⁶ Achim Stahl,³⁵ Felicitas Thorne,¹ Marc Tippmann,¹ Alessandra Tonazzo,²⁰ Wladyslaw H. Trzaska,¹⁷ John D. Vergados,³⁶ Christopher Wiebusch,³⁵ and Jürgen Winter¹

¹Physik-Department, Technische Universität München, Germany

²Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Germany

³Department of Physics, Ohio State University, Columbus, OH, USA

⁴Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Institut für Kernphysik, Karlsruhe Institute of Technology KIT, Germany

⁶Harish-Chandra Research Institute, Allahabad, India

⁷Dipartimento di Fisica, Università degli Studi e INFN, Milano, Italy

⁸Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

⁹Department of Theoretical Physics, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India

¹⁰Hawaii Pacific University, Kaneohe, HI, USA

¹¹Oulu Southern Institute and Department of Physics, University of Oulu, Finland

¹²Dipartimento di Fisica, Università e INFN, Ferrara, Italy

¹³GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

¹⁴Kepler Center für Astro- und Teilchenphysik, Eberhard Karls Universität Tübingen

¹⁵Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching, Germany

¹⁶Institut de Physique du Globe de Paris, France

¹⁷Department of Physics, University of Jyväskylä, Finland

¹⁸Faculty of Physics, University of Bucharest, Romania

¹⁹Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, HI, USA

²⁰Laboratoire Astroparticule et Cosmologie, Université Paris 7 (Diderot), France

²¹Department of Physics, Drexel University, Philadelphia, PA, USA

²²Physik-Institut, Universität Zürich, Switzerland

²³Department of Geology, University of Maryland, MD, USA

²⁴II Institut für Theoretische Physik, Universität Hamburg, Germany

²⁵Instituto de Física Corpuscular, University of Valencia, Spain

²⁶DESY, Zeuthen, Germany

²⁷Rockplan Ltd., Helsinki, Finland

²⁸Centro de Física Teórica de Partículas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

²⁹Dipartimento di Fisica, Università e INFN, Genova, Italy

³⁰IPPP, Department of Physics, Durham University, Durham, UK

³¹Neutrinica Oy, Oulu, Finland

³²Max-Planck-Institut für Physik, München, Germany

³³George Mason University, Fairfax, VA, USA

³⁴University of Helsinki and Helsinki Institute of Physics, Finland

³⁵III. Physikalisches Institut, RWTH Aachen University, Germany

³⁶Physics Department, University of Ioannina, Greece

ПИЯФ – search for rare processes
50 кТ, ЛАВ, 14С, Υ , λ , ..

Cavern

height: 115 m, diameter: 50 m
shielding from cosmic rays: ~4,000 m.w.e.

Muon Veto

plastic scintillator panels (on top)
Water Cherenkov Detector
3,000 phototubes
100 kt of water
reduction of fast
neutron background

Steel Cylinder

height: 100 m, diameter: 30 m
70 kt of organic liquid
30,000 – 50,000 phototubes

Buffer

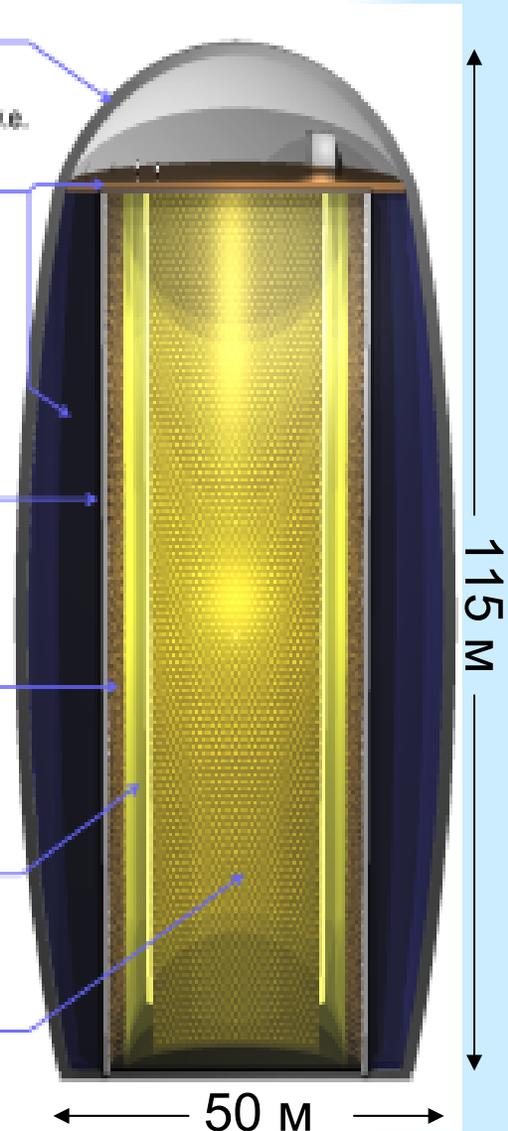
thickness: 2 m
non-scintillating organic liquid
shielding from external radioactivity

Nylon Vessel

separating buffer liquid
and liquid scintillator

Target Volume

height: 100 m, diameter: 26 m
50 kt of liquid scintillator



Отдел полупроводниковых ядерных детекторов Лаборатория низкофоновых измерений

НЕЙТРИНО
АКСИОН
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

BOREXINO
POSEIDON
DARKSIDE
RED
LENA

Si
(p)
M
D
S



g_{AN}



$g_{A\gamma}$



g_{Ae}



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

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

