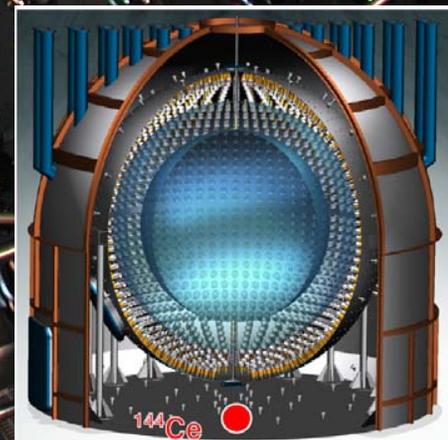


Эксперимент SOX: Short baseline Oscillations with BoreXino.

Поиск осцилляций нейтрино в
стерильное состояние

А.В. Дербин

Петербургский институт ядерной физики



Содержание

1. Указания на существование стерильного состояния с $\delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$
LSND, MiniBooNe, Ga-аномалия, реакторная аномалия

2. Детекторы солнечных нейтрино

Homestake, Kamiokande, SAGE, GALLEX/GNO, S-Kamiokande, SNO, KamLAND, BOREXINO

3. Детектор Борексино

энергия, координаты события, фон

4. Результаты Борексино по солнечным нейтрино

^7Be -нейтрино, ^8B -нейтрино, pp -нейтрино, CNO, pp асимметрия день/ночь, магнитный момент

5. Регистрация антинейтрино в Борексино

Гео-нейтрино, реакторные нейтрино, ^8B -антинейтрино

6. Искусственные источники нейтрино

Нейтрино ^{51}Cr , ^{39}Ar , антинейтрино ^{90}Y - ^{90}Sr , ^{144}Ce - ^{144}Pr

7. Борексино с источником нейтрино ^{51}Cr

Рассеяние нейтрино на электроны, $10 \text{ МК } ^{51}\text{Cr}$, осцилляционные кривые

8. Борексино и источник антинейтрино ^{144}Pr

КАЭС, МАЯК, $100 \text{ кК } ^{144}\text{Ce}$, ожидаемая чувствительность

Смешивание и осцилляции нейтрино

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix}$$

ν_4 █ 1 eV?
 ν_3 █ █ 49 meV
 ν_2 █ █ █ 8.7 meV

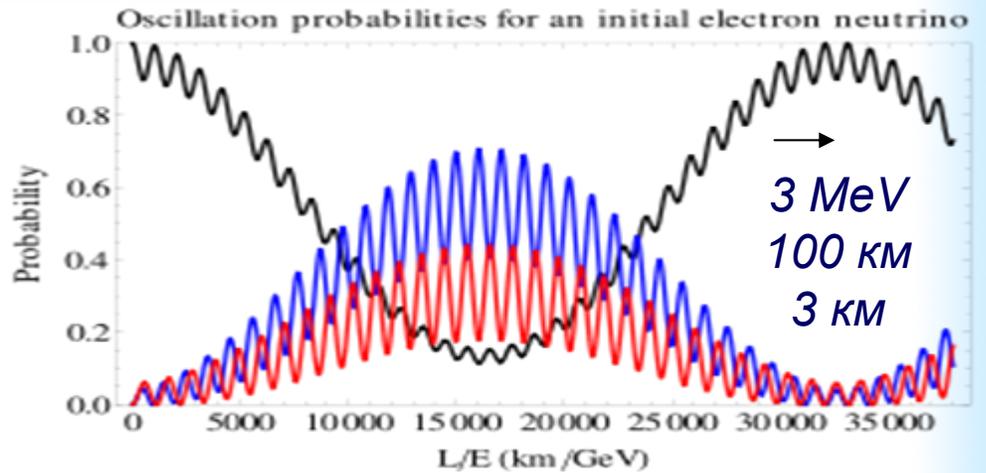
$L(m) = 2.5 E(\text{MeV}) / \Delta m^2(\text{eV}^2)$

$$\Delta m_{12}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2, \quad |\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2, \\
 \sin^2 \theta_{12} = 0.308, \quad \sin^2 \theta_{23} = 0.446, \quad \sin^2 \theta_{13} = 0.0237.$$

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \text{ and}$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle,$$

$$P = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 (L/E))$$



$$P_{ee} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13} (\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32})$$

$$\Delta_{ij} = 1.267 \Delta m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L(m) / E(\text{MeV})$$

Матрица PMNS

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

2 угла смешивания и 2 Δm^2 масс измерены:

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

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

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

$$|m_2^2 - m_1^2| = (7.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|m_3^2 - m_2^2| = (2.3 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

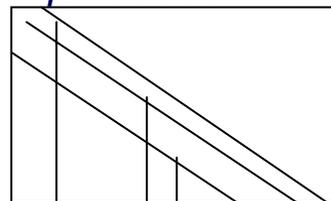
θ_{12} и δm_{12}^2 определены из экспериментов с солнечными нейтрино + KamLand

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ -1/2 & 1/2 & 1/\sqrt{2} \\ 1/2 & -1/2 & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

PMNS vs CKM

$$\begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

В β -распаде три особенности на графике Кюри



В распаде π -мезона три пика в спектре мюона



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*

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



Стерильное нейтрино с $\delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ и $\text{Sin}^2(2\theta) \sim 0.1$

Указание на существование нового массового состояния нейтрино было получено:

1. в экспериментах *LSND* (3.8σ) и *MiniBooNE* (3.8σ), изучавших осцилляции мюонных антинейтрино

$$\text{Sin}^2(2\theta) = (0.003-1.0) \delta m_{14}^2 = (0.05-100) \text{ эВ}^2$$

$$P = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 (L/E))$$

2. при калибровке *Ga-Ge* радиохимических детекторов с искусственными источниками нейтрино (*Ga neutrino anomaly*, 2.8σ)

$$\text{Sin}^2(2\theta) = 0.1 \delta m_{14}^2 = 1.5 \text{ эВ}^2$$

3. в результате новых вычислений спектра реакторных нейтрино, (2.5σ)

$$\text{Sin}^2(2\theta) = (0.01-0.3) \delta m_{14}^2 = 2.0 \text{ эВ}^2$$

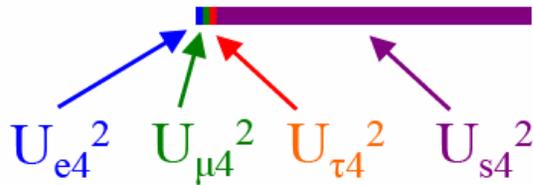
4. Космология и нуклеосинтез во время БВ предпочитали 4 типа нейтрино *WMAP* $N_{\text{eff}} = 4.34 \pm 0.88$ *PLANK+WMAP* $N_{\text{eff}} = 3.51 \pm 0.8$

Поскольку распадная ширина Z-бозона соответствует строго 3-м типам нейтрино, новое 4-е состояние интерпретируется как стерильное, не участвующее в слабых взаимодействиях, нейтрино

Схема смешивания 3 + 1

С одним стерильным нейтрино матрица PMNS становится матрицей 4x4 и появляется 4 параметра $U_{\alpha 4}$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} & U_{\mu 4} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} & U_{\tau 4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix}$$



Вероятность появления

$$P_{\mu e} = 4U_{e4}^2 U_{\mu 4}^2 \sin^2(1.27\Delta m_3^2 L/E)$$

Вероятность исчезновения νe

$$P_{e\bar{e}} \approx P_{es} = 4U_{e4}^2 U_{s4}^2 \sin^2(1.27\Delta m_3^2 L/E)$$

Вероятность исчезновения $\nu \mu$

$$P_{\mu\bar{\mu}} \approx 4U_{\mu 4}^2 U_{s4}^2 \sin^2(1.27\Delta m_3^2 L/E)$$

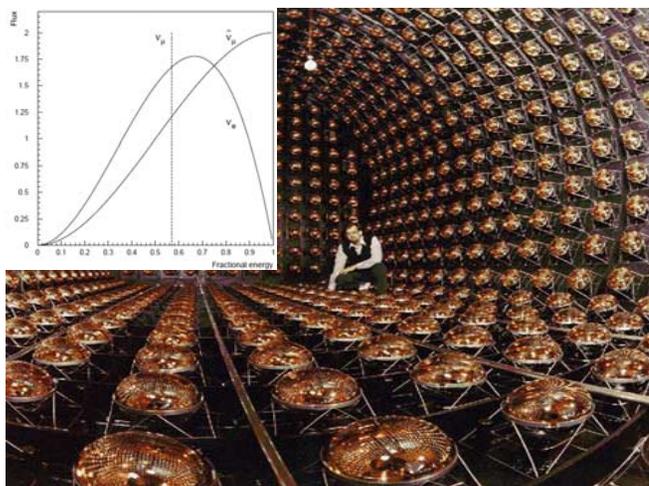
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}^{(-) (-)} = \delta_{\alpha\beta} - 4|U_{\alpha 4}|^2 (\delta_{\alpha\beta} - |U_{\beta 4}|^2) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E}\right)$$

$$\sin^2 2\theta_{e\mu} = 4|U_{e4}|^2 |U_{\mu 4}|^2$$

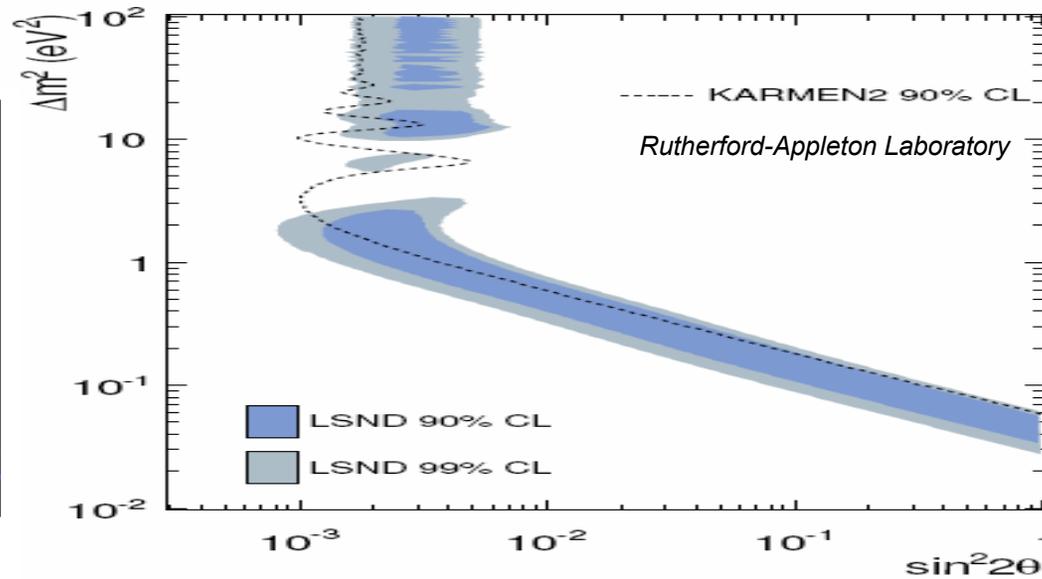
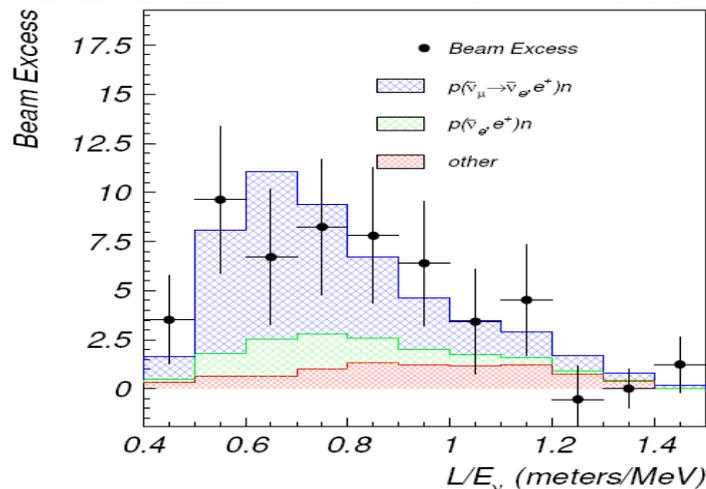
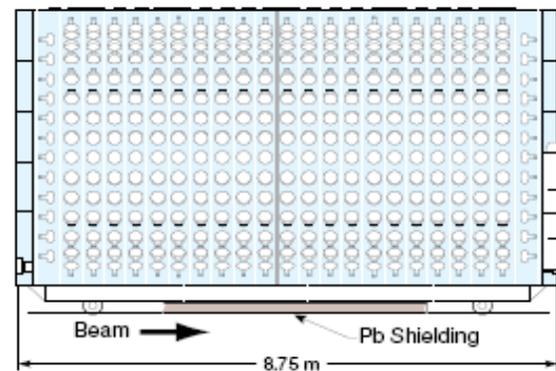
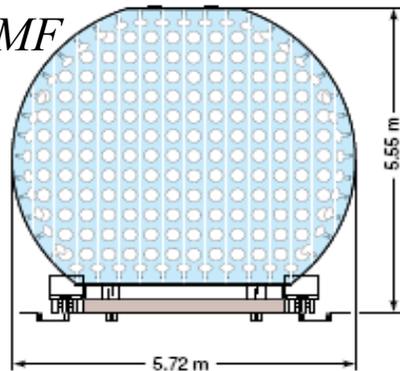
$$\sin^2 2\theta_{ee} = 4|U_{e4}|^2 (1 - |U_{e4}|^2)$$

$$\sin^2 2\theta_{\mu\mu} = 4|U_{\mu 4}|^2 (1 - |U_{\mu 4}|^2)$$

LSND – Liquid Scintillator Neutrino Detector

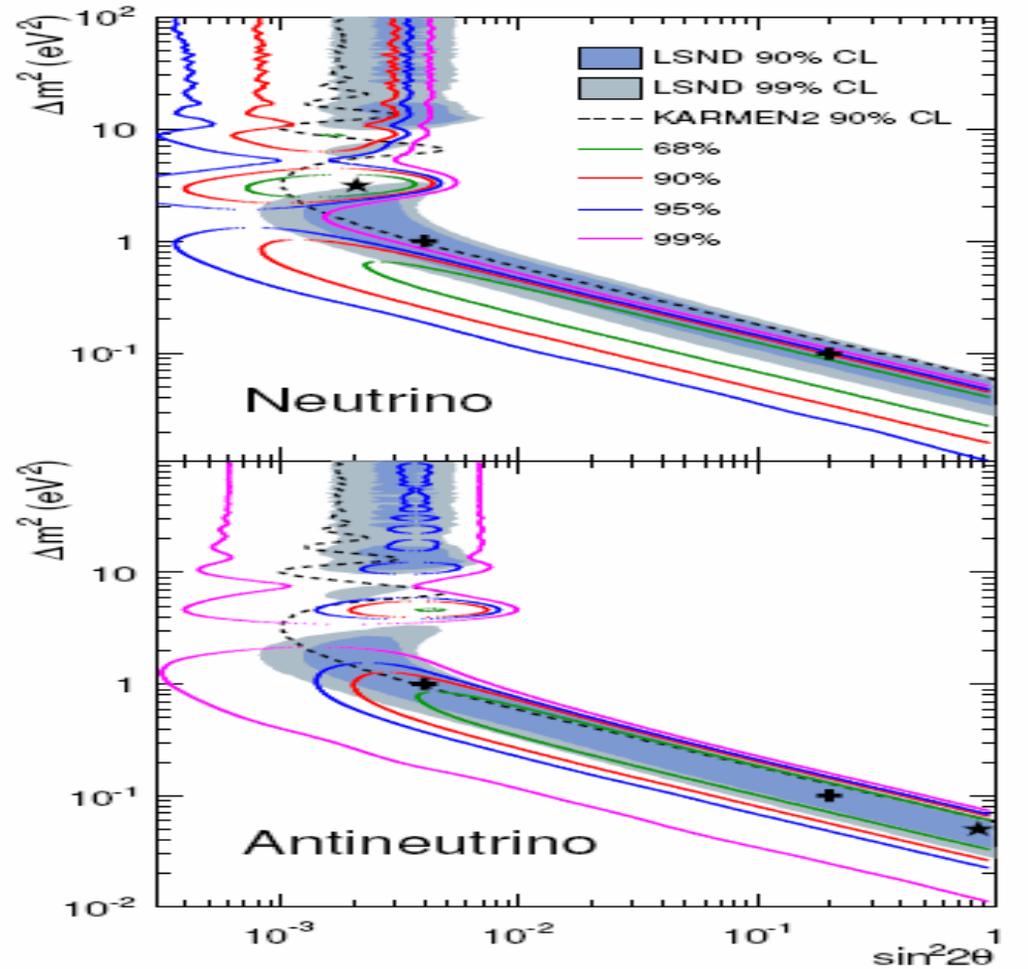
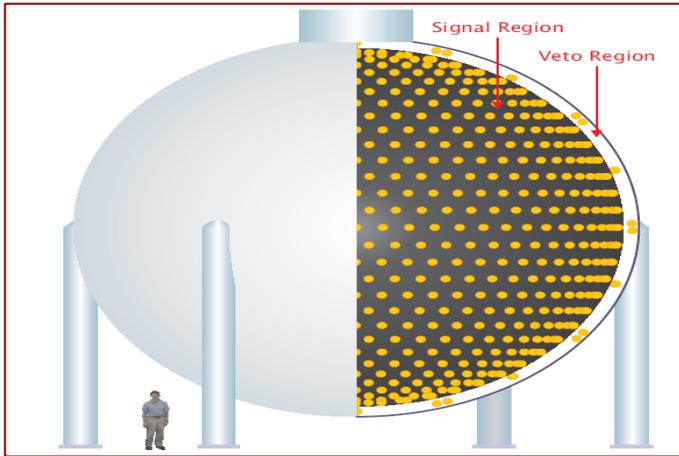


LAMF



В 1995, LSND указал на возможность осцилляций с $\delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$, наблюдая избыток анти- ν_e в пучке анти- ν_μ . Детектор содержит 167 тонн жидкого сцинтиллятора. Энергия нейтрино DAR 20-50 МэВ. $L = 30 \text{ м}$. Karmen – аналог

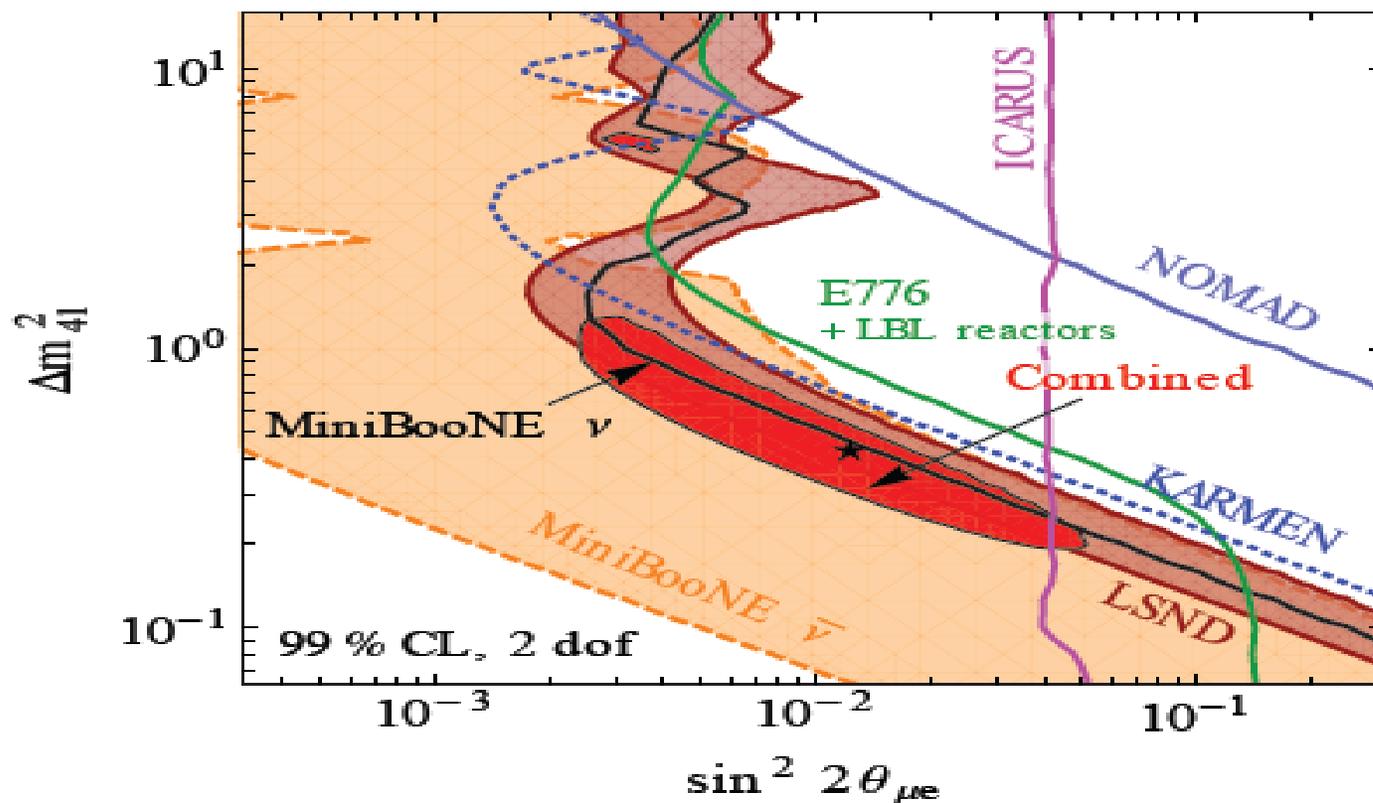
MiniBooNE- booster Neutrino Experiment FermiLab



800 тонн на расстоянии 540 метров от источника (анти) ν_μ с энергией ~ 500 МэВ. MiniBooNE (Черенков, CH₂) наблюдает избыток событий, связанных с электронными (анти)нейтрино в пучке мюонных (анти) ν_μ на уровне 3.8σ .

Появление $(анти)\nu_e$ в пучке $(анти)\nu_\mu$

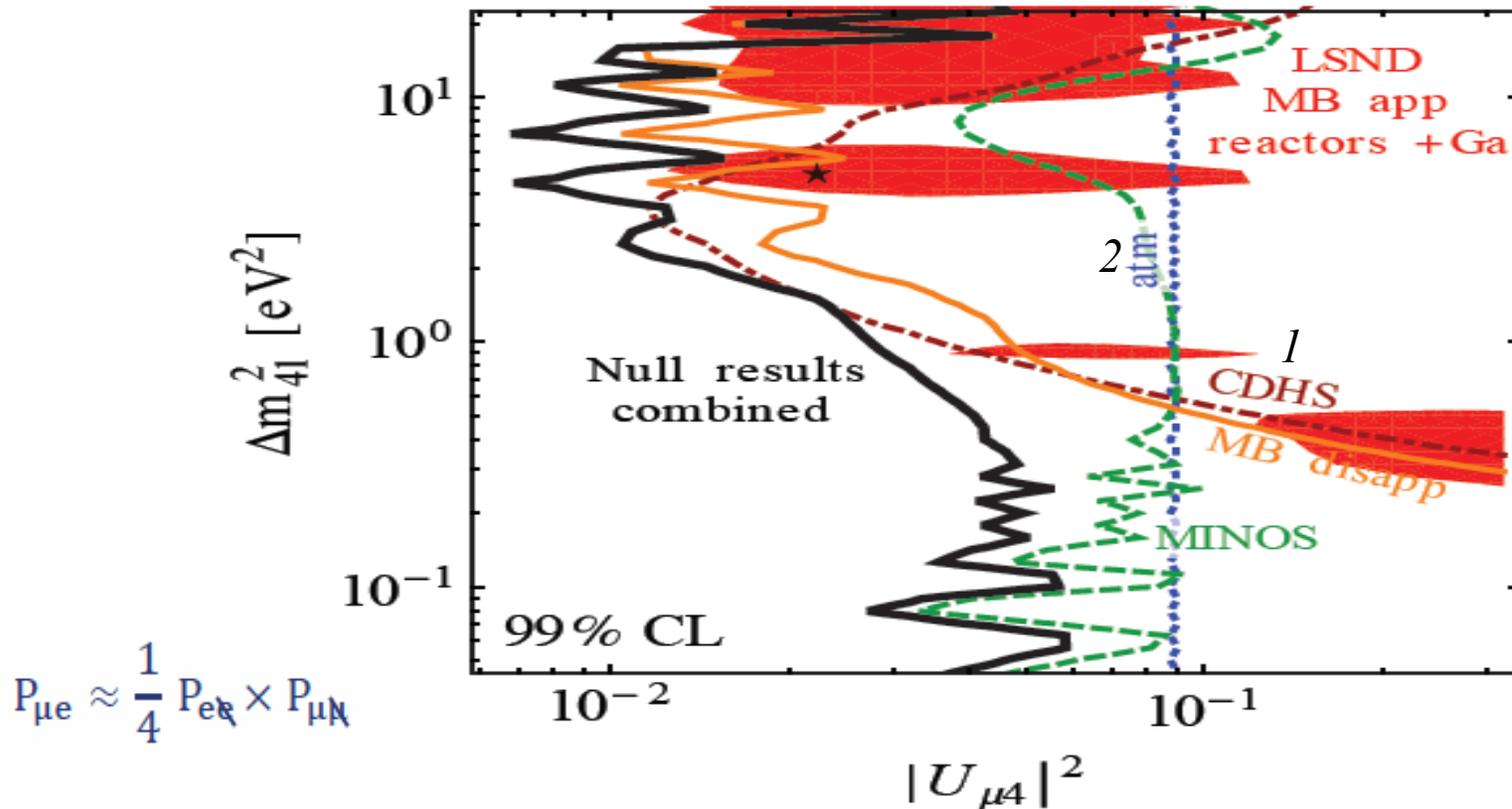
arXiv:1303.3011v3



Области разрешенных значений параметров δm^2 и $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ и существующие пределы. **LSND, MiniBooNE** против **KARMEN, NOMAD, ICARUS** и **E776 + LBL** реакторные эксперименты. Красная область соответствует совместному фиту всех данных, звездочкой указано наиболее вероятное значение осцилляционных параметров.

Нет исчезновения мюонных нейтрино

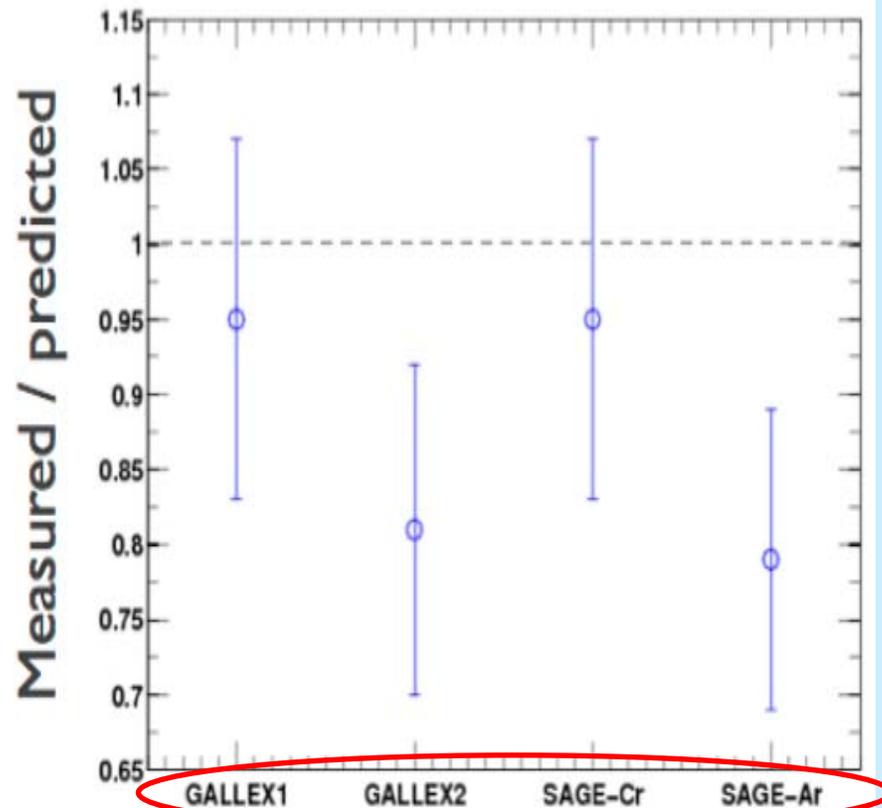
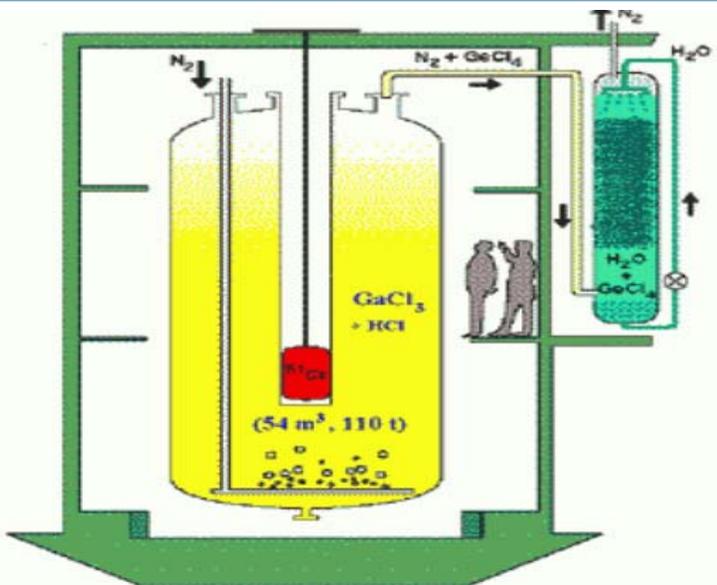
arXiv:1303.3011v3



$$P_{\mu e} \approx \frac{1}{4} P_{e e} \times P_{\mu \mu}$$

Ограничения на δm_{14}^2 и $\text{Sin}^2 2\theta_{\mu 4}$ из данных CDHS, атмосферных нейтрино, MiniBooNE (исчезновение), MINOS (CC и NC) и их комбинация. Красная область соответствует совместному фиту данных LSND и MiniBooNE по появлению и реакторных и Ga-данных по исчезновению. Звездочкой указано наиболее вероятное значение осцилляционных параметров. Поскольку $P_{\mu e} = 0.25 P_{\mu \mu} P_{e e}$, мюонные нейтрино должны исчезать, если e-ν появляются.

Галлиевая аномалия

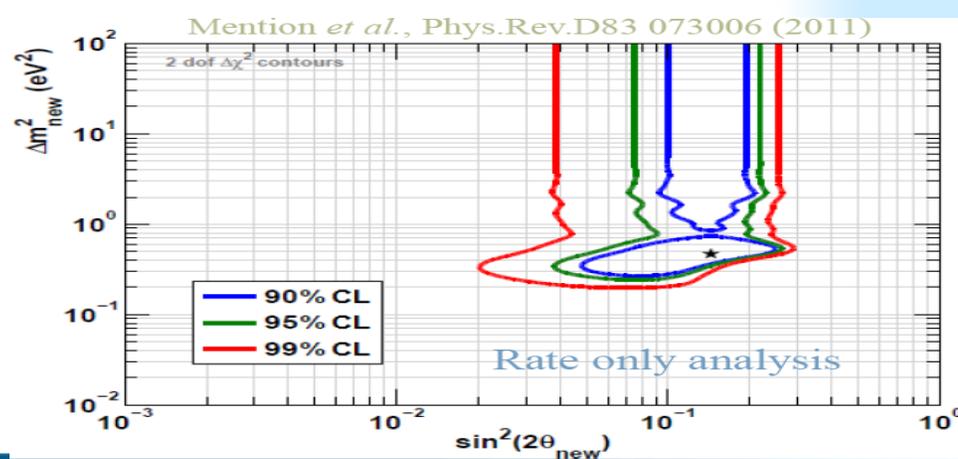
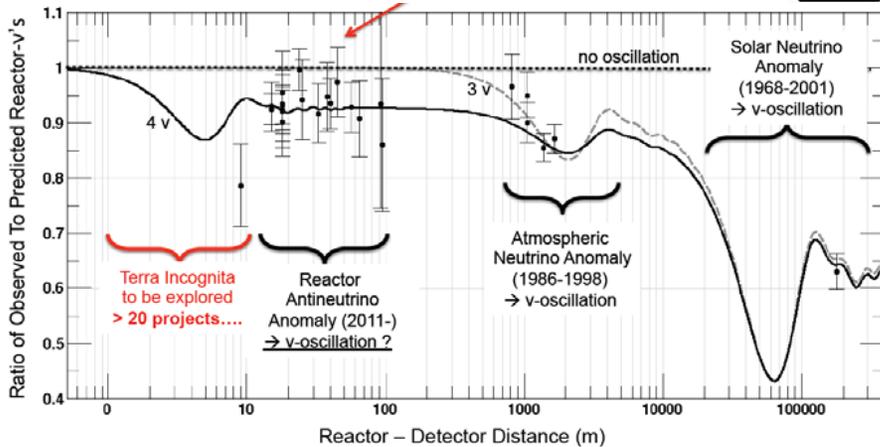
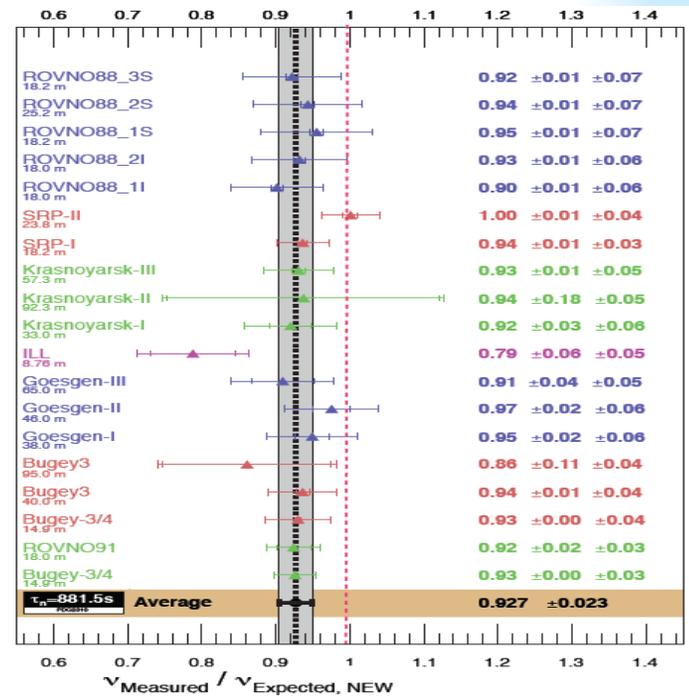
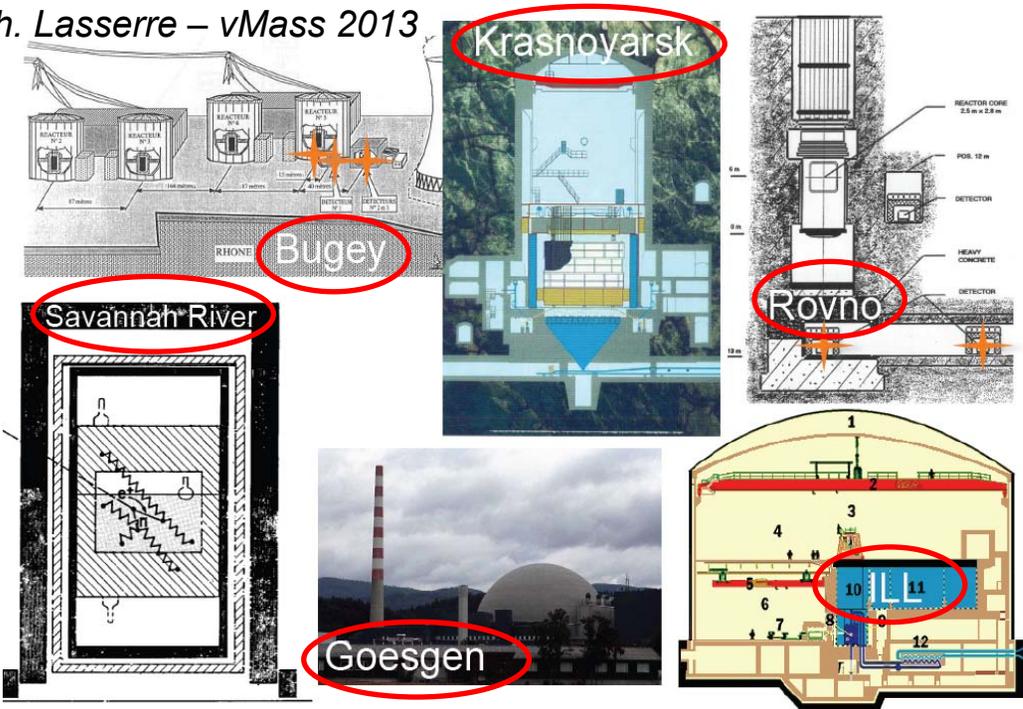


$$R_B^{\text{Ga}} = 0.86 \pm 0.05$$

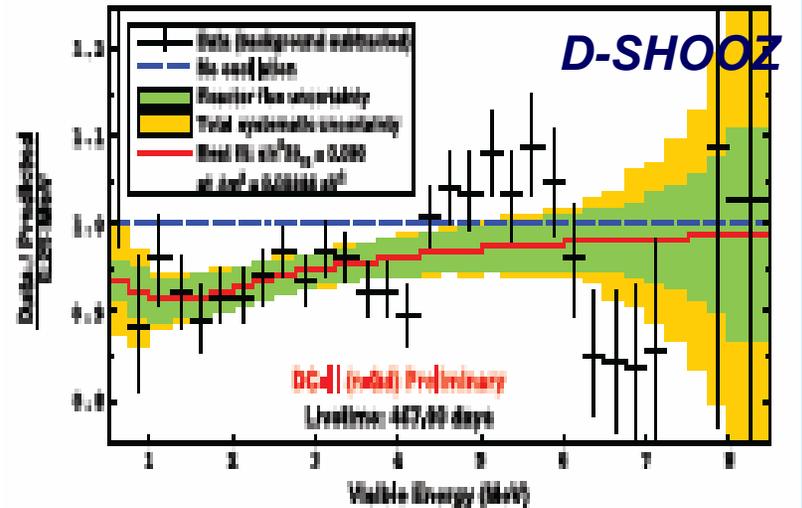
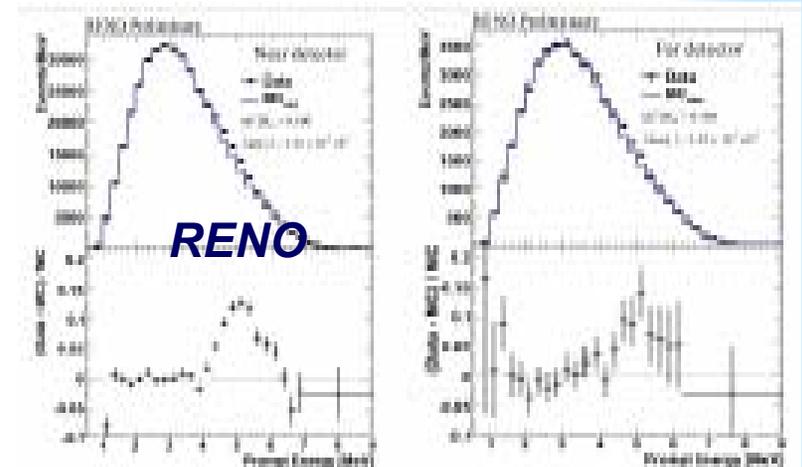
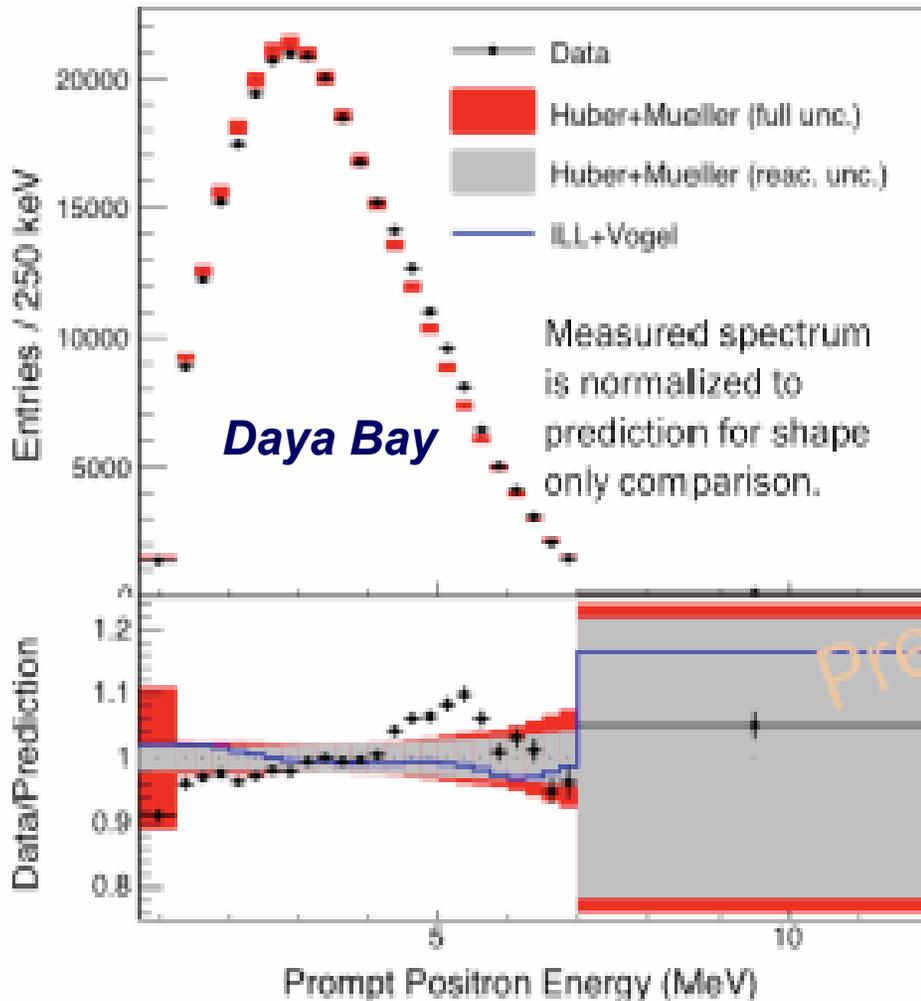
Результаты 4-х измерений с источниками нейтрино ^{51}Cr и ^{37}Ar отличаются от ожидаемого на 2.8σ .

Реакторная аномалия

Th. Lasserre – *v*Mass 2013



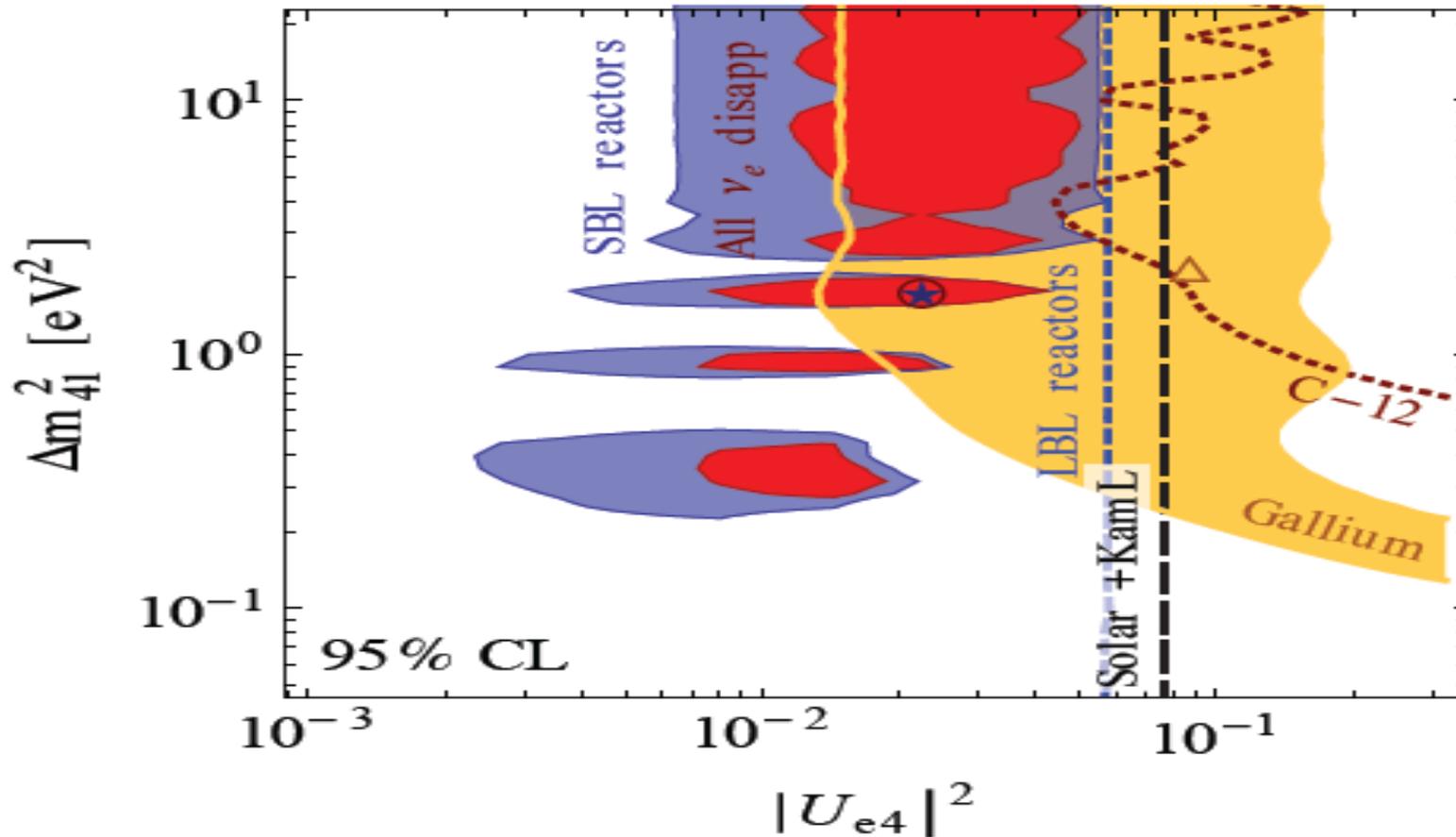
Проблемы спектра реакторных нейтрино



Во всех трех экспериментах избыток событий в интервале 4 – 6 МэВ для ближнего и дальнего детекторов. Не влияет на определение θ_{13} .

Исчезновение электронных (анти)нейтрино

J.Kopp et al., arXiv:1303.3011



Области разрешенных осцилляционных параметров (95% у.д. в схеме 3+1). **SBL** реакторы – синий. **GaGe-аномалия** – желтый. Большие углы смешивания ограничивают данные по ν_e - ^{12}C взаимодействию (LSND, KARMEN), LBL реакторные (CHOOZ, Palo Verde, DCHOOZ, Daya Bay и RENO) и детекторы солнечных м + KamLanD. Красная область – суммарный фит.

Сравнение экспериментов

Эксперимент	Источник нейтрино	Канал	Регистрация	признак	У.Д.
LSND	распад остановившихся мюонов	$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$	IBD	счет и спектр	3.8σ
Mini-BooNE	Распад пионов в полете	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$	CCQE	счет и спектр	3.8σ
SAGE GALLEX	^{51}Cr , ^{37}Ar	$\nu_{e} \rightarrow \nu_{s}$	IEC	счет	$\approx 3.0\sigma$
Reactor	$^{235,238}\text{U}$, $^{239,241}\text{Pu}$	$\nu_{e} \rightarrow \nu_{s}$	IBD	счет и спектр	3.0σ

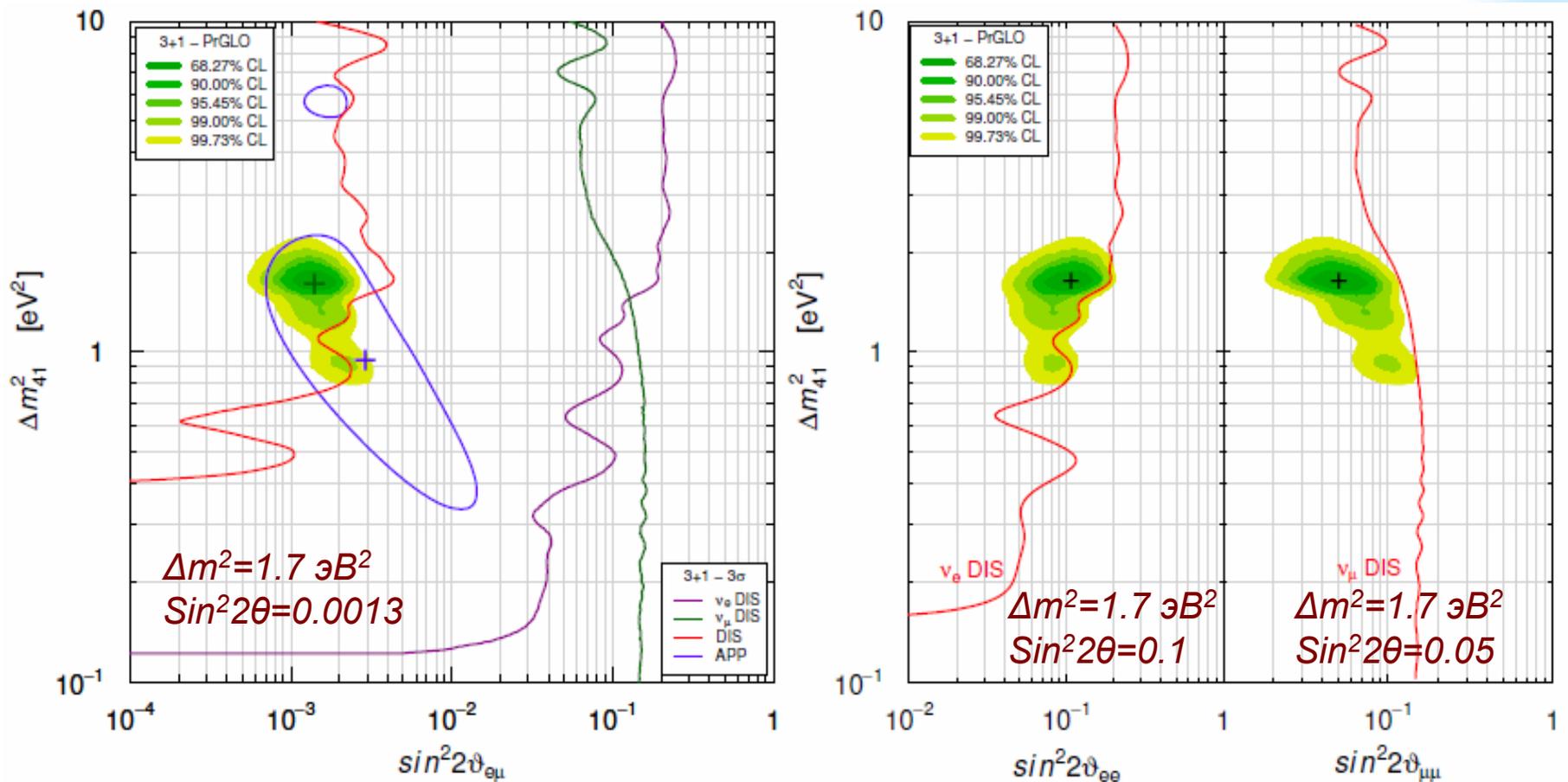


Figure 1: Allowed regions in the $\sin^2 2\theta_{e\mu} - \Delta m_{41}^2$, $\sin^2 2\theta_{ee} - \Delta m_{41}^2$ and $\sin^2 2\theta_{\mu\mu} - \Delta m_{41}^2$ planes obtained in the pragmatic 3+1 global fit PrGLO of short-baseline neutrino oscillation data compared with the 3σ allowed regions obtained from $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ short-baseline appearance data (APP) and the 3σ constraints obtained from $\bar{\nu}_e$ short-baseline disappearance data (v_e DIS), $\bar{\nu}_\mu$ short-baseline disappearance data (v_μ DIS) and the combined short-baseline disappearance data (DIS). The best-fit points of the global (PrGLO) and APP fits are indicated by crosses.

Light Sterile Neutrinos: A White paper 1204.5379 (400 cit.)

Light Sterile Neutrinos: A White Paper

K. N. Abazajian^{a,1} M. A. Acero,² S. K. Agarwalla,³ A. A. Aguilar-Arevalo,^{2,4,5} S. Antusch,⁶ C. A. Argüelles,⁷ A. B. Balantekin,⁸ G. Barenboim^{a,3} V. Barger,⁸ P. Bernardini,⁹ F. Bezrukov,¹⁰ O. E. Bjaelde,¹¹ S. A. Bogacz,¹² N. S. Bowden,¹³ A. Boyarsky,¹⁴ A. Bravar,¹⁵ D. Bravo Berguño,¹⁶ S. J. Brice,⁵ A. D. Bross,⁵ B. Caccianiga,¹⁷ F. Cavanna,^{18,19} E. J. Chun,²⁰ B. T. Cleveland,²¹ A. P. Collin,²² P. Coloma,¹⁶ J. M. Conrad,²³ M. Cribier,²² A. S. Cucoanes,²⁴ J. C. D'Olivo,² S. Das,²⁵ A. de Gouvêa,²⁶ A. V. Derbin,²⁷ R. Dharmapalan,²⁸ J. S. Diaz,²⁹ X. J. Ding,¹⁶ Z. Djurcic,³⁰ A. Donini,^{31,3} D. Duchesneau,³² H. Ejiri,³³ S. R. Elliott,³⁴ D. J. Ernst,³⁵ A. Esmaili,³⁶ J. J. Evans,^{37,38} E. Fernandez-Martinez,³⁹ E. Figueroa-Feliciano,²³ B. T. Fleming^{a,18} J. A. Formaggio^{a,23} D. Franco,⁴⁰ J. Gaffiot,²² R. Gandhi,⁴¹ Y. Gao,⁴² G. T. Garvey,³⁴ V. N. Gavrin,⁴³ P. Ghoshal,⁴¹ D. Gibin,⁴⁴ C. Giunti,⁴⁵ S. N. Gninenko,⁴³ V. V. Gorbachev,⁴³ D. S. Gorbunov,⁴³ R. Guenette,¹⁸ A. Guglielmi,⁴⁴ F. Halzen,^{46,8} J. Hamann,¹¹ S. Hannestad,¹¹ W. Haxton,^{47,48} K. M. Heeger,⁸ R. Henning,^{49,50} P. Hernandez,³ P. Huber^{b,16} W. Huelsnitz,^{34,51} A. Ianni,⁵² T. V. Ibragimova,⁴³ Y. Karadzhov,¹⁵ G. Karagiorgi,⁵³ G. Keefer,¹³ Y. D. Kim,⁵⁴ J. Kopp^{a,5} V. N. Korneukhov,⁵⁵ A. Kusenko,^{56,57} P. Kyberd,⁵⁸ P. Langacker,⁵⁹ Th. Lasserre^{a,22,40} M. Laveder,⁶⁰ A. Letourneau,²² D. Lhuillier,²² Y. F. Li,⁶¹ M. Lindner,⁶² J. M. Link^{b,16} B. L. Littlejohn,⁸ P. Lombardi,¹⁷ K. Long,⁶³ J. Lopez-Pavon,⁶⁴ W. C. Louis^{a,34} L. Ludhova,¹⁷ J. D. Lykken,⁵ P. A. N. Machado,^{65,66} M. Maltoni,³¹ W. A. Mann,⁶⁷ D. Marfatia,⁶⁸ C. Mariani,^{53,16} V. A. Matveev,^{43,69} N. E. Mavromatos,^{70,39} A. Melchiorri,⁷¹ D. Meloni,⁷² O. Mena,³ G. Mention,²² A. Merle,⁷³ E. Meroni,¹⁷ M. Mezzetto,⁴⁴ G. B. Mills,³⁴ D. Minic,¹⁶ L. Miramonti,¹⁷ D. Mohapatra,¹⁶ R. N. Mohapatra,⁵¹ C. Montanari,⁷⁴ Y. Mori,⁷⁵ Th. A. Mueller,⁷⁶ H. P. Mumm,⁷⁷ V. Muratova,²⁷ A. E. Nelson,⁷⁸ J. S. Nico,⁷⁷ E. Noah,¹⁵ J. Nowak,⁷⁹ O. Yu. Smirnov,⁶⁹ M. Obolensky,⁴⁰ S. Pakvasa,⁸⁰ O. Palamara,^{18,52} M. Pallavicini,⁸¹ S. Pascoli,⁸² L. Patrizii,⁸³ Z. Pavlovic,³⁴ O. L. G. Peres,³⁶ H. Pessard,³² F. Pietropaolo,⁴⁴ M. L. Pitt,¹⁶ M. Popovic,⁵ J. Pradler,⁸⁴ G. Ranucci,¹⁷ H. Ray,⁸⁵ S. Razzaque,⁸⁶ B. Rebel,⁵ R. G. H. Robertson,^{87,78} W. Rodejohann^{a,62} S. D. Rountree,¹⁶ C. Rubbia,^{39,52} O. Ruchayskiy,³⁹ P. R. Sala,¹⁷ K. Scholberg,⁸⁸ T. Schwetz^{a,62} M. H. Shaevitz,⁵³ M. Shaposhnikov,⁸⁹ R. Shrock,⁹⁰ S. Simone,⁹¹ M. Skorokhvatov,⁹² M. Sorel,³ A. Sousa,⁹³ D. N. Spergel,⁹⁴ J. Spitz,²³ L. Stanco,⁴⁴ I. Stancu,²⁸ A. Suzuki,⁹⁵ T. Takeuchi,¹⁶ I. Tamborra,⁹⁶ J. Tang,^{97,98} G. Testera,⁸¹ X. C. Tian,⁹⁹ A. Tonazzo,⁴⁰ C. D. Tunnell,¹⁰⁰ R. G. Van de Water,³⁴ L. Verde,¹⁰¹ E. P. Veretenkin,⁴³ C. Vignoli,⁵² M. Vivier,²² R. B. Vogelaar,¹⁶ M. O. Wascko,⁶³ J. F. Wilkerson,^{49,102} W. Winter,⁹⁷ Y. Y. Y. Wong^{a,25} T. T. Yanagida,⁵⁷ O. Yasuda,¹⁰³ M. Yeh,¹⁰⁴ F. Yermia,²⁴ Z. W. Yokley,¹⁶ G. P. Zeller,⁵ L. Zhan,⁶¹ and H. Zhang⁶²

¹University of California, Irvine

²⁷Petersburg Nuclear Physics Institute

¹⁰⁴Brookhaven National Laboratory

(Dated: April 25, 2012)

Программа поиска
стерильного нейтрино
с массой ~ 1 эВ²

arXiv:1204.5379v1 [hep-ph] 18 Apr 2012

SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino

G. Bellini,^h D. Bick,^g G. Bonfini,^c D. Bravo,^o B. Caccianiga,^h F. Calaprice,^k A. Caminata,^c P. Cavalcante,^c A. Chavarria,^k A. Chepurinov,^p D. D'Angelo,^h S. Davini,^r **A. Derbin,^d** A. Etenko,^g G. Fernandes,^c K. Fomenko,^{b,c} D. Franco,^a C. Galbiati,^k C. Ghiano,^a M. Göger-Neff,^m A. Goretti,^k C. Hagner,^g E. Hungerford,^r Aldo Ianni,^c Andrea Ianni,^k V. Kobychhev,^f D. Korablev,^b G. Korga,^r D. Krasnický,^c D. Kryn,^a M. Laubenstein,^c J.M. Link,^o E. Litvinovich,^g F. Lombardi,^c P. Lombardi,^h L. Ludhova,^h G. Lukyanchenko,^g I. Machulin,^g S. Manecki,^o W. Maneschg,ⁱ E. Meroni,^h M. Meyer,^g L. Miramonti,^h M. Misiaszek,^d P. Mosteiro,^k **V. Muratova,^d** L. Oberauer,^m M. Obolensky,^a F. Ortica,^j K. Otis,ⁿ M. Pallavicini,^c E. Pantic,^s L. Papp,^o S. Perasso,^c A. Pocar,ⁿ G. Ranucci,^h A. Razeto,^c A. Re,^h A. Romani,^j N. Rossi,^c R. Saldanha,^k C. Salvo,^c S. Schönert,^m **D. Semenov,^d** H. Simgen,ⁱ M. Skorokhvatov,^g O. Smirnov,^b A. Sotnikov,^b S. Sukhotin,^g Y. Suvorov,^{s,g} R. Tartaglia,^c G. Testera,^c **E. Unzhakov,^d** R.B. Vogelaar,^o H. Wang,^s M. Wojcik,^d M. Wurm,^g O. Zaimidoroga,^b S. Zavatarelli,^c and G. Zuzel^d

^aAPC, Univ. Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/Irfu, Obs. de Paris, Sorbonne

^bJoint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

^cDipartimento di Fisica, Università e INFN, Genova 16146, Italy

^dM. Smoluchowski Institute of Physics, Jagellonian University, Krakow, 3005

^eINFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi 67010, Italy

^fKiev Institute for Nuclear Research, Kiev 06380, Ukraine

^gNRC Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia

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

ⁱMax-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg 69029, Germany

^jDipartimento di Chimica, Università e INFN, Perugia 06123, Italy

^kPhysics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, U.S.A.

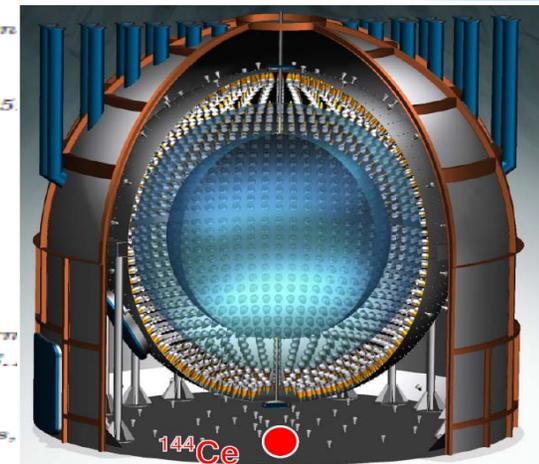
^lSt. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia

^mPhysik Department, Technische Universität München, Garching 85747, Germany

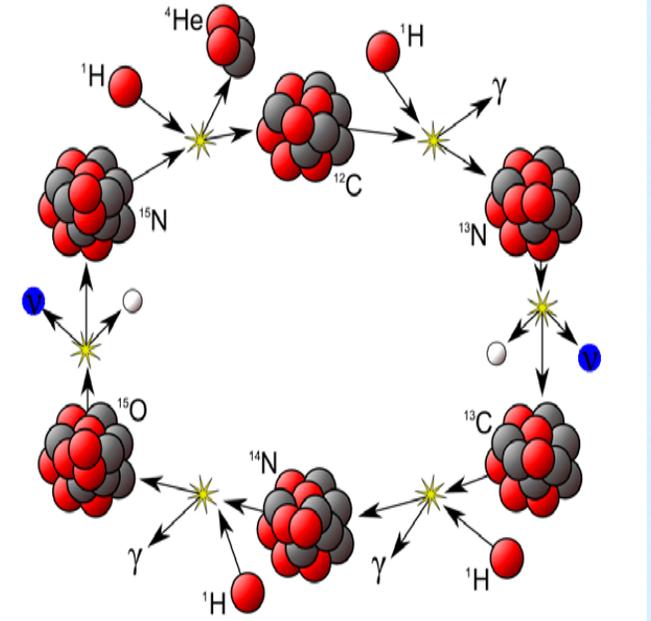
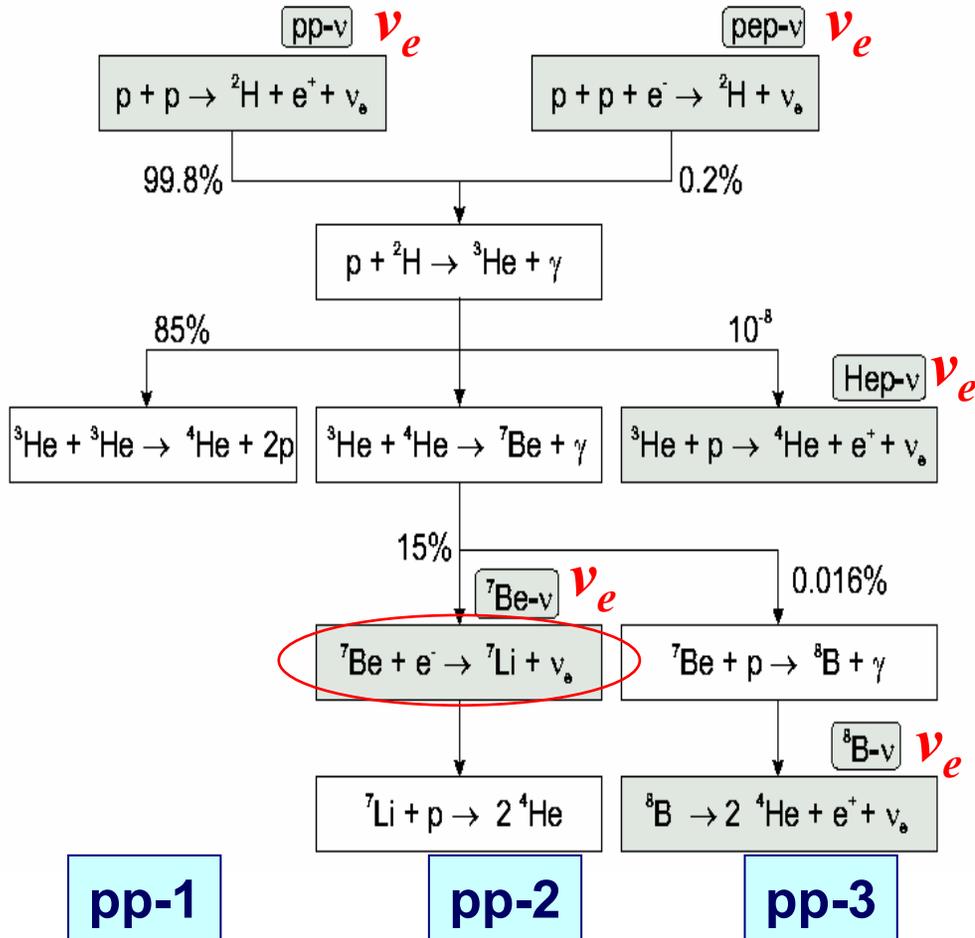
ⁿPhysics Department, University of Massachusetts, Amherst MA 01003, U.S.A.

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

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



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

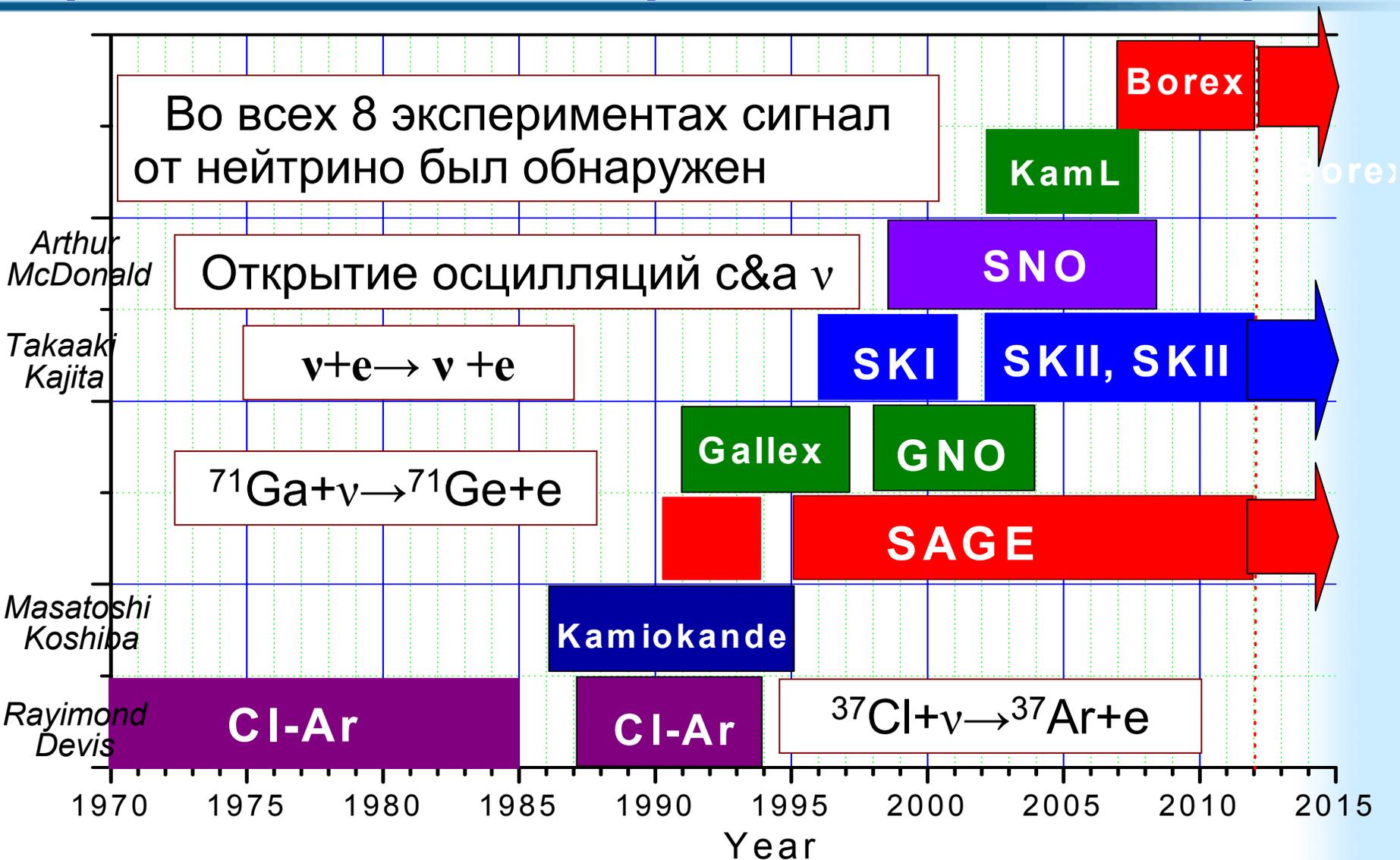


${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$
 ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$
 ${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$

Излучается 5 нейтрино в pp-цепи 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. 99% энергии производится в pp-цепи, и менее 1% дает CNO-цикл

Хронология детекторов солнечных нейтрино



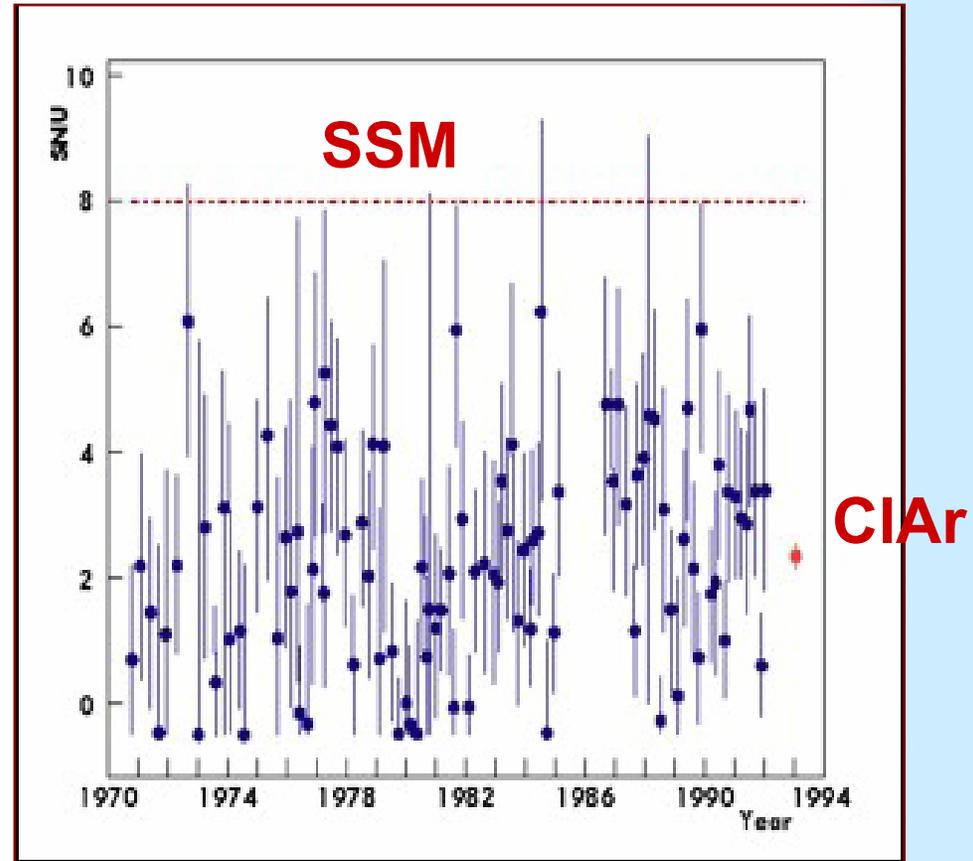
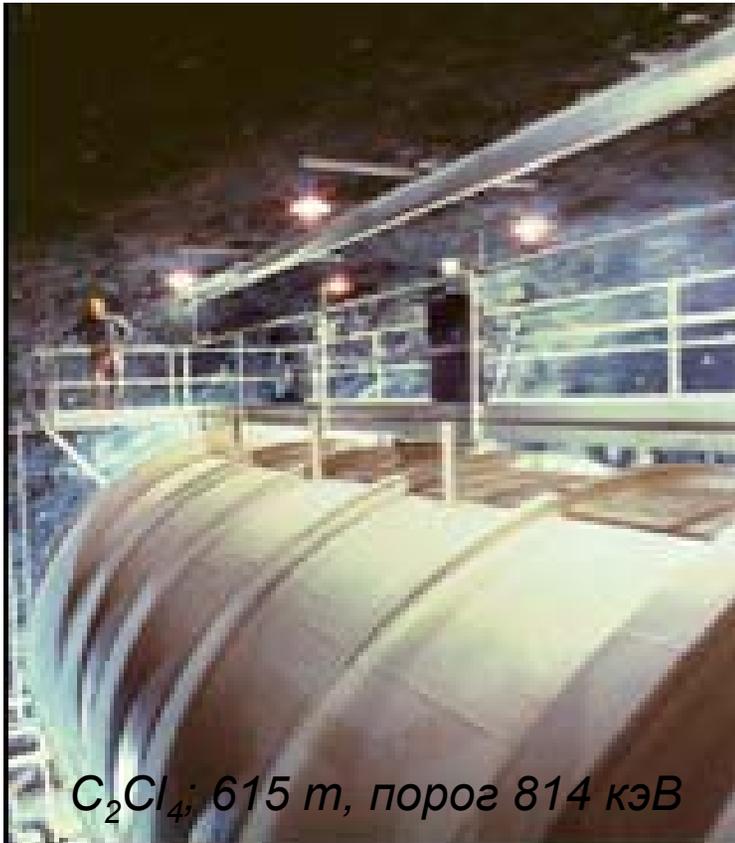
Солнечные нейтрино регистрировались 3-мя радиохимическими и 5 RT детекторами

Радиохимические детекторы солнечных нейтрино

Детектор		Мишень масса	Метод	Порог кэВ	Результат (доля от предсказаний ССМ)
Homestake	1970-1994 108 циклов	C_2Cl_4 ; 615 т	$\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$	814	0.337 ± 0.087
SAGE (действует)	1990-... 2006: 157 циклов	Мет. Ga ; 50 т	$\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$	233	0.520 ± 0.075 (TAUP-2007)
Gallex	1991-1997 67 циклов	$GaCl_3$; 30.3 т			0.605 ± 0.103
GNO-30	1998-2003 58 циклов				0.491 ± 0.081
Gallex+GNO					0.541 ± 0.081
Gallex+GNO+SAGE (ν -2006)					0.529 ± 0.065

Три(4) радиохимических детектора. Cl-Ar массой 615 т, SAGE – 50 т и GALLEX – 30 т. Детекторы SAGE и Gallex были прокалиброваны с источником нейтрино ${}^{51}Cr$, Детектор SAGE - в 2004 г. с источником ${}^{37}Ar$.

Cl-Ar детектор, Homestake



1. Измеренная скорость образования ^{37}Ar (5 ат /месяц 615 т) составила ~ 1/3 от предсказываемой ССМ. Возникает проблема солнечных нейтрино
2. Многолетние измерения дают возможность поиска зависимости скорости счета от времени.

Scientific American, Volume 221, July 1969, pp. 28-37

Грибов, Понтекорво - Михеев, Смирнов

Volume 28B, number 7

PHYSICS LETTERS

20 January 1969

Для объяснения $Cl-Ar$ результата угол смешивания близок к максимальному $\theta \approx \pi/4$ и больше, чем в кварковом секторе

NEUTRINO ASTRONOMY AND LEPTON CHARGE

V. GRIBOV* and B. PONTECORVO
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, USSR

Received 20 December 1968

It is shown that lepton nonconservation might lead to a decrease in the number of detectable solar neutrinos at the earth surface, because of $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ oscillations, similar to $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$ oscillations. Equations are presented describing such oscillations for the case when there exist only four neutrino states.

Я Д Е Р Н А Я Ф И З И К А
JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS
т. 42, вып. 6(12), 1985

Для объяснения $Cl-Ar$ результата угол смешивания мал $\theta \approx 0.01$, но за счет MSW -эффекта подавление потока ν_e

РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ВЕЩЕСТВЕ И СПЕКТРОСКОПИЯ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

МИХЕЕВ С. П., СМИРНОВ А. Ю.
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН СССР
(Поступила в редакцию 4 декабря 1984 г.)

Вещество может усиливать нейтринные осцилляции (увеличивать параметр смешивания $\sin^2 2\theta_m$). При малых углах смешивания в вакууме усиление носит резонансный характер по энергиям нейтрино или по плотности среды. В широком интервале осцилляционных параметров $\Delta m^2 = 10^{-4} \div 10^{-5}$ эВ² и $\sin^2 2\theta > 10^{-4}$ этот резонансный эффект существует для солнечных нейтрино. Он приводит к сильному подавлению нейтринного потока даже при малых $\sin^2 2\theta$.

Вместе, обе работы решают проблему солнечных нейтрино

SAGE, GALLEX/GNO: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

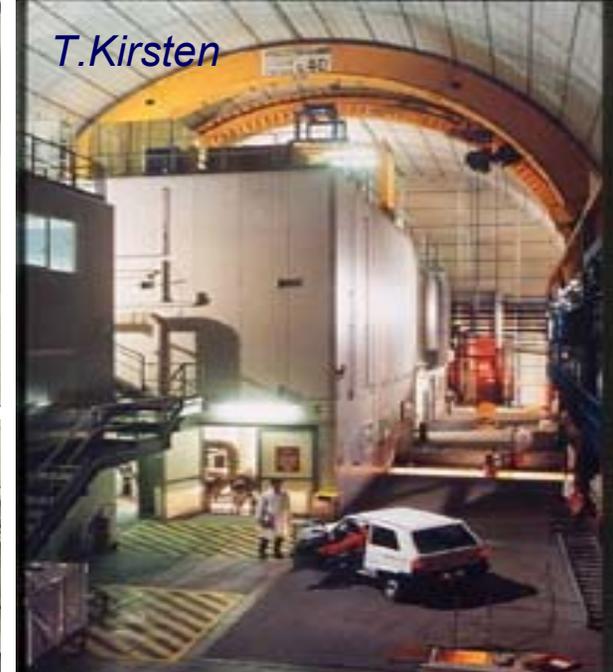
SAGE - радиохимический Ga-Ge эксперимент в Баксанской нейтринной обсерватории продолжает измерения

GALLEX/GNO в Гран Сассо 1991-2003

Г.Т. Зацепин, В.Н. Гаврин



T.Kirsten



65.4^{+3.1}_{-3.0} ^{+2.6}_{-2.8} SNU

67.6^{+4.0}_{-4.0} ^{+3.2}_{-3.2} SNU

arXiv:0901.2200v3

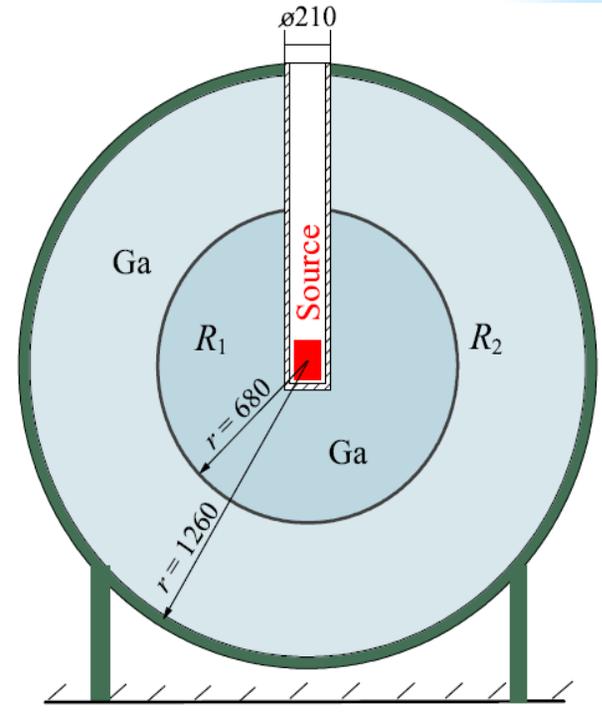
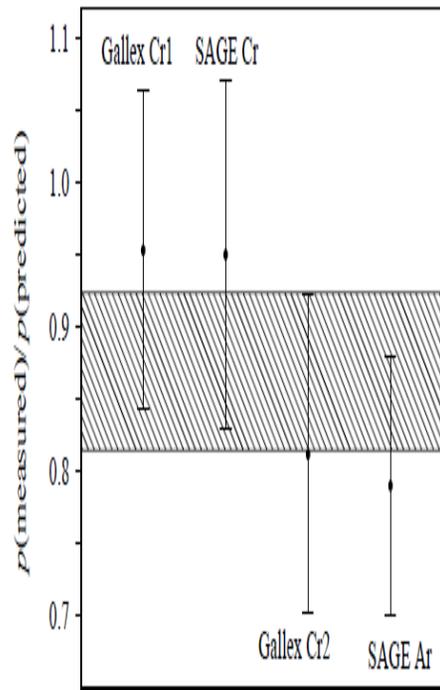
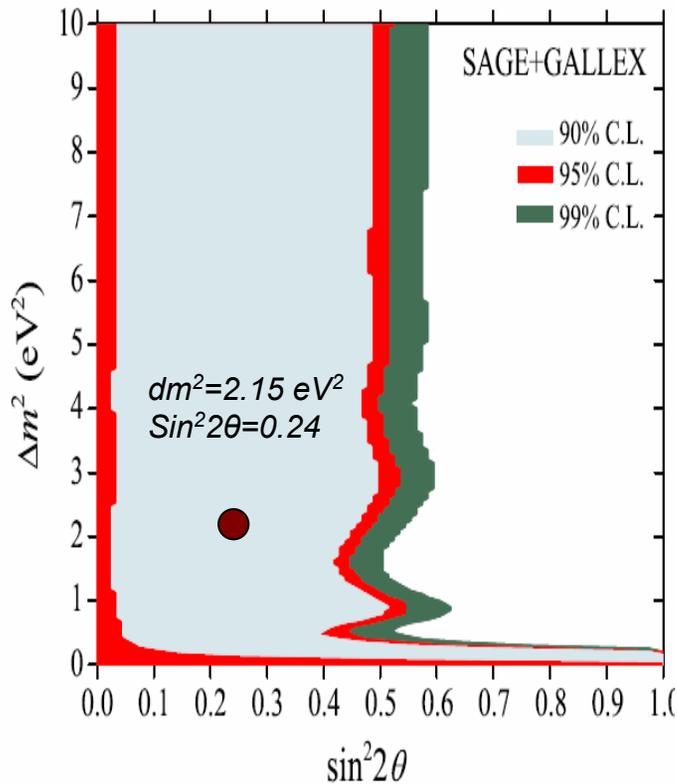
SAGE и GALLEX подтвердили дефицит нейтрино, но величина не 0.3, а 0.55

Ga-аномалия и поиск стерильного нейтрино

V. N. Gavrin,^{*} V. V. Gorbachev,^{*} E. P. Veretenkin,^{*} and B. T. Cleveland[†]

20 July 2010

arXiv:0901.2200v3



Число событий, зарегистрированных от источников ν , меньше ожидаемого. Для поиска переходов в с.с. предлагается разместить источник ^{51}Cr в центре Ga-детектора, разделенного на 2 concentрических зоны. Эксперимент чувствителен к осцилляциям с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ с амплитудой $\sim n \%$.

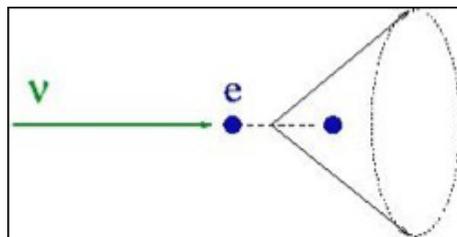
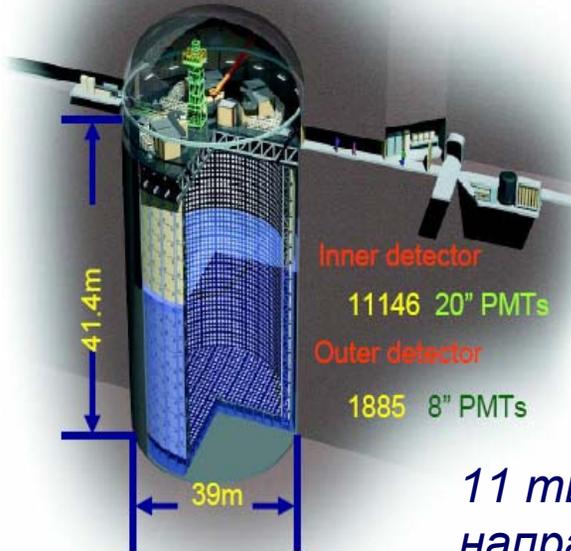
Детекторы, работающие в реальном времени

Детектор			Мишень, масса	Метод	Порог МэВ	Результат
KamiokaNDE-II		86-95	H ₂ O 3 кт	$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$	7.5	0.48±0.07
Super Kamiokande	I	96-01 1496 д	H ₂ O 50 кт	$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$	5.5	0.41±0.01
	II	02-05 791 д				0.42±0.03
	III IV	2006 548 д 2008-			5.0 4.5 3.5	0.40±0.02
SNO	I	99-01	D ₂ O 1006 т	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ (CC)-1.4 МэВ	6.5	0.340±0.023 ^{+0.029} _{-0.031} (ν_e)
				$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ (NC)-2.22 МэВ		
				$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ (ES)		
II	01-04 391д	+NaCl 2т	$^{35}\text{Cl} + n \rightarrow ^{36}\text{Cl} + 8.6 \text{ МэВ}$ (2-4 γ)	6.5	0.301 ±0.033	
III	04-06	+ ³ He счетчики	$^3\text{He} + n \rightarrow p + ^3\text{H} + 0.76 \text{ МэВ}$			

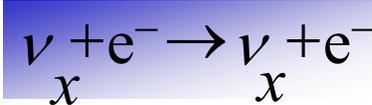
Пять электронных детекторов. SK массой 50 кт. Kamiokande, SK (о. атмосферных ν) и SNO (о. солнечных ν) – черенковские, Kamland и Borexino – сцинтилляционные.

Kamiokande, S-Kamiokande – H₂O детектор

M. Koshihara and Y. Totsuka,

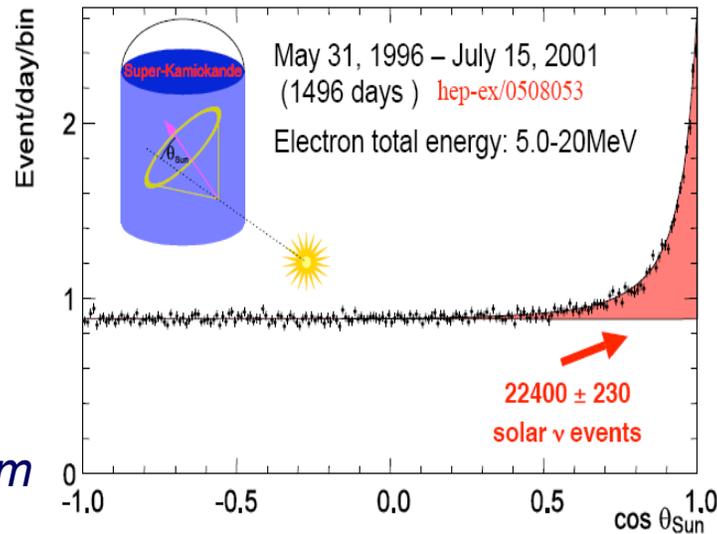


ES

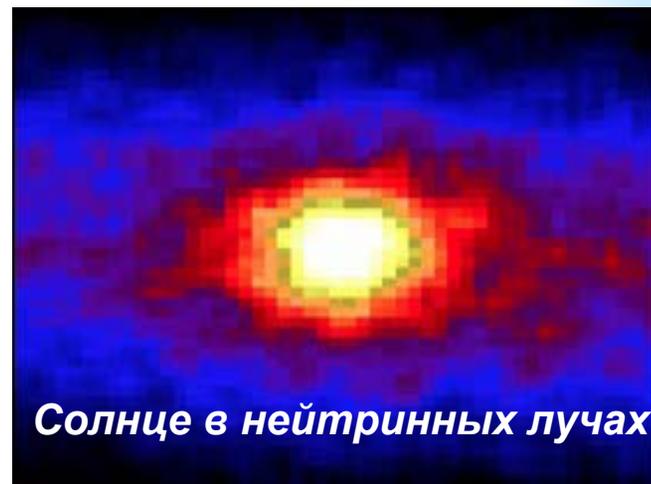
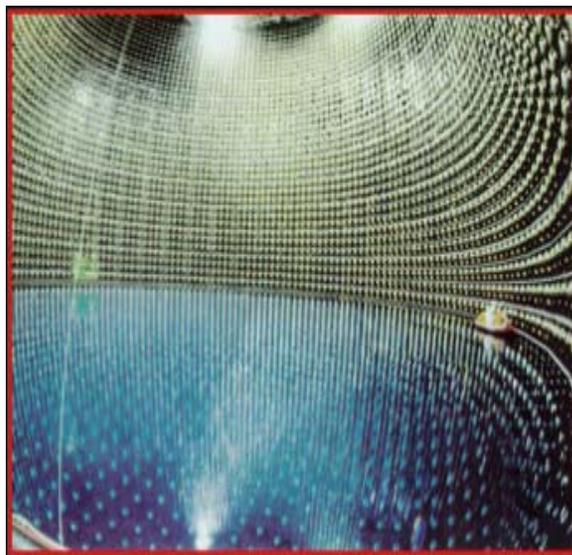
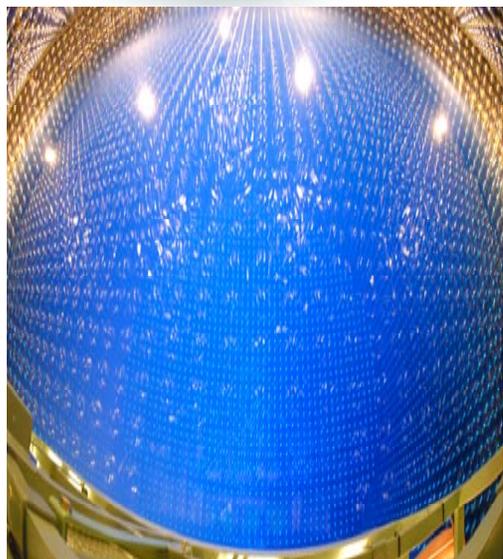


11 тыс. ФЭУ регистрируют направление и ~0.45 ССМ

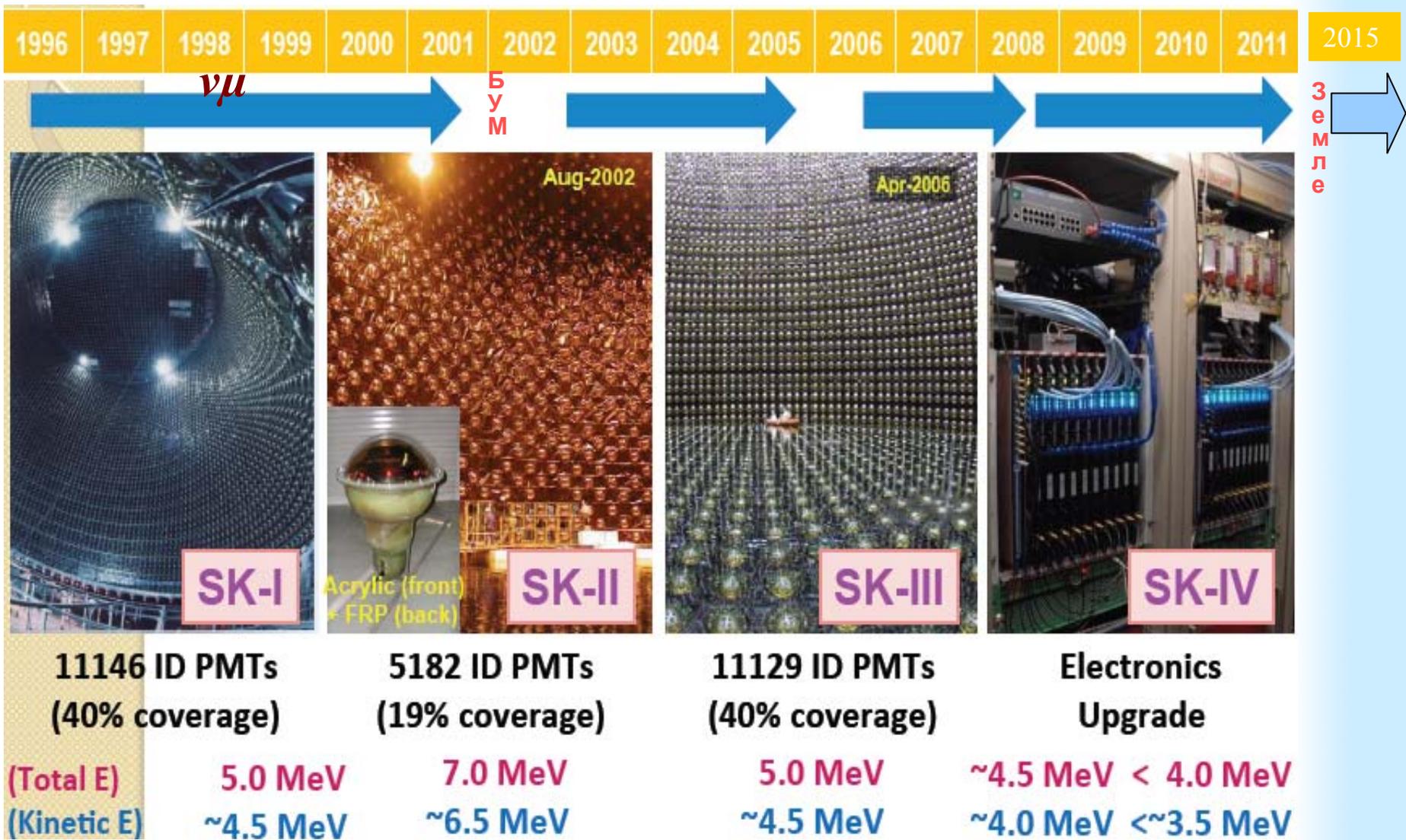
SK-I: ⁸B Solar Neutrino Flux



$$\Phi_{ES} = 2.35 \pm 0.02 \pm 0.08 \text{ [} \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{s} \text{]}$$



Понижение порога регистрации за 19 лет



Порог Катюканде составлял 7.5 МэВ. Порог SK опустился ниже 4 МэВ. 2 инцидента.

SNO - Sudbury Neutrino Observatory

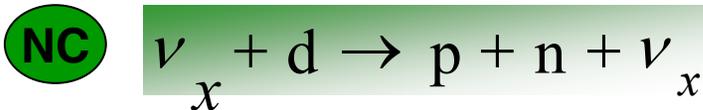
1000 тонн D_2O

9500 ФЭУ (~60% поверхности)

1700 тонн внутренняя защита H_2O

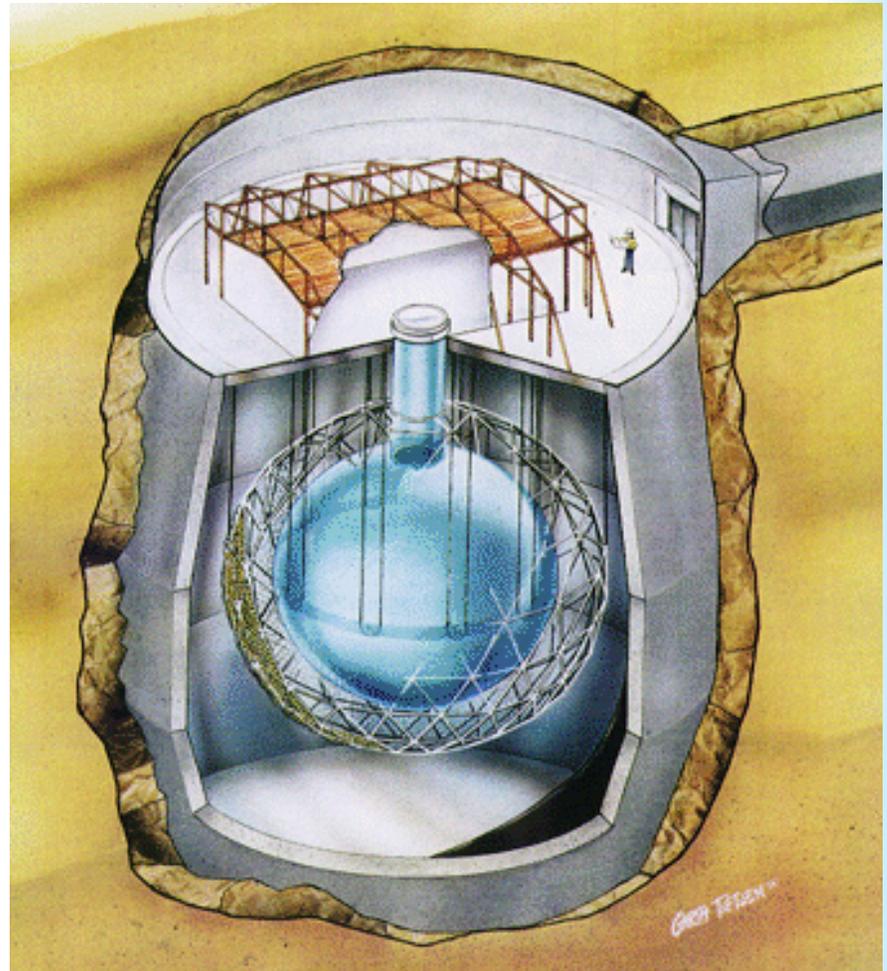
5300 тонн внешней защиты H_2O

глубина: 6000 м.в.э..



$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.340 \pm 0.023 \text{ (stat.) } \begin{matrix} +0.029 \\ -0.031 \end{matrix}$$

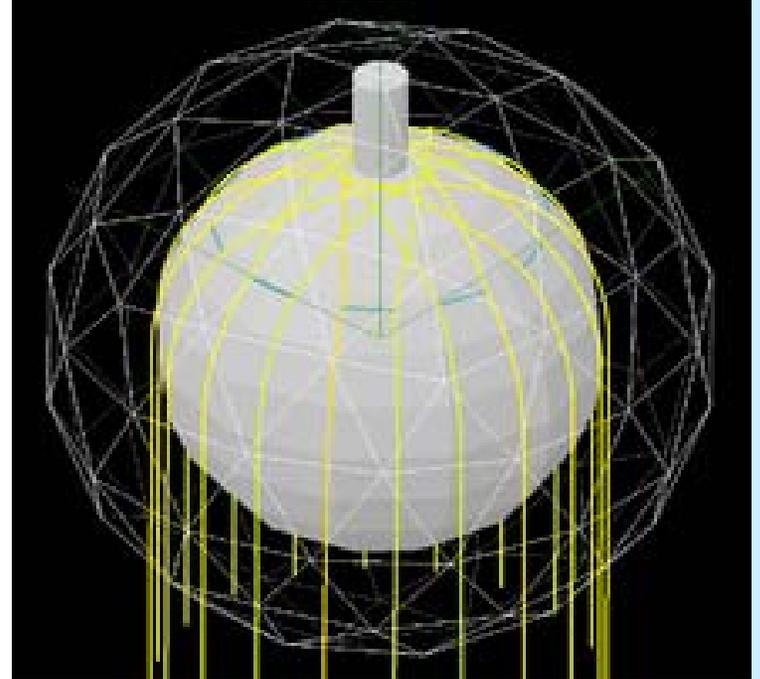
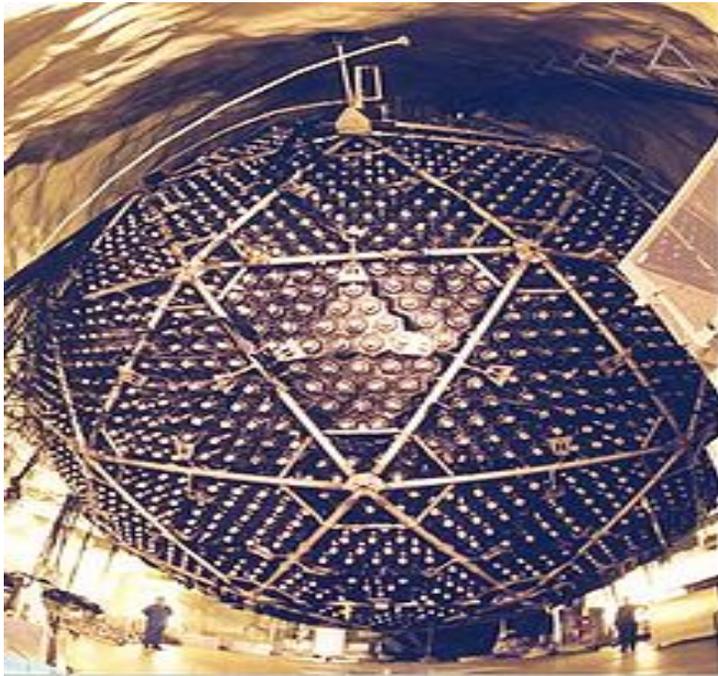
$$\phi_{NC} = \left(4.94 \pm 0.21 \text{ (stat.) } \begin{matrix} +0.38 \\ -0.34 \end{matrix} \right) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



Детектор работал с мая 1999 по ноябрь 2006. Первый результат, опубликованный в 2001 году, показал, что нейтрино осциллируют. Поток 8В-нейтрино, зарегистрированных через нейтральный ток, соответствует предсказаниям ССМ, через заряженный ~ 1/3 от ССМ. Си- и 3Не-вариант для n

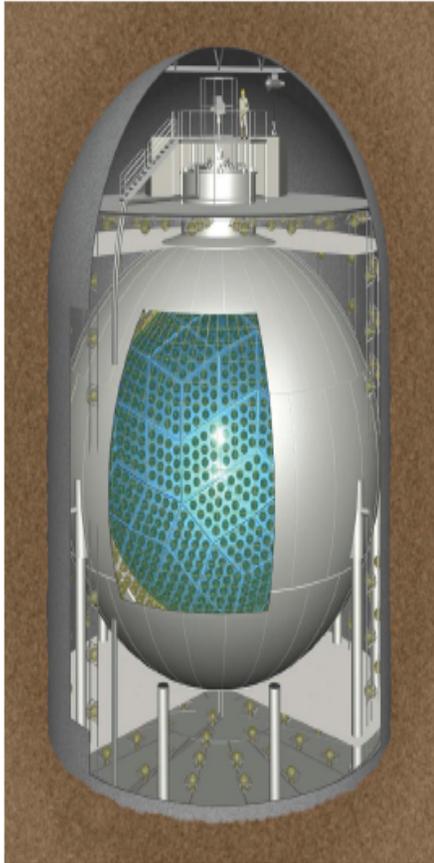
Новый SNO+ - сцинтилляционный детектор

Основная цель – рер-нейтрино и гео-нейтрино и 2 β -распад ^{130}Te .
Сцинтиллятор LAB (2014). Глубина 5890 м.в.э (3800 м.в.э. Борексино)
Производство космогенной активности (^{11}C) в ~ 20 раз меньше, чем в Борексино. Возможность регистрации рер- и SNO- ν . pp – проблема.

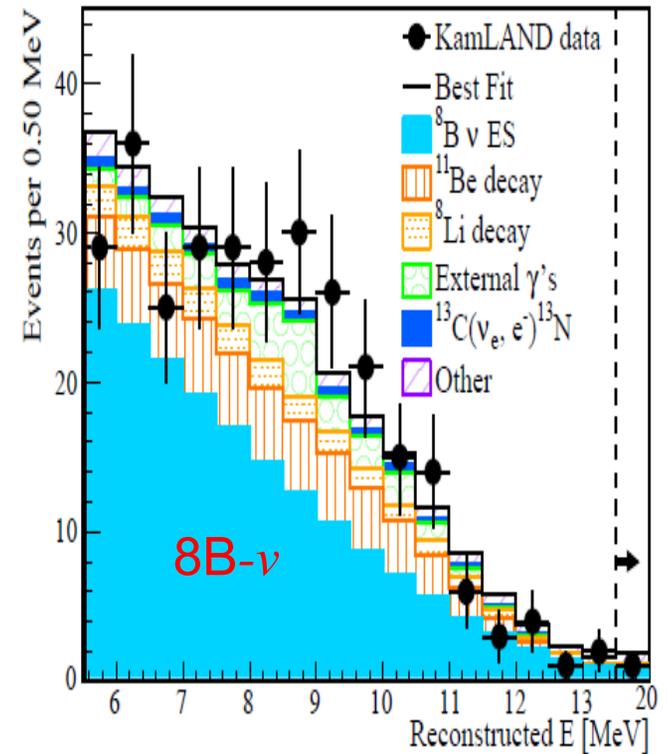


Задача следующего поколения детекторов солнечных нейтрино состоит в измерении спектров всех солнечных нейтрино. Это позволит лучше понять как структуру и процессы в Солнце, так и механизм нейтринных осцилляций в веществе. Март 2014: Заказ 1-ой партии ^{130}Te . Ввод в 2015.

KamLAND – детектор реакторных нейтрино



- 1 kton of liquid scintillator
 - 80% dodecane, 20% pseudocumene
 - 1.36 ± 0.03 g/l of PPO
 - density: 0.78 g/cm³
- Spherical balloon
 - radius: 6.5m
 - thickness: 135 μ m
- Stainless-steel Sphere
 - radius: 9m
 - 1879 PMTs
 - 1325 new 17" PMTs
 - 554 old 20" PMTs (Kamiokande)
- Outer detector
 - 3.2 kton water-Cherenkov

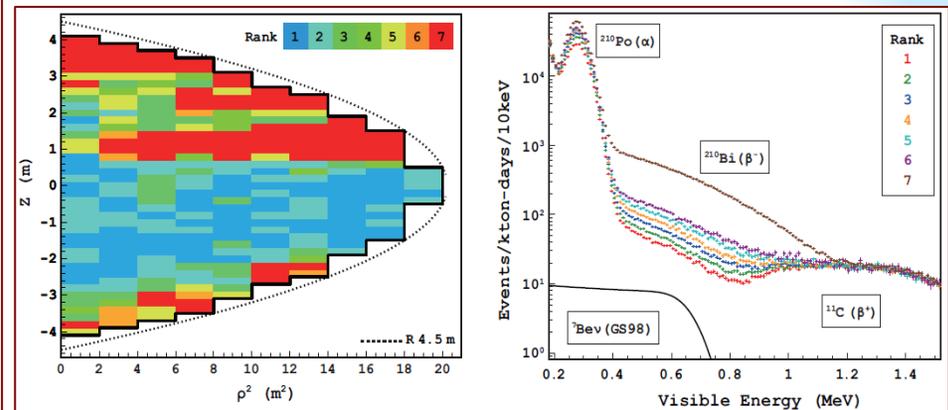
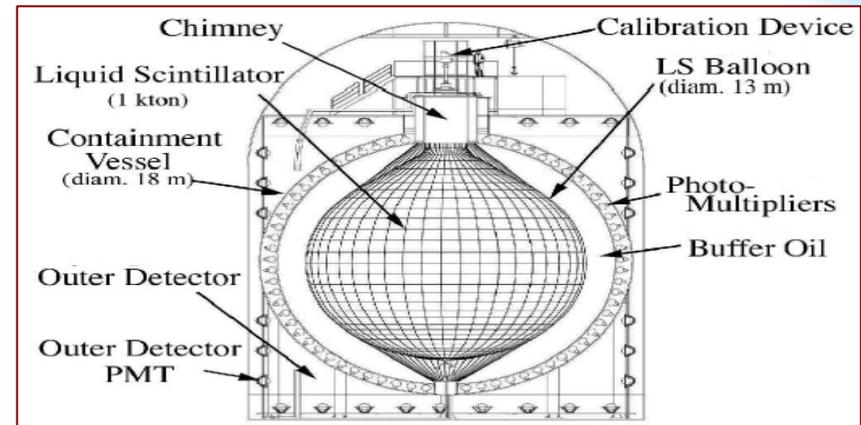
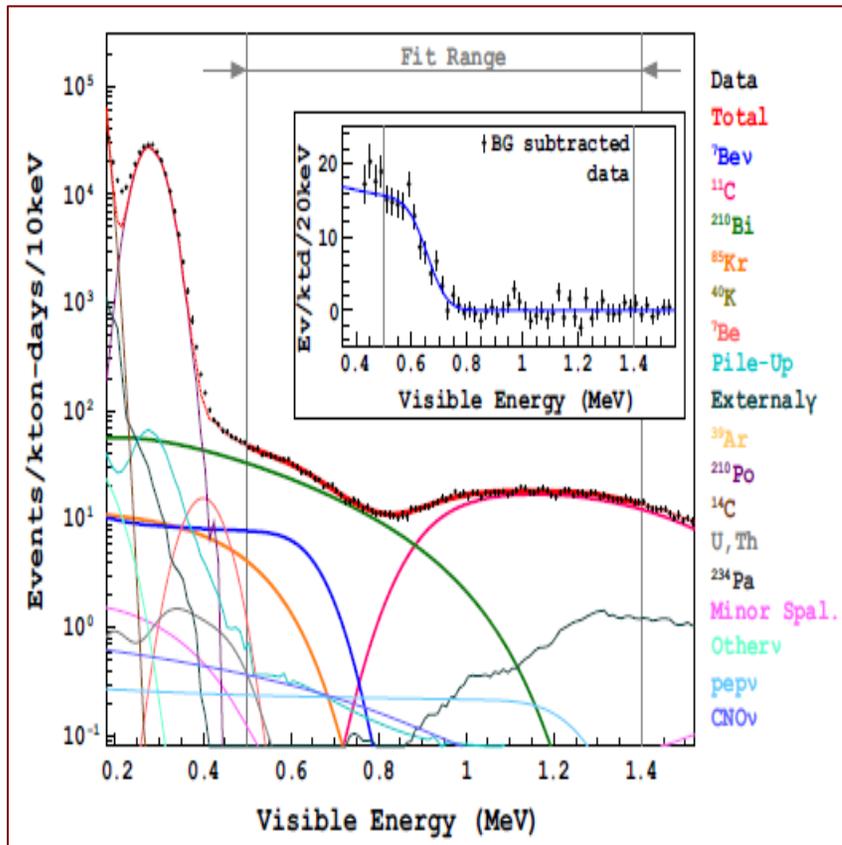


$$2.77 \pm 0.26(\text{stat}) \pm 0.32(\text{syst}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

KamLAND начал измерения в январе 2002 и через 145 дней представил первый результат, который выбрал **LMA** решение для антинейтрино. В 2002-2007 зарегистрировал $8B$ -нейтрино (2011).

KamLAND – результат для ${}^7\text{Be}$ -нейтрино

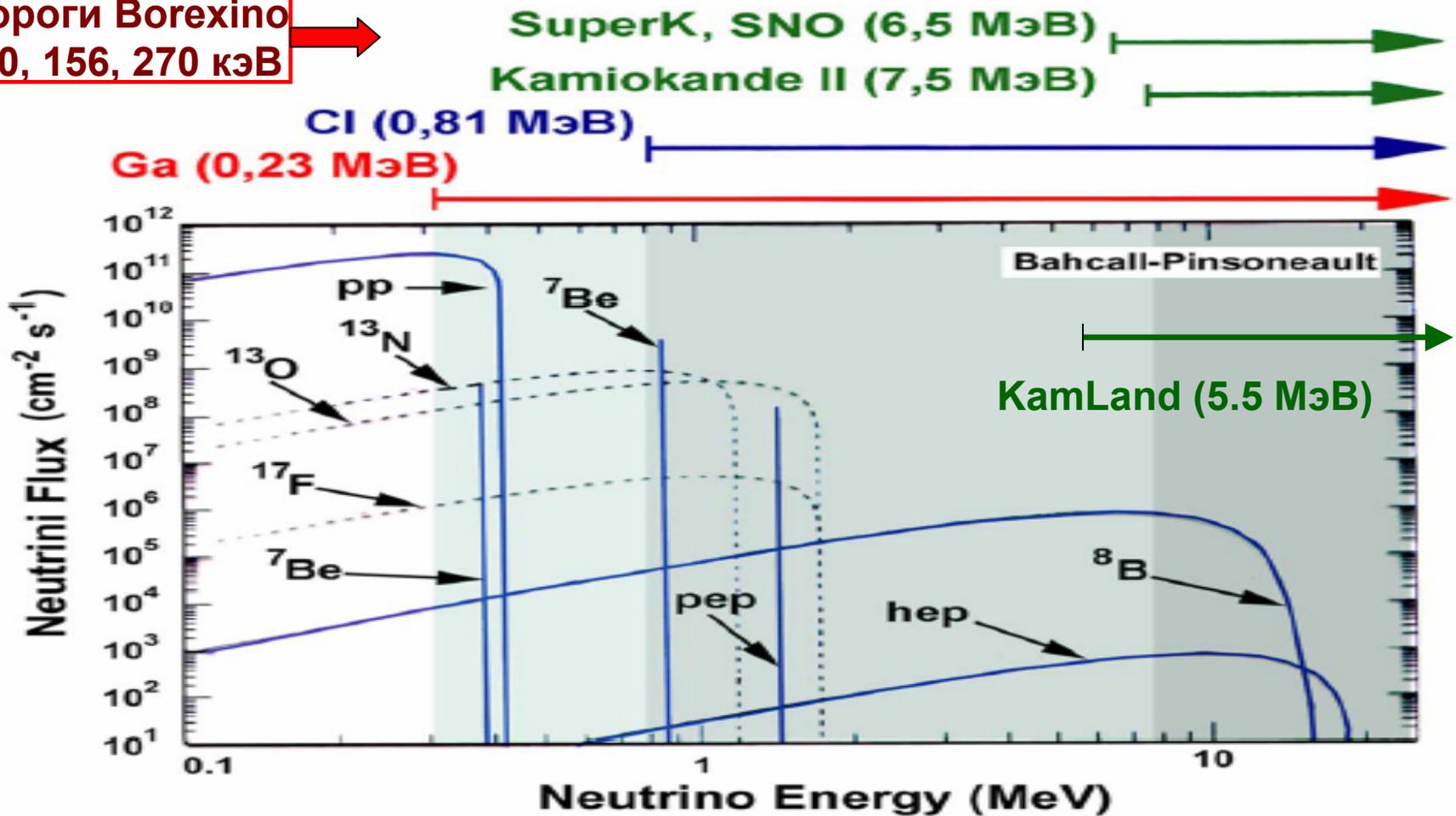
arXiv:1405.6190v1



165.4 kton-day exposure of KamLAND. The observed rate is 582 ± 90 (kton-day) $^{-1}$, which corresponds to a 862 keV ${}^7\text{Be}$ solar neutrino flux of $(3.26 \pm 0.50) \times 10^9$ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, assuming a pure electron flavor flux. Comparing this flux with the standard solar model prediction and further assuming three flavor mixing, a survival probability of 0.66 ± 0.14 is determined from the KamLAND data. Utilizing a global three flavor oscillation analysis, we obtain a total ${}^7\text{Be}$ solar neutrino flux of $(5.82 \pm 0.98) \times 10^9$ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, which is consistent with the SSM predictions.

Пороги регистрации и спектры нейтрино

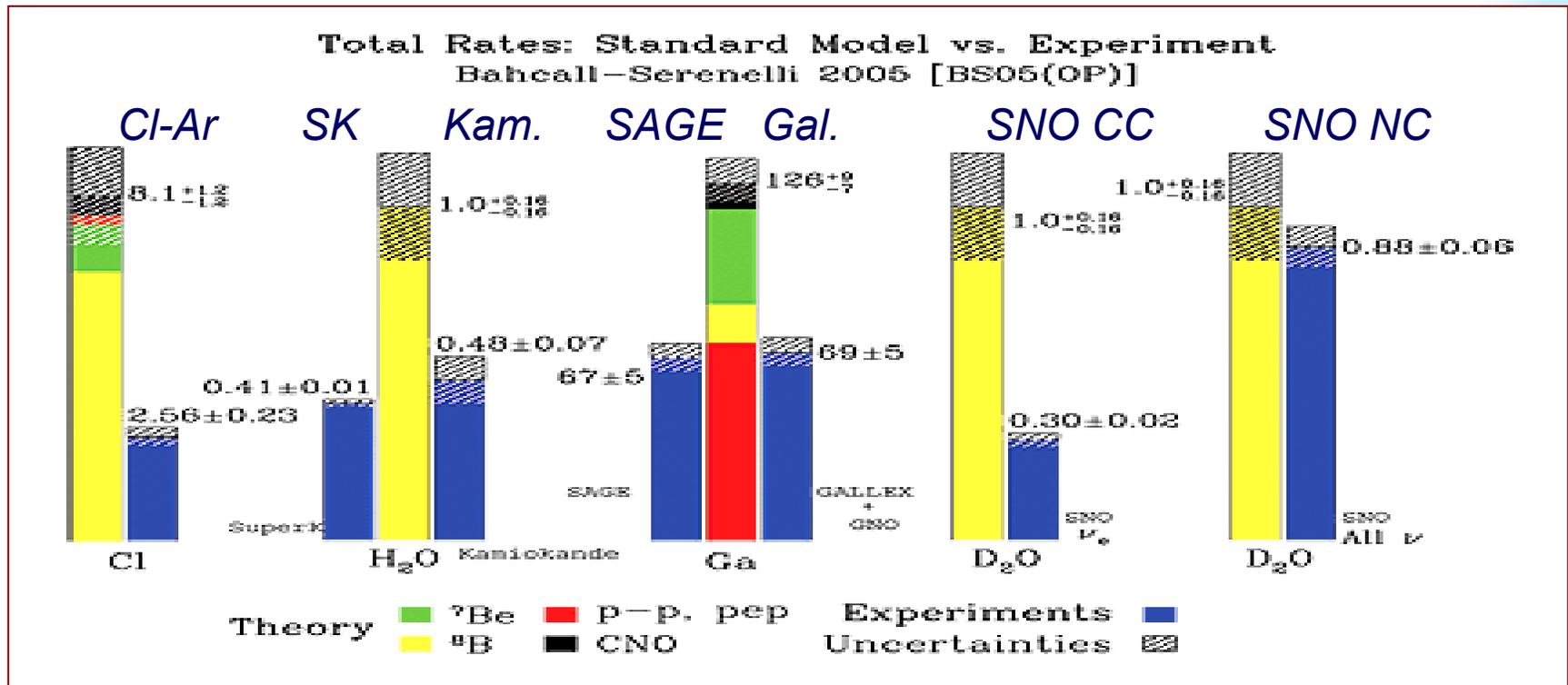
Пороги Борексино
50, 156, 270 кэВ



Ga-Ge и *Cl-Ar* детекторы с низким порогом регистрировали интегральный поток. Порог регистрации *SK*, *SNO* и *KamLand* более 5 (3.5) МэВ. До Борексино, *SK* и *SNO* *KamLand* регистрировали $\sim 10^{-4}$ потока солнечных ν .

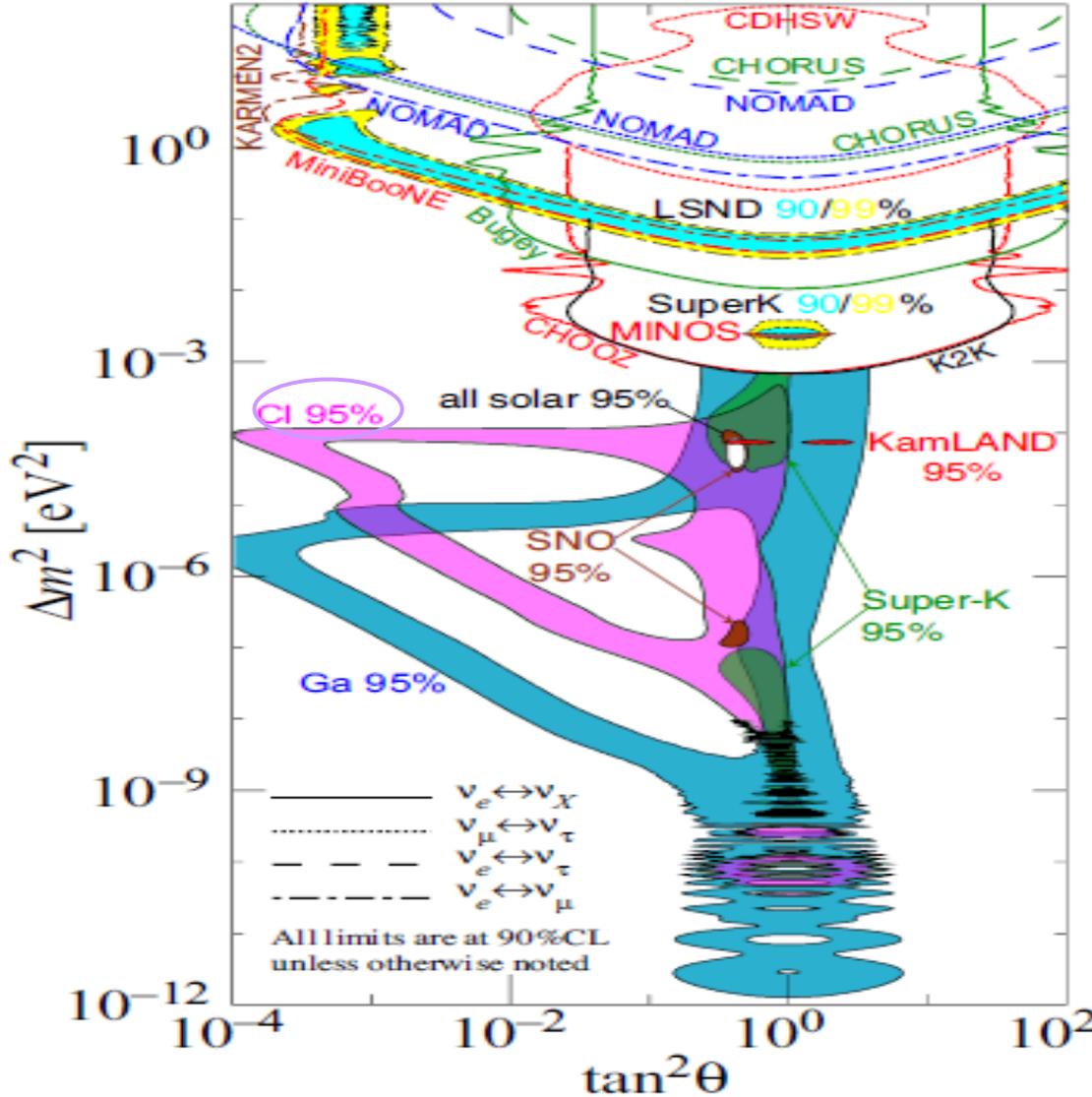
Проблема солнечных нейтрино

1. Поток нейтрино, измеренные Cl-Ar, Ga-Ge, SK лежат в интервале (0.3-0.6) от ожидаемых в ССМ и не согласуются между собой
2. Различные детекторы регистрируют разные части нейтринного спектра
3. Детекторы Cl-Ar и Ga-Ge регистрируют только электронные ν , SK и Kamiookande регистрирует нейтрино всех типов, однако $\sigma_{\nu_e} / \sigma_{\nu_\mu} = 7$.



Синий – эксперимент. Результат SNO для нейтрального тока совпал с предсказаниями ССМ. Доля ν_e составила 1/3 от общего потока нейтрино.

Осцилляционные решения для солнечных нейтрино



Эксперименты с
солнечными нейтрино
5 вариантов решений

SMA

VAQ

QVO

LOW

LMA

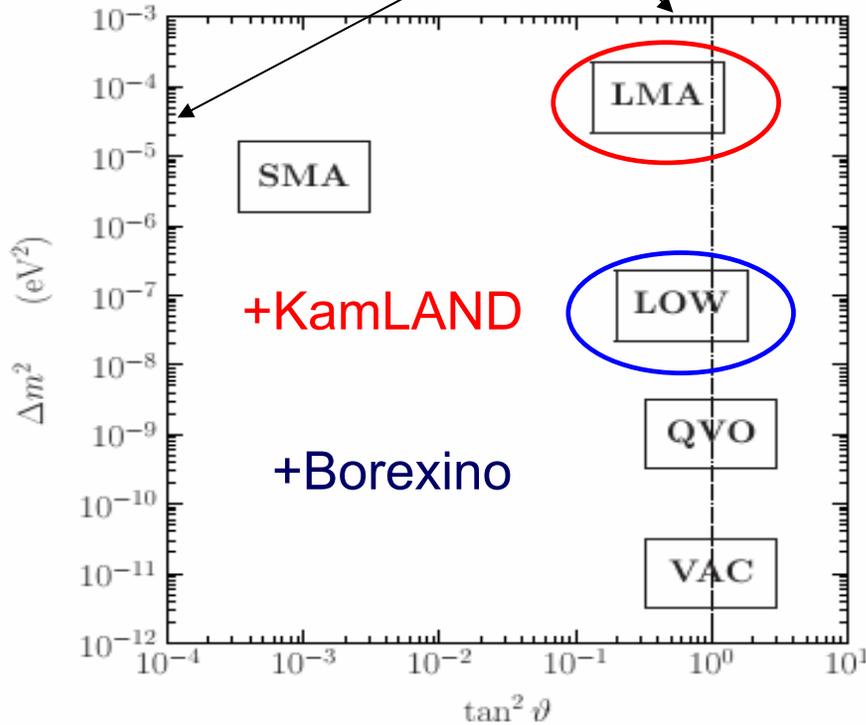
До результата KamLand модель спин-флэйворной прецессии, связанной с магнитными моментами нейтрино, имела лучшее согласие с экспериментальными данными, чем осцилляционное решение

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

Осцилляции в вакууме Понтекорво-Маки-Накагава-Саката

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47 \pm 0.04, \quad \theta_{12} = (34 \pm 1)^\circ,$$

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

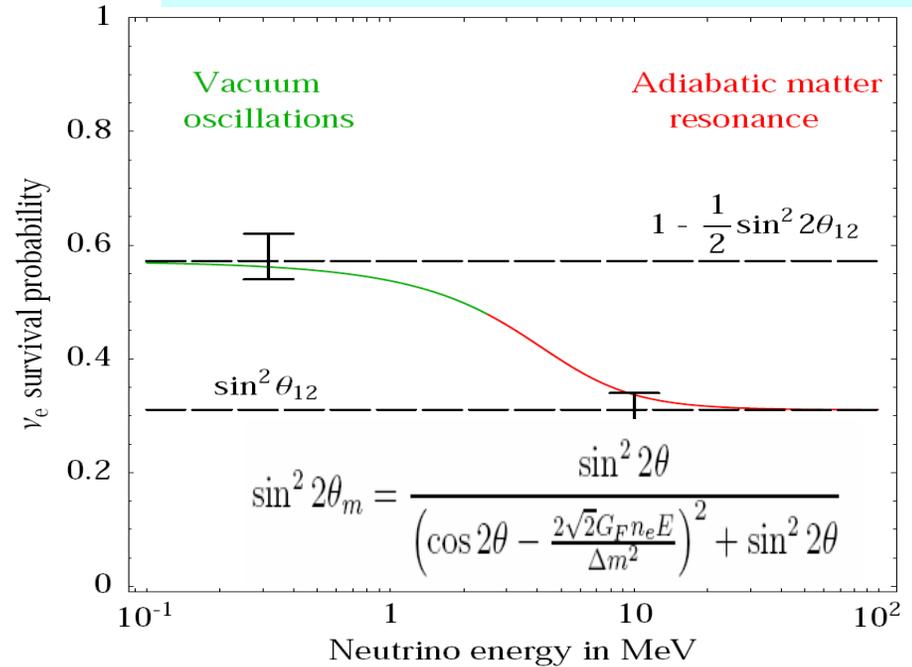


$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta_{12} + \nu_2 \sin \theta_{12}$$

Амплитуда = $\sin^2 2\theta_{12}$

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

В веществе Солнца Мухеев-Смирнов-Вольфенштейн



$P_{ee} \equiv P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \sim 56 \pm 6 \% \text{ (pp-}\nu\text{)}$.

$P_{ee} \sim 32 \pm 2 \% \text{ 8B-}\nu \text{ SNO)}$;

Поведение P_{ee} в области с различным влиянием вакуумных осцилляций и осцилляций в веществе чувствительно к NSI. Важен результат при $E_\nu = 0.86$ и 1.44 МэВ.



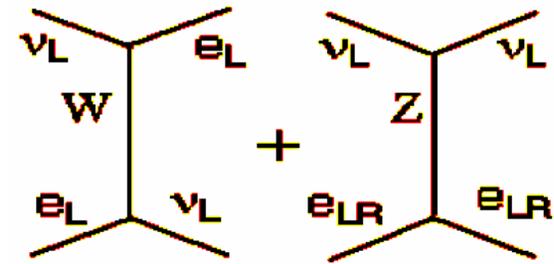
BOREXINO – сцинтилляционный детектор солнечных нейтрино

- Основная цель проекта – регистрация солнечных нейтрино с энергией менее 2 МэВ в реальном времени. Выбор осцилляционного решения – LMA, SMA или LOW
- Реакция – рассеяние нейтрино на электроны
- Детектор – жидкий сцинтиллятор
- Основная проблема – естественная радиоактивность. Необходимый уровень очистки сцинтиллятора от U, Th – 10^{-17} г/г
- Основная идея – максимально очистить легкие жидкости от естественной и искусственной р/а. Первый слой пассивной защиты от внешнего гамма- и нейтронного излучения – сцинтиллятор и вода. Максимальная степень очистки центрального сцинтиллятора.

Основная задача Борексино:

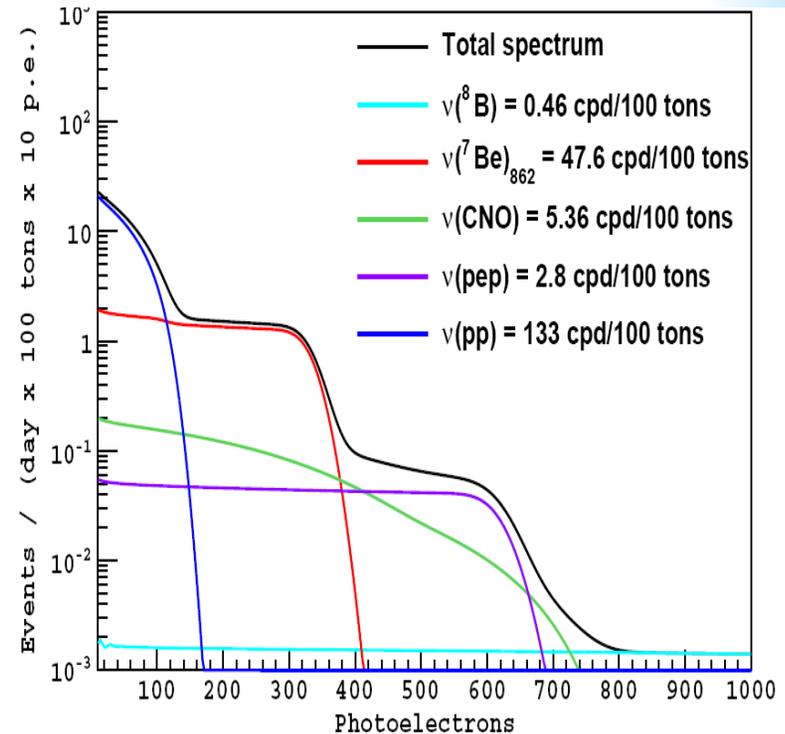
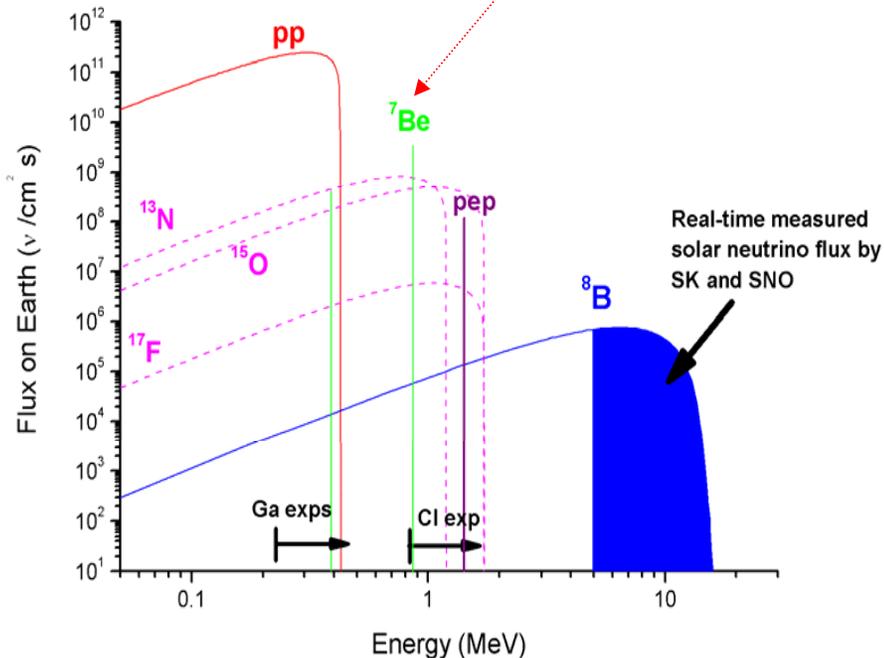
Регистрация упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроне.

Поток монохроматических ${}^7\text{Be}$ -нейтрино ($E=862$ кэВ) составляет 10% от общего потока солнечных нейтрино



Спектр электронов отдачи

99.994% of solar neutrino spectrum is NOT measured yet in real-time mode



Проверка и уточнение параметров осцилляционного LMA MSW решения

Сечение рассеяния нейтрино на электроны

$$\frac{d\sigma}{dE_e} = \frac{2G_F^2 m_e}{\pi} \left(g_L^2 + g_R^2 \left(1 - \frac{E_e}{E_\nu}\right)^2 - g_L g_R \frac{m_e E_e}{2E_\nu^2} \right)$$

Сечение реакции $\sim 10^{-45} \text{ см}^2$

$$G_F^2 m_e / 2\pi = 4.3 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^{-1}$$

Для электронных нейтрино – CC+NC:

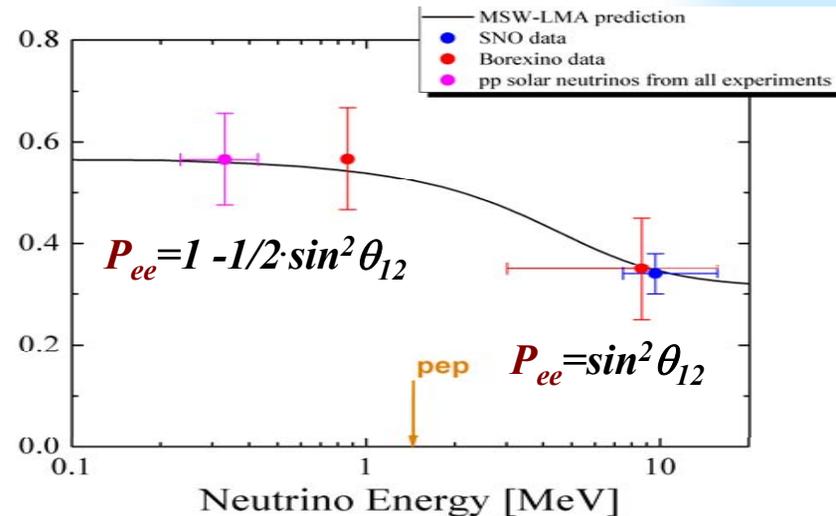
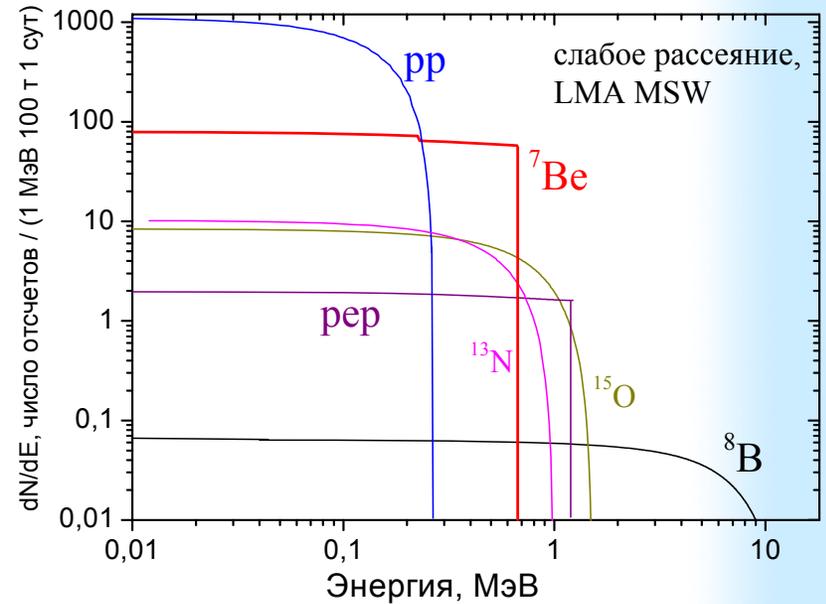
$$g_L = 1/2 + \sin^2 \theta_W, \quad g_R = \sin^2 \theta_W - \text{ для } \nu_e (W+Z)$$

Для μ - и τ -нейтрино σ в ~ 5 раз меньше:

$$g_L = -1/2 + \sin^2 \theta_W, \quad g_R = \sin^2 \theta_W - \text{ для } \nu_{\mu\tau} (Z)$$

детектор регистрирует ν_e, ν_μ и ν_τ :

$$\frac{d\sigma}{dE_e} = P_{ee} \cdot \left(\frac{d\sigma}{dE_e} \right)_{W+Z} + (1 - P_{ee}) \cdot \left(\frac{d\sigma}{dE_e} \right)_Z$$



Регистрация ν, e рассеяния в жидком сцинтилляторе

Ожидаемый эффект ~ 50 событий на 100 тонн в сутки в интервале 0 – 700 кэВ

Световыход PC+PPO 1.1×10^4 фотонов/МэВ

1) Хорошее энергетическое разрешение;

Регистрируем 500 ф.э./ МэВ

2) Низкий порог регистрации;

Триггер 25 ф.э. = 50 кэВ

3) Хорошая пространственная реконструкция.

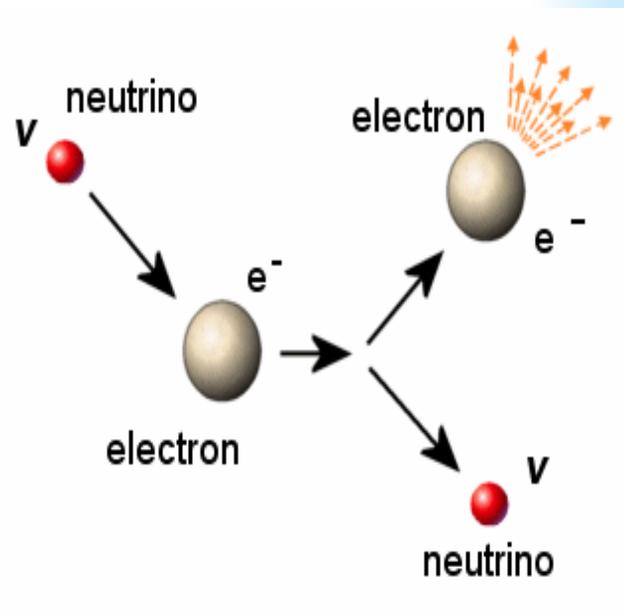
14 см при энергии 1 МэВ

4) Возможность α/β дискриминации

ОДНАКО...

-1) невозможно определить направление нейтрино;

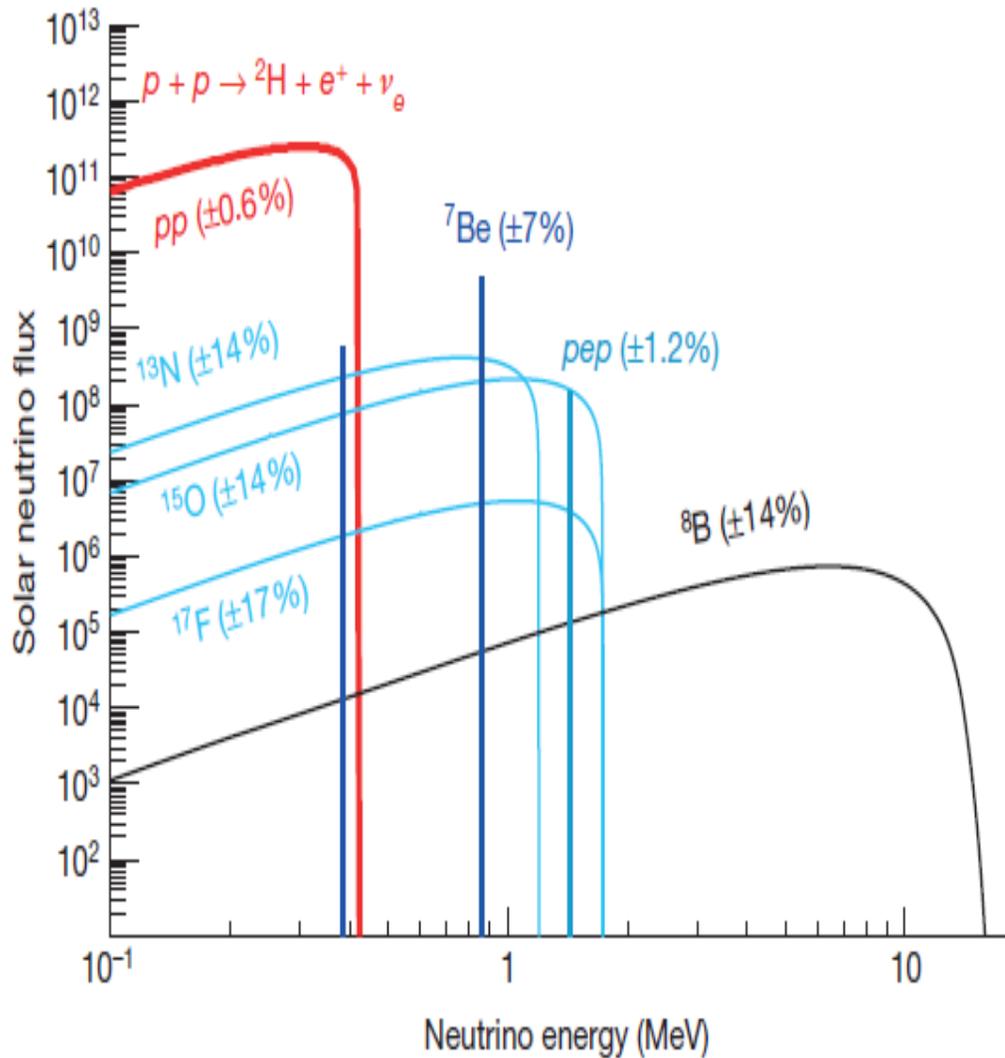
-2) событие (ν, e) -рассеяния является одиночным событием, не сопровождающимся другой частицей



Чтобы выделить данную реакцию необходимо понизить фон естественной радиоактивности в ~ 10^{10} раз

ВЫСОЧАЙШИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАДИАЦИОННОЙ ЧИСТОТЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА И МАТЕРИАЛОВ ДЕТЕКТОРА

Нейтрино из pp-цепочки



${}^7\text{Be}$ - нейтрино

${}^8\text{B}$ - нейтрино

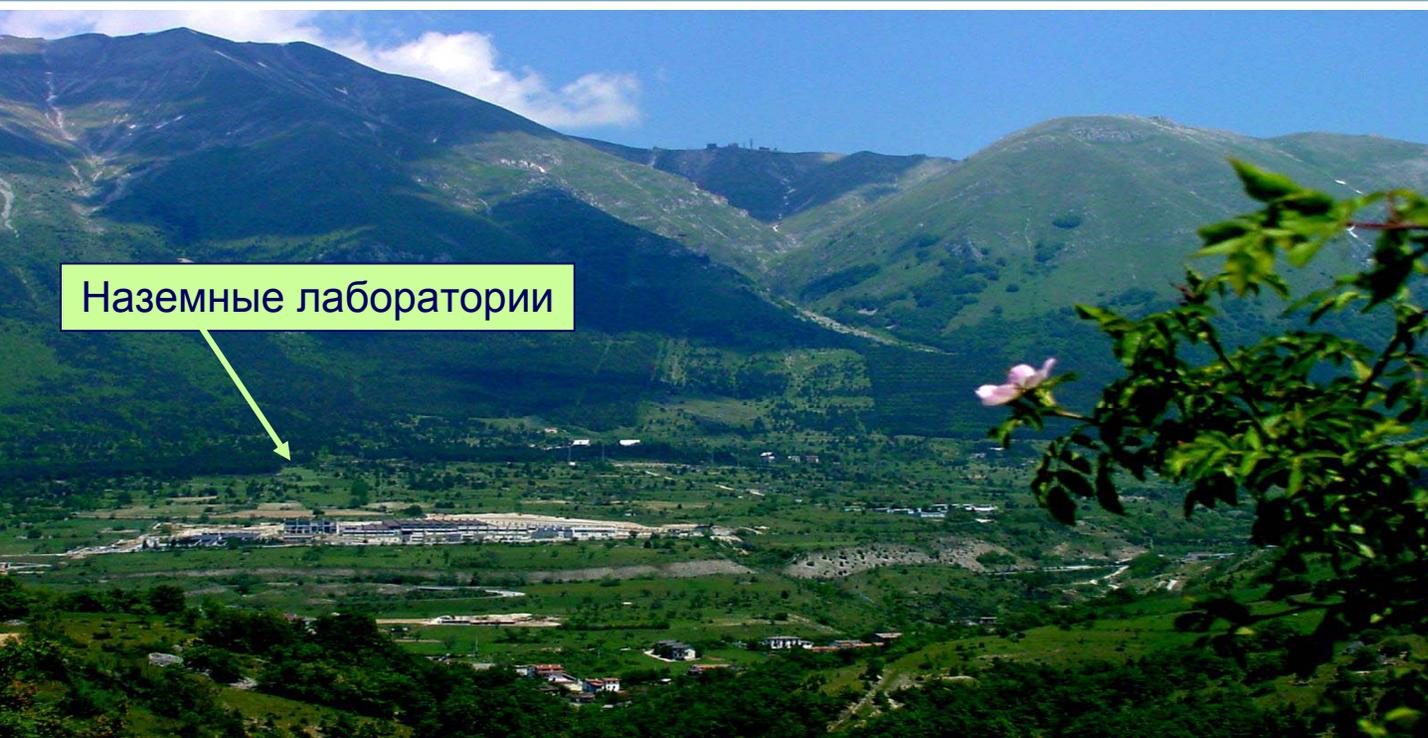
pep - нейтрино

pp - нейтрино

CNO - нейтрино

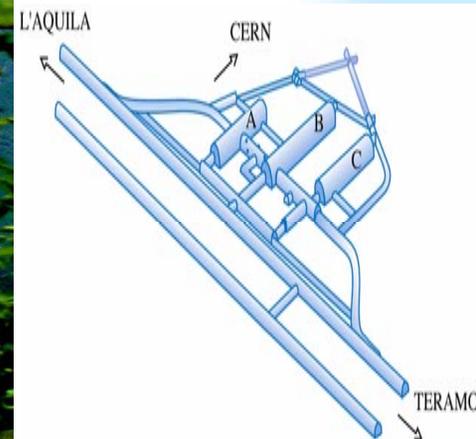
Borexino зарегистрировало ν из 4-х реакций pp-цепочки (her). Остался CNO-цикл

Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории

Италия,
120 км от Рима
3500 м.в.э.

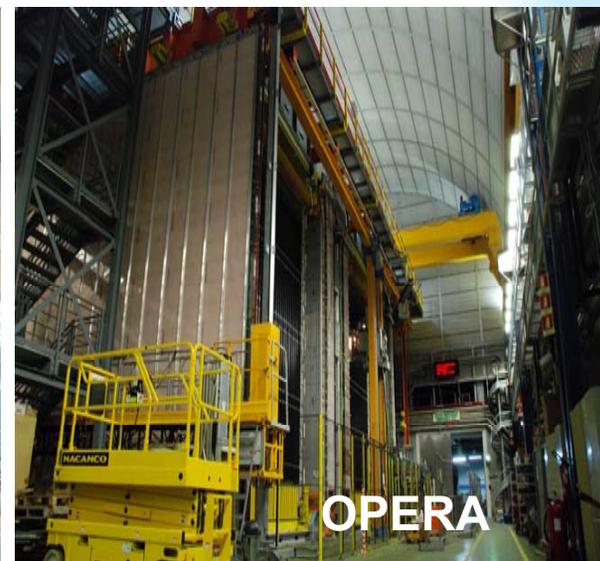
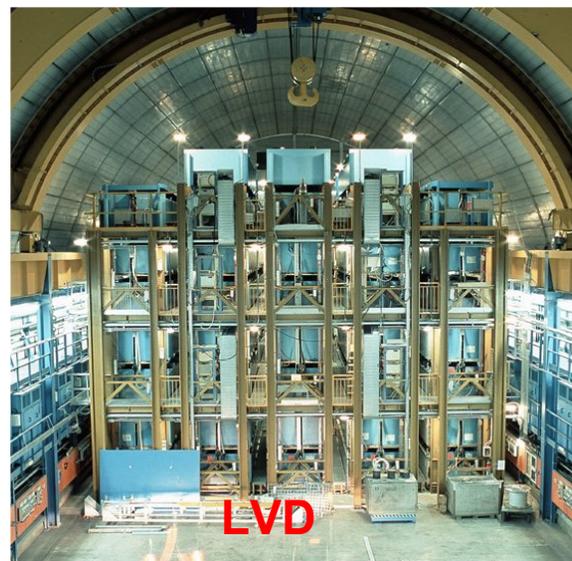
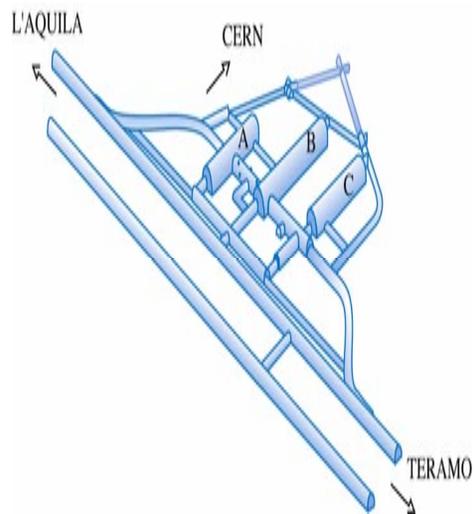
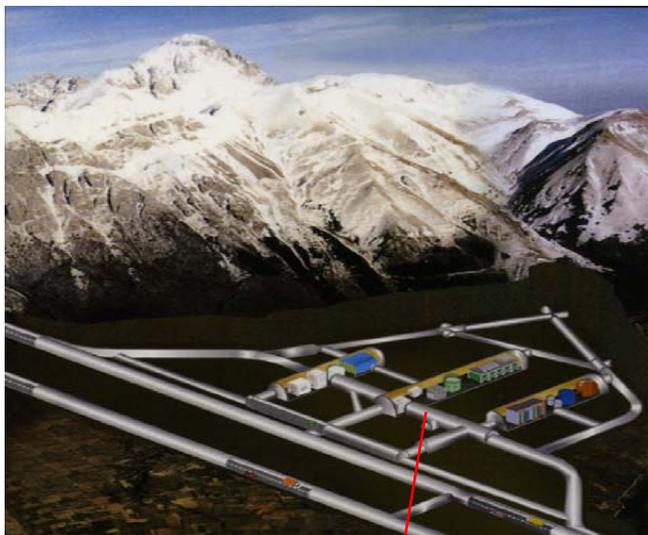


Борексидно и завод по очистке





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
Founded 1927
Houston



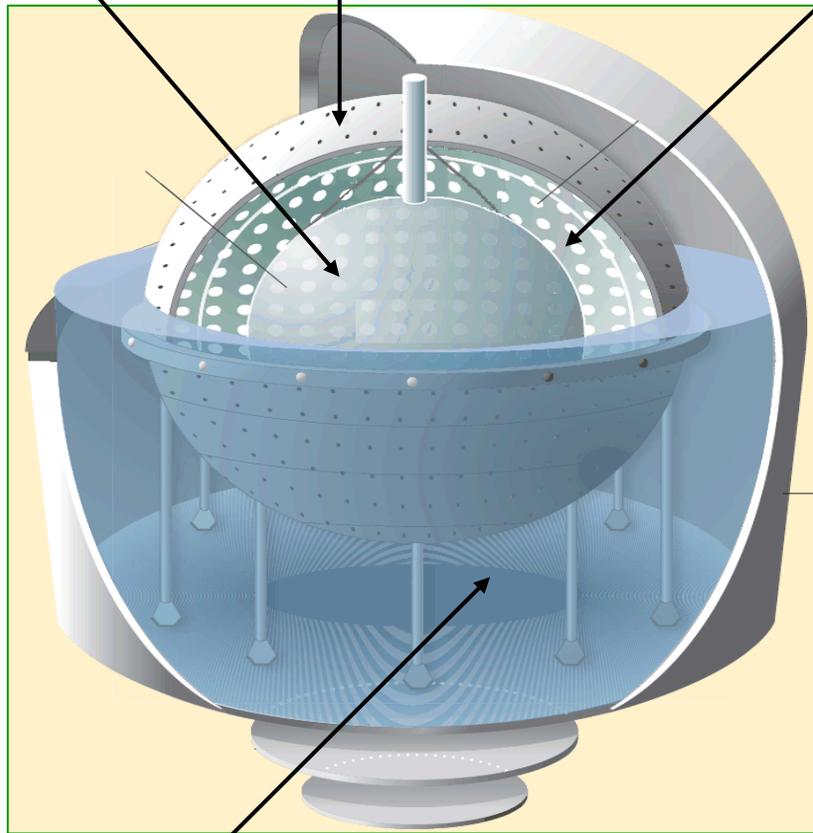
Moscow State

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

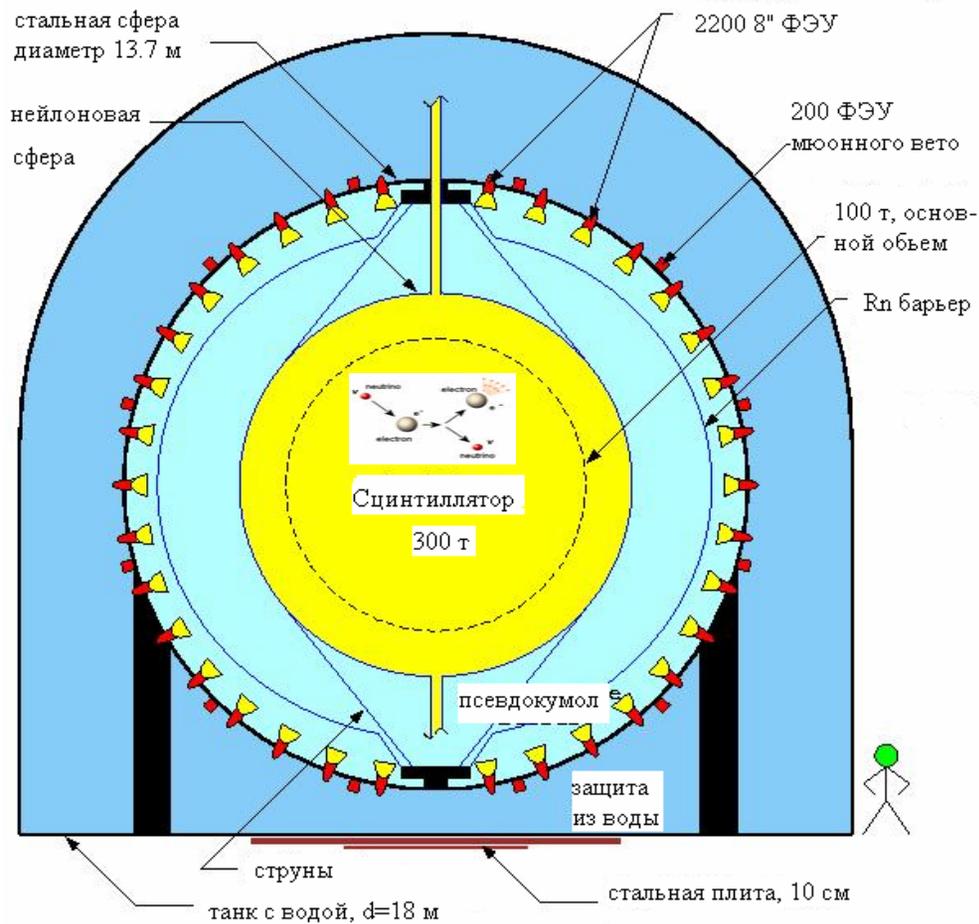
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

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

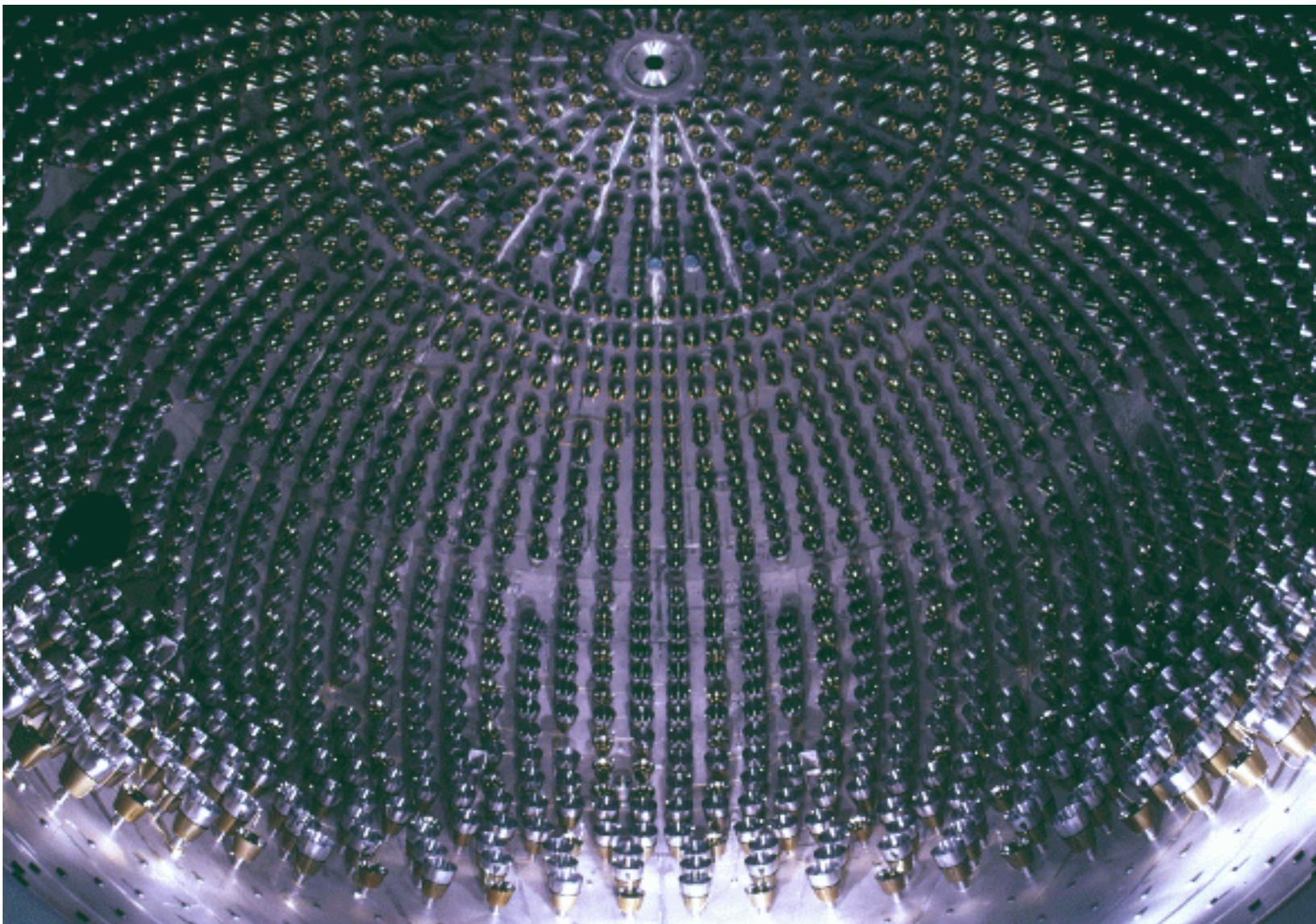
Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



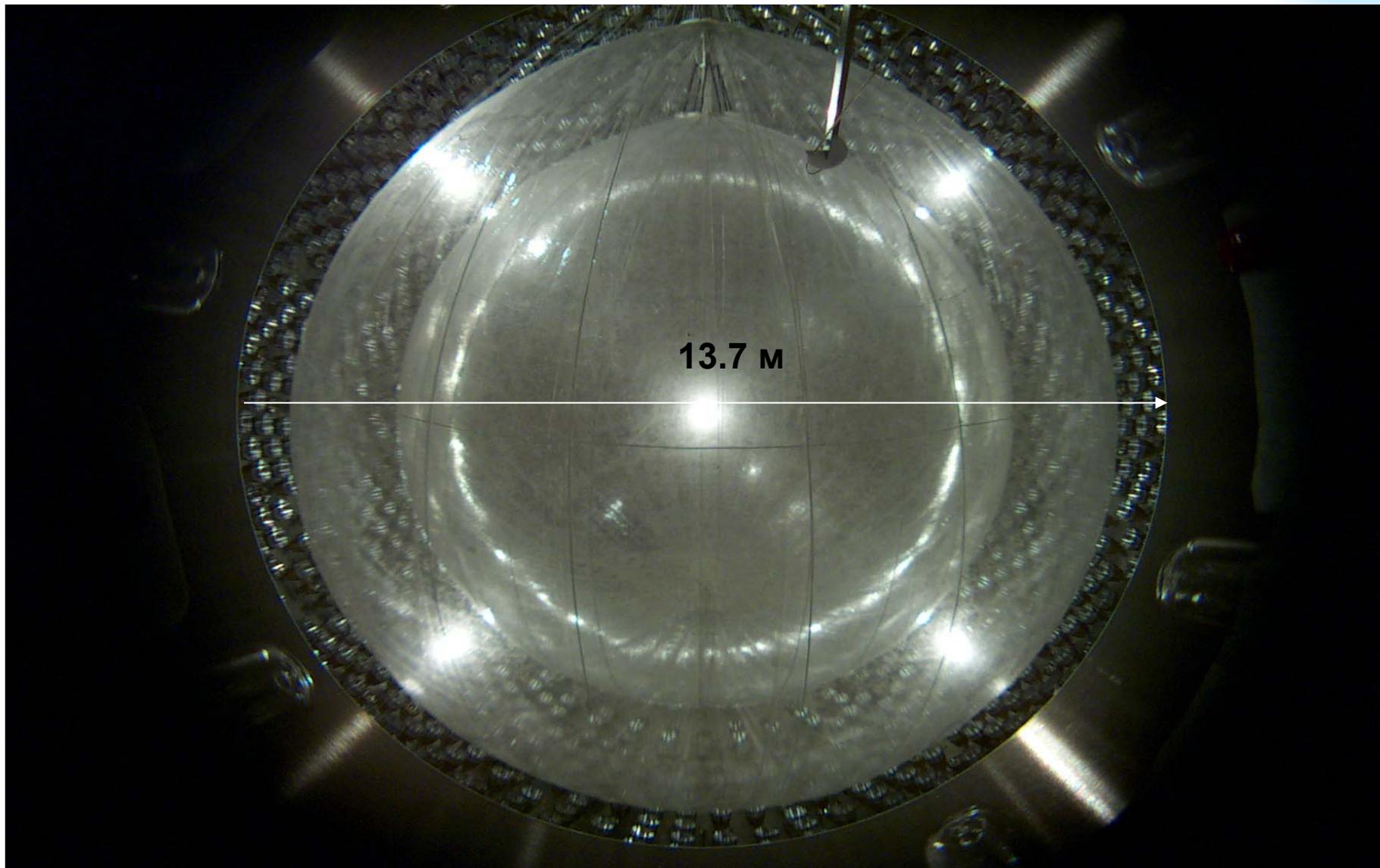
2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



2212 ФЭУ на поверхности стальной сферы

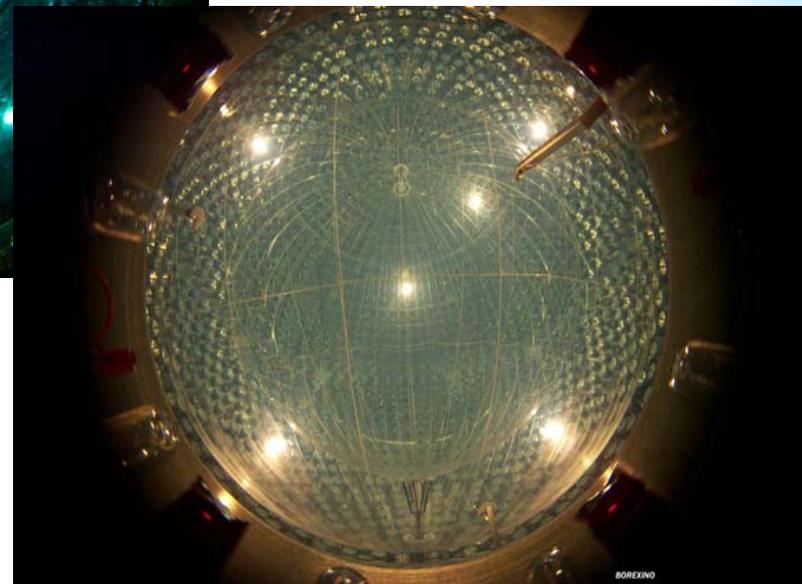
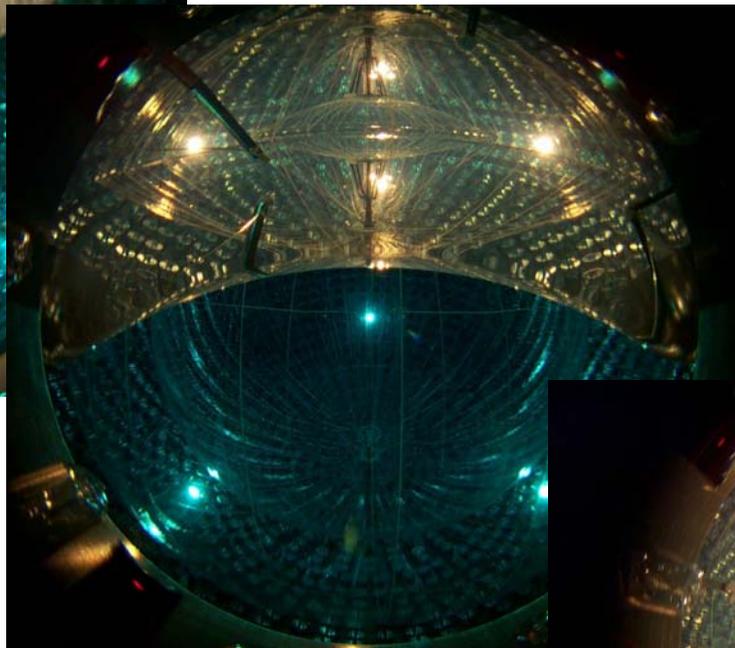
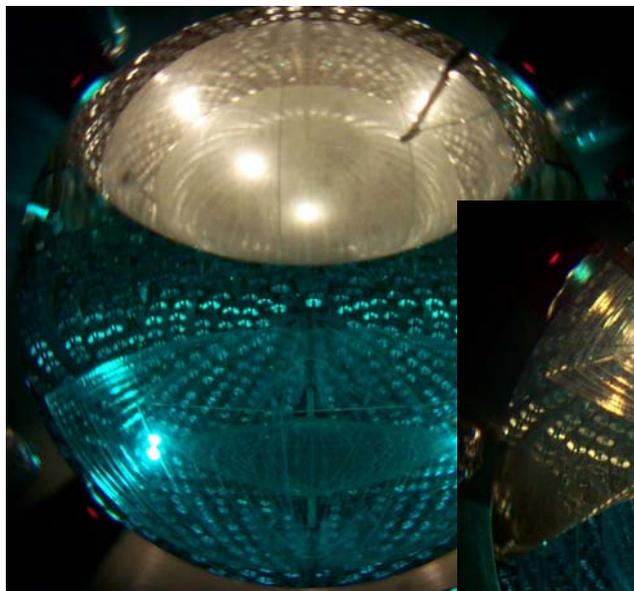


Стальная и нейлоновые сферы

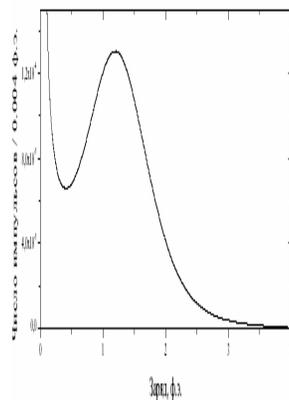
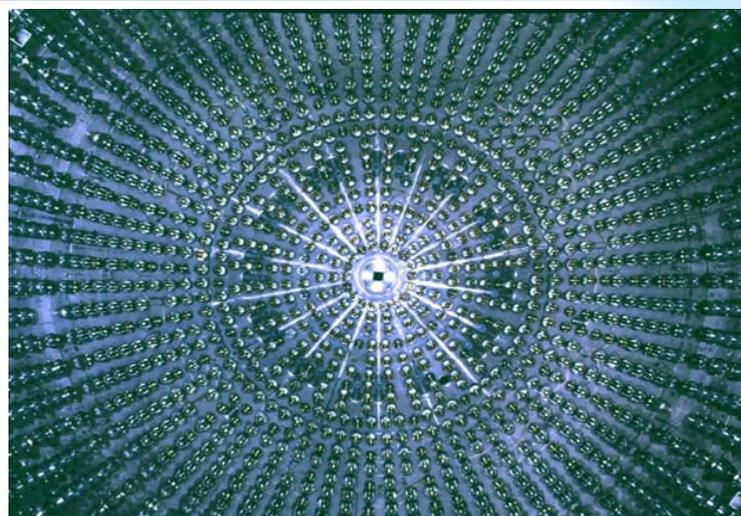
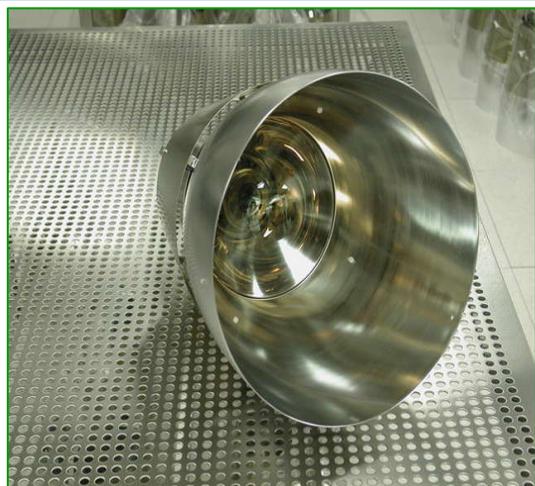




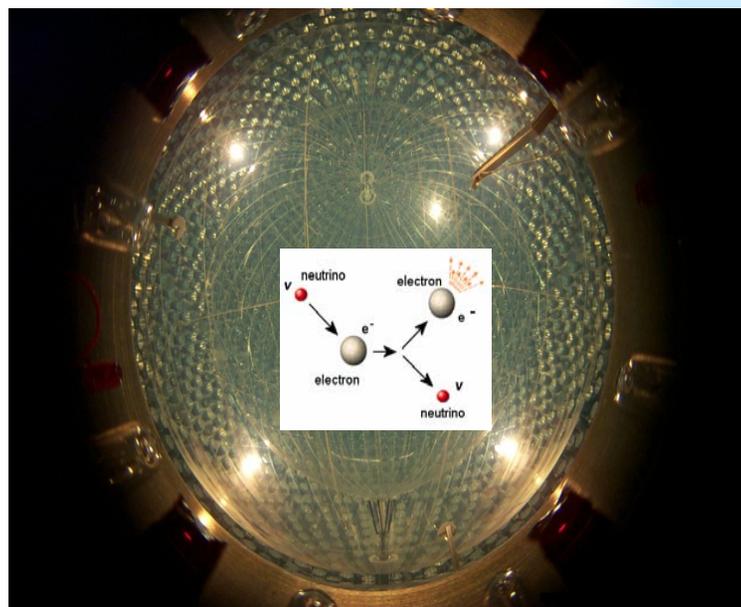
Вытеснение воды сцинтиллятором



ФЭУ, стальная и нейлоновая сферы



8" ETL 9351



Вид на OPERA, на и внутри сферы, центр управления





Рекордная чистота жидкого сцинтиллятора

Компонент	Типичная распространенность (источник)	CTF	Borexino Фаза 2
$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ [г/г]	10^{-12} (космогенный)	$2 \cdot 10^{-18}$	2.7×10^{-18}
^{238}U [г/г] (по ^{214}Bi)	$2 \cdot 10^{-5}$ (пыль)	$< 4.8 \cdot 10^{-16}$	1.6×10^{-17} $< 9.7 \times 10^{-19}$
^{232}Th [г/г] (по ^{212}Bi)	$2 \cdot 10^{-5}$ (пыль)	$< 8.4 \cdot 10^{-16}$	6.8×10^{-18} 1.2×10^{-18}
^{222}Rn (^{238}U [г/г] по ^{214}Bi)	100 атомов/см ³ (воздух)	$(3.5 \pm 1.3) \cdot 10^{-16}$	$\sim 10^{-16}$
^{40}K [г/г]	$2 \cdot 10^{-6}$ (пыль)	$\leq 10^{-15}$	$< 10^{-14}$
^{210}Pb [μБк / т]	(поверхностное з.)	500	~ 1
^{85}Kr [μБк / т]	1 Бк/м ³ (воздух)	600	0.29/(т сут)
^{39}Ar [μБк / т]	17 мБк/м ³ (воздух)	<800	~ 1

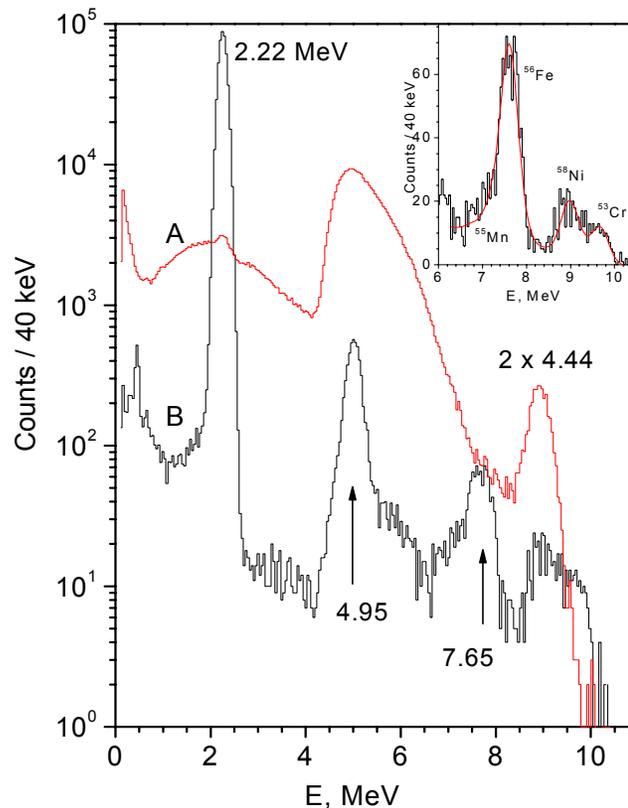
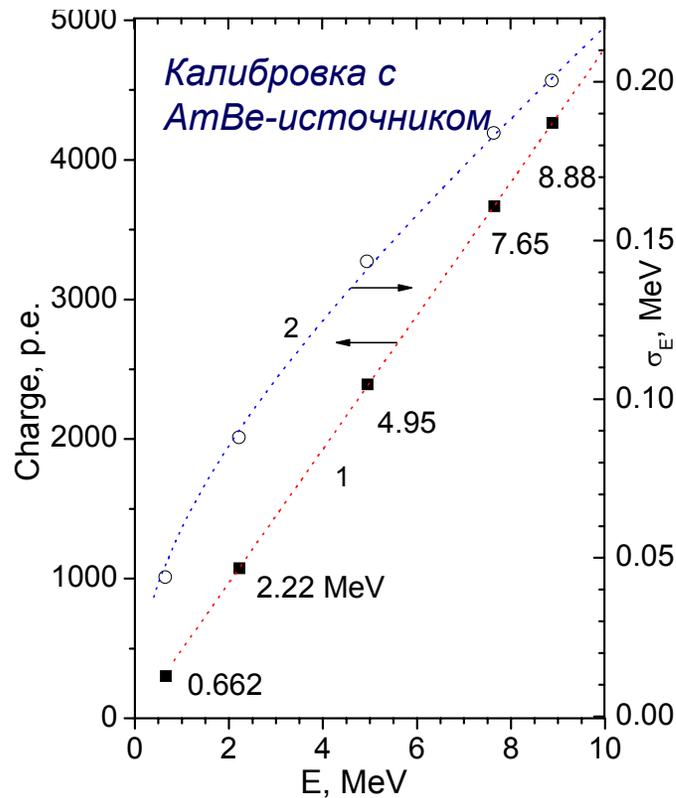
Нижний порог регистрации определяется активностью ^{14}C , которая на 6 порядков меньше чем на поверхности. U и Th в 10^{12} раз меньше, чем в о.с. Сигнал от ^7Be -нейтрино 5×10^{-9} Бк/кг. Активность ^{238}U , ^{232}Th в воде 10 Бк/кг

Что умеет Борексино:

1. Определение энергии события
2. Восстановление координат (x, y, z) события
3. Альфа-бета дискриминация (отличить сигнал, вызванный альфа-частицей, от сигнала, вызванного электроном)



Определение энергии события



1. Энергия определяется как число сработавших ФЭУ (или как $\Sigma\phi_{э.}$ или $\Sigma\Delta\text{ЦП}_i$). Калибровка была выполнена по спектрам ^{14}C , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{11}C и $^{241}\text{Am}^9\text{Be}$.
2. Учитывается зависимость числа фотонов от dE/dX (ионизационный дефицит)

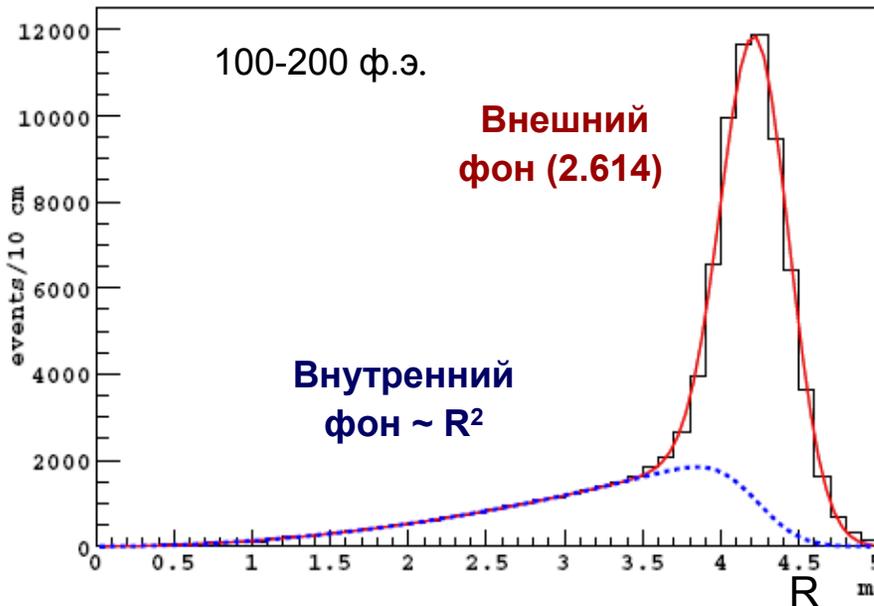
Регистрируется $11000 \times \epsilon_{\text{геом}} \times \epsilon_{\text{ф.к.}} = 500$ ф.э. для события с энергией 1 МэВ. Энергетическое разрешение $5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$. Триггер устанавливается при срабатывании К ФЭУ во временном окне 60 нс. Значение $K = 25$ соответствует порогу 50 keV, скорость счета 11 Hz определяется активностью ^{14}C .



Восстановление координат (x, y, z) события

Необходимо, поскольку фон в полном объеме недостаточно подавлен из-за γ -квантов, выходящих из сферы и ФЭУ. Только условие $R < 3.2$ м, которое вырезает внутренние 100 т, обеспечивает приемлемое соотношение эффект/фон. Программы реконструкции используют время прихода фотонов, которое регистрируется TDC. Точность восстановления $\sim 1/\sqrt{E}$ и зависит от скорости излучения фотонов

Основная задача пространственной реконструкции – создание “активной защиты” внутреннего объема сцинтиллятора его внешним слоем от внешнего γ -фона от конструкционных материалов (IV, стальная сфера, ФЭУ)

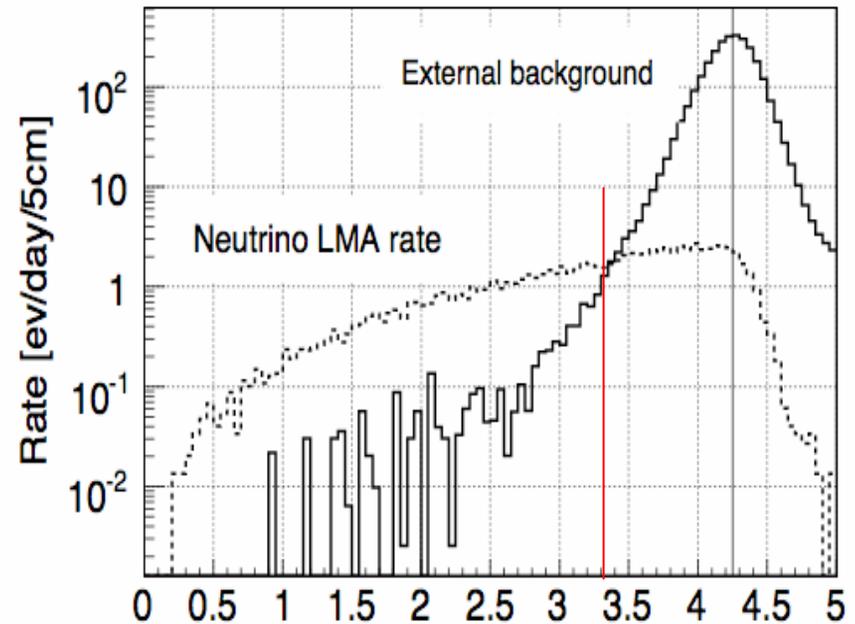
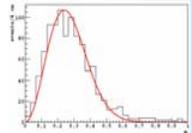


Пространственное разрешение:

1 МэВ – $\sigma = 14$ см

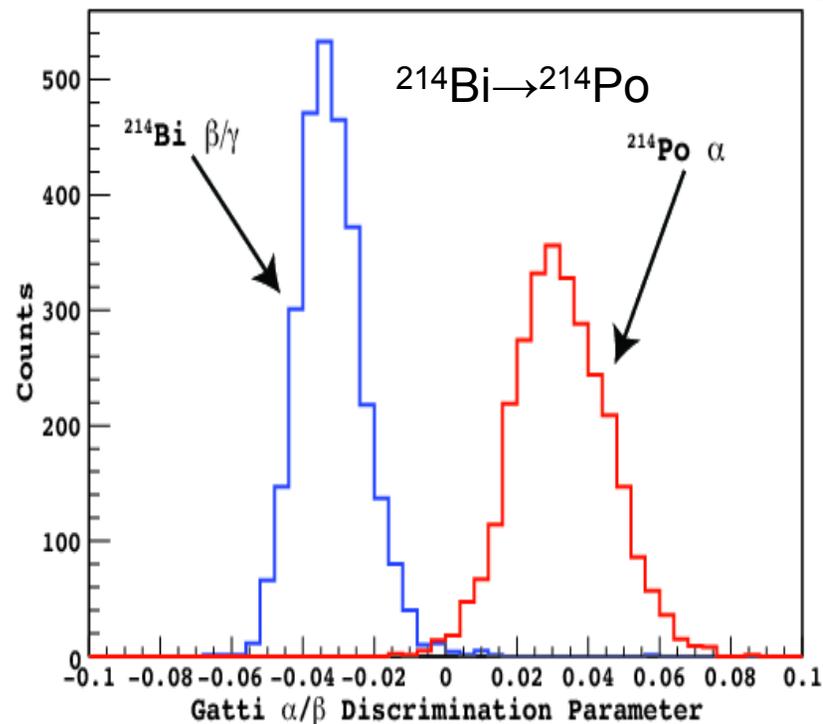
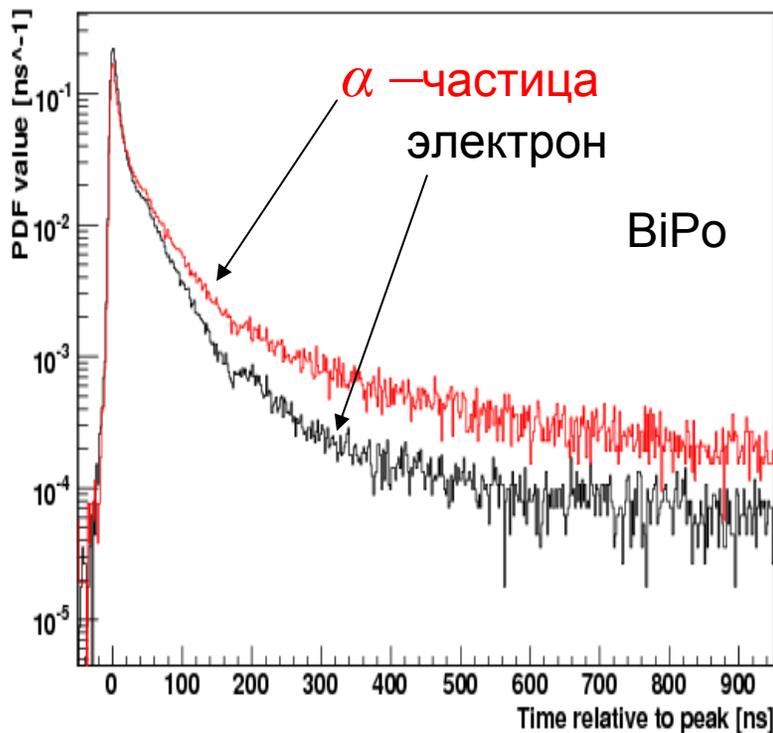
$^{214}\text{BiPo}$ (~ 800 кэВ) **16 см**

^{14}C (~ 100 кэВ) **41 см**



α/β - дискриминация

Световыход для α -частиц в ~ 10 раз меньше, чем для электронов той же энергии.
 α -частицы естественной p/a регистрируются как события с $E < 1$ МэВ. Для отделения используется зависимость скорости высвечивание фотонов от плотности ионизации.

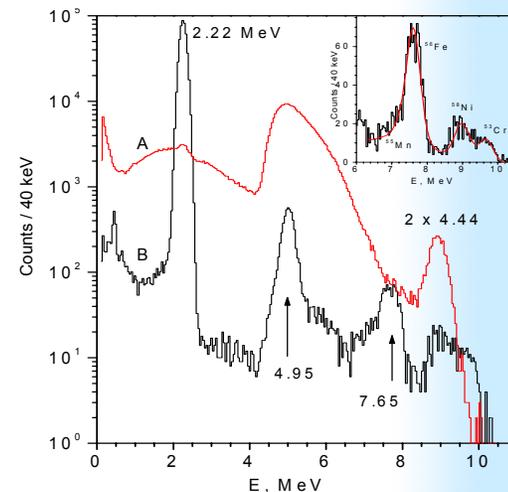
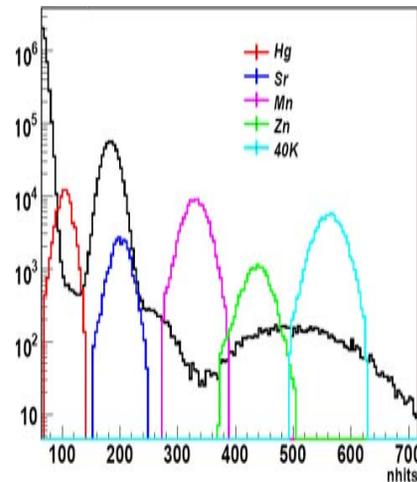
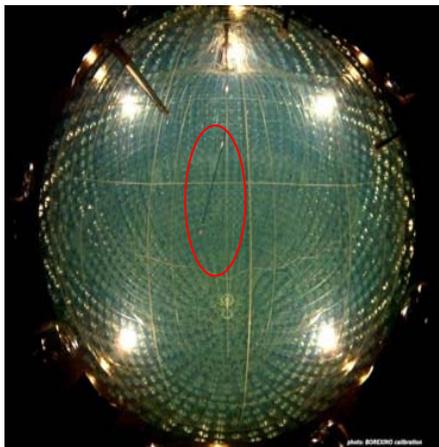
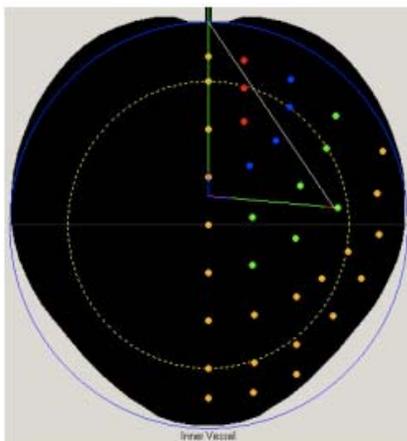


Фильтр Гатти $G = \sum_i P_i f_i$, $P_i = \frac{\overline{\alpha_i} - \overline{\beta_i}}{\overline{\alpha_i} + \overline{\beta_i}}$

Измерения с нейтронным AmBe источником позволили настроить $p(n)/\beta$ дискриминацию

Измерения с калибровочными источниками

Калибровка с источниками ^{14}C , ^{222}Rn , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{85}Sr , ^{222}Rn , AmBe

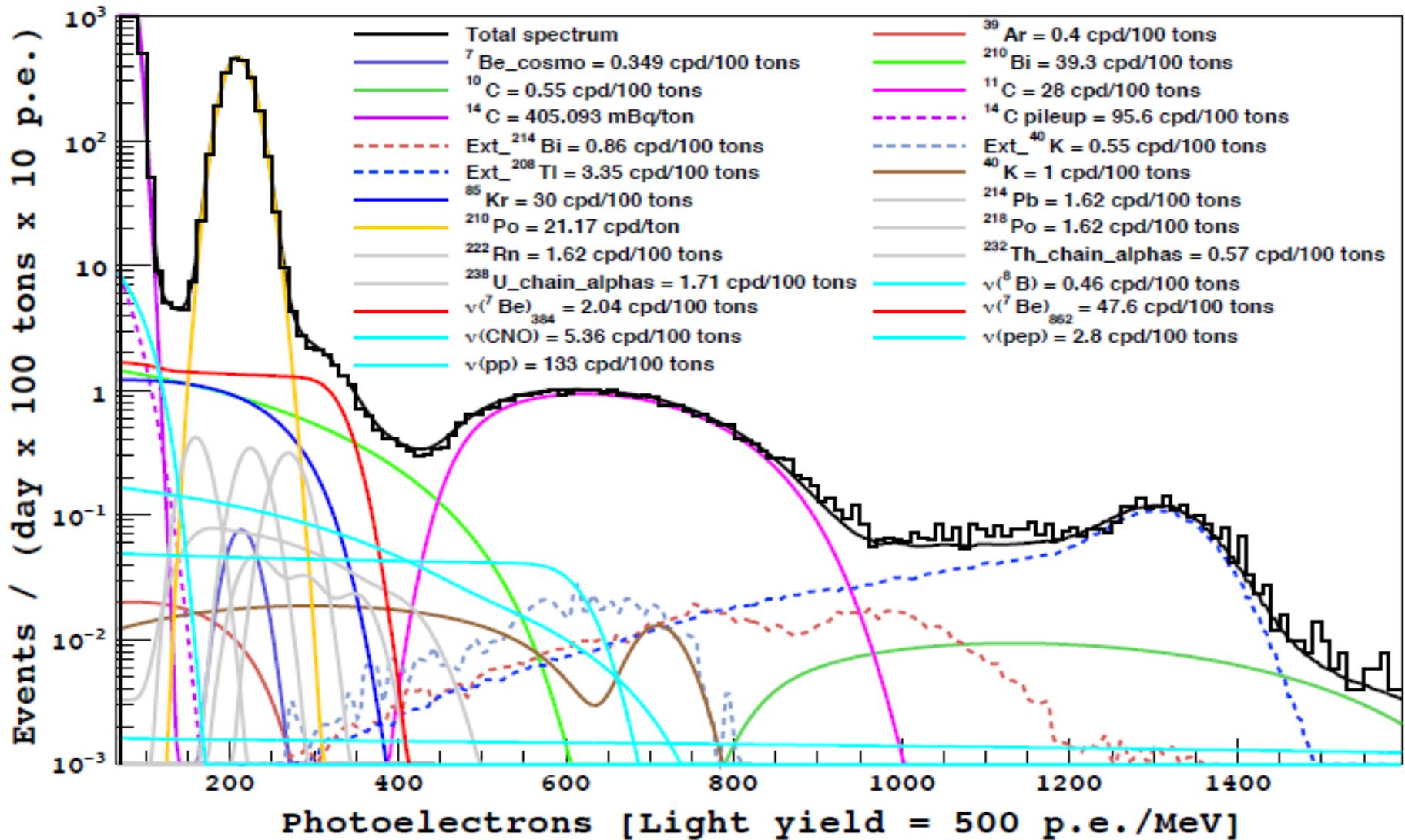


Положение определено с точностью 2 см
 Прецизионная энергетическая калибровка
 Функция отклика в зависимости от
 положения для **250 точек** внутри сферы.
 35 суток. Настройка t-отклика ФЭУ по
 лазеру

β : 100 Bq $^{14}\text{C}+^{222}\text{Rn}$ растворенные в PC:
 γ : 7 источников от 122 кэВ to 9.5 МэВ
 α : ^{222}Rn ,
 n : AmBe

Объем (масса) центрального детектора определялся исходя из измерений с калибровочными источниками. Суммарная (масса, E шкала, время, эффективности,..) систематическая ошибка составляет 3.5%. Ответная функция задается α -пиком ^{210}Po .

Основные компоненты спектра Борексино



$^{14}\text{C} \beta$, $^{210}\text{Po} \alpha$, $^7\text{Be} \nu$, $^{85}\text{Kr} \beta$, $^{210}\text{Bi} \beta$, $^{11}\text{C} \beta+$, $^{208}\text{Tl} \gamma$, $^{10}\text{C} \beta+$,

Регистрация антинейтрино

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

Для регистрации используется реакция обратного бета-распада



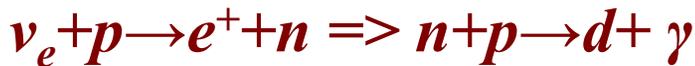
Два последовательных события в интервале 1 мс с энергиями $E=0.768 \text{ МэВ}$ и 2.2 МэВ являются четким указателем реакции.

Порог реакции составляет 1.8 МэВ

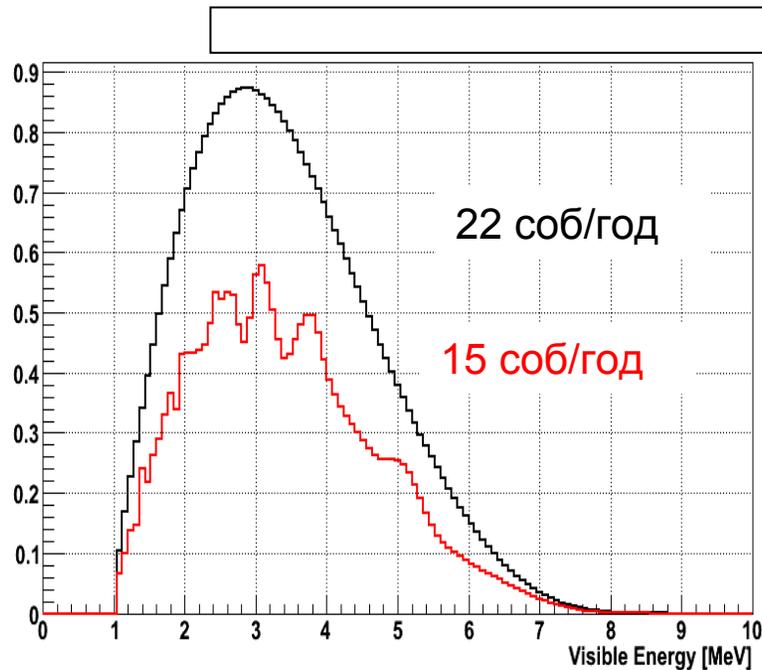


Реакторные нейтрино

Обратный бета-распад:



$$E_{\text{per}} = E_\nu - 0.78 \text{ MeV}, \sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$$



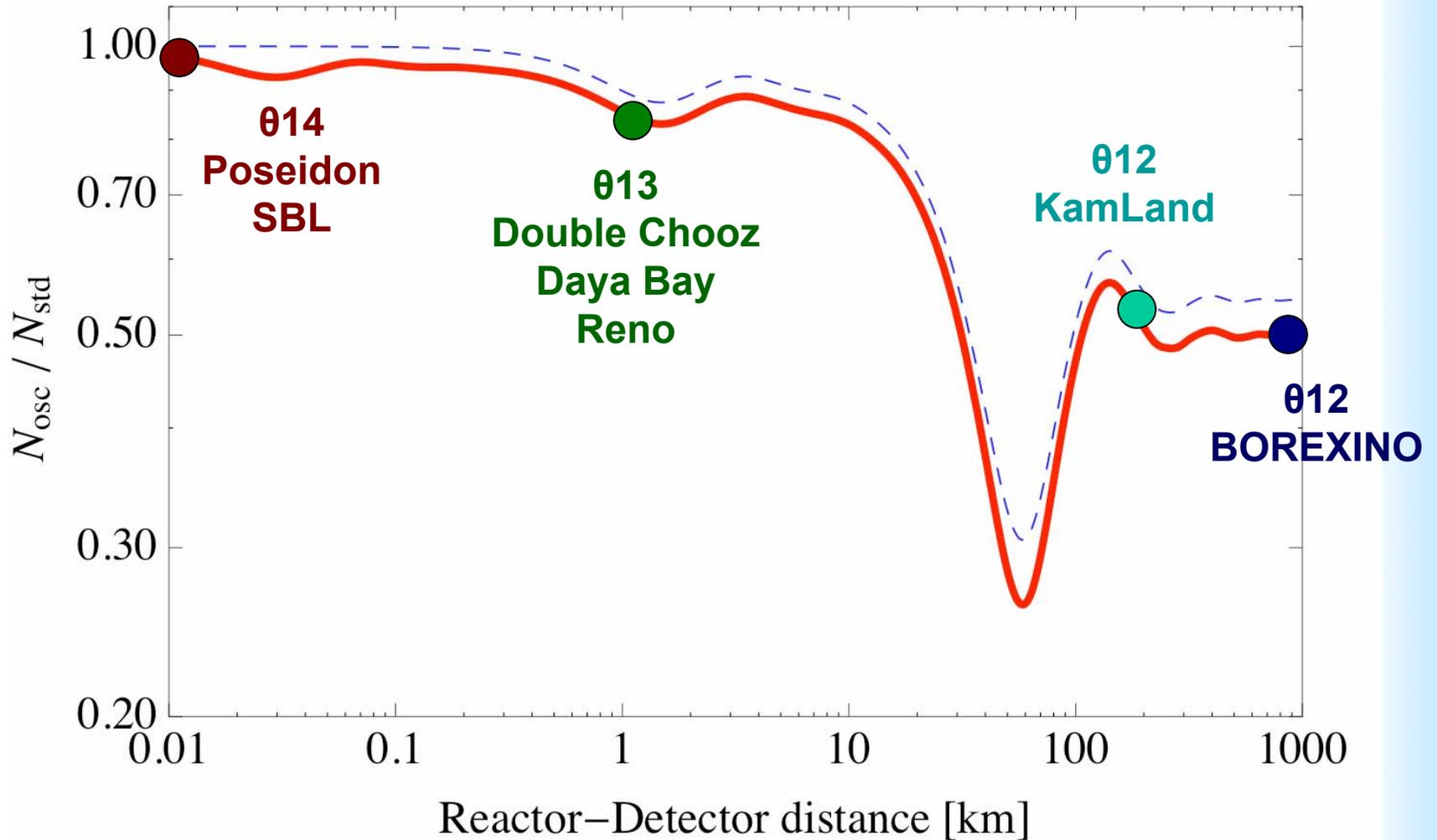
Ожидаемая скорость счета составляет 15 событий в год при 100% мощности всех реакторов. Борексино удачно расположен для поиска гео-нейтрино.



207 ядерных реакторов в 17 странах. 245 остальных в мире дают 2.5%. 13 реакторов дают 40% вклад в ожидаемый сигнал. 3 наиболее мощных атомных станции дают 13%

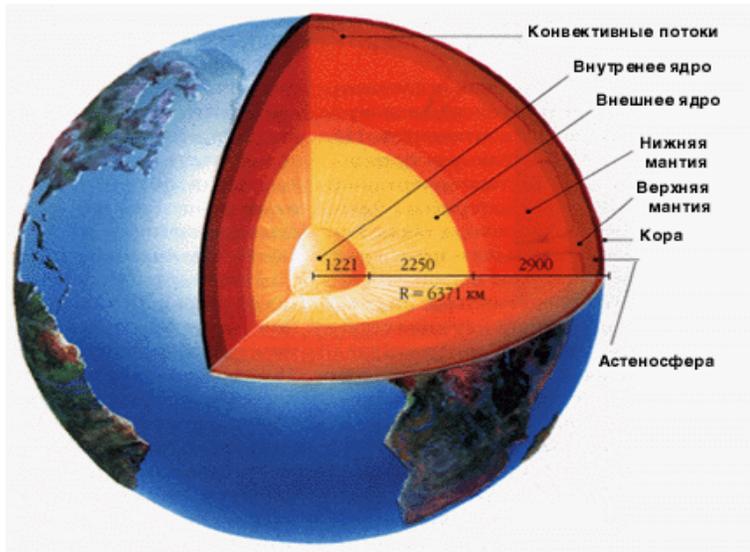
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ фон от пренебрежимо мал. Космогенный фон связанный с β -n с изотопами ($^8\text{He} + ^9\text{Li}$) и быстрыми нейтронами, пропущенными мюонной защитой подавляются 2 сек запретом после прохождения мюона через IV. Мертвое время 11%

Осцилляции реакторных нейтрино

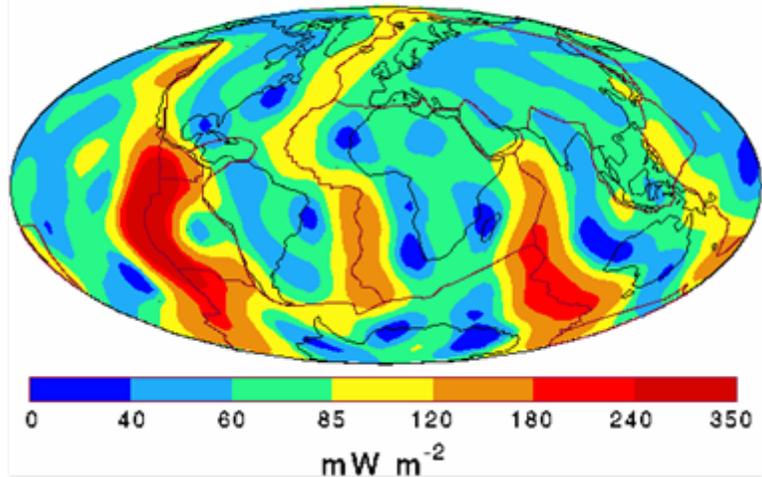


Гео-нейтрино –

новая возможность узнать как устроена Земля



Heat Flow



Тепловой поток (30 – 46) ТВт

Природа неясна

Гравитация, яд реактор, фазовые переходы, химические реакции

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

Стандартная BSE модель предсказывает 19 ТВт

Какая доля мощности $\Phi \approx 60$ mW/m²

связана с естественной р/а?
44±1 TW (Pollack 93)

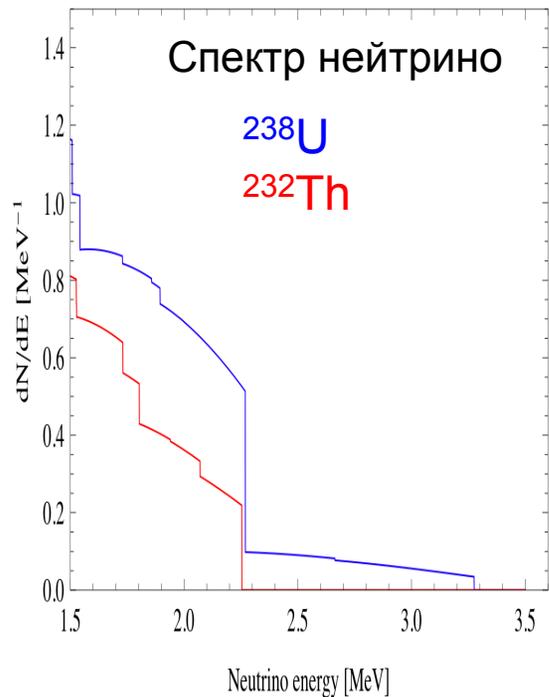
31 ±1 TW (Hofmeister & Criss 04)

Содержание в метеоритах –
19-31 TW

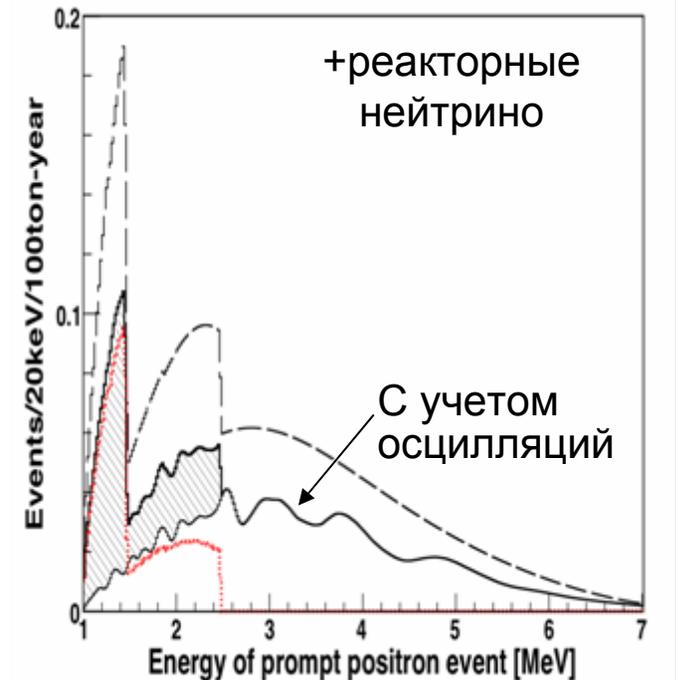
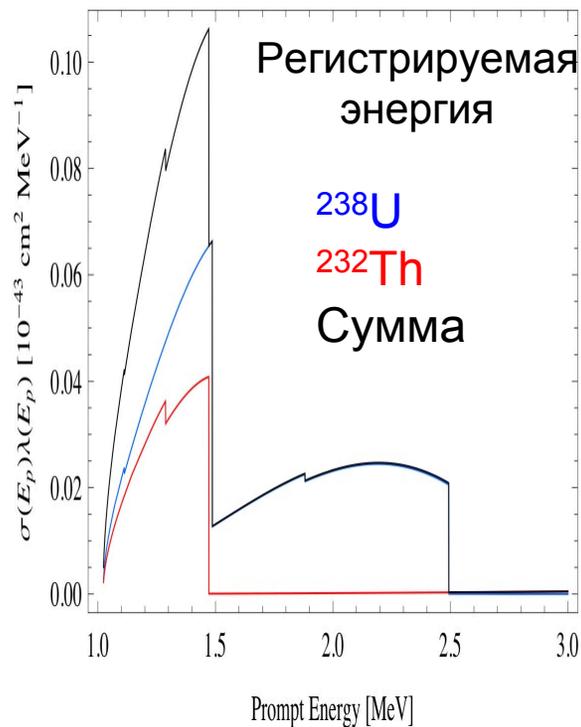
$$H_R [\text{TW}] = 9.5 M(\text{U}) [10^{17} \text{кг}] + 2.7 M(\text{Th}) + 3.6 M(^{40}\text{K})$$
$$L_n [10^{24} \text{с}^{-1}] = 7.4 M(\text{U}) [10^{17} \text{кг}] + 1.6 M(\text{Th}) + 27 M(^{40}\text{K})$$

Ожидаемый спектр позитронов

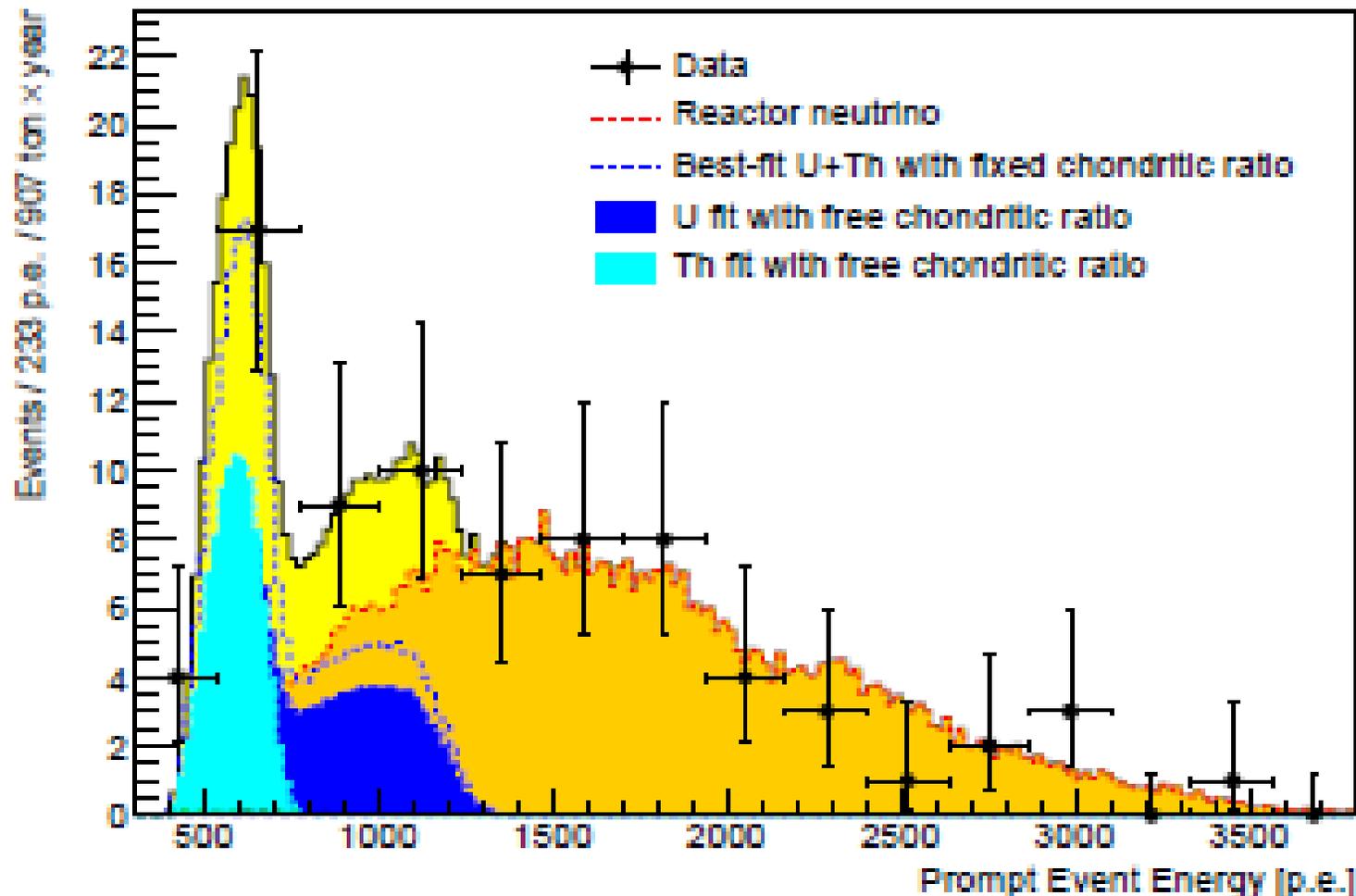
Decay	E_{\max} [MeV]	Q [MeV]	Q - $\langle E_{\nu} \rangle$ [MeV]	$\text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$	W kg^{-1}
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e^{-} + 6\nu_e$	3.25	51.7	47.7	7.41×10^7	0.94×10^{-4}
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e^{-} + 4\nu_e$	2.25	42.7	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 2015 г. = 2056 суток измерений



77 анти-нейтринных событий за экспозицию 907 ± 44 т×год. **24** гео-нейтрино и **53** реакторных нейтрино. Практически нулевой фон.

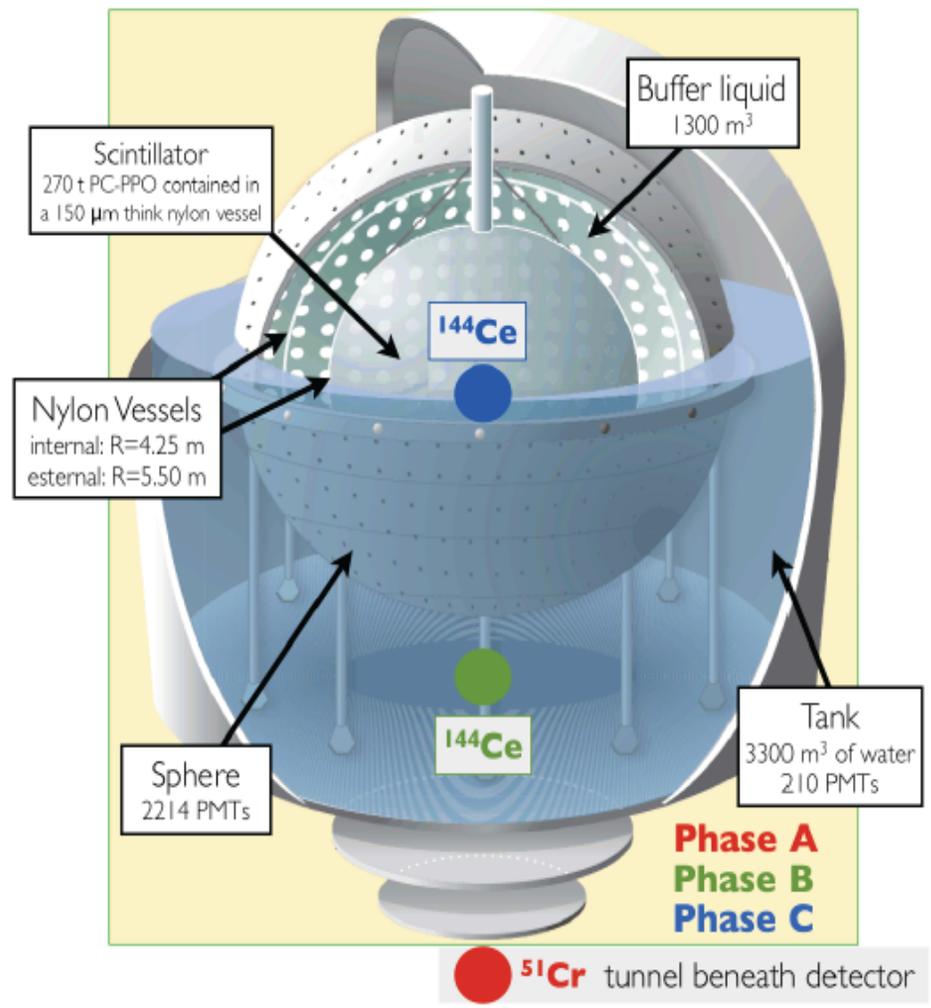
Проект SOX: Short distance Oscillations with BoreXino

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



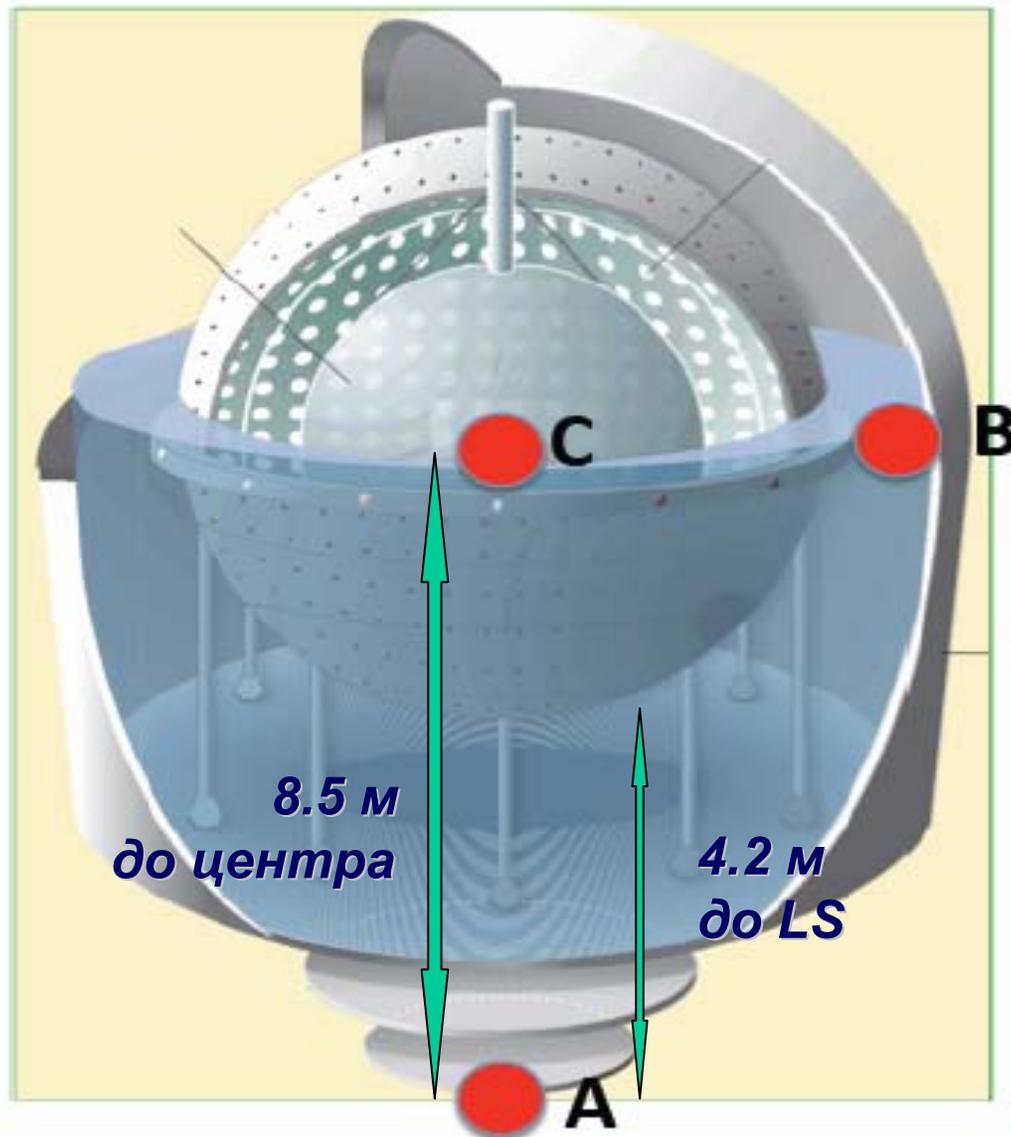
Три этапа поиска осцилляций нейтрино с источниками нейтрино ^{51}Cr и ^{144}Ce

Расположение источников нейтрино

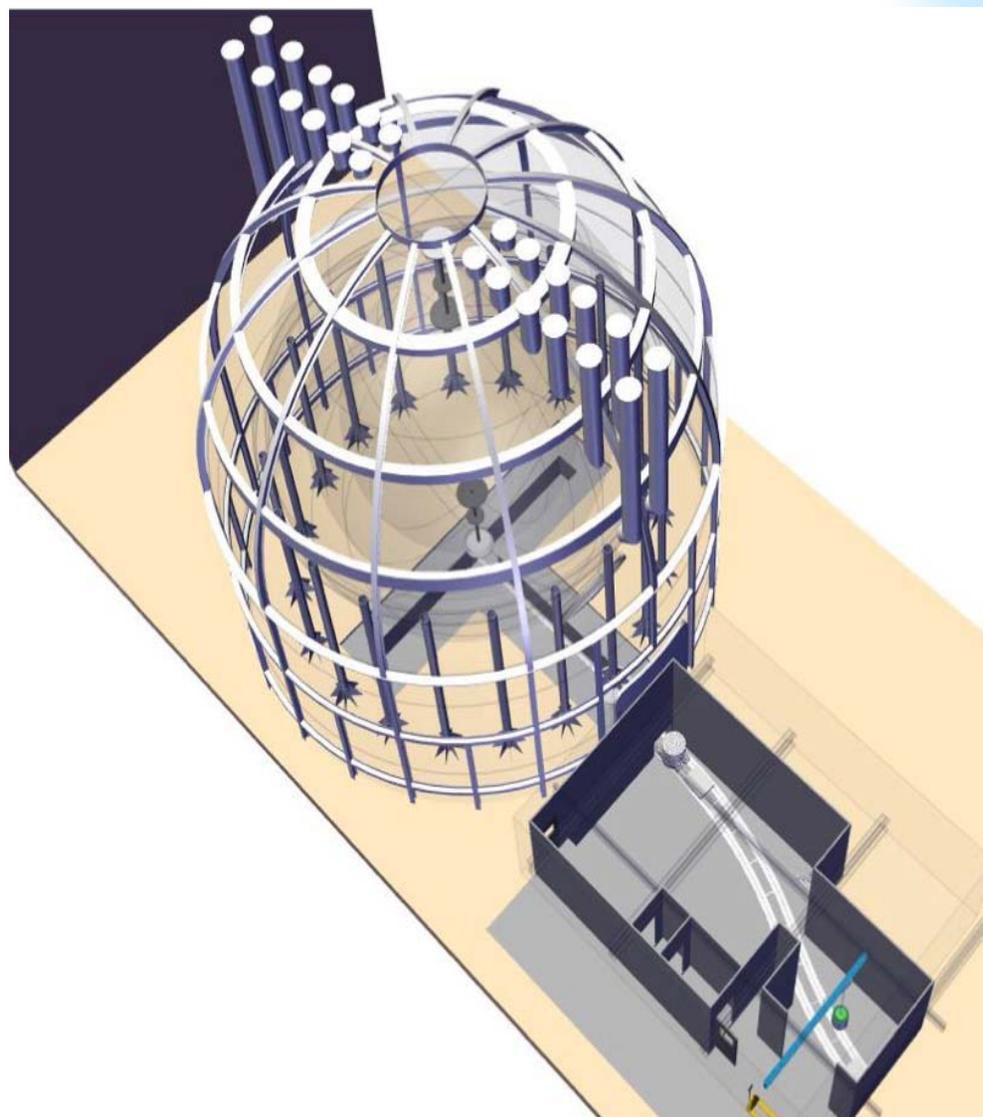
А- под детектором 825 см до центра. Без изменений.

В – внутри водного танка 700 см до центра.

С – центр. Максимум изменений в конструкции



Транспортная система



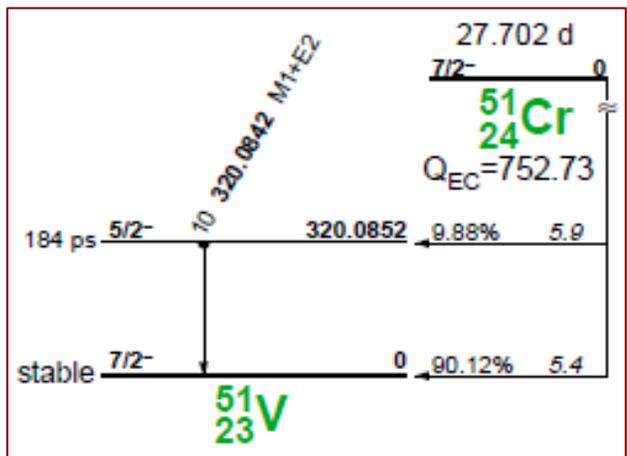
Источники нейтрино и антинейтрино

Источник (анти) нейтрино	Мо да	E_{ν} или E_{\max} (кэВ)	t , Сут..	Вт/ кКи	Кг/ МКи	производство
51Cr	EC	746 (81%)	40	0.19	0.01	50Cr(n,γ)51Cr
37Ar	EC	813 (100%)	50	~0.01		40Ca(n,α)37Ar
90Sr-90Y	β^-	2280 (100%)	1516 0	6.7	7.3	Деление осколок
144Ce-144Pr	β^-	2.9975 97.9%	411	7.6	0.3	Деление осколок

*Основные требования к возможным источникам:
счет $\sim 10^4$ соб/год, $E > 250$ кэВ, $t > 30$ сут, мин (Вт, размер, примеси)*



Источники нейтрино ^{51}Cr (^{37}Ar)



Рассеяние нейтрино на электроны
 $\nu + e \rightarrow \nu + e$, $\sigma = 10^{-45} \text{ см}^2$

$E = 752 \text{ кэВ}$

$\tau = 39.96 \text{ суток}$

190 W/MCi от 320 keV

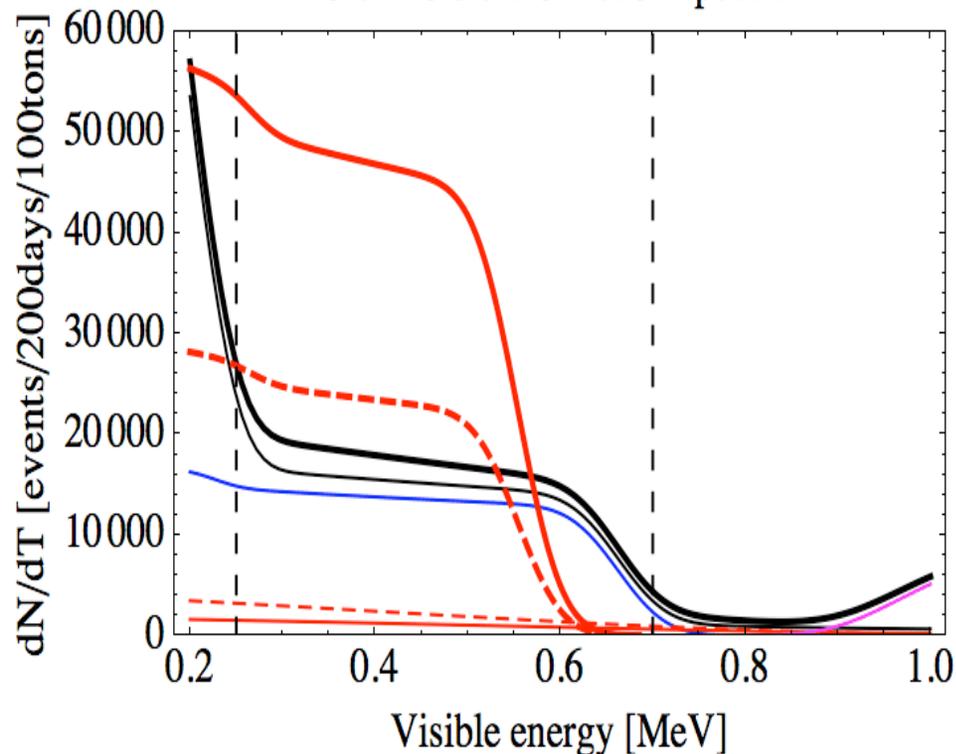
36 кг 38% обогащения

1.8 MCi реактор 35 MW

Дважды калибровали

GALLEX и SAGE

Borexino electron recoil spectrum



^{37}Ar $E = 811 \text{ кэВ}$ $\tau = 50.55 \text{ суток}$

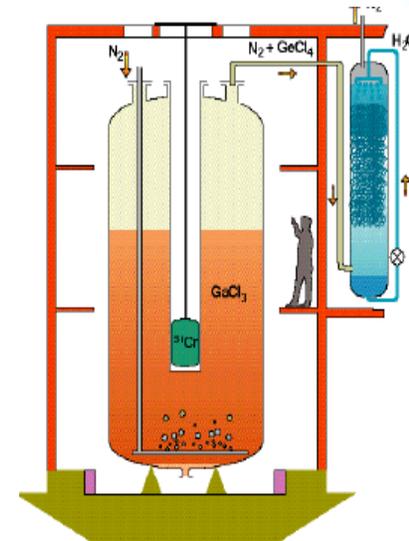
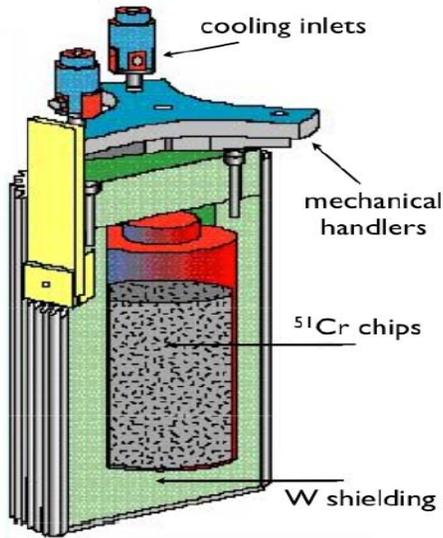
Облучая CaO быстрыми

нейтронами $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$

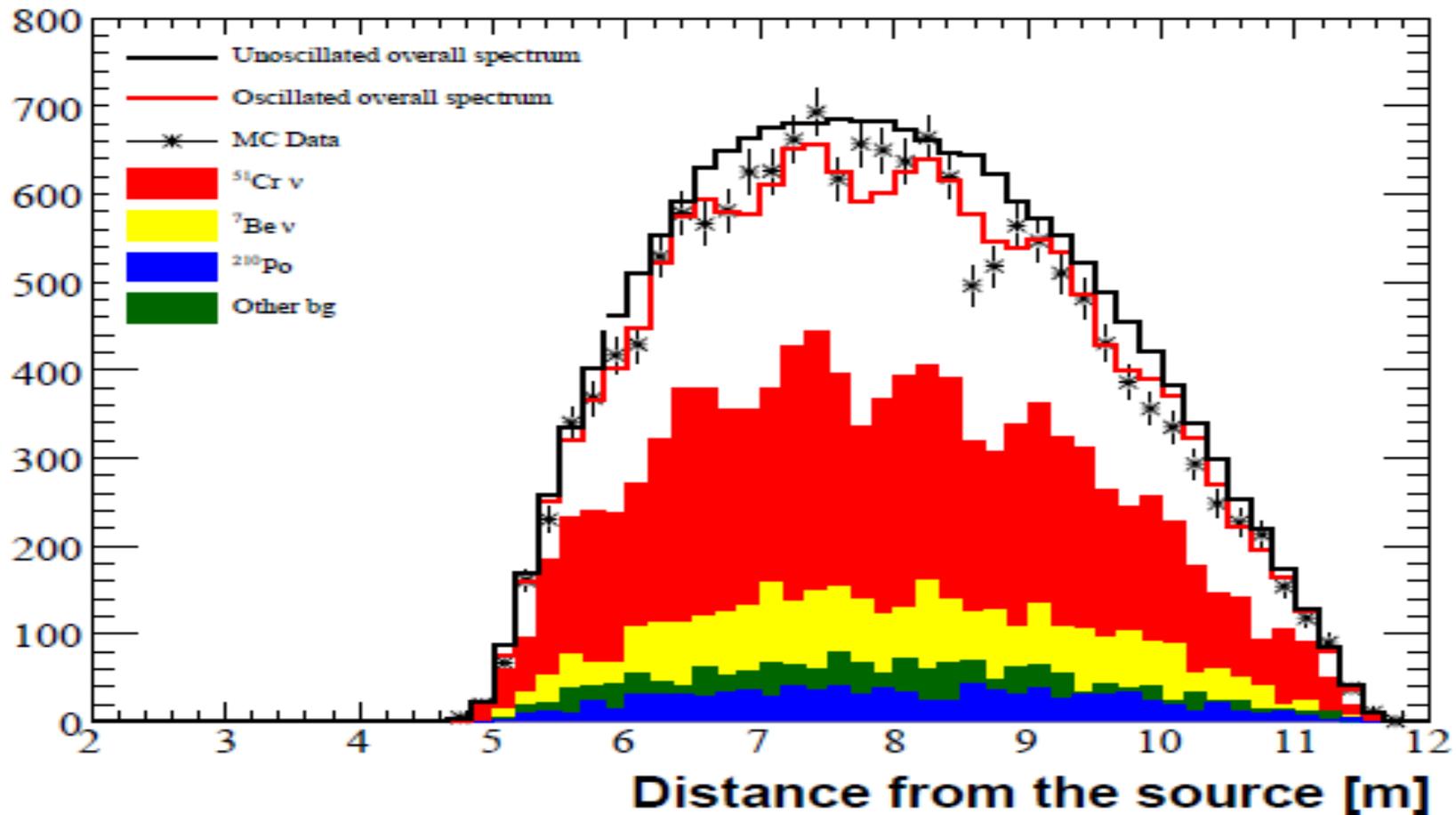
$\sim 16 \text{ W/MCi}$ 2.6 keV X-rays

Калибровали SAGE 0.4 MCi

Источник ^{51}Cr в эксперименте GALLEX/GNO

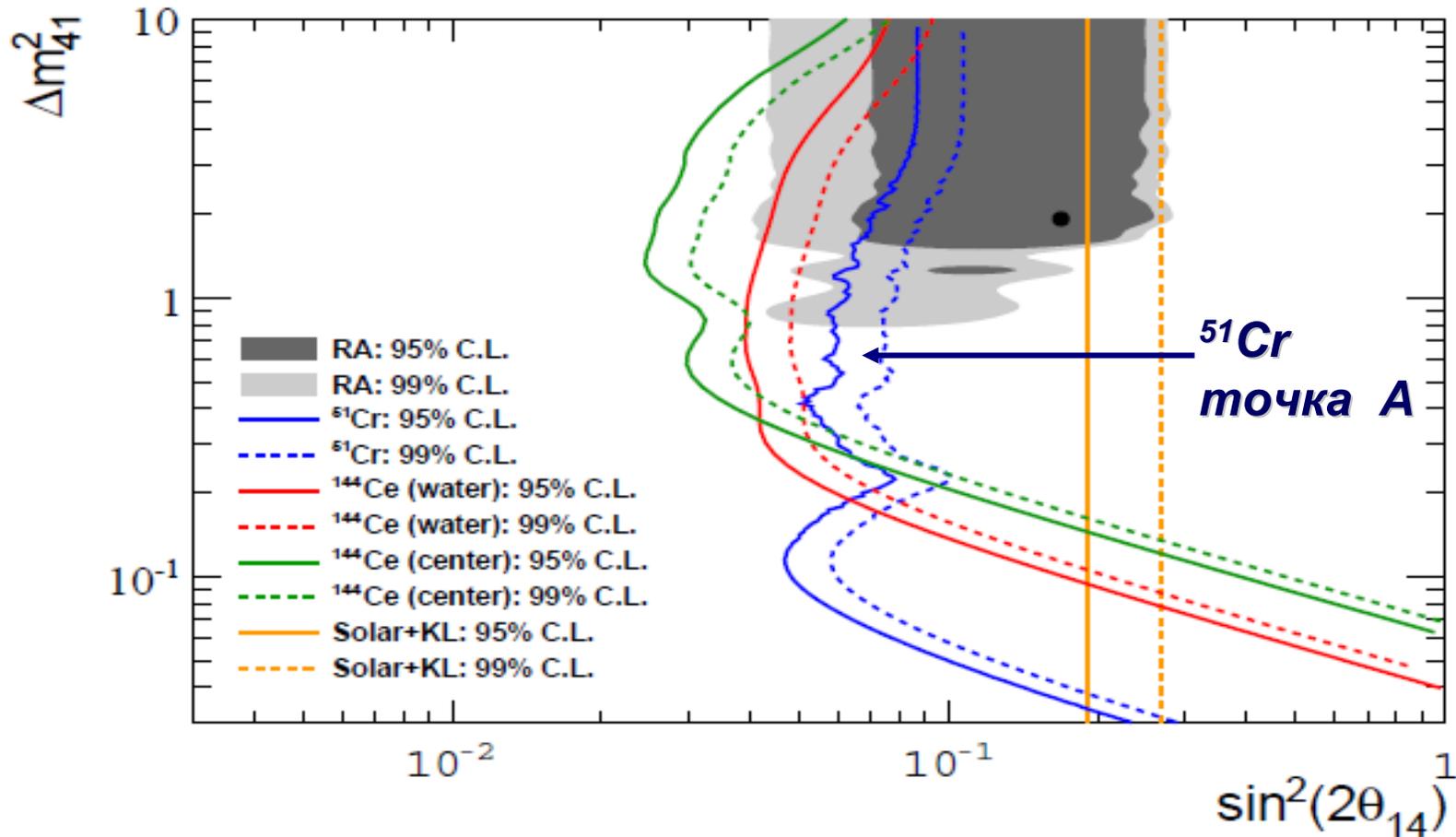


Сигнал от ^{51}Cr -нейтрино (750 кэВ)



Ожидаемое распределение скорости счета в зависимости от расстояния до источника ^{51}Cr для $dm^2 = 2 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta = 0.3$. 10 МКи на расстоянии 8.25 м от центра (точка А) за 60 суток измерений. Размеры источника 15-23 см. 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.

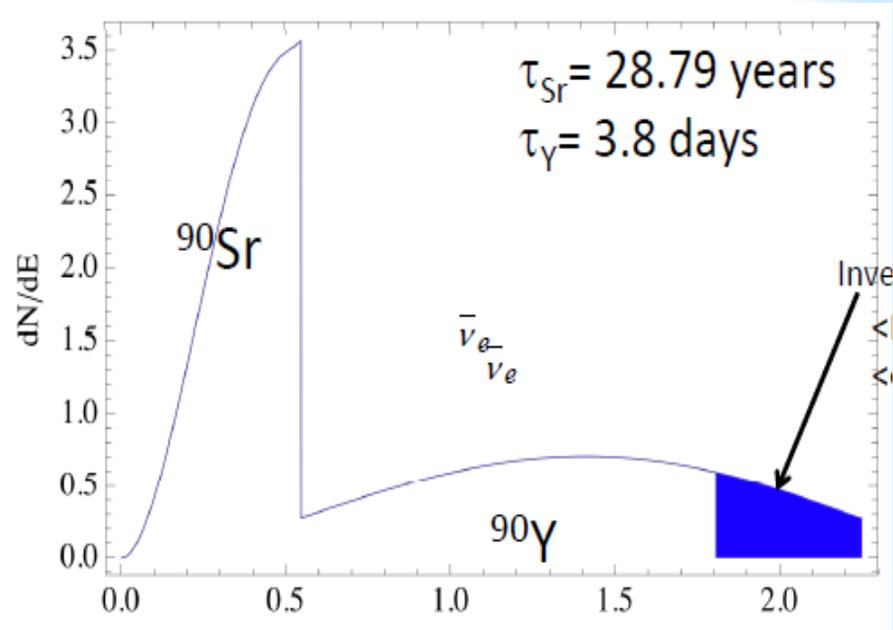
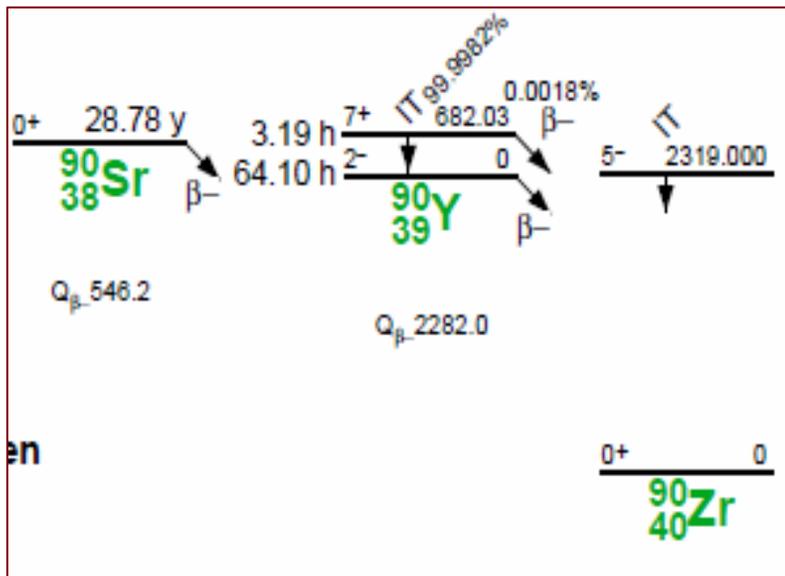
Проблемы источника ^{51}Cr

1. Время жизни 30 суток (срочность доставки)
2. Энергия 750 кэВ близка к энергии ^7Be -нейтрино 862 кэВ,
3. Фон ^7Be сравним с эффектом
4. Нейтрино, не антинейтрино (σ)
5. Для 12 МКи необходимо дополнительное обогащение по изотопу ^{50}Cr (Маяк), 37.5% недостаточно

Возможные источники антинейтрино

Couple	$\tau_{1/2}$ of parent	Q_{β^-} of daughter
$^{42}\text{Ar} - ^{42}\text{K}$	33 y	3.53 MeV
$^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$	28.9 y	2.28 MeV
$^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$	372 d	3.55 MeV
$^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$	285 d	3.00 MeV

Источник антинейтрино $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$



Микаэлян, Синев, Фаянс Письма ЖЭТФ 1998

Обратный бета-распад



$$\langle \sigma \rangle = 7.2 \times 10^{-45} \text{ см}^2$$

Рассеяние нейтрино на электроны



Осколок $E_0 = 2.28 \text{ МэВ}$

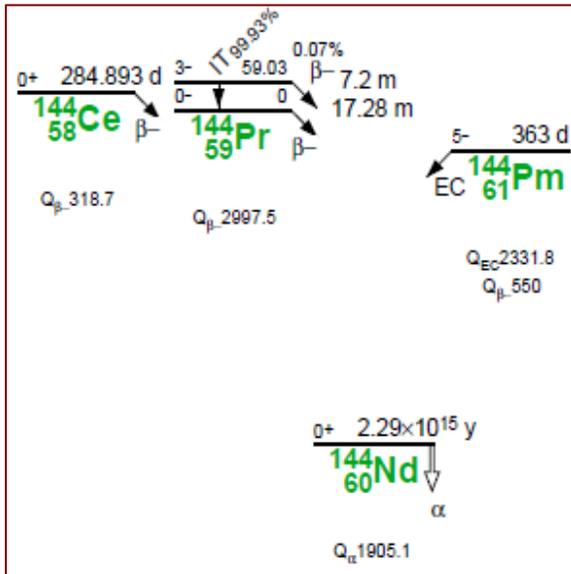
$\tau = 28.8 \text{ лет}$

6.7 кВт/МСi 7.5 кг/МСi

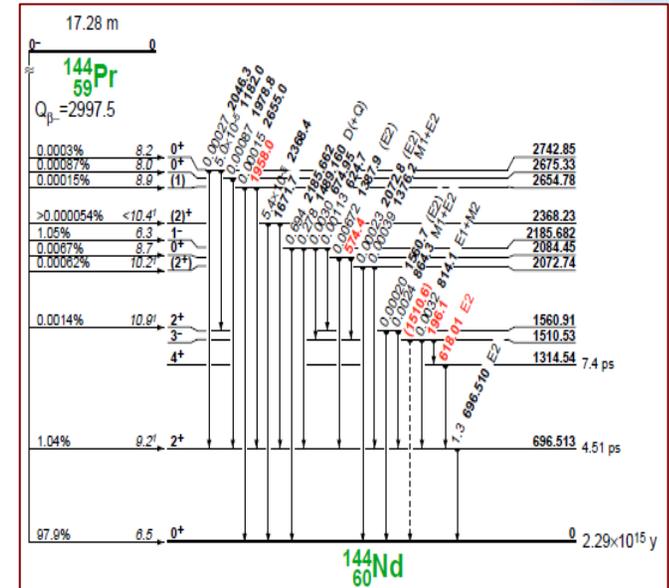
Термоэлектрические генераторы 0.2 МСi

Источник нейтрино $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$

M. Gribier et al. arXiv:1107.2335

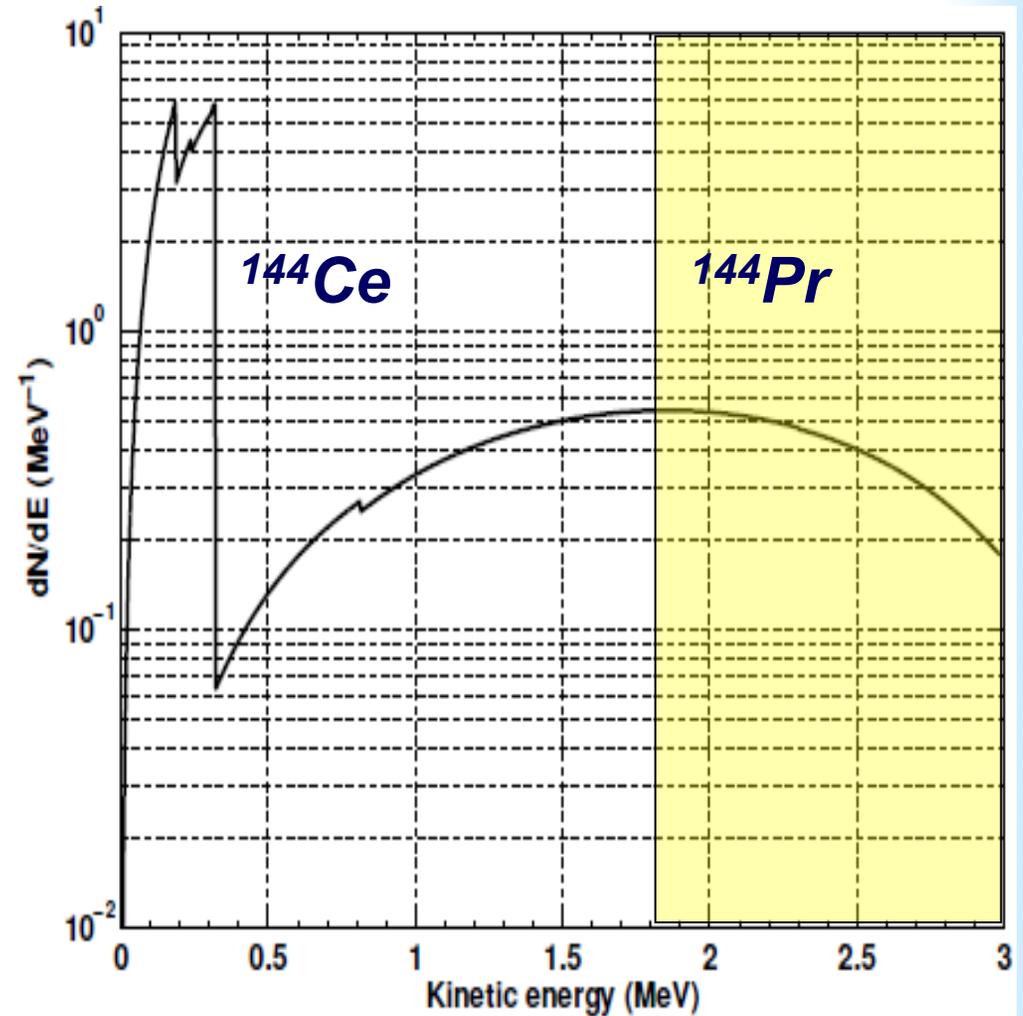
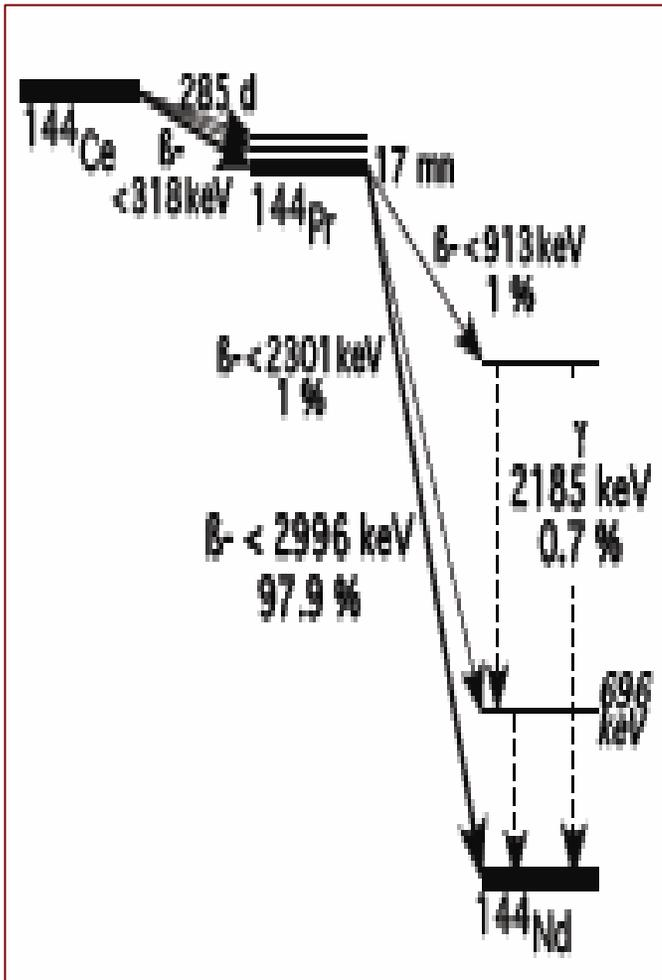


**^{144}Ce – осколок,
5% в топливе
 $E_0 = 3.0$ МэВ
 $\tau = 411$ сут.
7.5 кВт/МСi
300 г/МСi
3 РВq - 0.6 кВт
Маяк**



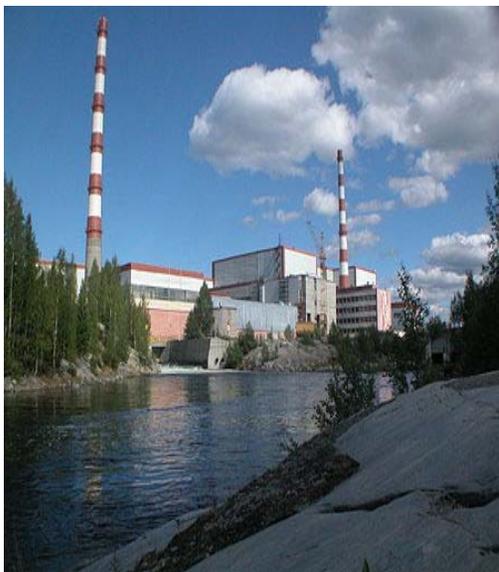
Source	F.Y. $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$	$t_{1/2}$	$1^{\text{st}} \beta^-$ (keV)	$2^{\text{nd}} \beta^-$ (keV)	$I_{\gamma > 1\text{MeV}}$	$I_{\gamma > 2\text{MeV}}$	W/kCi	kCi/4 10^4 int./y
$^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$	5.2%/3.7%	285 d	318 (76%) 184 (20%) 238 (4%)	2996 (99%) 810 (1%)	1380 (0.007%) 1489 (0.28%)	2185 (0.7%)	7.47	43.7

^{144}Ce - ^{144}Pr : спектр антинейтрино



Максимальная энергия нейтрино для ^{144}Ce – 318 кэВ, для ^{144}Pr - 3.0 МэВ.
Порог реакции обратного бета-распада 1.8 МэВ.

Кольская АЭС (с 1973 г.)



КАЭС - 4 блока ВВР-440. Выход ^{144}Ce составляет 5.5% при делении ^{235}U и 3.7% при делении ^{239}Pu . Время жизни ^{144}Ce 411 сут. Выбрано свежее топливо с временем охлаждения < 2 лет, которое в специальном контейнере доставлено на МАЯК.

ПО МАЯК, г. Озёрск



Комплектация
радиоизотопной
продукции

Пульт управления
радиохимическим
производством

МАЯК получил свежее топливо в марте 2015. Для получения 100 кК будет добавлено топливо исследовательского реактора с высоким обогащением по ^{235}U . ОПЯД поставил в МАЯК 6 гамма-спектрометров в 2014 г.

ПИЯФ поставил в МАЯК спектрометры



В отделе полупроводниковых ядерных детекторов разработано и изготовлено 6 спектрометрических систем на основе CdTe детекторов по заказу ПО МАЯК Челябинск для контроля технологических процессов переработки ядерного топлива по гамма спектрам. Детекторы ПИЯФ обладают лучшим в мире, среди CdTe детекторов, энергетическим разрешением для жестких (> 100 кэВ) γ -квантов.

Производство ^{144}Ce на базе Пьюрекс процесса



КАЭС, ОЯТ



Pu-U-Recovery
by Extraction



РЗ хрома-
тография

Процесс производства займет около 9 месяцев. Он включает в себя переработку нескольких тонн ОЯТ. После растворения ТВЭЛов в азотной кислоте исходный раствор, в зависимости от глубины выгорания топлива, содержит 250—300 г/л U, до 3 г/л Pu и до 100 мг/л Np.

МАЯК перерабатывает 100 т ОЯТ в год.

1 тонна ОЯТ содержит 13 кг РЗЭ (22 г ^{144}Ce (70 кКи, 3 года))

В течение первой экстракции в органическую фазу извлекаются U, Pu, Np, актиниды Am, Cm и ряд осколочных элементов (РЗЭ (в том числе Ce), Ru, Zr, Nb и др.).

Хроматографическое отделение Ce от других РЗЭ. Отжиг Ce до CeO_2 .

Сторонняя γ -активность $< 10^{-3}$ Бк/Бк ^{144}Ce

Активность ^{241}Am , $^{241}\text{Cm} < 10^{-5}$ Бк/Бк (P и n's)

Прессовка. Герметизация двухслойный стальной цилиндр. На выходе 30 g of ^{144}Ce в 5 кг CeO_2 . Загрузка в защитный W-контейнер (2.3 т) и в транспортный контейнер (21 т).



отжиг

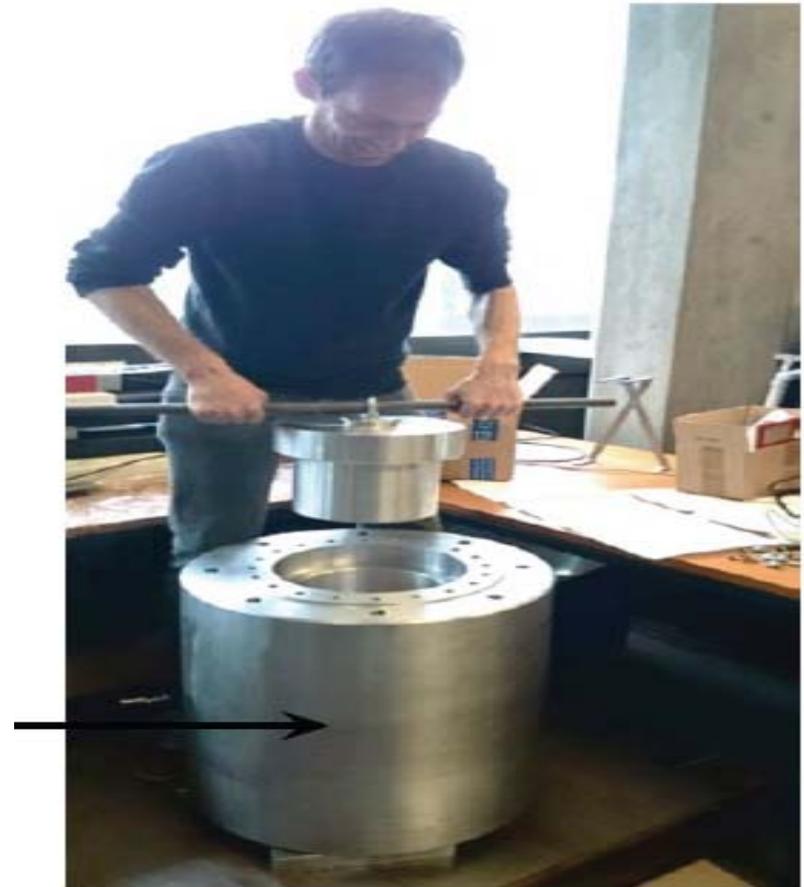
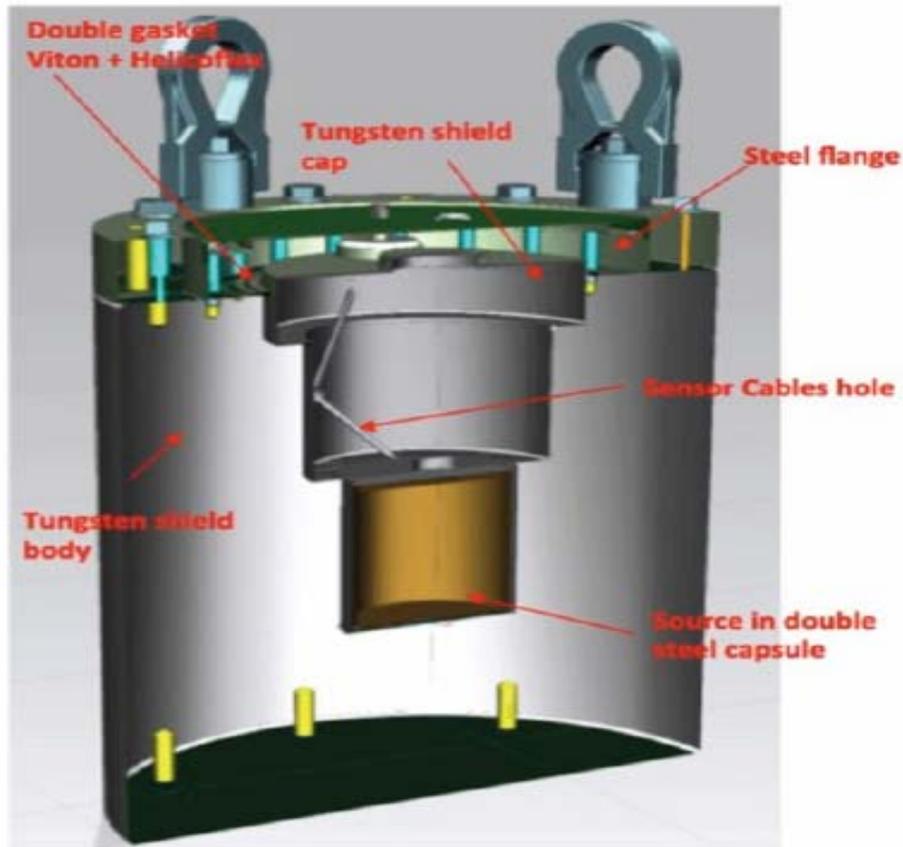


30 г ^{144}Ce в
5 кг CeO_2



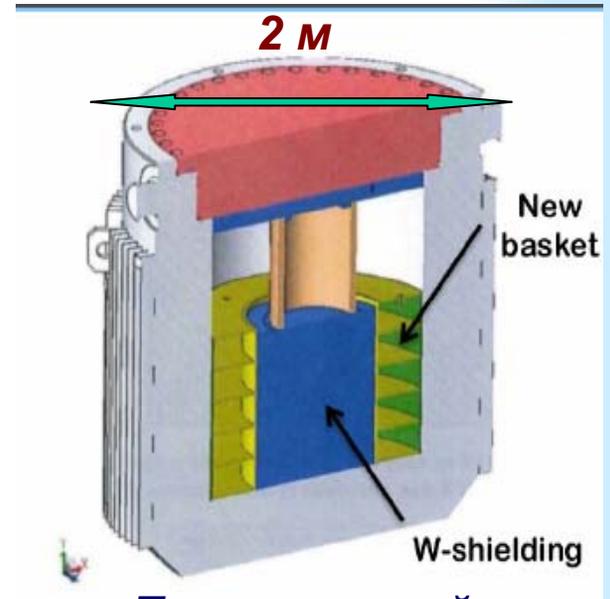
2300 кг W

Вольфрамовый контейнер



Самая большая вольфрамовая составная защита в мире. Цилиндр высотой 60 см и диаметром 60 см. Толщина 19 см. Масса 2.3 тонны. Размеры определяются линией 144 Pr с энергией 2.185 кэВ ($BR = 0.7\%$), которую нужно подавить в 10^{12} раз и размерами яма (1 м) под Борексино. Будет произведено в Китае. Температура внутри 500°C , на поверхности 80°C .

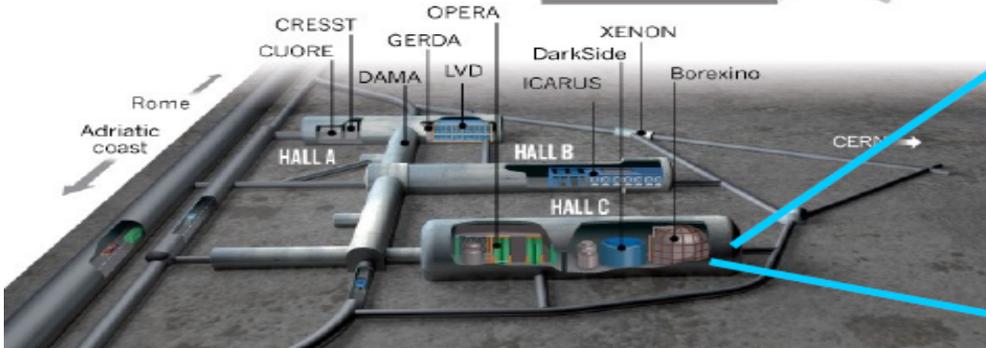
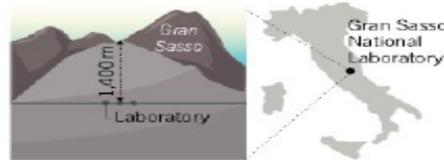
Транспортировка МАЯК ---> LNGS



Транспортный контейнер 21 т

THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.

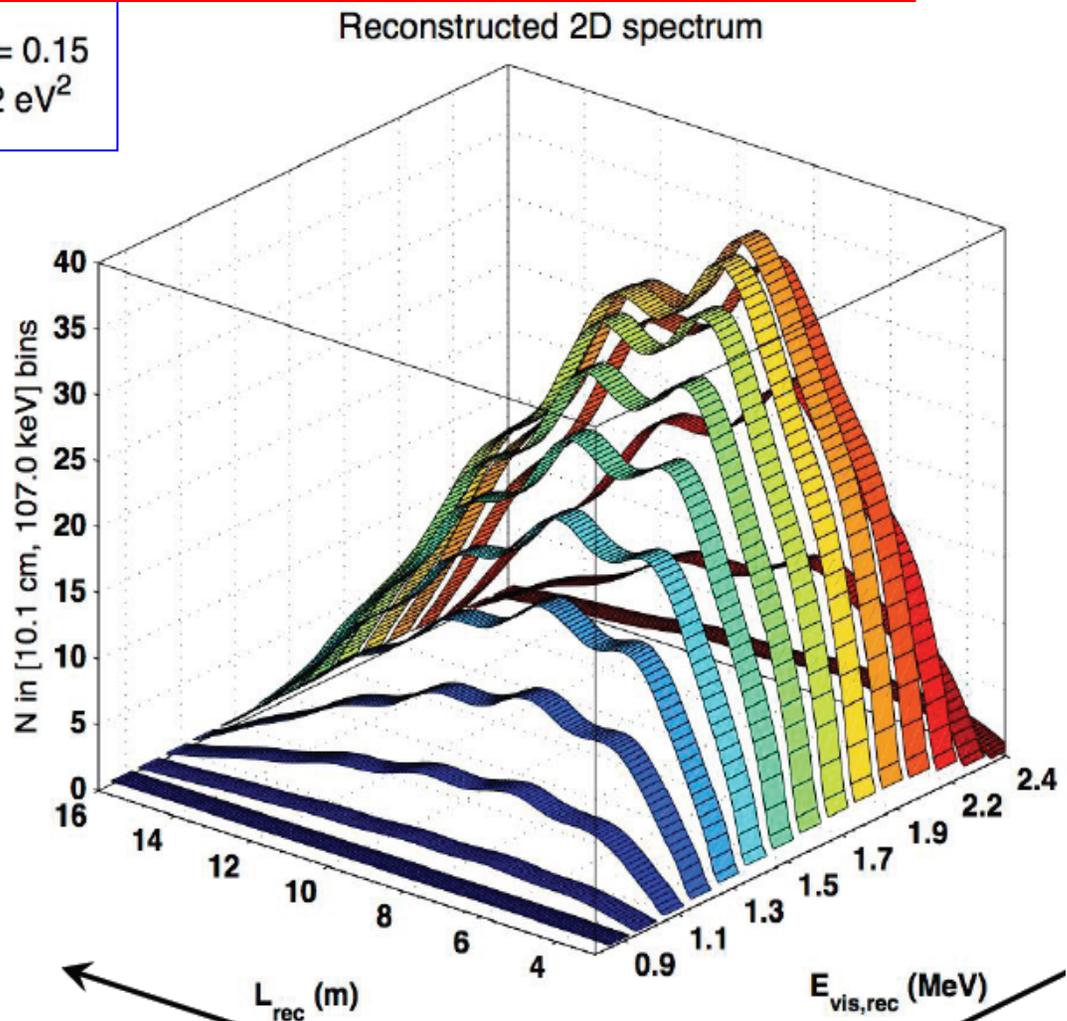


Из Челябинска в Петербург поездом (август-октябрь) далее по морю во Францию, Сакле и затем автотранспорт в Гран Сассо (до конца года). Время в пути ~ 1 месяц. Активность уменьшится на 7%

Скорость счета в зависимости от R и E

$$\mathcal{P}(\theta, \Delta m^2, L, E) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

$$\sin^2(2\theta) = 0.15$$
$$\Delta m^2 = 2 \text{ eV}^2$$



100 кКи ¹⁴⁴Се

8.5 м от центра.

1.5 года измерений.

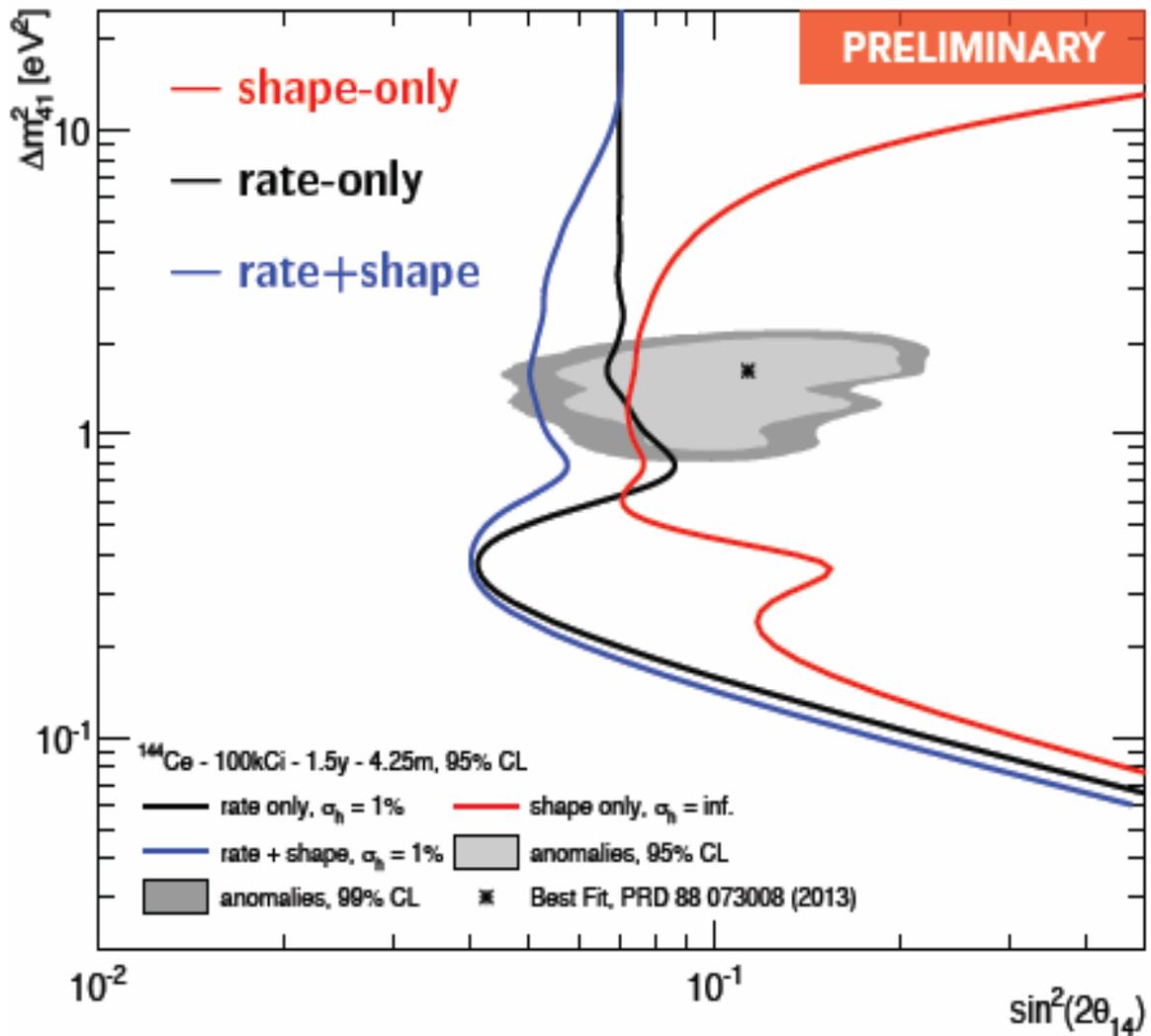
10⁴ событий.

$\sigma_E = 5\%$ (1 МэВ).

$\sigma_R = 15$ см (1 МэВ)

ФОН = 0

Чувствительность SOX_Ce к стерильному нейтрино



Измерение формы (R, Ev)

1. Smoking-gun
2. Чувствительны к $\delta m^2 \approx 0.5 - 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимо хорошее энергетическое и пространственное разрешение
4. Чувствительность определяется статистикой

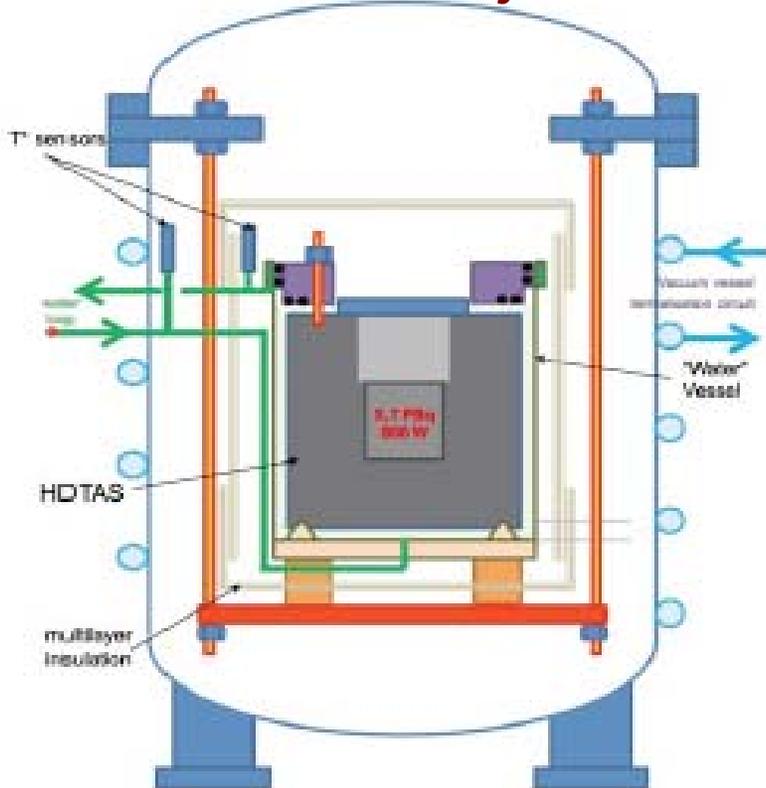
Счет+форма

1. Улучшение чувствительности по сравнению с формой
2. Чувствительны к $\delta m^2 > 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимы точные измерения тепловыделения и преобразования мощности в активность
4. Важны систематические ошибки для энергетической и пространственной реконструкций и эффективности к реакции обратного бета-распада

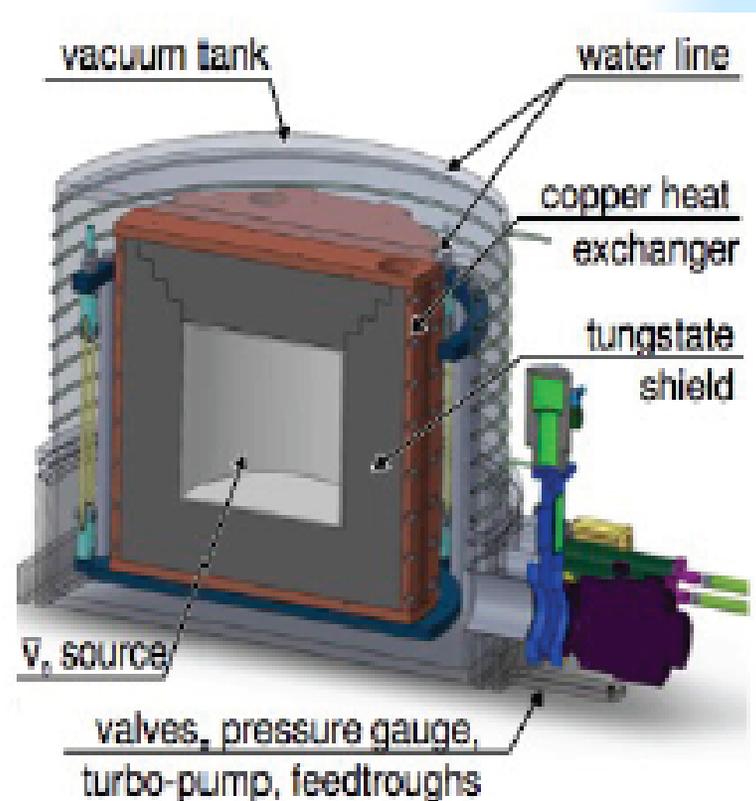
100 кКи на 8.5 м от центра 1.5 года измерений

Измерение активности – два калориметра

CEA- Saclay



TUM / Genova



Ожидается $216 \text{ Вт} / 10^{15} \text{ Вq}$ или 800 Вт в начале измерений. Будет измеряться поток и температура воды на входе и выходе. $P_{dt} = C_d M dT + P_{утечка}$. Задача минимизировать утечки тепла. Теплопроводность (мосты). Конвекция (вакуум). Радиация (экраны). Измерения тепловой мощности с точностью $< 1.5 \%$. Перевод в активность $A = P / \langle E \rangle$ (среднее энерговыделение на распад). Требования к сторонней γ - и α -активности.

Калориметр TUM / INFN испытывается

CONVECTION

Vacuum system

Turbo molecular pump

skroll pump

$$P < 5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$$



$$P \approx 0 \text{ W}$$

IRRADIATION

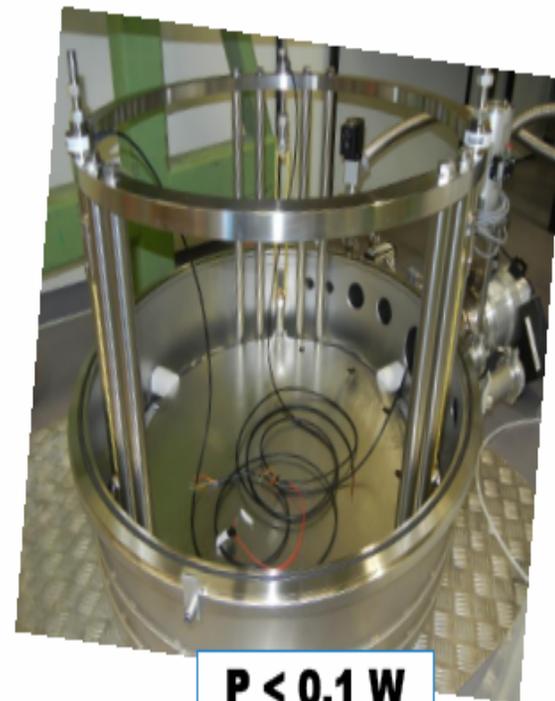
- 2 stages of superinsulator (10 foils each)
- Thermalization of the external chamber by hot water flow



$$P < 1 \text{ W}$$

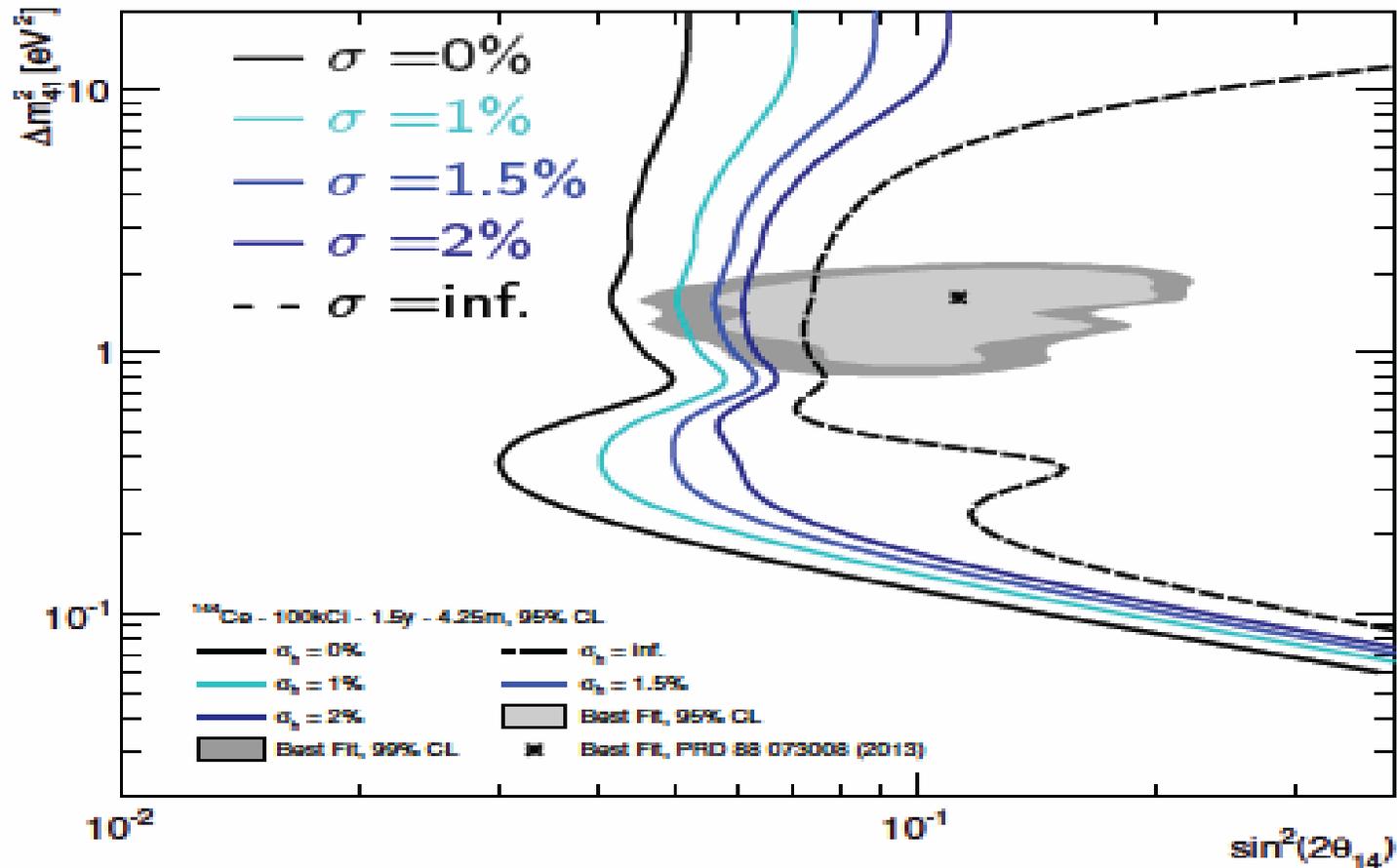
CONDUCTION

Hanging platform suspended by three kevlar ropes



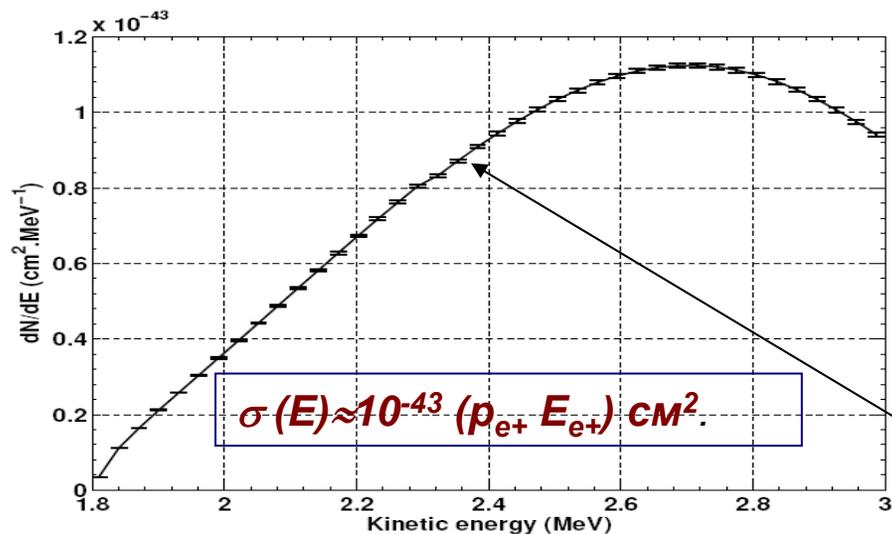
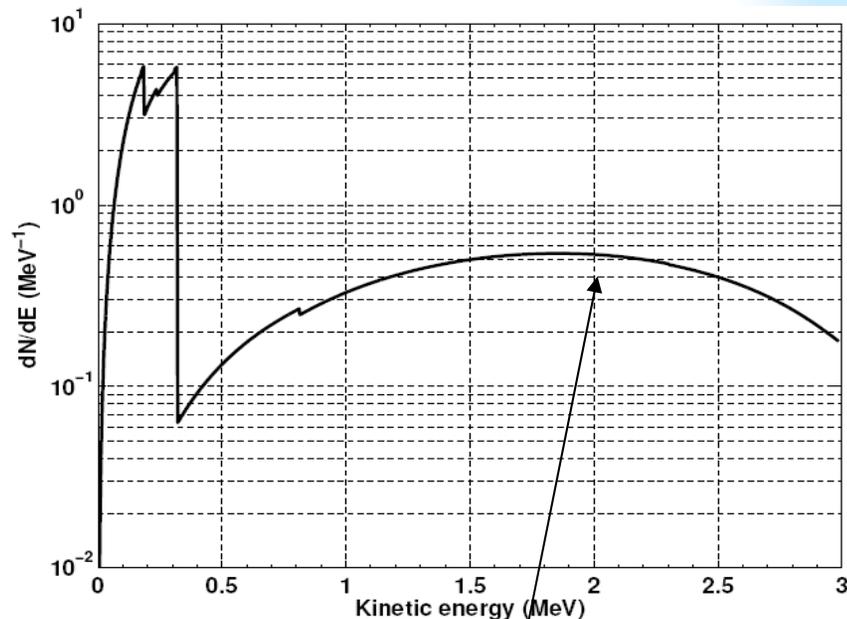
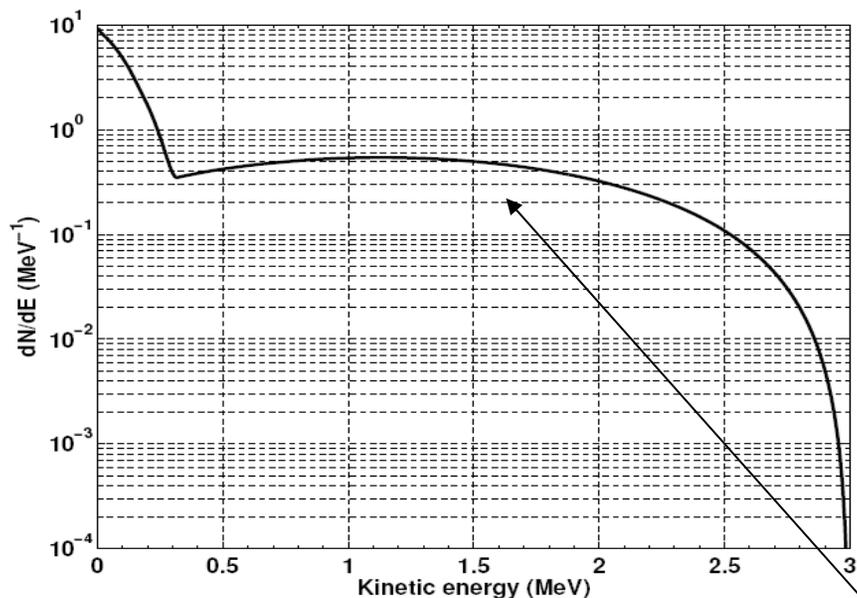
$$P < 0.1 \text{ W}$$

Калориметрия ^{144}Ce - ^{144}Pr источника (1%)



Зависимость чувствительности эксперимента к осцилляционным параметрам от точности определения активности источника антинейтрино. Штриховая линия соответствует анализу только формы осцилляционной кривой (не зависит от активности источника).

Бета-спектры, спектр нейтрино Φ_ν и $\Phi_\nu \times \sigma$ (сечение)

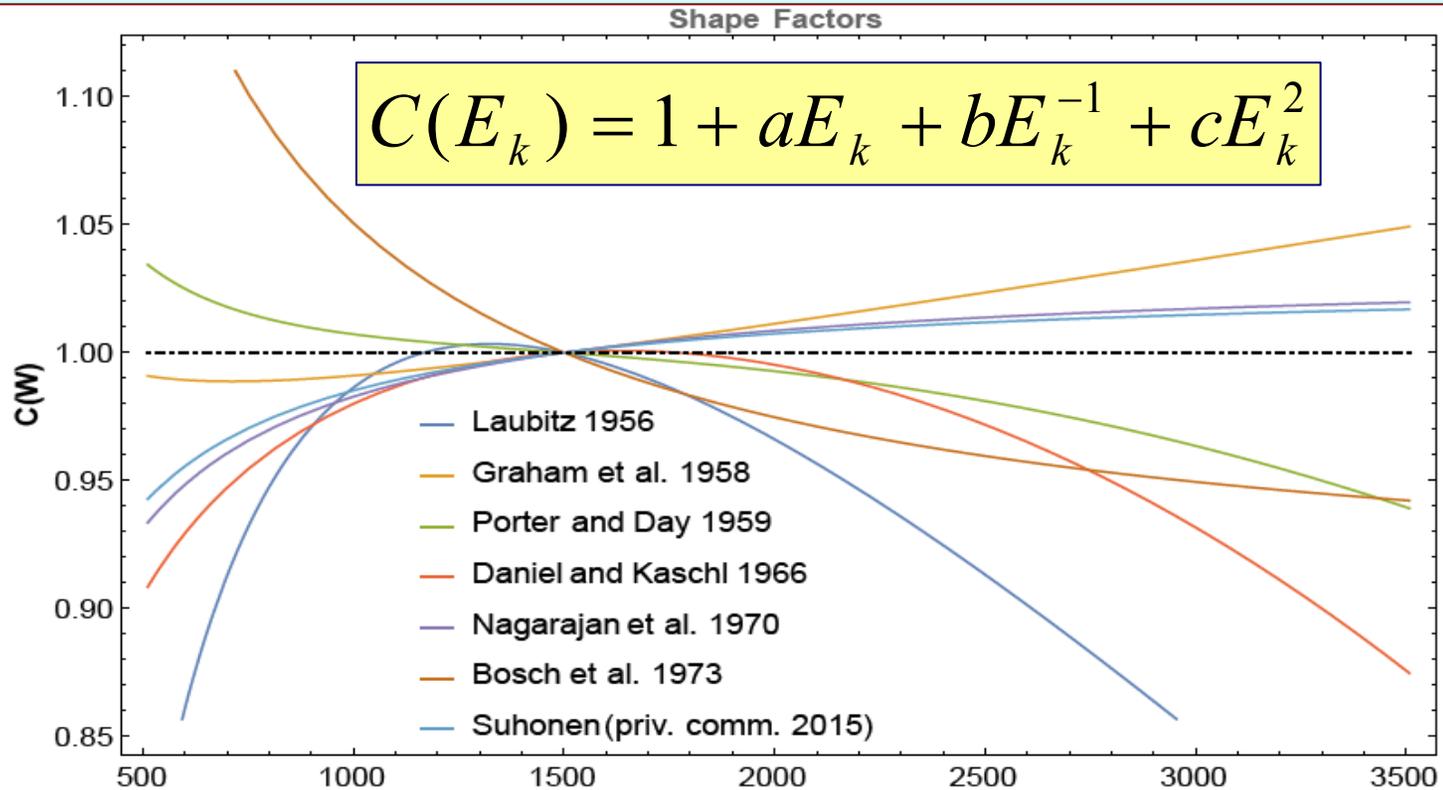


Бета-спектры,
спектр нейтрино Φ_ν
и произведение
 $\Phi_\nu \times \sigma$ (сечение)

**нужно
определить**
1) $\langle E \rangle$
2) CR
3) Примеси
(α - β - γ)

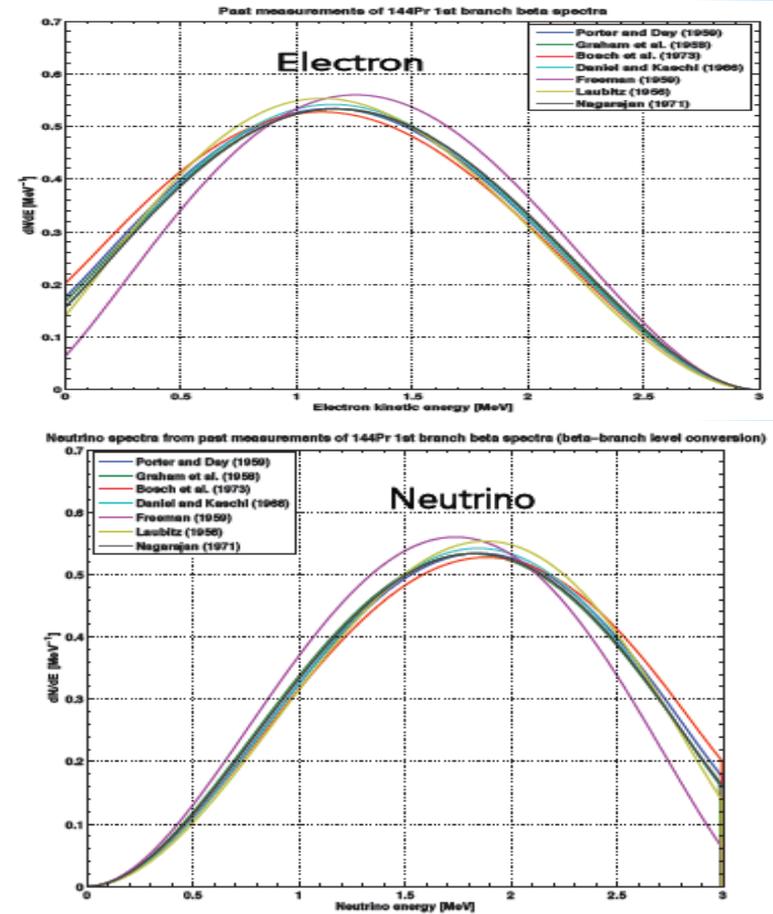
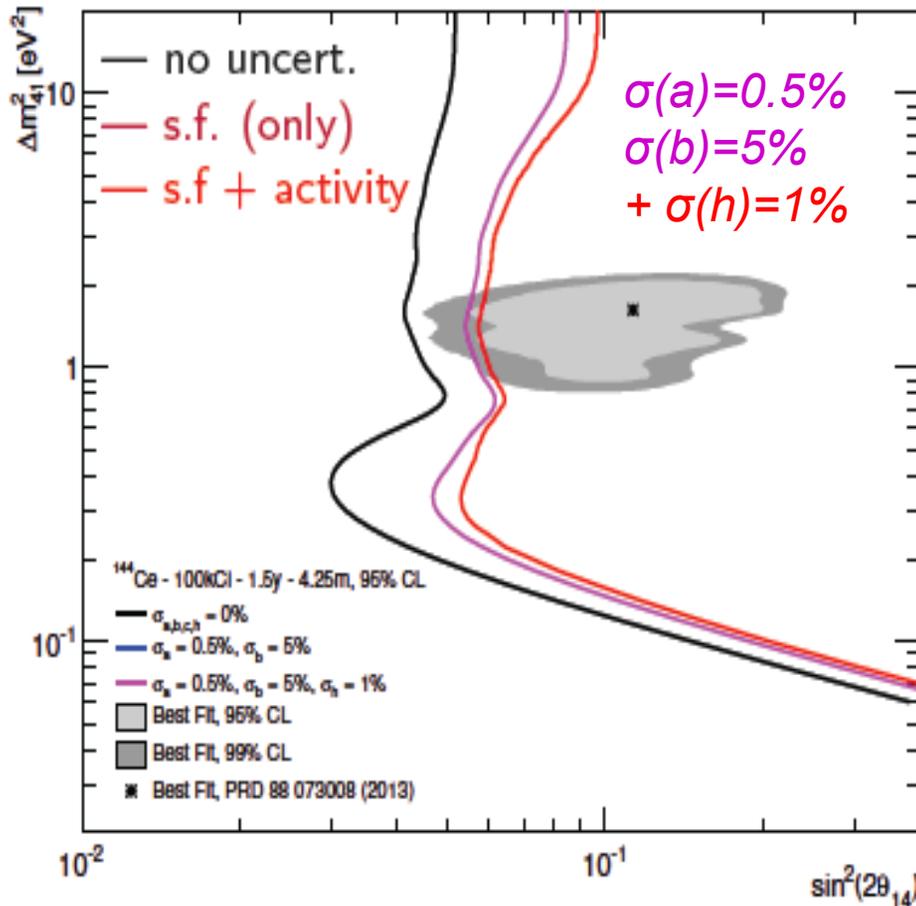
Измерение β -спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr

$$S(E_e, E_0, m_\nu) \propto P_e E_e (E_0 - E_e)^2 F(E_e, Z) C(E_k)$$



$C(E_k)$ – зависит от конкретного перехода. Shape-фактор для запрещенных переходов ($0 \rightarrow 0$, 1-го порядка, обычно ограничиваются b). Большая неопределенность в измерениях $C(E_k)$. Влияет на среднее $\langle E \rangle$, определение активности и ожидаемой скорости счета.

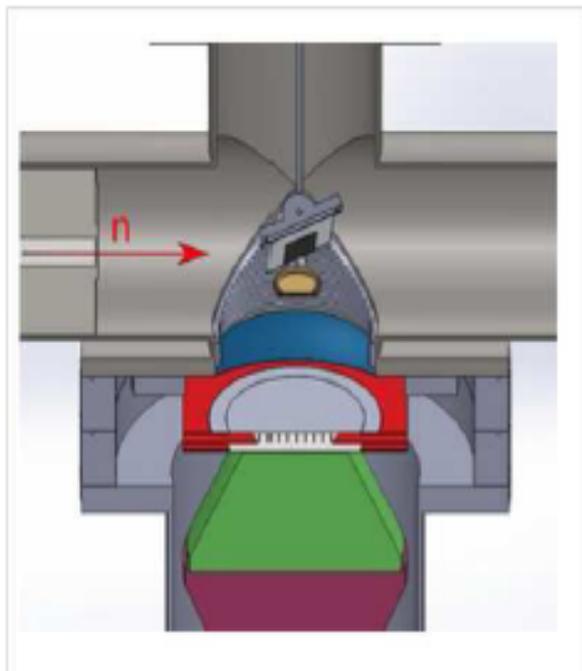
Спектр нейтрино при распаде ^{144}Pr



Спектры ^{144}Ce и ^{144}Pr соответствуют неуникальным запрещенным в первом порядке бета-переходам. Форма спектра ^{144}Pr известна с точностью несколько процентов. Необходимы новые измерения бета-спектров ^{144}Pr , чтобы достичь высокой (<1%) точности для коэффициента, связывающего тепловую мощность и активность, и для ожидаемой скорости счета реакции обратного бета распада.

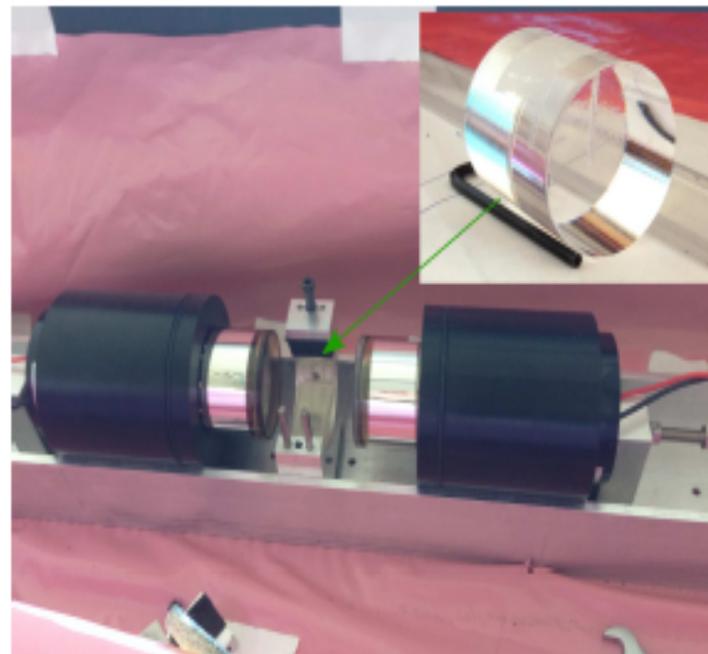
2 установки для измерение β -спектра ^{144}Pr

TUM spectrometer (PRL. 112, 122501)



Plastic scintillator + multiwire chamber
 γ veto

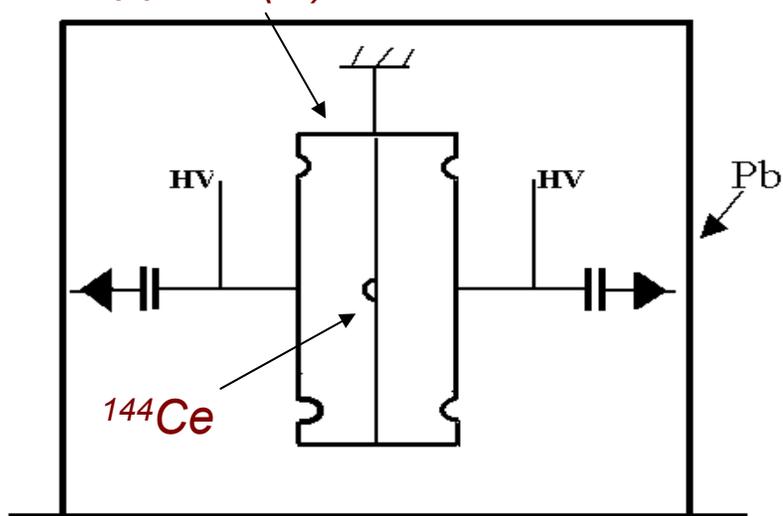
CEA spectrometer (under development)



Plastic scintillator + encased source
High coverage & light collection

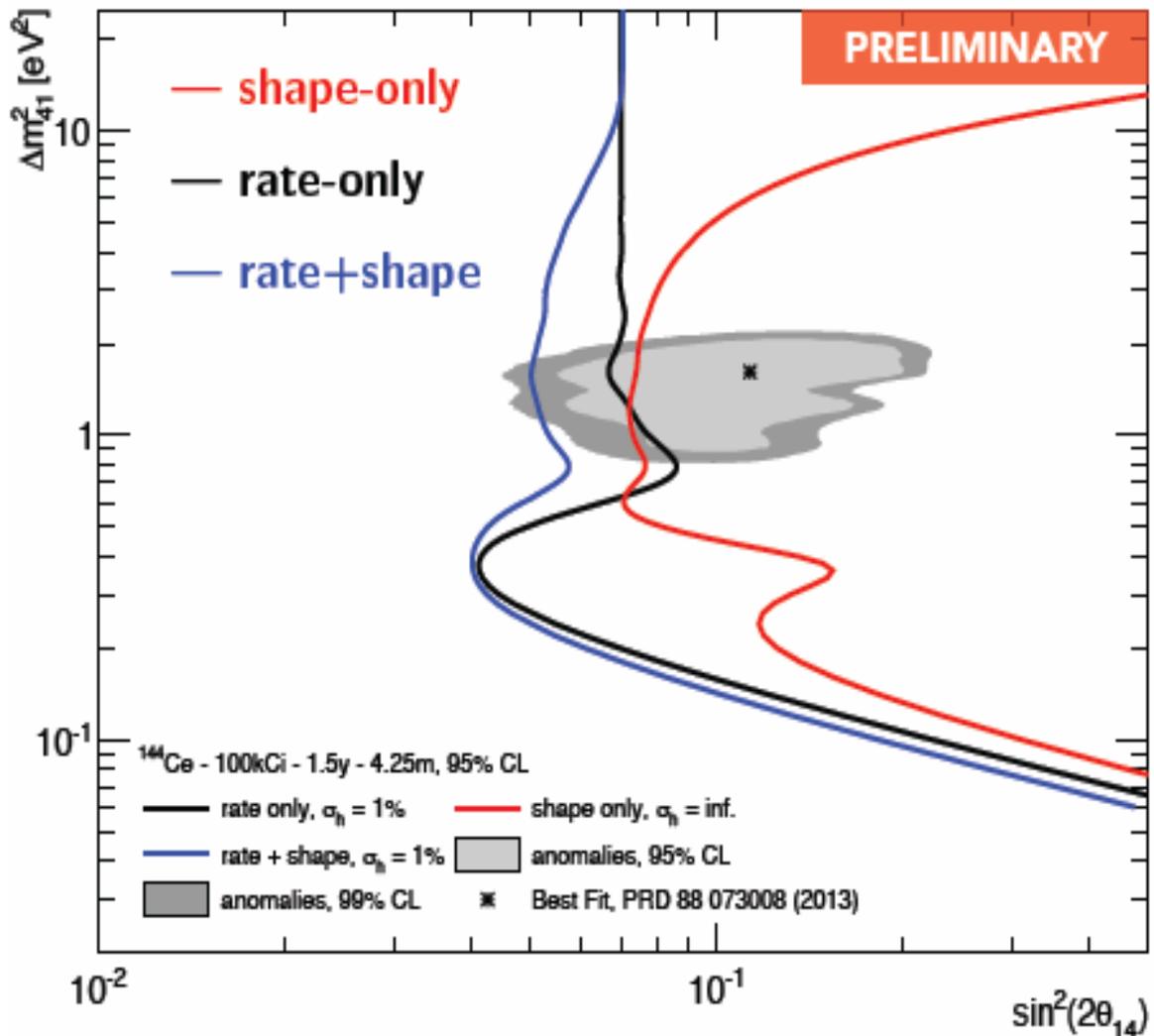
Измерения β -спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr в ПИЯФ

Два Si(Li) d 30 мм h 8 мм



Для измерения энергетического спектра будут использоваться два цилиндрических планарных Si(Li)-детектора. В центре торца одного из детекторов будет вышлифована лунка, глубиной ≈ 0.5 мм и диаметром 3 мм, в которой наносится источник ^{144}Ce - ^{144}Pr . Рабочая область каждого детектора имеет диаметр 30 мм и толщину 9 мм. Детекторы плотно соединяются друг с другом торцевыми плоскостями, устанавливаются в криостат и охлаждаются до температуры жидкого азота. Криостат будет окружен небольшим слоем пассивной защиты из свинца (25 мм) от внешней радиоактивности. Напротив криостата с Si(Li)-детекторами располагается HPGe-детектор диаметром 60 мм и длиной 60 мм, включенный в схему совпадений с Si(Li)-детекторами. Это позволит изучить схему распада и учесть тормозное излучение.

Чувствительность SOX_Ce к стерильному нейтрино



Измерение формы (R,Ev)

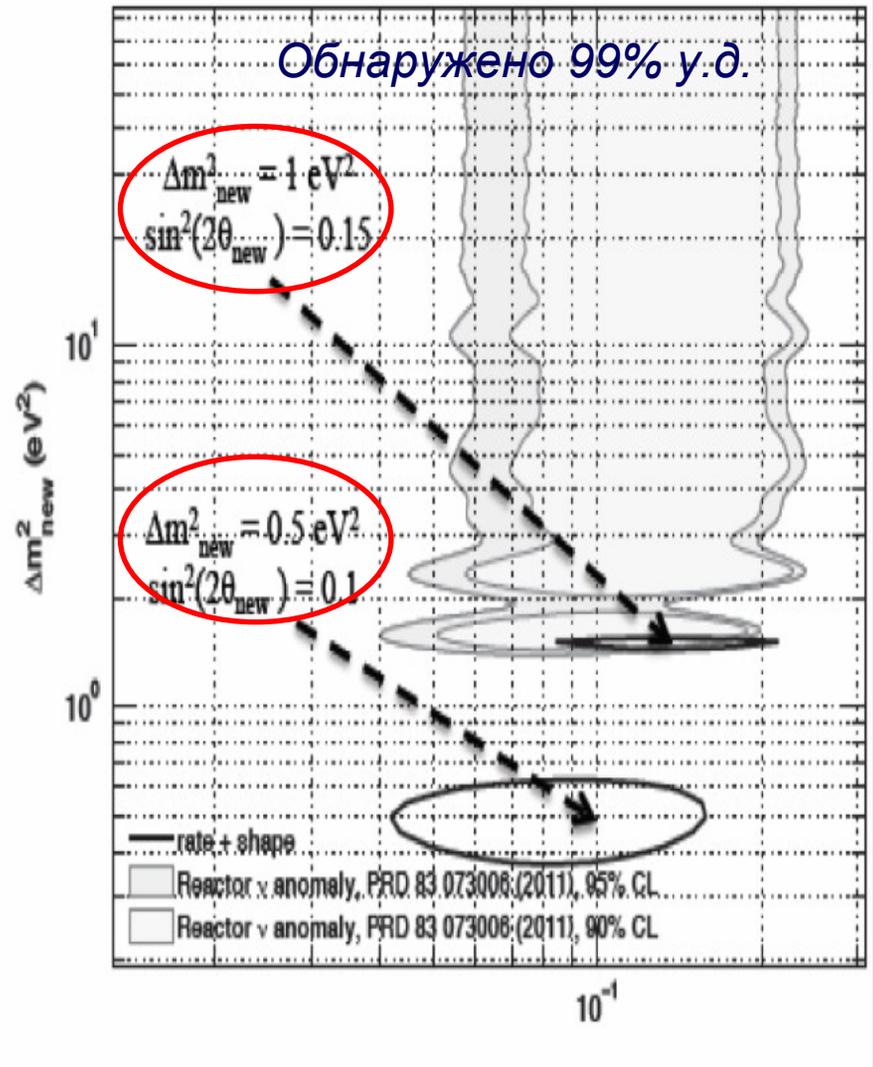
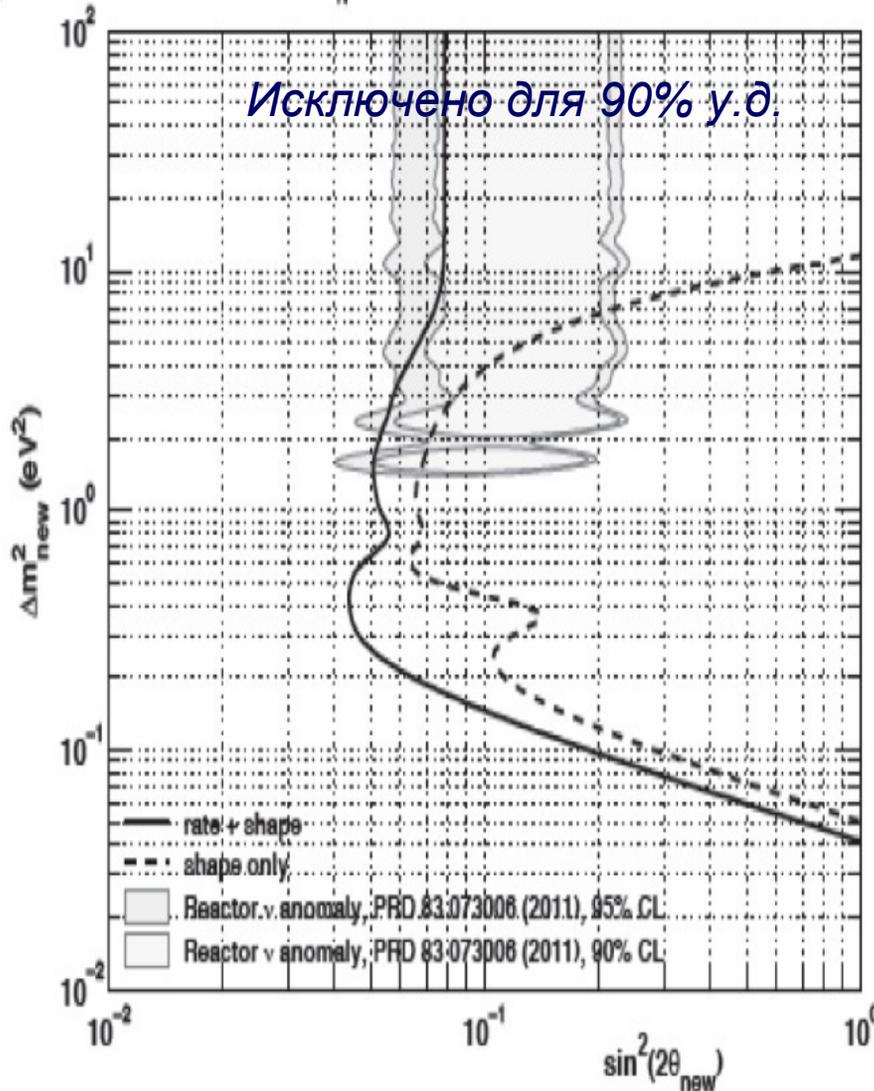
1. Smoking-gun
2. Чувствительны к $\delta m^2 \approx 0.5 - 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимо хорошее энергетическое и пространственное разрешение
4. Чувствительность определяется статистикой

Счет+форма

1. Улучшение чувствительности по сравнению с формой
2. Чувствительны к $\delta m^2 > 5 \text{ эВ}^2$
3. Необходимы точные измерения тепловыделения и преобразования мощности в активность
4. Важны систематические ошибки для энергетической и пространственной реконструкций и эффективности к реакции обратного бета-распада

100 кКи на 8.5 м от центра 1.5 года измерений

Возможность обнаружения стерильного нейтрино в SOX_Ce



100 кКи 144Ce, известные с 1.5% точностью на расстоянии 8.4 т от центра Вorexпо



Заключение – Борексино и стерильные нейтрино

1. Борексино – хороший детектор для поиска осцилляций нейтрино с искусственными источниками нейтрино. Детектор обладает лучшим энергетическим и пространственным разрешением, а также минимальным фоном в низкоэнергетической области.
2. Рассмотренные источники нейтрино ^{51}Cr и антинейтрино ^{144}Pr активностью 10 МКи и 100 кКи, соответственно, обеспечивают чувствительность достаточную для проверки области параметров осцилляций, соответствующих Ga- и реакторной аномалии.
3. Первый эксперимент с источником ^{144}Pr планируется выполнить в течении 2016-2018 г.г. без каких либо изменений в конструкции и в программе измерений солнечных нейтрино.
4. Результаты эксперимента с ^{144}Pr определяют программу измерений с источником нейтрино ^{51}Cr . Наиболее привлекательные измерения с целью поиска осцилляций на коротких расстояниях и CPT нарушения могут быть проведены с источниками нейтрино и антинейтрино, расположенными в центре Борексино.

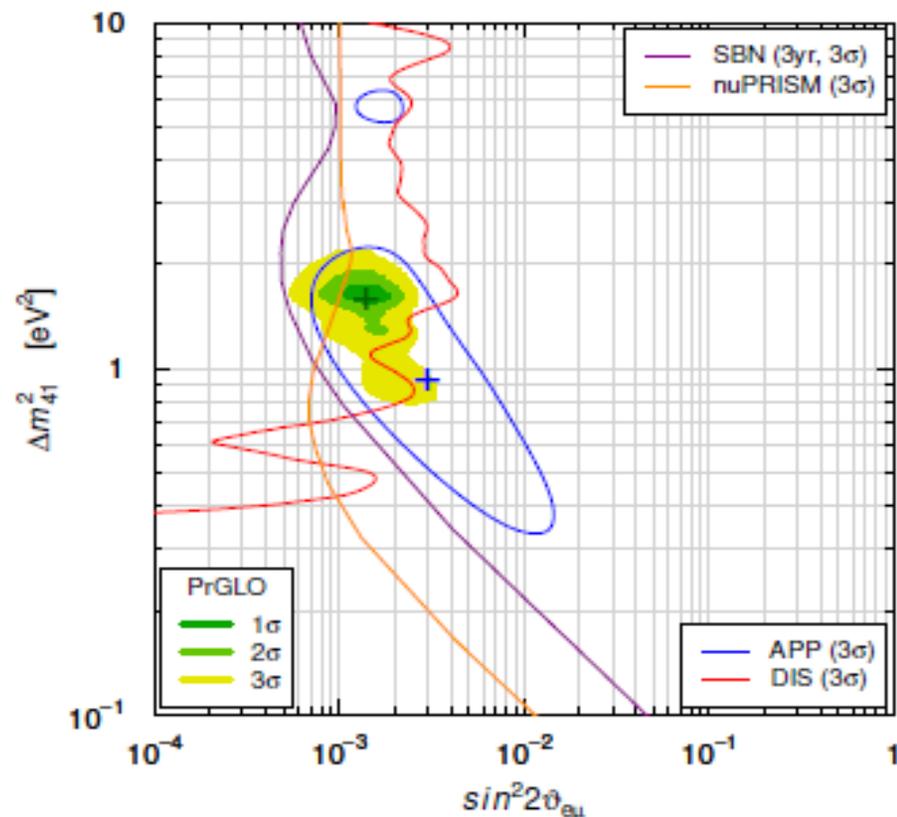
Спасибо за внимание!

Project	neutrino	source	E (MeV)	L (m)	status
SAGE [166]	ν_e	^{51}Cr	0.75	$\lesssim 1$	in preparation
CeSOX [167, 168]	$\bar{\nu}_e$	^{144}Ce	1.8 – 3	5 – 12	in preparation
CrSOX [167]	ν_e	^{51}Cr	0.75	5 – 12	proposal
Daya Bay [169, 170]	$\bar{\nu}_e$	^{144}Ce	1.8 – 3	1.5 – 8	proposal
JUNO [171]	$\bar{\nu}_e$	^{144}Ce	1.8 – 3	$\lesssim 32$	proposal
LENS [172]	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	$^{51}\text{Cr}, ^6\text{He}$	0.75, $\lesssim 3.5$	$\lesssim 3$	abandoned
CeLAND [173]	$\bar{\nu}_e$	^{144}Ce	1.8 – 3	$\lesssim 6$	abandoned
LENA [174]	ν_e	$^{51}\text{Cr}, ^{37}\text{Ar}$	0.75, 0.81	$\lesssim 90$	abandoned

Table 2: Main features of new source experiments and their status according to our knowledge.

Project	P_{th} (MW)	M_{target} (tons)	L (m)	Depth (m.w.e.)	status
Nucifer (FRA) [175]	70	0.8	7	13	operating
Stereo (FRA) [176]	57	1.75	9 – 12	18	in preparation
DANSS (RUS) [177]	3000	0.9	10 – 12	50	in preparation
SoLid (BEL) [178]	45 – 80	3	6 – 8	10	in preparation
PROSPECT (USA) [179]	85	3, 10	7 – 12, 15 – 19	few	in preparation
NEOS (KOR) [180]	16400	1	25	10 – 23	in preparation
Neutrino-4 (RUS) [181]	100	1.5	6 – 11	10	proposal
Poseidon (RUS) [182]	100	3	5 – 8	15	proposal
Hanaro (KOR) [183]	30	0.5	6	few	proposal
CARR (CHN) [184]	60	~ 1	7, 11	few	proposal

A Proposal for a Three Detector Short-Baseline Neutrino Oscillation Program in the Fermilab Booster Neutrino Beam arXiv:1503.01520v1



Detector	Distance from BNB Target	LAr Total Mass	LAr Active Mass
LAr1-ND	110 m	220 t	112 t
MicroBooNE	470 m	170 t	89 t
ICARUS-T600	600 m	760 t	476 t

Проекты и Эксперименты

Accelerator Decay-in-Flight:

TAUP Presentations: [Talks](#) [Posters](#)

Fermilab Short-Baseline (SBND, MicroBooNE ([Toups](#)), ICARUS ([Varanini](#)))
T2K Near Detector nuSTORM

Accelerator Decay-at-Rest:

OscSNS IsoDAR KDAR/KPipe

Reactor Experiments:

Nucifer Stereo ([Haser](#)) Solid ([Yarmia](#))
DANSS POSIDON Neutrino-4
CARR Korean SBL Prospect ([Heeger](#))
NuLAT CHANDLER ...

Radioactive Neutrino Sources:

SOX ([Vivier](#)) LZ-Cr ([McKinsey](#)) RICCOCHET

Sterile Searches that are not Short-Baseline:

OPERA ([Di Crescenzo](#)) IceCube ([Salvado](#)) SHiP ([De Serio](#))
MINOS+ ([Holin](#)) Plank ([Lattanzi](#)) KATRIN ([Mertens](#))