



Регистрация солнечных CNO нейтрино в эксперименте Борексино.

А.В. Дербин

Петербургский институт ядерной физики

Содержание

1. Потоки и спектры солнечных нейтрино в CSM

*pp-, ${}^7\text{Be}$ -, ${}^8\text{B}$ -, *рер*-, *гер*- и CNO*

2. Детекторы солнечных нейтрино

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

3. Измеренные потоки и осцилляционное LMA-MSW решение

Δm^2_{12} , θ_{12} , P_{ee}

4. Детектор Борексино

энергия, координаты события, фон

5. Результаты Борексино по солнечным нейтрино.

*${}^7\text{Be}$ -нейтрино, ${}^8\text{B}$ -нейтрино, *рер*-нейтрино, *pp*-нейтрино, CNO
ассиметрия день/ночь, временные вариации*

6. CNO нейтрино

*Корреляции с *рер*-нейтрино и ${}^{210}\text{Bi}$, потоки, содержание C+N*

7. Измерение бета-спектра ${}^{210}\text{Bi}$

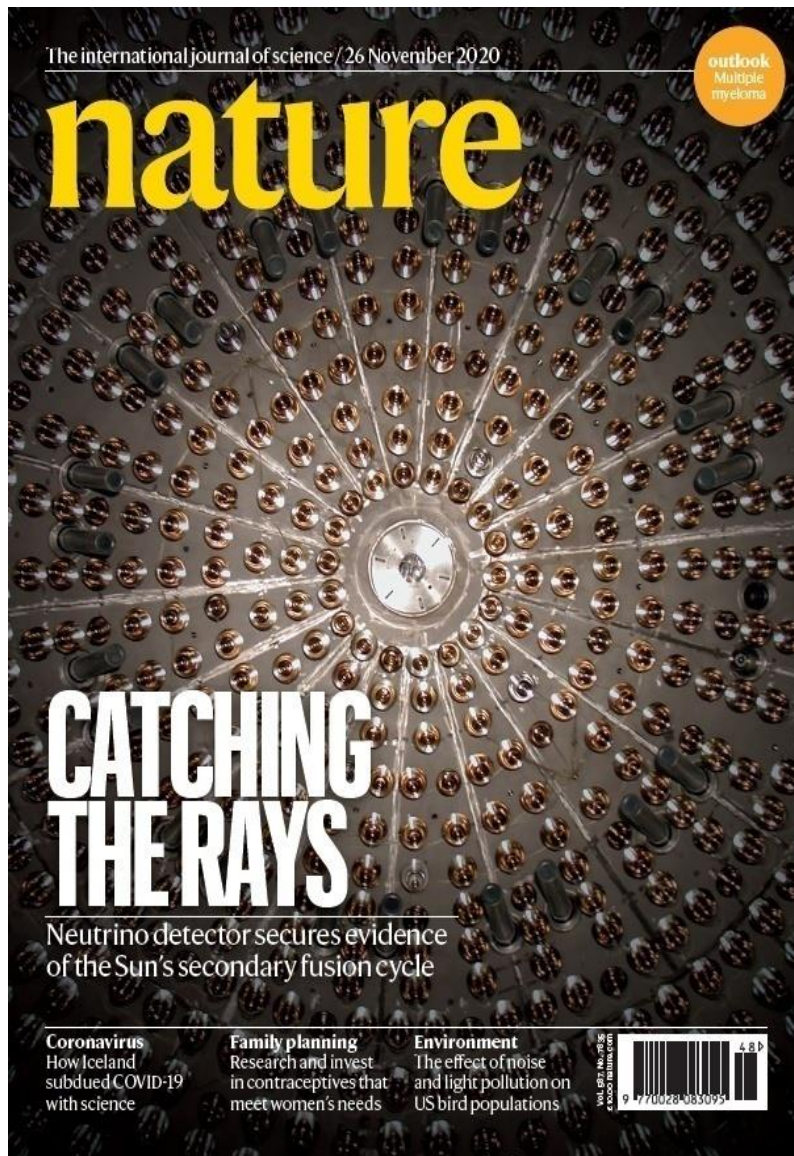
Два типа бета-спектрометров, разработанных в ПИЯФ

8. Результат для CNO- ν 2022 г. перспективы и заключение

9. Редкие процессы и корреляции с транзиентными источниками

Магнитный момент, аксионы, принцип Паули, тяжелое стерильное нейтрино, процессы с $\Delta B = \pm 1, 2, 3$, распад электрона, гео-нейтрино. Гамма-всплески, солнечные вспышки, гравитационные волны, быстрые радиовсплески, астрофизические нейтрино

Регистрация CNO-нейтрино (Nature, 2020)



Article

Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0> The Borexino Collaboration*

M. Agostini^{1,2}, K. Altenmüller², S. Appel², V. Atroshchenko³, Z. Bagdasarian^{4,27}, D. Basilico⁵, G. Bellini⁵, J. Benziger⁶, R. Blondi⁷, D. Bravo^{5,28}, B. Caccianiga⁵, F. Calaprice⁸, A. Caminata⁹, P. Cavalcante^{10,29}, A. Chepurinov¹¹, D. D'Angelo⁵, S. Davini⁹, A. Derbin¹², A. Di Giacinto⁷, V. Di Marcello⁷, X. F. Ding⁸, A. Di Ludovico⁸, L. Di Noto⁹, I. Drachnev¹², A. Formozov^{5,13}, D. Franco¹⁴, C. Galbiati^{8,15}, C. Ghiano⁷, M. Glammarchi⁵, A. Goretti^{8,29}, A. S. Göttel^{4,16}, M. Gromov^{11,13}, D. Guffanti¹⁷, Aldo Ianni⁷, Andrea Ianni⁸, A. Jany¹⁸, D. Jeschke², V. Kobychyev¹⁹, G. Korga^{20,21}, S. Kumaran^{4,16}, M. Laubenstein⁷, E. Litvinovich^{3,22}, P. Lombardi⁵, I. Lomskeya¹², L. Ludhova^{4,16}, G. Lukyanchenko³, L. Lukyanchenko³, I. Machulin^{3,22}, J. Martyn¹⁷, E. Meroni⁵, M. Meyer²³, L. Miramonti⁵, M. Misiaszek¹⁸, V. Muratova¹², B. Neumair², M. Nieslony¹⁷, R. Nugmanov^{3,22}, L. Oberauer², V. Orekhov¹⁷, F. Ortica²⁴, M. Pallavicini⁹, L. Papp², L. Pelicci⁵, Ö. Penek^{4,16}, L. Pietrofaccia⁸, N. Pilipenko¹², A. Pocar²⁵, G. Raikov³, M. T. Ranalli⁷, G. Ranucci⁵, A. Razeto⁷, A. Re⁵, M. Redchuk^{4,16}, A. Romani²⁴, N. Rossi¹⁷, S. Schönert², D. Semenov¹², G. Settanta⁴, M. Skorokhvatov^{3,22}, A. Singhal^{4,16}, O. Smirnov¹³, A. Sotnikov¹³, Y. Suvorov^{3,7,30}, R. Tartaglia⁷, G. Testera⁹, J. Thurn²³, E. Unzhakov¹², F. L. Villante^{7,26}, A. Vishneva¹³, R. B. Vogelaar¹⁰, F. von Felitzsch², M. Wojcik¹⁸, M. Wurm¹⁷, S. Zavatarelli⁹, K. Zuber²³ & G. Zuzel¹⁸

95 авторов, 22 РФ, 7 ПИЯФ

Регистрация CNO-нейтрино (EPJ C, 2020)

The European Physical Journal

volume 80 · number 11 · november · 2020

EPJ C



Recognized by European Physical Society

Particles and Fields



Internal view of the Borexino liquid scintillator containment liquid scintillator vessel. From the photo several parts of the detector are visible: the photomultipliers (silver-like color), the mu-metal shielding (brass-like color), the bottom of the outer nylon vessel (upper part of the photo).

From the Borexino collaboration on: Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino



Springer

Eur. Phys. J. C (2020) 80:1091

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08534-2>

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Experimental Physics

Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino

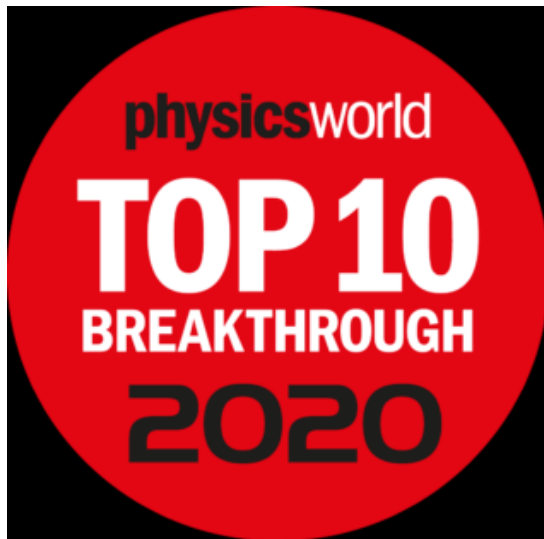
BOREXINO Collaboration^a

M. Agostini¹, K. Altenmüller¹, S. Appel¹, V. Atroshchenko², Z. Bagdasarian^{3,d}, D. Basilico⁴, G. Bellini⁴, J. Benziger⁵, R. Blondi⁶, D. Bravo^{4,e}, B. Caccianiga⁴, F. Calaprice⁷, A. Caminata⁸, P. Cavalcante^{9,f}, A. Chepurinov¹⁰, D. D'Angelo⁴, S. Davini⁸, A. Derbin¹¹, A. Di Giacinto⁶, V. Di Marcello⁶, X. F. Ding^{7,b}, A. Di Ludovico⁷, L. Di Noto⁸, I. Drachnev¹¹, A. Formozov^{4,12}, D. Franco¹³, C. Galbiati^{7,14}, C. Ghiano⁶, M. Giannarini⁴, A. Goretti^{7,f}, A. S. Göttel^{3,15}, M. Gromov^{10,12}, D. Guffanti¹⁶, Aldo Ianni⁶, Andrea Ianni⁷, A. Jany¹⁷, D. Jeschke¹, V. Kobayev¹⁸, G. Korga¹⁹, S. Kumaran^{3,15}, M. Laubenstein⁶, E. Litvinovich^{2,20}, P. Lombardi⁴, I. Lomskaia¹¹, L. Ludhova^{3,15}, G. Lukyanchenko², L. Lukyanchenko², I. Machulin^{2,20}, J. Martyan¹⁶, E. Meroni⁴, M. Meyer²¹, L. Miramonti⁴, M. Misiaszek¹⁷, V. Muratova¹¹, B. Neumair¹, M. Nieslony¹⁶, R. Nugmanov^{2,20}, L. Oberauer¹, V. Orekhov², F. Ortica²², M. Pallavicini⁸, L. Papp¹, Ö. Penek^{3,15}, L. Pietrofaccia⁷, N. Pillipenko¹¹, A. Pocar²³, G. Raikov², M. T. Ranalli⁶, G. Ranucci^{4,c}, A. Razeto⁶, A. Re⁴, M. Redchuk^{3,15}, A. Romani²², N. Rossi⁶, S. Schönert¹, D. Semenov¹¹, G. Settanta³, M. Skorokhvatov^{2,20}, O. Smirnov¹², A. Sotnikov¹², Y. Suvorov^{2,6,g}, R. Tartaglia⁶, G. Testera⁸, J. Thurn²¹, E. Unzhakov¹¹, F. L. Villante^{6,24}, A. Vishneva¹², R. B. Vogelaar⁹, F. von Feilitzsch¹, M. Wojcik¹⁷, M. Wurm¹⁶, S. Zavatarelli⁸, K. Zuber²¹, G. Zuzel¹⁷

95 авторов, 22 РФ, 7 ПИЯФ

Регистрация CNO-нейтрино (2016-20)

«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2020»



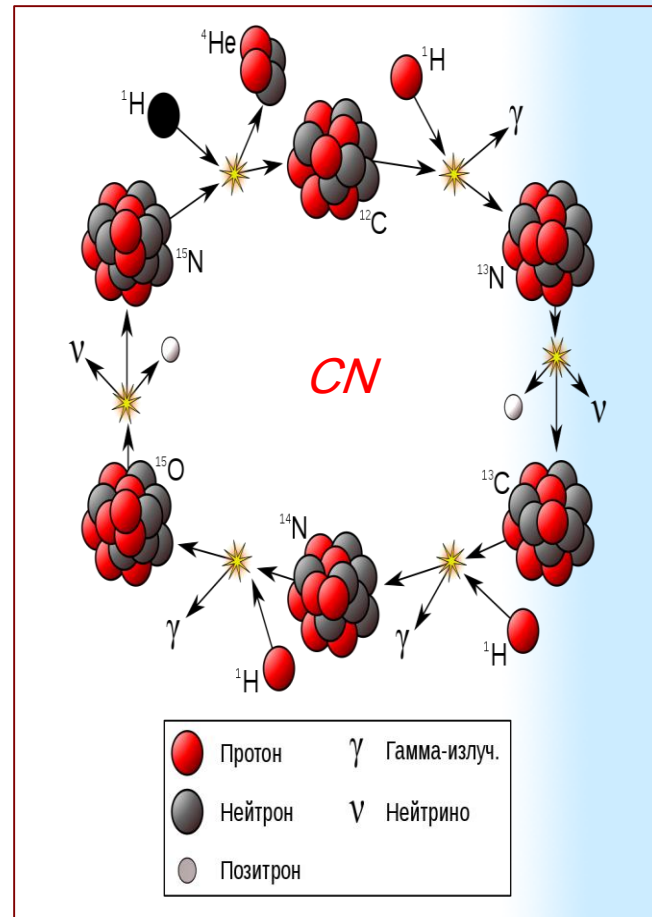
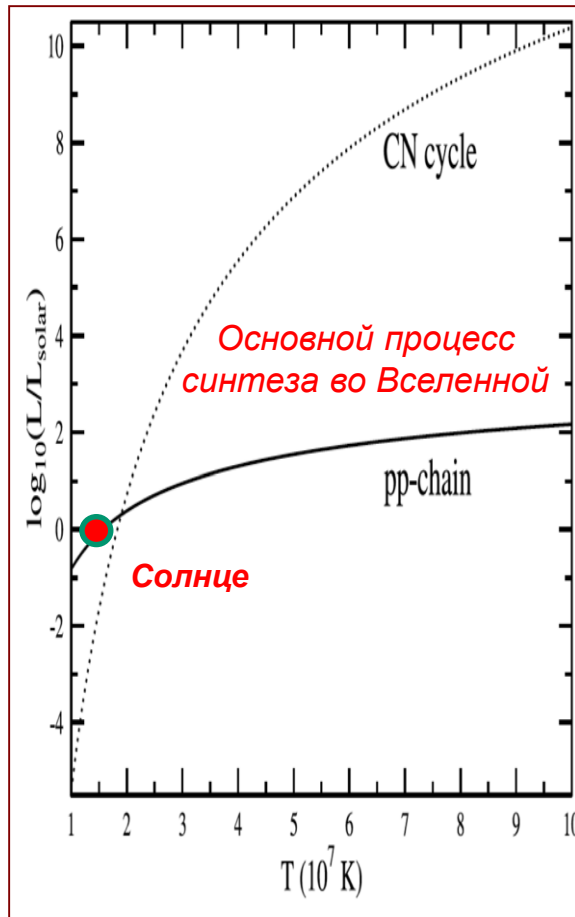
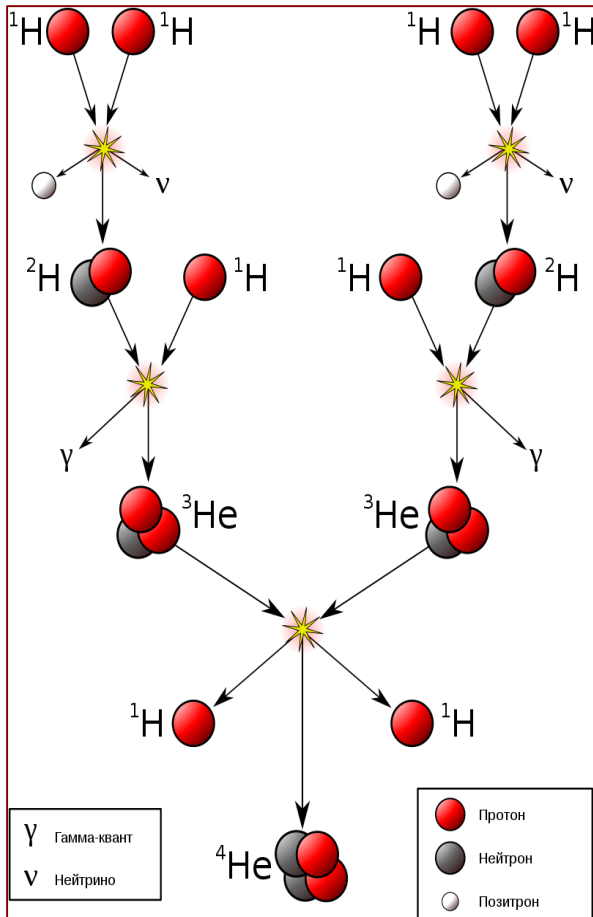
The EPS European Physical Society has awarded the prestigious "Giuseppe and Vanna Cocconi Prize 2021" to the scientific collaboration Borexino.



В 2021 году коллаборация была удостоена престижной премии Д.&В. Коккони Европейского физического общества за выдающийся вклад в астрофизику элементарных частиц и космологию, а именно, за новаторское наблюдение солнечных нейтрино из pp-цепочки и CNO-цикла.

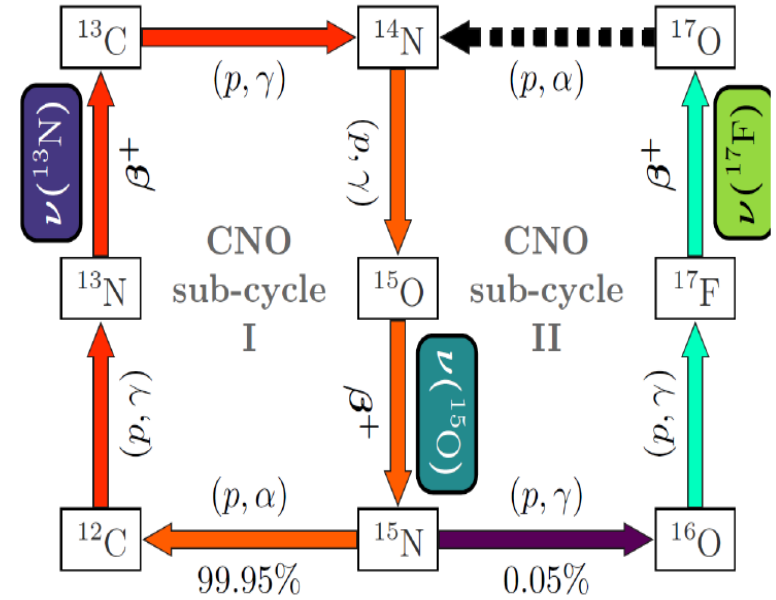
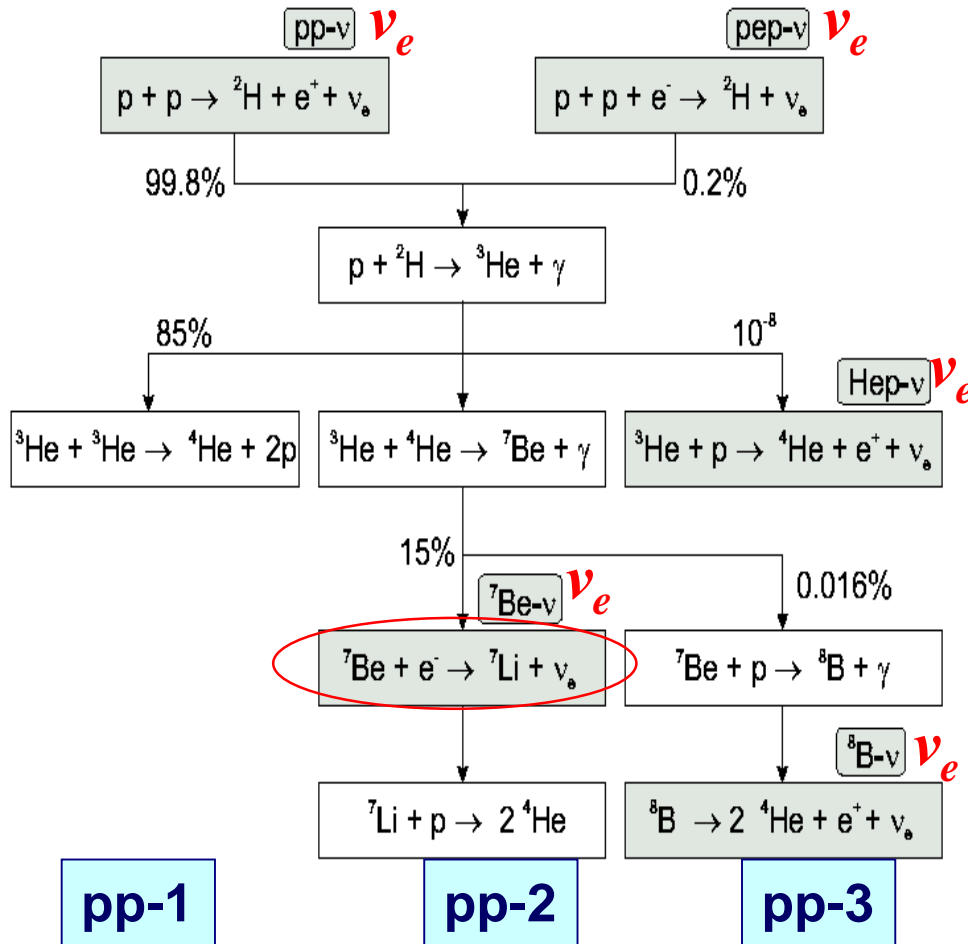
Важный результат, который был включен в 10 прорывных результатов 2020 года во всех разделах физики. В 2021 коллаборация получила премию Д. и В. Коккони, в существенной степени за результат для CNO-нейтрино.

pp-цепочка и CNO-цикл



Ядерный синтез H в He в звездах происходит посредством двух процессов: **pp-цепи**, включающей изотопы H и He, и **цикла углерод-азот-кислород (CNO)**, в котором синтез катализируется ядрами C, N и O. CNO цикл производит лишь 1% энергии Солнца, но для более массивных и горячих звезд этот цикл является определяющим, так уже для звезд с массой 1.3 Солнца, он отвечает за $\frac{1}{2}$ всей вырабатываемой энергии. CNO-цикл был предсказан теоретически и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения.

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

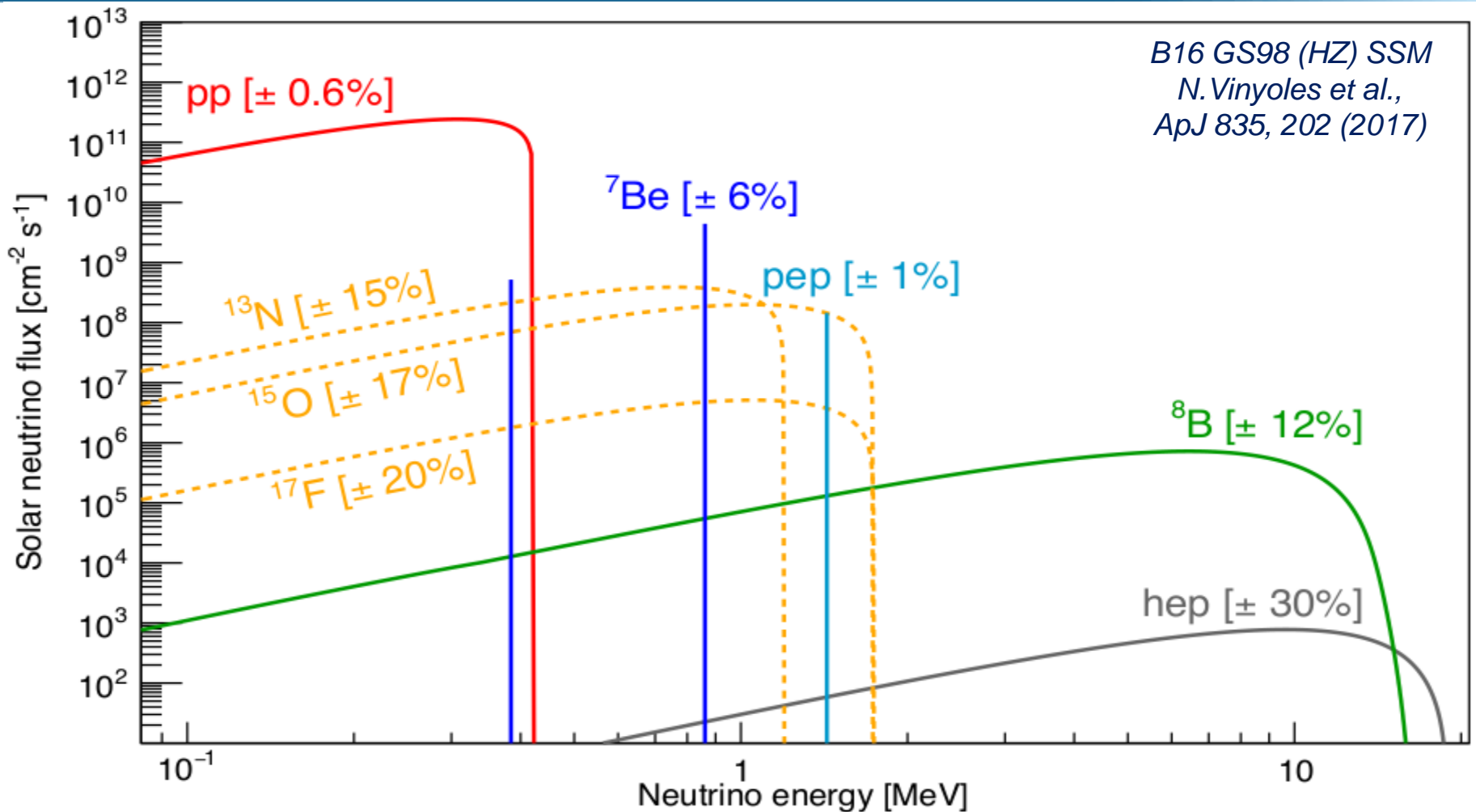


${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$
 ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$
 ${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$

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

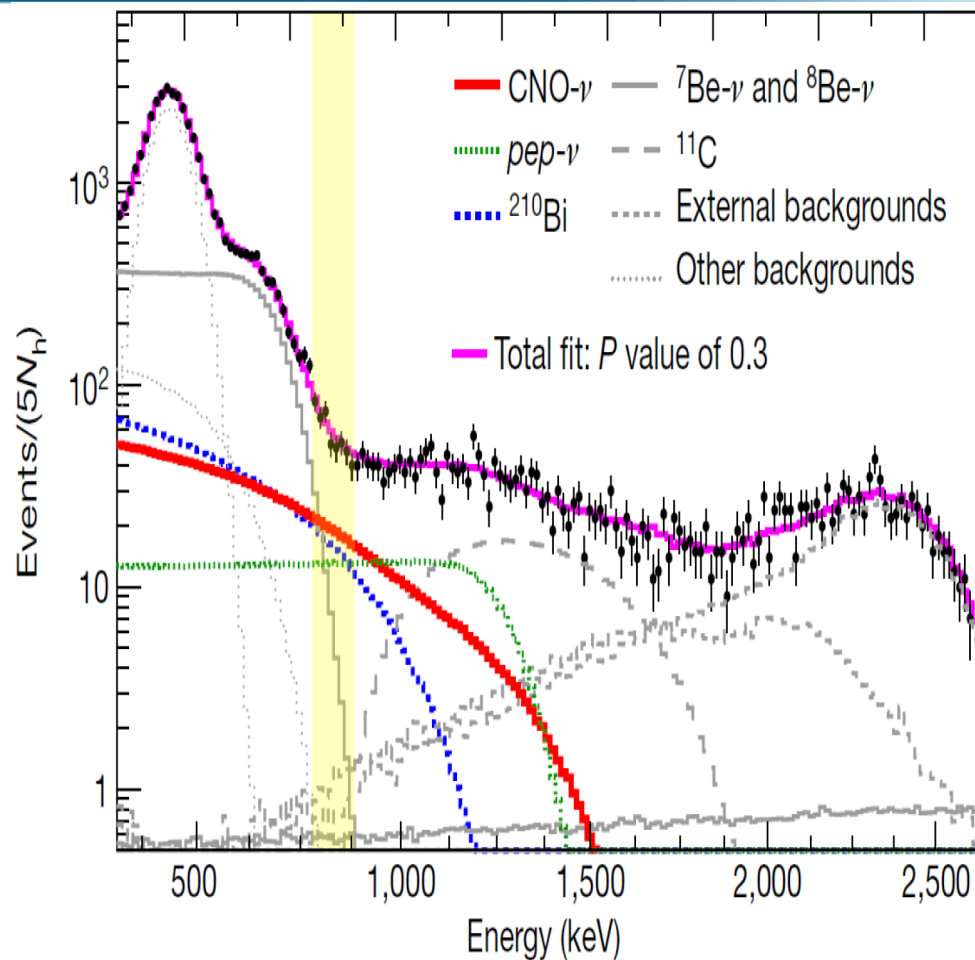
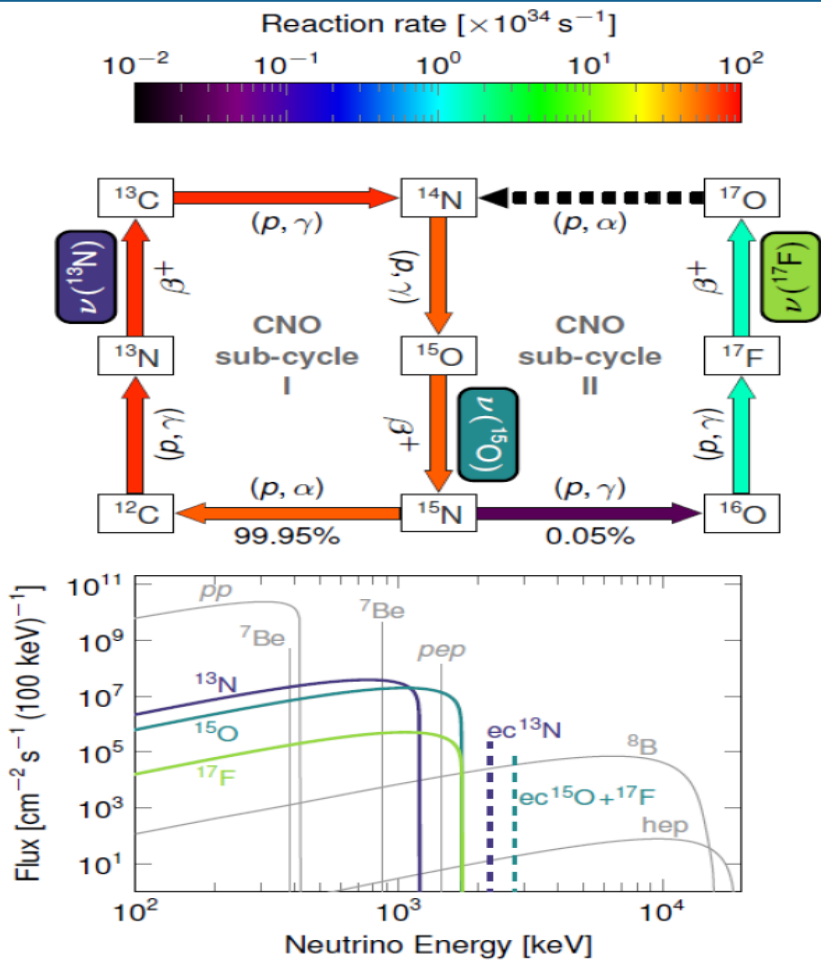
Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Полная выделяемая энергия 26.7 МэВ, из которой 0.6 МэВ уносят нейтрино. 99% энергии производится в pp-цепи, и менее 1% дает CNO-цикл

Спектры солнечных нейтрино



В *pp*-цепочке испускается 5 нейтрино, в *CNO-цикле* основные потоки нейтрино связаны с β^+ -распадами ядер ^{13}N , ^{15}O и ^{17}F (ЕС присутствует). Наиболее интенсивный поток *pp*-нейтрино составляет $6 \times 10^{10} \text{ v/cm}^2 \text{ сек}$, ^7Be – 5×10^9 , ^8B – 6×10^6 , *CNO* – $(2-3) \times 10^8$, реактор $\sim 10^{13} \text{ v/cm}^2 \text{ сек}$.

Регистрация CNO-нейтрино

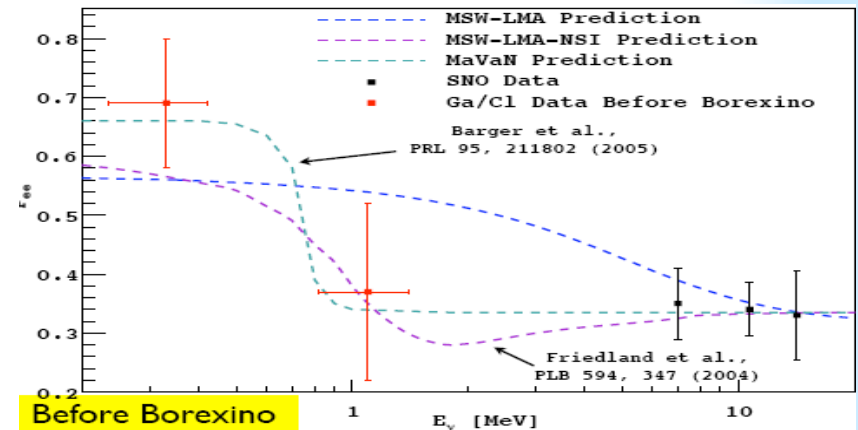
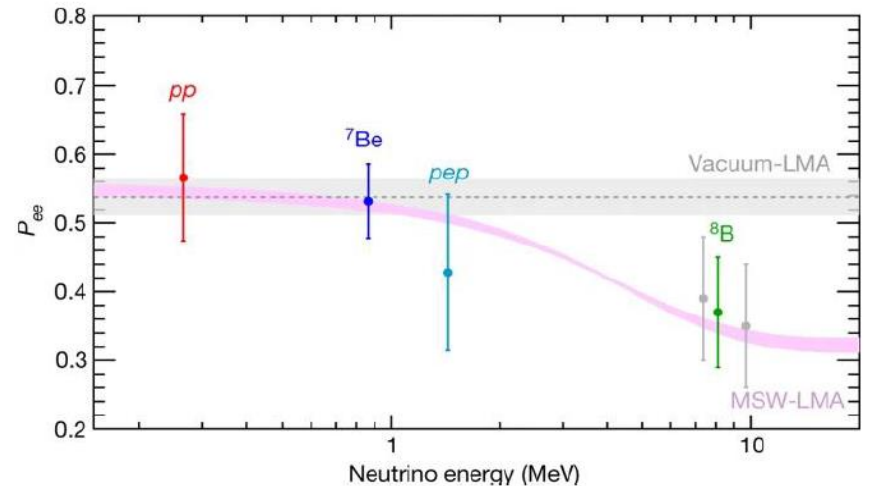


CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей астрофизики, был предсказан теоретически в 1938 г. к. Вайцзеккером, даже раньше чем pp -цепочка (Х. Бете), и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения. Сложность измерения CNO-нейтрино заключается в том, что нейтрино имеют непрерывный спектр, их поток мал, а спектр электронов отдачи коррелирует с фоновым спектром ^{210}Bi и спектром от рассеяния pep -нейтрино.

Значение CNO-нейтрино

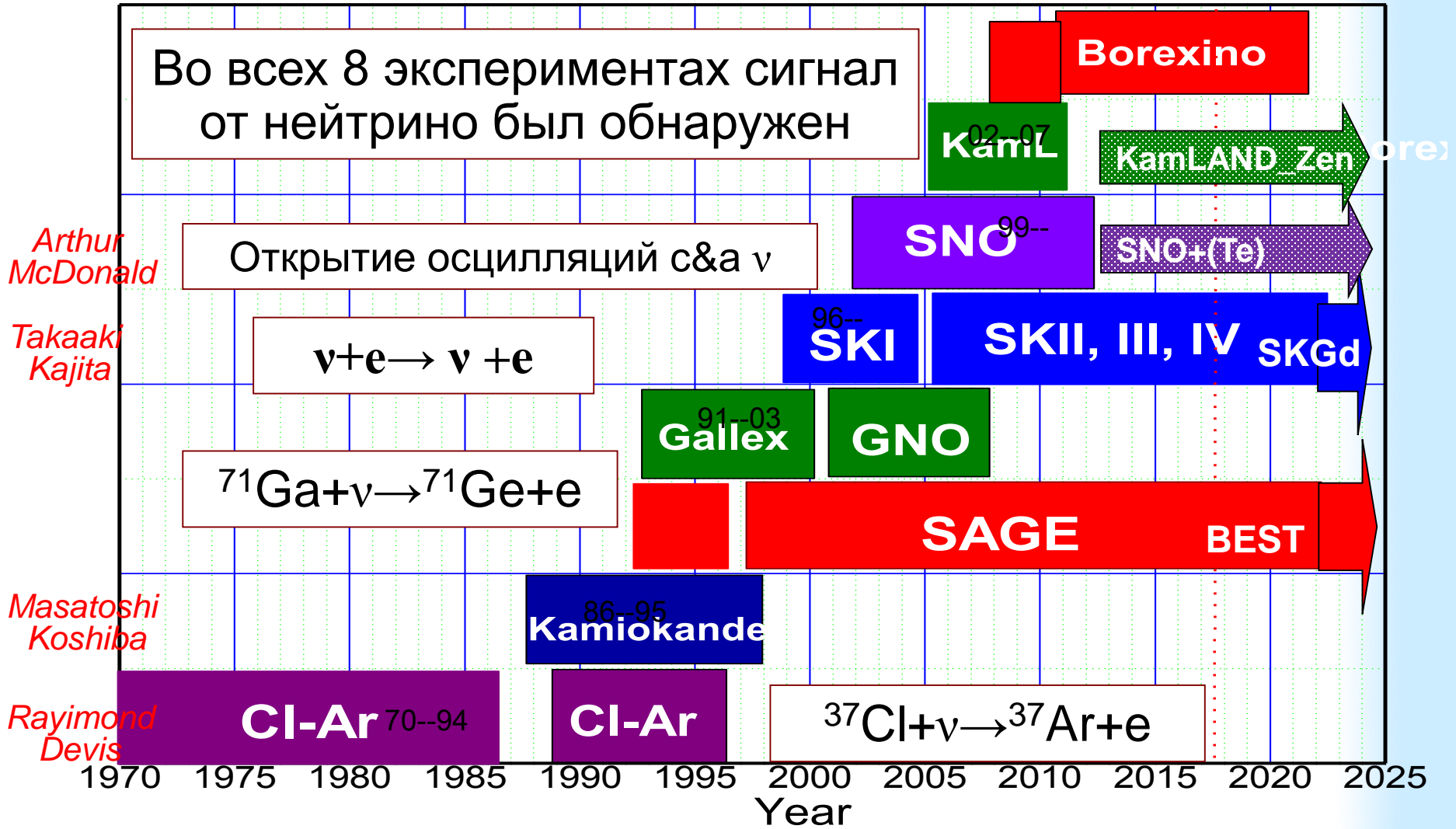
FLUX	B16-GS98	B16-AGSs09met	DIFF. (HZ-LZ)/HZ
pp ($10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.98(1±0.006)	6.03(1±0.005)	-0.8%
pep ($10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.44(1±0.01)	1.46(1±0.009)	-1.4%
^7Be ($10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	4.94(1±0.06)	4.50(1±0.06)	8.9%
^8B ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.46(1±0.12)	4.50(1±0.12)	17.6%
^{13}N ($10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2.78(1±0.15)	2.04(1±0.14)	26.6%
^{15}O ($10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2.05(1±0.17)	1.44(1±0.16)	29.7%
^{17}F ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.29(1±0.20)	3.26(1±0.18)	38.3%

N. Vinyoles et al., *Astrophys. J.* 836 (2017) 202



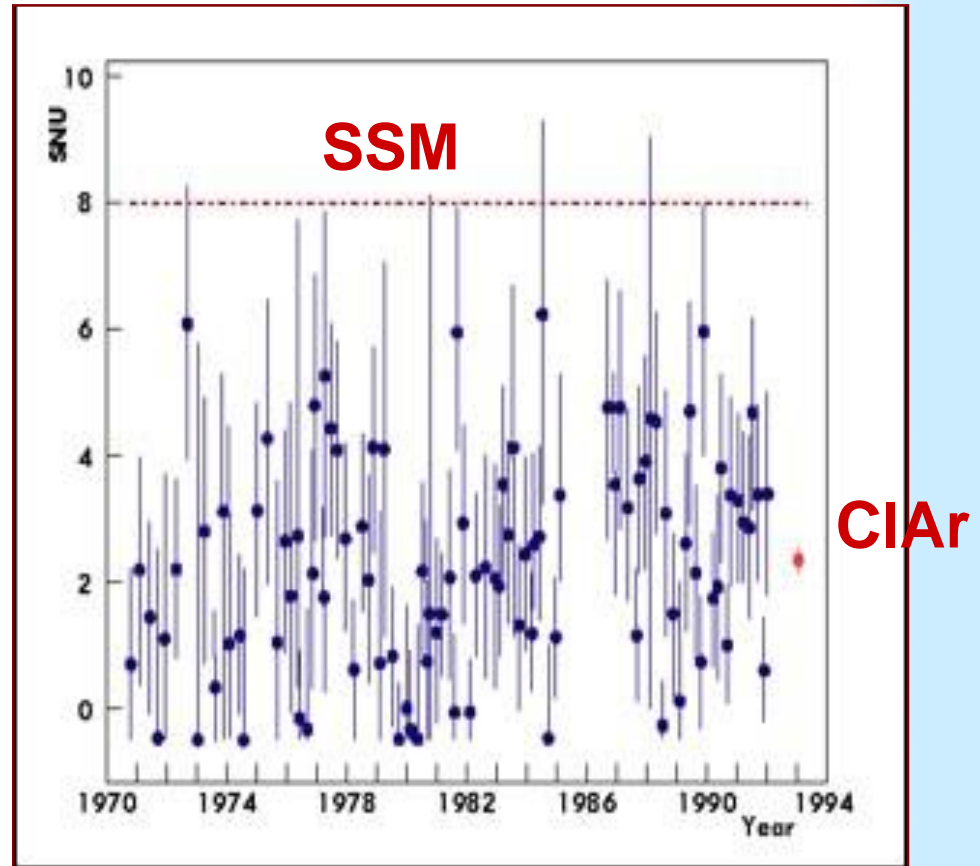
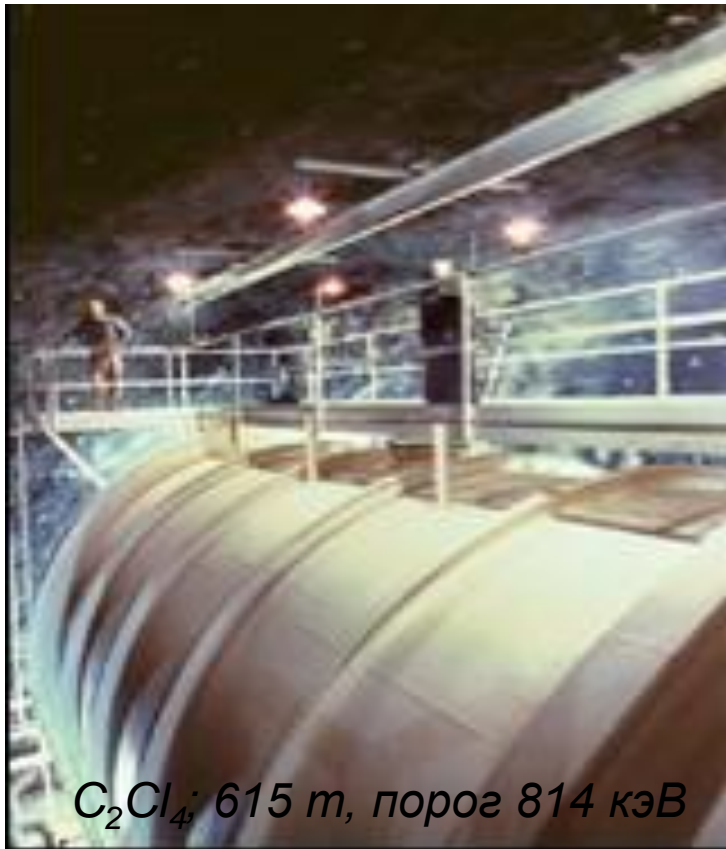
CNO играет ключевую роль в **астрофизике**, являясь основным источником энергии в более массивных и горячих звездах. Изучение CNO цикла важно для **физики Солнца**, поскольку потоки CNO нейтрино наиболее сильно зависят от металличности. Две канонические модели. Потоки нейтрино из pp-цепочки зависят от Z/X косвенным образом через T . Различие LZ (1.8%) и HZ (2.3%) - 9% (^7Be) и 18% (^8B) и достигает 30-40% для CNO-ν. Энергия нейтрино лежит в переходной области между вакуумными осцилляциями и осцилляциями в веществе.

Хронология детекторов солнечных нейтрино



Солнечные нейтрино регистрировались 3-мя радиохимическими и 5 RT детекторами

$\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ детектор, Homestake



1. Измеренная скорость образования ${}^{37}\text{Ar}$ (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 $\Delta m^2 = 10^{-4} \div 10^{-8}$ 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 $\sin^2 2\theta$.

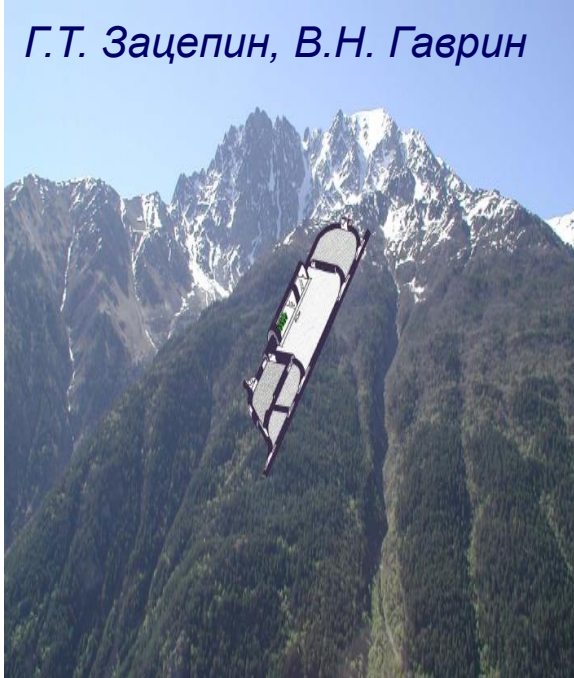
Вместе, обе работы решают проблему солнечных нейтрино

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

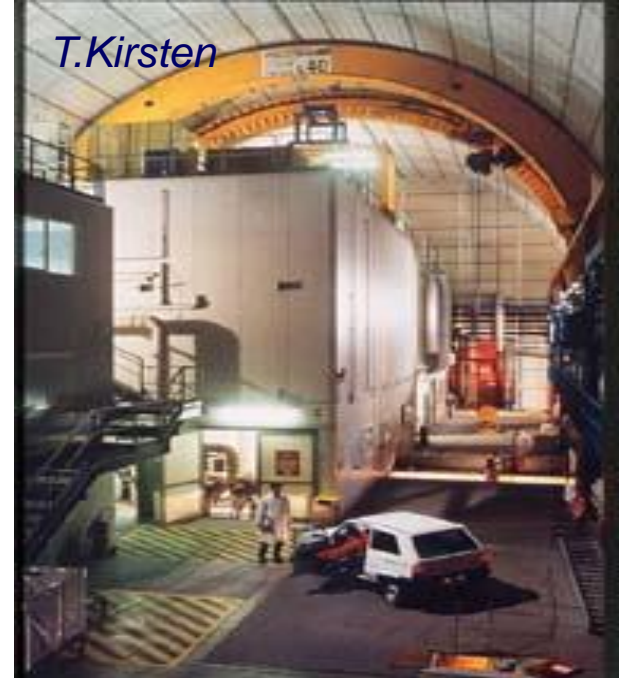
SAGE - радиохимический Ga-Ge эксперимент в Баксанской нейтринной обсерватории продолжает измерения

GALLEX/GNO в Гран Сассо 1991-2003

Г.Т. Зацепин, В.Н. Гаврин



T.Kirsten



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

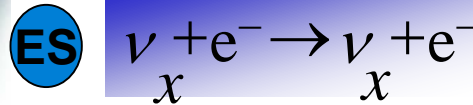
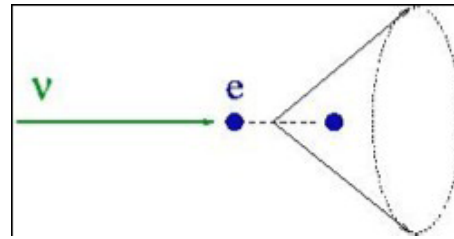
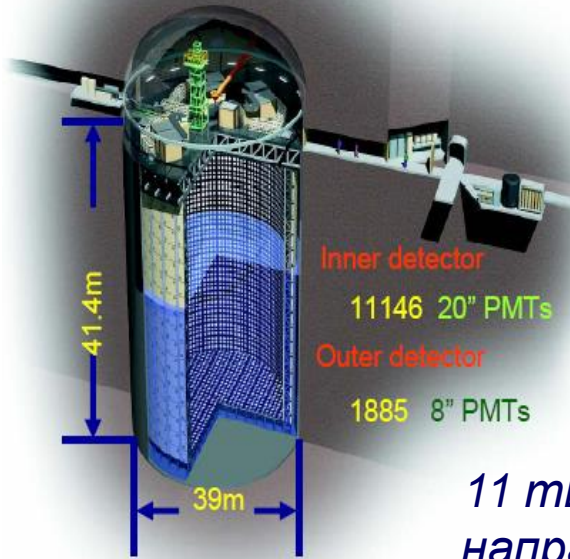
arXiv:0901.2200v3

$67.6^{+4.0}_{-4.0} \text{ } ^{+3.2}_{-3.2} \text{ SNU}$

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

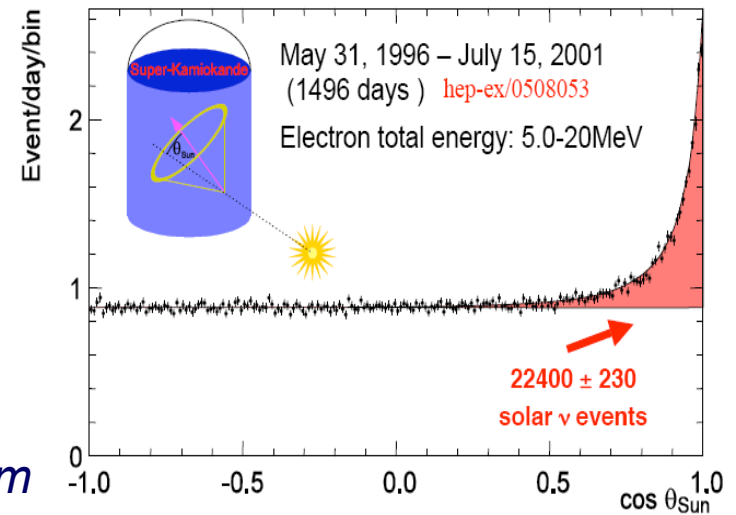
Kamiokande, S-Kamiokande – H₂O детектор

M. Koshiba and Y.Totsuka,

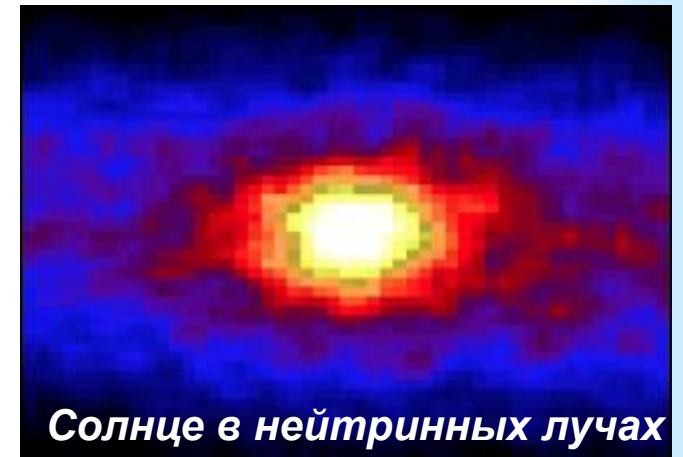
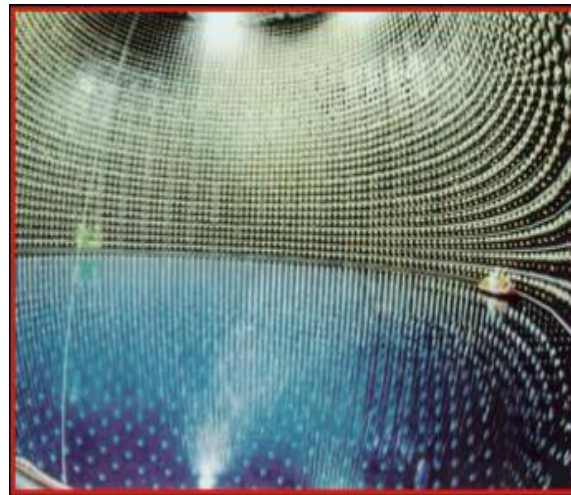
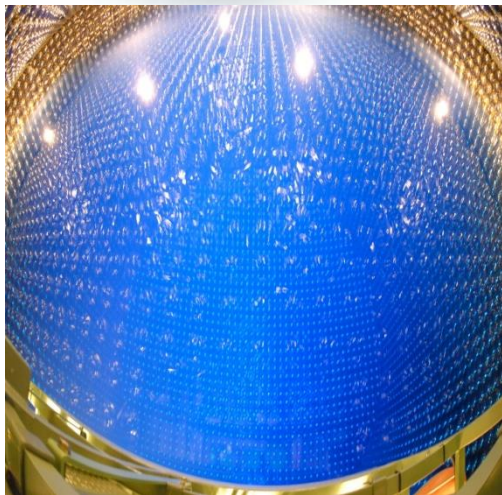


11 тыс. ФЭУ регистрируют направление и ~0.45 ССМ

SK-I: ⁸B Solar Neutrino Flux



$\phi_{ES} = 2.35 \pm 0.02 \pm 0.08 [x10^6/cm^2/s]$



KamiokaNDe (1986-1995) – 3 км, S-K (1996 - ...) 50 км, H-K (2025?) 250 км.

SNO - Sudbury Neutrino Observatory

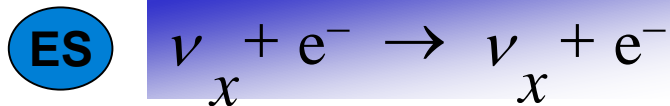
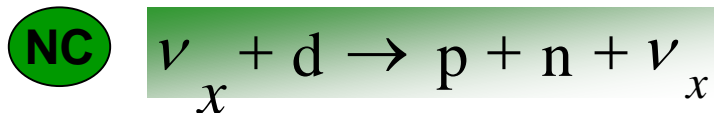
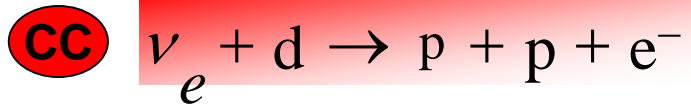
1000 тонн D_2O

9500 ФЭУ (~60% поверхности)

1700 тонн внутренняя защита H_2O

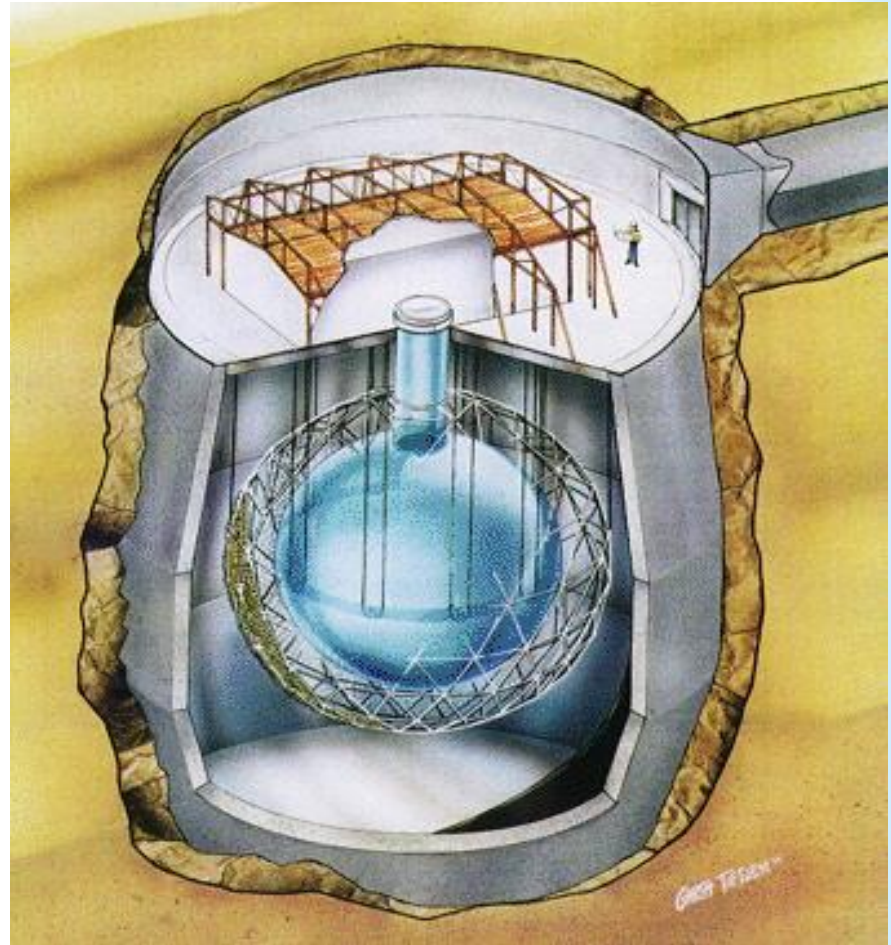
5300 тонн внешней защиты H_2O

глубина: 6000 м.в.э..



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

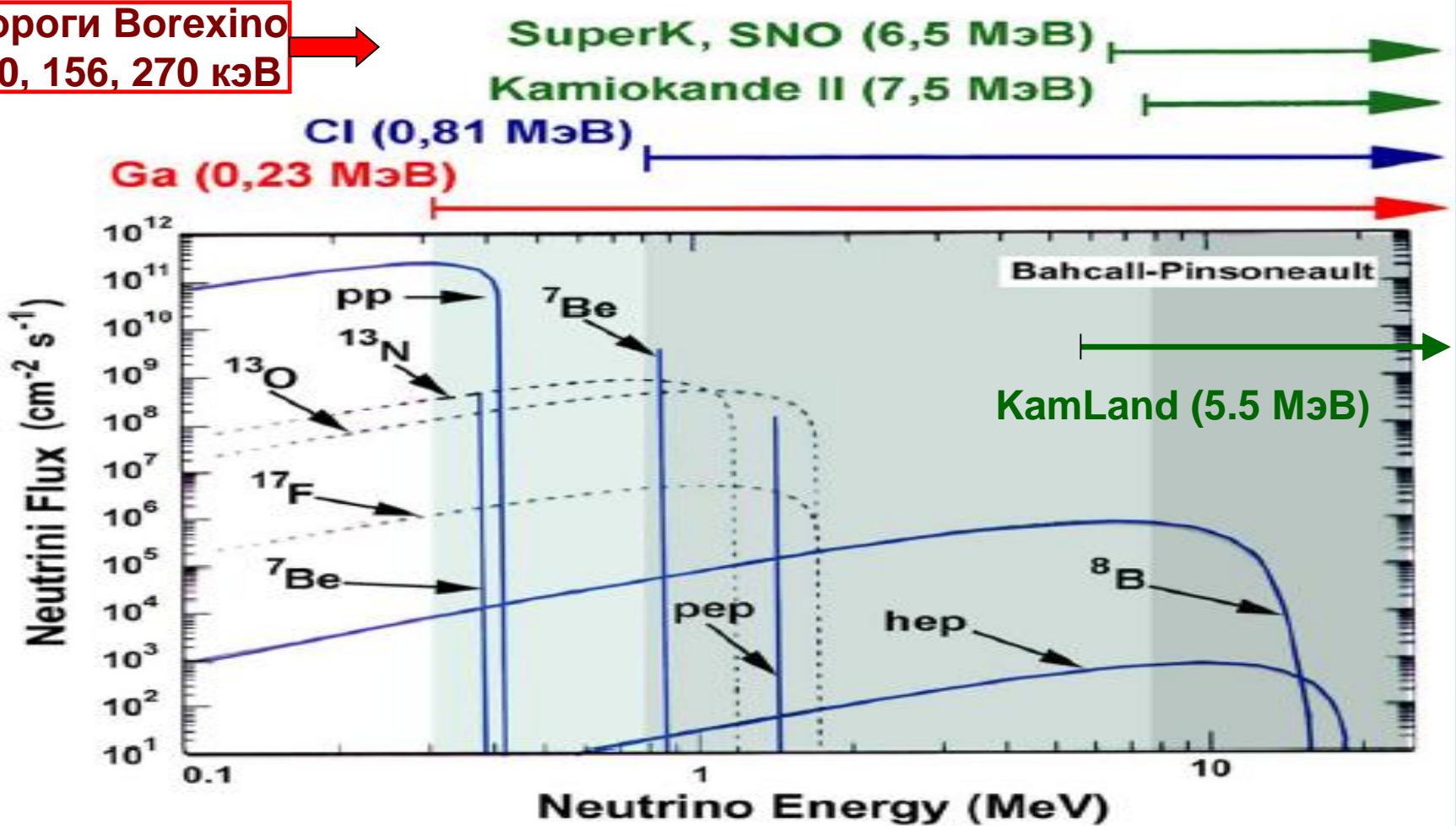
$$\phi_{NC} = (4.94 \pm 0.21_{-0.34}^{+0.38}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



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 ЗНе-вариант для п. SNO+ - ЖС детектор для поиска $0\nu\beta\beta$ -распада ^{130}Te .

Пороги регистрации и спектры нейтрино

Пороги Borexino
50, 156, 270 кэВ

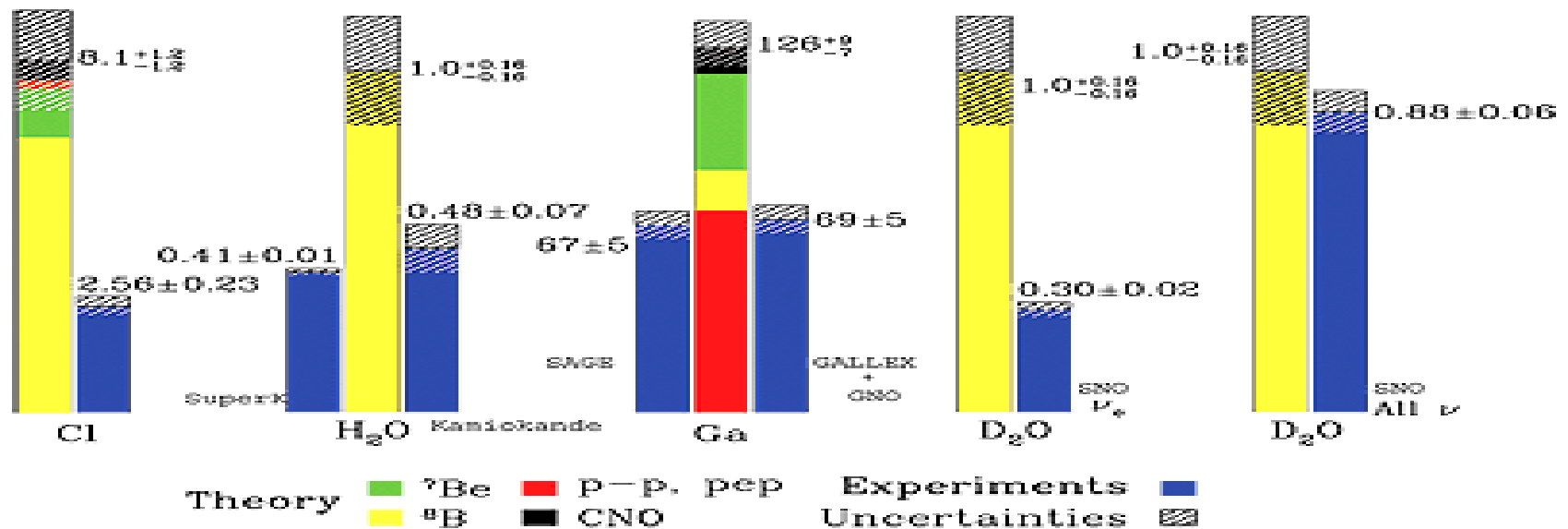


Ga-Ge и Cl-Ar детекторы с низким порогом регистрировали интегральный поток. Порог регистрации SK, SNO и KamLand более 5 (3.5) МэВ. До Борексино, SK и SNO KamLand регистрировали $\sim 10^4$ потока солнечных ν .

Проблема солнечных нейтрино

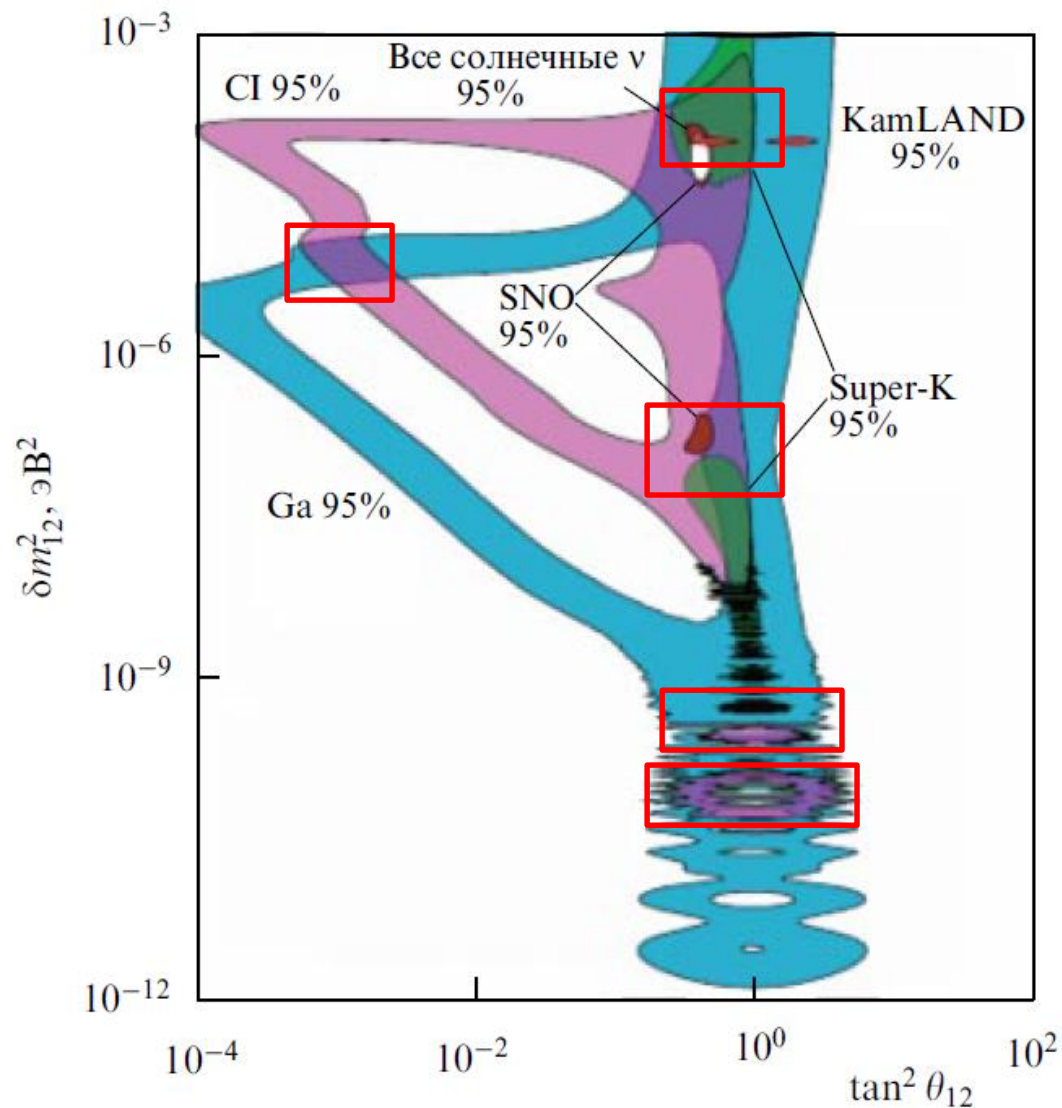
1. Поток нейтрино, измеренные Cl-Ar, Ga-Ge, SK лежат в интервале **(0.3-0.6)** от ожидаемых в ССМ и не согласуются между собой
2. Различные детекторы регистрируют разные части нейтринного спектра
3. Детекторы Cl-Ar и Ga-Ge регистрируют только электронные ν , SK регистрирует нейтрино всех типов, однако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

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



Результат SNO для нейтрального тока совпал с предсказаниями ССМ. Доля ν_e составила 1/3 от общего потока нейтрино. **8B-нейтрино.**

Осцилляционные решения для солнечных нейтрино

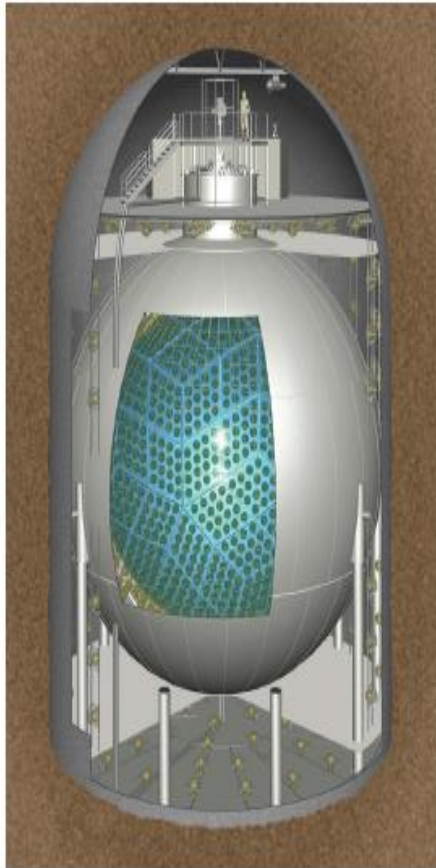


Эксперименты с
солнечными нейтрино
5 вариантов решений

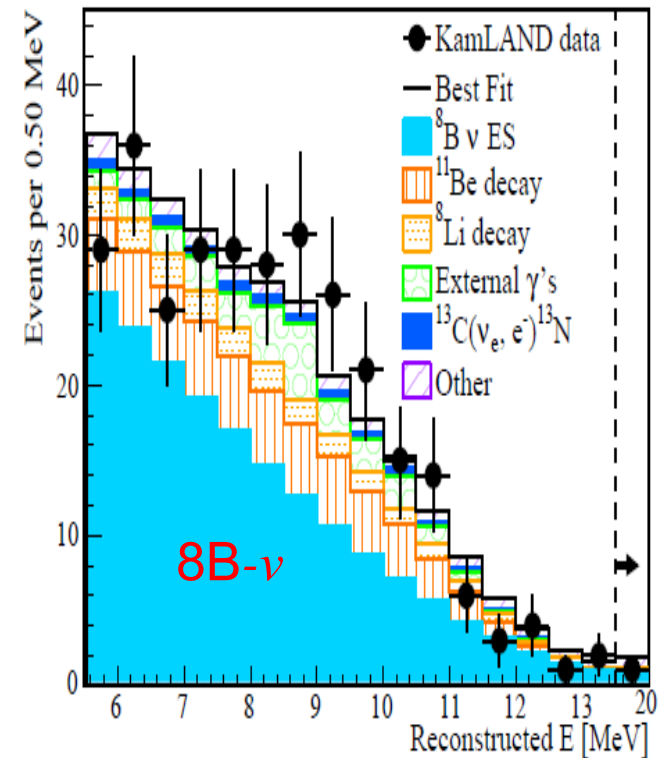
SMA
VAQ
QVO
LOW
LMA

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

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/cm^3
- Spherical balloon
 - radius: 6.5m
 - thickness: $135 \mu\text{m}$
- Stainless-steel Sphere
 - radius: 9m
 - 1879 PMTs
 - 1325 new 17" PMTs
 - 554 old 20" PMTs (Kamiokande)
- Outer detector
 - 3.2 kton water-Cherenkov



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

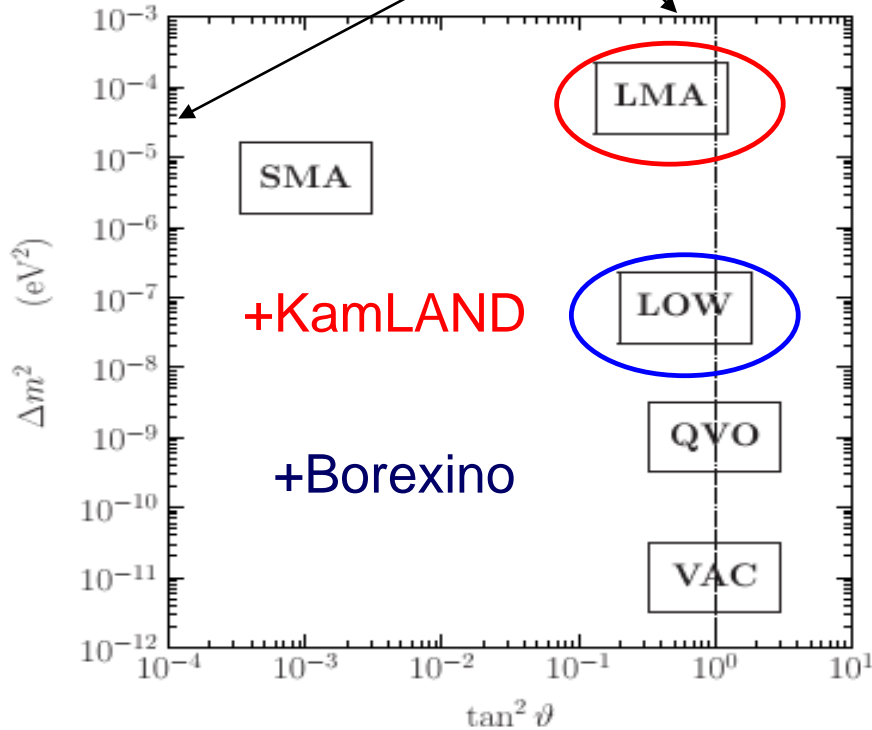
KamLAND начал измерения в январе 2002 и через 145 дней представил первый результат, который выбрал LMA решение для антинейтрино. В 2002-2007 зарегистрировал 8B -нейтрино (2011). KamLAND-Zen - $0\nu\beta\beta$ -распад ^{136}Xe $m_{\text{veff}} < (36-156) \text{ мэВ}$ (90% УД). Область ОИ. 2203.02139 (16 фев 2023).

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

Осцилляции в вакууме Понтекорво-Маки-Накагава-Саката

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

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

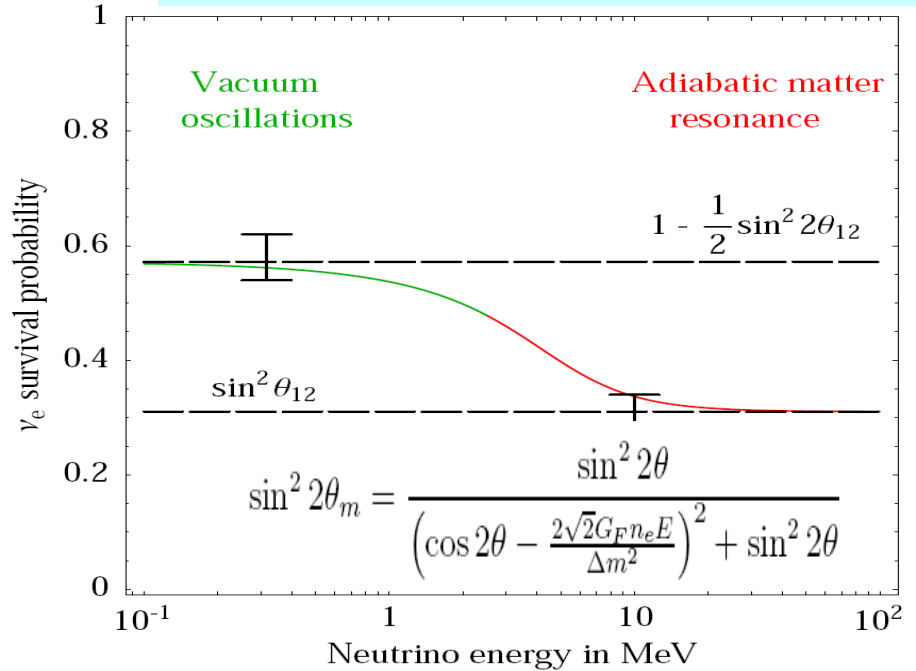


$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta_{12} + \nu_2 \sin \theta_{12}$$

Амплитуда = $\sin^2 2\theta_{12}$

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

В веществе Солнца Михеев-Смирнов-Вольфенштейн



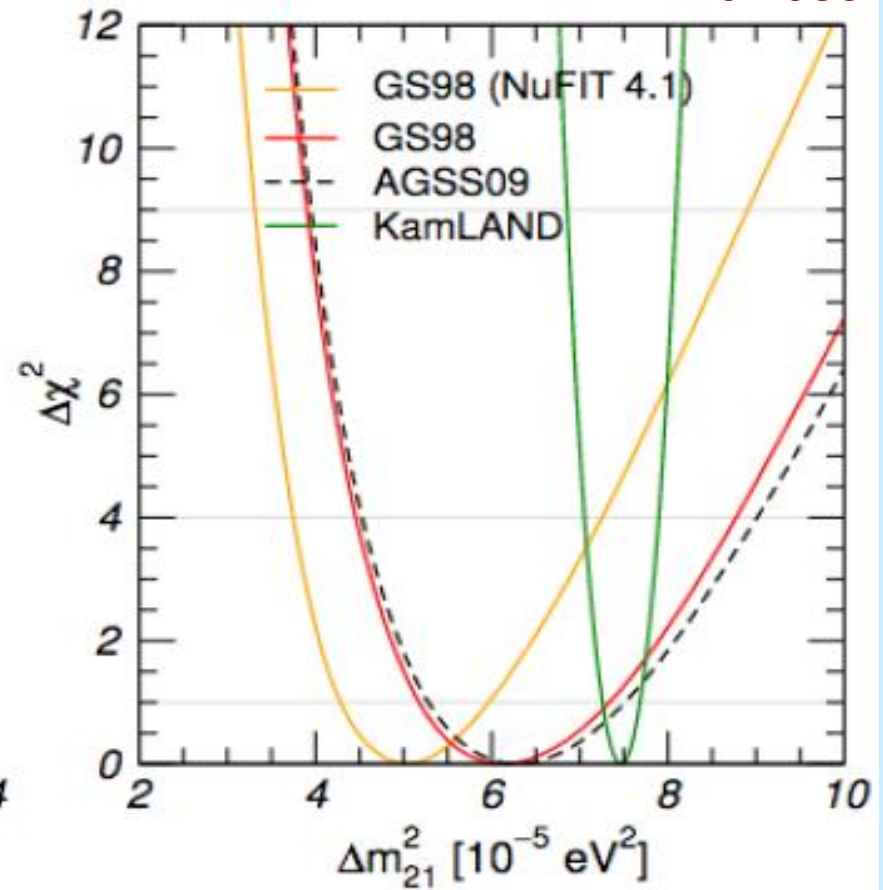
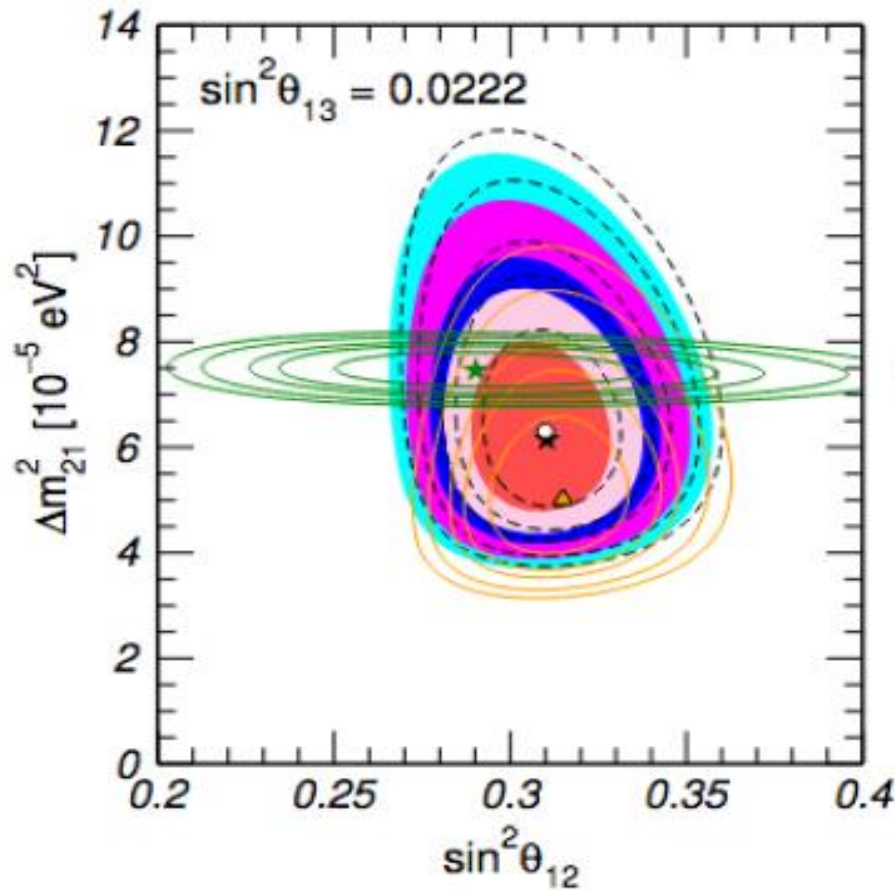
$P_{ee} \equiv P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \sim 56 \pm 6 \% \text{ (pp- } \nu)$.

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

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

Δm^2_{12} и $\sin^2\theta_{12}$ для солнечных и реакторных ν

2107.08613



Области разрешенных значений осцилляционных параметров из данных по солнечным нейтрино (для HZ и LZ) и KamLAND (зеленые кривые). Показаны контуры 1 σ , 90%, 2 σ , 99%, 3 σ . Небольшое расхождение 1.5 σ , возможно, связано с эффектом день/ночь и будет проверено с детектором S-K_Gd, способным регистрировать реакторные нейтрино.



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.

Vorexino: 1990 - 1995 – 2007 – 2017 - 2022

1990 – предложен проект
1995- построен прототип CTF
2001 – первые результаты CTF
2004 – изменение инфраструктуры
2007 – начало измерений
2007- 2010 – Фаза 1
(7Be , per- , 8B-v)
2010-11 – калибровка и очистка
2012 - 2017 Фаза 2
(pp , 7Be , per , 8B , $\text{CNO}<X$)
2018 - 2022 CNO/SOX Фаза 3 (CNO)



Bruno Pontecorvo
Award 2016



Enrico Fermi
Award 2017

«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2014»
«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2020»



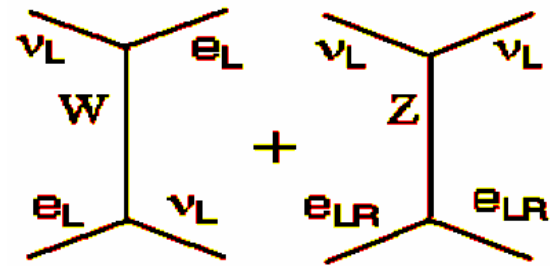
R&D CTF Утверждение Останов ФАЗА I Калиб. Очистка ФАЗА II ФАЗА III

1990 1995 1997 2002 2007 2010 2012 2017 2022

Основная задача Борексино:

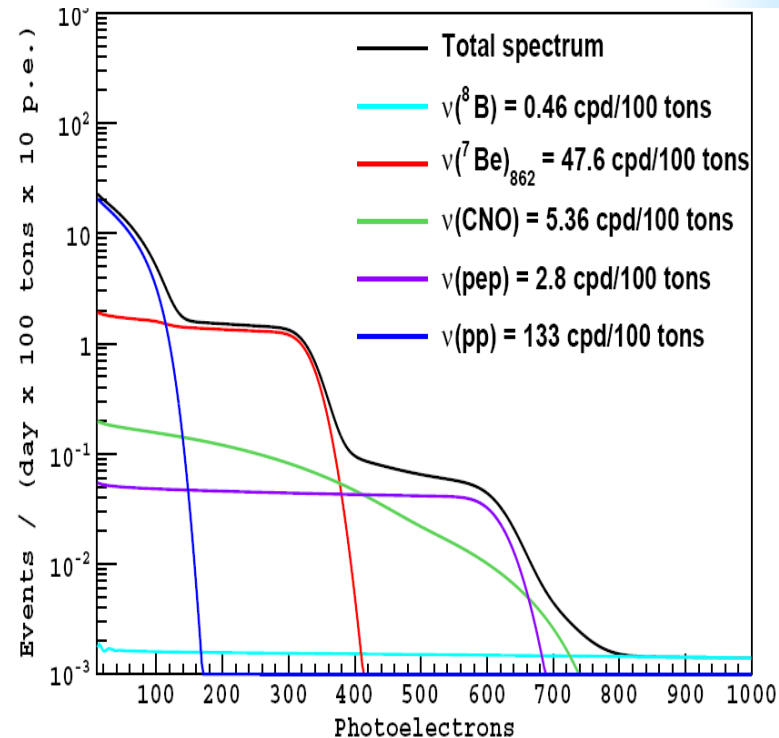
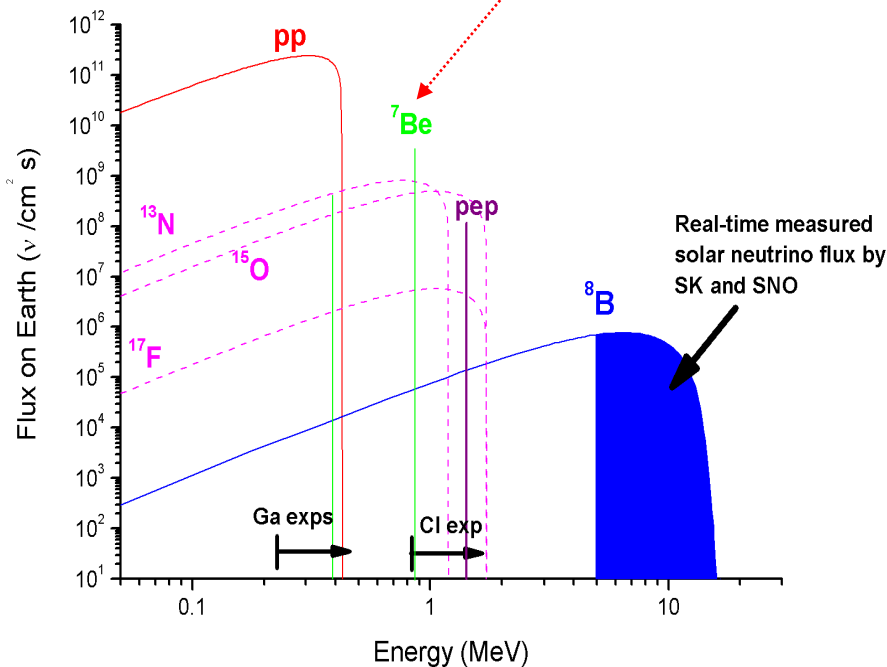
Регистрация упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроне.

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 электроне

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

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:

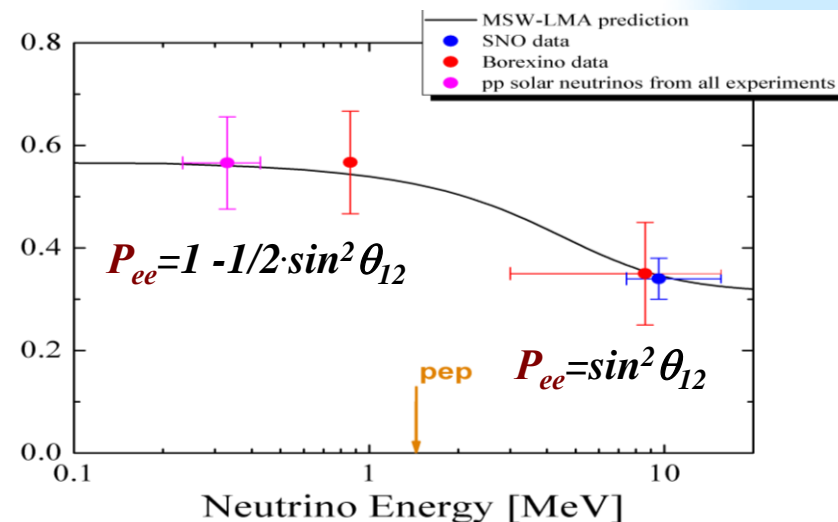
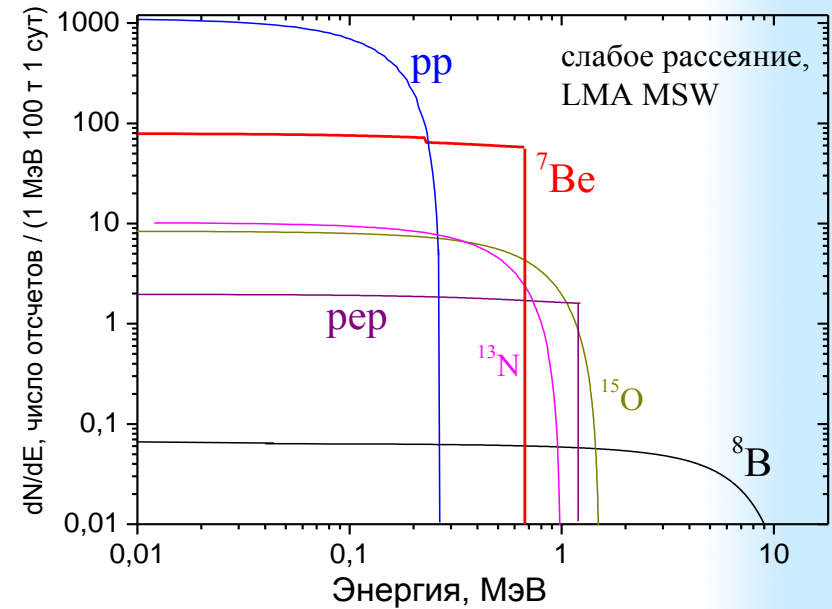
$$g_L = 1/2 + \sin^2 \theta_W, \quad g_R = \sin^2 \theta_W \quad \text{для } \nu_e \text{ (W+Z)}$$

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

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

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 РС+РРО 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.

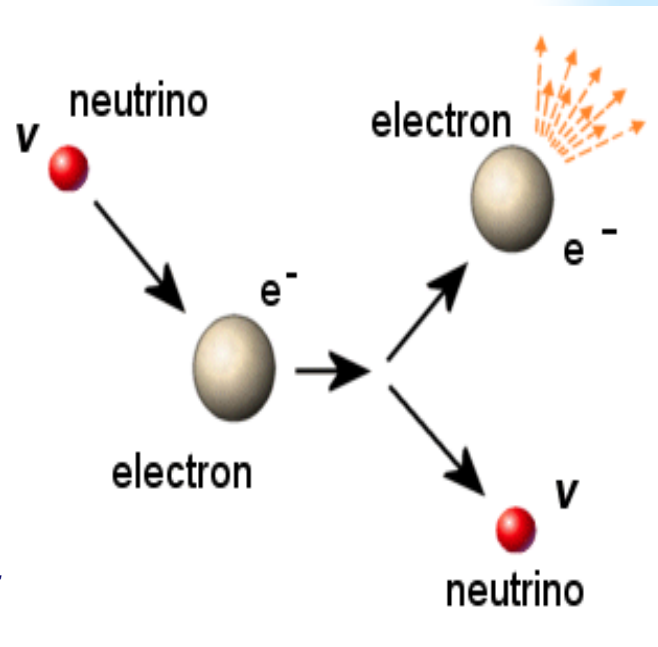
14 см при энергии 1 МэВ

4) Возможность α/β дискриминации

ОДНАКО...

-1) невозможно определить направление нейтрино;

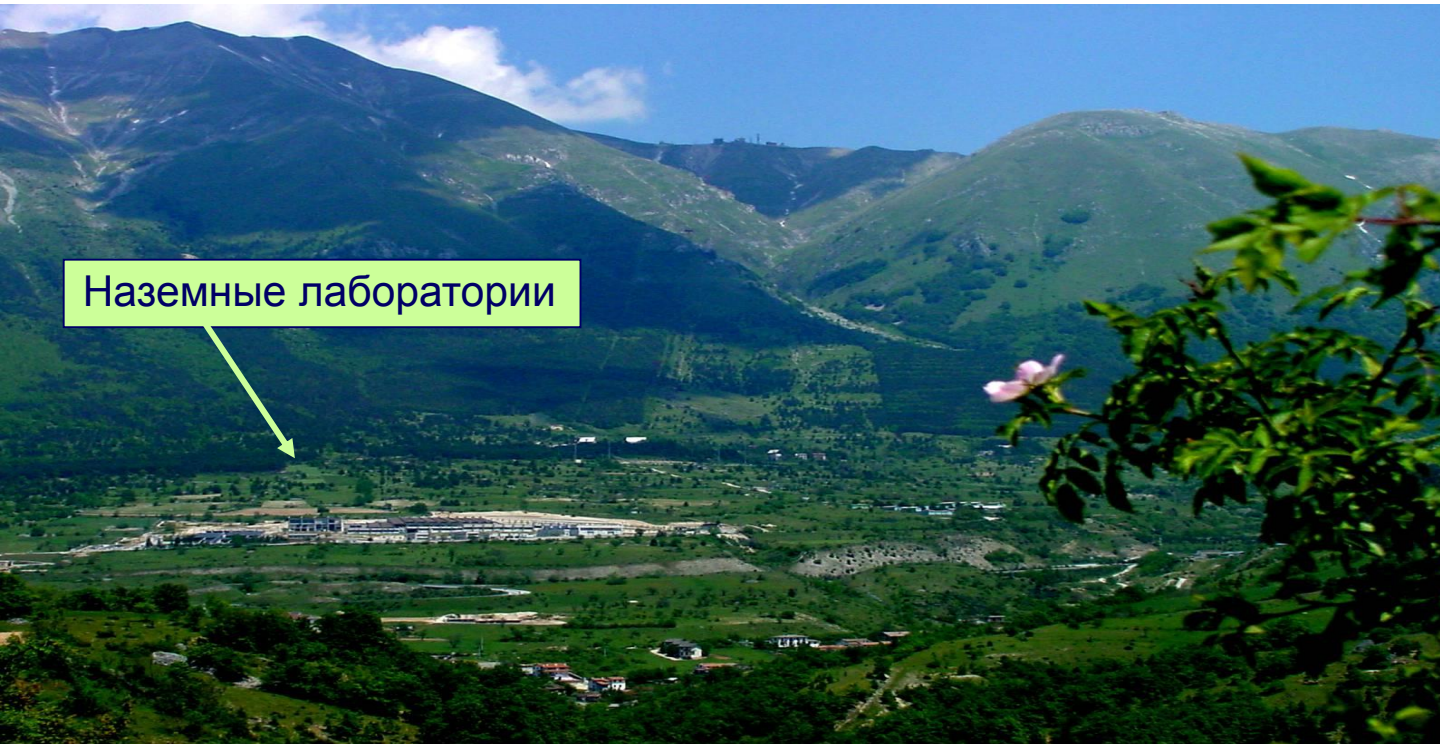
-2) событие (ν, e)-рассеяния является одиночным событием, не сопровождающимся другой частицей



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

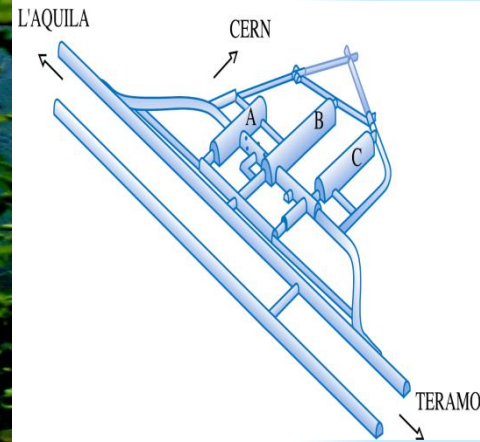
ВЫСОЧАЙШИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАДИАЦИОННОЙ ЧИСТОТЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА И МАТЕРИАЛОВ ДЕТЕКТОРА

Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории

Италия,
120 км от Рима
3800 м.в.э.

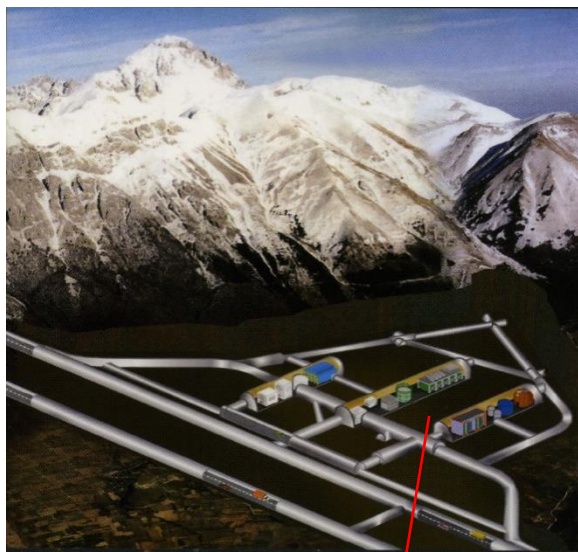


Борексидно и завод по очистке





Подземная лаборатория Гран-Сассо





Borexino Collaboration



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



PRINCETON
UNIVERSITY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"



St. Petersburg
Nuclear Physics Inst.



Technische Universität
München



University of
Houston



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Virginia
Tech



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ



Universität
Hamburg



НИЯФ
МГУ

SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY



Joint Institute for
Nuclear Research



G S

GRAN SASSO
SCIENCE INSTITUTE

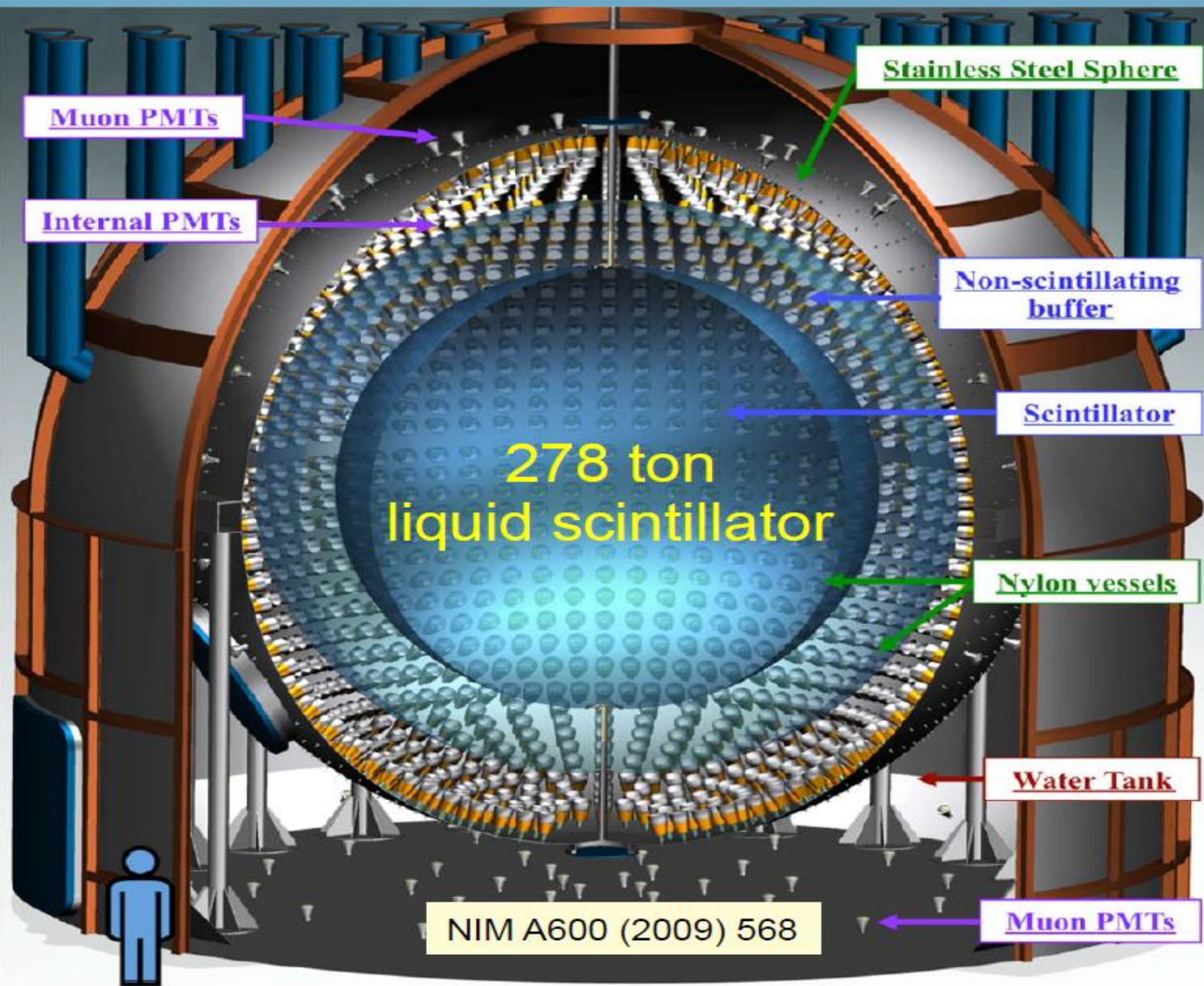
S I

CENTER FOR ADVANCED STUDIES
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



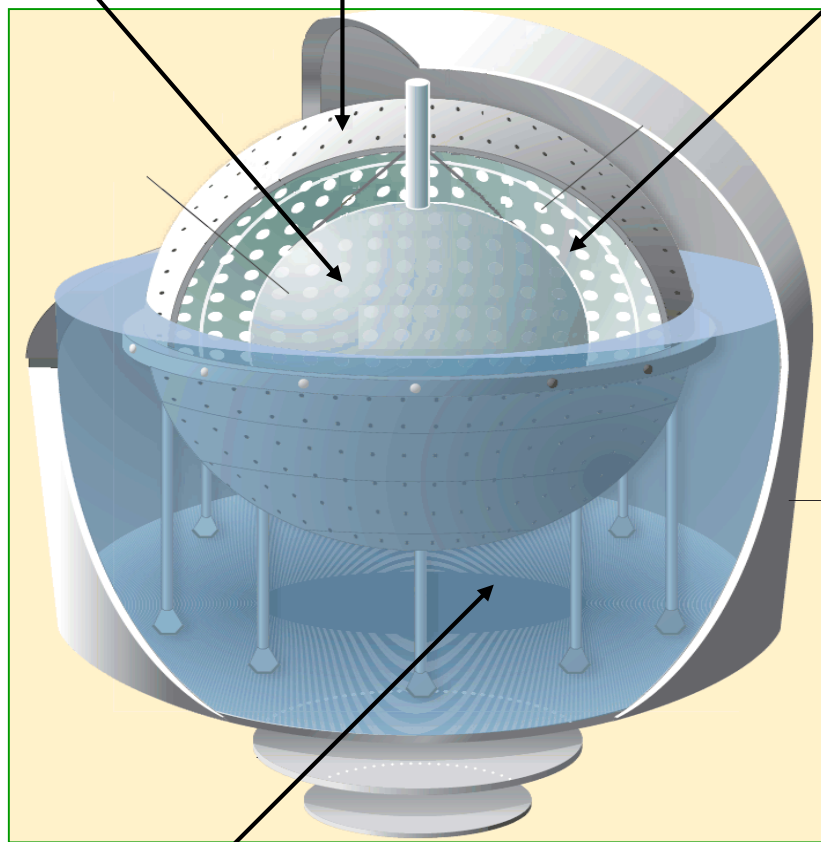


Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

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)



стальная сфера
диаметр 13,7 м

нейлоновая
сфера

2200 8" ФЭУ

200 ФЭУ
мюонного вето

100 т, основ-
ной объем

Rn барьер

Сцинтиллятор
300 т

псевдокумулятор

защита
из воды

струны

танк с водой, d=18 м

стальная плита, 10 см

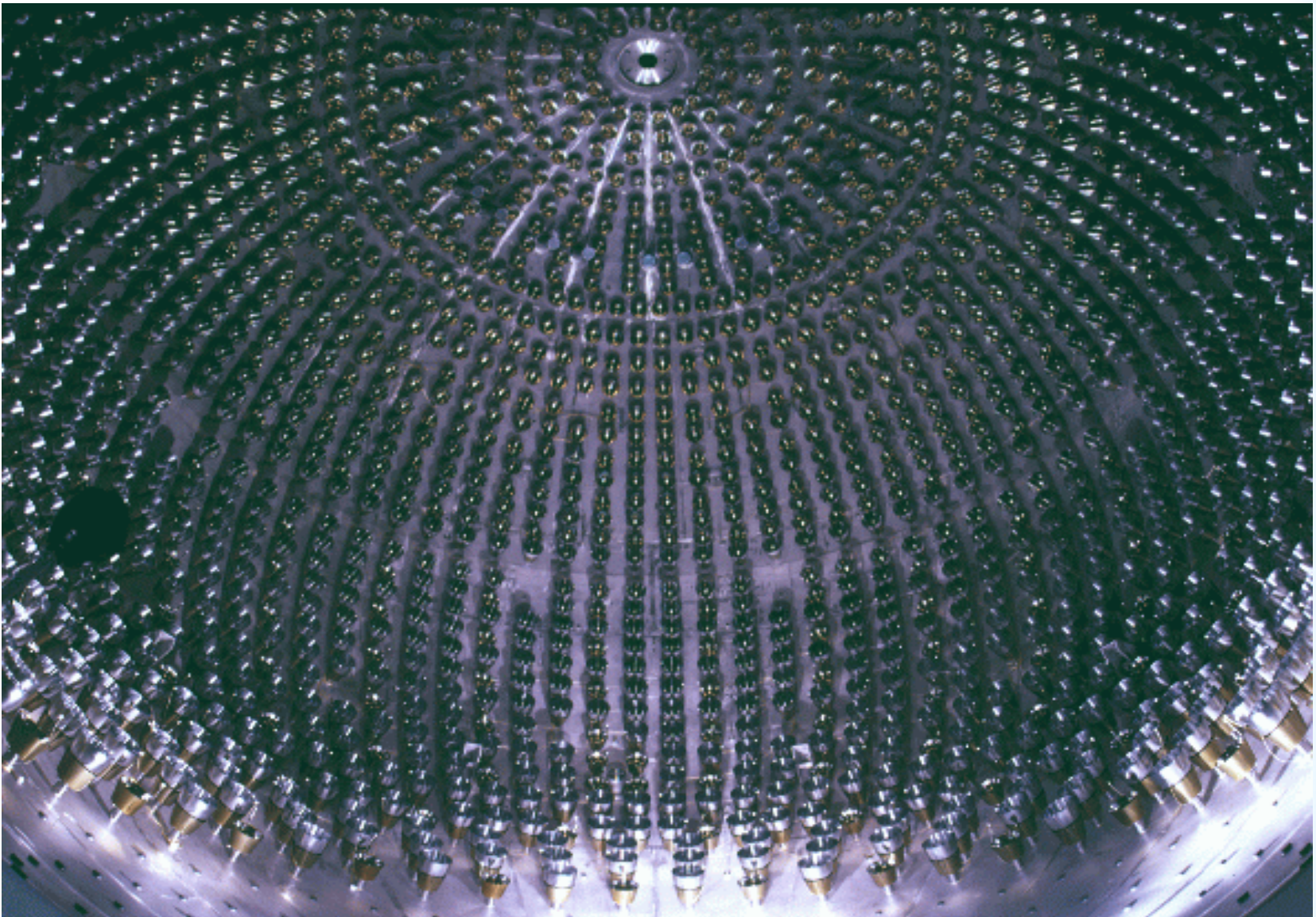
2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n

Стальная сфера с отверстиями для ФЭУ

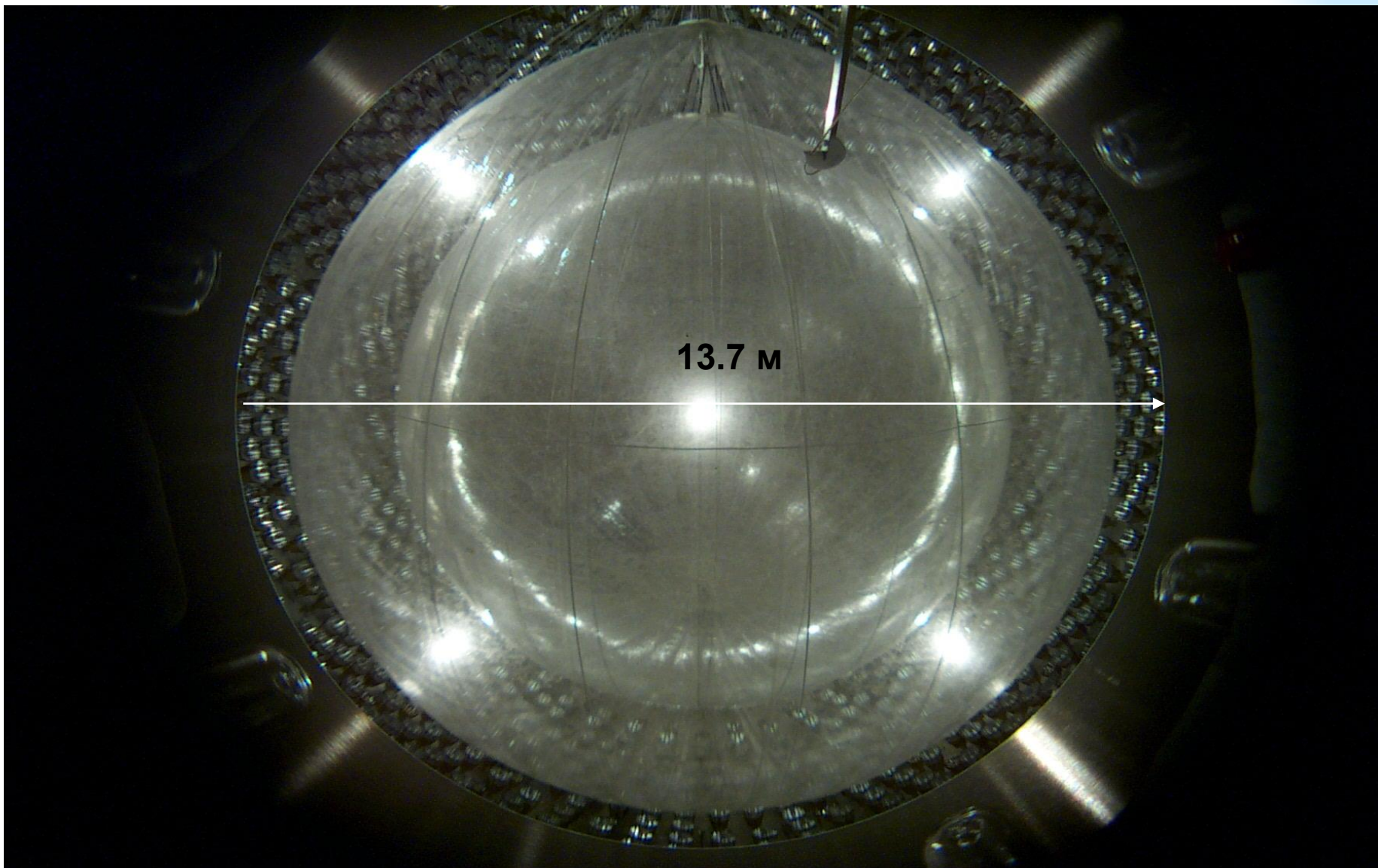




2212 ФЭУ на поверхности стальной сферы



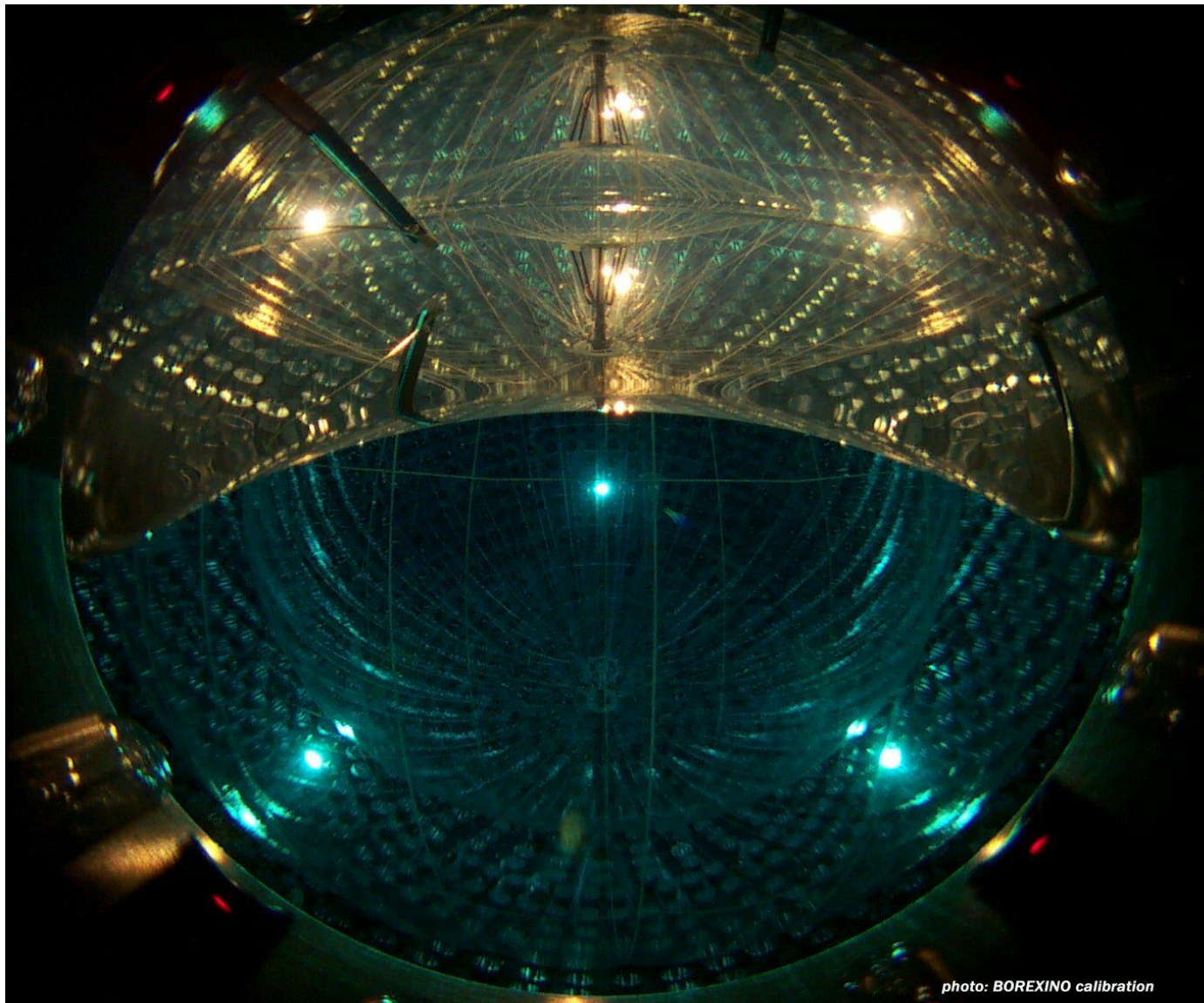
Стальная и нейлоновые сферы



ФЭУ на дне СС и антирадоновая сфера



Заполнение – сперва вода, затем сцинтиллятор



Вид на СТФ, на и внутри сферы, центр управления



Рекордная чистота жидкого сцинтиллятора

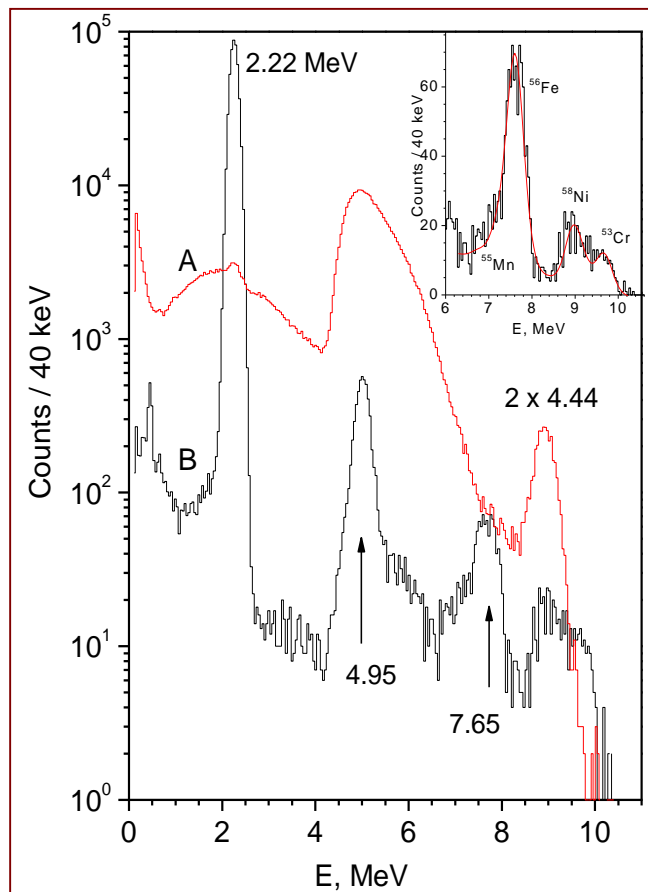
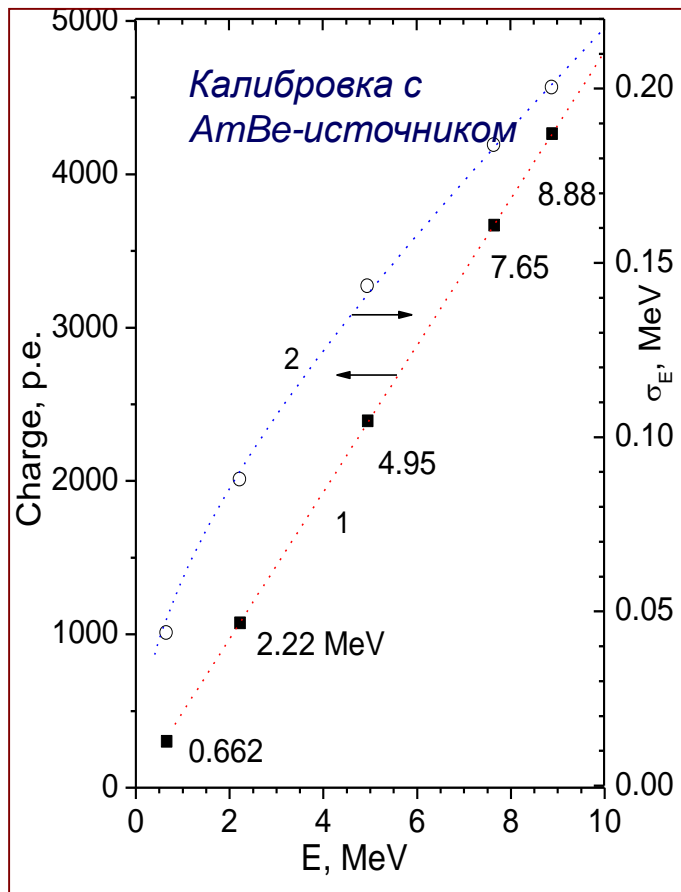
Компонент	Типичная распространенность (источник)	CTF	Boresino Фаза 2
$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ [г/г]	10^{-12} (космогенный)	$2 \cdot 10^{-18}$	2.7×10^{-18}
^{238}U [г/г] (по ^{214}Bi)	$2 \cdot 10^{-5}$ (пыль)	$< 4.8 \cdot 10^{-16}$	1.6×10^{-17} $< 9.7 \times 10^{-19}$
^{232}Th [г/г] (по ^{212}Bi)	$2 \cdot 10^{-5}$ (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 может 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 $\Sigma \phi_i$ или $\Sigma \Delta \phi_i$). 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 K 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

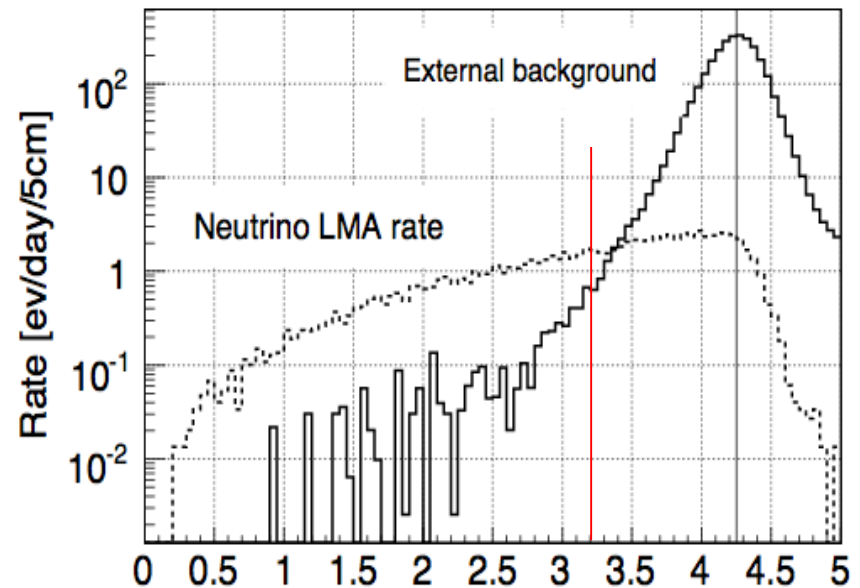
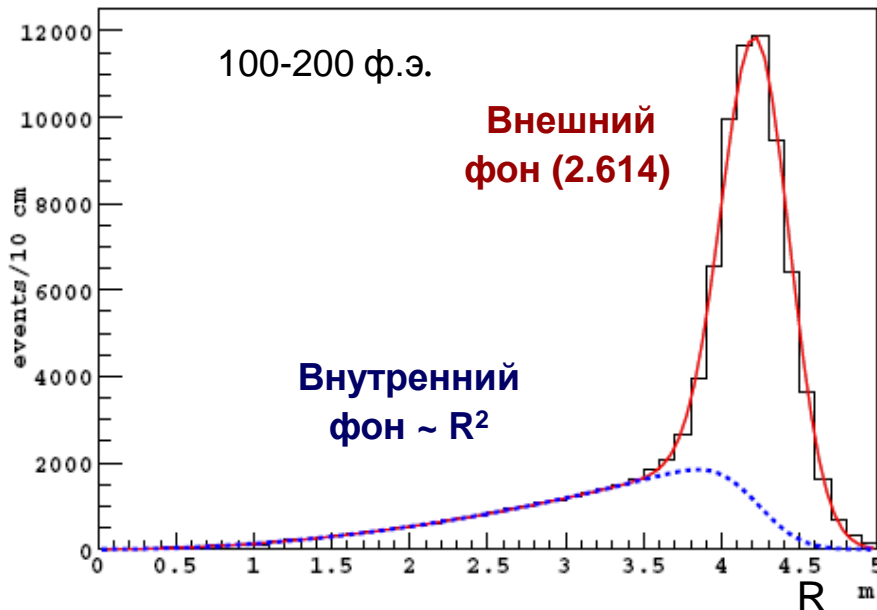
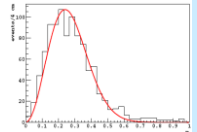
Основная задача пространственной реконструкции – создание “активной защиты” внутреннего объема сцинтиллятора его внешним слоем от внешнего γ -фона от конструкционных материалов (IV, стальная сфера, ФЭУ)

Пространственное разрешение:

1 МэВ – $\sigma = 14$ см

$^{214}\text{BiPo}$ (~800 кэВ) 16 см

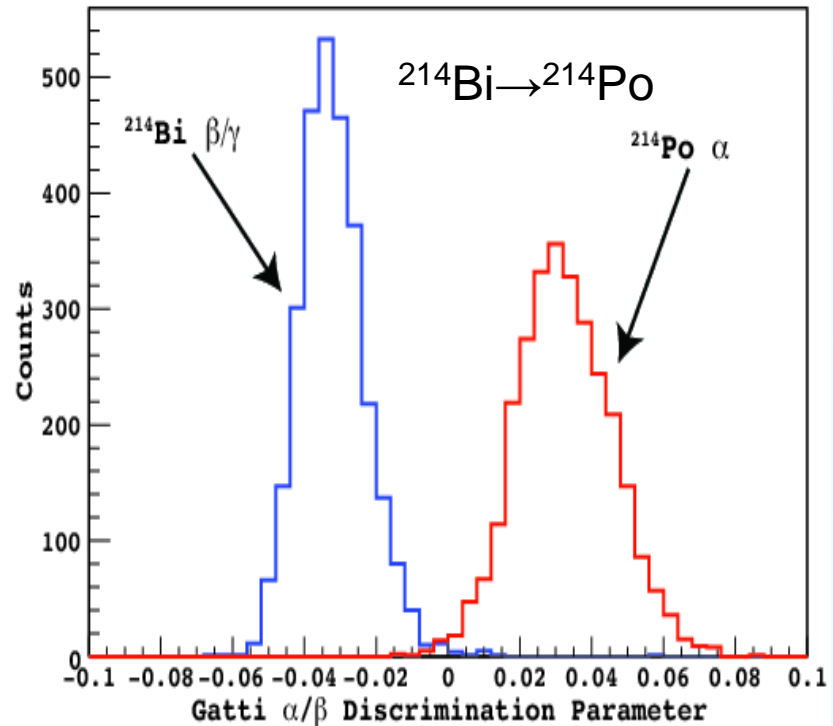
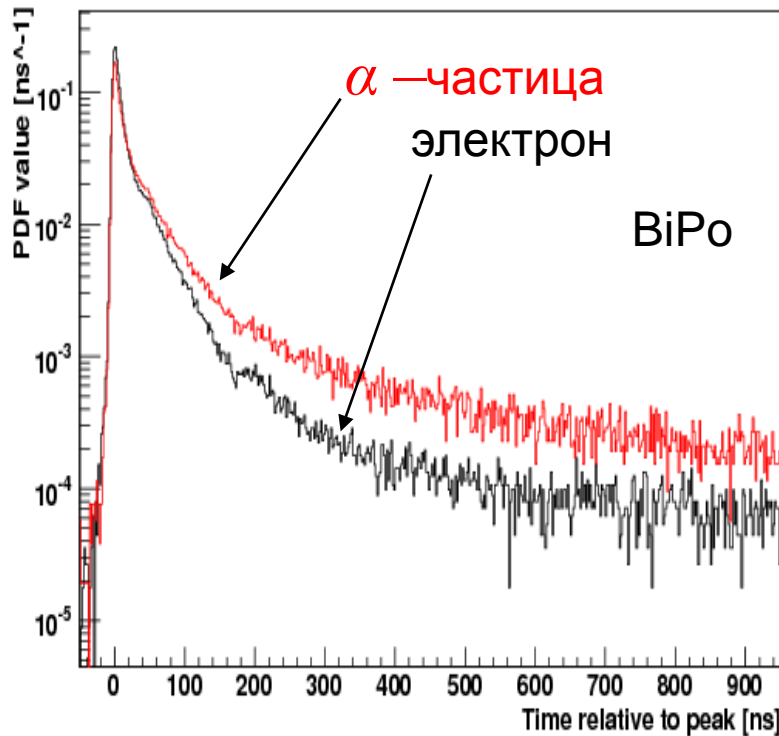
^{14}C (~100 кэВ) 41 см



α/β - дискриминация

Световыход для α -частиц в ~ 10 раз меньше, чем для электронов той же энергии.

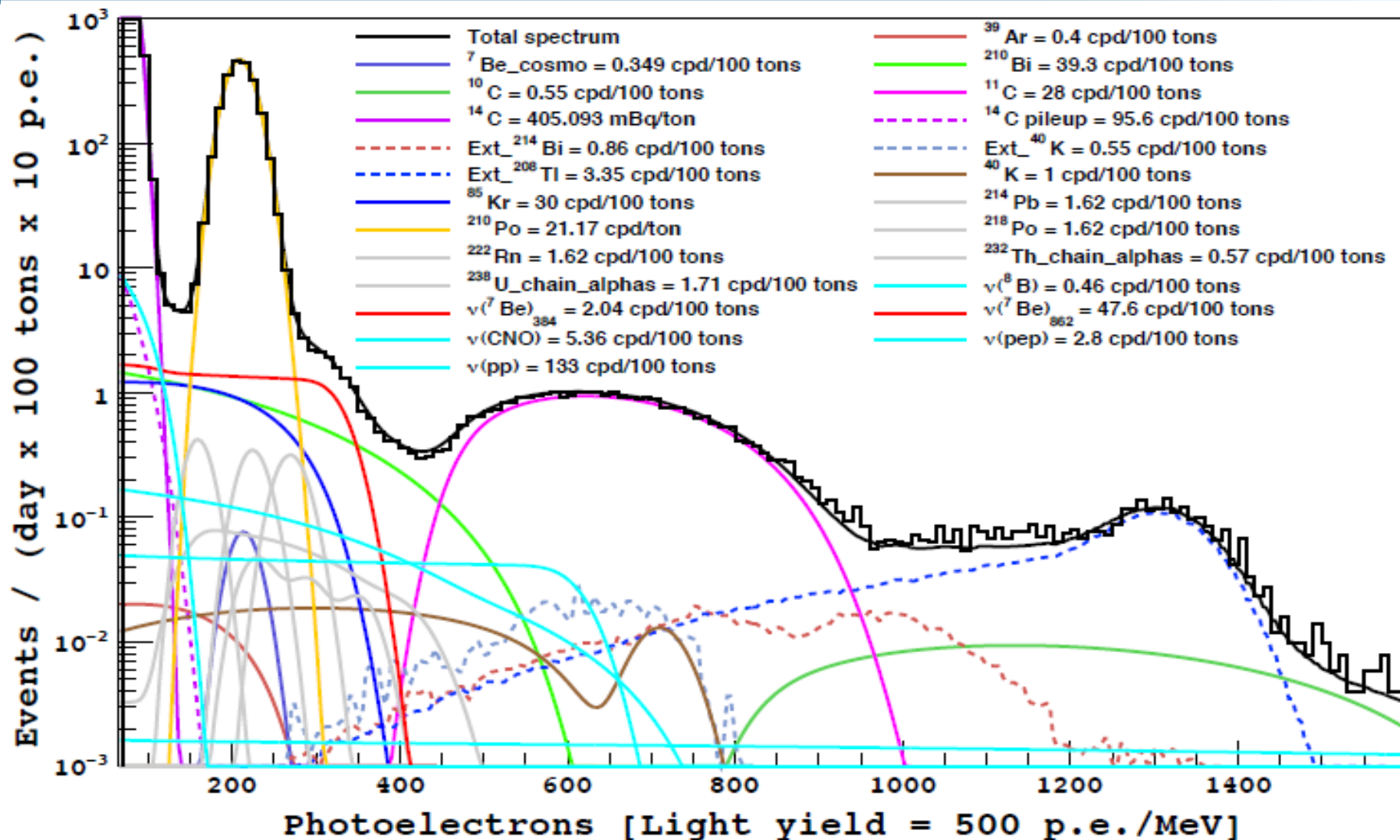
α -частицы естественной р/а регистрируются как события с $E < 1$ МэВ. Для разделения α от β используется зависимость скорости высвечивание фотонов от плотности ионизации.



1) *Фильтр Гатти* $G = \sum_j P_j f_j$, $P_i = \frac{\overline{\alpha_i} - \overline{\beta_i}}{\overline{\alpha_i} + \overline{\beta_i}}$ 2) MLP метод

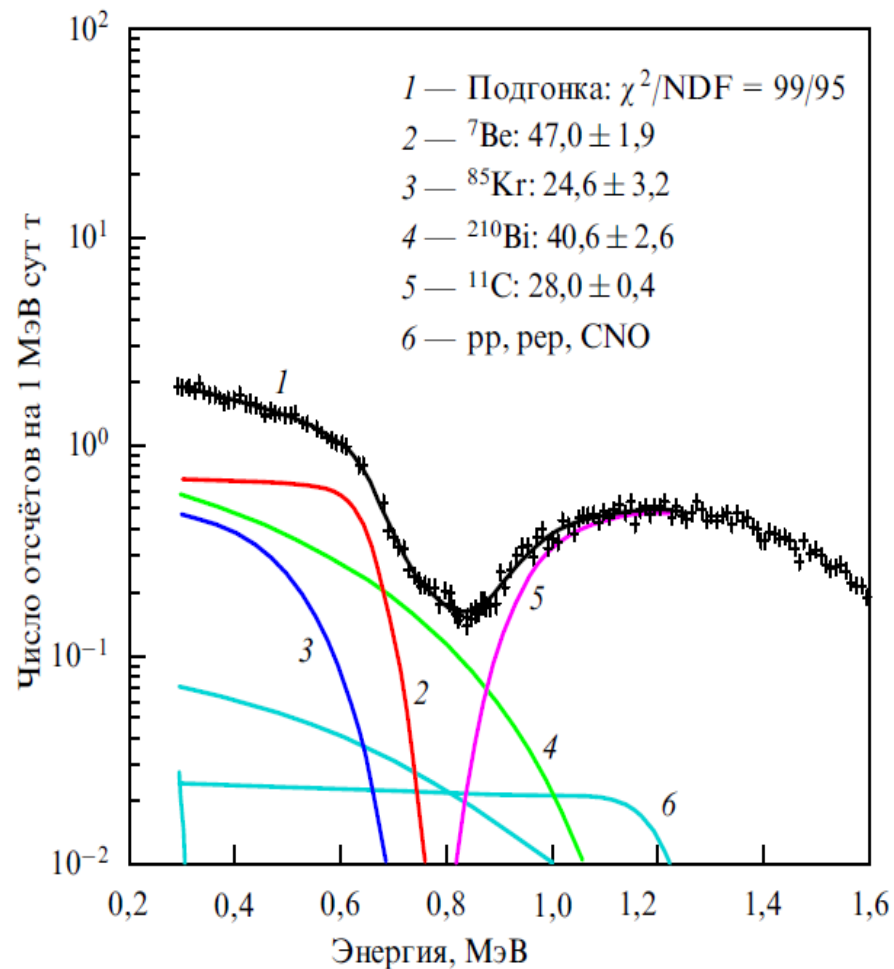
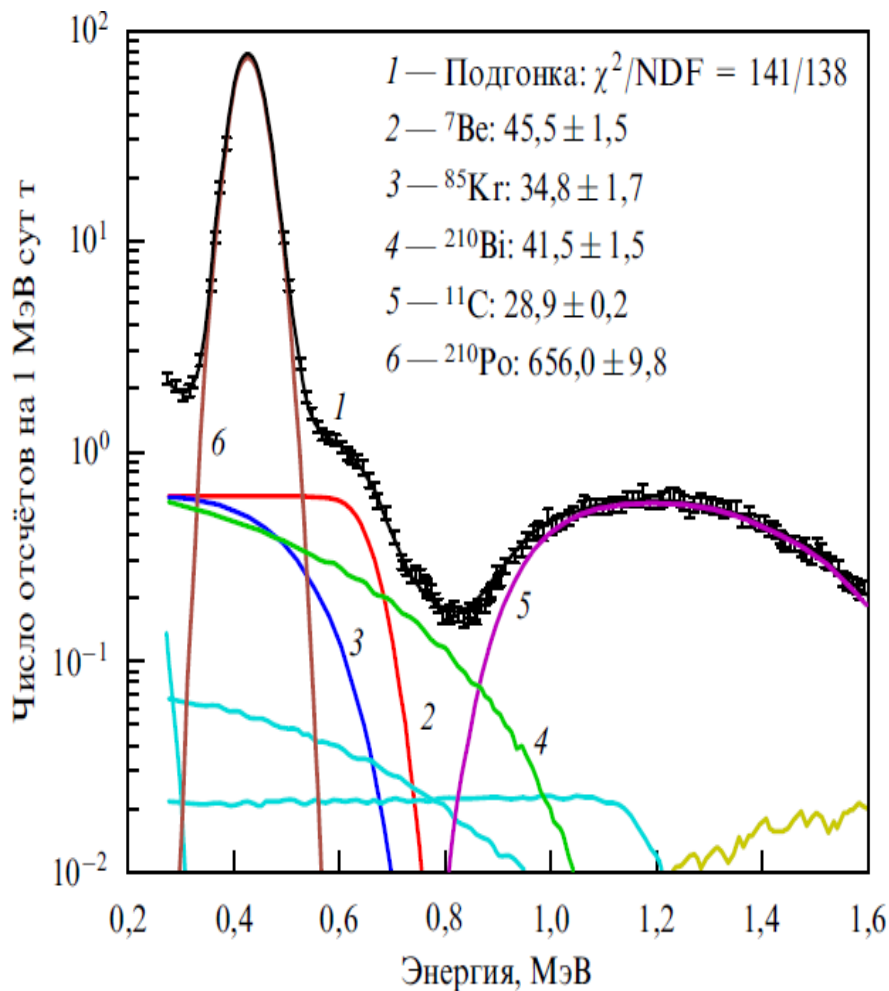
Измерения с нейтронным AmBe источником позволили настроить $p(n)/\beta$ дискриминацию

Основные компоненты спектра Борексино



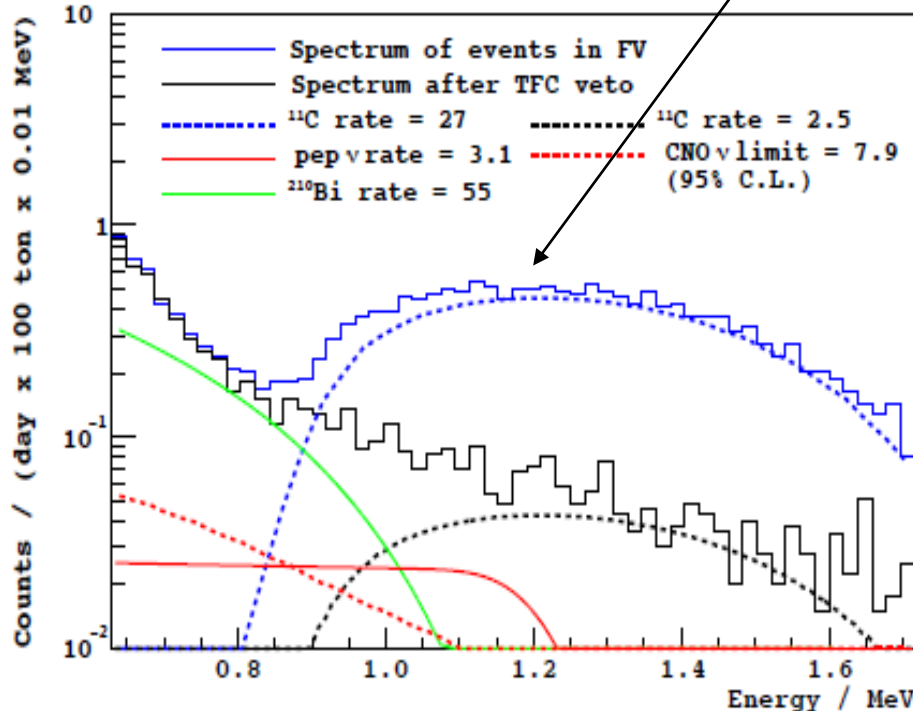
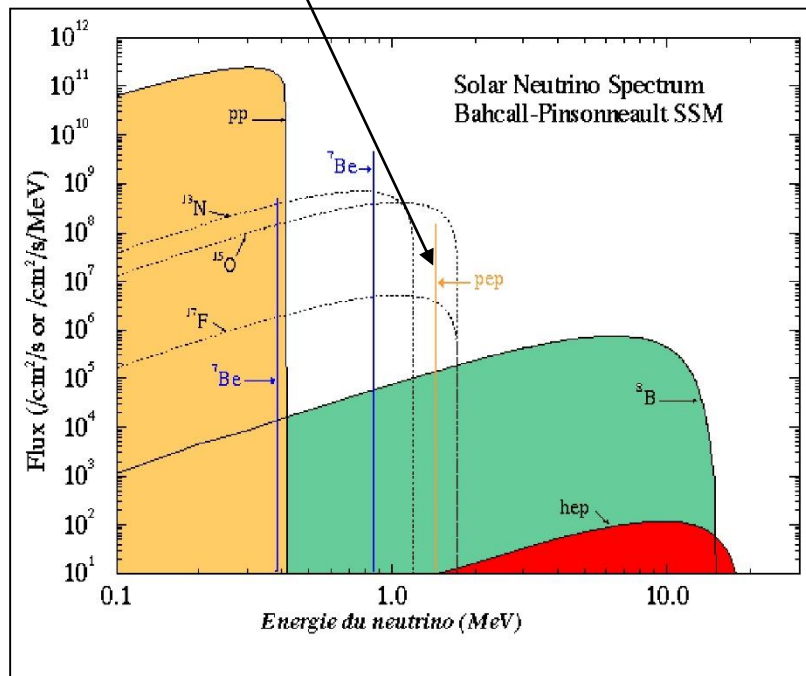
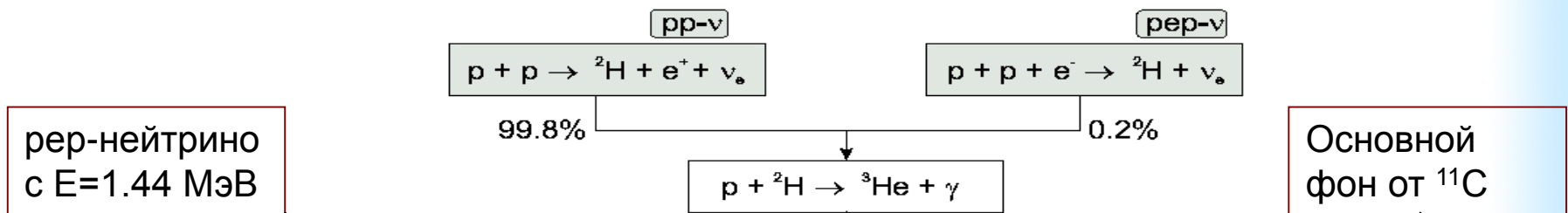
^{14}C β , ^{210}Po α , ^7Be ν , ^{85}Kr β , ^{210}Bi β , ^{11}C $\beta+$, ^{208}Tl γ , ^{10}C $\beta+$,

Измерение потока ${}^7\text{Be}$ -нейтрино



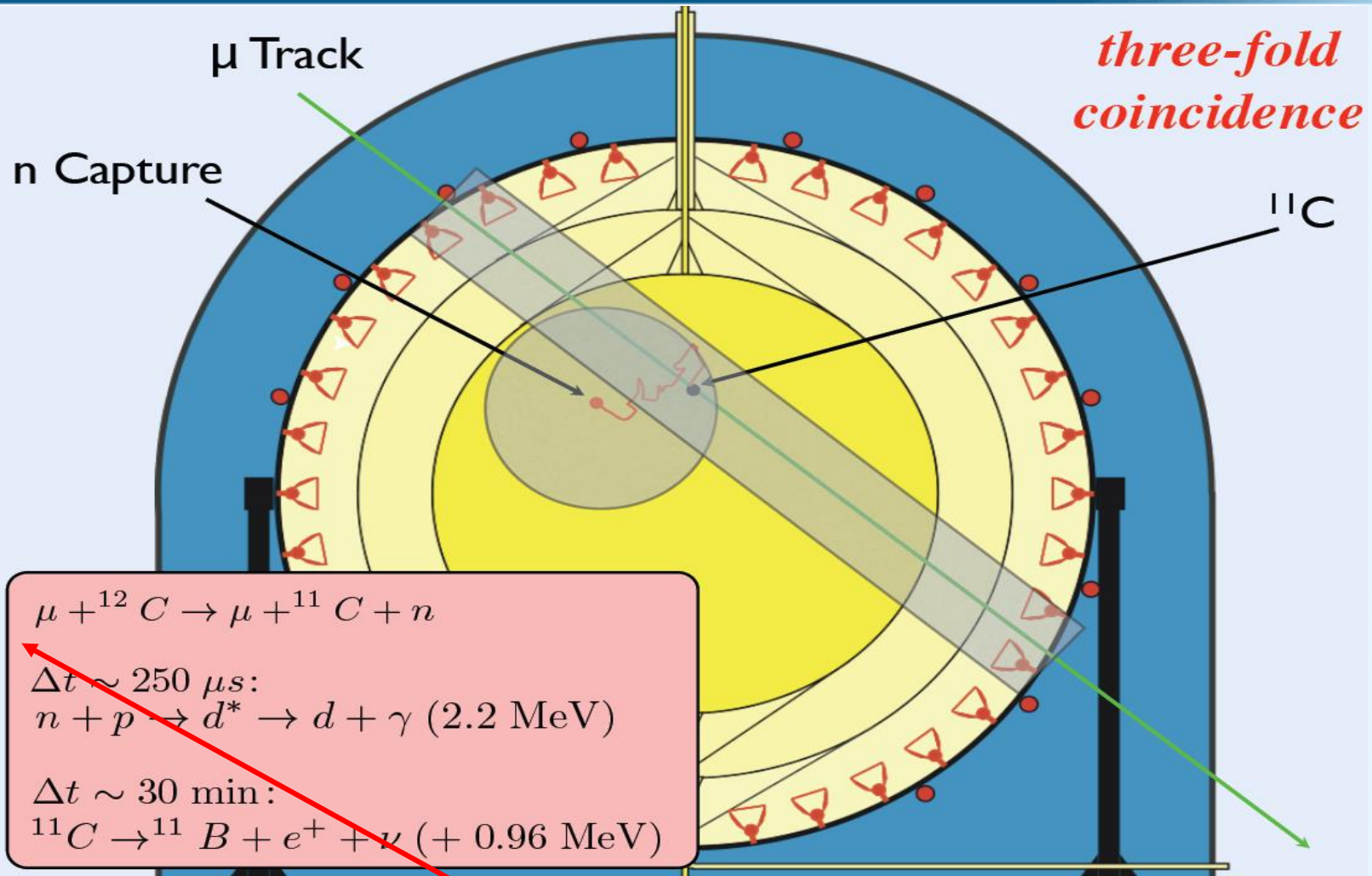
Слева - спектр Борексино, измеренный за 741 сут. Показана скорость счета основных компонент на 100 т в сутки. Справа - спектр после удаления событий альфа-распада ${}^{210}\text{Po}$.

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



Дейтрон, помимо реакции слияния двух протонов, производится в пер-реакции. Поток монохроматических пер-нейтрино в **30 раз** меньше потока ${}^7\text{Be}$ -нейтрино и предсказан с точностью 1.1%. Поток CNO нейтрино меняется на 30% в моделях Солнца с высокой и низкой металличностью.

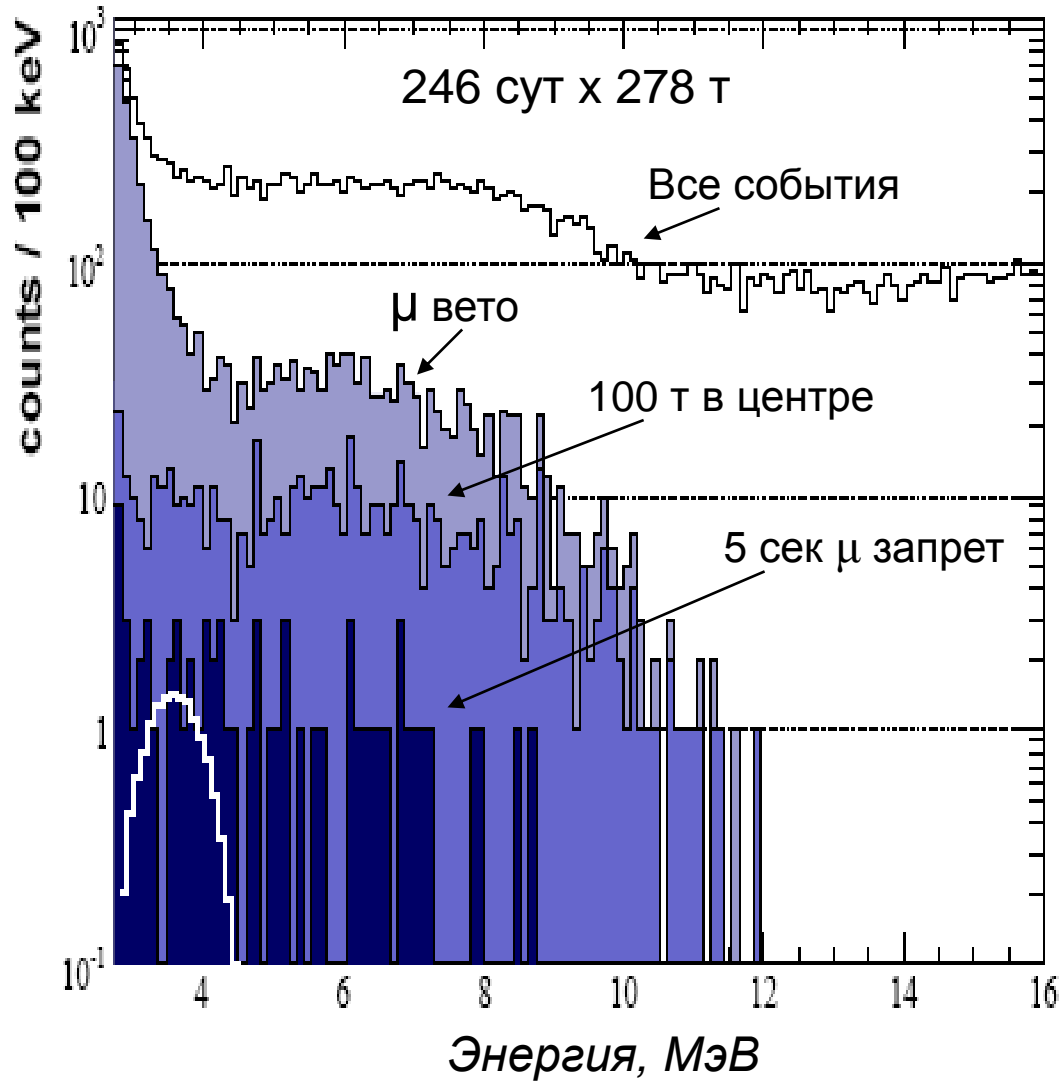
Три последовательных совпадения



Основной фон при регистрации пер- ν связан с изотопом ^{11}C , который образуется под действием мюонов. Подавление фона ^{11}C в 11 раз при потере 50% живого времени. Фаза 2 – подавление $92.4 \pm 4\%$ при потере 36% времени



Регистрация ^8B -нейтрино в интервале 3.0 -16 МэВ



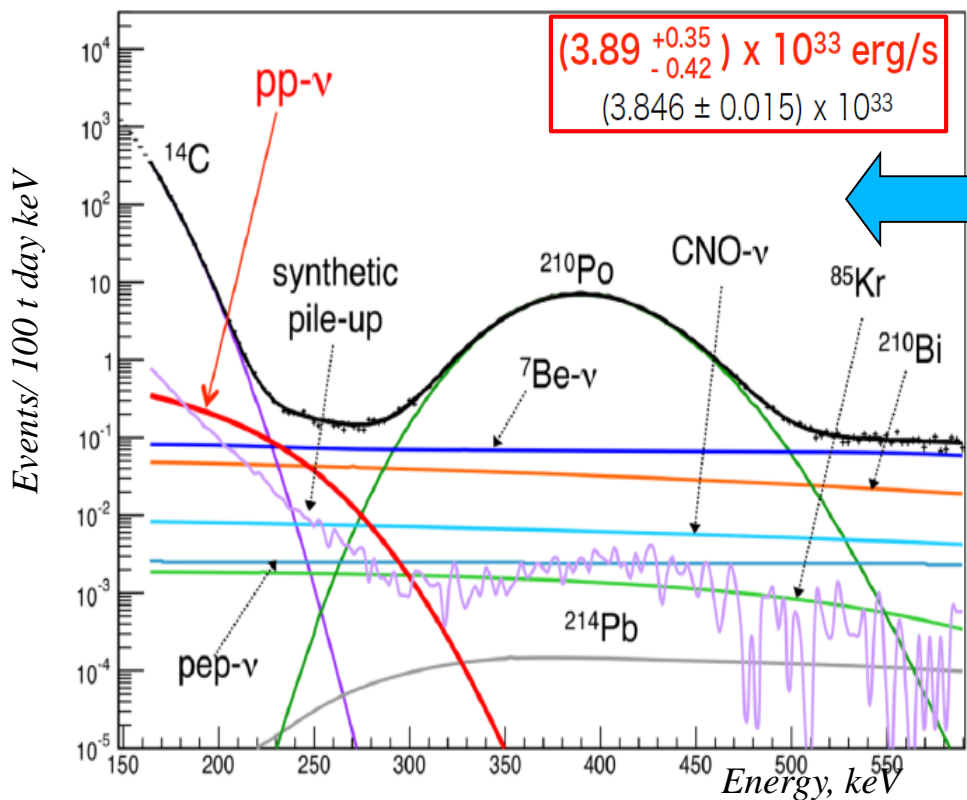
Ожидаемая скорость счета в **200 раз меньше** чем для ^7Be -нейтрино. Порог 3.0 МэВ связан с регистрацией γ -пика 2.614 МэВ.

Отбор событий

1. Мюонное вето
2. **Центральный объем массой 100 т**
3. Удаление событий в интервале 2 мс после мюонов пересекающий танк (нейтроны) + 5 s после мюонов, пересекающих SSS ^8Li , ^6He (23.4% м. вр.)
4. **Удаление $^{214}\text{Bi-Po}$ событий**
5. **Учет событий ^{10}C**
6. Учет событий ^{208}Tl исходя из числа $^{212}\text{BiPo}$ совпадений

Регистрация солнечных pp-нейтрино

Реакция сопровождается испусканием нейтрино с граничной энергией 420 кэВ, которые и были зарегистрированы в эксперименте. Регистрация pp-нейтрино является наиболее трудной задачей, из-за их малой энергии, самой низкой среди солнечных нейтрино, и лежащей в области высокого природного фона.



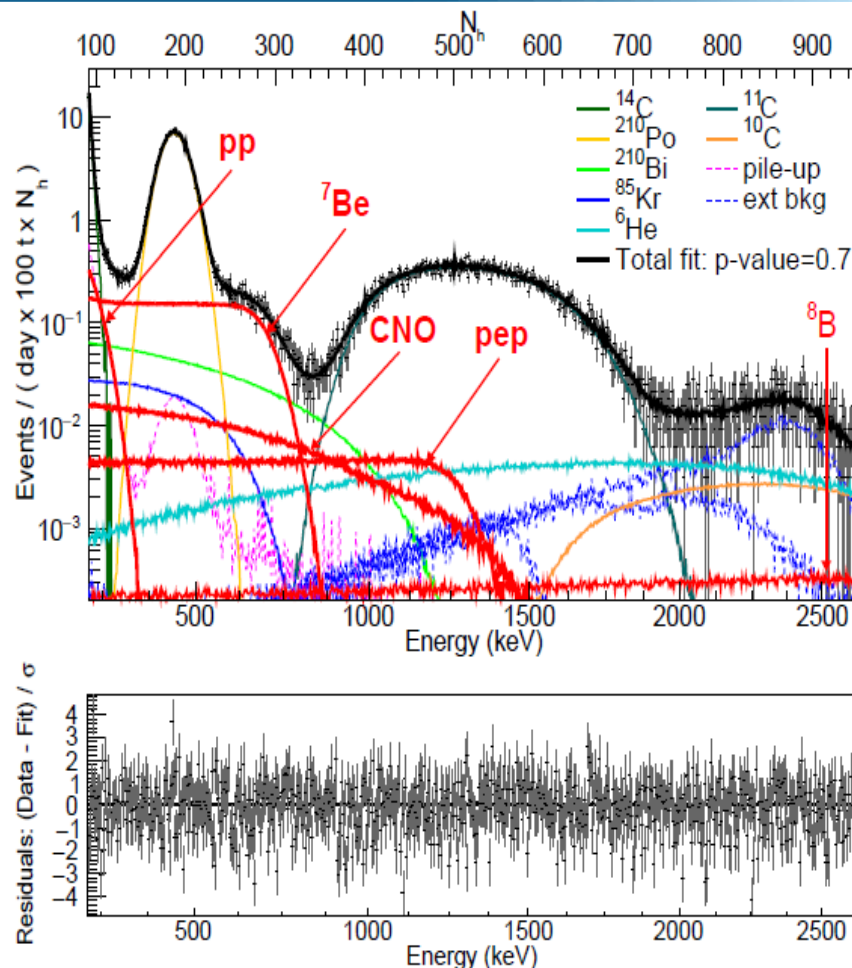
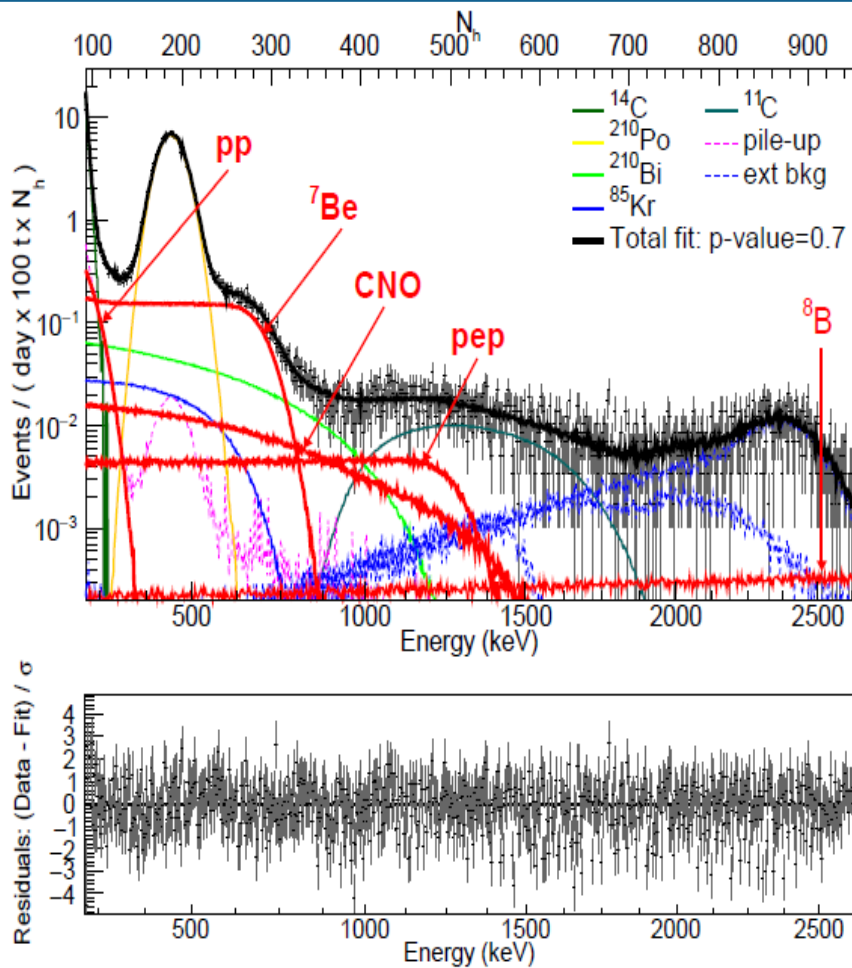
Энергетический спектр в интервале 150-600 кэВ, измеренный детектором Borexino, и его основные компоненты. Вклад pp-нейтрино показан красной сплошной линией.

Измеренный поток составил $(6.6 \pm 0.7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, что согласуется с предсказаниями Стандартной солнечной модели и осцилляционным LMA-MSW решением.

Сотрудники ПИЯФ, ОИЯИ, КИ и МГУ активно участвовали в получении данного результата в течении более 10 лет. e.g. A.V. Derbin, O.Yu. Smirnov, O.A. Zaimidoroга, On the possibility of detecting solar pp-neutrino with large volume liquid organic scintillator detector, ЯФ, 67, 2087 (2004)

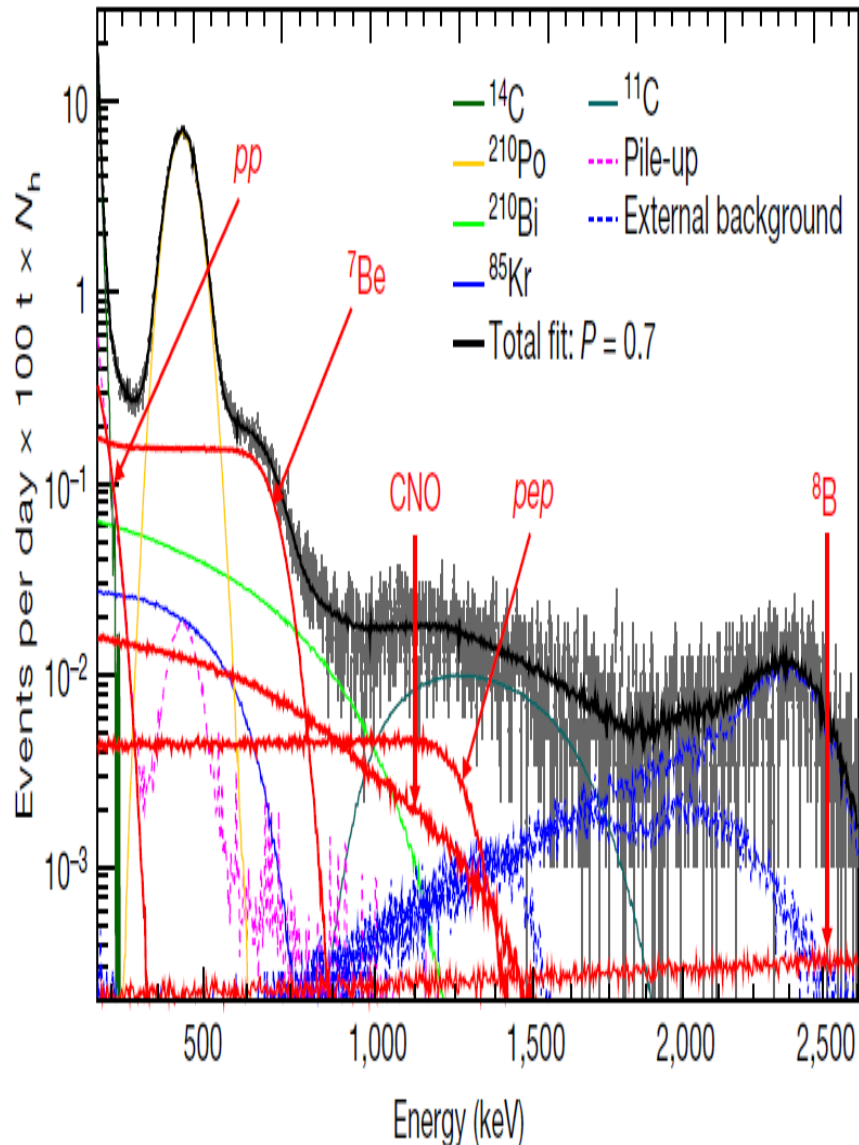
Опубликовано в *Nature* 512 (2014) 383

Совместный фит pp -, ${}^7\text{Be}$ - и pep -нейтрино (МС)



Скорости регистрации pp -, ${}^7\text{Be}$ -, and pep - ν 's получены из совместного фита, учитывающего внутренние фоны от распадов ${}^{85}\text{Kr}$, ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{210}\text{Bi}$, ${}^{11}\text{C}$, и внешние фоны ${}^{208}\text{Tl}$, ${}^{214}\text{Bi}$, and ${}^{40}\text{K}$. Анализировались данные Вorexino Фаза-II, накопленные за период с декабря 2011 г. по май 2016 г. общей длительностью 1291.51 сут.

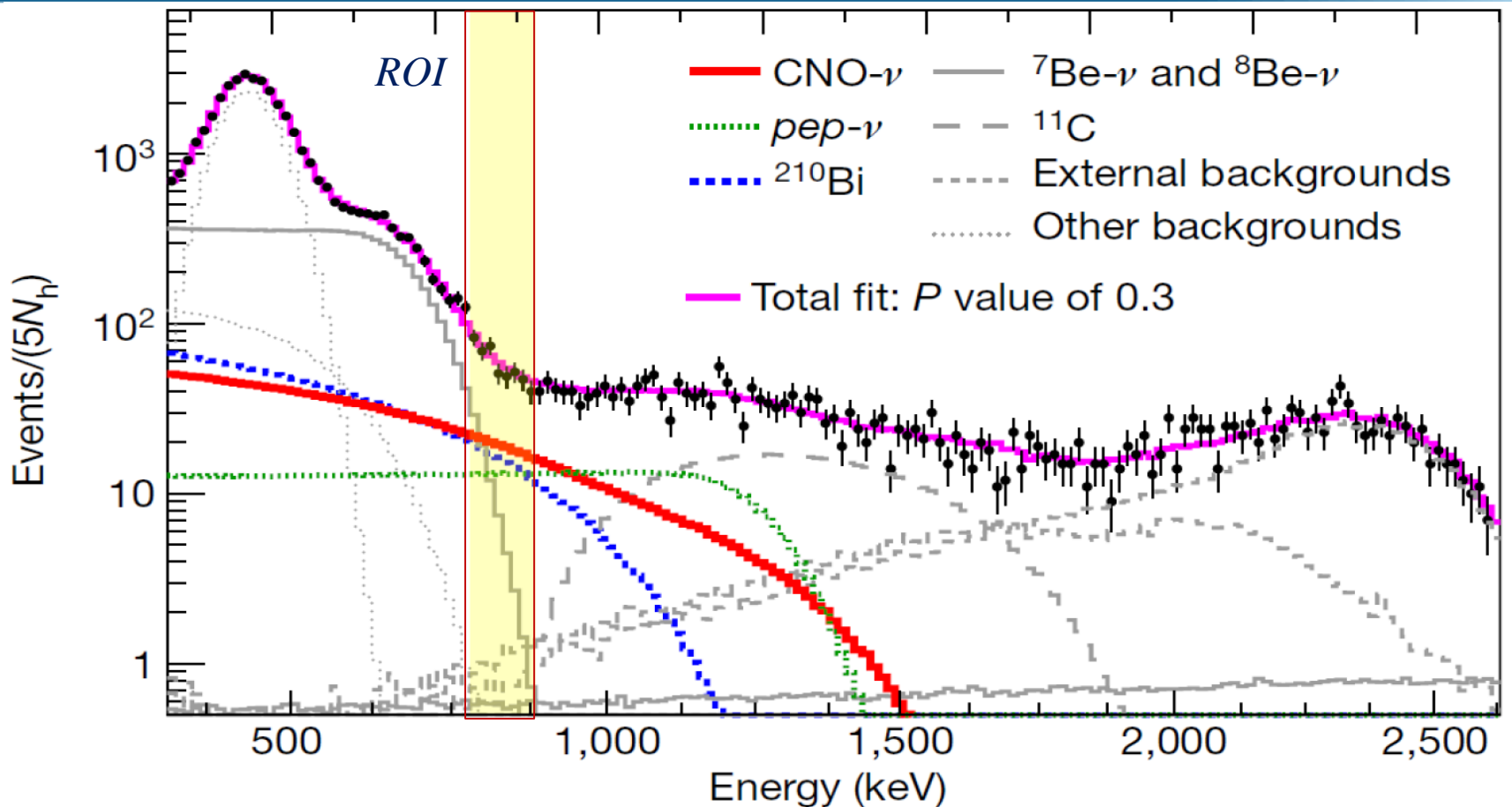
Результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино



«Nature» от 24 октября 2018 г.

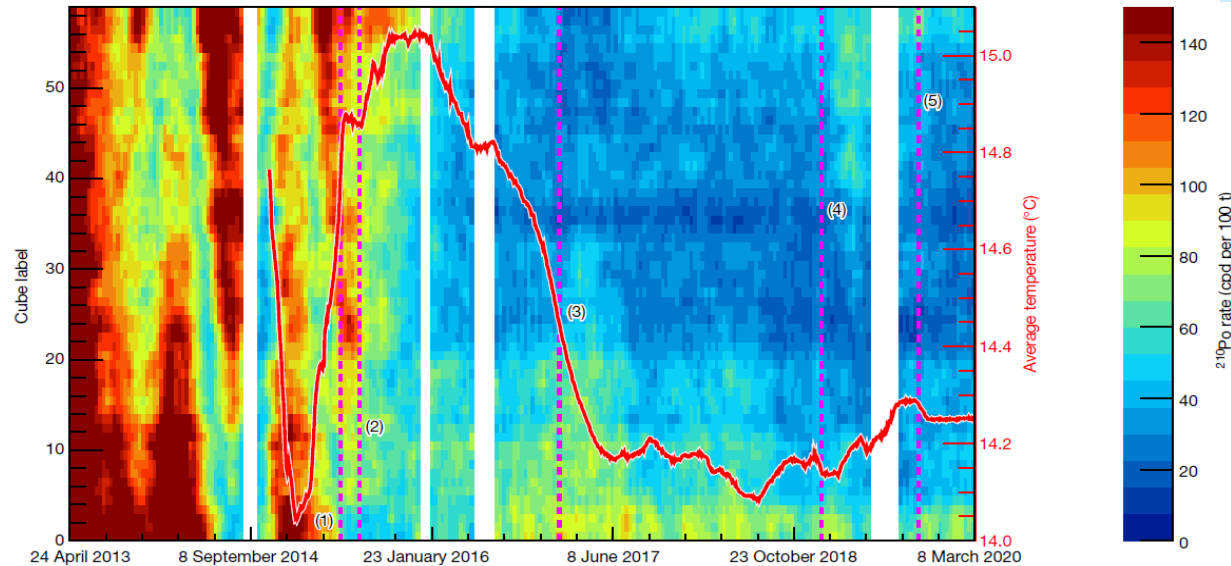
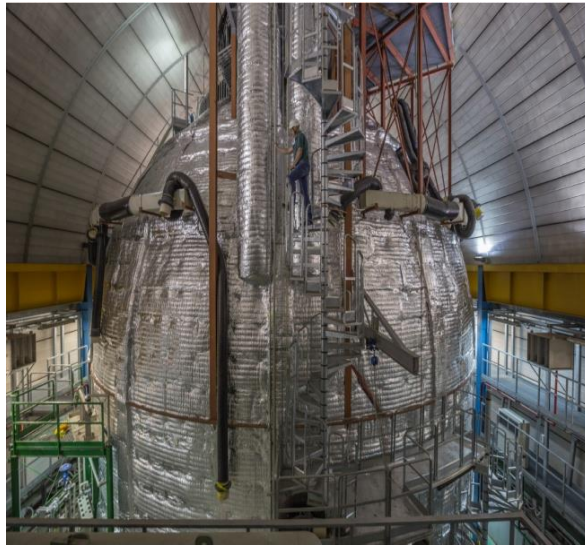
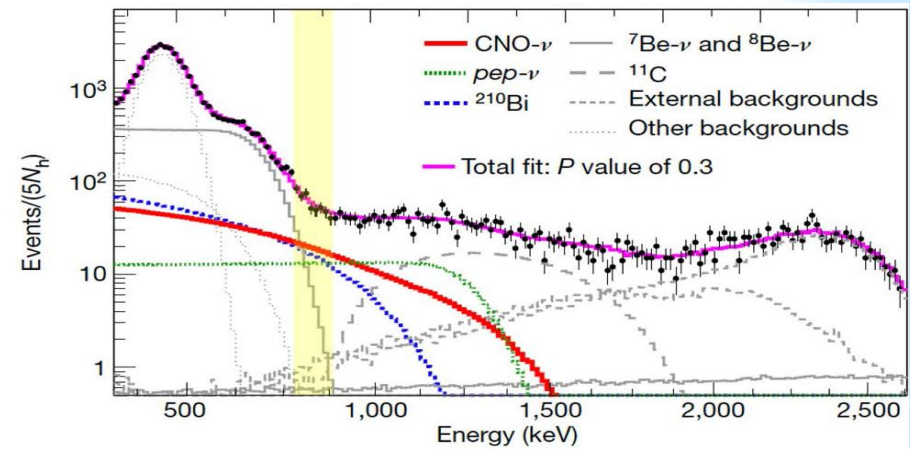
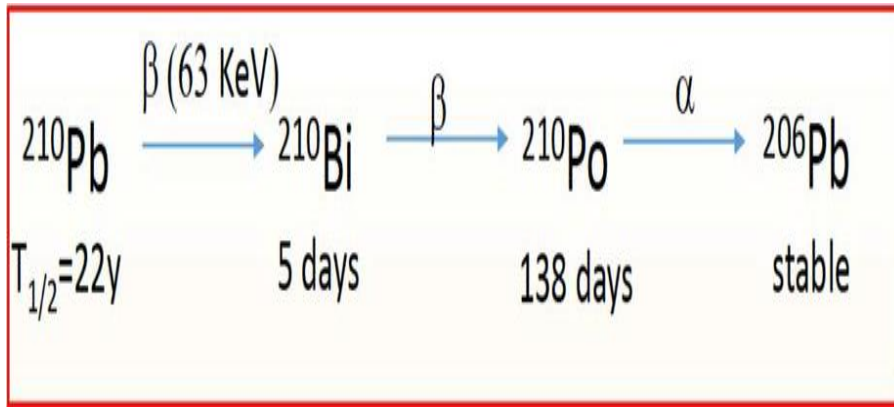
1. Поток ^7Be -нейтрино измерен с 2.7 % точностью
2. Поток ^8B - ν измерен с порога 3.0 МэВ
3. Поток pp -нейтрино выходит за 5σ
4. Измерен поток pp -нейтрино с 10.5% точностью
5. Наиболее строгий предел на поток CNO-нейтрино
6. В одном эксперименте определена доля электронных нейтрино (P_{ee}) при различном вкладе вакуумных осцил. и осцил. в веществе
7. Не обнаружена асимметрия «день-ночь» для ^7Be - ν . LMA-решение подтверждено для нейтрино.
8. Обнаружены годовые вариации потока ^7Be -нейтрино.
9. Определено отношение $R(^3\text{He}+^4\text{He})/R(^3\text{He}+^3\text{He}) = 2\Phi(^7\text{Be})/(\Phi(pp)-\Phi(^7\text{Be})) = 0.178^{+0.027}_{-0.023}$, которое является критическим тестом солнечного синтеза - $R=0.180\pm 0.011(\text{HZ})$, $R=0.161\pm 0.010(\text{LZ})$
10. Совместный фит всех нейтрино предпочитает HZ модель

СНО-нейтрино. Спектр Борексино



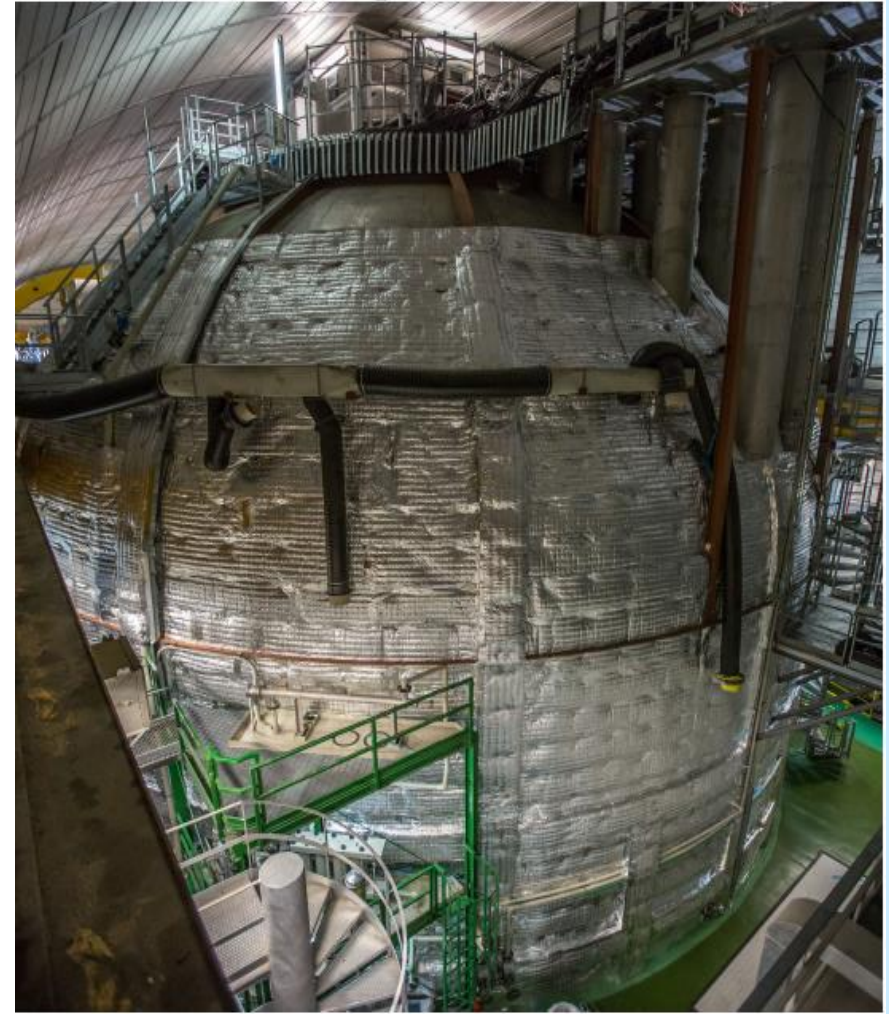
Спектр Борексино в интервале **320-2640 кэВ**, накопленный за **1072 сут.** живого времени, является суммой вкладов нейтрино и радиоактивных примесей в сцинтилляторе (^{85}Kr , ^{210}Bi , ^{210}Po и ^{40}K) и космогенного ^{11}C , а также γ -квантов от распадов ^{40}K , ^{214}Bi и ^{208}Tl во внешних материалах. Спектр CNO- ν подобен β -спектру ^{210}Bi . Для выделения вклада CNO-нейтрино необходимо измерить или ограничить спектры ^{210}Bi и *pep*-нейтрино.

Активность ^{210}Bi по активности ^{210}Po



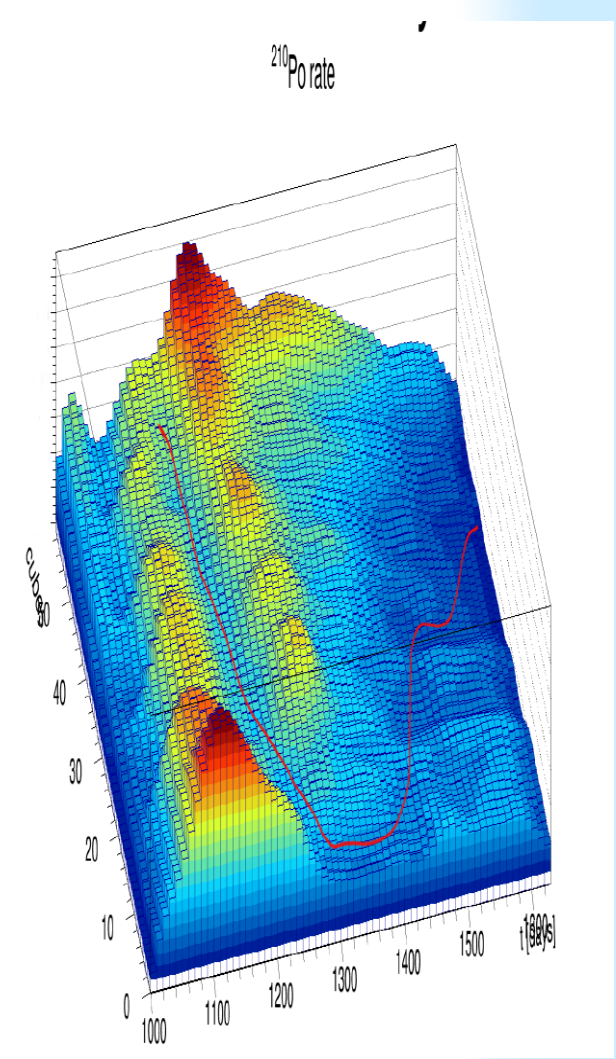
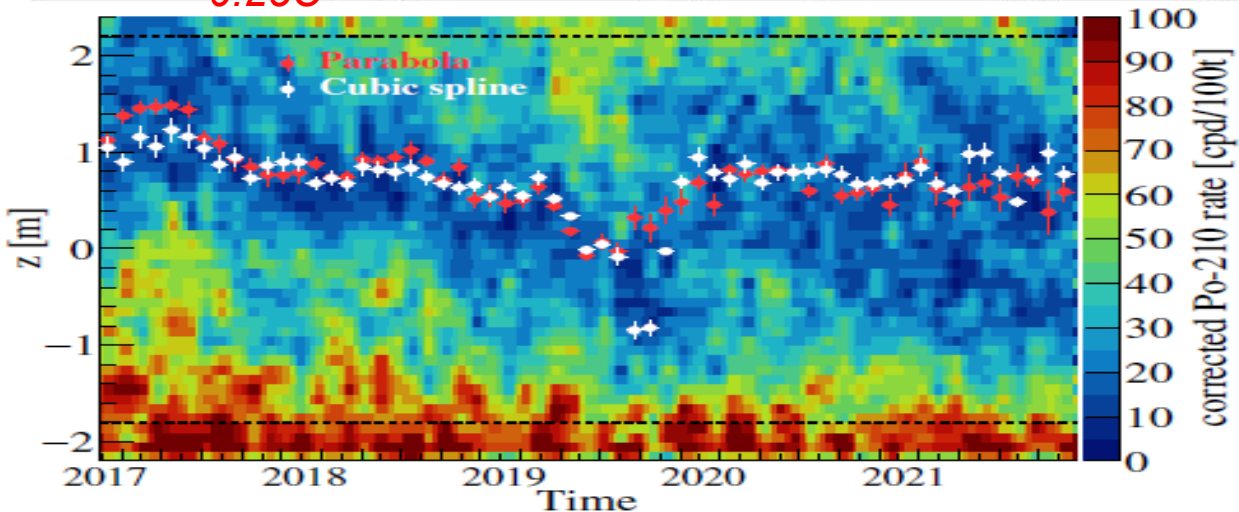
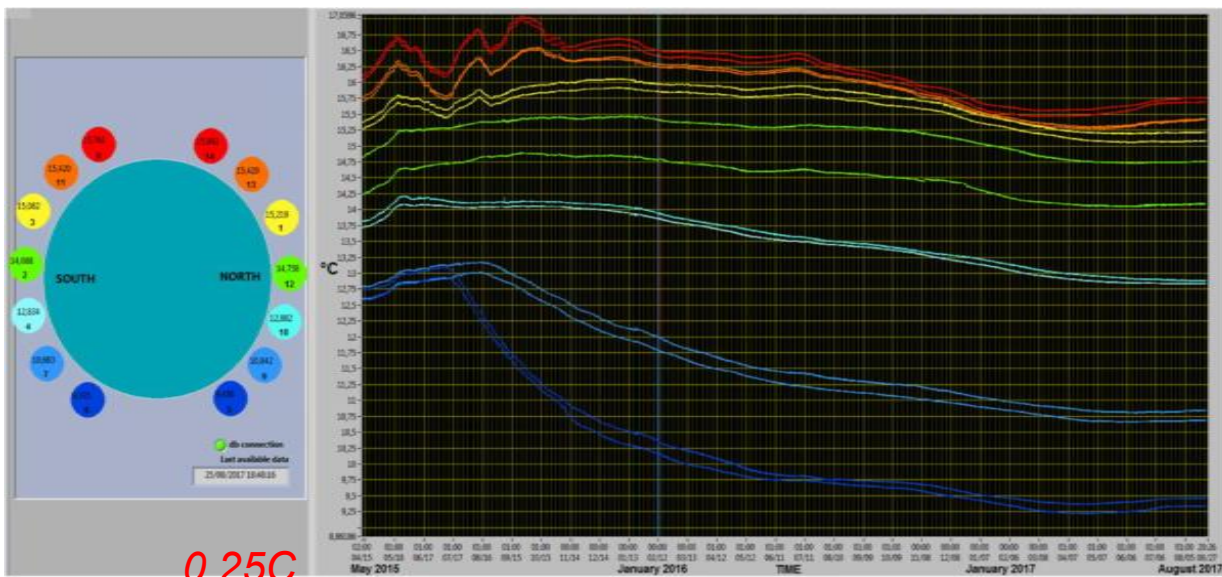
β -активность ^{210}Bi может быть определено по α -активности ^{210}Po если имеется равновесие. Для устранения конвективных потоков выполнена термостабилизация детектора, что позволило выделить область $R(^{210}\text{Po}) = 11.5 \pm 1.0$ отс./сут. 100 т и ограничить $R(^{210}\text{Bi})$.

Термостабилизация сцинтиллятора



Работы по стабилизация температуры внутри водного танка с 2016 г. Пассивная (20 см мин. ваты) и активная системы (нагреватели) позволили стабилизировать T на уровне 0.1 C и подавить конвективные потоки.

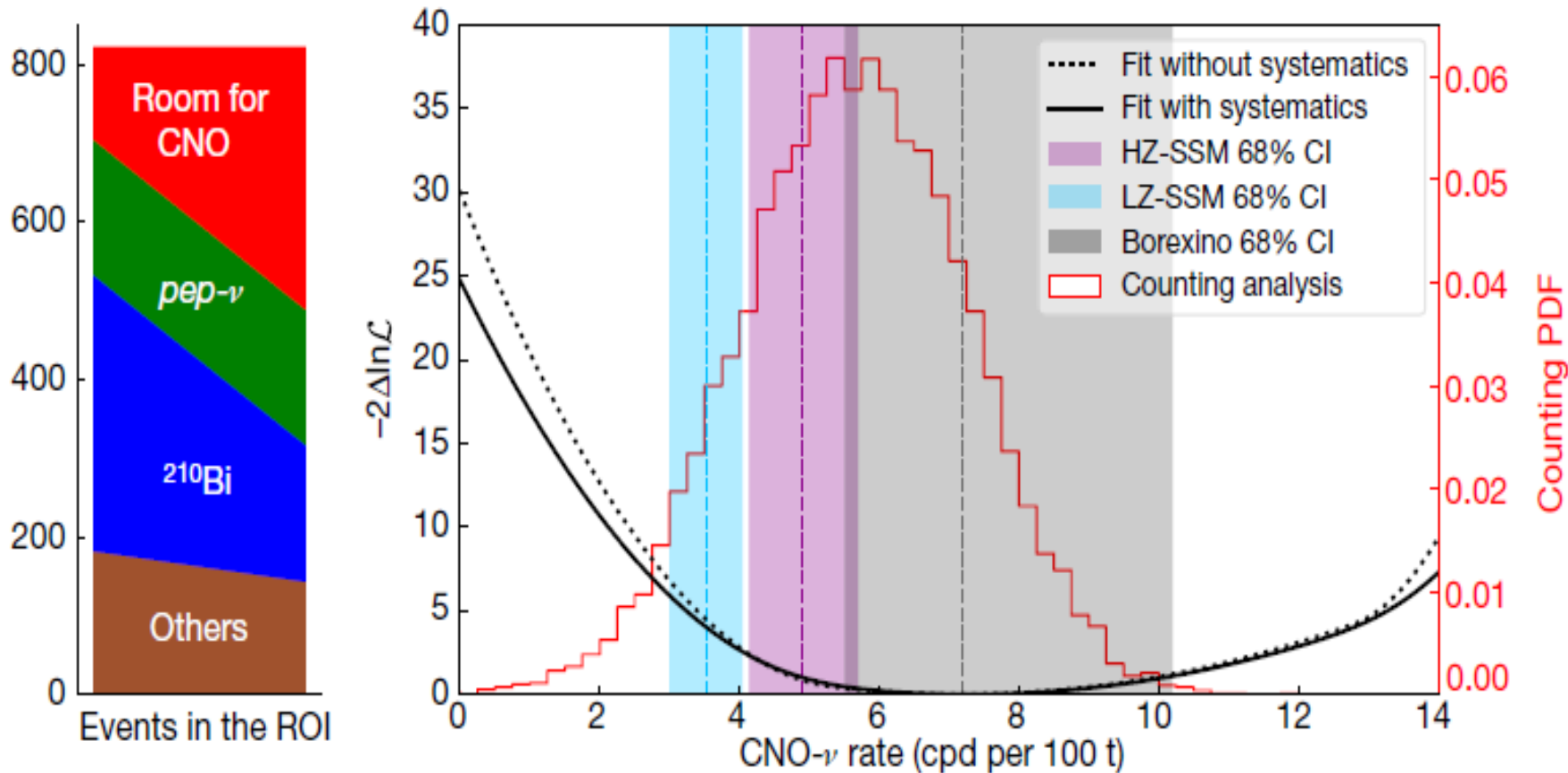
Температурная стабильность достигнута за 2 года



Начиная с сентября 2017 температура стабилизировалась, в результате удалось выделить области стабильной скорости счета.

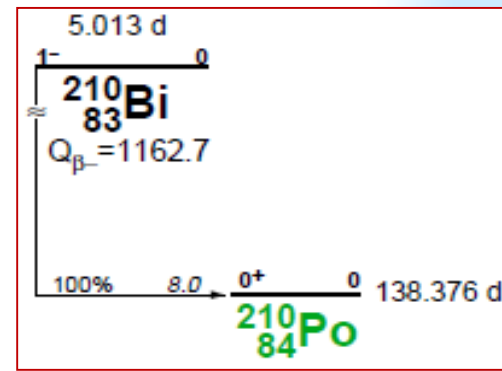
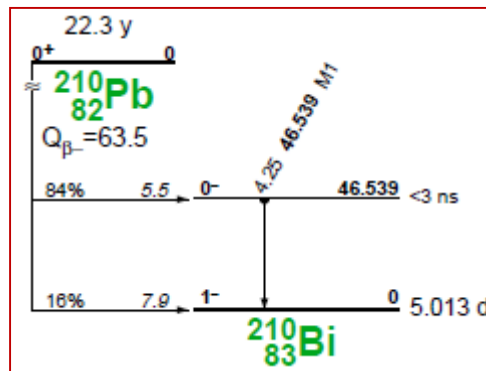
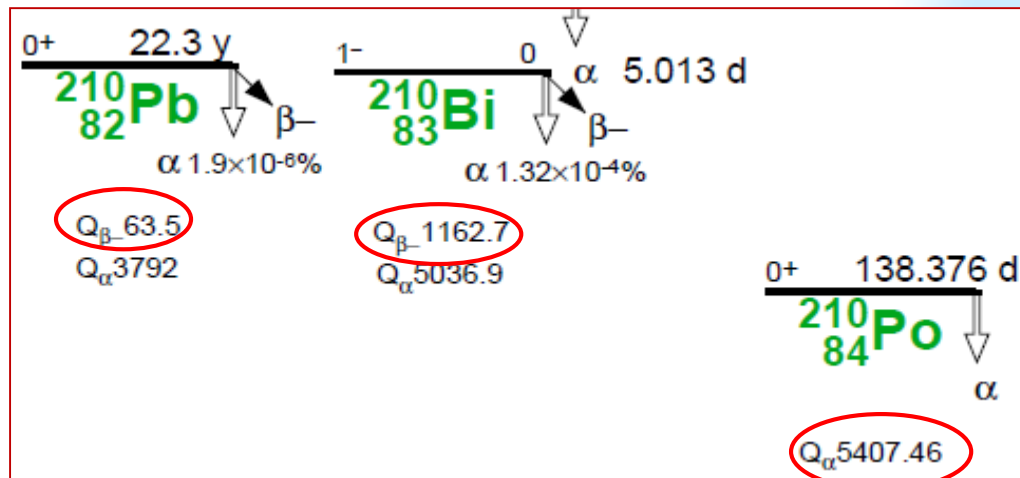
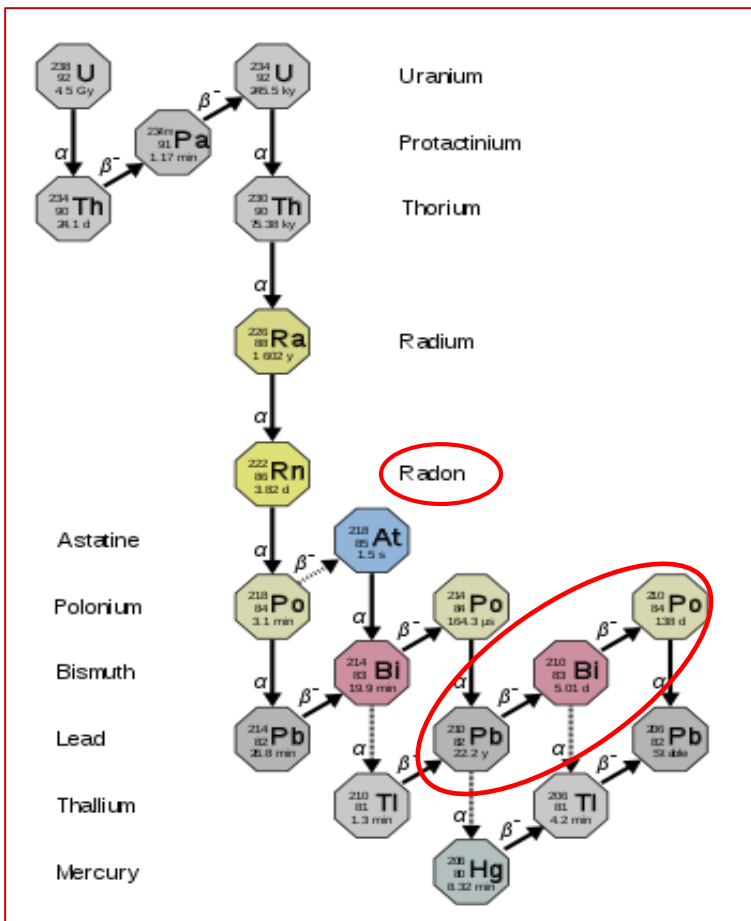
Результат для CNO-нейтрино

Nature, 2020



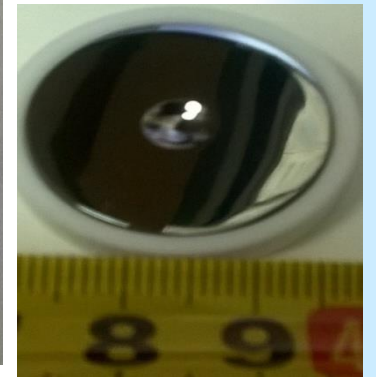
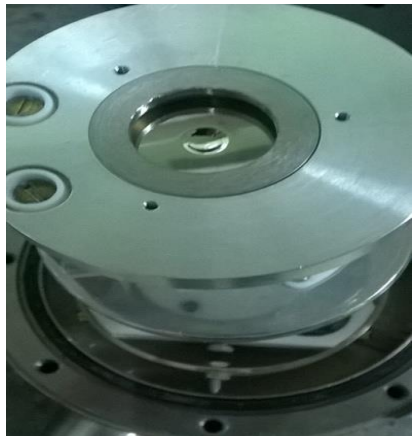
Результаты счетного и спектрального анализа в сравнении с LZ и HZ SSM. Функция правдоподобия скорости счета CNO-нейтрино для 320-2640 кэВ. Показаны интервалы для SSM-LZ $R=(3,52\pm 0,52)$ соб./сут.100т и SSM-HZ $R=(4,92\pm 0,78)$. Результат Borexino $R(\text{CNO})=(7.2_{-1.7}^{+3.0})$ соб./сут.100т. $\Phi(\text{CNO})=(7.0_{-2.0}^{+3.0})\times 10^8$ н/см²с. Значимость наблюдения CNO составляет 5.1σ . Гистограмма показывает $R(\text{CNO})=(5.6\pm 1.6)$ с/сут.100т, анализ в ROI=780-885 кэВ. Счетный и спектральный анализ используют форму β -спектра ^{210}Bi .

Измерение β -спектра ^{210}Bi – важно для $\text{CNO-}\nu$



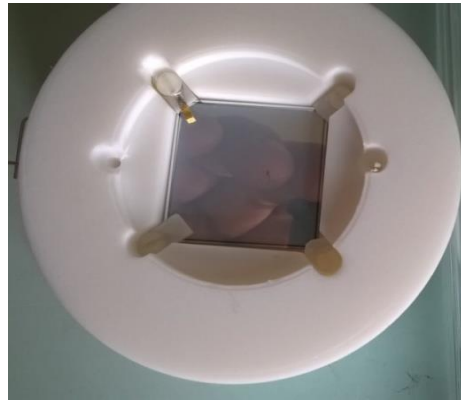
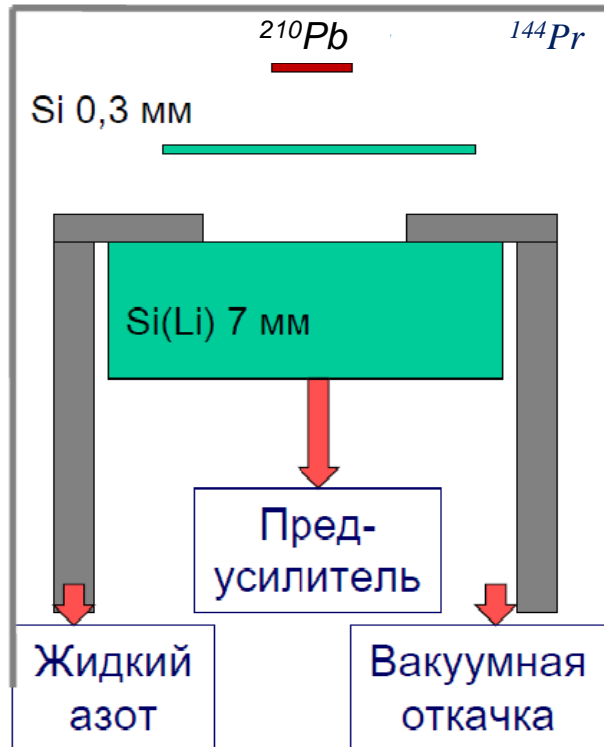
При подгонке спектра и анализе ROI использовалась форма β -спектра ^{210}Bi , который присутствует в фоновых спектрах всех низкофоновых установок, предназначенных для регистрации нейтрино, частиц темной материи, двойного бета-распада и др. ^{210}Bi может быть отделен от ^{238}U через газообразный ^{222}Rn , распады которого ведут к накоплению долгоживущего ^{210}Pb . ^{210}Pb ($Q=64$ кэВ) распадается в ^{210}Bi ($Q=1162$ кэВ), который распадается в ^{210}Po . *Vorexino* позволяет надежно выделить α -частицы и определить скорость счета ^{210}Bi .

Si(Li)-детекторы с толщиной до 10 мм



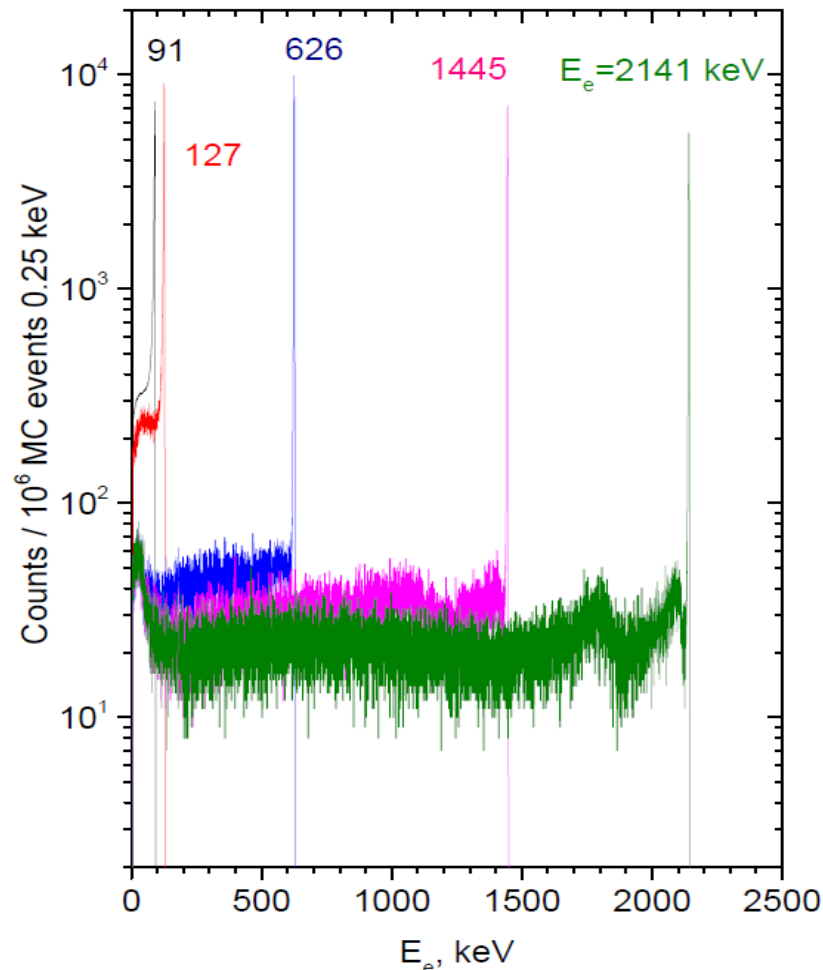
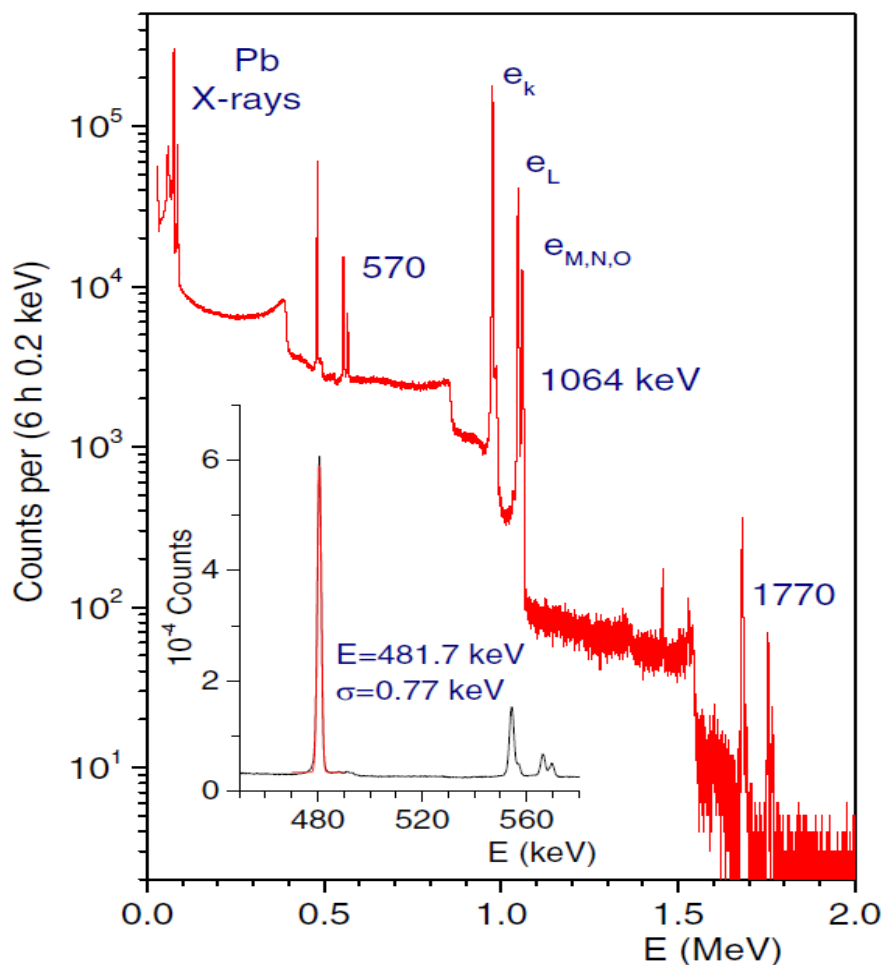
Измерение энергии электронов и α -частиц производилось с помощью Si(Li)-детекторов, изготовленных нами в ПИЯФ, и имеющих хорошее энергетическое разрешение ($\sigma \sim 1$ кэВ при $E=1$ МэВ), тонкое входное окно (~ 5000 А) и достаточную толщину для регистрации электронов с энергией до 3 МэВ. Детекторы размещаются в вакуумном криостате и охлаждаются до температуры жидкого азота.

Бета-спектрометр «мишень-детектор»



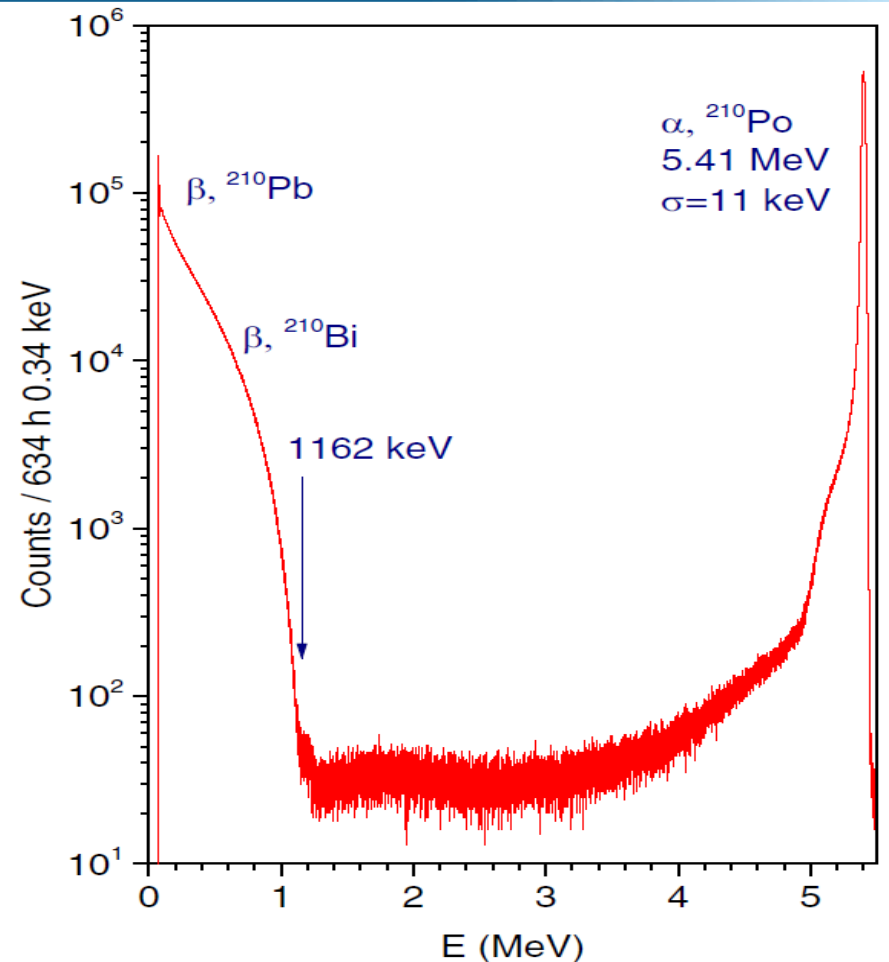
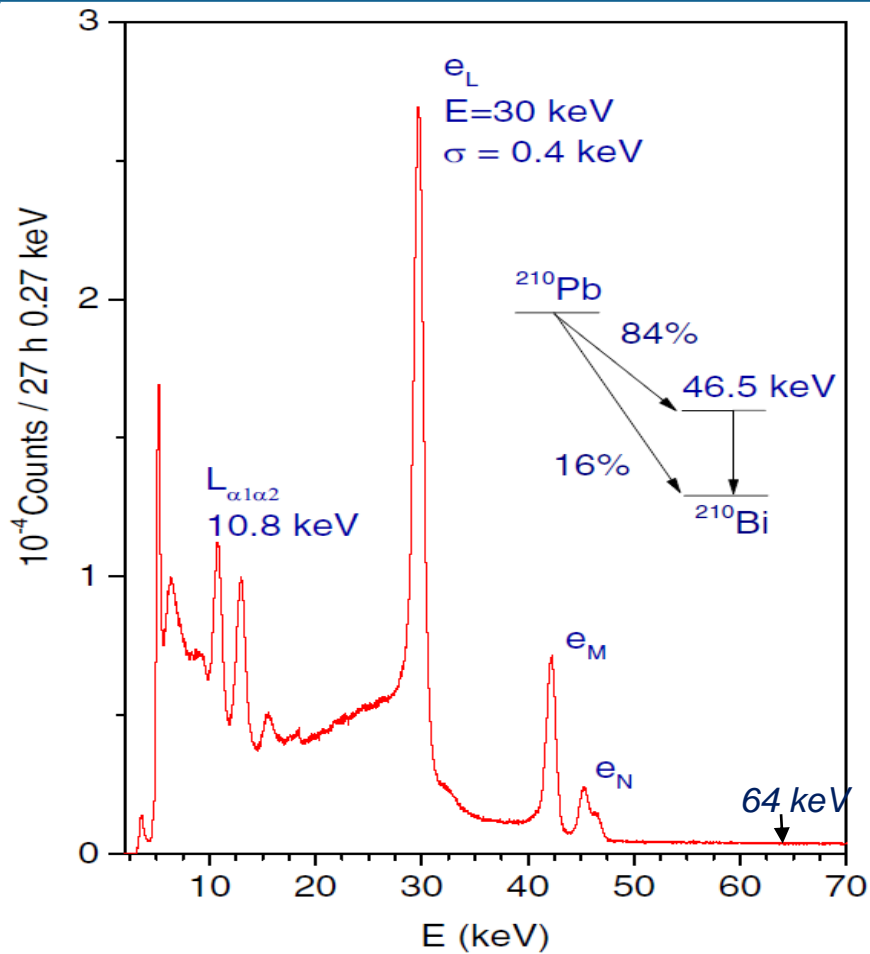
В ПИЯФ был специально разработан и создан **бета-спектрометр**, состоящий из Si(Li) -детектора полного поглощения и пролетного Si -детектора, который позволяет эффективно разделять β -излучение ядер от сопутствующего рентгеновского и γ -излучения. Метод основан на использовании **совпадений** между толстым и тонким детекторами. Спектрометр может использоваться для прецизионного измерения формы β -спектров различных радиоактивных ядер, в частности для измерения β -спектров ^{144}Ce - ^{144}Pr и ^{210}Bi для задач нейтринной физики.

E-, ϵ -калибровка и M-K симуляции функции отклика



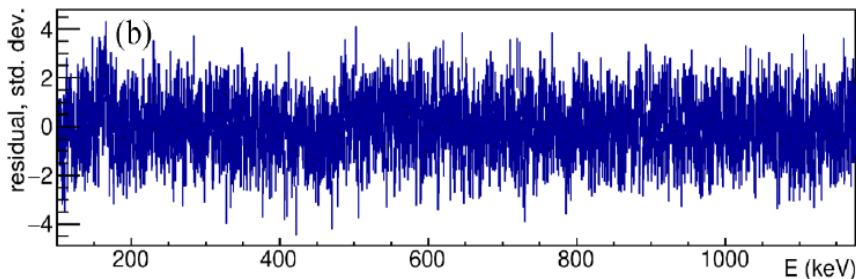
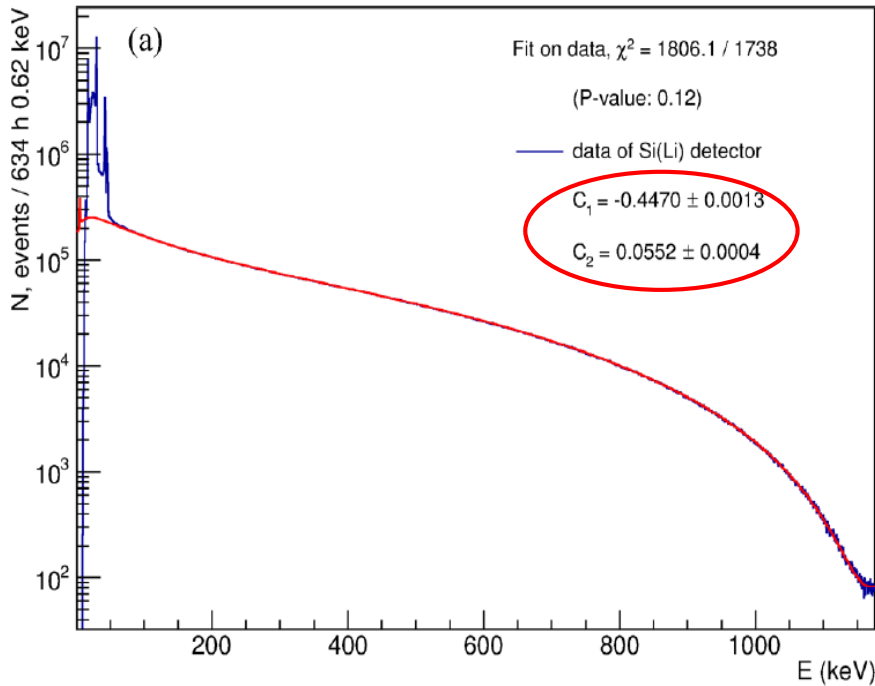
Конверсионные и Ожэ электроны позволяют прокалибровать спектрометр в области энергий от 0 до 2 МэВ. Основная проблема связана с хвостом функции отклика. Обратное рассеяние электронов от поверхности кристалла зависит от энергии и угла падения и составляет (10-30)%. Монте-Карло симуляция в *Geant4* для определения функции отклика.

Измерения $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$



Результаты измерения α -, β -, и γ -спектров ^{210}Pb , ^{210}Bi и ^{210}Po в схеме «мишень-детектор». Безносительный источник ^{210}Pb специально подготовлен для эксперимента. Разрешение для конверсионных электронов с $E=30 \text{ кэВ}$ составило $\sigma = 0.4 \text{ кэВ}$. Для α -частиц с энергией 5.3 МэВ составило $\sigma=11 \text{ кэВ}$. Накоплено 10^8 событий за 634 ч .

Подгонка β -спектра ^{210}Bi (Phys.Rev. C, 2020)



Форма β -спектра

$$S(W) = PW(W - W_0)^2 \times F(W, Z) \times C(W)$$

Функция Ферми и поправки

$$F(E, Z) = F_0(E, Z) \times S(E, Z) \\ \times L_0(E, Z) \times M(E, Z) \times G_\beta(E)$$

Ядерный формфактор

$$C(W) = 1 + C_1W + C_2W^2$$

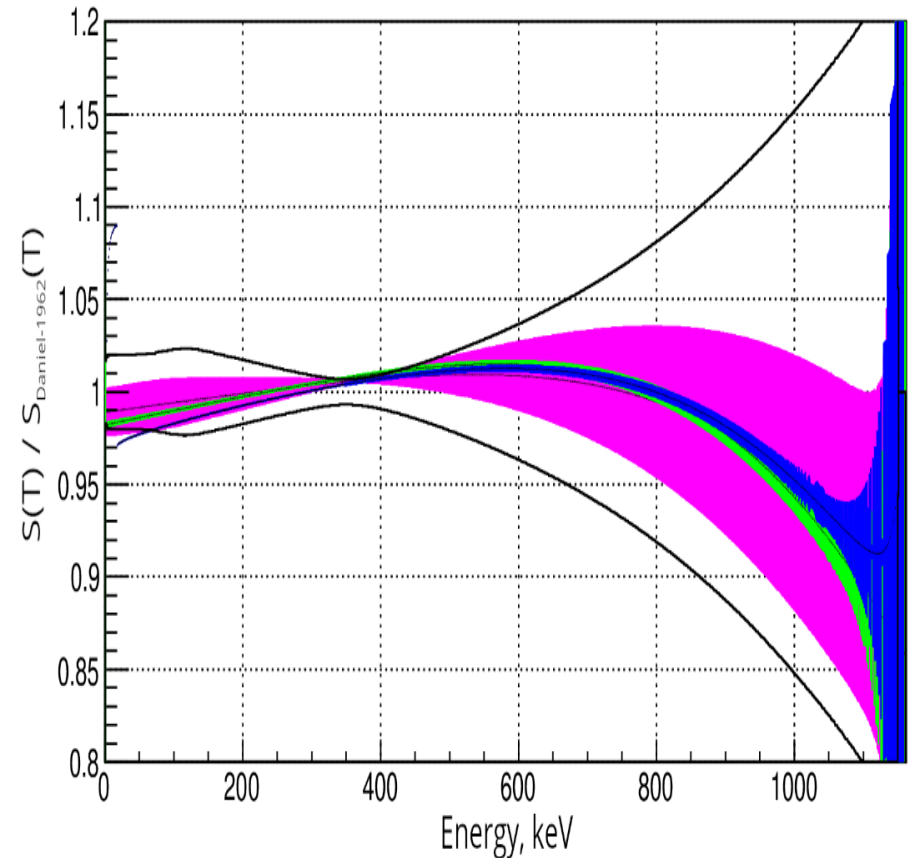
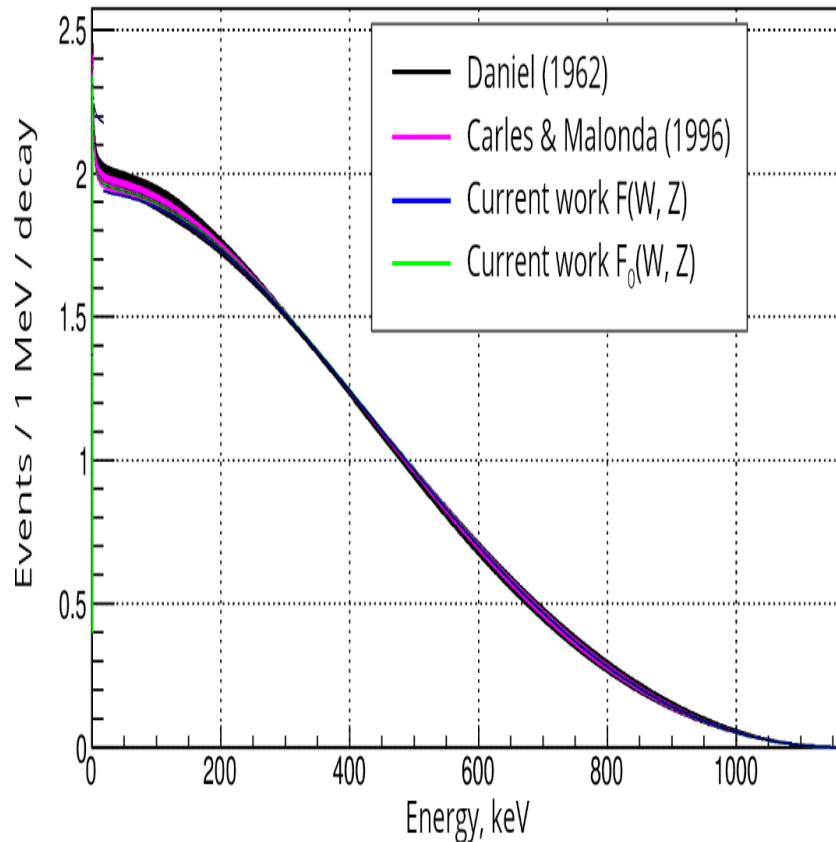
Свертка с функцией отклика

$$N(E) = \int_{E/mc^2+1}^{W_0} S(W) \times R(W, E) dW$$

$$C(W) = 1 + (-0.4470 \pm 0.0013)W + (0.0552 \pm 0.0004)W^2$$

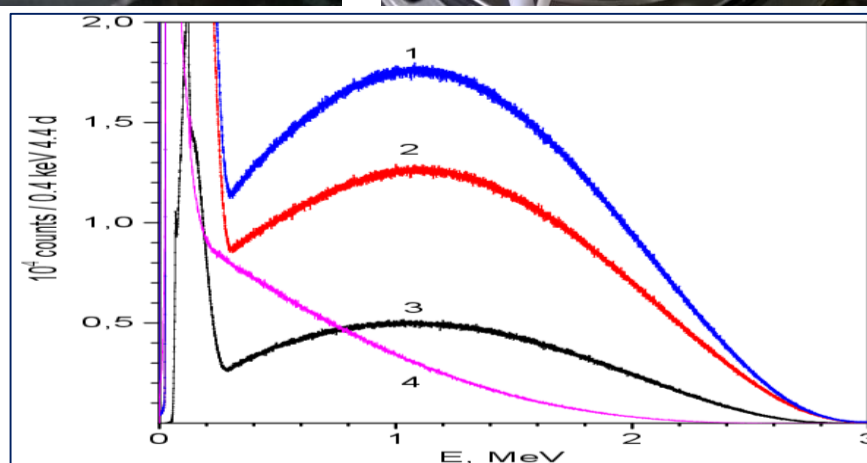
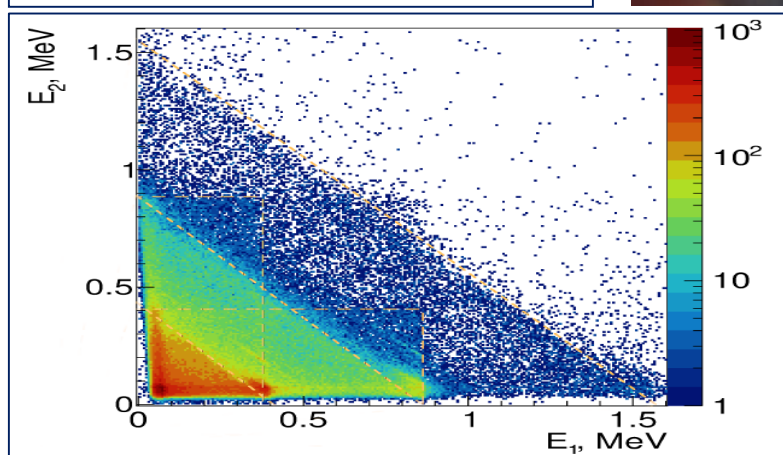
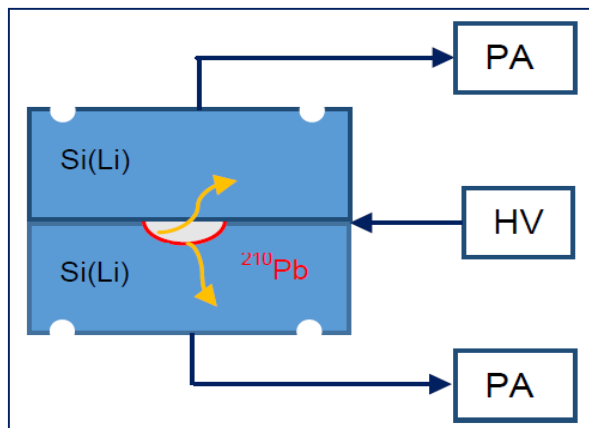
Распад ^{210}Bi это запрещенный 1-го порядка неуникальный переход. Я.Ф. в виде полинома. Подгонка в области 100-1175 кэВ дает приемлемое значение $\chi^2 = 1806/1738$ ($P = 0.12$). Существенное отклонение от формы разрешенного перехода.

Сравнение с предыдущими работами



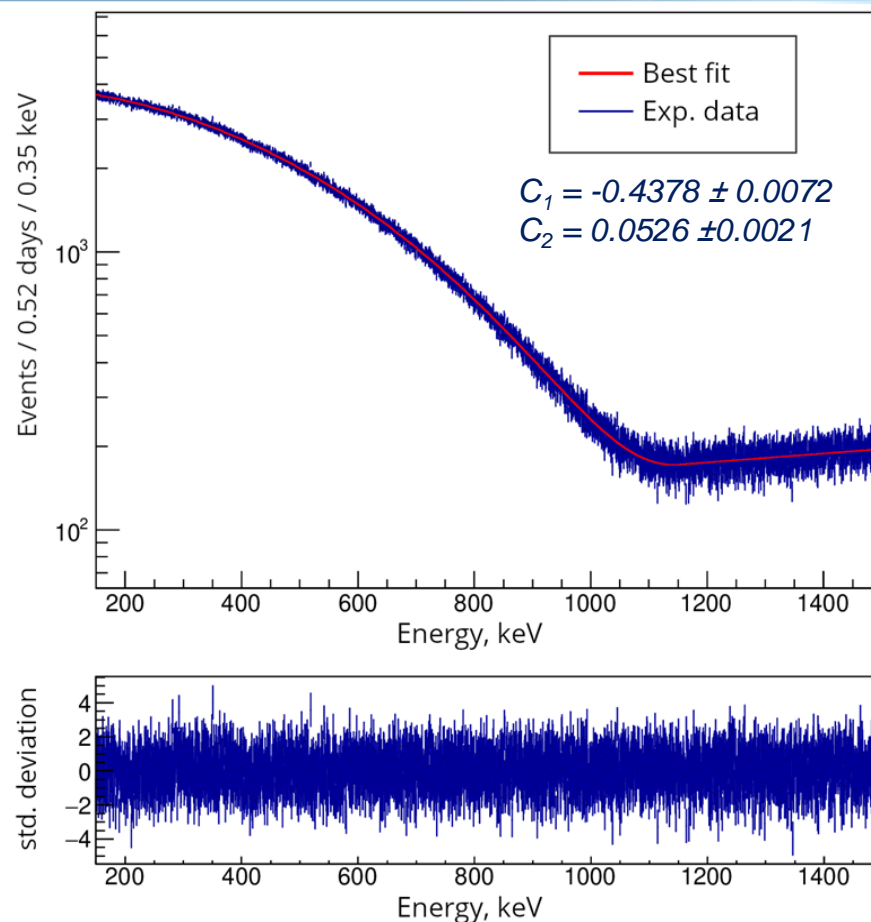
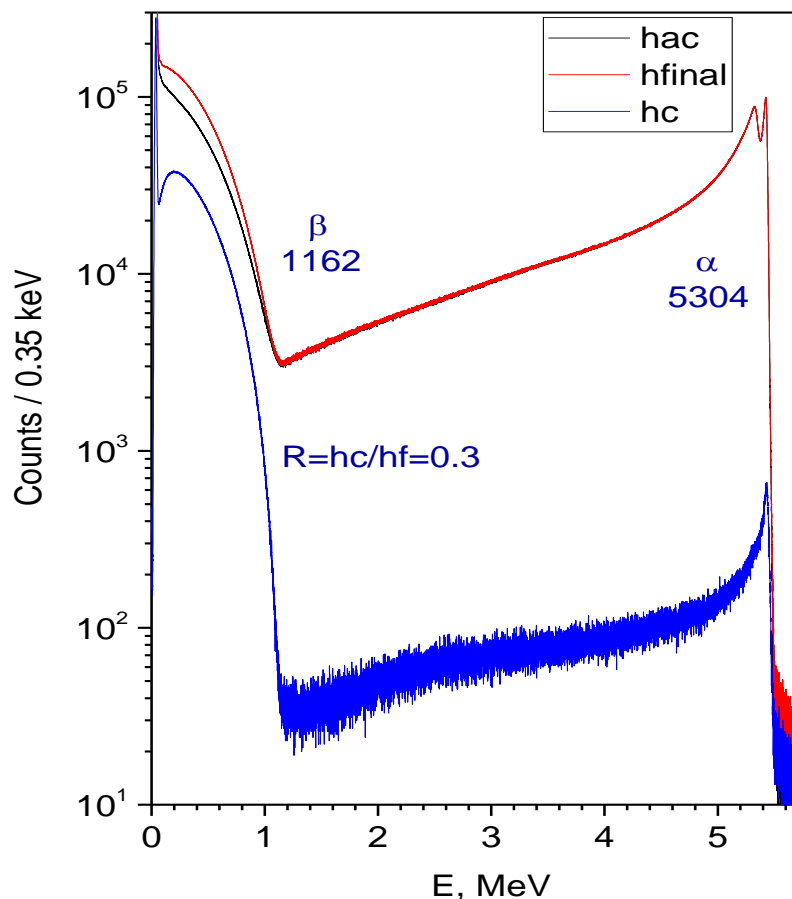
Согласуется со спектрами, измеренными с помощью магнитного β -спектрометра и жидкого сцинтиллятора. Отношение к спектру D , ошибки спектра D показаны сплошными черными линиями и достигают **15%**. Параметры ядерного формфактора в согласии (7.5%) с этими двумя работами и имеют существенно лучшую точность (**~ 10 раз**). Для определения систематической ошибки использовалось три β -спектра ^{210}Bi .

4πβ спектрометр с Si(Li)-детекторами



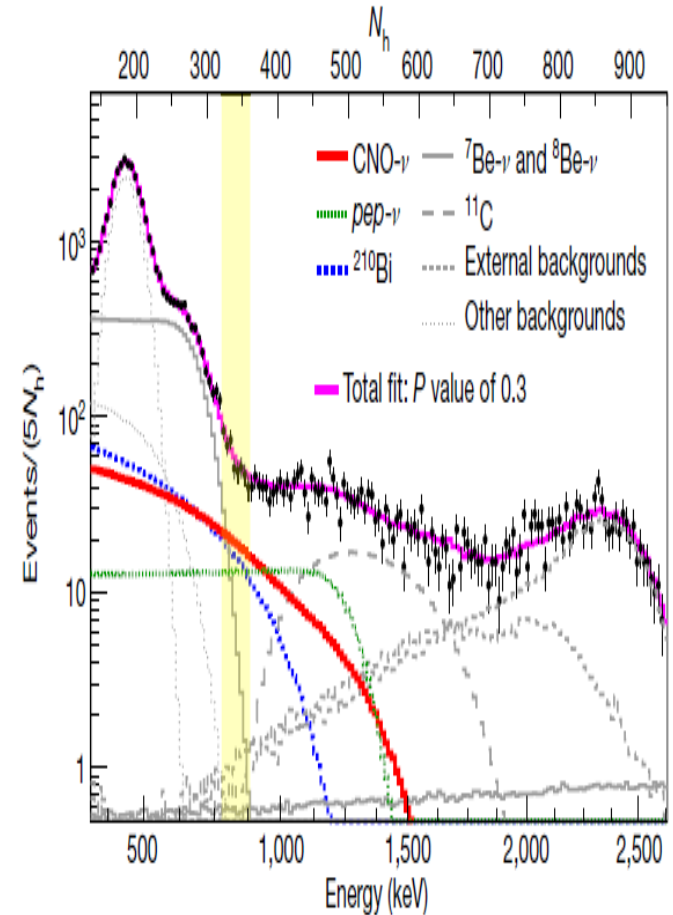
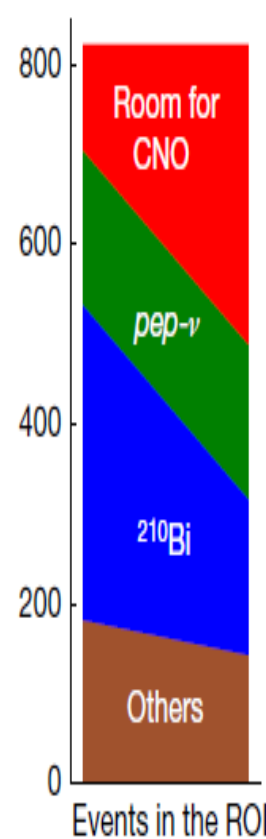
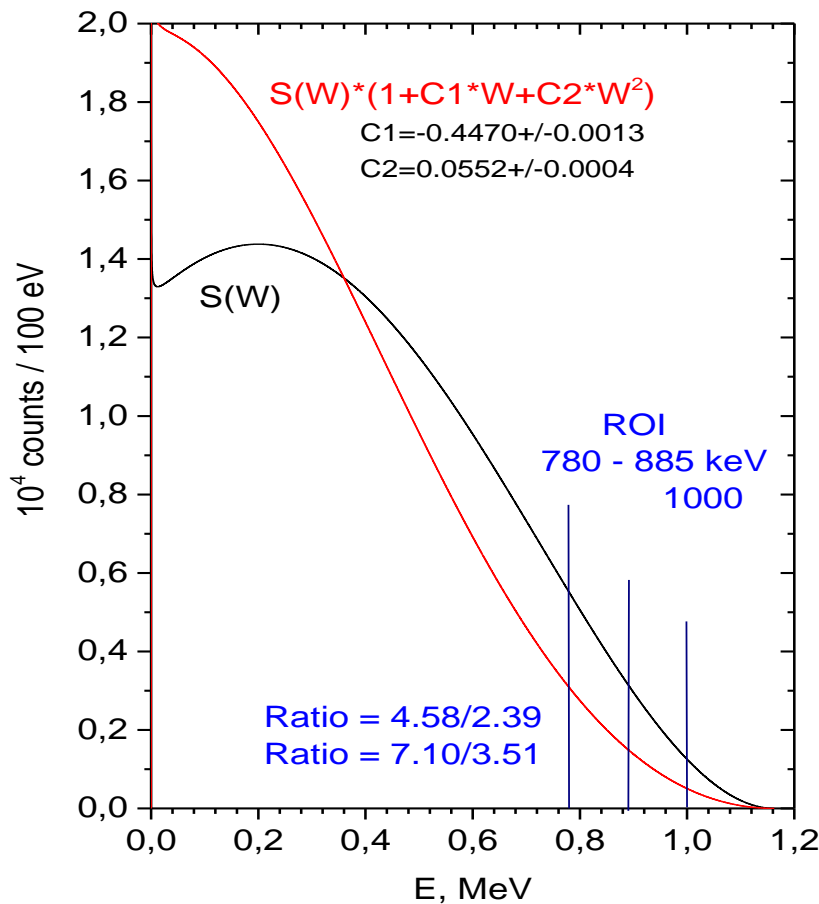
Для решения проблемы «хвоста» функции отклика создан 4πβ-спектрометр. В центре Si(Li)-детектора вышлифована лунка, в которую наносится источник. Сверху накладывается второй Si(Li)-детектор. Вся конструкция размещается в криостате и охлаждается до температуры жидкого азота. 4π спектрометр с функцией отклика близкой к Гауссовой практически решает проблему β-спектра для $E_e > 70 \text{ keV}$. Для определения спектра ниже 70 keV необходимо вычислить поправки и определить значения $C1$ и $C2$.

Результаты для ^{210}Bi с 4 $\pi\beta$ -спектрометром (2021)



Спектр электронов, измеренный с помощью 4 $\pi\beta$ -спектрометра. Функция отклика близка к гауссовой и не содержит низкоэнергетической части, связанной с обратным рассеянием электронов от поверхности кристалла. При подгонке ядерного формфактора функцией $C(W)=1+C_1W+C_2W^2$ значения параметров $C_1 = -0.4378 \pm 0.0072$ и $C_2 = 0.0526 \pm 0.0021$ в согласии с измерениями в схеме «мишень-детектор».

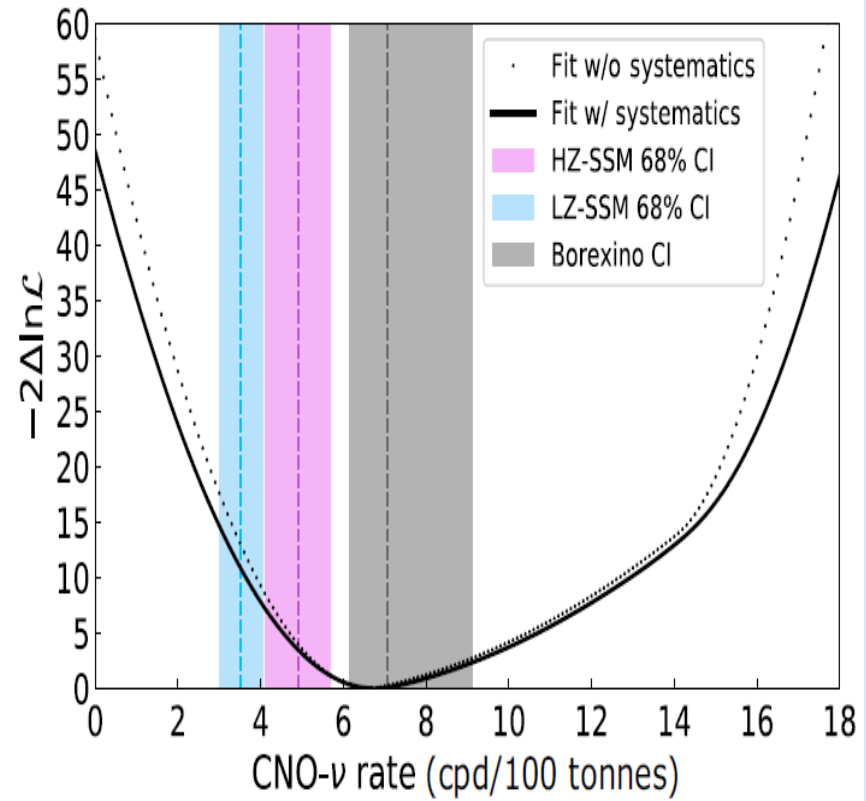
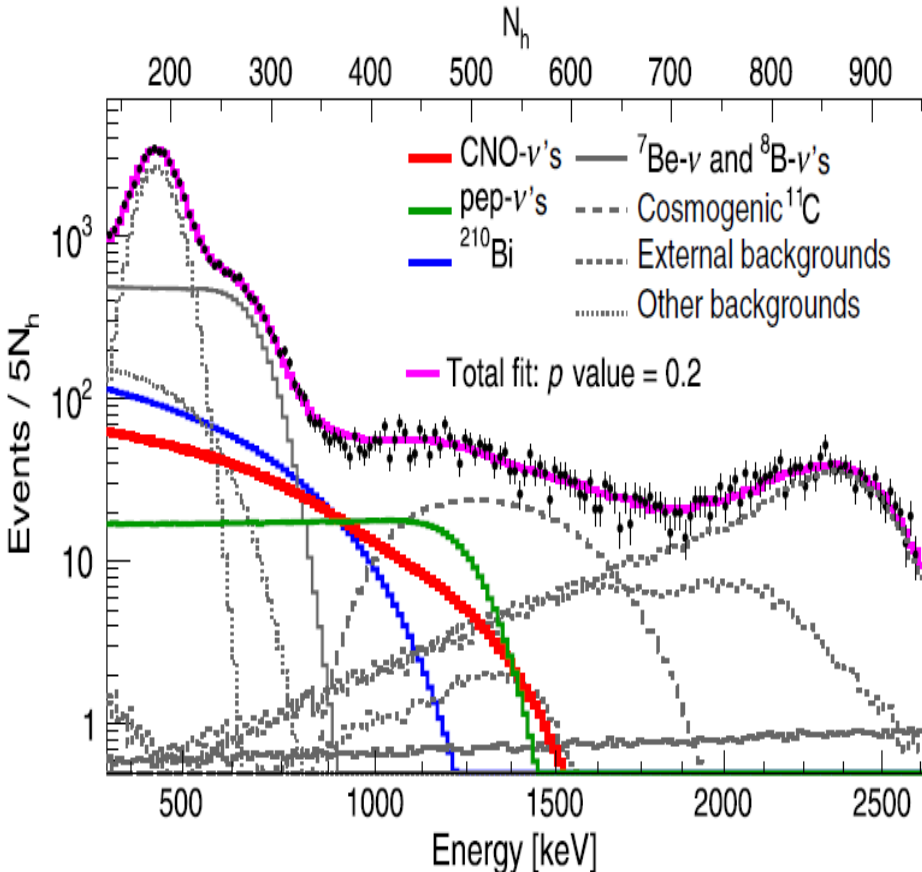
Спектр ^{210}Bi и CNO-нейтрино



Форма спектра ^{210}Bi существенно отличается от разрешенной и важна при анализе вклада CNO-нейтрино в измеренный спектр Борексино. Особенно это важно при анализе спектров будущих детекторов с большей статистикой для CNO-нейтрино и меньшим вкладом в фон космогенного ^{11}C . Анализ на полном наборе данных Борексино, который дополнительно включает **1.5 года** статистики, выполнен в **2022 г.**

Регистрация CNO-нейтрино – результат 2022 г.

PRL 129, 259701 (2022)

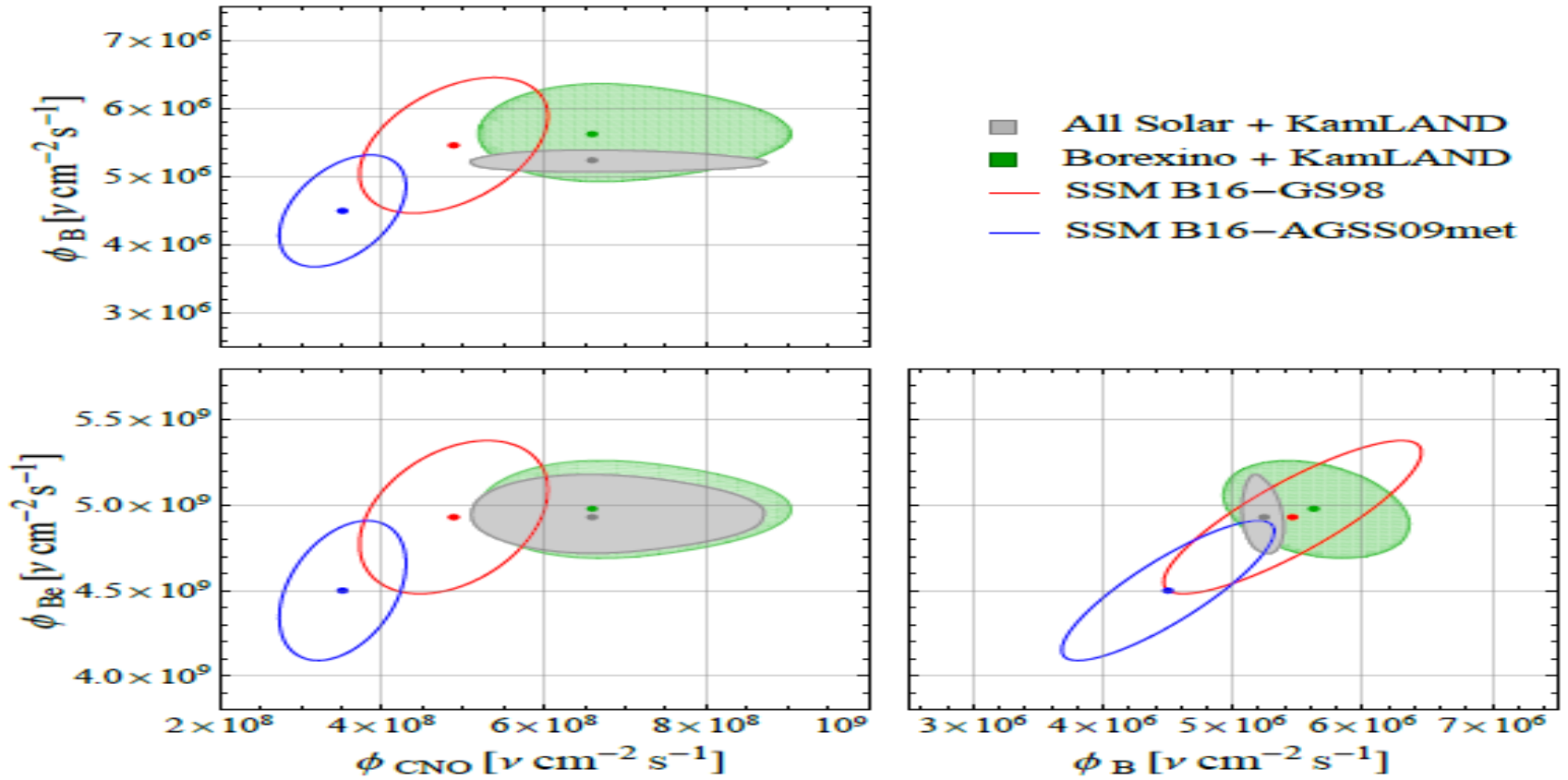


Результаты спектрального анализа данных с января 2017 г. по октябрь 2021 г. подавленным вкладом космогенного фона ^{11}C (слева). Справа: функция правдоподобия ($-2\Delta\ln L$) скорости счета CNO-нейтрино с учетом статистики и систематики. Синие, фиолетовые и серые вертикальные полосы показывают 68% у.д. для SSM-LZ ($3,52 \pm 0,52$ cpd/ 100 t) и SSM-HZ ($4,92 \pm 0,78$ cpd/100 t) и результат Borexino ($6.8-0.8+2.0$ cpd/ 100 t), соответственно.

Металличность: теория vs эксперимент

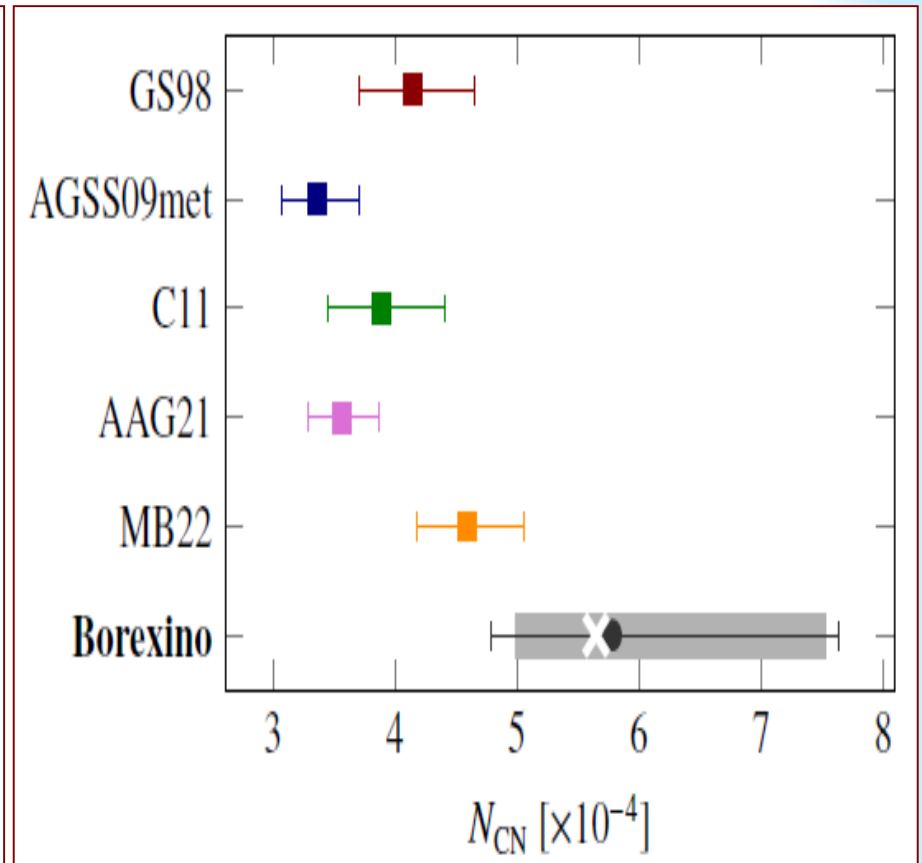
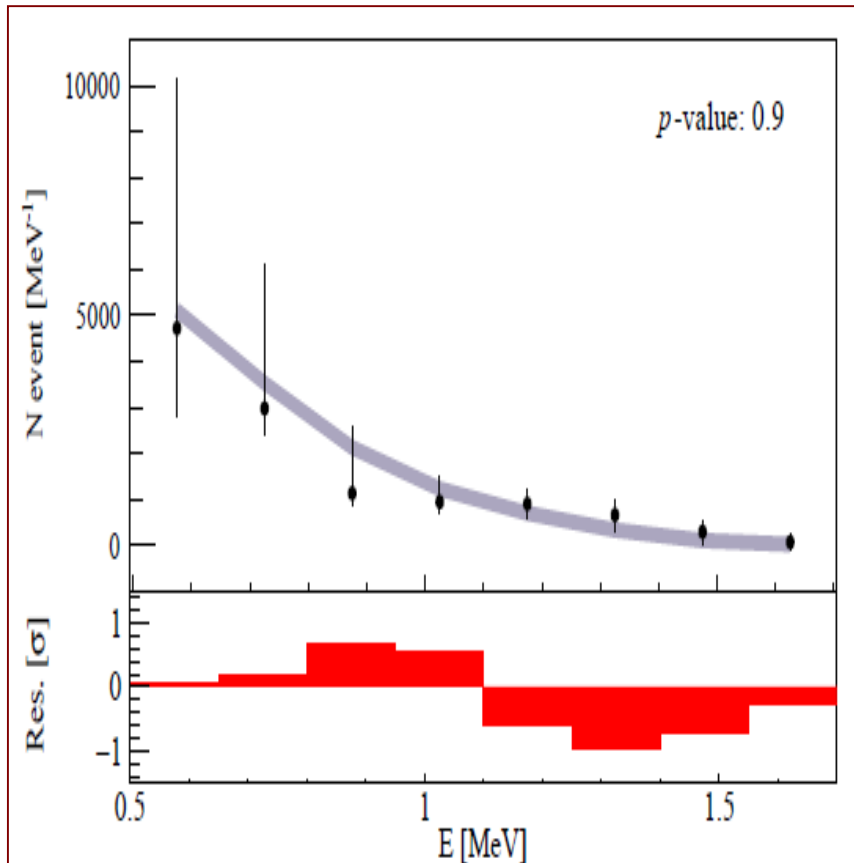
SSM-HZ = B16-GS98: Vinyoles et al. Astr.J. 835 (2017) 202 + Grevesse et al., SpaceSci.Rev. (1998)85

SSM-LZ = B16-AGSS09met: Vinyoles et al. Astr.J. 835 (2017) 202 + A. Serenellier et al., Astr. J. 743,(2011)24



Включение результатов CNO в глобальный анализ данных о солнечных нейтрино + KamLAND (1σ контур); $\Phi(\text{Be})$, $\Phi(\text{B})$ и $\Phi(\text{CNO})$ вместе с θ_{12} и Δm^2_{12} являются свободными параметрами фита. Результаты хорошо согласуются с HZ, но не с LZ. Добавление CNO уменьшает $P(\text{LZ})$ до 0,028 (0.016 Вх только). Добавление результатов по ^7Be и ^8B нейтрино позволяет исключить LZ на уровне 3.1σ .

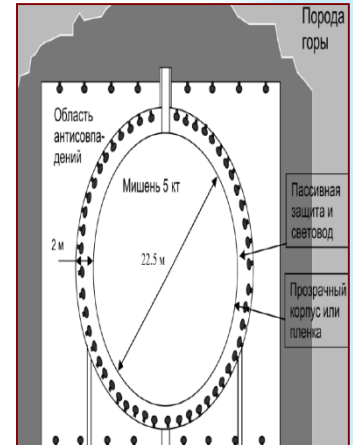
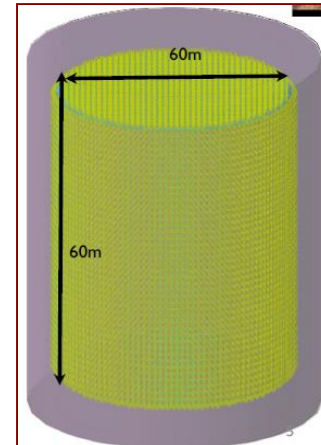
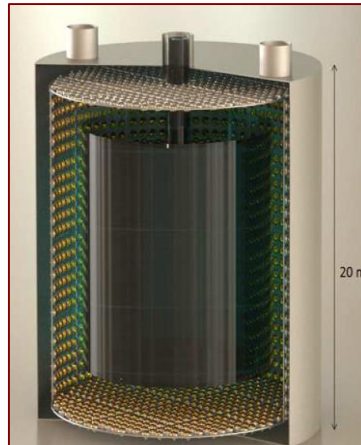
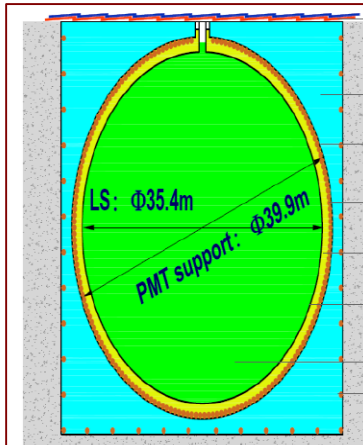
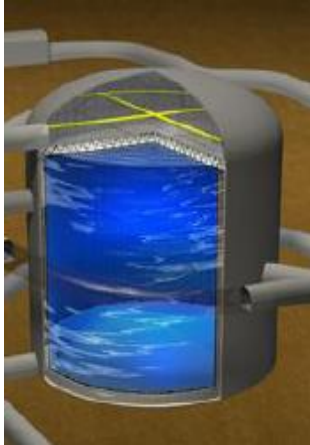
Определение концентрации $C+N / H$



Измеренный спектр электронов отдачи в сравнении с ожидаемым (LMA MSW) и (теор. - экс.) / σ экс. Увеличение статистики позволит проверить нестандартные взаимодействия в переходной области. Проведённые измерения позволяют определить концентрацию $(C+N)/H$ в сравнении с данными по спектрометрии фотосферы. Результат $5.8+1.9-1.0$ отличается на 2σ от LZ.

Перспективы солнечных нейтрино

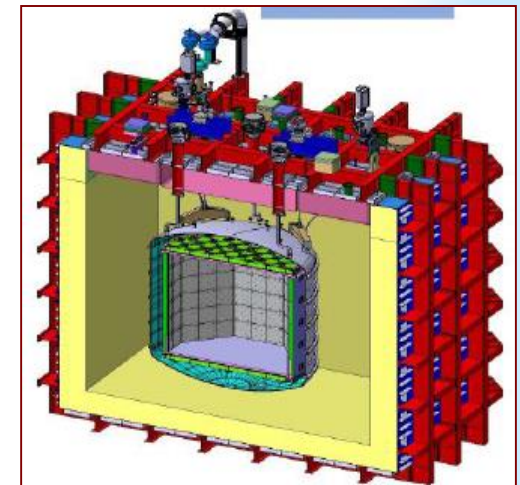
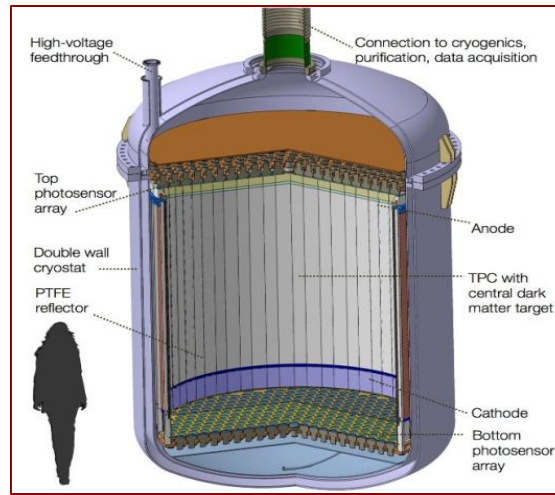
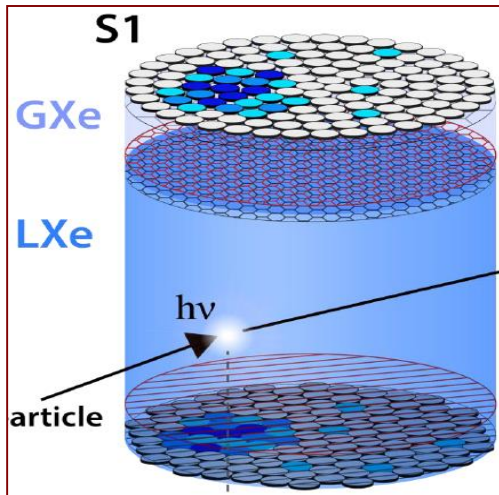
Hyper-Kamiokande, JUNO, ЛАБ, 680 м **JinPing**, 5кТ, LS, 2.4км **THEIA**, 50-100 кТ, **Баксан**, 10 кТ,
 250 км, ^8B , $\text{hep-}\nu$ реакторные, ^7Be , ^8B pp , ^7Be , ^8B , CNO WbLS , ^7Be , ^8B $\text{LS-}^{14}\text{C}$, geo, sol



XENONnT, LXe, 59 m,
 ^{136}Xe $2b2\nu$, ^{131}Xe , ~~44G~~

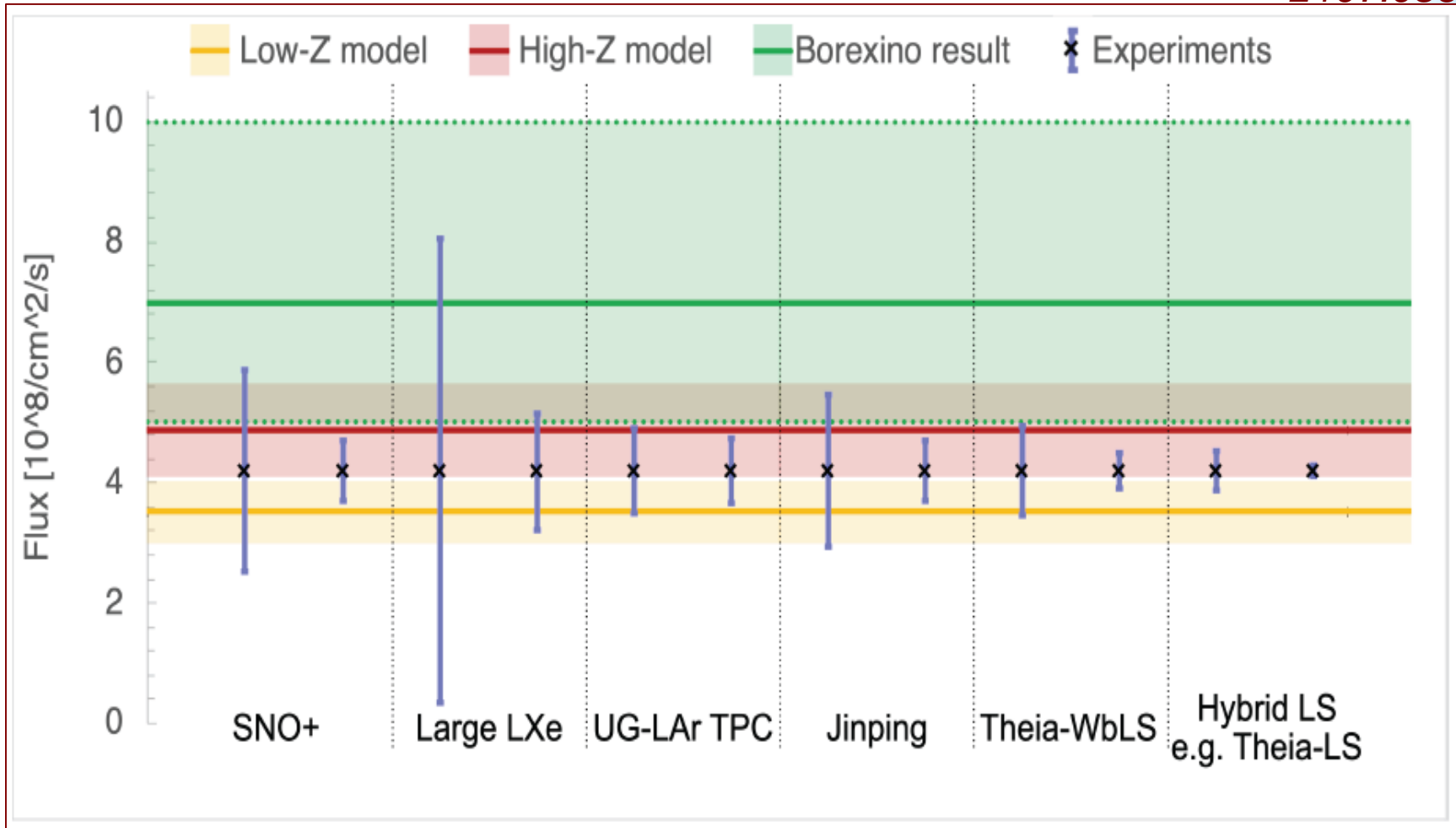
DARWIN, LXe, 40t, pp- , $^7\text{Be-}\nu$,
 axions, $2b0\nu$ ^{136}Xe , CvNS ($^8\text{B-}\nu$), SN- ν

DarkSide20k, LAr, 50 m,
 ^{42}Ar ^{42}K (3.5 МэВ), DUNE



Перспективы для CNO нейтрино

2107.0861



Ожидаемая точность измерения потока CNO-нейтрино для двух сценариев, согласно 2107.0861. Точность экспериментов превысит точность теоретических предсказаний.

Заключение

1. Коллаборация Borexino успешно провела нейтринную спектроскопию Солнца по реакции (ν, e) -рассеяния. С рекордной точностью измерены потоки pp -, ${}^7\text{Be}$ -, pep - и CNO -нейтрино, а поток ${}^8\text{B}$ -нейтрино измерен с наиболее низкого порога.

2. Повышение точности в измерении потоков и спектров низкоэнергетических pp -, ${}^7\text{Be}$ -, pep - и CNO -нейтрино важно, как для физики частиц, так и физики Солнца. Данные Borexino лучше согласуются с HZ моделью Солнца.

3. Получены новые данные по редким процессам (магнитный момент, аксионы, принцип Паули, тяжелое стерильное нейтрино, процессы с $\Delta B = \pm 1, 2, 3$, распад электрона) и корреляциям с транзиентными источниками (гамма-всплески, солнечные вспышки, гравитационные волны, быстрые радиовсплески, астрофизические нейтрино).

4. Солнечные нейтринные детекторы эффективны для других физических задач:

Гео-нейтрино (KamLAND, Борексино)

Двойной ($2\nu\beta\beta$) бета-распад (KamLAND_Zn, SNO+, Borexino)

Стерильное нейтрино (CeLand, Borexino_SOX, BEST)

Спасибо за внимание!

