



Регистрация солнечных CNO нейтрино в эксперименте Борексино.

А.В. Дербин

Петербургский институт ядерной физики

Содержание

1. Потоки и спектры солнечных нейтрино в ССМ
pp-, ^7Be -, ^8B -, pep-, hep- и CNO

2. Детекторы солнечных нейтрино
Homestake, Kamiokande, SAGE, GALLEX/GNO, S-Kamiokande, SNO, KamLAND, BOREXINO

3. Детектор Борексино
энергия, координаты события, фон

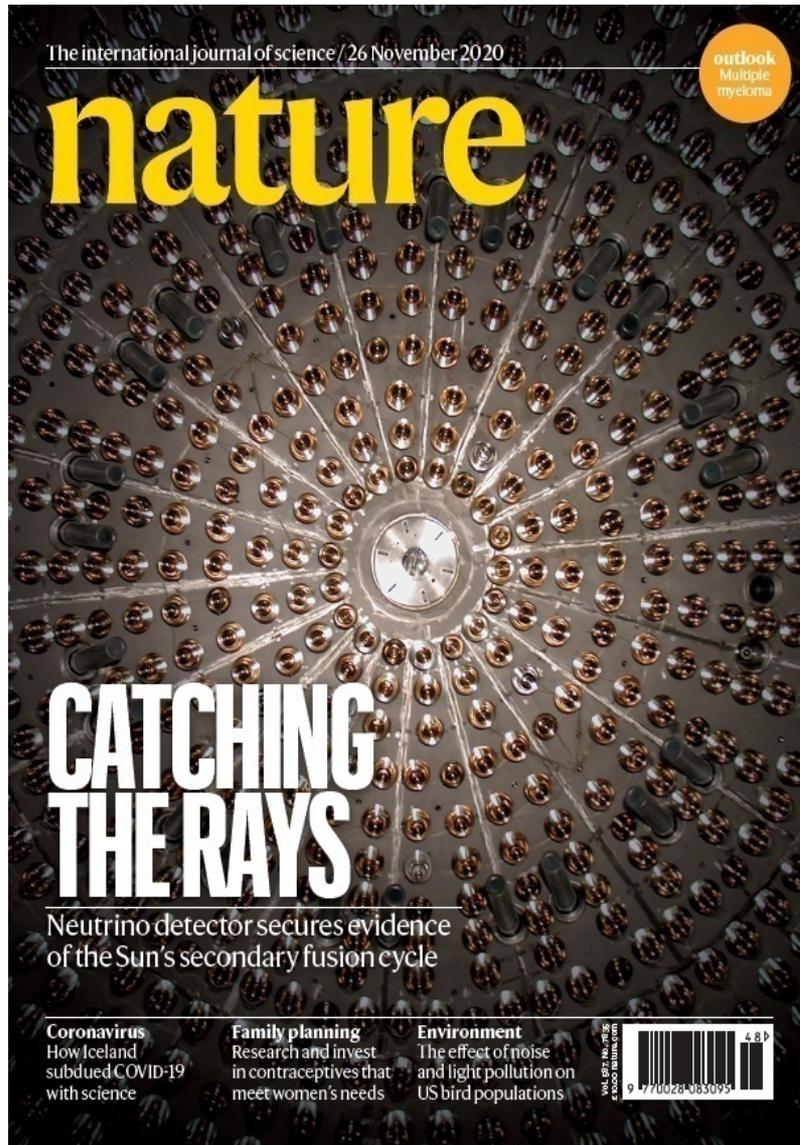
4. Результаты Борексино по солнечным нейтрино из pp-цепочки.
 ^7Be -, ^8B -, pep- и pp-нейтрино

5. CNO нейтрино
Корреляции с pep-нейтрино и ^{210}Bi , потоки, содержание C+N

6. Измерение бета-спектра ^{210}Bi
Два типа β -спектрометров на основе Si(Li)-детекторов в ПИЯФ

7. Результаты для CNO- ν 2020 - 2023 г. перспективы и заключение

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



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. Giammarchi⁴, A. Goretti^{7,f}, A. S. Göttel^{3,15}, M. Gromov^{10,12}, D. Guffanti¹⁶, Aldo Ianni⁶, Andrea Ianni⁷, A. Jany¹⁷, D. Jeschke¹, V. Kobychyev¹⁸, G. Korga¹⁹, S. Kumaran^{3,15}, M. Laubenstein⁶, E. Litvinovich^{2,20}, P. Lombardi⁴, I. Lomskeya¹¹, L. Ludhova^{3,15}, G. Lukyanchenko², L. Lukyanchenko², I. Machulin^{2,20}, J. Martyn¹⁶, 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^{2,6,8}, 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

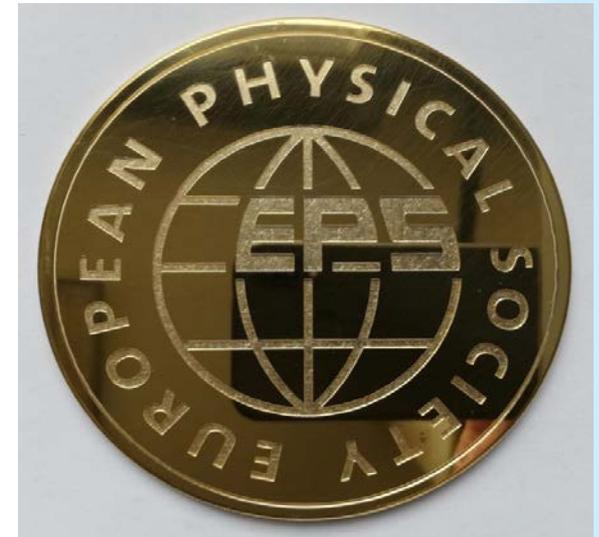
95 авторов, 22 РФ, 7 ПИЯФ

Регистрация CNO-нейтрино (2016-20-22-23)

«Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2020»



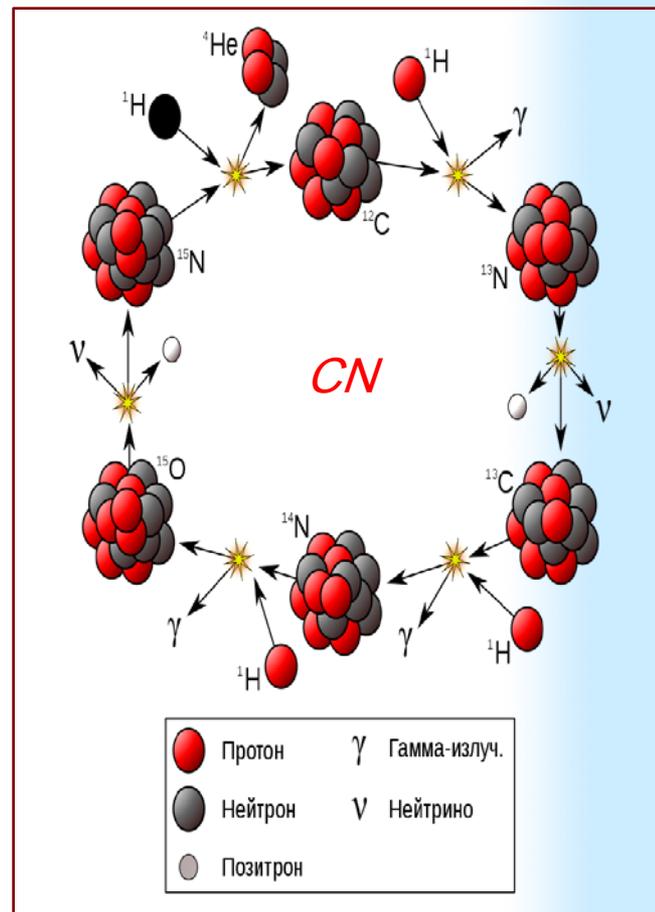
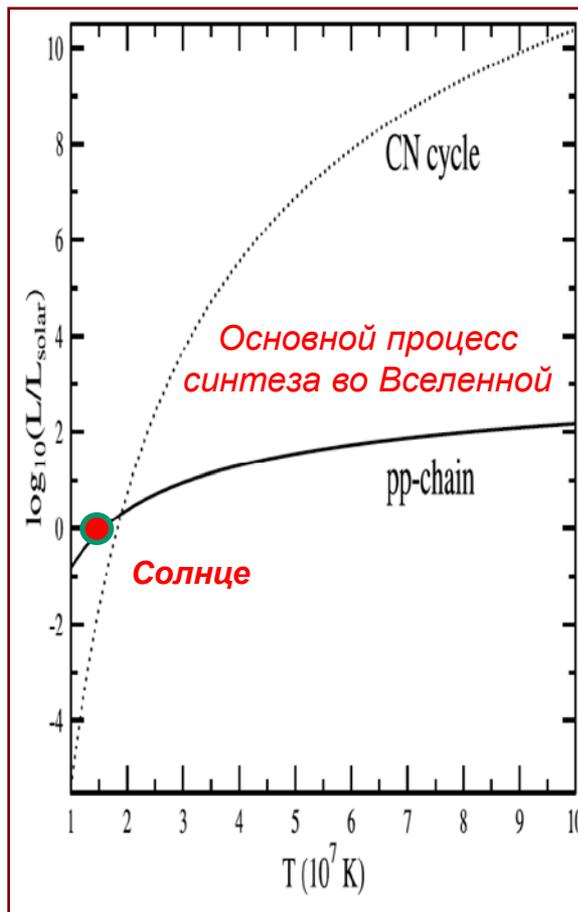
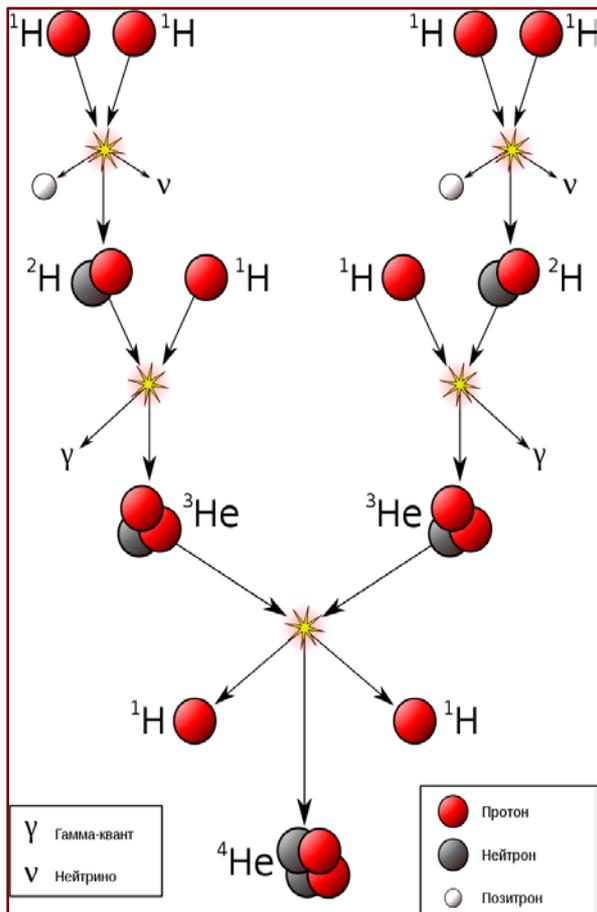
The EPS European Physical Society has awarded the prestigious "Giuseppe and Vanna Cocconi Prize 2021" to the scientific collaboration Borexino.



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.

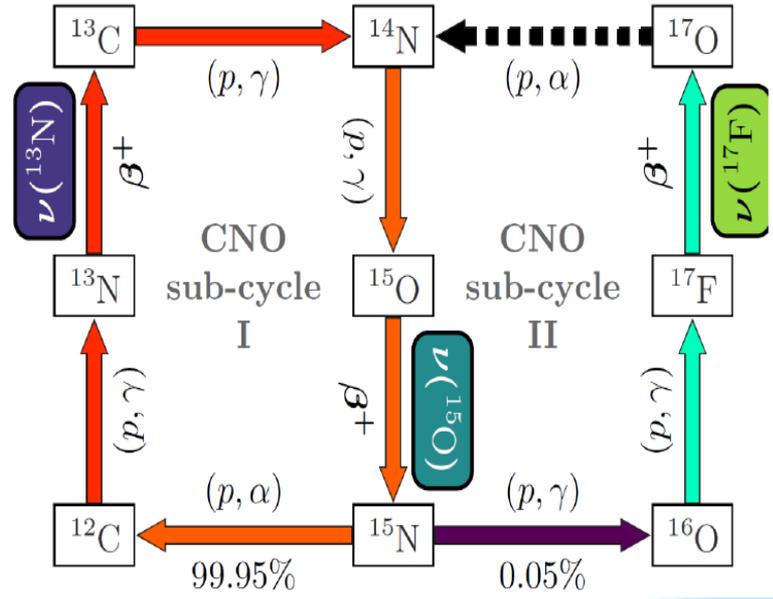
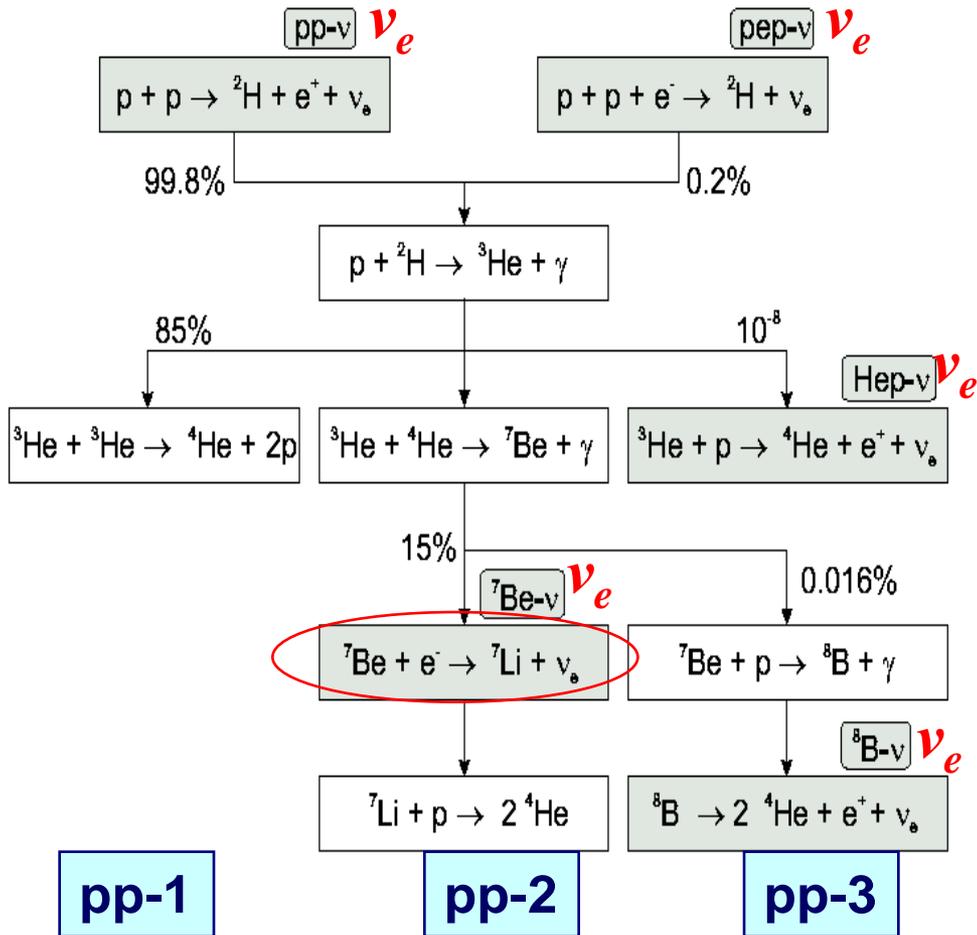
Важный результат, который был включен в 10 прорывных результатов 2020 года во всех разделах физики. В 2021 коллаборация получила премию Д. и В. Коккони, в существенной степени за результат для CNO-нейтрино.

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 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

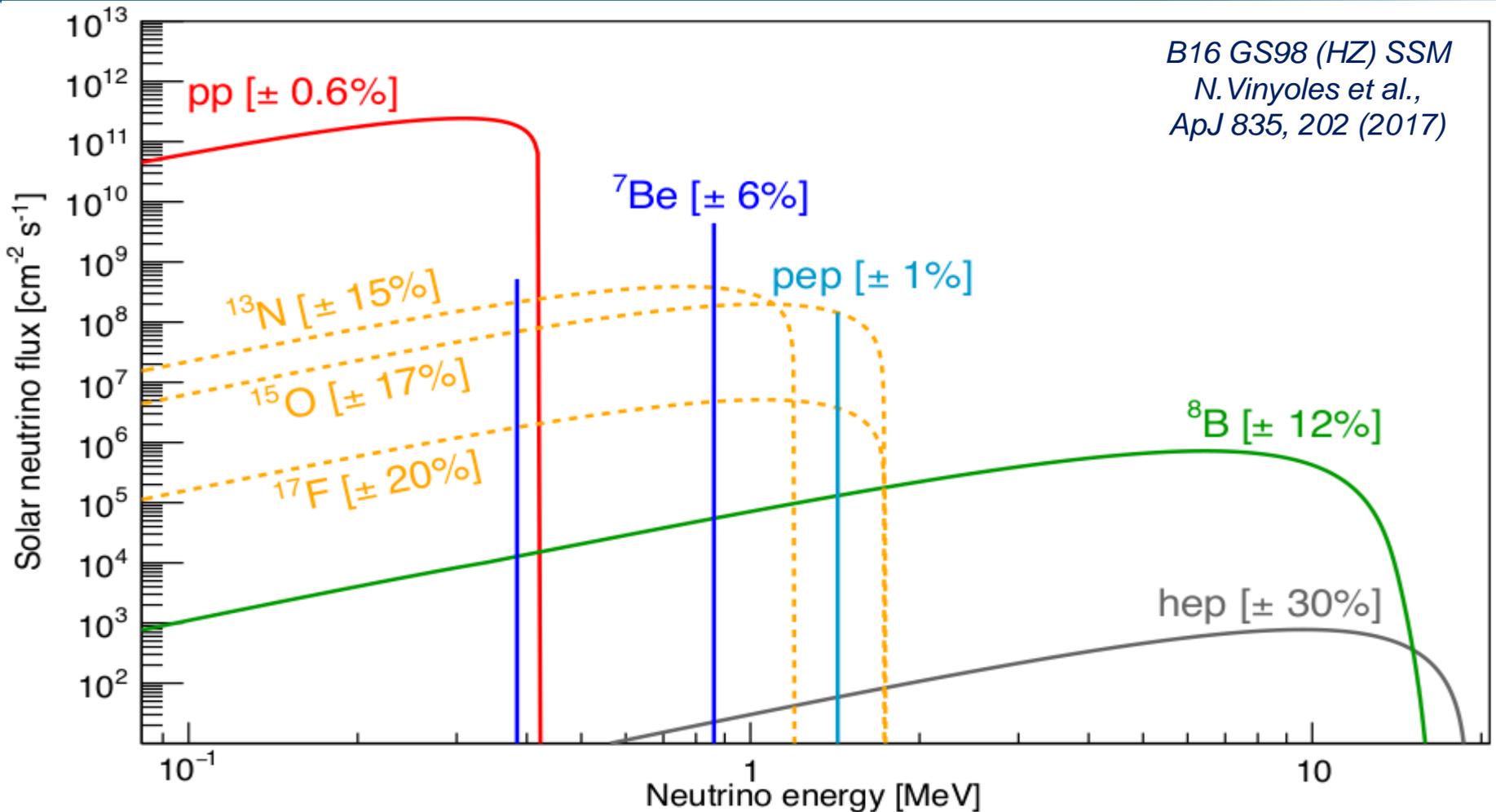


${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$
 ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$
 ${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$

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

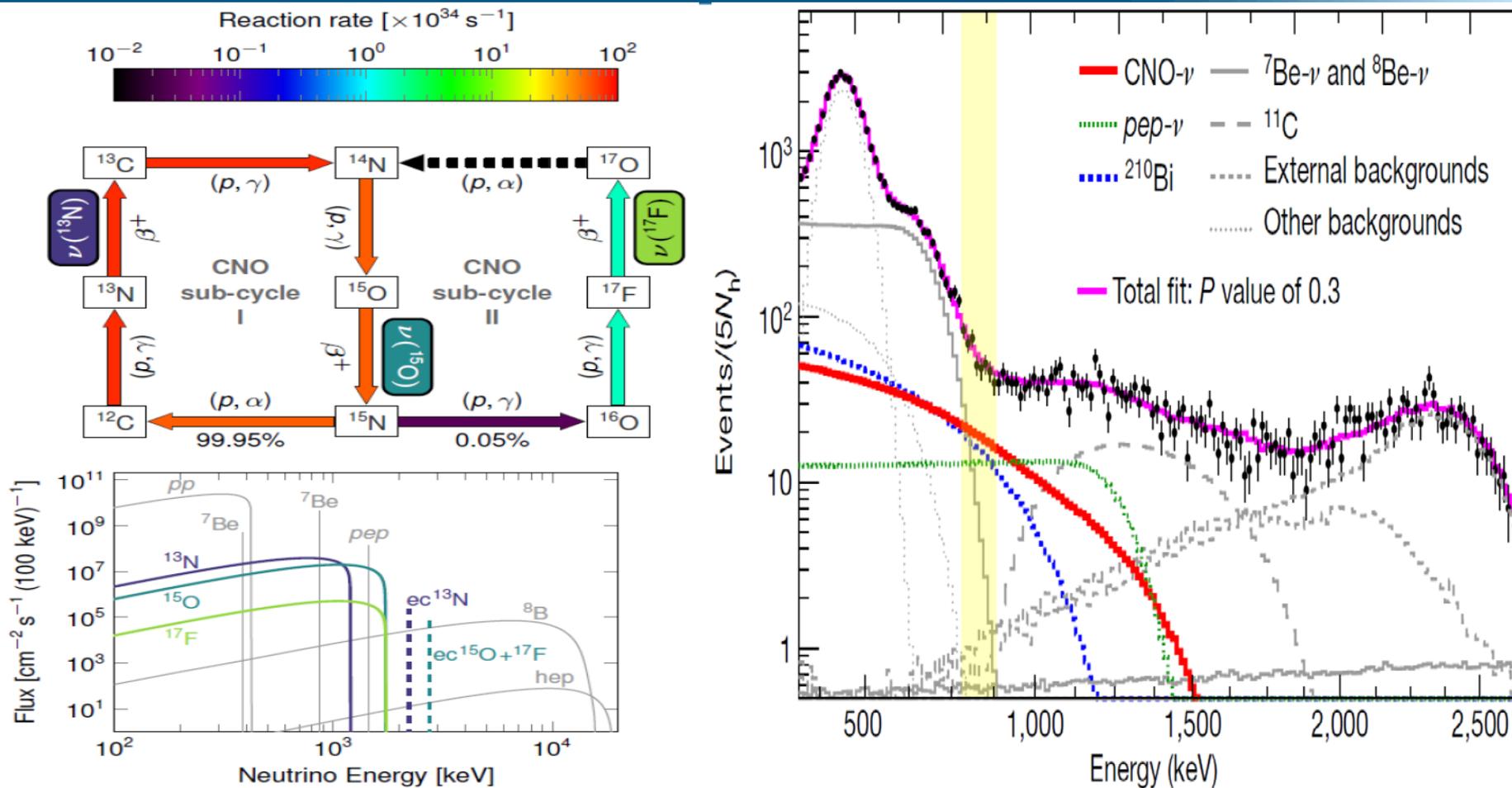
Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Полная выделяемая энергия 26.7 МэВ, из которой 0.6 МэВ уносят нейтрино. 99% энергии производится в pp-цепи, и менее 1% дает CNO-цикл

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 (EC 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

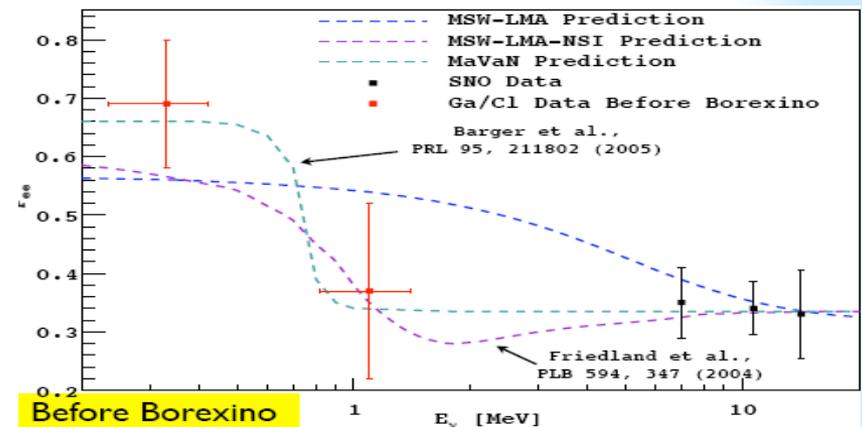
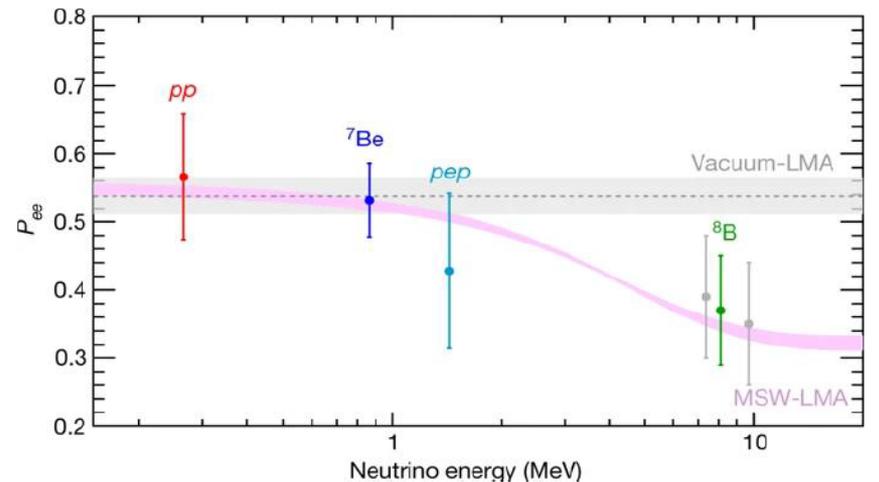


CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей астрофизики, был предсказан теоретически в 1938 г. к. Вайцеккером, даже раньше чем pp -цепочка (Х. Бете), и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения. Сложность измерения CNO-нейтрино заключается в том, что нейтрино имеют непрерывный спектр, их поток мал, а спектр электронов отдачи коррелирует с фоновым спектром ^{210}Bi и спектром от рассеяния pep -нейтрино. Вклад ^{11}C подавлен отбором.

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.

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.

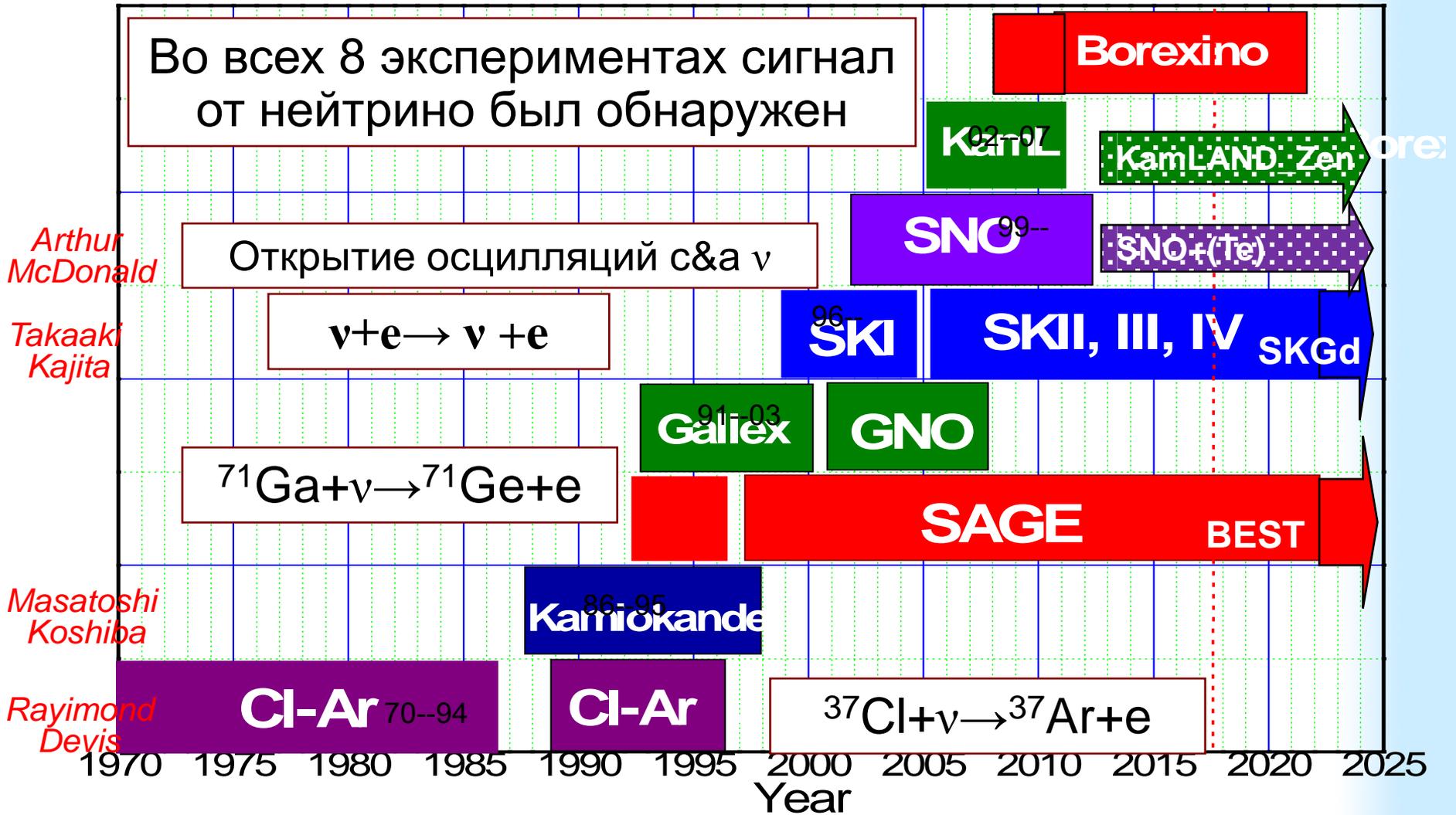
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН СССР

(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

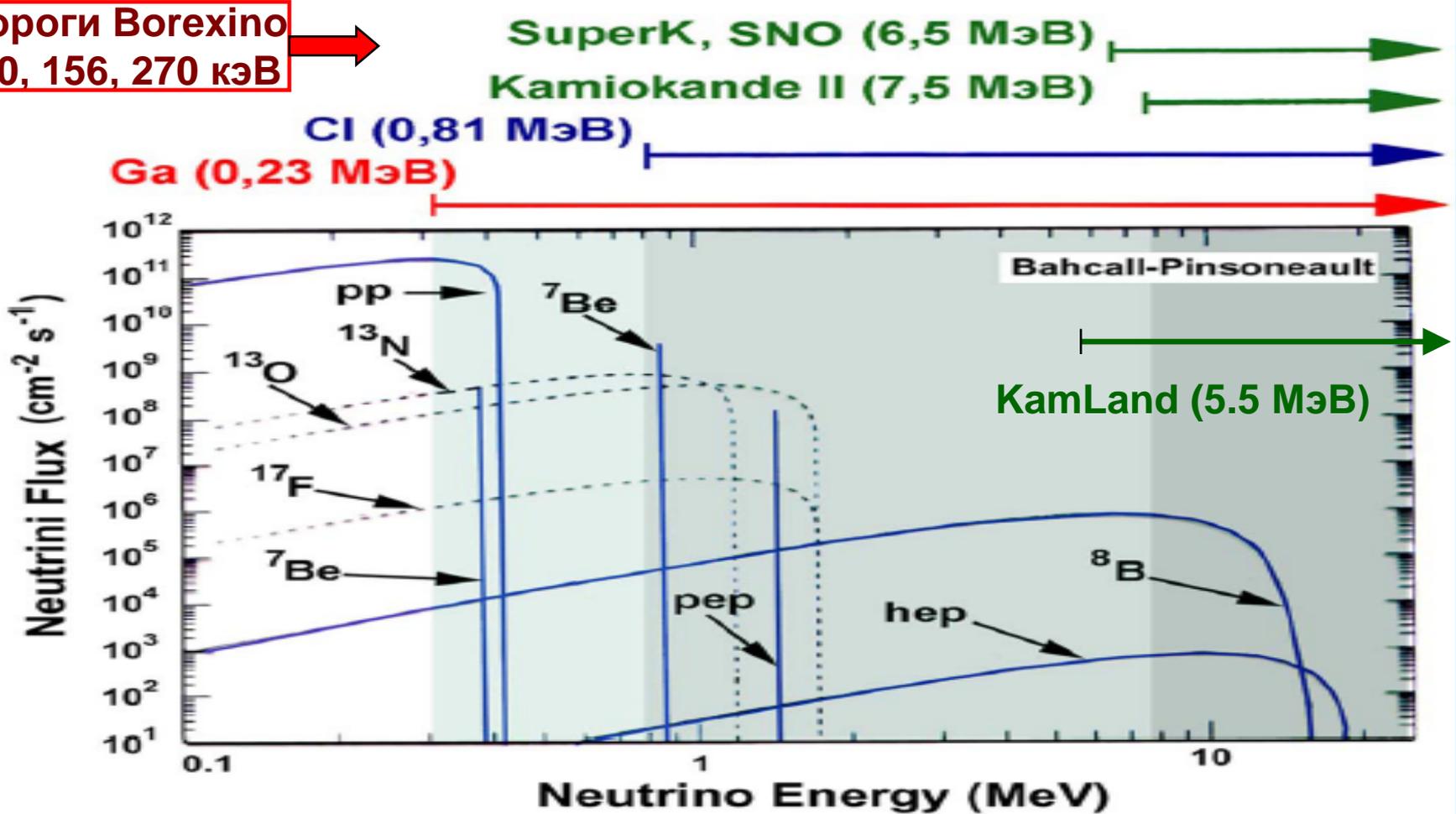
Хронология детекторов солнечных нейтрино



Солнечные нейтрино регистрировались 3-мя радиохимическими и 5 RT детекторами

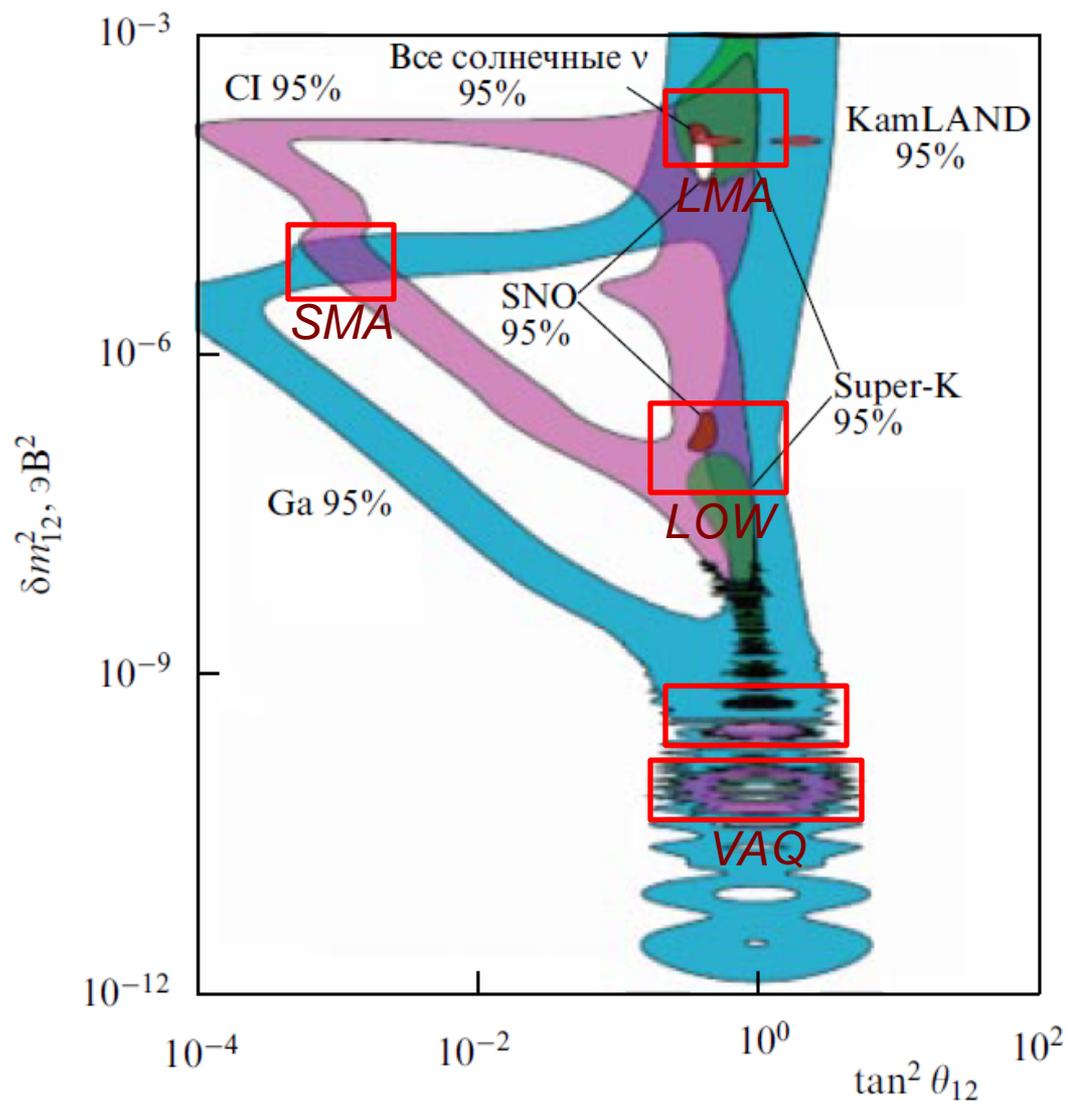
Пороги регистрации и спектры нейтрино

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 .

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



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.

Borexino: 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»



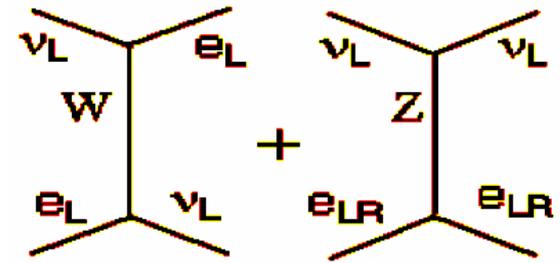
R&D CTF Утверждение Останов ФАЗА I Калиб. Очистка ФАЗА II ФАЗА III

1990 1995 1997 2002 2007 2010 2012 2017 2022

Основная задача Борексино:

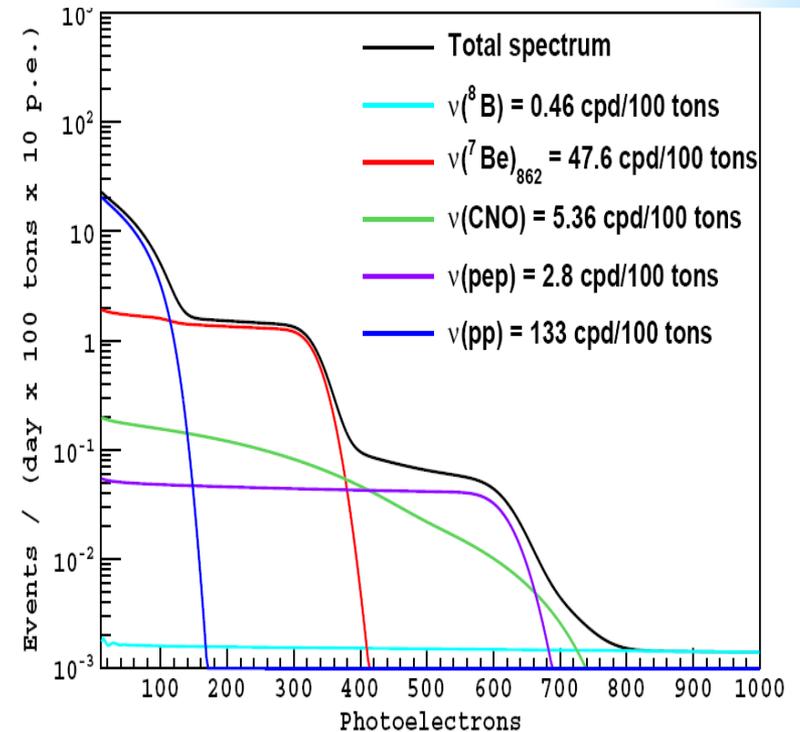
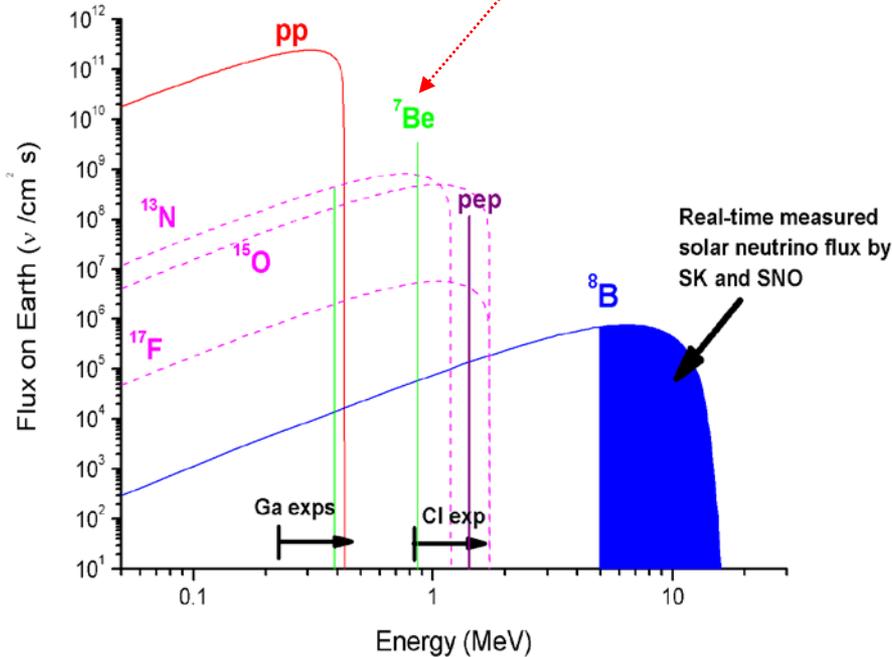
Регистрация упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ -нейтрино на электроне.

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 электроном

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

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:

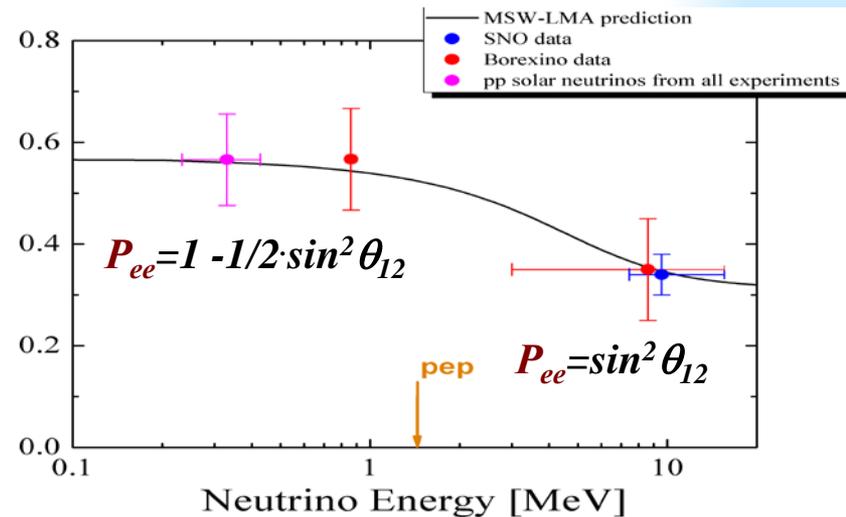
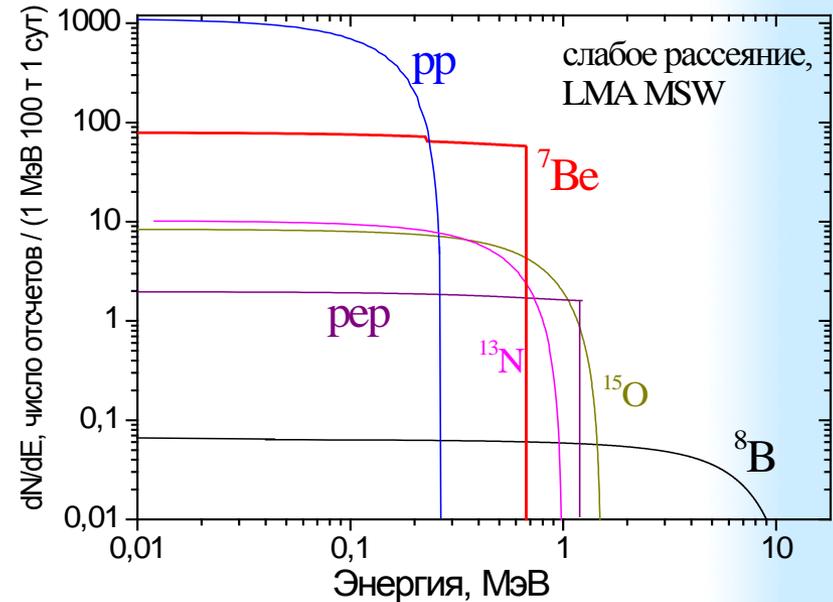
$$g_L = 1/2 + \sin^2 \theta_W, \quad g_R = \sin^2 \theta_W \text{ - для } \nu_e \text{ (W+Z)}$$

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

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

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 PC+PPO 1.1×10^4 фотонов/МэВ

1) Хорошее энергетическое разрешение;

Регистрируем 500 ф.э./ МэВ \rightarrow 5% / $E^{0.5}$

2) Низкий порог регистрации;

Триггер 25 ф.э. = 50 кэВ

3) Хорошая пространственная реконструкция.

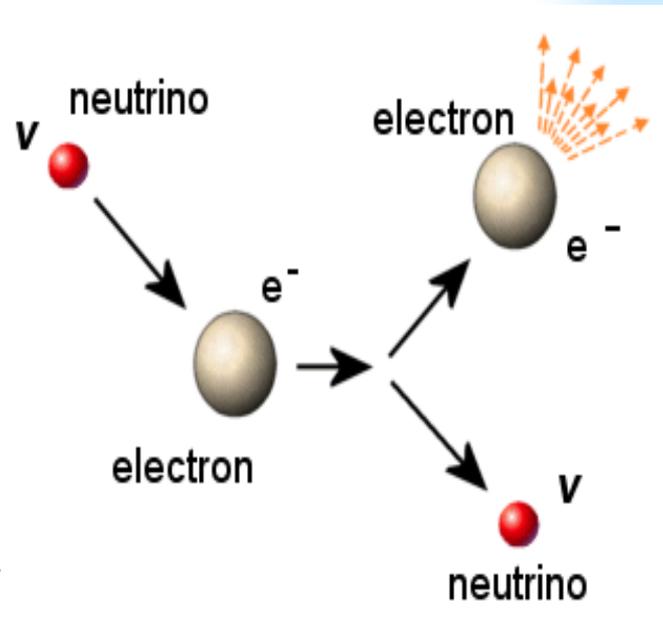
14 см при энергии 1 МэВ

4) Возможность α/β дискриминации

ОДНАКО...

-1) невозможно определить направление нейтрино;

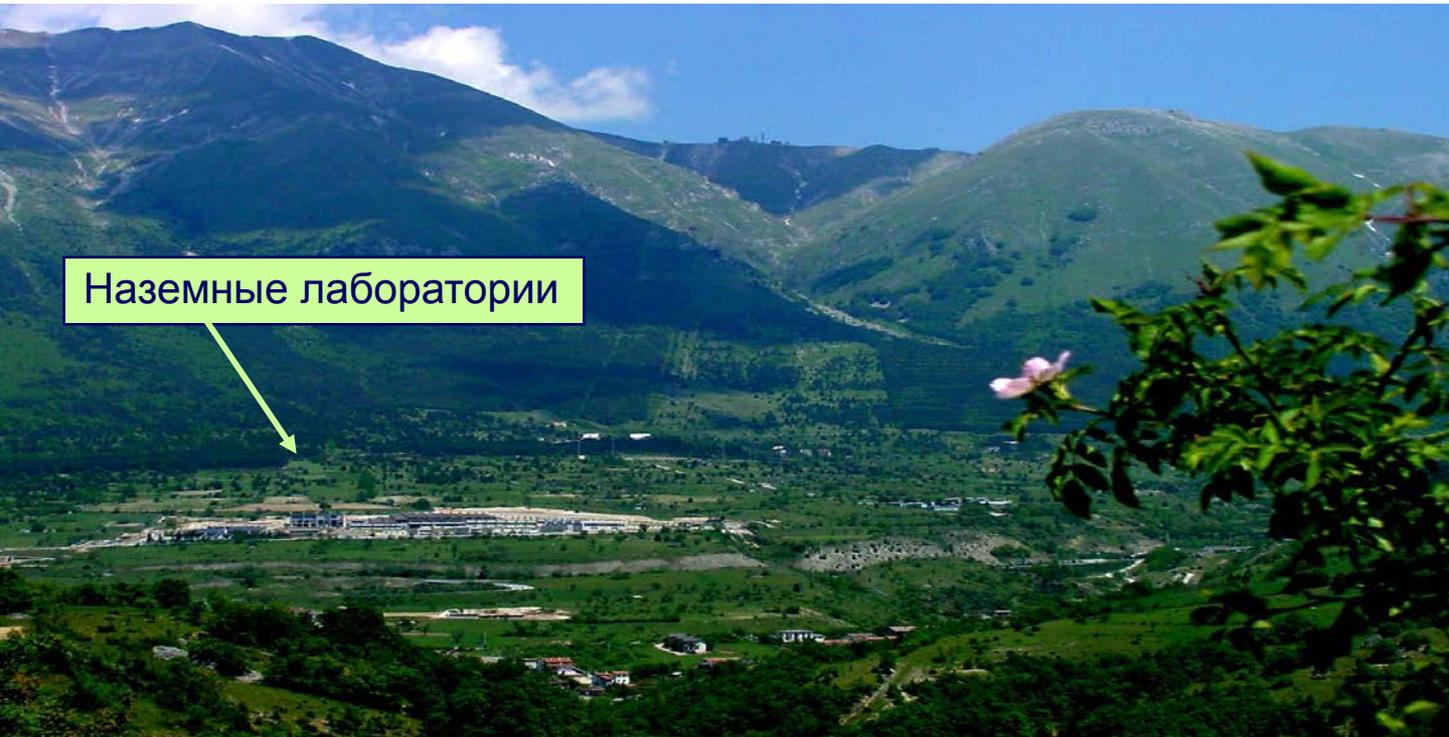
-2) событие (ν, e)-рассеяния является одиночным событием, не сопровождающимся другой частицей



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

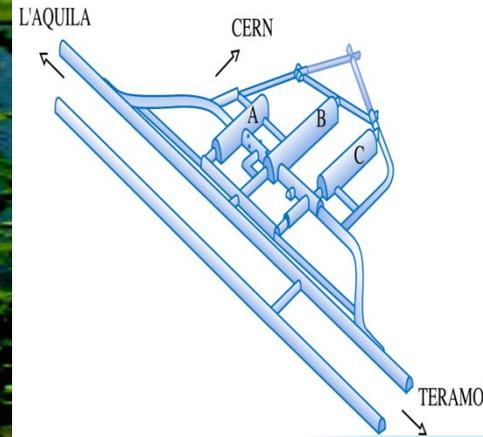
ВЫСОЧАЙШИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАДИАЦИОННОЙ ЧИСТОТЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА И МАТЕРИАЛОВ ДЕТЕКТОРА

Национальная лаборатория Гран Сассо



Наземные лаборатории

Италия,
120 км от Рима
3800 м.в.э.

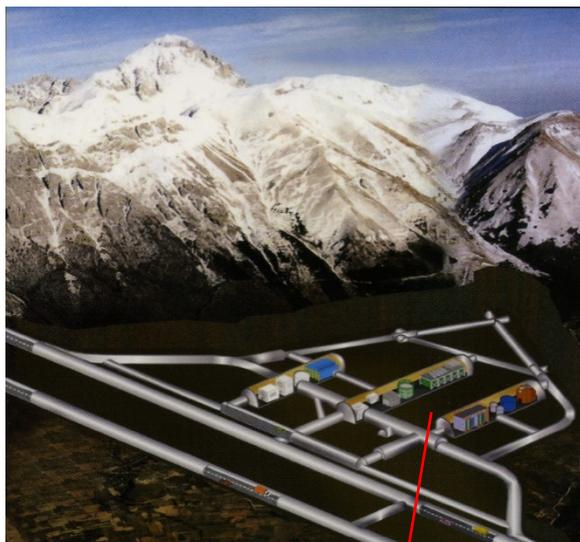


Борексидно и завод по очистке





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



S

GRAN SASSO
SCIENCE INSTITUTE

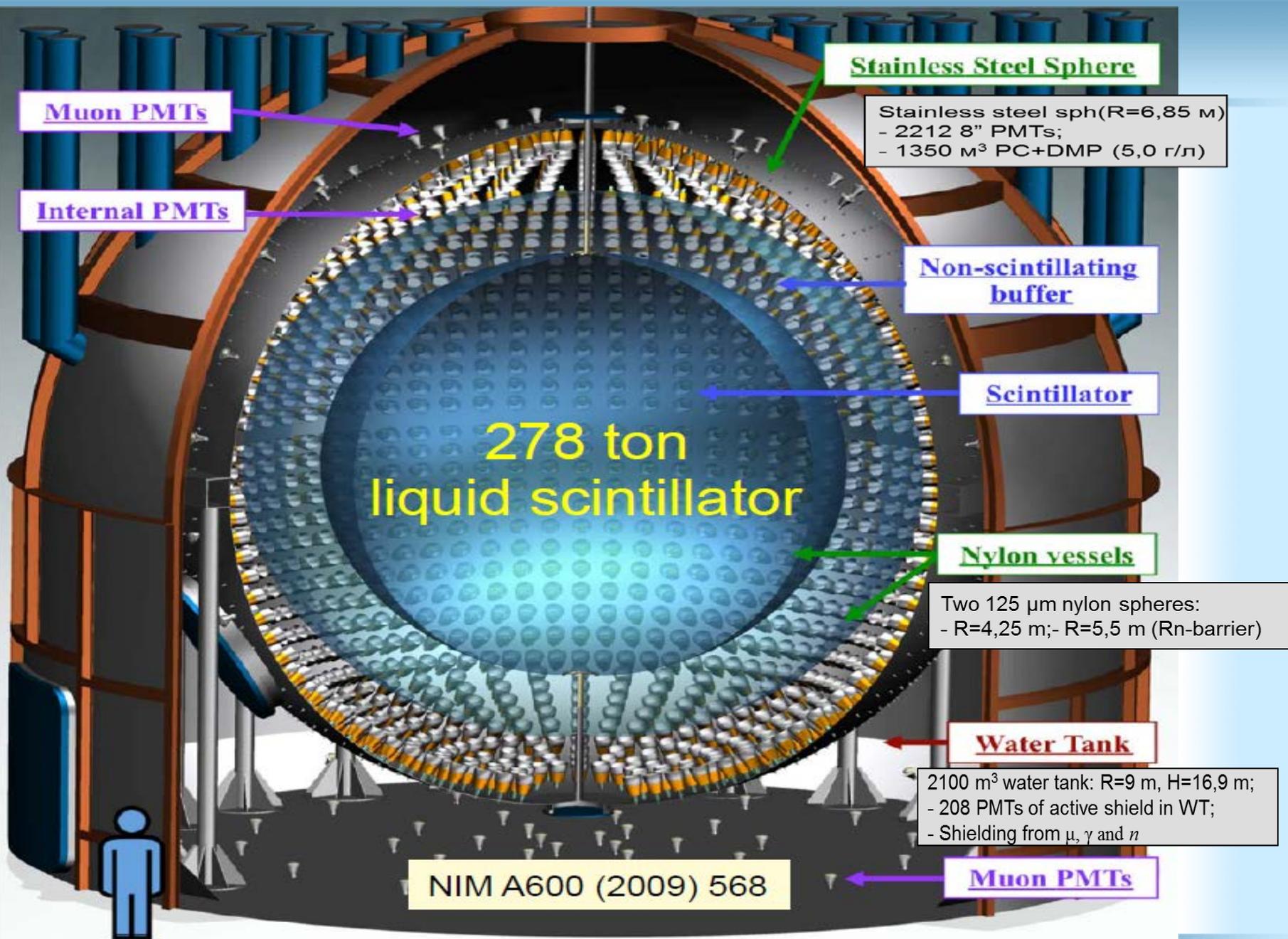
S

CENTER FOR ADVANCED STUDIES
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

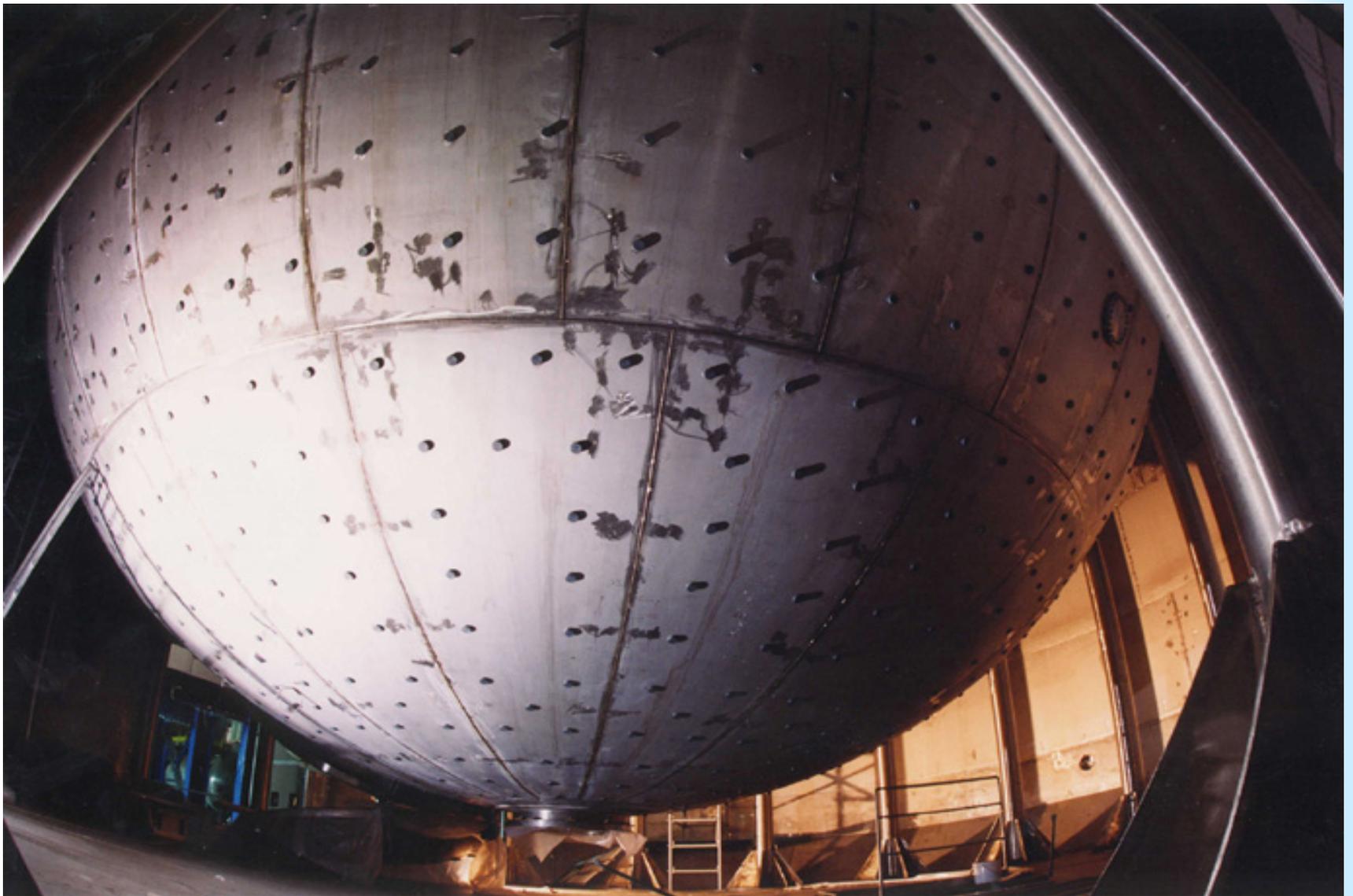


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN





Стальная сфера с отверстиями для ФЭУ



2212 ФЭУ на поверхности стальной сферы



02.04.2024 г.

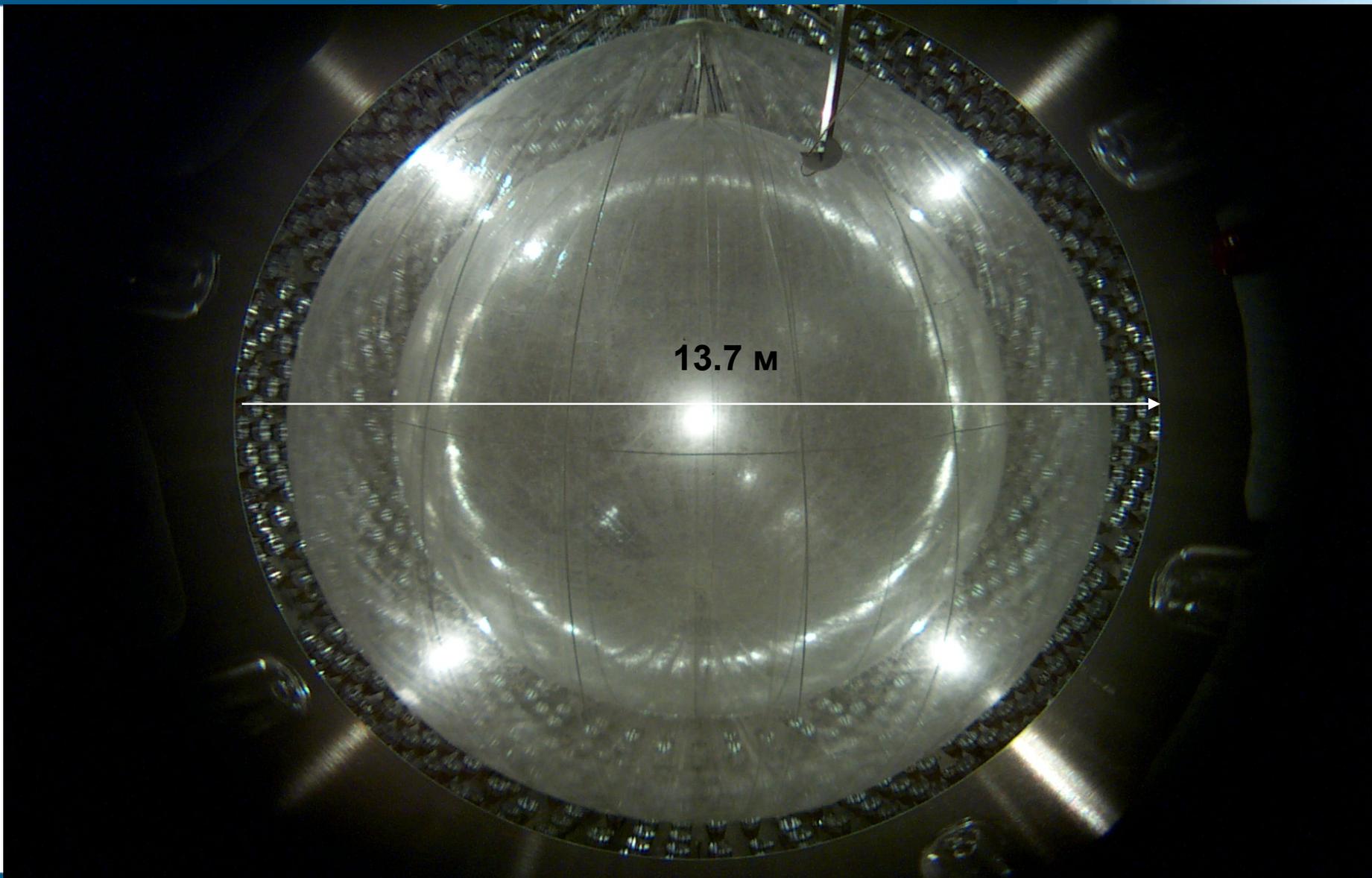
Сессия СЯФ ОФН РАН, ОИЯИ, 1-5 апреля 2024

25

2212 ФЭУ на поверхности стальной сферы



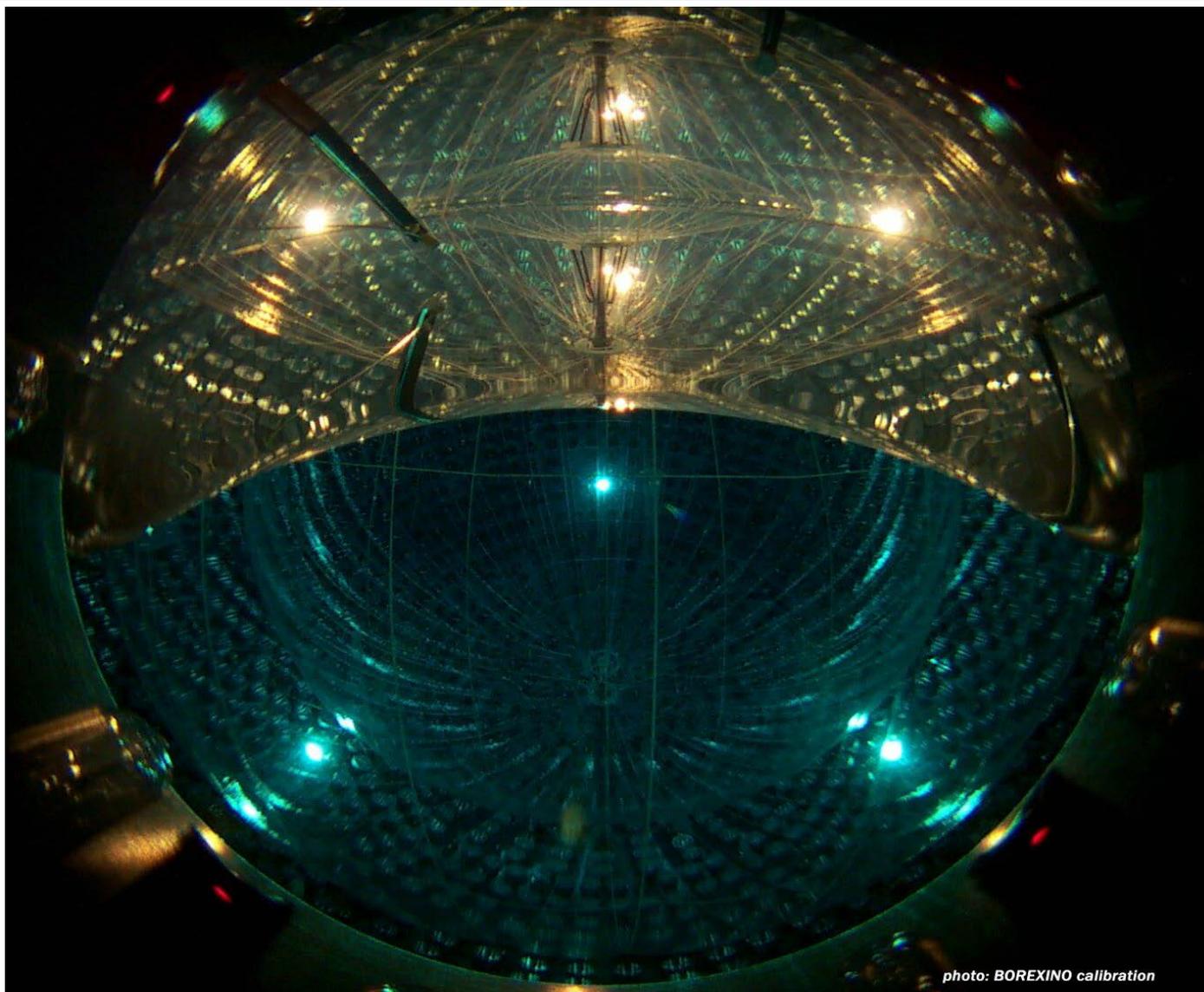
Стальная и нейлоновые сферы



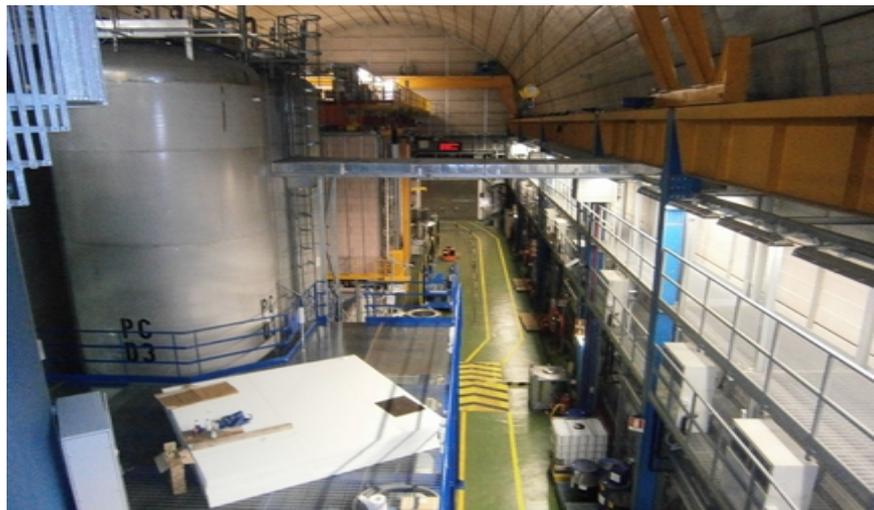
ФЭУ на дне стальной сферы и анти-Rn сфера



Заполнение – сперва вода, затем сцинтиллятор



Вид на СТФ, на и внутри сферы, центр управления



Рекордная чистота жидкого сцинтиллятора

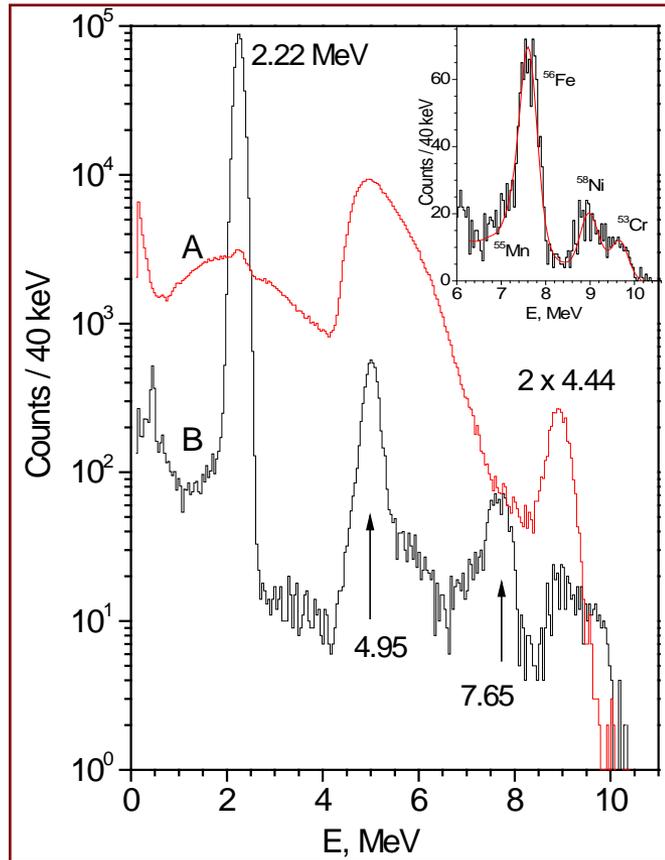
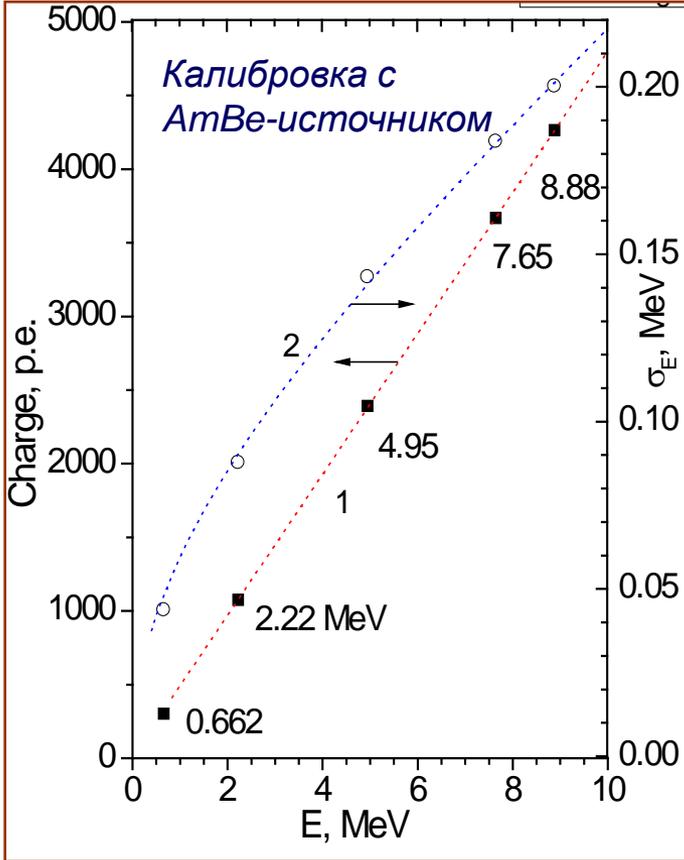
Компонент	Типичная распространенность (источник)	CTF	Boresino Фаза 2
$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ [г/г]	10^{-12} (космогенный)	$2 \cdot 10^{-18}$	2.7×10^{-18}
^{238}U [г/г] (по ^{214}Bi)	$2 \cdot 10^{-5}$ (пыль)	$< 4.8 \cdot 10^{-16}$	1.6×10^{-17} $< 9.7 \times 10^{-19}$
^{232}Th [г/г] (по ^{212}Bi)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

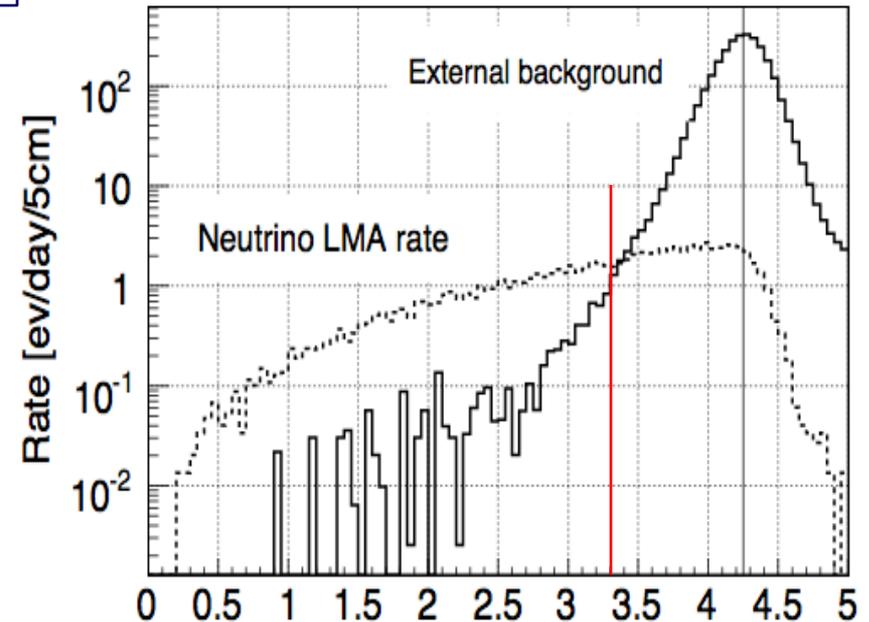
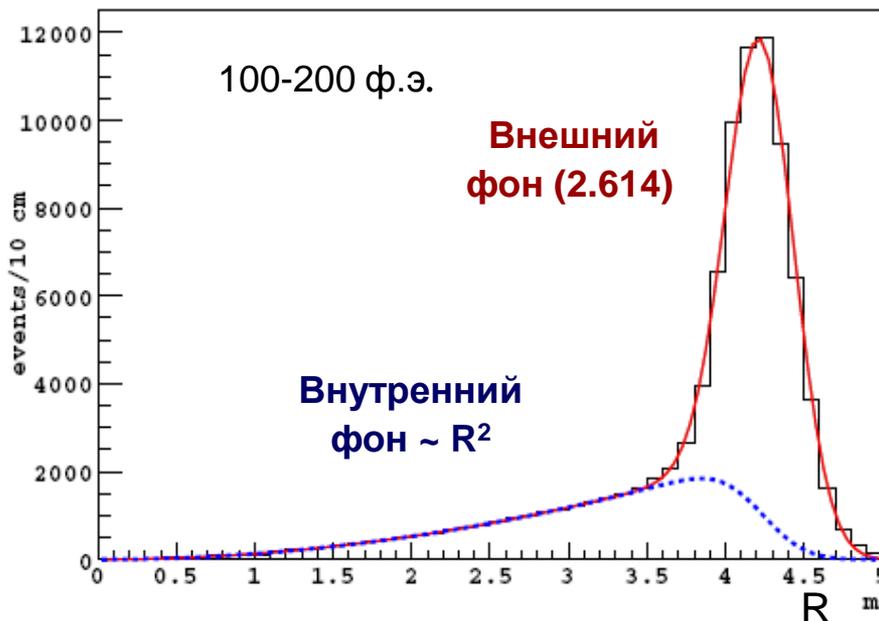
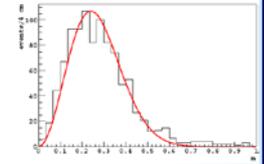
Основная задача пространственной реконструкции – создание “активной защиты” внутреннего объема сцинтиллятора его внешним слоем от внешнего γ -фона от конструкционных материалов (IV, стальная сфера, ФЭУ)

Пространственное разрешение:

1 МэВ – $\sigma = 14$ см

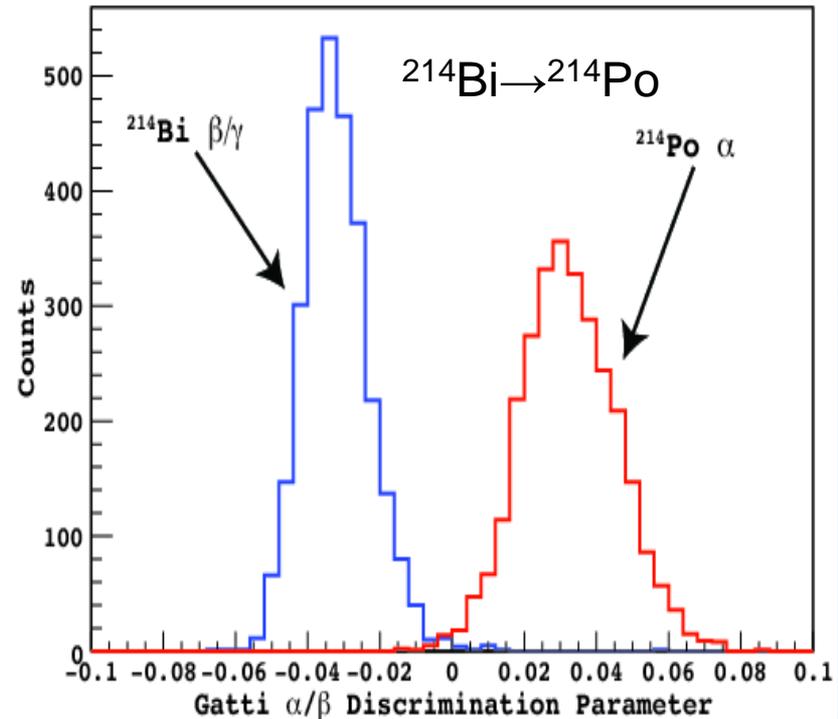
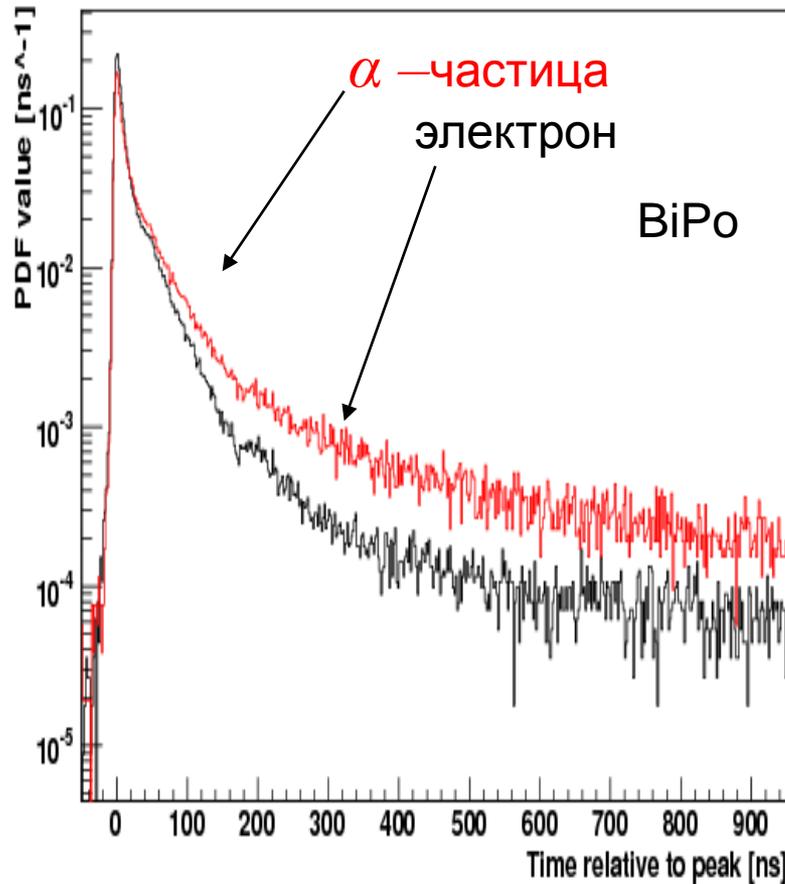
$^{214}\text{BiPo}$ (~800 кэВ) **16 см**

^{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 используется зависимость скорости высвечивание фотонов от плотности ионизации.



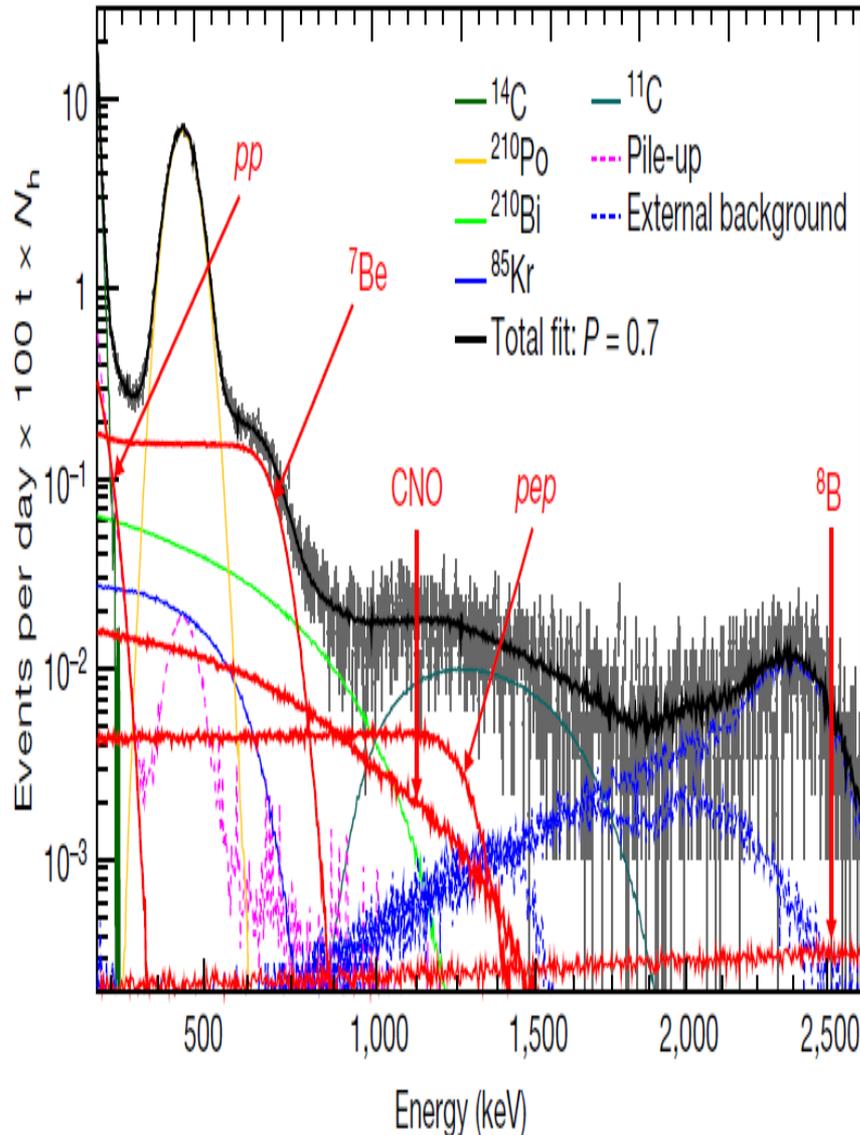
Фильтр Гатти $G = \sum_i P_i f_i$

$$P_i = \frac{\overline{\alpha_i} - \overline{\beta_i}}{\overline{\alpha_i} + \overline{\beta_i}}$$

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

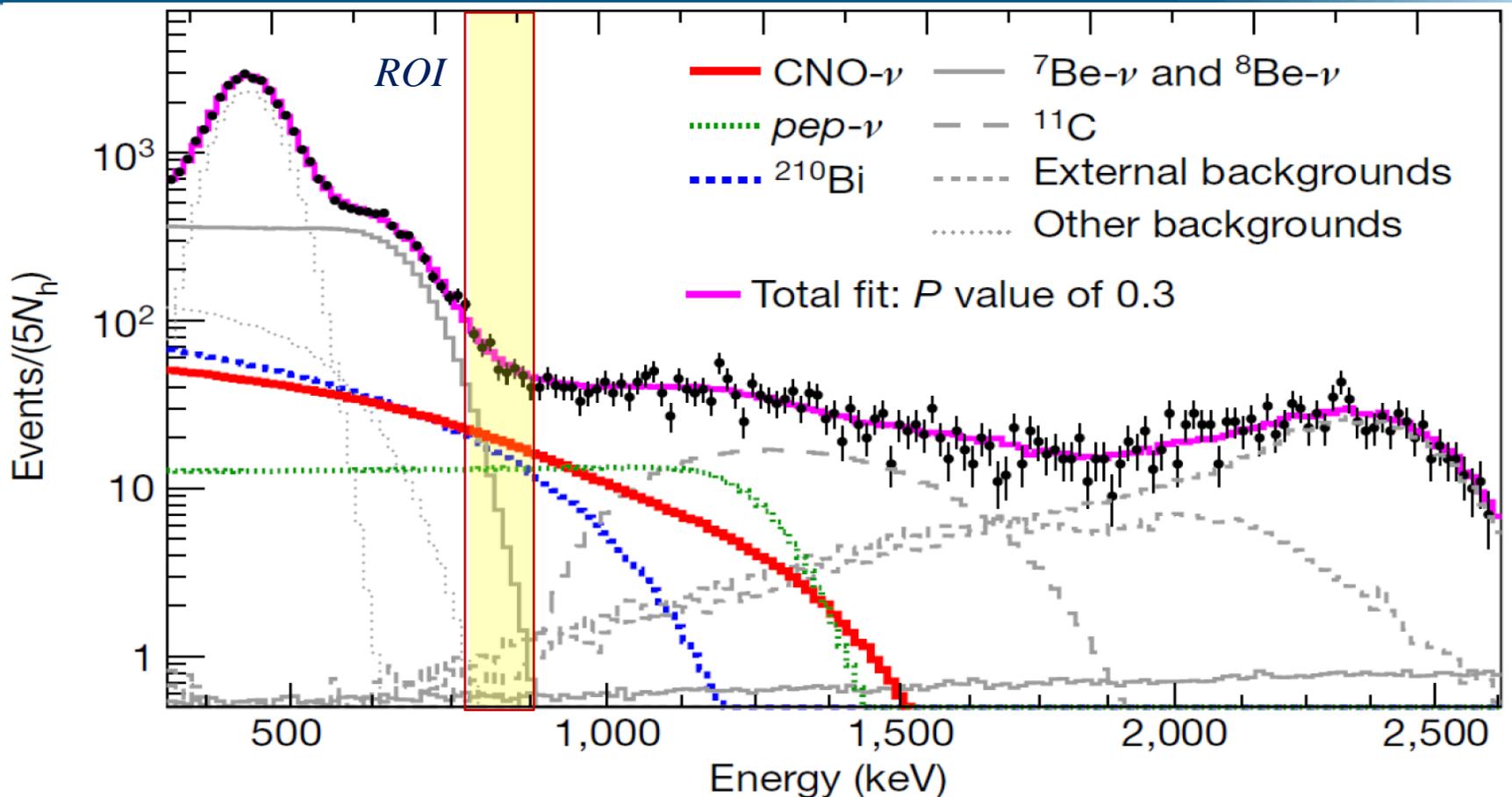
Результаты 10-летних измерений солнечных нейтрино

Фаза I+II «Nature» от 24 октября 2018 г.



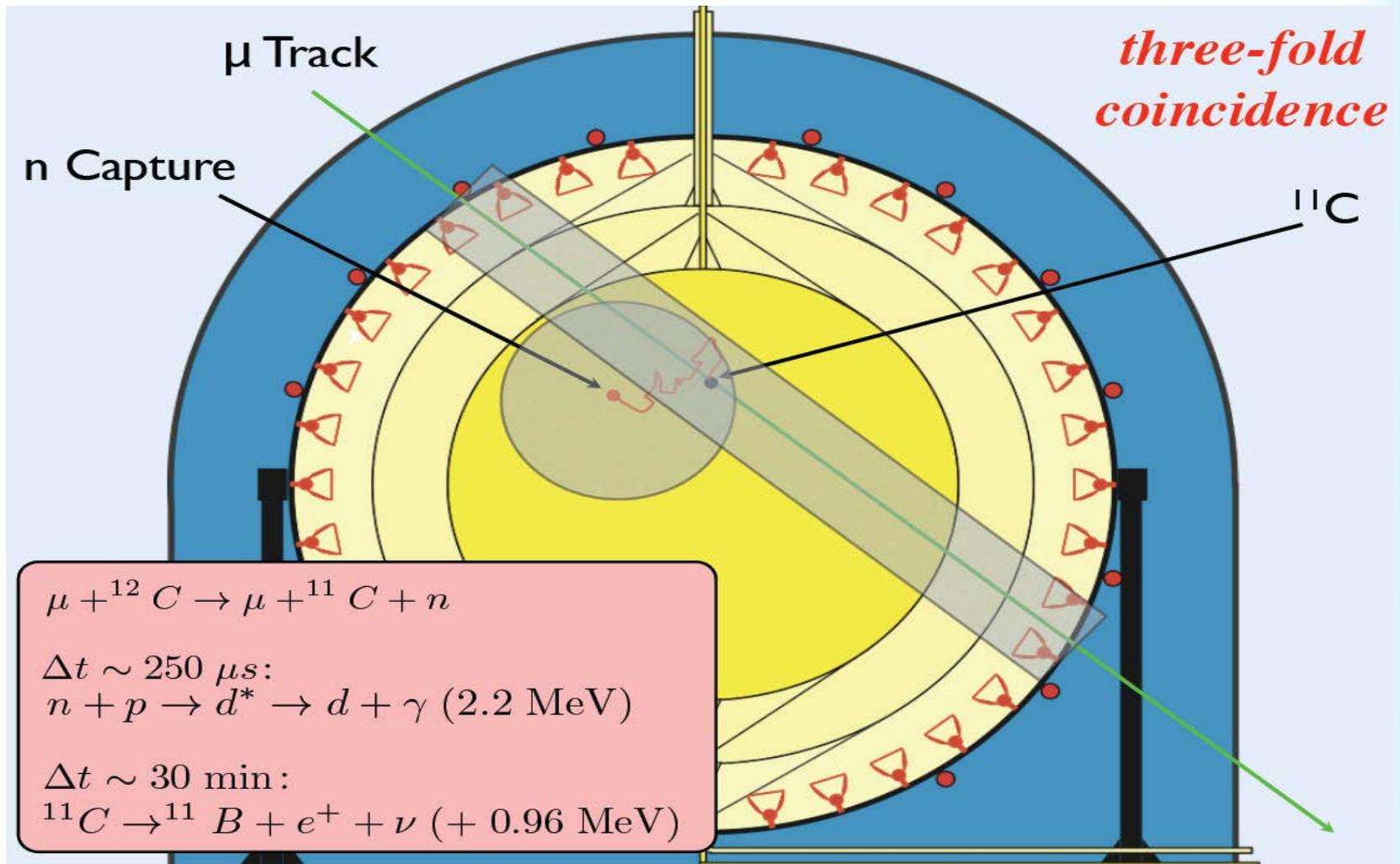
1. Поток ^7Be -нейтрино измерен с 2.7 % точностью
2. Поток ^8B - ν измерен с порога 3.0 МэВ
3. Поток pp -нейтрино выходит за 5σ
4. Измерен поток pp -нейтрино с 10.5% точностью
5. Наиболее строгий предел на поток CNO-нейтрино
6. В одном эксперименте определена доля электронных нейтрино (P_{ee}) при различном 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



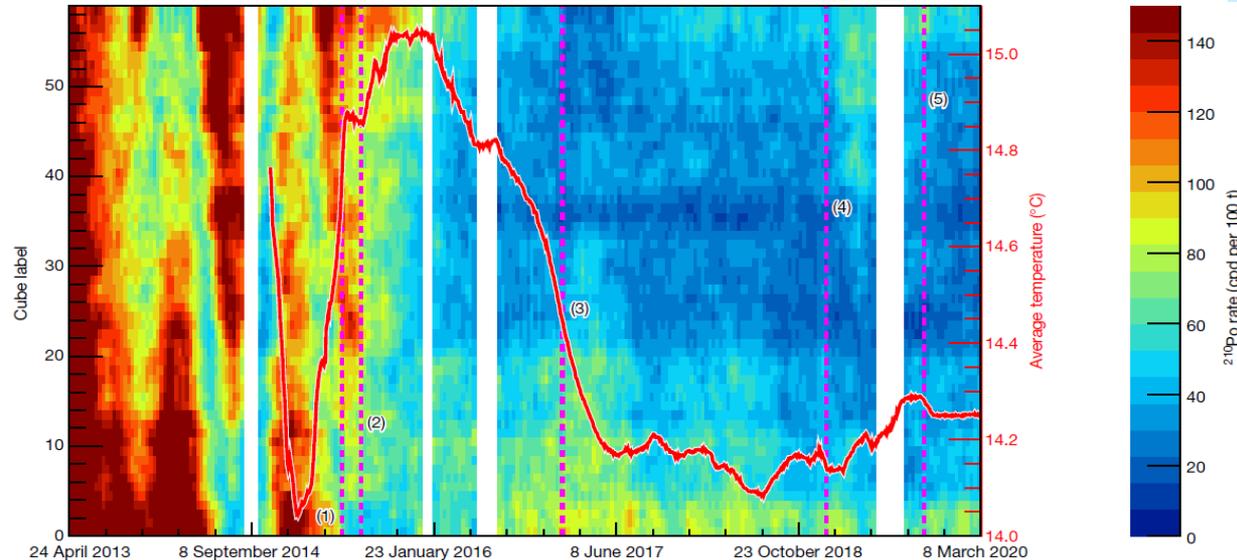
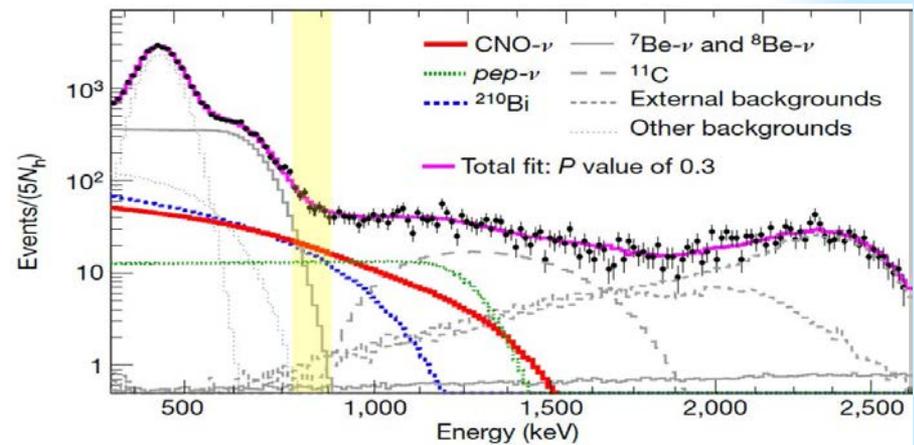
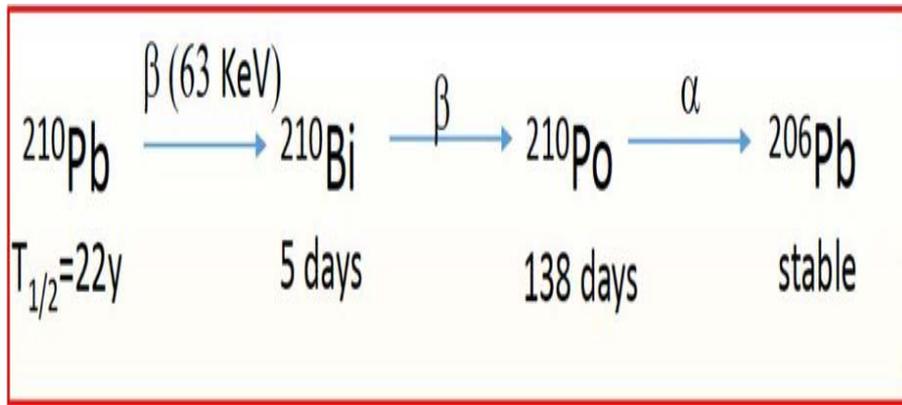
Спектр Борексино в интервале **320-2640 кэВ**, накопленный за **1072 сут.** живого времени, является суммой вкладов нейтрино и радиоактивных примесей в сцинтилляторе (^{85}Kr , ^{210}Bi , ^{210}Po и ^{40}K) и космогенного ^{11}C , а также γ -квантов от распадов ^{40}K , ^{214}Bi и ^{208}Tl во внешних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

Отбор ^{11}C - три последовательных совпадения



Основной фон при регистрации пер- ν связан с изотопом ^{11}C ($t_{1/2}=20$ мин), который образуется под действием мюонов. Подавление фона ^{11}C в ~ 10 раз при приемлемой потере живого времени.

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



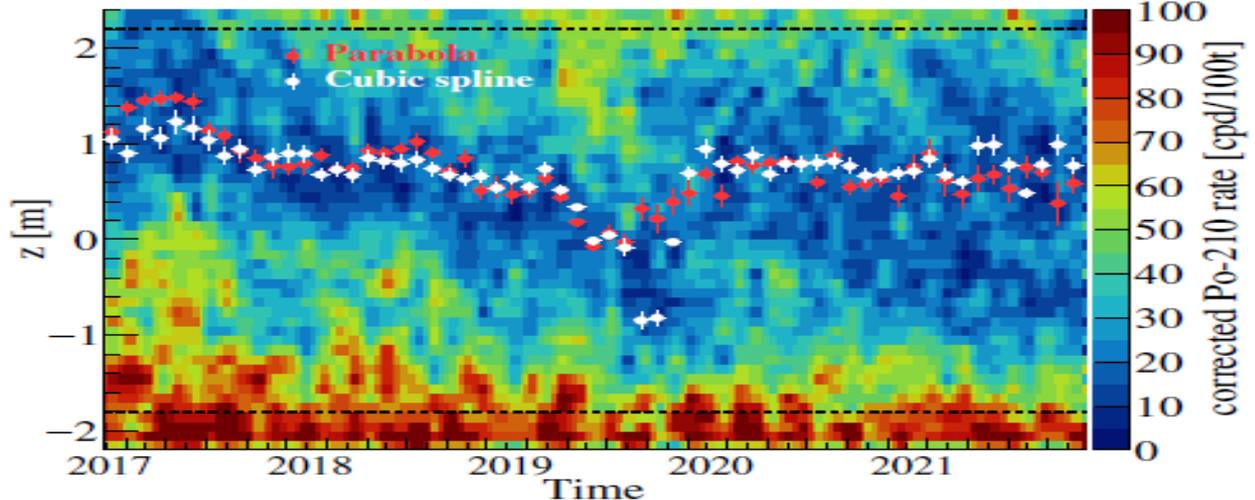
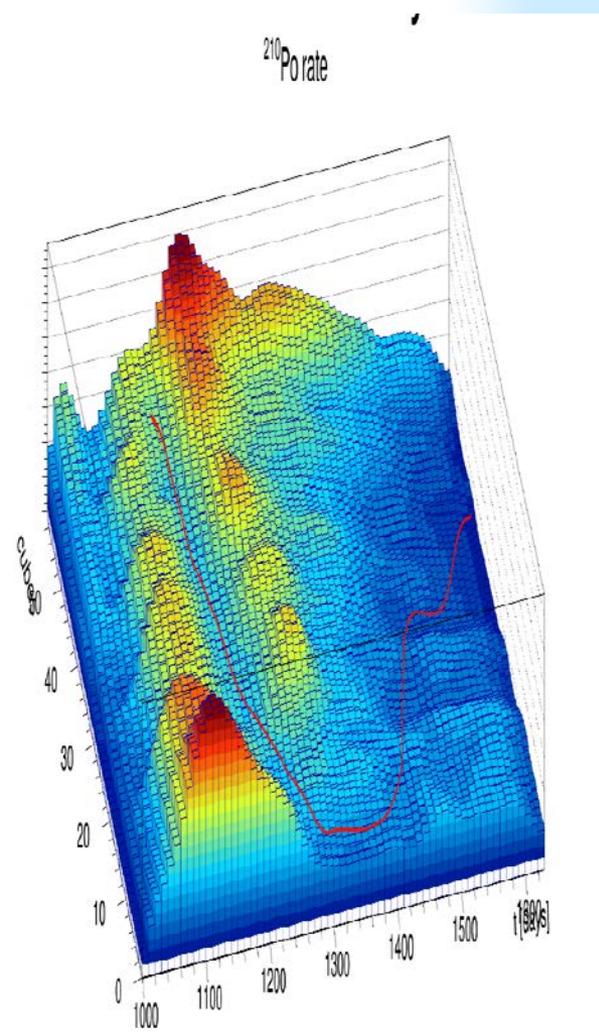
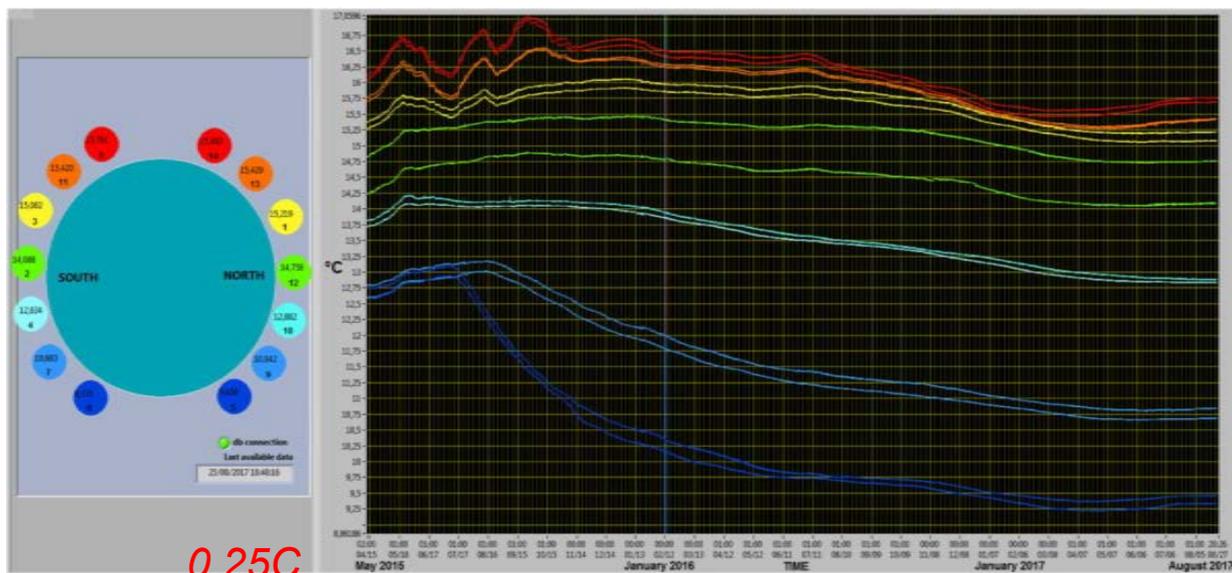
β -активность ^{210}Bi может быть определено по α -активности ^{210}Po если имеется равновесие. Для устранения конвективных потоков выполнена термостабилизация детектора, что позволило выделить область $R(^{210}\text{Po}) = 11.5 \pm 1.0$ отс./сут. 100 т и ограничить $R(^{210}\text{Bi})$.

Термостабилизация сцинтиллятора



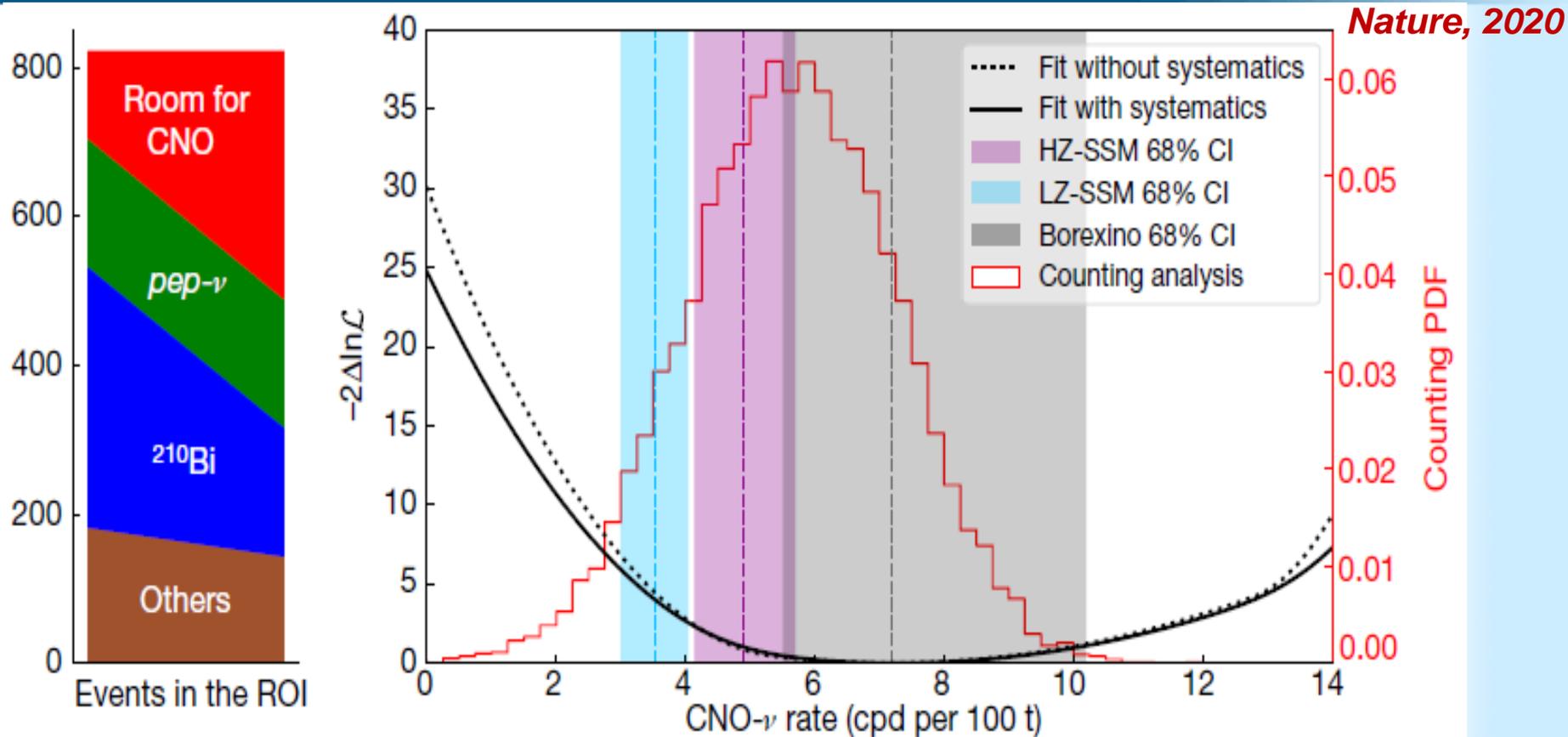
Работы по стабилизация температуры внутри водного танка с 2016 г. Пассивная (20 см мин. ваты) и активная системы (нагреватели) позволили стабилизировать T на уровне 0.1 C и подавить конвективные потоки.

Температурная стабильность достигнута за 2 года



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

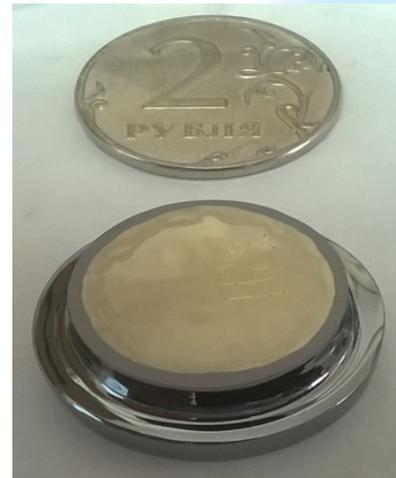
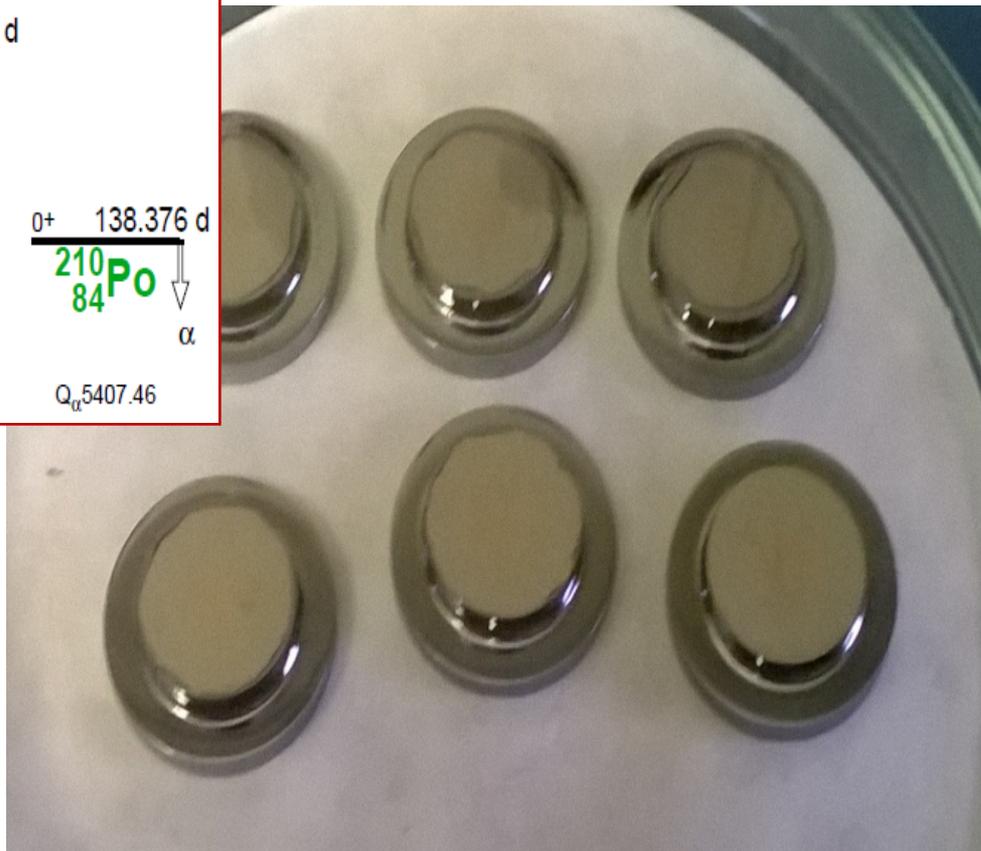
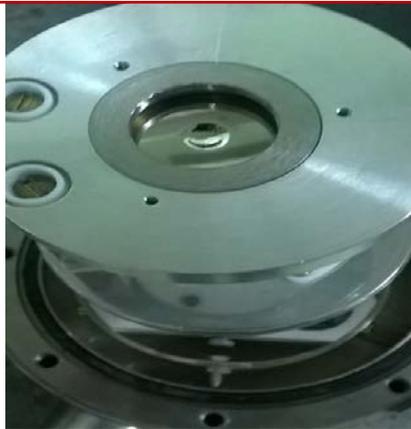
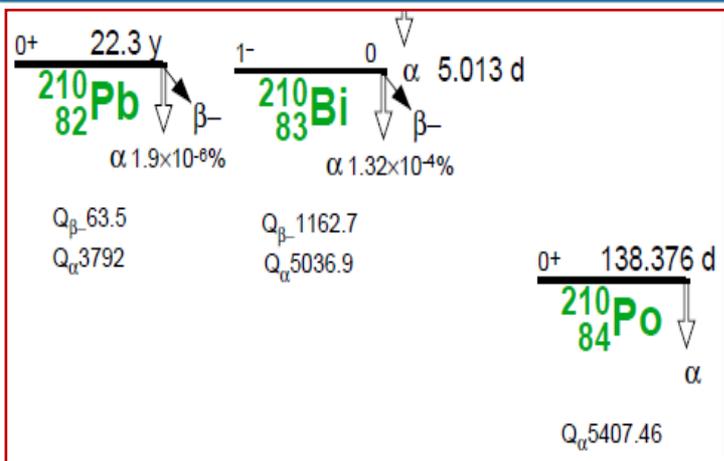
Первый результат для CNO-нейтрино



Nature, 2020

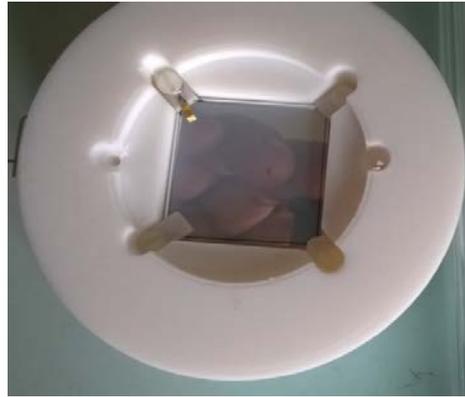
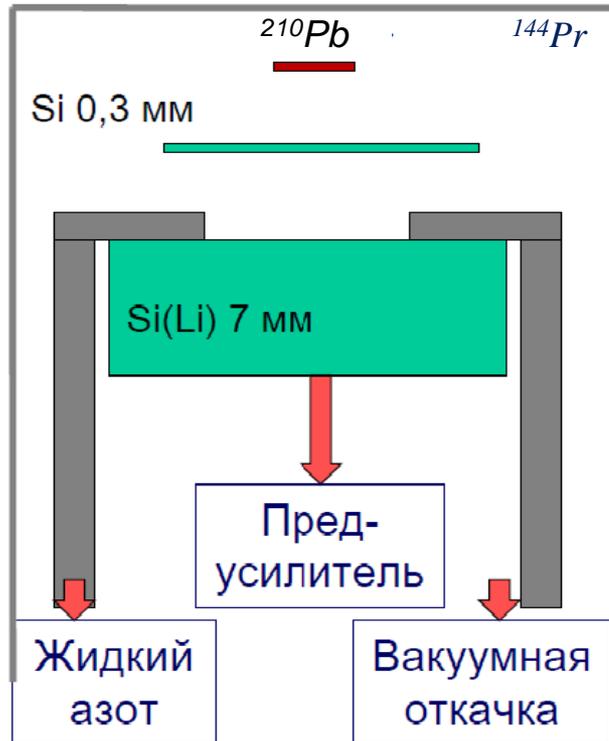
Результаты счетного и спектрального анализа в сравнении с LZ и HZ SSM. Функция правдоподобия скорости счета CNO-нейтрино для 320-2640 кэВ. Показаны интервалы для **SSM-LZ** $R=(3,52\pm 0,52)$ соб./сут.100т и **SSM-HZ** $R=(4,92\pm 0,78)$. Результат Borexino $R(\text{CNO})=(7.2_{-1.7}^{+3.0})$ соб./сут.100т. $\Phi(\text{CNO})=(7.0_{-2.0}^{+3.0})\times 10^8$ в/см²с. Значимость наблюдения CNO составляет 5.1σ . Гистограмма показывает $R(\text{CNO})=(5.6\pm 1.6$ с/сут.100т, 3.5σ), анализ в ROI=780-885 кэВ. Счетный и спектральный анализ используют форму β -спектра ^{210}Bi .

Si(Li)-детекторы с толщиной до 10 мм



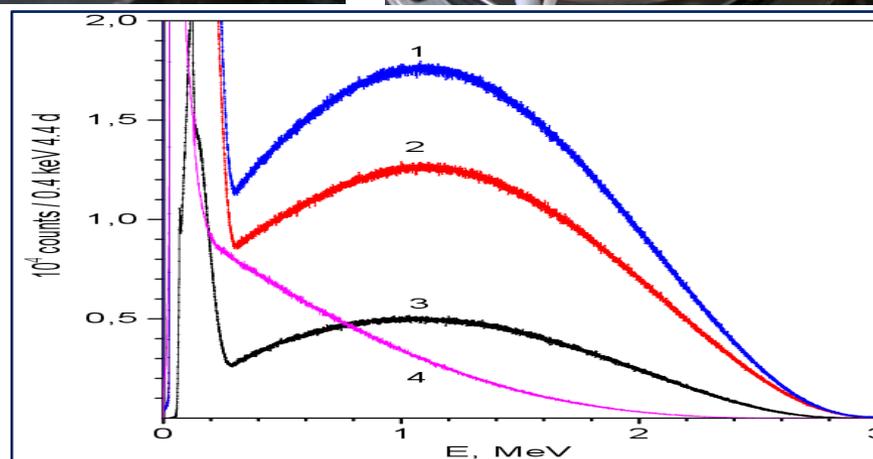
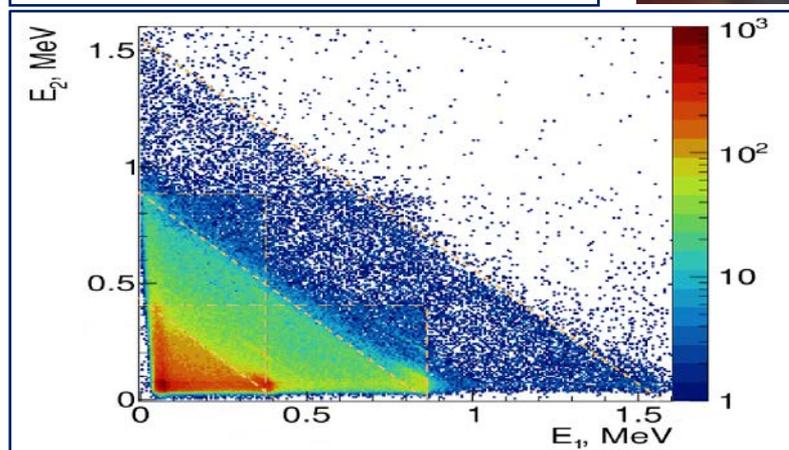
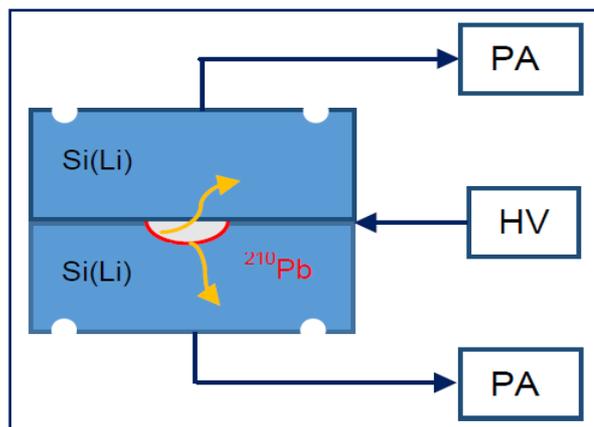
Измерение энергии электронов и α -частиц производилось с помощью Si(Li)-детекторов, изготовленных нами в ПИЯФ, и имеющих хорошее энергетическое разрешение ($\sigma \sim 1$ кэВ при $E=1$ МэВ), тонкое входное окно (~ 5000 А) и достаточную толщину для регистрации электронов с энергией до 3 МэВ. Детекторы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

Бета-спектрометр «мишень-детектор»



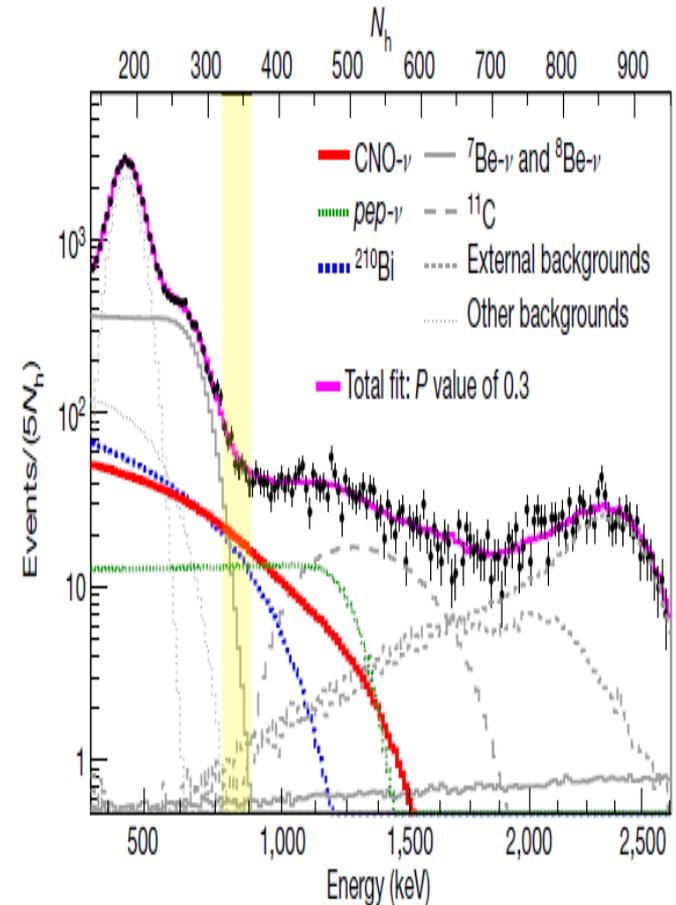
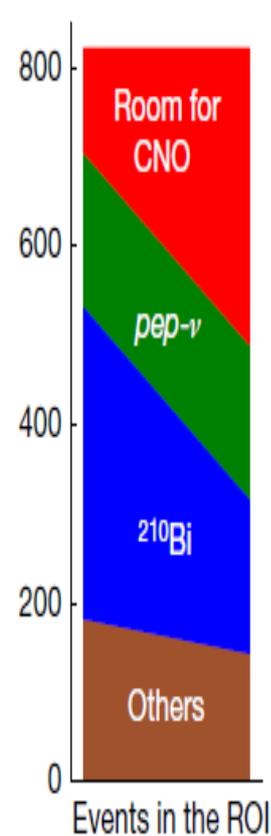
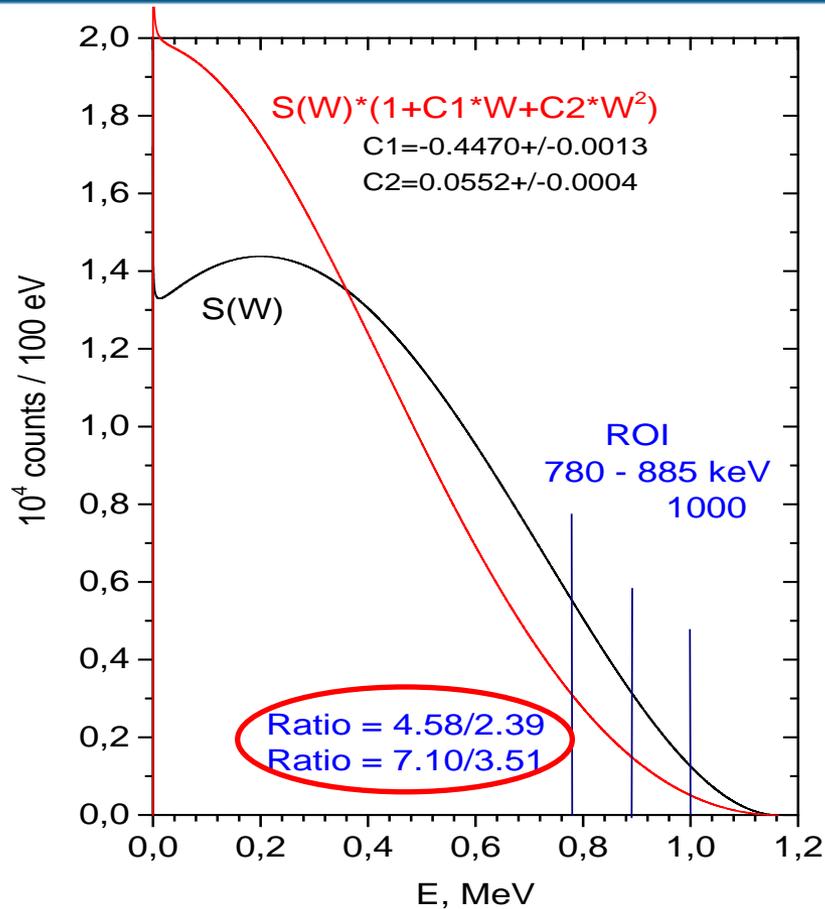
В ПИЯФ был специально разработан и создан **бета-спектрометр**, состоящий из **Si(Li)**-детектора полного поглощения и пролетного **Si**-детектора, который позволяет эффективно разделять β -излучение ядер от сопутствующего рентгеновского и γ -излучения. Метод основан на использовании **совпадений** между 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.

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 $C2$.

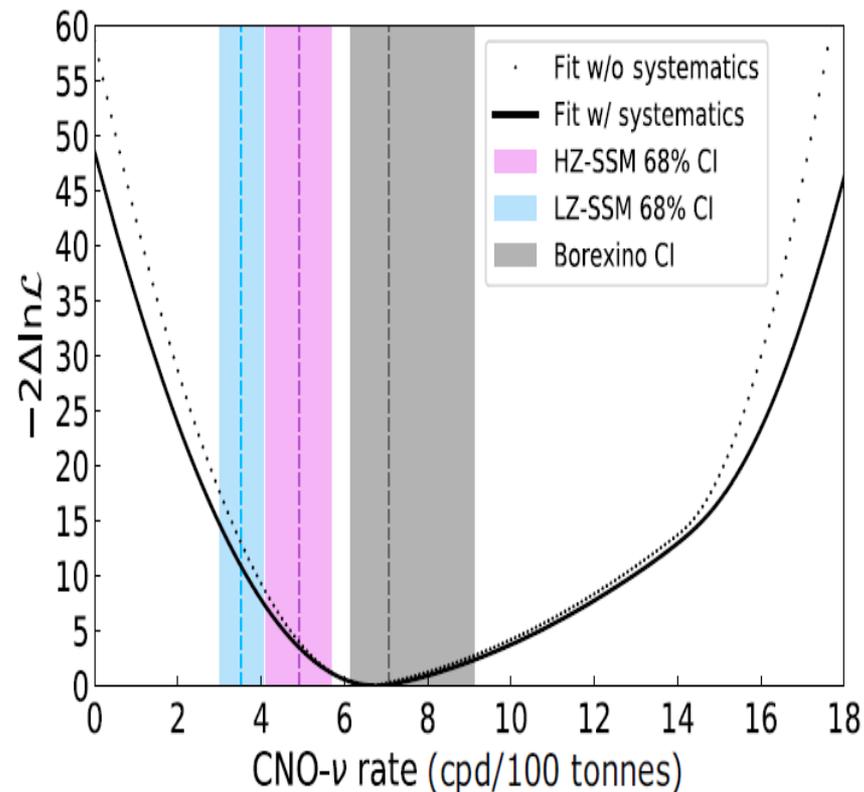
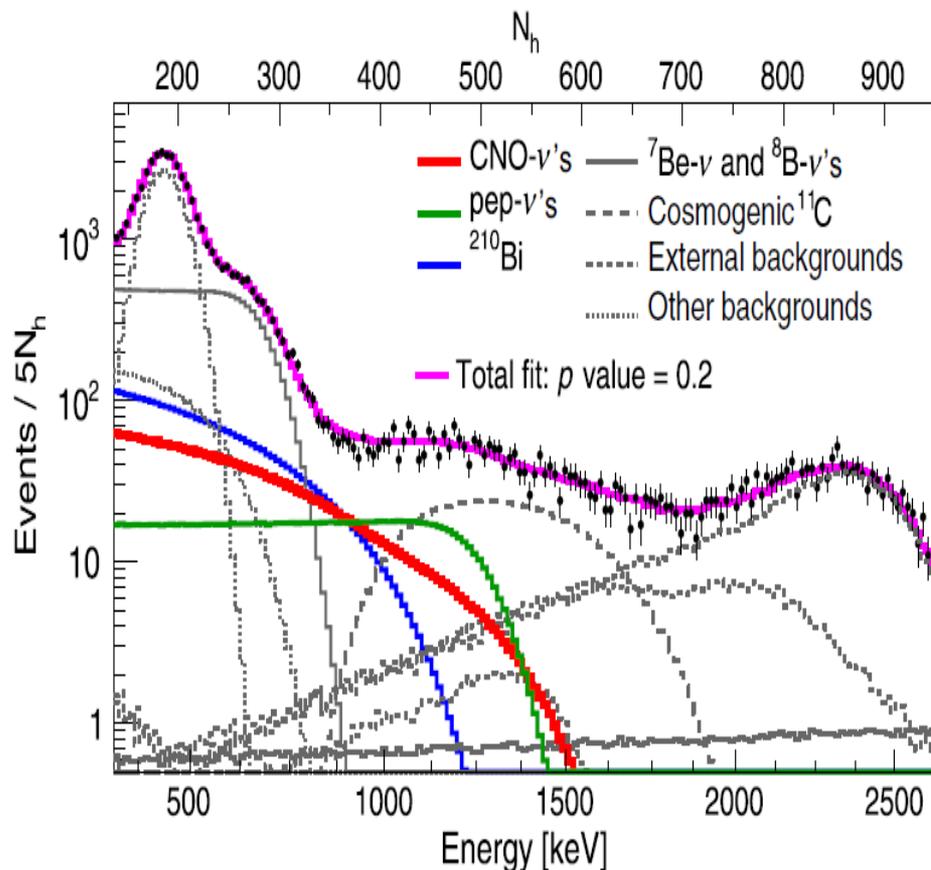
Спектр ^{210}Bi и CNO-нейтрино



Форма спектра ^{210}Bi существенно отличается от ожидаемой 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.**

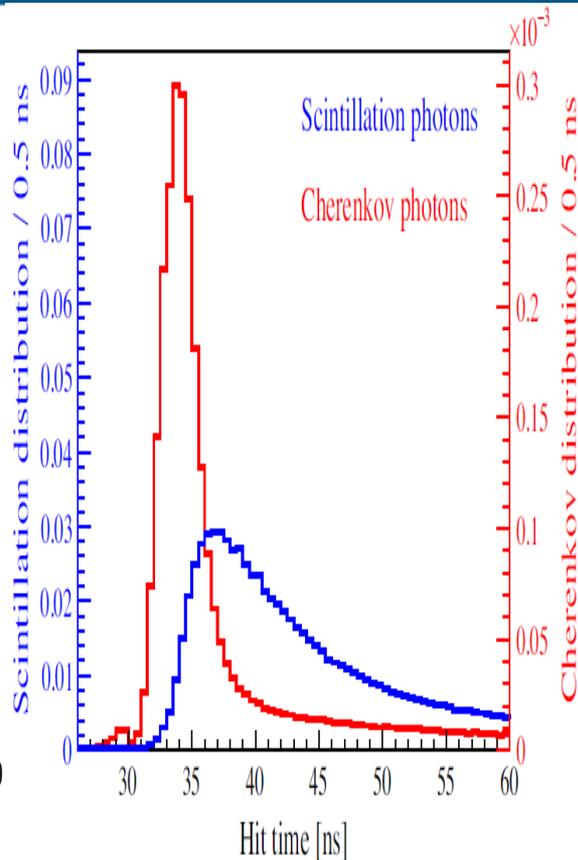
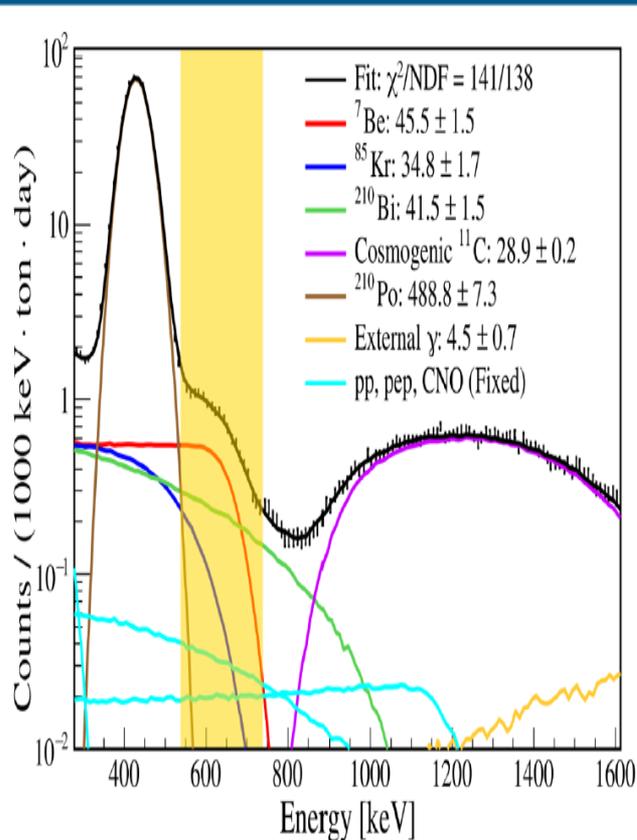
Регистрация CNO-нейтрино – результат 2022 г.

PRL 129, 259701 (2022)

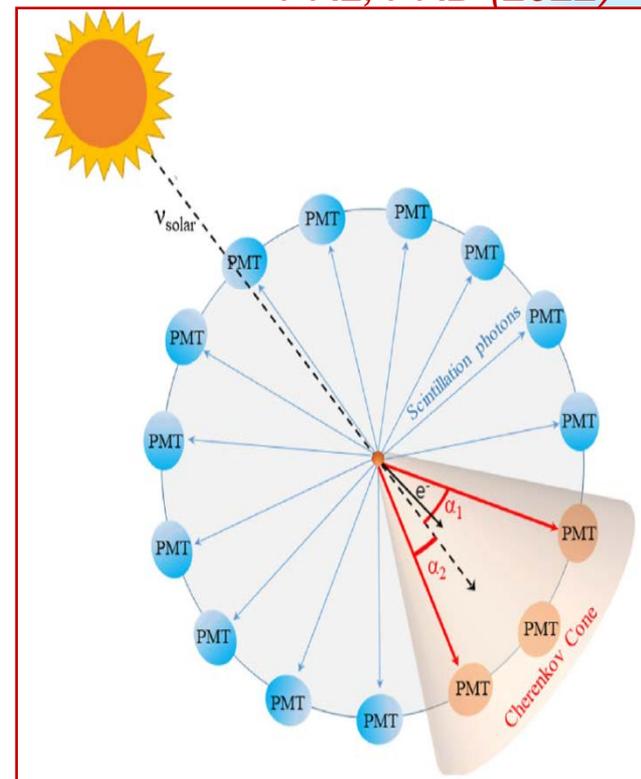


Результаты спектрального анализа данных с января 2017 г. по октябрь 2021 г. подавленным вкладом космогенного фона ^{11}C (слева). Справа: функция правдоподобия ($-2\Delta\ln\mathcal{L}$) скорости счета CNO-нейтрино с учетом статистики и систематики. Синие, фиолетовые и серые вертикальные полосы показывают 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. Новый метод для включения в анализ всех данных, фаз I+II+III.

Выделение интегрального направления ${}^7\text{Be-}\nu$



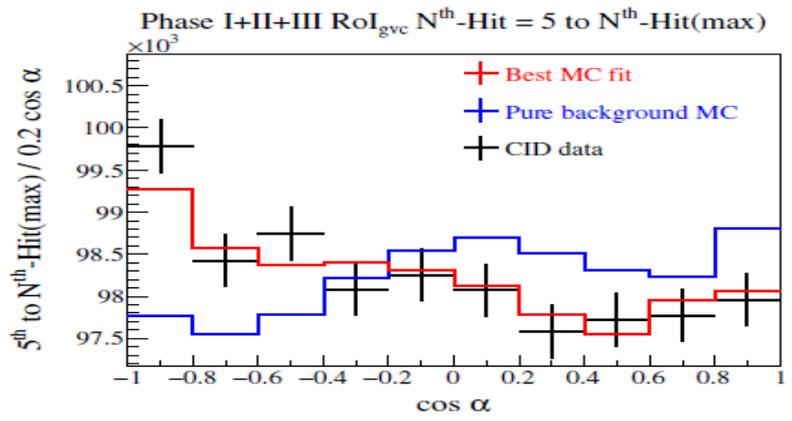
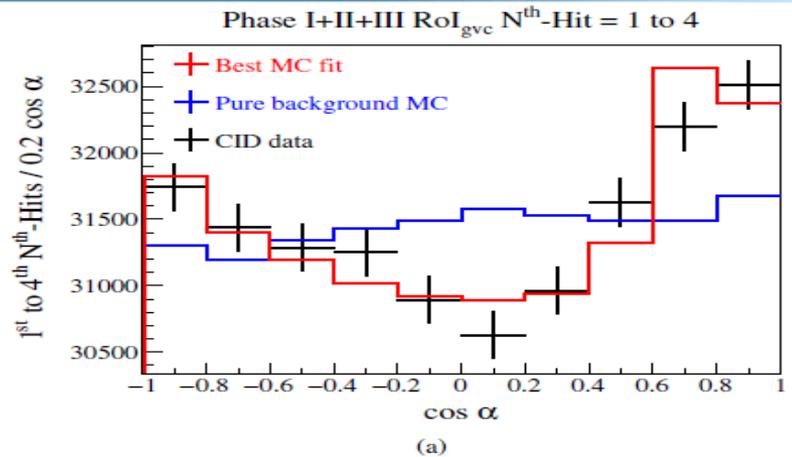
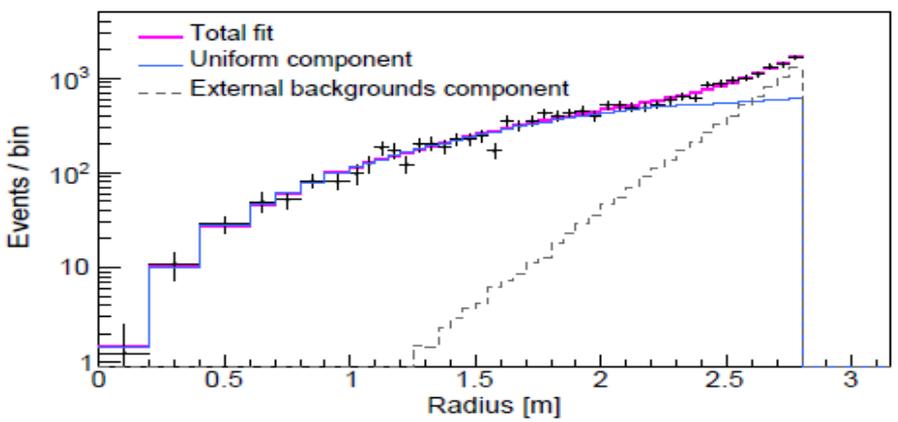
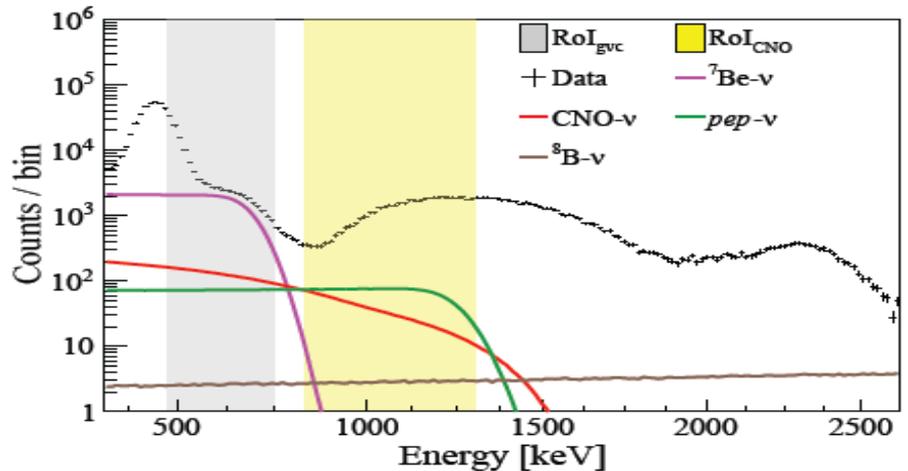
PRL, PRD (2022)



Разработан новый метод, который сопоставляет позицию ФЭУ для зарегистрированного фотона с положением Солнца и определяет угол фотона от направления на Солнце. В анализе используются различия во временной вероятности излучения черенковских и сцинтилляционных фотонов. В энергетическом окне от $0,54$ до $0,74$ МэВ получено для ${}^7\text{Be-}\nu$ $51,6 \pm 13$ соб/сут 100 т, что согласуется с предыдущими спектроскопическими результатамиorexino. Впервые продемонстрирована возможность использования направленного черенковского излучения для МэВ-ных солнечных нейтрино в сцинт. детекторе с высоким световыходом. Возможность реконструкции событий с использованием как черенковских, так и сцинт. фотонов.

Выделение интегрального направления CNO- ν на Солнце

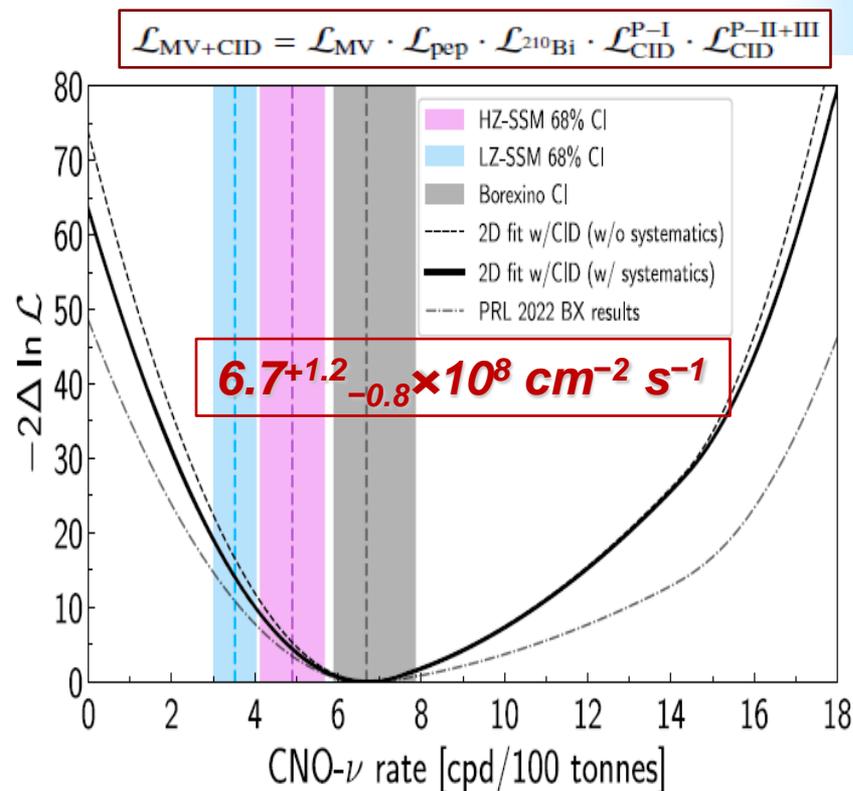
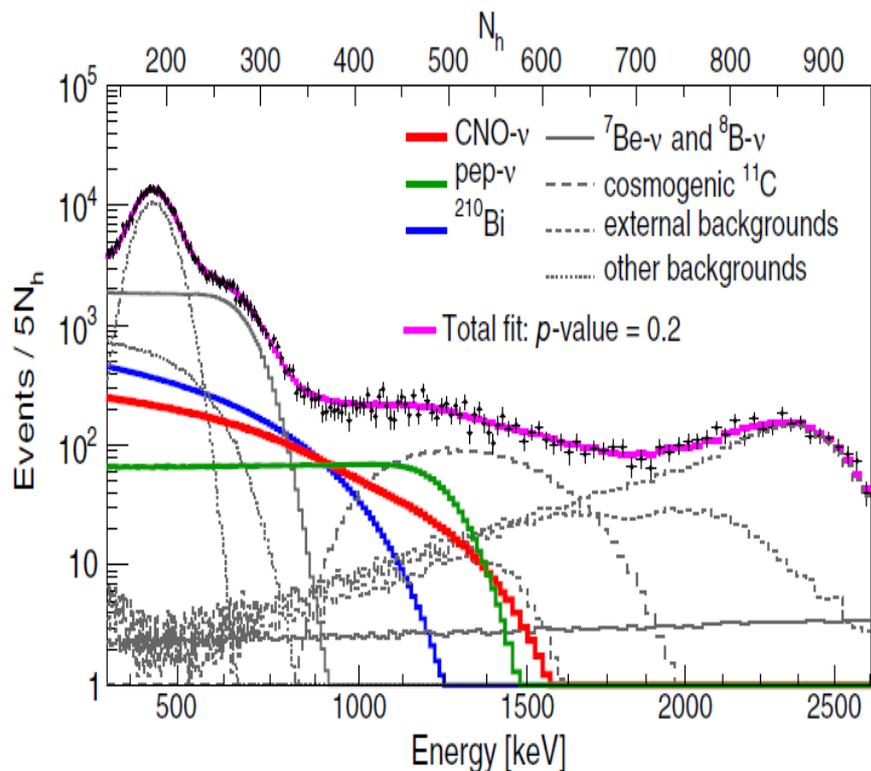
PRD 108, 102005 (2023)



Два интервала для ${}^7\text{Be-}\nu$ и $\text{CNO-}\nu$, использовавшиеся при анализе данных фазы I+II+III в объеме радиусом 2,95 м. Компоненты солнечных нейтрино показаны для SSM HZ. Значения смещения результата восстановления координат и групповой скорости для $\text{CNO-}\nu$ находились из результата для ${}^7\text{Be-}\nu$. (а) Гистограмма $N(\cos\alpha)$ для 1-4 фотонов показывает явный пик черенковского излучения. (в) Гистограмм $N(\cos\alpha)$ для фотонов, начиная с 5-го.

Регистрация CNO-нейтрино – результат 2023 г.

PRD 108, 102005 (2023)

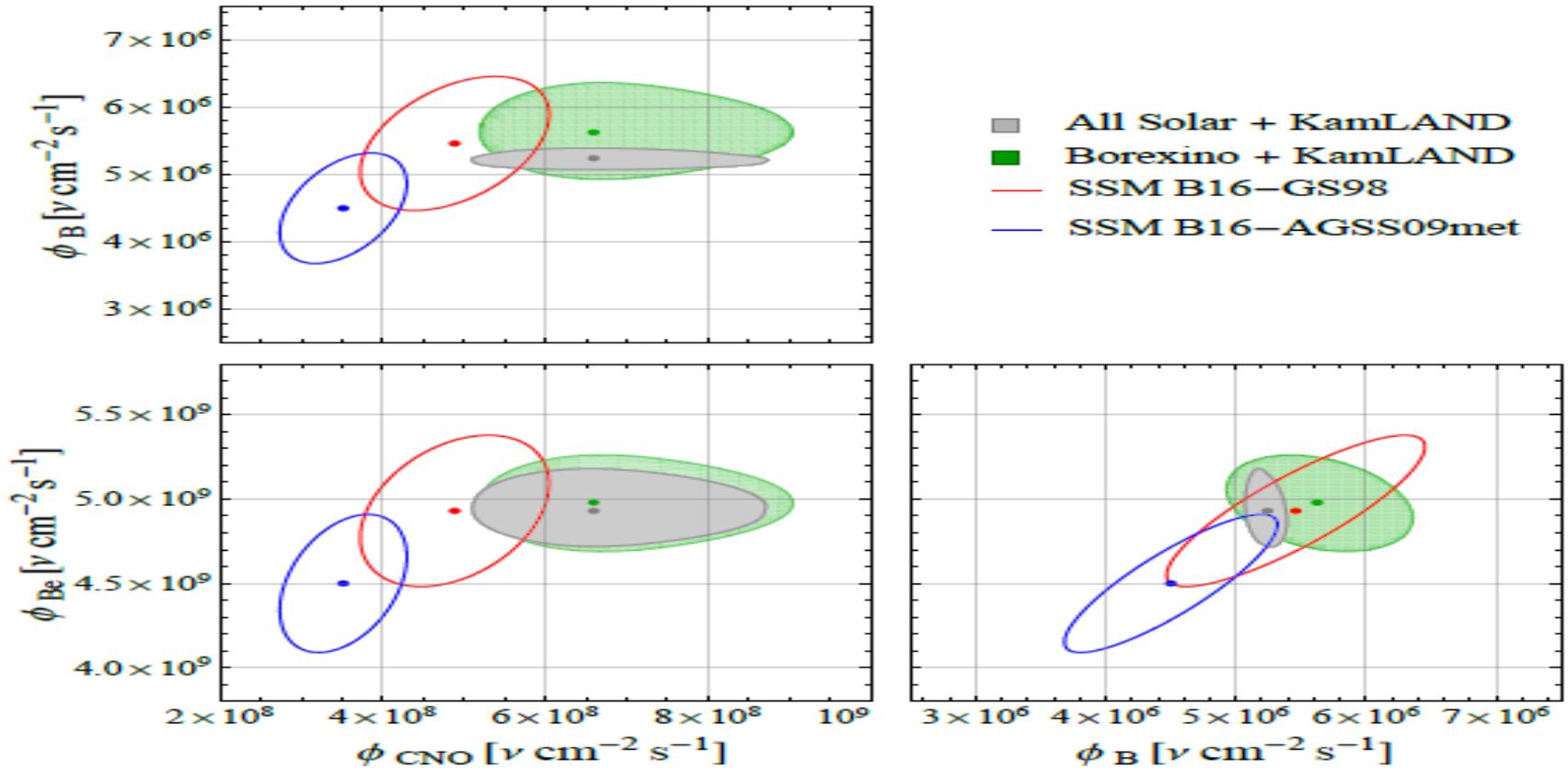


Метод выделения интегрального направления (МВИН) использовался для включения в анализ всего набора данных Бorexино – Фазы I+II+III. Без ограничения активности ^{210}Bi для скорости счета CNO- ν получено $(7.2^{+2.8}_{-2.7})$ соб./сут. 100 т. Наиболее точное измерение потока CNO- ν получается путем объединения результата для CNO- ν на основе МВИН с результатами спектрального анализа данных Фазы-III. С учетом стат. и сист. ошибок полученная скорость взаимодействия CNO- ν составляет $(6.7^{+1.2}_{-0.8})$ соб./сут. 100 т, что соответствует потоку $(6.7^{+1.2}_{-0.8}) \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, с учетом осцилляций нейтрино. Величина согласуется со ССМ с **высокой металличностью B16-GS98**. В сочетании с результатами измерений потоков ^7Be - и ^8B - ν , ранее полученными Бorexино, модель B16-AGSS09met с низкой металличностью отвергается на уровне 3.2σ .

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 .

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. Определенная скорость счета CNO-нейтрино составляет $6.7^{+1.2}_{-0.8}$ соб./сутки/100 т, что соответствует потоку CNO-нейтрино $(6.7^{+1.2}_{-0.8}) \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Гипотеза отсутствия CNO-нейтрино отвергается на уровне $\approx 8 \sigma$.

3. 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.

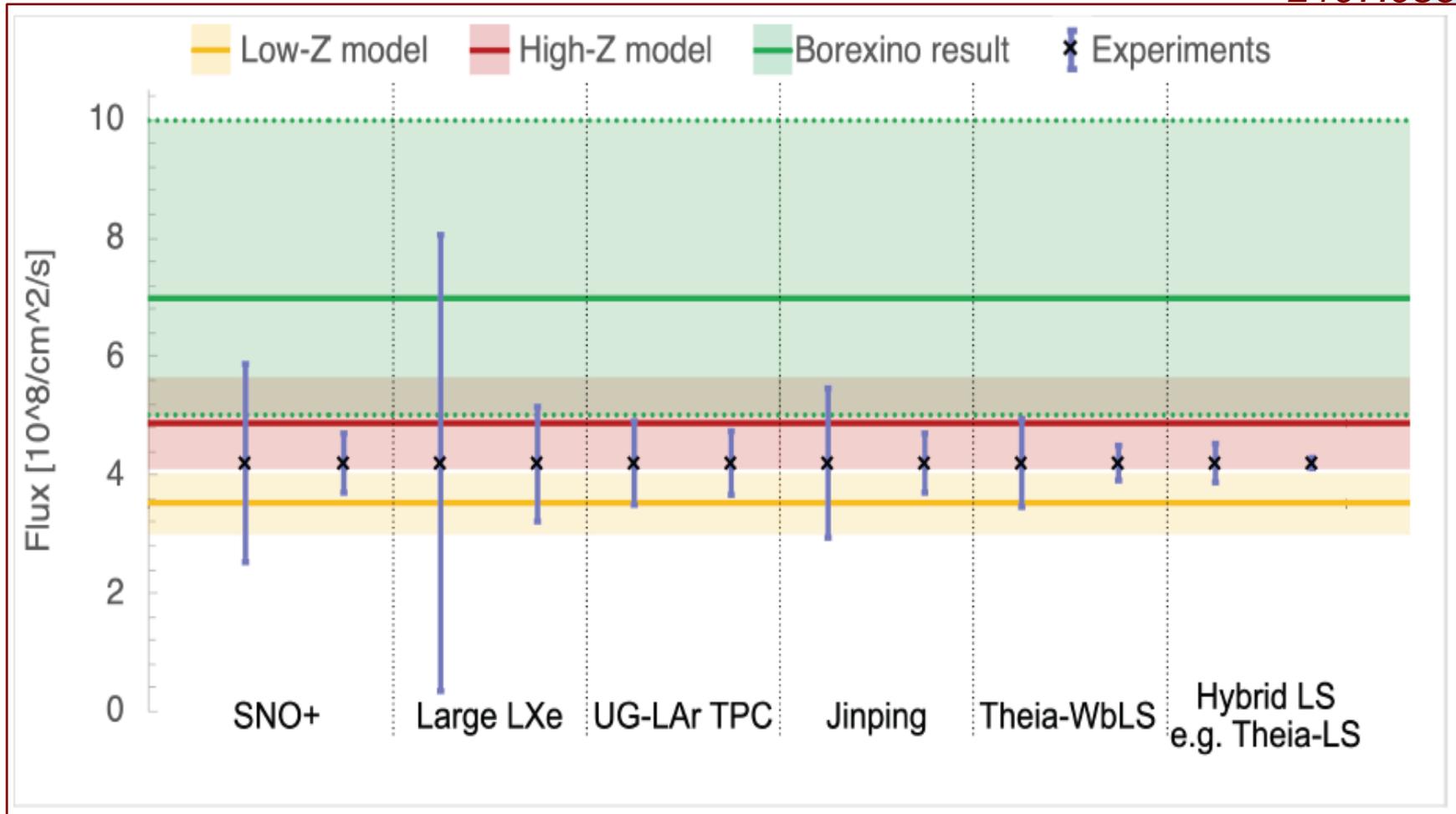
Species	Rate [cpd/100t]	Flux [$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
pp	$(134 \pm 10)^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5)^{+0.3}_{-0.5} \times 10^{10}$
${}^7\text{Be}$	$(48.3 \pm 1.1)^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.11)^{+0.06}_{-0.08} \times 10^9$
pep (HZ)	$(2.7 \pm 0.4)^{+0.1}_{-0.2}$	$(1.3 \pm 0.3)^{+0.1}_{-0.1} \times 10^8$
${}^8\text{B} (> 3 \text{ MeV})$	$0.223^{+0.021}_{-0.022}$	$5.68^{+0.42}_{-0.44} \times 10^6$
CNO	$6.7^{+1.2}_{-0.8}$	$6.7^{+1.2}_{-0.8} \times 10^8$
hep	< 0.002 (90% CL)	$< 1.8 \times 10^5$ (90% CL)

Спасибо за внимание!



Перспективы для CNO нейтрино

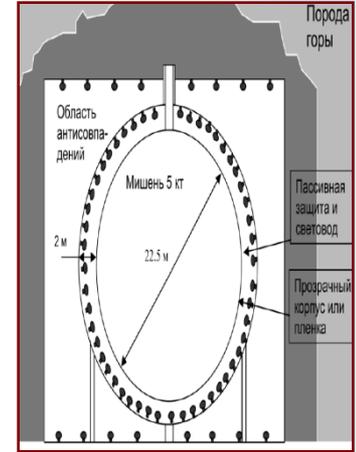
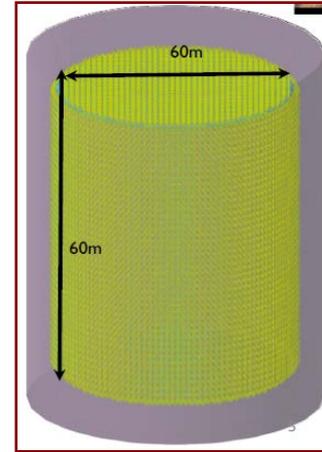
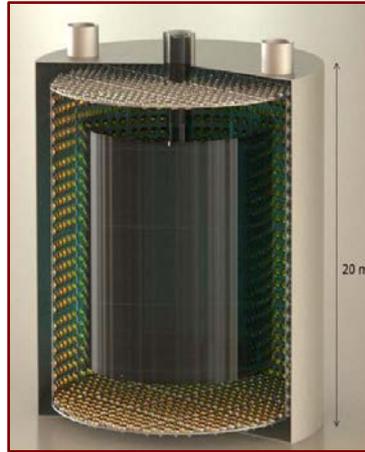
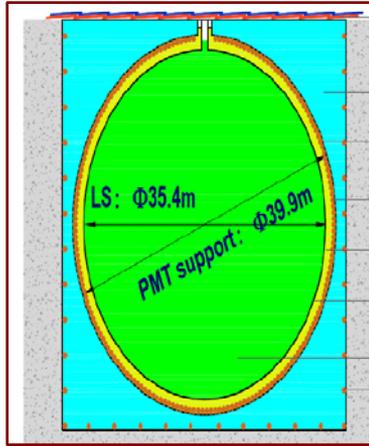
2107.0861



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

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 т,
 ^{136}Xe $2\text{b}2\nu$, ^{131}Xe , ~~44G~~

DARWIN, LXe, 40т, pp- , $^7\text{Be-}\nu$,
 axions, $2\text{b}0\nu$ ^{136}Xe , CvNS ($^8\text{B-}\nu$), SN- ν

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

