



ИЗМЕРЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО РР-ЦИКЛА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BOREXINO

ЧЕПУРНОВ А.С., ГРОМОВ М.Б.
ОТ ИМЕНИ КОЛЛАБОРАЦИИ BOREXINO

СЕМИНАР ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ
29.01.19

nature

THE INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE



How early life
shapes the
infant gut
microbiome
and risk of
disease
PAGES 583 & 589

SECURITY BLANKET

SPACE

REACHING FOR
THE MOON
Plans for a permanent luna
base gather momentum
PAGE 474

NEUTRINO PHYSICS

THE HEART
OF THE SUN
Neutrino detector probes
solar nuclear reactions
PAGES 496 & 505

CAREERS

SATISFACTION
IN SCIENCE?
Nature's salary survey takes
the pulse of the workplace
PAGE 611

NATURE.COM

25 October 2018
Vol. 562, No. 7728

Итоги 10 лет работы
эксперимента Borexino:
наиболее точный
спектральный анализ
нейтринных потоков от Солнца

Список статей Borexino (~50)

Солнечные ν: Nature 562, 505–510 (2018)

arXiv:1707.09279v2

arXiv:1709.00756v1

pp-ν: Nature 512, 383–386 (2014)

^7Be -ν: Phys. Rev. Lett. 101, 091302 (2008)

рер-ν: Phys. Rev. Lett. 108, 051302 (2012)

Стабильность e^- : Phys. Rev. Lett. 115,
231802 (2015)

Гео-ν: Phys. Rev. D 92, 031101(R) (2015)

Магнитный момент ν: Phys. Rev. D 96,
091103(R) (2017)

Сезонные модуляции ^7Be -ν:

Astroparticle Physics 92, 21–29 (2017)

Итоги фазы I: Phys. Rev. D 89, 112007 (2014)

Отсутствие асимметрии день/ночь ^7Be -ν:

Physics Letters B 707 (1), 22–26 (2012)

GW-ν корреляции: The Astrophysical
Journal (ApJ), 850:21 (2017)



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



Universität
Hamburg



SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR
PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE
UNIVERSITY



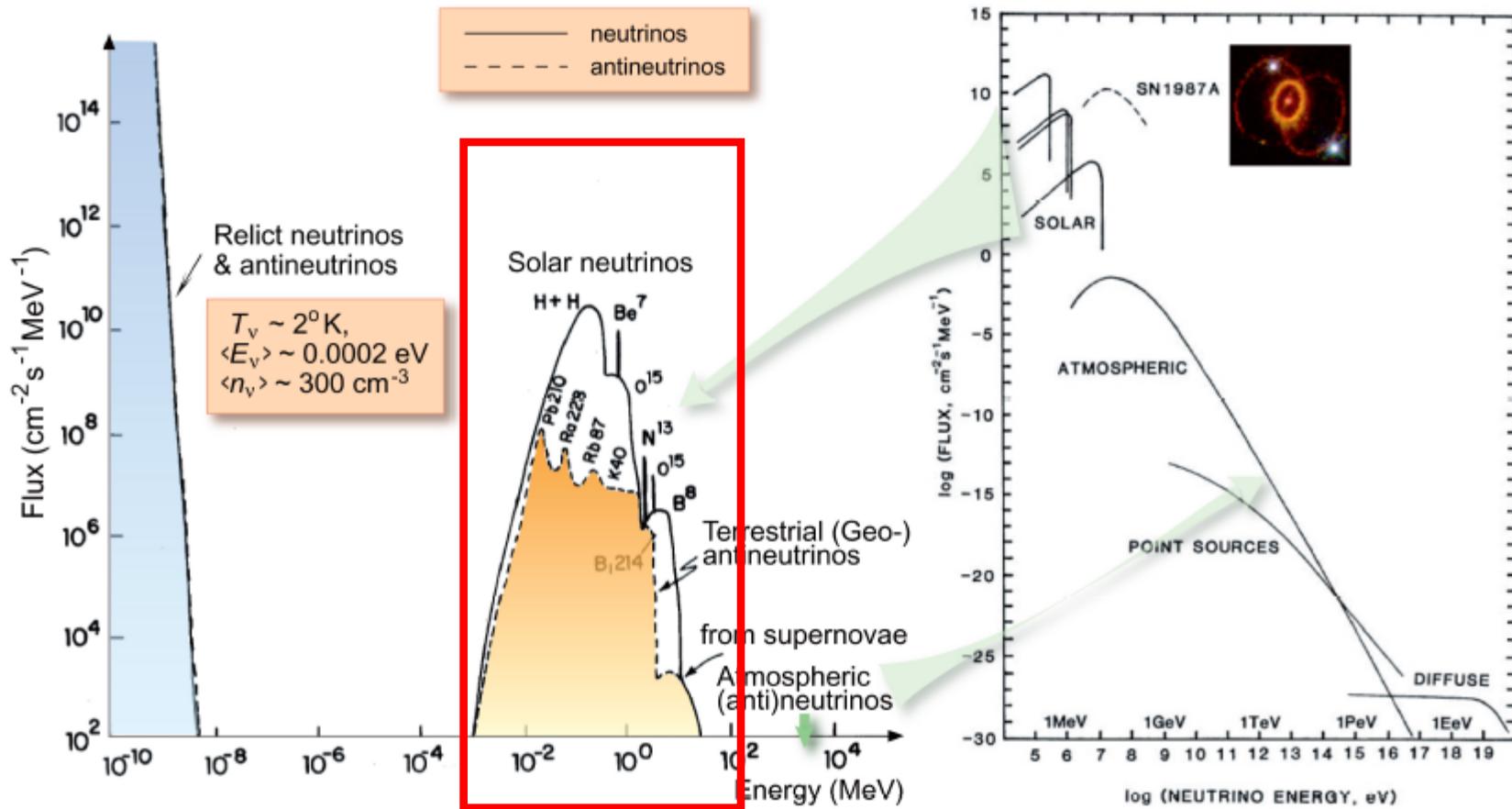
Joint Institute for
Nuclear Research



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



POLITECNICO
MILANO 1863



Реликтовые нейтрино - энергия 10^{-4} поток $10^{13}\text{-}10^{14}\text{ см}^{-2}\text{*с}^{-1}$

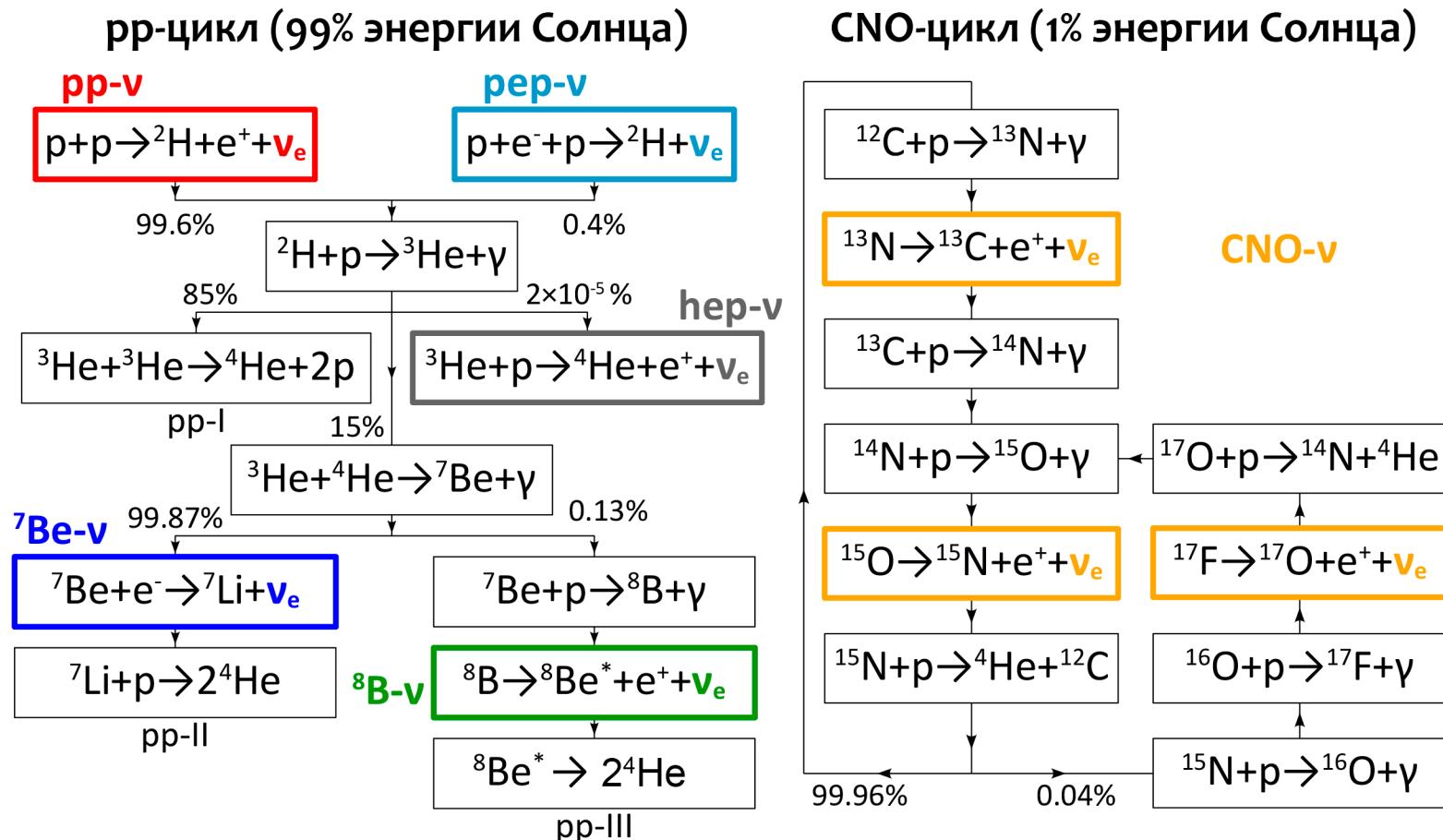
Солнечные нейтрино - $\sim 1\text{кэВ}$ - $\sim 10\text{МэВ}$ поток $10^{10}\text{ см}^{-2}\text{*с}^{-1}$

Недра земли (слабые распады ядер) - $\sim 1\text{кЭв}$ - $\sim 10\text{МЭв}$ поток $10^6\text{ см}^{-2}\text{*с}^{-1}$

Реакторные нейтрино - $\sim 1\text{кэВ}$ - $\sim <9\text{ МэВ}$ (1ГВт - 10 м) поток $\sim 10^{13}\text{ см}^{-2}\text{*с}^{-1}$

Космические лучи - $\sim >100\text{МэВ}$ поток $10^6\text{ см}^{-2}\text{*с}^{-1}$

Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий



- von Weizsäcker, C. F. Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne I. *Phys. Z.* 38, 176 (1937)

- Bethe, H. A. & Critchfield, C. L. The formation of deuterons by proton combination. *Phys. Rev.* 54, 248 (1938)

- Fowler, W. Experimental and theoretical nuclear astrophysics; the quest for the origin of the elements: **Nobel prize lecture**. *Rev. Mod. Phys.* 56, 149 (1984).

- Bethe, H. Energy production in stars. *Phys. Rev.* 55, 434 (1939).

температура (К)

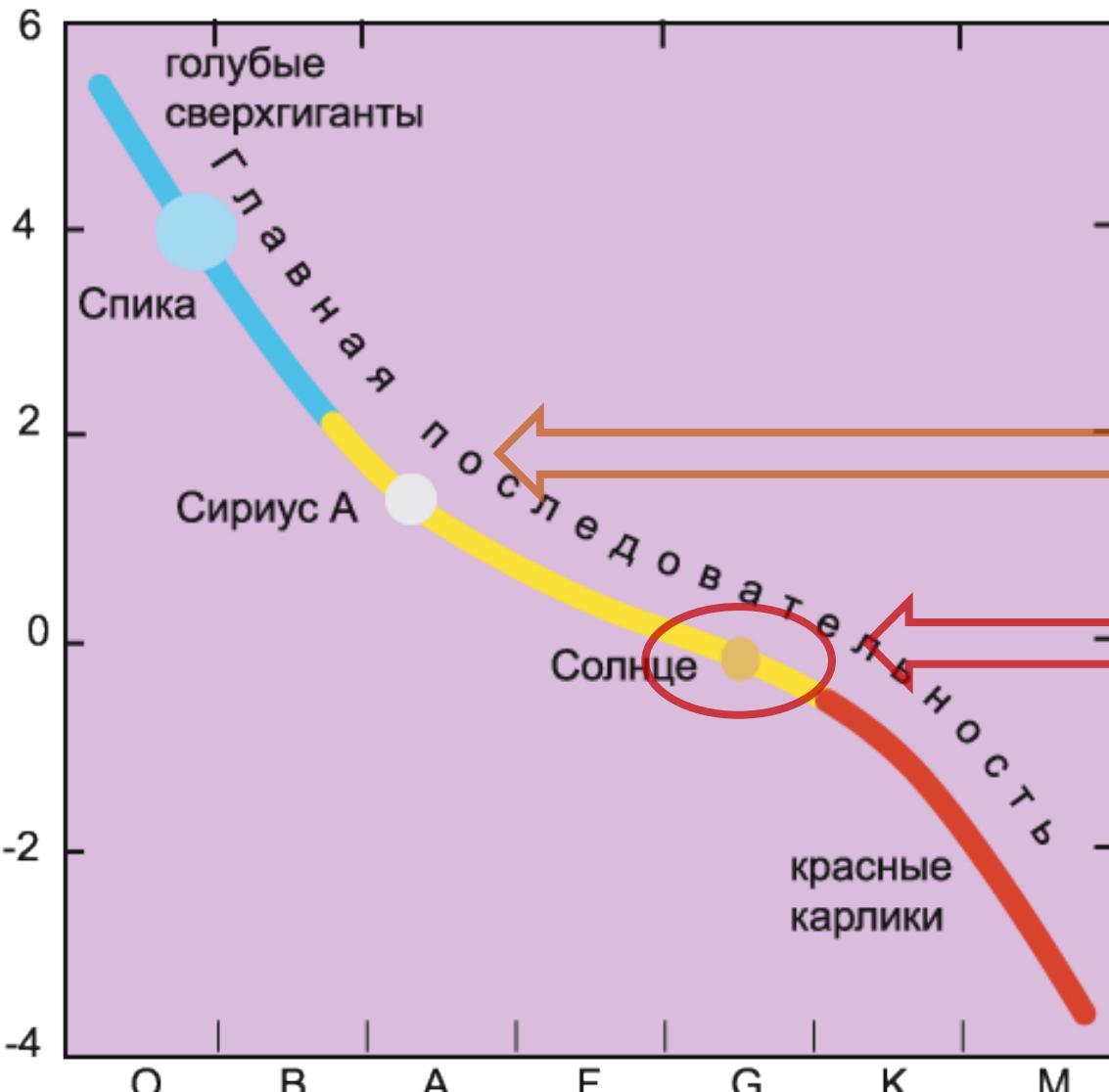
25,000

10,000

6000

3000

светимость $\lg(L/L_{\text{Sun}})$



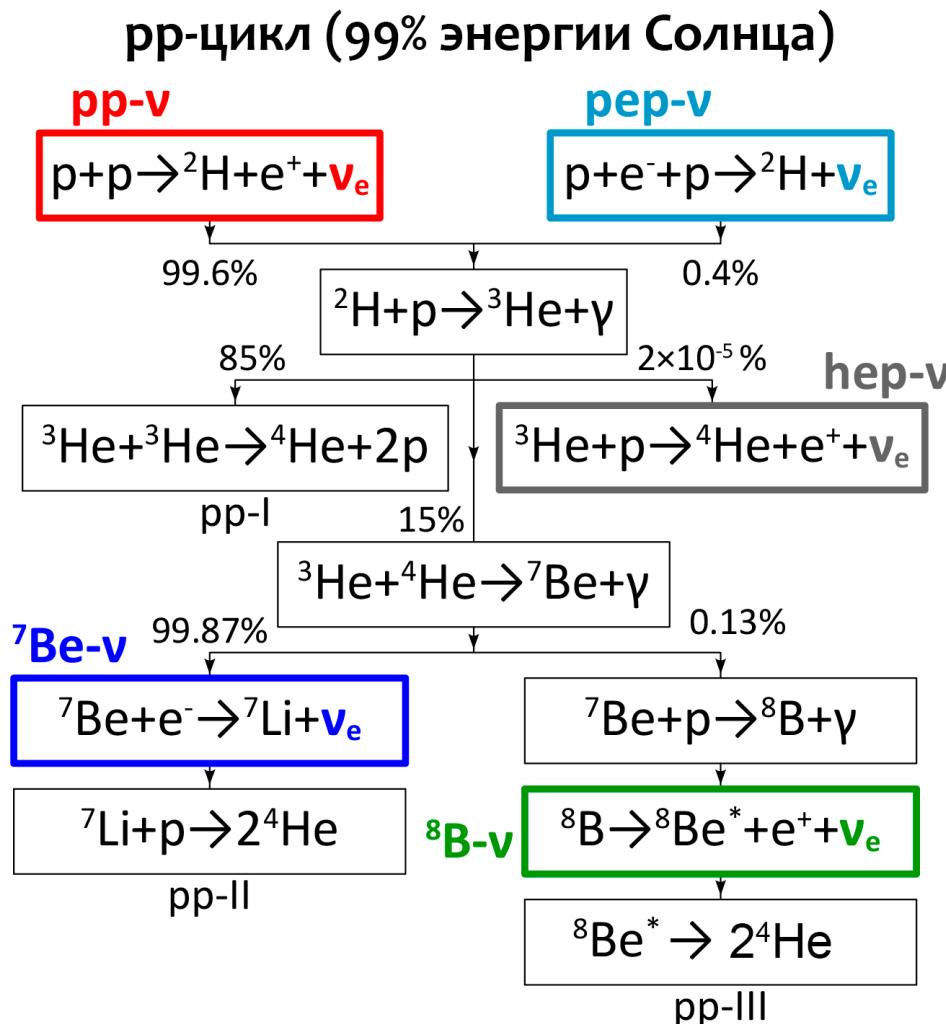
Доминирование
разных термоядерных циклов
в зависимости от типа звезд

Доминирование СНО-цикла
при сгорании водорода
в гелий

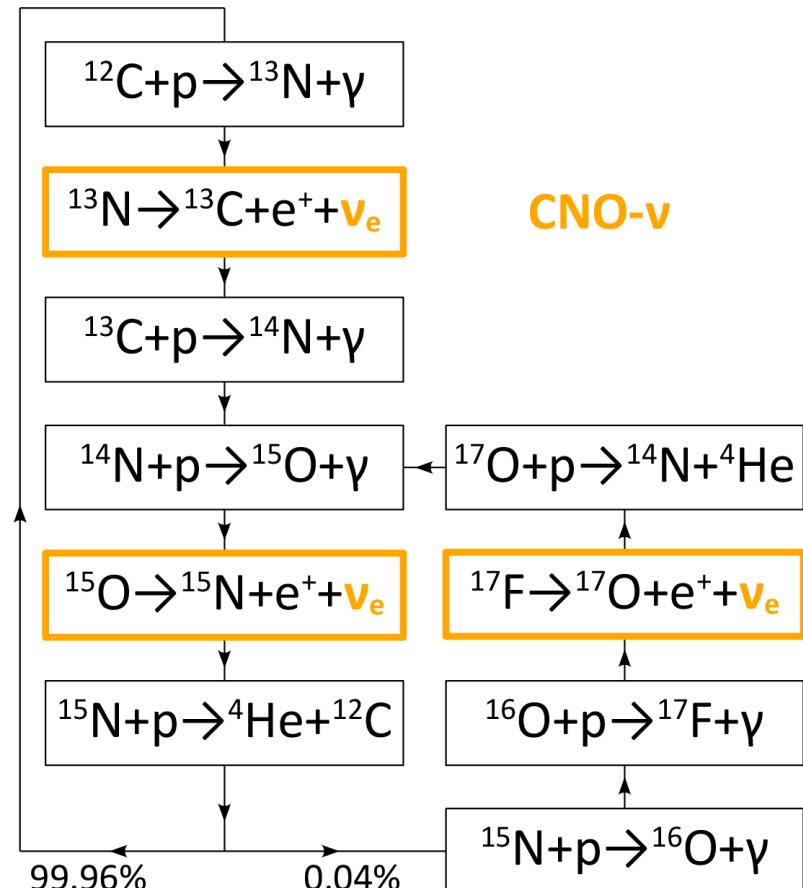
Доминирование pp-цикла
при сгорании водорода
в гелий

спектральный класс

Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий



CNO-цикл (1% энергии Солнца)

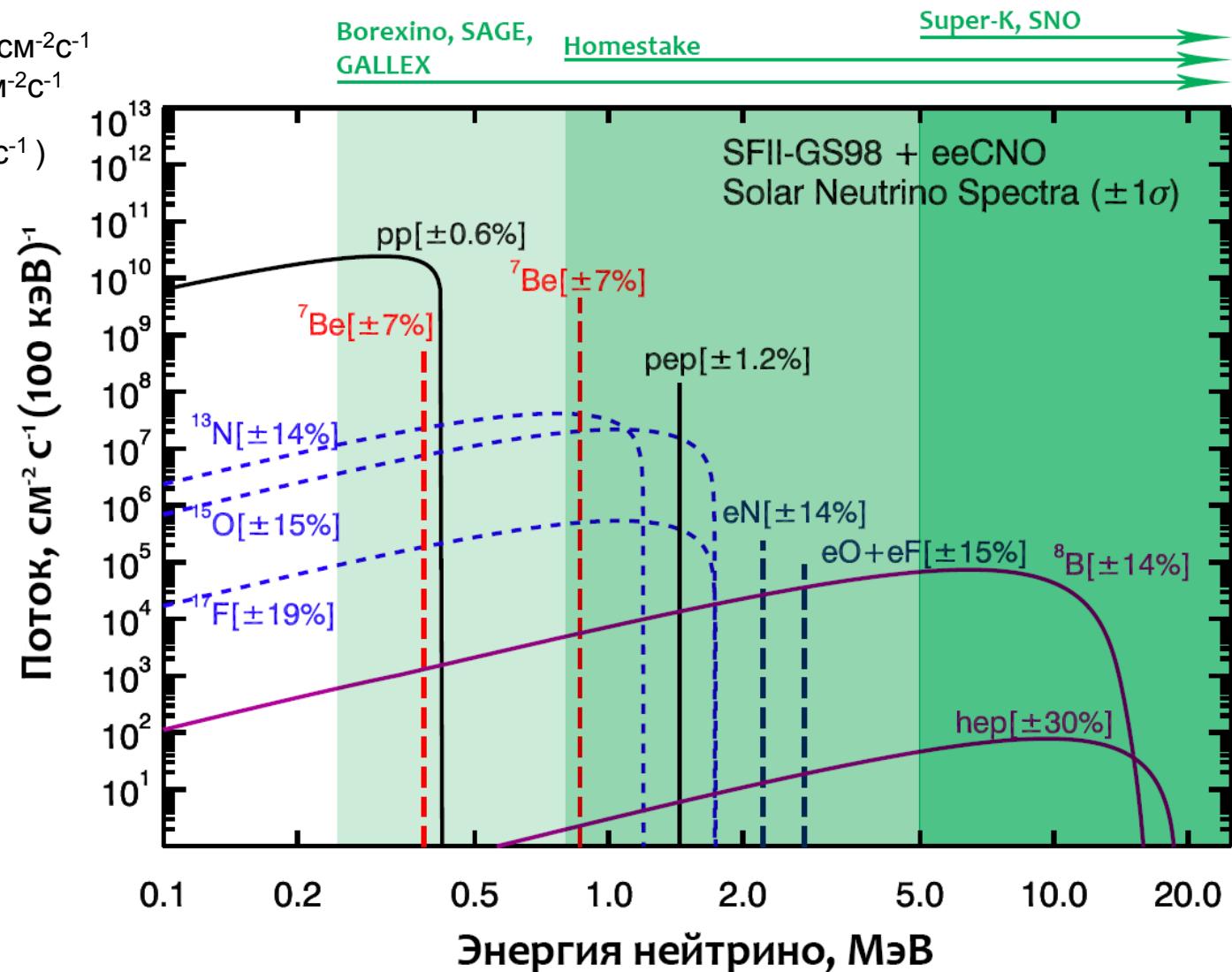


$$4p + 2e^- \rightarrow ⁴He + 2\nu_e. (E(\nu_e) \approx 26 \text{ МэВ})$$

(нейтрино уносит менее 10% энергии реакции синтеза).

Теоретические спектры солнечных нейтрино по данным ССМ

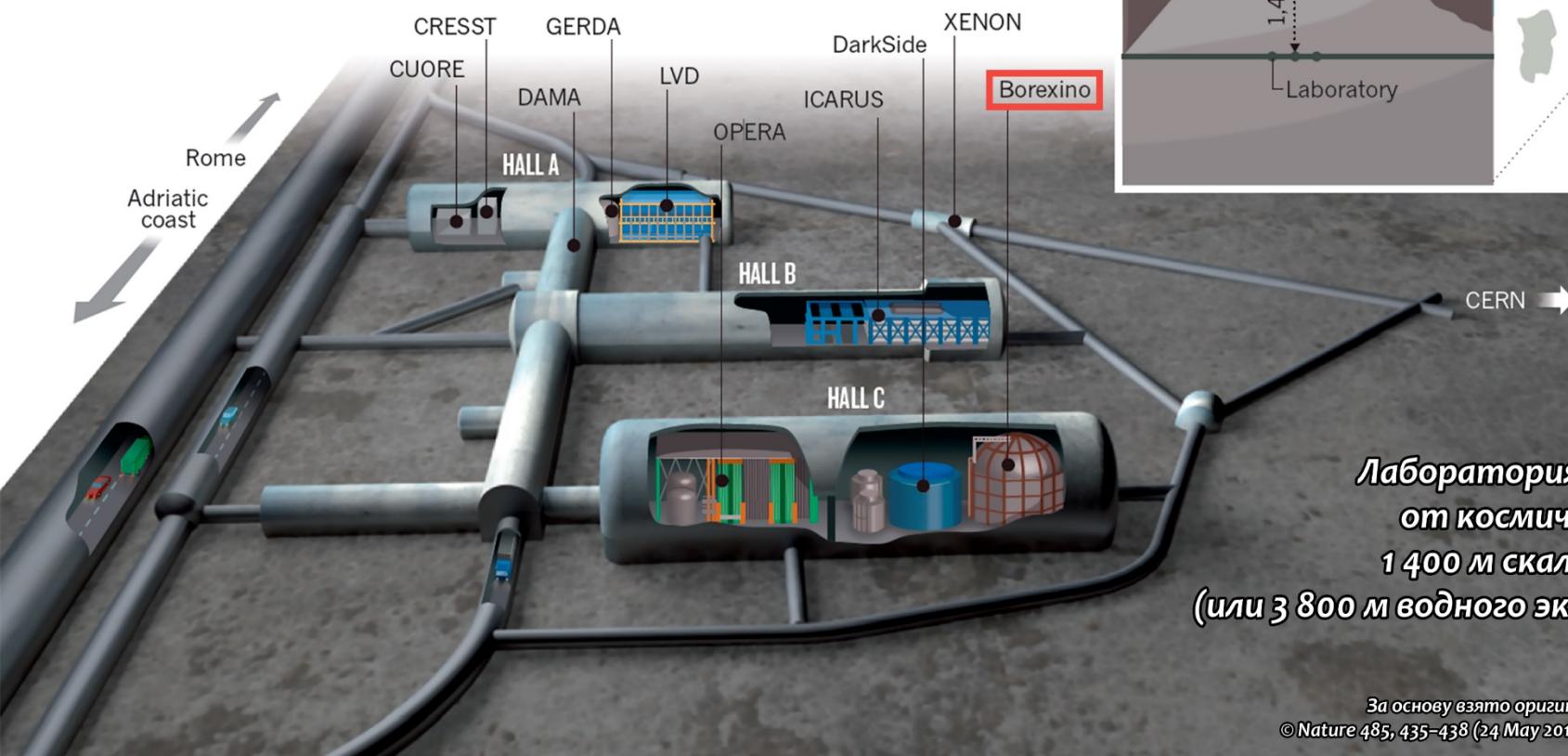
pp 90% - $\sim 6.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
 ^7Be 10% - $\sim 5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
 ($< 1\%$ ^8B - $6 \times 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$)



Bahcall, J. N. *Neutrino Astrophysics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989).

Vinyoles, N. et al. A new generation of standard solar models. *Astrophys. J.* 835, 202 (2017).

РАСПОЛОЖЕНИЕ ДЕТЕКТОРА BOREXINO в НАЦИОНАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГРАН-САСКО



Лаборатория защищена
от космических лучей
1 400 м скальных пород
(или 3 800 м водного эквивалента)

За основу взято оригинальное изображение
© Nature 485, 435–438 (24 May 2012) doi:10.1038/485435a

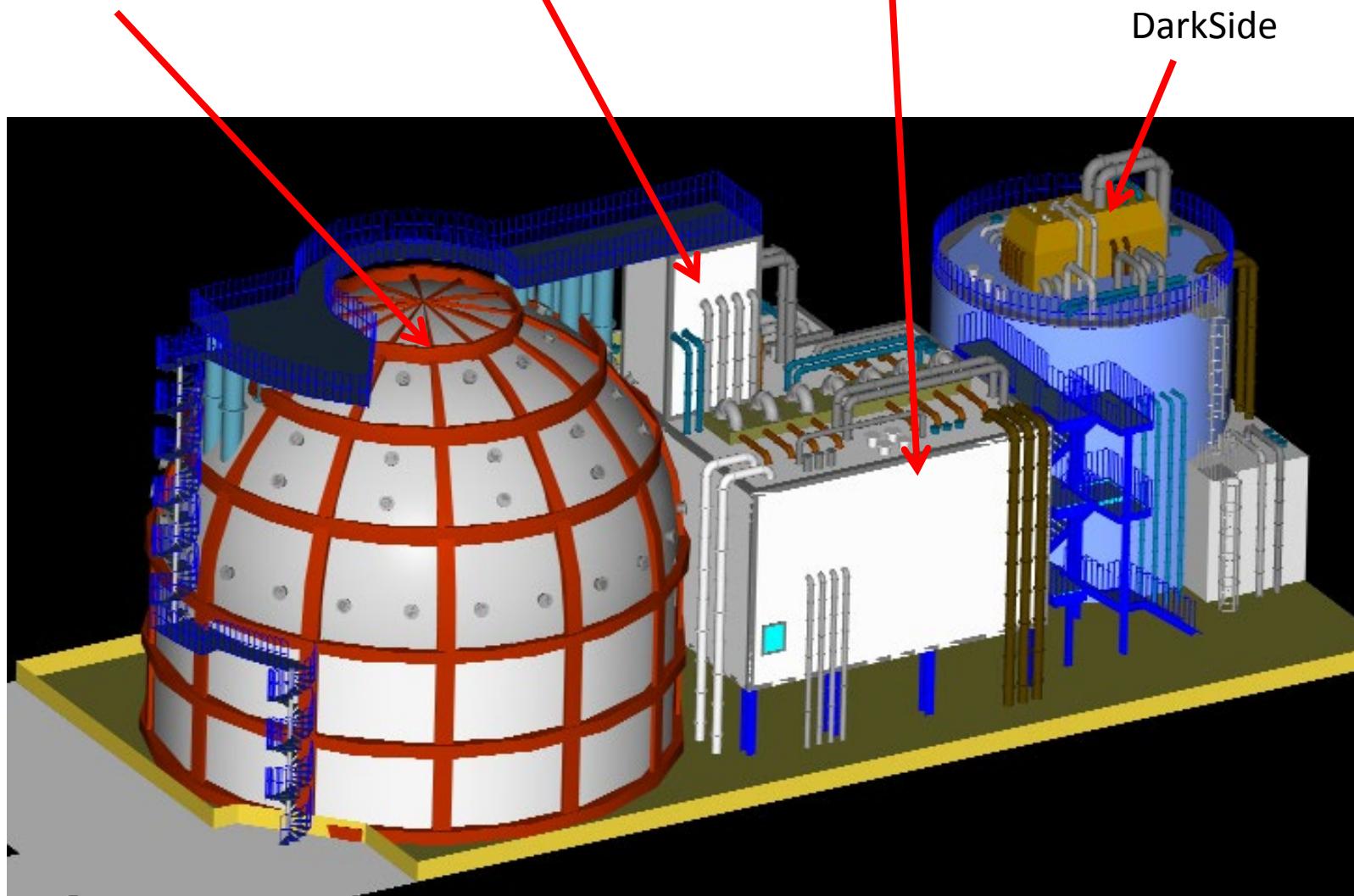
Состав детектора Borexino

Защитный кожух
сферы
детектора

Заводы по
очистке
жидкостей

Комнаты
управления

СТФ с чистыми
комнатами
В настоящее время
передан
коллаборации
DarkSide



Эксперимент Борексино

Система
сбора данных
Laben

Диапазон измерений:

200 кэВ - 18 МэВ

Физические задачи:

Солнечные нейтрино

Гео-нейтрино

Стерильные нейтрино

Редкие процессы

Система
сбора данных
FADC

Диапазон измерений:

1 МэВ - 50 МэВ

Физические задачи:

Вспышки сверхновых

Гео-нейтрино

Стерильные нейтрино

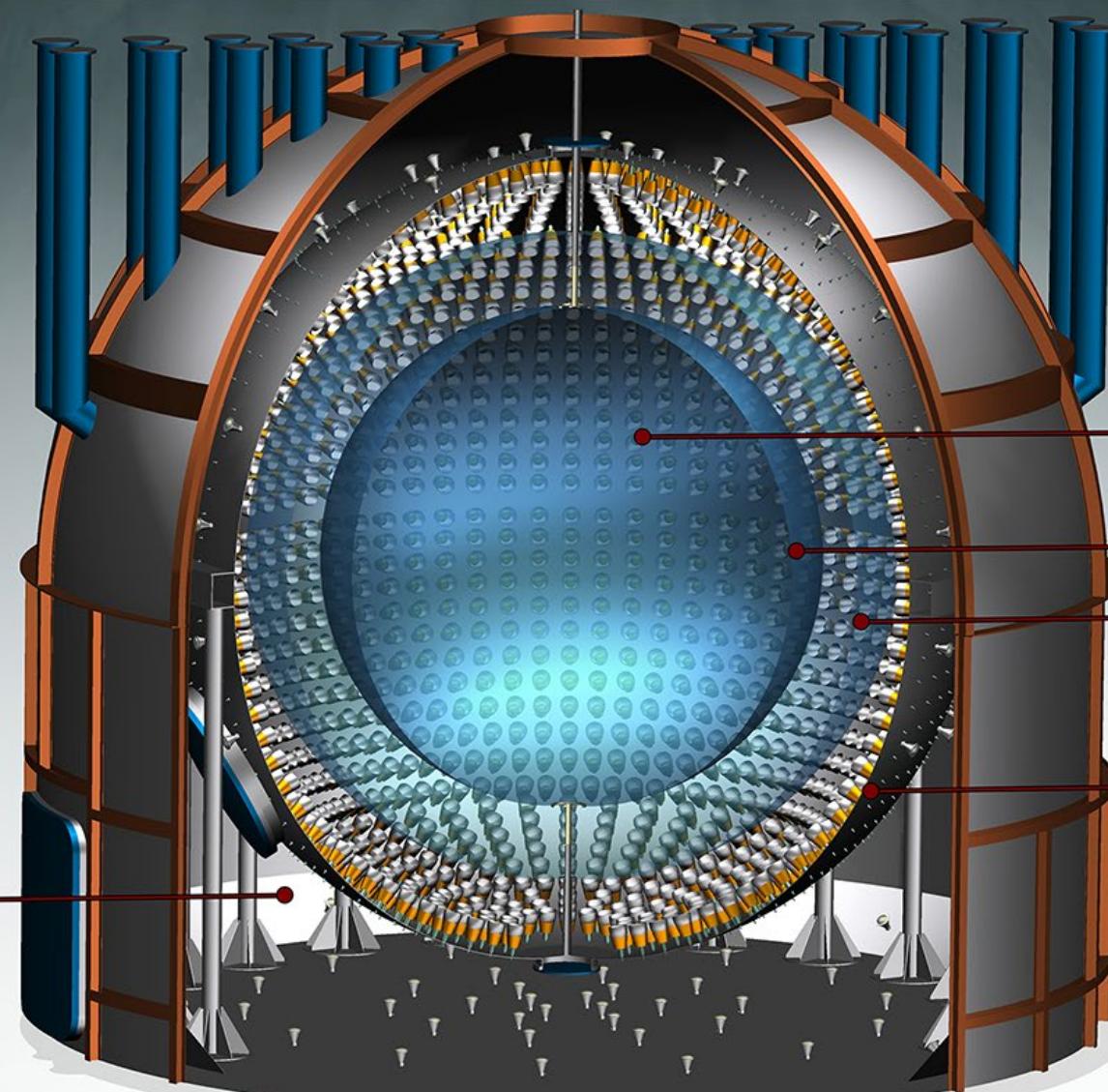
Редкие процессы

Мишень из
сцинтиллятора:
278 т PC+PPO (1.5 г/л)

Нейлоновые сферы:
(толщина 125 мкм)
Внутренняя: 4.25 м,
Внешняя: 5.50 м
(защита от радона)

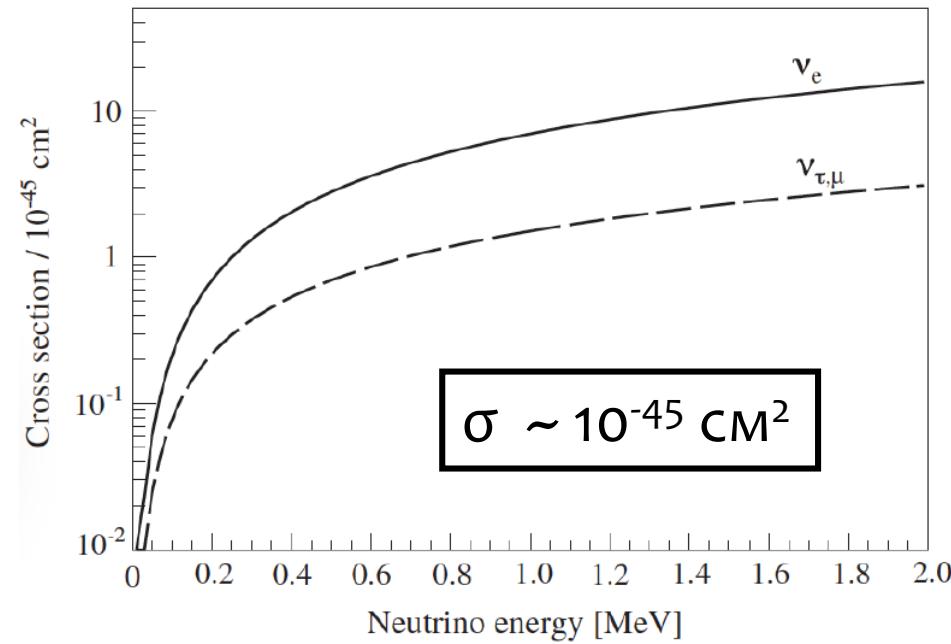
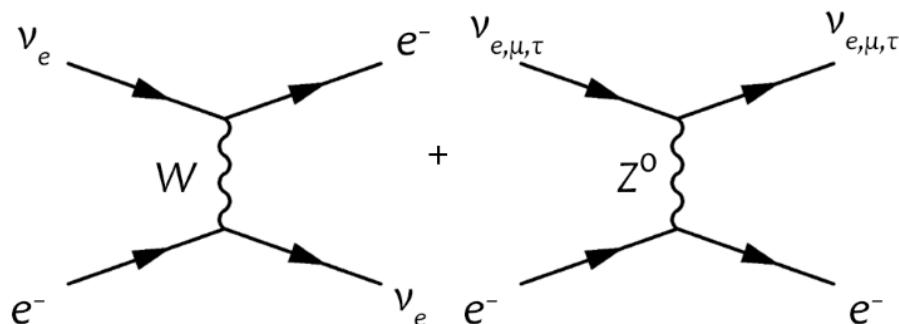
Сфера из
нержавеющей стали:
1346 м³,
 $R = 6.85$ м,
2212 8" (ETL 9351) ФЭУ
Два буфера:
323 т и 567 т
PC+DMP (5.0 г/л)

Водяной бак WT:
водный
черенковский
детектор,
2100 м³,
 $R = 9$ м, $H = 16.9$ м,
208 ФЭУ в воде,
защита от γ , n , μ



Регистрация нейтрино в ЖОС мишени Borexino

Для детектирования солнечных нейтрино
используется реакция
упругого рассеяния нейтрино
на электронах



$$N_e = (3.307 \pm 0.003) \times 10^{31} \text{ e}^-/\text{100t}$$

Сигнал от солнечных (моноэнергетических) нейтрино в Борексино:

$$R(E_\nu, T) = P_{ee}(E_\nu) \varphi_\nu(E_\nu) \frac{d\sigma_e(E_\nu, T)}{dT} + (1 - P_{ee}(E_\nu)) \varphi_\nu(E_\nu) \frac{d\sigma_{\mu,\tau}(E_\nu, T)}{dT}$$

Ожидаемые из ССМ потоки солнечных нейтрино

Solar neutrino	Rate (counts per day per 100 t)	Flux ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Flux-SSM predictions ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
pp	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \times 10^{10}$	$5.98(1.0 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1.0 \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
^7Be	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.11^{+0.06}_{-0.08}) \times 10^9$	$4.93(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.12}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.13}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
$^8\text{B}_{\text{HER-I}}$	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$(5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
$^8\text{B}_{\text{HER-II}}$	$0.087^{+0.080+0.005}_{-0.010-0.005}$	$(5.56^{+0.52+0.33}_{-0.64-0.33}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
$^8\text{B}_{\text{HER}}$	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$(5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	<8.1 (95% C.L.)	$<7.9 \times 10^8$ (95% C.L.)	$4.88(1.0 \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.51(1.0 \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	<0.002 (90% C.L.)	$<2.2 \times 10^5$ (90% C.L.)	$7.98(1.0 \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1.0 \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

L. Ludhova et al.. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. Nature, 562:505–510, 2018.

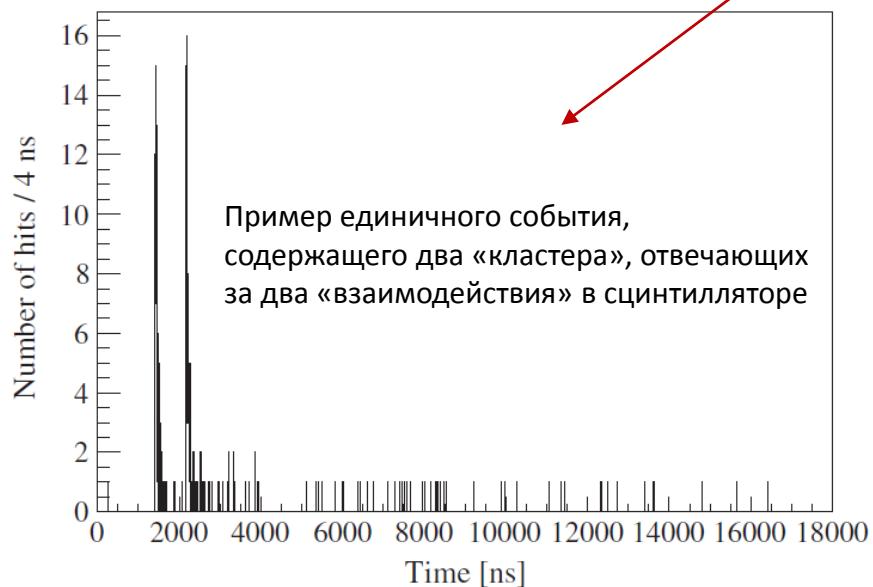
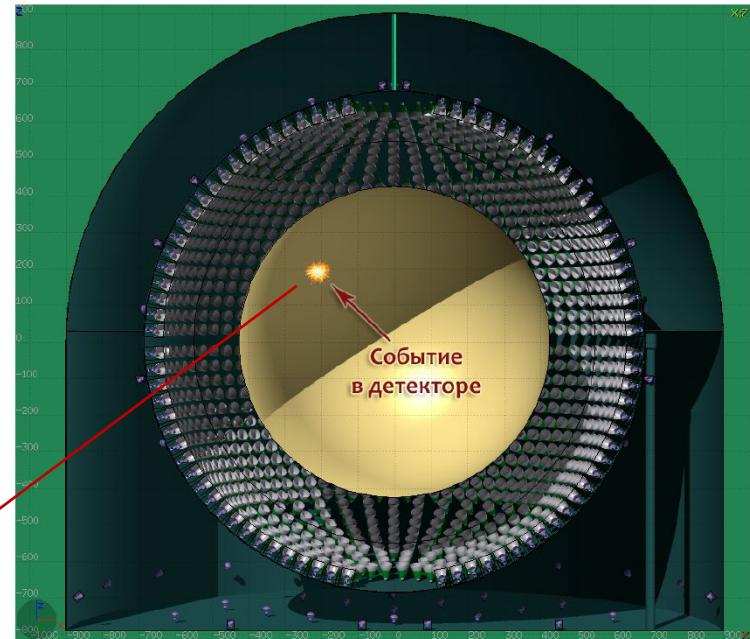
Поток $\sim 6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{s}^{-1}$ дает ~ 130 событий в день на 100 т мишени

Событие в детекторе Borexino численно содержит

- количество фотоэлектронов (выделенная энергия), собранных каждым из сработавших ФЭУ
- положение в детекторе (временем прихода света на ФЭУ)
- тип частицы (дискриминация по форме импульса)

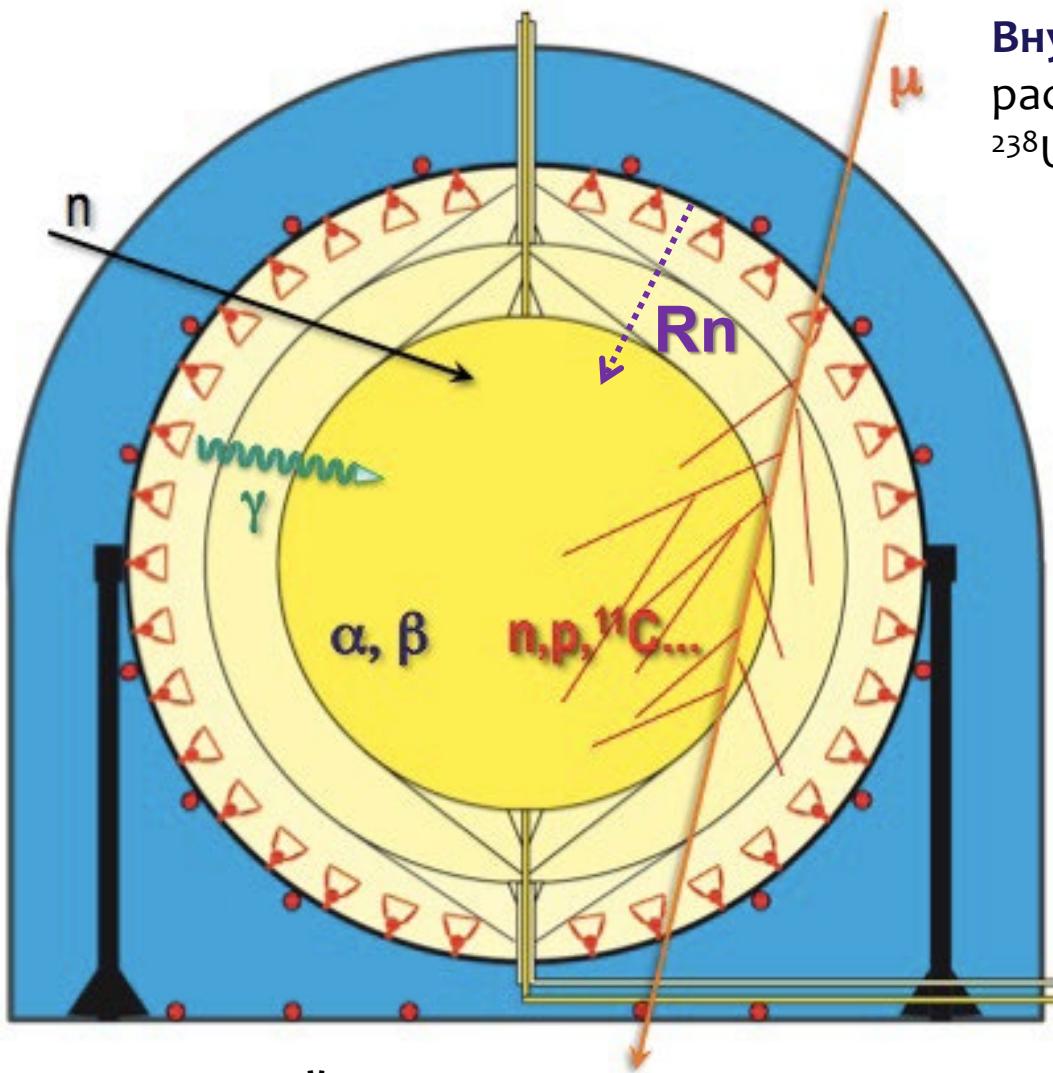
Триггер настроен на то, что должны сработать минимум 25-30 ФЭУ, (т.е. зарегистрировать хотя бы один фотоэлектрон во временном окне 99 нс) – это эквивалентно выделению энергии 50-60 кэВ. 1 МэВ электрон производит в среднем 500 фотоэлектронов

Временное окно триггера программируется и составляет (с декабря 2007 г.) 16,5 мкс, при мертвом времени 2,5 мкс.



КАК МЫ УЗНАЕМ, ЧТО ЭТО СОБЫТИЕ СООТВЕТСТВУЕТ РАССЕЯНИЮ НЕЙТРИНО ?

Borexino – установка с беспрецедентной радиохимической чистотой



Быстрые нейтроны,
возникающие при взаимодействии
мюонов с окружением детектора

Внутренняя радиоактивность -
распады долгоживущих изотопов
 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K и их дочерних ядер

Внешнее γ -излучение
возникает в буферных объёмах,
в металлической сфере,
в стекле ФЭУ и концентраторах света;
основные источники: ^{40}K , ^{208}Tl , ^{214}Bi

Проникновение радона
в центральный детектор за счёт
диффузии и переноса
тепловыми потоками;
источники радона: ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th

«Космические» мюоны

Космогенный фон (фон от мюонов) -
нейтроны и радионуклиды,
Возникающие при взаимодействии
мюонов с материалами детектора

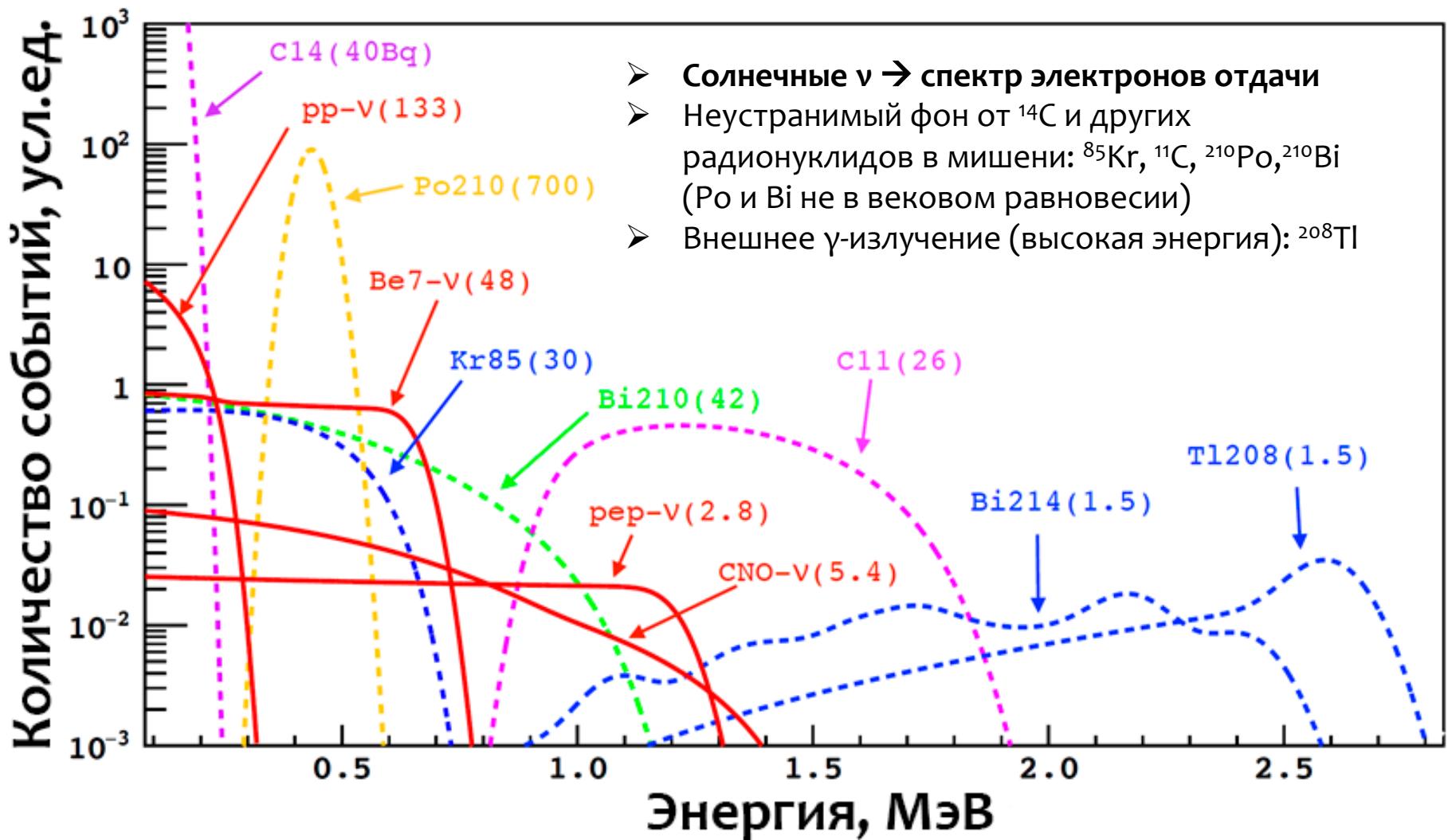
Фоны в детекторе Borexino

Background LER	Rate (Bq per 100 t)
^{14}C (0.156 MeV, β^-)	[40.0 ± 2.0]
Background LER	Rate (counts per day per 100 t)
^{85}Kr (0.687 MeV, β^-) (internal)	6.8 ± 1.8
^{210}Bi (1.16 MeV, β^-) (internal)	17.5 ± 1.9
^{11}C (1.02–1.98 MeV, β^+) (internal)	26.8 ± 0.2
^{210}Po (5.3 MeV, α) (internal)	260.0 ± 3.0
^{40}K (1.460 MeV, γ) (external)	1.0 ± 0.6
^{214}Bi (<1.764 MeV, γ) (external)	1.9 ± 0.3
^{208}Tl (2.614 MeV, γ) (external)	3.3 ± 0.1
Background HER-I	Rate (counts per day per 227.8 t)
μ , cosmogenics, ^{214}Bi (internal)	[$6.1_{-3.1}^{+8.7} \times 10^{-3}$]
(α, n) (external)	0.224 ± 0.078
^{208}Tl (5.0 MeV, β^- , γ) (internal)	[0.042 ± 0.008]
^{208}Tl (5.0 MeV, β^- , γ) (emanated)	0.469 ± 0.063
^{208}Tl (5.0 MeV, β^- , γ) (surface)	1.090 ± 0.046
Background HER-II	Rate (counts per day per 266.0 t)
μ , cosmogenics (internal)	[$3.8_{-0.1}^{+14.6} \times 10^{-3}$]
(α, n) (external)	0.239 ± 0.022

L. Ludhova et al.. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. Nature, 562:505–510, 2018.

Остаточный фон обусловлен β^- (электроны), β^+ (позитроны), γ (гамма), μ (мюоны), α (альфа частицы) и n (нейтроны). Фоновые скорости получены путем подгонки к энергетическому спектру из собранных событий в трех областях энергии: LER, HER-I/II. Скорость счета в квадратных скобках оценивалась по независимым источникам. Учитывается фон внутренний (то есть из-за событий, равномерно распределенных в объеме сцинтиллятора) и внешний (то есть из-за события в источниках, окружающих сцинтиллятор).

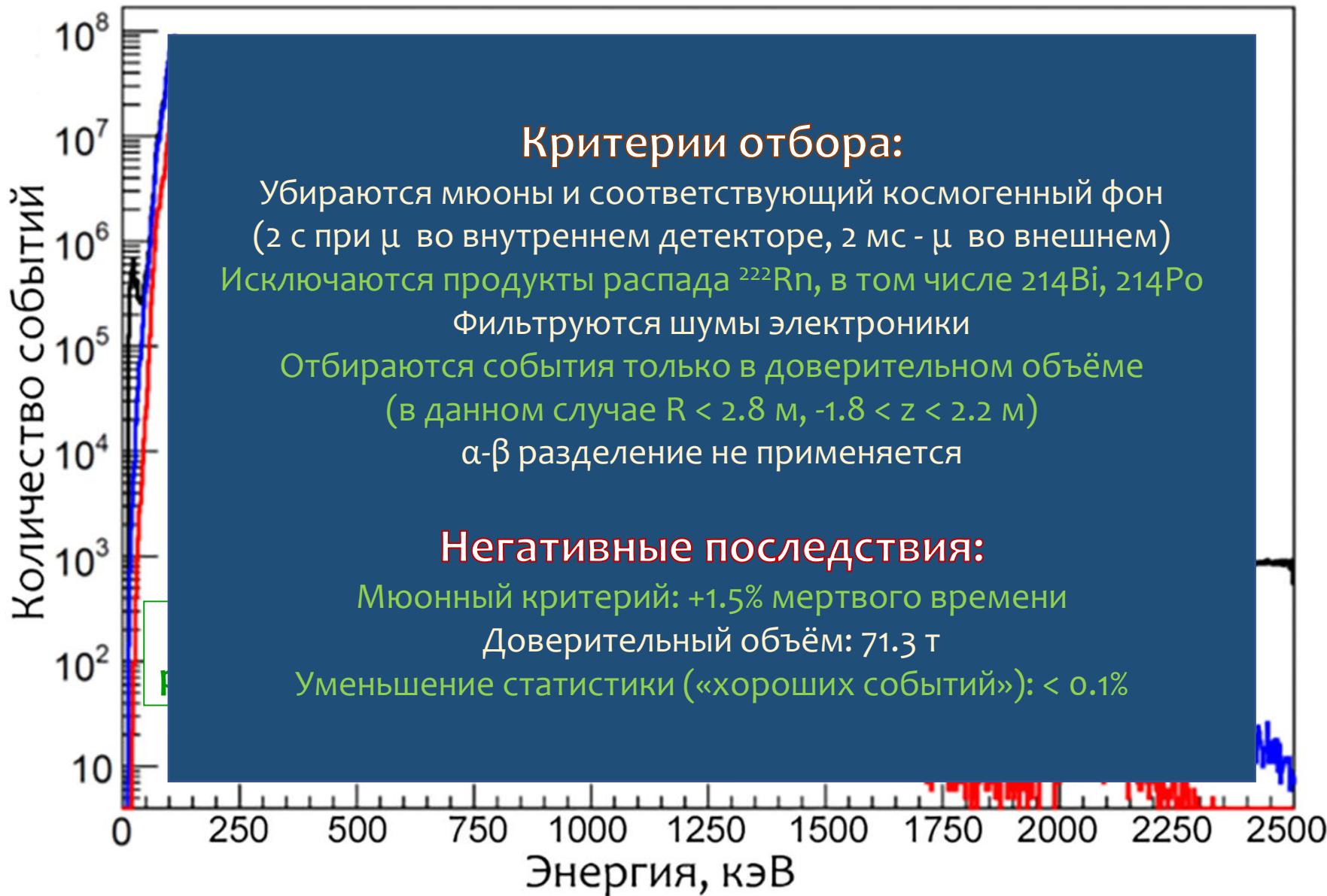
Возможные вклады нейтрино и фонов в наблюдаемый спектр (согласно Монте-Карло моделированию)



Скорости счёта приведены в cpd/100 t (количество событий в день в 100 т)

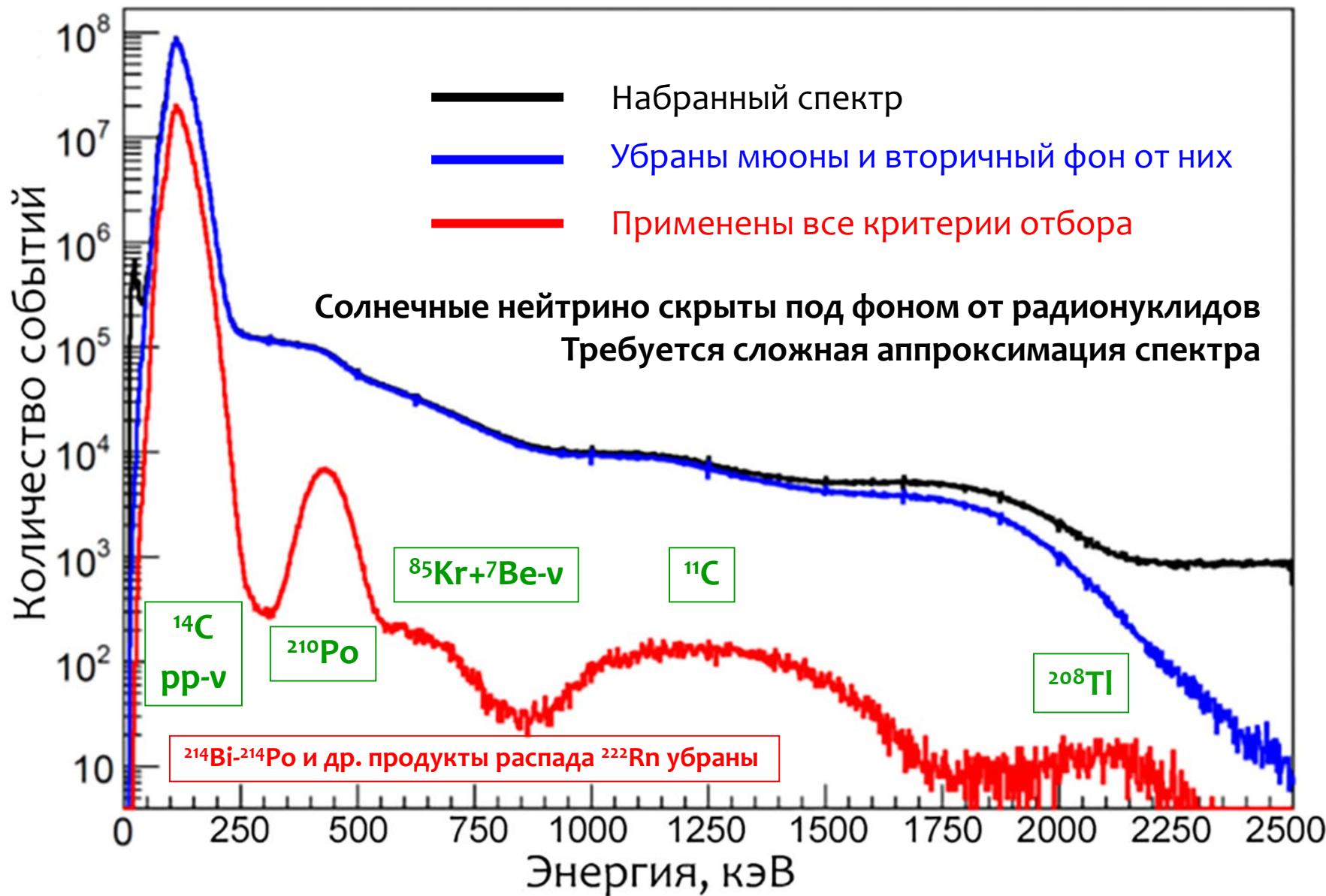
Спектр до/после отбора событий

(область малых энергий: 0.19 – 2.93 МэВ)

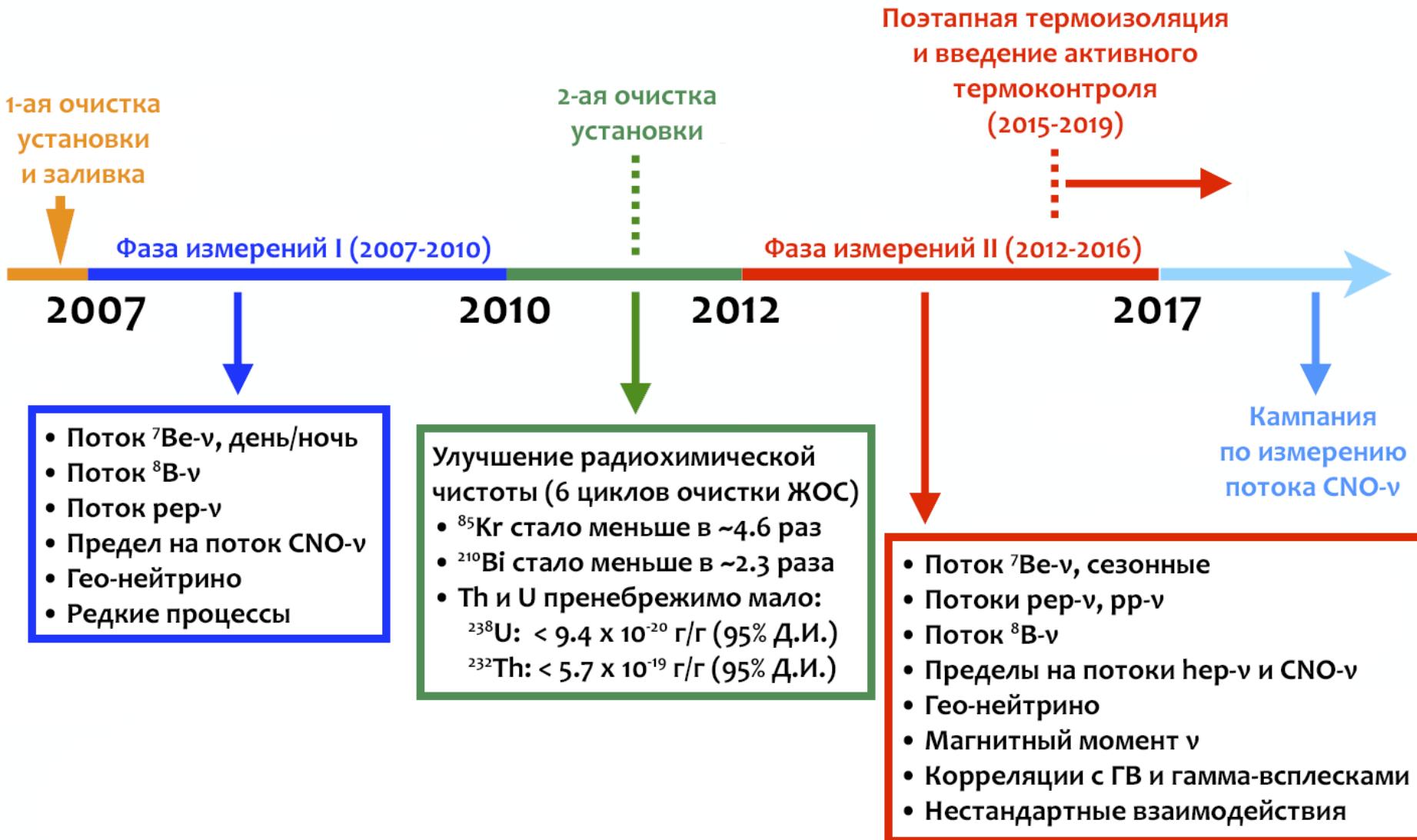


Спектр до/после отбора событий

(область малых энергий: 0.19 – 2.93 МэВ)



Научная программа эксперимента Borexino



Измерения выполнены в трех диапазонах энергий

Низкие энергии (НЭ) ФАЗА II 0.19 – 2.93 МэВ

полная экспозиция 1,291.51 days x 71.3 t.

pp- ν , ^7Be - ν , pep- ν , CNO- ν

Borexino, SAGE,
GALLEX

Homestake

Super-K, SNO

ФАЗА I и II

Высокие энергии I

(ВЭ I)

3.2 – 5.7 МэВ

^8B - ν

ВЭ I-II 2,062.4 days x
227.8 (266.0) t

Высокие энергии II

(ВЭ II)

5.7 – 16.0 МэВ

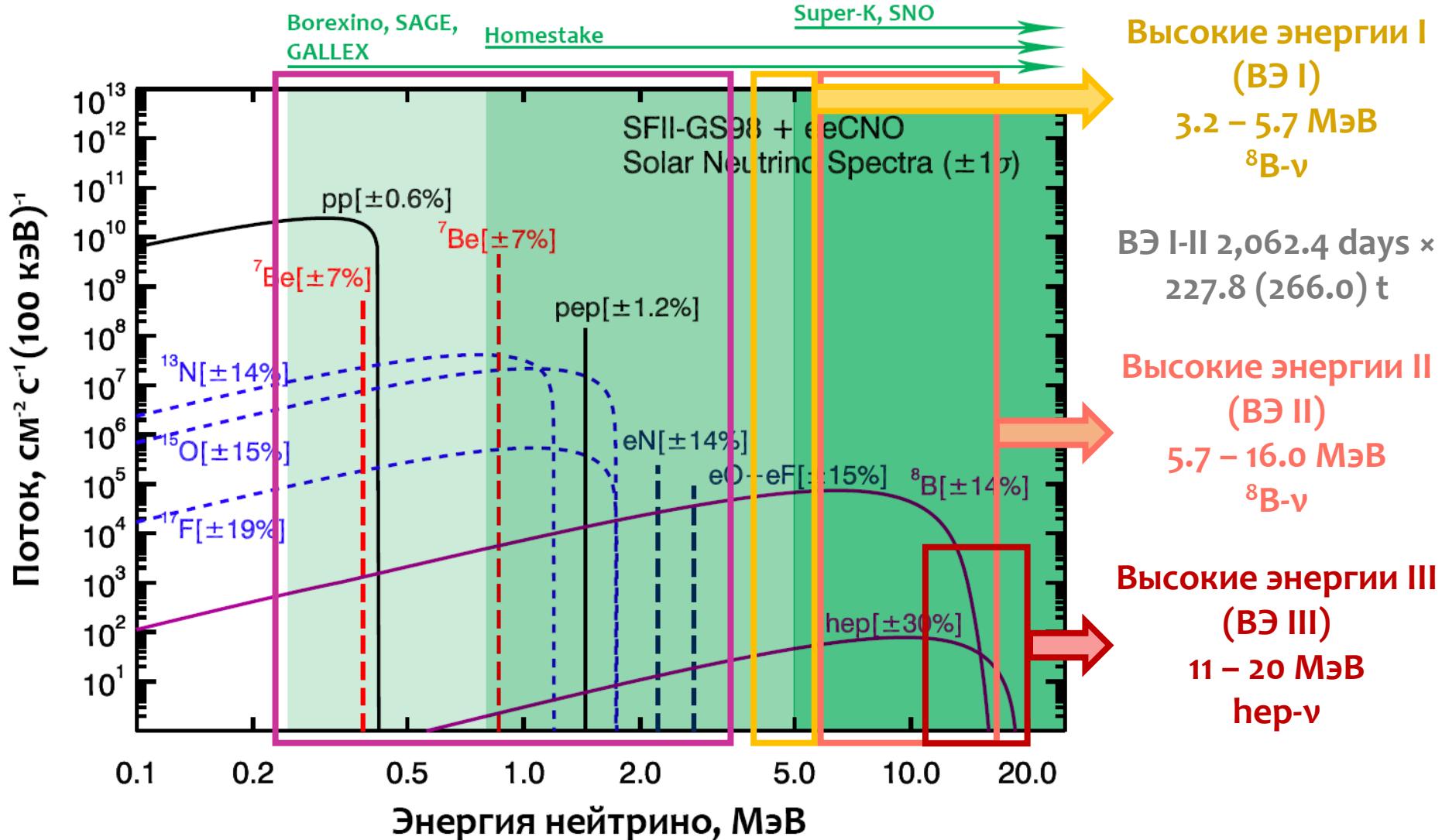
^8B - ν

Высокие энергии III

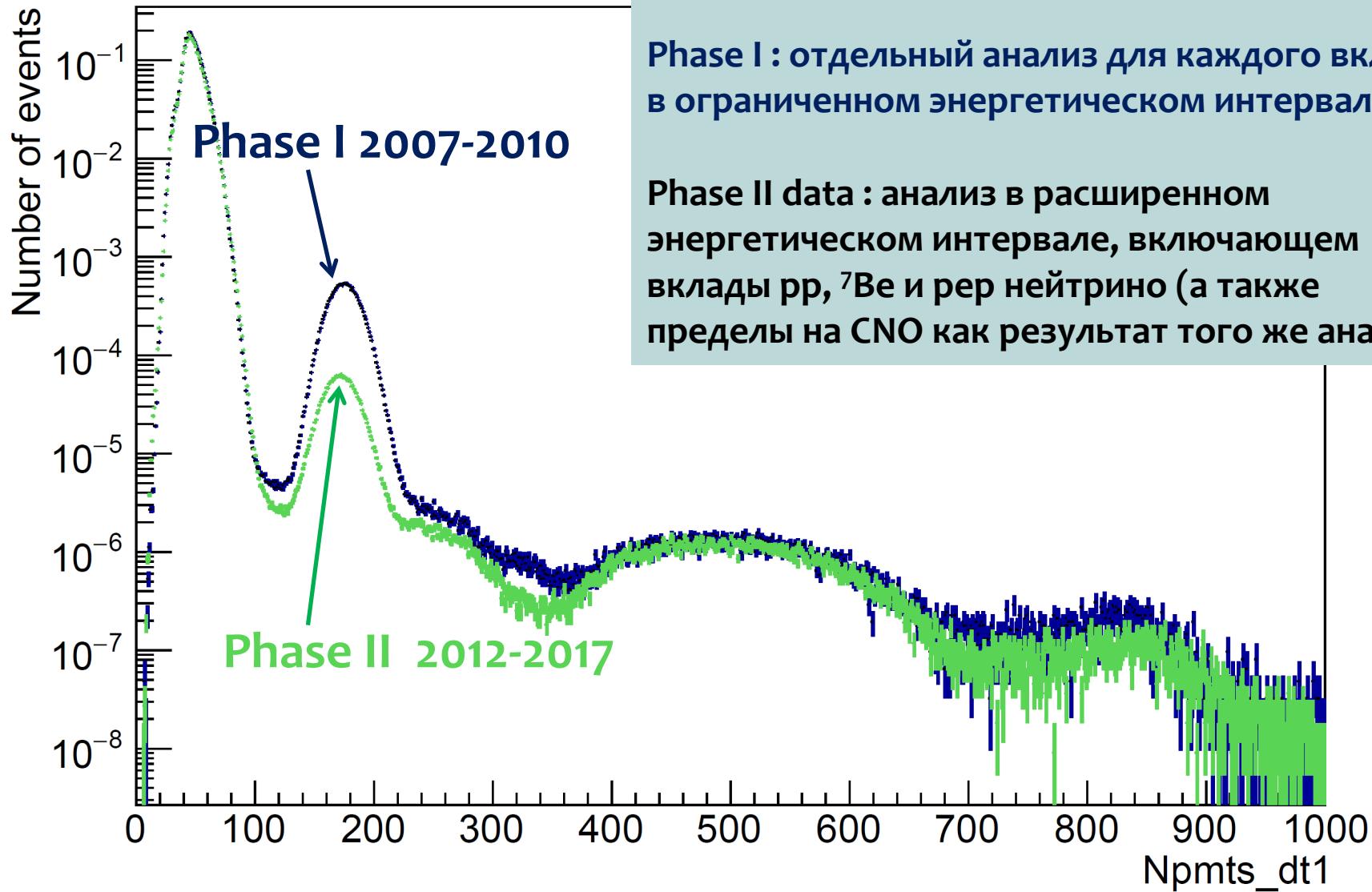
(ВЭ III)

11 – 20 МэВ

hep- ν

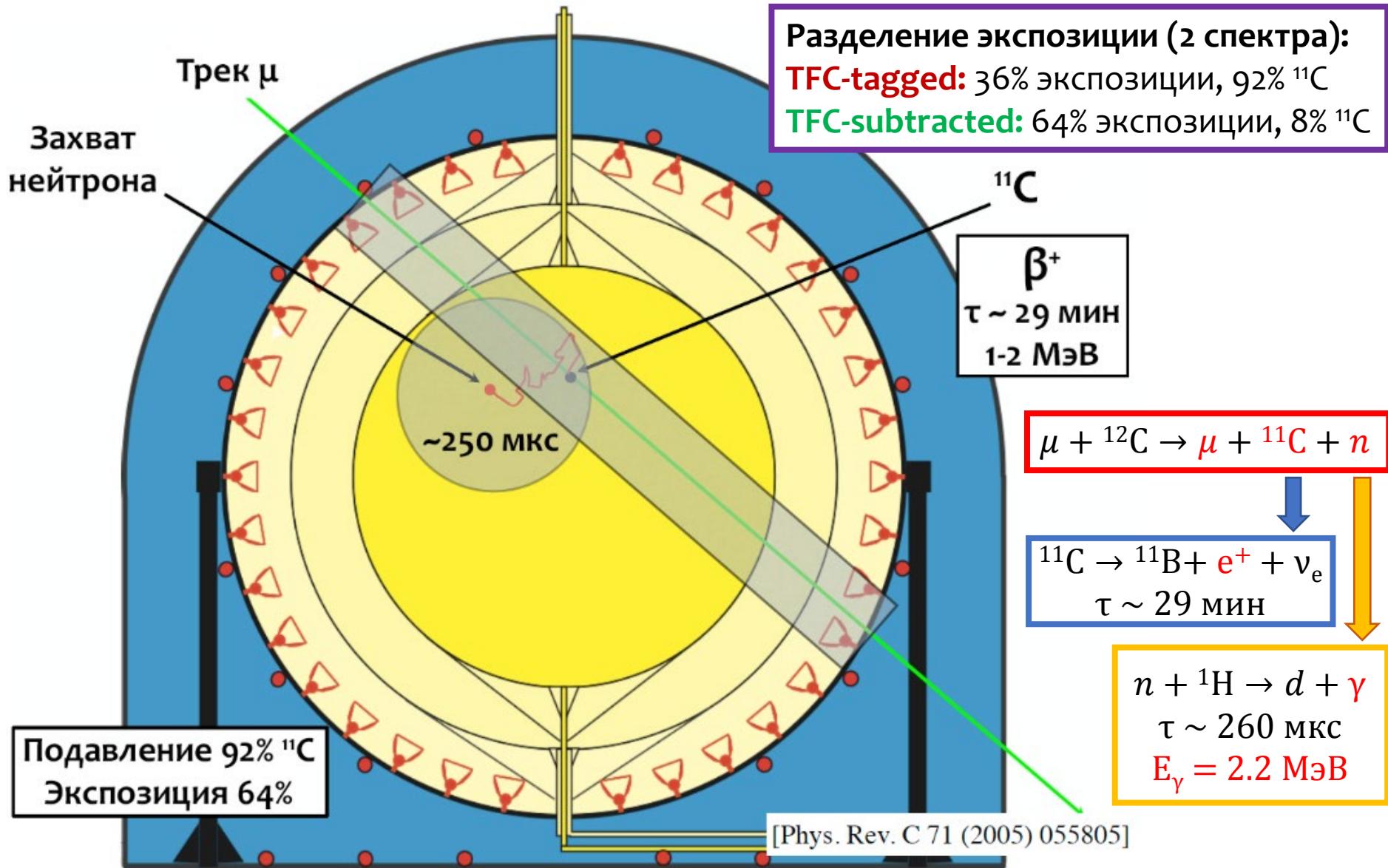


Разница анализов в Фазе I и Фазе II



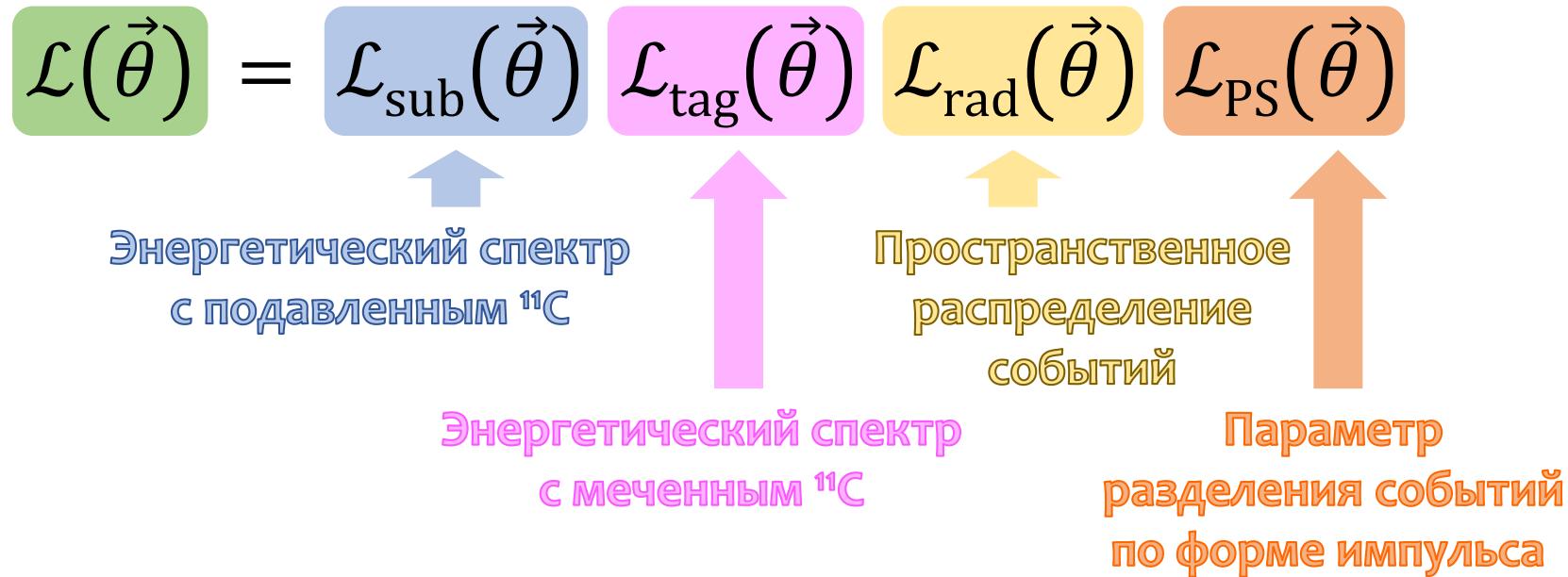
Метод тройных совпадений для отбора ^{11}C

(so-called the Three-Fold Coincidence technique – TFC)



Многопараметрическая аппроксимация на основе метода максимального правдоподобия

Поточечный (binned) поиск максимума следующей функции правдоподобия:



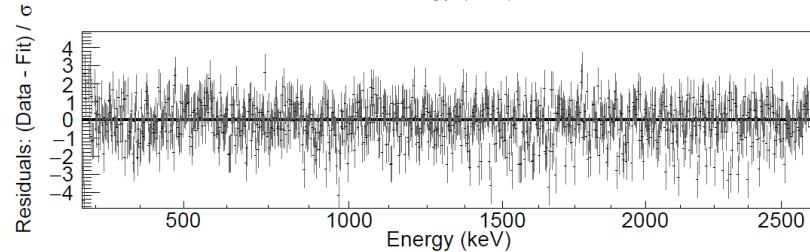
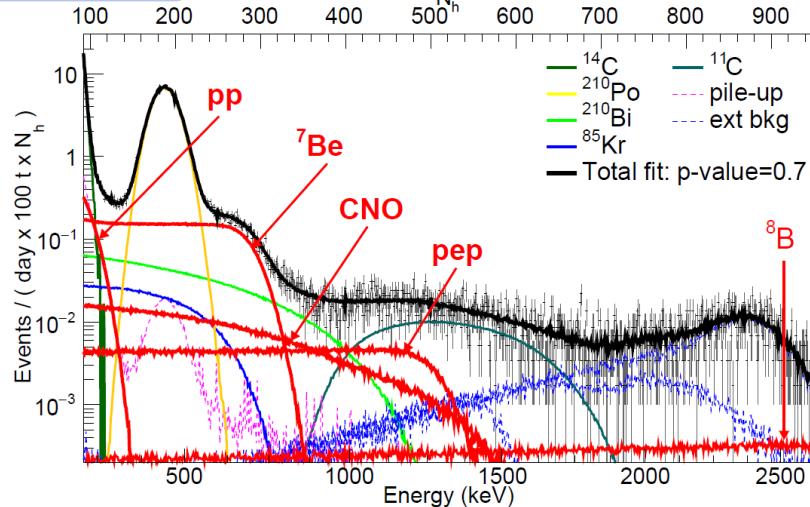
$\vec{\theta}$ - неизвестные параметры (скорости счёта v в событий: pp- v , $^7\text{Be}-v$, pep- v , CNO- v)

Спектральные компоненты для аппроксимации получают двумя способами:
А) Монте-Карло моделирование, Б) численно-аналитическое вычисление

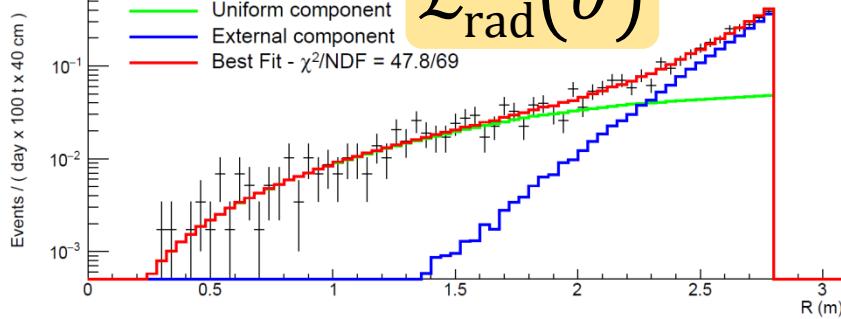
Используются по очереди оба набора спектральных компонентов
Результаты близки, разница включается в систематическую ошибку

Результаты аппроксимации

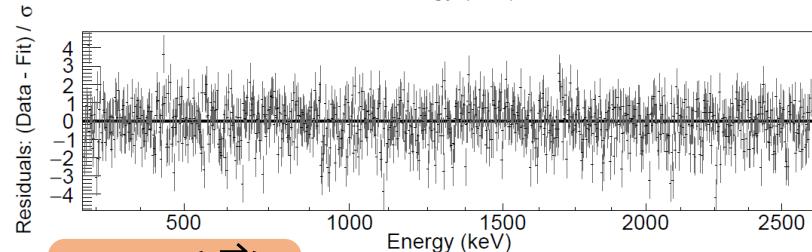
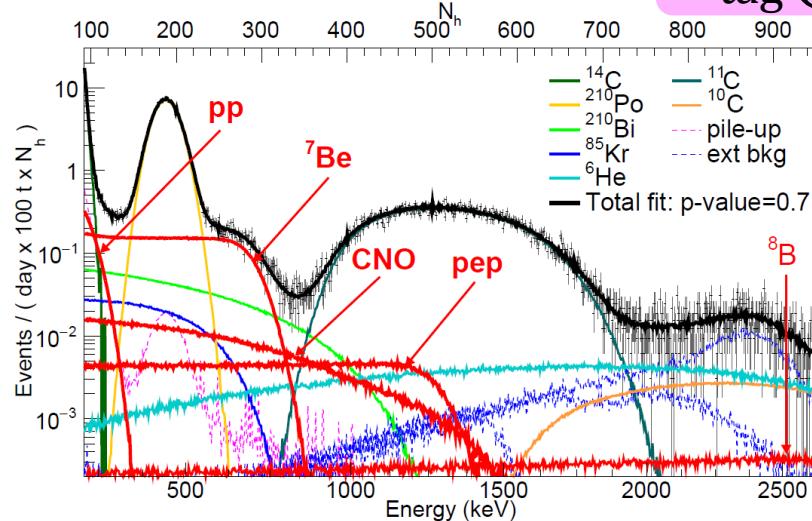
$\mathcal{L}_{\text{sub}}(\vec{\theta})$



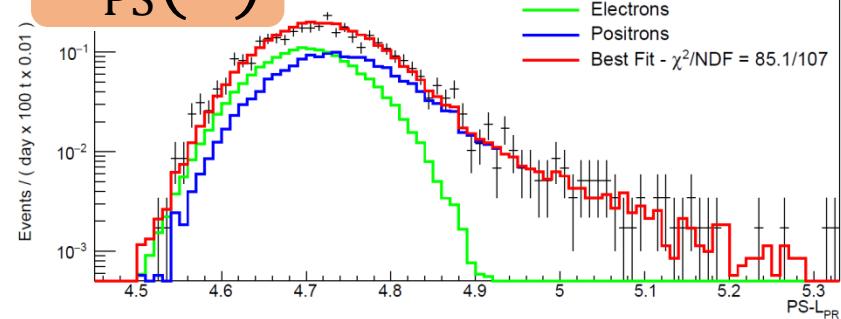
$\mathcal{L}_{\text{rad}}(\vec{\theta})$



$\mathcal{L}_{\text{tag}}(\vec{\theta})$



$\mathcal{L}_{\text{PS}}(\vec{\theta})$



Результаты (аппроксимации)

- Данные:** 14.12.2011 - 21.05.2016
- Полная экспозиция:** 1291.51 дней × 71.3 т
- Область фитирования:** (0.19-2.93) МэВ

Solar ν	Borexino experimental results		B16(GS98)-HZ		B16(AGSS09)-LZ	
	Rate [cpd/100 t]	Flux [cm $^{-2}$ s $^{-1}$]	Rate [cpd/100 t]	Flux [cm $^{-2}$ s $^{-1}$]	Rate [cpd/100 t]	Flux [cm $^{-2}$ s $^{-1}$]
pp	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \times 10^{10}$	131.0 ± 2.4	$5.98 (1 \pm 0.006) \times 10^{10}$	132.1 ± 2.3	$6.03 (1 \pm 0.005) \times 10^{10}$
^7Be	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.13^{+0.07}_{-0.10}) \times 10^9$	47.8 ± 2.9	$4.93 (1 \pm 0.06) \times 10^9$	43.7 ± 2.6	$4.50 (1 \pm 0.06) \times 10^9$
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.12}) \times 10^8$	2.74 ± 0.05	$1.44 (1 \pm 0.009) \times 10^8$	2.78 ± 0.05	$1.46 (1 \pm 0.009) \times 10^8$
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.13}) \times 10^8$	2.74 ± 0.05	$1.44 (1 \pm 0.009) \times 10^8$	2.78 ± 0.05	$1.46 (1 \pm 0.009) \times 10^8$
CNO	< 8.1 (95% C.L.)	$< 7.9 \times 10^8$ (95% C.L.)	4.91 ± 0.56	$4.88 (1 \pm 0.11) \times 10^8$	3.52 ± 0.37	$3.51 (1 \pm 0.10) \times 10^8$

Фоны

Background	Rate [cpd/100 t]
^{14}C [Bq/100 t]	40.0 ± 2.0
^{85}Kr	6.8 ± 1.8
^{210}Bi	17.5 ± 1.9
^{11}C	26.8 ± 0.2
^{210}Po	260.0 ± 3.0
Ext. ^{40}K	1.0 ± 0.6
Ext. ^{214}Bi	1.9 ± 0.3
Ext. ^{208}Tl	3.3 ± 0.1

Систематические ошибки

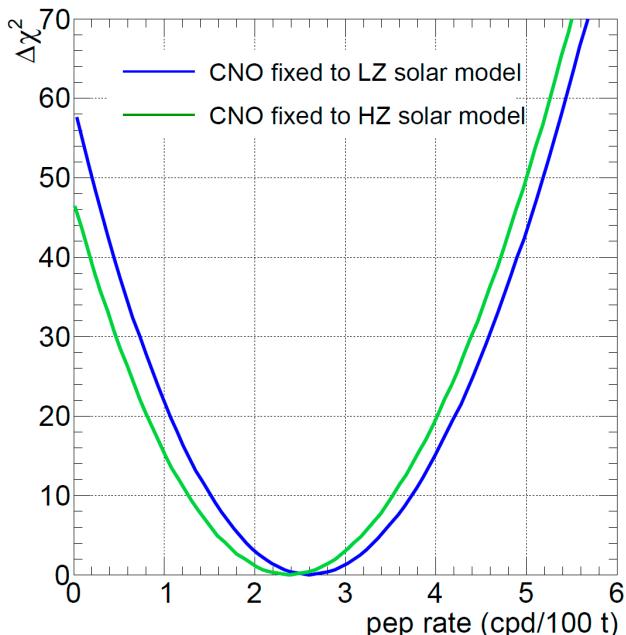
Source of uncertainty	pp		^7Be		pep	
	-%	+	-%	+	-%	+
Fit method (analytical/MC)	-1.2	1.2	-0.2	0.2	-4.0	4.0
Choice of energy estimator	-2.5	2.5	-0.1	0.1	-2.4	2.4
Pile-up modeling	-2.5	0.5	0	0	0	0
Fit range and binning	-3.0	3.0	-0.1	0.1	1.0	1.0
Fit models	-4.5	0.5	-1.0	0.2	-6.8	2.8
Inclusion of ^{85}Kr constraint	-2.2	2.2	0	0.4	-3.2	0
Live Time	-0.05	0.05	-0.05	0.05	-0.05	0.05
Scintillator density	-0.05	0.05	-0.05	0.05	-0.05	0.05
Fiducial volume	-1.1	0.6	-1.1	0.6	-1.1	0.6
Total systematics (%)	-7.1	4.7	-1.5	0.8	-9.0	5.6

$R(^{85}\text{Kr}) < 7.5 @ 95\%$

Масса ЖОС

Обновленные результаты эксперимента Borexino (2018 г.)

	Предыдущие (2014) свд/100 т	Текущие(2018) свд/100 т	Точность измерений, %	Точность теории (HZ/LZ)
pp-ν	$144 \pm 13 \pm 10$	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$11.4 \rightarrow 10.6$	(HZ) 1.8 / (LZ) 1.7
$^7\text{Be}-\nu$	$46.0 \pm 1.5^{+1.6}_{-1.5}$	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$4.8 \rightarrow 2.7$	(HZ) 6.1 / (LZ) 5.9
рер-ν	$3.1 \pm 0.6 \pm 0.3$	(HZ) $2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$ (LZ) $2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	(HZ) $22 \rightarrow 17$ (LZ) $22 \rightarrow 16$	(HZ) 1.8 (LZ) 1.8



**Регистрация рер-ν нейтрино
с достоверностью $>5\sigma$**

CNO: Предел на скорость счёта CNO- ν (95% Д.И.):

$$R(\text{CNO}) < 8.1 \text{ свд/100 т}$$

на поток (95% Д.И.): $\varphi(\text{CNO}) < 7.9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Ожидается: (HZ) 4.92 ± 0.55 , (LZ) 3.52 ± 0.37 свд/100 т (2σ)

В фазе II для разделения CNO-ν и рер-ν использовалось теоретическое отношение потоков pp-ν и рер-ν (слабое ограничение) вместо теоретического значения потока рер-ν, применявшегося в фазе I (сильное ограничение)

Светимость Солнца

$$L_{\nu}^{\text{Borexino}} = (3.89^{+0.35}_{-0.42}) \times 10^{33} \text{ эрг/с}$$

L. Ludhova et al.. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. *Nature*, 562:505–510, 2018.

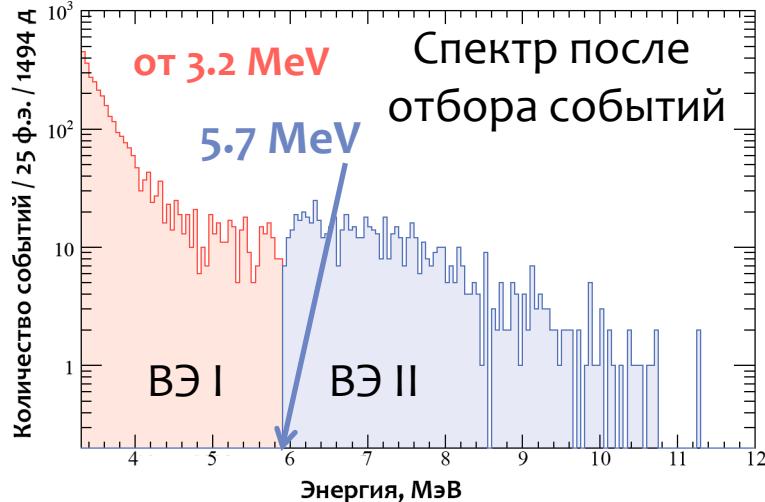
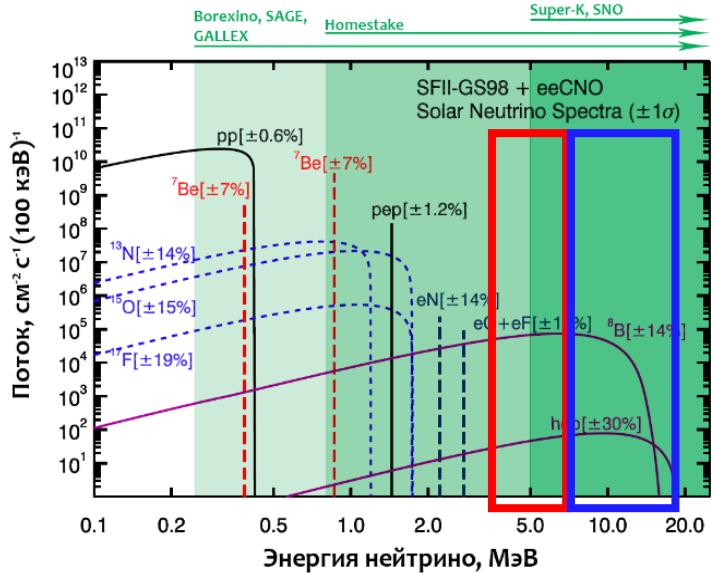
Согласуется со значением светимости Солнца,
полученной при измерениях
в электромагнитном канале с помощью КА:

$$L_{\gamma} = (3.846 \pm 0.015) \times 10^{33} \text{ эрг/с}$$

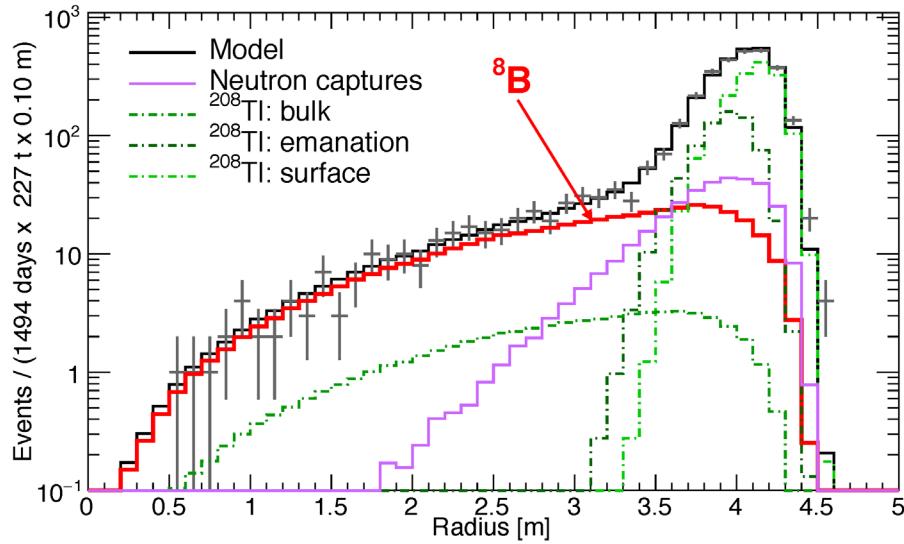
Chapman, G. A. in *Encyclopedia of Planetary Science and Encyclopedia of Earth Science* 748 (Springer, 1997).

Fruhlich, C. & Lean, J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophys. Res. Lett.* 25, 4377 (1998).

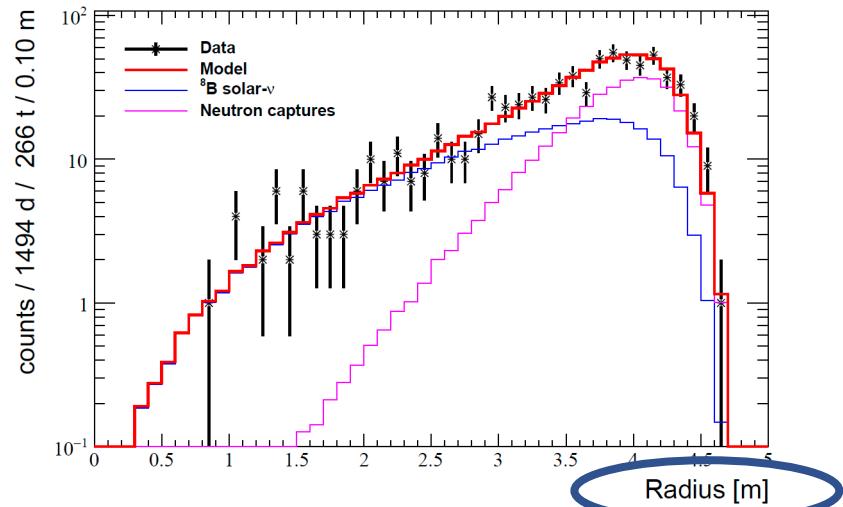
Улучшен результат по измерению ${}^8\text{B}$ -ν



Аппроксимация для 3.2-5.7 МэВ



Аппроксимация для 5.7-16.0 МэВ



Разделение по энергии необходимо для аккуратного учёта фона

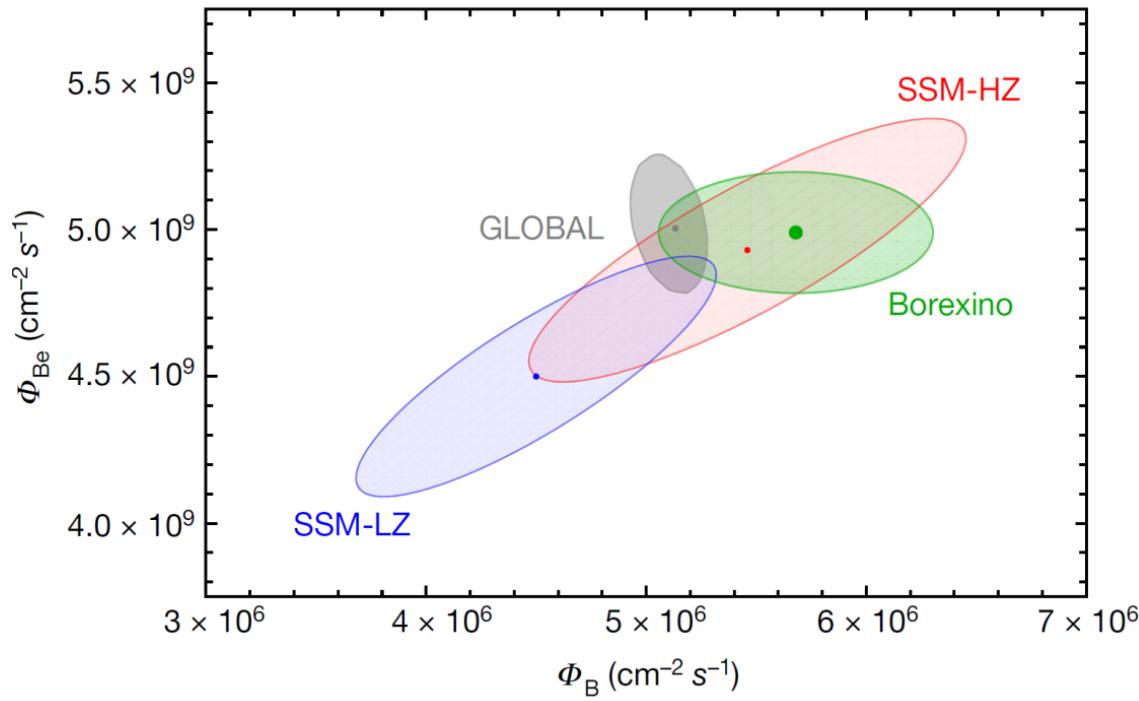
Улучшен результат по измерению ${}^8\text{B}$ -ν

Что было улучшено в новом анализе?

- Ошибка уменьшена более чем в 2 раза
- Полная экспозиция: 1.5 кт г за период с 2008 по 2016
в 11.5 раз больше, чем в анализе Фазы I
- Более аккуратный учёт фонов (γ -кванты из буфера и нейлоновой сферы, космогенный фон, γ -кванты от захватов нейтронов на ядрах С и Fe)
- Самый низкий энергетический порог среди нейтринных детекторов, работающих в режиме реального времени

	Скорость счёта, свд/100 т	Поток, $\times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Поток ССМ, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
${}^8\text{B}_{\text{HER-I}}$	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15}$	
${}^8\text{B}_{\text{HER-II}}$	$0.087^{+0.080+0.005}_{-0.010-0.005}$	$5.56^{+0.52+0.33}_{-0.64-0.33}$	$5.46 (1.0 \pm 0.12) \times 10^6 \text{ (HZ)}$ $4.50 (1.0 \pm 0.12) \times 10^6 \text{ (LZ)}$
${}^8\text{B}_{\text{HER}}$	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}$	
hep	<0.002 (90% Д.И.)	$< 2.2 \times 10^5$ (90% Д.И.)	$7.98 (1.0 \pm 0.30) \times 10^3 \text{ (HZ)}$ $8.25 (1.0 \pm 0.12) \times 10^3 \text{ (LZ)}$

Влияние значение потоков нейтрино на решение проблемы металличности Солнца



Глобальный фит данных BX + KamLAND

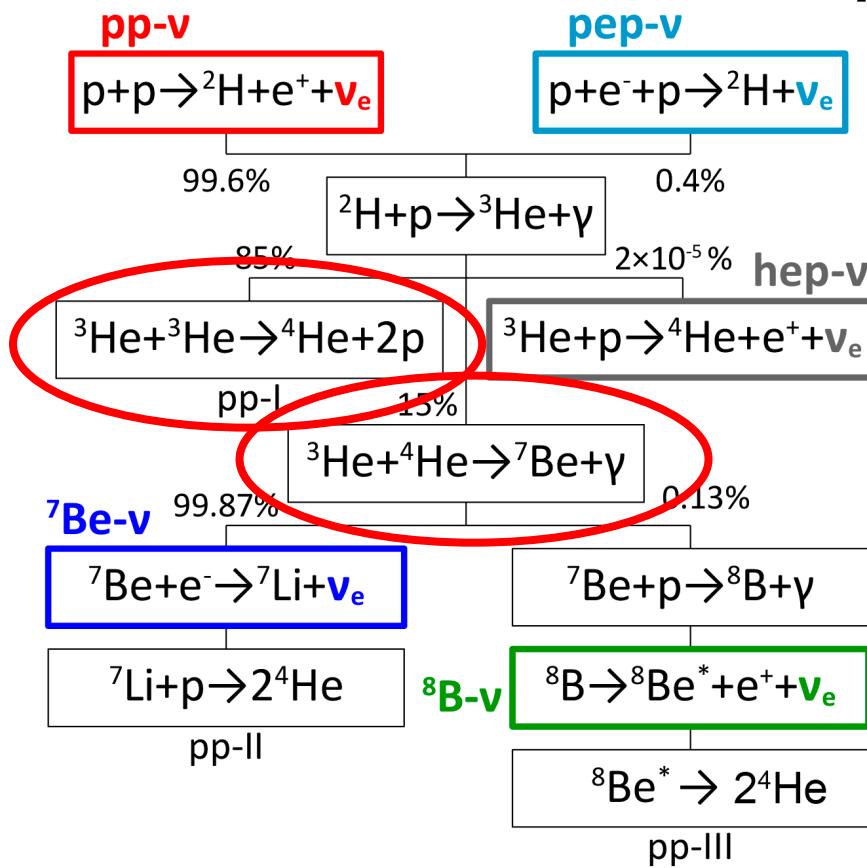
$$f_{\text{Be}} = \frac{\Phi(\text{Be})}{\Phi(\text{Be})_{\text{HZ}}} = 1.01 \pm 0.03$$

$$f_B = \frac{\Phi(B)}{\Phi(B)_{\text{HZ}}} = 0.93 \pm 0.02$$

Результаты Borexino для потоков ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ нейтрино (зеленая точка и зеленый эллипс).
Экспериментальные данные о Солнце и KamLAND в глобальном анализе оставляя свободными
параметры осцилляций θ_{12} и Δm_{12}^2 (серый эллипс, помеченный как GLOBAL).
Теоретический прогноз для низкой металличности (LZ) (синий) и с высокой металличностью (HZ)
(красный) Standard Solar Model (SSM) 18 также показаны. Подгонка возвращает следующее
колебание параметры: $\tan^2 \theta_{12} = 0.47 \pm 0.03$ и $\Delta m_{12}^2 = (7.5 \times 10^{-5}) \pm 0.03$, в согласие с тем, что сообщается
в исх. 19 ($\sin^2 \theta_{13}$ фиксируется на 0,0217; ссылка 19). Все контуры соответствуют 68,27% Д.И.

**Найдено указание на высокую металличность Солнца Допуская, что HZ-SSM правильная, Данные
Borexino исключают LZ-SSM с достоверностью 96.6% Д.И.**

Влияние соотношений потоков нейтрино на уточнение механизма pp-цикла



$$R \equiv \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle} = \frac{2\phi({}^7\text{Be})}{\phi(\text{pp}) - \phi({}^7\text{Be})}$$

Потоки pp и ${}^7\text{Be}$ нейтрино дают:

$$R_{\text{BRX}} = 0.178^{+0.027}_{-0.023}$$

что находится в соответствии с современными ССМ

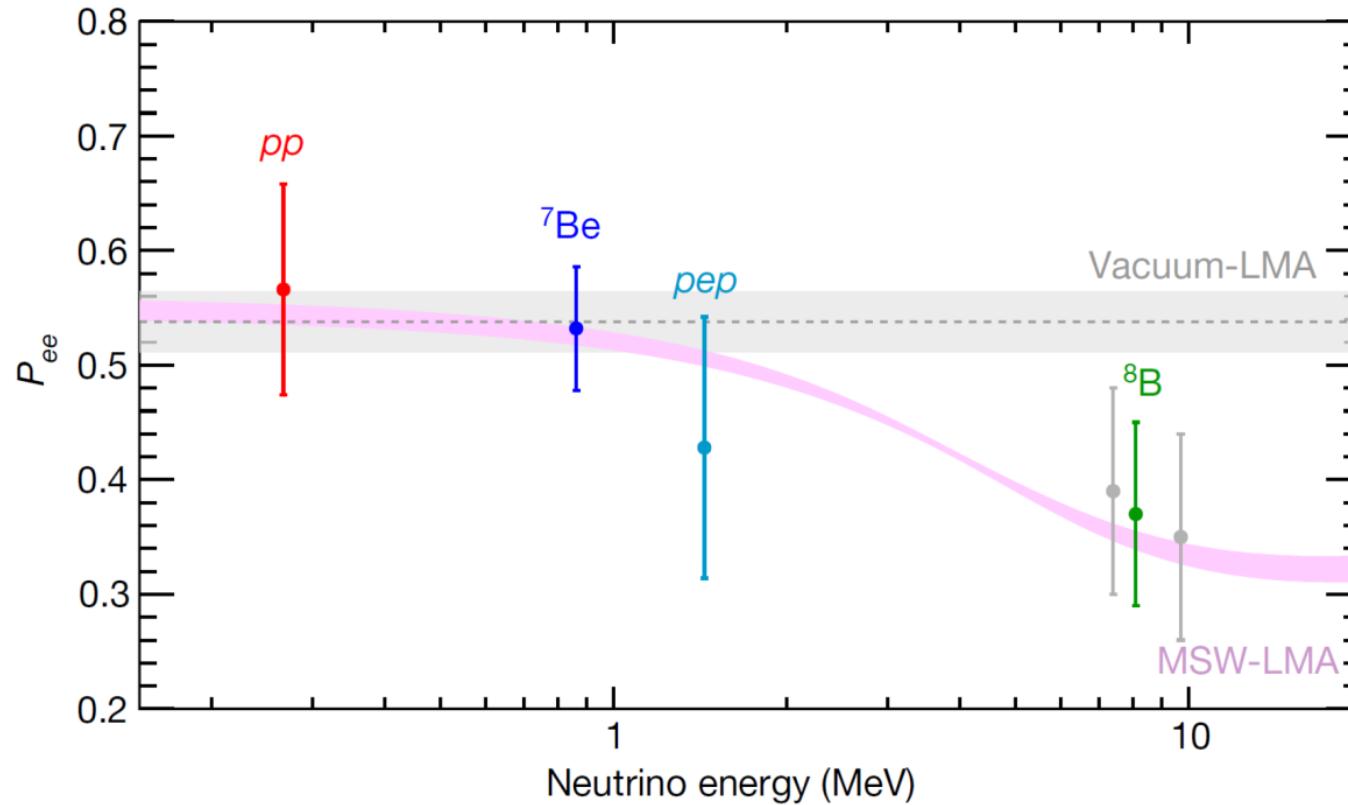
$$R_{\text{Hz}} = 0.180 \pm 0.011$$

$$R_{\text{Lz}} = 0.161 \pm 0.010$$

Vinyoles, N. et al. A new generation of standard solar models. *Astrophys. J.* **835**, 202 (2017)

Знание отношения между вероятностями реакций ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ (pp-I) и ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$ (pp-II) важно для проверки Солнечных моделей, так как отражает соотношение между конкурирующими процессами, которыми может завершиться pp-цикл

Проверка MSW/LMA через вероятность выживания ν_e



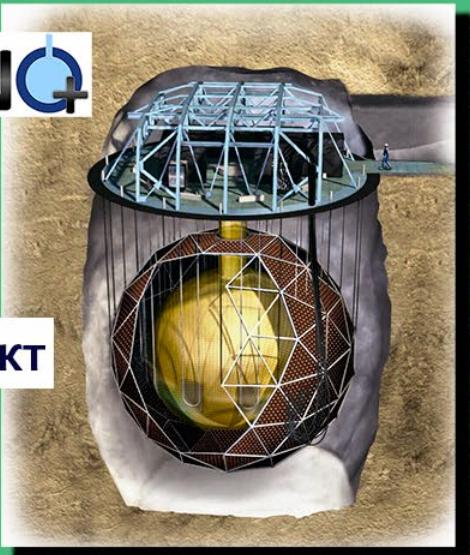
Вероятность выживания электронного нейтрино P_{ee} как функция энергии нейтрино.

Точки данных представляют результаты Borexino для pp, ^7Be , pep и ^8B (зеленый) для диапазона ВЭ и серый для отдельного ВЭ-I и поддиапазона ВЭ-II, предполагая HZ-SSM. Точки данных ^8B и pp установлены при средней энергии нейтрино, которые производят рассеянные электроны выше порога обнаружения. Столбики ошибок включают экспериментальные и теоретические неопределенности.

Гипотеза Vacuum-LMA отвергнута с вероятностью 98.2% Д.И.

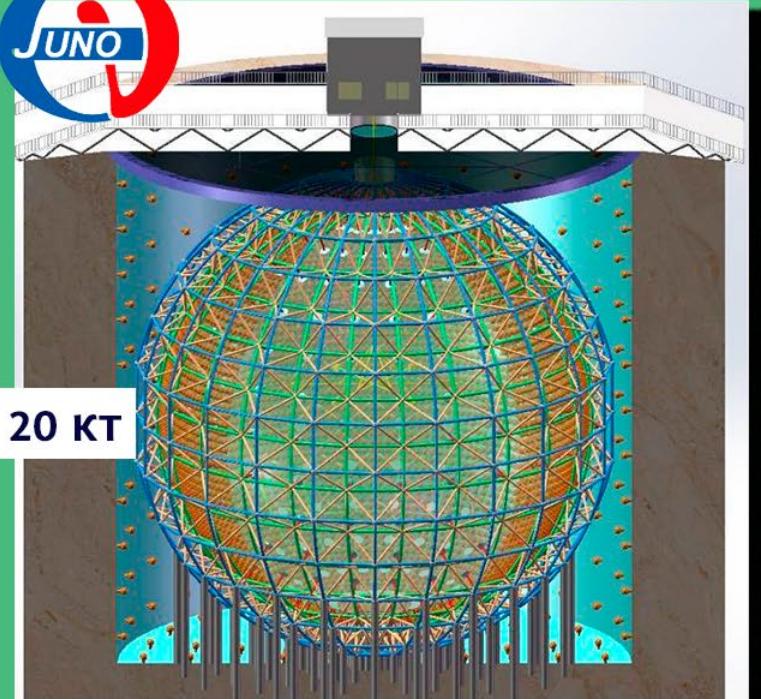
ПЕРЕОСНАЩАЕТСЯ

SNO+



0.8 кт

JUNO

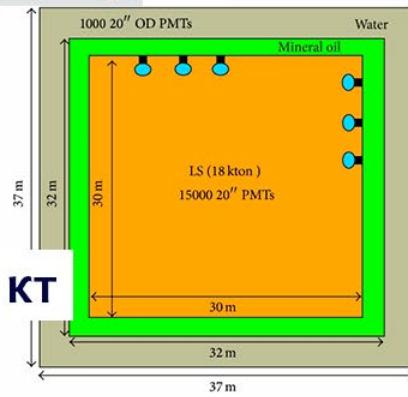


20 кт

ЧАСТИЧНОЕ ФИНАНСИРОВАНИЕ

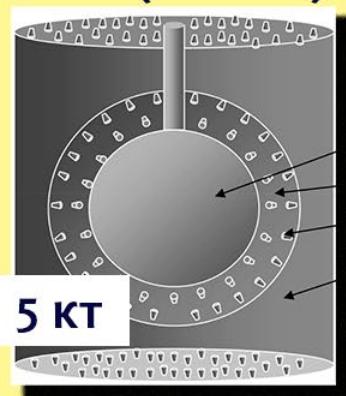
RENO
 θ_{13}

RENO-50 detector



18 кт

BNO (Baksan)



5 кт

ПРОЕКТЫ

НаноНано

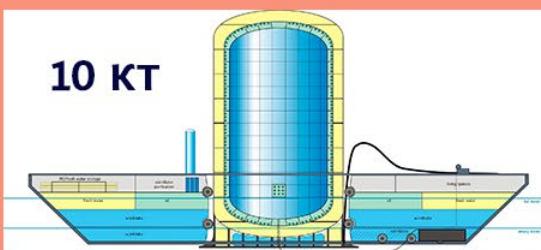
Нейтринный детектор,
опускаемый
на океаническое
дно с плавучей
платформы

LENA

50 кт



10 кт



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

С наилучшими пожеланиями!

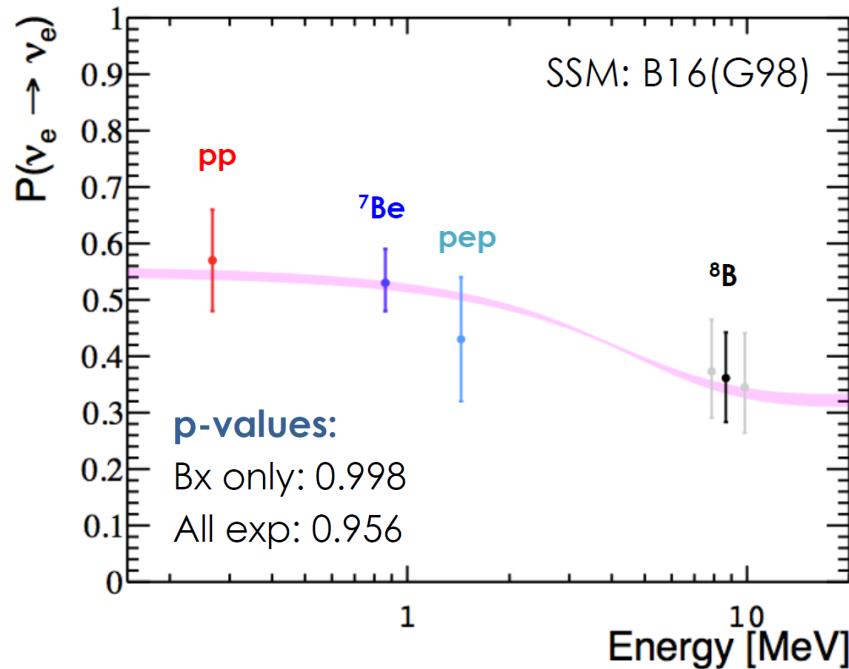
Коллаборация Borexino



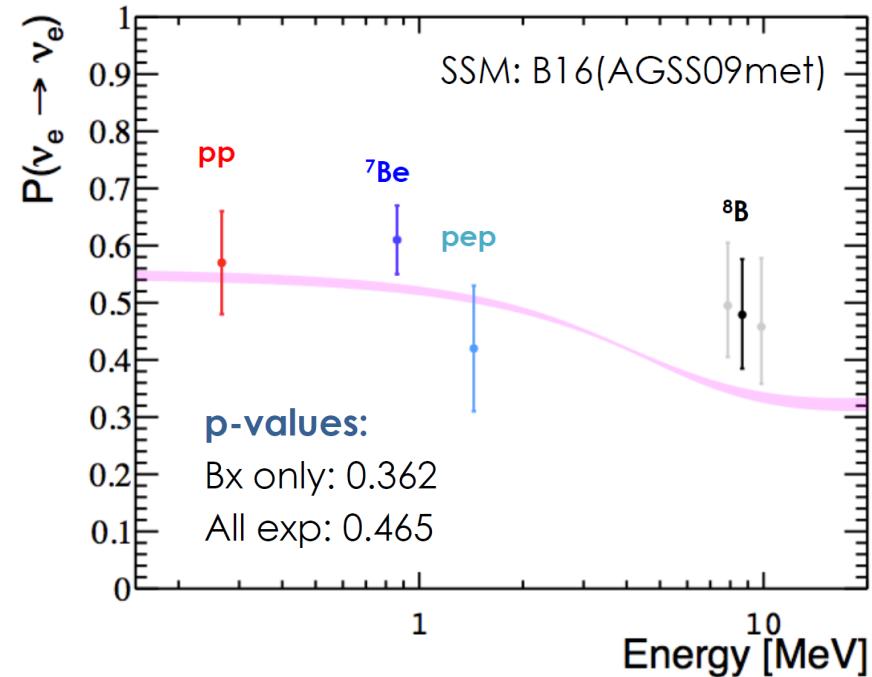
Лето 2017 года

Влияние результатов MSW/LMA вероятности выживания ν_e на проблему металличности Солнца

CCM с высокой металличностью (HZ-SSM)



CCM с высокой металличностью (LZ-SSM)



Розовая полоса – рассчитанная вероятность с ошибкой 1σ с учётом эффекта Михеева-Смирнова-Вольфенштейна и сильного смешивания

Замечания о структуре ошибок:

- полная ошибка включает экспериментальные и теоретические ошибки
- для pp- ν и pep- ν доминируют экспериментальные ошибки
(легко предсказать, трудно померить)
- для for $^7\text{Be}-\nu$ и $^8\text{B}-\nu$ теоретические предсказания солнечных моделей имеют меньшую точность, чем экспериментальные данные

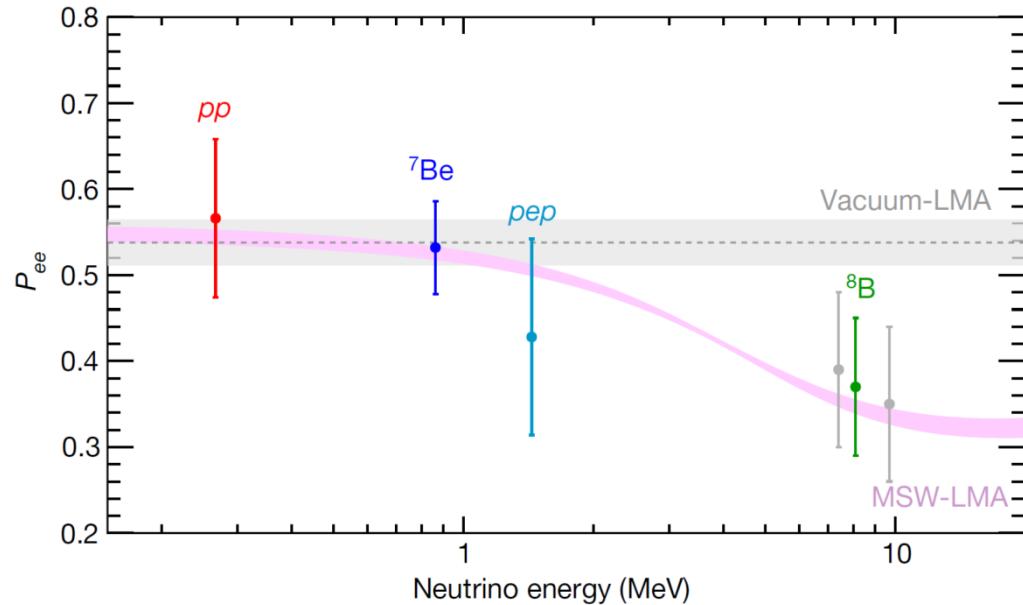
Измеренные Borexino и ожидаемые из ССМ потоки солнечных нейтрино

Table 2 | Borexino experimental solar-neutrino results

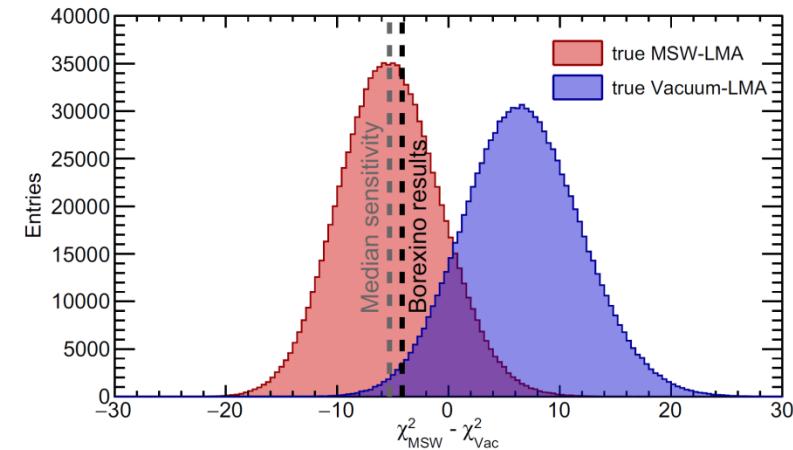
Solar neutrino	Rate (counts per day per 100 t)	Flux ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Flux–SSM predictions ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
<i>pp</i>	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \times 10^{10}$	$5.98(1.0 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1.0 \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
^7Be	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.11^{+0.06}_{-0.08}) \times 10^9$	$4.93(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
<i>pep</i> (HZ)	$2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.12}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
<i>pep</i> (LZ)	$2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.13}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
$^8\text{B}_{\text{HER-I}}$	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$(5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
$^8\text{B}_{\text{HER-II}}$	$0.087^{+0.080+0.005}_{-0.010-0.005}$	$(5.56^{+0.52+0.33}_{-0.64-0.33}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
$^8\text{B}_{\text{HER}}$	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$(5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	<8.1 (95% C.L.)	$<7.9 \times 10^8$ (95% C.L.)	$4.88(1.0 \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.51(1.0 \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	<0.002 (90% C.L.)	$<2.2 \times 10^5$ (90% C.L.)	$7.98(1.0 \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1.0 \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

Measured neutrino rates (second column): for *pp*, ^7Be , *pep* and CNO neutrinos we quote the total counts without any threshold; for ^8B and hep neutrinos we quote the counts above the corresponding analysis threshold. Neutrino fluxes (third column) are obtained from the measured rates assuming the MSW-LMA oscillation parameters¹⁹, standard neutrino-electron cross-sections²⁷ and a density of electrons in the scintillator of $(3.307 \pm 0.003) \times 10^{31}$ electrons per 100 t. All fluxes are integral values without any threshold. The result for *pep* neutrinos depends on whether we assume HZ or LZ SSM predictions to constrain the CNO neutrino flux. The last column shows the fluxes predicted by the SSM for the HZ or LZ hypotheses¹⁸.

MSW/LMA : вероятности выживания электронных нейтрино (II)



a likelihood ratio test to compare the data with the MSW/LMA and the vacuum-LMA predictions (pink and grey bands).

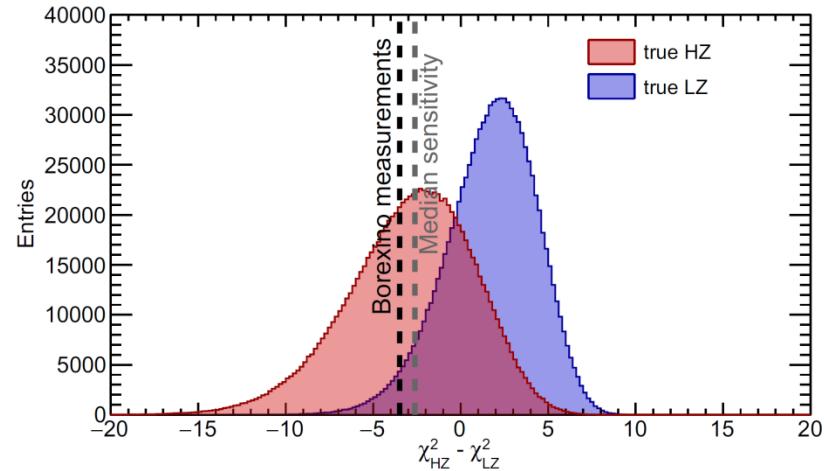
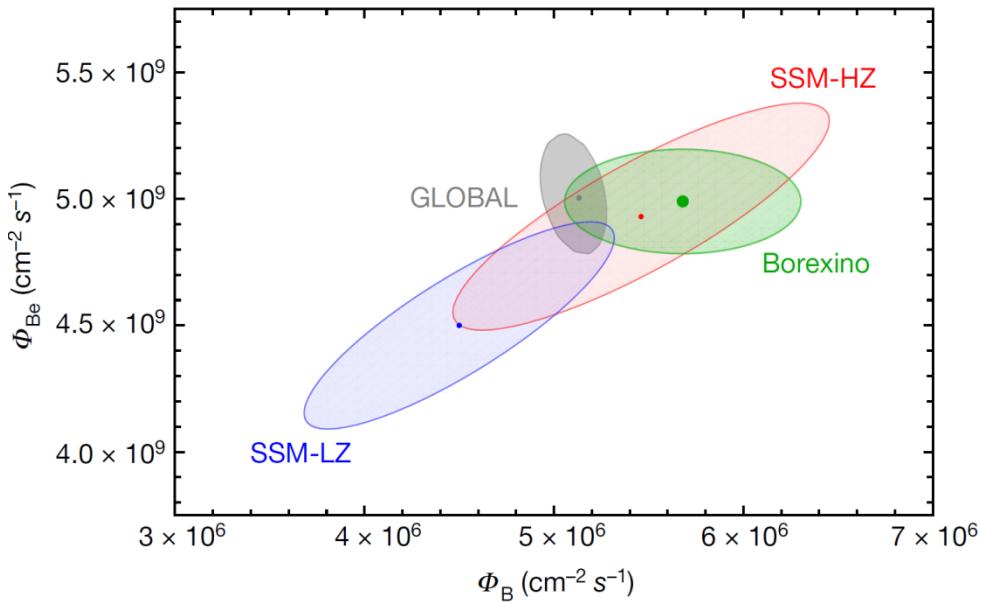


Frequentist hypothesis test of MSW-LMA versus vacuum-LMA

$$t = -2\log[L(\text{MSW})/L(\text{vacuum})] = \chi^2(\text{MSW}) - \chi^2(\text{vacuum})$$

Our data disfavour the vacuum-LMA hypothesis at 98.2% C.L.

Solar metallicity problem (I)



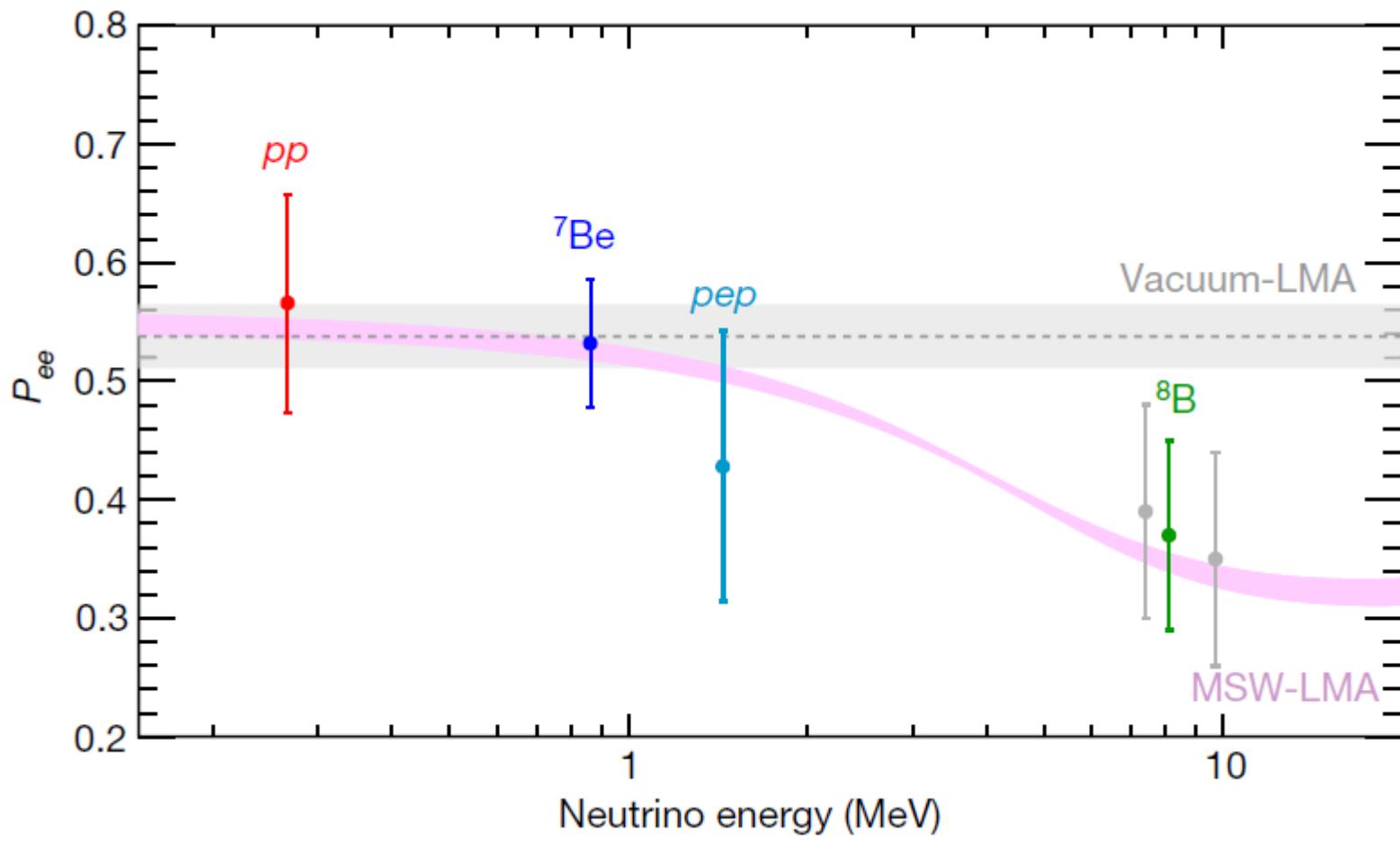
$$t = -2\log[L(\text{HZ})/L(\text{LZ})] = \chi^2(\text{HZ}) - \chi^2(\text{LZ})$$

- Global fit to all solar + Kamland data
(including the new ${}^7\text{Be}$ result from BX)

$$f_{\text{Be}} = \frac{\Phi(\text{Be})}{\Phi(\text{Be})_{\text{HZ}}} = 1.01 \pm 0.03$$

$$f_B = \frac{\Phi(B)}{\Phi(B)_{\text{HZ}}} = 0.93 \pm 0.02$$

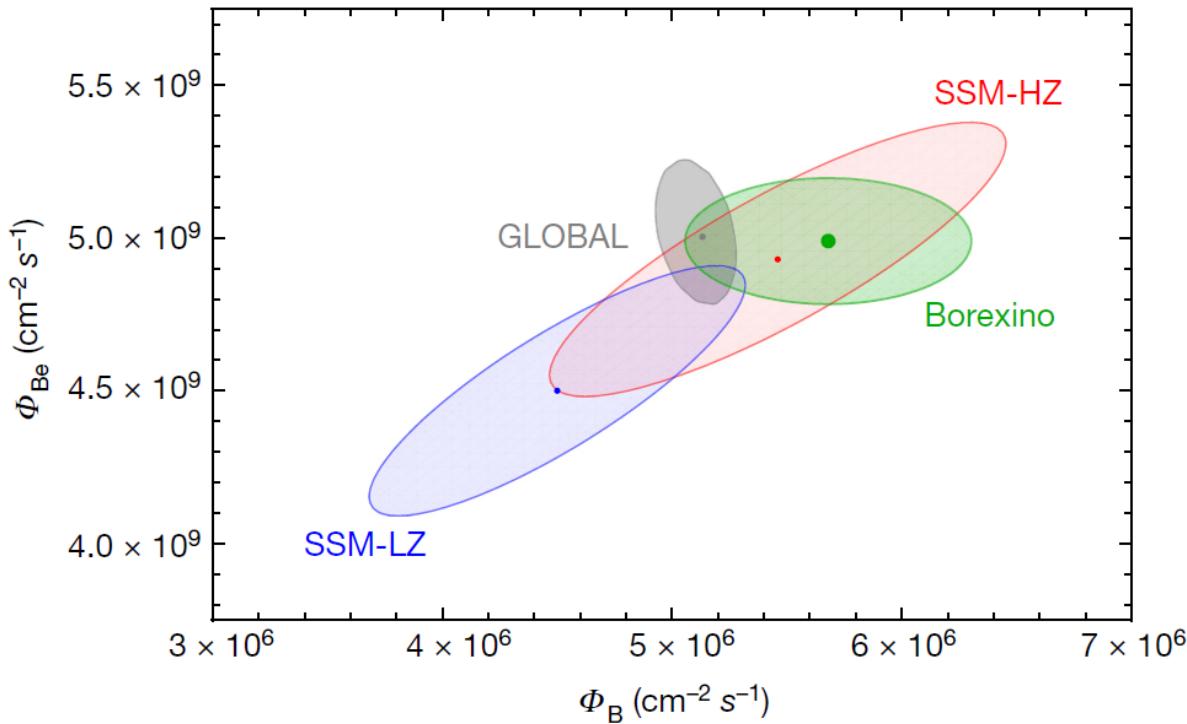
• a hint towards the HM :
Assuming HZ to be true, BX data disfavour LZ at 96.6% C.L.
(slightly stronger than the the median sensitivity of 94.2% C.L.).



Вероятность выживания электронного нейтрино P_{ee} как функция энергия нейтрино.

Розовая полоса - это прогноз $\pm 1\sigma$ для MSW-LMA с параметрами колебаний, определенными из исх. 19.

Серая полоса – это случай вакуум-LMA с параметрами колебаний, определенными по ссылкам 38,39. Точки данных представляют результаты Borexino для pp (красный), 7Be (синий), pep (голубой) и 8B (зеленый для диапазона HER и серый для отдельного HER-I и поддиапазоны HER-II), предполагая HZ-SSM. Точки данных 8B и pp установлены при средней энергии нейтрино, которые производят рассеянные электроны выше порог обнаружения. Столбики ошибок включают экспериментальные и теоретические неопределенности.



Результаты и анализ Borexino в пространстве $\Phi(7\text{Be}) - \Phi(8\text{B})$.

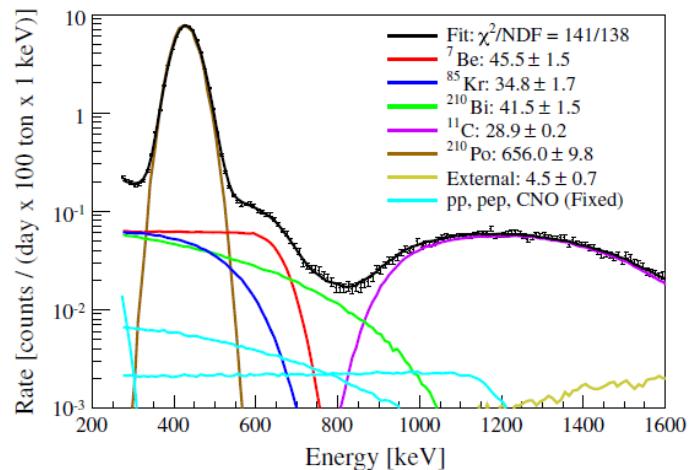
Результаты Borexino для потоков нейтрино 7Be и 8B (зеленая точка и затенение площадь). Допустимые контуры в пространстве $\Phi(7\text{Be}) - \Phi(8\text{B})$ объединяя эти новые результаты со всеми данными о Солнце и КамЛАНД в глобальном анализ и оставляя свободными параметры колебаний θ_{12} и Δm_{12}^2 (серый эллипс, помеченный как ГЛОБАЛЬНЫЙ). Теоретический прогноз для низкой металличностью (LZ) (синий) и с высокой металличностью (HZ) (красный) Standard Solar Модели (SSM) 18 также показаны. Подгонка возвращает следующее колебание параметры: $\tan 2\theta_{12} = 0,47 \pm 0,03$ и $\Delta m_{12}^2 = (7,5 \times 10^{-5}) \pm 0,03$, в согласие с тем, что сообщается в исх. 19 ($\sin 2\theta_{13}$ фиксируется на 0,0217; ссылка 19). Все контуры соответствуют 68,27% кл.

Точные измерения потока ${}^7\text{Be}$ нейтрино

Поток ${}^7\text{Be}$ нейтрино измерен с точностью
 $< 5\%$

$$R({}^7\text{Be}) = 46.0 \pm 1.5(\text{stat})^{+1.5}_{-1.6}(\text{sys}) \text{ cpd}/100 \text{ ton}$$

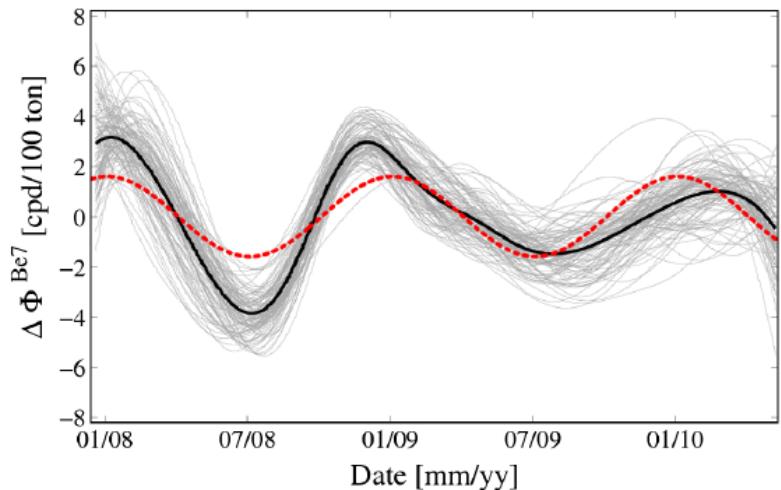
G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 141302 (2011).



Отсутствие асимметрии день/ночь в окне
 ${}^7\text{Be}$ нейтрино подтвердило LMA (90%)

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

G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Lett. B 707, (2012) 22.



Годовые модуляции (~7%) показаны на ${}^7\text{Be}$ нейтрино
аналогично результатам SNO и Super Kamiokande

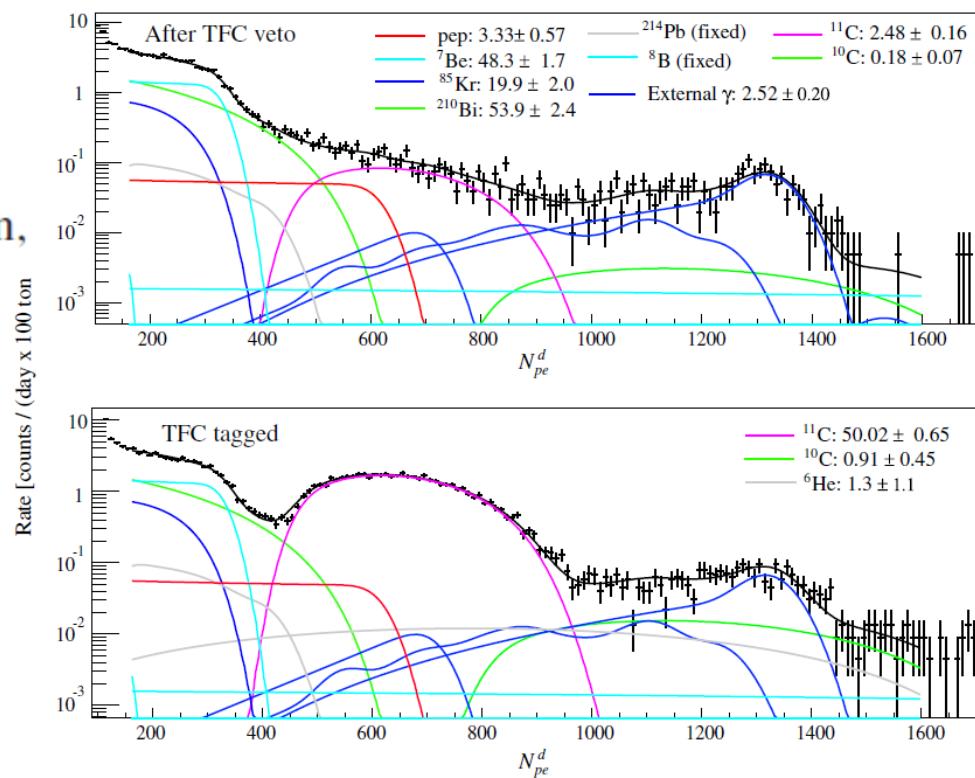
Результаты по рер и CNO солнечным нейтрино

рер –нейтрино зарегистрированы благодаря радиохимической чистоте и специальной технике тройных совпадений для подавления фона от ^{11}C

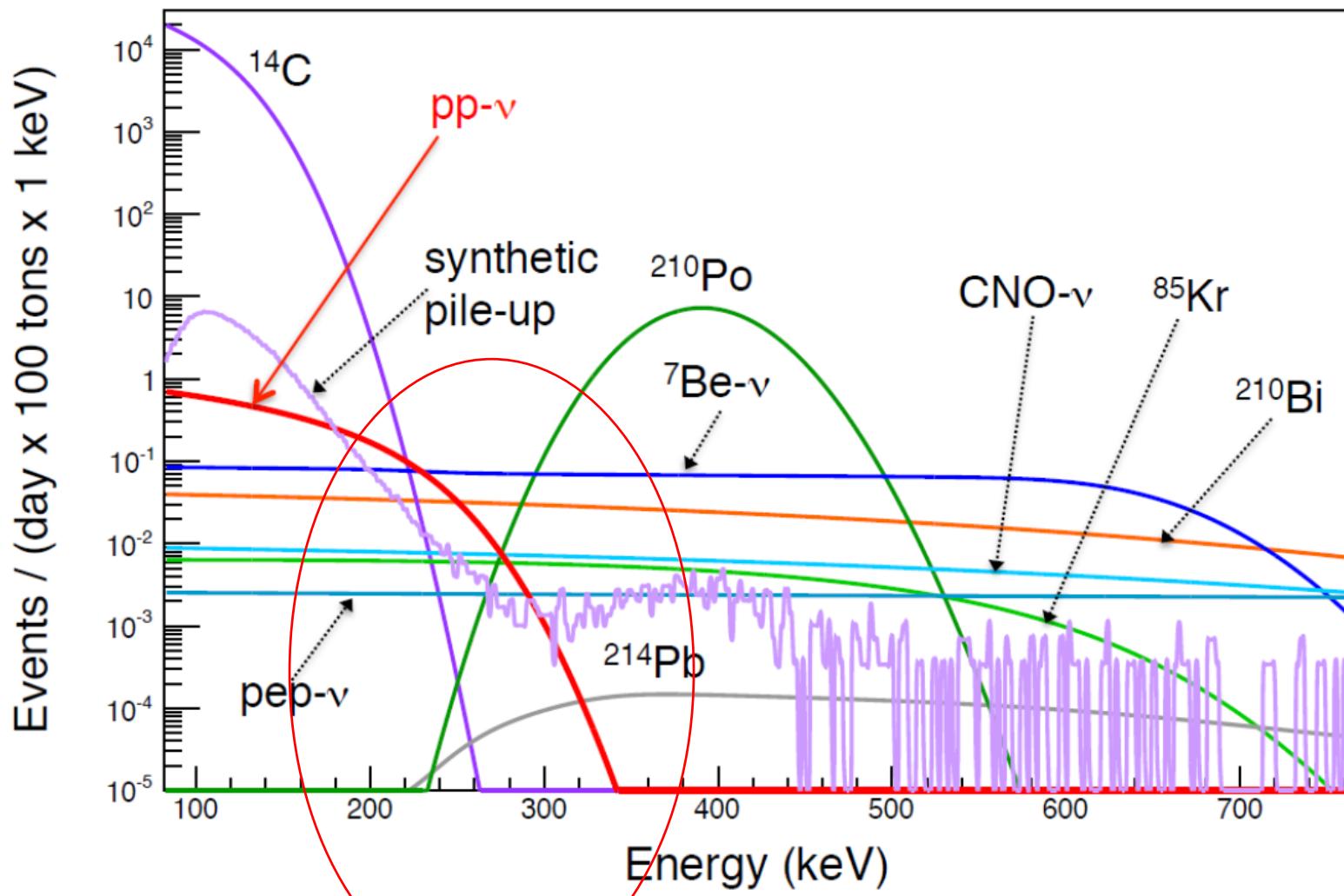
$$R(\text{pep}) = 3.1 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{syst}} \text{ cpd}/100 \text{ ton},$$

CNO – установлен предел уточнению которого мешает фон от ^{210}Bi и ^{11}C

$$R(\text{CNO}) < 7.9 \text{ cpd}/100 \text{ ton at 95% C.L.}$$



G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. Lett. 108, 051302 (2012).

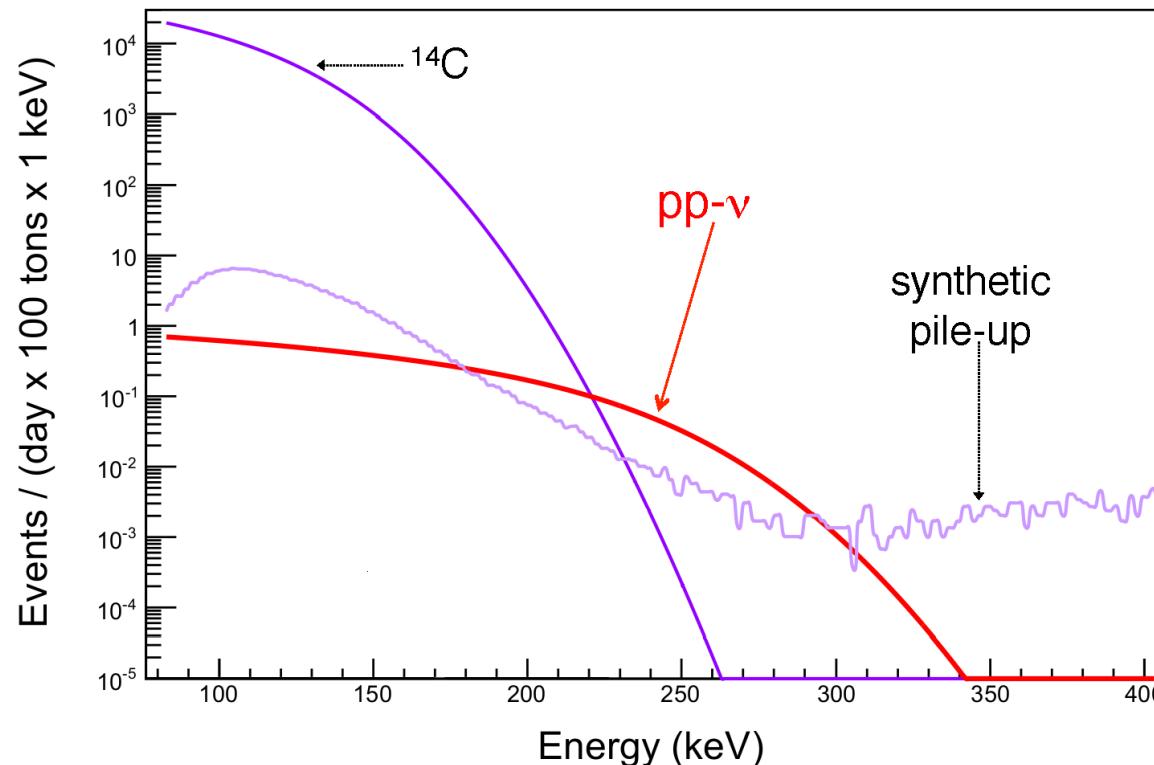


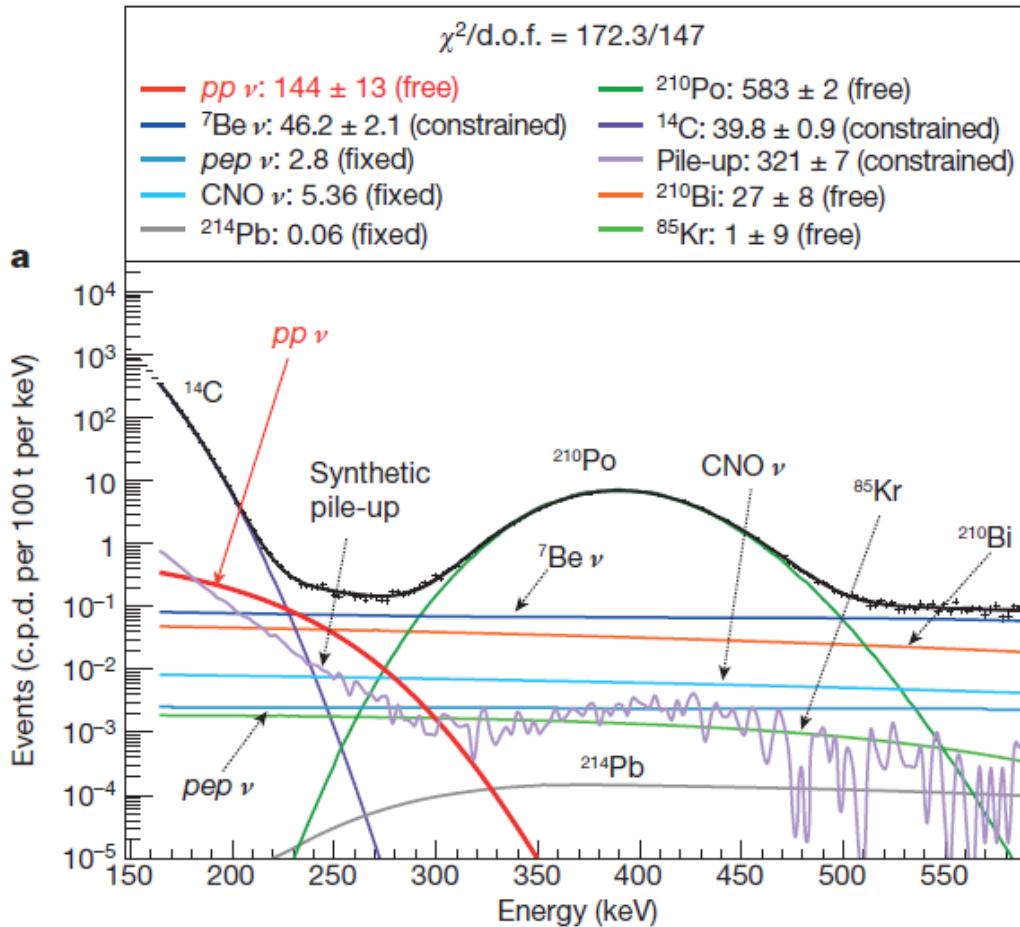
Как можно измерить pp нейтрино ?

Граница спектра электронов отдачи - 264 кэВ, главный фон от ^{14}C – 156 кэВ
Остальные известные источники фона имеют плоские спектры в этой области

Три условия необходимо выполнить :

- 1) низкий порог регистрации по энергии
- 2) хорошее энергетическое разрешение ($\sim 10\%$ при 200 кэВ)
- 3) низкий фон радиоактивный
- 4) как можно меньше событий ^{14}C





Впервые был измерен поток pp-нейтрино с точностью ~11%

$\text{pp} = 144 \pm 13 \text{ (stat)} \pm 10 \text{ (syst) cpd/100 t}$

(MSW/LMA, HM) $131 \pm 2 \text{ cpd/100 t}$

G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), "Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun", Nature 512, 383 (2014).

Table 1 | Results from the fit to the energy spectrum

Parameter	Rate \pm statistical error (c.p.d. per 100 t)	Systematic error (c.p.d. per 100t)
pp neutrino	144 ± 13	± 10
^{85}Kr	1 ± 9	± 3
^{210}Bi	27 ± 8	± 3
^{210}Po	583 ± 2	± 12

The best-fit value and statistical uncertainty for each component are listed together with its systematic error. The χ^2 per degree of freedom of the fit is $\chi^2/\text{d.o.f.} = 172.3/147$.

История наблюдения нейтрино от Солнца в реальном времени.

Kamiokande – (7 МэВ порог) -> **SuperKamiokande** (5 МэВ порог) 50 000 т
большой водный детектор, регистрирующий $\nu_x e \rightarrow \nu_x e$.

Т.е. только «борные» нейтрино могут быть зарегистрированы и

Сечение реакции $\nu_e e \rightarrow \nu_e e$ раз больше, чем $\nu_{\mu,\tau} e \rightarrow \nu_{\mu,\tau} e$

Результаты, опубликованные в 1998 стали еще одним подтверждением наличия эффекта дефицита солнечных нейтрино.

SNO - 1000 т D2O сверхчистой тяжелой воды, окруженный обычной водой для подавления фона с порогом 4 МэВ

$$\nu_e d \rightarrow p p e^- \text{ (CC)},$$

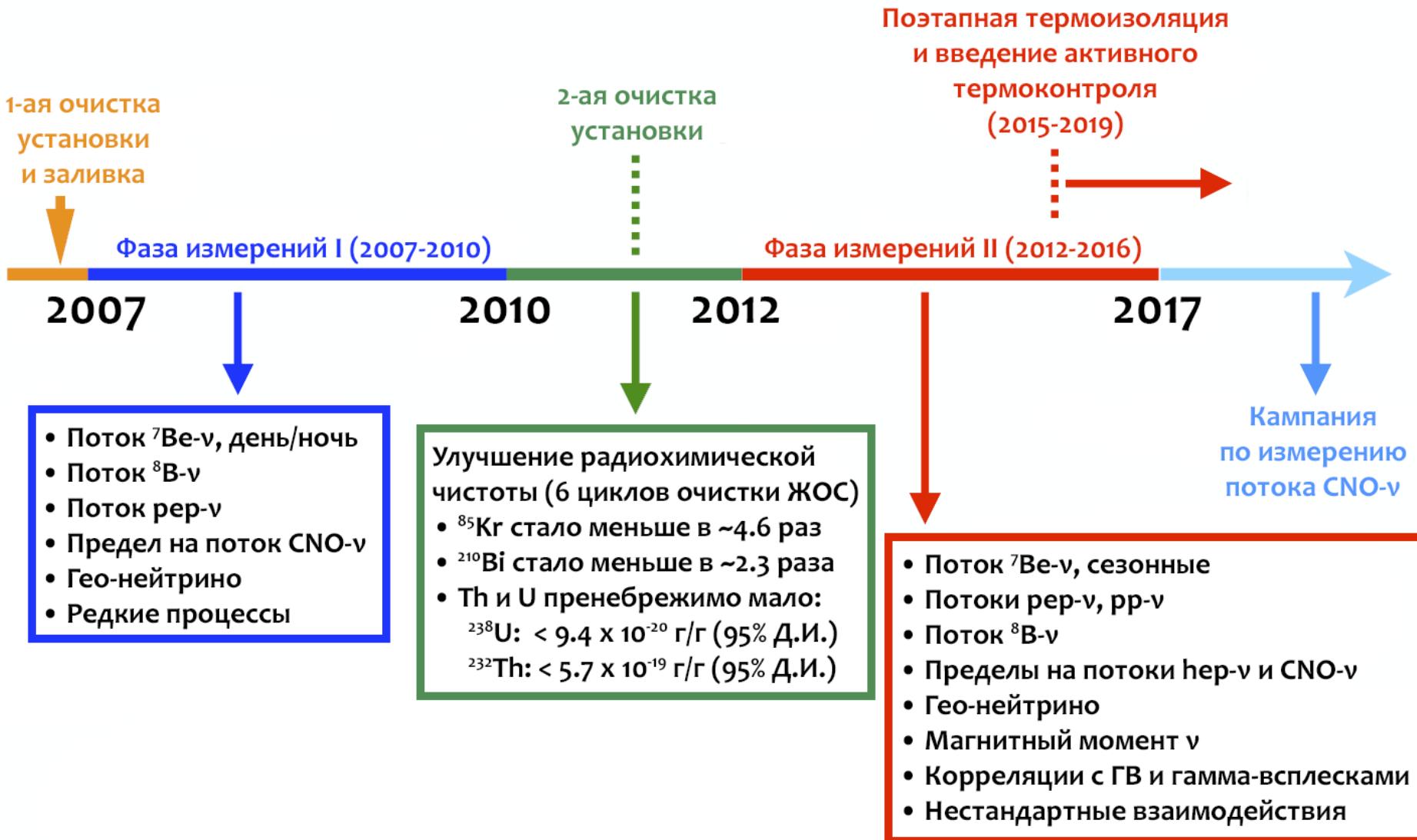
$$\phi_e = \left(1,76_{-0,05}^{+0,06} \text{(стат.)} {}_{-0,09}^{0,09} \text{(систем.)} \right) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$\nu_x d \rightarrow p n \nu_x \text{ (NC)},$$

$$\phi_{\mu\tau} = \left(3,41_{-0,45}^{+0,45} \text{(стат.)} {}_{-0,47}^{0,47} \text{(систем.)} \right) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

2001 год.

Научная программа эксперимента Borexino

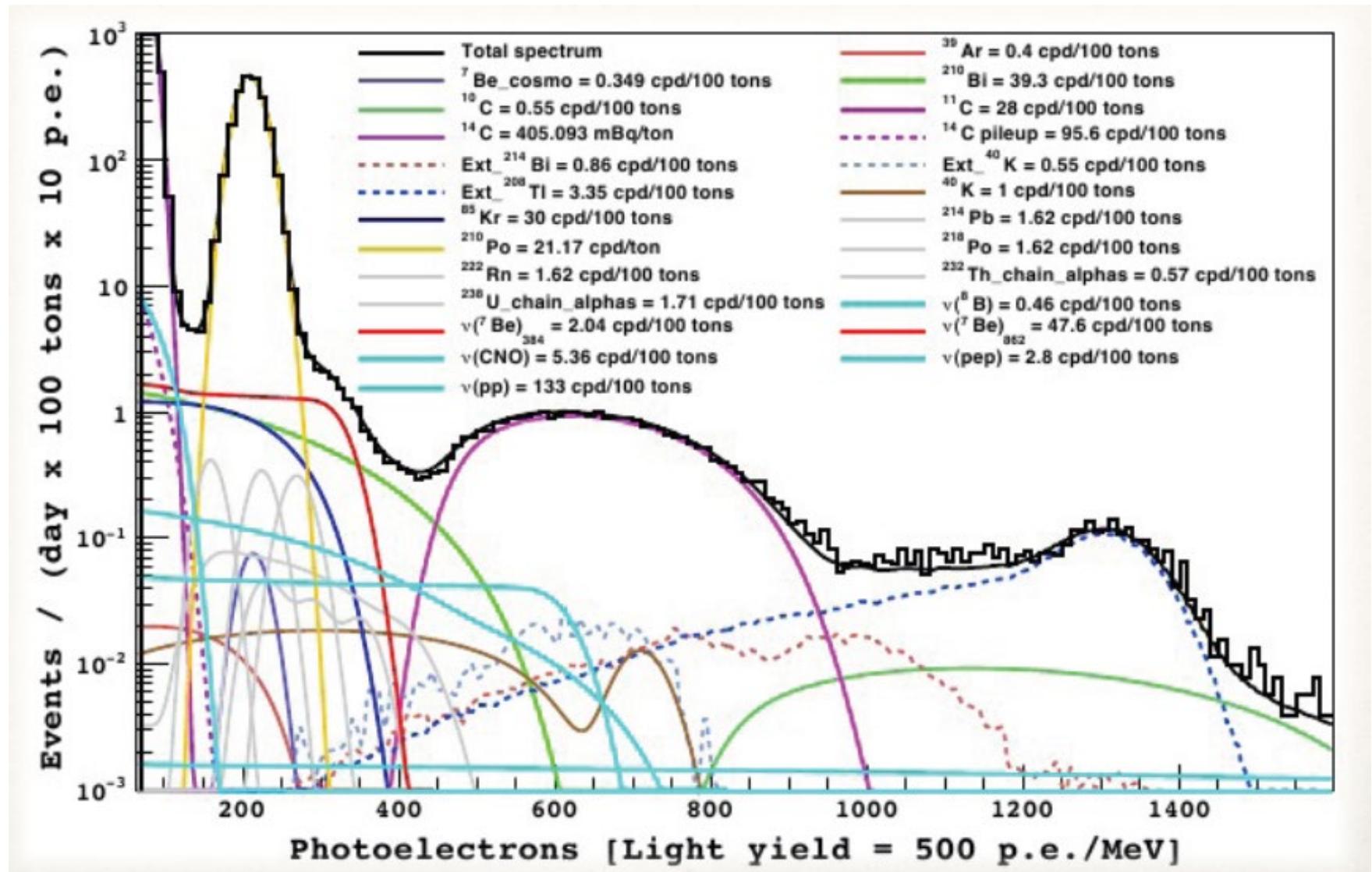


Радиохимическая чистота сцинтиллятора Borexino

Нуклид	Ест. распростран. (и источник)	Цель счёт мас. фр.	Фаза I счёт мас. фр.	Фаза II счёт мас. фр.
^{14}C / ^{12}C	10^{-12} Г/Г (космоген.)	$\sim 10^{-18}$ Г/Г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ Г/Г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ Г/Г
^{39}Ar	17 мБк/м ³ (воздух)	~ 1 свд/100 т	$\ll 85\text{Kr}$	$\ll 85\text{Kr}$
^{40}K	$2 \cdot 10^{-6}$ Г/Г (пыль)	$\sim 10^{-15}$ Г/Г	$< 1.7 \cdot 10^{-15}$ Г/Г (95% Д.И.)	$< 1.7 \cdot 10^{-15}$ Г/Г (95% Д.И.)
^{85}Kr	1 Бк/м ³ (воздух)	~ 1 свд/100 т	30.4 ± 5.5 свд/100т	6.8 ± 1.8 свд/100 т
^{210}Bi	В равновесии с ^{222}Rn или ^{210}Pb	Не указано	~ 70 свд/100 т	~ 25 свд/100 т
^{210}Po	Поверхностные загрязнения	100 свд/100 т	~ 6000 свд/100 т	~ 200 свд/100 т
^{222}Rn	100 атомов/см ³ (воздух)	~ 10 свд/100 т	1 свд/100 т	0.1 свд/100 т
^{232}Th	$10^{-6} - 10^{-5}$ Г/Г (пыль)	$\sim 10^{-16}$ Г/Г или 10^{-6} Бк/т	6.8 ± 1.5 10^{-18} Г/Г	$< 5.7 \cdot 10^{-19}$ Г/Г (95% Д.И.)
^{238}U	$10^{-6} - 10^{-5}$ Г/Г (пыль)	$\sim 10^{-16}$ Г/Г или 10^{-6} Бк/т	1.6 ± 0.1 10^{-17} Г/Г	$< 9.4 \cdot 10^{-20}$ Г/Г (95% Д.И.)

свд - событий в день; Д.И. - доверительный интервал

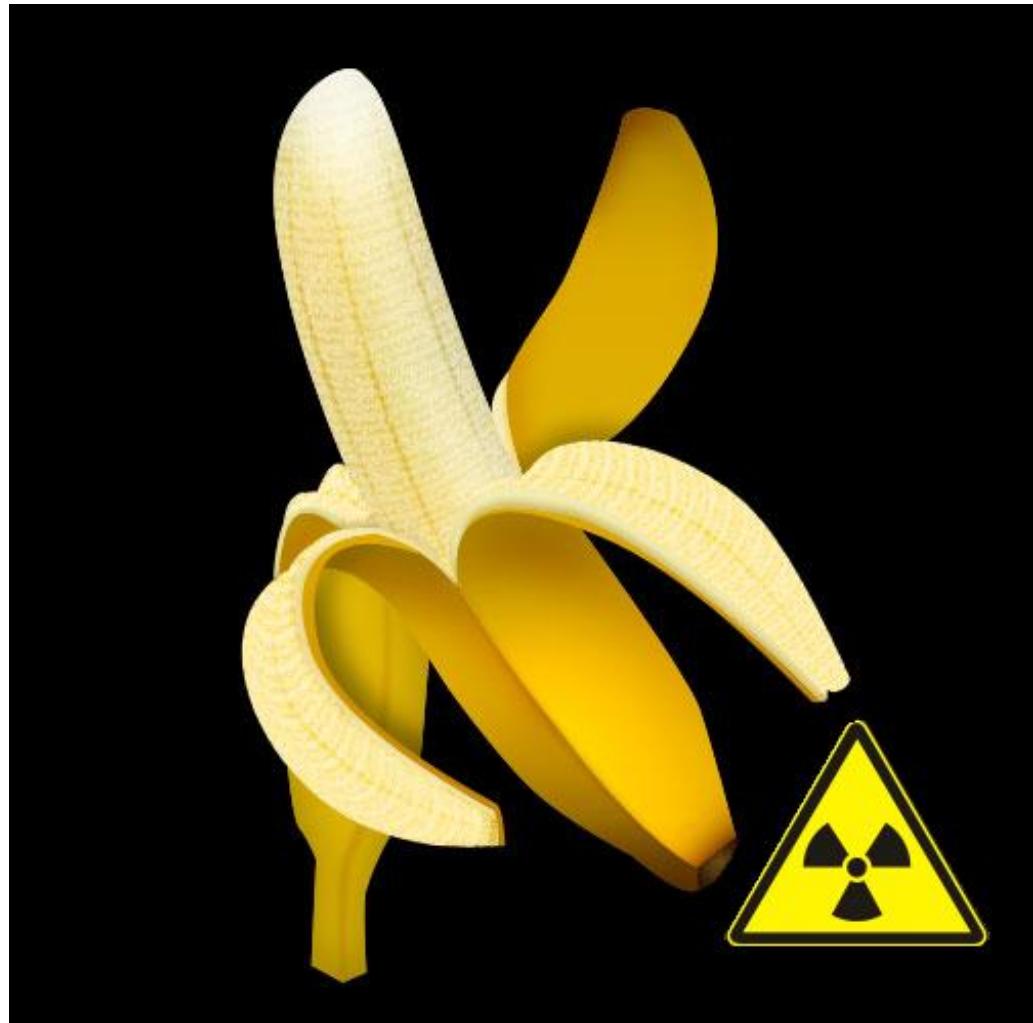
Обработанный «Спектр» регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах.



Банановый эквивалент

- понятие, применяемое сторонниками ядерной энергетики для характеристики активности радиоактивного источника (сравнения с активностью калия-40, содержащегося среди других изотопов калия в обычном банане)
- в грамме природного калия 32 Бк ${}^{40}\text{K}$
- 19 Бк в банане с массой 150 г

**Содержание ${}^{40}\text{K}$ в Borexino
 $< 2.4 \times 10^{-7}$ (95% Д.И.)
бананового эквивалента
(или 36 мкг)**



Сечение упругого рассеяния нейтрино на электронах – основной реакции для регистрации нейтрино в детекторе Borexino.



$$N_e = (3.307 \pm 0.003) \times 10^{31} e^-/100t$$

TABLE I. The total ν_e is the neutrino energy spectra, and calculated

Solar ν	E_ν
pp	\leq
^7Be	\leq
^7Be	\leq
pep	\leq
^{13}N	\leq
^{15}O	\leq
^{17}F	\leq
^8B	\leq

