



# ИЗМЕРЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО PP-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 lunar 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  $\nu$ : *Nature* **562**, 505–510 (2018)

[arXiv:1707.09279v2](https://arxiv.org/abs/1707.09279v2)

[arXiv:1709.00756v1](https://arxiv.org/abs/1709.00756v1)

pp- $\nu$ : *Nature* **512**, 383–386 (2014)

$^7\text{Be}$ - $\nu$ : *Phys. Rev. Lett.* **101**, 091302 (2008)

реp- $\nu$ : *Phys. Rev. Lett.* **108**, 051302 (2012)

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

Гео- $\nu$ : *Phys. Rev. D* **92**, 031101(R) (2015)

Магнитный момент  $\nu$ : *Phys. Rev. D* **96**, 091103(R) (2017)

Сезонные модуляции  $^7\text{Be}$ - $\nu$ :

*Astroparticle Physics* **92**, 21-29 (2017)

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

Отсутствие асимметрии день/ночь  $^7\text{Be}$ - $\nu$ :  
*Physics Letters B* **707** (1), 22-26 (2012)

GW- $\nu$  корреляции: *The Astrophysical Journal (ApJ)*, **850**:21 (2017)



# BOREXINO COLLABORATION



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



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



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ



Universität  
Hamburg



SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR  
PHYSICS  
LOMONOSOV MOSCOW STATE  
UNIVERSITY



Joint Institute for  
Nuclear Research



GRAN SASSO  
SCIENCE INSTITUTE

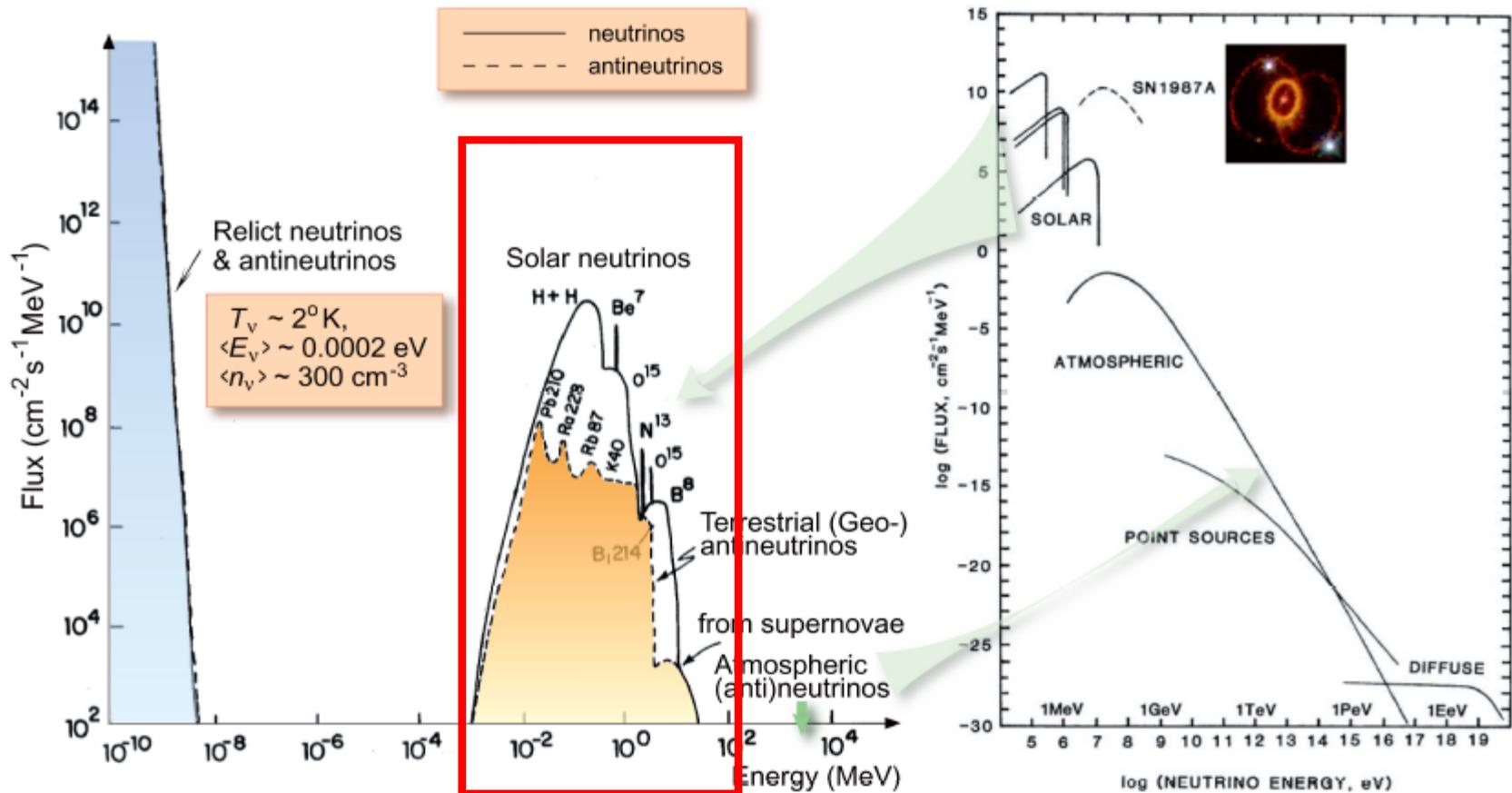
CENTER FOR ADVANCED STUDIES  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



POLITECNICO  
MILANO 1863



Реликтовые нейтрино - энергия  $10^{-4}$  поток  $10^{13}\text{-}10^{14}\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

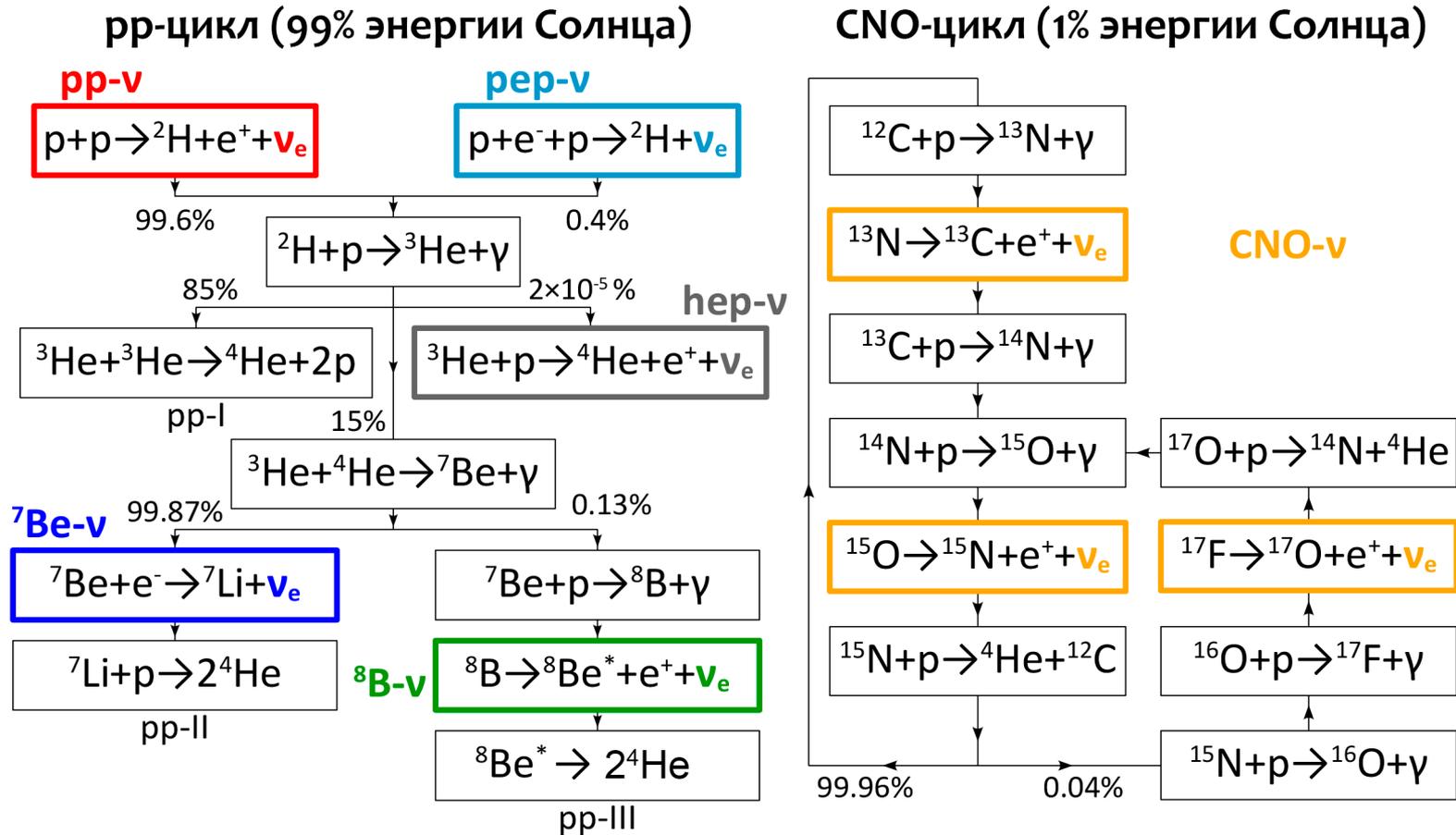
Солнечные нейтрино -  $\sim 1\text{кЭВ-} \sim 10\text{МЭВ}$  поток  $10^{10}\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Недра земли (слабые распады ядер) -  $\sim 1\text{кЭВ-} \sim 10\text{МЭВ}$  поток  $10^6\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Реакторные нейтрино -  $\sim 1\text{кЭВ-} \sim <9\text{ МЭВ}$  (1ГВт – 10 м) поток  $\sim 10^{13}\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Космические лучи -  $\sim >100\text{МЭВ}$  поток  $10^6\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

# Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий

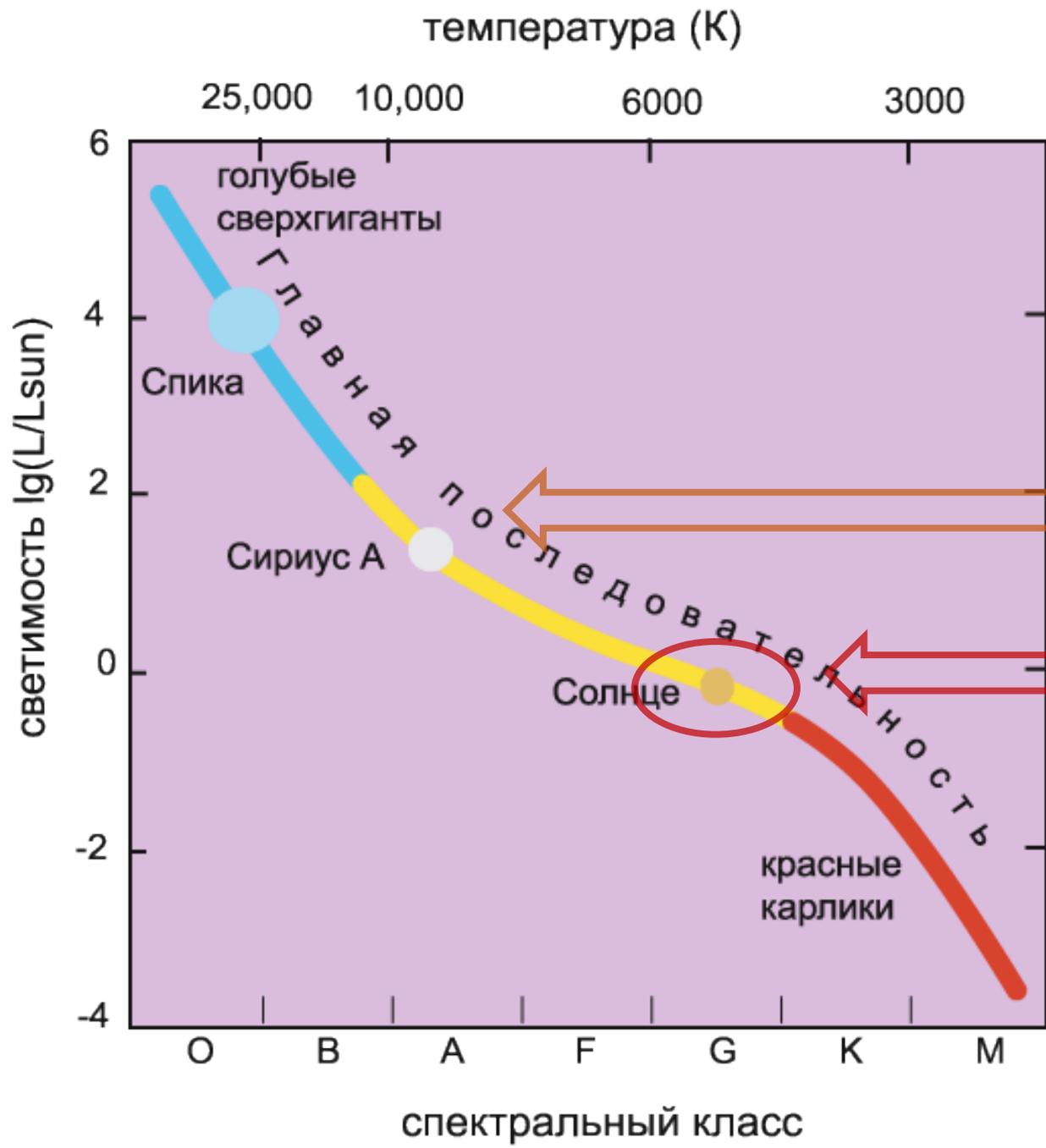


- von Weizsäcker, C. F. Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne I. *Phys. Z.* 38, 176 (1937)

- 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).



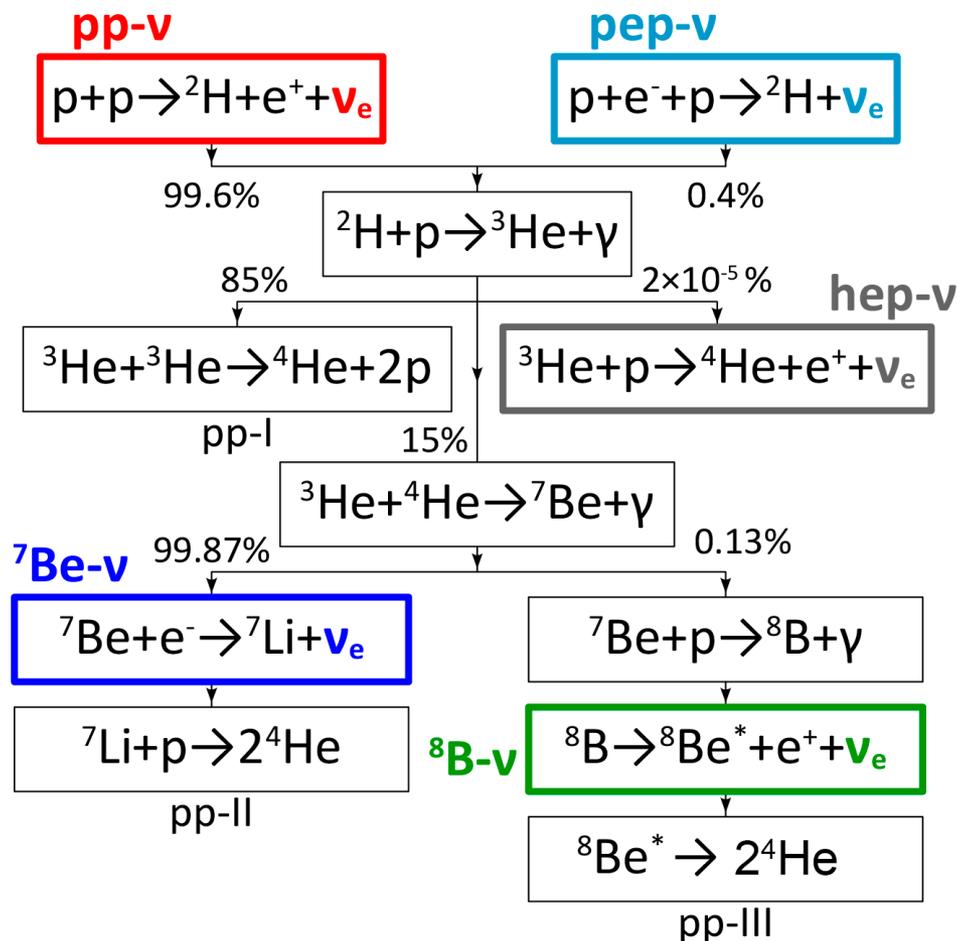
**Доминирование разных термоядерных циклов в зависимости от типа звезд**

**Доминирование CNO-цикла при сгорании водорода в гелий**

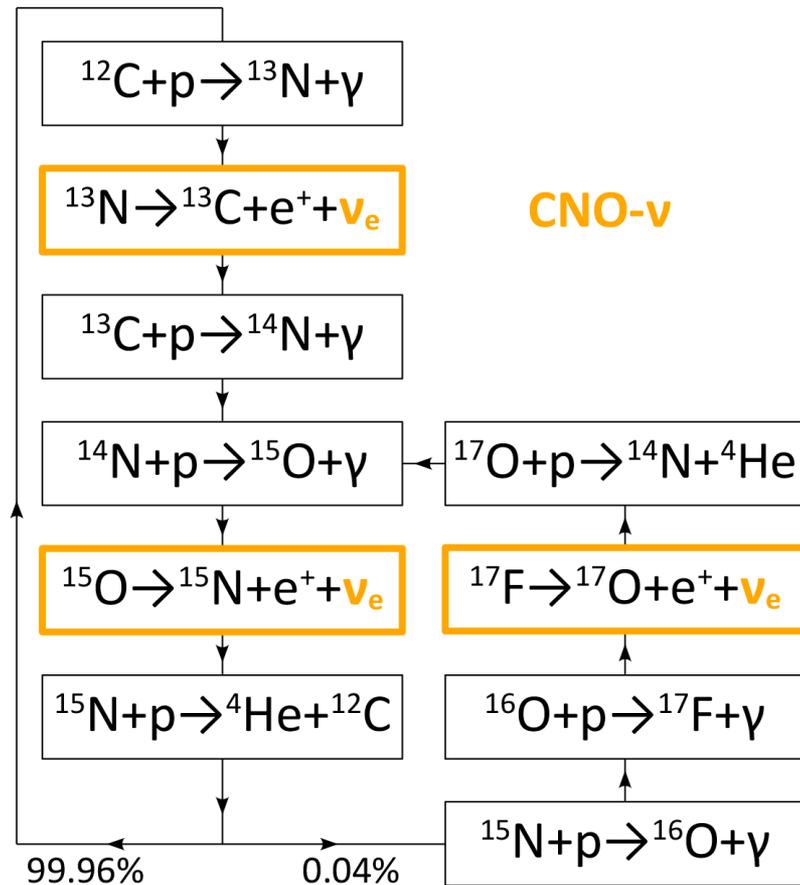
**Доминирование pp-цикла при сгорании водорода в гелий**

# Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий

pp-цикл (99% энергии Солнца)



CNO-цикл (1% энергии Солнца)



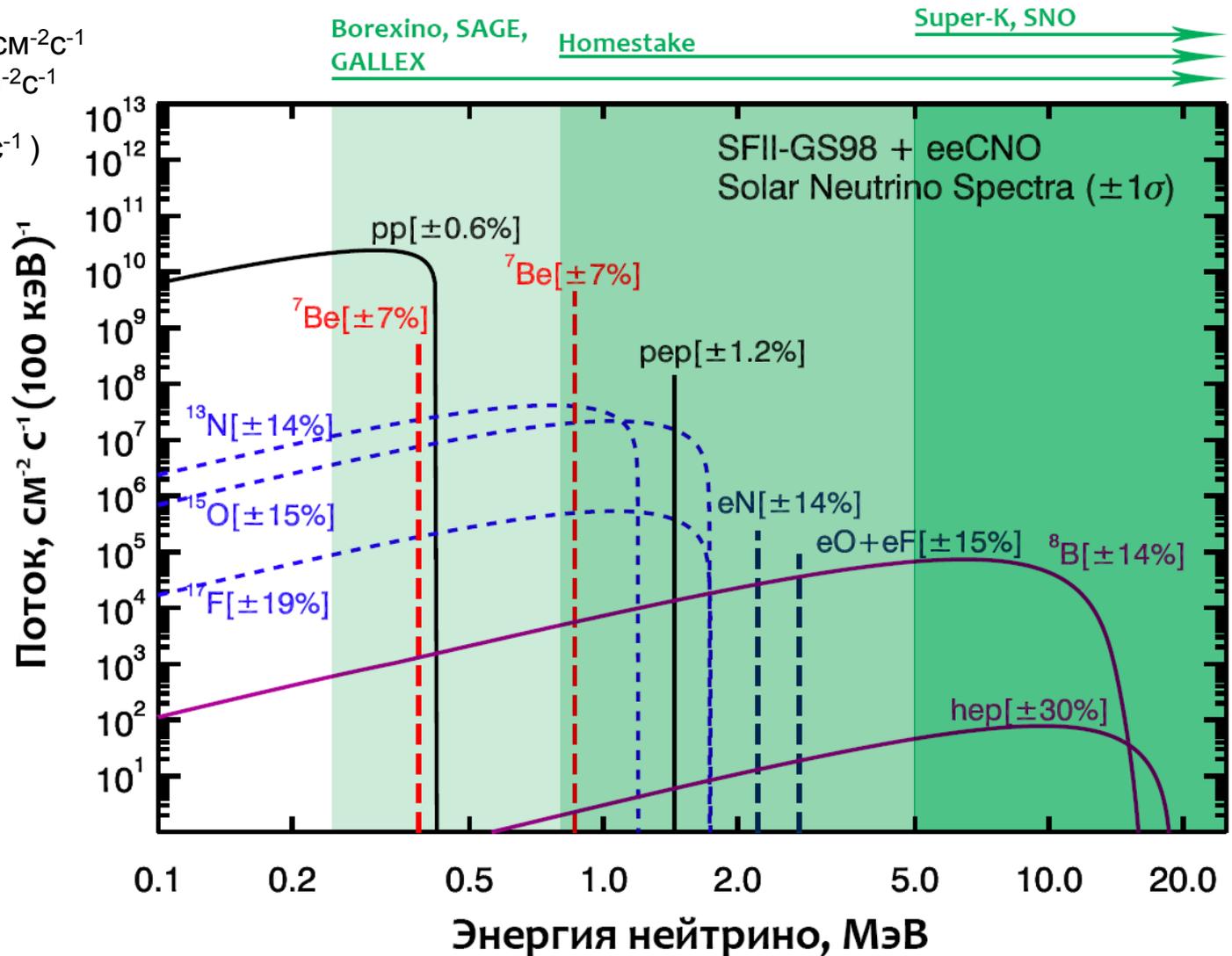
$$4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e. \quad (E(\nu_e) \cong 26 \text{ МэВ})$$

(нейтрино уносит менее 10% энергии реакции синтеза).

# Теоретические спектры солнечных нейтрино

по данным ССМ

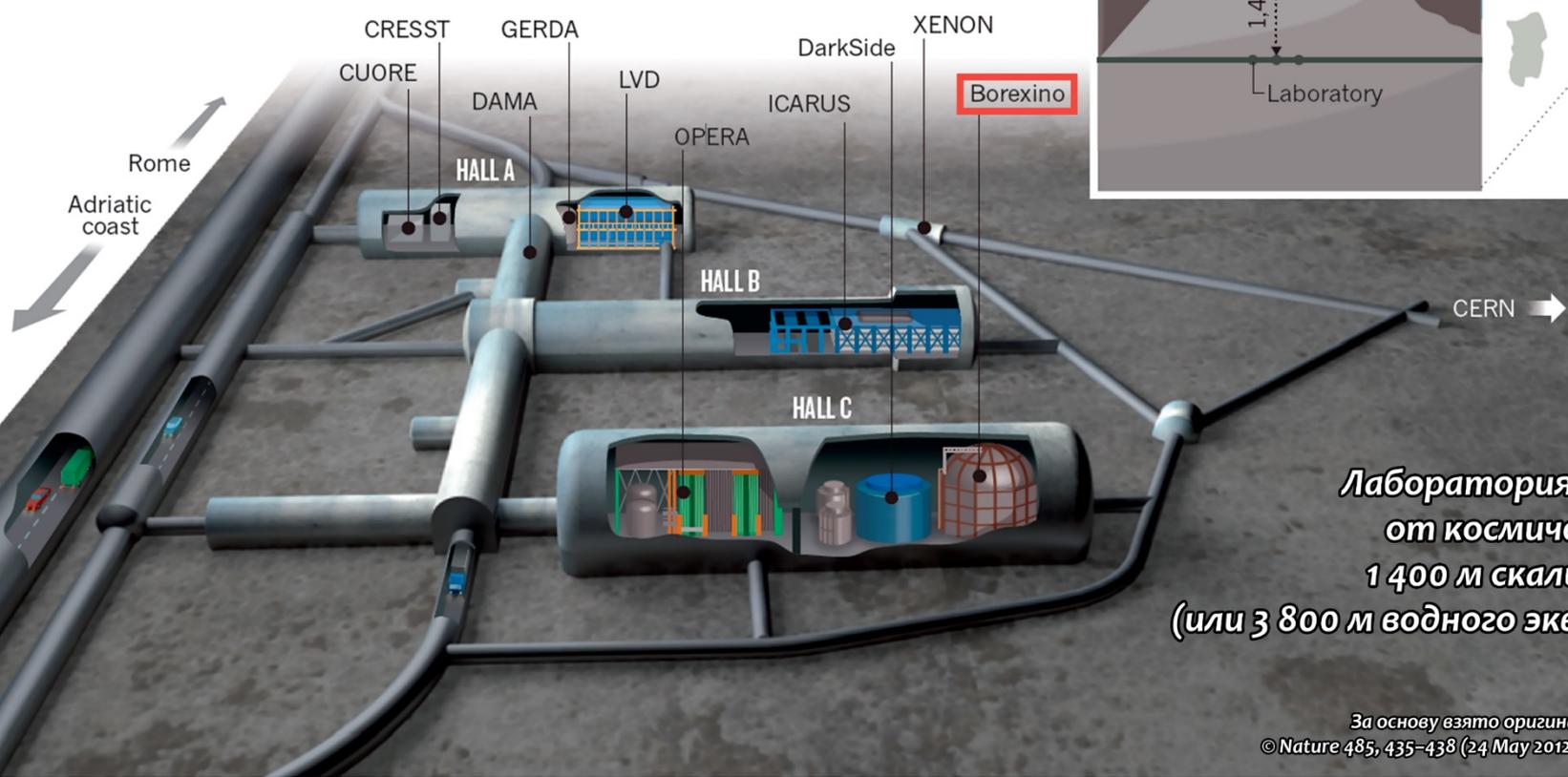
pp 90% -  $\sim 6.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$   
 ${}^7\text{Be}$  10% -  $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$   
 (< 1%  ${}^8\text{B}$  -  $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )



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-САССО



**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*

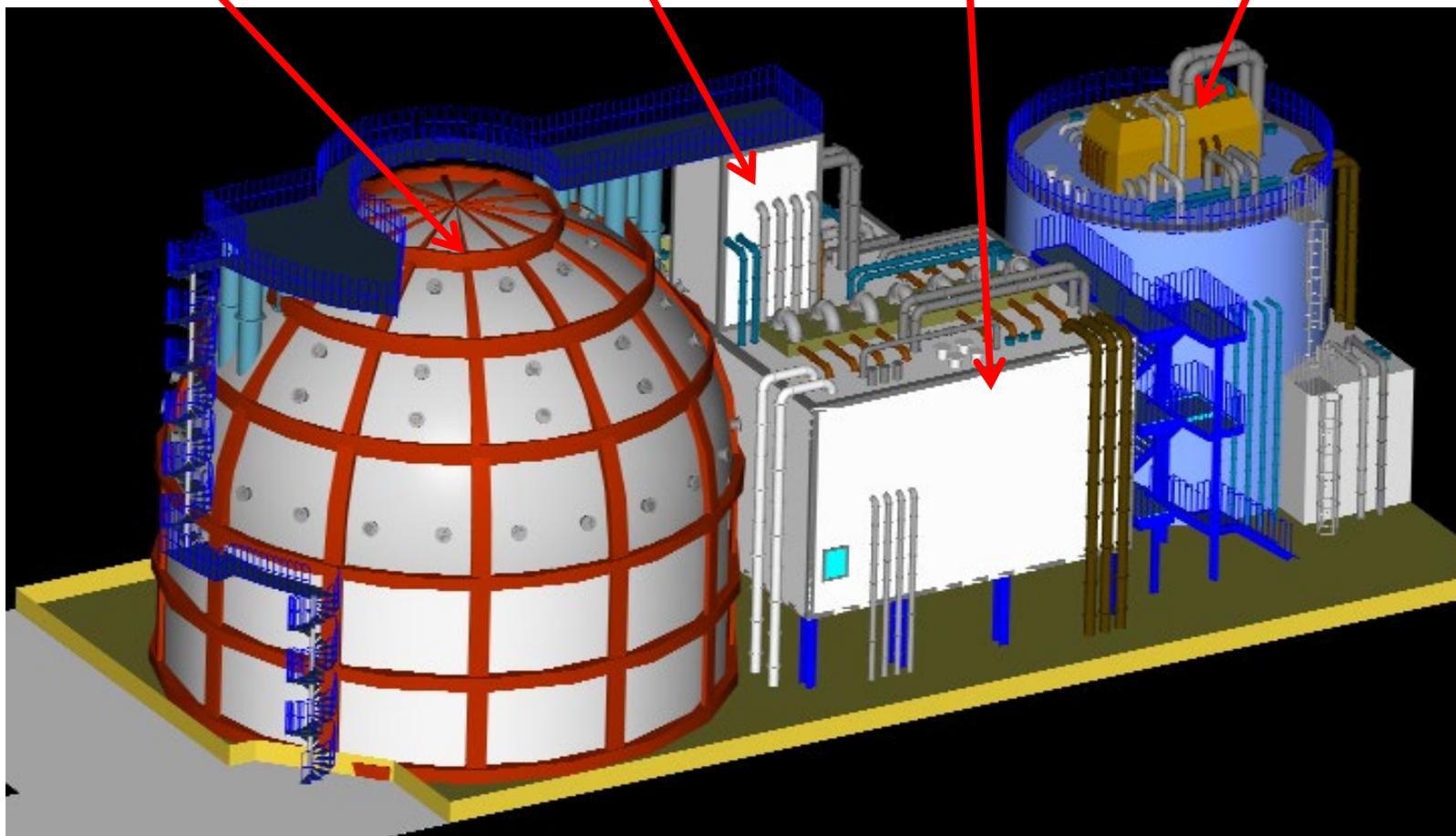
## Состав детектора Borexino

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

Водяной бак WT:  
водный  
черенковский  
детектор,  
2100 м<sup>3</sup>,  
R = 9 м, H = 16.9 м,  
208 ФЭУ в воде,  
защита от  $\gamma$ , n,  $\mu$

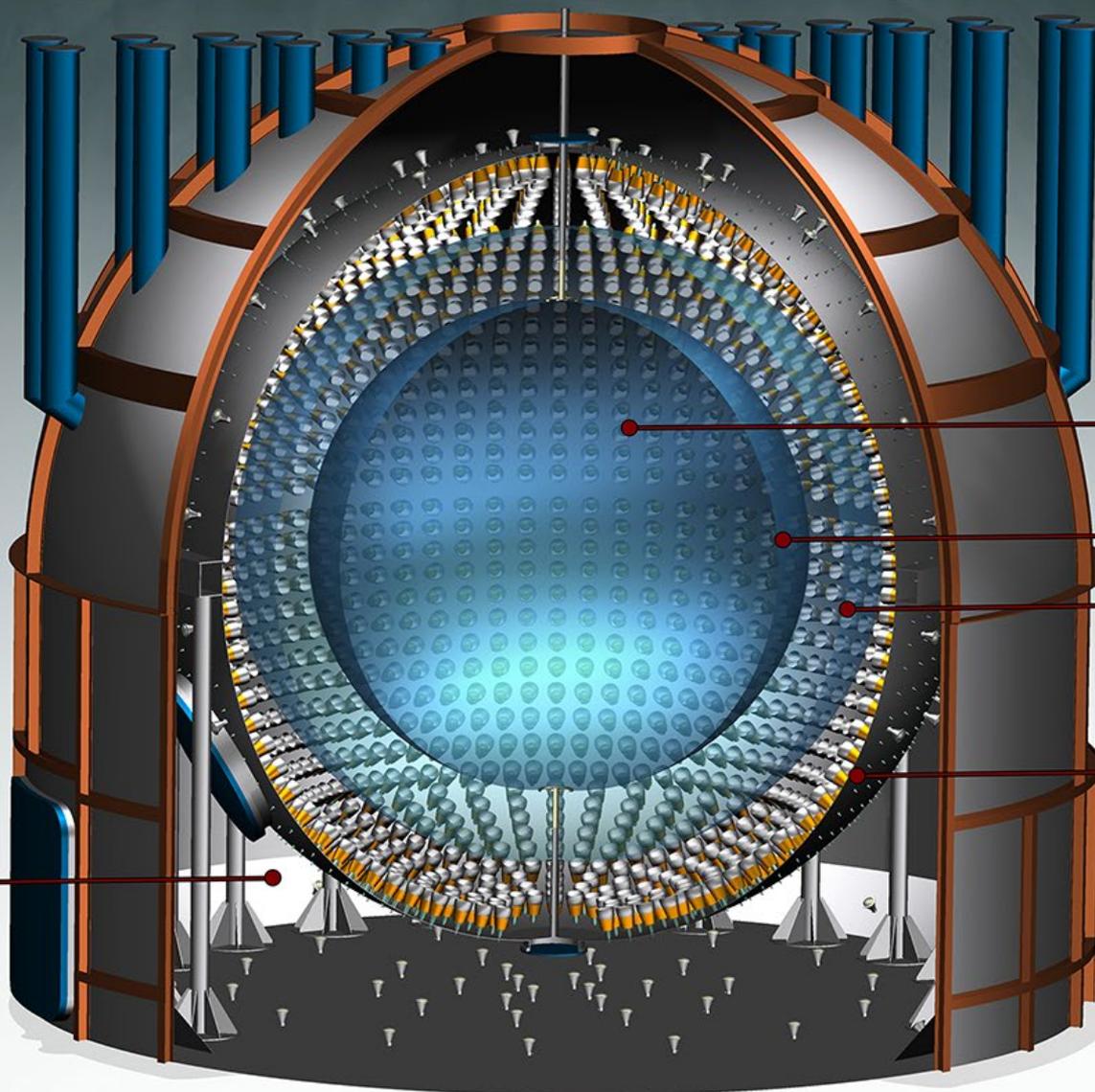
## Система сбора данных FADC

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)

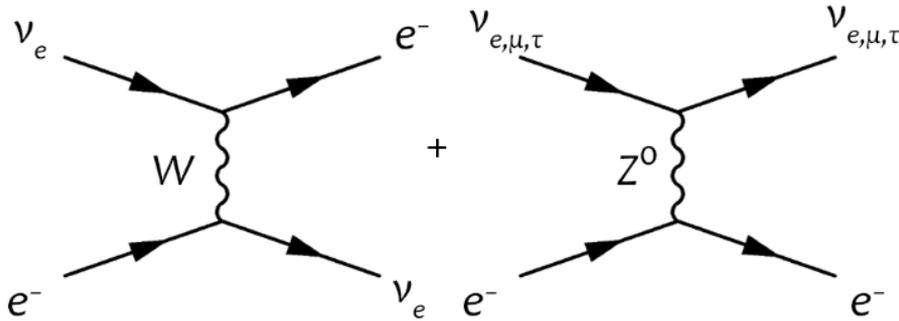
Нейлоновые сферы:  
(толщина 125 мкм)  
Внутренняя: 4.25 м,  
Внешняя: 5.50 м  
(защита от радона)

Сфера из  
нержавеющей стали:  
1346 м<sup>3</sup>,  
R = 6.85 м,  
2212 8" (ETL 9351) ФЭУ  
Два буфера:  
323 т и 567 т  
PC+DMP (5.0 г/л)

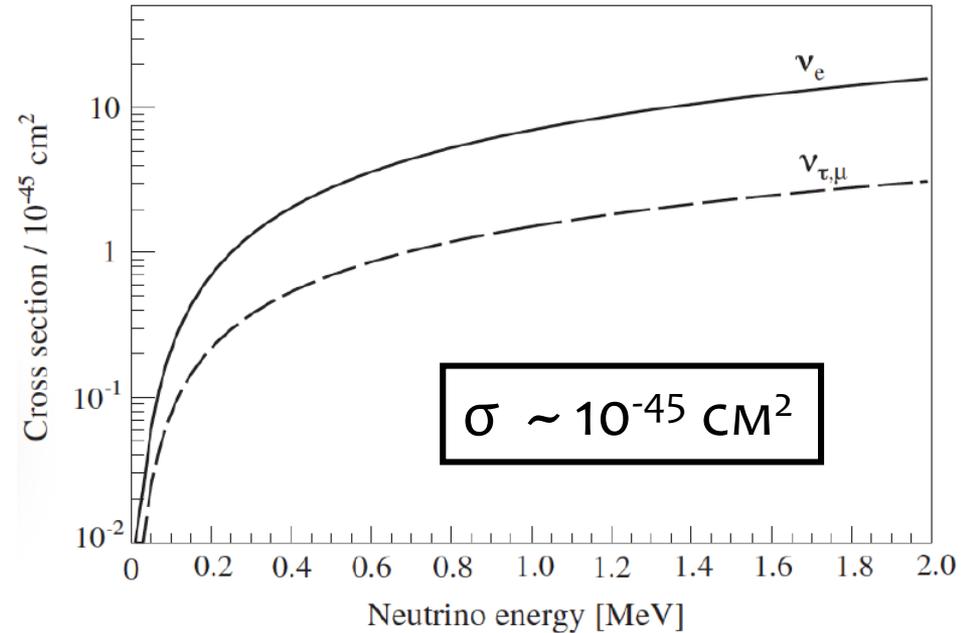


# Регистрация нейтрино в ЖОС мишени Borexino

Для детектирования солнечных нейтрино используется реакция упругого рассеяния нейтрино на электронах



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



Сигнал от солнечных (моноэнергетических) нейтрино в Борексино:

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

## 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)
${}^7\text{Be}$	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.11^{+0.06}_{-0.08}) \times 10^9$	$4.93(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (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.*

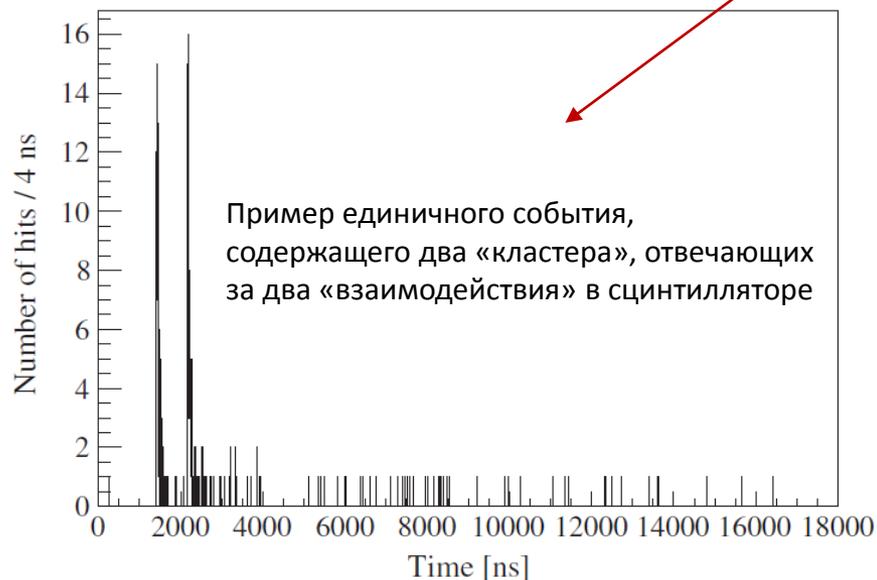
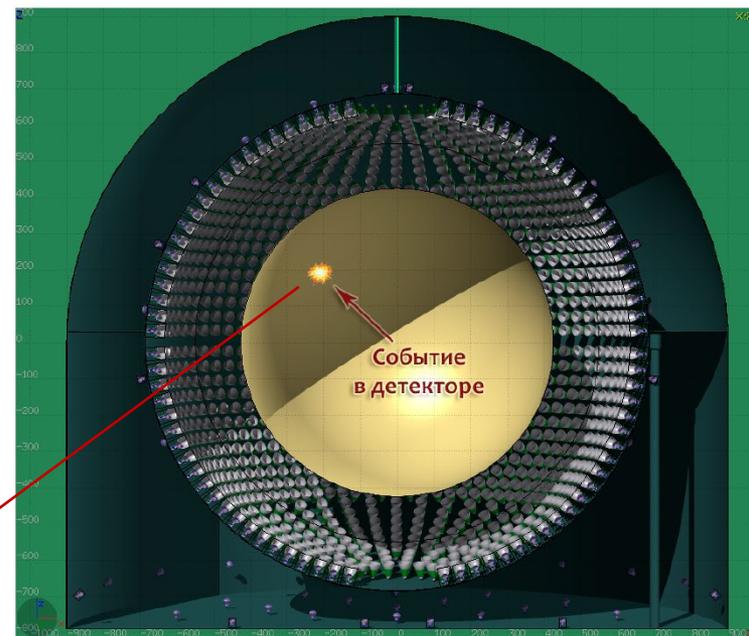
**Поток  $\sim 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  дает  $\sim 130$  событий в день на 100 т мишени**

## Событие в детектореorexino 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)

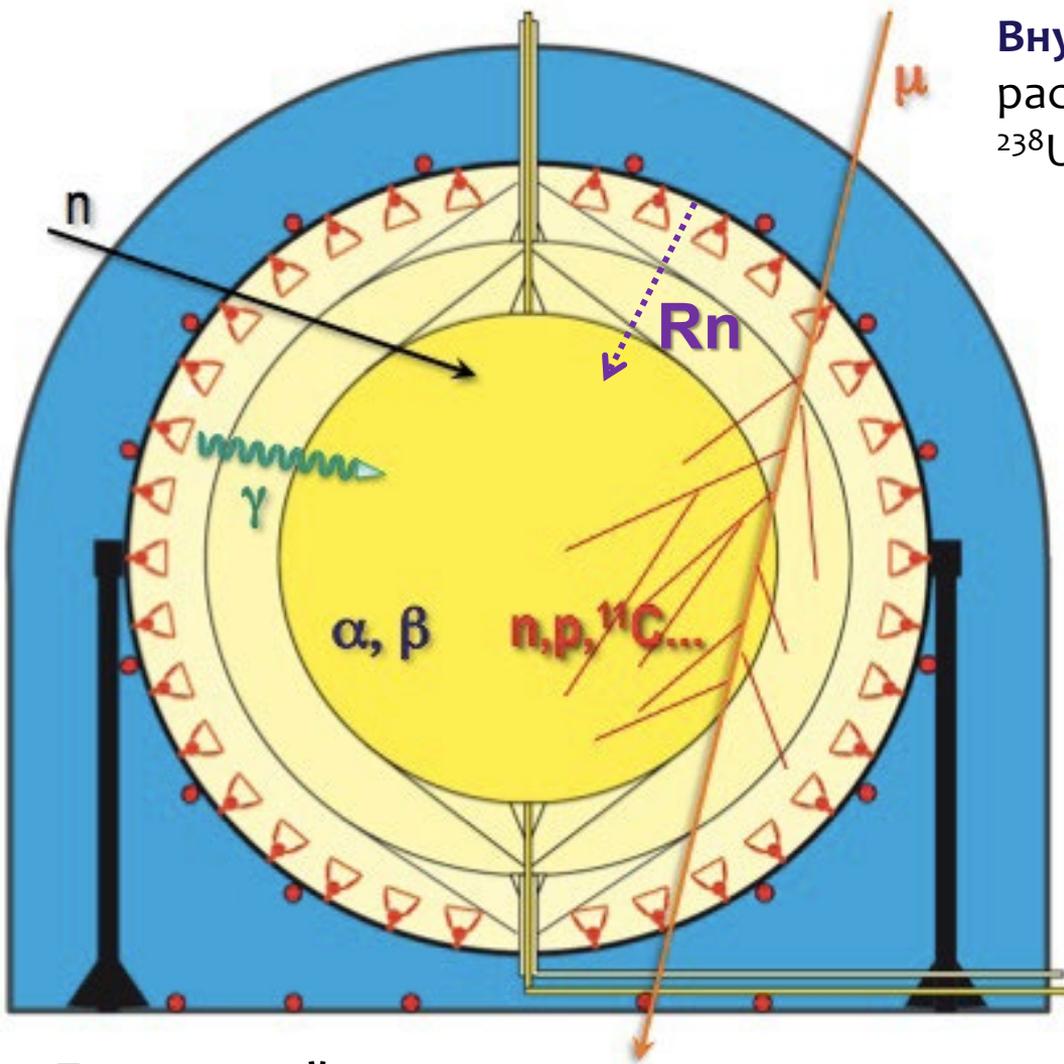
Триггер настроен на то, что должны сработать минимум 25-30 ФЭУ, (т.е. зарегистрировать хотя бы один фотоэлектрон во временном окне 99 нс) – это эквивалентно выделению энергии 50-60 кэВ. 1 МэВ электрон производит в среднем 500 фотоэлектронов

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 ?**

# Вorexino – установка с беспрецедентной радиохимической чистотой



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

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

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

**«Космические» мюоны**

**Быстрые нейтроны**, возникающие при взаимодействии мюонов с окружением детектора

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

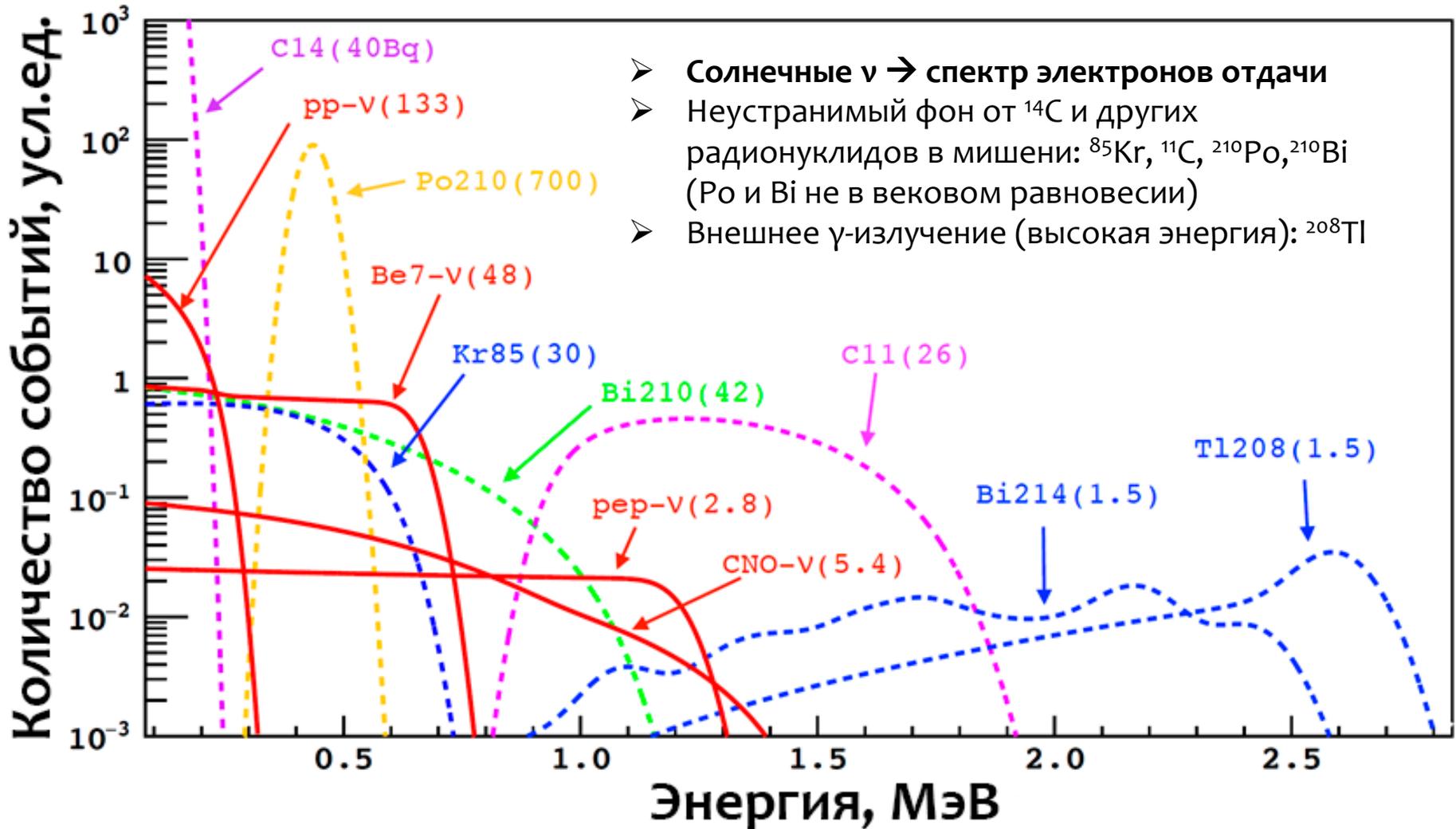
# Фоны в детекторе Borexino

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

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

Остаточный фон обусловлен  $\beta^-$  (электроны),  $\beta^+$  (позитроны),  $\gamma$  (гамма),  $\mu$  (мюоны),  $\alpha$  (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).

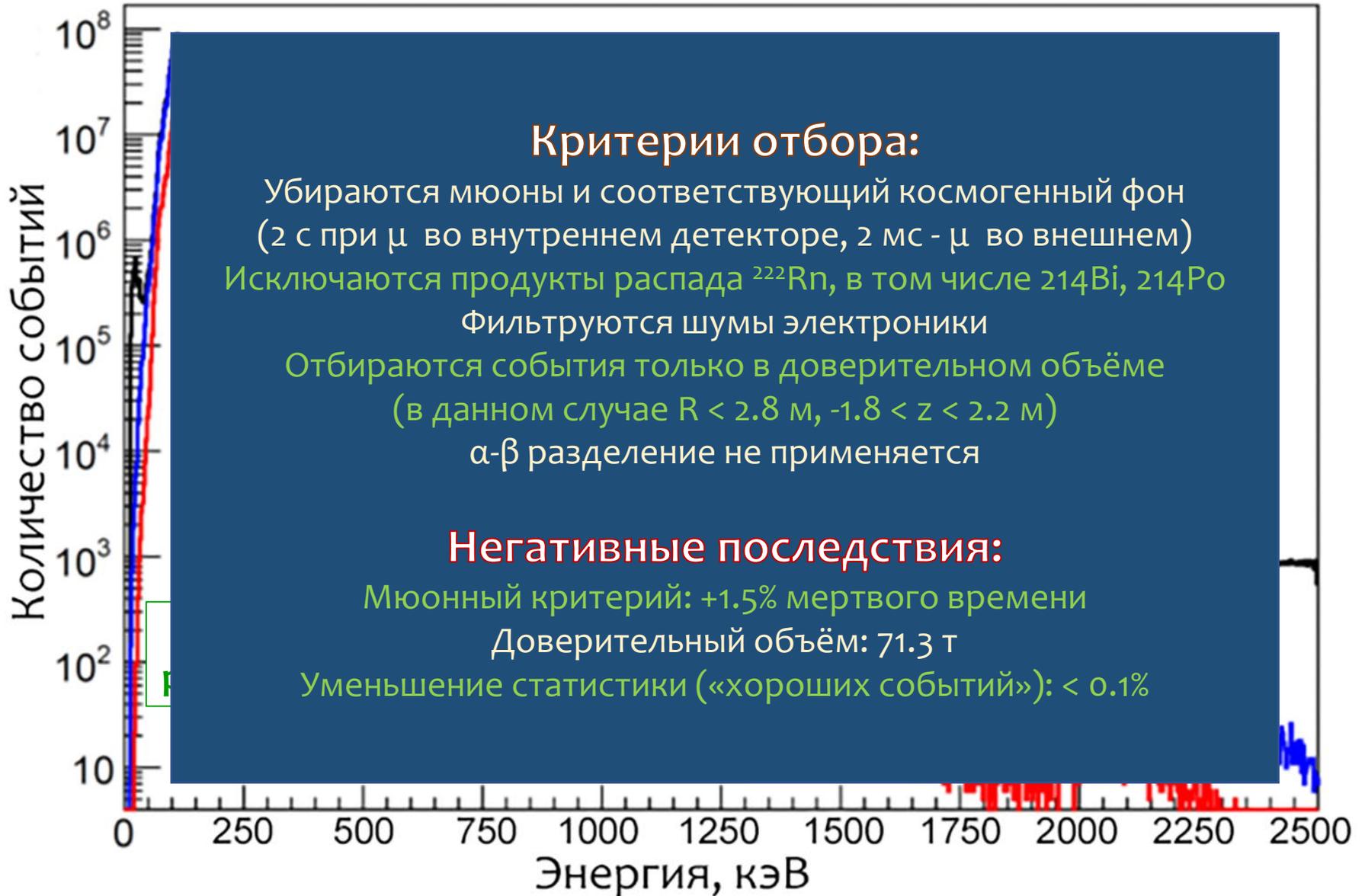
## Возможные вклады нейтрино и фонов в наблюдаемый спектр (согласно Монте-Карло моделированию)



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

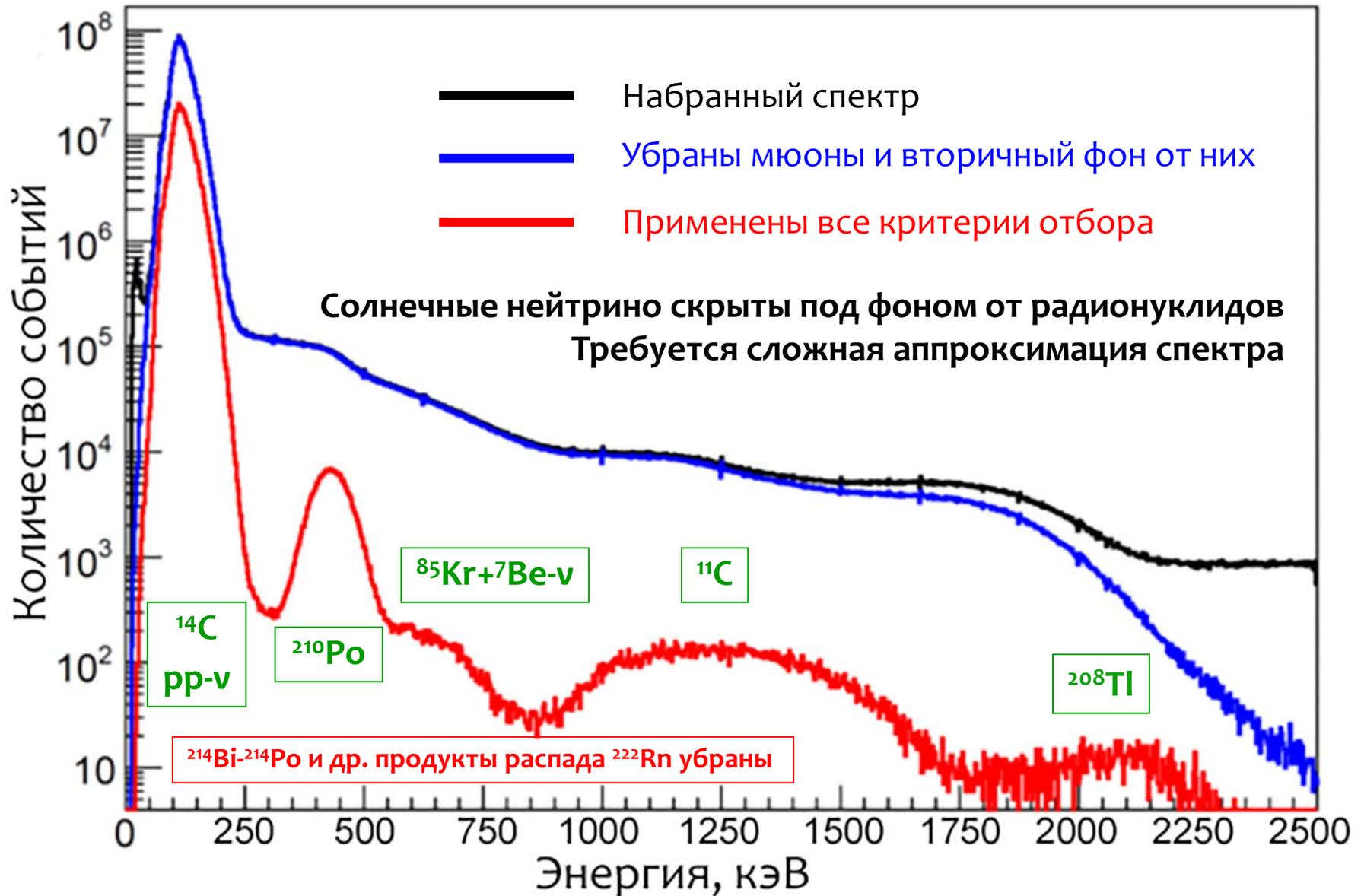
# Спектр до/после отбора событий

(область малых энергий: 0.19 – 2.93 МэВ)

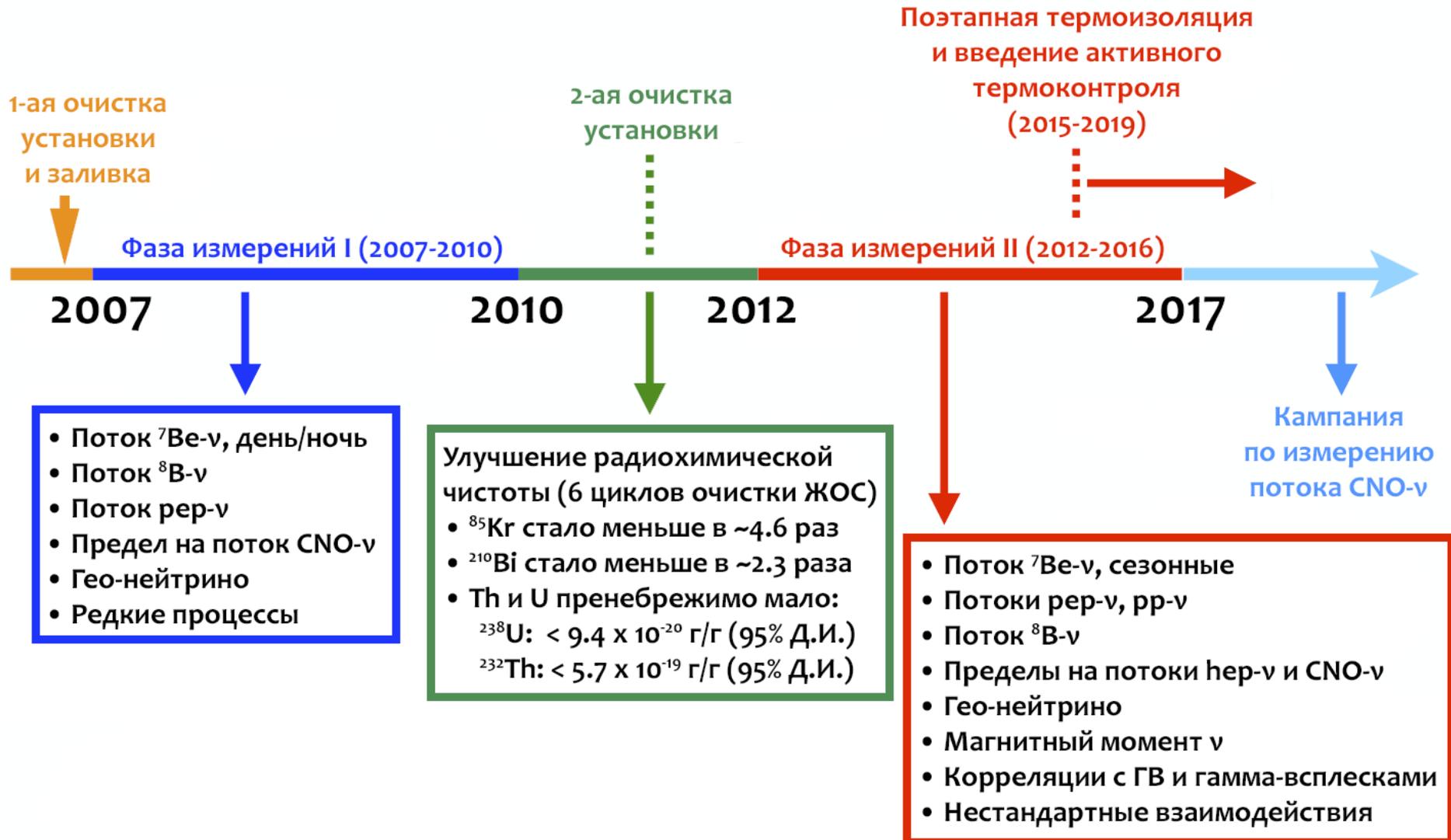


# Спектр до/после отбора событий

(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- $\nu$ ,  $^7\text{Be}$ - $\nu$ , pep- $\nu$ , CNO- $\nu$

ФАЗА I и II

Borexino, SAGE,  
GALLEX

Homestake

Super-K, SNO

Высокие энергии I  
(ВЭ I)

3.2 – 5.7 МэВ

$^8\text{B}$ - $\nu$

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

Высокие энергии II  
(ВЭ II)

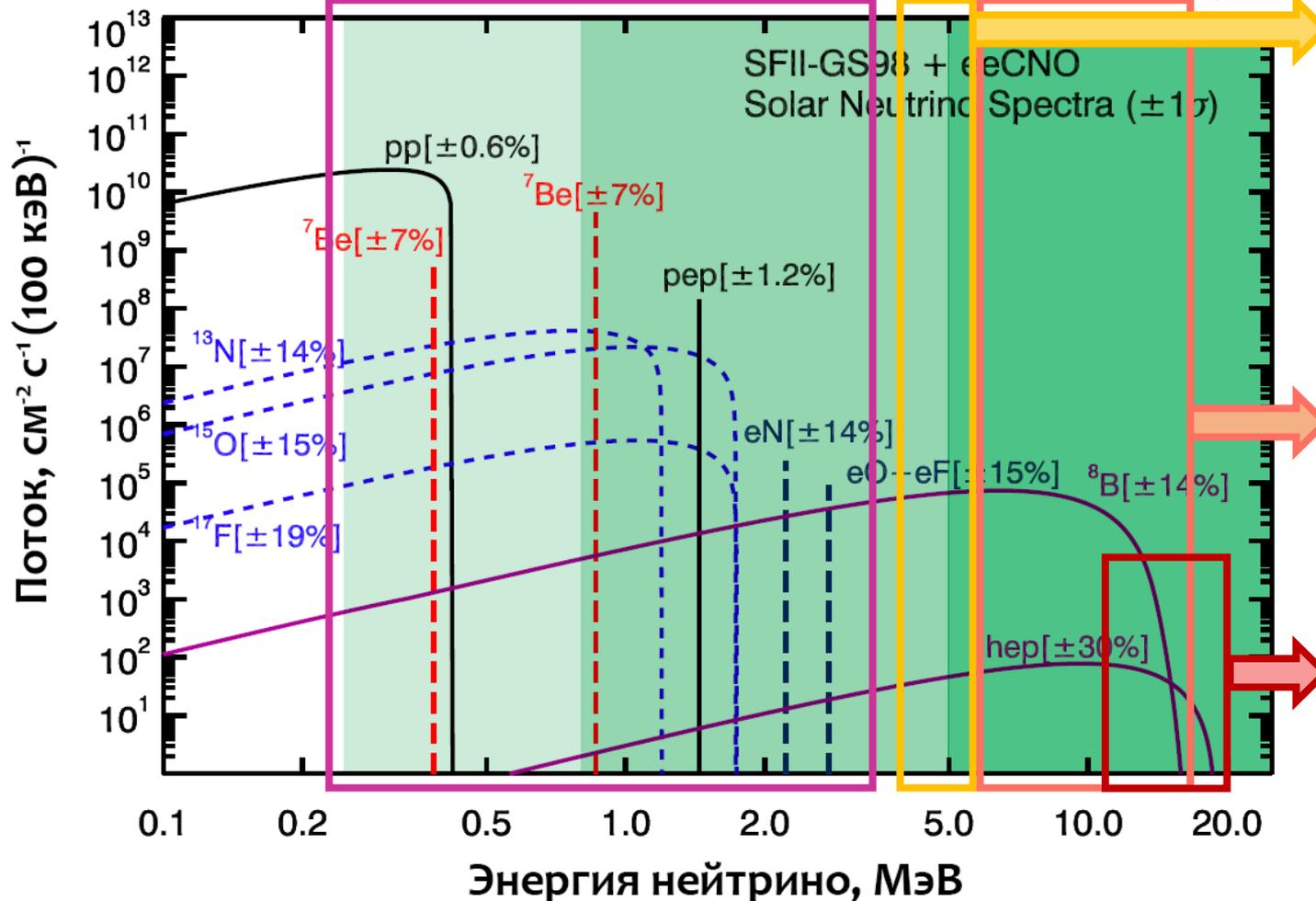
5.7 – 16.0 МэВ

$^8\text{B}$ - $\nu$

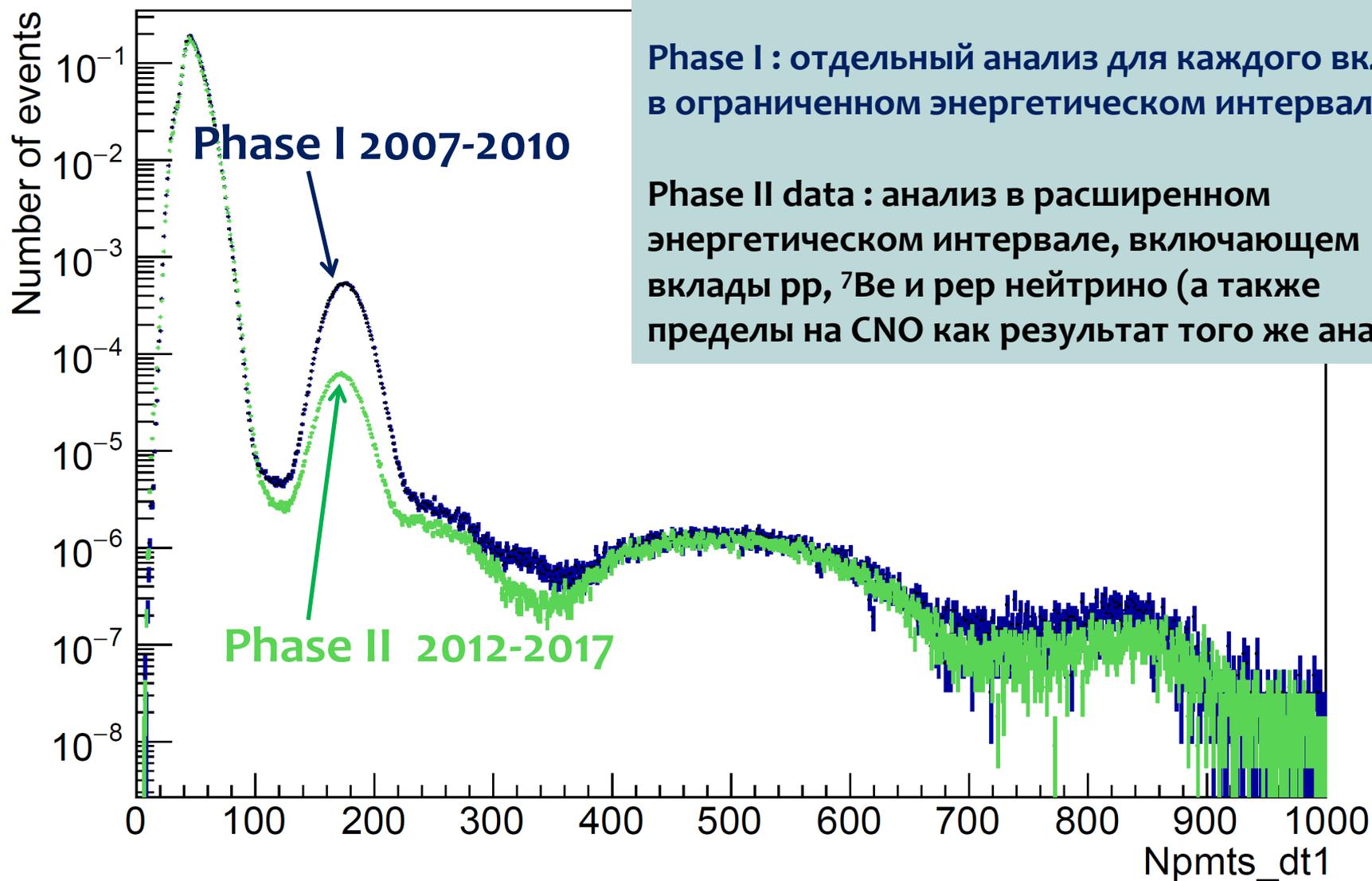
Высокие энергии III  
(ВЭ III)

11 – 20 МэВ

hep- $\nu$

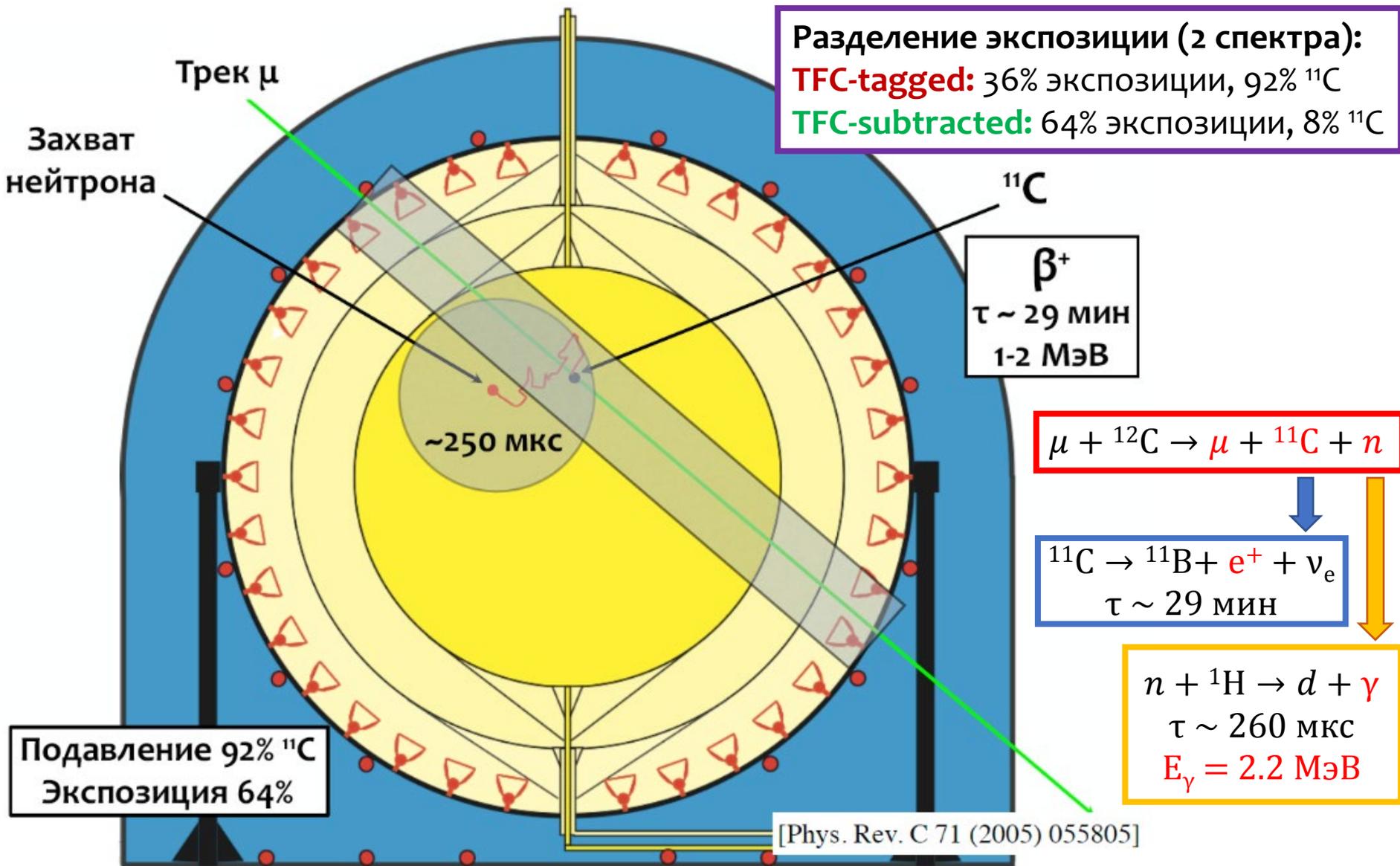


# Разница анализов в Фазе I и Фазе II



# Метод тройных совпадений для отбора $^{11}\text{C}$

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



# Многопараметрическая аппроксимация на основе метода максимального правдоподобия

Поточечный (binned) поиск максимума следующей функции правдоподобия:

$$\mathcal{L}(\vec{\theta}) = \mathcal{L}_{\text{sub}}(\vec{\theta}) \mathcal{L}_{\text{tag}}(\vec{\theta}) \mathcal{L}_{\text{rad}}(\vec{\theta}) \mathcal{L}_{\text{PS}}(\vec{\theta})$$

Энергетический спектр  
с подавленным  $^{11}\text{C}$

Энергетический спектр  
с меченым  $^{11}\text{C}$

Пространственное  
распределение  
событий

Параметр  
разделения событий  
по форме импульса

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

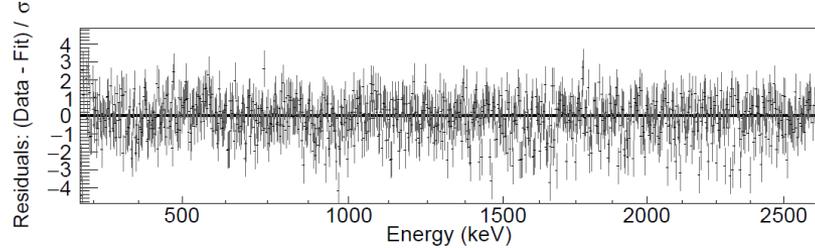
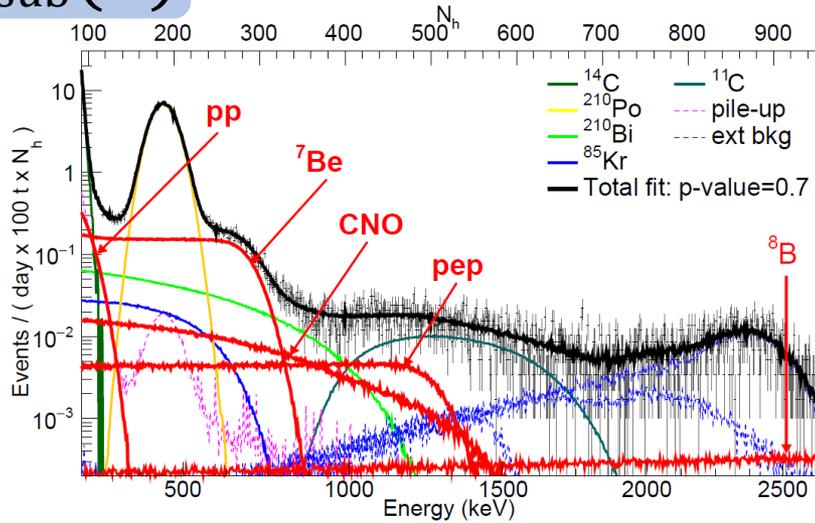
Спектральные компоненты для аппроксимации получают двумя способами:

А) Монте-Карло моделирование, Б) численно-аналитическое вычисление

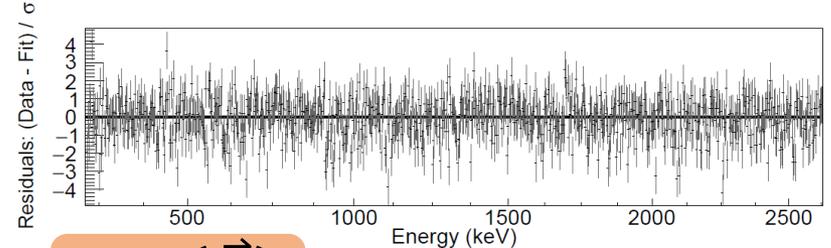
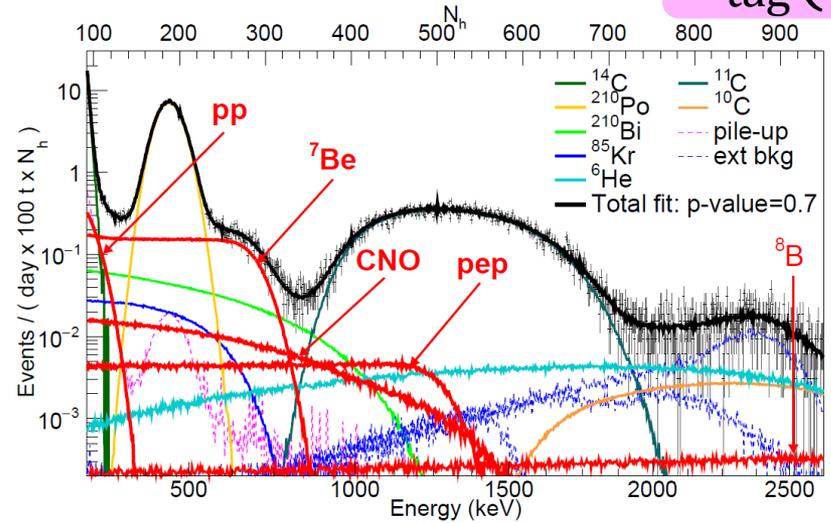
Используются по очереди оба набора спектральных компонентов  
Результаты близки, разница включается в систематическую ошибку

# Результаты аппроксимации

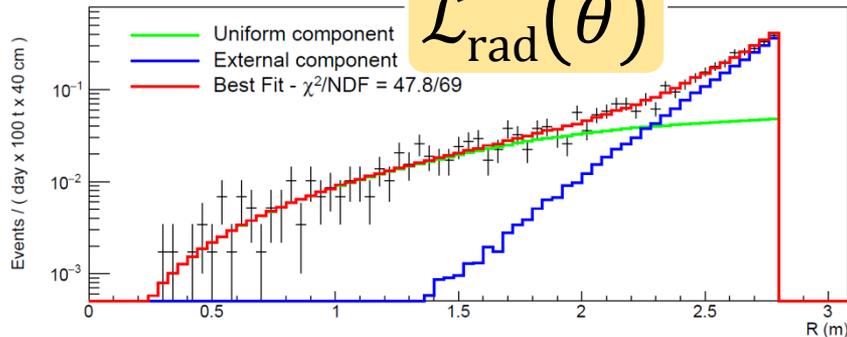
$$\mathcal{L}_{\text{sub}}(\vec{\theta})$$



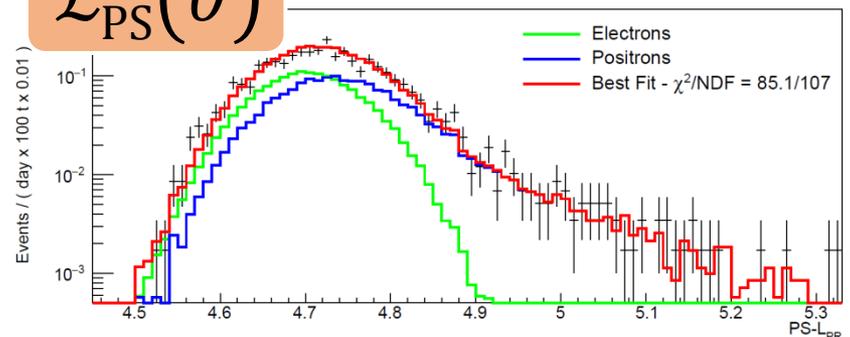
$$\mathcal{L}_{\text{tag}}(\vec{\theta})$$



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



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



# Результаты (аппроксимации)

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

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

## Фоны

Background	Rate [cpd/100 t]
<sup>14</sup> C [Bq/100 t]	$40.0 \pm 2.0$
<sup>85</sup> Kr	$6.8 \pm 1.8$
<sup>210</sup> Bi	$17.5 \pm 1.9$
<sup>11</sup> C	$26.8 \pm 0.2$
<sup>210</sup> Po	$260.0 \pm 3.0$
Ext. <sup>40</sup> K	$1.0 \pm 0.6$
Ext. <sup>214</sup> Bi	$1.9 \pm 0.3$
Ext. <sup>208</sup> Tl	$3.3 \pm 0.1$

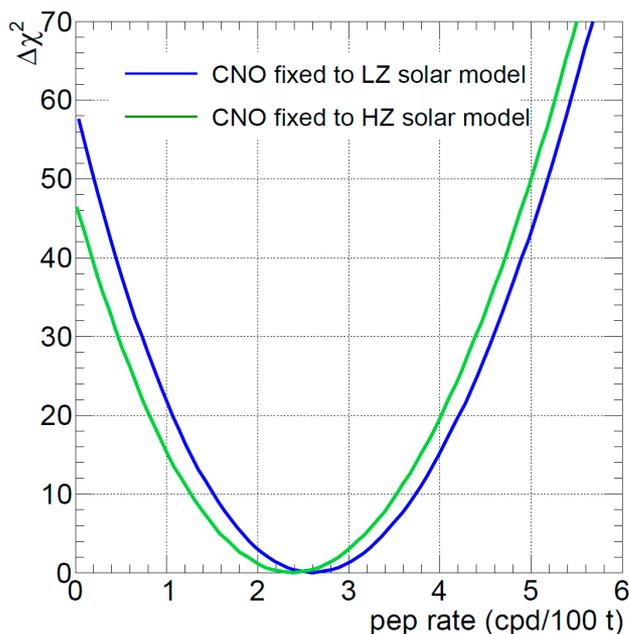
## Систематические ошибки

Source of uncertainty	<i>pp</i>		<sup>7</sup> Be		<i>pep</i>	
	-%	+%	-%	+%	-%	+%
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 <sup>85</sup> 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

<sup>210</sup>Bi, E-шкала, отклик  
**R(<sup>85</sup>Kr) < 7.5 @ 95%**  
**Масса ЖОС**

# Обновленные результаты экспериментаorexino (2018 г.)

	Предыдущие (2014) свд/100 т	Текущие( 2018) свд/100 т	Точность измерений, %	Точность теории (HZ/LZ)
pp-ν	144±13±10	134±10 <sup>+6</sup> <sub>-10</sub>	11.4→10.6	(HZ) 1.8 / (LZ) 1.7
<sup>7</sup> Be-ν	46.0±1.5 <sup>+1.6</sup> <sub>-1.5</sub>	48.3±1.1 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.7</sub>	4.8→ <b>2.7</b>	(HZ) <b>6.1</b> / (LZ) <b>5.9</b>
реp-ν	3.1±0.6±0.3	(HZ) 2.43±0.36 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.22</sub>	(HZ) 22→17	(HZ) 1.8
		(LZ) 2.65±0.36 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.24</sub>	(LZ) 22→16	(LZ) 1.8



## Регистрация реp-ν нейтрино с достоверностью >5σ

**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)  $4.92 \pm 0.55$ , (LZ)  $3.52 \pm 0.37$  свд/100 т (2σ)

В фазе II для разделения CNO-ν и реp-ν использовалось теоретическое отношение потоков pp-ν и реp-ν (слабое ограничение) вместо теоретического значения потока реp-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).*



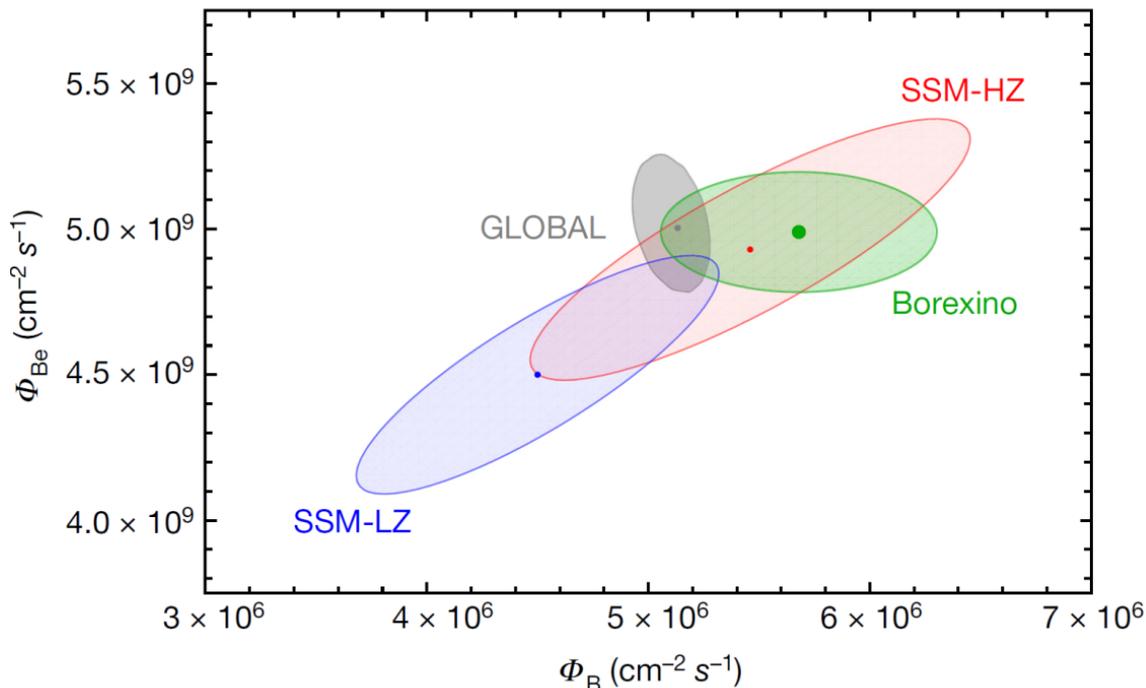
# Улучшен результат по измерению $^8\text{B}-\nu$

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 ( $\gamma$ -кванты из буфера и нейлоновой сферы, космогенный фон,  $\gamma$ -кванты от захватов нейтронов на ядрах C 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, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
$^8\text{B}_{\text{HER-I}}$	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15}$	$5.46 (1.0 \pm 0.12) \times 10^6 \text{ (HZ)}$ $4.50 (1.0 \pm 0.12) \times 10^6 \text{ (LZ)}$
$^8\text{B}_{\text{HER-II}}$	$0.087^{+0.080+0.005}_{-0.010-0.005}$	$5.56^{+0.52+0.33}_{-0.64-0.33}$	
$^8\text{B}_{\text{HER}}$	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}$	
hep	$< 0.002 \text{ (90\% Д.И.)}$	$< 2.2 \times 10^5 \text{ (90\% Д.И.)}$	$7.98 (1.0 \pm 0.30) \times 10^3 \text{ (HZ)}$ $8.25 (1.0 \pm 0.12) \times 10^3 \text{ (LZ)}$

# Влияние значение потоков нейтрино на решение проблемы металличности Солнца



Глобальный фит данных

**BX + KamLAND**

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

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

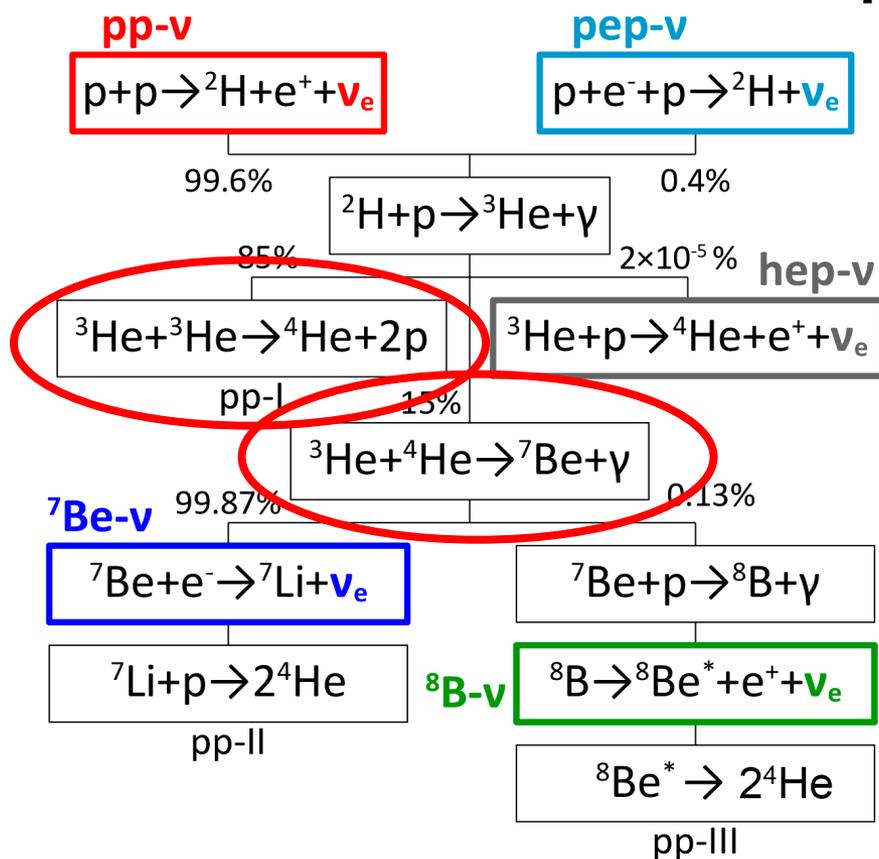
Результаты Borexino для потоков  $^7\text{Be}$  и  $^8\text{B}$  нейтрино (зеленая точка и зеленый эллипс).

Экспериментальные данные о Солнце и KamLAND в глобальном анализ и оставляя свободными параметры осцилляций  $\theta_{12}$  и  $\Delta m_{12}^2$  (серый эллипс, помеченный как GLOBAL).

Теоретический прогноз для низкой металличности (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 согласии 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

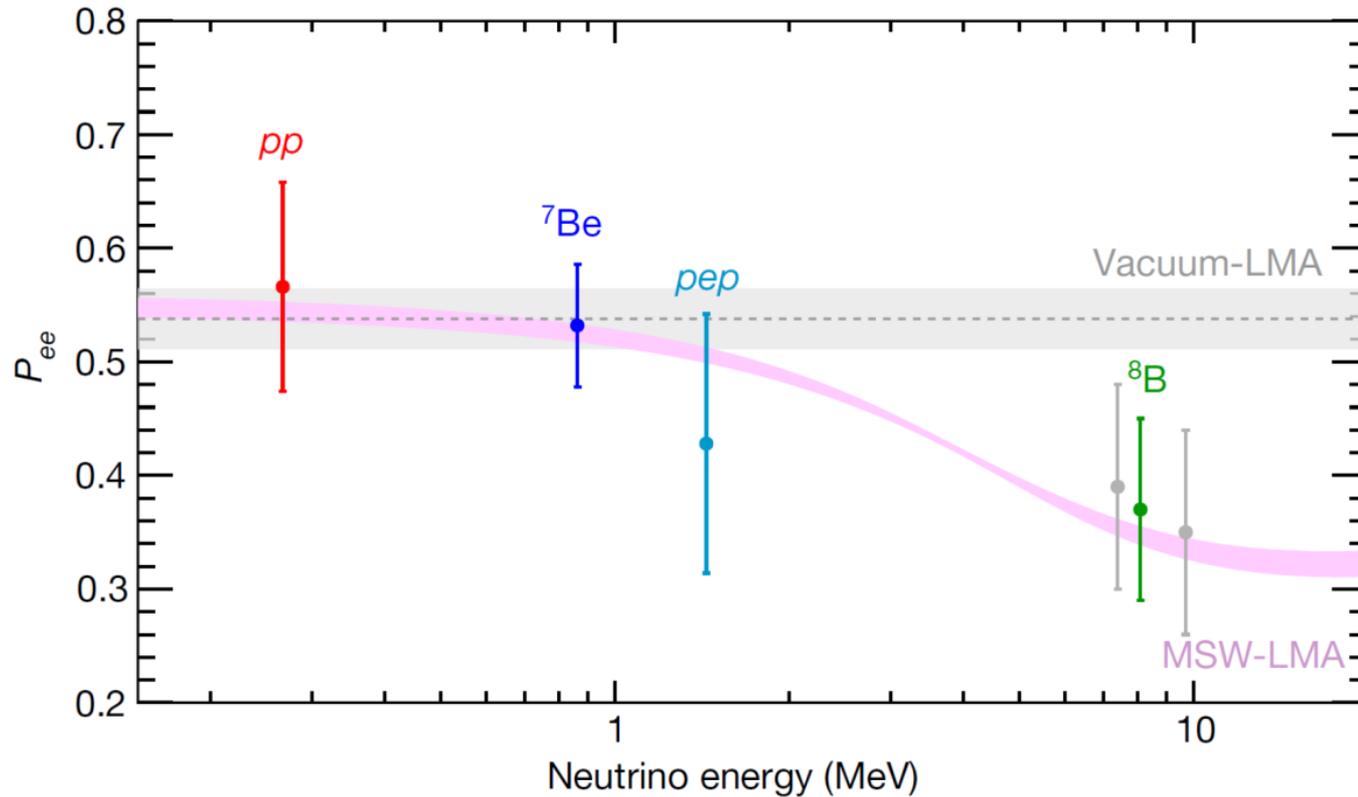
$$R_{\text{HZ}} = 0.180 \pm 0.011$$

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

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 $\nu_e$



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

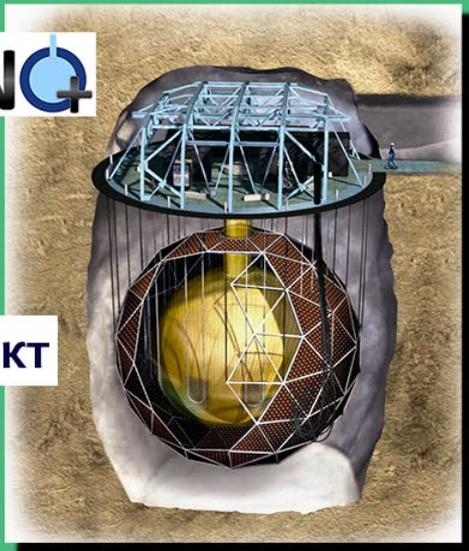
Точки данных представляют результаты Borexino для  $pp$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  $pep$  и  ${}^8\text{B}$  (зеленый) для диапазона ВЭ и серый для отдельного ВЭ-I и поддиапазоны ВЭ-II, предполагая HZ-SSM. Точки данных  ${}^8\text{B}$  и  $pp$  установлены при средней энергии нейтрино, которые производят 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

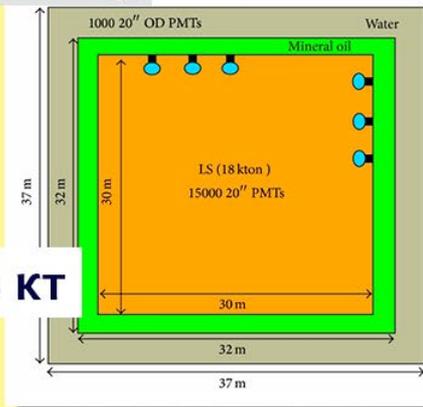


ЧАСТИЧНОЕ ФИНАНСИРОВАНИЕ

RENO

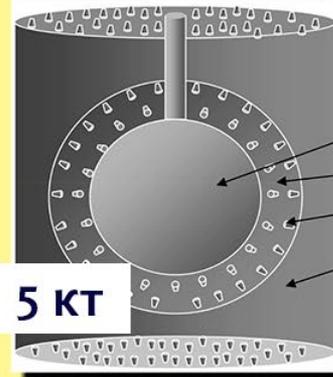
RENO-50 detector

18 КТ



BNO (Baksan)

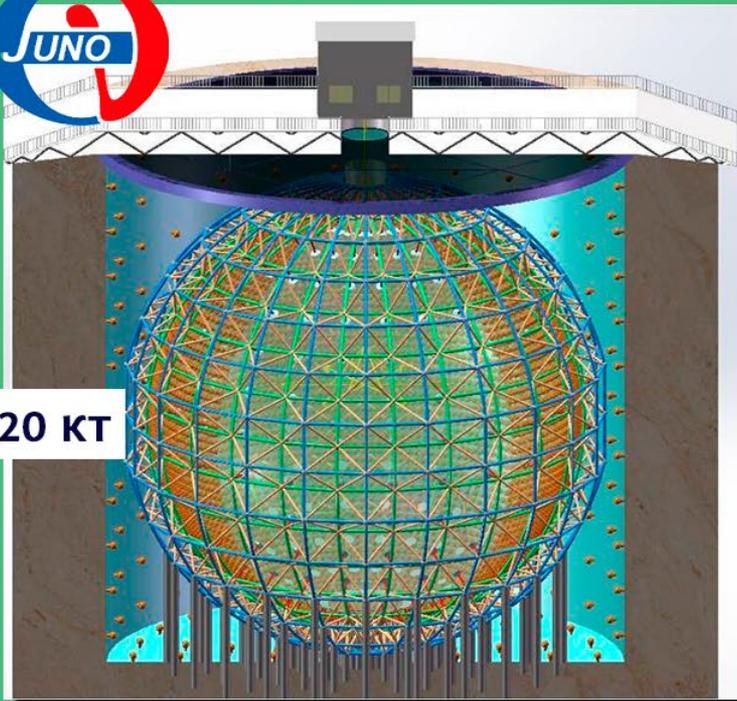
5 КТ



СТРОИТСЯ

JUNO

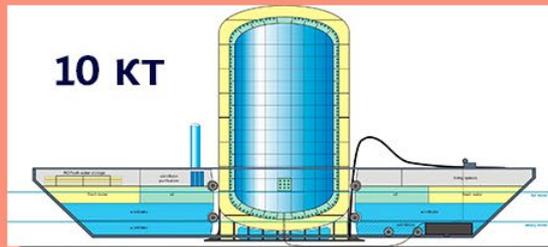
20 КТ



ПРОЕКТЫ

НаноНано  
Нейтринный детектор,  
опускаемый  
на океаническое  
дно с плавучей  
платформы

10 КТ



LENA

50 КТ



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

С наилучшими пожеланиями!

Коллаборация Vorexino



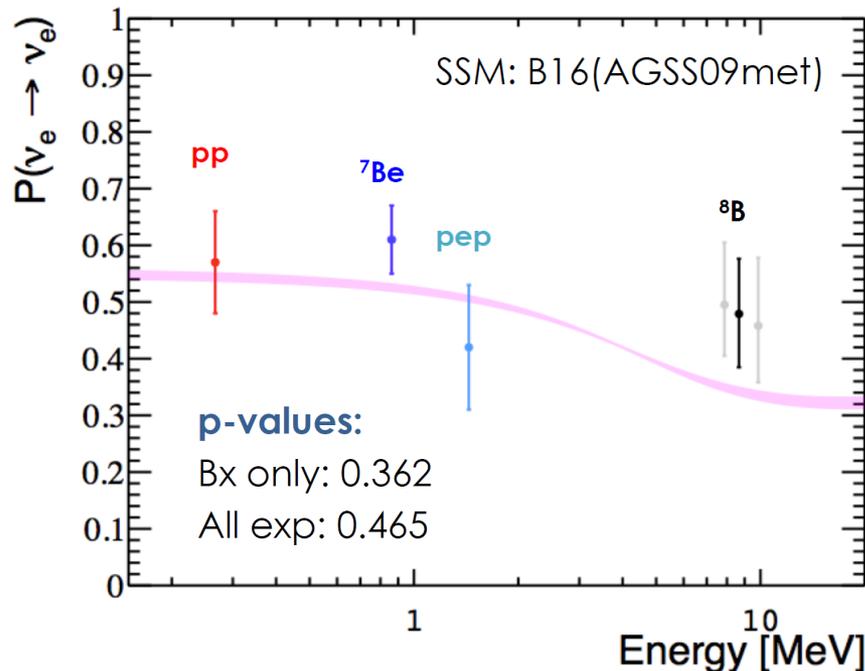
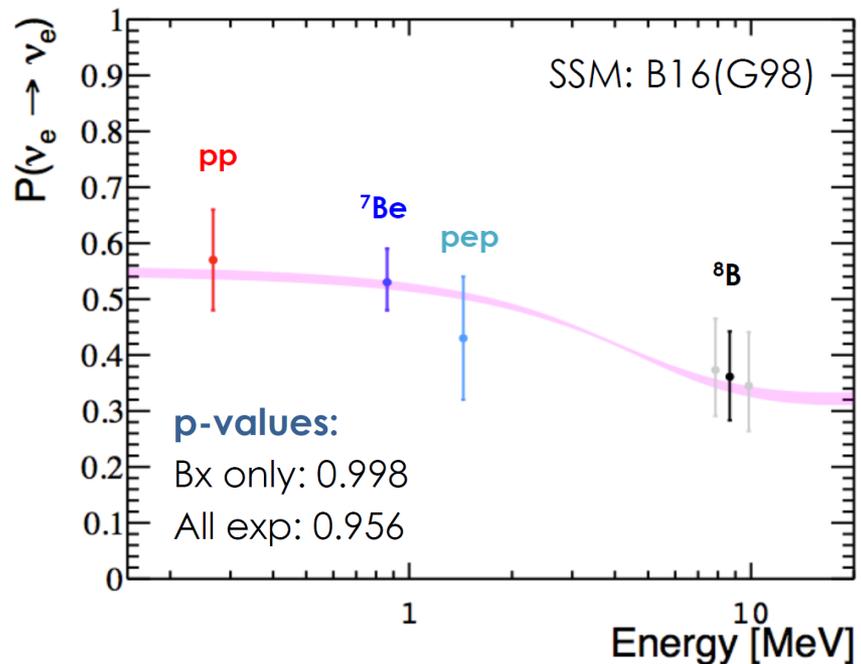
Лето 2017 года



# Влияние результатов MSW/LMA вероятности выживания $\nu_e$ на проблему металличности Солнца

ССМ с высокой металличностью (HZ-SSM)

ССМ с высокой металличностью (LZ-SSM)



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

## Замечания о структуре ошибок:

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

# Измеренные Borexino и ожидаемые из СSM потоки солнечных нейтрино

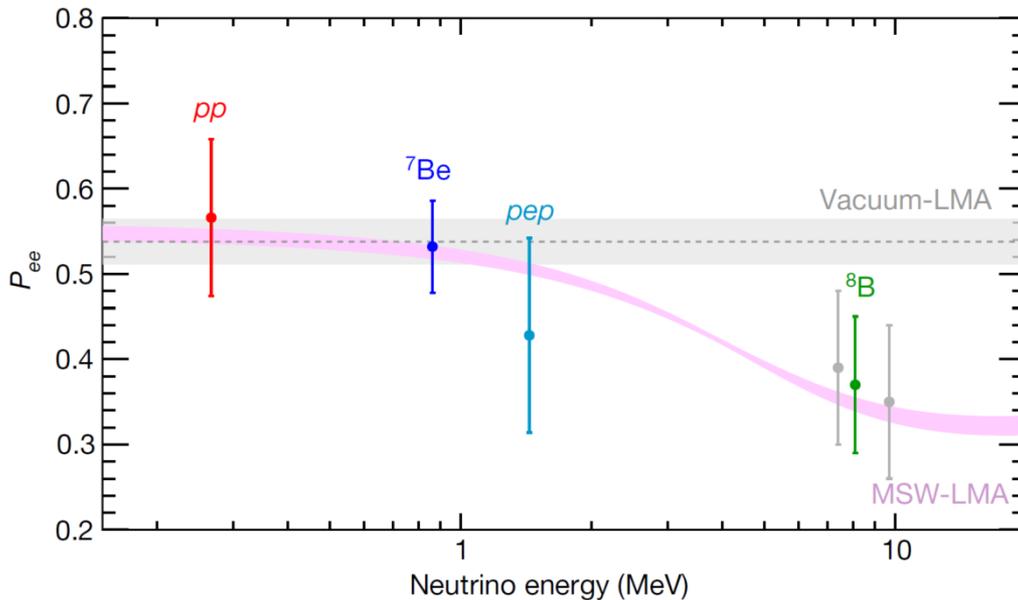
**Table 2 | Borexino experimental solar-neutrino results**

Solar neutrino	Rate (counts per day per 100 t)	Flux ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Flux-SSM predictions ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
$pp$	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1.0 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1.0 \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
${}^7\text{Be}$	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
$pep$ (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
$pep$ (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (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)
${}^8\text{B}_{\text{HER-II}}$	$0.087_{-0.010-0.005}^{+0.080+0.005}$	$(5.56_{-0.64-0.33}^{+0.52+0.33}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
${}^8\text{B}_{\text{HER}}$	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (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)

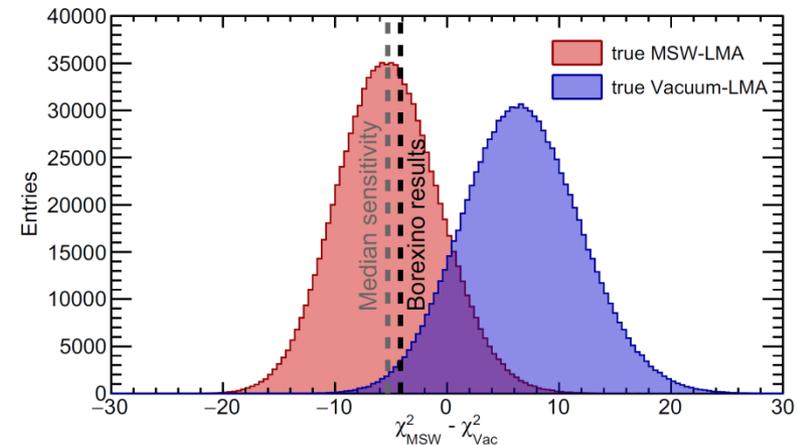
Measured neutrino rates (second column): for  $pp$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  $pep$  and CNO neutrinos we quote the total counts without any threshold; for  ${}^8\text{B}$  and hep neutrinos we quote the counts above the corresponding analysis threshold. Neutrino fluxes (third column) are obtained from the measured rates assuming the MSW-LMA oscillation parameters<sup>19</sup>, standard neutrino–electron cross-sections<sup>27</sup> 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 hypotheses<sup>18</sup>.

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

# 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).

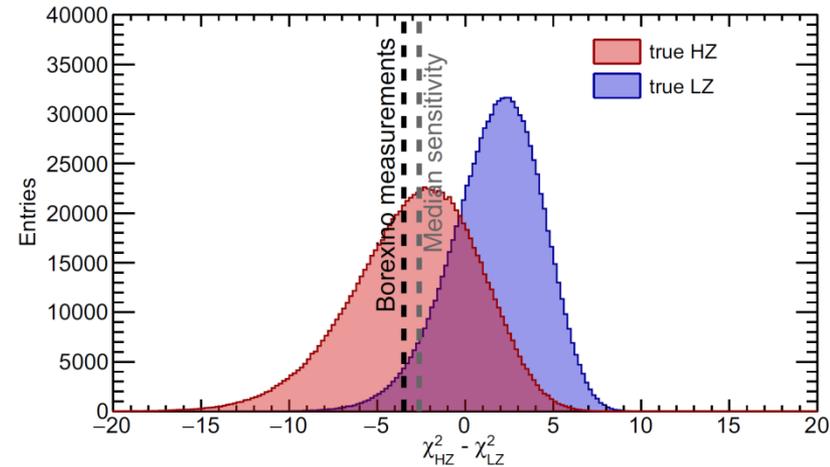
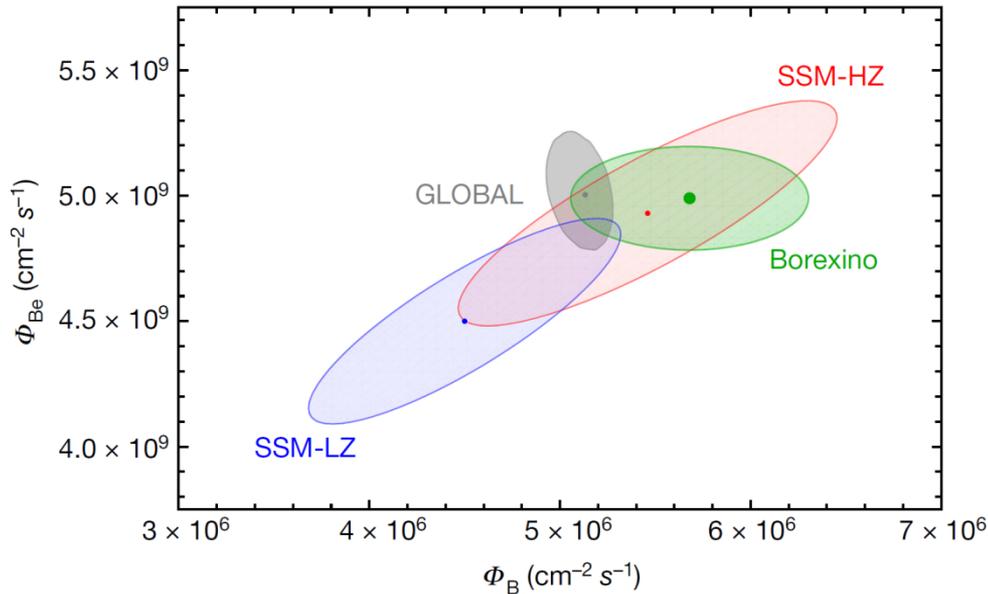


Frequentist hypothesis test of MSW-LMA versus vacuum-LMA

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

**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)**

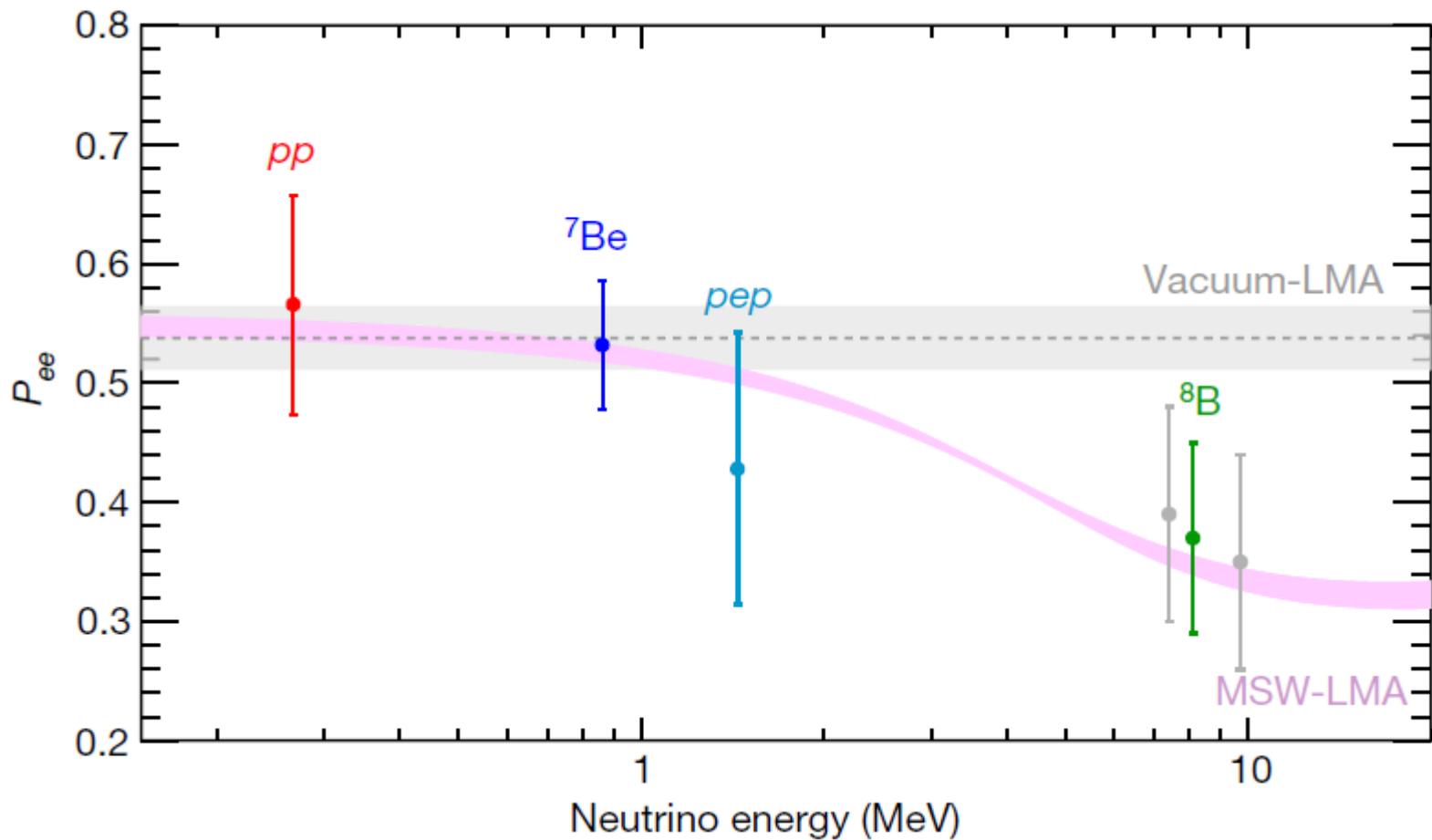
$$f_{\text{Be}} = \frac{\Phi(\text{Be})}{\Phi(\text{Be})_{\text{HZ}}} = 1.01 \pm 0.03$$

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

- **a hint towards the HM :**

Assuming HZ to be true, BX data disfavour LZ at 96.6% C.L.

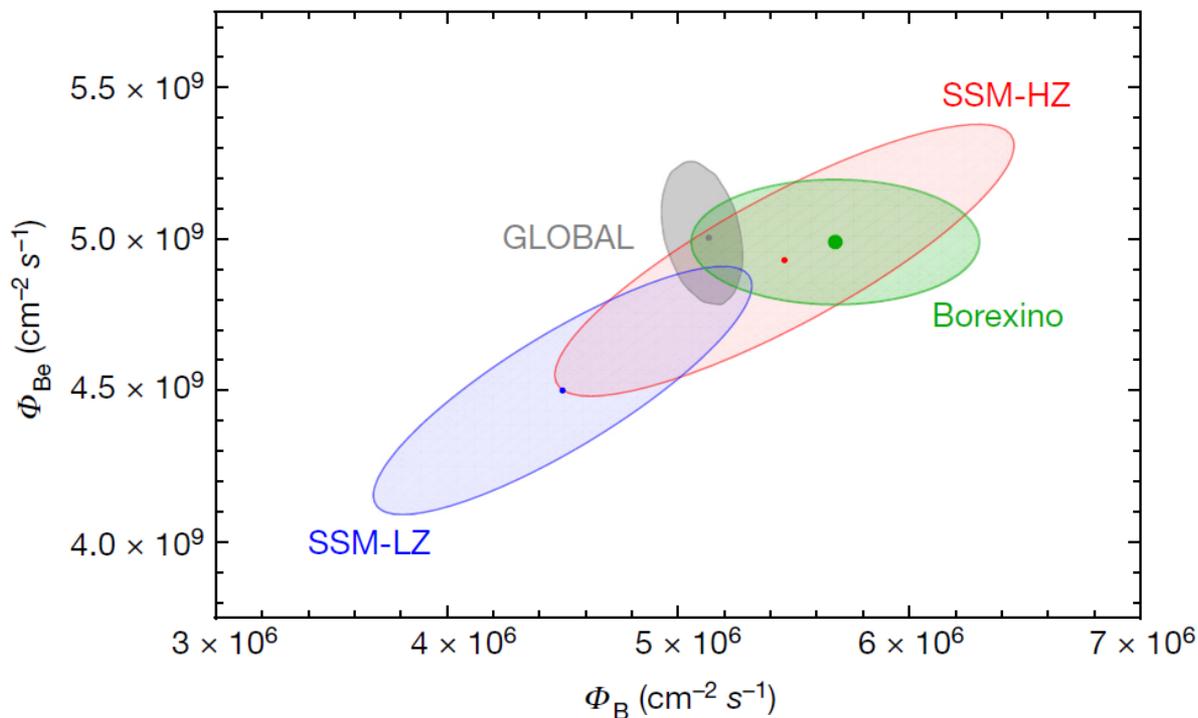
(slightly stronger than the the median sensitivity of 94.2% C.L.).



Вероятность выживания электронного нейтрино  $P_{ee}$  как функция энергии 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),  ${}^7\text{Be}$  (синий),  $pep$  (голубой) и  ${}^8\text{B}$  (зеленый для диапазона HER и серый для отдельного HER-I и поддиапазоны HER-II), предполагая HZ-SSM. Точки данных  ${}^8\text{B}$  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  $\Phi(7\text{Be}) - \Phi(8\text{B})$ .

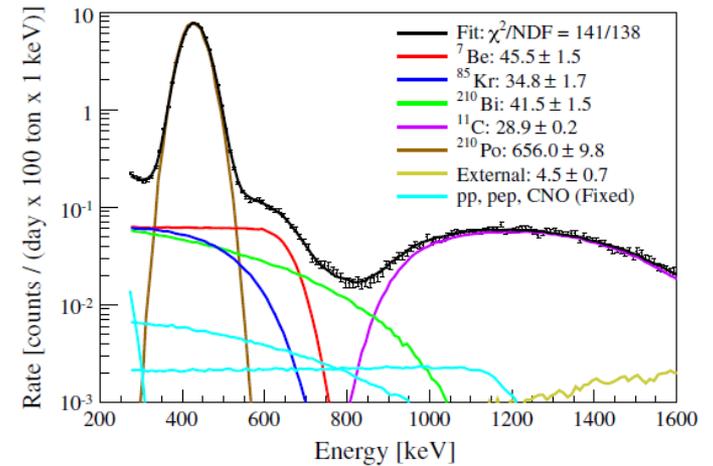
Результаты Borexino для потоков нейтрино  $7\text{Be}$  и  $8\text{B}$  (зеленая точка и затененная площадь). Допустимые контуры в пространстве  $\Phi(7\text{Be}) - \Phi(8\text{B})$  объединяя эти новые результаты со всеми данными о Солнце и КамЛАНД в глобальном анализе и оставляя свободными параметры колебаний  $\theta_{12}$  и  $\Delta m_{21}^2$  (серый эллипс, помеченный как ГЛОБАЛЬНЫЙ). Теоретический прогноз для низкой металличности (LZ) (синий) и с высокой металличностью (HZ) (красный) Standard Solar Модели (SSM) 18 также показаны. Подгонка возвращает следующее колебание параметров:  $\tan 2\theta_{12} = 0,47 \pm 0,03$  и  $\Delta m_{21}^2 = (7,5 \times 10^{-5}) \pm 0,03$ , в согласии 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  $< 5\%$

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

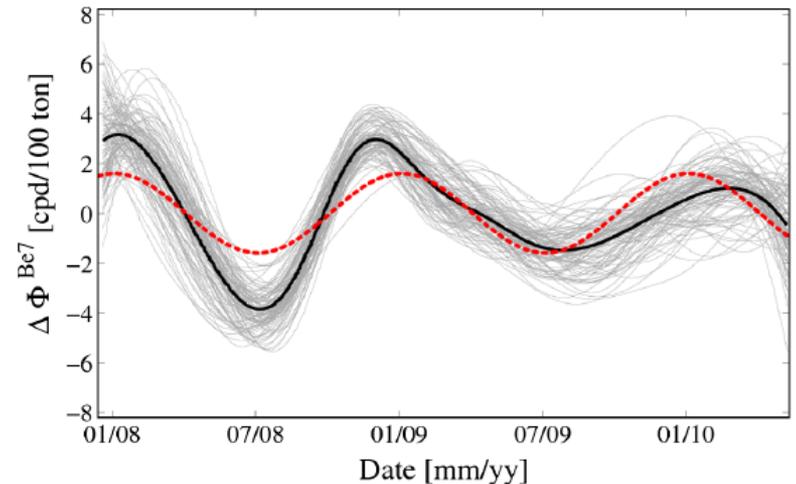
*G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 141302 (2011).*



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 ( $\sim 7\%$ ) показаны на  ${}^7\text{Be}$  нейтрино аналогично результатам SNO и Super KamioKande

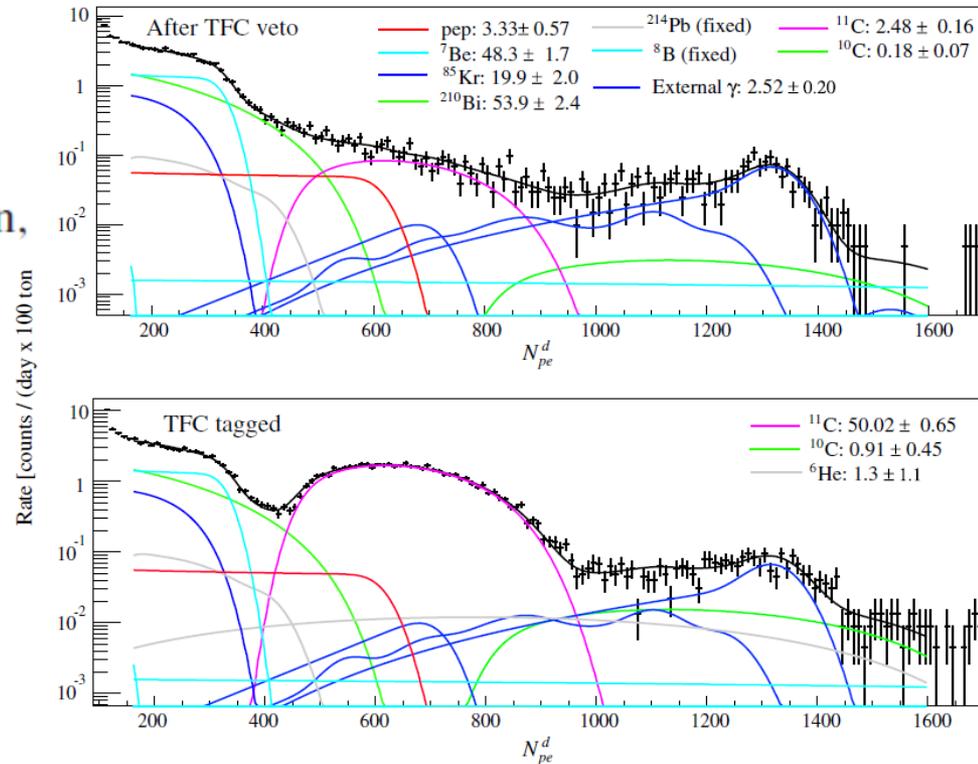
# Результаты по pep и CNO солнечным нейтрино

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

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

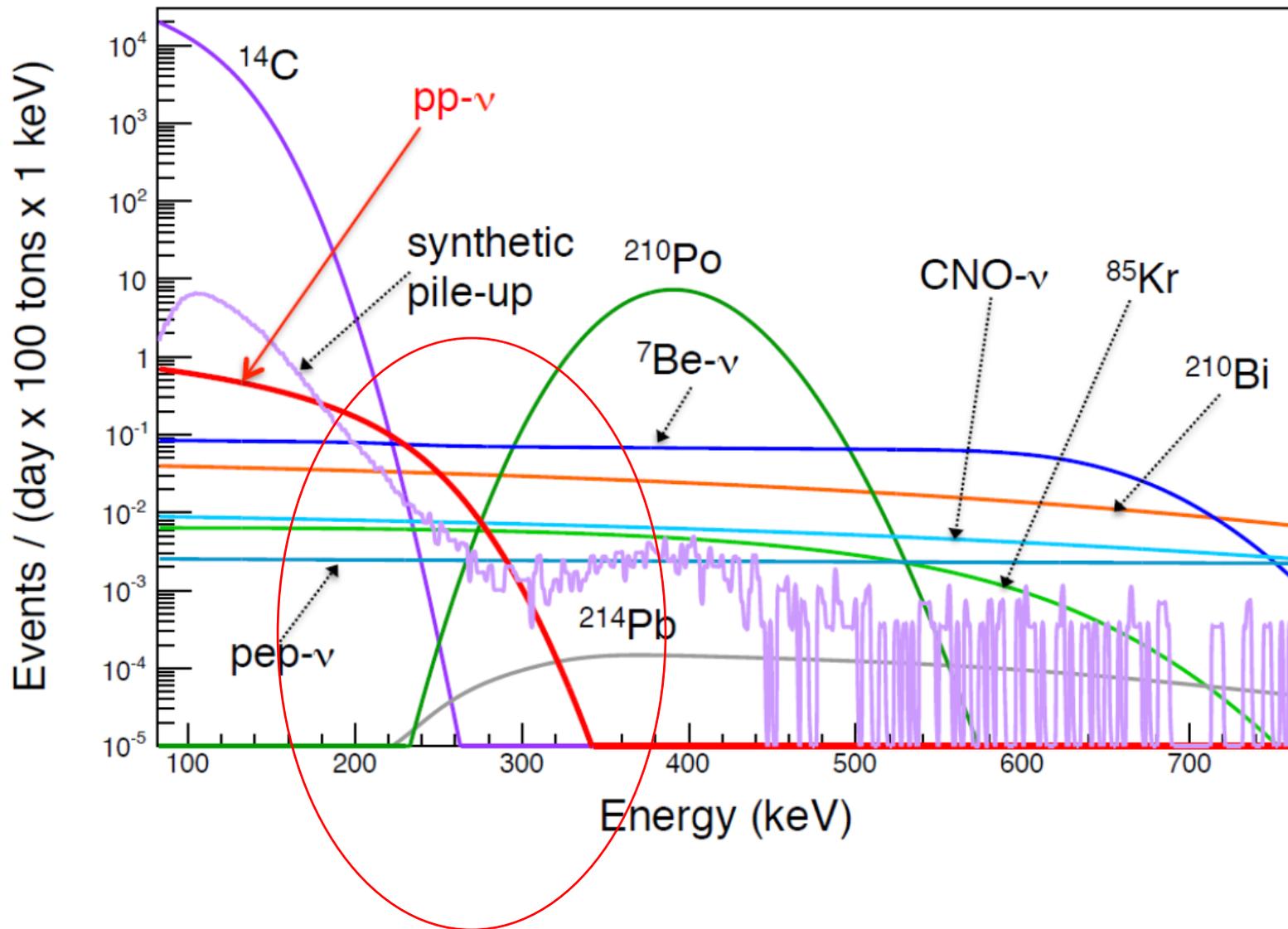
CNO – установлен предел уточнению которого мешает фон от  $^{210}\text{Bi}$  и  $^{11}\text{C}$

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



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

# pp-нейтрино      Спектр регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах

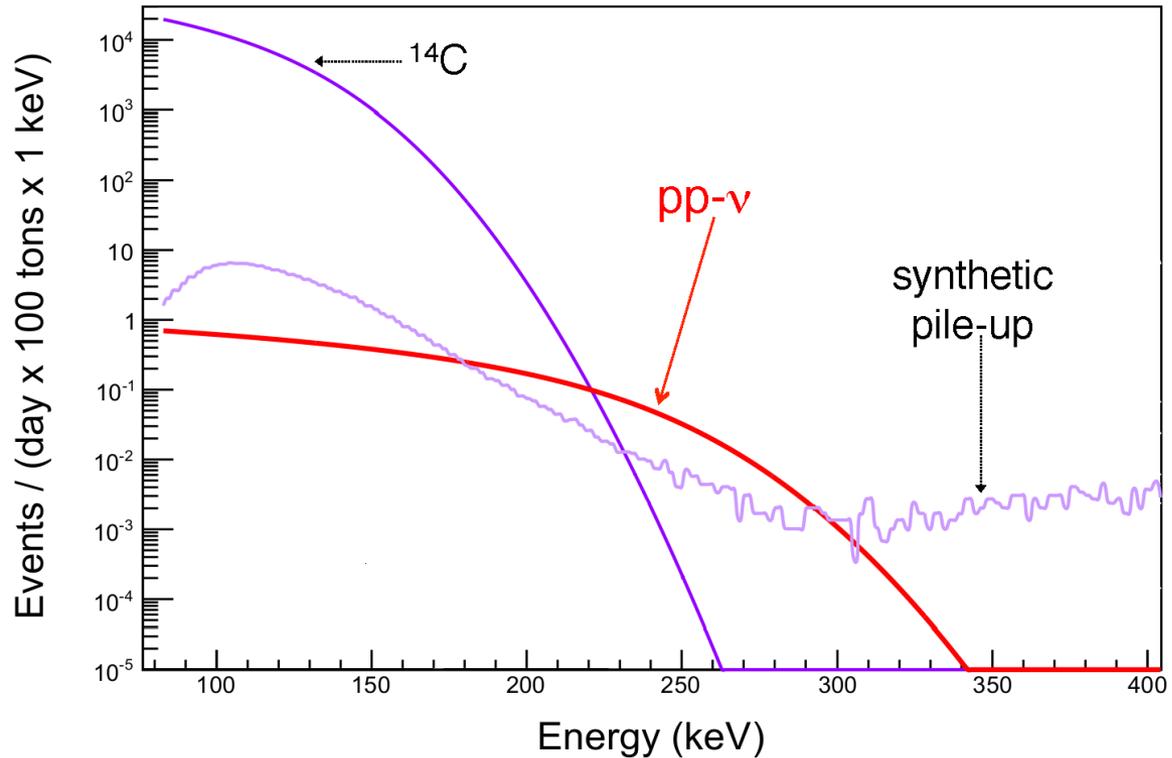


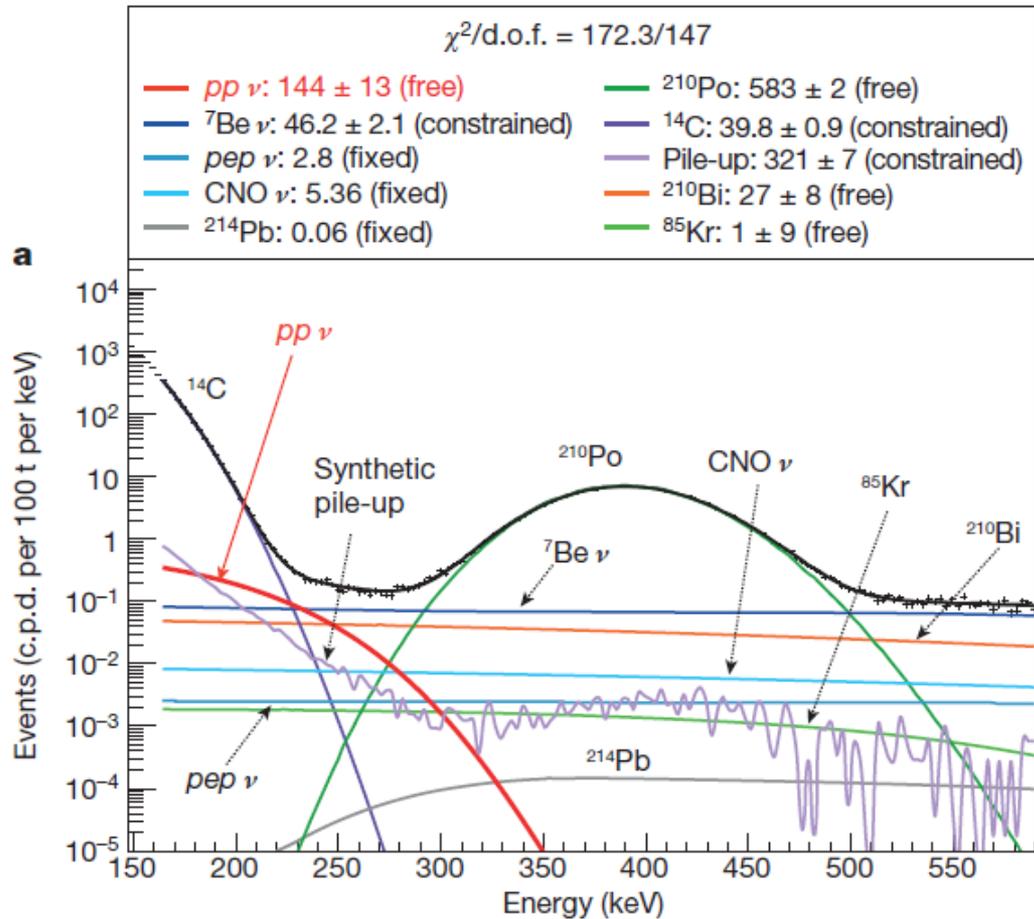
## Как можно измерить $\nu\nu$ нейтрино ?

Граница спектра электронов отдачи - 264 кэВ, главный фон от  $^{14}\text{C}$  – 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  $^{14}\text{C}$





**Впервые был измерен поток пр-нейтрино с точностью ~11%**

**$pp = 144 \pm 13$  (stat)  $\pm 10$  (syst) cpd/100 t  
(MSW/LMA, HM)  $131 \pm 2$  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	$144 \pm 13$	$\pm 10$
$^{85}\text{Kr}$	$1 \pm 9$	$\pm 3$
$^{210}\text{Bi}$	$27 \pm 8$	$\pm 3$
$^{210}\text{Po}$	$583 \pm 2$	$\pm 12$

The best-fit value and statistical uncertainty for each component are listed together with its systematic error. The  $\chi^2$  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

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

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

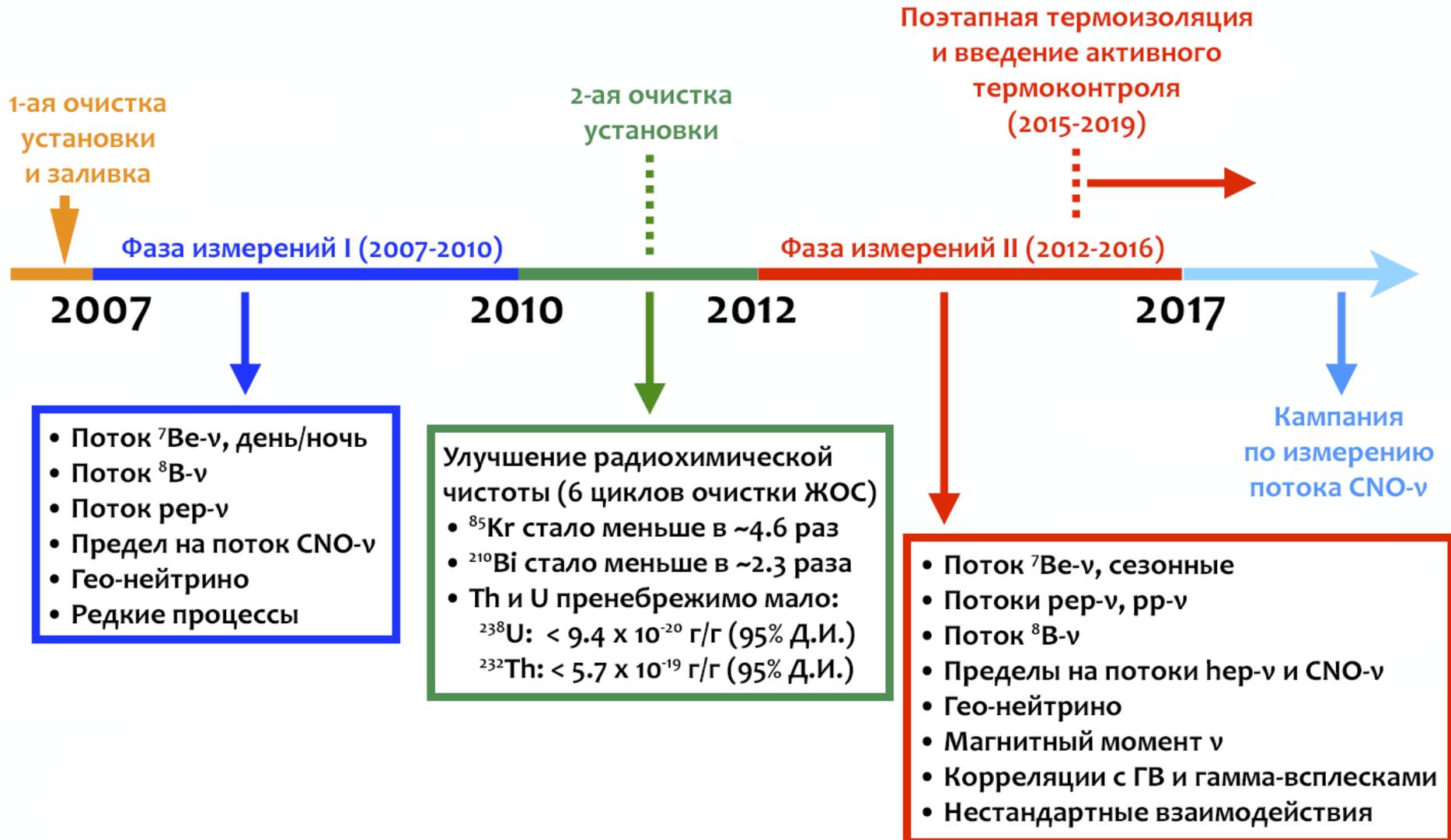
$$\nu_x e \rightarrow \nu_x e \text{ (ES).}$$

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

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

2001 год.

# Научная программа экспериментаorexino

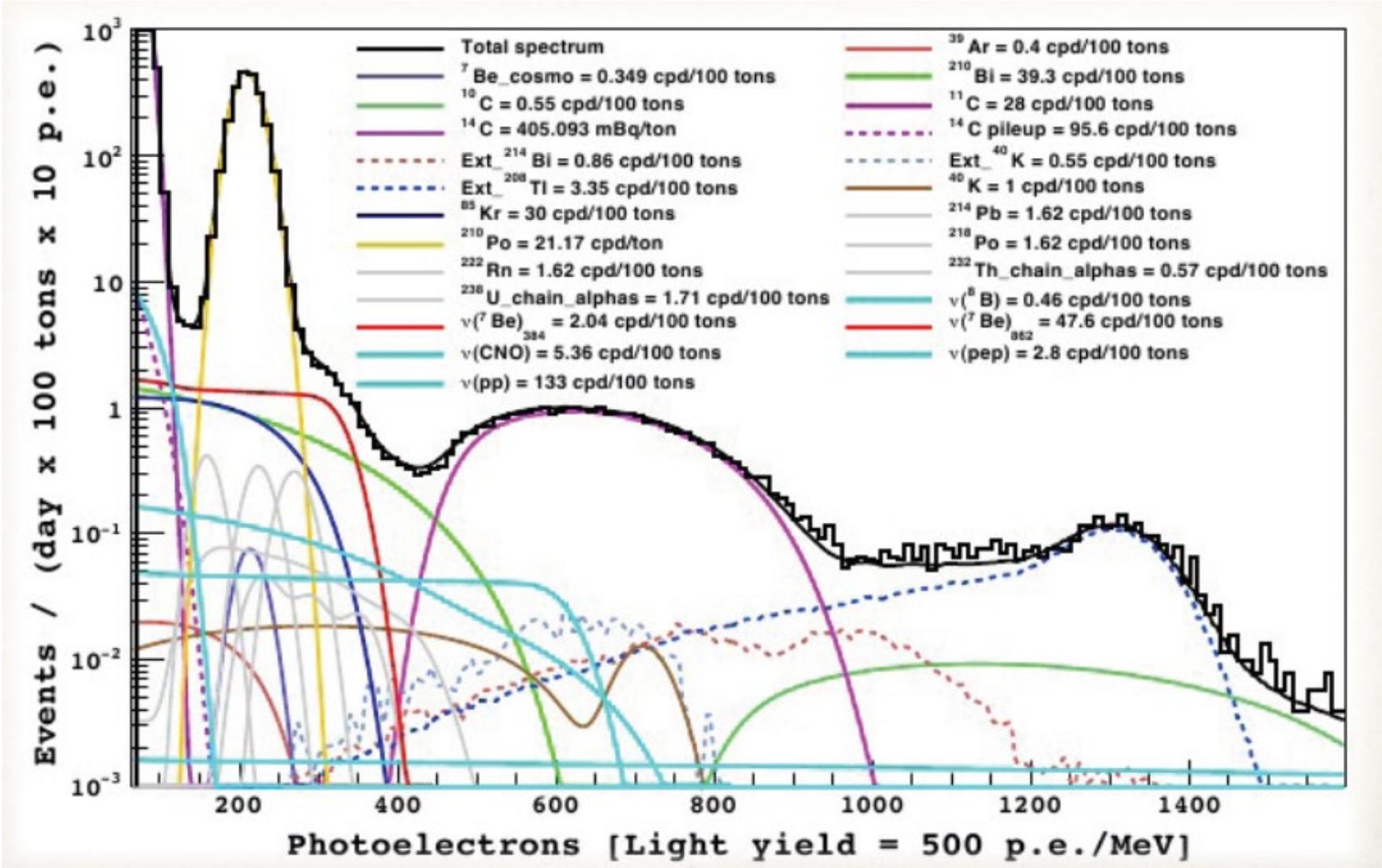


# Радиохимическая чистота сцинтиллятора Vorexino

Нуклид	Ест. распростран. (и источник)	Цель счёт    мас. фр.	Фаза I счёт    мас. фр.	Фаза II счёт    мас. фр.
$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$	$10^{-12}$ г/г (космоген.)	$\sim 10^{-18}$ г/г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ г/г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ г/г
$^{39}\text{Ar}$	17 мБк/м <sup>3</sup> (воздух)	$\sim 1$ свд/100 т	$\ll ^{85}\text{Kr}$	$\ll ^{85}\text{Kr}$
$^{40}\text{K}$	$2 \cdot 10^{-6}$ 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.)
$^{85}\text{Kr}$	1 Бк/м <sup>3</sup> (воздух)	$\sim 1$ свд/100 т	$30.4 \pm 5.5$ свд/100т	$6.8 \pm 1.8$ свд/100 т
$^{210}\text{Bi}$	В равновесии с $^{222}\text{Rn}$ или $^{210}\text{Pb}$	Не указано	$\sim 70$ свд/100 т	$\sim 25$ свд/100 т
$^{210}\text{Po}$	Поверхностные загрязнения	100 свд/100 т	$\sim 6000$ свд/100 т	$\sim 200$ свд/100 т
$^{222}\text{Rn}$	100 атомов/см <sup>3</sup> (воздух)	$\sim 10$ свд/100 т	1 свд/100 т	0.1 свд/100 т
$^{232}\text{Th}$	$10^{-6} - 10^{-5}$ г/г (пыль)	$\sim 10^{-16}$ г/г или $10^{-6}$ Бк/т	$6.8 \pm 1.5$ $10^{-18}$ г/г	$< 5.7 \cdot 10^{-19}$ г/г (95% Д.И.)
$^{238}\text{U}$	$10^{-6} - 10^{-5}$ г/г (пыль)	$\sim 10^{-16}$ г/г или $10^{-6}$ Бк/т	$1.6 \pm 0.1$ $10^{-17}$ 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 Воргехино  
<  $2.4 \times 10^{-7}$  (95% Д.И.)  
бананового эквивалента  
(или 36 мкг)**

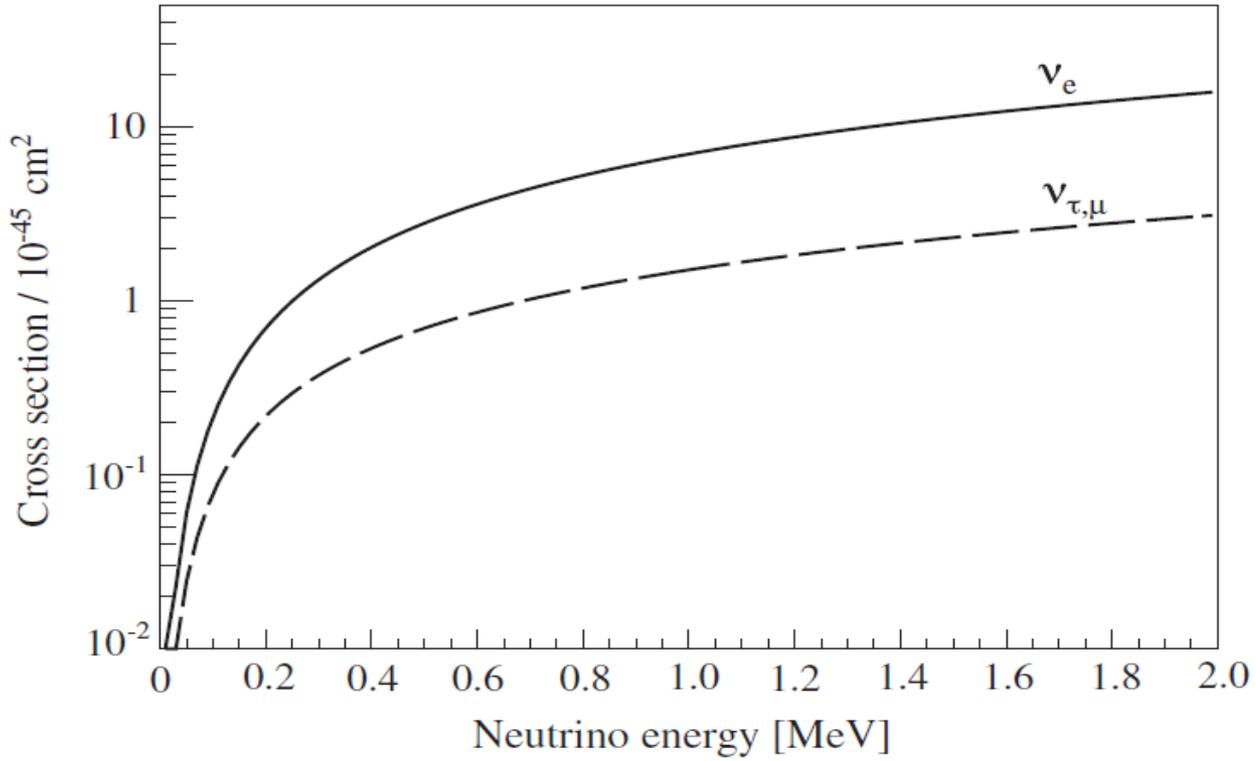


Сечение упругого рассеяния нейтрино на электронах – основной реакции для регистрации нейтрино в детекторе Borexino.



TABLE I. The total  $E_\nu$  is the neutrino energy spectrum. The last column shows the energy spectra of  $e^-$  according to continuous energy spectra, and calculate

Solar $\nu$	$E_\nu$
$pp$	$\leq$
${}^7\text{Be}$	$\leq$
${}^7\text{Be}$	$\leq$
$pep$	$\leq$
${}^{13}\text{N}$	$\leq$
${}^{15}\text{O}$	$\leq$
${}^{17}\text{F}$	$\leq$
${}^8\text{B}$	$\leq$



energy spectra of  $e^-$  according to continuous energy spectra, and calculate

$P_{ee}$
$0.542 \pm 0.016$
$0.537 \pm 0.015$
$0.524 \pm 0.014$
$0.514 \pm 0.012$
$0.528 \pm 0.014$
$0.517 \pm 0.013$
$0.517 \pm 0.019$
$0.384 \pm 0.009$