



Прямое наблюдение основных реакций термоядерного синтеза на Солнце в эксперименте BOREXINO

Чепурнов А.С., Громов М.Б.

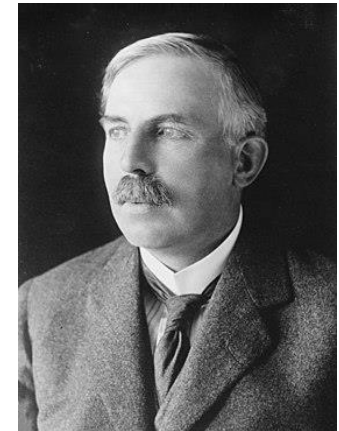
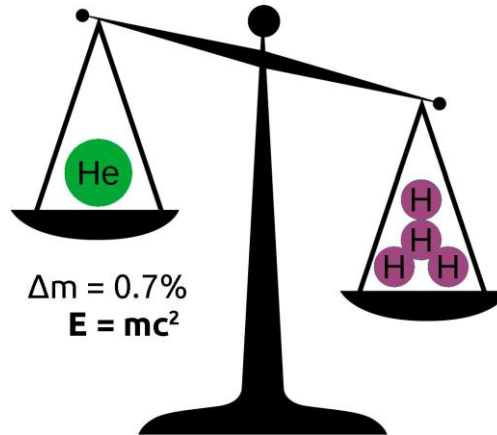
Научная сессия к 75-летию НИИЯФ МГУ 15-17.02.2021

Какой источник энергии питает звезды ?

Теоретическое решение проблемы горения Солнца



*Arthur Stanley
Eddington*



Ernest Rutherford

“Температура в центре Солнца - 20 МК” (15,5 МК)

«Туннельный эффект !»

Р.Аткинсон и Ф.Хаутерманс
(1929 г)

+

=>

Г.А.Гамов
Теория α-распада



Carl F. von Weizsacker

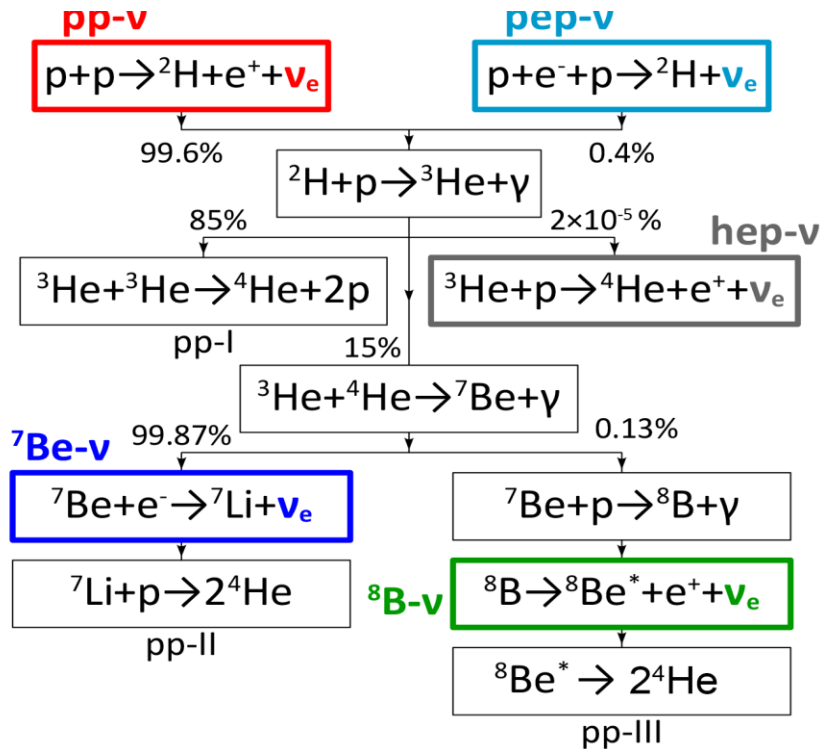


*Hans Bethe
(Nobel 1967)*

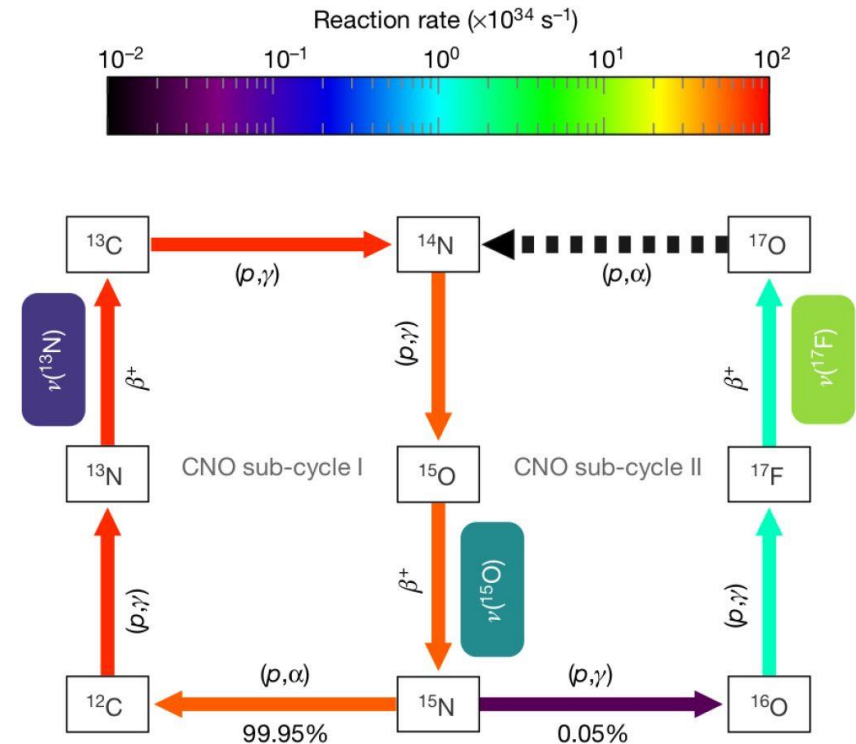
Источником энергии Солнца является «горение» водорода
в термоядерных реакциях в pp и CNO циклах (1938)

Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий

pp-цикл (99% энергии Солнца)



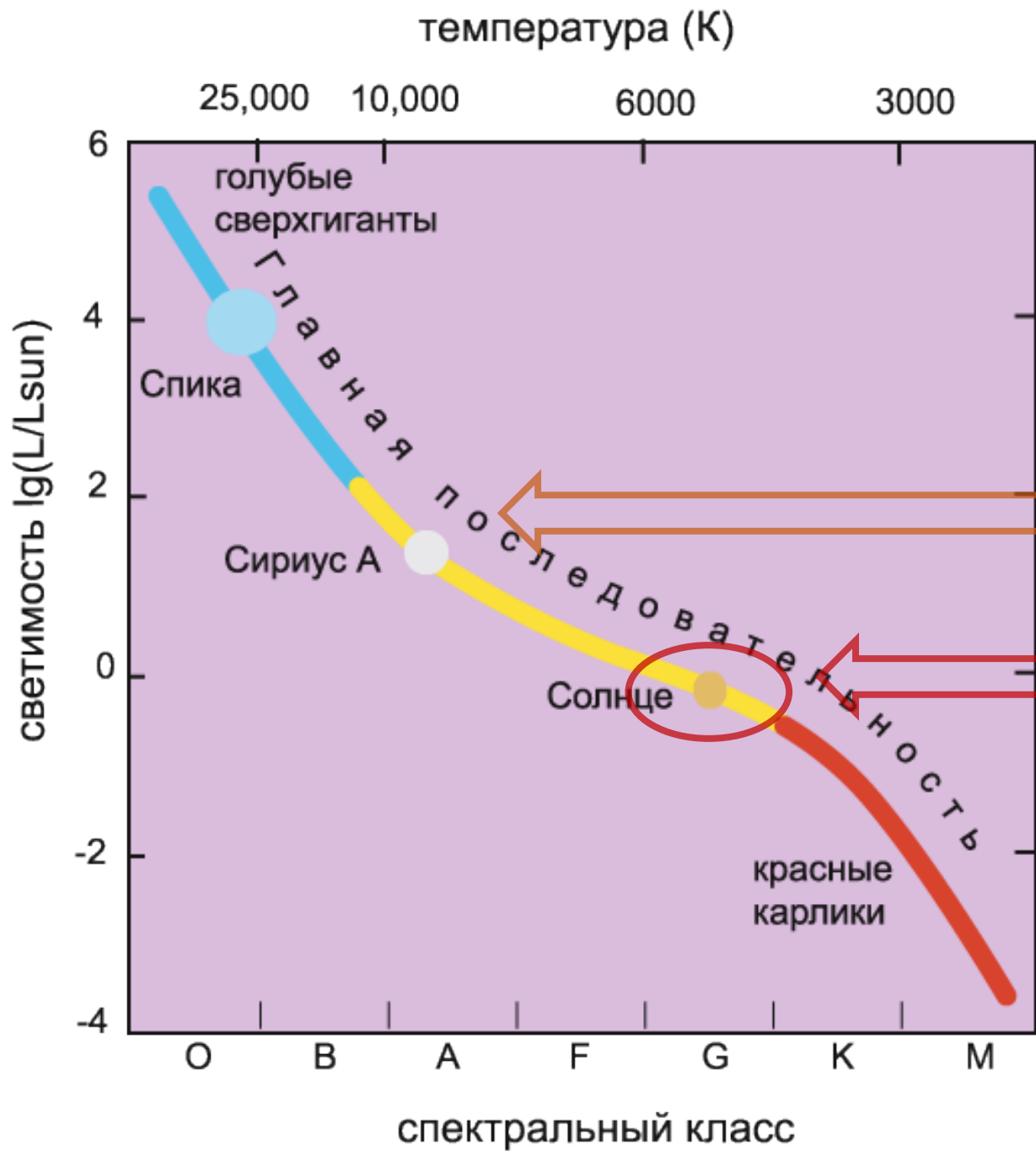
CNO-цикл (1% энергии Солнца)



- 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).

- ${}^{12}\text{C}$ - катализатор реакции
- Bethe, H. Energy production in stars. *Phys. Rev.* 55, 434 (1939).

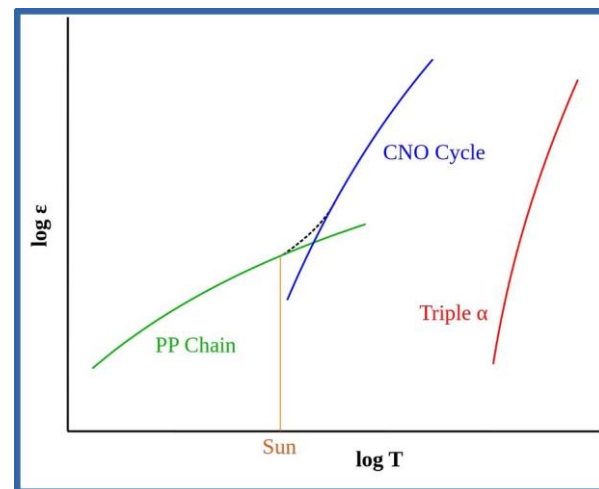
Исследование потоков нейтрино (счетный метод и спектроскопия) в настоящее время считается единственным прямым методом исследованием ядра Солнца и прояснения вопроса об источнике солнечной энергии



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

Доминирование CNO-цикла

Доминирование pp-цикла

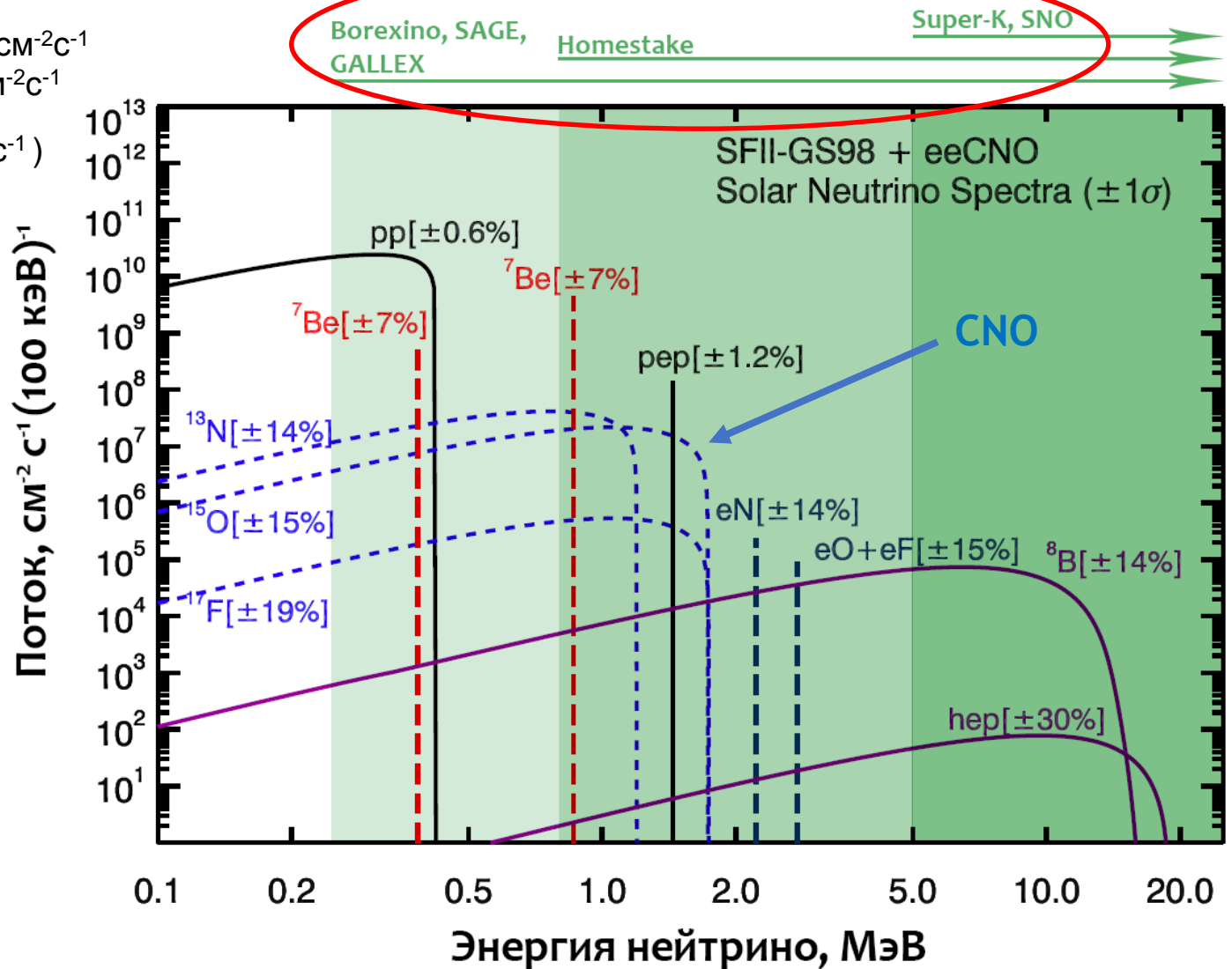


Спектры солнечных нейтрино по данным Стандартной Солнечной Модели

pp 90% - $\sim 6.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
 ${}^7\text{Be}$ 10% - $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

($< 1\% \text{ } {}^8\text{B}$ - $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$)

Металличность Солнца
 ($Z > 2$)
 HZ ? LZ

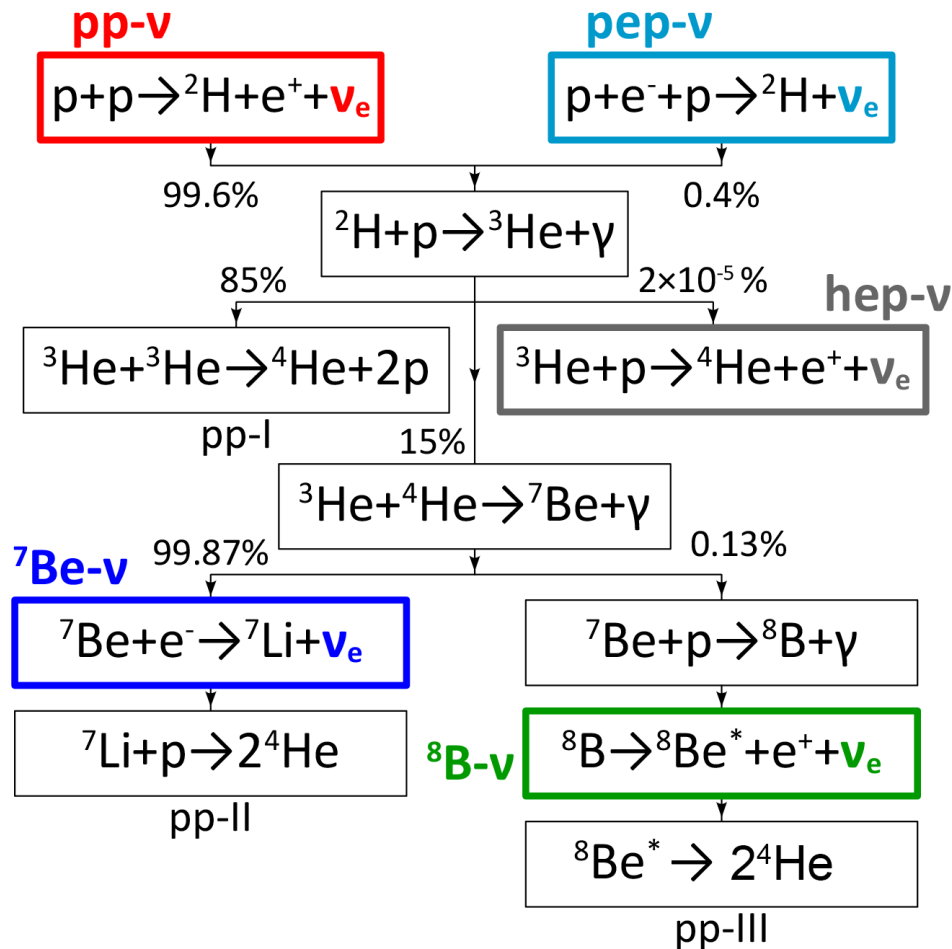


Bahcall, J. N. *Neutrino Astrophysics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989).

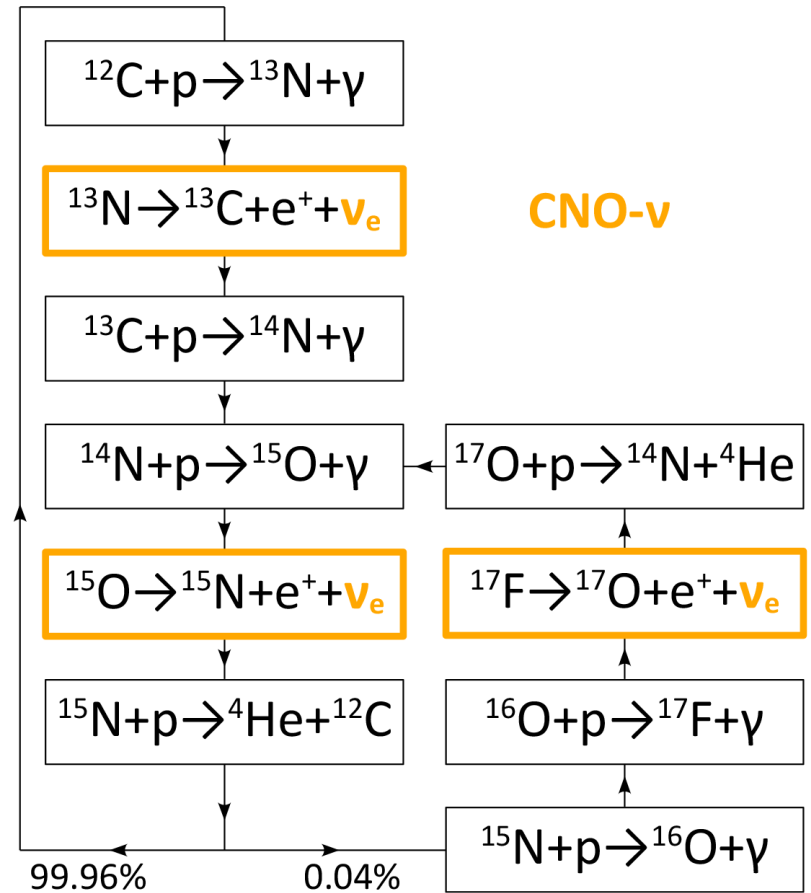
Vinyoles, N. et al. *A new generation of standard solar models*. *Astrophys. J.* 835, 202 (2017).

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).



Borexino Collaboration



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



PRINCETON
UNIVERSITY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"



St. Petersburg
Nuclear Physics Inst.



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM



НИИЯФ
МГУ
SKOBELTSYN INSTITUTE OF
NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE
UNIVERSITY



Joint Institute for
Nuclear Research



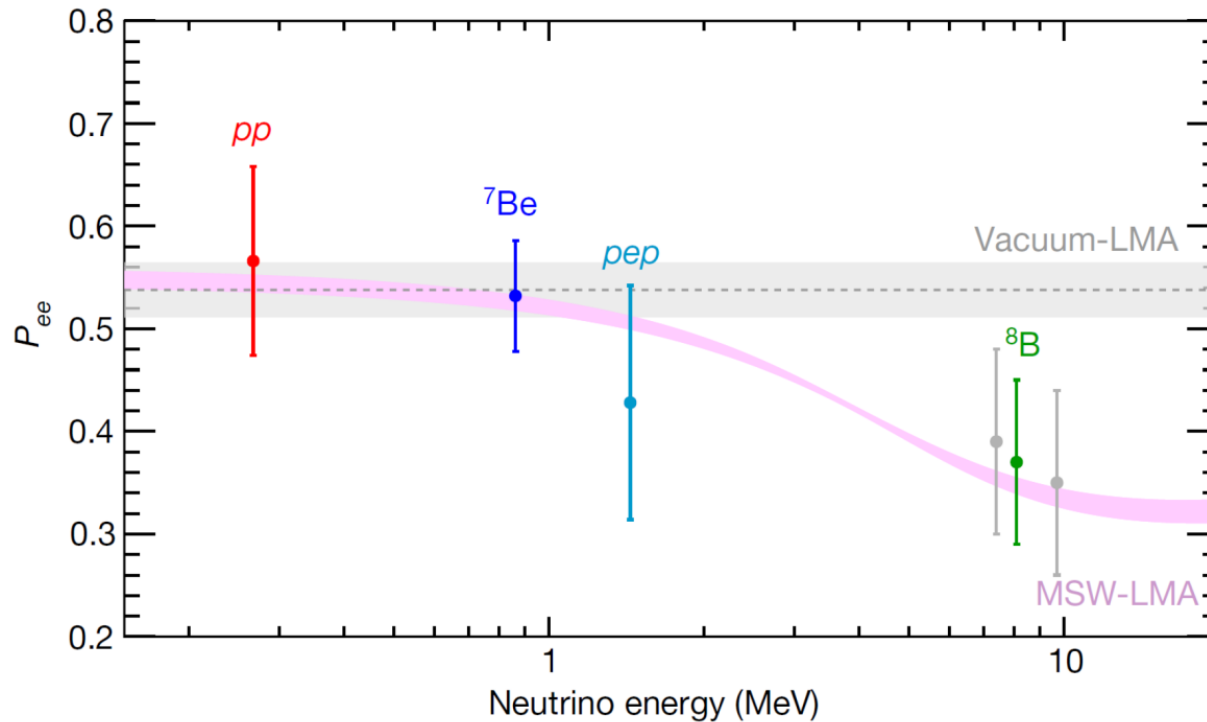
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

Основные результаты эксперимента Борексино в исследовании солнечных нейтрино (2020 г.)

| Тип нейтрино | Ссылки | Скорость счета [cpd/100t] | Поток [cm ⁻² s ⁻¹] |
|-----------------|---|---------------------------------------|---|
| pp | Nature 2014, Nature 2018, PRD 2019 | $134 \pm 10_{-10}^{+6}$ | $6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3} \times 10^{10}$ |
| ⁷ Be | PLB 2008, PRL 2011, Nature 2018, PRD 2019 | $48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$ | $4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06} \times 10^9$ |
| pep | PRL 2012, Nature 2018 PRD 2019 | $2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$ | $1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08} \times 10^8$ |
| ⁸ B | PRD 2010, Nature 2018, PRD 2020 | $0.223_{-0.022}^{+0.021}$ | $5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03} \times 10^6$ |
| hep | Nature 2018 | <0.002 (90% CL) | <2.2x10 (90% CL) |
| CNO | Nature 2020 | $7.2_{-1.7}^{+3.0}$ | $7.0_{-2.0}^{+3.0} \times 10^8$ |

Проверка MSW/LMA через вероятность выживания ν_e по данным эксперимента Борексино

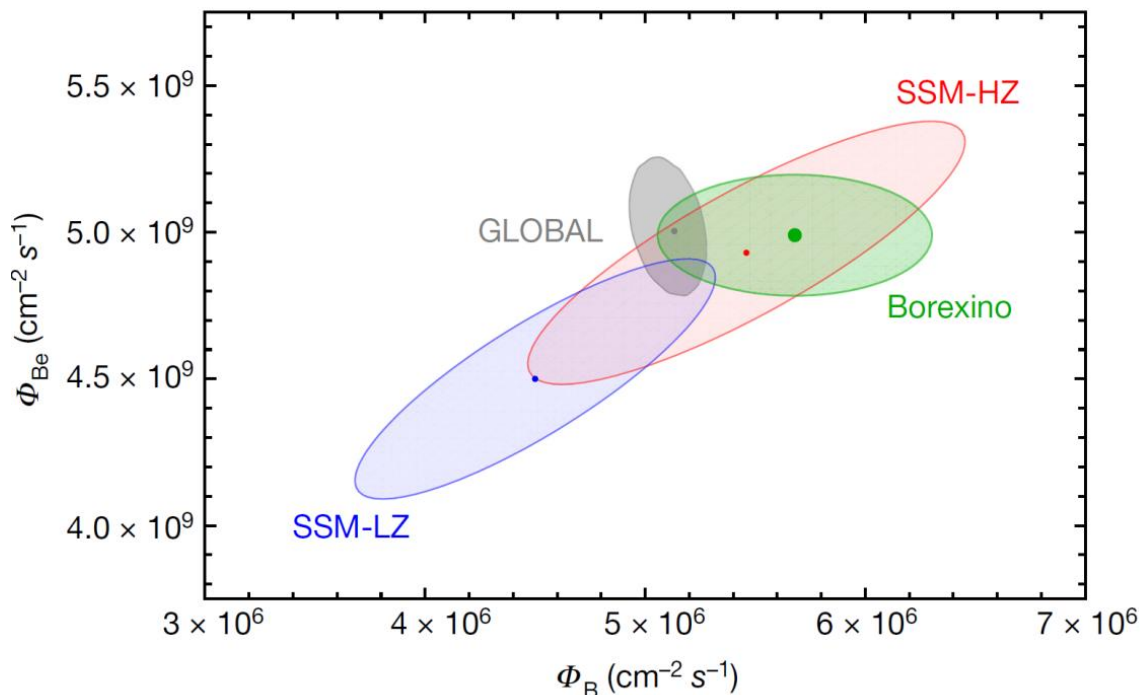


Вероятность выживания электронного нейтрино P_{ee} как функция энергии нейтрино. Точки данных представляют результаты Борексино для pp , ${}^7\text{Be}$, pep и ${}^8\text{B}$ (зеленый) предполагая NZ-SSM.

Столбики ошибок включают экспериментальные и теоретические неопределенности.

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

Влияние значений измеренных потоков нейтрино на решение проблемы металличности Солнца



Глобальный фит данных

BX + KamLAND

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

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

Результаты Borexino для потоков ^7Be и ^8B нейтрино (зеленая точка и зеленый эллипс).

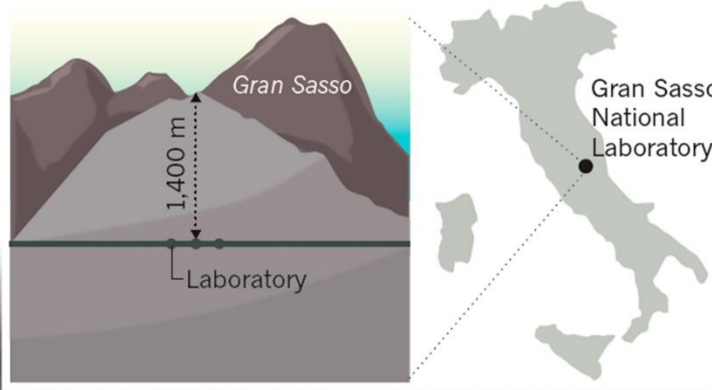
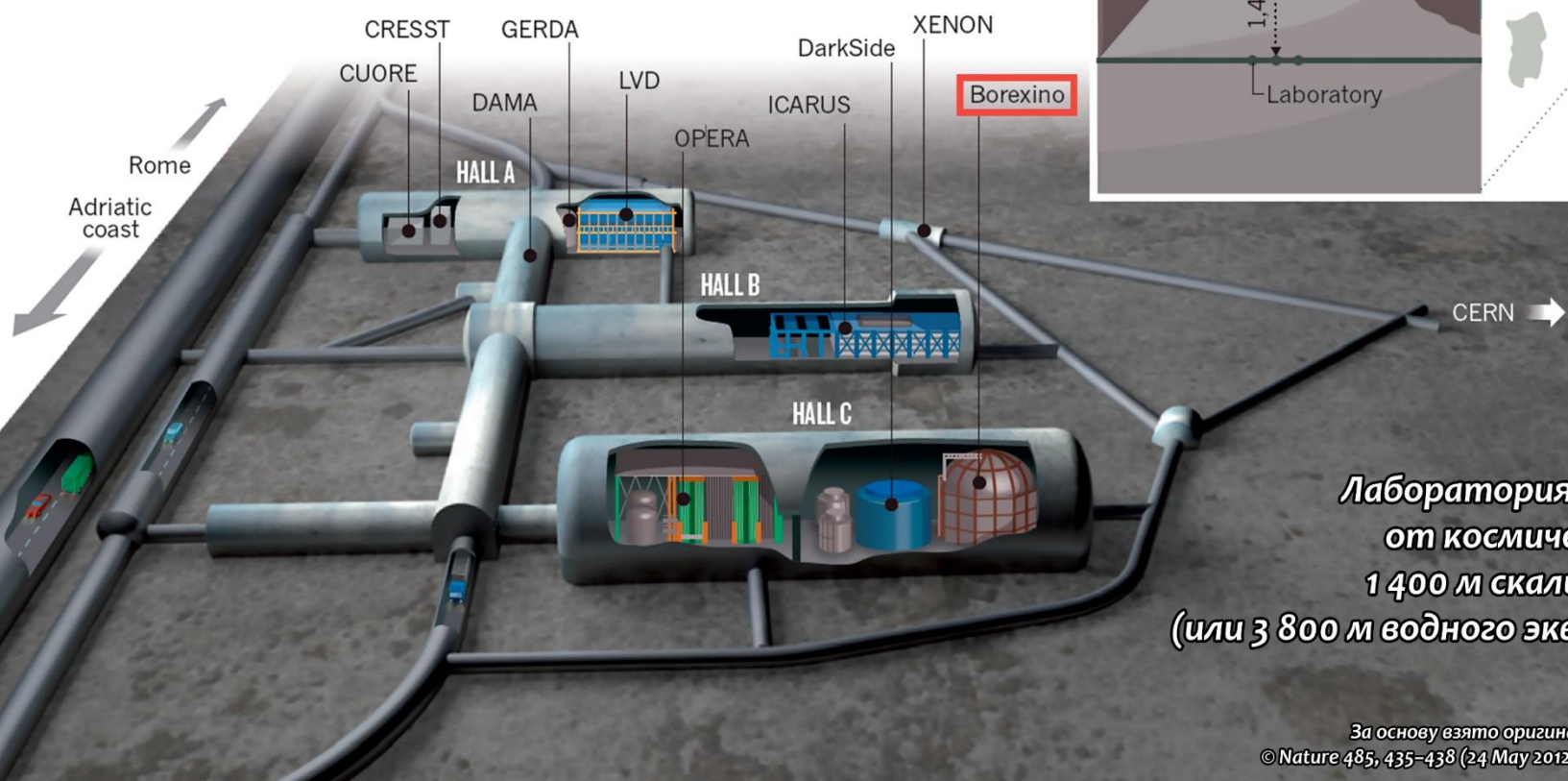
Экспериментальные данные о Солнце и KamLAND в глобальном анализ и оставляя свободными параметры осцилляций θ_{12} и Δm_{12}^2 (серый эллипс, помеченный как GLOBAL).

Теоретический прогноз для низкой металличности (LZ) (синий) и с высокой металличностью (HZ) (красный) Standard Solar Модели (SSM) 18 также показаны. 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.



РАСПОЛОЖЕНИЕ ДЕТЕКТОРА **BOREXINO** В НАЦИОНАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГРАН-САССО



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

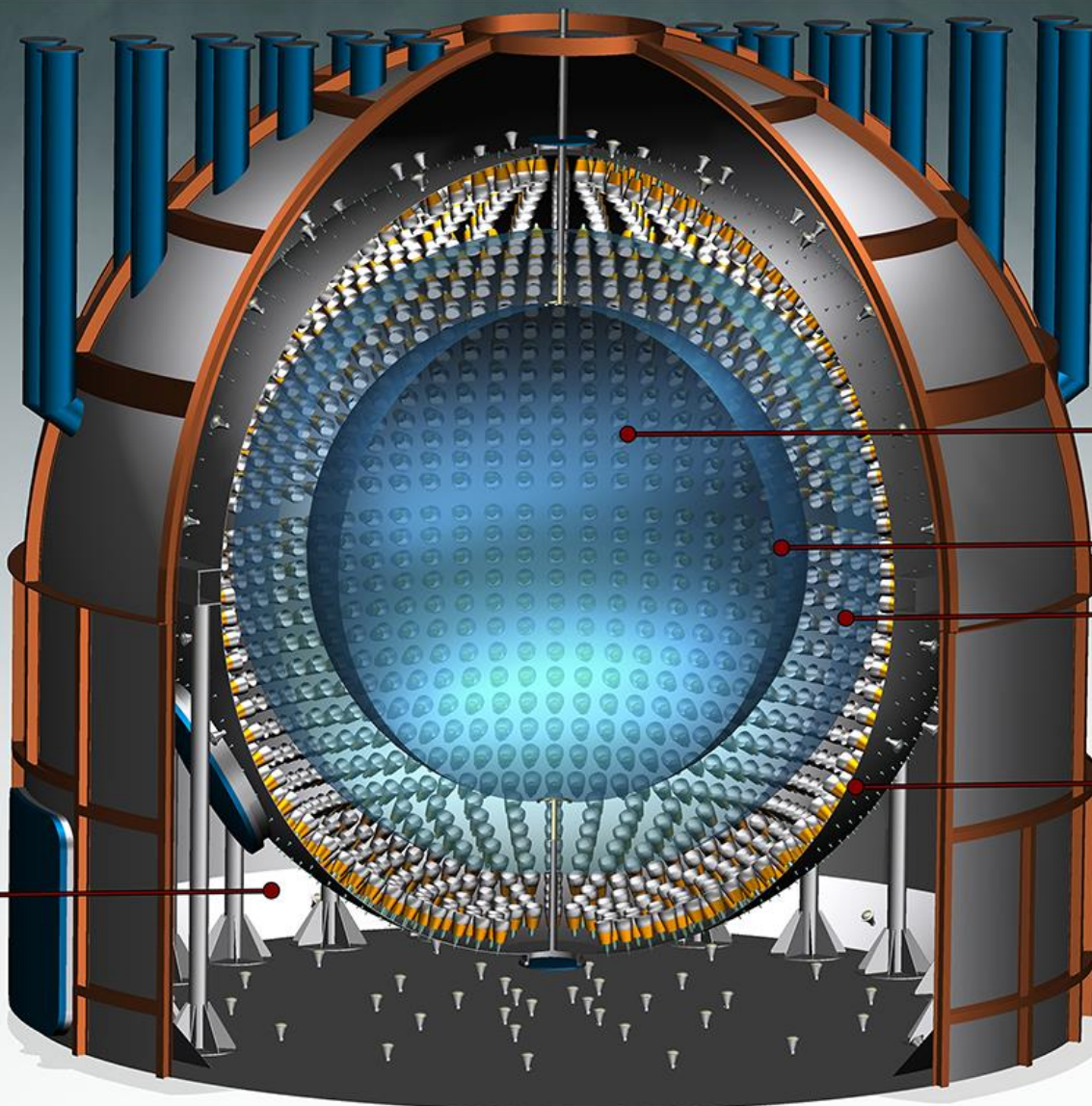
За основу взято оригинальное изображение
© Nature 485, 435–438 (24 May 2012) doi:10.1038/485435a

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 м³,
R = 9 м, H = 16.9 м,
208 ФЭУ в воде,
защита от γ , n, μ

Детектор Борексино



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)

История эксперимента Борексино

1988: S.Raghavan and S. Pakvasa, Phys.Rev. D37, 849-857 (1988)

1990: идея о создании суб-МэВного детектора солнечных нейтрино
реального времени *(Gianpaolo Bellini & Franc Calaprice)*

1995: СТФ проверка возможности ультра низкого фона

$$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th} < 10^{-16} \text{ g/g} \quad ^{14}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-18}$$

1996-1997: Одобрение проекта

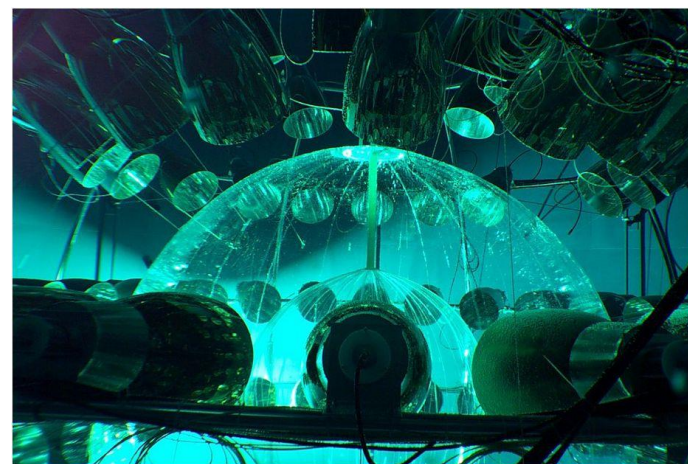
Середина 2007: Начало набора данных

Колоссальные усилия потрачены на отбор ультранизкофонных конструкционных материалов и приготовление ультранизкофонового сцинтиллятора.

Создание уникальных технологий очистки от радиоактивности : дистилляция N_2 stripping, водная экстракция



Raju Raghavan
(1937-2011)



Научная программа экспериментаorexino



Фазы I и II: измерения в двух диапазонах энергий

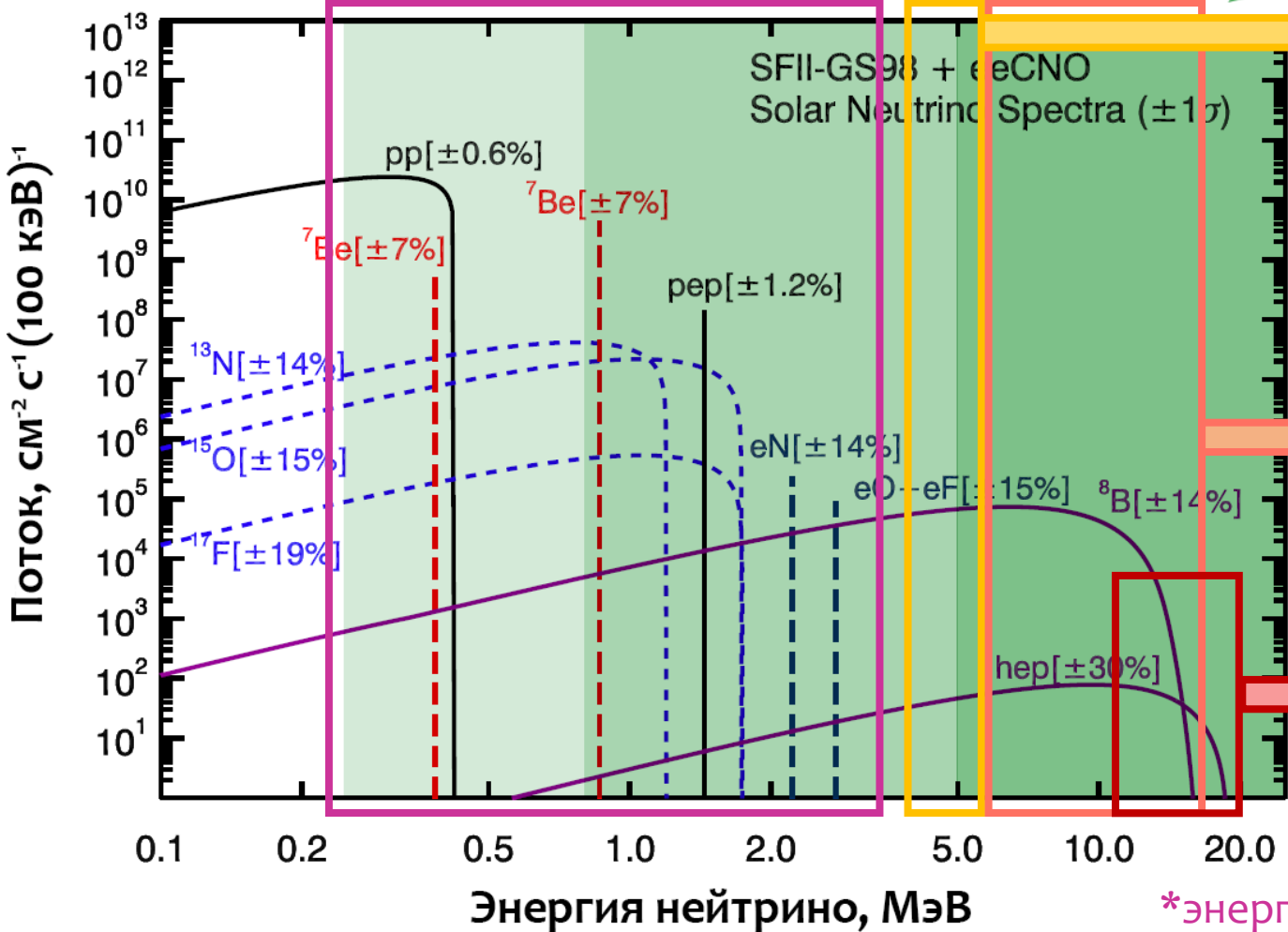
Низкие энергии (НЭ) ФАЗА II 0.19 – 2.93 МэВ*

Полная экспозиция 1,291.51 days x 71.3 t

pp-ν, ⁷Be-ν, pep-ν, CNO-ν

ФАЗА I и II

Borexino, SAGE, GALLEX Homestake Super-K, SNO



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

*энергия электронов отдачи

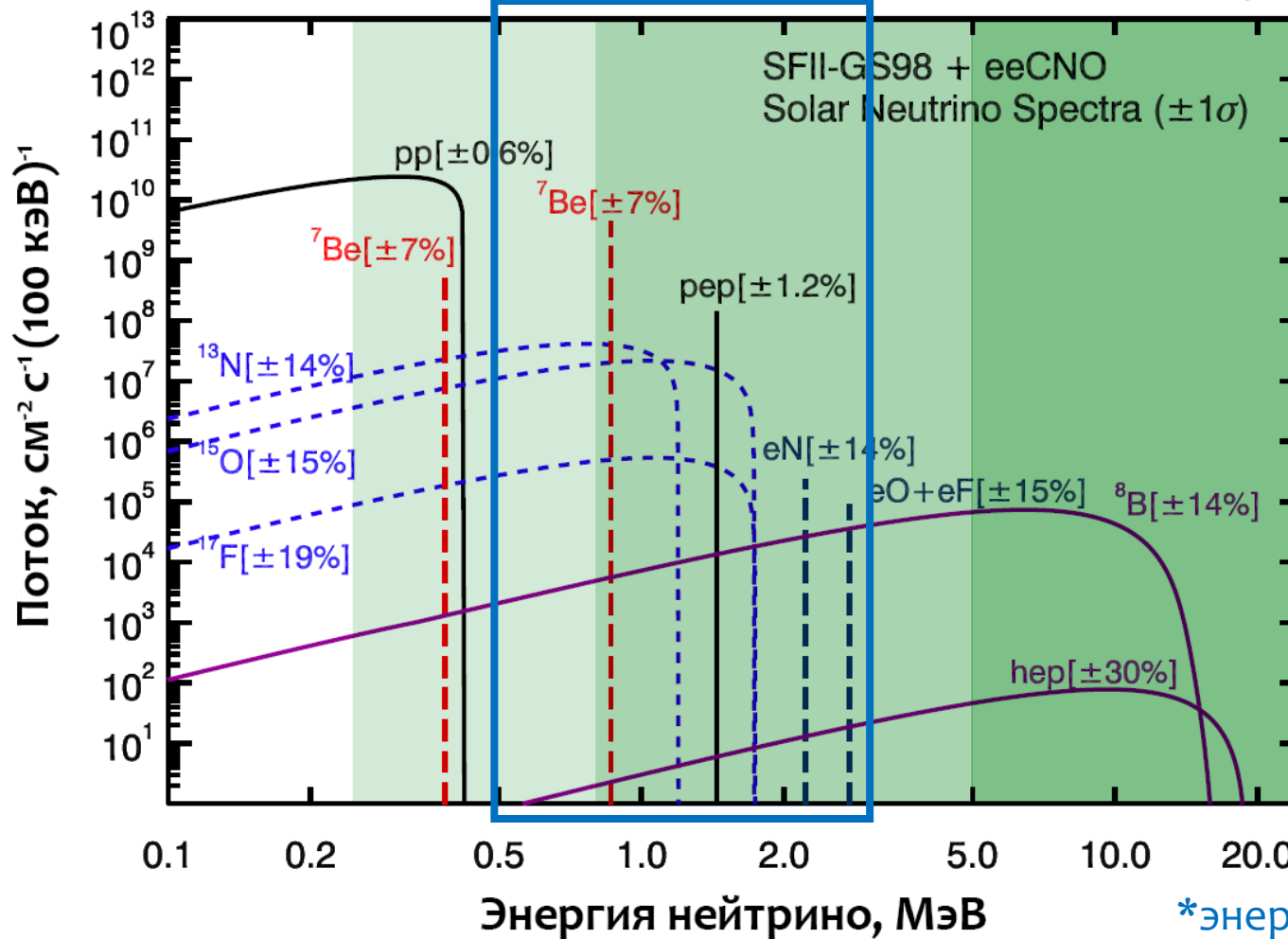
Фаза III: измерения при низких энергиях

Анализируемая область 0.32 – 2.64 МэВ*

Полная экспозиция 1072 days x 71.3 t

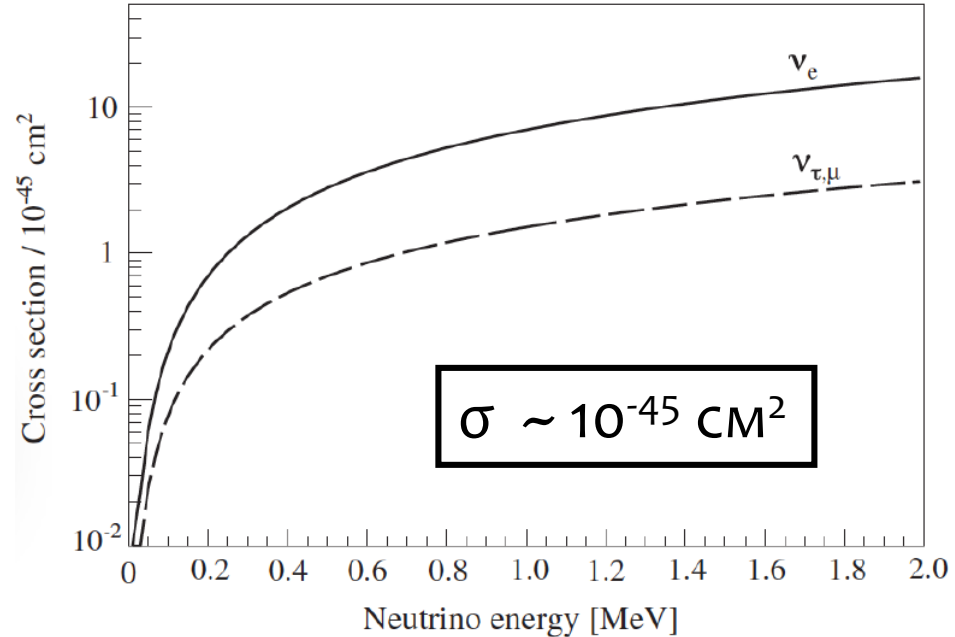
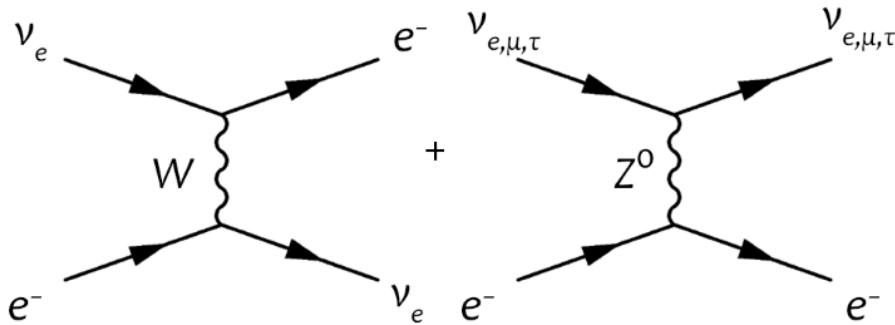
Поиск CNO- ν

Borexino, SAGE, GALLEX Homestake Super-K, SNO



Принцип регистрации нейтрино в детекторе Borexino

Для детектирования солнечных нейтрино используется реакция упругого рассеяния нейтрино на электронах

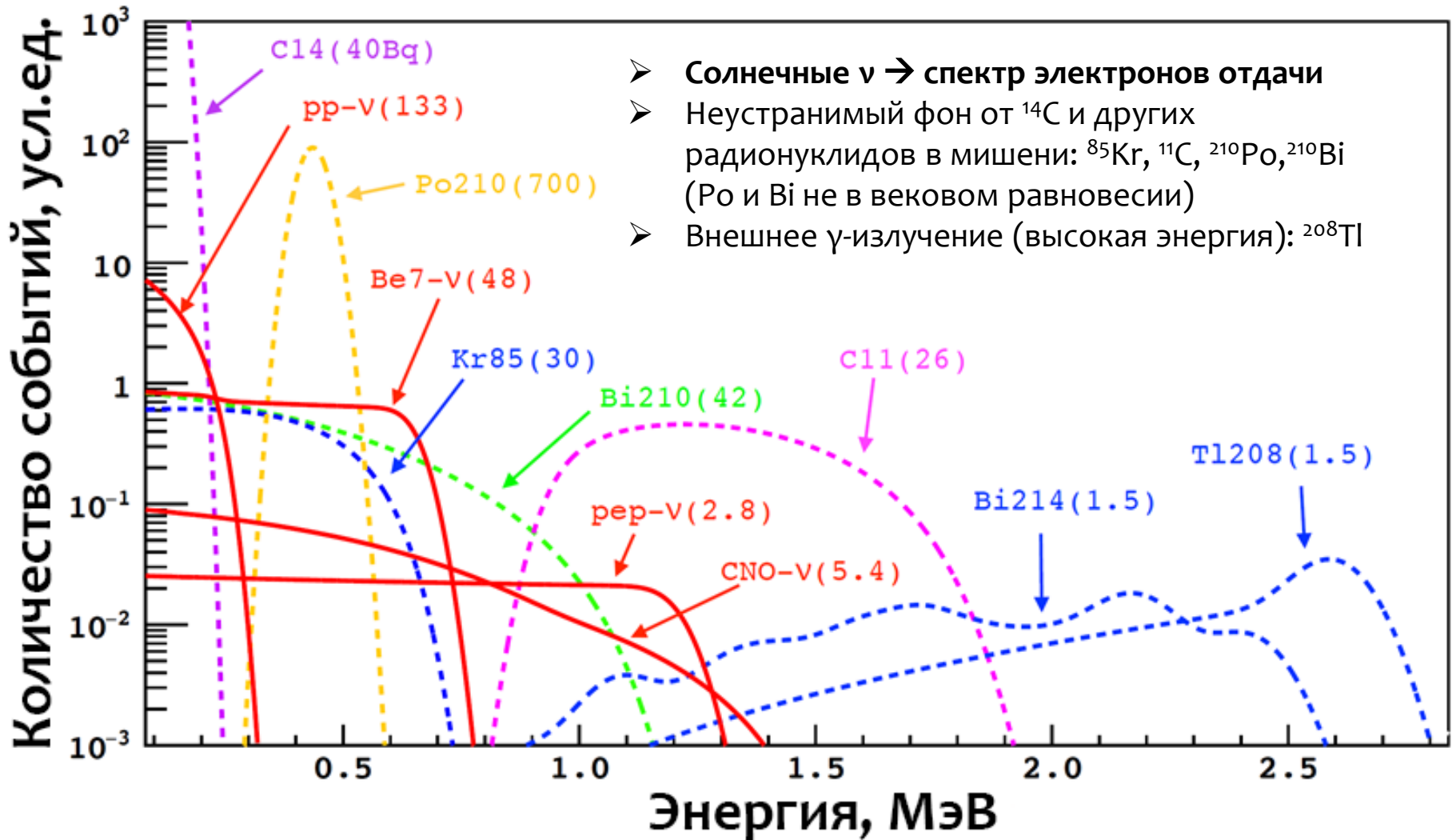


$$N_e = (3.307 \pm 0.003) \times 10^{31} \text{ e}^- / 100\text{t}$$

Сигнал от солнечных (моноэнергетических) нейтрино в Борексино:

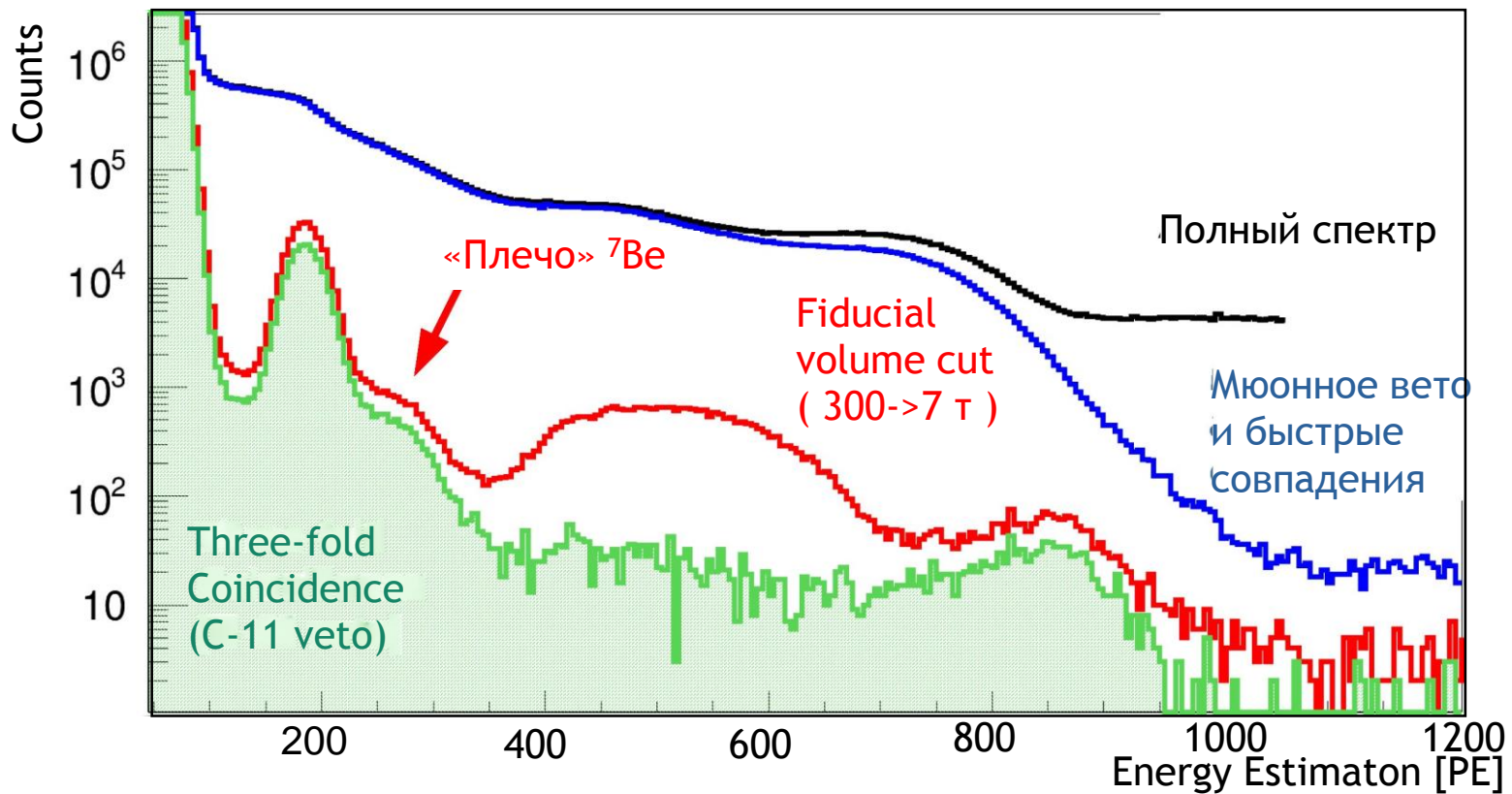
$$R(E_\nu, T) = P_{ee}(E_\nu) \phi_\nu(E_\nu) \frac{d\sigma_e(E_\nu, T)}{dT} + (1 - P_{ee}(E_\nu)) \phi_\nu(E_\nu) \frac{d\sigma_{\mu, \tau}(E_\nu, T)}{dT}$$

Монте-Карло моделирование вкладов от рассеяния нейтрино и р/а фона в наблюдаемый спектр в детекторе Борексино



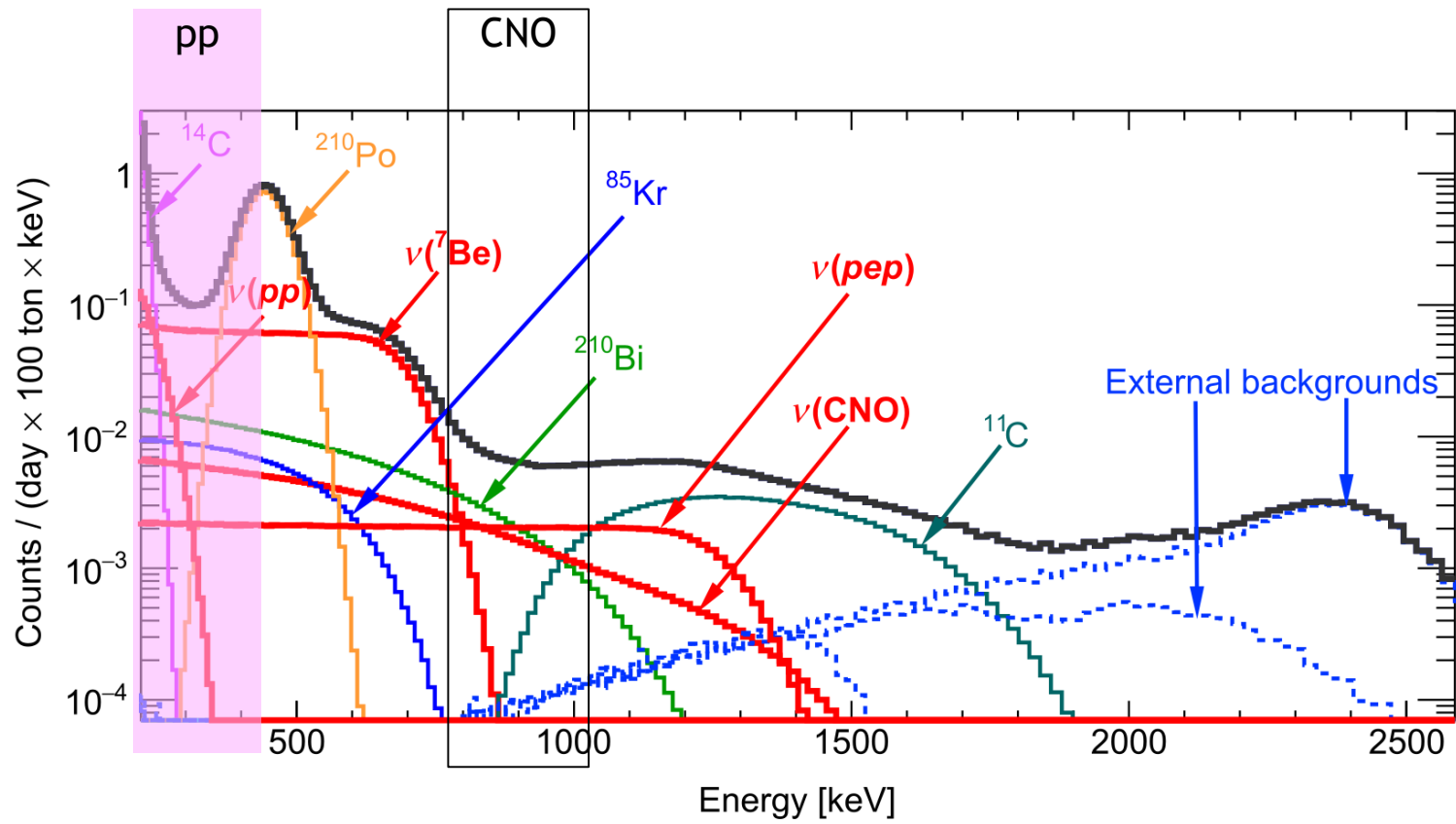
Скорости счёта приведены в ср/100 т (количество событий в день в 100т)

Энергетический спектр событий в детекторе Борексино



Энергетический спектр Борексино

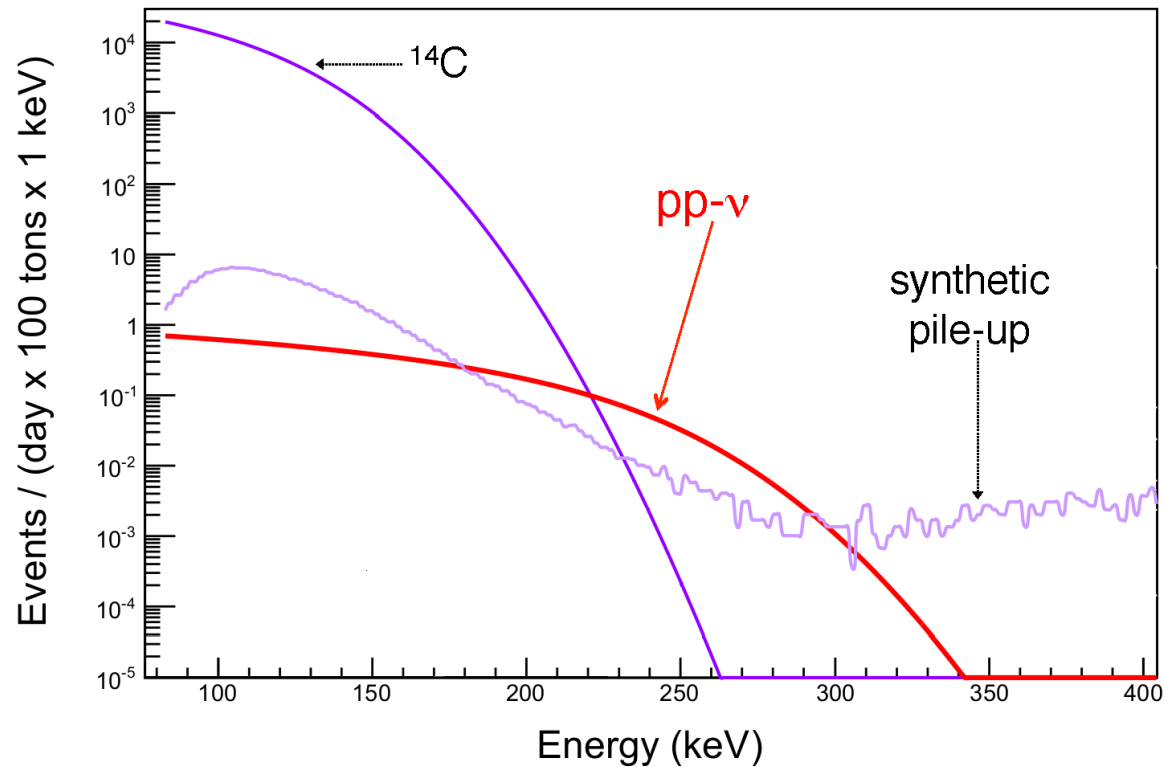
ROI для измерения pp и CNO

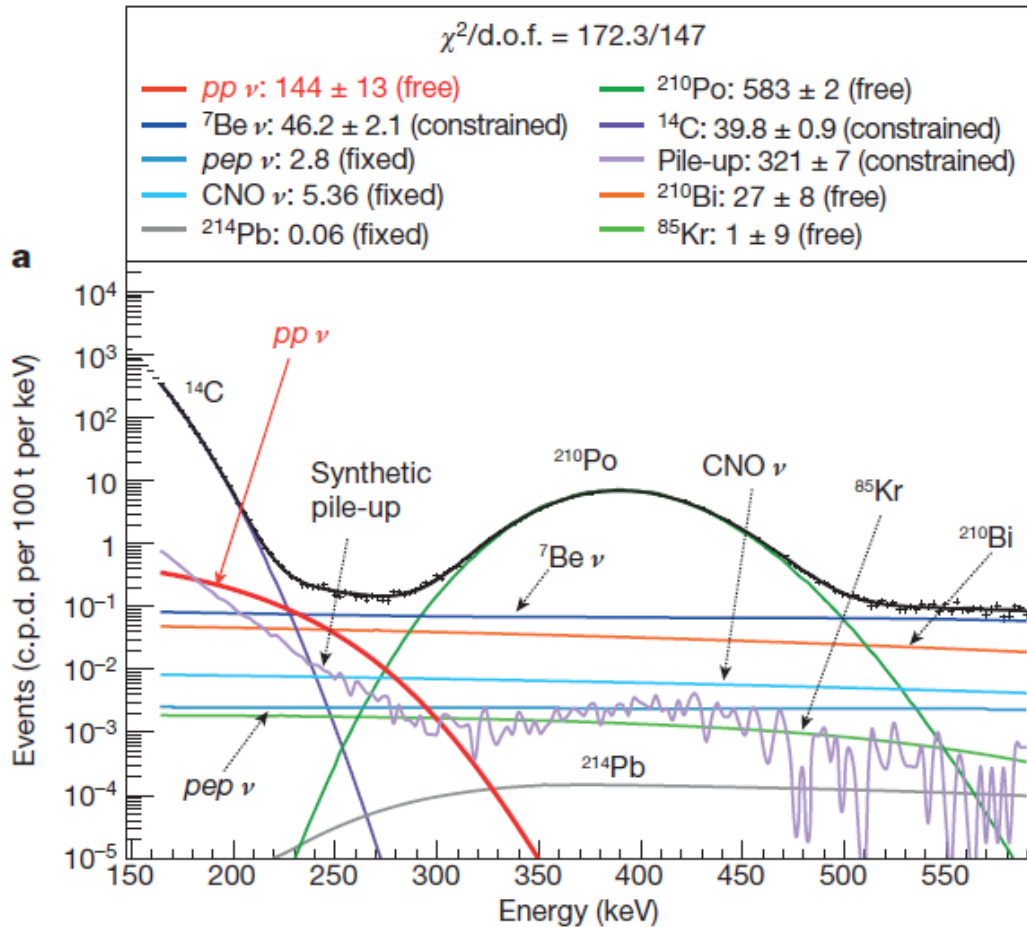


Как было измерено pp нейтрино.

Три условия необходимо выполнить :

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





В 2014 г. в первые был измерен поток пр-нейтрино с точностью ~11%

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

(MSW/LMA, HM) 131 ± 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).

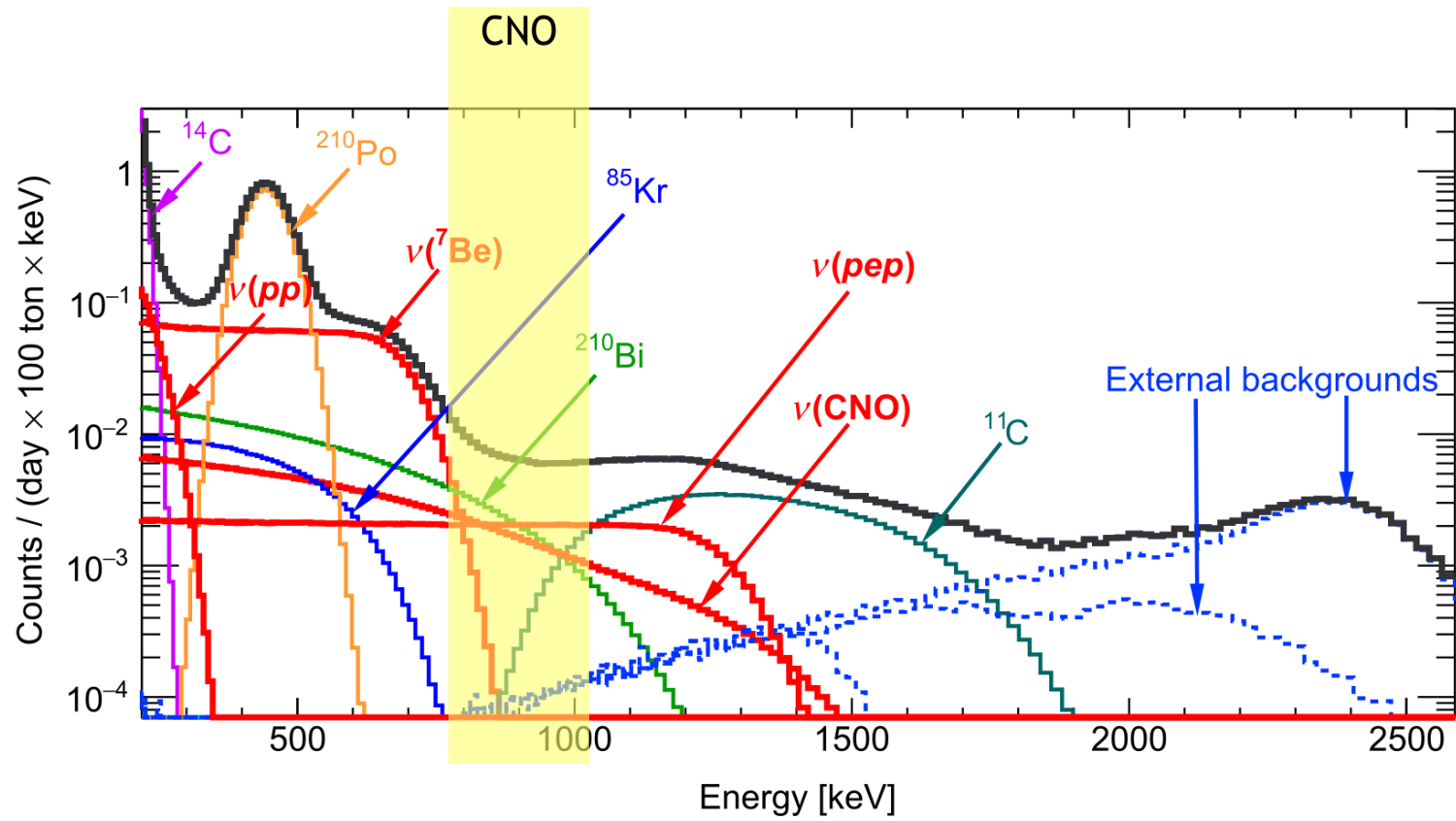
Table 1 | Results from the fit to the energy spectrum

| Parameter | Rate \pm statistical error (c.p.d. per 100 t) | Systematic error (c.p.d. per 100t) |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| pp neutrino | 144 ± 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 $\chi^2/\text{d.o.f.} = 172.3/147$.

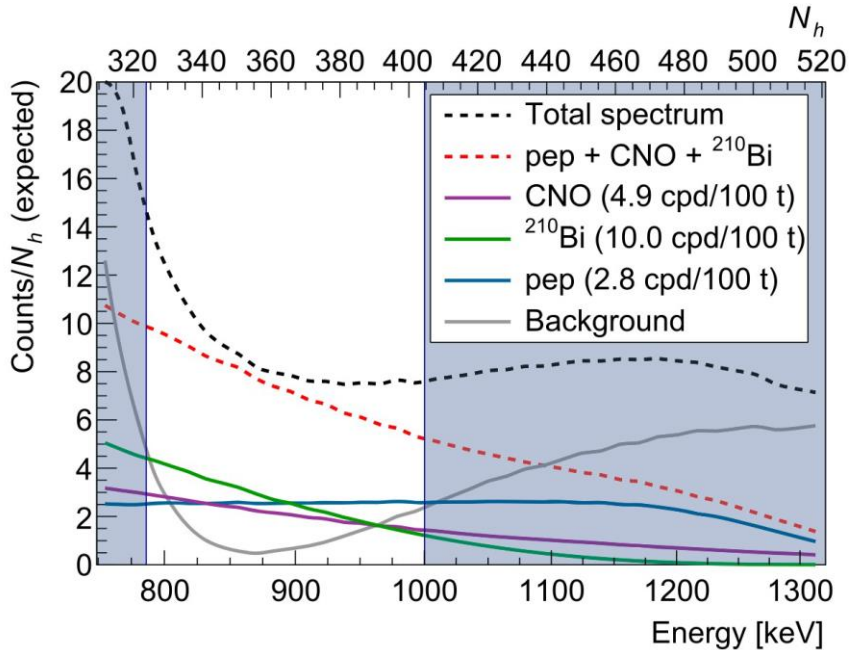
Энергетический спектр Борексино

(область в которой возможна регистрация CNO)



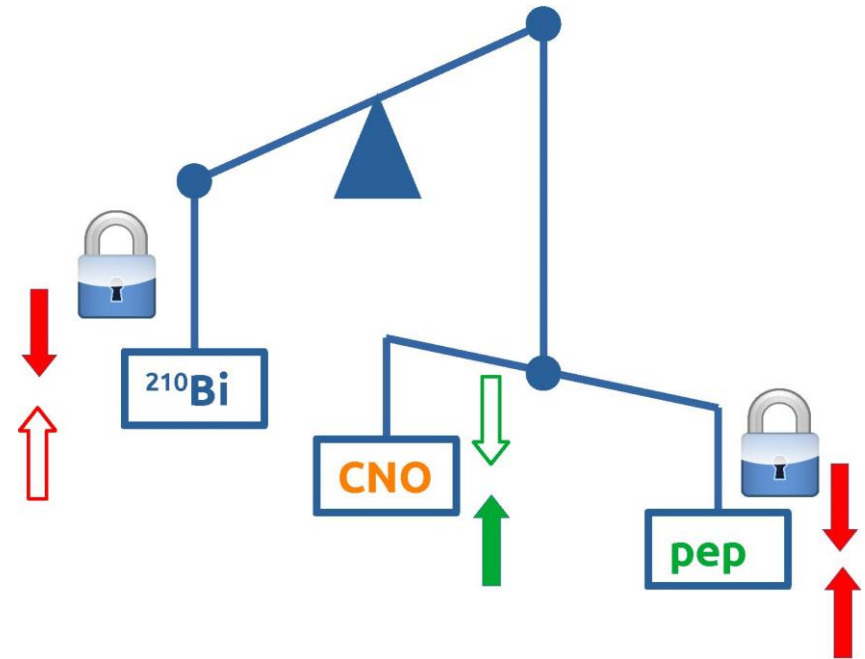
Решение проблемы чувствительности к CNO-нейтрино

Region of Interest



CNO <> pep <> ^{210}Bi

Необходимо было придумать как разделить вклады от разных источников в ROI



Решение - независимые ограничения на разные вклады в спектр - pep и Bi210

From presentation of Nicola Rossi

Независимое ограничение на рер

$$pp: p + p \rightarrow d + e + \nu_e$$

Ограничение 1.4%

$$per: p + e + p \rightarrow d + \nu_e$$

rer ограничения

1. Из теоретического pp/пер отношения (pp измерены)
2. Экспериментальные данные о солнечных нейтрино
3. Ограничение на **Светимость Солнца** (0.4%)
4. Параметры осцилляции из глобального фита

Эти ограничения не связаны с CNO-нейтрино

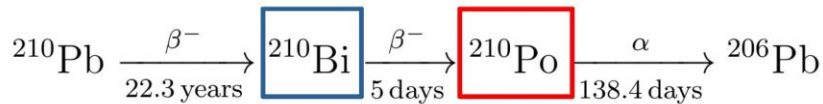
Диффузия:

Очень медленная $\sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

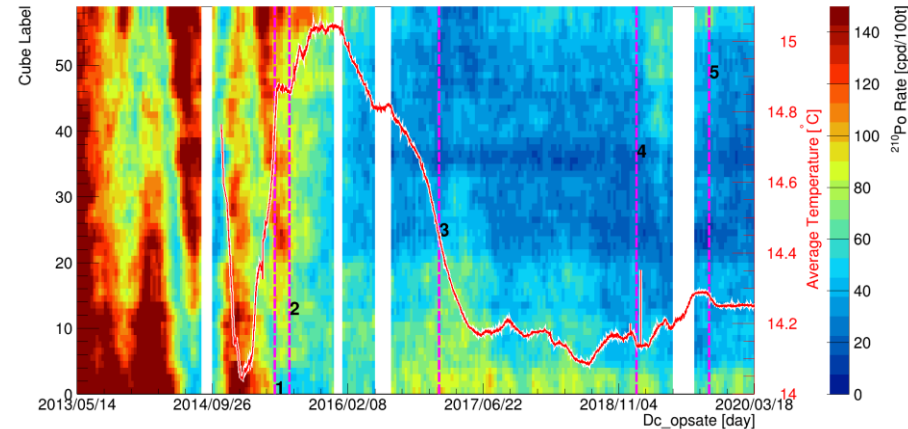
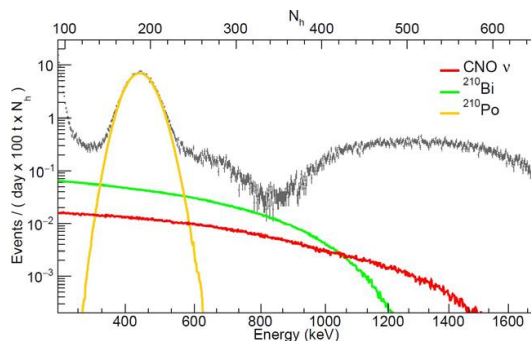
Конвекция:

Ро-210 поступающий снаружи

Независимые ограничения ^{210}Bi



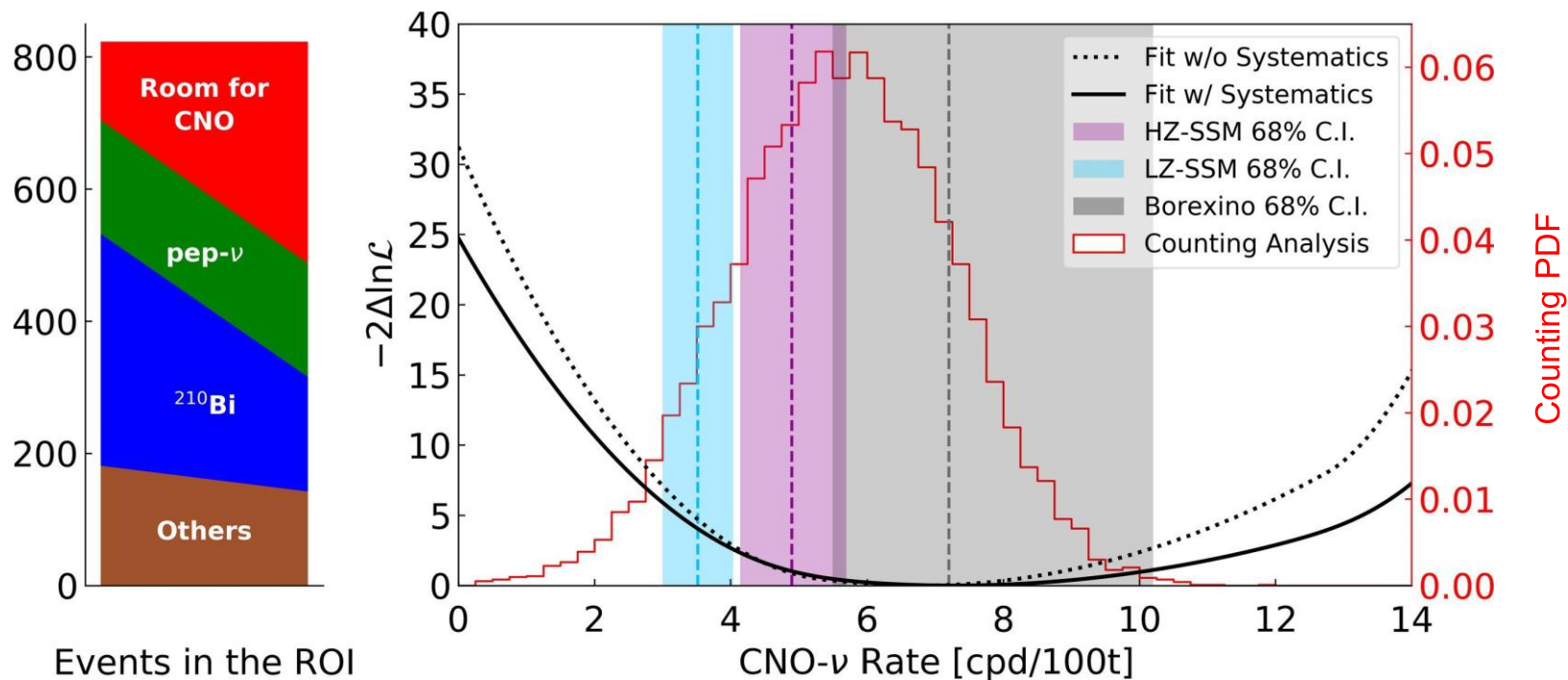
Используем **вековое равновесие** цепочки A=210



Термоизоляция детектора

1. Плато - симметричные ограничения
2. Минимум -> верхний предел

Конечный результат по регистрации CNO нейтрино



Result (68% CL stat + sys) = $7.2_{-1.7}^{+3.0}$ cpd/100t

Итогом 20-летних усилий эксперимента Borexino стало прямое измерение спектра и потока нейтрино от термоядерных реакций на Солнце



Список статей Borexino (~ 60)

CNO- ν : *Nature* **587**, 577–582 (2020)

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

pp- ν : *Nature* **512**, 383–386 (2014)

pp, pep, $^7\text{Be-}\nu$: *Phys. Rev. D* **100**, 082004 (2019)

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

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

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

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

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

Сезонные модуляции $^7\text{Be-}\nu$:

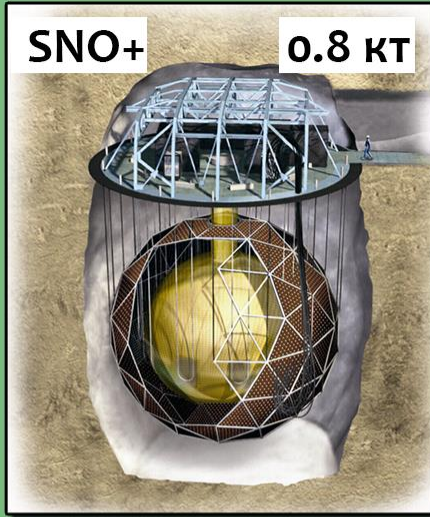
Astroparticle Physics **92**, 21-29 (2017)

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

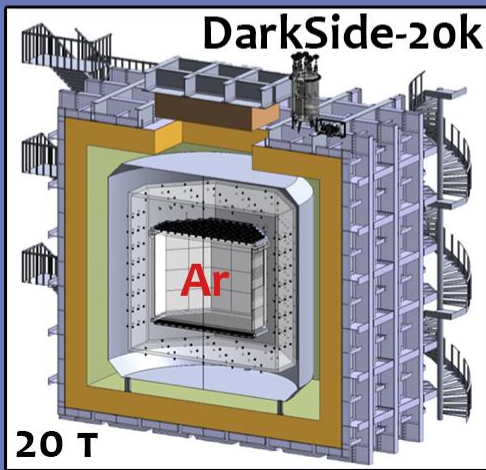
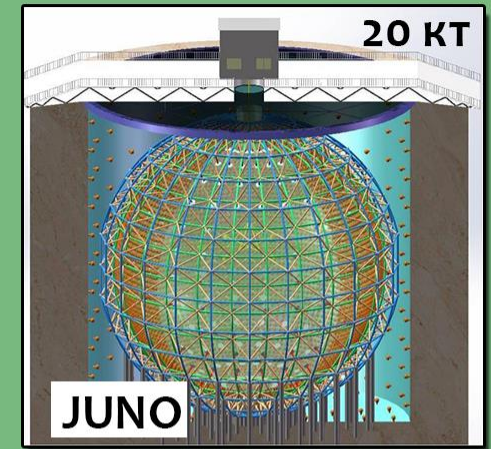
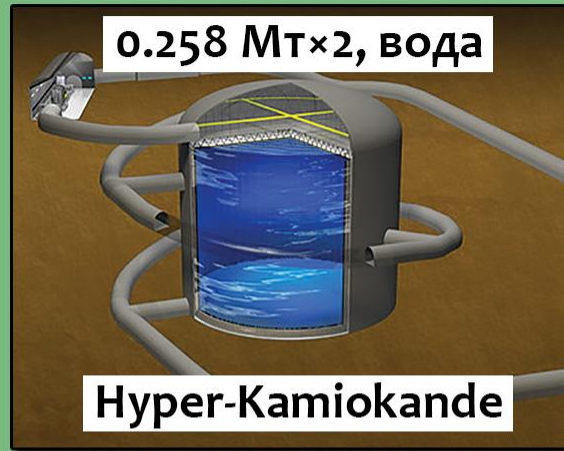
Отсутствие асимметрии день/ночь $^7\text{Be-}\nu$:
Physics Letters B **707** (1), 22-26 (2012)

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

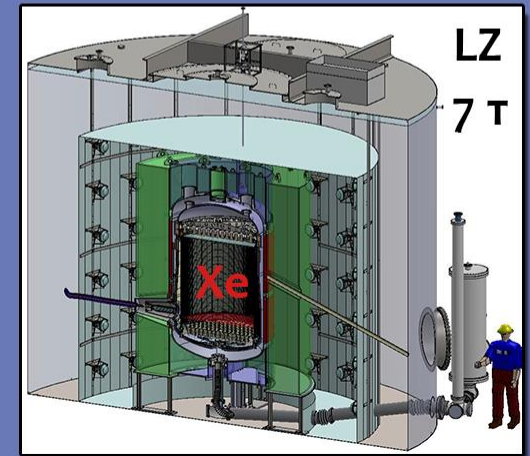
Новое поколение детекторов имеющих «солнечную программу»



Нейтронные детекторы



Детекторы тёмной материи



Спасиѡо за вниманиe!