



ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BOREXINO: ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СЕМИНАР ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ
16.11.2023



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

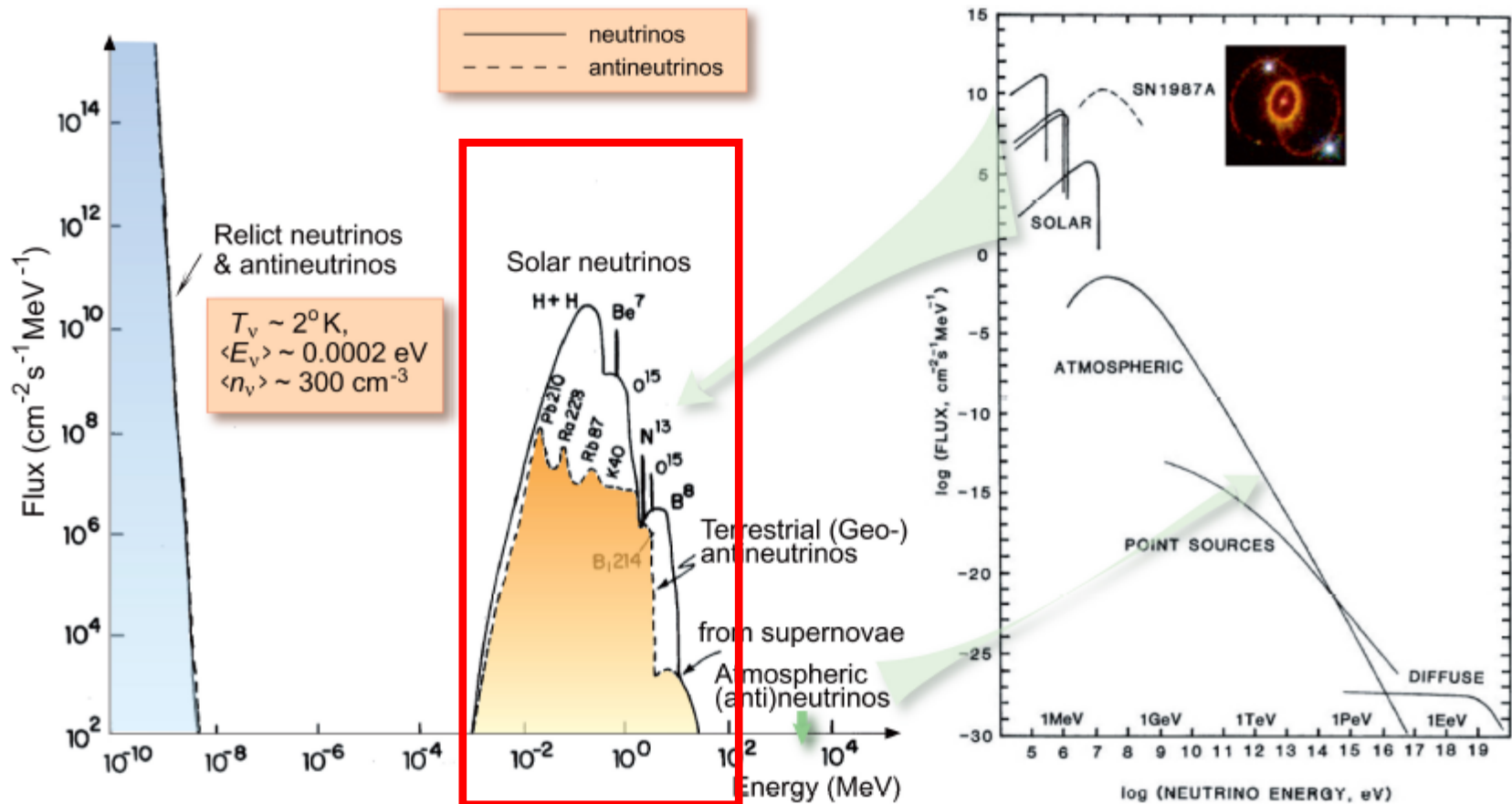
CENTER FOR ADVANCED STUDIES
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



POLITECNICO
MILANO 1863



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

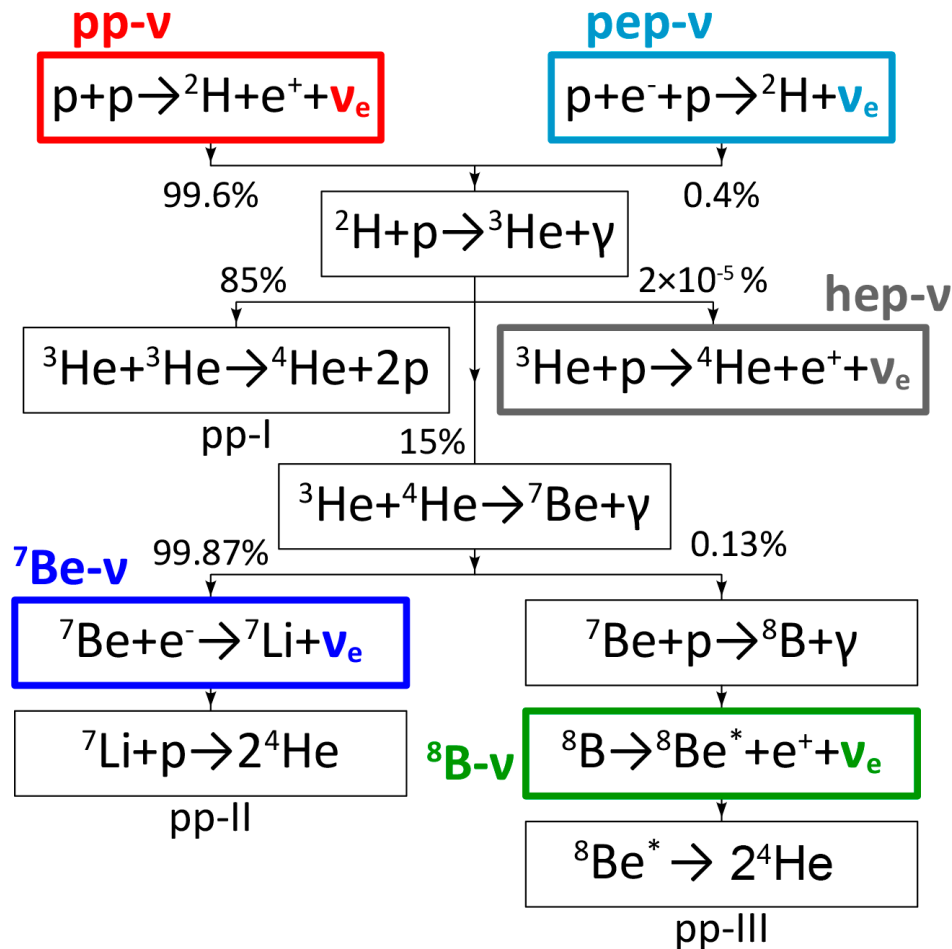
Солнечные нейтрино - ~ 1 кэВ - ~ 10 МэВ поток 10^{10} $\text{cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$

Недра земли (слабые распады ядер) - ~ 1 кэВ- ~ 10 МэВ поток 10^6 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$

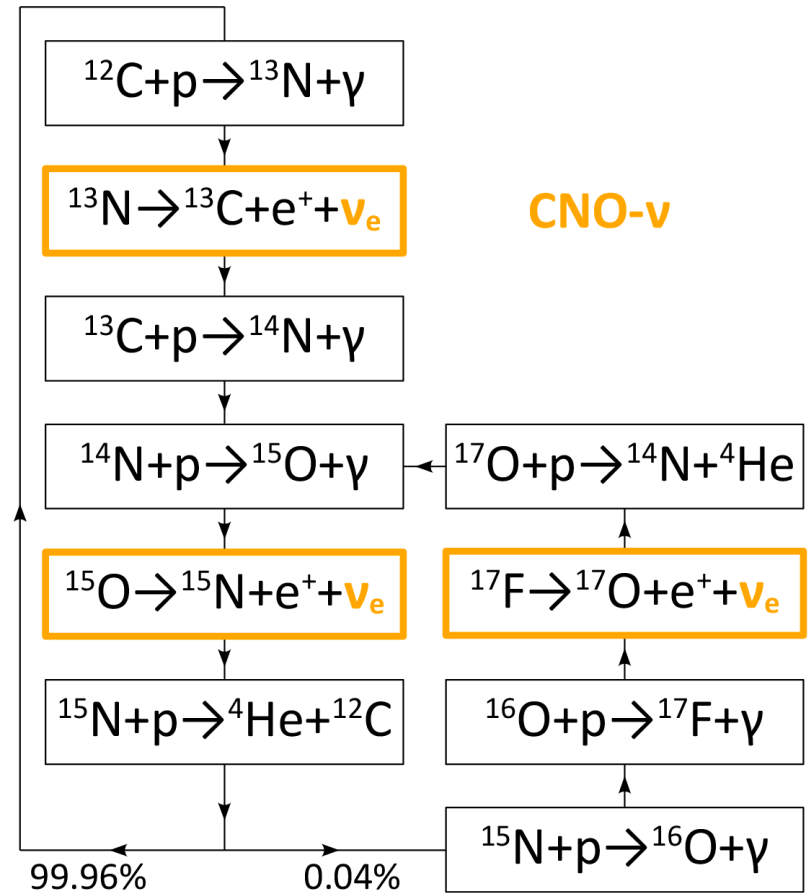
Реакторные нейтрино - ~ 1 кэВ- $\sim < 9$ МэВ (1ГВт, 10 м) поток $\sim 10^{13}$ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$

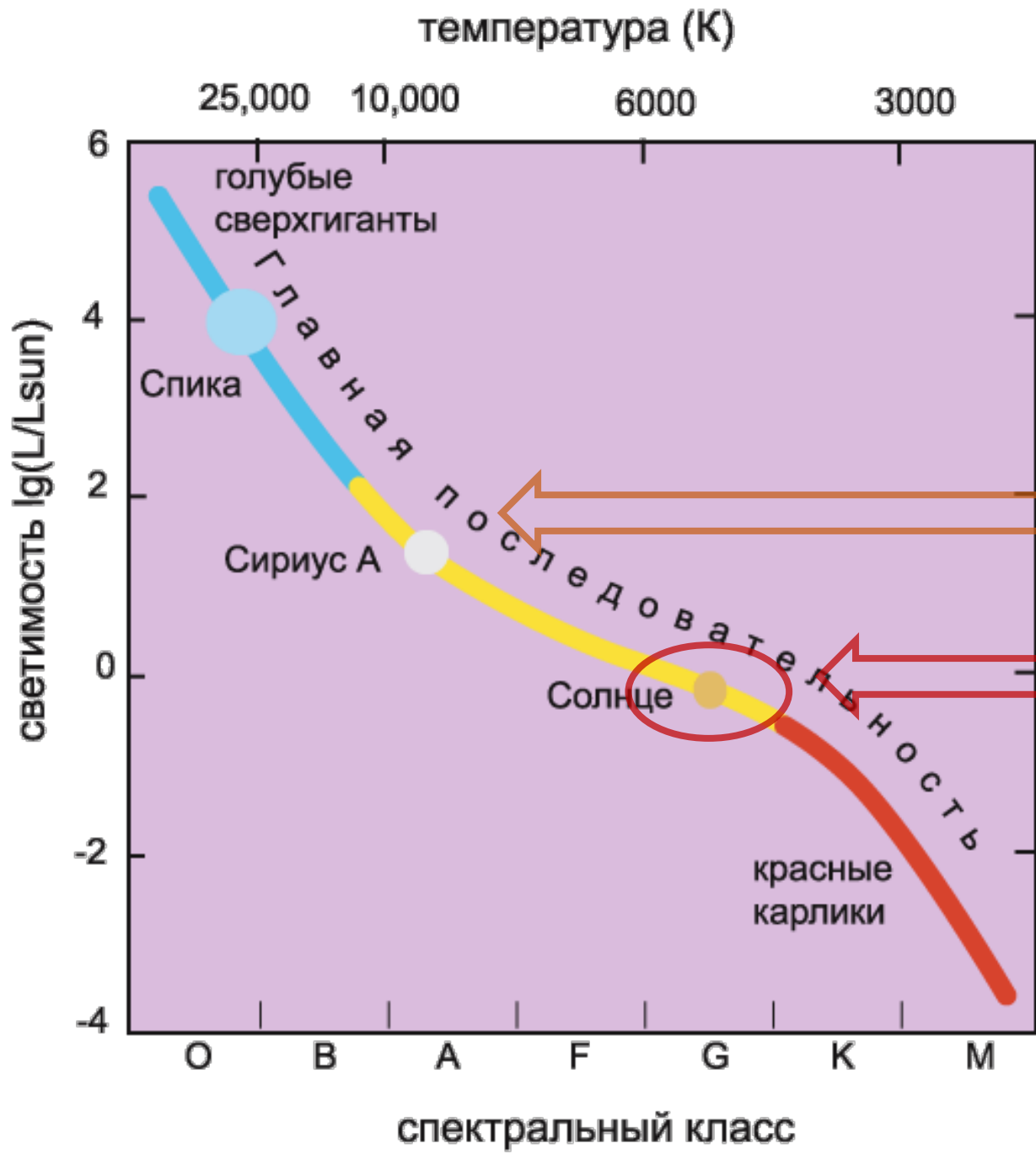
Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий

pp-цикл (99% энергии Солнца)



CNO-цикл (1% энергии Солнца)

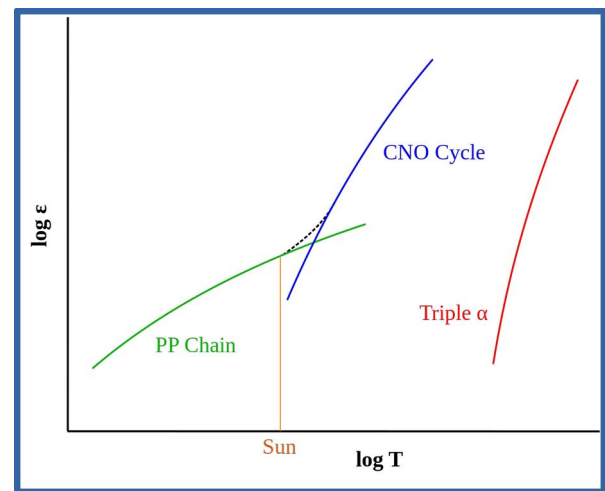




**Доминирование
разных термоядерных циклов
в зависимости от типа звезд**

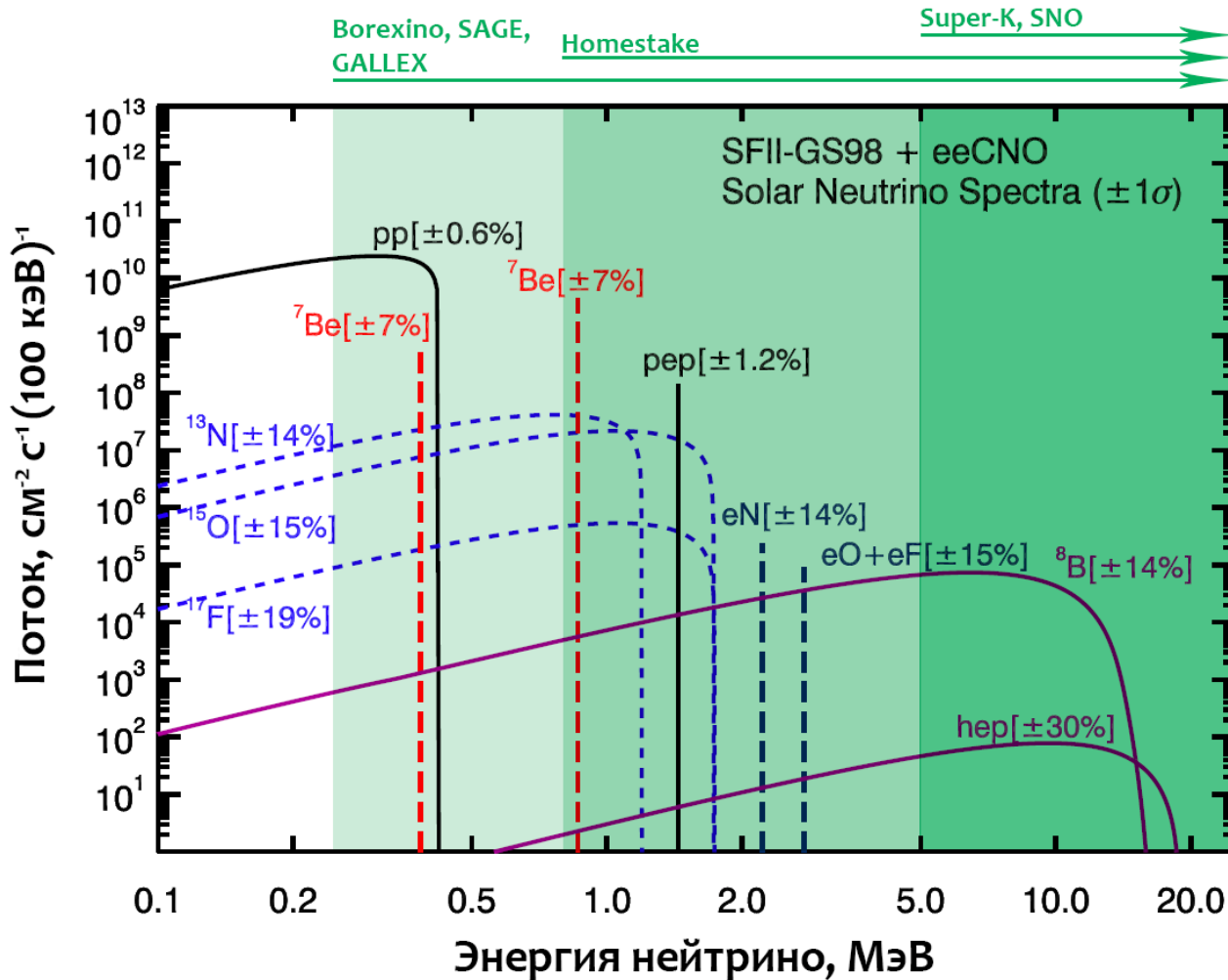
**Доминирование CNO-цикла
при сгорании водорода
в гелий**

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



Теоретические спектры солнечных нейтрино

Стандартная модель Солнца



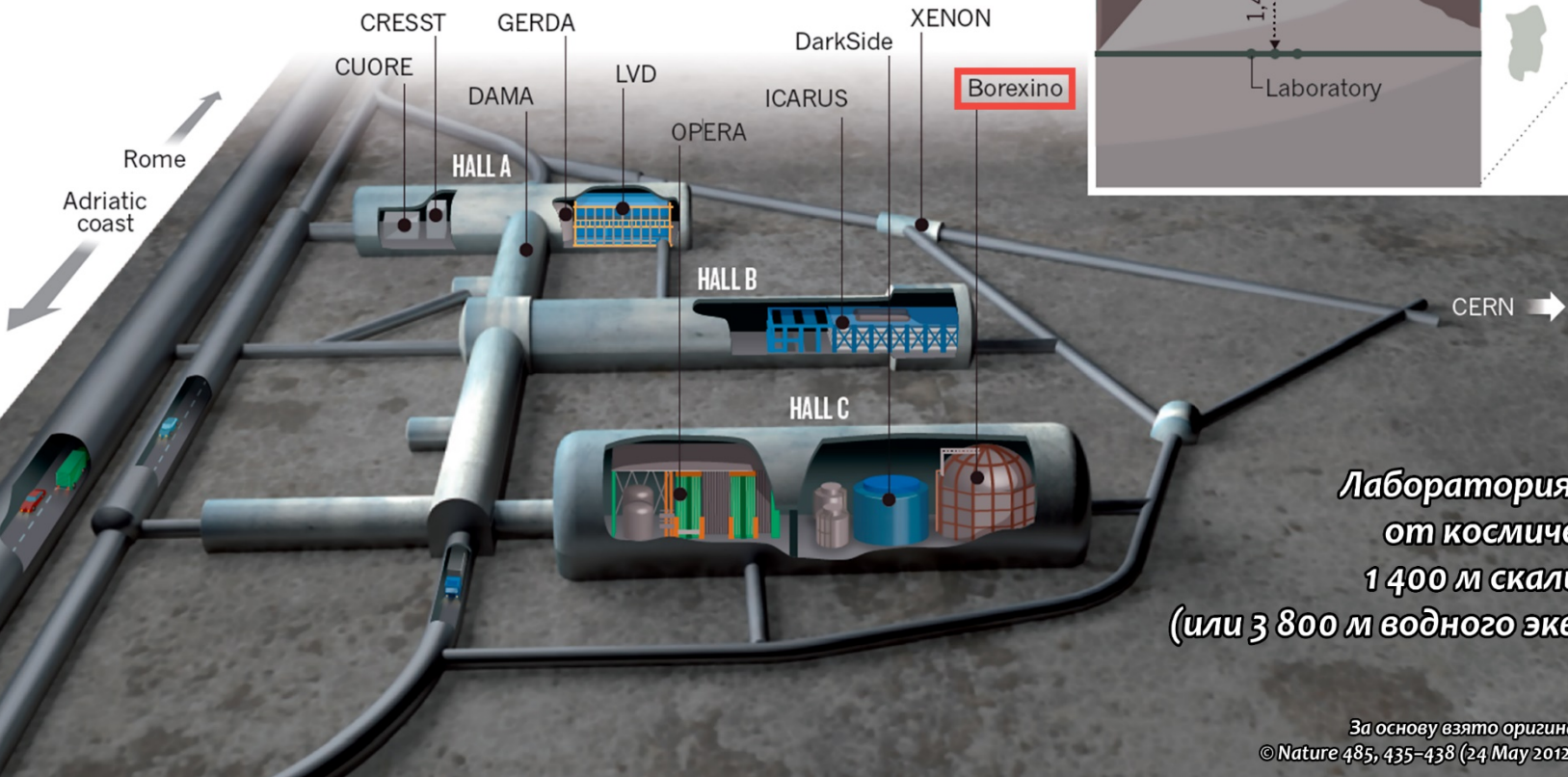
pp
90% - $\sim 6.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$

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

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



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

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

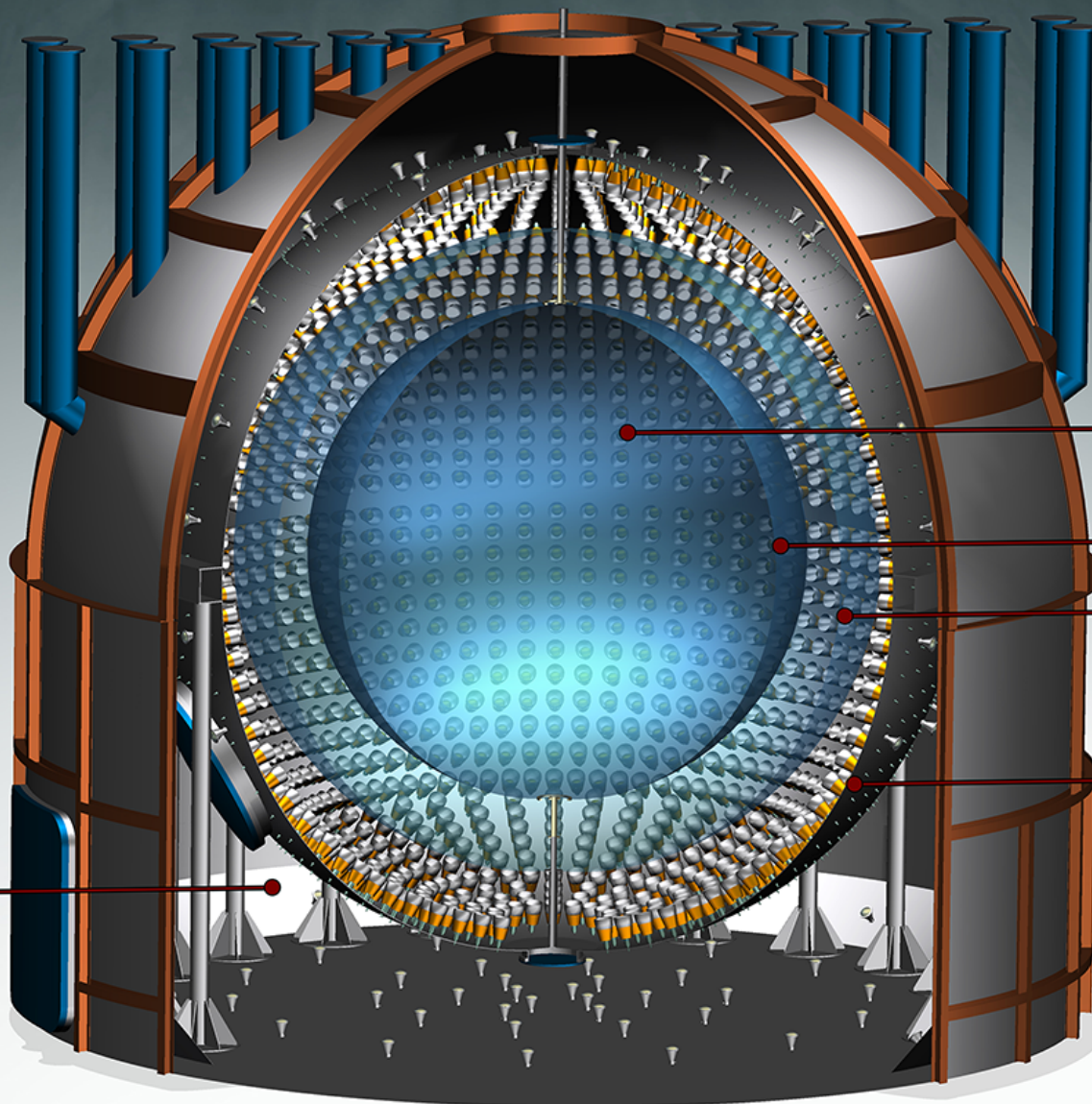
Система сбора данных FADC

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)

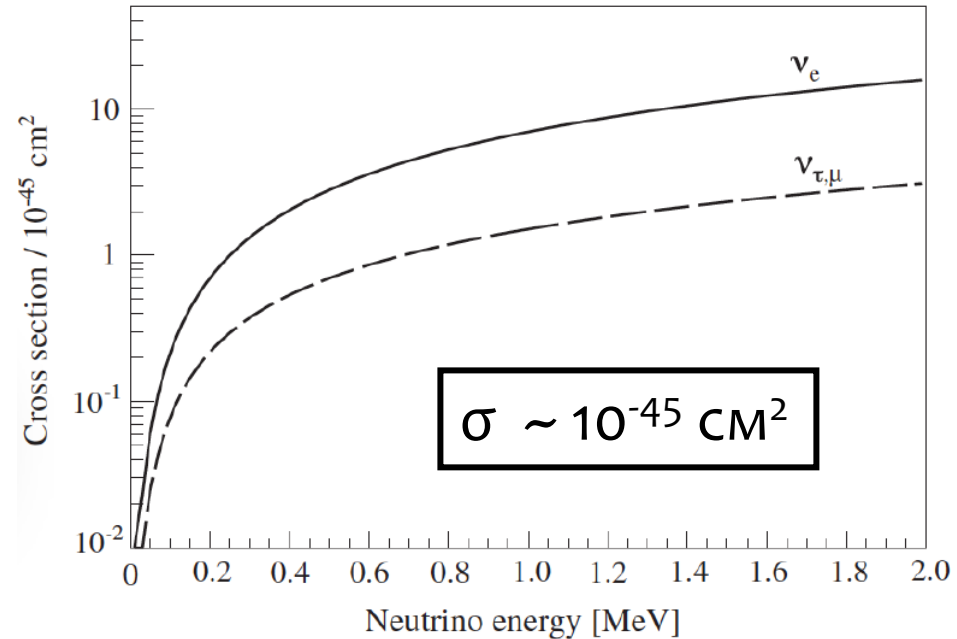
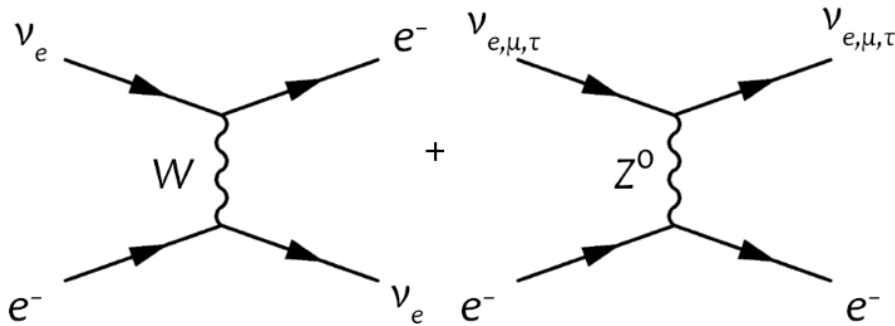
Нейлоновые сферы:
(толщина 125 мкм)
Внутренняя: 4.25 м,
Внешняя: 5.50 м
(защита от радона)

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)



Регистрация нейтрино в ЖОС мишени Borexino

Для детектирования солнечных нейтрино используется реакция упругого рассеяния нейтрино на электронах



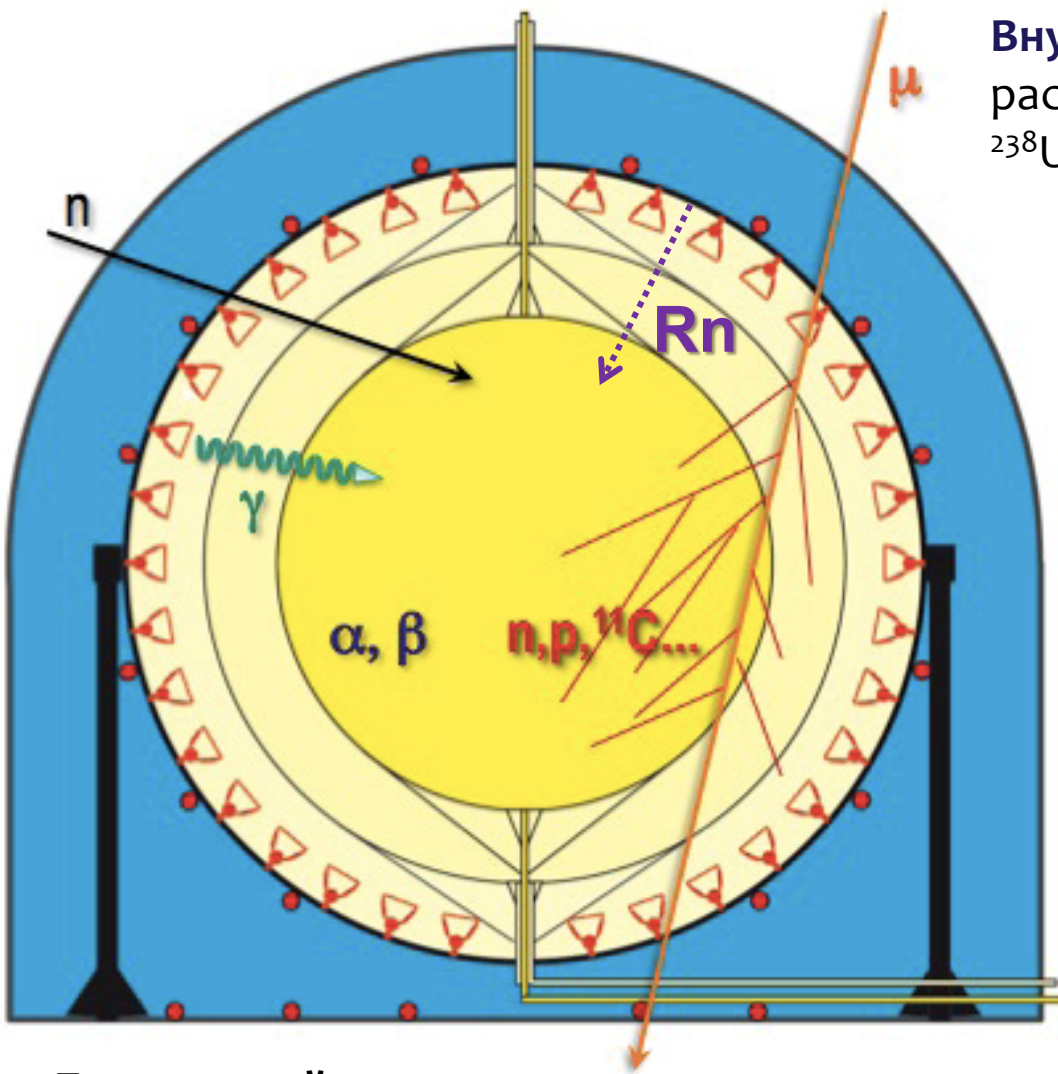
Сигнал от солнечных (моноэнергетических) нейтрино в Борексино:

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

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

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

Bohexino – 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 γ -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

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}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

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

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)

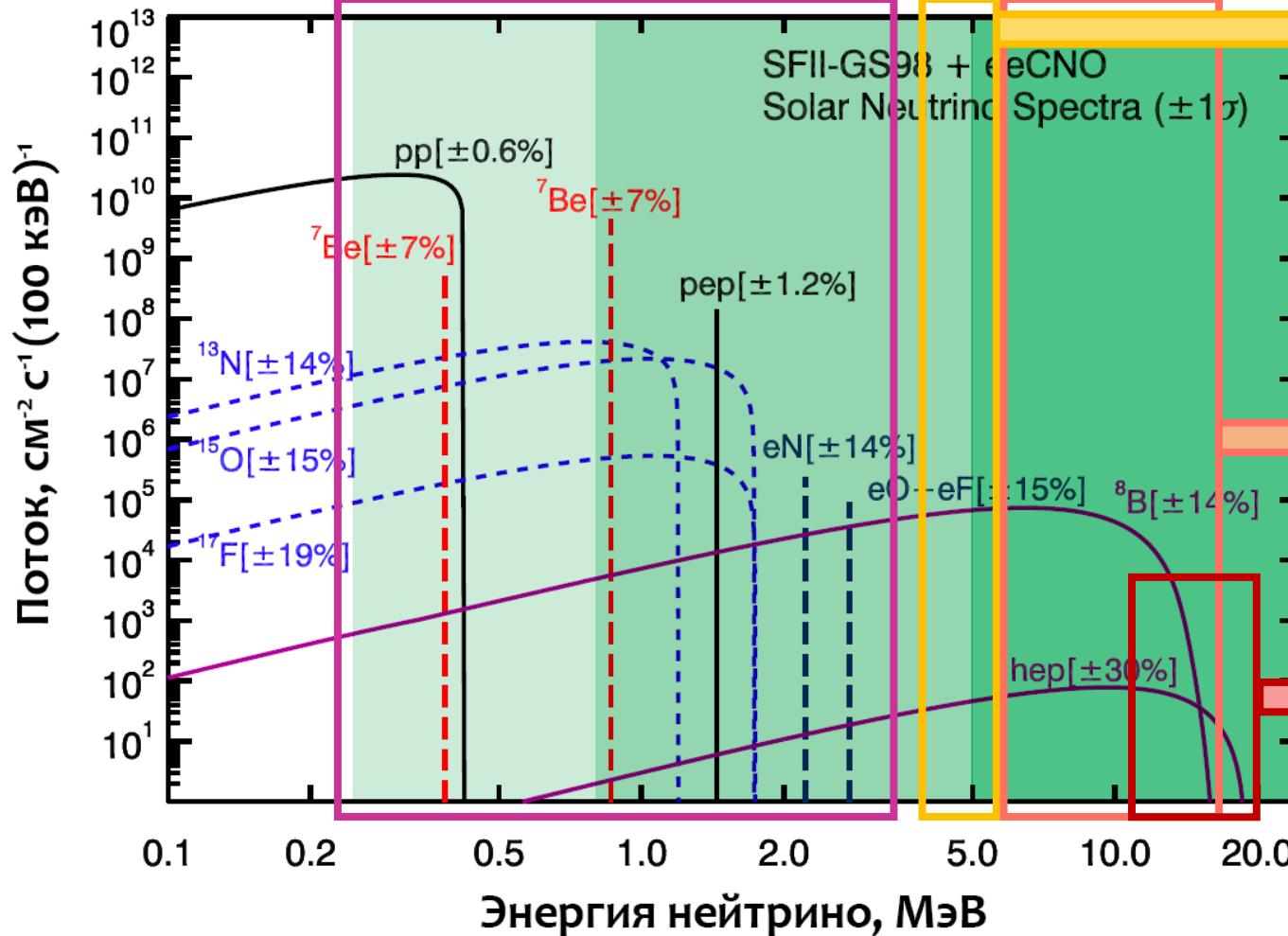
5.7 – 16.0 МэВ

^8B - ν

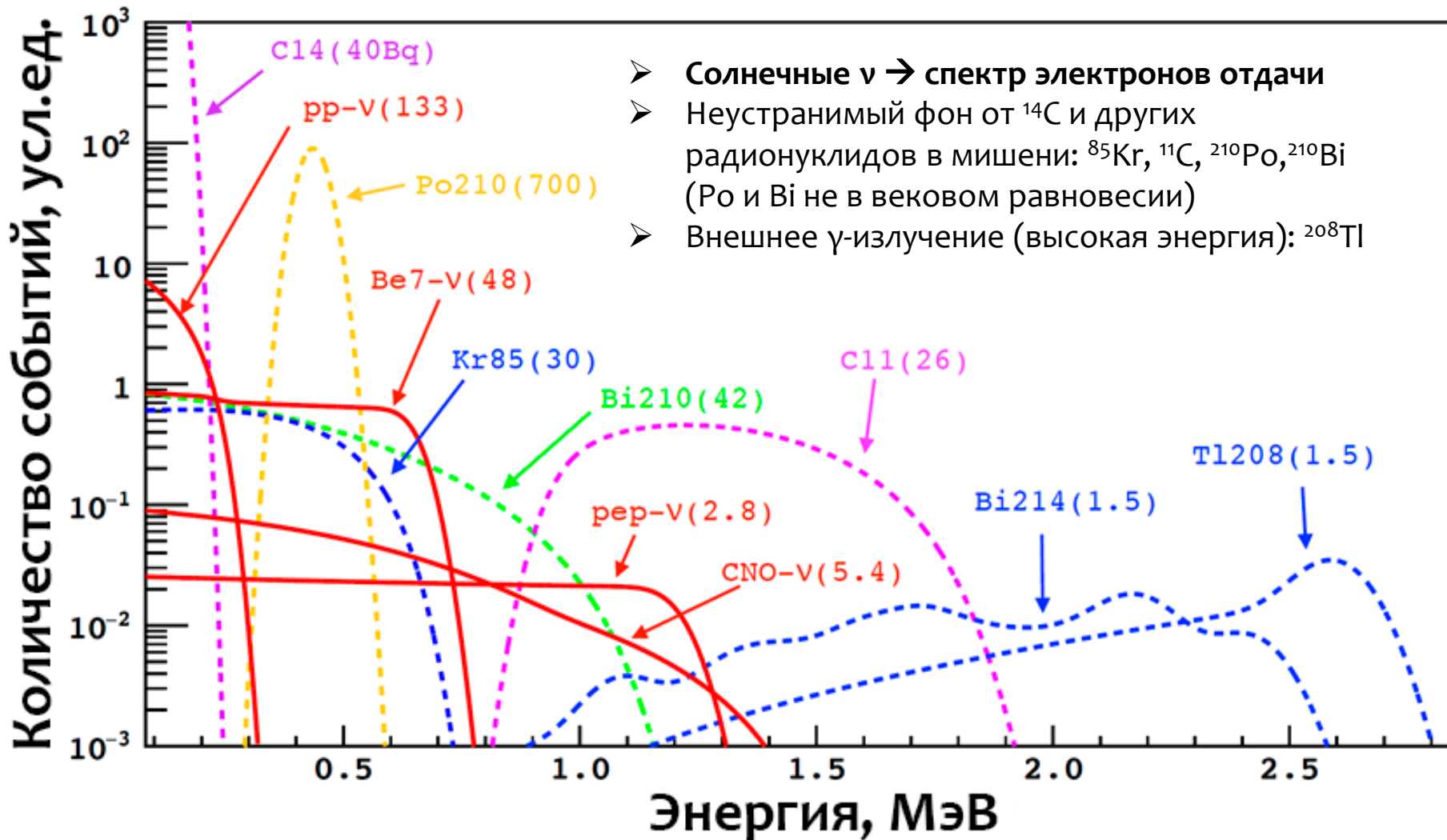
Высокие энергии III
(ВЭ III)

11 – 20 МэВ

hep- ν



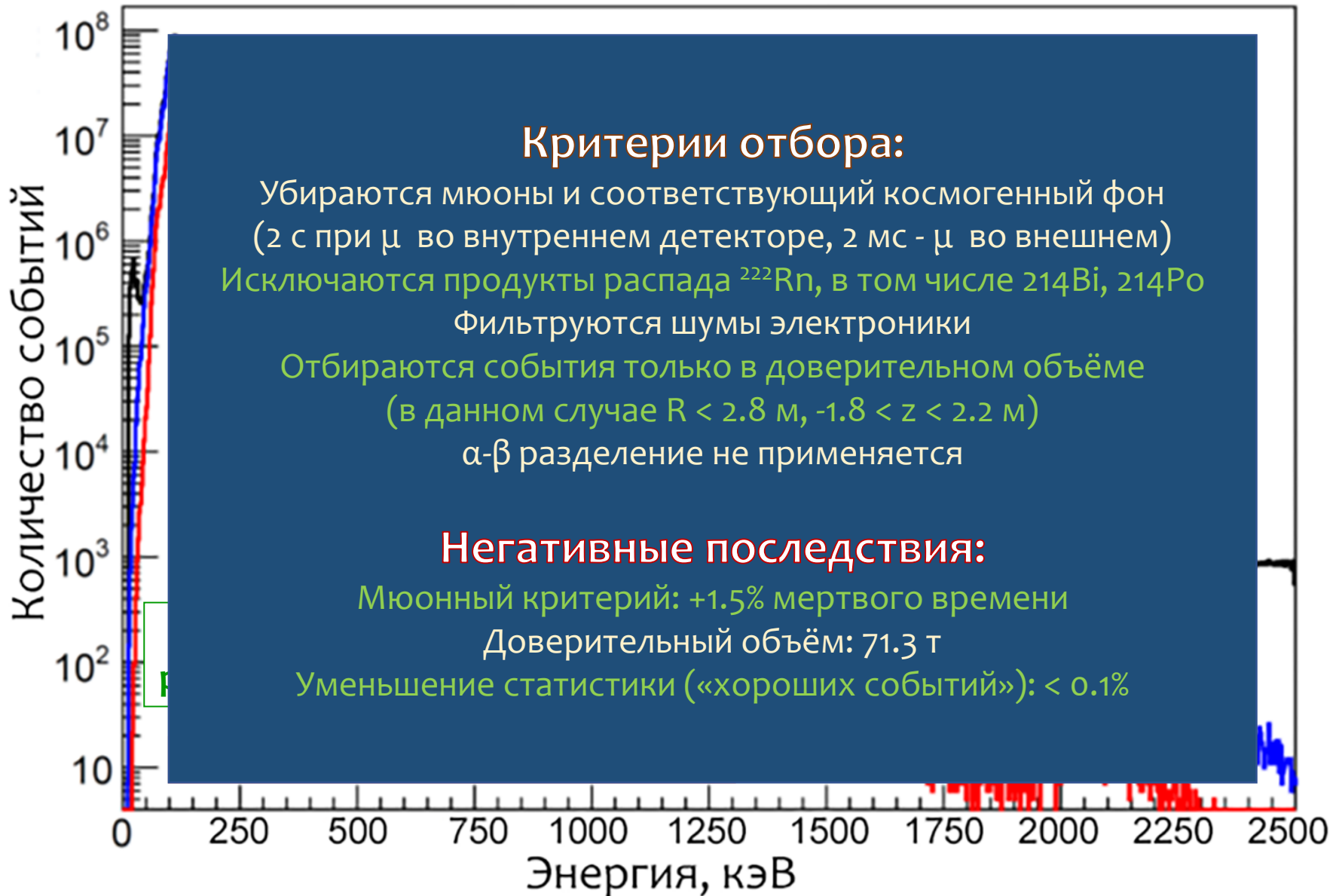
Возможные вклады нейтрино и фонов в наблюдаемый спектр (согласно Монте-Карло моделированию)



Скорости счёта приведены в $\text{срд}/100 \text{ т}$ (количество событий в день в 100 т)

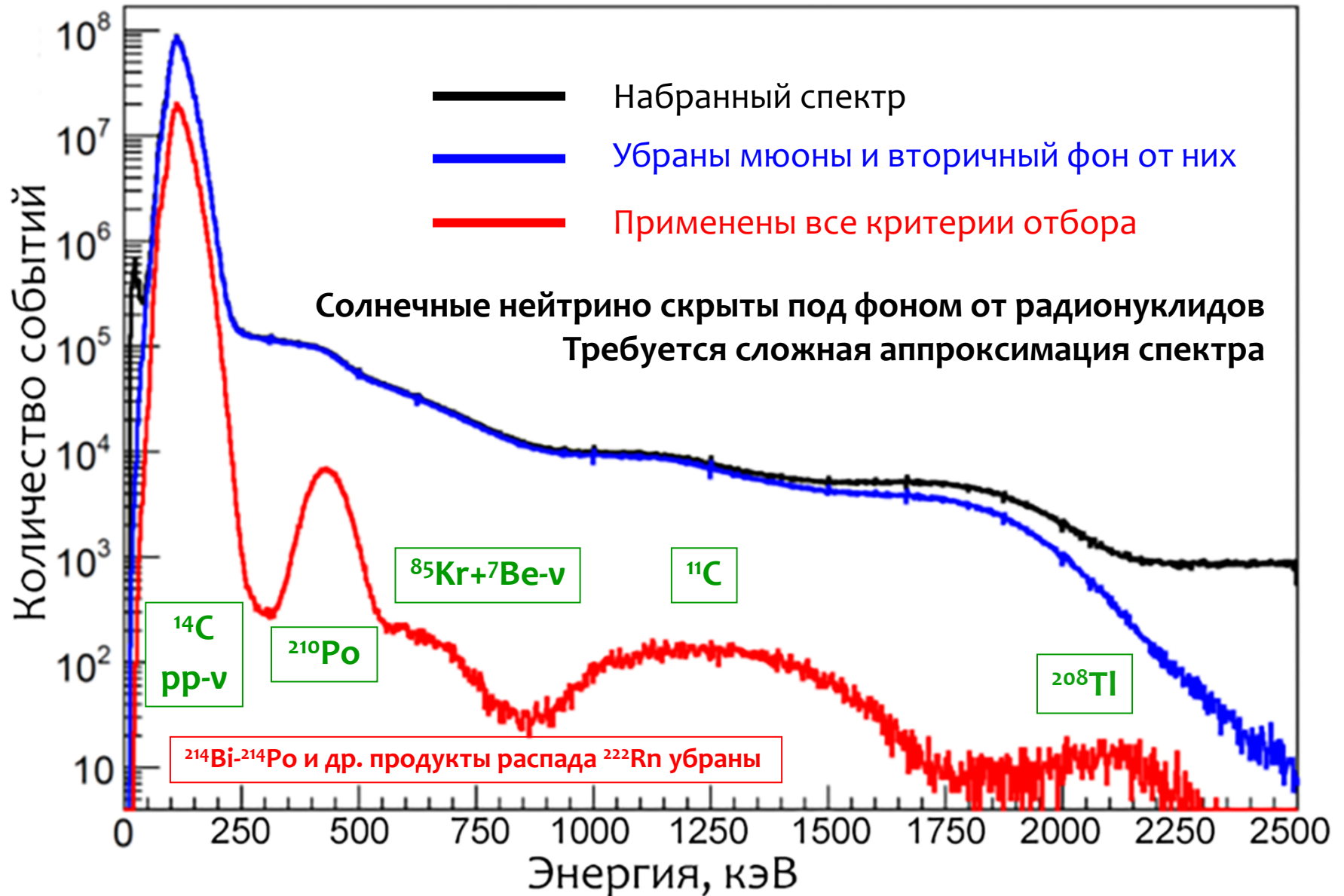
Спектр до/после отбора событий

(область малых энергий: 0.19 – 2.93 МэВ)

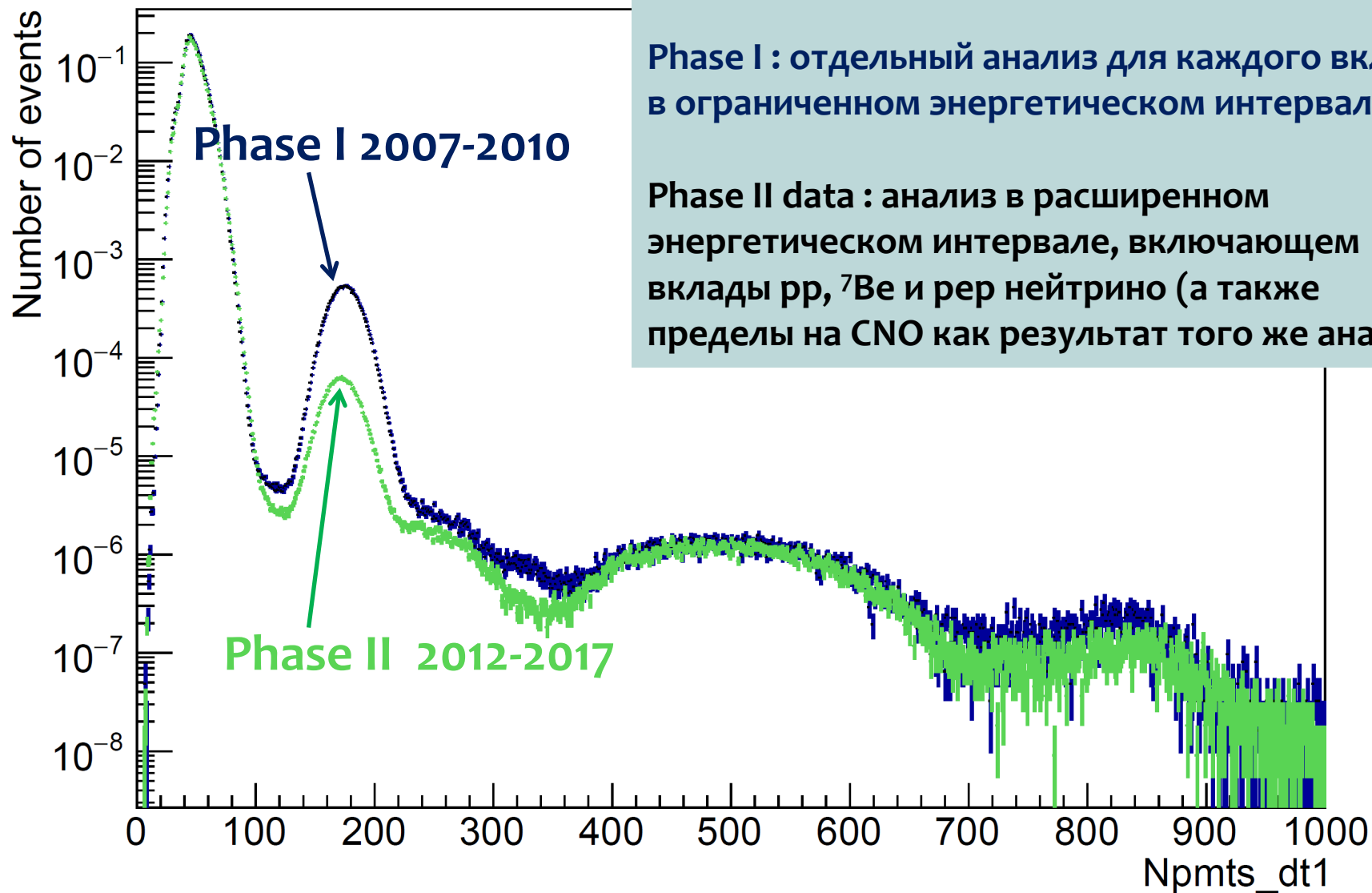


Спектр до/после отбора событий

(область малых энергий: 0.19 – 2.93 МэВ)



Разница анализов в Фазе I и Фазе II



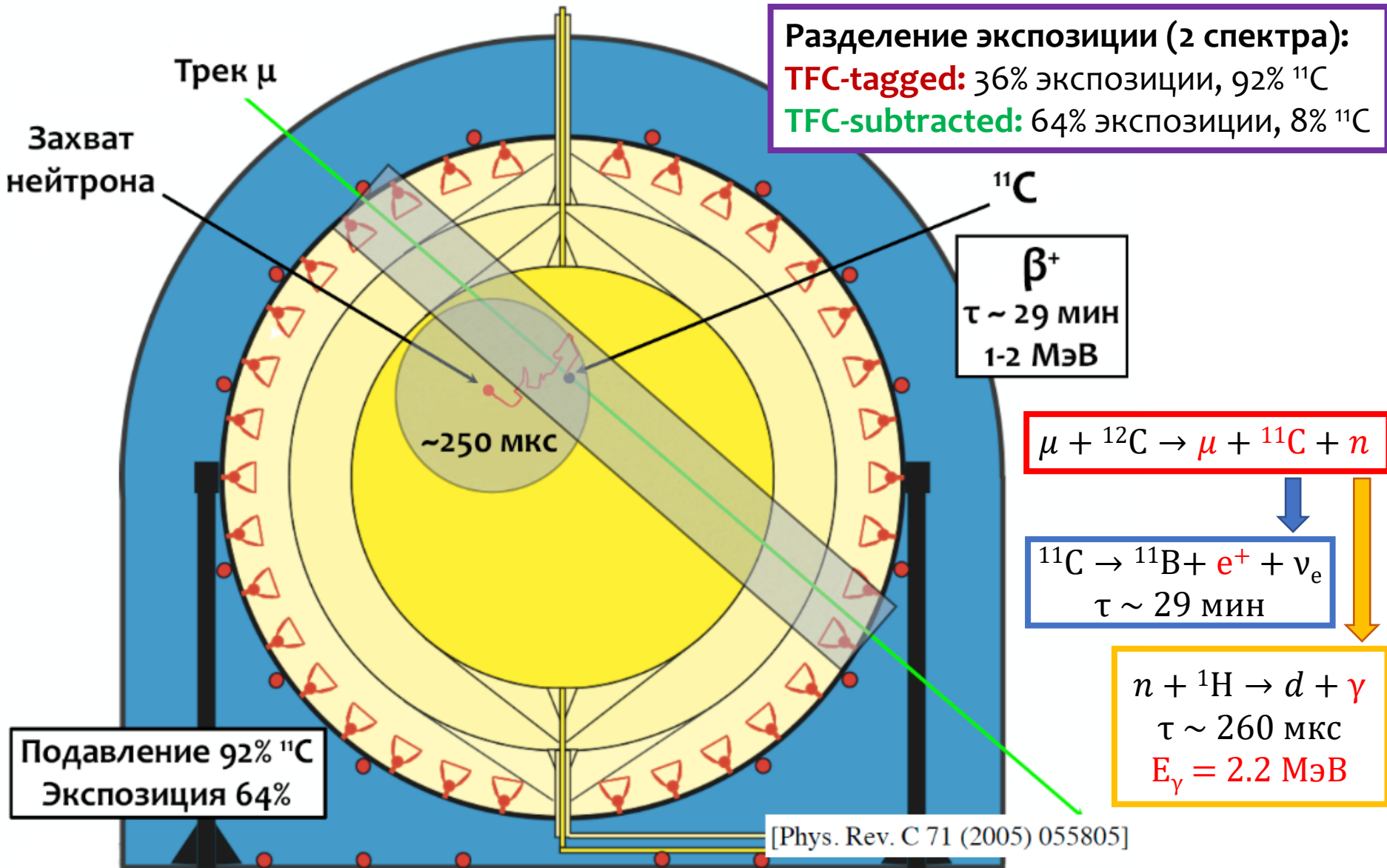
Phase II: меньше ^{85}Kr , ^{210}Bi и ^{210}Po

Phase I : отдельный анализ для каждого вклада в ограниченном энергетическом интервале

Phase II data : анализ в расширенном энергетическом интервале, включающем вклады pp, ^7Be и pep нейтрино (а также пределы на CNO как результат того же анализа)

Метод тройных совпадений для отбора ^{11}C

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



Многопараметрическая подгонка 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}C

Энергетический спектр
с меченым ^{11}C

Пространственное
распределение
событий

Параметр
разделения событий
по форме импульса

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

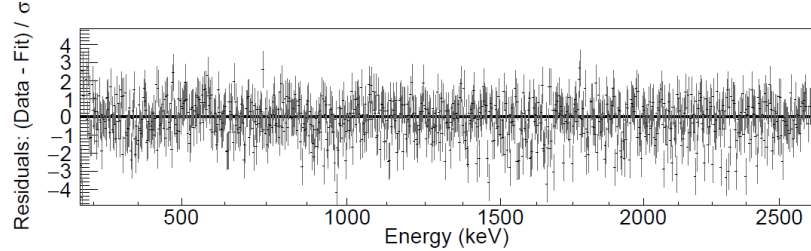
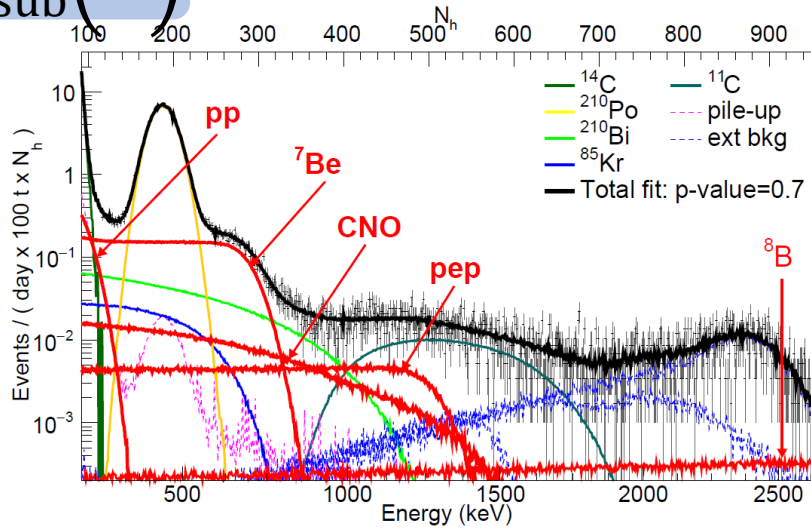
Спектральные компоненты для аппроксимации получают двумя способами:

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

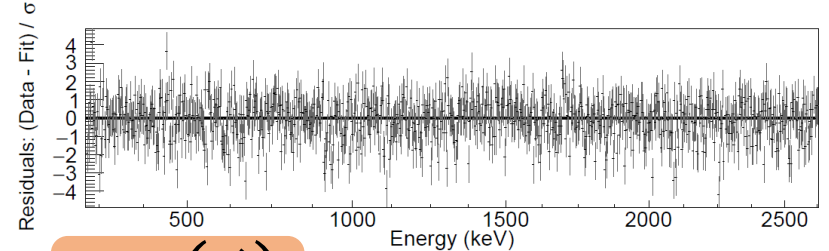
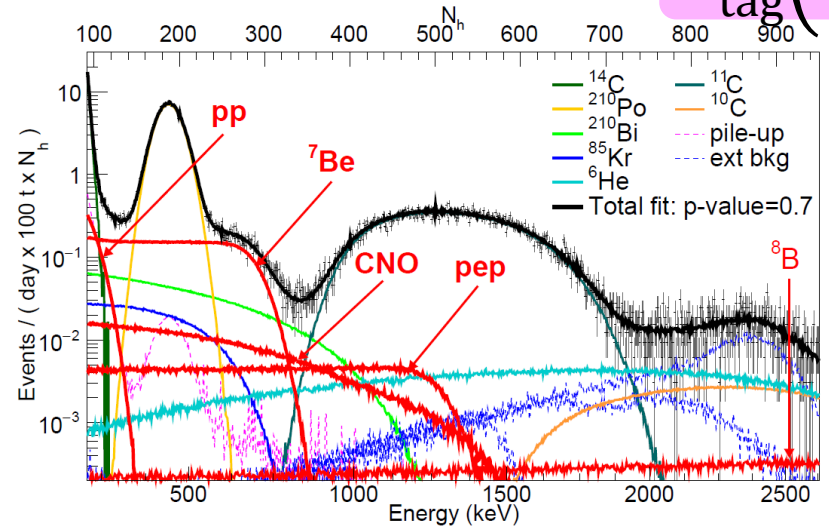
Используются по очереди оба набора спектральных компонентов
Результаты близки, разница включается в систематическую ошибку

Результаты подгонки

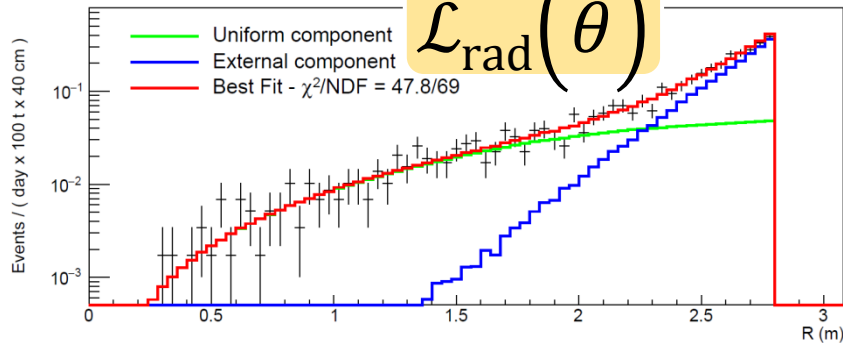
$$\mathcal{L}_{\text{sub}}(\vec{\theta})$$



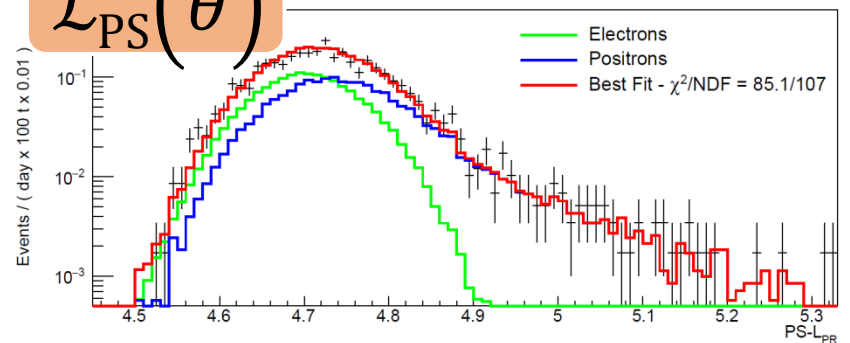
$$\mathcal{L}_{\text{tag}}(\vec{\theta})$$



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



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



Результаты измерений потоков солнечных нейтрино от pp-цикла

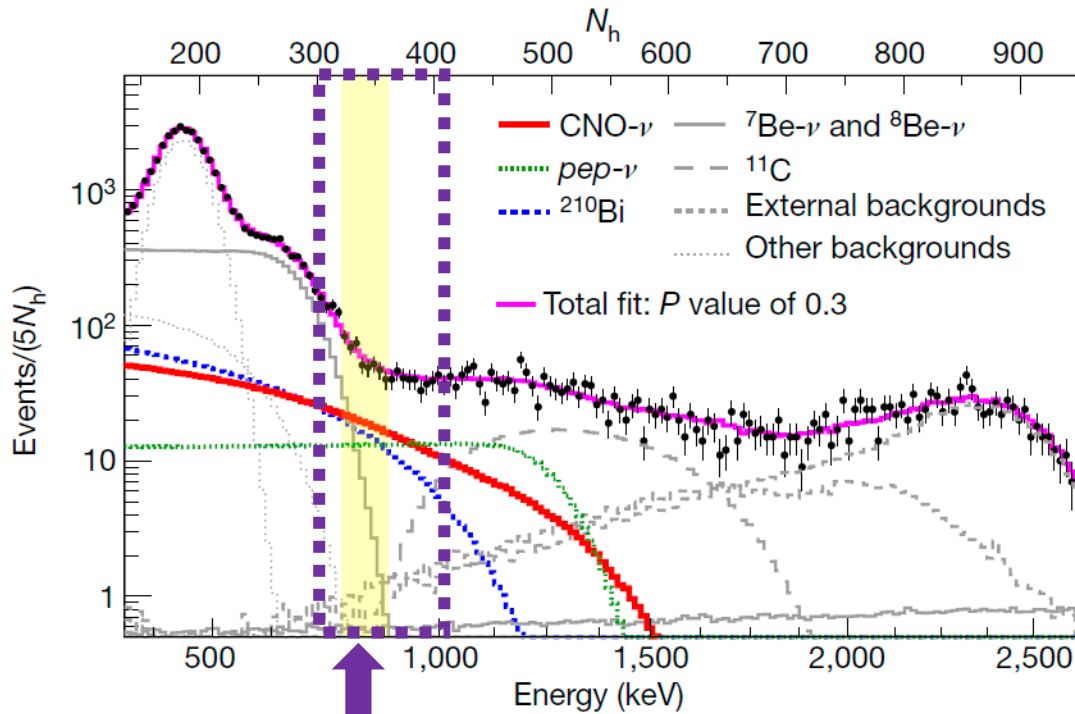
Реакция	Скорость счёта, соб. / (день * 100 т)	Ошибка, %	Поток (Borexino)*, $\nu / (\text{см}^2 * \text{с})$	Поток (CCM)**, $\nu / (\text{см}^2 * \text{с})$
pp	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	9.5	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	17	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1 \pm 0.01) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	17	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1 \pm 0.01) \times 10^8$ (LZ)
^7Be	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	2.7	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1 \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1 \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
^8B	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	7.6	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)

Результаты получены с использованием CCM значений для скорости счёта CNO- ν

*Параметры осцилляций: *I.Esteban et al., Journal of High Energy Physics 01 (2017)*

**Расчитанные потоки нейтрино: *N.Vinyole et al., Astr.Jour. 835,202 (2017)*

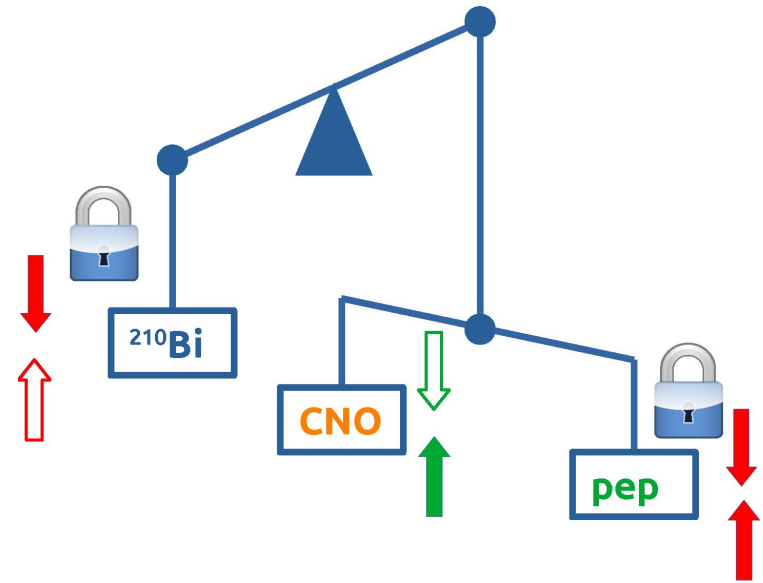
Стратегия измерения потока CNO-нейтрино



Region of interest
for the CNO- ν

Необходимо наложить ограничения на $pep\text{-}\nu$, ^{210}Bi ,
чтобы извлечь скорость счёта для CNO- ν

Ограничение на $pep\text{-}\nu$: (2.74 ± 0.04) свд / 100 т, получено из глобальной подгонки
с применением отношения pp/pep и ограничения на светимость Солнца

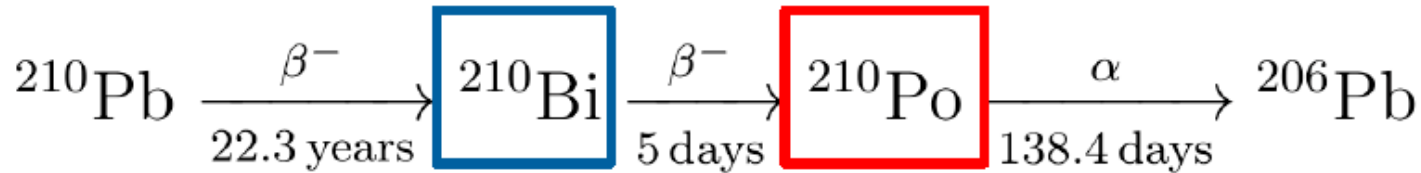


Корреляция между
компонентами спектра:
CNO- ν , $pep\text{-}\nu$, ^{210}Bi

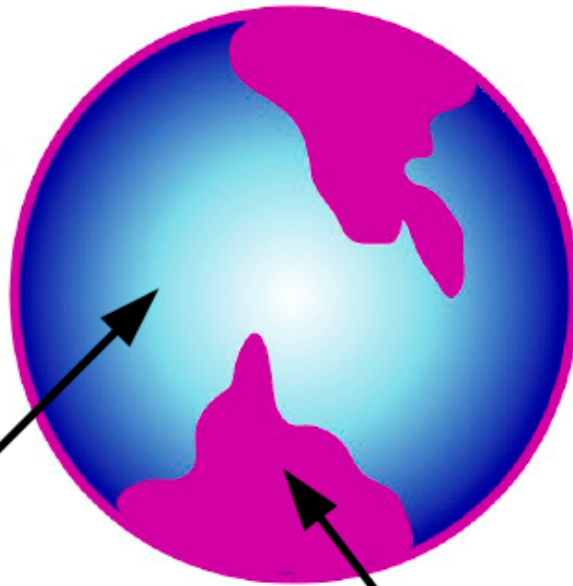
Как ограничить компоненту ^{210}Bi ?

Как ограничить компоненту ^{210}Bi ?

$$R(^{210}\text{Bi}) = R(^{210}\text{Po})? \quad R(\text{Po}) = R(\text{Po})_{\text{supported}} + R(\text{Po})_{\text{out-of-equilibrium}}$$

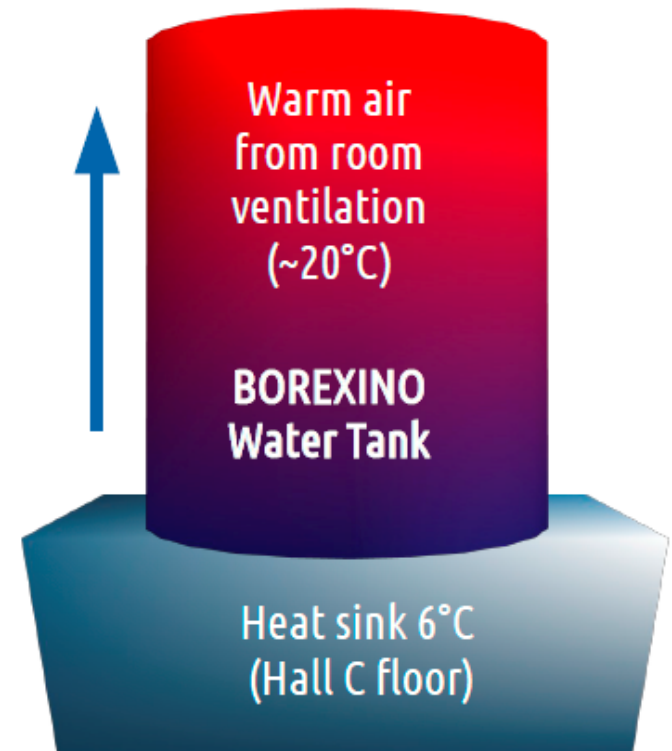


^{210}Po migration Mechanisms



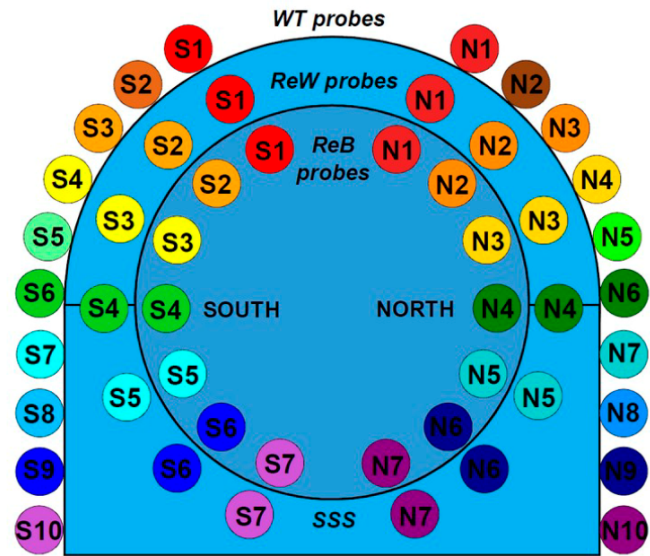
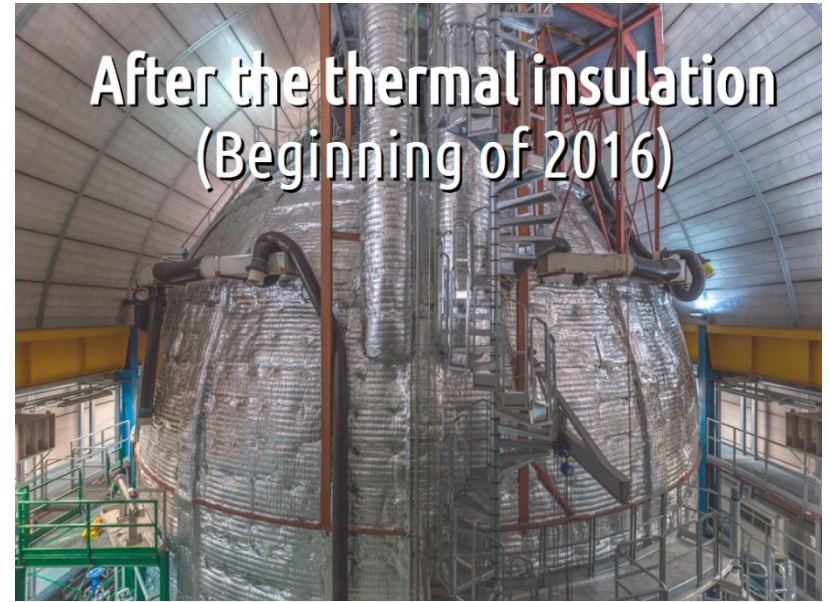
Diffusion:
Very slow
 $D \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
(diffusion coefficient)

Convection:
 ^{210}Po from the outer regions (strongly reduced by insulation)

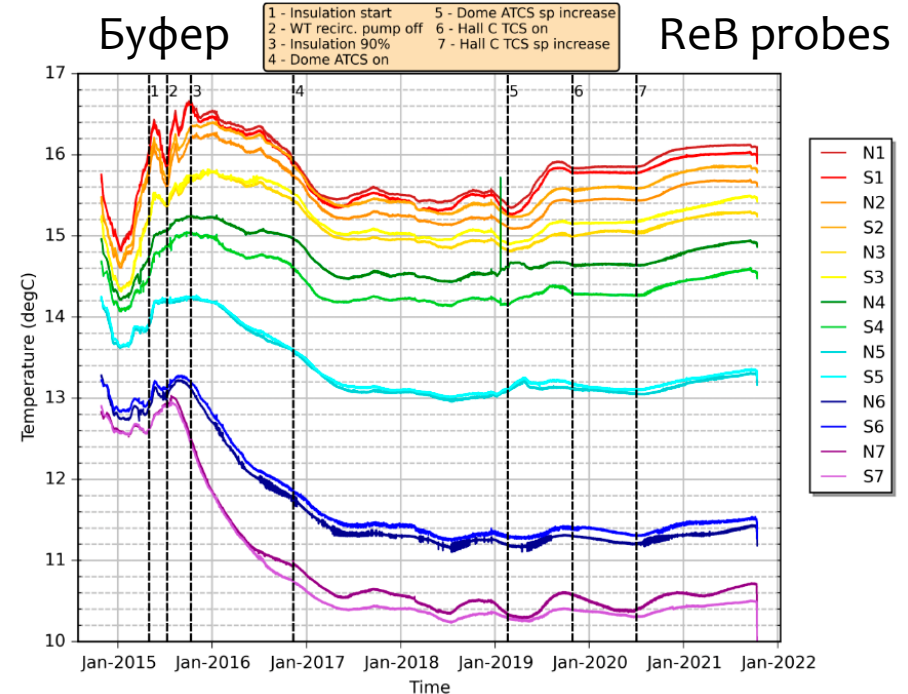


Idea: vertical gradient

Теплоизоляция детектора для подавления переноса ^{210}Po

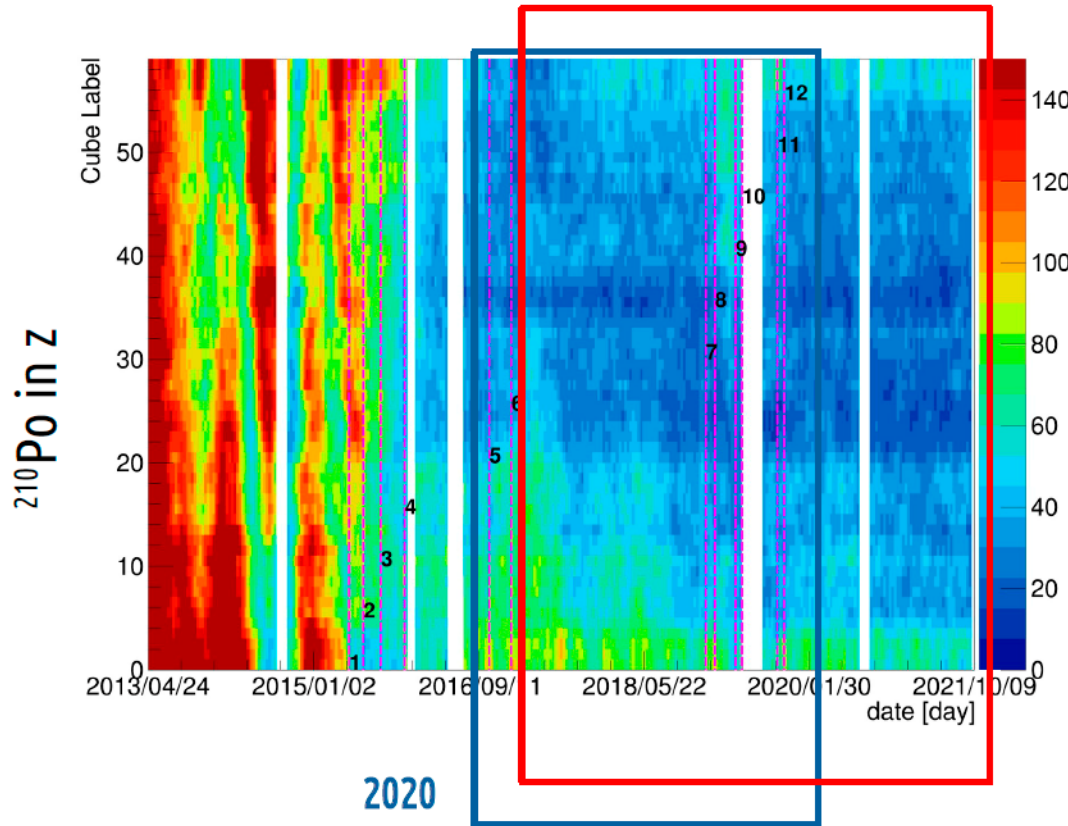


Около 50 датчиков температуры

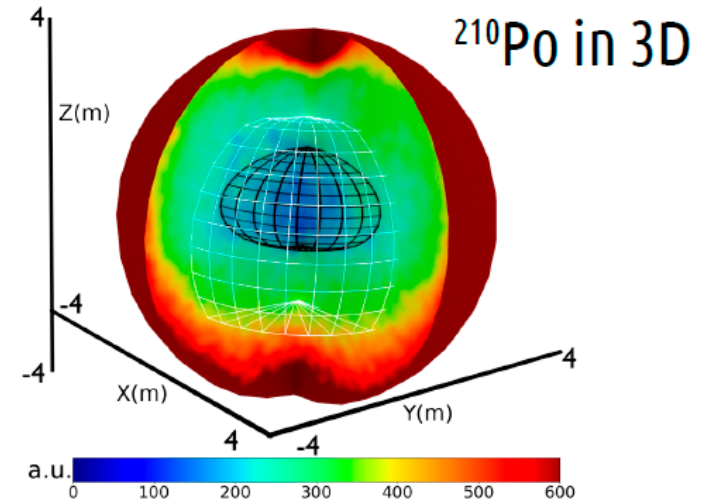


Результаты подавления переноса ^{210}Po

This work



The Low Polonium Field



Минимум при $z \sim 80$ см, что согласуется

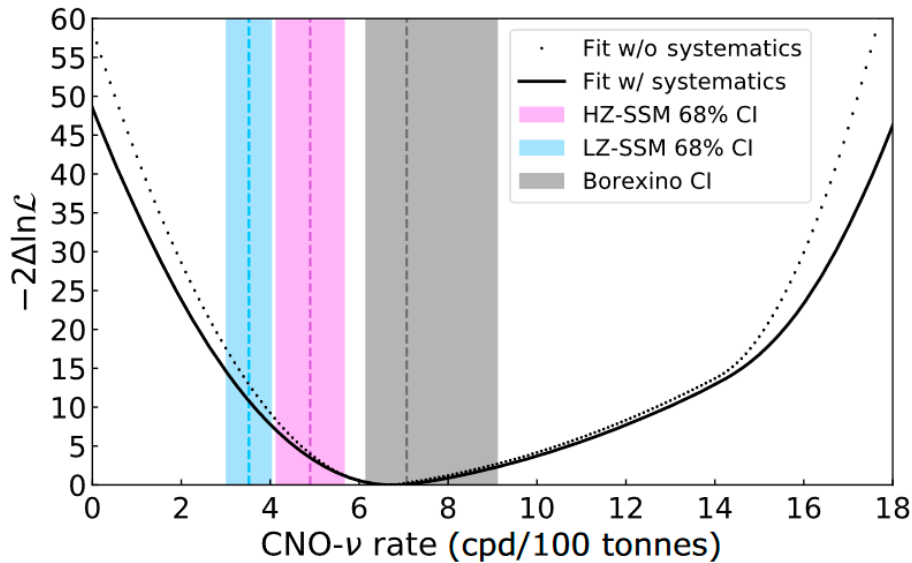
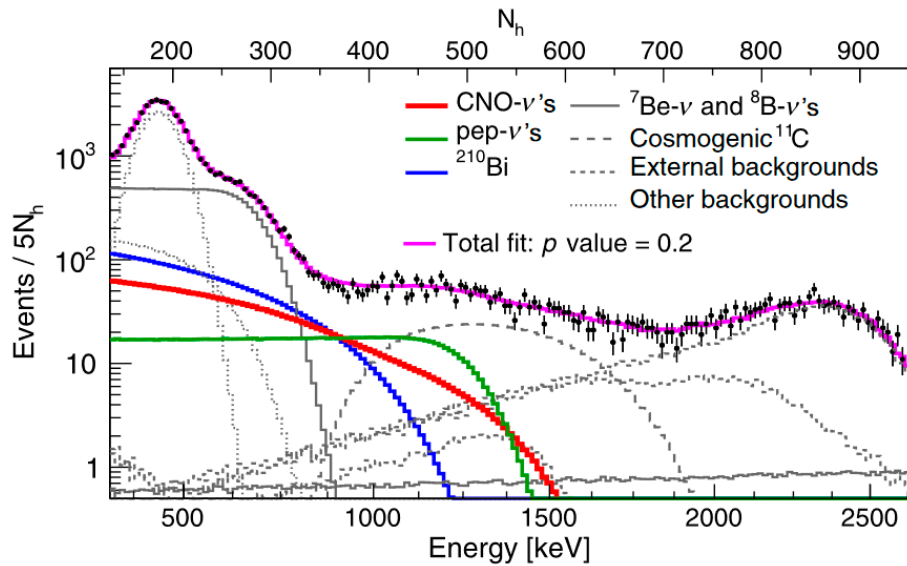
с численным моделированием динамики движения жидкости мишени

$$R(^{210}\text{Bi}) < R(^{210}\text{Po})_{\min} = R(^{210}\text{Bi}) + R(^{210}\text{Po})_{\text{vessel}}$$

Если $R(^{210}\text{Po})_{\text{vessel}} > 0 \rightarrow$ верхний предел на $R(^{210}\text{Bi}) \rightarrow$ нижний на CNO- ν

Итоговое ограничение: $R(^{210}\text{Bi}) < (10.8 \pm 1.0)$ свд / 100 т

Результаты исследования солнечных CNO-ν (2022)

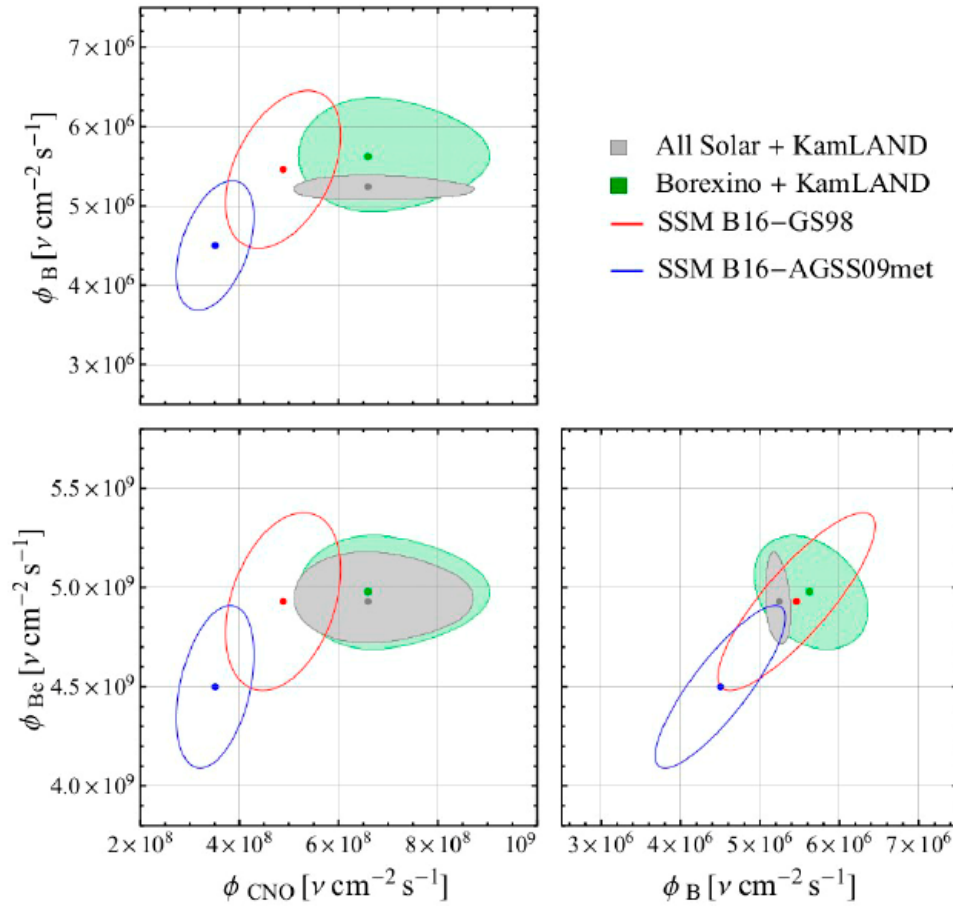


Скорость счёта ^{210}Bi , соб. / (день * 100 т)	10.8 ± 1.0
Скорость счёта CNO-ν, соб. / (день * 100 т)	$6.7^{+2.0}_{-0.8}$
Поток CNO-ν, $\nu / (\text{cm}^2 * \text{c})$	$6.6^{+2.0}_{-0.9} \times 10^8$
Достоверность	7σ
Исключение CCM LZ Только Borexino	3.1σ

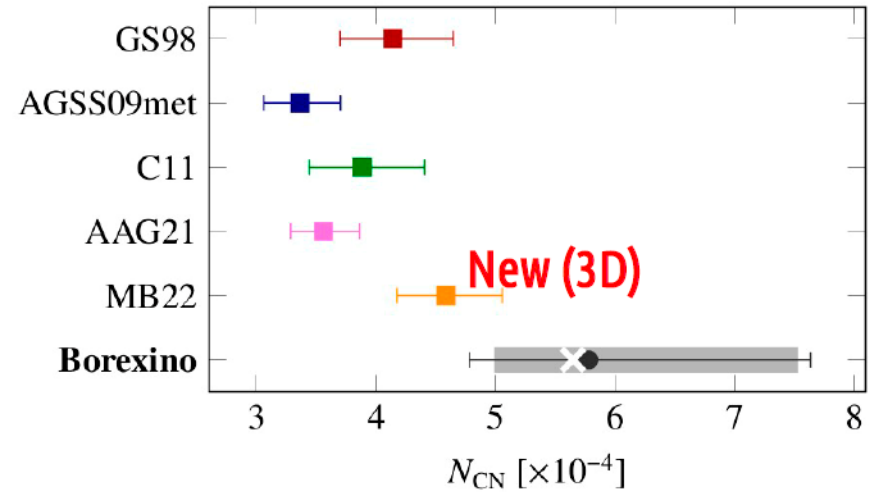
Phys. Rev. Lett. **129**, 252701 (2022)

Сопоставление новых результатов с предсказаниями разных версий Стандартной модели Солнца

Global analysis



Metallicity determination



$$\frac{N_{\text{CN}}}{N_{\text{CN}}^{\text{SSM}}} = 1.35 \times (0.96)^{-0.769} \times \left[1_{-0.136}^{+0.303}(\text{CNO}) \pm 0.097(\text{nucl}) \pm 0.023(^8\text{B}) \pm 0.005(\text{env}) \pm 0.027(\text{diff}) \pm 0.022(^{13}\text{N}/^{15}\text{O}) \right]$$

2σ tension between LZ metallicity and data

Tension between LZ and neutrino data

Учёт направления прилёта солнечных нейтрино

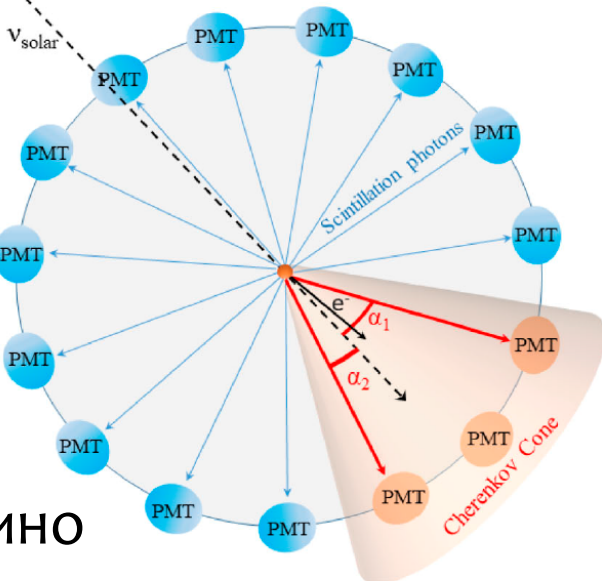
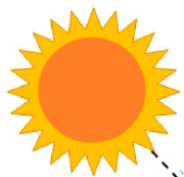
Коррелированная и интегрированная характеристика направления

Correlated and Integrated Directionality (CID)

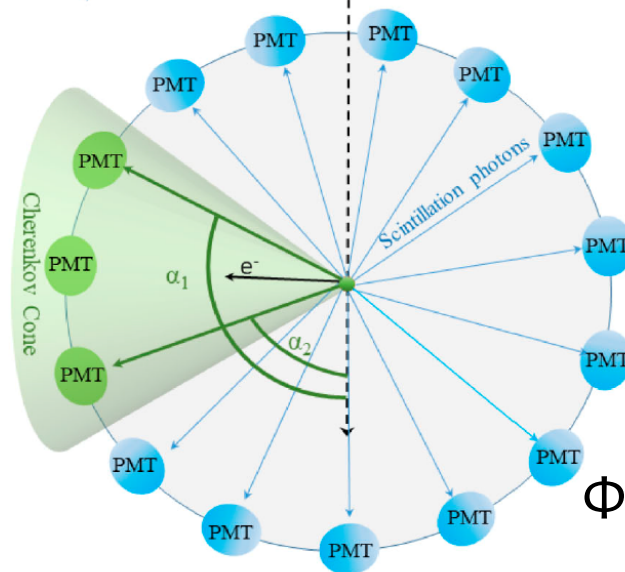
Возможно отделение сигнала от фона

Borexino ЖОС:

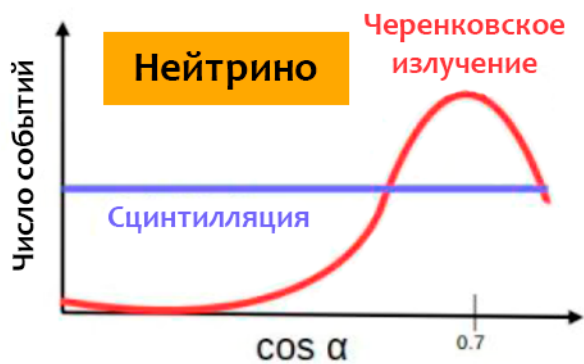
вклад черенковского излучения ~1%



Нейтрино



Фон



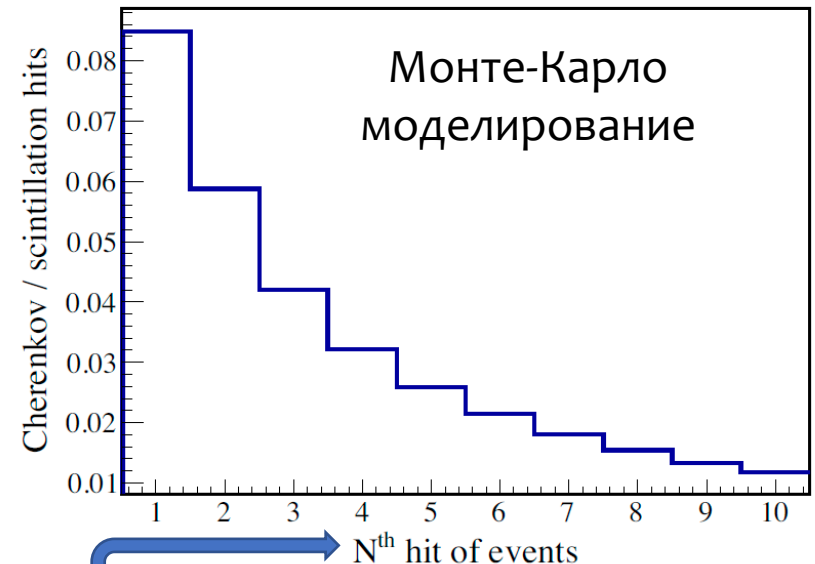
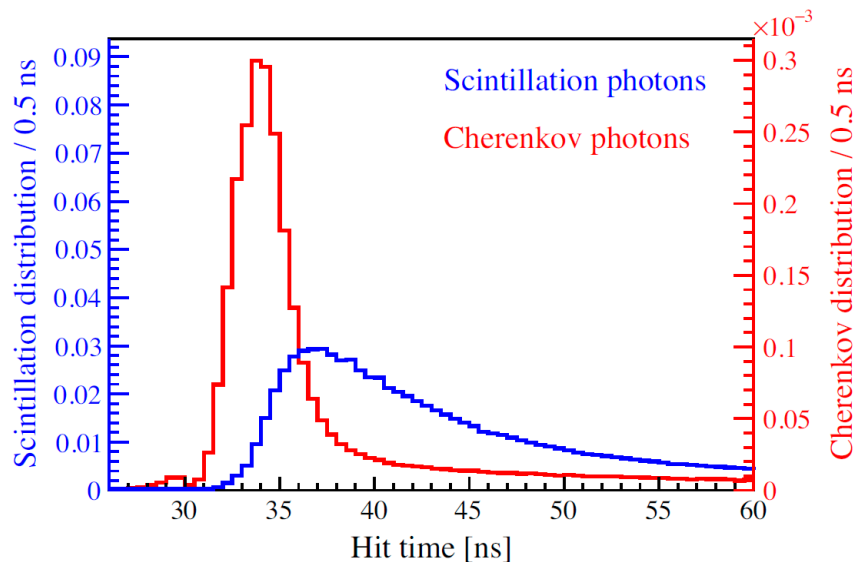
Коррелированная и интегрированная характеристика направления

Пособытийно невозможно различить сцинтилляционные и черенковские фотоны

- Необходимо статистическое разделение
- Черенковские фотоны испускаются **раньше**: через **десятки пс**,
сцинтилляционные – на масштабах **нескольких нс**
- Можно использовать время прилёта фотонов на ФЭУ

Идея CID:

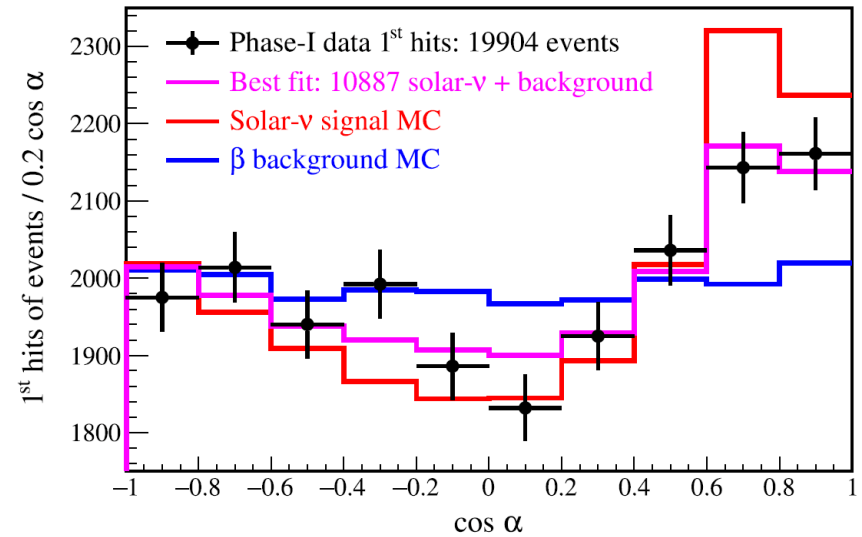
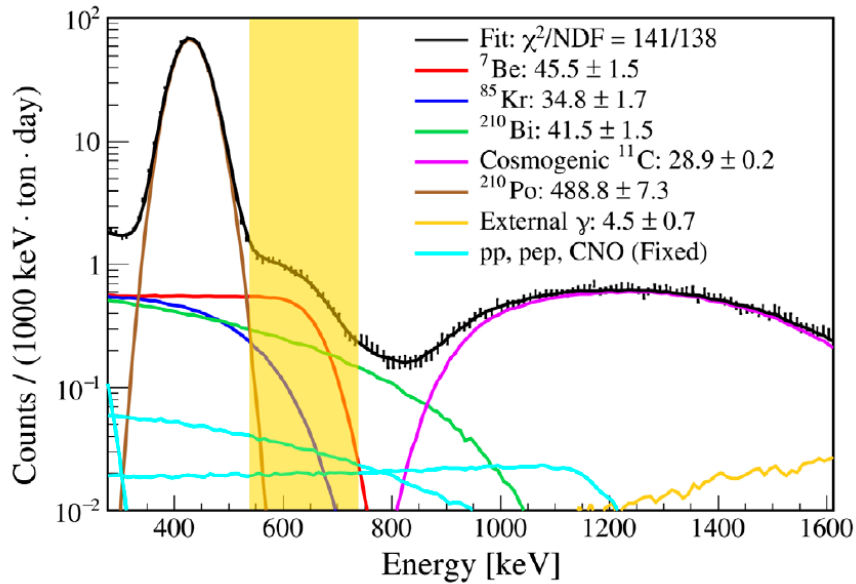
сопоставить по времени первые фотоны (хиты) каждого события с положением Солнца и затем получить распределение по углу (направлению) за время измерений



Для каждого события фотоны отсортированы по времени прилёта на ФЭУ

Коррелированная и интегрированная характеристика направления Проверка метода на солнечных ${}^7\text{Be}$ -нейтрино

Phys.Rev.D 105 (2022) 5, 052002
Phys.Rev.Lett. 128 (2022) 9, 091803



Ожидаемое число солнечных нейтрино

${}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}$

На основе ССМ версии HZ

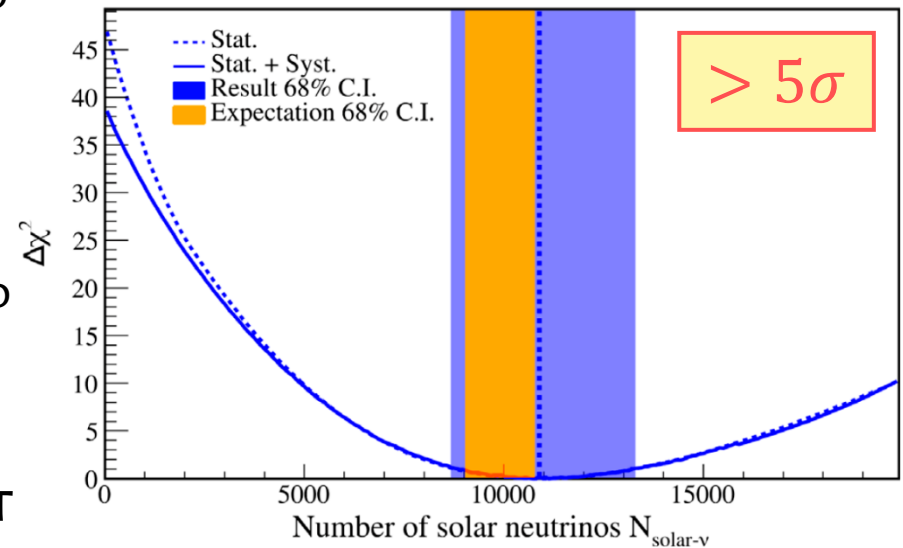
10187^{+541}_{-1127}

Измеренное число солнечных нейтрино

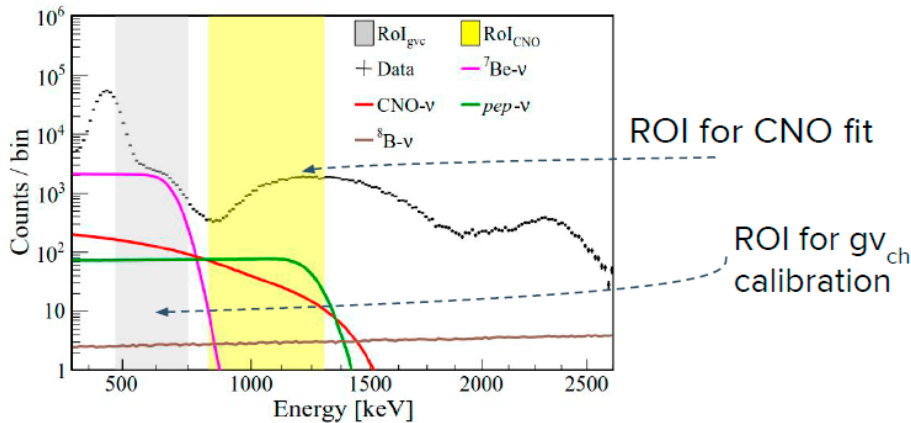
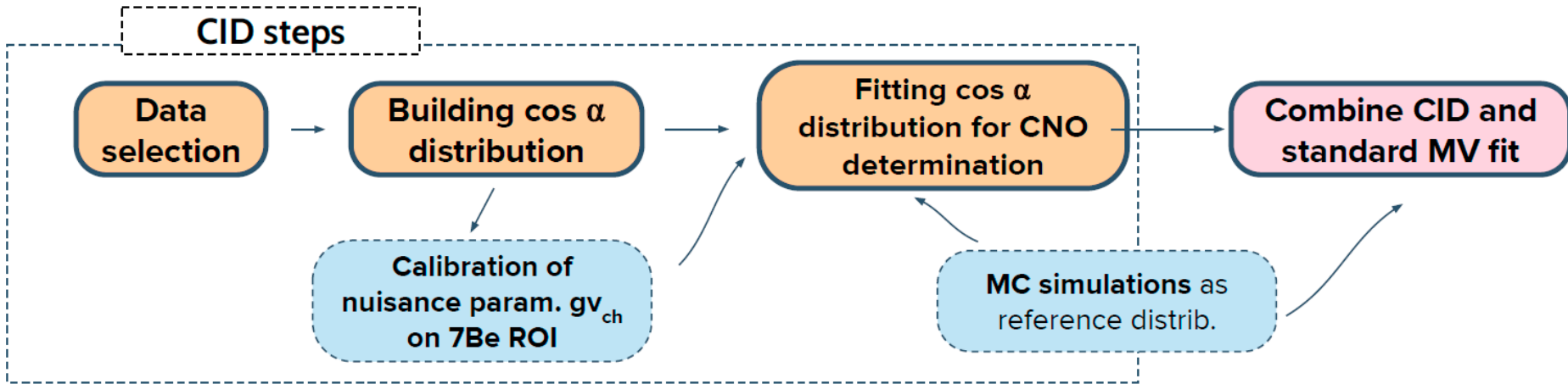
${}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}$

10887^{+2567}_{-2306}

$R ({}^7\text{Be}) = 51.6^{+13.9}_{-12.5}$ свд / 100 т



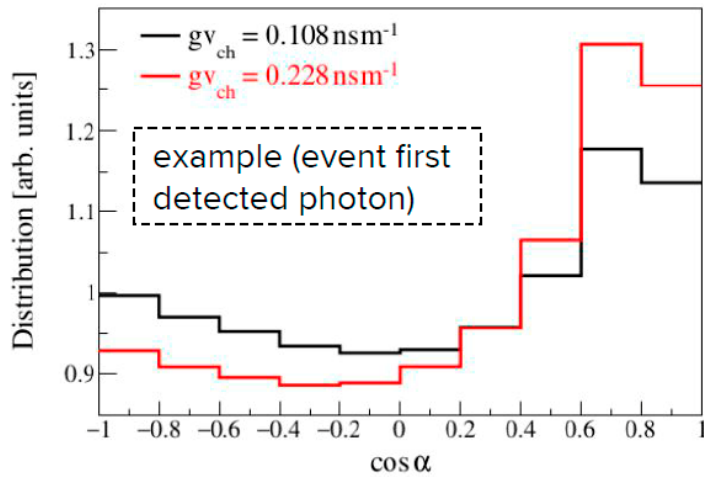
Измерение скорости счёта CNO-нейтрино с применением CID методики и без ограничения на ^{210}Bi



- Full Borexino dataset (2007-2021)
Exposure: 595.85 y x tonnes
- No information on background is needed!



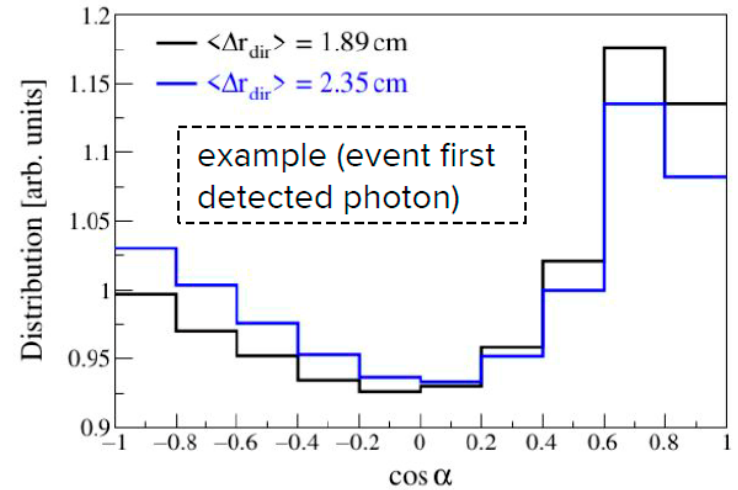
1) **Group velocity of Cherenkov photons**, relative to scintillation, at MC level: $t_{\text{corrected}} = t_{\text{MC}} - g v_{\text{ch}} d_{\text{MC}}$



Can be calibrated: ${}^7\text{Be}$ shoulder ROI

→ **constrained** nuisance parameter in CNO analysis

2) Small **bias in position reconstruction** in direction of the solar neutrino Δr due to Cherenkov hits



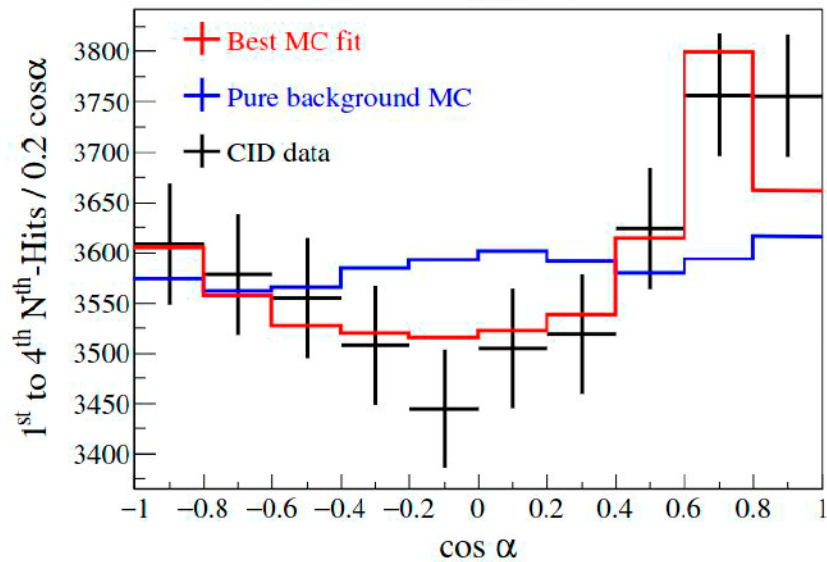
Cannot be calibrated: no dedicated e- Cherenkov calibration source

→ **free** nuisance parameter in CNO analysis

Подгонка распределения $\cos \alpha$ в CNO- ν ROI

$g\nu_{\text{ch}}$ calibration **unlocks** the CID analysis on the whole Borexino dataset and without 210Bi constraint
 Events $\cos \alpha$ distribution in the CNO ROI \rightarrow **obtain number of ν ($N_\nu = N_{\text{CNO}} + N_{\text{pep}} + N_{\text{8B}}$) and background events**

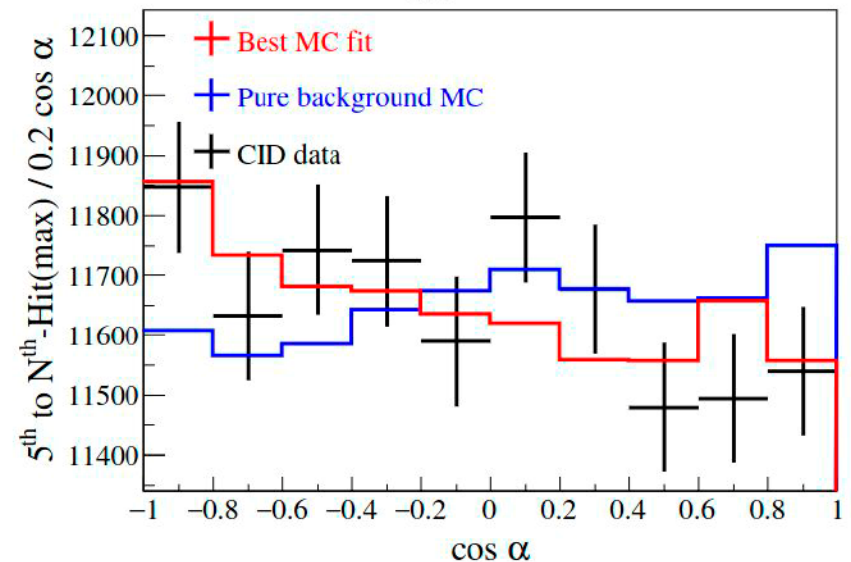
Phase I+II+III RoI_{CNO} N^{th} -Hit = 1 to 4



Earliest 4 hits: direct Cherenkov information
 (peak for neutrinos at $\cos \alpha \sim 0.75$)

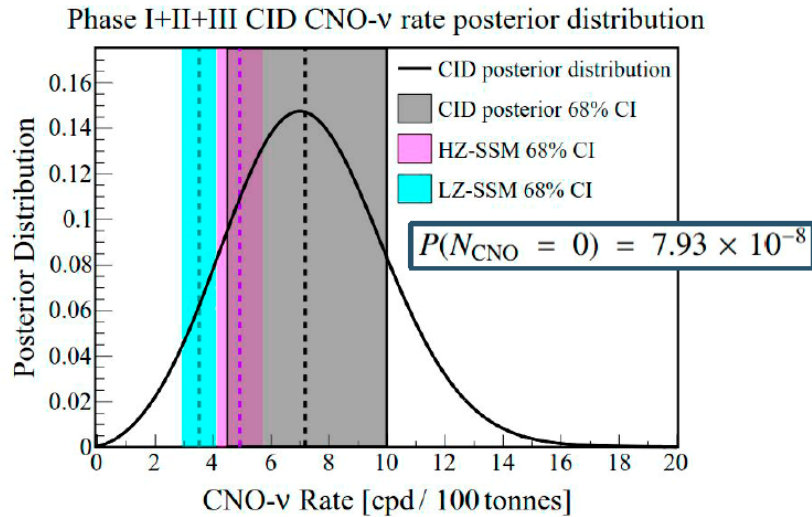
+

Phase I+II+III RoI_{CNO} N^{th} -Hit = 5 to N^{th} -Hit(max)



Later hits: indirect directionality
 information via Δr_{dir}

Результаты измерения скорости счёта CNO-нейтрино с применением CID методики и без ограничения на ^{210}Bi



Convolving both posteriors
 Subtracting pep- ν ^8B - ν contrib.
 Including systematics

- No-CNO hypothesis, applying also pep ν constraint, rejected at **5.3 σ level**
- No assumption on background levels (e.g. ^{210}Bi)
- Solar models prediction agreement: LZ-SSM is 1.7 times less likely to be true than HZ-SSM

Phys. Rev. D **108**, 102005 (2023)

$$R_{\text{CNO}}^{\text{CID}} = 7.2 \pm 2.5 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys)} \begin{matrix} +1.1 \\ -0.8 \end{matrix} \text{ (nuisance)} \frac{\text{cpd}}{100 \text{ tonnes}} = 7.2^{+2.8}_{-2.7} \frac{\text{cpd}}{100 \text{ tonnes}}$$

Для сравнения:

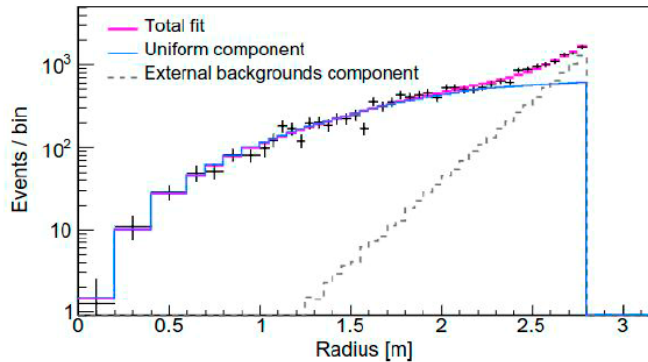
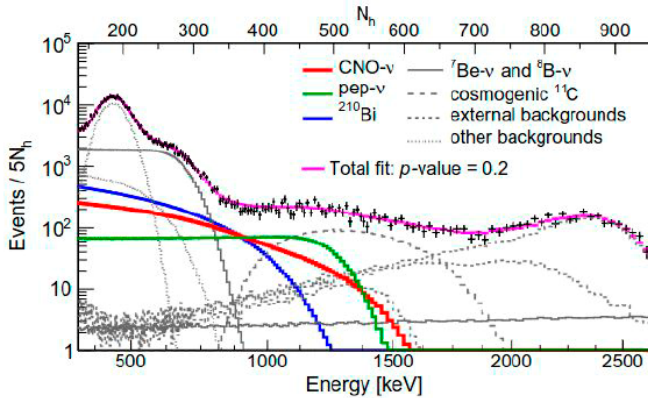
Скорость счёта CNO- ν ,
 соб. / (день * 100 т)

$$6.7^{+2.0}_{-0.8}$$

Phys. Rev. Lett. **129**, 252701 (2022)

Стратегия совместного анализа для наиболее точного измерения потока CNO-нейтрино

Combining the **multivariate analysis** (events energy and radial position) with **CID technique**, Phase-III dataset



$$\mathcal{L}_{\text{MV+CID}} = \underbrace{\mathcal{L}_{\text{MV}}}_{\text{multivariate fit (energy + radius)}} \cdot \mathcal{L}_{\text{pep}} \cdot \mathcal{L}_{^{210}\text{Bi}} \cdot \underbrace{\mathcal{L}_{\text{CID}}^{\text{P-I}} \cdot \mathcal{L}_{\text{CID}}^{\text{P-II+III}}}_{\text{CID constraints (new!)}}$$

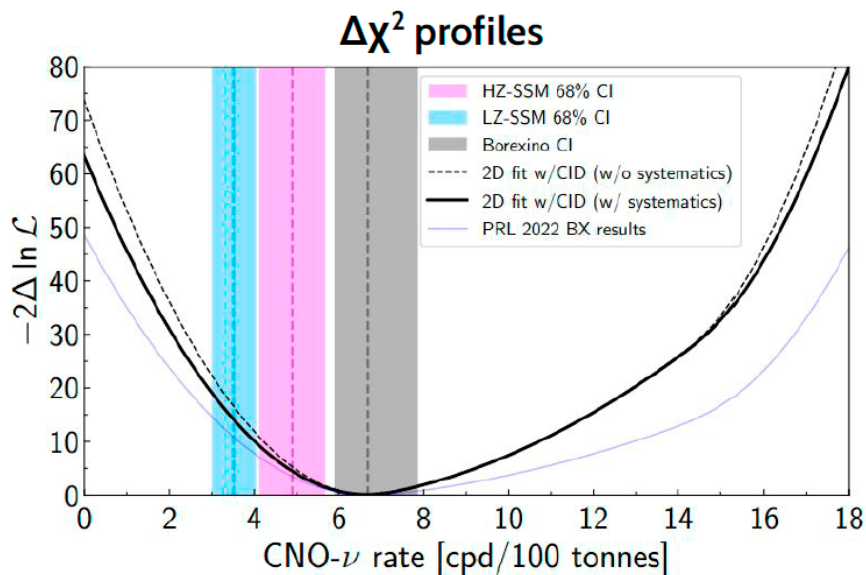
independent constraints

pep ν 1.4% rate constraint (solar physics + flavor oscill.)

^{210}Bi rate 10% constraint (thermal insulation)

Результаты совместного анализа для наиболее точного измерения потока CNO-нейтрино

Combining the **multivariate analysis** (events energy and radial position) with **CID technique**, Phase-III dataset



- Most precise CNO result ever obtained:
 $\Phi_{\text{CNO}} = 6.7^{+1.2}_{-0.8} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- No CNO hypothesis excluded at about 8σ
- Agreement with HZ-SSM scenario:
 LZ-SSM disfavored at 3.1σ level

Phys. Rev. D **108**, 102005 (2023)

	<i>Phys. Rev. Lett.</i> 129 , 252701 (2022)	<i>Phys. Rev. D</i> 108 , 102005 (2023)
Поток CNO- ν , $\nu / (\text{cm}^2 * \text{c})$	$6.6^{+2.0}_{-0.9} \times 10^8$	$6.7^{+1.2}_{-0.8} \times 10^8$
Ошибка, %	22	15

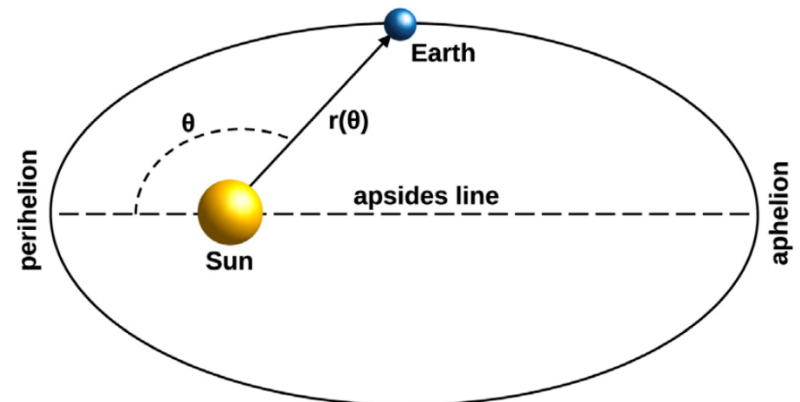
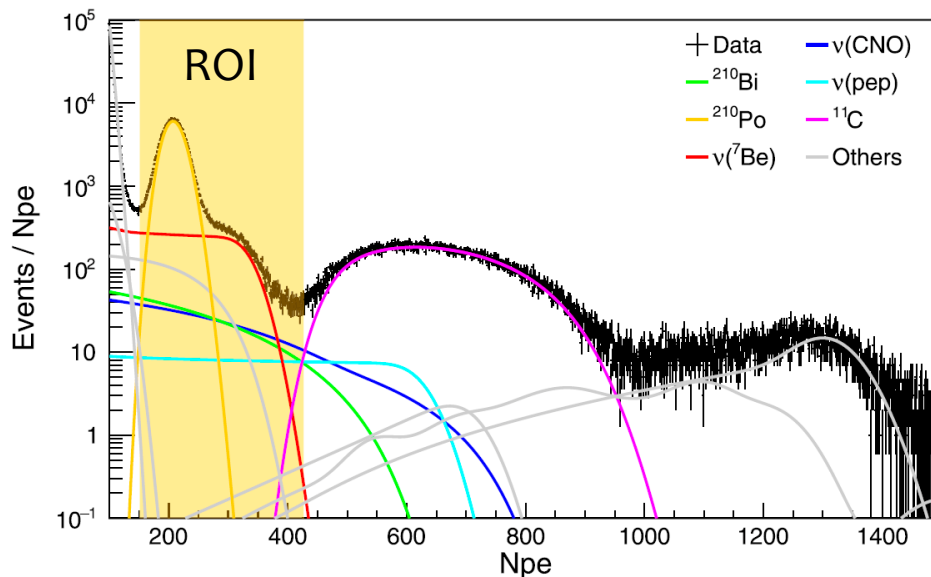
Сезонные вариации потока солнечных нейтрино

Поток солнечных нейтрино демонстрирует ежегодную периодическую вариацию из-за эллиптической формы орбиты Земли:

$$\Phi(t) \approx \frac{\Phi_0}{\bar{r}^2} [1 + 2\varepsilon \cos(\omega_y(t - t_0))] + O(\varepsilon^2)$$

ε - эксцентриситет земной орбиты

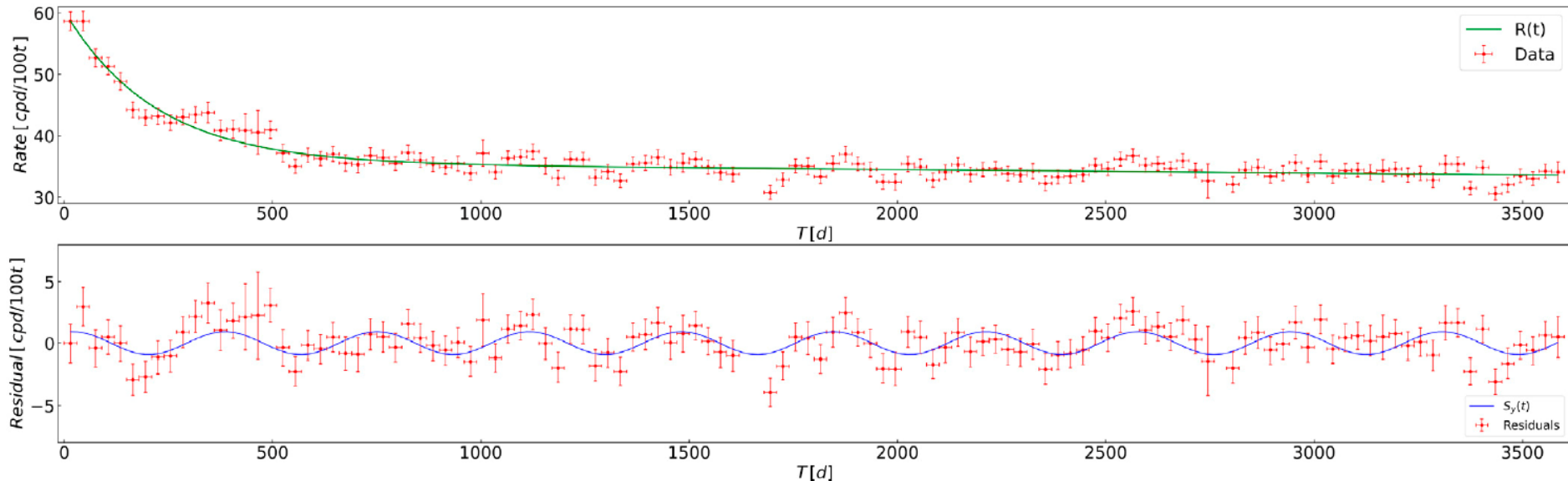
Ожидаемая вариация 3.34%



- Данные: Фаза-II и Фаза-III (11.12.2011 – 03.10.2021)
- Сферический доверительный объём, радиус 3 м (~ 100 т)
- Фон от α -распадов ^{210}Po уменьшается с помощью отбора событий по форме импульса (эффективность >99%)
- Основной вклад в ROI от $^7\text{Be}-\nu$

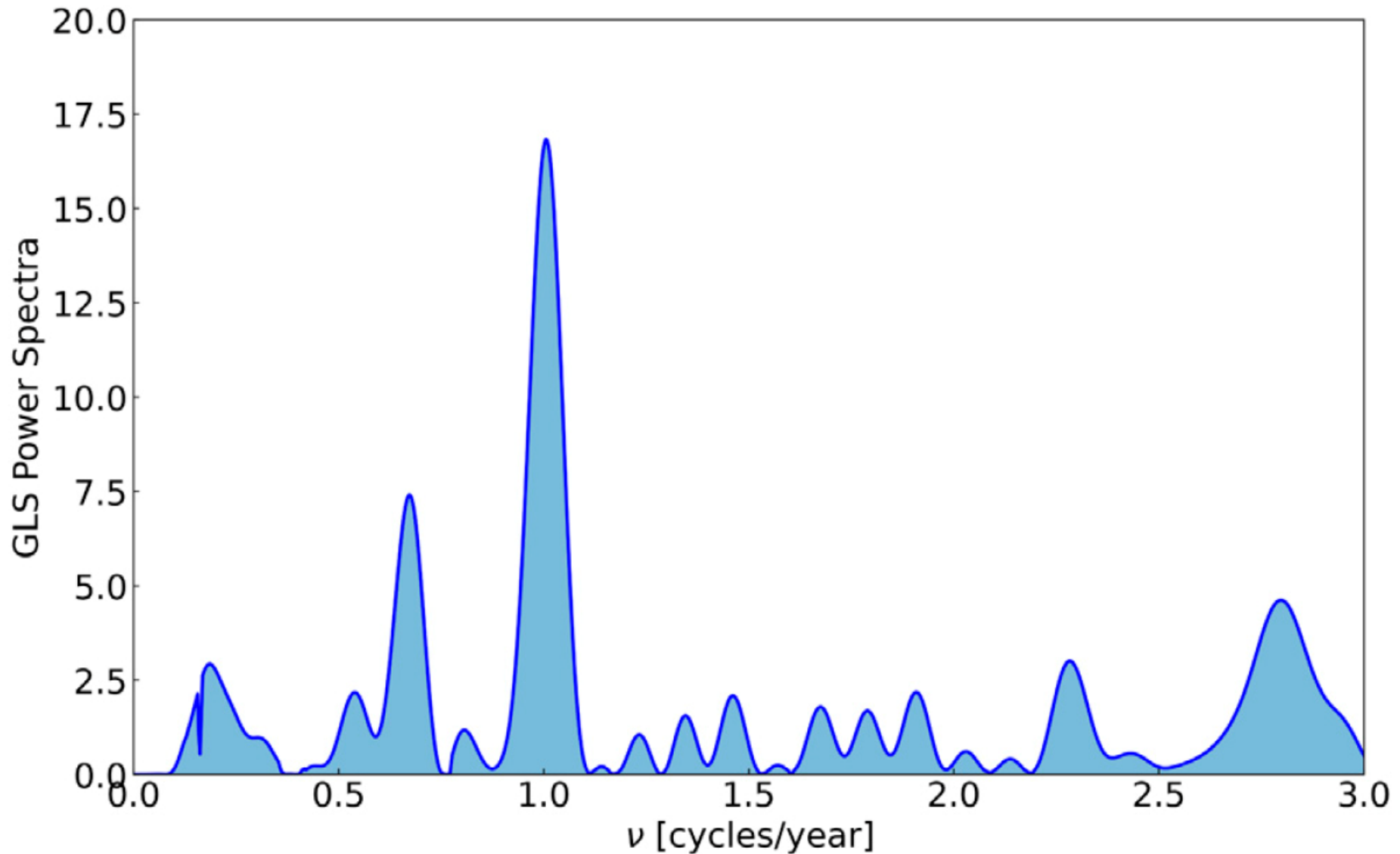
Частотный анализ для поиска сезонных вариаций

- Частотный анализ выполнен с применением **обобщенного метода Ломба–Скаргла**, т.е. одной из версий спектрального анализа методом наименьших квадратов
- Обобщённый метод используется как более универсальный, что позволяет искать вариации с небольшим периодом (например, асимметрия нейтринного потока день-ночь)
- Предварительно из наблюдаемой временной зависимости скорости счёта исключена экспоненциальная компонента, связанная с остаточным фоном от ^{210}Po , ^{210}Bi и ^{85}Kr



Каждая точка соответствует усреднённому значению скорости счёта за 30 дней

Частотный анализ для поиска сезонных вариаций



Периодограмма с чётким пиком в значении 1 год. Достоверность: 5.3σ

Параметры орбиты Земли

Остаточная временная зависимость скорости счёта событий в детекторе подгонялась простой моделью

$$S_y(t) = A_y \cos(\omega_y(t - t_0))$$

Результаты подгонки:

- $A_y = (0.94 \pm 0.16)$ свд / 100 т
- $T_y = (363.1 \pm 3.6)$ дней
- $t_0 = (30 \pm 20)$ дней
дата перигелия
- Достоверность: 5.9σ

$$A = 2\varepsilon = \frac{A_y}{R_\odot} = (3.68 \pm 0.65)\%$$

Ожидаемая вариация $2\varepsilon = 3.34\%$

$R_\odot = (25.6 \pm 1.27)$ свд / 100 т

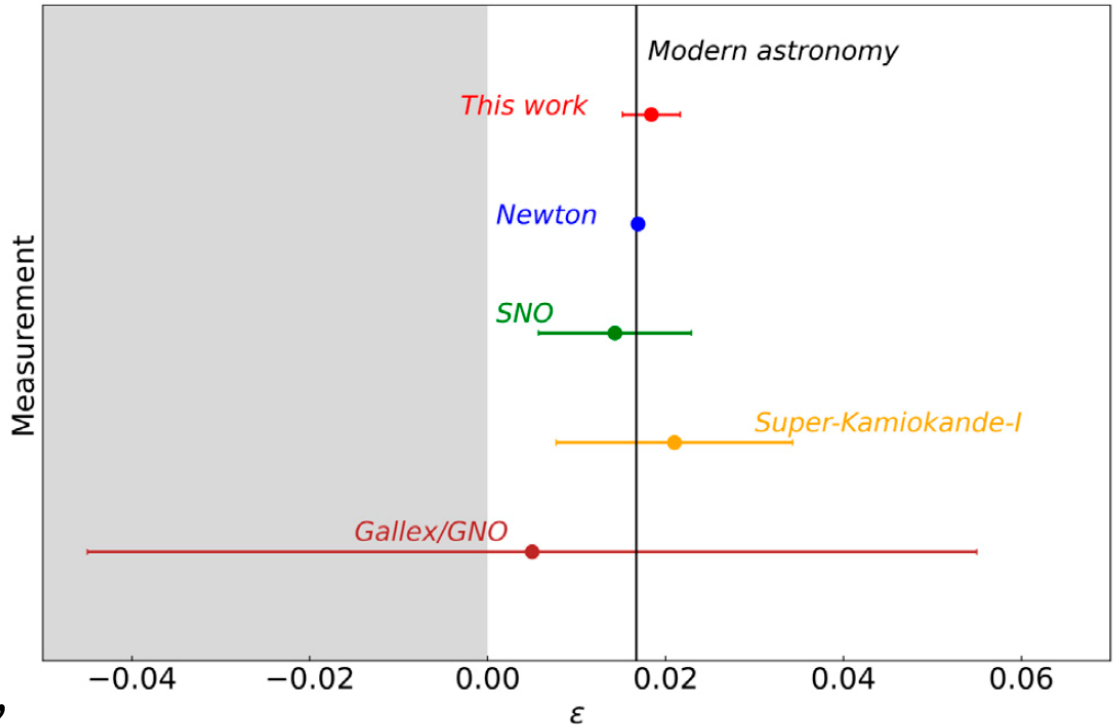
Средняя скорость счёта нейтрино, предсказание ССМ, консервативно

Первое измерение

продолжительности года

с точностью на уровне **1%**

с помощью солнечных нейтрино

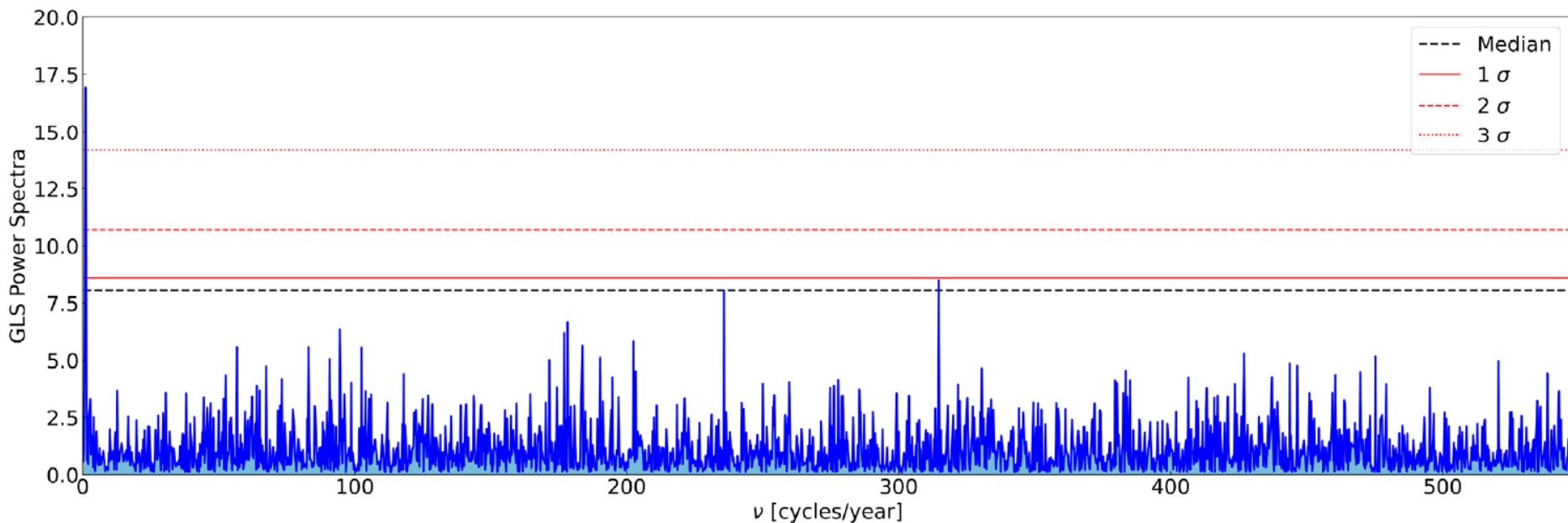


$$\varepsilon = 0.0184 \pm 0.0032$$

Современное значение: 0.0167

Astroparticle Physics **145**, 102778 (2023)

Частотный анализ для поиска суточных вариаций



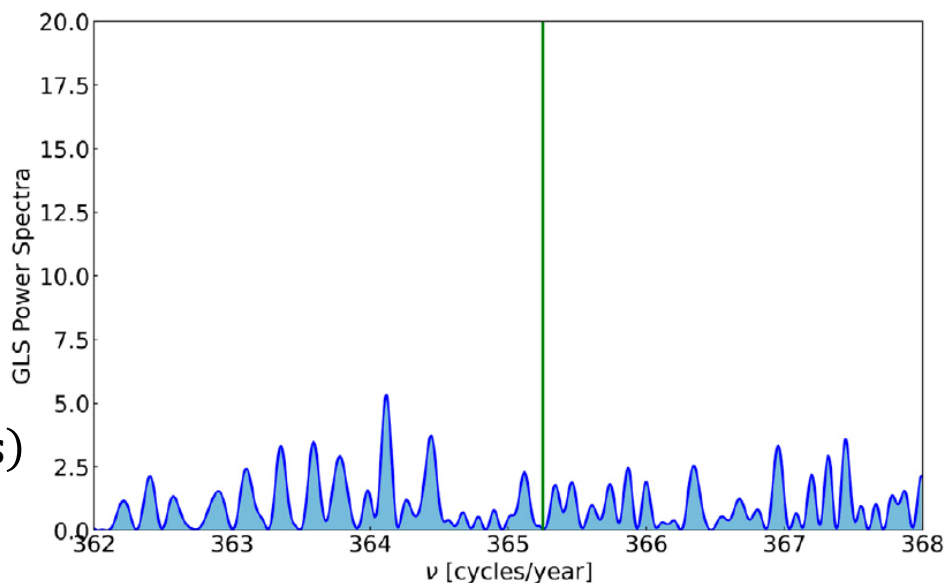
Результат предыдущего анализа (Фаза-I):

$$A_{\text{dn}} = 2 \frac{D - N}{D + N} =$$
$$= 0.001 \pm 0.012 \text{ (stat)} \pm 0.007 \text{ (sys)}$$

Текущий результат (Фаза-II + Фаза-III):

$$A_{\text{dn}} = 0.0030 \pm 0.0094 \text{ (stat)} \pm 0.0002 \text{ (sys)}$$

Упрощённый анализ (проверка),
нельзя напрямую сравнивать с Фазой-I



Заключение

1. Детектор Borexino успешно завершил измерения, но анализ данных продолжается
2. За последние несколько лет удалось точнее измерить поток CNO-нейтрино и наложить более строгие ограничения на параметры Стандартной модели Солнца
3. Разработаны новые экспериментальные методы, позволяющие дополнительно уменьшать фон в нейтринных детекторах. Особенно интересен метод учёта направления прилёта солнечных нейтрино в сцинтилляционных детекторах
4. Достоверно установлено наличие сезонных вариаций потока солнечных нейтрино. Нейтринным методом измерены параметры орбиты Земли
5. Ожидаются уточнения потоков солнечных нейтрино от pp -цикла, новое ограничение на магнитный момент нейтрино и время жизни электрона. Обновление результатов возможно благодаря увеличенной статистике, дополнительному подавлению фона и новому более точному методу коррекции энергии

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

С наилучшими пожеланиями!

Коллаборация Vorexino



Лето 2017 года

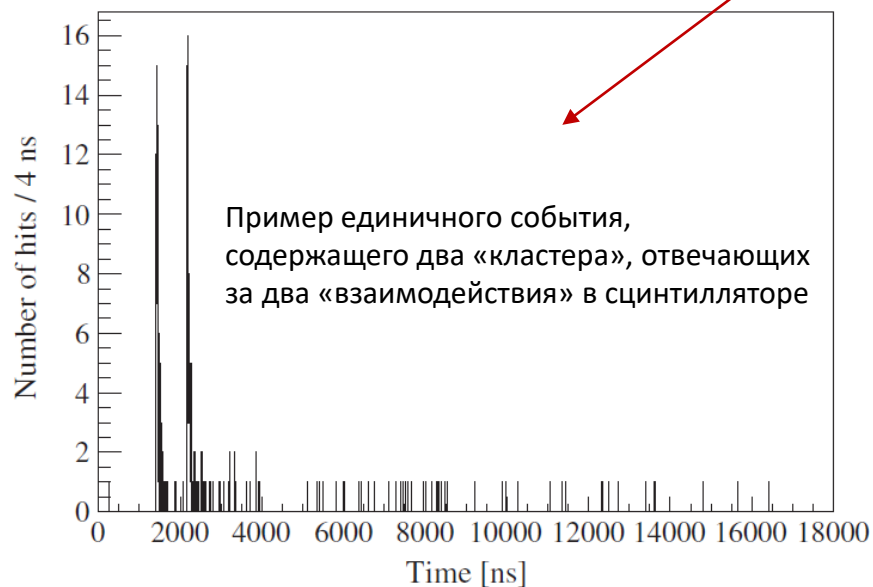
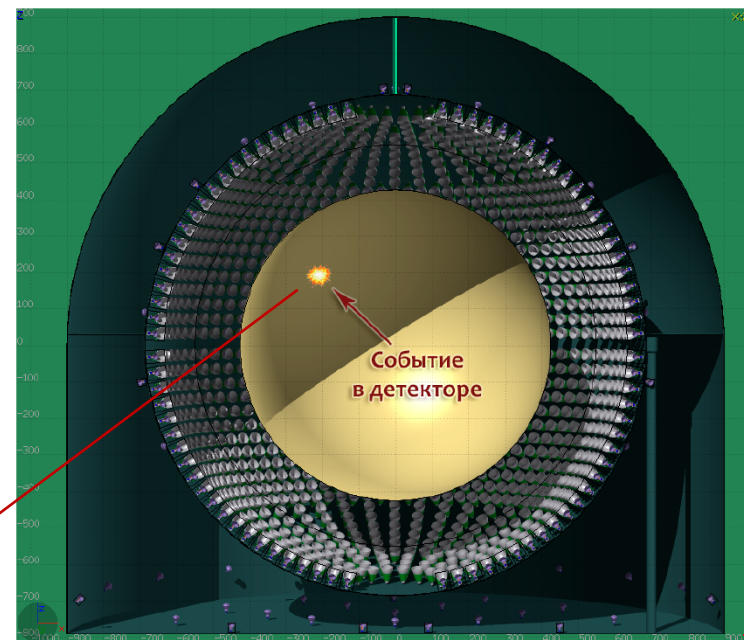
Дополнительные слайды

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 ?

Фоны в детекторе Borexino

Background LER	Rate (Bq per 100 t)
^{14}C (0.156 MeV, β^-)	$[40.0 \pm 2.0]$
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)	$[0.042 \pm 0.008]$
^{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).

Измеренные Borexino и ожидаемые из СSM потоки солнечных нейтрино

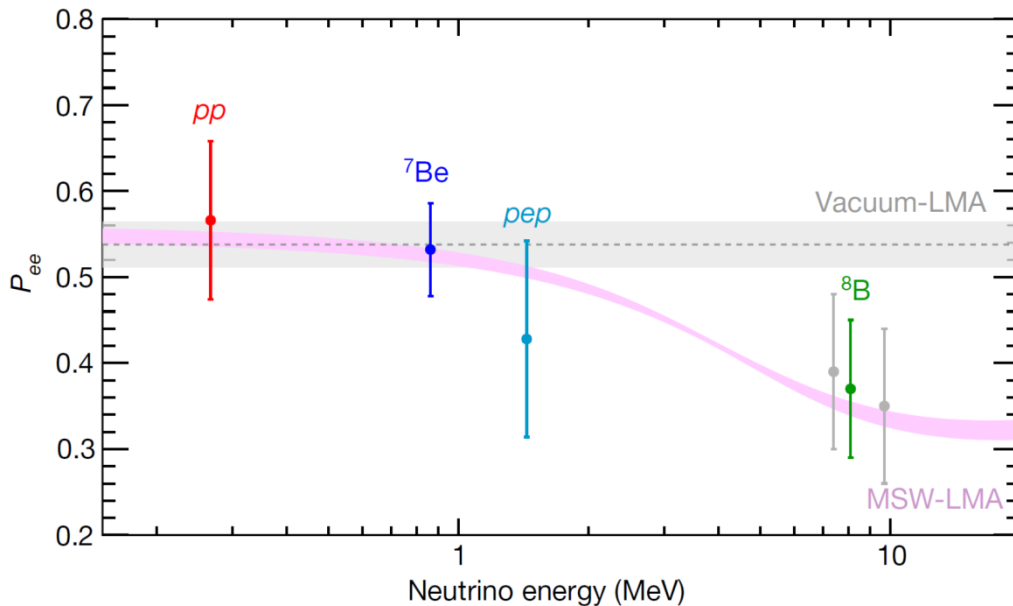
Table 2 | Borexino experimental solar-neutrino results

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.)	< 7.9×10^8 (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.)	< 2.2×10^5 (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)

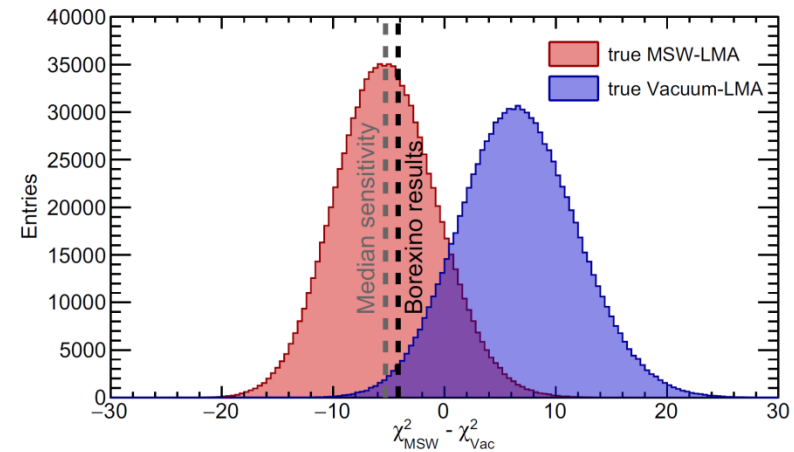
Measured neutrino rates (second column): for pp , ${}^7\text{Be}$, pep and CNO neutrinos we quote the total counts without any threshold; for ${}^8\text{B}$ and hep neutrinos we quote the counts above the corresponding analysis threshold. Neutrino fluxes (third column) are obtained from the measured rates assuming the MSW-LMA oscillation 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.

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.

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 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]
<i>pp</i>	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \times 10^{10}$	131.0 ± 2.4	$5.98 (1 \pm 0.006) \times 10^{10}$	132.1 ± 2.3	$6.03 (1 \pm 0.005) \times 10^{10}$
⁷ Be	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.13^{+0.07}_{-0.10}) \times 10^9$	47.8 ± 2.9	$4.93 (1 \pm 0.06) \times 10^9$	43.7 ± 2.6	$4.50 (1 \pm 0.06) \times 10^9$
<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 ± 0.05	$1.44 (1 \pm 0.009) \times 10^8$	2.78 ± 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 ± 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.)	< 7.9×10^8 (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

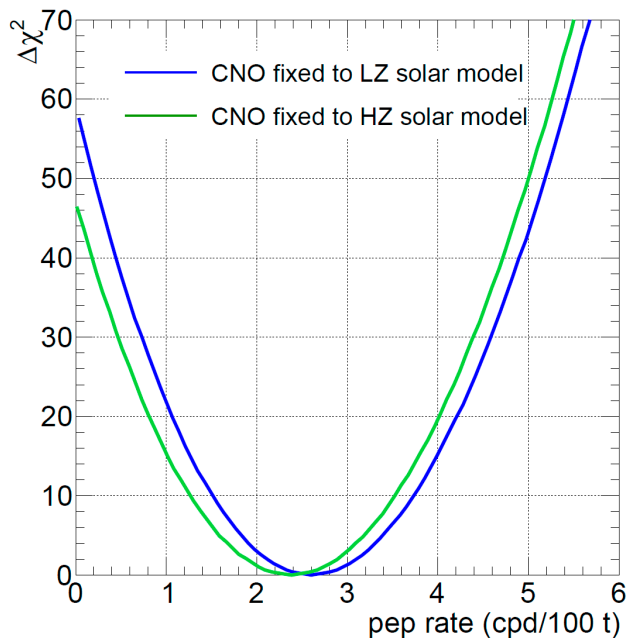
Систематические ошибки

Source of uncertainty	<i>pp</i>		⁷ 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 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

²¹⁰Bi, E-шкала, отклик
R(⁸⁵Kr) < 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 ⁺⁶ ₋₁₀	11.4→10.6	(HZ) 1.8 / (LZ) 1.7
⁷ Be-ν	46.0±1.5 ^{+1.6} _{-1.5}	48.3±1.1 ^{+0.4} _{-0.7}	4.8→ 2.7	(HZ) 6.1 / (LZ) 5.9
реp-ν	3.1±0.6±0.3	(HZ) 2.43±0.36 ^{+0.15} _{-0.22}	(HZ) 22→17	(HZ) 1.8
		(LZ) 2.65±0.36 ^{+0.15} _{-0.24}	(LZ) 22→16	(LZ) 1.8



Регистрация реp-ν нейтрино с достоверностью >5σ

CNO: Предел на скорость счёта CNO- ν (95% Д.И.):
 $R(\text{CNO}) < 8.1$ свд/100 т
 на поток (95% Д.И.): $\varphi(\text{CNO}) < 7.9 \cdot 10^8$ см⁻²с⁻¹
 Ожидается: (HZ) 4.92±0.55, (LZ) 3.52±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.

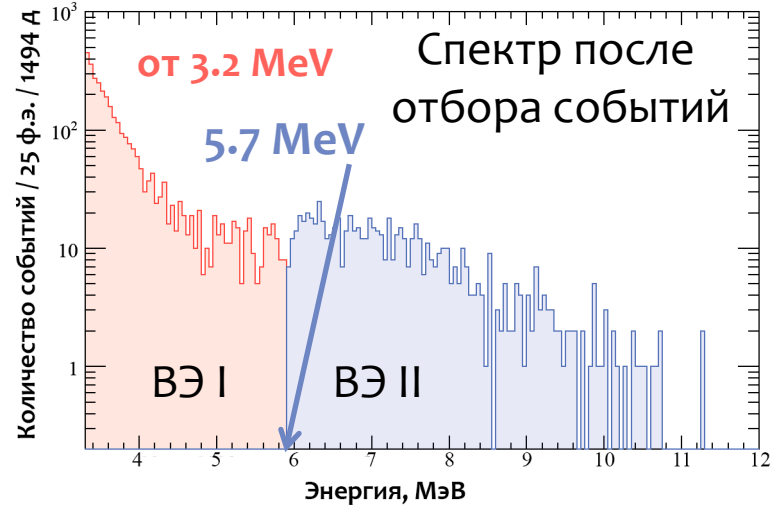
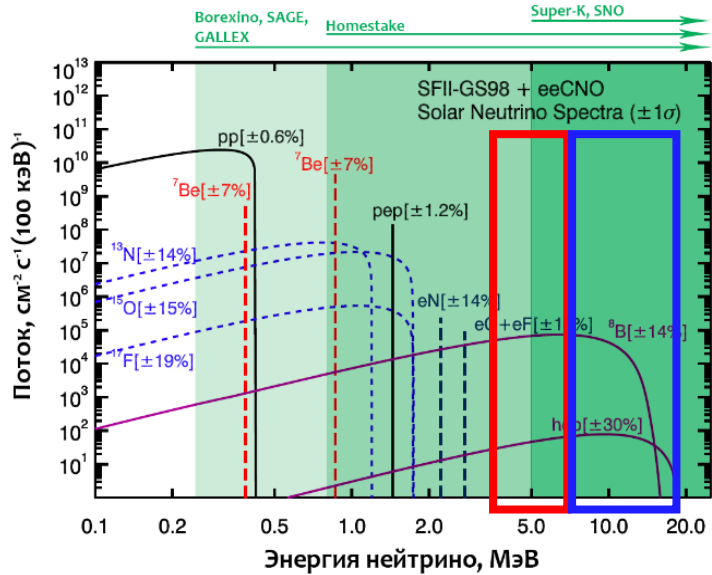
Согласуется со значением светимости Солнца,
полученной при измерениях
в электромагнитном канале с помощью КА:

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

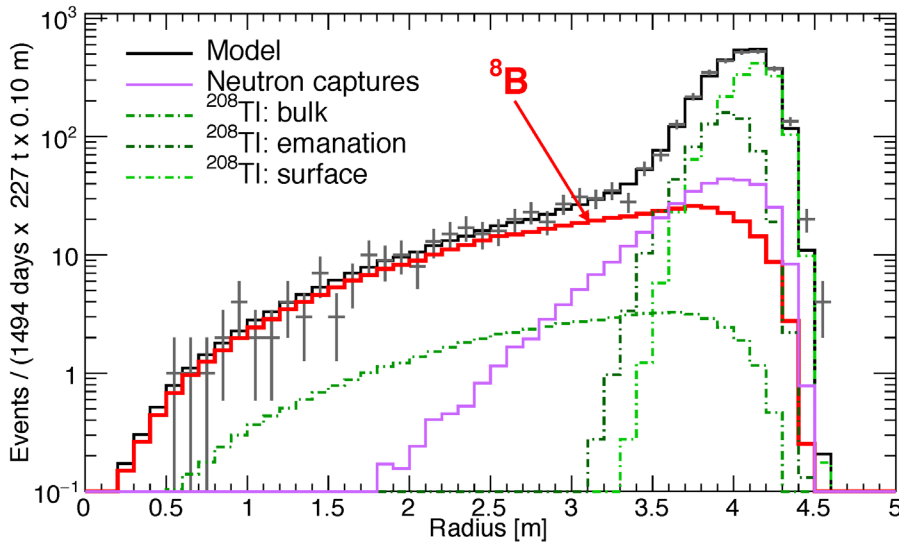
Chapman, G. A. in Encyclopedia of Planetary Science and Encyclopedia of Earth Science 748 (Springer, 1997).

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

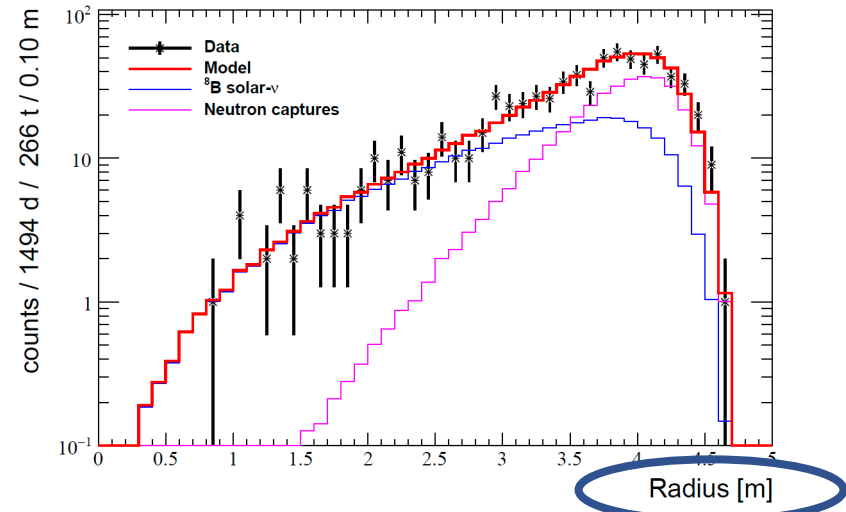
Улучшен результат по измерению ^8B - ν



Аппроксимация для 3.2-5.7 МэВ



Аппроксимация для 5.7-16.0 МэВ



Разделение по энергии необходимо для аккуратного учёта фона

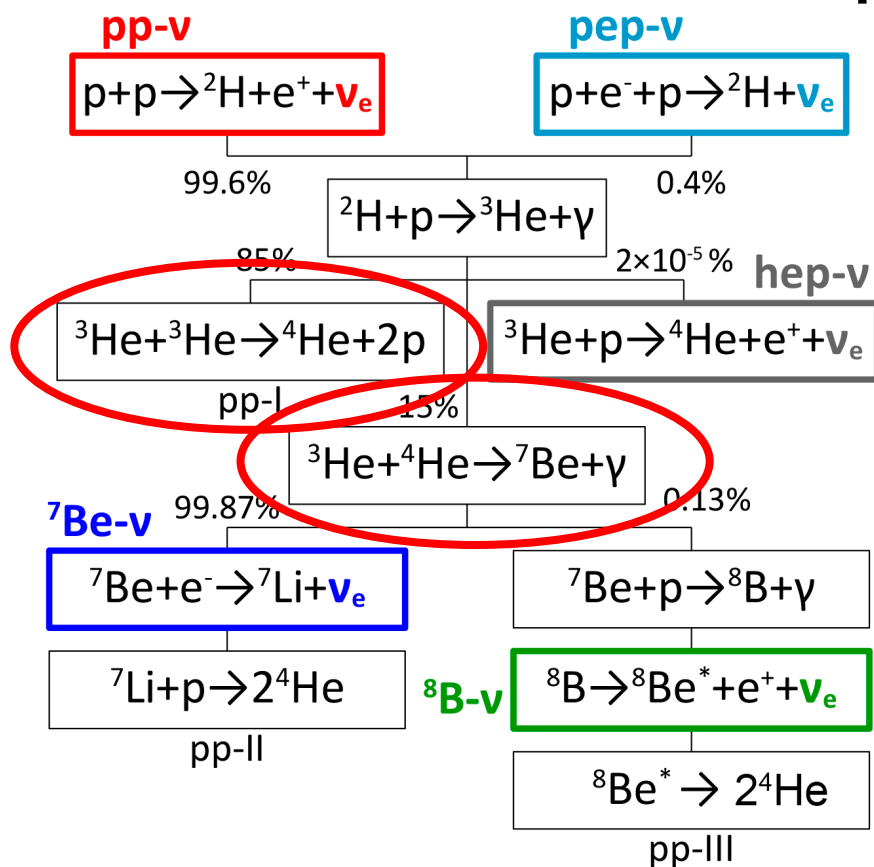
Улучшен результат по измерению $^8\text{B}-\nu$

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 (γ -кванты из буфера и нейлоновой сферы, космогенный фон, γ -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 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

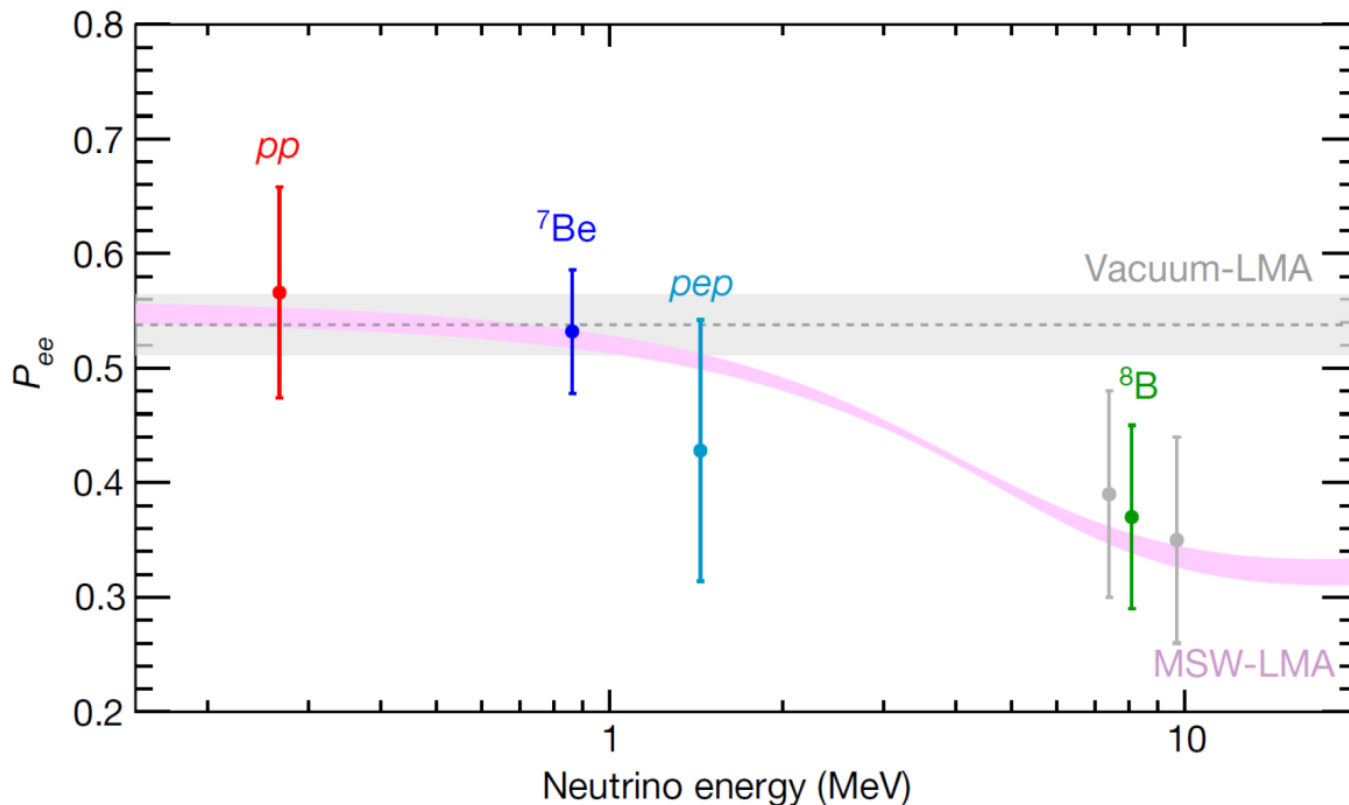
$$R_{\text{HZ}} = 0.180 \pm 0.011$$

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

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 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.

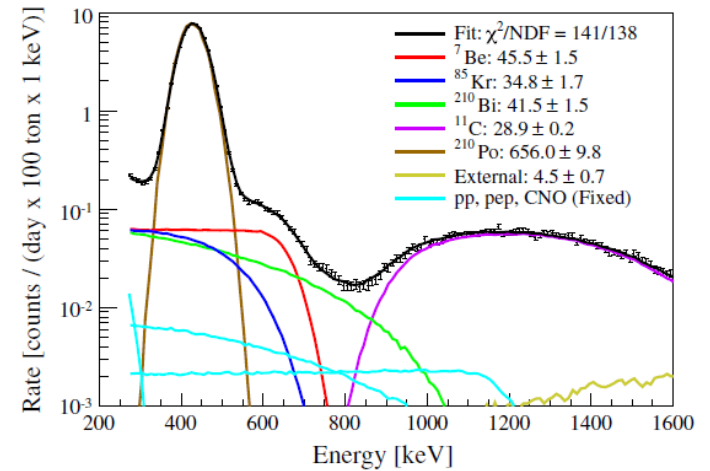
Гипотеза Vacuum-LMA отвергнута с вероятностью 98.2% Д.И.

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

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

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

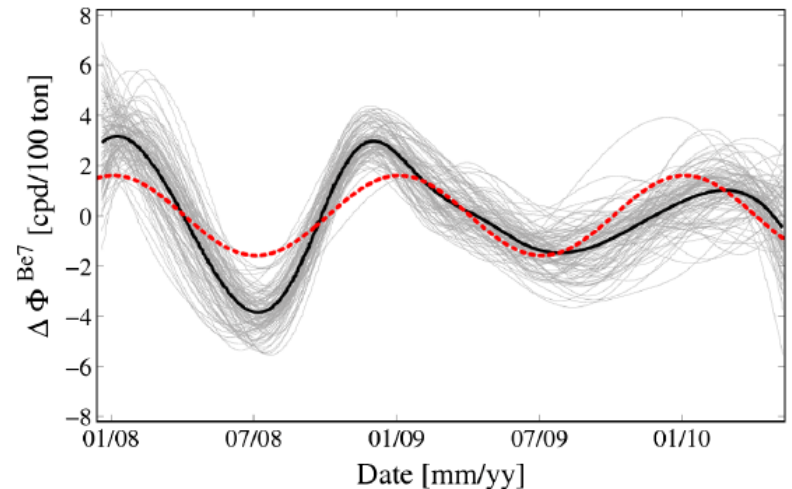
G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 141302 (2011).



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

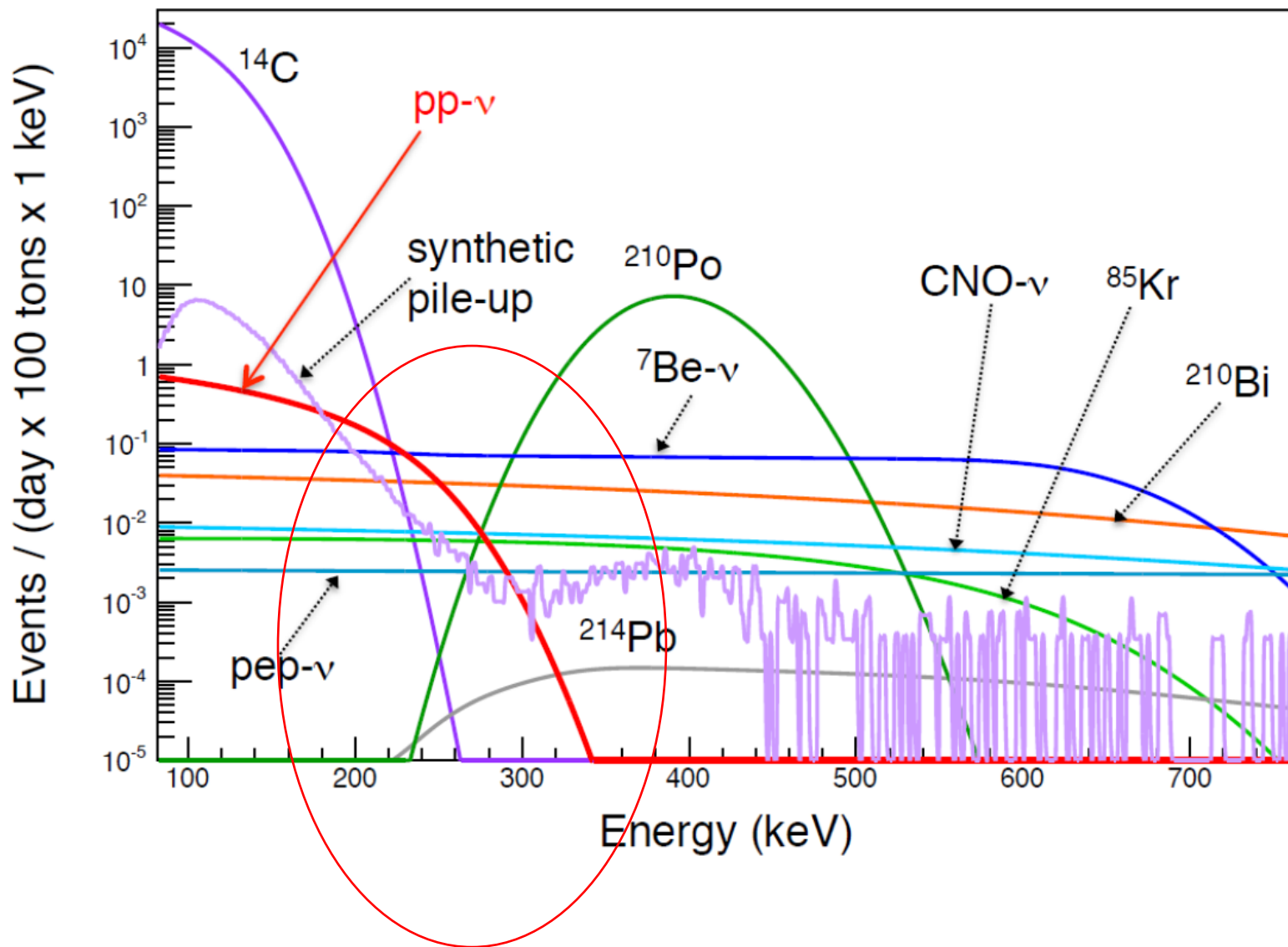
$$A_{dn} = 0.001 \pm 0.012(\text{stat}) \pm 0.007(\text{sys}).$$

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

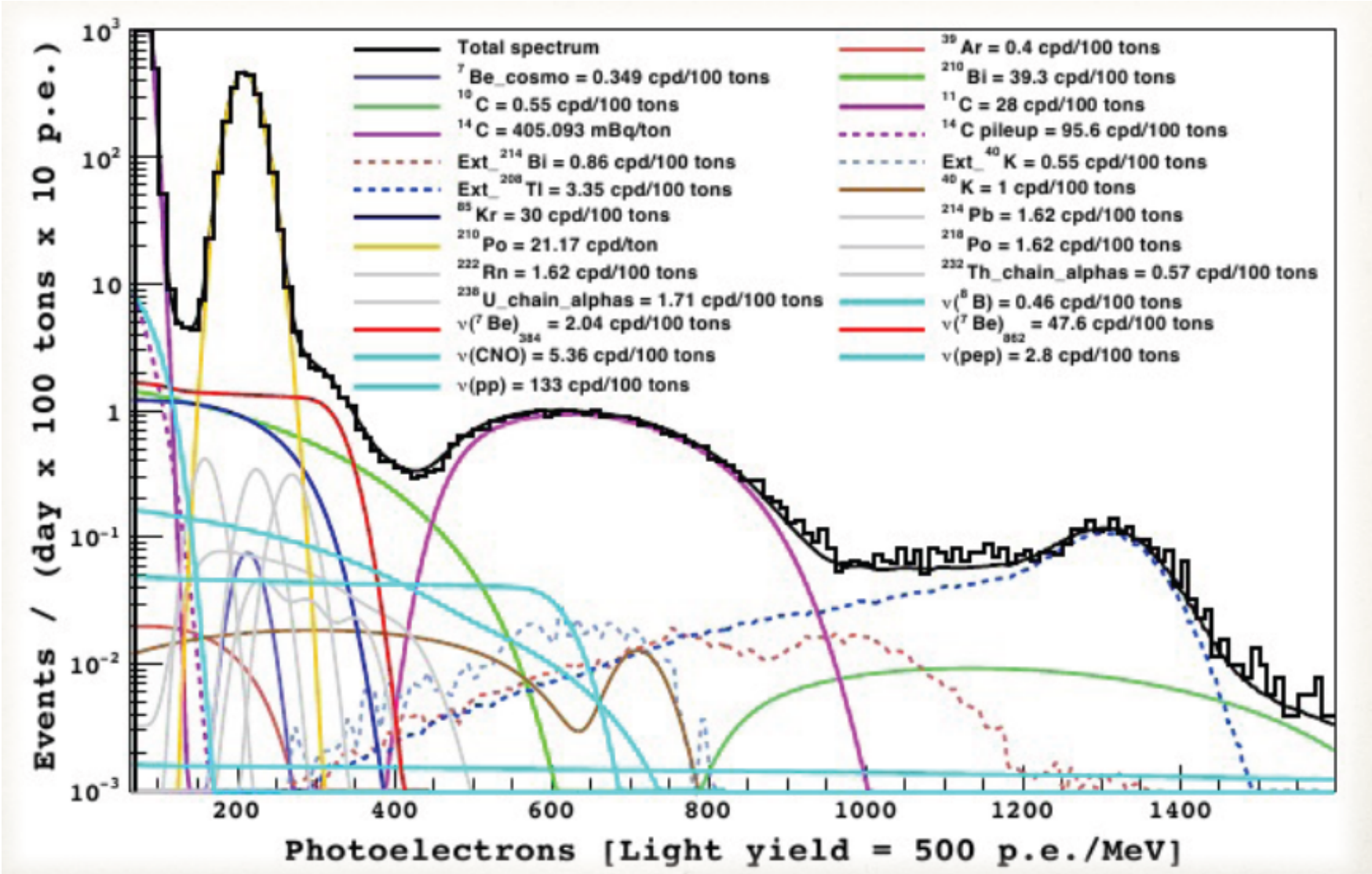


Годовые модуляции ($\sim 7\%$) показаны на ${}^7\text{Be}$ нейтрино аналогично результатам SNO и Super KamioKande

pp-нейтрино Спектр регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах



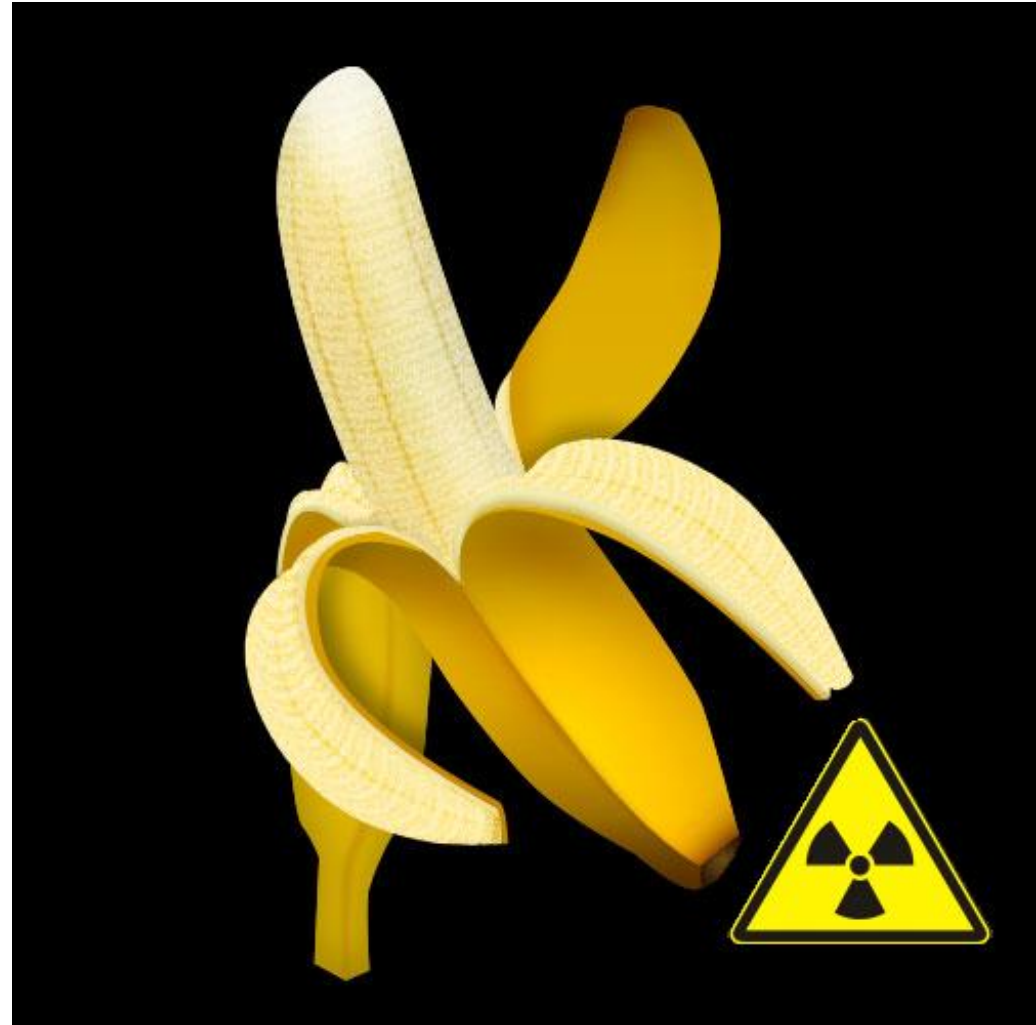
Обработанный «Спектр» регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах.



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}K
- 19 Бк в банане с массой 150 г

**Содержание ^{40}K в Воргехино
< 2.4×10^{-7} (95% Д.И.)
бананового эквивалента
(или 36 мкг)**



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)