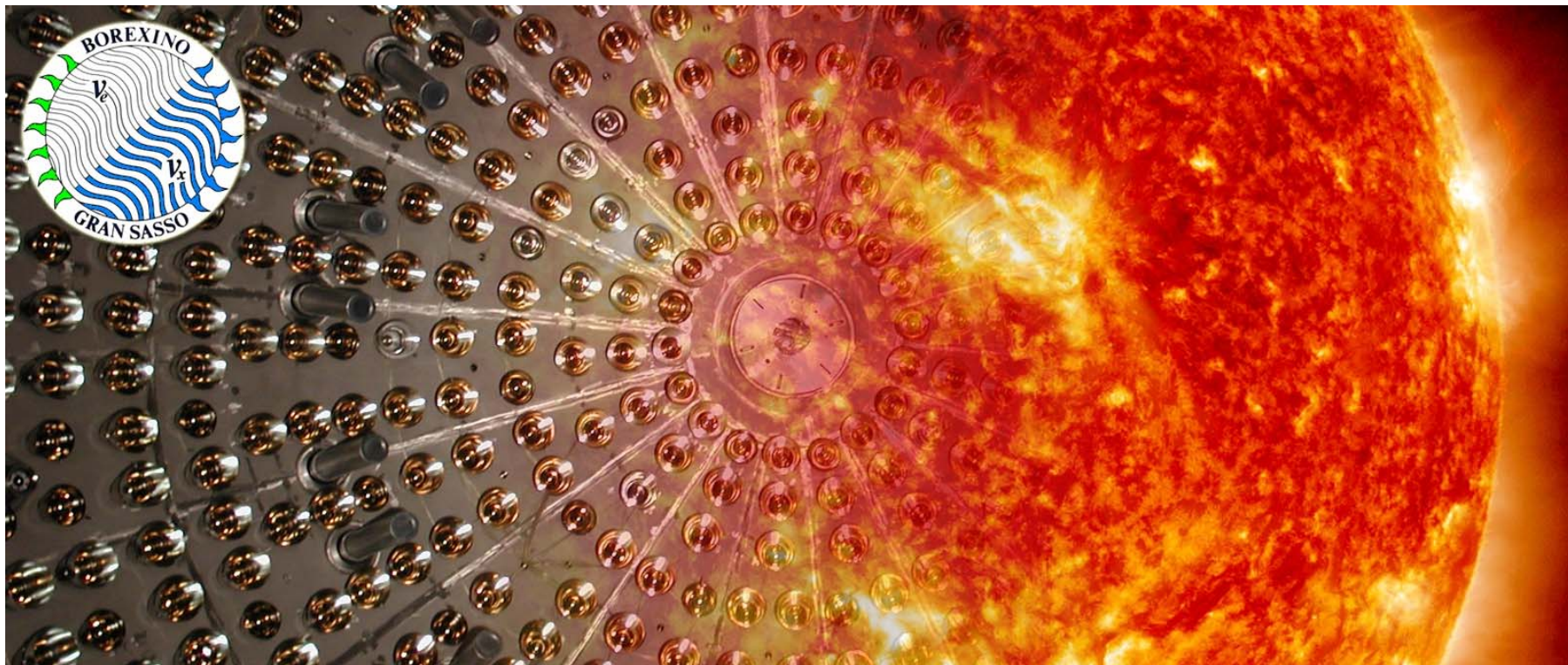
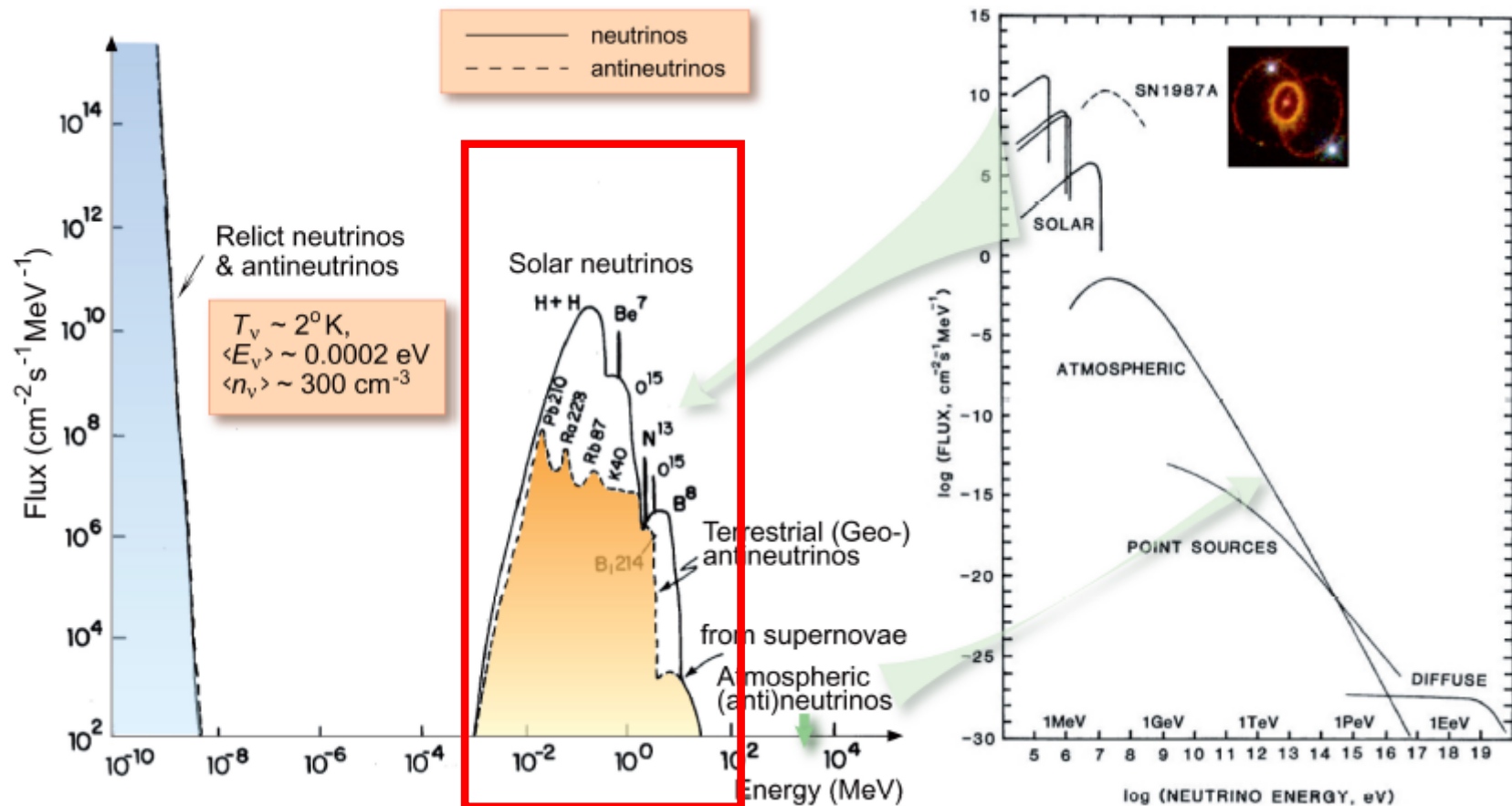




Исследование солнечных нейтрино с помощью детектора BOREXINO

А. С. Чепурнов



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

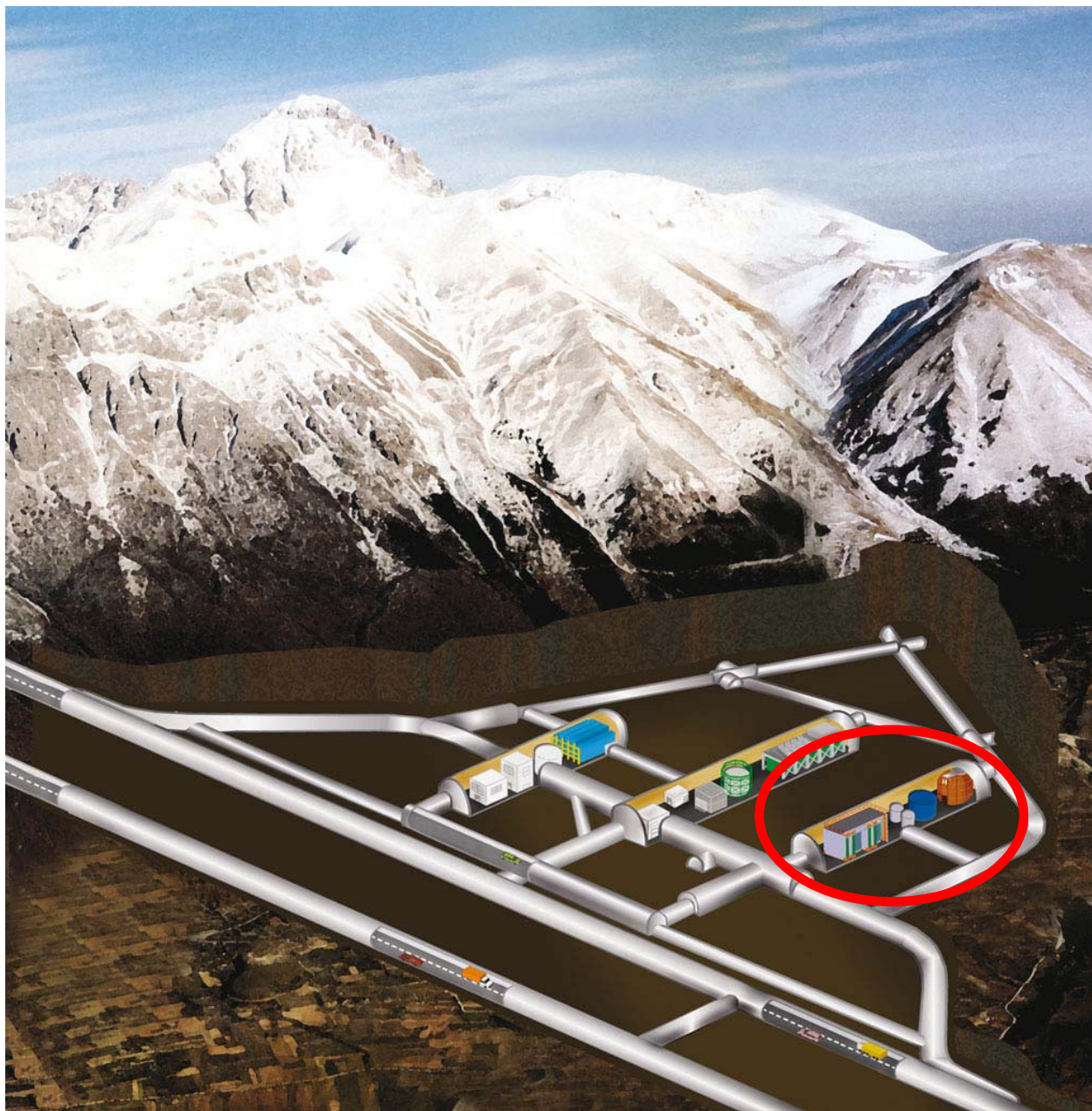
Солнечные нейтрино - $\sim 1 \text{ кэВ}$ - $\sim 10 \text{ МэВ}$ поток $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Недра земли (слабые распады ядер) - $\sim 1 \text{ кэВ}$ - $\sim 10 \text{ МэВ}$ поток $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

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

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

Институт LNGS INFN – европейский центр низкофоновых экспериментов



(Photo: LNGS)



Италия, 120 км от
Рима 3500 м.в.э.

Детектор Borexino - краткая история .



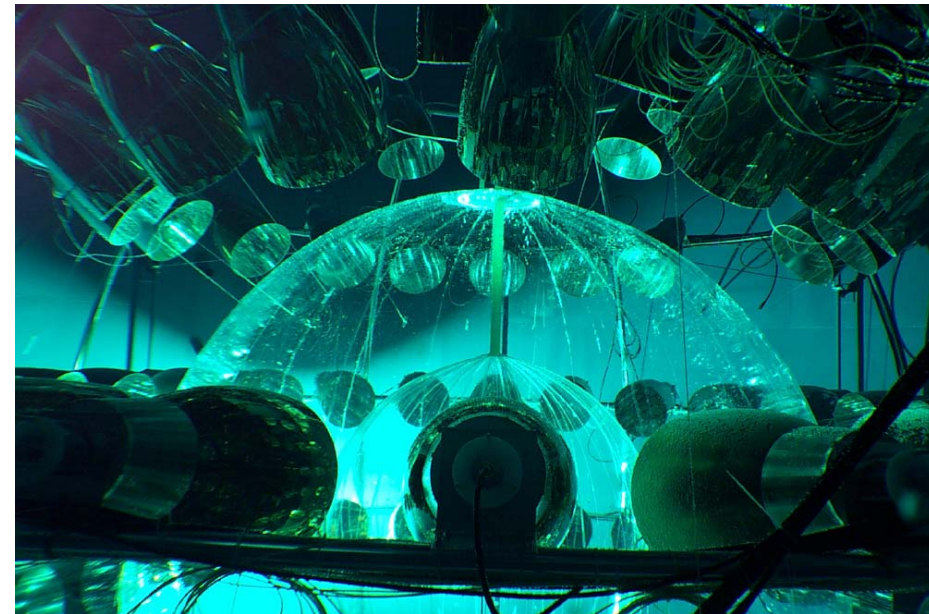
1990 – начало проектирования

1991 – начало НИОКР по очистке ЖОС до уровня 10^{-16} г/г
(проблема отсутствия приборов для измерений. Решение – создание СТФ с чувствительностью уровня 10^{-16} г/г)

1995 – эксперименты на СТФ показали возможность достичь требуемую чистоту жидкостей

1996-1997 – проект BOREXINO был одобрен и началось финансирование со стороны INFN, NSF, Germany

1999-2000 – российские ученые вступили в коллаборацию Borexino



Май 2007 – **н. время** - сбор и обработка физических данных



Milano



Heidelberg



Hamburg



Mainz



Gran Sasso



Perugia



Genova



Napoli



TU Dresden



Jagiellonian
Kraków



the Borexino Collaboration



JINR
Dubna



Virginia Tech



Houston



Paris



MOSCOW



Los Angeles



Princeton



UMass
Amherst



St. Petersburg



Kurchatov
Moscow

Участники коллаборации Борексино в России

РНЦ Курчатовский институт	- Скорохватов М. (+ ~ 15 сотрудников)
ПИЯФ	- Дербин А. (+ ~ 5 сотрудников)
ОИЯИ	- Смирнов О. (+ ~ 3 сотрудников)
НИИЯФ МГУ	- Чепурнов А., Громов М. (аспирант физфак МГУ)

НИИЯФ МГУ - участник коллаборации Boraxino с 2005 г. по настоящее время.

Работа ведется в соответствии с Соглашением о сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и LNGS INFN.

Детектор Борексино – многоцелевой нейтринный детектор в области физики нейтрино низких энергий (> 150 кэВ < 30 МэВ), работающий в реальном времени

Фундаментальные исследования.

Изучение нейтрино от Солнца, ядерных реакторов, ускорителя и других природных и искусственных источников, в том числе:

- изучение нейтринных осцилляций, измерение параметров смешивания нейтрино, изучение осцилляций нейтрино в веществе,
- изучение природы массовых состояний нейтрино в экспериментах по поиску двойного бета-распада ^{136}Xe , ^{150}Nd .
- поиск магнитного момента нейтрино в эксперименте с искусственным радиоактивным источником ^{51}Cr ,
- проверка Стандартной модели, поиск редких процессов, нарушающих Стандартную модель,
- изучение нейтрино от Сверхновых, участие в проекте SNEWS (the Super Nova Early Warning System), направленном на включение детектора Борексино в мировую сеть регистрации сигналов от вспышек Сверхновых звезд.

Междисциплинарные исследования:

- определение радиогенной составляющей теплового потока Земли путем регистрации антинейтрино, излучаемых дочерними продуктами распада Урана и Тория; определение общего содержания этих элементов в Земле,
- проверка гипотезы о протекании в центре Земли цепной реакции деления мощностью 3 – 10 ТВт,
- измерение с помощью нейтринных детекторов в реальном времени интенсивности и соотношений pp- и CNO-циклов термоядерных процессах в недрах Солнца, оценка плотности солнечного вещества.

Детектор Борексино и его влияние на развитие новых технологий .

Разработка технологии получения и производства сверхчистых материалов с ультра низким уровнем радиоактивности (10^{-18} г/г U и Th)

Измерение и контроль малых уровней радиоактивности, в том числе содержания радона в воздухе и жидкостях.

Разработка технологий детектирования нейтринного излучения для задач нераспространения и мониторинга окружающей среды, развитие методов нейтринной томографии.

Разработка электронных устройств цифровой обработки сигналов с помощью скоростных FlashADC

Информационные технологии: управление сложными устройствами в реальном времени с применением WEB-технологий, запись, хранение и обработка больших объемов информации, развитие методов реконструкции событий.

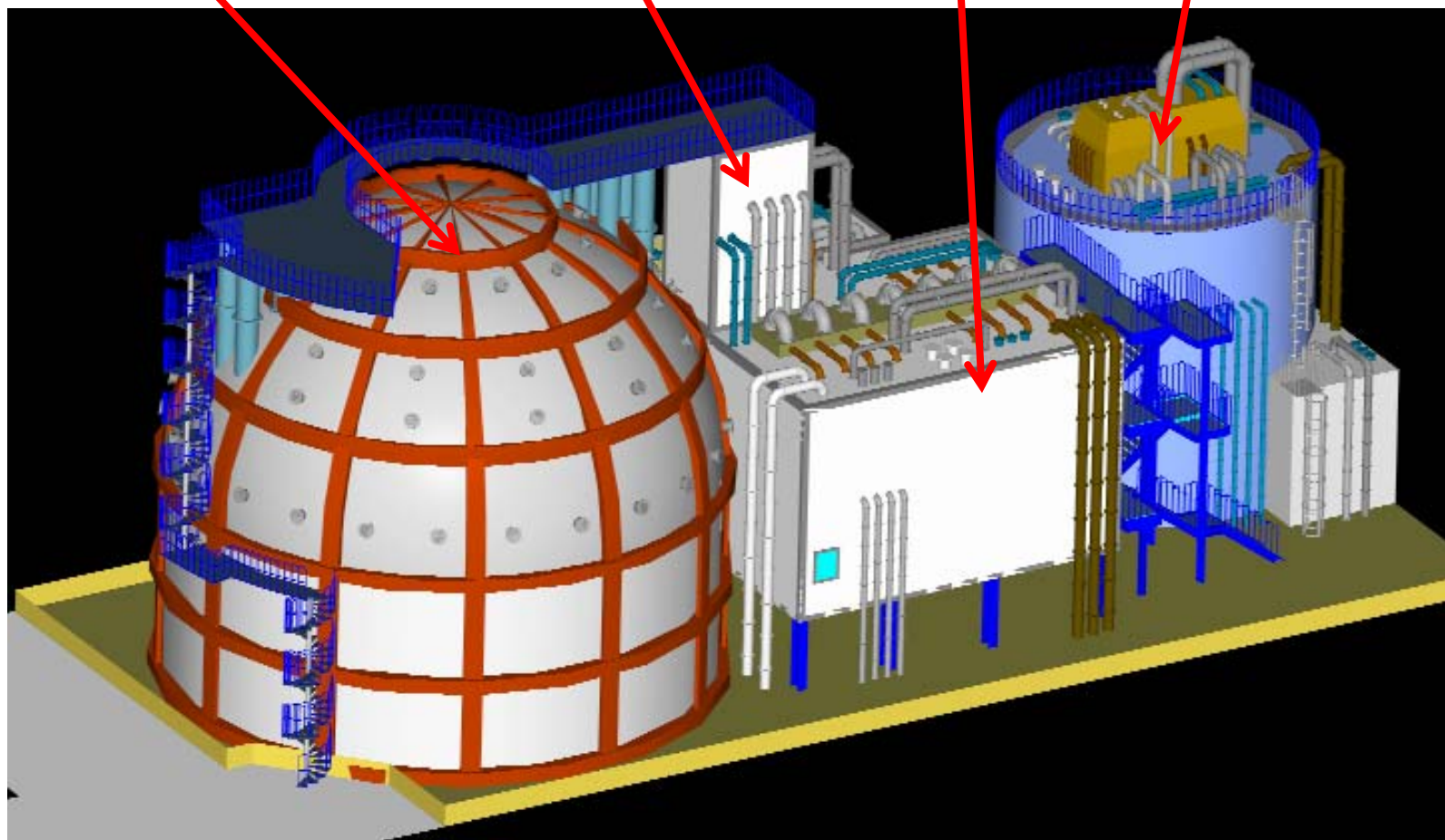
Состав детектора Борекино

Защитный
кожух сферы
детектора

Заводы по
очистке
жидкостей

Комнаты
управления

СТФ с чистыми
комнатами



Детектор Бorexино запущен в мае 2007 г.



Два нейлоновых баллона 125 мкм

Мишень $d=8,5\text{м}$ $V=340\text{ м}^3$

РС (1,2,4-триметилбензол) + 1,5 г/л
РРО 1,5 г/л 2,5 диметилоксазол)

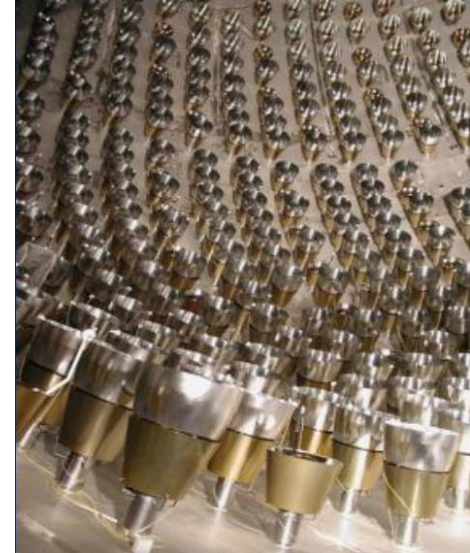
2200 (~2000)

8" ФЭУ

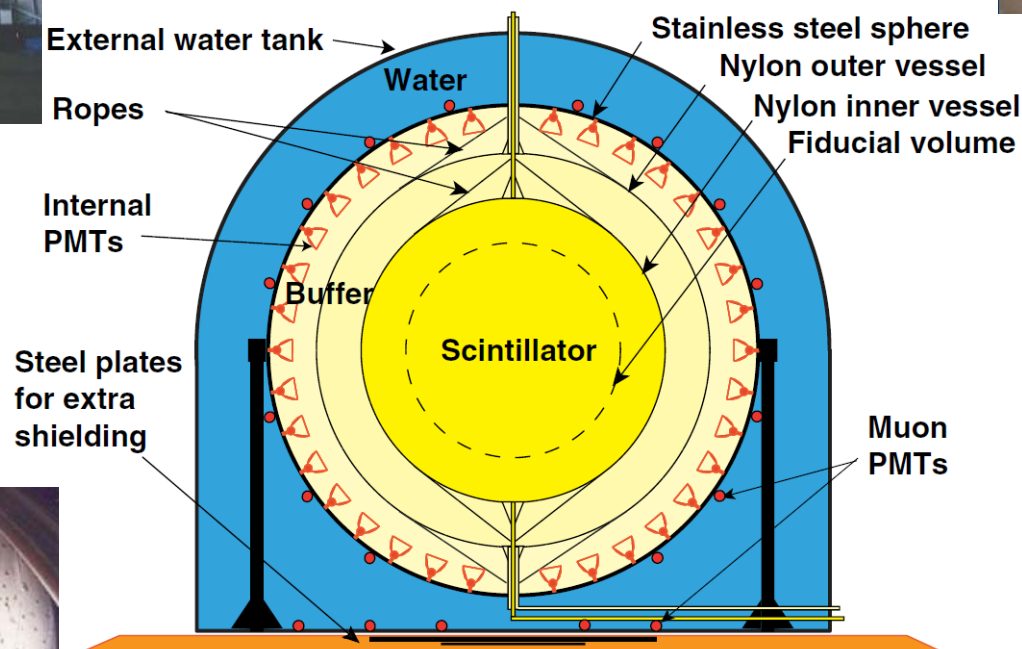
ETL9351

Внутренний буфер $d=11,5\text{м}$

РС + DMP (защита от R_n)



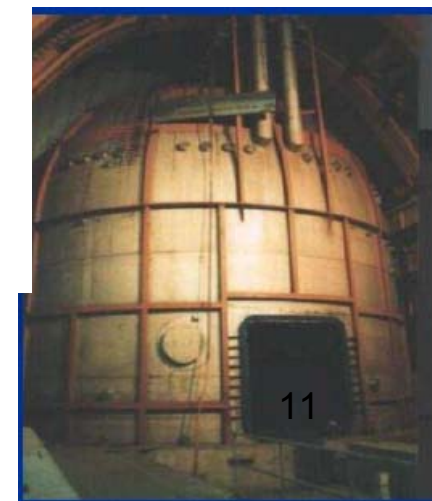
Borexino Detector



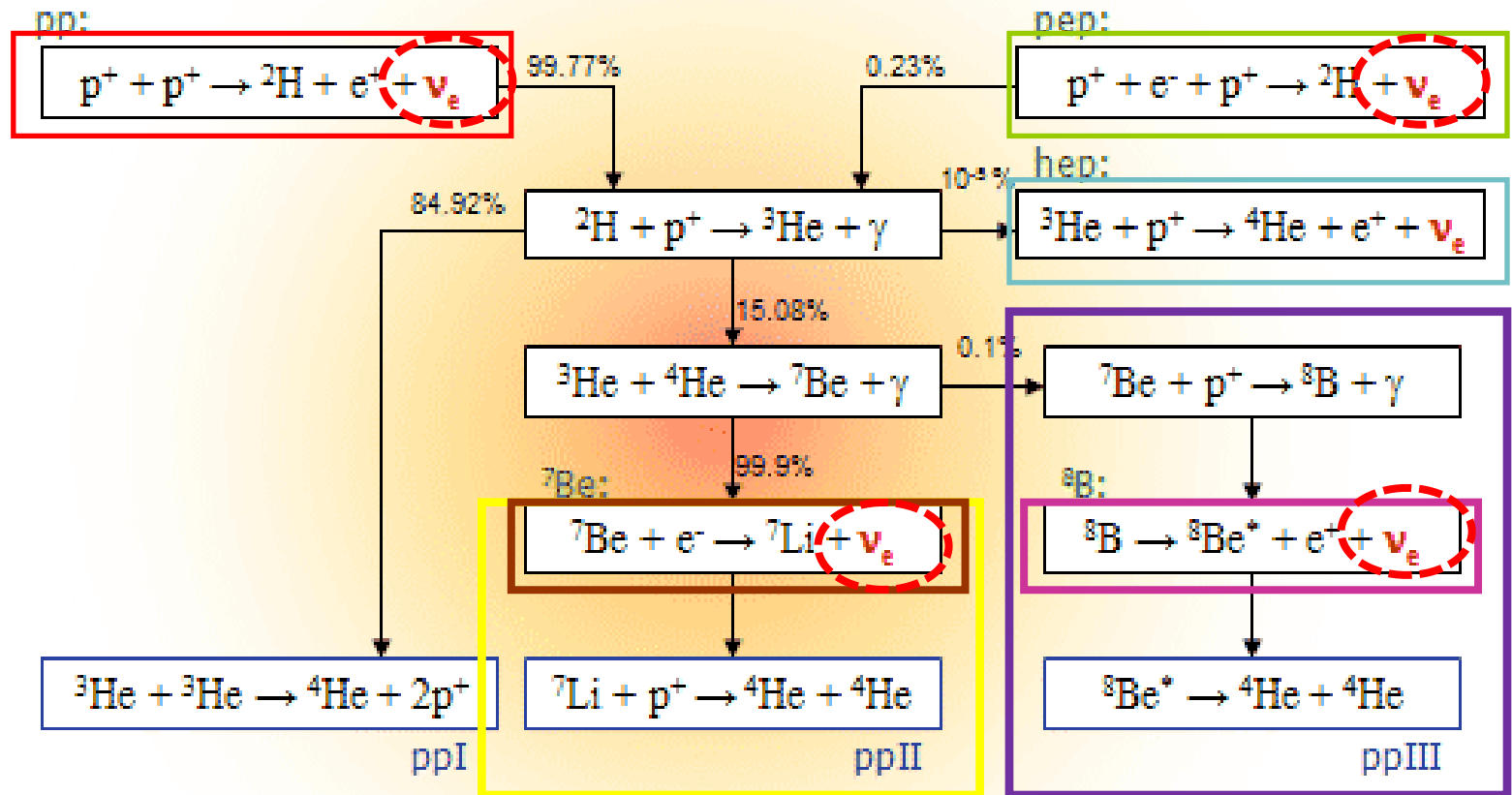
Стальная сфера
 $d=13,7\text{м}$ $V=1350\text{ м}^3$
РС + DMP



Водяной бак мюонного
вето, черенковский
детектор, 208 ФЭУ
 $d=18\text{м}$ $h=16,9\text{м}$
 $V=2400\text{м}^3$



Солнечные нейтрино электронного типа, pp – chain



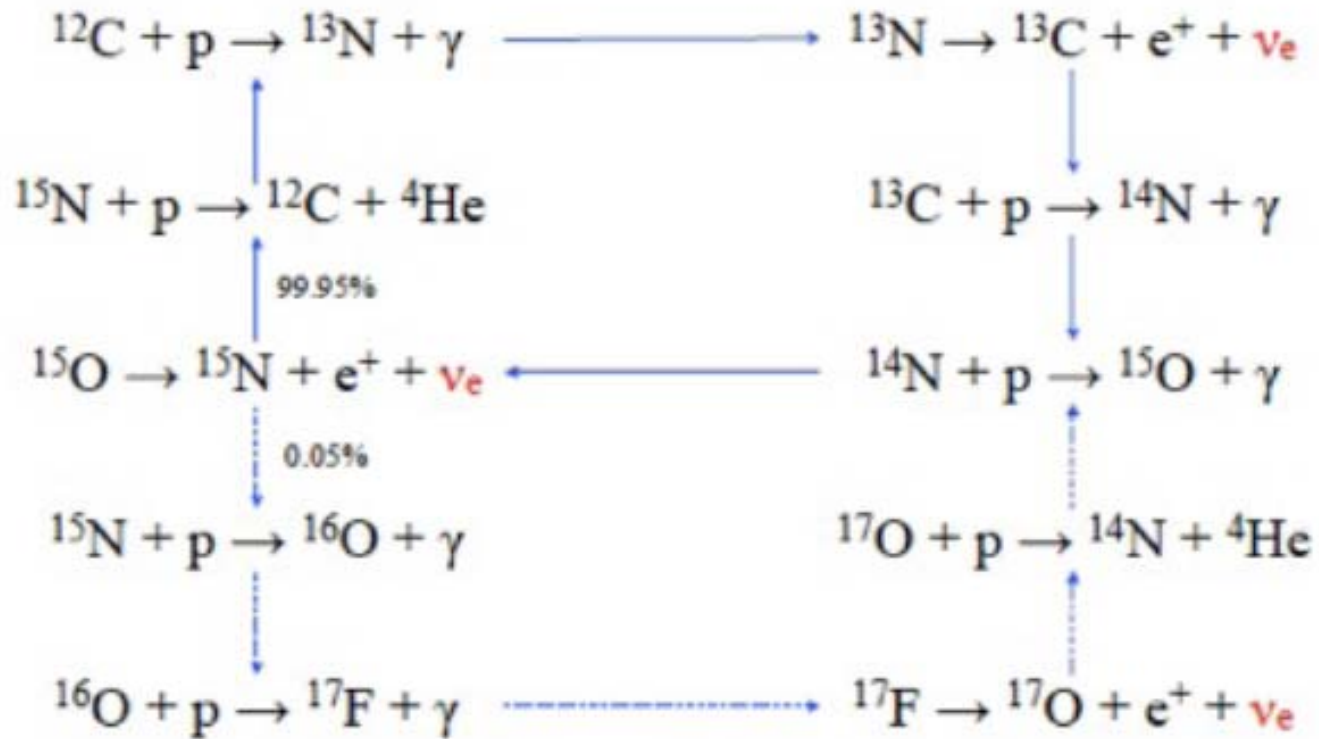
* **pp** and **pep** reactions: 0.42 MeV (max), monoenergetic 1.44 MeV

* **ppI** branch - **hep** reaction; ${}^7\text{Be}$ -producing reaction

* **ppII** branch - ${}^7\text{Be}$ destruction (into ${}^7\text{Li}$) - production of ${}^7\text{Be}$ MONOENERGETIC NEUTRINOS (0.862 MeV or 0.384 MeV if Li is excited (10%))

* **ppIII** branch - rare (1 / 5000) but leads to ${}^8\text{B}$ neutrinos

Солнечные нейтрино электронного типа CNO– chain

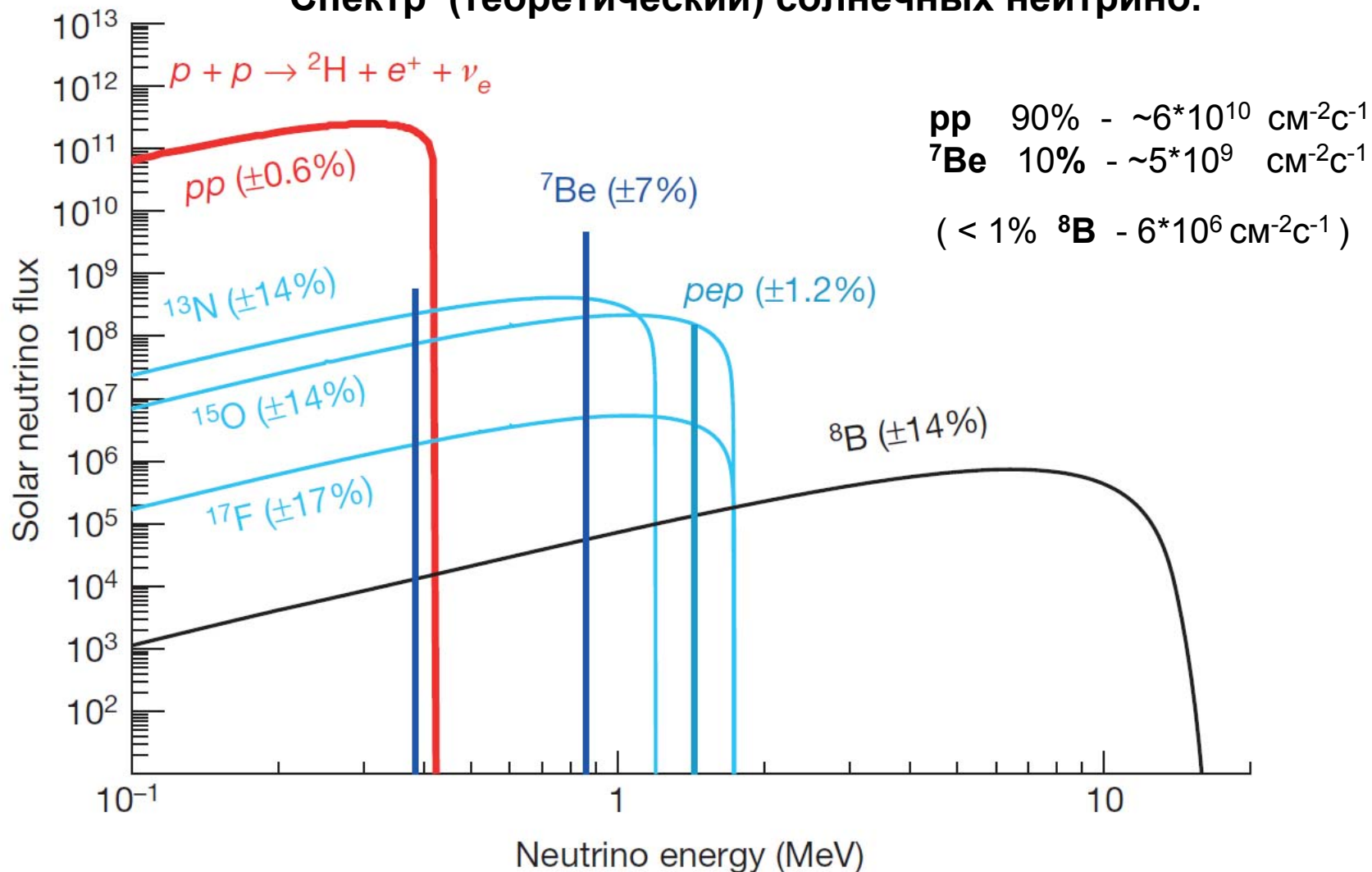


$$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$$

$$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

$$^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{e}^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$$

Спектр (теоретический) солнечных нейтрино.



Поток нейтрино (вертикальный масштаб) приводится в $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}$ для источников с непрерывным спектром и в $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ для моноэнергетических источников. Приведенные неопределенности соответствуют CCM [Serenelli, A. M., Haxton, W. C. & Peña-Garay, C. *Solar models with accretion - I. Application to the solar abundance problem. Astrophys. J.* 743, 24 (2011)]

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 $\nu_e e \rightarrow \nu_e e$ в 6 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

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

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

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

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

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

2001 год.

Ожидаемый спектр регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах.

$$\nu_{e,\mu,\tau} + e^{-} \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + e^{-}$$

$$\sigma \sim 10^{-45} \text{ cm}^2$$

TABLE I. The total cross sections $\sigma_{\nu e}$ and $\sigma_{\nu \mu}$ for solar neutrinos, weighted for the spectral shape in case of continuous energy spectra. E_ν is the neutrino energy, E_e is the electron energy, $E_{\nu e}$ is the energy of the scattered e^- according to case of continuous energy spectra, and $E_{\nu \mu}$ is the energy of the scattered μ^- according to case of continuous energy spectra.

Solar ν

pp

^7Be

^7Be

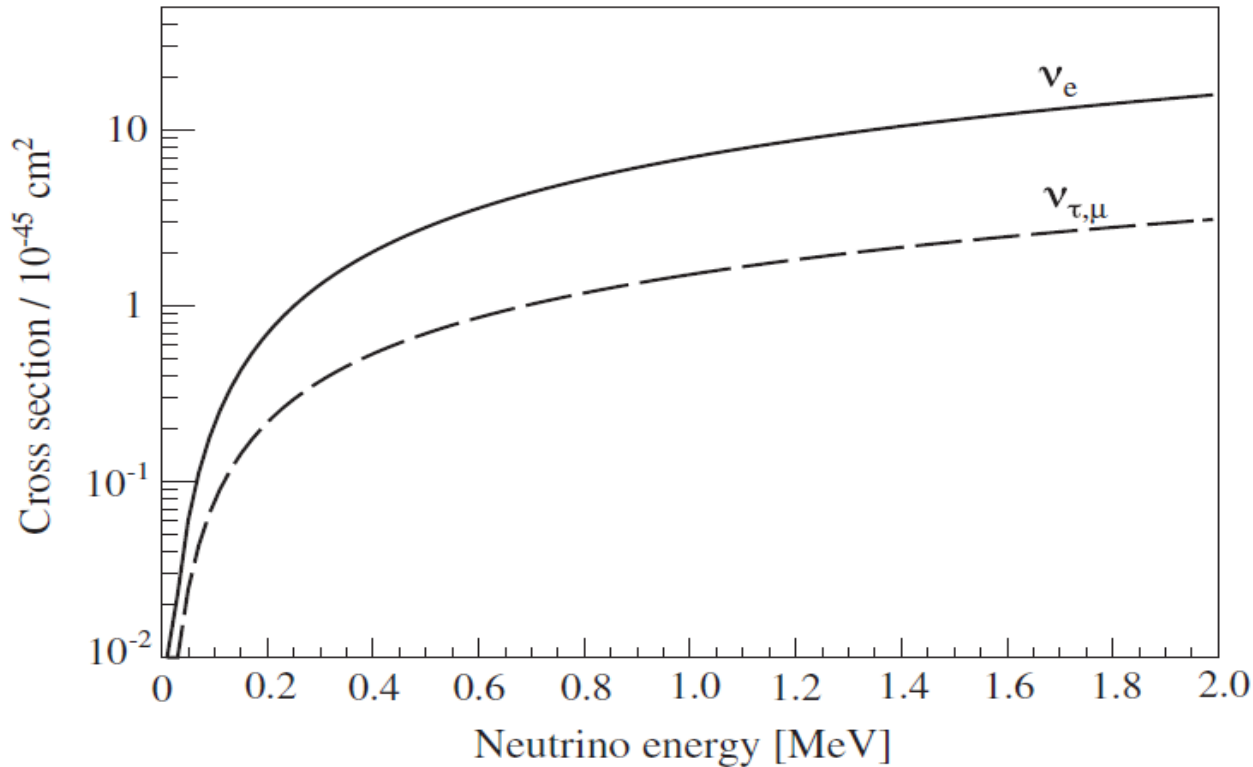
pep

^{13}N

^{15}O

^{17}F

^8B



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

Ожидаемый спектр регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах.

$$\nu_{e,\mu,\tau} + e^{-} \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + e^{-} \quad \sigma \sim 10^{-45} \text{ cm}^2$$

TABLE II. The solar neutrino fluxes Φ_ν calculated with the high-metallicity standard solar model (GS98) [2], the ones obtained with the low-metallicity model (AGSS09) [19], and the corresponding expected ν -interaction rates R_ν in Borexino. The fluxes are given in units of $10^{10}(pp)$, 10^9 (${}^7\text{Be}$), 10^8 (pep , ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$), and 10^6 (${}^8\text{B}$, ${}^{17}\text{F}$). The CNO flux is the sum of the ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$, and ${}^{17}\text{F}$ fluxes. The rate calculations are based on Eq. (3). The last column lists some of the relevant background components in the energy region of interest of a given ν species; see Sec. XIC for a discussion about them.

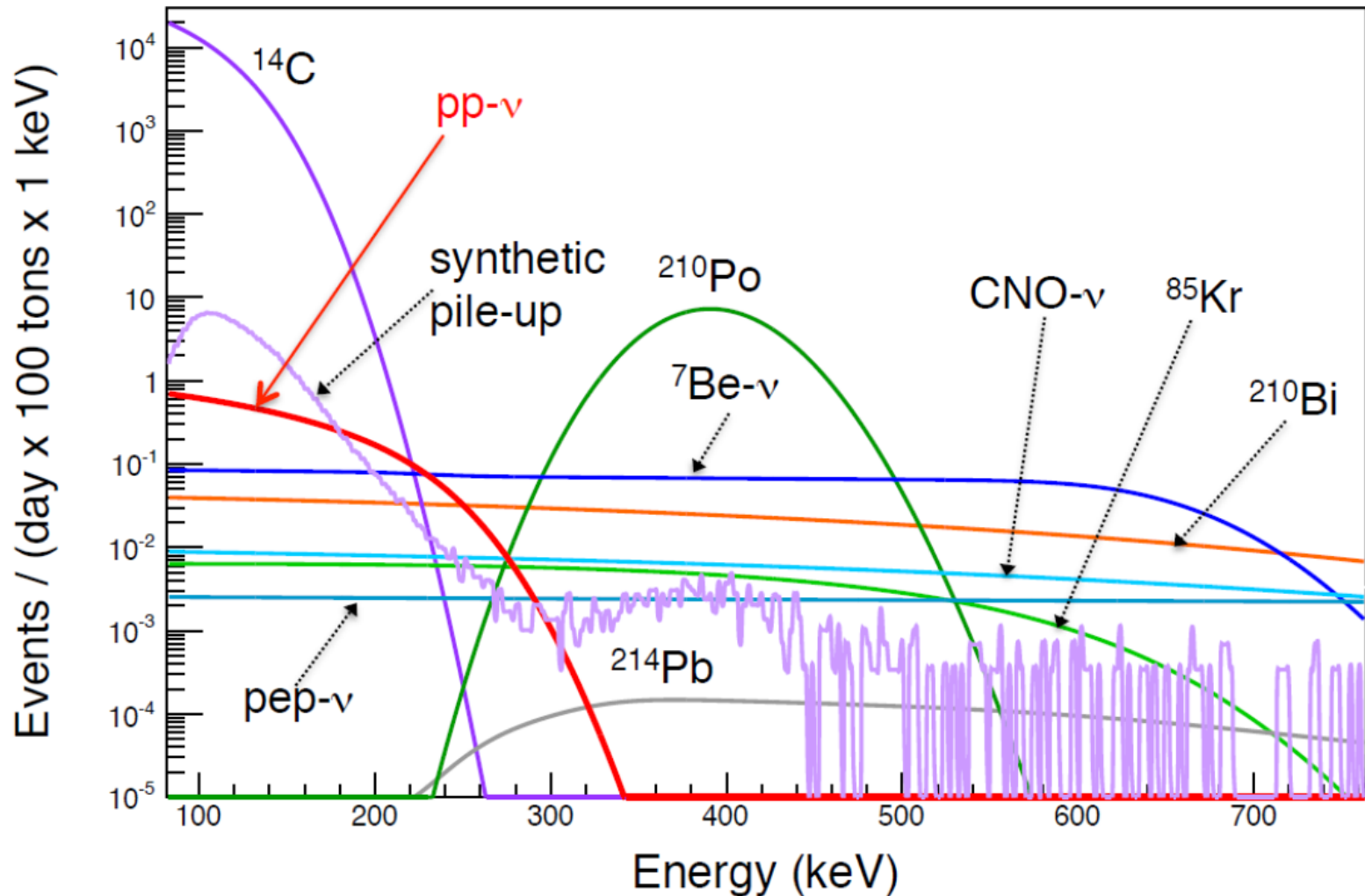
Solar- ν	Φ_ν (GS98) high metallicity [$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Φ_ν (AGSS09) low metallicity [$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	R_ν (GS98) high metallicity [cpd/100 ton]	R_ν (AGSS09)low metallicity [cpd/100 ton]	Main background
pp	5.98 (1 ± 0.006)	6.03 (1 ± 0.006)	130.8 ± 2.4	131.9 ± 2.4	${}^{14}\text{C}$
${}^7\text{Be}^*$ (384 keV)	0.53 (1 ± 0.07)	0.48 (1 ± 0.07)	1.90 ± 0.14	1.73 ± 0.12	${}^{85}\text{Kr}$, ${}^{210}\text{Bi}$
${}^7\text{Be}^*$ (862 keV)	4.47 (1 ± 0.07)	4.08 (1 ± 0.07)	46.48 ± 3.35	42.39 ± 3.05	${}^{85}\text{Kr}$, ${}^{210}\text{Bi}$
pep	1.44 (1 ± 0.012)	1.47 (1 ± 0.012)	2.73 ± 0.05	2.79 ± 0.06	${}^{11}\text{C}$, ${}^{210}\text{Bi}$
${}^{13}\text{N}$	2.96 (1 ± 0.14)	2.17 (1 ± 0.14)	2.42 ± 0.34	1.78 ± 0.23	
${}^{15}\text{O}$	2.23 (1 ± 0.15)	1.56 (1 ± 0.15)	2.75 ± 0.42	1.92 ± 0.29	
${}^{17}\text{F}$	5.52 (1 ± 0.17)	3.40 (1 ± 0.16)	0.068 ± 0.012	0.042 ± 0.007	
CNO	5.24 (1 ± 0.21)	3.76 (1 ± 0.21)	5.24 ± 0.54	3.74 ± 0.37	${}^{11}\text{C}$, ${}^{210}\text{Bi}$
${}^8\text{B}$	5.58 (1 ± 0.14)	4.59 (1 ± 0.14)	0.44 ± 0.07	0.37 ± 0.05	${}^{208}\text{Tl}$, ext γ

*The production branching ratios of the 384 and 862 keV ${}^7\text{Be}$ - ν lines are 0.1052 and 0.8948, respectively. The respective ratio of interaction rates in Borexino is 3.9:96.1.

Ожидаемый спектр регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах.

$$\nu_{e,\mu,\tau} + e^{-} \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + e^{-}$$

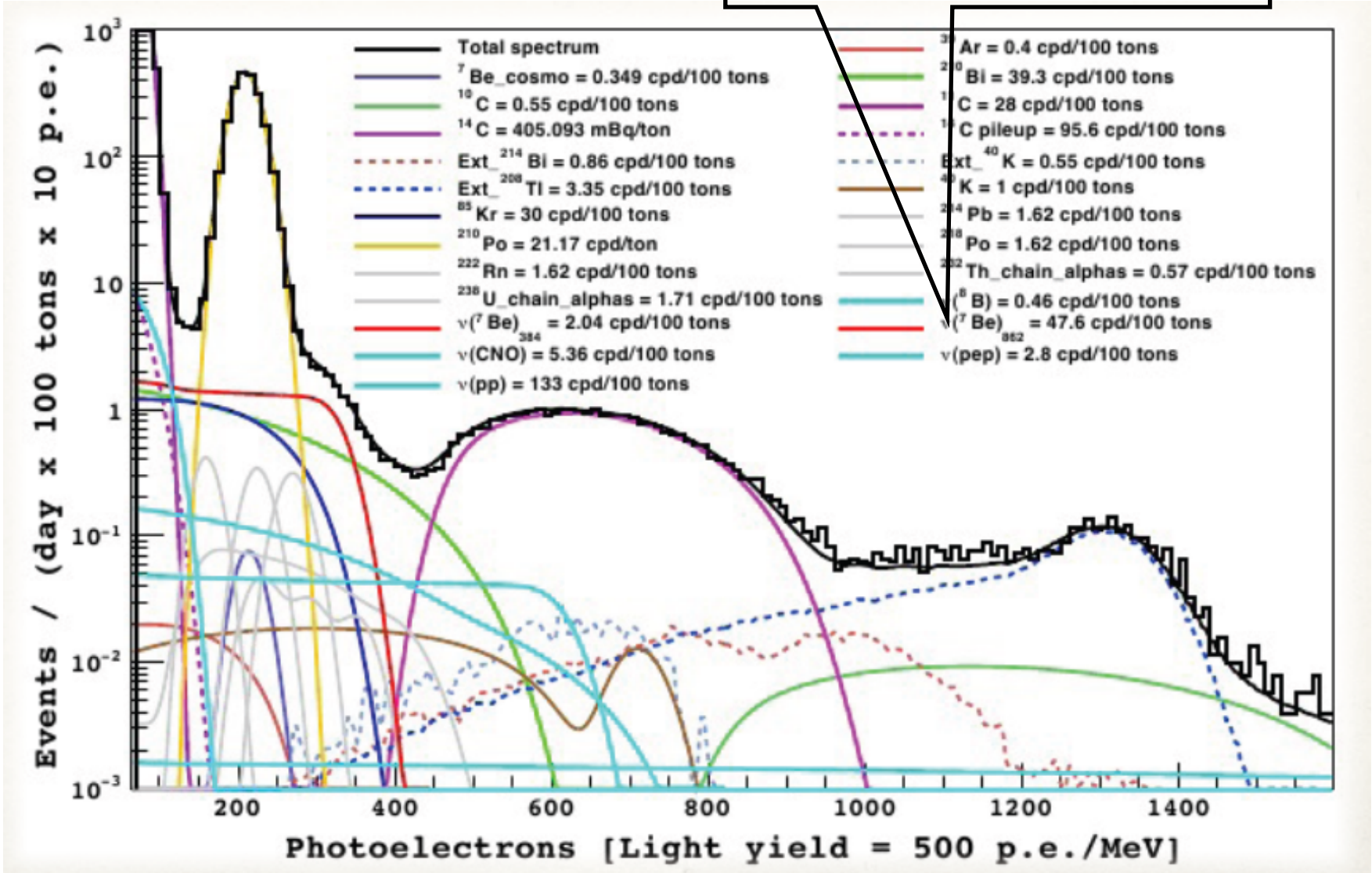
$$\sigma \sim 10^{-45} \text{ cm}^2$$



«Спектр» регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах $\sigma \sim 10^{-45} \text{ см}^2$

$$\nu_{e,\mu,\tau} + e^{-} \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + e^{-}$$

**5*10⁻⁹ Бк/кг (вода 10 Бк/кг
человеческое тело 5000 Бк/кг)**



Фоновые условия в детекторе Борексинао – текущий статус.

Name	Source	Typical	Required	Achieved
muon	Cosmic	200 Hz/m ²	~10 ⁻¹⁰	<10 ⁻¹⁰
Ext. gamma	Rock			negligible
Int. gamma	PMTs, SSS, Water, Vessels			negligible
¹⁴C	Intrinsic	~10 ⁻¹²	~10 ⁻¹⁸	~10 ⁻¹⁸
²³⁸U / ²³²Th	Dust	~10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶ g/g	<10 ⁻¹⁶ g/g	~<10⁻¹⁸g/g
⁴⁰K	Dust, PPO	~2·10 ⁻⁶ Bq/ton	<10 ⁻¹⁴ scint <10 ⁻¹¹ PPO	~5cpd/100t (estimate)
²¹⁰Bi	Surface contamination	Initial stable: ~40 cpd/100t		18 cpd/100t
²¹⁰Po	Surface contamination	Initial stable: ~10 ³ cpd/100t		~300 cpd/100t
²²²Rn	Air, emanation	~10-100 Bq/L (air-water)	<1count/day·100tons	<10⁻¹⁹ g/g
³⁹Ar	Air (nitrogen)	~17 mBq/m ³	<1count/day·100tons	?
⁸⁵Kr	Air (nitrogen)	~1 Bq/m ³	<1count/day·100tons	was ~8 cpd/100tons very low lately

Событие в детекторе Борексино

численно содержит количество света, собранного каждым из сработавших ФЭУ и временем прихода света на ФЭУ.

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.

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

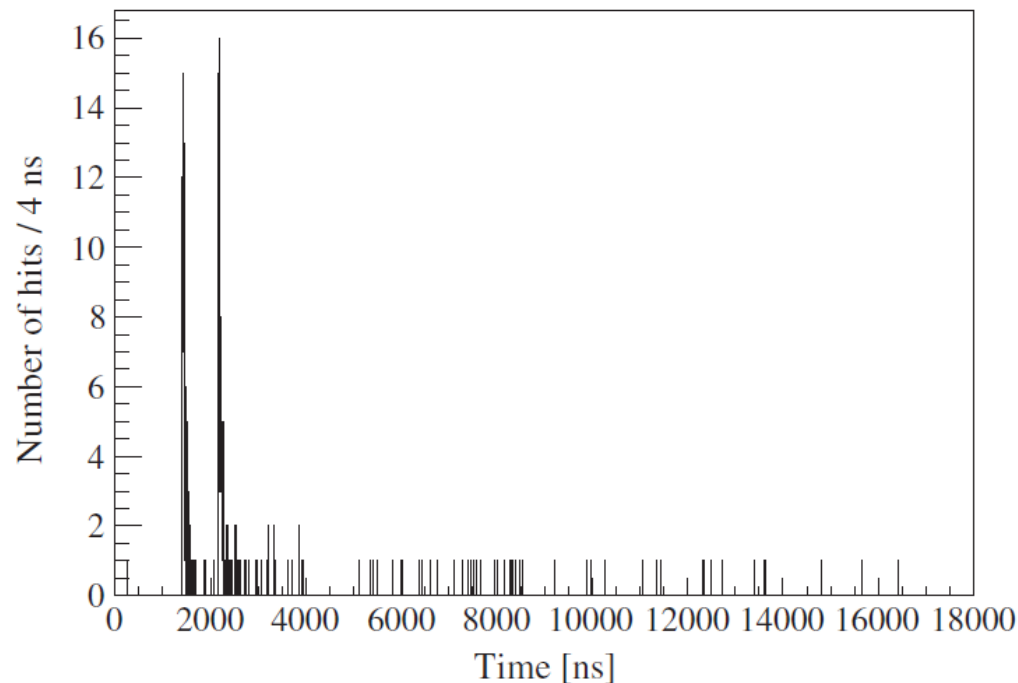


FIG. 7. An example of a single data acquisition gate (so-called event) containing two well-separated clusters, which are due to two different interactions inside the scintillator.

Методы анализа в детекторе Борексино

- Реконструкция пространственного положения события
- Калибровка энергетическая
- Калибровочные кампании

Обработка накопленных «событий»:

- удаление одинарных одинарных событий, которые могут быть «помечены» за счет распадов с задержанными совпадениями, мюоны события следующие за мюонами и т.п., включая шумы электроники и ФЭУ
- подавление фона за счет пространственной реконструкции событий.
- группировка данных по количественным параметрам (энергетические оценки, радиальное положение событий, особенности параметров формы импульса) , их последующее фитирование в виде моделей методами МС и статистическое вычитание из экспериментальных данных

Источники фона в детекторе Борексина

- внешние (не от сцинтиллятора) и на поверхности нейлоновых сфер
- внутренние (от сцинтиллятора)
- космогенные (наведенная активность от мюонов)

Источники фона в детекторе Борексино (внешние)

TABLE V. Expected rates of external background relevant for the pep and ^{208}Tl , ^{214}Bi , and ^{40}K from Geant-4 Monte Carlo code, simulation of the PMTs [49]. The data are taken from the SSS and light cones from previous estimates [22], assuming a radius of 25 cm. The upper limit for buffer fluid has been estimated assuming a contamination of ^{238}U and ^{232}Th greater than those in the sci

Source

^{208}Tl from PMTs
 ^{214}Bi from PMTs
 ^{40}K from PMTs
 Light cones and SSS
 Nylon vessels
 End-cap regions
 Buffer

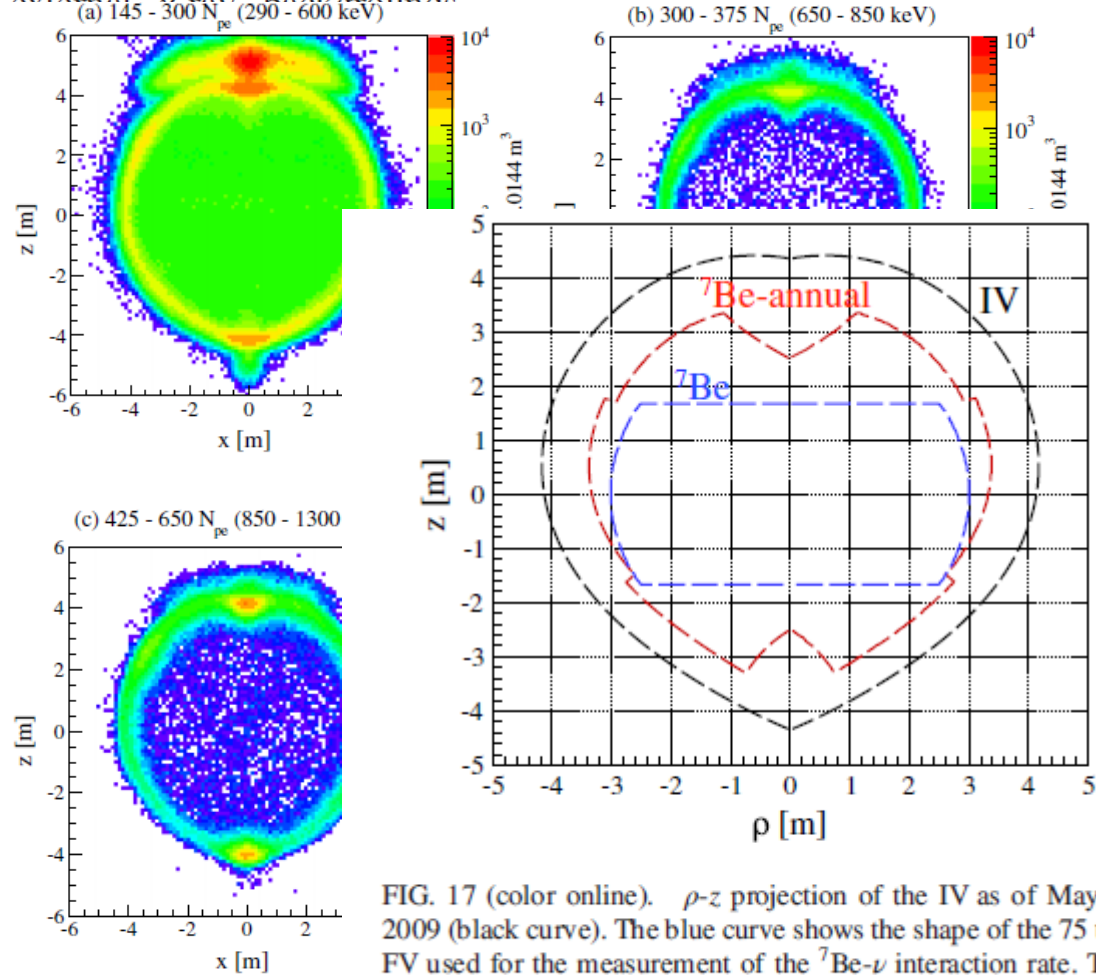


FIG. 14 (color online). Spatial distribution of energy regions. The color axis represents the rate in units of 10^4 m^{-3} . (a) ^{210}Po peak region: $145-300 N_{pe}$ (290–600 keV). (b) ^{208}Tl peak region: $300-375 N_{pe}$ (650–850 keV). (c) ^{214}Bi peak region: $425-650 N_{pe}$ (850–1300 keV). (d) ^{208}Tl peak region: $900-1500 N_{pe}$ (1800–3000 keV). Events occurring outside the IV ($R = 4.25 \text{ m}$), near the top end cap ($z = 4.25 \text{ m}$), most clearly seen in the low-energy region shown in (a), are due to the small leak of scintillator from the IV to the buffer region (Sec. II A).

FIG. 17 (color online). ρ - z projection of the IV as of May 3, 2009 (black curve). The blue curve shows the shape of the 75 ton FV used for the measurement of the $^7\text{Be}-\nu$ interaction rate. The red curve illustrates the profile of the FV used for the $^7\text{Be}-\nu$ annual modulation analysis.

Источники фона в детекторе Бorexино (главные космогенные и внутренние)

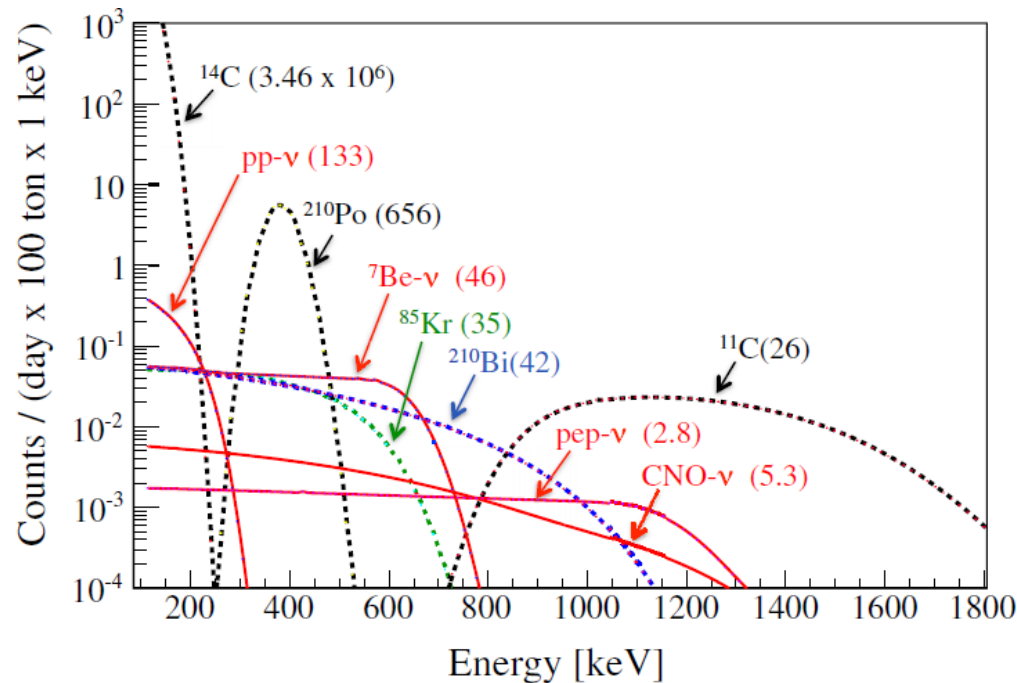


FIG. 20 (color online). Calculated energy spectra due to solar neutrinos (shown as continuous red line) and of the main background components (dotted lines). The realistic Borexino energy resolution is included. The rates are fixed at the values shown in parenthesis and given in units of cpd/100 ton.

1.2 мюона на м² в час дают
несколько десятков ядер ¹¹C в день

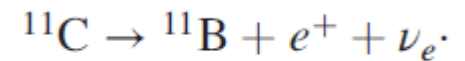
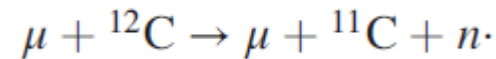


TABLE VIII. Decay rate of the main internal radioactive backgrounds considered in this work; if the rate has changed in time the minimum and maximum values are quoted. For ⁸⁵Kr contamination, both the results of delayed coincidence method (a) and spectral fit analysis (b) are reported.

Isotope	Decay Rate [cpd/100 ton]	Reference
¹⁴ C	$(3.46 \pm 0.09) \times 10^6$	Sec. XIC 1
⁸⁵ Kr	$(30.4 \pm 5.3 \pm 1.5)^{(a)}$	Sec. XIC 2
	$(31.2 \pm 1.7 \pm 4.7)^{(b)}$	Sec. XXII
⁴⁰ K	< 0.42 (95% C.L.)	Sec. XIC 3
³⁹ Ar	~ 0.4	Sec. XIC 4
²³⁸ U	(0.57 ± 0.05)	Sec. XIC 5
²²² Rn	(1.72 ± 0.06)	Sec. XIC 5
²¹⁰ Bi	$(41.0 \pm 1.5 \pm 2.3)$	Sec. XIC 7
²¹⁰ Po	$5 \times 10^2 - 8 \times 10^3$	Sec. XIC 8
²³² Th	(0.13 ± 0.03)	Sec. XIC 9

Источники фона в детекторе Борексина (внутренние)

TABLE VII. List of the main internal radioactive backgrounds considered in this work, except those related to ^{238}U and ^{232}Th chains, which are reported in Tables IX and XVI.

Isotope	Mean Life	Energy [keV]	Decay
^{14}C	8.27×10^3 yrs	156	β^-
^{85}Kr	15.4 yrs	687	β^-
^{40}K (89%)	1.85×10^9 yrs	1310	β^-
^{40}K (11%)	1.85×10^9 yrs	1460	EC + γ
^{39}Ar	388 yrs	565	β^-

TABLE IX. The ^{238}U decay chain showing isotopes, life times, maximum released energies and type of decay. A large number of γ line accompanying many of the decays are not reported in the table.

Isotope	Mean Life	Energy [keV]	Decay
^{238}U	6.45×10^9 yrs	4200	α
^{234}Th	34.8 days	199	β^-
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.70 min	2290	β^-
^{234}U	3.53×10^5 yrs	4770	α
^{230}Th	1.15×10^5 yrs	4690	α
^{226}Ra	2.30×10^3 yrs	4790	α
^{222}Rn	5.51 days	5490	α
^{218}Po	4.40 min	6000	α
^{214}Pb	38.7 min	1020	$\beta^- \gamma$
^{214}Bi	28.4 min	3270	$\beta^- \gamma$
^{214}Po	236 μ sec	7690	α
^{210}Pb	32.2 yrs	63	$\beta^- \gamma$
^{210}Bi	7.23 days	1160	β^-
^{210}Po	200 days	5410	α
^{206}Pb	stable	-	-

TABLE X. The ^{232}Th decay chain showing isotopes, life times, maximum released energies, and type of decay. A large number of γ line accompanying many of the decays are not reported in the table.

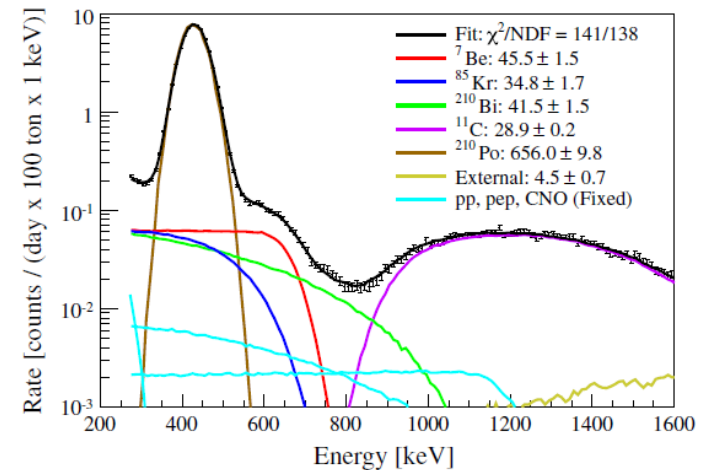
Isotope	Mean life	Energy [keV]	Decay
^{232}Th	2.03×10^{10} yr	4010	α
^{228}Ra	8.31 yr	46	$\beta^- \gamma$
^{228}Ac	8.84 hr	2140	$\beta^- \gamma$
^{228}Th	2.76 yr	5520	α
^{224}Ra	5.28 day	5690	α
^{220}Rn	80.2 s	6290	α
^{216}Po	209 ms	6780	α
^{212}Pb	15.3 hr	573	$\beta^- \gamma$
^{212}Bi (64%)	87.4 min	2250	β^-
^{212}Bi (36%)	87.4 min	6050	α
^{212}Po	431 ns	8780	α
^{208}Tl	4.40 min	4990	$\beta^- \gamma$

Точные измерения потока ^7Be нейтрино

Поток ^7Be нейтрино измерен с точностью
< 5%

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

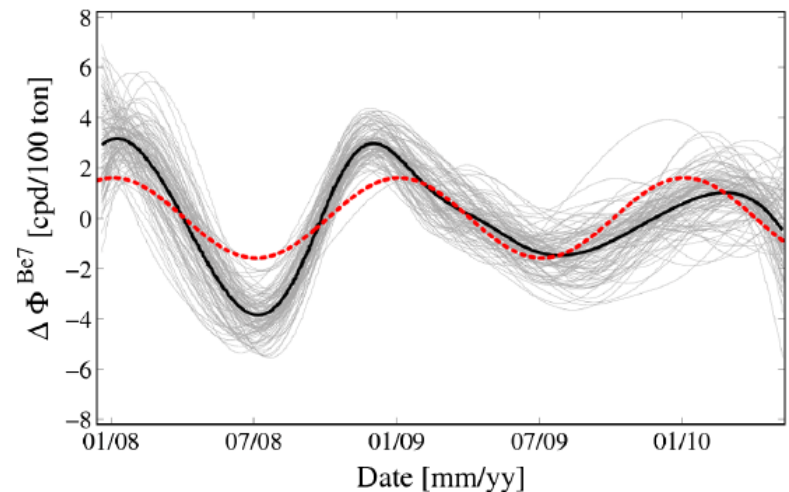
G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 141302 (2011).



Отсутствие асимметрии день/ночь в окне
 ^7Be нейтрино подтвердило LMA (90%)

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

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



Годовые модуляции (~7%) показаны на ^7Be нейтрино
аналогично результатам SNO и Super Kamiokande

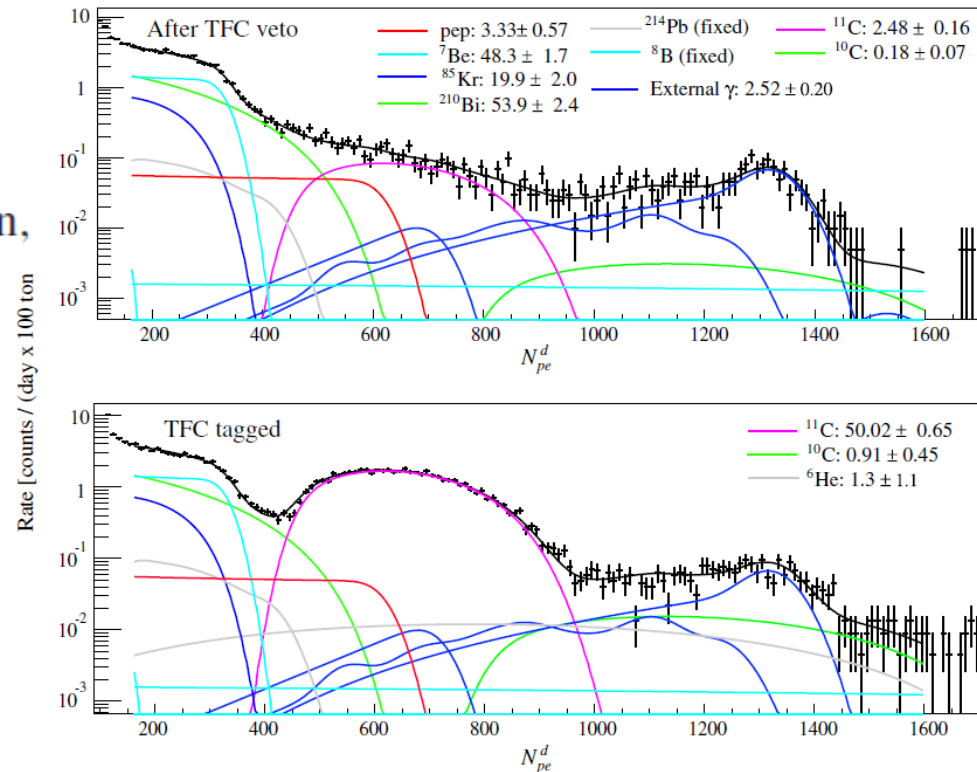
Результаты по рер и CNO солнечным нейтрино

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

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

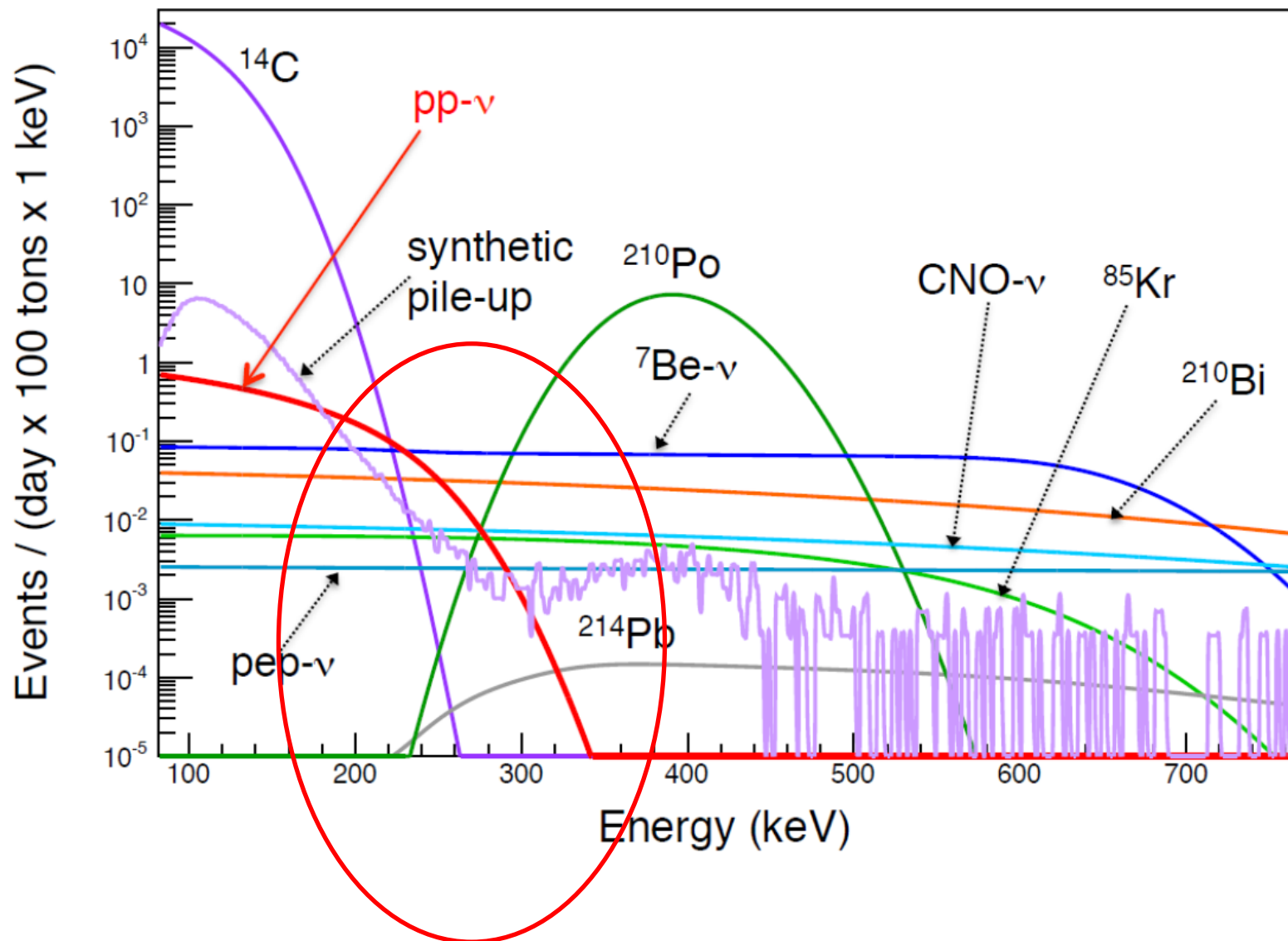
CNO – установлен предел уточнению которого мешает фон от ^{210}Bi и ^{11}C

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



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

pp-нейтрино Спектр регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах



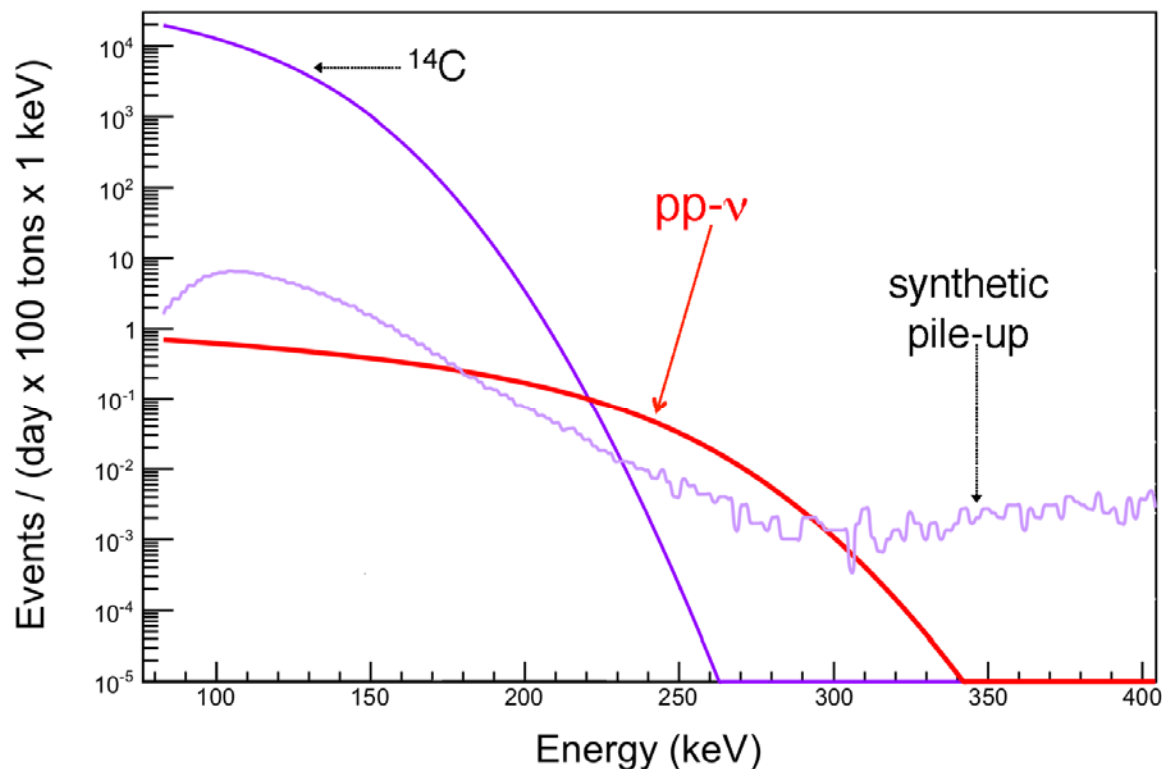
Как можно измерить $\bar{\nu}_\nu$ нейтрино ?

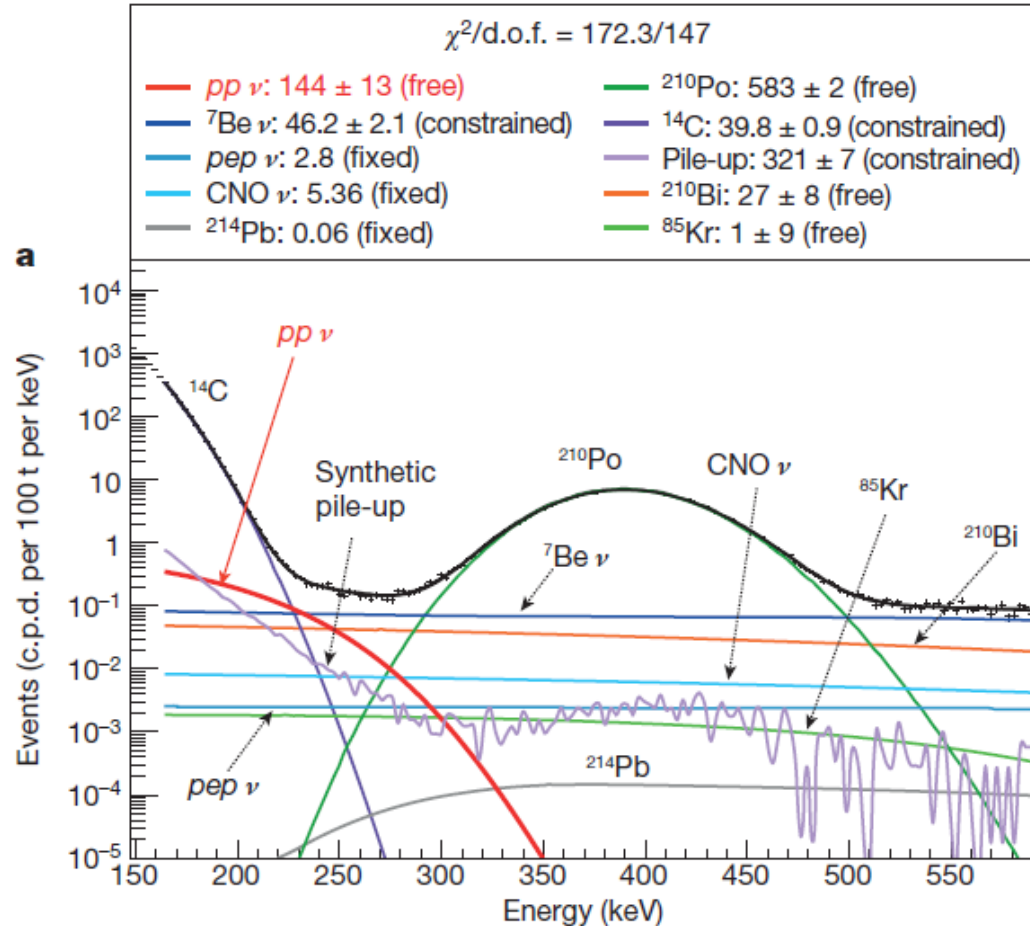
Граница спектра электронов отдачи - 264 кэВ, главный фон от ^{14}C – 156 кэВ

Остальные известные источники фона имеют плоские спектры в этой области

Три условия необходимо выполнить :

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





Впервые был измерен поток pp -нейтрино с точностью $\sim 11\%$

$pp = 144 \pm 13$ (stat) ± 10 (syst) cpd/100 t
(MSW/LMA,HM) 131 ± 2 cpd/100 t

Table 1 | Results from the fit to the energy spectrum

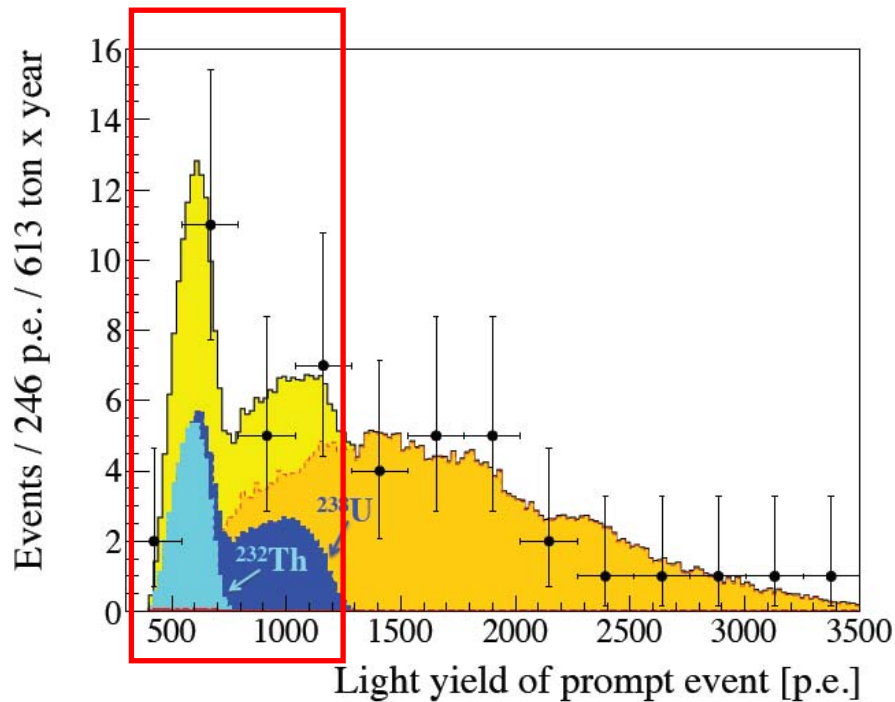
Parameter	Rate $\pm$ statistical error (c.p.d. per 100 t)	Systematic error (c.p.d. per 100t)
pp neutrino	144 ± 13	± 10
^{85}Kr	1 ± 9	± 3
^{210}Bi	27 ± 8	± 3
^{210}Po	583 ± 2	± 12

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 $\chi^2/\text{d.o.f.} = 172.3/147$.

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

Геонейтрино и реакторные нейтрино в детекторе Борексино

Методом наибольшего правдоподобия для фиксированного хондритного отношения $\text{Th}/\text{U}=3,9$ найдены вклады от реакторов и геонейтрино и поставлен предел на мощность геореактора - 4.5 ТВт



$$N_{\text{geo}} = (14.3 \pm 4.4)$$

$$N_{\text{реактор}} = (31.2 \pm 7.0 - 6.1)$$

$$\text{Эффект/фон} \sim 65$$

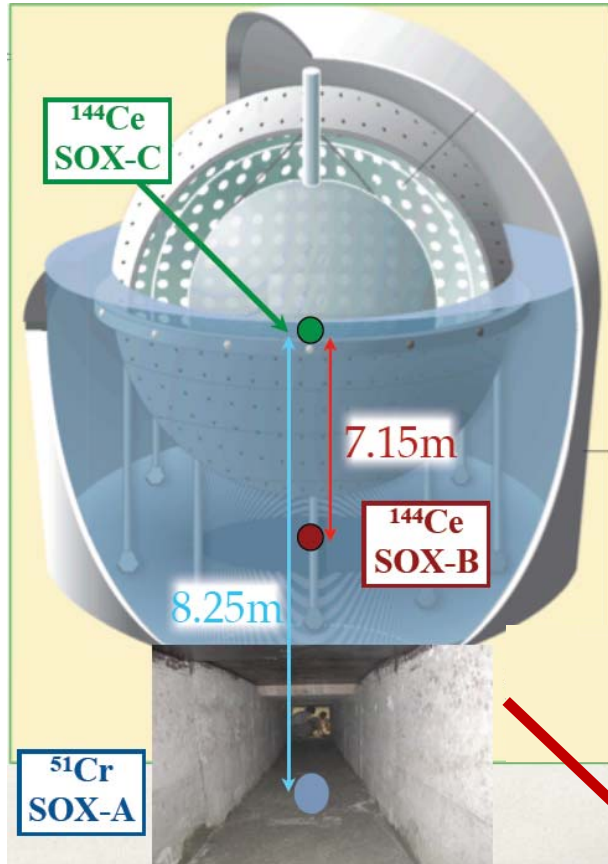
$$\text{Экспозиция} (613 \pm 26) \text{ тонн} \cdot \text{год}$$

Спектр позитронных событий в детекторе Борексино

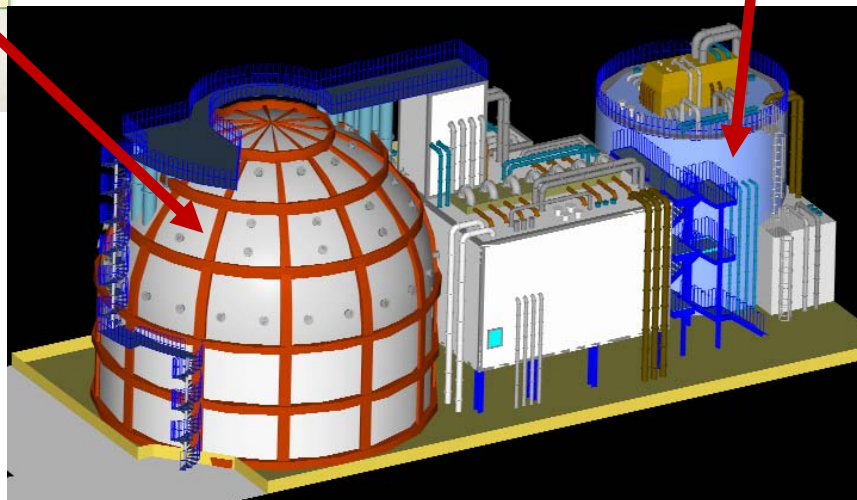
Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino

<http://arxiv.org/pdf/1303.2571v2.pdf>

Будущее Борексино

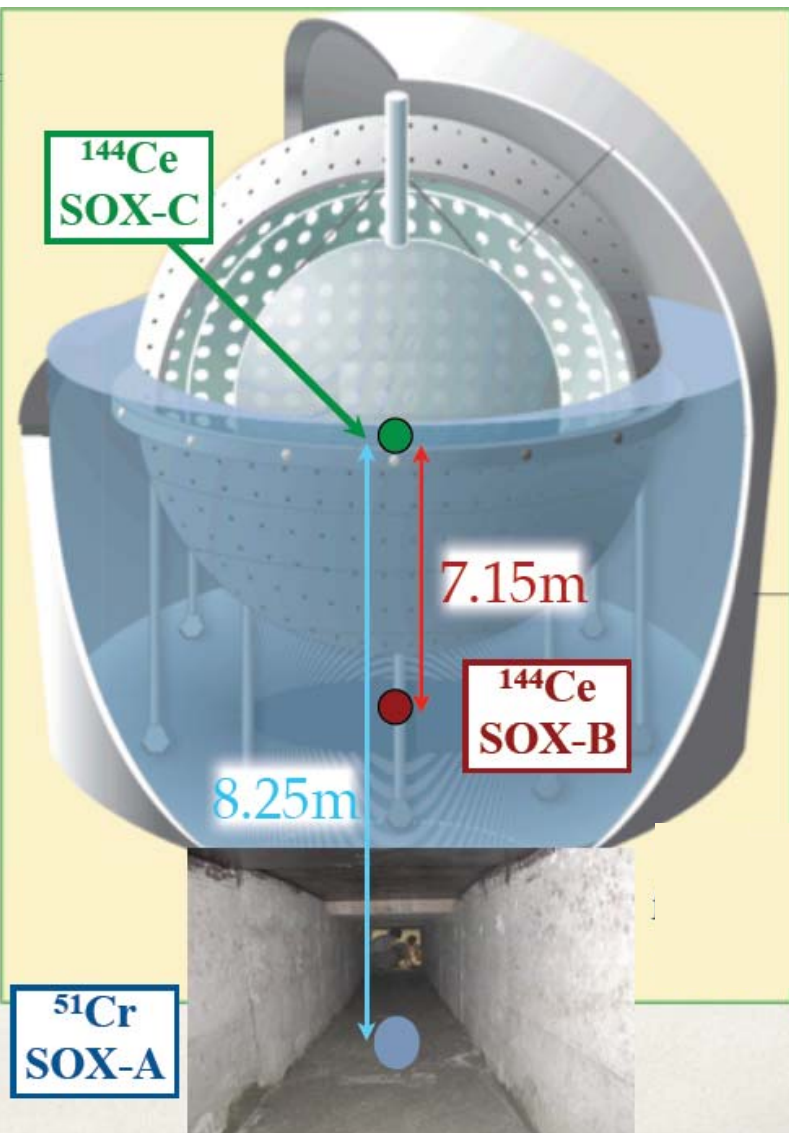


Short –distance Oscillation
with BoreXino



SOX: Short-distance Oscillation with Borexino

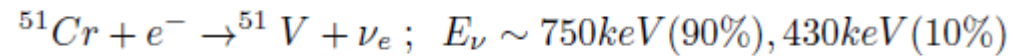
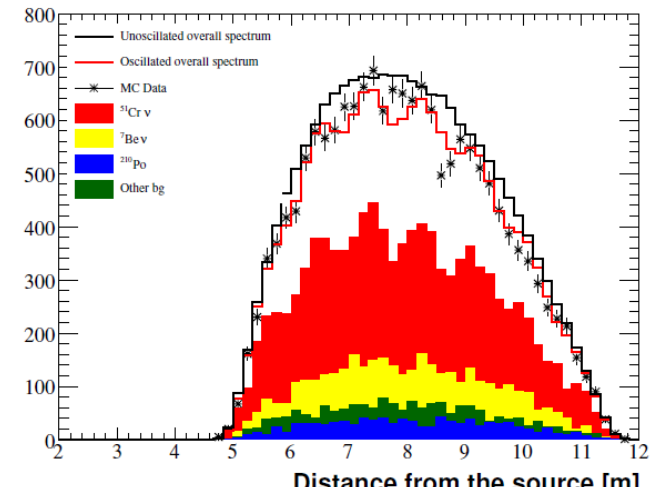
Поиск осцилляций нейтрино с искусственными источниками нейтрино



Phase A
 $\sim 10\text{M Ci } ^{51}\text{Cr}$

$$\Delta m_{41}^2 = 2\text{ eV}^2$$

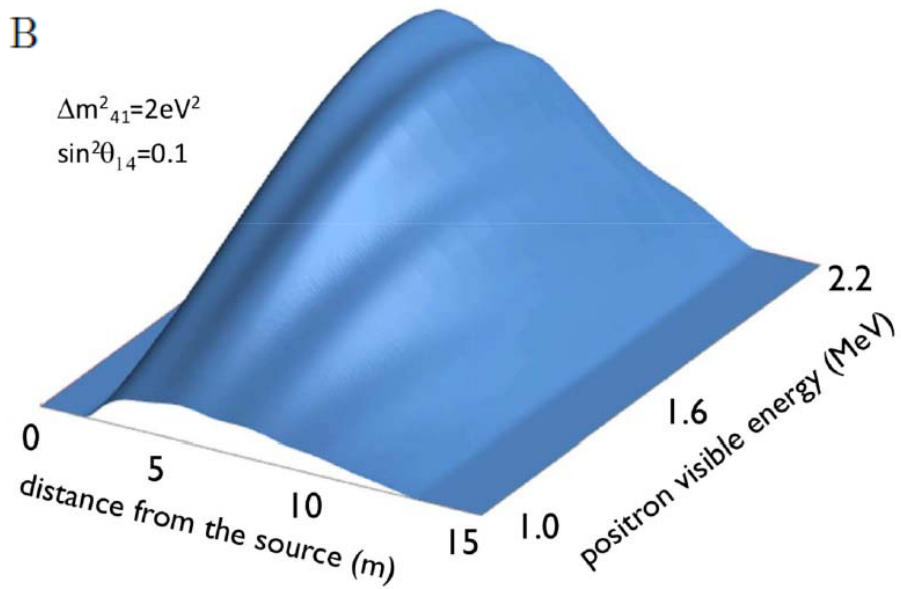
$$\sin^2(2\theta_{14}) = 0.3$$



Phase B

$$\Delta m_{41}^2 = 2\text{ eV}^2$$

$$\sin^2\theta_{14} = 0.1$$



Спасибо за внимание

