

Подземная физика

Леонид Безруков

ИЯИ РАН, Москва

Zoom конференция 50-лет ИЯИ РАН, 3 – 4 декабря 2020

Подземная физика это – исследование редких событий

1. Галлий-германиевый телескоп ИЯИ РАН (В. Гаврин, Г. Зацепин, В. Кузьмин и др.)

20 ÷ 30 атомов Ge в месяц в 50ти тоннах Ga → физика Солнца и свойства нейтрино.

2. GERDA (с участием ИЯИ РАН, А. Поманский, И. Барабанов, Л. Безруков и др.)

Двойной безнейтринный бета распад атома германия → физика на малых расстояниях.

Результат: Фон – $5.2 \cdot 10^{-4}$ событий/ (кг·год·кэВ), $T_{1/2} > 1.8 \cdot 10^{26}$ лет,
 $m_{\beta\beta} < 79 \div 180$ meV

Underground physics laboratories (m of water equiv. shielding)

БНО ИЯИ РАН



А.Поманский, Е.Алексеев,
В.Кузьминов, В.Петков

Артёмовский филиал ИЯИ РАН



О.Ряжская

- [ANDES](#) ($\leftrightarrow$ 4800)
- [ARF](#) ($\updownarrow$ 2800)
- [Baksan](#) ($\leftrightarrow$ 4800)
- [Boulby](#) ($\updownarrow$ 2800)
- [CallioLab](#) ($\updownarrow$ 4000)
- [Canfranc](#) ($\leftrightarrow$ 2500)
- [CJPL](#) ($\leftrightarrow$ 6720)
- [INO](#) ($\leftrightarrow$ 4000)
- [Kamioka](#) ($\leftrightarrow$ 2700)
- [Kimballton aka KURF](#) ($\leftrightarrow$ 1450)
- [LNGS](#) ($\leftrightarrow$ 3400)
- [LSBB](#) ($\leftrightarrow$ 1500)
- [LSM/Fréjus](#) ($\leftrightarrow$ 4800)
- [Oto](#) ($\leftrightarrow$ 1400)
- [SNOLAB](#) ($\updownarrow$ 6000)
- [Soledar](#) ($\updownarrow$ 570)
- [Soudan](#) ($\updownarrow$ 2100)
- [Stawell aka SUPL](#) ($\updownarrow$ 2900)
- [SURE](#) ($\updownarrow$ 4300)
- [WIPP](#) ($\updownarrow$ 1600)
- [Yangyang aka Y2L](#) ($\leftrightarrow$ 2100)

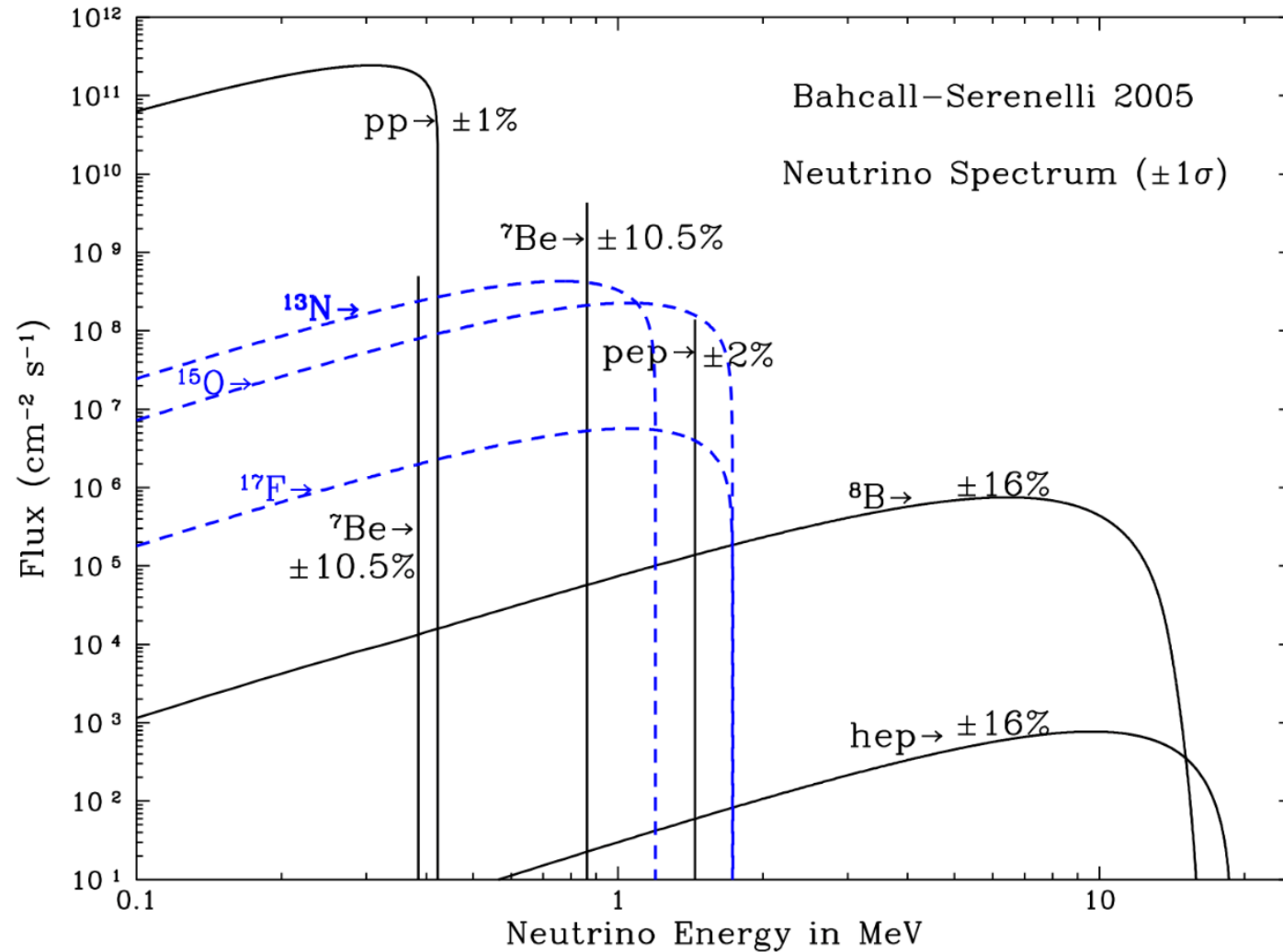
Содержание доклада

- Солнечные нейтрино (В.Гаврин, Г.Зацепин, В.Кузьмин, С.Михеев, А.Смирнов и др.)
- Гео-нейтрино (Л.Безруков, В.Синёв и др.)
- Нейтрино от вспышки сверхновой звезды (О. Ряжская и др.)
- Заключительные замечания

Солнечные нейтрино

- В.Паули (90 лет назад) при интерпретации результатов экспериментов по бета-распаду ядер и частиц предложил, что должна существовать новая очень слабо взаимодействующая частица – нейтрино.
- Он выразил сомнение в возможности обнаружить такую частицу.
- Распад нейтрона: $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$
- Основная реакция синтеза в Солнце: $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$

The theoretical solar neutrino spectrum (SSM)



Cl – Ar experiment, R.Devis Jr., Nobel pr. 2002

HOMESTAKE-CHLORINE	Homestake chlorine experiment	Solar ν_e	$^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar}^* + e^-$ $^{37}\text{Ar}^* \rightarrow ^{37}\text{Cl} + e^+ + \nu_e$	CC	C₂Cl₄ (615 t)	Radiochemical	814 keV	Homestake Mine, South Dakota	1967–1998
------------------------------------	-------------------------------	---------------	--	----	--	-------------------------------	---------	--	-----------

$$[{}^7\text{Be}+\text{CNO}+\text{pep}+{}^8\text{B} \mid \text{Cl}] = 2,56 \cdot (1 \pm 0,088) \text{ SNU}$$

Predicted counting rate: 7 ÷ 8 SNU

SNU = 10^{-36} captures per target atom per second.

Ga-Ge exp.: SAGE, Callex + GNO

Soviet– American Gallium Experiment	Solar ν_e		$\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$	CC	Ga (metallic)	Radiochemical	233.2 keV	Baksan River valley, Russia	1989–
--	------------------	--	---	----	----------------------------------	-------------------------------	--------------	--	-------

$$[\text{pp} + {}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep} + {}^8\text{B} | \text{Ga}] = 66,1 \cdot (1 \pm 0,047) \text{ SNU}.$$

Predicted counting rate: 120 ÷ 130 SNU

SNU = 10^{-36} captures per target atom per second.

Japan, M.Koshihara, Nobel pr. 2002,
T.Kajita, Nobel pr. 2015

Kamiokande	Kamioka Nucleon Decay Experiment	S, ATM	ν_e	$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$	ES	Water (H ₂ O)	Cherenkov	7.5 MeV	Kamioka , Japan	1986– 1995
----------------------------	----------------------------------	-----------	---------	-----------------------------------	----	---	---------------------------	------------	------------------------------------	---------------

The flux of ^8B solar neutrinos measured by Super-Kamiokande in their 1496-day dataset was:
 $(2.35 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.})) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Predicted flux: $(5\text{--}6) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Проблема дефицита солнечных нейтрино

- Обнаружено, что регистрируемый поток солнечных нейтрино значительно ниже предсказываемого Стандартной моделью Солнца (SSM).
- Сформулирована проблема дефицита солнечных нейтрино по сравнению со Стандартной моделью Солнца (SSM).

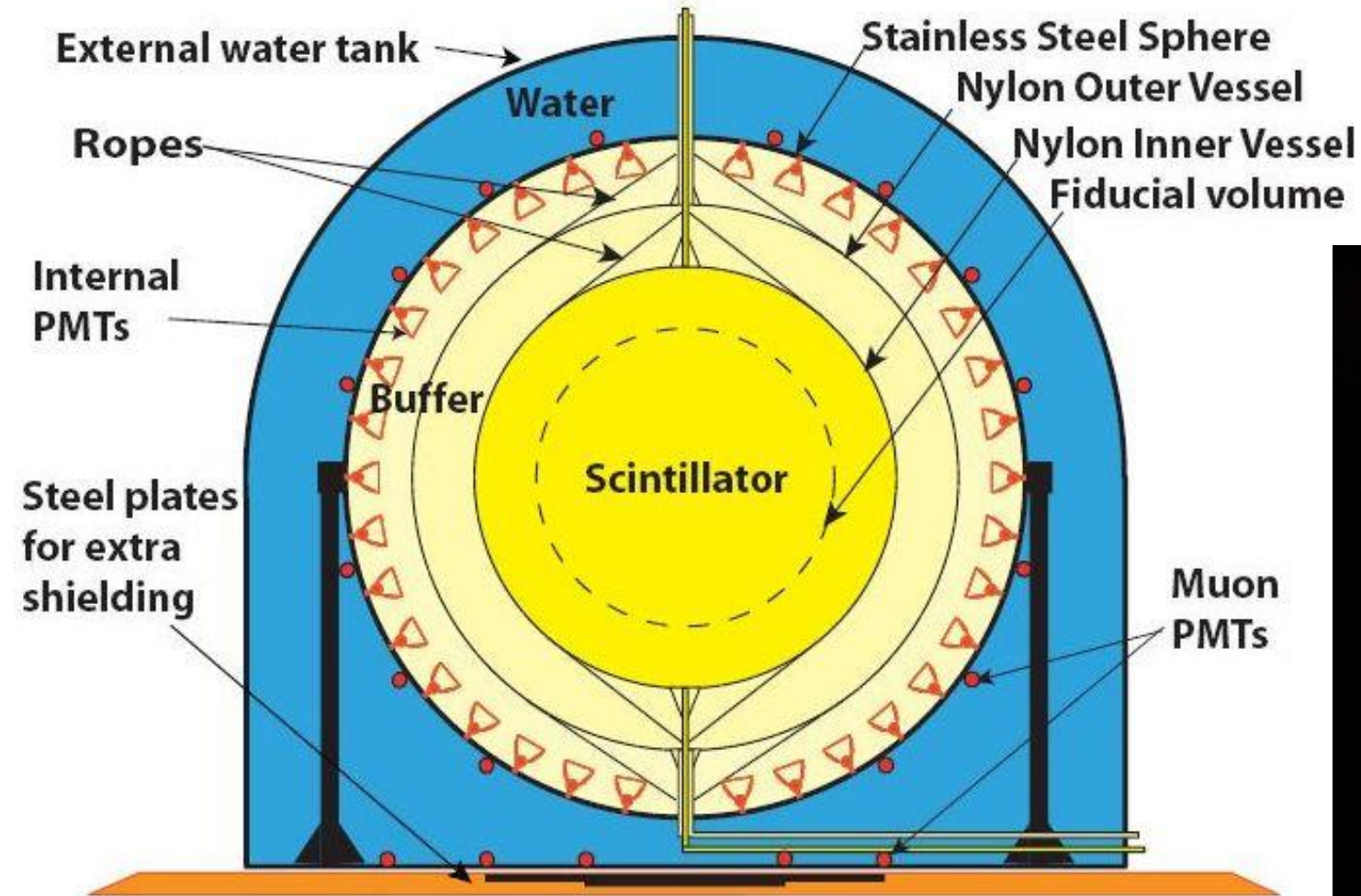
Canada, A.McDonald, Nobel pr. 2015

SNO	Sudbury Neutrino Observatory	S, ATM,	ν_e , ν_μ , ν_τ	$\nu_e + {}^2\text{D} \rightarrow 2\text{p} + \text{e}^-$ $\nu_x + {}^2\text{D} \rightarrow \nu_x + \text{n} + \text{p}$ $\nu_e + \text{e}^- \rightarrow \nu_e + \text{e}^-$	CC NC ES	Heavy water (1 kt D_2O)	Cherenkov	3.5 MeV	Creighton Mine, Ontario	1999 – 2006
---------------------	------------------------------	---------	--	--	----------------	--	---------------------------	---------	---	-------------

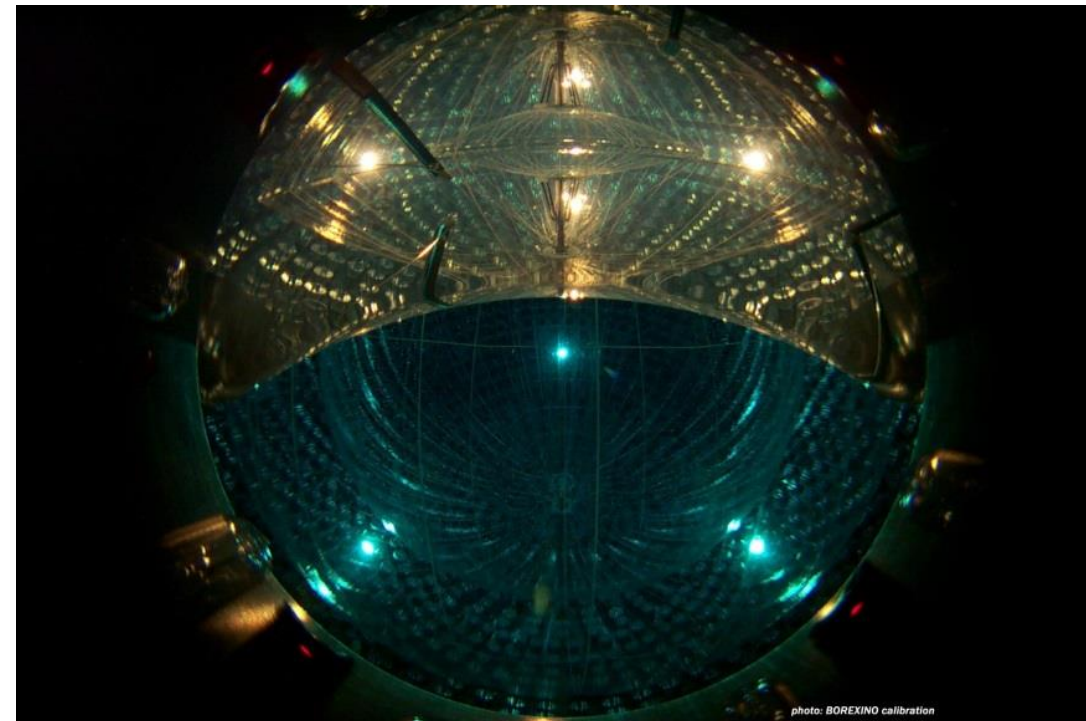
Predicted flux: $\Phi_{8\text{B}} = (5.69 \pm 0.91) 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Salt CC flux ν_e , $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	1.68 +0.06–0.06(stat.)+0.08–0.09(syst.)
Salt NC flux ν_x , $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	4.94 +0.21–0.21(stat.)+0.38–0.34(syst.)
${}^3\text{He}$ counter CC flux ν_e , $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	1.67 +0.05–0.04(stat.)+0.07–0.08(syst.)
${}^3\text{He}$ counter NC flux ν_x , $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	5.54 +0.33–0.31(stat.)+0.36–0.34(syst.)

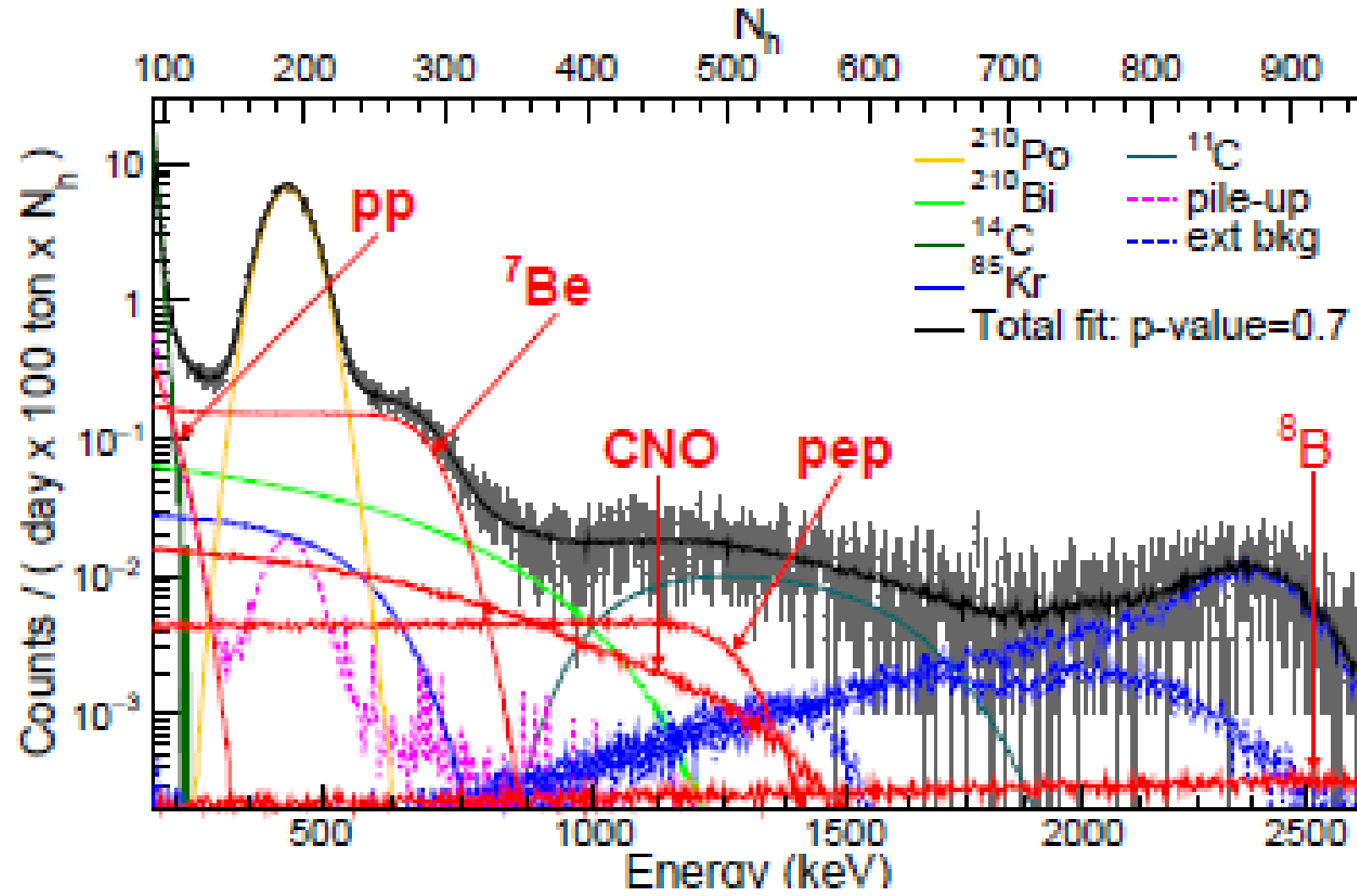
Borexino Detector



100 t fiducial volume.
Total target mass 300 t.



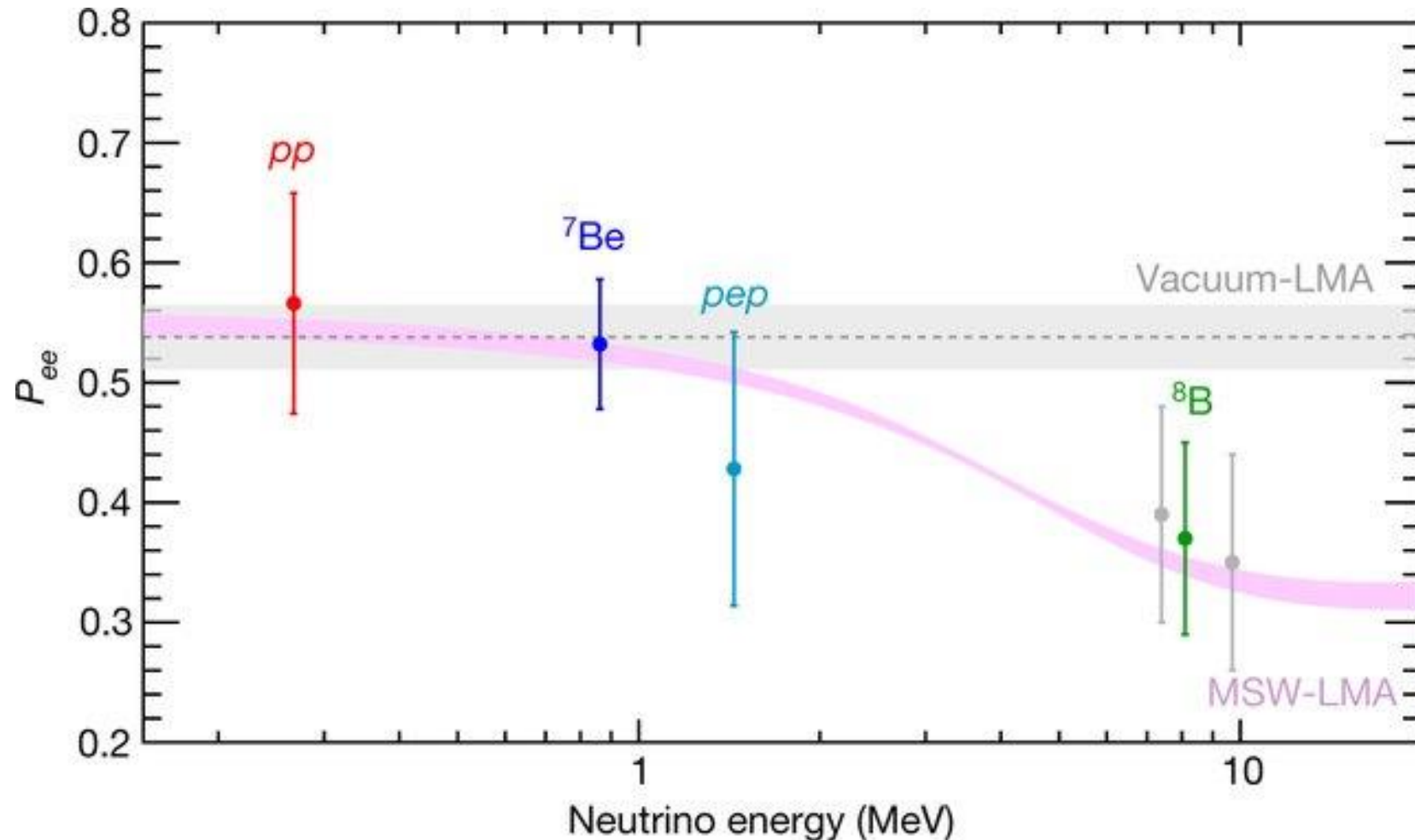
Multivariate results energy spectra. The sum of the individual components (black lines) is superimposed on the data (grey points).



Осцилляции солнечных нейтрино

- Проблема дефицита солнечных нейтрино была решена моделью осцилляций солнечных нейтрино.
- Для понимания величины потока ^8B нейтрино важную роль сыграло открытие резонансных осцилляций нейтрино при взаимодействии с веществом Солнца (С. Михеев, А. Смирнов)

Solar ν_e survival probability as a function of neutrino energy including all solar (with Borexino) experimental results. The grey band is the prediction of the Vacuum-LMA solution. The pink band is the prediction of MSW-LMA model.



НОВОСТЬ

- The Borexino Collaboration., Agostini, M., Altenmüller, K. *et al.*

Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun.

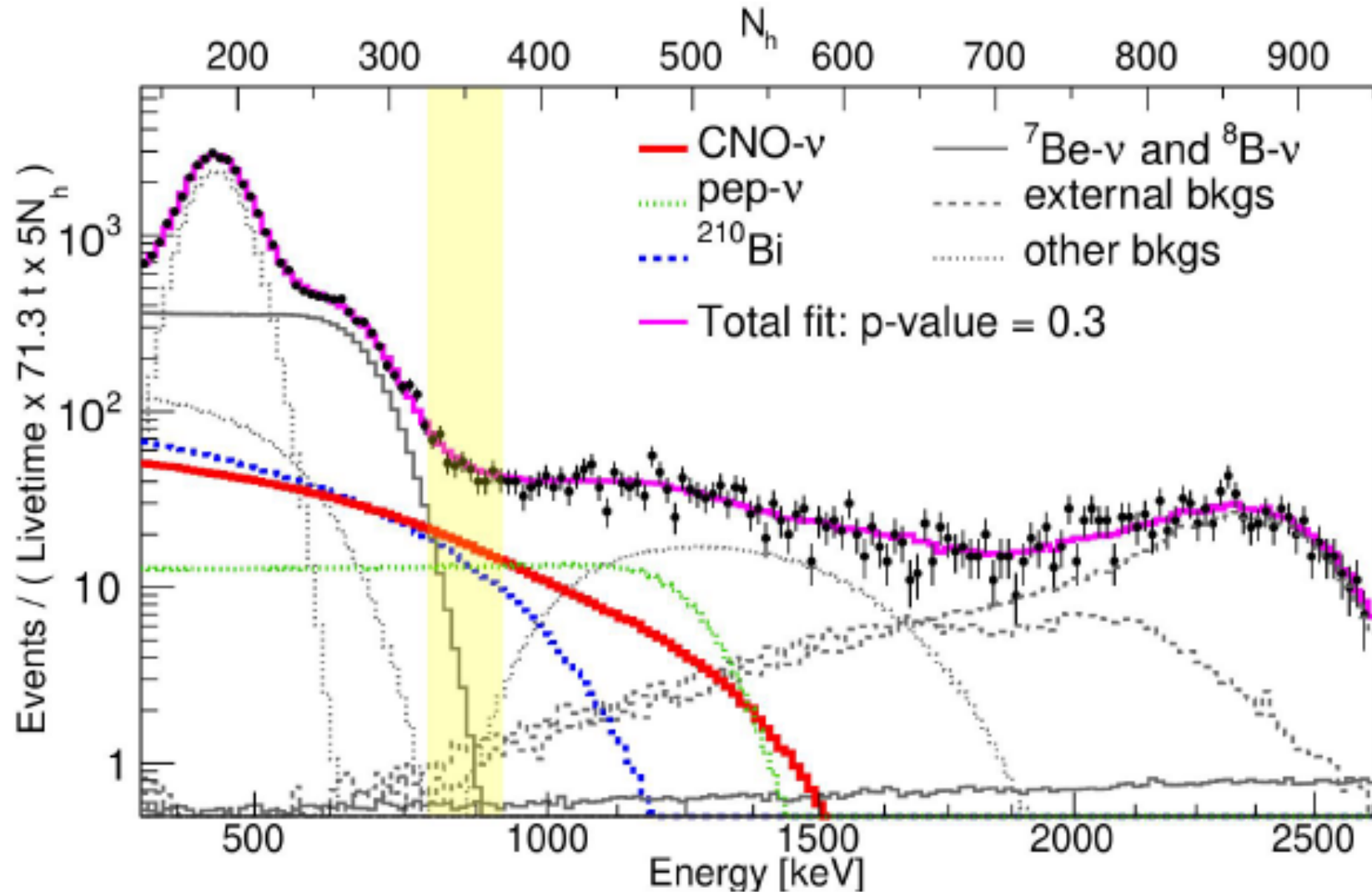
Nature 587, 577–582.

Published 25 November 2020.

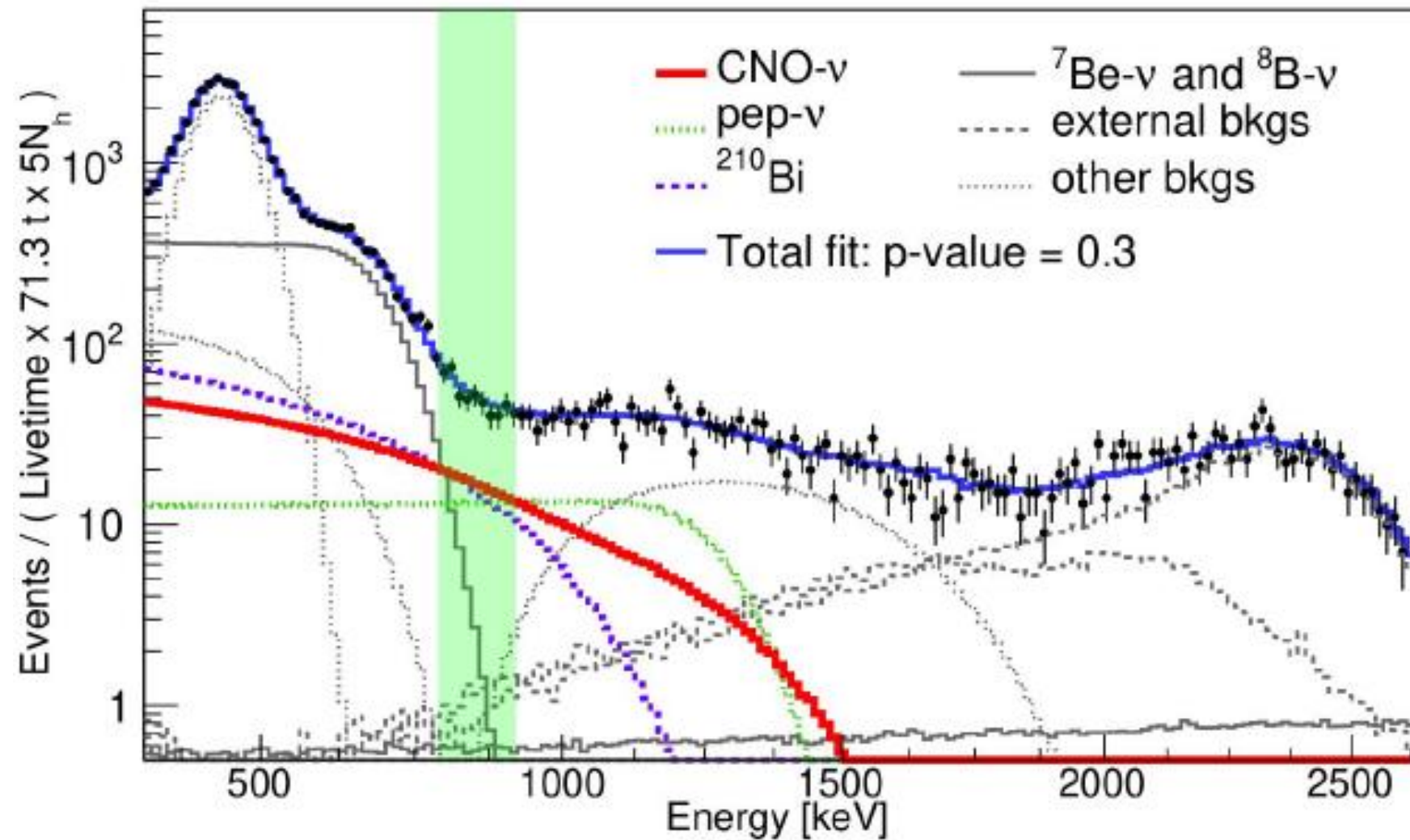
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0>

Agostini M., [Altenmüller K.](#), [Appel S.](#) et al. First Direct Experimental Evidence of CNO neutrinos. arXiv: 2006.15115 [hep-ex]. 2020.

Рис. Диф. энергетический спектр одиночных событий в Borexino.



Borexino



Обозначения

- Дифференциальная скорость счёта

$$R'(E) = \frac{dR(E)}{dE}$$

- Интегральная скорость счёта

$$R = \int_0^{\infty} R'(E) dE$$

- Интервальная скорость счёта

$$R(E_{min} + E_{max}) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R'(E) dE$$

- Эффективная энергия

$$E_{eff} = \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} E \cdot R'(E) dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} R'(E) dE}$$

Borexino. Результат измерения CNO- ν

- Ожидаемая скорость счёта CNO- ν (SSM-HM, MSW-LMA)

$$R_{CNO} = 4.92 \pm 0.78 \text{ cpd/100 tons} \quad (68\%CL)$$

- Counting Analysis (CA) result (Used energy range: $\Delta E_{CA} = 0.74 \div 0.85 \text{ MeV}$. $E_{eff} = 0.8 \text{ MeV}$)

$$R_{CA} \pm \sigma(R_{CA}) = \frac{R_{CA} (0.74 \div 0.85 \text{ MeV}) \pm \sigma_{CA}}{R_{CNO} (0.74 \div 0.85 \text{ MeV})} \cdot R_{CNO} = 5.6 \pm 1.6 \text{ cpd/100 t}$$

- Multivariable Fit (MF) result (Used energy range: $\Delta E_{MF} = 0.32 \div 2.64 \text{ MeV}$. $E_{eff} = 0.56 \text{ MeV}$)

$$R_{MF} \pm \sigma(R_{MF}) = \frac{R_{MF} (0.32 \div 2.64 \text{ MeV}) \pm \sigma_{MF}}{R_{CNO} (0.32 \div 2.64 \text{ MeV})} \cdot R_{CNO} = 7.2 - 1.7 + 3.0 \text{ cpd/100 t}$$

Солнечные нейтрино. Выводы.

- Полная спектроскопия солнечных нейтрино завершена.
- Построена и подтверждена модель осцилляций солнечных нейтрино.
- Подтверждена стандартная модель солнца (SSM-HZ).
- Возникла проблема избытка CNO- ν подобных событий.

Связь потоков гео-антинейтрино с внутренним теплом Земли.

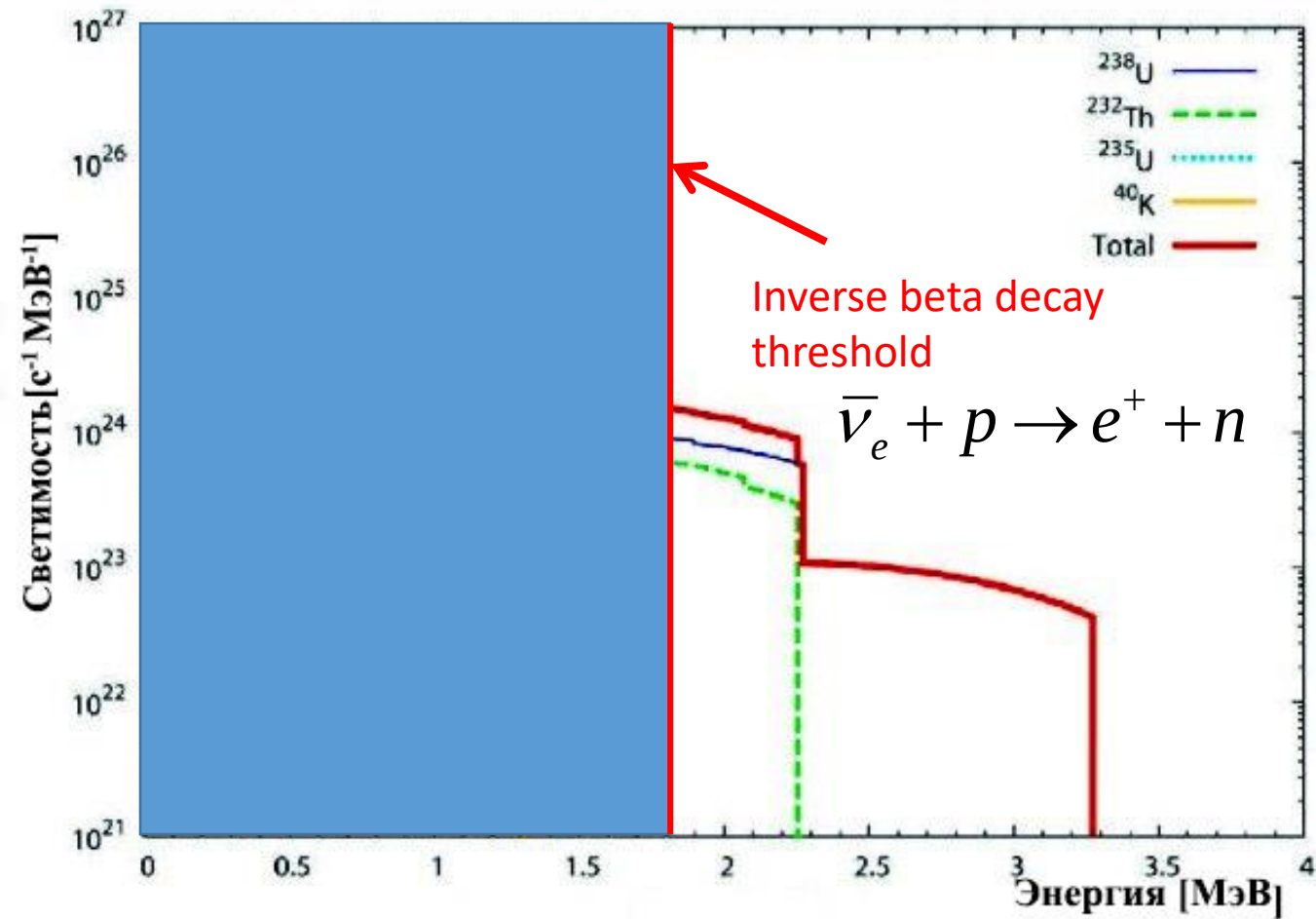
- ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K decays in the Earth body are the source of heat and geoneutrinos.
- $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e + 6\tilde{\nu}_e + 51,7 \text{ MeV} (47,7)$
- $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e + 4\tilde{\nu}_e + 42,7 \text{ MeV} (40,4)$
- $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \tilde{\nu}_e + 1.31 \text{ MeV} (0.598) \text{ prob. } 0,893$
 $\rightarrow ^{40}\text{Ar} + \gamma + \nu_e + 1.51 \text{ MeV} (1.46) \text{ prob. } 0,1066$

HE модель: $H_U + H_{\text{Th}} \approx 40 \text{ TW}$, $1.5\% \rightarrow H_K = 265 \text{ TW}$.

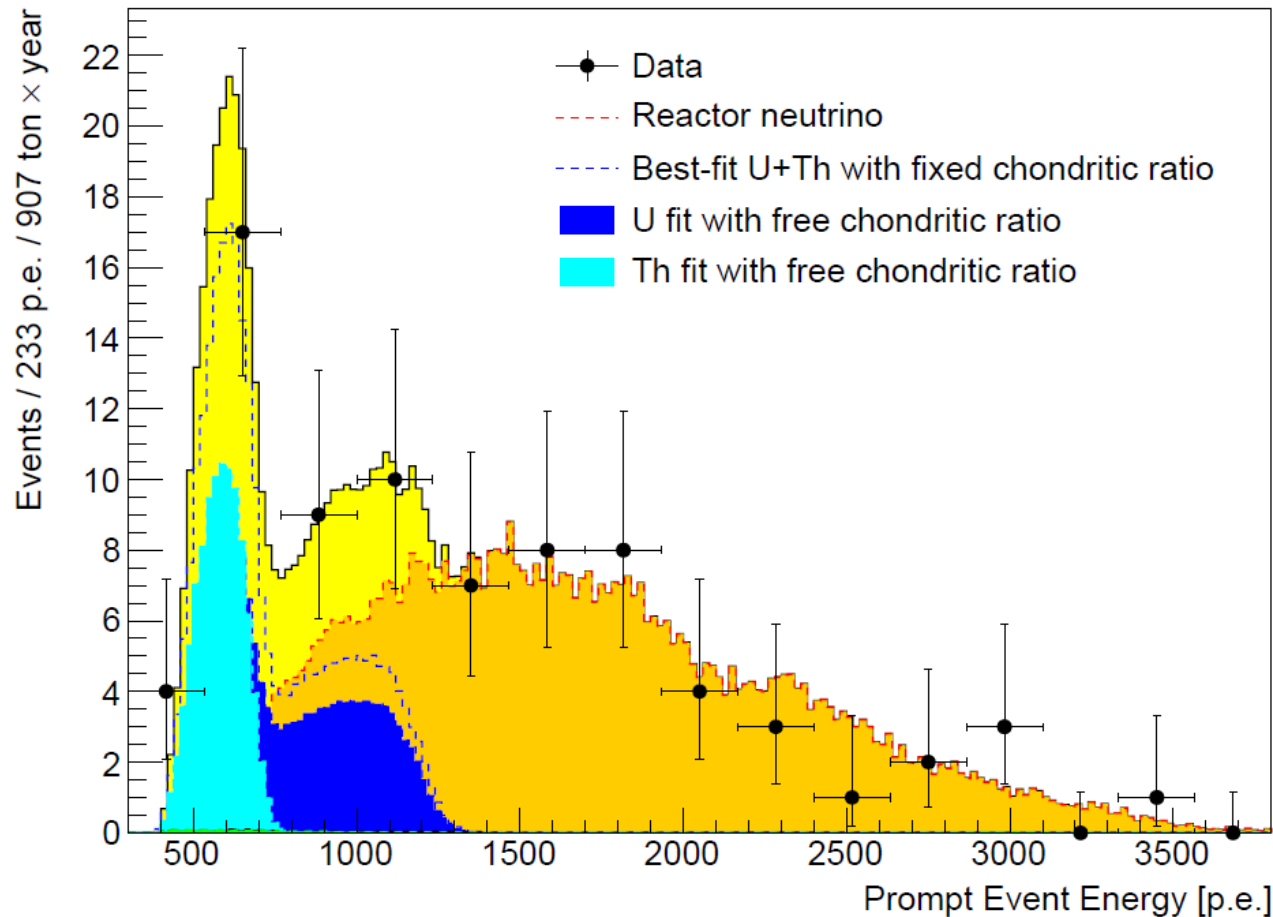
BSE модель: $H_U + H_{\text{Th}} \approx 20 \text{ TW}$, $H_K \approx 4 \text{ TW}$.

В гео-науку внедрён результат усреднения измерения потока внутреннего тепла Земли: $47 \pm 2 \text{ TW}$.

Geo-antineutrinos energy spectra



Borexino.



M. Agostini et al. Phys. Rev. D 92, 031101 (2015).

M. Agostini et al. Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino. PHYSICAL REVIEW D 101, 012009 (2020)

$T_{\text{meas}} = 2056$ days (**5.6 years**)

$N_p = (0.977 \pm 0.05) \times 10^{31}$ protons on target

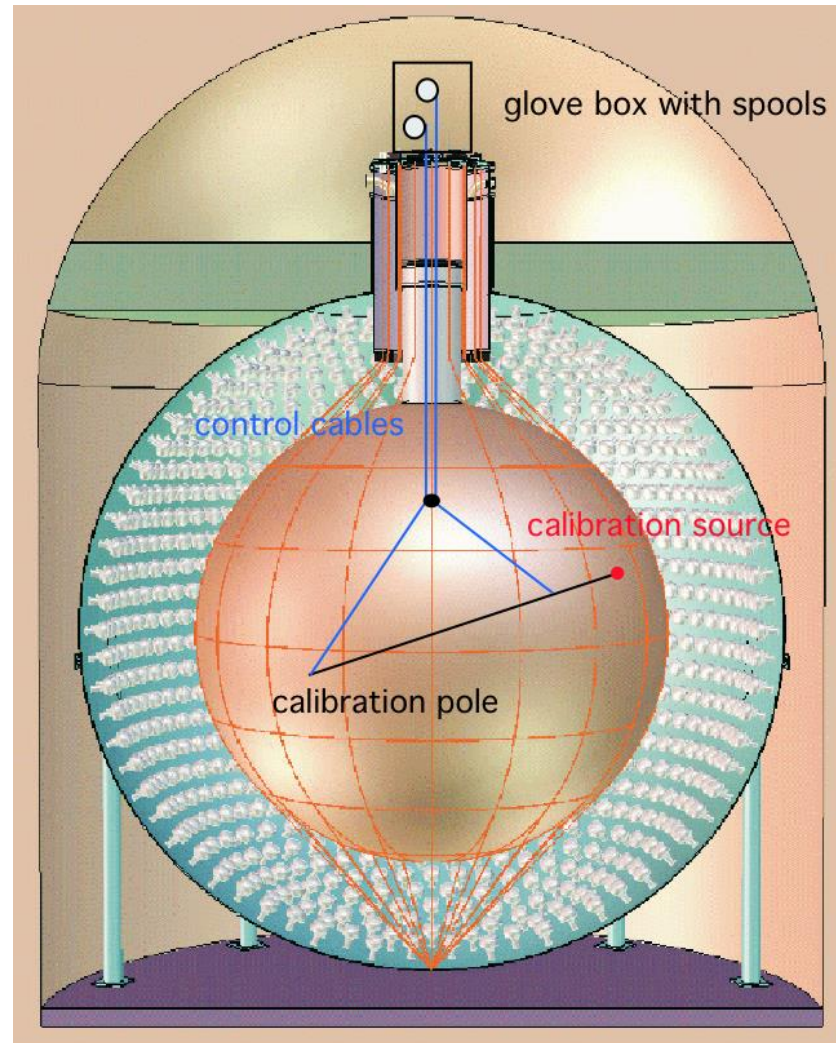
Exposure $(5.5 \pm 0.3) \times 10^{31}$ proton years

$23.7^{+6.5(\text{st})+0.8}_{-5.7(\text{st})-0.6}$ geo-nu events

43.5 TNU (Terrestrial Neutrino Unit)

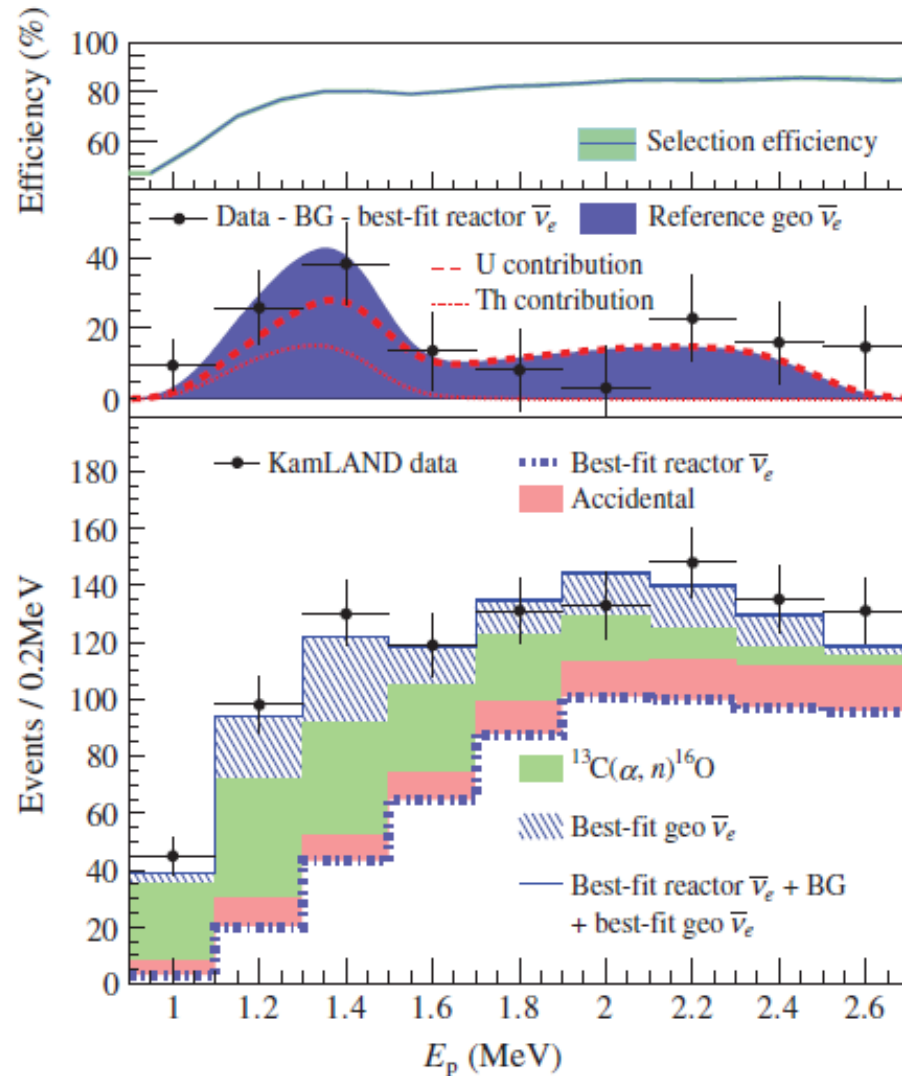
TNU corresponds to 1 geoneutrino event recorded over a year-long fully efficient exposure of 10^{32} free protons, which is approximately the number of free protons in a 1 kiloton liquid scintillation detector.

KamLAND Detector



600 t fiducial volume.
Total target mass 1000 t.
 $R \sim 12$ events/year

KamLAND



A. Gando et al. Phys. Rev. D 88, 033001 (2013).

$T_{\text{meas}} = 2991$ days (8.2 years)

$N_p = (5.98 \pm 0.13) \times 10^{31}$ protons on target

Exposure $(4.9 \pm 0.1) \times 10^{32}$ proton years

116^{+28}_{-27} geo-nu events

23.67 TNU

Heat production by Uranium and Thorium

(abundance: $2 \times 10^{-6} \%$)

$8 \times 10^{-6} \%$)

branch	Isotope abundance in Natural mixture	Q_eff, MeV	Decays number in 1 kg per s	J/dec	W per kg	Total mass in Earth according BSE, kg	H, TW
²³⁸ U	0.993	47.7	1.23×10 ⁷	7.64×10 ⁻¹²	9.44×10 ⁻⁵	0.806×10 ¹⁷	7.608
²³⁵ U	0.007	44	5.68×10 ⁵	7.05×10 ⁻¹²	4.01×10 ⁻⁶	0.58×10 ¹⁵	0.002
²³² Th	1.0	40.4	4.06×10 ⁶	6.47×10 ⁻¹²	2.63×10 ⁻⁵	3.2×10 ¹⁷	8.5
Total heat							16.11

Heat production by Potassium (abundance 0.02% weight)

branch	⁴⁰ K abundance in Natural mixture	Q_eff, MeV	Decays number in 1 kg per s	J/dec	W per kg	Total Potassium mass in Earth, kg	H, TW
0.8914	1.17×10 ⁻⁴	0.595	2.76×10 ⁴	9.53×10 ⁻¹⁴	2.63×10 ⁻⁹	1.194×10 ²¹	3.1
0.1066		1.46	3.30×10 ³	2.34×10 ⁻¹³	7.73×10 ⁻¹⁰		0.9
0.002		0.0027	62	4.26×10 ⁻¹⁶	2.64×10 ⁻¹⁴		0.0
Total heat							4.0

Bezrukov-Sinev Model

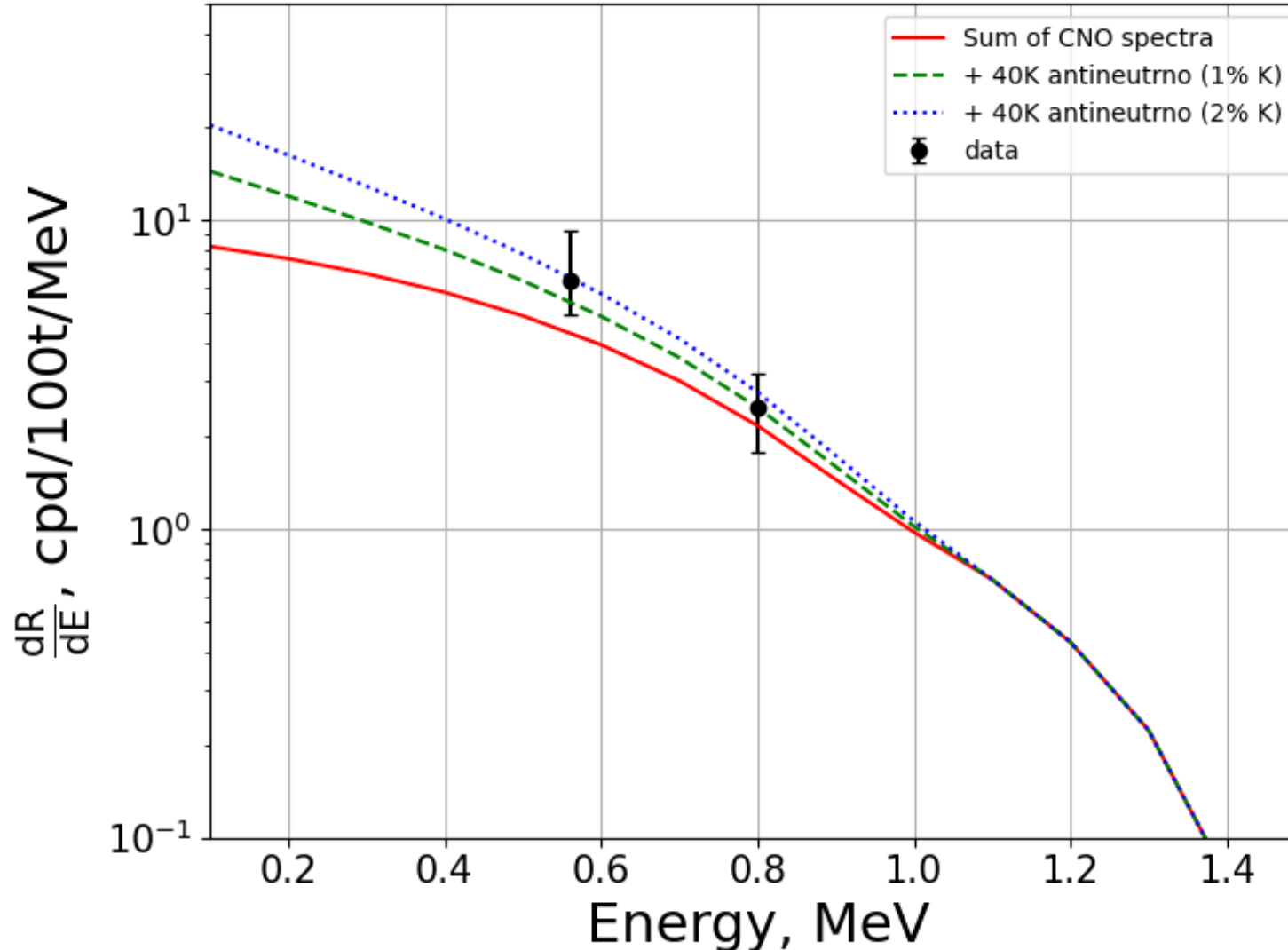
- $M(\text{U}) = 1.7 \times 10^{17} \text{ kg}$ ($2.8 \times 10^{-6} \%$),
 $M(\text{Th}) = 6.7 \times 10^{17} \text{ kg}$ ($1.12 \times 10^{-5} \%$)
- In the Crust they distributed according BSE (Reference Model)
- In the Mantle and Core they were chosen in abundances not to break observed counting rates (Borexino and KamLAND)

	Experimental counting rate, TNU	Calculated counting rate, TNU
Borexino	43.5 ± 12.5	38.1
KamLAND	23.67 ± 5.61	31.8

Представление результатов измерения потока CNO- ν ,
используя понятие эффективной энергии

- $R'_{CA}(0.8 \text{ MeV}) \pm \sigma(R'_{CA}) = \frac{R_{CA} \pm \sigma(R_{CA})}{R_{CNO}} R'_{CNO}(0.8 \text{ MeV})$
- $R'_{MF}(0.56 \text{ MeV}) \pm \sigma(R'_{MF}) = \frac{R_{MF} \pm \sigma(R_{MF})}{R_{CNO}} R'_{CNO}(0.56 \text{ MeV})$

Энергетический спектр электронов отдачи при рассеянии нейтрино (или антинейтрино) на электронах сцинтиллятора $dR(E)/dE$ в детекторе Borexino. Красным – солнечные CNO нейтрино, зелёным и синим – CNO нейтрино + ^{40}K гео-антинейтрино. Точки – результат эксперимента.



arXiv:2007.07371v2 [hep-ex physics.ins-det]. 2020.
On first detection of solar neutrinos from CNO cycle with Borexino.
L. B. Bezrukov,
I. S. Karpikov,
A. S. Kurlovich,
A. K. Mezhoikh,
S. V. Silaeva,
V. V. Sinev,
V. P. Zavarzina

Результат анализа полученной скорости счёта CNO подобных событий в детекторе BOREXINO

Наиболее правдоподобной моделью является наличие дополнительных событий к событиям от взаимодействия CNO нейтрино (SSM HZ с учётом MSW-LMA эффекта).

Источником этих событий могут являться гео-антинейтрино от распада ^{40}K . Наиболее вероятное содержание калия в Земле составило $1,5 \pm 1.0 \%$ от массы Земли.

Такую концентрацию калия в Земле предсказывает модель «Богатая водородом Земля». Заметим, что в общепринятой модели Земли (Силикатная Земля, BSE) в коре Земли содержится 1,5% калия от массы коры.

Prediction 2015, 2020: Borexino will observe
 $6 \div 9$ cpd/100tons as CNO- ν events.
Expected from CNO- ν in SSM is 4.9 cpd/100tons

Geoneutrino and Hydridic Earth model. Version 2. [Leonid Bezrukov](#). INR Preprint:
1378/2014, January 2014, Moscow. [arXiv:1308.4163v2](#) [astro-ph.EP]

V.V.Sinev, L.B.Bezrukov, E.A.Litvinovich, I.N.Machulin, M.D.Skorokhvatov, S.V.Sukhotin.
Looking for Antineutrino Flux from ^{40}K with Large Liquid Scintillator Detector, Physics of
Particles and Nuclei.46 (2015) 186, doi:10.1134/S1063779615020173;
arXiv:1405.3140 [physics.ins-det].

L.B.Bezrukov, I.S.Karpikov, A.S.Kurlovich, A.K.Mezhokh, S.V.Silaeva, V.V.Sinev, V.P.Zavarzina,
On the contribution of the ^{40}K geo-antineutrino to single Borexino events. (2020)
arXiv:2004.02533v2 [hep-ex]

Гео-antineйтрино. Выводы

1. Детекторы Borexino and Kamland измерили потоки U and Th geo- $\tilde{\nu}$.
1. Данные о потоках U and Th geo- $\tilde{\nu}$ позволяют объяснить величину теплового потока из Земли вплоть до $H = 50 \text{ TW}$ и допускают содержание U and Th не только в коре Земли.
3. Детектор Borexino измерил поток CNO- ν и обнаружил избыток событий по сравнению с предсказанием SSM.
4. Данные о потоке CNO- ν допускают содержание калия в Земле $1,5 \pm 1.0 \%$ от массы Земли.

Нейтрино от вспышки сверхновой звезды.

- Загадка Сверхновой звезды SN1987A.

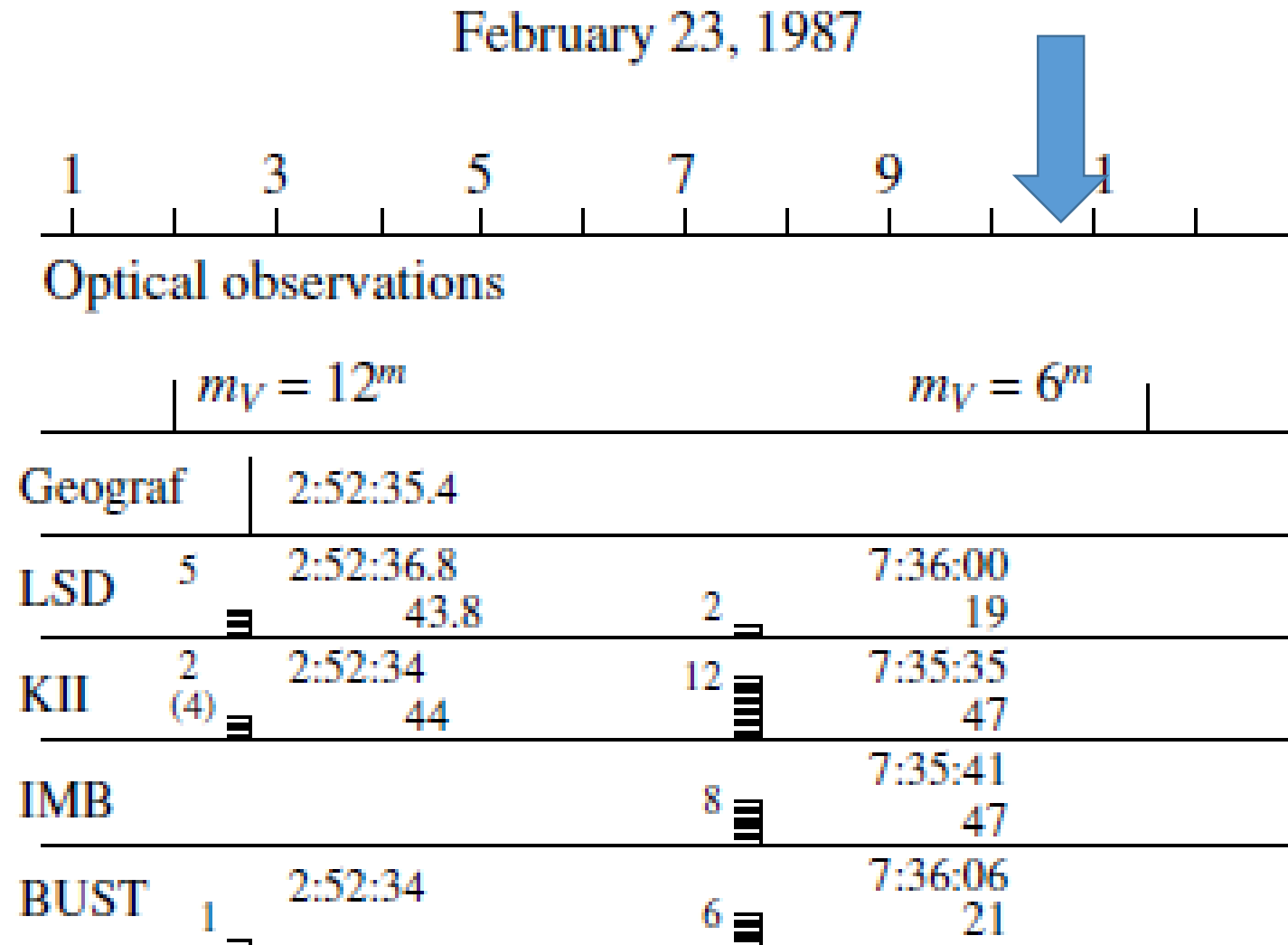
Imshennik V.S., Ryazhskaya O.G., Space Sci Rev, **74**, 325-334 (1995)

Сработавшие детекторы

Detector	Depth of water equivalent, m	Working mass, t Material	Detection threshold, MeV	Detection efficiency		Background pulse frequency m, s^{-1**}
				e^+ spectrum of reaction $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ (19)	e^- spectrum of reaction $\nu_i e^- \rightarrow \nu_i e^-$ (21a, 21c)*	
BUST, USSR	850	130(200) $C_n H_{2n}$	10	0.6	0.15 (0.54)	0.013 (0.033)
		160 Fe				
LSD, USSR–Italy	5200	90 $C_n H_{2n}$	5–7	0.9	0.4 (0.7)	0.01
		200 Fe				
KII, Japan–USA	2700	2140 H_2O	7–14	0.7	0.17 (0.54)	0.022
IMB, USA	1570	5000 H_2O	20–50	0.1	0.02 (0.18)	3.5×10^{-6}

* The detection efficiencies of the electron spectrum produced in the reactions $\nu_{\mu,\tau}(\bar{\nu}_{\mu,\tau}) + e^- \rightarrow \nu_{\mu,\tau}(\bar{\nu}_{\mu,\tau}) + e^-$ (21c) are given in parentheses.

Нейтринный сигнал от вспышки сверхновой звезды SN1987A



Вращающийся коллапсар. УФН, 2006, 176, №10

- Первая стадия коллапса: Деформация при вращении , центральная часть напоминает блин, в центре $T/T_{\text{сф}} \sim 0.01$, энергия нейтрино 25-55 МэВ в реакции

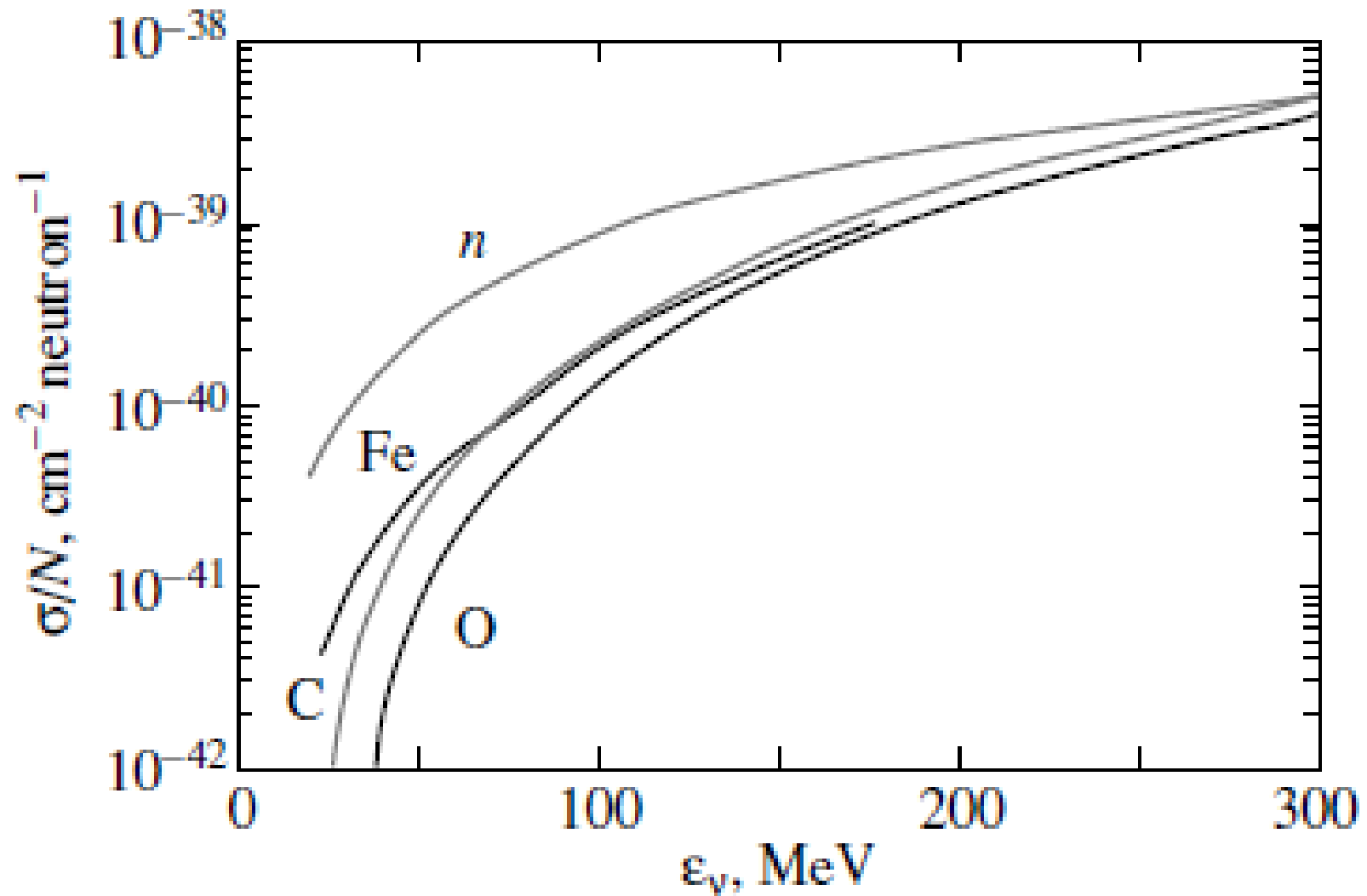
$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$. Эти нейтрино свободно выходят.

Неустойчивость приводит к разрыву ядра на 2 и более нейтронные звезды

- Вторая фаза коллапса: Передача вещества от легкой к тяжелой НЗ продолжается несколько часов.

При массе $0.095 M_{\odot}$ малая звезда взрывается, массивная коллапсирует по модели стандартного центрально-симметричного коллапса.

Comparison of the reduced total cross sections
with the neutrino cross section on a free neutron for the reaction
 $\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1)$ (E.V.Bugaev et al. Nucl.Phys. A324. 350 (1979)).

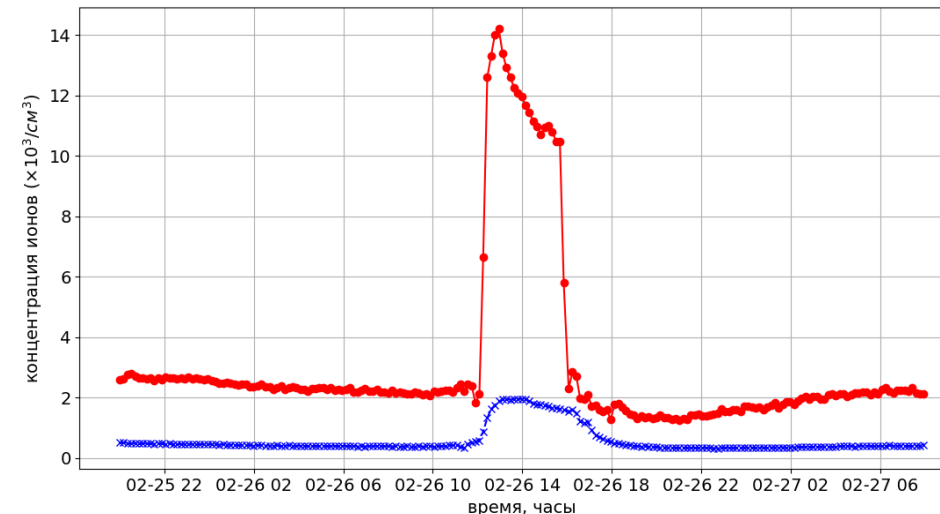
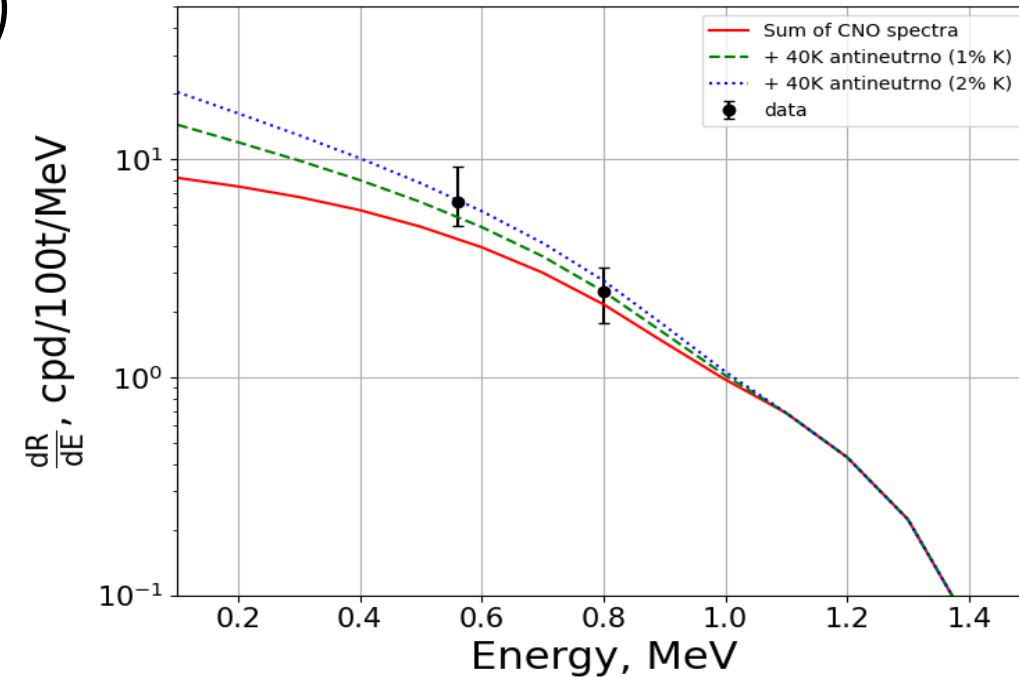


Сверхновая SN1987A. Выводы

- Предложена интерпретация нейтринного сигнала от Сверхновой SN1987A.

Поле положительного заряда в коре Земли (Л.Безруков, В.Синёв и др.)

1. Создана новая модель земного электричества.
2. Предсказано и открыто существование поля положительного заряда в коре Земли.
3. Предсказано, что Borexino увидит избыток событий от CNO- ν по сравнению с предсказанием SSM HZ. Наблюдаемая скорость счёта CNO- ν согласуется с представлением, что Земля содержит $1.5 \pm 1.0\%$ калия от массы Земли и с представлением, что реализуется модель Солнца с высокой металличностью.
4. Наличие избытка положительного заряда в коре Земли связано с наличием избытка CNO- ν подобных событий, т.к. оба предсказания сделаны исходя из одной модели Земли – Богатая водородом Земля.



Дорогие коллеги
Поздравляю Вас с 50ти-летием ИЯИ РАН.
Ваш, Леонид Безруков