

*О. Ю. Смирнов, А. В. Вишнева*

## «Борексино» в 2015 г.

В 2015 г. коллаборацией «Борексино» опубликованы новые результаты по измерению потока геонейтрино [1] и получены новые ограничения на время жизни электрона по отношению к распаду  $e \rightarrow \nu + \gamma$  [2].

Измерение потока геонейтрино произведено на статистике, набранной в течение 2056 сут, в два раза большей по сравнению с использованной в предыдущей публикации. Всего наблюдается 77 антинейтринных кандидатов с ожидаемым отношением вкладов от геонейтрино и европейских реакторов около 1:2 (рис. 1). Фон в антинейтринных измерениях на детекторе «Борексино» от других известных источников пренебрежимо мал и составляет менее одного события за время наблюдения. Оценка наблюдаемого сигнала от геонейтрино производилась с помощью подгонки наблюдаемого спектра спектральными вкладами от геонейтрино (с фиксированным хондитным отношением масс U и Th в Земле  $M(\text{Th})/M(\text{U}) = 3,9$ ), реакторных нейтрино и остаточных фонов. Наблюдаемый сигнал

от геонейтрино составил  $(43,5^{+12,1}_{-10,7})$  TNU (Terrestrial Neutrino Unit) в полном согласии с ожидаемым для большинства геофизических моделей (1 TNU соответствует одному событию в год на  $10^{32}$  протонов мишени). Вероятность отсутствия вклада от геонейтрино в наблюдаемом спектре ничтожно мала и составляет  $3,6 \cdot 10^{-9}$ .

При этом впервые в истории наблюдения геонейтрино с определенной долей вероятности (98% у.д.) можно утверждать, что геонейтринный сигнал имеет ненулевой вклад от мантии. Оценка вклада земной коры составляет  $(23,4 \pm 2,8)$  TNU. Статистическая разность наблюдаемого сигнала и вклада земной коры (т.е. сигнала от мантии) составляет  $(20,9^{+15,1}_{-10,3})$  TNU, соответствующая вероятность ненулевого вклада мантии — 98%.

Вклад радиогенного тепла, рассчитанный для разных моделей, представлен на рис. 2: ось  $x$  — радиогенное тепло, ось  $y$  — наблюдаемый сигнал.

*O. Yu. Smirnov, A. V. Vishneva*

## Borexino in 2015

In 2015 the Borexino collaboration obtained new results on geoneutrino flux [1] and established stringent limits on electron lifetime with respect to the decay mode  $e \rightarrow \nu + \gamma$  [2].

The geoneutrino flux measurement was performed with 2056 days data set, which is twice as large as the statistics used in the previous publication. Seventy-seven antineutrino candidates were observed in total, with the expected ratio of geoneutrinos to neutrinos from the European reactors of about 1:2 (see Fig. 1). Backgrounds from other sources for antineutrino measurement in Borexino are negligible and do not exceed one event for the measurement time. The observed geoneutrino signal is evaluated by fitting the experimental spectrum with the spectral contributions from geoneutrino (with chondritic Th/U mass ratio fixed at  $M(\text{Th})/M(\text{U}) = 3.9$ ), reactor neutrino and residual backgrounds. The observed value of  $(43.5^{+12.1}_{-10.7})$  TNU for the geoneutrino flux is totally

consistent with the expected one for most of geophysical models (1 TNU, Terrestrial Neutrino Unit, corresponds to 1 event per year for  $10^{32}$  protons in target). The probability of the absence of geoneutrino signal is negligible, namely,  $3.6 \cdot 10^{-9}$ .

Moreover, for the first time in the history of geoneutrino observations, the non-zero contribution from the mantle is confirmed at 98% confidence level. Estimated crust contribution to the total signal is  $(23.4 \pm 2.8)$  TNU. The statistical difference between the total observed signal and the crust contribution (i.e., the signal from the mantle) is  $(20.9^{+15.1}_{-10.3})$  TNU, which corresponds to the non-zero contribution from the mantle with 98% probability.

The radiogenic heat contribution calculated for different models is presented in Fig. 2. The radiogenic heat is plotted in the  $x$  axis, and the observed signal is presented in the  $y$  axis. The maximal (red line) and the minimal (blue line) signals correspond to two extreme distributions of

Максимальный (красная линия) и минимальный (синяя линия) сигналы соответствуют двум предельным распределениям радиоактивных элементов в мантии в каждой из моделей: однородному и на границе ядро/мантия. Радиогенный вклад в полное тепло Земли, соответствующий наблюдаемому в «Борексино» сигналу, составляет от 11 до 52 ТВт для 68%-го у.д.

Рис. 1. Спектр антинейтрино, набранный за 2056 сут. Всего наблюдалось 77 кандидатов антинейтрино, из них 1/3 — геонейтрино

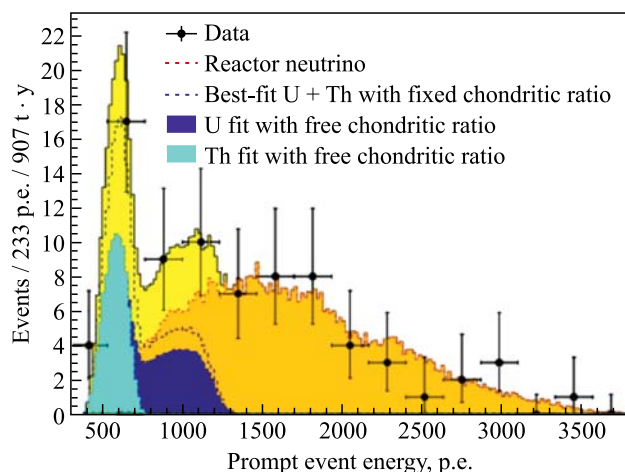


Fig. 1. Antineutrino spectrum in Borexino for 2056 days of the data taking. Seventy-seven antineutrino candidates are observed in total, about 1/3 of which are geoneutrinos

the radioactive elements in the mantle: homogeneous (maximal) and all the heating elements at the crust/mantle boundary (minimal). The radiogenic contribution to the total Earth heat, corresponding to the signal observed in Borexino, could be from 11 to 52 TW at 68% C.L. Coloured areas correspond to three classes of the most popular geophysical models, namely, cosmochemical, geochemical and geodynamical ones. Nowadays the discrimination among these models is still impossible due to the limited precision of the measurement.

The second important result obtained by Borexino in 2015 is the best limit for the electron lifetime with respect to the decay mode with the electric charge conservation violation  $e \rightarrow \nu + \gamma$  [2].

A similar analysis was provided by the collaboration earlier with the data acquired at the 4-tonne prototype of the Borexino. The result has been the best electron lifetime limit for 13 years. As Borexino has a much larger mass and a lower residual background level in comparison with the prototype, a significant improvement of the previous result was expected.

A monoenergetic photon of energy equal to half of the electron mass (256 keV) was considered as an

Заштрихованными областями обозначены три класса наиболее популярных геофизических моделей: космохимические, геохимические и геодинамические. В настоящее время из-за невысокой точности измерения геонейтринного сигнала дискриминация моделей не представляется возможной.

Второй важный результат, полученный в 2015 г. на «Борексино», представляет собой лучшее ограничение на время жизни электрона по отношению к распаду с нарушением электрического заряда  $e \rightarrow \nu + \gamma$  [2].

Ранее подобный анализ проводился коллаборацией на данных, набранных на 4-тонном прототипе детектора «Борексино»; полученный результат оставался наиболее сильным ограничением на время жизни электрона в течение 13 лет. Поскольку детектор «Борексино» обладает значительно большей массой и более низким уровнем остаточной радиоактивности по сравнению с прототипом, ожидалось значительное улучшение предыдущего результата.

В качестве сигнала от распада электрона рассматривался моноэнергетический фотон с энергией 256 кэВ (половина массы электрона). Промоделированный методом Монте-Карло сигнал был включен в общую подгоночную функцию. Подгонка экспериментально-го спектра производилась при различных значениях

Рис. 2. Вклад радиогенного тепла, рассчитанный для разных моделей Земли

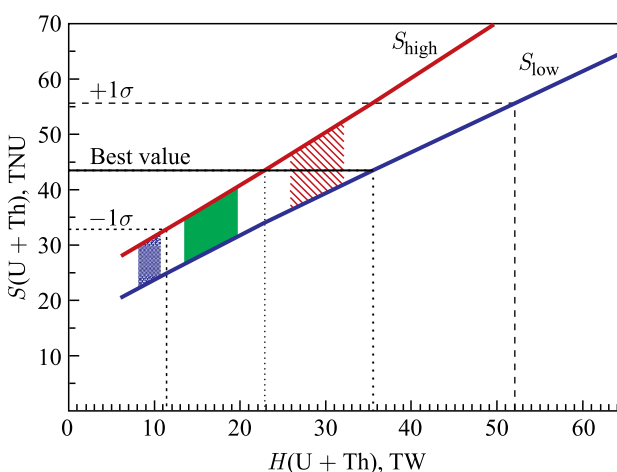


Fig. 2. Radiogenic heat calculated for different Earth models

electron decay signal. The expected signal was modeled with the Monte Carlo method and included in the total fitting function. Fitting of the experimental spectrum was performed at various event rates of the hypothetical decay. Analysis of the obtained chi-square profile with accounting for possible systematic errors gives a limit on the event rate of 1.23 events per day per 100 t of the scintillator

скорости счета для искомого процесса. Анализ полученного профиля  $\chi^2$  с учетом возможных систематических ошибок дает ограничение на скорость счета на уровне 1,23 события в сутки на 100 т сцинтиллятора для 90%-го у.д., что соответствует нижнему пределу на время жизни электрона  $\tau \geq 6,6 \cdot 10^{28}$  лет и на два порядка превышает предыдущий результат для данной моды распада.

Пример спектральной подгонки представлен на рис.3. Здесь скорость счета моноэнергетического фотона зафиксирована при значении, соответствующем предельному для 90%-го у.д., положение пика от  $\gamma$ -кванта с энергией 256 кэВ отмечено стрелкой.

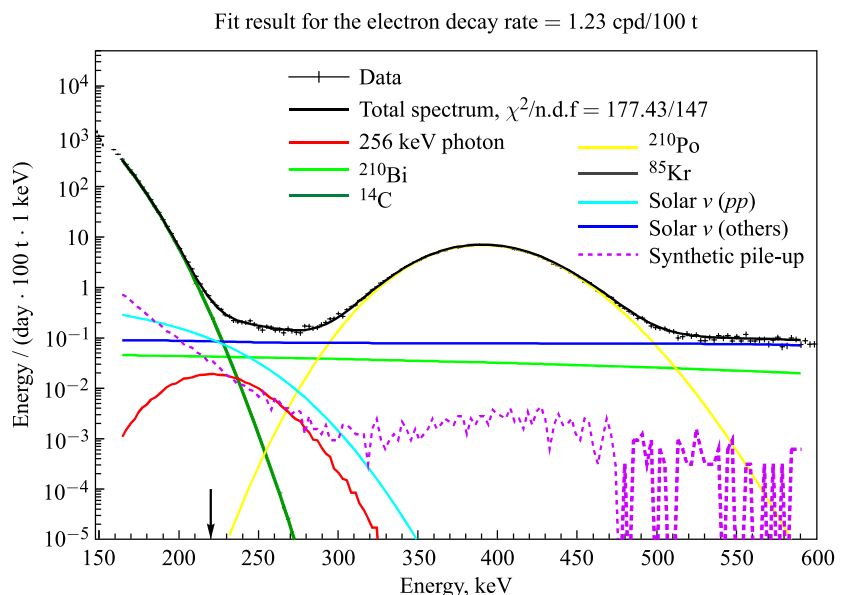
Ученые ЛЯП принимали активное участие в анализе данных для обеих публикаций и внесли решающий вклад в получение результата. Результаты

докладывались на международных конференциях в 2015 г. [3, 4].

В ближайших планах коллаборации — попытка измерения (или ограничения) потока нейтрино из углеродно-азотного цикла (или CNO-цикла) в Солнце. Данное измерение представляет первостепенный интерес в современной физике Солнца в связи с так называемой проблемой металличности Солнца (или его химического состава), которая на сегодня может быть решена только путем измерения потока нейтрино из углеродно-азотного цикла. В 2015 г. с целью реализации измерения потока CNO-нейтрино осуществлена термоизоляция детектора. Она должна предотвратить перемешивание сцинтиллятора за счет конвекции, при этом появится возможность выделить скорость счета  $^{210}\text{Bi}$ , находящегося в вековом равновесии с  $^{210}\text{Po}$ . Измерение скорости счета  $^{210}\text{Bi}$  является существен-

Рис. 3. Спектральная подгонка для данных «Борексино»

Fig. 3. Spectral fit of Borexino data



for 90% C.L., which corresponds to the lower limit on the electron lifetime of  $\tau \geq 6.6 \cdot 10^{28}$  y and improves the previous result for this decay mode by two orders of magnitude.

An example of the spectral fit is presented in Fig. 3. Here the event rate of the monoenergetic photon is fixed at the value corresponding to 90% C.L., the arrow points at the position of the 256 keV gamma peak.

DLNP scientists actively participated in the data analysis for both publications. The results were reported at international conferences in 2015 [3, 4].

The near future plans of the collaboration include an attempt to measure (or constrain) the flux of neutrinos from the CNO cycle in the Sun. This measurement is of the primary interest in modern solar physics in view of

the so-called solar metallicity problem (or the problem of solar chemical composition) which can be solved only by measuring the flux of the CNO neutrinos. In view of the measurement, the thermal isolation of the Borexino tank was undertaken this year with a purpose of stopping the transfer of the residual  $^{210}\text{Bi}$  into the central core of the detector due to the convection movement, allowing the separation of the fraction of  $^{210}\text{Bi}$  rate in secular equilibrium with  $^{210}\text{Po}$ . The measurement of the  $^{210}\text{Bi}$  rate is an essential part of the CNO-neutrino analysis, as the spectral shape of  $^{210}\text{Bi}$  is very similar to those expected from the CNO neutrino.

Combined analysis of the first and the second phases of the experiment is envisaged in order to improve the accuracy of measurement of the most intense neutrino

ной частью спектрального анализа, так как форма  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  практически неотличима от спектральной формы сигнала, ожидаемого от CNO-нейтрино.

Предусмотрен совместный анализ данных первой и второй фаз эксперимента с целью улучшения точности измерения наиболее интенсивных потоков нейтрино из  $pp$ -цепочки реакций на Солнце ( $pp$  и  $^7\text{Be}$ ). Запланирована работа по уточнению ограничения на эффективный магнитный момент солнечных нейтрино, ожидается улучшение предела в два раза, что соответствует значению, достигнутому в наиболее чувствительном реакторном эксперименте с германиевыми детекторами GEMMA.

В 2016 г. запланированы измерения с искусственным источником антинейтрино в рамках проекта SOX с целью поиска активно обсуждаемых в последнее время стерильных нейтрино. Если стерильные нейтрино существуют, то они должны проявить себя в этом эксперименте, создавая характерный осцилляционный «узор» — периодические изменения плотности регистрируемых событий.

fluxes from the proton–proton chain in the Sun ( $pp$  and  $^7\text{Be}$ ). There are also plans for improvement of the limit on the effective neutrino magnetic moment; we expect the improvement by a factor of two achieving the sensitivity comparable to the GEMMA experiment, the most sensitive reactor experiment with germanium detectors.

In 2016 the measurements with an artificial antineutrino source are planned within the framework of the SOX project. The aim of the measurement is the search for sterile neutrinos actively discussed by physicists in the last years. If sterile neutrinos exist they will be detected by searching for a specific oscillation pattern with periodical changes of events density.

### References

1. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. Spectroscopy of Geoneutrinos from 2056 Days of Borexino Data // *Phys. Rev. D*. 2015. V.92. P.031101.
2. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. A Test of Electric Charge Conservation with Borexino. arXiv:1509.01223 [hep-ex]; *Phys. Rev. Lett.* (submitted).

### Список литературы

1. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. Spectroscopy of Geoneutrinos from 2056 Days of Borexino Data // *Phys. Rev. D*. 2015. V.92. P.031101.
2. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. A Test of Electric Charge Conservation with Borexino. arXiv:1509.01223 [hep-ex]; *Phys. Rev. Lett.* (submitted).
3. *Smirnov O. on behalf of the Borexino Collab.* Borexino. New Geoneutrino Results // *Neutrino GeoScience-2015*, 15–17 June 2015, Paris, France.
4. *Vishneva A. on behalf of the Borexino Collab.* Test of the Electric Charge Conservation Law with Borexino Detector // *The Intern. Conf. on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015)*, 5–10 Oct. 2015, Moscow, Russia.

3. *Smirnov O. on behalf of the Borexino Collab.* Borexino. New Geoneutrino Results // *Neutrino GeoScience-2015*, 15–17 June 2015, Paris, France.

4. *Vishneva A. on behalf of the Borexino Collab.* Test of the Electric Charge Conservation Law with Borexino Detector // *The Intern. Conf. on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015)*, 5–10 Oct. 2015, Moscow, Russia.

7-я Международная конференция «Распределенные вычисления и грид-технологии в науке и образовании», посвященная 60-летию ОИЯИ	4–9 июля, Дубна
Гельмгольцевская международная летняя школа «Квантовая физика предельных состояний: от сильных полей до тяжелых кварков»	18–30 июля, Дубна
Международная школа «Перспективные методы современной теоретической физики: интегрируемые и стохастические системы»	31 июля – 6 августа, Дубна
Совещание коллаборации NA-62	22–27 августа, Дубна
Гельмгольцевская международная летняя школа «Космология, струны и новая физика»	28 августа – 10 сентября, Дубна
120-я сессия Ученого совета ОИЯИ	Сентябрь, Дубна
8-й Международный симпозиум по экзотическим ядрам (EXON-2016)	4–10 сентября, Казань, Россия
Третий этап международной практики для студентов из ЮАР, Сербии, Белоруссии, Кубы	4–25 сентября, Дубна
Международное совещание «Ускорительный комплекс NICA: проблемы и решения»	10–17 сентября, Созополь, Болгария
Международное совещание «Классические и квантовые интегрируемые системы и суперсимметрия»	19–24 сентября, Тяньцзинь, Китай
23-й Балдинский международный семинар по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика», посвященный 90-летию со дня рождения академика А. М. Балдина	19–24 сентября, Дубна
72-е заседание Совета Отделения ядерной физики Европейского физического общества, посвященное 60-летию ОИЯИ	28–30 сентября, Дубна

---

The 7th international conference “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education” dedicated to the 60th anniversary of JINR	4–9 July, Dubna
Helmholtz international summer school “Quantum Field Theory at the Limits: From Strong Fields to Heavy Quarks”	18–30 July, Dubna
International school “Advanced Methods of Modern Theoretical Physics: Integrable and Stochastic Systems”	31 July – 6 August, Dubna
NA62 Collaboration Meeting	22–27 August, Dubna
Helmholtz international summer school “Cosmology, Strings and New Physics”	28 August – 10 September, Dubna
The 120th session of the JINR Scientific Council	September, Dubna
The 8th International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2016)	4–10 September, Kazan, Russia
Third stage of the International Student Practice for students from RSA, Serbia, Belarus and Cuba	4–25 September, Dubna
International workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions”	10–17 September, Sozopol, Bulgaria
International workshop “Classical and Quantum Integrable Systems and Supersymmetry”	19–24 September, Tianjin, China
23rd Baldin International Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics” (Baldin ISHEPP-23), dedicated to the 90th anniversary of Academician Baldin’s birthday	19–24 September, Dubna
The 72nd Nuclear Physics Division Board Meeting of the European Physical Society, dedicated to the 60th anniversary of JINR	28–30 September, Dubna