

*О. Ю. Смирнов*

## Измерение потока нейтрино из протон-протонной реакции на Солнце на детекторе «Борексино»

Цепочка ядерных превращений, начинающаяся с протон-протонной ( $pp$ ) реакции (рис. 1), является главным источником солнечной энергии. Углеродно-азотный цикл (CN) дает намного меньший вклад в полную солнечную энергию. Нейтрино из  $pp$ -реакции до настоящего времени наблюдались только в низкопороговых радиохимических экспериментах на основе галлия — SAGE в СССР/РФ и Gallex/GNO в Италии. Сигнал от  $pp$ -нейтрино в радиохимических экспериментах может быть выделен из полного измеренного потока лишь с привлечением данных других экспериментов.

Коллаборация «Борексино» объявила о первом прямом наблюдении нейтрино из первичной  $pp$ -реакции [1] в области энергий солнечных нейтри-

но, прежде недоступных в режиме реального времени. Это первый физический результат, полученный во второй фазе эксперимента. Скорость счета взаимодействий, вызванных  $pp$ -нейтрино, составила  $(144 \pm 13 \text{ (стат.)} \pm 10 \text{ (сист.)}) \text{ соб./}(\text{сут} \cdot 100 \text{ т})$ . Статистическая значимость ненулевого сигнала от  $pp$ -нейтрино очень велика, вероятность отсутствия нейтрино от  $pp$ -реакции исключается на уровне  $10\sigma$ . Если принять во внимание осцилляции нейтрино с современными значениями параметров осцилляций, соответствующий поток солнечных  $pp$ -нейтрино составит  $(6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Это значение находится в хорошем согласии с предсказаниями стандартной модели Солнца, поток  $pp$ -нейтрино в ней составляет  $5,98 \cdot (1 \pm 0,006) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*О. Yu. Smirnov*

## Detection of Solar Neutrinos from $pp$ Reaction in Borexino Experiment

The proton–proton ( $pp$ ) reactions chain (Fig. 1) is the main source of power in the Sun. The carbon–nitrogen (CN) cycle contributes only for a small fraction of the total power. Neutrinos from the  $pp$  reaction have been observed till now only in low-threshold gallium-based radiochemical experiments, SAGE in the USSR/Russia and Gallex/GNO in Italy. In radiochemical experiments the signal from  $pp$  neutrino can be deduced from the total measured flux only if the data of other experiments are used.

Borexino collaboration has reported the first observation of solar neutrinos from the primary  $pp$  reaction [1] by exploring the solar neutrino energy region that has never been studied before in real-time mode. This is the first result obtained in the second phase of the experiment. The rate of

solar neutrino interactions from  $pp$  chain is measured to be  $(144 \pm 13 \text{ (stat.)} \pm 10 \text{ (syst.)}) \text{ counts}/(\text{day} \cdot 100 \text{ t})$ . The statistical significance of the non-zero  $pp$  signal is very high; the absence of the neutrino from  $pp$  reaction is excluded at  $10\sigma$  level. Taking into account the values of the neutrino oscillation parameters, the measured solar  $pp$  neutrino flux is  $(6.6 \pm 0.7) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . This value is in good agreement with the SSM prediction of  $5.98 \cdot (1 \pm 0.006) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

The probability that  $pp$  neutrinos produced in the core of the Sun are not transformed into muon or tau neutrinos by the neutrino oscillation mechanism is found to be  $P_{ee} = 0.64 \pm 0.12$ , providing a constraint on the Mikheyev–Smirnov–Wolfenstein large-mixing angle (MSW-LMA) solution in the low-energy vacuum regime.

Рассчитанная на основе измерения сигнала от  $pp$ -нейтрино вероятность выживания электронных нейтрино на пути от ядра Солнца к Земле составляет  $P_{\nu_{ee}} = 0,64 \pm 0,12$  и позволяет ограничить параметры для сценария осцилляций в модели Михеева–Смирнова–Вольфенштейна с большими углами смешивания (MSW-LMA) в режиме вакуумных осцилляций.

Возможность измерения потока солнечных нейтрино из  $pp$ -реакции с помощью большого детектора на основе жидкого органического сцинтиллятора впервые обсуждалась в статьях [2, 3]. В этих работах была показана принципиальная возможность подобного измерения на детекторе с высоким энергетическим разрешением (порядка 10 кэВ ( $1\sigma$ ) при энерговыделении 200 кэВ) при условии достижения радиоактивной чистоты сцинтиллятора на уровне требований, предъявляемых к детектору «Борексину».

«Борексину» — жидкосцинтилляционный детектор большого объема, установленный в подземной лаборатории Гран-Сассо в центральной Италии с целью изучения низкоэнергетических солнечных нейтрино, набирает данные с мая 2007 г. На «Борексину» достигнута рекордная чувствительность, позволившая подтвердить существование потока  $pp$ -нейтрино. Измерение стало возможным благодаря исключительно низкому

The possibility of the  $pp$ -neutrino measurement in a large-volume liquid scintillator (LS) detector was first discussed in [2, 3]. It has been shown that a large-volume liquid organic scintillator detector with an energy resolution of 10 keV at 200 keV ( $1\sigma$ ) will be sensitive to solar  $pp$  neutrinos, if operated at the target radiopurity levels for the Borexino detector.

Borexino, a large-volume liquid scintillator detector, installed at the underground Gran Sasso laboratory with an aim of the low-energy solar neutrino fluxes measurement, has been taking data since May 2007. Borexino achieved the necessary sensitivity to provide the direct evidence of the rare signal from  $pp$  neutrinos. This has been made possible by the combination of the extremely low levels of intrinsic background in Borexino, and the implementation of novel analysis techniques. This result is a step toward the prospect for measurements of CNO neutrino interaction rates, which is believed to be the crucial point for the solar metallicity problem.

The result was obtained with a spectral fit to the experimental data, as shown in Fig. 2. All known background components, contributing in the region of interest, were considered in the fit. These are decays of  $^{14}\text{C}$  naturally present

уровню внутреннего фона в «Борексину», а также хорошему энергетическому разрешению детектора. Данный результат является шагом на пути к измерению потока нейтрино из CNO-цикла, который является ключевым для разрешения загадки распространенности элементов на Солнце (солнечной металличности).

Результат получен с помощью спектральной подгонки данных модельной функцией, как это показано на рис. 2. Все известные вклады в спектр фоновых событий, присутствующие в изучаемой области энергий, были включены в используемую модель: распады  $^{14}\text{C}$ , естественно присутствующего в органике,  $\beta$ -распады  $^{85}\text{Kr}$  и  $^{210}\text{Bi}$ , а также  $\alpha$ -распады моноэнергетического  $^{210}\text{Po}$ . Спектральный вклад от солнечных нейтрино из реакции на  $^7\text{Be}$  представляет собой фон при измерении

Рис. 1. Реакции из протон-протонной цепи реакций на Солнце. Во время первой фазы эксперимента были измерены потоки нейтрино из реакций  $^7\text{Be}$  и  $^8\text{B}$ , а также нейтрино из реакции  $pp$ , являющейся альтернативным началом цепочки с вероятностью 0,24%

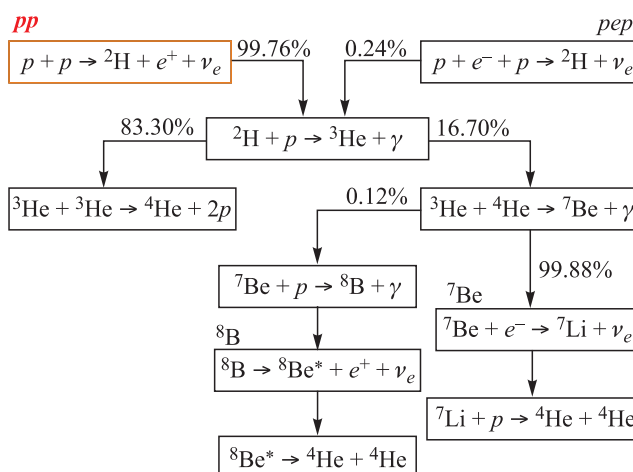


Fig. 1. Reactions in the  $pp$ -neutrino chain. During the first phase of the experiment, Borexino has already provided the real-time measurement of neutrinos from  $^7\text{Be}$  and  $^8\text{B}$  reactions and the measurement of the alternative start of the  $pp$  chain, the  $pep$  reaction giving a start to the chain in 0.24% cases

in organic matter, residual  $\beta$  decays of  $^{85}\text{Kr}$  and  $^{210}\text{Bi}$ , and  $\alpha$  decays of monoenergetic  $^{210}\text{Po}$ . The signal from  $^7\text{Be}$  represents a background to the measurement; its contribution was constrained at the high precision value found in devoted analysis [4]. Because of the relatively high  $^{14}\text{C}$  rate, the signals of pile-up were considered very carefully. A method for the pile-up construction from the data samples was developed, providing a robust estimation of the pile-up signals shape and intensity.  $^{14}\text{C}$  rate was defined in an independent measurement using events with low software-defined

Рис. 2. Подгонка экспериментального спектра «Борексина» модельной функцией. Все результаты подгонки, кроме скорости счета событий от распадов  $^{14}\text{C}$ , указаны в единицах соб./100 т/сут. Счет событий  $^{14}\text{C}$  указан в Бк/100 т

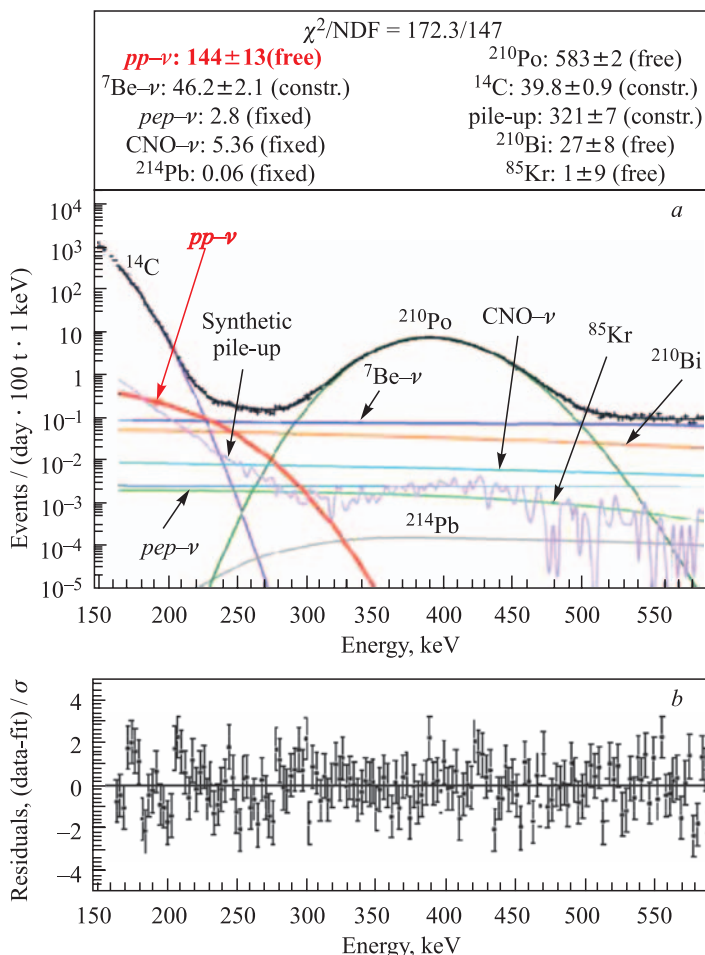


Fig. 2. Experimental Borexino spectrum fit with model functions. All results are given in counts/100 t/day with the exception of  $^{14}\text{C}$  count, given in Bq/100 t

threshold, arriving with a delay with respect to main events that acquired higher hardware-defined threshold. The estimated rate of 40 Bq/100 t of scintillator corresponds to the isotopic abundance of  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  of  $2.7 \cdot 10^{-18}$  g/g. All the other contributions from the remaining solar neutrinos do not influence the result and were fixed at the values predicted by the standard solar model, taking into account the oscillations effects. A high-precision analytical model for the energy scale, detector resolution and detector response shape was developed and verified against the Monte Carlo data. The results of the spectral fit are shown in Fig. 2.

Together with the previous measurements of the  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$  and  $pep$ -neutrino flux by Borexino, the measurement of the  $pp$ -neutrino flux provides a test of the electron neutrino

potок  $pp$ -нейтрино, он был определен при предыдущем анализе данных в другом энергетическом диапазоне с целью определения потока этих нейтрино [4]. Вследствие сравнительно высокого счета событий от распадов  $^{14}\text{C}$  особое внимание было уделено событиям, возникающим при случайном наложении сигналов. Был разработан метод построения спектра сигналов наложения с использованием реальных данных детектора, обеспечивающий надежную оценку формы и счета сигналов наложения. Скорость счета событий  $^{14}\text{C}$  определялась независимо по спектру событий с низким программным порогом. Это события, прибывающие с задержкой по отношению к основным событиям, для которых более высокий порог выбран для подавления случайных событий и определяется электроникой триггера. Полученная в этом измерении скорость счета 40 Бк/100 т сцинтиллятора соответствует изотопному содержанию  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 2,7 \cdot 10^{-18}$  г/г. Все остальные вклады от солнечных нейтрино не влияют существенно на результат и были фиксированы на значениях, предсказываемых стандартной моделью Солнца с учетом эффекта осцилляций. Была разработана высокоточная ана-

survival probability on its way from the Sun. The Borexino contributions to the measurements of the electron neutrino survival probability  $P_{\nu_{ee}}$  are summarized in Fig. 3.

Most solar-neutrino analyses assume that the modern total flux of neutrinos is consistent with the solar luminosity. The neutrino flux corresponds to the energy generation in the solar core at the time of measurement, while the values obtained on the basis of luminosity corresponds to energy released a long time ago. As photons take about 100,000 years to diffuse out of the core, this connection would not hold if the temperature of the solar core varies on time scale less than 100,000 years. Because the solar luminosity has been measured to a precision of 0.01%, checks on this relationship are limited by neutrino-flux uncertainties. The Borexino results constrain not only solar variability at the level of 10% in 100,000 years, but also certain new-physics phenomena, such as solar emission of undetected “sterile” neutrinos. The uncertainty of  $pp$  neutrino-flux measurement could be reduced to 1% in a devoted experiment.

Results are obtained with an active participation of DNLР scientists, taking part in the experiment starting

литическая модель для описания энергетической шкалы детектора, его разрешения, а также формы отклика детектора. Функция отклика проверялась на большой статистике данных, полученных методом Монте-Карло. Результаты спектральной подгонки показаны на рис. 2.

Вместе с предыдущими измерениями солнечных нейтрино из реакций  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$  и  $pp$  на «Борексино» данное измерение предоставляет возможность определения вероятности выживания электронных нейтрино на их пути от ядра Солнца к Земле. Вклад «Борексино» в измерение вероятности выживания солнечных электронных нейтрино показан на рис. 3.

Большинство солнечных моделей предполагает, что современный поток солнечных нейтрино находится в согласии с солнечной светимостью. Нейтринный поток соответствует энергии, генерируемой в ядре Солнца в момент измерения потока, в то время как значение, рассчитываемое на основе солнечной светимости, соответствует энергии, выделившейся много лет назад. Так как фотоны, выделившиеся в ядре, достигают поверхности Солнца за время порядка 100 000 лет, данное равенство может быть нарушено, если температура солнечного

ядра меняется на шкале времени меньше 100 000 лет. Так как солнечная светимость измерена с точностью 0,01 %, проверка стабильности энерговыделения Солнца ограничена только возможностями «солнечных» экспериментов. Результат «Борексино» ограничивает нестабильность Солнца на уровне 10 % на временной шкале 100 000 лет, а также позволяет ограничить некоторые физические явления, включая излучение нерегистрируемых стерильных нейтрино. Неопределенность измерения потока  $pp$ -нейтрино может быть уменьшена до 1 % в специально сконструированном детекторе.

Результаты получены при активном участии группы ученых из Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, участвующих в эксперименте с момента разработки проекта. В составе международной коллаборации «Борексино» также научно-исследовательские институты из Италии, США, Германии, России, Польши и Франции. С российской стороны в коллаборации, помимо ОИЯИ, участвуют ученые НИЦ «Курчатовский институт», Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, а также НИЯУ «Московский инженерно-физический институт».

Рис. 3. Вероятность выживания электронных нейтрино  $P_{\nu_{ee}}$ , измеренная на детекторе «Борексино»

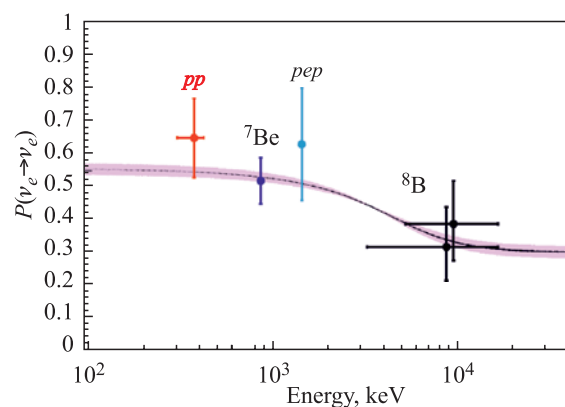


Fig. 3. Electron neutrino survival probability  $P_{\nu_{ee}}$  as measured by the Borexino experiment

from the initial stage of the project. The Borexino international collaboration unites research institutions from Italy, USA, Germany, Russia, Poland and France. From the Russian side, the physicists from NRC “Kurchatov Institute”, Konstantinov PNPI, Skobeltsyn INP MSU, and the National Nuclear Research University MEPhI are taking part in the experiment.

#### Список литературы / References

1. Bellini G. et al. (Borexino Collab.). Neutrinos from the Primary Proton-Proton Fusion Process in the Sun // Nature. 2014. V. 512. P. 383.
2. Derbin A. V., Smirnov O. Yu., Zaimidoroga O. A. Search for Solar  $pp$  Neutrinos with an Upgrade of CTF Detector // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66, No. 4. P. 712–723.
3. Derbin A. V., Smirnov O. Yu., Zaimidoroga O. A. On the Possibility of Detecting Solar  $pp$  Neutrino with the Large-Volume Liquid Organic Scintillator Detector // Phys. At. Nucl. 2004. V. 67, No. 11. P. 2066–2072.
4. Bellini G. et al. (Borexino Collab.). Precision Measurement of the  ${}^7\text{Be}$  Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 141302.