

*О. Ю. Смирнов*

## Измерение длительности астрономического года в эксперименте Borexino в 2017 г.

В 2017 г. коллаборацией Borexino опубликованы результаты анализа временных вариаций потока бериллиевых нейтрино. Период вариаций соответствует астрономическому году, при этом амплитуда и фаза вариаций находятся в согласии с ожидаемыми за счет эксцентриситета орбиты Земли [1], что подтверждает солнечное происхождение сигнала. Другие статистически значимые периодичности сигнала не выявлены. Полученное подгоночное значение периода изменения сигнала  $T = (367 \pm 10)$  сут можно рассматривать как первое измерение длительности астрономического года с помощью солнечных нейтрино.

Из анализа отклонения формы спектра электронов отдачи от предсказываемого Стандартной моделью получены лучшие на сегодня ограничения на эффективный магнитный момент солнечных нейтрино

$\mu_{\nu}^{\text{eff}} < 2,8 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (для 90%-го уровня достоверности) [2], что можно сравнить с пределом  $\mu_{\nu}^{\text{eff}} < 2,9 \times 10^{-11} \mu_B$  (для 90%-го уровня достоверности), полученным в наиболее чувствительном реакторном эксперименте с германиевыми детекторами GEMMA. Данный предел не содержит ошибок, связанных с предсказаниями моделей Солнца или с неопределенностью массы сцинтиллятора, и получен с использованием результатов радиохимических (галлиевых) экспериментов для ограничения суммы сигналов от солнечных нейтрино. Предел на эффективный момент солнечных нейтрино позволил получить ограничения на магнитные моменты отдельных ароматовых состояний, а также на элементы матрицы магнитных моментов для дираковских и майорановских нейтрино.

*O. Yu. Smirnov*

## Measurement of the Length of the Astronomical Year in the Borexino Experiment in 2017

In 2017 the results of the time variation studies of the beryllium neutrino flux were published. The period of variations corresponds to one year, and the phase and amplitude of the variations are in agreement with the expectation due to the eccentricity of the Earth's orbit [1], confirming the solar origin of the signal. Other statistically significant periodicities are not observed in the data. The best fit value for the period of the signal variation of  $T = (367 \pm 10)$  d could be considered as the first measurement of the astronomic year length with solar neutrinos.

A new model-independent limit on the effective moment of the solar neutrino  $\mu_{\nu}^{\text{eff}} < 2.8 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (at 90% C.L.) [2] has been obtained from the analysis of

the allowed deviations of the electron recoil spectra from those predicted by the Standard Model. This could be compared to the best direct limit on the magnetic moment of electron antineutrino  $\mu_{\nu}^{\text{eff}} < 2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (at 90% C.L.) obtained using Ge detectors in the most sensitive reactor experiment GEMMA. The limit is free from uncertainties associated with predictions from the SSM neutrino flux and systematics from the detector's FV, and is obtained by constraining the sum of the solar neutrino fluxes using the results from radiochemical (gallium) experiments. The limit on the effective neutrino moment for solar neutrinos was used to set new limits on the magnetic moments for the neutrino flavor states and for the elements of the neu-

В рамках современного «многоканального» подхода к астрофизическим событиям выполнен поиск нейтрино в совпадении с гравитационными всплесками (события GW150914, GW151226 и GW170104) [3] и 2350 всплесками гамма-активности, наблюдавшимися во время 8-летнего периода набора данных в эксперименте Borexino [4]. Статистически значимые превышения сигнала над ожидаемым фоном не наблюдались, что позволило установить пределы на интегральный поток низкоэнергетичных нейтрино и антинейтрино, связанных с данными событиями. В качестве примера на рис. 1 приведены ограничения, полученные для интегральных потоков антинейтрино в совпадении с гамма-всплесками.

В 2017 г. коллаборацией завершена объемная работа по точной калибровке энергетической шкалы детектора и настройке метода аналитической подгонки на модельных данных [5]. Готовятся к публикации результаты спектральной подгонки эксперименталь-

Рис. 1. Ограничения на интегральный антинейтринный сигнал в совпадении с гамма-всплесками. Предел Borexino при малых энергиях на порядок и более превышает пределы, полученные на других установках, несмотря на меньшую массу детектора. При более высоких энергиях преимущество Borexino по фону становится несущественным, значит, пределы Borexino уступают более массивному детектору SuperKamiokande

Fig. 1. The limits on the fluence of the low-energy antineutrino associated with GRBs. Due to the lower background the limit of Borexino at low energies is an order of magnitude stronger compared to other detectors, despite its lower mass. At higher energies the advantage of Borexino in low background is not so important, and the limits are naturally weaker compared to more massive SuperKamiokande

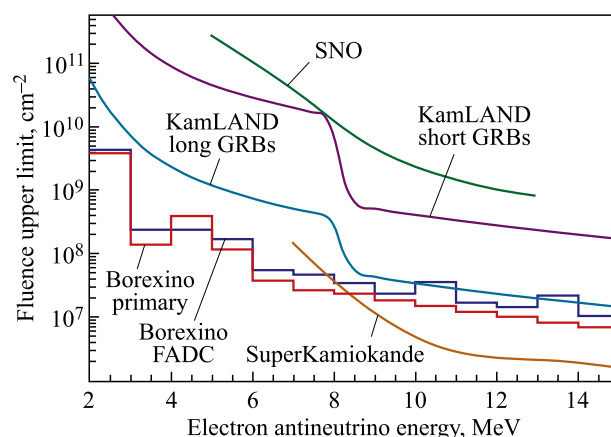
trino magnetic moments matrix for Dirac and Majorana neutrinos.

In the framework of the modern multi-messenger approach to the astrophysical events, the search has been performed for the neutrino and antineutrino in coincidence with gravitational wave events (events GW150914, GW151226 and GW170104) [3] and with 2350 gamma-ray bursts (GRB) that occurred during 8 years of the Borexino data taking [4]. No statistically significant excess of the event above the background has been observed, and the limits have been obtained on the fluence of the low-energy neutrino and antineutrino associated with these events. As an example in Fig. 1 the obtained limits on the fluence of antineutrino in coincidence with GRBs are presented.

In 2017 the Borexino collaboration continued its work on the processing of the collected data. Ample work on improvement of the energy scale description has been finished and tested with the data generated using Monte Carlo

ных данных, впервые проведенной одновременно для нейтринных сигналов от трех разных реакций на Солнце, а именно для  $pp$ -,  $pep$ - и бериллиевых нейтрино. Подгонка осуществляется в широком энергетическом диапазоне от порога 180 кэВ до 3 МэВ. Ранее для минимизации влияния нелинейности энергетической шкалы на результат анализ проводился в более узких энергетических окнах, подобранных для  $pp$ -,  $pep$ - и бериллиевых нейтрино по отдельности. С использованием нового подхода точность определения потоков солнечных нейтрино будет улучшена практически в два раза по сравнению с более ранними публикациями.

Отдельно проводится анализ высокоэнергетической части спектра (с порогами 1,65 и 3 МэВ) с целью более точного определения потока борных нейтрино, а также проверки поведения кривой вероятности выживания электронных нейтрино при малых энергиях. Точность определения потока борных нейтрино достигнет 10% для данных, набранных в течение



method [5]. Results of the spectral fit of the experimental data are being prepared for publication; for the first time a spectral fit is performed simultaneously involving neutrino signal from three different nuclear reactions under the Sun, namely, from  $pp$ ,  $pep$  and beryllium neutrinos, in a wide energy region from 180 keV up to 3 MeV. In earlier analysis the fitting procedure was applied in narrow energy windows selected individually for each of the reactions under consideration. Using the new approach, the precision of neutrino fluxes measurement will improve by a factor of 2.

A dedicated analysis is performed for the high-energy part of the spectrum, with 1.65 and 3 MeV thresholds, to better extract the boron solar neutrinos and to check the behavior of the electron neutrino survival probability curve for boron neutrinos at lower energies. The expected precision of the boron neutrino flux measurement is 10% for the data collected in the last 10 years. The preliminary results show that the electron neutrino survival probability



Рис. 2. Подготовка к измерению потоков нейтрино из CNO-цикла: термоизоляция детектора Borexino достигает уровня 14 м. В настоящее время термоизоляция установки завершена полностью

Fig. 2. Toward the CNO-neutrino flux measurement: thermoinsulation of the Borexino detector is at the 14 m level. At present, the thermoinsulation is completed

in the transition region of the MSW/LMA scenario is in agreement with the model and does not support the indications of the “turn-down” of the survival probability curve coming from SuperKamiokande experiment.

The Borexino data on solar neutrino fluxes have better, but with weak statistical significance, agreement with high-metallicity (high- $Z$ ) variant of the Standard Solar Model. Therefore, at present the problem of the chemical composition of the Sun (or its metallicity problem) still does not have unique solution. In the near future the collaboration is planning to measure (or constrain) neutrino flux from the carbon–nitrogen cycle (CNO cycle) in the Sun. The measurement of the flux with moderate precision is believed to be a clue to the solution of the Sun chemical composition problem, as the predictions of the CNO-neutrino flux significantly differs for solar models

with different metallicities, of up to 30–40%. Earlier, in view of this measurement, the thermal insulation of the Borexino detector was undertaken (see Fig. 2) 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 its parent  $^{210}\text{Po}$ . Irregularities of the  $^{210}\text{Po}$  counting rate changes, observed during both campaigns of the data taking, do not allow extraction of its support level due to the presence of the parent  $^{210}\text{Bi}$ . The bounding of the  $^{210}\text{Bi}$  rate is an essential part of the CNO-neutrino analysis, as the spectral shape of  $^{210}\text{Bi}$   $\beta$ -decay is very similar to those expected from the recoil electrons for CNO neutrino. At present, we observe the stabilization of the  $^{210}\text{Po}$  count, this gives us a hope for a positive result of the CNO-neutrino flux measurement.

10 лет. Предварительный анализ показывает, что вероятность выживания электронных нейтрино в переходной области MSW/LMA согласуется с моделью и не подтверждает имеющиеся в данных детектора SuperKamiokande указания на уменьшение вероятности выживания в переходной области.

Данные Borexino по солнечным нейтрино имеют лучшее, но статистически слабо значимое согласие с вариантом Стандартной модели Солнца с высокой металличностью. Таким образом, проблема химического состава Солнца (или солнечной металличности) на сегодня не имеет однозначного решения. В ближайших планах коллаборации остается измерение (или ограничение) потока нейтрино из углеродно-азотного цикла (CNO-цикла) в Солнце. Измерение данного потока с умеренной точностью считается ключом к решению проблемы химического состава Солнца, так как для солнечных моделей с разной металличностью предсказания потока CNO-нейтрино существенно различаются, достигая 30–40%. Ранее с целью осуществления данного измерения была произведена термоизоляция детектора для предотвращения образования конвективных потоков, переносящих избыток  $^{210}\text{Po}$  со стенок во внутренний объем сцинтиллятора (рис. 2). Нерегулярности изменения счета событий  $^{210}\text{Po}$ , на-

блюдавшиеся на протяжении обеих кампаний набора данных, не позволяют выделить уровень его поддержки за счет присутствия родительского  $^{210}\text{Bi}$ . Ограничения на скорость счета  $^{210}\text{Bi}$  необходимы для спектрального анализа, так как форма  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  практически неотличима от спектральной формы сигнала, ожидаемого от CNO-нейтрино. В настоящее время наблюдается стабилизация распада  $^{210}\text{Po}$ , что позволяет надеяться на позитивный результат кампании по измерению потока CNO-нейтрино.

В ближайшее время планируется проведение комбинированного анализа первой и второй фаз эксперимента с целью дальнейшего улучшения точности измерения потока  $pp$ -нейтрино. Это позволит улучшить точность определения вероятности выживания электронных нейтрино в вакуумном режиме осцилляций, так как предсказания этого потока на Солнце определяются его светимостью и являются наиболее точными.

В первой половине 2018 г. коллаборация планирует начать измерения с искусственным источником антинейтрино на основе  $^{144}\text{Ce}$  в рамках проекта SOX с целью поиска активно обсуждающихся стерильных нейтрино. Если стерильные нейтрино существуют, то они должны проявить себя в этом эксперименте, приводя к уменьшению полного счета событий и создавая характерную осцилляционную картину в виде периодических изменений плотности регистрируемых событий, зависящую от параметров смешивания.

#### Список литературы / References

1. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Seasonal Modulation of the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Rate in Borexino // *Astropart. Phys.* 2017. V.92. P.21.
2. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Limiting Neutrino Magnetic Moments with Borexino Phase-II Solar Neutrino Data // *Phys. Rev. D.* 2017. V.96. P.091103(R).
3. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). A Search for Low-Energy Neutrinos Correlated with Gravitational Wave Events GW 150914, GW 151226, and GW 170104 with the Borexino Detector // *Astrophys. J.* 2017. V.850. P.21.
4. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Borexino's Search for Low-Energy Neutrino and Antineutrino Signals Correlated with Gamma-Ray Bursts // *Astropart. Phys.* 2017. V.86. P.11.
5. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). The Monte Carlo Simulation of the Borexino Detector // *Astropart. Phys.* 2018. V.97. P.136.

Next year we are planning to perform combined analysis of the first and the second phases of the experiment in order to improve the accuracy of measurement of the  $pp$ -neutrino flux from the Sun. This will improve the precision of the electron neutrino survival probability measurement in the vacuum regime of oscillations, taking into account the prediction that the  $pp$ -neutrino flux in the Sun is the most precise one due to the fact that it is defined by the luminosity of the Sun.

In the first half of the year 2018 the measurements with an artificial antineutrino source  $^{144}\text{Ce}$  are planned within the framework of the SOX project, aiming at the search of the actively discussed sterile neutrinos. If sterile neutrinos do exist they will be detected in the experiment by observing a specific oscillation pattern with periodical changes of events density depending on the mixing parameters.