

О. Ю. Смирнов

Эксперимент «Borexino» в 2019 г.

В 2019 г. коллаборация «Borexino» получила новые ограничения на нестандартные взаимодействия нейтрино, опубликовала результаты поиска модельно-независимых нейтринных и антинейтринных астрофизических потоков, а также новые результаты по антинейтринным потокам от распадов элементов в Земле, так называемых геонейтрино.

Поиски нестандартных взаимодействий (НСВ) нейтрино проводились на основе данных второй фазы эксперимента [1]. Эти данные уже использовались ранее для поиска распада электрона и установления пределов на магнитный момент нейтрино. Поиск НСВ, рассматриваемых некоторыми физическими теориями вне Стандартной модели (СМ), проводился путем исследования допустимых отклонений экспериментальных спектров от теоретически предсказываемых в рамках СМ. Спектры электронов отдачи, наблюдаемые в «Borexino», определяются зависящей от энергии вероятностью $P_{ee}(E)$ выживания электронных нейтрино и киральными константами связи нейтрино

и электрона. НСВ могут изменить как киральные связи (что приводит к изменениям в спектре электронов отдачи), так и вероятность P_{ee} (за счет влияния на процессы распространения нейтрино в веществе Солнца). Анализ проводился для ароматово-диагональных взаимодействий для электронных и тау-нейтрино, в применении к мюонным ароматам более сильные ограничения на НСВ получены в ускорительных экспериментах. Не было найдено никаких указаний на наличие НСВ на уровне чувствительности эксперимента, что позволило установить соответствующие ограничения на параметры НСВ (рис. 1). Более того, получены ограничения на угол Вайнберга ($\sin 2\theta_W$), сравнимые с ограничениями, полученными в экспериментах с реакторными антинейтрино. Данный анализ проводился силами дубненских физиков. По результатам работы была защищена кандидатская диссертация [2].

Другая работа, законченная в 2019 г., посвящена поиску нейтрино и антинейтрино от астрофизических источников [3]. Получены модельно-независимые

О. Yu. Smirnov

Borexino in 2019

In 2019, the Borexino collaboration has presented the results of the search for non-standard neutrino interactions, model-independent limits on neutrino and antineutrino fluxes from astrophysical sources, as well as a new analysis of the antineutrino fluxes from the Earth, the fluxes of the so-called geoneutrinos.

The search for the neutrino non-standard interactions (NSI) was performed with Borexino Phase II data [1]. These data were used earlier to search for the electron decay and set limits on the neutrino magnetic moment. The search for the neutrino NSI, considered by some physics theories beyond the Standard Model, was carried out by searching for the deviations of the observed spectra from those predicted by the SM. The electron-recoil spectra observed in Borexino are determined by the energy-dependent solar ν_e survival probability $P_{ee}(E)$, and chiral couplings of a neutrino and an electron. The NSI would modify both the chiral couplings (modifying the electron-recoil spectra) and the P_{ee} (modifying neutrino propagation through the Sun). The analysis was restricted by

the case of flavor-diagonal interactions, and only the electron- and tau-flavors were considered, because the muon flavor NSIs are strongly restricted by the accelerator measurements. No indications of new physics were found at the level of the detector sensitivity, and some competitive constraints on the NSI parameters were placed (see Fig. 1 for example). In addition, the Weinberg angle ($\sin 2\theta_W$) was obtained with a precision comparable to that achieved in reactor antineutrino experiments. The analysis was performed by the Dubna group physicists. A. Formozov defended a PhD thesis based on the work [2] in 2019.

The other work completed in 2019 was devoted to the search for neutrinos and antineutrinos from astrophysical sources [3]. The model-independent upper limits on the antineutrino fluxes from unknown sources in the energy range of 1.8–16.8 MeV were established, exceeding the previously published ones by a factor of 2.5. Using the same data set, the first experimental constraints on the diffuse supernova anti- ν_e fluxes were obtained in the previously unexplored region below 8 MeV, and the limits on

ограничения на антинейтринные потоки в диапазоне энергий 1,8–16,8 МэВ, в 2,5 раза более сильные, чем опубликованные ранее. С тем же набором данных получены первые экспериментальные ограничения на поток диффузных антинейтрино от сверхновых в ранее не исследованной области энергий ниже 8 МэВ, а также улучшены ограничения на поток антинейтрино от Солнца. Присутствие последних в потоке солнечных нейтрино было бы проявлением anomalously большого магнитного момента нейтрино, приводящим к конверсии майорановских нейтрино в антинейтрино за счет комбинации механизма спин-ароматовой прецессии в сильном магнитном поле Солнца и нейтринных осцилляций. В предположении, что форма

энергетического антинейтринного спектра совпадает с формой спектра от солнечных борных нейтрино, получено ограничение на поток солнечных антинейтрино $\Phi < 384 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (90%-й уровень достоверности (у.д.)), что соответствует пределу на вероятность конверсии $p(\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e) < 7,2 \cdot 10^{-5}$ (90%-й у.д.) при энергиях выше энергии обратного бета-распада протона, а именно 1,8 МэВ. При более низких энергиях пределы на вероятность конверсии нейтрино получены из изучения формы спектра электронов отдачи для солнечных бериллиевых нейтрино с энергией 862 кэВ, новый предел составил $p(\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e) < 0,14$ (90%-й у.д.). И, наконец, исследовалась гипотеза об излучении нейтрино при солнечных вспышках путем поиска нейтрино

Рис. 1. Ограничения на область параметров НСВ в плоскости $\epsilon_e^{L/R}$, полученные коллаборацией «Borexino», в сравнении с разрешенными областями параметров, полученными в других экспериментах. При анализе использовались оба варианта Стандартной модели Солнца: с высокой (HZ, сплошная красная) и с низкой (LZ, штриховая красная) металличностью. Ограничения, полученные из полного анализа данных солнечных экспериментов, обозначены черной пунктирной линией. Все контуры соответствуют 90%-му у.д. (для двух степеней свободы). Точечная серая линия ограничивает область параметров ϵ' , ответственных за влияние НСВ на прохождение нейтрино в веществе Солнца

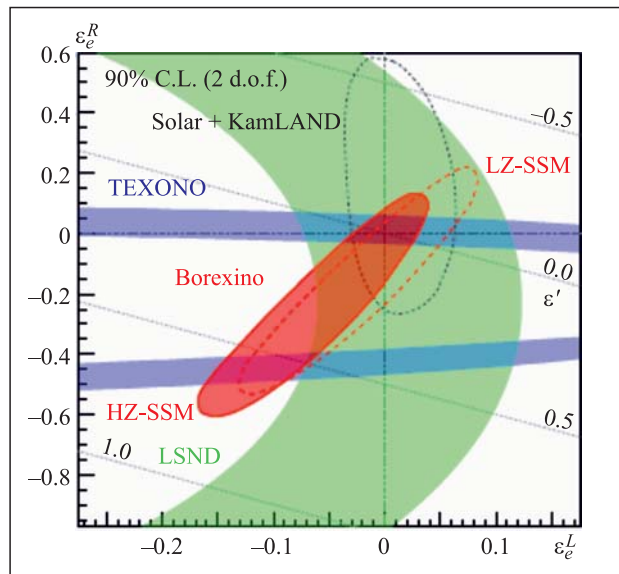


Fig. 1. A region for NSI parameters in $\epsilon_e^{L/R}$ plane obtained by the Borexino collaboration compared to the allowed regions obtained in other experiments. Both existing variants of the Standard Solar Model were tested: HZ-SSM (filled red) and LZ-SSM (dashed red). The bounds from the global analysis of solar neutrino experiments are presented by dashed black line. All contours correspond to 90% C.L. (2 d.o.f.). The dotted gray lines represent the range of ϵ' parameter, relevant for NSIs at propagation

the solar antineutrino fluxes were improved. The presence of these anti- ν_e in the solar neutrino spectra would be a manifestation of a non-zero anomalous magnetic moment of Majorana neutrinos, making possible their conversion into antineutrinos in the strong magnetic field of the Sun due to the spin-flavor precession mechanism in conjunction with the neutrino oscillations. A limit for the solar anti- ν_e flux of $384 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (90% C.L.) was obtained assuming an undistorted solar ^8B neutrino energy spectrum. The

limits correspond to the transition probability $p(\nu_e \rightarrow \text{anti-}\nu_e) < 7.2 \cdot 10^{-5}$ (90% C.L.) at energies above the threshold of the reaction of the inverse beta decay of the proton, namely 1.8 MeV. At lower energies the spectral shape of elastic scattering events was used to set limits on the solar ^7Be neutrinos conversion into the anti- ν_e at 862 keV, the new limit is $p(\nu_e \rightarrow \text{anti-}\nu_e) < 0.14$ (90% C.L.). Finally, the solar flares were considered as possible neutrino sources; therefore, the search for neutrinos of all flavors was

всех ароматов в совпадении с последними. В результате проведенного исследования получены наиболее сильные ограничения на плотность нейтринного потока в области энергий 3–7 МэВ. Если предположить пропорциональность потока нейтрино интенсивности солнечных вспышек, то данные «Borexino» исключают интенсивную солнечную вспышку как причину наблюдаемого избытка событий в наборе данных №117 хлор-аргонового эксперимента «Homestake» (BNL, США).

Нейтринная геофизика, или изучение внутреннего строения Земли путем измерения нейтринных потоков на ее поверхности, является новой междисциплинарной областью науки, быстро развивающейся на стыке геологии, геофизики и физики частиц. Геонейтрино представляют собой антинейтрино от распадов долгоживущих естественных радиоактивных изотопов, ответственных за радиогенный тепловой поток Земли. Геонейтрино несут уникальную информацию, которая может быть использована при построении моделей химического строения Земли. Подробный обзор экспериментальной нейтринной геофизики опубликован в 2019 г. членом дубненской группы О. Ю. Смирновым [4]. В настоящее время только два детектора, «Borexino» и KamLAND, достигли уровня чувстви-

тельности, необходимого для регистрации геонейтрино.

Новые измерения геонейтринного потока в «Borexino» выполнены на данных, набранных в течение 3263 сут, в период с декабря 2007 г. по апрель 2019 г. Критерии отбора антинейтринных кандидатов были оптимизированы в сравнении с применявшимися ранее. В результате достигнуто значительное увеличение эффективной экспозиции, главным образом за счет увеличения доверительного объема детектора и применения более сложного отбора событий космогенного фона. На экспозиции, в два раза превышающей использованную при предыдущем анализе и достигшей $(1,29 \pm 0,05) \cdot 10^{32}$ протонов \times год, наблюдается $52,6_{-8,6}^{+9,4}$ (стат.) $_{-2,1}^{+2,7}$ (сист.) геонейтринных событий от распадов ^{238}U и ^{232}Th , соответствующих геонейтринному сигналу $47,0_{-7,7}^{+8,4}$ (стат.) $_{-1,9}^{+2,4}$ (сист.) TNU*, точность измерения геонейтринного сигнала достигла $+18,3 \div -17,2\%$. Отношение масс $M(\text{Th})/M(\text{U})$ в основном анализе фиксировалось при значении, полу-

* 1 TNU (Terrestrial Neutrino Unit) соответствует одному взаимодействию на 10^{32} протонов мишени в год (столько протонов содержится приблизительно в 1 кг типичного органического скнтиллятора).

performed in coincidence with the solar flares. The strongest up-to-date limits on the neutrino fluence of all flavor neutrinos below 3–7 MeV were obtained as a result of the search. Assuming the neutrino flux is proportional to the flare intensity, an intense solar flare was excluded as the cause of the observed excess of the events in Run 117 of the Cl–Ar Homestake experiment.

Neutrino geoscience, the study of the Earth's interior by measuring geologically produced neutrino fluxes at its surface, is a new interdisciplinary field of science, rapidly developing as a synergy between geology, geophysics and particle physics. Geoneutrinos, antineutrinos from long-lived natural isotopes responsible for the Earth radiogenic heat flux, provide valuable information that can be used for designing possible models of the Earth's chemical composition. A comprehensive review of the experimental geoneutrino study was published by O. Smirnov [4] in 2019. At present, only two detectors, Borexino and KamLAND, have reached the level of the sensitivity necessary for the geoneutrino detection.

New measurements of geoneutrino fluxes with Borexino were performed with 3263 days of data taking between December 2007 and April 2019 [5]. Compared to

previous analyses, data selection criteria were significantly optimized. As a result, a significant gain in exposition was achieved due to the use of enlarged fiducial volume and application of a sophisticated cosmogenic veto. The reported exposure of $(1.29 \pm 0.05) \cdot 10^{32}$ protons \times year represents an increase by a factor of two over the previous Borexino analysis. In total, $52.6_{-8.6}^{+9.4}$ (stat.) $_{-2.1}^{+2.7}$ (syst.) antineutrino events associated with decays of ^{238}U and ^{232}Th were observed, corresponding to the geoneutrino signal of $47.0_{-7.7}^{+8.4}$ (stat.) $_{-1.9}^{+2.4}$ (syst.) TNU* with a $+18.3 \div -17.2\%$ total precision. The analysis assumes the $M(\text{Th})/M(\text{U})$ mass ratio of the chondritic CI meteorites, the compatible results were found leaving free the contributions from ^{238}U and ^{232}Th in the fit. The antineutrino background from the world nuclear reactors was unconstrained in the fit procedure and was found to be compatible with the expectations. After the robust confirmation of the non-zero geoneutrino signal, the interest of physicists is concentrat-

* 1 TNU (Terrestrial Neutrino Unit) corresponds to one event per 10^{32} target protons per year (that is how many protons are in one kiloton of typical organic scintillator).

ченном при изучении метеоритов типа CI, при этом результаты анализа данных со свободными вкладами ^{238}U и ^{232}Th совместимы с полученными в основном анализе. Вклад антинейтрино от ядерных реакторов никак не ограничивался при подгонке данных, результаты подгонки совпадают с ожидаемыми. После получения статистически надежного указания на существование геонейтрино усилия физиков сконцен-

трированы на выделении вклада от мантии в полный геонейтринный поток. Поток геонейтрино из мантии, в отличие от доступной для прямых измерений коры, предсказывается геофизическими моделями и критически зависит от модели (рис. 2). Гипотеза отсутствия геонейтринного сигнала от мантии исключается данными «Borexino» на у.д. 99%. Измеренный от мантии сигнал составляет $21,2_{-9,0}^{+9,6}$ (стат.) $_{-0,9}^{+1,1}$ (сист.)

Рис. 2. Разбивка полного измеренного потока тепла на земной поверхности, составляющего 47 ± 2 ТВт (горизонтальные черные линии), на три главных вклада для ряда моделей «кремниевой» Земли: вековое охлаждение (синий) и радиогенный вклад от литосферы (коричневый) и мантии (оранжевый). Вклад от литосферы $8,1_{-1,4}^{+1,9}$ ТВт оценивается на основе непосредственных измерений и не зависит от модели. Радиогенный вклад от мантии зависит от количества радиоактивных изотопов, предсказываемого соответствующей моделью. Для «Borexino» оценка полного теплового потока составляет $30,0_{-12,7}^{+13,5}$ ТВт. Разница между полным потоком тепла и соответствующим радиогенным потоком представляет собой вклад векового теплового потока, или скорость охлаждения Земли в современную эпоху

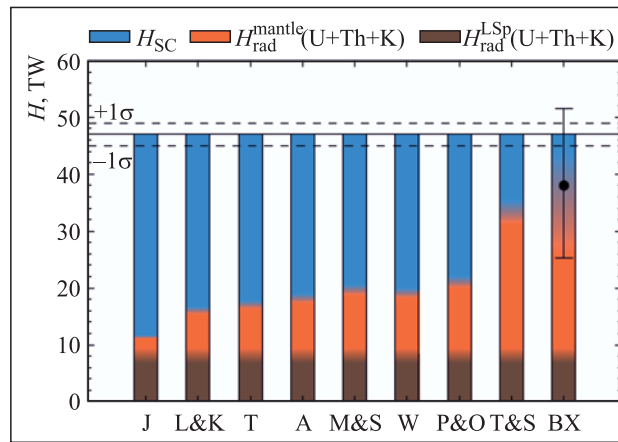


Fig. 2. Decomposition of the measured Earth's total surface heat flux of (47 ± 2) TW (represented by horizontal black lines) into three major contributions for some of the bulk silicate Earth (BSE) models: secular cooling (blue) and radiogenic contribution from lithosphere (brown) and mantle (orange). The lithospheric contribution is the same for all bars, as it is the part of the Earth directly accessible for the measurements. The mantle radiogenic heat depends upon the amount of the heat producing elements predicted by BSE model. For the Borexino the value of $30.0_{-12,7}^{+13,5}$ TW is inferred from the extracted mantle signal. The difference between the total heat and the respective total radiogenic heat is left for the heat from secular cooling of the Earth

ed on separating the crust and mantle contribution. The mantle contribution, in contrast to the accessible crust, is predicted theoretically, and significantly varies for different Earth models (see Fig. 2 for the comparison of models with the Borexino measurement). The null-hypothesis of observing a geoneutrino signal from the mantle is excluded at a 99.0% C.L. by the Borexino data. The measured mantle signal of $21,2_{-9,0}^{+9,6}$ (stat.) $_{-0,9}^{+1,1}$ (syst.) TNU corresponds to the production of radiogenic heat of $24,6_{-10,4}^{+11,1}$ TW from U and Th in the mantle. Large uncertainties of the measurement are associated with the subtraction of two close uncertain values, the Borexino measurement itself and the estimate of the crust contribution. Assuming 18% contribution of K in the mantle and using an estimate of the total radiogenic heat of the lithosphere of $8,1_{-1,4}^{+1,9}$ TW, the

Borexino estimate of the total radiogenic heat of the Earth is $38,2_{-12,7}^{+13,6}$ TW, which corresponds to the convective Urey ratio of $0,78_{-0,28}^{+0,41}$. These values are well compatible with different geological predictions, manifesting just a $\sim 2,4\sigma$ tension compared to the prediction of the Earth models with the lowest concentration of heat-producing elements in the mantle. In addition, the existence of a hypothetical georeactor at the center of the Earth having power greater than 2.4 TW is excluded at 95% C.L. The procedure of georeactor power extraction consisted in a fit of the experimental antineutrino spectrum with an addition of the spectrum from the georeactor with and additional constraint on the number of expected reactor antineutrino events. Particular attention was given to the description of all analysis details which should be of interest for the next

TNU и соответствует радиогенному теплу от U и Th в мантии $24,6_{-10,4}^{+11,1}$ ТВт. Большая неопределенность в измерении связана со статистическим разделением двух близких величин, а именно полного геонейтринного потока в «Borexino» и оценки вклада от коры. В предположении, что вклад калия в тепло мантии составляет 18%, и с учетом оценки полного радиогенного тепла для литосферы $8,1_{-1,4}^{+1,9}$ ТВт измерение «Borexino» соответствует полному радиогенному потоку тепла от Земли $38,2_{-12,7}^{+13,6}$ ТВт, что соответствует конвективному отношению Юри $0,78_{-0,28}^{+0,41}$. Данные значения хорошо совместимы с различными геофизическими моделями, демонстрируя только статистически слабое ($\sim 2,4\sigma$) отклонение для моделей с наиболее низкими концентрациями радиоактивных элементов в мантии. Дополнительно, существование гипотетического геореактора в центре Земли с мощностью выше 2,4 ТВт исключается данными «Borexino» на у. д. 95%. Процесс поиска сигнала от геореактора закончился в подгонке экспериментальных данных с дополнительным вкладом от геореактора, но при вкладе от мировых ядерных реакторов, ограниченном теоретическим предсказанием. В данной статье особое внимание уделено деталям анализа данных, представляющим инте-

рес для следующего поколения экспериментов с жидким сцинтиллятором.

В 2020 г. коллаборация намерена опубликовать результаты поиска нейтрино от углеродно-азотного цикла на Солнце. Данное измерение представляет особый интерес для солнечной физики в связи с так называемой проблемой солнечной металличности (или химического состава Солнца), которая может быть решена после измерения потока нейтрино из цикла CNO. В связи с данным измерением в конструкцию детектора в 2015 г. были внесены серьезные изменения с целью ограничения конвективного переноса остаточного ^{210}Bi в центральный объем детектора для выделения счета событий распада ^{210}Bi , находящихся в вековом равновесии с дочерним ^{210}Po . Измерение скорости счета ^{210}Bi является существенной частью анализа потока нейтрино из цикла CNO, так как спектр бета-распада ^{210}Bi очень похож на спектр электронов отдачи, ожидаемый от нейтрино CNO-цикла.

В настоящее время дубненская группа участвует в комбинированном анализе данных, полученных в первой и второй фазах эксперимента. Основной целью данного анализа является улучшение точности измерения наиболее интенсивных потоков солнечных нейтрино из протон-протонной цепочки (pp и ^7Be).

Список литературы / References

1. Agarwalla S.K. et al. (Borexino Collab.). Constraints on Non-Standard Neutrino Interactions from Borexino Phase-II. arxiv:1905.03512[hep-ph]; JHEP (in press).
2. Formosov A. Search for Non-Standard Neutrino Interactions with Large-Volume Liquid Scintillator Detectors. PhD thesis, 2019; DOI: 10.13130/formosov-andrey_phd2019-05-15.
3. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Search for Low-Energy Neutrinos from Astrophysical Sources with Borexino. arXiv:1909.02422 [hep-ex]; *Astrop. J.* (submitted).
4. Smirnov O. Experimental Aspects of Geoneutrino Detection: Status and Perspectives // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2019. V. 109. P. 103712.
5. Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Comprehensive Geoneutrino Analysis with Borexino. arXiv:1909.02257[hep-ex]; *Phys. Rev. D* (in press).

generation geoneutrino measurements using liquid scintillator detectors.

In 2020, the collaboration is planning to release the results of the measurement of the neutrino flux from the CNO cycle in the Sun. This measurement is of primary interest in modern solar physics because 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-neutrino. In view of the measurement, a serious upgrade of the detector was performed in 2015 with a purpose of stopping the transfer of the residual ^{210}Bi into the central core of the detector due to the convection movement, allowing the separation of the fraction of ^{210}Bi rate in secular equilibrium with ^{210}Po . The measurement of the ^{210}Bi rate is an essential part of the CNO-neutrino analysis, as the spectral shape of ^{210}Bi is very similar to that expected from the CNO-neutrino.

The Dubna group is essentially involved in the combined analysis of the first and second phases of the experiment aiming at the improvement of the accuracy of the measurement of the most intense neutrino fluxes from the proton–proton chain in the Sun (pp and ^7Be).