

ПОИСК КОРРЕЛЯЦИЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ГАММА-ВСПЛЕСКАМИ, СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ И ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА Borexino

И. Ломская от имени коллаборации Borexino*

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Представлены результаты по поиску корреляций низкоэнергетических сигналов с гамма-всплесками (GRB), солнечными вспышками (SF) и гравитационными волнами (GW) с помощью детектора Borexino. Поиск скоррелированных событий с энергиями выше чем 0,25 (1,0) МэВ, расположенных внутри чувствительного объема детектора и идентифицированных не как альфа-частицы и космогенные распады (нейтриноподобные события), был проведен с различными временными окнами, центрированными вокруг времени регистрации гамма-всплесков или гравитационных волн. Поиск событий, скоррелированных с солнечными всплесками, проводился с временным окном, соответствующим длительности солнечных всплесков. Полученная скорость счета находится в хорошем статистическом согласии с ожидаемой скоростью счета от природного, космогенного и нейтринного фонов в детекторе. В результате получены лучшие верхние ограничения на все ароматы нейтрино, связанные с вышеупомянутыми астрофизическими источниками, для энергий нейтрино ниже 5–7 МэВ. Полученные ограничения позволяют исключить объяснение аномалии, полученной в 117-й серии нейтринного эксперимента Homestake с помощью солнечных нейтрино.

The results of a low-energy neutrino search with the Borexino detector in coincidence with gamma-ray bursts (GRB), solar flares (SF) and gravitational wave (GW) events are presented. The correlated events with energies greater than 0.25 (1.0) MeV, positioned inside the detector fiducial volume and not identified as alpha-particles or fast cosmogenic decays (neutrino-like events) were searched within various time windows centered around the GRB or GW detection time. The events correlated with SF were searched in the time window corresponding to SF duration. All count rates obtained are in good statistical agreement with the expected count rate of natural, cosmogenic and neutrino backgrounds in the detector. As a result, we have obtained the best current upper limits on all flavor neutrino fluences associated with these astrophysical sources for neutrino energy below 5–7 MeV. The obtained

* E-mail: lomskaya_is@npni.nrcki.ru

limits allow one to exclude the solar neutrino explanation of the anomaly of run 117 in the Homestake neutrino experiment.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

ВВЕДЕНИЕ

Редкие процессы, такие как гамма-вспышки, солнечные всплески и гравитационные волны, рождающиеся от астрофизических источников, например, в процессе слияния нейтронных звезд и черных дыр, представляют огромный интерес для астрофизики, в том числе и для нейтринного сектора. До сих пор неизвестны конкретные теоретические модели, которые могли бы точно описать процессы, происходящие при вышеперечисленных явлениях, и их поведение. Поиск нейтрино в корреляции с редкими процессами от астрофизических источников мог бы помочь дать объяснение и, возможно, решение какой-нибудь из проблем, возникающих при изучении астрофизических феноменов.

Наблюдение событий гравитационных волн GW150914 и GW151226 в эксперименте LIGO [1–3] вызвало интерес в связи с экспериментами по нейтрино. Сочетание данных от гравитационных и нейтринных детекторов может стать новым подходом к более полному пониманию астрофизических и космологических процессов посредством комбинирования информации от различных методик исследования.

Детектор Borexino показал свой потенциал в различных областях экспериментальной нейтринной астрономии. Среди недавних достижений — точные спектральные измерения нейтрино, возникающих в различных реакциях ядерного синтеза pp -цепи и CNO-цикла на Солнце [4]. В этих работах крайне важную роль сыграл беспрецедентно низкий уровень фона, который удалось получить в детекторе Borexino благодаря сложной программе контроля радиочистоты материалов и многоступенчатой очистке сцинтиллятора. Столь низкий уровень фона в области энергий ниже 5 МэВ делает детектор Borexino уникальной установкой для поиска сигналов от редких процессов в этой энергетической области.

ДЕТЕКТОР BOREXINO

Borexino — жидкий сцинтилляционный детектор, расположенный в лаборатории Гран-Сассо (Италия) на глубине 3400 м по водному эквиваленту. Конструкция детектора основана на концепции послойной экранировки таким образом, чтобы уровень радиочистоты повышался по направлению к центру детектора. Основной корпус детектора, представляющий собой цилиндр с полусферическим верхом диаметром 18 м и высотой 15,7 м, изготовлен из нержавеющей стали с высокой радиочистотой. Расположенная внутри сфера из нержавеющей стали (SSS) диаметром 6,75 м и толщиной 8 мм закреплена поддерживающей

структурой из нержавеющей стали. Пространство между внешним цилиндром и сферой, заполненное сверхчистой водой и оснащенное 208 8-дюймовыми ФЭУ, служит черенковским мюонным вето и называется внешним детектором (OD). На внутренней стороне сферы установлено 2209 8-дюймовых ФЭУ внутреннего детектора (ID), а внутренний объем заполнен псевдокумолем (C_9H_{12}). Внутренний детектор содержит два прозрачных сферических нейлоновых сосуда с показателем преломления, близким к показателю преломления псевдокумола, и радиусами 5,5 м (радионный барьер) и 4,25 м (внутренний сосуд, Inner Vessel — IV), расположенных концентрически внутри сферы из нержавеющей стали (рис. 1). Нейлон, используемый для этих сосудов, производился под землей, чтобы соответствовать высоким стандартам радиационной чистоты.

В объеме сцинтиллятора, во внутреннем сосуде, есть примесь РРО (2,5-дифенилоксазола), используемого для создания стоковского сдвига [5]. Сцинтиллятор за пределами внутреннего сосуда допирован DMP, который гасит световой выход, уменьшая сцинтилляционные сигналы, происхождение которых находится вне IV.

Детектор, тщательно очищенный с помощью различных методик, включая водную экстракцию, показывает исключительно низкий уровень радиоактивных примесей в объеме жидкости внутреннего сосуда [6]. Подробное его описание можно найти в работе [7].

С помощью детектора Borexino обнаружен, а затем и точно измерен поток солнечных нейтрино ${}^7\text{Be}$ [8], за исключением какой-либо

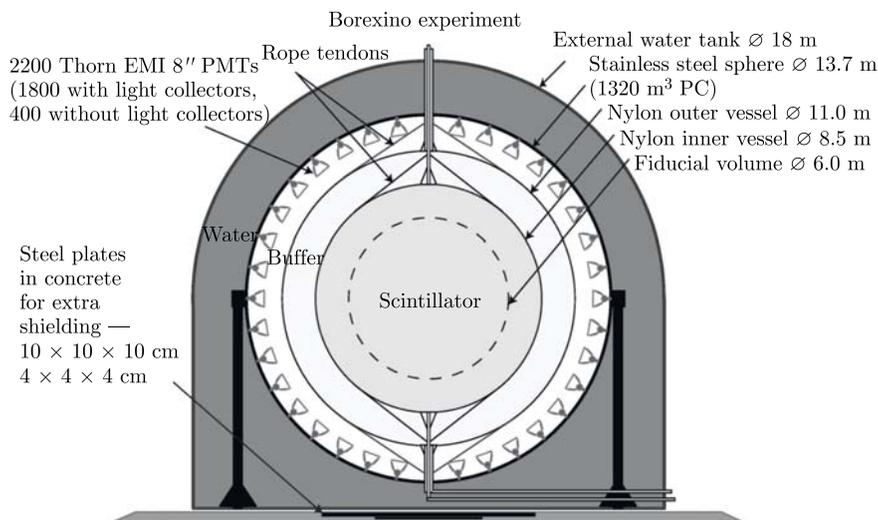


Рис. 1. Принципиальная схема детектора Borexino

значительной асимметрии скорости счета днем и ночью [9], измерена скорость счета ^8B -нейтрино с порогом 3 МэВ [10], проверено первое прямое наблюдение *пер*-нейтрино [11], проведено первое спектральное измерение *пр*-нейтрино [12] и установлено лучшее верхнее ограничение для потока солнечных нейтрино, образующихся в CNO-цикле [13]. Уникально низкий уровень фона детектора Borexino позволил установить новые ограничения на эффективный магнитный момент нейтрино [14], на устойчивость электрона к распаду на нейтрино и фотон [15], на смешивание тяжелых стерильных нейтрино в распаде ^8B [16], на возможное нарушение принципа Паули [17], на поток высокоэнергетических солнечных аксионов [18], на антинейтрино от Солнца и других неизвестных источников [19].

ОТБОР ДАННЫХ

Цель отбора данных — обеспечить максимальную экспозицию при минимальном уровне фона. Так как рассеяние нейтрино на электроне, поиск которого производится в текущем анализе, не имеет сигнатуры взаимодействия, уменьшение фона должно выполняться как уменьшение скорости счета детектором фоновых событий. Для этого следует учитывать следующие источники фона:

- короткоживущие космогенные фоны ($\tau \leq 1$), возникающие внутри чувствительного объема детектора, такие как ^{12}B , ^8He , ^9C , ^9Li и др.;
- другие космогенные фоны, возникающие внутри чувствительного объема детектора, такие как ^{11}Be , ^{10}C , ^{11}C и др.;
- фоны от внутреннего нейлонового сосуда, такие как цепи распада ^{210}Pb и урана/тория;
- природные источники фона, содержащиеся в самом веществе сцинтиллятора, такие как ^{14}C , ^{85}Kr , ^{210}Bi и ^{210}Pb .

Эти фоны можно подавить с помощью информации, поступающей из обработанных данных детектора, таких как совпадения ID/OD и реконструкция позиции события. Космогенный фон может быть уменьшен благодаря применению временного вето детектора после каждого мюона, который можно различить по совпадению с внешним вето, а также с помощью дискриминации по форме импульса [20]. В частности, для анализа событий в корреляции с гравитационными волнами временное вето длиной 0,3 с применялось для подавления скорости счета от ^{12}B до статистически незначимого уровня, что снижало скорость счета от ^8He , ^9C и ^9Li в 3 раза с потерей живого времени менее чем 1%. Фоны, содержащиеся в основной массе сцинтиллятора, не поддаются подавлению, поскольку они не могут быть локализованы ни в пространстве, ни во времени. Тем не менее скорость счета можно уменьшить, установив нижний порог на видимую энергию. Это важно, в частности, из-за присутствия ^{14}C в веществе сцинтиллятора. ^{14}C претерпевает бета-распад с граничной энергией 0,156 МэВ и имеет активность приблизительно

110 Бк во всем объеме внутреннего детектора. Наличие этой спектральной составляющей вынуждает установить нижний порог анализа на видимую энергию — 0,25 МэВ. Фоны, содержащиеся в нейлоне внутреннего сосуда, не могут быть удалены любым способом очистки, поэтому они в 10^2 – 10^3 раз выше, чем фоны в объеме сцинтиллятора. Самые существенные компоненты — распады ^{214}Bi и ^{208}Tl . Эти нуклиды претерпевают процессы распада β и $\beta + \gamma$ с непрерывным спектром, пересекающимся с областью, используемой в анализе. Единственный способ подавить этот источник фона — выполнить геометрический отбор событий, выделив те, которые находятся в пределах чувствительного объема. Чувствительный объем определяется тем, что включает в себя события, расположенные далее 75 см от внутреннего сосуда, что соответствует трем стандартным отклонениям для неопределенности восстановления положения на нижнем пороге энергии. Соответствующий чувствительный объем имеет массу 145 т.

Для анализа событий в корреляции с гамма-всплесками применялся полностью аналогичный алгоритм отбора данных, а также отбор быстрых совпадений для событий регистрации антинейтрино по реакции обратного бета-распада на протоне. Также в этом анализе применялись данные системы FADC, которая обладает лучшей линейностью для высокоэнергетических событий при более высоком энергетическом пороге и невозможности восстановления координаты, что позволило контролировать корректность анализа при высоких энергиях. Для солнечных вспышек данные отбирались аналогичным образом, за исключением временного вето после мюона, пересекающего ID, которое составило 2 с.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные для гравитационных волн из серий O1, O2 экспериментов LIGO/Virgo получены из публичных баз данных. Для дальнейшего анализа применяется временное окно ± 500 и $+500/-1500$ с относительно времени обнаружения события гравитационной волны. Это временное окно учитывает возможную задержку нейтрино, которое распространяется медленнее, чем гравитационная волна, а также возможность более ранней эмиссии нейтрино из-за неустановленности моделей слияния черной дыры с черной дырой (BH–BH).

В этом анализе используется диапазон видимых энергий от 0,25 до 15 МэВ, что позволяет регистрировать нейтрино с энергией от 0,41 МэВ через упругое рассеяние нейтрино на электроны. Как видно из рис. 2, скорость счета данных детектора Vogexip0 согласуется с распределением Пуассона и позволяет использовать алгоритм Филдмана–Кузина [21].

Верхнее ограничение на флюенс, в предположении отсутствия нейтринных осцилляций, для моноэнергетических (анти-)нейтрино с энер-

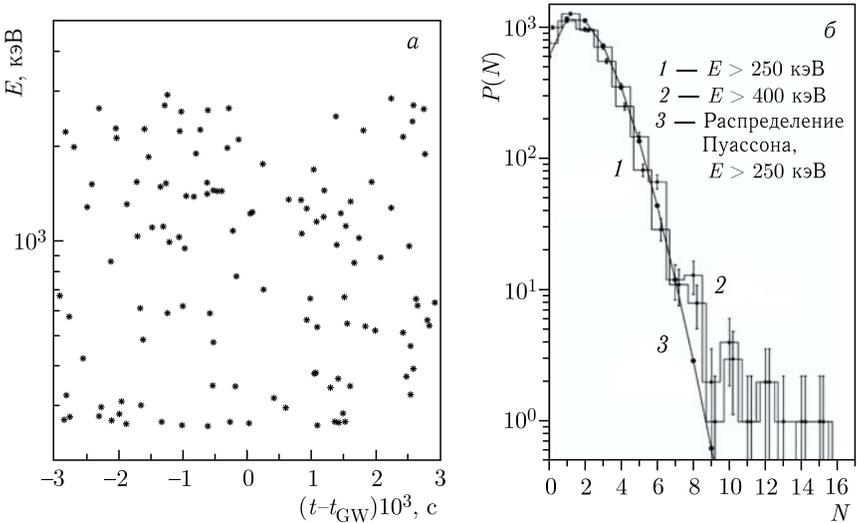


Рис. 2. а) События Vorexino с видимой энергией от 0,25 до 15 МэВ, происходящие в пределах ± 3000 с от времени обнаружения событий гравитационных волн. б) Распределение количества отсчетов в окне в 1000 с, не скоррелированном с событием гравитационной волны. Скорость счета событий во временном окне гравитационной волны согласуется со скоростью счета для солнечных нейтрино и фона

гией E_ν было вычислено как

$$\Phi = \frac{N_{90}(E_\nu, n_{\text{obs}}, n_{\text{bkg}})}{\varepsilon N_e \sigma(E_{\text{th}}, E_\nu)}, \quad (1)$$

где $N_{90}(E_\nu, n_{\text{obs}})$ — верхний предел с 90%-м уровнем достоверности на количество скоррелированных событий гравитационных волн в диапазоне E_{th}, E_ν на одно событие гравитационной волны; ε — эффективность регистрации электронов отдачи; $N_e = 4,79 \cdot 10^{31}$ — количество электронов в чувствительном объеме Vorexino.

Полное сечение рассеяния $\sigma(E_{\text{th}}, E_\nu)$ получается интегрированием дифференциального сечения $d\sigma(E_\nu)/dE_e$ по всем энергиям электронов отдачи:

$$\sigma(E_{\text{th}}, E_\nu) = \int \frac{d\sigma(E_\nu, E_e)}{dE_e} dE_e. \quad (2)$$

Поскольку электронные антинейтрино с энергией более 1,8 МэВ могут взаимодействовать с протонами через реакцию обратного бета-распада, мы рассчитываем верхние пределы на флюенс для моноэнергетических антинейтрино, используя соотношение (1), но заменяя N_e числом протонов N .

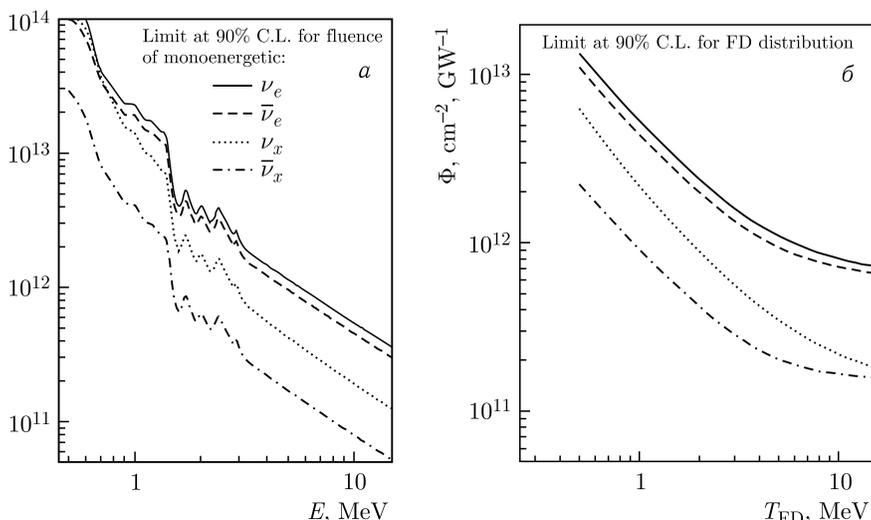


Рис. 3. *a*) Ограничения для моноэнергетических нейтрино были рассчитаны с плавающим порогом (анализ Филдмана–Кузина проводился для каждой разрешенной энергии отдачи электрона). *б*) Ограничения для распределения Ферми–Дирака, рассчитанные для различных температур с нулевым химическим потенциалом

В случае сплошного спектра нейтрино соотношение (4) нужно проинтегрировать и по спектру нейтрино:

$$\sigma(E_1, E_2) = \int \int \frac{d\sigma(E_\nu, E_e)}{dE_e} \varphi dE_e dE_\nu. \quad (3)$$

Поскольку нет надежной теории для низкоэнергетической части спектра излучения нейтрино для слияния черных дыр (ВН–ВН), мы рассчитали пределы на флюенс для спектра нейтрино, распределенного в соответствии с законом Ферми–Дирака [22] для эффективной температуры (T), связанной со средней энергией нейтрино как $\langle E \rangle \simeq 3T$, и нулевого химического потенциала:

$$\varphi(E_\nu, T) \propto \frac{(E_\nu)^2}{1 + \exp(E_\nu/T - \eta)}. \quad (4)$$

Хотя использование распределения Ферми–Дирака для аппроксимации спектра нейтрино хорошо мотивировано только для потока тепловых нейтрино (например, в случае коллапса сверхновой [23–25]), энергия, выделяющаяся во время слияния черных дыр, явно не носит тепловой характер, тем не менее в нем может присутствовать похожая нейтринная компонента.

Анализ данных для гамма-всплесков производился не только для моноэнергетических нейтрино, но и для моноэнергетических антинейтрино.

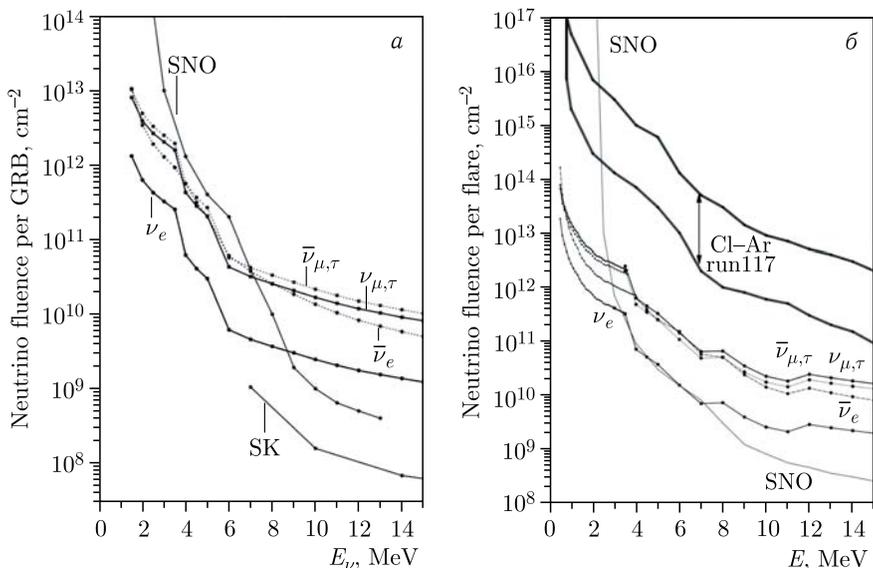


Рис. 4. Верхние ограничения, полученные детектором Vorexino при 90%-м уровне достоверности через упругое рассеяние нейтрино на электроны для всех ароматов нейтрино: а) для событий гамма-всплесков вместе с результатами SuperKamiokande; б) для солнечных вспышек, причем ограничения полностью перекрывают область аномалии эксперимента Homestake

Отличительной чертой этого анализа являлось параллельное использование FADC для анализа нейтринных событий, что особенно полезно для области высоких энергий.

Принципиальным отличием анализа событий в корреляциях с солнечными вспышками является выбор окна, который соответствует продолжительности солнечной вспышки по причине близости потенциального источника. В остальном анализ проводился аналогичным образом. Низкий порог анализа позволил полностью исключить аномалию серии 117-го нейтринного эксперимента Homestake [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнен поиск событий детектора Vorexino в корреляции с гравитационными волнами, солнечными вспышками и гамма-всплесками. Установлены лучшие ограничения на нейтринный флюенс этих событий в области энергий ниже 5 МэВ (рис.3 и 4). Благодаря низкому порогу регистрации удалось исключить аномалию скорости счета нейтринных событий в серии 117-го хлор-аргонного эксперимента Homestake на 90%-м уровне достоверности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abbott B. P. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.)*. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 131103.
2. *Abbott B. P. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.)*. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 241103.
3. *Abbott B. P. et al. (Virgo, LIGO Scientific Collabs.)*. The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914 // *Astrophys. J.* 2016. V. 833, No. 1. P. L1; arXiv:1602.03842.
4. *Back H. et al. (Borexino Collab.)*. CNO and *pep* Neutrino Spectroscopy in Borexino: Measurement of the Deep-Underground Production of Cosmogenic ^{14}C in an Organic Liquid Scintillator // *Phys. Rev. C.* 2006. 10. V. 74. P. 045805.
5. *Alimonti G. et al. (Borexino Collab.)*. Science and Technology of Borexino: A Real-Time Detector for Low Energy Solar Neutrinos // *Astropart. Phys.* 2002. V. 16, No. 3. P. 205–234.
6. *Back H. et al. (Borexino Collab.)*. Borexino Calibrations: Hardware, Methods, and Results // *J. Instrum.* 2012. V. 7, No. 10. P. P10018.
7. *Alimonti G. et al. (Borexino Collab.)*. The Borexino Detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2009. V. 600, No. 3. P. 568–593.
8. *Arpesella C. et al. (Borexino Collab.)*. Direct Measurement of the ^7Be Solar Neutrino Flux with 192 Days of Borexino Data // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 091302.
9. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Absence of a Day–Night Asymmetry in the ^7Be Solar Neutrino Rate in Borexino // *Phys. Lett. B.* 2012. V. 707.
10. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Measurement of the Solar ^8B Neutrino Rate with a Liquid Scintillator Target and 3 MeV Energy Threshold in the Borexino Detector // *Phys. Rev. D.* 2010. V. 82. P. 033006.
11. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. First Evidence of *pep* Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 051302.
12. *Testera G. et al. (Borexino Collab.)*. The Measurement of the *pp* Chain Solar Neutrinos in Borexino // *PoS.N.* 2019. V. OW2018. P. 014.
13. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. First Direct Experimental Evidence of CNO Neutrinos. arXiv:2006.15115. 2020.
14. *Agostini M. et al. (The Borexino Collab.)*. Limiting Neutrino Magnetic Moments with Borexino Phase-II Solar Neutrino Data // *Phys. Rev. D.* 2017. V. 96. P. 091103.
15. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. Test of Electric Charge Conservation with Borexino // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 231802.
16. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. New Limits on Heavy Sterile Neutrino Mixing in ^8B Decay Obtained with the Borexino Detector // *Phys. Rev. D.* 2013. V. 88. P. 072010.
17. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. New Experimental Limits on the Pauli-Forbidden Transitions in ^{12}C Nuclei Obtained with 485 Days Borexino Data // *Phys. Rev. C.* 2010. V. 81. P. 034317.

18. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Search for Solar Axions Produced in the $p(d,^3\text{He})A$ Reaction with Borexino Detector // *Phys. Rev. D*. 2012. V. 85. P. 092003.
19. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Study of Solar and Other Unknown Anti-Neutrino Fluxes with Borexino at {LNGS} // *Phys. Lett. B*. 2011. V. 696, No. 3. P. 191–196.
20. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Muon and Cosmogenic Neutron Detection in Borexino // *J. Instrum.* 2011. V. 6, No. 05. P. 05005.
21. *Feldman G. J., Cousins R. D.* Unified Approach to the Classical Statistical Analysis of Small Signals // *Phys. Rev. D*. 1998. V. 57. P. 3873–3889.
22. *Fermi E.* Zur Quantelung des idealen einatomigen Gases // *Z. Phys.* 1926. V. 36, No. 11–12. P. 902–912.
23. *Janka H. T., Hillebrandt W.* Neutrino Emission from Type II Supernovae — An Analysis of the Spectra // *Astron. Astrophys.* 1989. V. 224. P. 49–56.
24. *Keil M. T., Raffelt G. G., Janka H. T.* Monte Carlo Study of Supernova Neutrino Spectra Formation // *Astrophys. J.* 2003. V. 590. P. 971–991; arXiv:astro-ph/0208035.
25. *Tamborra I., Muller B., Hudepohl L., Janka H. T., Raffelt G.* High-Resolution Supernova Neutrino Spectra Represented by a Simple Fit // *Phys. Rev. D*. 2012. V. 86. P. 125031; arXiv:1211.3920 [astro-ph.SR].
26. *Davis R.* A Review of the Homestake Solar Neutrino Experiment // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 1994. V. 32. P. 13–32.