

## Поиск на БПСТ электронных нейтрино от гравитационно-волновых событий

В. Б. Петков<sup>+\*1)</sup>, Р. В. Новосельцева<sup>+</sup>, М. М. Болиев<sup>+</sup>, И. М. Дзапарова<sup>+\*</sup>, М. М. Кочкаров<sup>+</sup>, А. Н. Куреня<sup>+</sup>,  
Ю. Ф. Новосельцев<sup>+</sup>, П. С. Стриганов<sup>+</sup>, А. Ф. Янин<sup>+</sup>

<sup>+</sup>Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

<sup>\*</sup>Институт астрономии РАН, 119017, Москва, Россия

Поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.

По данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) проведен поиск электронных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 21 МэВ в совпадении с гравитационно-волновыми событиями GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 и GW170817. В интервале  $\pm 500$  с от гравитационно-волновых событий нейтринных сигналов на БПСТ обнаружено не было. Получены ограничения на потоки электронных нейтрино и антинейтрино низкой энергии от астрофизических источников гравитационных всплесков.

DOI: 10.7868/S0370274X18070020

**Введение.** К настоящему времени гравитационно-волновыми детекторами LIGO и Virgo зарегистрированы шесть гравитационно-волновых событий: GW150914 [1], GW151226 [2], GW170104 [3], GW170608 [4], GW170814 [5] и GW170817 [6]. Из анализа формы гравитационного сигнала сделан вывод, что первые пять событий являются результатом слияния черных дыр, а событие GW170817 – результатом слияния нейтронных звезд в двойных системах.

Обнаружение гравитационно-волновых событий инициировало поиск их астрофизических источников. От первых пяти гравитационно-волновых всплесков достоверных сигналов обнаружено не было. Событие GW170817 было идентифицировано с детектированным Fermi-GBM гамма-всплеском GRB 170817A, от которого в дальнейшем было обнаружено электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн [7].

Поиск нейтринных сигналов от гравитационно-волновых событий GW150914, GW151226, GW170104 и GW170817 был проведен в большом диапазоне энергий (от 0.5 МэВ до  $\sim 2.5 \cdot 10^{10}$  ГэВ) и для различных типов нейтрино на нейтринных телескопах ANTARES и IceCube, ливневой установке Pierre Auger, детекторах Borexino, KamLAND и Super-Kamiokande [8–16].

Во всех экспериментах для поиска нейтринных событий был выбран временной интервал  $\pm 500$  с, как максимальный интервал между гравитационной вол-

ной и нейтрино от космических гамма-всплесков [17]. Нейтринных сигналов от гравитационно-волновых событий не было обнаружено ни в одном из перечисленных экспериментов. Были поставлены ограничения на потоки нейтрино и нейтринную светимость астрофизических источников гравитационных всплесков.

В области низких энергий (от 0.5 МэВ до  $\approx 110$  МэВ) поиск различных типов нейтрино от гравитационно-волновых событий GW150914, GW151226, GW170104 и GW170817 был проведен на детекторах Borexino [13], KamLAND [14] и Super-Kamiokande [15, 16]. При поиске электронных антинейтрино на установках Borexino, KamLAND и Super-Kamiokande использовалась реакция обратного бета-распада (IBD)

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+, \quad (1)$$

имеющая низкий порог  $E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 1.3$  МэВ и наибольшее сечение в данной области энергий. На установках Borexino и Super-Kamiokande также использовалась реакция упругого рассеяния (ES)

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-, \quad (2)$$

которая чувствительна ко всем типам нейтрино, с наибольшим сечением для электронных нейтрино.

Из-за фоновых условий БПСТ для поиска электронных нейтрино и антинейтрино низкой энергии от гравитационно-волновых событий использовались реакции их взаимодействия с углеродом сцинтиллятора. В данной работе представлены полученные на

<sup>1)</sup>e-mail: vpetkov@inr.ru

БПСТ ограничения на потоки электронных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 21 МэВ от астрофизических источников гравитационных всплесков GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 и GW170817.

**Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп.** Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) является многоцелевым детектором, предназначенным для широкого диапазона исследований в области физики космических лучей, элементарных частиц и нейтринной астрофизики. Телескоп расположен на Северном Кавказе (Россия) в подземной лаборатории на эффективной глубине 850 м в.э. [18, 19]. Установка имеет размеры  $17 \times 17 \times 11$  м и состоит из 4-х горизонтальных и 4-х вертикальных сцинтилляционных плоскостей. Плоскости покрыты стандартными сцинтилляционными счетчиками, полное число счетчиков в БПСТ – 3184. Полная масса сцинтиллятора составляет 330 т.

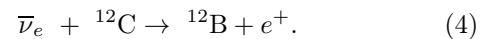
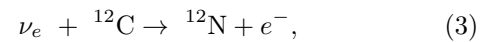
Стандартный сцинтилляционный счетчик представляет собой алюминиевый контейнер размером  $0.7 \times 0.7 \times 0.3$  м, заполненный жидким органическим сцинтиллятором на основе уайт-спирита  $C_nH_{2n+2}$  ( $n \approx 9$ ). Объем сцинтиллятора просматривается одним фотоумножителем ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 15 см. Наиболее вероятное энерговыделение в счетчике от мюонов равно 50 МэВ. С каждого счетчика снимается четыре сигнала. Сигнал с анода ФЭУ используется для измерения времени срабатывания плоскости и измерения энерговыделения до 2.5 ГэВ. Для настройки и контроля коэффициентов усиления ФЭУ используется токовый выход (сигнал с анода ФЭУ через интегрирующую цепочку). Сигнал с 12-го динода поступает на вход дискриминатора – формирователя (так называемый импульсный канал), с порогом срабатывания 8 и 10 МэВ для внутренних и внешних плоскостей, соответственно. Сигнал с 5-го динода ФЭУ поступает на вход логарифмического преобразователя, где он преобразуется в импульс, длина которого пропорциональна логарифму амплитуды сигнала. Логарифмический канал позволяет измерять энерговыделение в индивидуальном счетчике в диапазоне 0.5–600 ГэВ.

Триггером для запуска системы регистрации является срабатывание импульсного канала любого счетчика БПСТ. Темп счета такого триггера –  $17 \text{ с}^{-1}$ . При появлении триггера вся информация о данном событии поступает в “on-line” ЭВМ, в которой происходит предварительная обработка событий с целью получения информации о текущем состоянии регистрирующей аппаратуры. Для привязки событий к

мировому времени используется сигнал GPS, точность синхронизации 0.2 мс.

**Поиск электронных нейтрино и антинейтрино низкой энергии на БПСТ.** Реакция обратного бета-распада на БПСТ используется при поиске нейтринных вспышек от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра [20, 21]. При относительно небольших энергиях электронных антинейтрино ( $\lesssim 30\text{--}40$  МэВ) пробег рожденного в реакции (1) позитрона будет, как правило, заключен в объеме одного сцинтилляционного счетчика. В таком случае сигнал от Сверхновой будет проявляться как серия событий (в каждом из которых на установке срабатывает только один счетчик) в течение временного интервала 20 с. В качестве мишени используются три нижних горизонтальных слоя – внутренние плоскости (1200 счетчиков), содержащие 130 т сцинтиллятора. Скорость счета этих слоев от фоновых событий равна  $0.02 \text{ с}^{-1}$ . Такой темп счета фоновых событий не позволяет использовать реакцию обратного бета-распада для поиска нейтринных событий от гравитационных всплесков, так как при этом используется гораздо большее временное окно – 1000 с, и число фоновых событий становится неприемлемо велико.

Поэтому для поиска на БПСТ электронных нейтрино/антинейтрино низкой энергии от гравитационных всплесков используются реакции их взаимодействия с углеродом сцинтиллятора:



События рождения нестабильных изотопов  ${}^{12}\text{N}$  и  ${}^{12}\text{B}$  (с временем жизни  $\tau({}^{12}\text{N}) = 15.9 \text{ мс}$  и  $\tau({}^{12}\text{B}) = 29.1 \text{ мс}$ ) в реакциях (3) и (4), и их последующего распада представляют собой два последовательных срабатывания одного и того же счетчика. Основным (и достаточно хорошо изученным) источником фона при регистрации электронных нейтрино/антинейтрино низкой энергии являются взаимодействия нейтронов с ядрами углерода  $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$  в сцинтилляторе счетчиков БПСТ, в которых рождается нестабильный изотоп  ${}^{12}\text{B}$  [22]. Таким образом, в качестве кандидатов на нейтринные события низкой энергии от гравитационных всплесков на БПСТ рассматриваются последовательные одиночные срабатывания одного и того же счетчика в интервале 150 мс ( $> 5\tau({}^{12}\text{B})$ ). Отбор таких событий позволяет существенно уменьшить фон, и, как следствие, увеличить массу мишени до 240 т сцинтиллятора, добавив к 1200 счетчикам внутренних плоскостей еще 1020 счетчиков внешних плоскостей БПСТ.

В интервале  $\pm 500$  с от гравитационно-волновых всплесков GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 и GW170817 на БПСТ не было обнаружено событий, которые можно было бы интерпретировать как сигналы от взаимодействия электронных нейтрино/antineйтрино с ядрами углерода мишени. Более того, минимальный интервал между возможным нейтринным сигналом на БПСТ и гравитационно-волновым событием составляет  $\approx 1$  сут, для GW151225. Из отсутствия нейтринных сигналов были поставлены верхние ограничения (на 90 % доверительном уровне) на поток электронных нейтрино и антинейтрино для различных их энергий, в предположении моноэнергетического спектра:

$$F(E_\nu) = \frac{n_{90}}{S(E_\nu)}, \quad (5)$$

где  $n_{90} = 2.3$  и  $S(E_\nu)$  – эффективная площадь регистрации электронного нейтрино/antineйтрино, которую можно представить в виде

$$S(E_\nu) = \epsilon N \sigma(E_\nu) [\delta_{\text{in}} P_{\text{in}}(E_\nu) + \delta_{\text{out}} P_{\text{out}}(E_\nu)]. \quad (6)$$

Здесь  $\sigma(E_\nu)$  – сечение реакции взаимодействия электронного нейтрино/antineйтрино с ядром атома углерода (реакции (3) и (4), [23, 24]),  $N = 10^{31}$  – полное число атомов углерода в мишени,  $\epsilon = 0.94$  – доля чистого времени регистрации во время поиска нейтринных сигналов от гравитационно-волновых событий,  $\delta_{\text{in}}$  и  $\delta_{\text{out}}$  – доля массы мишени на внутренних и внешних плоскостях БПСТ. Эффективности регистрации событий от взаимодействия электронных нейтрино/antineйтрино с ядрами углерода в сцинтилляторе различаются для внутренних ( $P_{\text{in}}(E_\nu)$ ) и внешних ( $P_{\text{out}}(E_\nu)$ ) плоскостей БПСТ, из-за различных порогов срабатывания счетчиков внутренних (8 МэВ) и внешних (10 МэВ) плоскостей телескопа. При их вычислении для каждой из реакций (3) и (4) были учтены эффективности регистрации электронов/позитронов в счетчиках БПСТ [25] и бета-спектры  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$  [26].

**Результаты.** На рис. 1 и 2 приведены полученные на БПСТ верхние ограничения (на 90 % доверительном уровне) на потоки электронных нейтрино и антинейтрино от гравитационно-волновых событий в зависимости от их энергии (для моноэнергетического спектра), в сравнении с результатами детекторов Borexino, KamLAND и Super-Kamiokande. Для регистрации электронных нейтрино на установках Borexino и Super-Kamiokande использовалась реакция (2) упругого рассеяния нейтрино на электронах (ES). Для регистрации электронных антинейтрино на установке Borexino использовалась как реакция упругого рассеяния (при более низких энергиях),

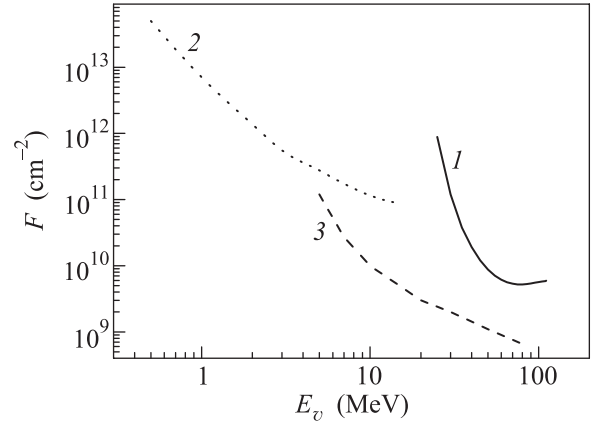


Рис. 1. Верхние ограничения на поток электронных нейтрино в зависимости от их энергии (для моноэнергетического спектра). 1 – БПСТ, реакция (3); 2 – Borexino, ES; 3 – Super-Kamiokande, ES

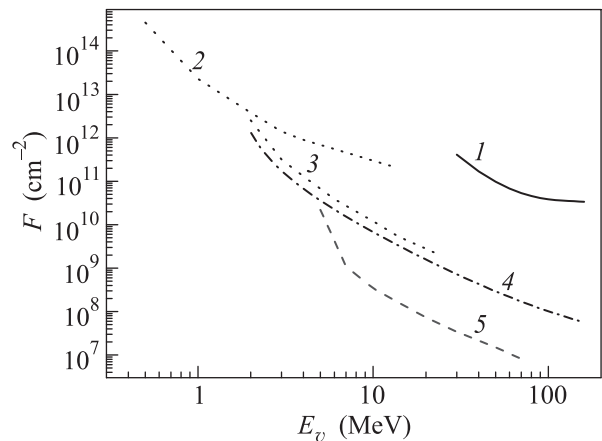


Рис. 2. Верхние ограничения на поток электронных антинейтрино в зависимости от их энергии (для моноэнергетического спектра). 1 – БПСТ, реакция (4); 2 – Borexino, ES; 3 – Borexino, IBD; 4 – KamLAND, IBD; 5 – Super-Kamiokande, IBD

так и реакция (1) обратного бета-распада (IBD). На установках KamLAND и Super-Kamiokande для поиска электронных антинейтрино от гравитационно-волновых событий использовалась реакция обратного бета-распада.

Ограничения, полученные в нашем эксперименте, одинаковы для каждого из гравитационно-волновых событий GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 и GW170817. Приведенные на рисунках ограничения Borexino являются средними для трех из событий: GW150914, GW151226, GW170104 [13]. На установке KamLAND поиск электронных антинейтрино был проведен для событий GW150914 и GW151226, на рис. 2 показано

ограничение для GW150914, как более жесткое [14]. На установке Super-Kamiokande ограничения на потоки электронных нейтрино и антинейтрино были получены для гравитационно-волновых событий GW150914, GW151226 и GW170817, на рис. 1 и 2 также представлены наиболее жесткие их ограничения [15, 16].

Работа выполнена на УНУ Баксанский Подземный Сцинтилляционный Телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке Программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН “Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии” и РФФИ (грант # 17-52-80133).

1. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
2. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 241103 (2016).
3. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 221101 (2017).
4. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration), *Astrophys. J. L.* **851**, L35 (2017).
5. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **119**, 141101 (2017).
6. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017).
7. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube Collaboration, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN Collaboration, The Insight-HXMT Collaboration, ANTARES Collaboration, The Swift Collaboration, AGILE Team, The 1M2H Team, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, GRAVITA: GRAvitational Wave Inaf TeAm, The Fermi Large Area Telescope Collaboration, ATCA: Australia Telescope Compact Array, ASKAP: Australian SKA Pathfinder, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper, Wider, Faster Program), AST3, and CAASTRO Collaborations, The VINROUGE Collaboration, MASTER Collaboration, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, Caltech-NRAO, TTU-NRAO, and NuSTAR Collaborations, Pan-STARRS, The MAXI Team, TZAC Consortium, KU Collaboration, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS: Transient Robotic Observatory of the South Collaboration, The BOOTES Collaboration, MWA: Murchison Widefield Array, The CALET Collaboration, IKI-GW Follow-up Collaboration, H.E.S.S. Collaboration, LOFAR Collaboration, LWA: Long Wavelength Array, HAWC Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, ALMA Collaboration, Euro VLBI Team, Pi of the Sky Collaboration, The Chandra Team at McGill University, DFN: Desert Fireball Network, ATLAS, High Time Resolution Universe Survey, RIMAS and RATIR, and SKA South Africa/MeerKAT, *Astrophys. J. L.* **848**, L12 (2017).
8. S. Adrian-Martinez, A. Albert, M. André et al. (ANTARES Collaboration, IceCube Collaboration, LIGO Scientific Collaboration, and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. D* **93**, 122010 (2016).
9. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (The Pierre Auger Collaboration), *Phys. Rev. D* **94**, 122007 (2016).
10. A. Albert et al. (ANTARES Collaboration, IceCube Collaboration, LIGO Scientific Collaboration, and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. D* **96**, 022005 (2017).
11. A. Albert, M. Andre, M. Anghinolfi et al. (ANTARES Collaboration), arXiv:1710.03020.
12. A. Albert, M. Andre, M. Anghinolfi et al. (ANTARES Collaboration, IceCube Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, and LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Astrophys. J. L.* **850**, L35 (2017).
13. M. Agostini, K. Altenmuller, S. Appel et al. (The Borexino Collaboration), *Astrophys. J.* **850**, 21 (2017).
14. A. Gando, Y. Gando, T. Hachiya et al. (The KamLAND Collaboration), *Astrophys. J. L.* **829**, L34 (2016).
15. K. Abe, K. Haga, Y. Hayato et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *Astrophys. J. L.* **830**, L1 (2016).
16. K. Abe, K. Haga, Y. Hayato et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), arXiv:1802.04379.
17. B. Baret, I. Bartos, B. Bouhou et al. (Collaboration), *Astropart. Phys.* **35**, 1 (2011).
18. E. N. Alekseev, V. V. Alexeyenko, Yu. M. Andreyev et al. (BUST Collaboration), *Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan* **10**, 276 (1979).
19. E. N. Alekseev, L. N. Alekseeva, V. N. Bakatanov et al. (BUST Collaboration), *Phys. Part. Nucl.* **29**, 254 (1998).
20. R. V. Novoseltseva, M. M. Boliev, I. M. Dzaparova et al. (BUST Collaboration), *Phys. Part. Nucl.* **47**, 968 (2016).
21. Ю. Ф. Новосельцев, М. М. Болиев, В. И. Волченко и др. (Коллаборация БПСТ), *ЖЭТФ* **152**, 1 (2017).
22. М. М. Kochkarov, I. A. Alikhanov, M. M. Boliev et al. (BUST Collaboration), *Phys. Part. Nucl.* **47**, 980 (2016).
23. M. Fukugita, Y. Kohyama, and K. Kubodera, *Phys. Lett. B* **212**, 139 (1988).
24. E. Kolbe, K. Langanke, and P. Voge, *Nucl. Phys. A* **652**, 91 (1999).
25. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. И. Волченко и др. (Коллаборация БПСТ), *ЖЭТФ* **104**, 2897 (1993).
26. T. Mayer-Kuckuk and F. C. Michel, *Phys. Rev.* **127**, 545 (1962).