ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 4, с. 583–587

УДК 52-728:53.05:52-13

ПОИСК МЮОННЫХ НЕЙТРИНО ОТ ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ СОБЫТИЙ

© 2021 г. В. Б. Петков[1, 2, *], И. М. Дзапарова[1, 2, 3], М. М. Кочкаров[1], М. Г. Костюк[1], А. Н. Куреня[1], Ю. Ф. Новосельцев[1], Р. В. Новосельцева[1], П. С. Стриганов[1, 3], И. Б. Унатлоков[1], А. Ф. Янин[1, 3]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение наук Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия*

[3]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Государственный Астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия*

**E-mail: vpetkov@inr.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.
После доработки 19.11.2020 г.
Принята к публикации 28.12.2020 г.

По данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа проведен поиск мюонных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 1 ГэВ в совпадении с гравитационно-волновыми событиями, зарегистрированными обсерваториями Advanced LIGO и Advanced Virgo в трех наблюдательных периодах. Получены ограничения на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от источников гравитационных волн. Представлен метод поиска нейтринных событий по алертам от LIGO/Virgo, приведено описание алгоритма обработки информации и поиска совпадений нейтринных и гравитационно-волновых событий в режиме реального времени.

DOI: 10.31857/S0367676521040281

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к поиску нейтрино высоких энергий (ГэВ и выше) вызван тем, что поток таких нейтрино ожидается от любого слияния компактного объекта с остатком нейтронной звезды или слияния, которое происходит в значительной концентрации газа [1]. Обнаружение гравитационных волн и нейтрино высоких энергий из общих источников позволит установить связь между динамикой гравитирующих объектов и свойствами релятивистских потоков.

В данной работе представлены результаты поиска на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) мюонных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 1 ГэВ от областей локализации всех подтвержденных к настоящему моменту гравитационно-волновых (GW) событий, зарегистрированных обсерваториями Advanced LIGO и Advanced Virgo во всех трех наблюдательных периодах. Получены ограничения на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от источников гравитационных волн. Разработан метод поиска нейтринных событий на БПСТ по алертам от LIGO/Virgo в режиме реального времени.

Следует заметить, что к настоящему времени поиск нейтринных сигналов был проведен для нескольких GW событий, зарегистрированных в первых двух наблюдательных периодах [2–7]. В этих экспериментах поиск проводился для различных типов нейтрино в широком диапазоне энергий (от 0.5 МэВ до ~$2.5 \cdot 10^{10}$ ГэВ), нейтринных событий от источников гравитационных волн обнаружено не было.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп расположен на Северном Кавказе (Россия) в подземной лаборатории на эффективной глубине $8.5 \cdot 10^4$ г/см^2 (850 м. в. э.). БПСТ является многоцелевым детектором, предназначенным для широкого диапазона исследований в области физики космических лучей, элементарных частиц и нейтринной астрофизики [8]. Установка имеет размеры 17 × 17 × 11 м^3 и состоит из 4 горизонтальных и 4 вертикальных сцинтилляционных

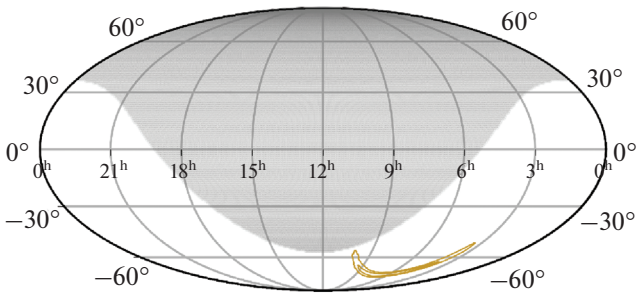

Рис. 1. Область локализации гравитационно-волнового события GW150914 и поле зрения БПСТ (выделено светлым).

плоскостей. Плоскости покрыты стандартными сцинтилляционными счетчиками, полное число счетчиков в БПСТ 3184. Стандартный сцинтилляционный счетчик представляет собой алюминиевый контейнер размером $0.7 \times 0.7 \times 0.3$ м^3, заполненный жидким органическим сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Объем сцинтиллятора просматривается одним фотоумножителем ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 15 см. Конструкция БПСТ позволяет идентифицировать траектории мюонов, пересекающих телескоп, и определять направление прихода мюона. Угловое разрешение установки составляет ≈1.6°. Следует заметить, что направление прихода мюона, рожденного в реакции взаимодействия нейтрино с веществом, сильно коррелирует с направлением прихода нейтрино. Суммарная неопределенность в определении направления нейтрино обусловлена самой природой сигнала (угол рождения мюона относительно направления нейтрино и многократное рассеяние мюона при его прохождении от точки рождения до установки) и для регистрируемых БПСТ нейтрино составляет ~5°.

При регистрации мюонов из нижней полусферы ($\theta > 90°$) можно исключить фон от проникающих под землю мюонов, если на глубине расположения установки фон от рассеяния назад мюонов, пришедших сверху, меньше эффекта от нейтрино. На глубине расположения БПСТ фон мюонов полностью исключается для зенитных углов $\theta > 100°$ [9]. Разделение направлений прихода мюонов между верхней и нижней полусферой проводится с помощью времяпролетной методики. Пороговая энергия регистрируемых БПСТ мюонных нейтрино определяется энергетическими потерями пересекающих телескоп мюонов и составляет 1 ГэВ для используемых условий отбора. В настоящее время регистрация мюонных нейтрино из нижней полусферы проводится в режиме реального времени.

ПОИСК МЮОННЫХ НЕЙТРИНО ОТ GW СОБЫТИЙ

На данный момент, в течение трех наблюдательных периодов, гравитационно-волновыми детекторами LIGO и Virgo достоверно зарегистрированы пятнадцать GW событий [10–14]. Для трех из них (GW170817, GW170818, GW190814) области локализации полностью находятся вне поля зрения БПСТ. Области локализации источника гравитационных волн по данным LIGO/Virgo достаточно велики, и могут достигать ~ полутора тысяч квадратных градусов. Данные с локализацией содержат вероятность расположения источника в каждом сегменте небесной сферы.

Поиск нейтрино от GW событий был проведен во временном интервале ±500 с, который является максимальным интервалом между гравитационной волной и нейтрино от космических гамма-всплесков [15]. В интервале ±500 с от гравитационно-волновых событий мюонные нейтрино/антинейтрино из нижней полусферы на БПСТ зарегистрированы не были. Из факта отсутствия нейтринных сигналов от источника, были поставлены верхние пределы (на 90% доверительном уровне) на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино в зависимости от их энергии для моноэнергетического спектра:

$$I(E_\nu, \theta, \varphi) = \frac{n_{90}}{S_{eff}(E_\nu, \theta, \varphi)}, \qquad (1)$$

где $S(E_\nu, \theta, \varphi)$ – эффективная площадь регистрации мюонного нейтрино/антинейтрино с энергией E_ν и направлением прихода (θ, φ), $n_{90} = 2.3$ – ограничение на 90% доверительном уровне на число событий для распределения Пуассона. Эффективную площадь регистрации нейтрино можно представить в виде:

$$S_{eff}(E_\nu, \theta, \varphi) = \sigma_{\nu N}(E_\nu) S_T(\theta, \varphi) L_{eff}(E_\nu) \rho N_A, \qquad (2)$$

где $\sigma_{\nu N}$ – сечение взаимодействия мюонного нейтрино/антинейтрино с нуклоном [16], $S_T(\theta, \varphi)$ – площадь телескопа под данным направлением, $L_{eff}(E_\nu)$ – эффективный пробег мюона, рожденного нейтрино с энергией E_ν, ρ – плотность грунта в окрестности телескопа, N_A – число Авогадро. Площадь БПСТ для регистрации мюонов от нейтрино из нижней полусферы (т.е., при $\theta > 100°$) изменяется, в зависимости от направления, в три раза (от 72 до 217 м^2). Соответственно, как это видно из формул (1) и (2), и все полученные ограничения будут различаться не более чем в три раза.

В качестве примера на рис. 1 показана область локализации гравитационно-волнового события GW150914, которая полностью находится в поле зрения БПСТ (поле зрения БПСТ выделено светлым). Верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от точки наиболее вероятного расположения источни-

ка гравитационных волн для события GW150914 (S_T = 174 м^2) приведены на рис. 2. Пределы получены отдельно для мюонных нейтрино и антинейтрино вследствие различия в сечениях взаимодействия мюонных нейтрино и антинейтрино [16], и, следовательно, в различных эффективных площадях регистрации.

В предположении степенного спектра с показателем −2 получены верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино для диапазона энергий 1–10^5 ГэВ:

$$F = \frac{n_{90}}{\int\limits_{E_{min}}^{E_{max}} dE_\nu S(E_\nu) I(E_\nu)}, \qquad (3)$$

где E_{min} = 1 ГэВ, $E_{max} = 10^5$ ГэВ, $I(E_\nu) = E_\nu^{-2}$.

В табл. 1 приведены диапазоны верхних пределов на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино для двенадцати подтвержденных GW событий, области локализации которых попадают в поле зрения БПСТ. Диапазон ограничений определяется диапазоном величин площади БПСТ для регистрации мюонов от нейтрино от области локализации каждого GW события, находящейся в поле зрения телескопа.

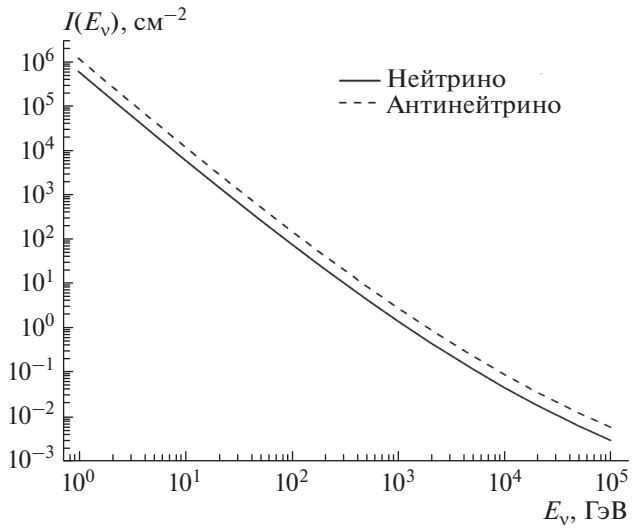

Рис. 2. Верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от точки наиболее вероятного расположения источника гравитационных волн для события GW150914 (для моноэнергетического спектра).

ПОИСК МЮОННЫХ НЕЙТРИНО ПО АЛЕРТАМ ОТ LIGO/VIRGO

С начала третьего наблюдательного периода (19 апреля 2019 г.–27 марта 2020 г.) обсерватории LIGO/Virgo предоставляли данные о предполагаемых гравитационно-волновых событиях в режиме реального времени, в течение этого наблюдательного периода была разослана информация о 56 кандидатах в GW события [17].

Алерты, распространяемые в виде машиночитаемых пакетов, принимаются и обрабатывается в режиме реального времени на сервере Баксанской Нейтринной Обсерватории. В момент появления алерта запускается онлайн-программа анализа его содержимого. Онлайн-программа сверяет данные по мюонным нейтрино из нижней полусферы, которые регистрируются БПСТ в режиме реального времени, с данными гравитаци-

Таблица 1. Верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от гравитационно-волновых событий

GW событие	Мюонные нейтрино		Мюонные антинейтрино	
	F_{min}, см$^{-2}$	F_{max}, см$^{-2}$	F_{min}, см$^{-2}$	F_{max}, см$^{-2}$
GW150914	109.3	52.9	215.1	104.2
GW151012	146.9	50.8	289.5	100.0
GW151226	148.1	51.8	291.6	101.9
GW170104	144.0	51.6	283.6	101.6
GW170608	138.3	70.6	272.4	139.1
GW170729	146.5	56.0	288.5	110.3
GW170809	103.2	58.3	203.2	114.8
GW170814	64.5	54.9	126.9	108.1
GW170823	146.5	52.9	288.5	104.2
GW190425	148.1	51.9	291.6	102.2
GW190412	136.3	63.9	268.3	125.7
GW190521	146.5	73.6	288.5	144.8

Рис. 3. Блок-схема анализа алерта.

онно-волновых детекторов. Главной задачей работы с алертами является поиск нейтринного события в области локализации гравитационно-волнового события. Поскольку направления на источник гравитационных волн могут быть восстановлены с точностью до десятков-сотен квадратных градусов, а точность восстановления направления прихода мюонного нейтрино/антинейтрино на БПСТ составляет ~5°, то совместное наблюдение гравитационных волн и нейтрино может значительно улучшить локализацию источника, тем самым сделав более осуществимыми последующие электромагнитные наблюдения. В случае наличия нейтринного события внутри области локализации гравитационно-волнового события рассылается оповещение с координатами прихода нейтрино, для обзора области локализации нейтринного события оптическими телескопами.

Схема алгоритма анализа алерта представлена на рис. 3. Онлайн-программа после получения алерта извлекает информацию о дате, времени события, названии события и ссылку на файл с данными об области локализации. Файлы хранятся в базе данных кандидатов на гравитационно-волновые события. Данные с локализацией содержат вероятность расположения источника в каждом сегменте небесной сферы, разбитой на ячейки. Затем осуществляется поиск нейтринных событий на БПСТ в интервале ±500 с относительно времени регистрации кандидата в гравитационно-волновые события. После этого программа загружает файл с локализацией гравитационно-волнового события и сверяет поле зрения БПСТ в момент события с областью, в которой с 90% вероятностью расположен предполагаемый источник. Если не было совпадения этих областей, то, за неимением смысла, обработка данных завершается. В случае, если поле зрения БПСТ полностью или частично перекрывает локализацию гравитационно-волнового события и при этом нейтринных событий на БПСТ обнаружено не было, производится расчет ограничений на потоки мюонных нейтрино и антинейтрино в двух точках небесной сферы – максимума и минимума площадей БПСТ. Если при совпадении областей поля зрения БПСТ и локализации гравитационно-волнового события обнаружено нейтринное событие, производится сверка направления прихода нейтрино с областью локализации события. При отсутствии совпадения направления прихода нейтрино с областью локализации гравитационно-волнового события, производится расчет ограничений на потоки мюонных нейтрино/антинейтрино в точках максимума и минимума площади БПСТ. Если совпадение есть, производится рассылка оповещения с координатами прихода нейтрино для просмотра данного участка небесной сферы оптическими телескопами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте на БПСТ проведен поиск мюонных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 1 ГэВ в совпадении с двенадцатью подтвержденными GW событиями, области локализации которых попадают в поле зрения телескопа. В интервале ±500 с от гравитационно-волновых событий мюонные нейтрино/антинейтрино из нижней полусферы на БПСТ зарегистрированы не были. Получены верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино. Разработан метод поиска на БПСТ нейтринных событий по алертам от LIGO/Virgo в режиме реального времени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-11027). Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fraija N.* // J. High Energy Astrophys. 2016. V. 11–12. P. 29.
2. *Adrian-Martinez S., Albert A., Andre M. et al.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. Art. No. 122010.
3. *Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. Art. No. 122007.
4. *Albert A., Andre M., Anghinolfi M. et al.* // Astrophys. J. Lett. 2017. V. 850. Art. No. L35.
5. *Abe K., Haga K., Hayato Y. et al.* // Astrophys. J. Lett. 2016. V. 830. Art. No. L1.
6. *Agostini M., Altenmuller K., Appel S. et al.* // Astrophys. J. 2017. V. 850. P. 21.
7. *Петков В.Б., Новосельцева Р.В., Болиев М.М. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. С. 418.
8. *Alekseev E.N., Alexeyenko V.V., Andreyev Yu.M. et al.* // Proc. 16th ICRC (Kyoto, 1979). V. 10. P. 276.
9. *Boliev M.M., Butkevich A.V., Dzaparova I.M. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. P. 585.
10. *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* // Phys. Rev. X. 2019. V. 9. Art. No. 031040.
11. *Abbott R., Abbott T.D., Abraham S. et al.* // arXiv: 2004.08342. 2020.
12. *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* // Astrophys. J. Lett. 2020. V. 892. Art. No. L3.
13. *Abbott R., Abbott T.D., Abraham S. et al.* // Astrophys. J. Lett. 2020. V. 896. Art. No. L44.
14. *Abbott R., Abbott T.D., Abraham S. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. Art. No. 101102.
15. *Baret B., Bartos I., Bouhou B. et al.* // Astropart. Phys. 2011. V. 35. P. 1.
16. *Hayato Y.* // Acta Phys. Polon. B. 2009. V. 40. P. 2477.
17. https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3.

Search for muon neutrinos from regions of localization of gravitational-wave events

V. B. Petkov[a, b], I. M. Dzaparova[a, b, c], M. M. Kochkarov[a], M. G. Kostyuk[a], A. N. Kurenya[a], Yu. F. Novoseltsev[a], R. V. Novoseltseva[a], P. S. Striganov[a, c], I. B. Unatlokov[a, *], A. F. Yanin[a, c]

[a] *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[b] *Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[c] *Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia*

**e-mail: vpetkov@inr.ru*

A search for muon neutrinos and antineutrinos with energies above 1 GeV was carried out using data from the Baksan Underground Scintillation Telescope, in coincidence with fifteen gravitational-wave events recorded by the Advanced LIGO and Advanced Virgo observatories in three observation periods. Limits on the integral fluxes of muon neutrinos and antineutrinos from sources of gravitational waves are obtained. A method for searching for neutrino events using alerts from LIGO/Virgo is presented. The description of the information processing algorithm and the search for coincidences of neutrino and gravitational-wave events in real time is given.