

УДК 52-728:53.05:52-13

МОНИТОРИНГ НЕЙТРИННЫХ ВСПЫШЕК ОТ СВЕРХНОВЫХ НА БАКСАНСКОМ ПОДЗЕМНОМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ТЕЛЕСКОПЕ

© 2021 г. Ю. Ф. Новосельцев^{1, *}, И. М. Дзапарова^{1, 2, 3}, М. М. Кочкаров¹, А. Н. Куреня¹, Р. В. Новосельцева¹, В. Б. Петков^{1, 2, 3}, П. С. Стриганов^{1, 3}, И. Б. Унатлоков¹, А. Ф. Янин^{1, 3}

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: novoseltsev@inr.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп работает по программе поиска нейтринных вспышек с середины 1980 г. В качестве мишени мы используем две части установки с суммарной массой 240 тонн. За период с 30.06.1980 по 30.06.2020 чистое время наблюдения составило 34.4 г. За это время не было зарегистрировано ни одного события — кандидата на нейтринную вспышку. Это приводит к значению верхней границы средней частоты гравитационных коллапсов звезд в Галактике 0.067 год^{-1} на 90% уровне достоверности.

DOI: 10.31857/S0367676521040268

ВВЕДЕНИЕ

Детектирование нейтрино от SN1987A явилось экспериментальным подтверждением идей о крайне важной роли нейтрино в процессе взрыва массивных звезд (рождения сверхновых), выдвинутых более 50 лет назад [1–3]. Впервые представилась возможность сравнить основные параметры существующей теории — излученную энергию, температуру нейтрино и длительность нейтринной вспышки — с экспериментальными значениями [4, 5]. В последние десятилетия поиск нейтринных всплесков вели несколько детекторов: Баксанский сцинтилляционный телескоп (БПСТ) [6, 7], Камиоканде [8] и супер-Камиоканде [9], MACRO [10], LVD [11], AMANDA [12], SNO [13], IceCube [14], Borexino [15], KamLAND [16] и другие.

БПСТ работает по программе поиска нейтринных вспышек почти непрерывно с середины 1980 г. [17]. С июня 2016 г. на БПСТ работает система оповещения, позволяющая в течение 20 мин выдать сообщение об обнаруженной вспышке. В настоящее время проводятся тестирования для подключения к системе SNEWS. В данной статье представлен текущий статус эксперимента.

МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРИННОЙ ВСПЫШКИ

Полная масса сцинтиллятора БПСТ составляет 330 тонн. Масса, заключенная в трех нижних горизонтальных слоях (1200 счетчиков) — 130 тонн. Три нижние горизонтальные плоскости мы называем детектор Д1. Большинство событий, которые БПСТ регистрирует от взрыва СН, представляют собой реакции обратного бета распада (ОБР): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. Если средняя энергия антинейтрино $E_{\bar{\nu}_e} = 12\text{--}15 \text{ МэВ}$ [18, 19], то пробег e^+ (рожденного в реакции ОБР) будет заключен, как правило, в объеме одного счетчика. В таком случае сигнал от СН будет проявляться как серия событий, когда на установке срабатывает только один счетчик (“одиночное событие”). Поиск нейтринной вспышки заключается в регистрации кластера “одиночных событий” в течение временного интервала, не превышающего длительность нейтринной вспышки ($\tau = 20 \text{ с}$). Ожидаемое среднее число событий N_{ev} от реакций ОБР в течение времени Δt от начала коллапса ядра можно представить так:

$$N_{ev} = N_p \int_0^{\Delta t} dt \int_0^{\infty} dE F(E, t) \sigma(E) \eta(E) \quad (1)$$

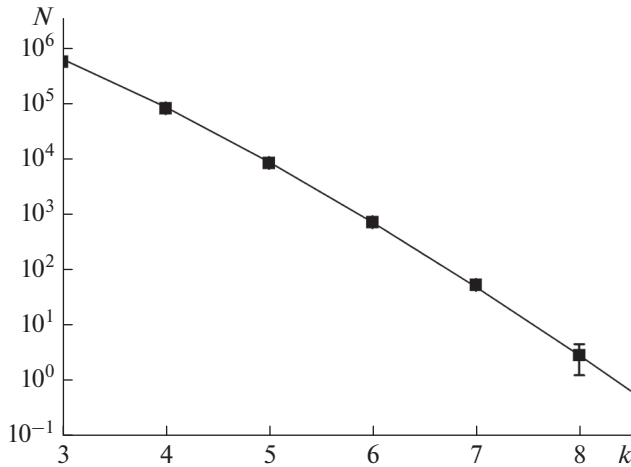


Рис. 1. Число кластеров в детекторе Д1, содержащих k одиночных событий в интервале $\tau = 20$ с. Квадраты – экспериментальные данные, кривая – ожидаемое распределение согласно выражению (5).

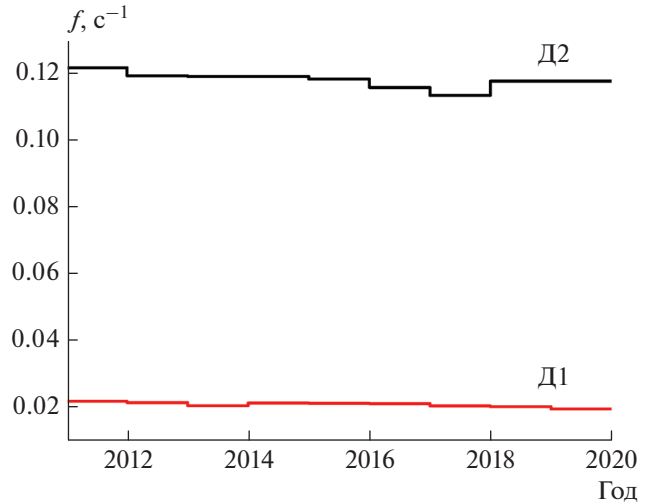


Рис. 2. Скорости счета одиночных событий в детекторах Д1 и Д2 за период 2011–2020 гг.

здесь N_p – число свободных протонов в мишени, F – поток электронных антинейтрино, $\sigma(E)$ – сечение реакции ОБР, $\eta(E)$ – эффективность детектирования. Для СН на расстоянии 10 кпс, полной энергии, излученной в нейтрино $\epsilon_{tot} = 3 \cdot 10^{53}$ эрг, и массы мишени 130 т (детектор Д1) получим (температура антинейтрино $k_B T = 4.5$ МэВ и энергия, излученная в $\bar{\nu}_e$, равна $1/6 \epsilon_{tot}$):

$$N_{ev}(NH) \cong 35, \quad (\text{без учета осцилляций}). \quad (2)$$

Осцилляции нейтрино, конечно, повлияют на этот результат (см., например [20–23]). Для простейшего сценария, в котором конверсия нейтринных потоков обусловлена только МСВ эффектом [24, 25], поток электронных антинейтрино $F_{\bar{\nu}_e}$, прибывающих к Земле, может быть записан в виде [26]

$$F_{\bar{\nu}_e} = U_{e1}^2 F_{\bar{\nu}_e}^0 + U_{e2}^2 F_{\bar{\nu}_x}^0 \quad (3)$$

для нормальной массовой иерархии (НН) и

$$F_{\bar{\nu}_e} = F_{\bar{\nu}_x}^0 \quad (4)$$

для обратной массовой иерархии (ИН), где F_i^0 – исходные нейтринные потоки в звезде, индекс “x” обозначает неэлектронные ароматы (анти-)нейтрино, а U_{ij} – элементы матрицы смешивания ($U_{e1}^2 \cong \cos^2 \theta_{12} \cong 0.7$, $U_{e2}^2 \cong \sin^2 \theta_{12} \cong 0.3$).

Если для температуры неэлектронных нейтрино принять значение $T_x = 6$ МэВ, то получим $N_{ev}(NH) \cong 39$, $N_{ev}(IH) \cong 48$.

Фоном для поиска нейтринных вспышек являются: 1) радиоактивность (в основном от космогенных изотопов), 2) мюоны космических лучей, если траектория мюона такова, что срабатывает только один счетчик из 3184. Полная скорость

счета фоновых событий равна $f_1 = 0.0207 \text{ с}^{-1}$ для детектора Д1 и $\approx 1.5 \text{ с}^{-1}$ для внешних слоев. Поэтому в качестве триггерной мишени используются три нижних горизонтальных слоя счетчиков – детектор Д1.

Фоновые события могут имитировать ожидаемый сигнал (k одиночных событий внутри скользящего временного интервала τ) со скоростью

$$p(k) = f_1 \exp(-f_1 \tau) \frac{(f_1 \tau)^{k-1}}{(k-1)!}. \quad (5)$$

На рис. 1 представлена обработка экспериментальных данных (одиночные события за период 2001–2020 годы, $T_{actual} = 17.3$ лет) в сравнении с ожидаемым распределением (5), вычисленным при $f_1 = 0.0207 \text{ с}^{-1}$. Из выражения (5) следует, что фоновые события создают кластер из 8 одиночных событий со скоростью 0.178 год^{-1} . За $T_{actual} = 17.3$ лет ожидается 3.08 события, что мы и наблюдаем в эксперименте (3 события).

Чтобы увеличить число детектируемых нейтринных событий и надежность регистрации нейтринной вспышки, мы используем те части внешних сцинтилляционных слоев, которые имеют относительно низкий темп счета фоновых событий. Полное число счетчиков в этих частях внешних слоев 1030 (масса сцинтиллятора 110 тонн). Этот массив счетчиков мы называем детектор Д2; темп счета одиночных событий в Д2 равен $f_2 = 0.12 \text{ с}^{-1}$. Стабильность работы и скорости счета одиночных событий в детекторах Д1 и Д2 показаны на рис. 2.

В случае регистрации в детекторе Д1 кластера с множественностью $k \geq 3$, мы проверяем число одиночных событий k в 10-секундном времен-

ном окне в детекторе Д2. Начало этого окна совпадает с началом кластера в Д1. Согласно (1) среднее число нейтринных событий в Д2 будет $N_{ev}(NH) \cong 28$ (при тех же условиях, что в (2)). Так что ожидаемое полное число событий от реакций ОБР в детекторах (Д1 + Д2) равно

$$N_{ev} = N_{ev}(D1) + N_{ev}(D2) \cong 63 \quad (6)$$

(без учета осцилляций).

С учетом влияния МСВ эффекта получим (см. (3), (4)) $N_{ev}(NH) \cong 71$, $N_{ev}(IH) \cong 88$ для прямой и обратной массовой иерархии соответственно.

Детекторы Д1 и Д2 независимы: вероятность имитации фоном события, когда в Д1 наблюдается кластер с множественностью $k1$ и одновременно в Д2 – кластер с множественностью $k2$, равна произведению соответствующих вероятностей – $P(k1, k2) = P1(k1) \cdot P2(k2)$, где $P1$ определяется согласно (5), а $P2$ есть распределение Пуассона для $f_2 = 0.12 \text{ с}^{-1}$ и длительности временного окна 10 с. В частности, мы получаем $P(6, 5) = 0.23 \text{ год}^{-1}$, $P(6, 6) = 0.045 \text{ год}^{-1}$.

В случае очень близкой СН число детектируемых нейтринных событий будет очень большим. Например, для расстояния до СН 0.2 кпс полное число событий от реакций ОБР будет ~ 250000 . В первые секунды (после отскока ядра) ожидается $\sim (25-30) \cdot 10^3$ событий в секунду. Время обработки события на БПСТ ~ 1 мс, поэтому мы будем регистрировать ~ 1000 событий в секунду. Таким образом, в случае очень близкой СН некоторая часть событий (которая зависит от расстояния до СН) будет потеряна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод детектирования нейтринной вспышки на БПСТ основан на одновременной регистрации кластеров одиночных событий в детекторе Д1 и детекторе Д2. Оценка (6) позволяет ожидать ~ 10 нейтринных событий для наиболее удаленных СН (~ 25 кпс) нашей Галактики. За период с 30 июня 1980 г. по 30 июня 2020 г. чистое время наблюдения составило 34.4 г. Это наибольшее время наблюдения за Галактикой на одной и той же установке. За это время ни одного события-кандидата на коллапс звездного ядра зарегистрировано не было. Это приводит к значению верхней границы средней частоты гравитационных коллапсов в Галактике $f_{col} < 0.067 \text{ год}^{-1}$ на 90% уровне достоверности.

Работа выполнена на уникальной научной установке Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образова-

ния РФ (соглашение № 075-15-2019-1640, уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gatow G., Shoenberg M.* // Phys. Rev. 1940. V. 58. P. 1117.
2. *Зельдович Я.Б., Гусейнов О.Х.* // Докл. АН СССР. 1965. Т. 162. С. 791.
3. *Colgate S.A., White R.H.* // Astrophys. J. 1966. V. 143. P. 626.
4. *Loredo T.J., Lamb D.Q.* // Phys. Rev. D. 2002. V. 65. Art. No 063002.
5. *Pagliaroli G., Vissani F., Costantini M.L., Ianni A.* // Astropart. Phys. 2009. V. 31. P. 163.
6. *Алексеев Е.Н., Алексеева Л.Н., Волченко В.И. и др.* // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. С. 2897.
7. *Novoseltseva R.V., Boliev M.M., Dzaparova I.M. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47. P. 968.
8. *Hirata K., Kajita T., Koshiba M. et al. (Kamiokande-II Collaboration)* // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 1490.
9. *Ikeda M., Takeda A., Fukuda Y. et al.* // Astrophys. J. 2007. V. 669. P. 519.
10. *Ambrosio M., Antolini R., Baldini A. et al. (MACRO Collaboration)* // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 37. No. 3. P. 265.
11. *Aglietta M., Alpat B., Alyea E.A. et al. (LVD Collaboration)* // Nuovo Cim. A. 1992. V. 105. P. 1793.
12. *Ahrens J., Bai X., Barouch G. et al. (AMANDA Collaboration)* // Astropart. Phys. 2002. V. 16. P. 345.
13. *Aharmim B., Ahmed S.N., Anthony A.E. et al.* // Astrophys. J. 2011. V. 728. P. 83.
14. *Lund T., Marek A., Lunardini C. et al.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. Art. No. 063007.
15. *Bellini G., Benziger J., Bick D. et al. (Borexino Collaboration)* // Phys. Lett. B. 2007. V. 658. P. 101.
16. *Eguchi K., Enomoto S., Furuno K. et al. (KamLAND Collaboration)* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. Art. No. 021802.
17. *Alexeyev E.N., Alexeyenko V.V., Andreyev Yu.M. et al.* // Proc. 16th ICRC. (Kyoto–Tokyo, 1979). V. 10. P. 276.
18. *Tamborra I., Raffelt G., Hanke F. et al.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. Art. No. 045032.
19. *Имшенник В.С., Надежин Д.К.* // Итоги науки и техн. Сер. Астрон. 1982. Т. 21. С. 63.
20. *Hillebrandt W., Hoflich P.* // Rep. Prog. Phys. 1989. V. 52. P. 1421.
21. *Pantaleone J.* // Phys. Lett. B. 1992. V. 287. P. 128.
22. *Sawyer R.F.* // Phys. Rev. D. 2005. V. 72. Art. No. 045003.
23. *Duan H., Fuller G.M., Carlson J., Qian Y.-Z.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. Art. No. 105014.
24. *Wolfenstein L.* // Phys. Rev. D. 1978. V. 17. Art. No. 2369.
25. *Mikheev S.P., Smirnov A.Y.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1985. V. 42. P. 913.
26. *Dighe A., Smirnov A.Y.* // Phys. Rev. D. 2000. V. 62. Art. No. 033007.

**Monitoring of supernova neutrino bursts
at the Baksan underground scintillation telescope**

**Yu. F. Novoseltsev^{a, *}, I. M. Dzaparova^{a, b, c}, M. M. Kochkarov^a, A. N. Kurenya^a,
R. V. Novoseltseva^a, V. B. Petkov^{a, b, c}, P. S. Striganov^{a, c}, I. B. Unatlov^a, A. F. Yanin^{a, c}**

^a*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

^b*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^c*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia*

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

The Baksan underground scintillation telescope operates under the program of a search for neutrino bursts since the mid-1980. As a target, we use two parts of the facility with a total mass of 240 tons. Over the period of June 30, 1980 to June 30, 2020, the actual observational time is 34.4 years. No candidate for the stellar core collapse has been detected during the observation period. The corresponding upper bound of the mean frequency of core collapse supernovae in our Galaxy is 0.067 year^{-1} (90% CL).