

ИЗОТРОПНЫЙ ПОТОК НЕЙТРИНО ОТ ВЗРЫВОВ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД ВО ВСЕЛЕННОЙ

*В. Б. Петков**

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Институт астрономии РАН, Москва

Накопление во Вселенной всех типов нейтрино, излучаемых при гравитационных коллапсах центральных ядер массивных звезд, происходит на протяжении всей истории эволюции галактик. Изотропный и постоянный во времени поток таких нейтрино является гарантированным потоком, который несет информацию как о спектрах нейтрино от индивидуальных сверхновых, так и о распределении сверхновых по красному смещению. В работе обсуждаются имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные ограничения и перспективы поиска изотропного нейтринного излучения в современных и будущих экспериментах.

The neutrinos of all types from core-collapse supernova explosions are accumulated in the Universe throughout the galaxies evolution. Isotropic and time-independent flux of such neutrinos is a guaranteed steady source of supernova neutrinos, which can give information about the supernovae dynamics and the supernovae redshift distribution. The current upper limits on the isotropic neutrino flux and prospects for the present and future experiments are discussed.

PACS: 97.60.Bw; 95.85.Ry

ВВЕДЕНИЕ

Нейтринное излучение играет важную роль в эволюции звезд, особенно в финальной части эволюции массивных звезд (см., например, [1] и ссылки в данной работе). По современным представлениям, эволюция звезды с массой, превышающей массу Солнца более чем в 8 раз, заканчивается гравитационным коллапсом центрального ядра звезды, сопровождаемым мощной вспышкой нейтринного излучения. Коллапс может сопровождаться сбросом внешней оболочки звезды, что проявляется как вспышка сверхновой. Первая и пока единственная сверхновая, от которой было зарегистрировано нейтринное излучение (сверхновая 1987A), вспыхнула на расстоянии 50 кпк в соседней галактике Большое Магелланово Облако. Несмотря на малую статистику

*E-mail: vpetkov@inr.ru

зарегистрированных нейтринных событий, изучение нейтринного сигнала от сверхновой 1987А позволило в целом подтвердить важную роль нейтрино в процессе взрыва массивных звезд [2].

Работающие в настоящее время нейтринные детекторы способны с высокой статистической точностью зарегистрировать нейтринный сигнал от сверхновой в нашей Галактике. Но такие события — вспышки сверхновых в нашей Галактике — являются достаточно редкими: по современным оценкам, они происходят 1–3 раза в столетие [3], что не противоречит имеющимся на сегодняшний день экспериментальным ограничениям. Из действующих нейтринных детекторов наибольшее время наблюдения за Галактикой на одной и той же установке имеет Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ), работающий по задаче поиска нейтринных вспышек от гравитационных коллапсов звезд в Галактике с 30 июня 1980 г. [4]. В пределах радиуса чувствительности БПСТ (≈ 20 кпк) находится $\approx 95\%$ звезд нашей Галактики. Чистое время наблюдения на БПСТ по данной задаче составляет 30,37 года за период с 30 июня 1980 г. по 31 декабря 2015 г., верхняя граница на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике равна 0,076 в год на 90 %-м доверительном уровне.

В то же время во всей видимой части Вселенной вспышки сверхновых происходят несколько раз в секунду. Таким образом, изотропный поток нейтрино от всех сверхновых во Вселенной является гарантированным потоком нейтрино от гравитационных коллапсов центральных ядер массивных звезд. Измерение характеристик потока таких нейтрино позволит протестировать модели коллапса ядер массивных звезд не только для событий в ближайших окрестностях нашей Галактики, но и на достаточно больших расстояниях (при красных смещениях больше или порядка 1). Кроме того, такие измерения позволят получить независимую оценку частоты взрывов сверхновых (которая пропорциональна темпу формирования массивных звезд) в зависимости от красного смещения.

Возможность регистрации изотропного нейтринного излучения от всех сверхновых во Вселенной (включая так называемые неудавшиеся сверхновые, завершившиеся образованием черной дыры) обсуждается в научном сообществе в течение уже нескольких десятилетий (см., например, [5, 6] и ссылки в этих работах). Поиск такого излучения входит в научную программу действующих и проектируемых детекторов в области нейтринной астрономии низких энергий.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ИЗОТРОПНЫЙ ПОТОК НЕЙТРИНО

Первые ограничения на изотропные потоки различных типов нейтрино (ν_e , $\bar{\nu}_e$, $\nu_{\mu+\tau}$, $\bar{\nu}_{\mu+\tau}$) были получены на сцинтилляционном детекторе LSD (90 т жидкого сцинтиллятора) за три года набора информации [7].

В дальнейшем поиск изотропного потока электронных антинейтрино проводился на водном черенковском детекторе Super-Kamiokande [8, 9] и сцинтилляционном детекторе KamLAND [10]. В обоих экспериментах для регистрации электронных антинейтрино используется реакция обратного бета-распада:



которая имеет наибольшее сечение и дает основное число событий в детекторе.

Масса мишени водного черенковского детектора Super-Kamiokande составляет 22,5 кт. Поиск изотропных электронных антинейтрино был проведен по экспериментальным данным детектора за чистое время набора информации 2853 сут (экспозиция 176 кт-лет). По этим данным были получены лучшие на сегодняшний день ограничения на изотропный поток электронных антинейтрино, которые в зависимости от модели спектра изотропного излучения находятся в диапазоне 2,8–3,1 $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для энергии выше 17,3 МэВ [9]. Эти ограничения уже достаточно близки к теоретическим предсказаниям изотропного потока электронных антинейтрино — для одной из моделей различие составляет всего $\sim 1,6$ раза.

Поиск изотропного потока электронных нейтрино был проведен на тяжеловодном черенковском детекторе SNO (1 кт тяжелой воды), для регистрации электронных нейтрино использовалась реакция взаимодействия с дейтерием



Полученный в этом эксперименте лучший верхний предел на изотропный поток электронных нейтрино с экспозицией 0,65 кт-лет составляет 70 $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для энергии в диапазоне 22,9–36,9 МэВ [11]. Это ограничение заметно превышает теоретические предсказания на изотропный поток электронных нейтрино (от 0,19 до 1,49 $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) для данного энергетического диапазона.

В работе [12] ограничение на диффузный поток электронных нейтрино было теоретически выведено из полученного в эксперименте Super-Kamiokande ограничения на поток электронных антинейтрино. Но такого рода ограничения зависят от целого ряда допущений, поскольку соотношения между изотропными потоками различных типов нейтрино зависят, в свою очередь, от модели нейтринного излучения при коллапсе ядра звезды и от конкретного сценария нейтринных осцилляций.

2. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОИСКА ИЗОТРОПНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ НЕЙТРИНО НА БПСТ

Новый, более жесткий, предел на изотропный поток электронных нейтрино может быть получен по экспериментальным данным БПСТ. БПСТ состоит из восьми плоскостей, сплошь покрытых стандартными сцинтилляционными детекторами. Пять внешних плоскостей полностью закрывают

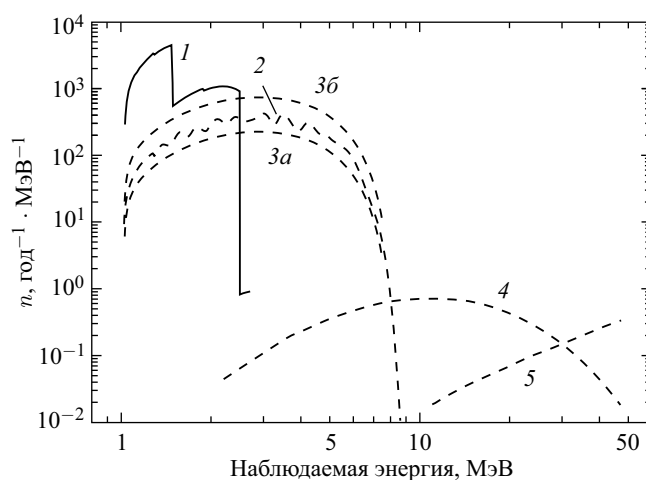
три внутренние плоскости, обеспечивая для них активную защиту от мюонов. На внутренних плоскостях БПСТ находятся 1200 детекторов, порог регистрации которых 8 МэВ. В этих детекторах содержится ~ 131 т сцинтиллятора, что соответствует $5,5 \cdot 10^{30}$ ядер углерода ^{12}C . Для поиска нейтринных взаимодействий в БПСТ (в том числе нейтринных всплесков от коллапсирующих звезд в Галактике) используются события со срабатыванием одного или двух рядом лежащих детекторов только на одной из внутренних плоскостей телескопа (при относительно небольших энергиях нейтрино/антинейтрино пробег вторичной частицы будет заключен в объеме одного детектора). Использование только внутренних плоскостей телескопа, несмотря на уменьшение массы рабочего вещества, позволяет существенно подавить фон: темп счета одиночных срабатываний (фоновых событий) трех внутренних плоскостей составляет $0,02 \text{ с}^{-1}$, в то время как для внешних плоскостей — $1,5 \text{ с}^{-1}$.

Для регистрации электронных нейтрино на БПСТ используется реакция взаимодействия нейтрино с ядром углерода мишени ^{12}C (порог реакции 17,3 МэВ), в результате которой рождается электрон и нестабильный изотоп азота ^{12}N . При распаде этого изотопа азота, время жизни которого составляет 15,9 мс, образуется углерод ^{12}C и позитрон с максимальной энергией 16,38 МэВ. Таким образом, события взаимодействия электронного нейтрино в детекторе имеют характерную сигнатуру — два последовательных срабатывания одного и того же детектора в определенном временном окне при отсутствии сигналов с других детекторов телескопа. При этом максимальное энерговыделение во втором срабатывании с учетом аннигиляции позитрона составляет 17,38 МэВ. На сегодняшний день экспозиция БПСТ по данной задаче составляет $\approx 1,6$ кт-лет, что примерно в 2,5 раза превышает экспозицию эксперимента SNO.

3. О ПОИСКЕ ИЗОТРОПНОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРОННЫХ АНТИНЕЙТРИНО В БУДУЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Одним из наиболее обсуждаемых будущих детекторов является многоцелевой нейтринный детектор LENA (Low Energy Neutrino Astronomy) с массой мишени (жидкого сцинтиллятора) 50 кт [13]. Детектор предполагалось разместить в шахте Пихасалми (центральная Финляндия) на глубине 1450 м. Диапазон измерений электронных антинейтрино изотропного потока в детекторе LENA составляет 9,7–25 МэВ, снизу он ограничен фоном реакторных антинейтрино, а сверху — фоном атмосферных антинейтрино. Ожидаемая скорость счета изотропных электронных антинейтрино в этом диапазоне составляет, по оценкам, 4–6 событий в год [14, 15].

В настоящее время в ИЯИ РАН ведутся исследования, связанные с разработкой проекта по созданию большого сцинтилляционного детектора (БСД)



Спектры позитронов реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ в БСД для массы мишени 5 кт (осцилляции учтены): 1 — от геонейтрино; 2 — от антинейтрино окружающих детектор реакторов; 3а, 3б — от антинейтрино гипотетического геореактора; 4 — от антинейтрино изотропного потока от взрывов сверхновых звезд во Вселенной; 5 — от атмосферных антинейтрино

с массой мишени 5–10 кт в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН [16]. Детектор предназначен для регистрации природных потоков нейтрино низкой энергии (до 100 МэВ) различного происхождения, в том числе геонейтрино, нейтрино от Солнца и вспышек сверхновых. Задача поиска изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и черных дыр, является одной из приоритетных задач БСД. На рисунке показаны ожидаемые спектры событий реакции (1) в детекторе для всех источников антинейтрино, в том числе от антинейтрино изотропного потока от взрывов сверхновых звезд во Вселенной (кривая 4). Так как потоки реакторных и атмосферных антинейтрино в БНО почти вдвое меньше, чем в месте предполагаемого размещения детектора LENA, диапазон измерений изотропных антинейтрино в БСД шире: 8–30 МэВ. В этом энергетическом диапазоне ожидаемая скорость счета от изотропного потока антинейтрино в БСД с массой мишени 5 кт составит около 1 события за год измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотропный поток нейтрино от всех сверхновых во Вселенной является гарантированным потоком нейтрино от гравитационных коллапсов центральных ядер массивных звезд. Поиск изотропного нейтринного излучения вхо-

дит в научную программу действующих и проектируемых детекторов в области нейтринной астрономии низких энергий. Лучшие ограничения на изотропный поток электронных антинейтрино, полученные на установке Super-Kamiokande, уже достаточно близки к теоретическим предсказаниям. В то же время лучшее ограничение на изотропный поток электронных нейтрино, полученное в эксперименте SNO, в десятки раз превышает теоретические предсказания. Ожидается, что нейтринные детекторы следующего поколения, такие как БСД и LENA, смогут зарегистрировать электронные антинейтрино изотропного потока.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Raffelt G. G.* Neutrinos and the Stars // Proc. of the Intern. School of Physics "Enrico Fermi". 2012. V. 182: Neutrino Phys. Astrophys. P. 61; arXiv:1201.1637.
2. *Имшенник В. С., Надежин Д. К.* Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория // УФН. 1988. Т. 156, вып. 4. С. 561.
3. *Adams S. M., Kochanek C. S., Beacom J. F., Vagins M. R., Stanek K. Z.* Observing the Next Galactic Supernova // Astrophys. J. 2013. V. 778. P. 164; arXiv:1306.0559.
4. *Novoseltseva R. V. et al. (BUST Collab.)*. The Search for Neutrino Bursts from Supernovae with Baksan Underground Scintillation Telescope // Part. Nucl. 2016. V. 47, Iss. 6. P. 1775.
5. *Домогацкий Г. В.* Возможности изучения частоты гравитационных коллапсов звезд во Вселенной с помощью регистрации изотропного потока электронных антинейтрино // Астрон. журн. 1984. Т. 61, вып. 1. С. 51.
6. *Lunardini C.* Diffuse Supernova Neutrinos at Underground Laboratories. arXiv:1007.3252.
7. *Aglietta M. et al. (LSD Collab.)*. Limits on Low-Energy Neutrino Fluxes with the Mont Blanc Liquid Scintillator Detector // Astropart. Phys. 1992. V. 1. P. 1.
8. *Malek M. et al. (Super-Kamiokande Collab.)*. Search for Supernova Relic Neutrinos at Super-Kamiokande // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 061101; arXiv:hep-ex/0209028.
9. *Bays K. et al. (Super-Kamiokande Collab.)*. Supernova Relic Neutrino Search at Super-Kamiokande // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 052007.
10. *Gando A. et al. (KamLAND Collab.)*. Search for Extraterrestrial Antineutrino Sources with the KamLAND Detector // Astrophys. J. 2012. V. 745. P. 193.
11. *Aharmim B. et al. (SNO Collab.)*. A Search for Neutrinos from the Solar *hep* Reaction and the Diffuse Supernova Neutrino Background with the Sudbury Neutrino Observatory // Astrophys. J. 2006. V. 653. P. 1545.

12. *Lunardini C.* The Diffuse Neutrino Flux from Supernovae: Upper Limit on the Electron Neutrino Component from the Non-Observation of Antineutrinos at SuperKamiokande // *Phys. Rev. D.* 2006. V. 73. P. 083009; arXiv:hep-ph/0601054.
13. *Wurm M., Beacom J. F., Bezrukov L. B. et al. (LENA Collab.).* The Next-Generation Liquid-Scintillator Neutrino Observatory LENA // *Astropart. Phys.* 2012. V. 35. P. 685; arXiv:1104.5620 [astro-ph.IM].
14. *Wurm M., von Feilitzsch F., Göger-Neff M., Hochmuth K. A., Undagoitia T. M., Oberauer L., Potzel W.* Detection Potential for the Diffuse Supernova Neutrino Background in the Large Liquid-Scintillator Detector LENA // *Phys. Rev. D.* 2007. V. 75. P. 023007; arXiv:astro-ph/0701305.
15. *Möllenberg R., von Feilitzsch F., Hellgartner D., Oberauer L., Tippmann M., Winter J., Wurm M., Zimmer V.* Detecting the Diffuse Supernova Neutrino Background with LENA // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. P. 032005; arXiv:1409.2240.
16. *Барабанов И.Р. и др. (колл. БСД).* Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН по изучению природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики. <http://www.inr.ac.ru/st/full.pdf>.