

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ПОД ЗЕМЛЕЙ НА БАКСАНСКОМ ПОДЗЕМНОМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ТЕЛЕСКОПЕ ИЯИ РАН

М. М. Кочкаров^{1,*}, *М. М. Болиев*¹, *И. М. Дзапарова*^{1,2},
*Р. В. Новосельцева*¹, *Ю. Ф. Новосельцев*¹, *В. Б. Петков*^{1,2},
*В. И. Волченко*¹, *Г. В. Волченко*¹, *А. Ф. Янин*¹

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

² Институт астрономии Российской академии наук, Москва

Представлены результаты изучения характеристик быстрых нейтронов, рождаемых мюонами космических лучей в окрестности Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ). В работе применена специальная методика изучения потока нейтронов по темпу образования нестабильного радиоактивного изотопа ^{12}B в результате (n, p) -реакции на ядрах углерода в органическом сцинтилляторе БПСТ. Согласно результатам обработки информации детектора за период с 2002 по 2015 г., было обнаружено $N_{^{12}\text{B}} = (337 \pm 2,5)$ двойных событий, отвечающих критериям отбора для реакции $^{12}\text{C}(n, p)^{12}\text{B}$. Оценка фона быстрых нейтронов с $E > 28,6$ МэВ на внутренних плоскостях детектора ($\Phi \propto 10^{-11} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), основанная на экспериментальных данных, отличается примерно на два порядка величины от полного потока нейтронов, предсказываемого теорией для БПСТ. Разница объясняется ослаблением потока нейтронов в сцинтилляторе внешних плоскостей детектора.

Estimation of the muon-induced neutron flux at a depth of 850 m w.e. on the internal planes of the Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST) is presented. A neutron background has been studied with a novel approach — using a production of a cosmogenic nuclide ^{12}B by muon-induced neutrons in an organic liquid scintillator. A sample of $N_{^{12}\text{B}} = (337 \pm 2.5)$ events satisfying the criteria for the reaction $^{12}\text{C}(n, p)^{12}\text{B}$ was obtained using the experimental data of BUST detector taken in 2002–2015. The estimated full fluxes of fast neutrons $\Phi \propto 10^{-11} \text{ sm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ are two orders of magnitude lower than expectations based on Monte Carlo simulation for the detector location. This can be explained by suppression of neutron flux in a scintillator of external planes.

PACS: 87.53.Bn

*E-mail: kochkarov@inr.ru

ВВЕДЕНИЕ

С целью повышения чувствительности детектора подземные физические установки оснащаются активной мюонной защитой в режиме антисовпадений. Однако это является плохим барьером для быстрых нейтронов, индуцированных мюонами в грунте за пределами защиты. Знание потока нейтронов имеет первостепенное значение для понимания фона большинства подземных физических экспериментов по поиску и регистрации нейтринных сигналов, двойного бета-распада, частиц темной материи и других редких событий. Сечения реакции для описанных явлений на много порядков ниже, чем у реакций с участием нейтронов. Нейтроны высоких энергий рождаются при прохождении мюонов космических лучей через грунт в окрестности детектора. Обладая большой длиной пробега, быстрые нейтроны способны достигать мишени детектора. На сегодняшний день быстрые нейтроны являются неустраняемым фоном для большинства подземных экспериментов, поскольку способны имитировать сигналы редких событий в области как низких, так и высоких энергий. Изучением фона быстрых нейтронов занимаются на многих подземных детекторах [1–3], также известны работы по прямому детектированию нейтронов от мюонов космических лучей под землей [4]. Однако присутствует значительная неопределенность в имеющихся теоретических предсказаниях и результатах экспериментов, обусловленная недостаточным количеством данных по сечению реакции с нейтронами в широких диапазонах энергии. Современные тенденции проектирования детекторов предполагают поиск материалов, способных к подавлению фона, и непосредственно связаны с экспериментами по изучению взаимодействия нейтронов с различными веществами. В настоящей работе представлены результаты исследования экспериментальных данных БПСТ по изучению потока быстрых нейтронов на внутренних плоскостях детектора. При обработке данных использованы новейшие данные экспериментов по измерению сечения реакции взаимодействия нейтронов с ядрами углерода.

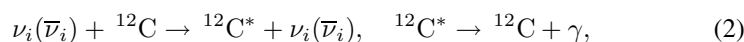
1. ЭКСПЕРИМЕНТ БПСТ

БПСТ является одной из крупнейших подземных физических установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Детектор [5] представляет собой модульную установку в форме параллелепипеда ($17 \times 17 \times 11$ м) с двумя дополнительными внутренними плоскостями. Все плоскости состоят из стандартных сцинтилляционных счетчиков, заполненных жидким органическим сцинтиллятором на основе уайт-спирита (C_nH_{2n+2} , $n \simeq 9$), с порогом срабатывания 8 МэВ. Детектор предназначен для решения широкого круга задач, в том числе регистрации нейтринных событий [6–8]. Одной из важнейших проблем, решенных на БПСТ, является регистрация нейтринного сигнала от

взрыва сверхновой с коллапсом ядра [9]. Для регистрации коллапса используется информация только с трех нижних горизонтальных плоскостей, состоящих из 1200 счетчиков с общей массой сцинтиллятора 130 т. Метод регистрации нейтринного сигнала основан на реакции обратного бета-распада



При средней энергии коллапсных антинейтрино $E_{\bar{\nu}_e} \simeq 12-15$ МэВ [10, 11] весь пробег позитрона из реакции (1) укладывается в пределах одного модуля установки. В информации с детектора такое событие будет отображаться как одиночный сигнал с одного из счетчиков при отсутствии сигналов по всем каналам от остальных модулей установки — так называемое одиночное срабатывание. Событие от коллапса сверхновой выглядит как серия одиночных срабатываний счетчиков в течение времени нейтринной вспышки. При этом внешние плоскости детектора выполняют роль активной антисовпадательной защиты. Наряду с обратным бета-распадом в счетчиках возможны реакции упругого рассеяния нейтрино на ядрах мишени:



следствием которых будут также одиночные срабатывания счетчиков. С другой стороны, аналогичные реакции с участием нейтронов способны имитировать сигналы от нейтрино, представляя значительный фон полезным сигналам ввиду большего сечения реакций.

В сцинтилляторе детектора возможны реакции неупругого взаимодействия нейтронов с углеродом. По версии пакета моделирования Geant4, при пороге счетчиков 8 МэВ наибольший вклад в сигналы от неупругих реакций с нейтронами вносит (n, p) -реакция на углероде с образованием ${}^{12}\text{B}$:



Особенностью реакций с образованием нестабильных изотопов является характерная сигнатура события в виде двух последовательных одиночных сигналов из одного и того же счетчика — двойное событие. Первое одиночное событие соответствует (n, p) -реакции с ядром углерода, второе — бета-распаду рожденного в первом событии нестабильного изотопа. Приведенная структура сигнала позволяет эффективно отделять двойные события, вызванные нейтронами, от одиночных событий — кандидатов на сигнал от реакции с нейтрино.

2. НАРАБОТКА ${}^{12}\text{B}$ В СЦИНТИЛЛЯТОРЕ

При анализе информации детектора на предмет наличия нейтринных сигналов производится выборка одиночных событий из всего объема данных. В полученном массиве отобранных одиночных событий проводится поиск

двойных событий, которые представляют собой пару одиночных сигналов из одного и того же счетчика, разделенных определенным временным интервалом. Критерии отбора формируются в зависимости от цели обработки данных. В настоящей работе предметом исследования являются двойные сигналы, которые относятся к реакции образования и последующего распада изотопа ^{12}B в сцинтиляторе БПСТ. Критерии отбора двойных событий учитывают время жизни изотопа ^{12}B , сечение реакции (3), модульную структуру детектора, особенности сбора информации со счетчиков. Для отбора двойных событий обрабатываются данные только внутренних плоскостей детектора, поскольку они являются мишенью при поиске нейтринного сигнала. Одиночные сигналы, формирующие двойное событие, должны принадлежать одному и тому же счетчику с интервалом времени не более пяти времен жизни $\tau_{12\text{B}}$ изотопа бора. С учетом частоты появления события (3) устанавливается ограничение на количество сигналов с одного счетчика — не более двух двойных событий в пределах 15-мин блока информации. В количество двойных событий вносят вклад собственные срабатывания счетчиков, обусловленные случайными пробоями в делителе фотоумножителя из-за дефектов пайки и старения элементов электроники.

Для выявления таких модулей делается допущение о равномерности потока нейтронов по всем внутренним плоскостям детектора. В этом случае распределение количества двойных событий по счетчикам должно удовлетворять распределению Пуассона. Аппроксимация Пуассоном распределения двойных событий по детекторам позволяет выявить модули, вышедшие из режима нормального функционирования в период проведения наблюдений. Сечения реакции (3), предсказываемые моделями Geant4, имеют максимальный разброс значений в интервале энергий от 15 до 100 МэВ. В связи с этим при отборе двойных событий верхний предел энерговыделения в счетчике, соответствующий максимальной энергии налетающего нейтрона, решено зафиксировать на уровне $E_n \leq 100$ МэВ. Максимальная энергия электрона при бета-распаде ^{12}B $E_\beta = 13,4$ МэВ, что должно соответствовать максимальному энерговыделению в счетчике при втором срабатывании. С учетом квантинг-фактора и неоднородности светосбора с объема счетчика полученные пределы по энерговыделению в сцинтиляторе принимают следующие значения: для первого события $E1_{\text{max}} \simeq 200$ МэВ, для второго — $E2_{\text{max}} \simeq 30$ МэВ.

Применение вышеперечисленных критериев отбора к обработке данных по одиночным срабатываниям позволяет получить набор двойных событий — кандидатов на сигналы от ^{12}B . Описанным методом была проведена обработка экспериментальных данных детектора БПСТ за период с 2002 по 2015 г. включительно. Чистое время наблюдения составило $t \simeq 12,72$ лет. Согласно результатам обработки, за время наблюдения было обнаружено 354 двойных события, отвечающих критериям отбора. Оценка наработанного за время наблюдения изотопа ^{12}B проводилась методом аппроксимации распределения

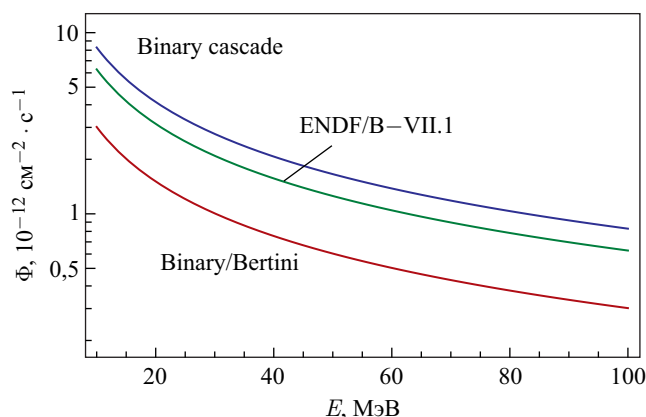
временных интервалов между одиночными сигналами, формирующими двойное событие, распадной кривой с фиксированным параметром τ . Нарботка изотопа ^{12}B нейтронами на внутренних плоскостях детектора, соответствующая минимуму χ^2 -распределения, составила $N_{^{12}\text{B}} = (337 \pm 2,5)$ на уровне достоверности 0,95.

3. ФОН НЕЙТРОНОВ НА ВНУТРЕННИХ ПЛОСКОСТЯХ БПСТ

Количество изотопа ^{12}B , образованного нейтронами в мишени детектора за время наблюдения t , можно представить в виде

$$N_{^{12}\text{B}} = nft \int_{E_{\text{thr}}}^{E_{\text{max}}} \sigma(E)j(E) dE, \quad (4)$$

где n — количество ядер мишени; f — эффективность регистрации; E_{thr} — пороговая энергия; E_{max} — максимальная энергия нейтронов; $\sigma(E)$ — сечение (n,p) -реакции; $j(E)$ — энергетический спектр нейтронов. Количество ^{12}C в мишени из расчета на 130 т сцинтиллятора внутренних плоскостей БПСТ составляет $n = 6 \cdot 10^{30}$ ядер. Эффективность регистрации на данном этапе работы оценена без моделирования Монте-Карло на уровне $f = 0,28$. Сечение (n,p) -реакции $\sigma(E)$ является плохо изученным параметром. В нашей предыдущей работе [12] из-за большого разброса теоретических предсказаний от различных моделей взаимодействия было использовано усредненное по всем моделям значение полного сечения. К началу проведения данной работы стали доступны результаты экспериментов по облучению образцов из углерода нейтронами в широком диапазоне значений энергии. В частности, коллаборацией n_TOF [13], в предположении, что при энергиях $E > 10$ МэВ спектр нейтронов ведет себя как $1/E$ [14], измерена величина полного сечения реакции (3). Она составила $\int_{13,6 \text{ МэВ}}^{10 \text{ ГэВ}} \sigma(E)/E dE = 35_{-5}^{+5}$ мб. Из сравнения данных эксперимента n_TOF с предсказаниями теоретических моделей [13] видно, что наиболее близки к экспериментальным данным предсказания ENDF B-VII.1, комбинационной модели Binary/Bertini (до 30 МэВ — Binary, после — Bertini) и Binary cascade. Назовем их «условно согласующимися». Из-за квенчинг-эффекта порог регистрации реакции (3) для счетчиков БПСТ составляет 28,6 МэВ, что не позволяет напрямую использовать измеренное экспериментом n_TOF полное сечение. Однако величину полного сечения можно подобрать, следуя предсказаниям «условно согласующихся» моделей. С учетом соотношения $j(E) \propto 1/E$ из формулы (4)



Энергетические спектры нейтронов на внутренних плоскостях детектора БПСТ на основе трех моделей взаимодействия из пакета Geant4. Модели отобраны в результате сравнения предсказаний с данными эксперимента коллаборации n_TOF [13]

получено выражение для энергетического спектра нейтронов:

$$j(E) = \frac{N_{12B}}{nft \int_{28,6 \text{ МэВ}}^{100 \text{ МэВ}} \sigma(E)/E dE} \frac{1}{E}. \quad (5)$$

На рисунке приведены спектры нейтронов для внутренних плоскостей детектора на основе предсказаний, наиболее близких к экспериментальным данным моделей n_TOF. Путем интегрирования энергетических спектров от порога (порог счетчика для реакции (3) $E_{\text{thr}} = 28,6$ МэВ) до 100 МэВ проводится расчет полного потока нейтронов для выбранных моделей в указанном интервале энергии: $\Phi_{\text{Bin}} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Phi_{\text{Endf}} = 4,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Phi_{\text{Bin/Ber}} = 9 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Для сравнения полученных значений с предсказаниями теории воспользуемся результатами моделирования FLUKA из работы [15]. Согласно [15], зависимость полного потока нейтронов от глубины, по данным розыгрыша для нескольких подземных лабораторий, успешно аппроксимируется соотношением $\Phi_n(h_0) = P_0(P_1/h_0) \exp(-h_0/P_1)$, где $P_0 = (4 \pm 1,1) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $P_1 = (0,86 \pm 0,05) \text{ км в.э.}$ Согласно этой модели, для глубины установки БПСТ (850 м в.э.) полный поток нейтронов составляет $\Phi_n(0,85) = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Различие в значениях полного потока, полученного на основе экспериментальных данных и предсказываемого моделированием FLUKA, объясняется поглощением и замедлением нейтронов в сцинтиляторе внешних плоскостей БПСТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение потока быстрых нейтронов, рождаемых мюонами космических лучей в окрестности детектора БПСТ, было проведено в рамках задачи по изучению фона одиночных срабатываний счетчиков при поиске нейтринного сигнала от взрыва сверхновой с коллапсом ядра. Путем применения специальной методики обработки данных для внутренних плоскостей БПСТ получены такие характеристики быстрых нейтронов, как полный поток и энергетический спектр в диапазоне от 28,6 до 100 МэВ. Внешние плоскости БПСТ, используемые при поиске нейтринного сигнала в качестве активной защиты в режиме антисовпадений, значительно подавляют поток нейтронов, идущий со стороны грунта. Следующий этап работы предполагает измерение потока нейтронов на самих внешних плоскостях детектора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-32-00312.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abe S. et al. (KamLAND Collab.).* Production of Radioactive Isotopes through Cosmic Muon Spallation in KamLAND // *Phys. Rev. C.* 2010. V. 81. P. 025807.
2. *Bellini G. et al. (BOREXINO Collab.).* Muon and Cosmogenic Neutron Detection in Borexino // *JINST.* 2011. V. 6. P. 05005.
3. *Reichhart L. et al.* Measurement and Simulation of the Muon-Induced Neutron Yield in Lead // *Astropart. Phys.* 2013. V. 47. P. 67.
4. *Zhang C., Mei D.-M.* Measuring Muon-Induced Neutrons with Liquid Scintillation Detector at Soudan Mine // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 90. P. 122003.
5. *Alekseev E.N. et al. (BUST Collab.).* The Baksan Underground Scintillation Telescope // *Phys. Part. Nucl.* 1998. V. 29. P. 254.
6. *Boliev M.M. et al. (BUST Collab.).* Observation of Upward Through-Going Muons with the Baksan Detector: An Update // *Nucl. Phys. B.* 1999. V. 70. P. 371.
7. *Novoseltseva R.V. et al. (BUST Collab.).* The Search for Neutrino Bursts from Core Collapse Supernovae at the Baksan Underground Scintillation Telescope // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2011. V. 75, Iss. 3. P. 419.
8. *Novoseltseva R.V. et al. (BUST Collab.).* The Search for Neutrino Bursts from Supernovae with Baksan Underground Scintillation Telescope // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47. P. 1775–1785.
9. *Alekseev E.N. et al. (BUST Collab.)* // *Phys. Lett. B.* 1988. V. 205. P. 209.
10. *Achkasov V.M., Bakatanov V.N., Novoseltsev Yu.F. et al.* An Investigation of the Energy Spectrum and Inelastic Muon Interaction at the Baksan Underground Scintillation Telescope // *Bull. USSR Acad. Sci. Phys.* 1986. V. 50. P. 2224.

11. *Имиенник В. С., Надежин Д. К.* Конечные стадии эволюции звезд и вспышки сверхновых // Итоги науки и техники. Сер. «Астрономия». 1982. Т. 21. С. 63.
12. *Kochkarov M. M. et al. (BUST Collab.)*. Neutron Flux Measurement Using Activated Radioactive Isotopes at the Baksan Underground Scintillation Telescope // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47. P. 1794–1802.
13. *Žugec P. et al. (n_TOF Collab.)*. Measurement of the $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ Cross Section at n_TOF at CERN by In-Beam Activation Analysis // Phys. Rev. C. 2014. V. 90. P. 021601.
14. *Мальгин А. С., Ряжская О. Г.* Нейтроны от мюонов под землей // ЯФ. 2008. Т. 71, № 10. С. 1800.
15. *Mei D.-M., Hime A.* Muon-Induced Background Study for Underground Laboratories // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 053004.