

ИЗМЕРЕНИЕ СЛАБЫХ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ В МОДАНЕ С ПОМОЩЬЮ ЙОДСОДЕРЖАЩИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

© 2019 г. Д. В. Пономарев^a, З. Каланинова^{a,b}, Д. В. Медведев^a, С. В. Розов^a, И. Е. Розова^a,
В. В. Тимкин^a, Д. В. Философов^a, К. В. Шахов^a, Е. А. Якушев^a

^a Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^b Department of Nuclear Physics and Biophysics, Comenius University,
Bratislava, Slovakia

Поступила в редакцию 08.10.2018 г.

После доработки 19.10.2018 г.

Принята к публикации 15.11.2018 г.

Представлены первые результаты измерений нейтронного потока в подземной лаборатории LSM (Модан, Франция) с помощью нового чувствительного метода. Регистрация нейтронов происходит за счет задержанных $\gamma\gamma$ -совпадений в реакции $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$. Показано, что метод позволяет регистрировать потоки тепловых нейтронов на уровне 10^{-6} нейтронов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

DOI: 10.1134/S003281621903008X

ВВЕДЕНИЕ

В современной физике важным направлением исследований является поиск редких событий в низкофоновых экспериментах, выполняемых в глубоких подземных лабораториях, где достигается значительное подавление фона, обусловленного космическими лучами. К таким экспериментам относятся многочисленные нейтринные эксперименты, поиск безнейтринной моды двойного бета-распада, поиск частиц темной материи и сверхтяжелых элементов в природе и др. При проведении поиска редких процессов важной задачей является учет вклада нейтронов в общий результат измерений. При этом основной экспериментальной трудностью является необходимость регистрации потоков нейтронов на уровне ниже 10^{-5} нейтронов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При таких низких потоках количество регистрируемых нейтронных событий, даже с наиболее чувствительными ^3He -счетчиками, составляет не более нескольких штук в час [1], что приводит к необходимости учета и подавления собственного фона таких детекторов. При этом из-за высокой стоимости и ограничения поставок ^3He такие детекторы в настоящее время не являются легкодоступными.

Альтернативой ^3He -детекторам являются, например, сцинтилляторы с гадолинием [2] или ^6Li [3]. Основной экспериментальной трудностью при использовании сцинтилляторов для реги-

страции редких нейтронных событий является их большая чувствительность к γ - и мюонному фону.

Метод, о котором пойдет речь ниже, позволяет дискриминировать нейтронные события и поэтому может быть использован для регистрации низких потоков нейтронов в подземных лабораториях. В данной работе представлены первые результаты экспериментальной проверки метода в подземной лаборатории LSM (Модан, Франция) вблизи установки EDELWEISS [4], с помощью которой выполняется прямой поиск слабозаимодействующих частиц небарионной темной материи (WIMP). Для данного эксперимента точная информация о нейтронном фоне является основой для корректной интерпретации получаемых данных [5].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Новый чувствительный метод регистрации нейтронов основан на использовании йодсодержащих сцинтилляторов. В результате захвата теплового нейтрона ядром йода (сечение реакции 6.2 б [6]), содержащегося в NaI(Tl)-детекторе, образуется ядро ^{128}I в возбужденном состоянии с энергией 6.8 МэВ. При разрядке в основное состояние значительная часть распадов проходит через уровень 137.8 кэВ с периодом полураспада $T_{1/2} = 845$ нс [6], что дает возможность регистрировать нейтроны по количеству задержанных $\gamma\gamma$ -совпадений. Ис-

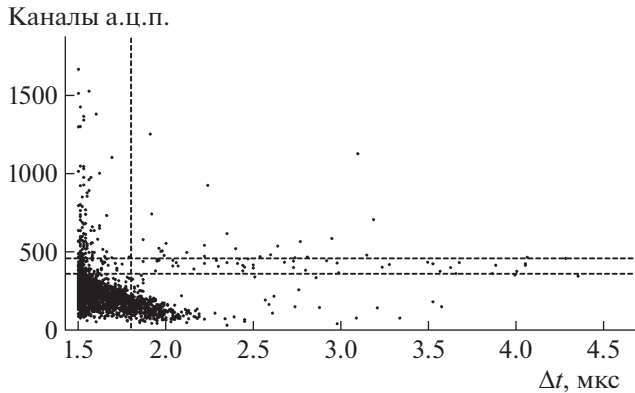


Рис. 1. Задержанные события (точки), зарегистрированные NaI(Tl)-детектором в присутствии источника нейтронов. Δt – время задержки. Штриховой линией выделена область интереса в диапазоне от 1.8 до 5 мкс. Большое число событий ниже области интереса – постимпульсы фотоэлектронного умножителя.

пользование техники задержанных совпадений с временным окном в несколько микросекунд позволяет отделять нейтронные события от фоновых с большой эффективностью. Учитывая тот факт, что фон случайных совпадений находится в почти квадратичной зависимости от общего фона, использование метода становится особенно эффективным при проведении низкофоновых измерений. Более подробно метод описан в [7].

В апреле 2017 г. начались тестовые измерения нейтронного потока в подземной лаборатории LSM с помощью указанного метода. Для этих целей использовался NaI(Tl)-детектор массой 720 г, помещенный в медно-свинцовую защиту. Энергетическая шкала была откалибрована по γ -линиям в спектре Th с использованием торийсодержащей проволоки. Параметры отбора задержанных $\gamma\gamma$ -совпадений (т.е. нейтронных событий) были получены с помощью слабого AmBe-источника с активностью 20 нейтронов/с (рис. 1). Факт регистрации нейтрона определялся как задержанное событие с энергией 137 кэВ, что соответствует каналам аналого-цифрового преобразователя (АЦП) от 380 до 460 (рис. 2). В данном интервале каналов было найдено 39 из 75 (~50%) всех зарегистрированных в ходе калибровочных измерений нейтронных событий, при этом предварительная оценка отношения количества нейтронных событий к фону случайных совпадений составляла 1 : 1. Поиск задержанных событий, связанных с нейтронами, осуществлялся во временном диапазоне 1.8–5 мкс. Как видно из рис. 1, использованию окна задержки, начинающегося ранее 1.8 мкс, препятствуют многочисленные постимпульсы фотоэлектронного умножителя. Для контроля фона задер-

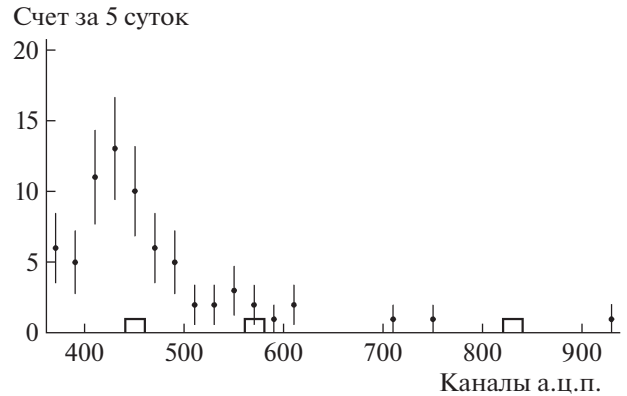


Рис. 2. Задержанные события, зарегистрированные NaI(Tl)-детектором за 5 дней измерений в присутствии слабого источника нейтронов. Точками с ошибками обозначены события с окном выборки 1.8–5 мкс. Сплошной линией показаны задержанные совпадения с окном 11.8–15 мкс. Диапазон каналов от 380 до 460 соответствует энергии 137 кэВ.

жанных совпадений использовалось временное окно от 11.8 до 15 мкс.

Непосредственно измерения фонового потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории были начаты 3 апреля 2017 г. К январю 2018 г. было набрано 260.45 дней данных.

В результате анализа накопленных данных было обнаружено 70 задержанных событий в области интереса (рис. 3). Значение фона случайных совпадений для временного окна длительностью 3.2 мкс можно экспериментально оценить по числу задержанных событий во временном окне, значительно (на много периодов распада уровня) сдвинутом от мгновенного события. Так, в накопленных экспериментальных данных в интервале задержек от 11.8 до 15 мкс было обнаружено 37 событий. Данное значение находится в полном согласии с расчетной величиной, составившей 34 события и определенной из количества одиночных событий во всем спектре и в области пика 137 кэВ. Высокое значение фона случайных совпадений обусловлено присутствием в используемом NaI(Tl)-детекторе ^{40}K на уровне ~3 Бк, что является общей проблемой ранних поколений таких детекторов (который был доступен на момент проведения представляемых тестовых измерений). В настоящее время данная проблема устранена.

С учетом разницы между общим числом задержанных событий и величиной фона, а также эффективности детектора [7] измеренный поток тепловых нейтронов составил $(2.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-6}$ нейтронов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при определяющем вкладе в неопределенность полученной величины низкой

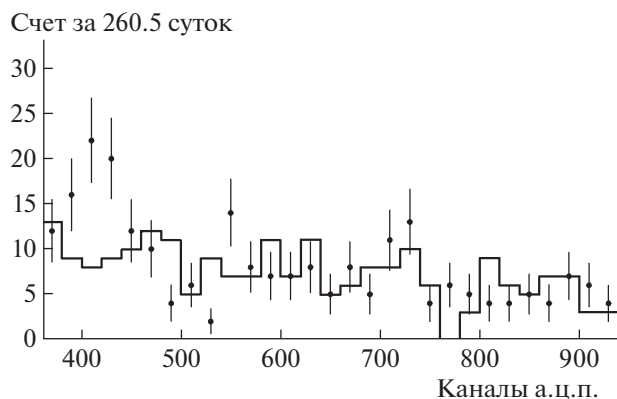


Рис. 3. Задержанные события, зарегистрированные NaI(Tl)-детектором при измерении фона. Диапазон каналов от 380 до 460 соответствует энергии 137 кэВ. Точками с ошибками обозначены события с окном выборки 1.8–5 мкс. Сплошной линией показаны задержанные совпадения с окном 11.8–15 мкс.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных измерений показана принципиальная возможность регистрации йодсодержащими сцинтилляторами низких нейтронных потоков на уровне 10^{-6} нейтронов \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$. При использовании низкофоновых детекторов с меньшим содержанием ^{40}K и массой около 100 кг возможно измерение потока нейтронов на уровне ниже 10^{-8} нейтронов \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$.

Авторы работы выражают благодарность дирекции и техническому персоналу подземной лаборатории LSM за помощь в проведении измерений. Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00159 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розов С.В., Бруданин В.Б., Лубашевский А.В., Семих С.С., Философов Д.В., Якушев Е.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 4. С. 500.
2. Du Q., Lin S.T., Liu S.K., Tang C.J., Wang L., Wei W.W., Wong H.T., Xing H.Y., Yue Q., Zhu J.J. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A. 2018. V. 889. P. 105. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.098>
3. Whitney C.M., Soundara-Pandian L., Johnson E.B., Vogel S., Vinci B., Squillante M., Glodo J., Christianfile J.F. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A. 2015. V. 784. P. 346. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.022>
4. EDELWEISS collaboration Armengaud E. et al. // Journal of Instrumentation. 2017. V. 12. Issue 08. P08010. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/08/P08010>
5. EDELWEISS collaboration. Armengaud E. et al. // Astroparticle Physics. 2013. V. 47. P. 1.
6. Table of Isotopes. 8th ed. / Ed by R. Firestone and V.S. Shirley. NY.: John Wiley, 1998.
7. Yakushev E., Rozov S., Drokhllyansky A., Filosofov D., Kalaninova Z., Timkin V., Ponomarev D. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A. 2017. V. 848. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.12.022>

скорости счета нейтронов при относительно высоком фоне случайных совпадений.

Для проверки результатов одновременно с вышеописанными измерениями в непосредственной близости от места их проведения выполнялись измерения потоков нейтронов с помощью двух низкофоновых ^3He -детекторов [1]. За все время измерений были зарегистрированы потоки $(2.3 \pm 0.1^{\text{stat}} \pm 0.2^{\text{sys}}) \cdot 10^{-6}$ и $(3.1 \pm 0.1^{\text{stat}} \pm 0.3^{\text{sys}}) \cdot 10^{-6}$ нейтронов \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$. Важно отметить тот факт, что детектор, зарегистрировавший наибольший поток нейтронов, находился ближе к стене лаборатории, остаточная естественная радиоактивность материалов которой является доминирующим источником нейтронов в подземной лаборатории. В общем, наблюдается удовлетворительное согласие, в рамках ошибок измерений, между потоками нейтронов, измеренными NaI(Tl)-детектором и ^3He -детекторами.