

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОСТИ И СПЕКТРА ВНУТРЕННЕГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ^{51}Cr

*В. В. Горбачев**, *В. Н. Гаврин*, *Т. В. Ибрагимова*,
А. В. Калихов, *Ю. М. Малышкин*, *А. А. Шихин*

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

По измерениям спектра внутреннего тормозного излучения предполагается определять активность источника ^{51}Cr в эксперименте BEST по поиску стерильных нейтрино. Описаны измерения активности и спектра внутреннего тормозного излучения с точечными источниками ^{51}Cr малой активности на германиевом ППД. Обсуждаются точность и погрешности применения метода.

It is assumed to determine the activity of the ^{51}Cr source in the BEST experiment, exploring sterile neutrinos, by measuring the spectrum of internal bremsstrahlung. The paper describes the measurement of activity and spectrum of internal bremsstrahlung with low-activity point sources of ^{51}Cr by germanium SCD. The accuracy and errors of the method are discussed.

PACS: 29.25.Rm; 07.05.Kf; 29.30.Kv; 29.25.-t

ВВЕДЕНИЕ

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН готовится эксперимент BEST, в котором будут исследоваться осцилляционные переходы электронных нейтрино в стерильные состояния [1], указания на которые были получены в ряде экспериментов [2], в том числе в четырех калибровочных экспериментах на галлиевых мишенях солнечных нейтринных детекторов SAGE и GALLEX с интенсивными искусственными источниками нейтрино [3–6]. В эксперименте BEST галлиевая мишень SAGE, разделенная на две независимые зоны, будет облучаться монохроматическими нейтрино от источника ^{51}Cr активностью 3 МКи. Возможности эксперимента BEST по определению параметров предполагаемых осцилляций $\nu_e \rightarrow \nu_x$ зависят от погрешностей измерений. Одной из составляющих полной систематической погрешности является неопределенность активности нейтринного источника ^{51}Cr . Активность

*E-mail: vvgor_gfb1@mail.ru

источника будет измеряться двумя независимыми методами, точность которых, как предполагается, будет выше 1 %. Первый метод — калориметрический, в котором измеряется выделение тепла от источника в калориметре [7]. Этот метод использовался для измерений активности во всех калибровочных галлиевых экспериментах с источниками.

Второй метод — спектрометрический, в котором активность будет определяться по измерению спектра фотонов от источника [8]. Этот метод будет применен впервые, и в данной работе исследуются некоторые аспекты спектрометрического метода. В частности, метод восстановления спектров, т. е. исключение влияния детектора, который также дает возможность измерения спектра внутреннего тормозного излучения (ВТИ) ^{51}Cr .

1. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ

Фотонное излучение ^{51}Cr состоит из двух частей: фотонной линии 320 кэВ интенсивностью 0,1 распад $^{-1}$ и непрерывного спектра ВТИ до 750 кэВ с суммарной интенсивностью $\sim 3,8 \cdot 10^{-4}$ распад $^{-1}$ [3].

Хромовый источник будет иметь объем ~ 1 л, и распределение активности в нем может быть сильно неравномерным. Поэтому при измерении активности по интенсивности линии 320 кэВ погрешность будет велика.

В спектрометрическом методе активность находится из решения системы уравнений $S_j = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ij} B_i$, где S_j — сигнал, регистрируемый в детекторе в области энергий E_j , собираемый из N частей, на которые мысленно разбивается источник. Вероятности ε_{ij} регистрации фотонов с энергией E_j , рождаемых в каждой части i источника, вычисляются по известной геометрии относительного расположения источника и детектора. Активность источника определяется как сумма активностей B_i каждой части источника. Для того чтобы система уравнений имела решение, необходимо, чтобы число энергетических интервалов в регистрируемом спектре было не меньше N , т. е. необходимо использовать детектор с высоким энергетическим разрешением, например германиевый ППД.

Подробное описание метода приведено в работе [8].

2. ИЗМЕРЕНИЯ С ДВУМЯ ТОЧЕЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ^{51}Cr

Для того чтобы проверить возможность измерения спектра ВТИ ^{51}Cr , были проведены измерения с двумя точечными источниками ^{51}Cr малой активности — 1 ГБк и 10 кБк. Излучение от источников попадало в кристалл детектора, проходя предварительно через отверстие в свинцовом коллиматоре. Коллиматор выделяет на поверхности кристалла детектора малую

область, в пределах которой фотоны одной энергии имеют одинаковую вероятность регистрации.

С источником 10 кБк были проведены измерения полной активности в детекторе NaI в условиях 4π -геометрии. При сравнительно малой активности этого источника скорость счета детектора не искажалась наложениями импульсов, и активность была измерена с точностью $\sim 0,5\%$.

По соотношению скорости счета событий в пике 320 кэВ в спектрах обоих источников, зарегистрированных в ППД, с точностью 3,3% получена активность источника 1 ГБк, который использовался для измерения спектра ВТИ.

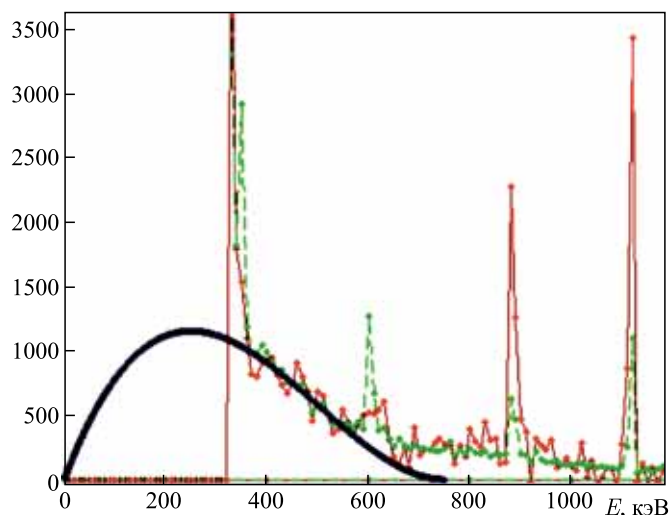
3. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ВТИ

Измеряемые в ППД спектры импульсов отличаются от фотонных спектров в источниках излучения из-за неполного поглощения части фотонов в кристалле детектора. Это обстоятельство создает серьезные проблемы для анализа измерений непрерывных спектров фотонов, таких как спектр ВТИ. Для детекторов с высоким разрешением может быть применена процедура восстановления спектров, которая удаляет части спектров, соответствующие неполному поглощению фотонов, используя функции отклика — набор спектров импульсов в детекторе от монохроматических источников фотонов разных энергий [8].

Функции отклика были рассчитаны методом Монте-Карло и скорректированы по результатам калибровок различными стандартными источниками (^{137}Cs , ^{22}Na и др.).

Результаты измерений спектров импульсов от хромового источника приведены на рисунке, на котором вместе с исходным спектром показан спектр, полученный после проведения процедуры восстановления. Со стороны малых энергий спектры ограничены линией 320 кэВ, которая в ~ 300 раз интенсивнее суммарного спектра ВТИ. В области выше 320 кэВ кроме непрерывного спектра ВТИ ^{51}Cr выделяются линии 889 и 1120 кэВ от примесей ^{46}Sc и ^{182}Ta , образовавшихся в образце при нейтронном облучении в атомном реакторе вместе с ^{51}Cr .

В области энергий 640 кэВ виден широкий пик от наложения событий от 320-кэВ фотонов. Таким образом, наблюдаемая часть спектра ВТИ ^{51}Cr находится в пределах от 360 до 580 кэВ. Приведенная на рисунке рассчитанная кривая ВТИ [9] хорошо согласуется с формой восстановленного спектра в этом интервале энергий. Активность источника, полученная из аппроксимации спектра ВТИ в этом интервале, в пределах 6% совпадает с активностью, полученной из сравнения интенсивностей источников в линии 320 кэВ (см. разд. 2).



Спектры событий в ППД от ^{51}Cr : штриховая линия — исходный зарегистрированный спектр; сплошная — восстановленный спектр; толстая — аппроксимация спектра ВТИ

Именно указанные два обстоятельства — форма восстановленного спектра и полученная из аппроксимации активность источника, совпадающие с теоретическими предсказаниями, дают основание полагать, что в измерениях действительно был получен спектр ВТИ ^{51}Cr .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Большие неопределенности, с которыми был измерен спектр ВТИ ^{51}Cr , связаны с большой интенсивностью в линии 320 кэВ. Провести в таких условиях точные измерения непрерывного спектра ВТИ, как показано в данной работе, невозможно.

Вместе с тем измерения спектра ВТИ от ^{51}Cr активностью 3 МКи в эксперименте BEST будут проводиться в условиях, когда источник будет помещен в защитную оболочку из 2,5 см вольфрама. Относительная интенсивность в линии 320 кэВ и ВТИ при этом уменьшается с ~ 300 до 1,5 раза, вследствие чего, во-первых, диапазон измерений спектра ВТИ будет расширен до интервала 320–750 кэВ и, во-вторых, статистика регистрируемого спектра ВТИ будет значительно больше, что позволит провести точные измерения активности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-02-12075_офи-м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев В. В. и др. Поиск осциллирующих электронных нейтрино на короткой базе в экспериментах SAGE и Bogexino с искусственным источником нейтрино // ЯФ. 2013. Т. 76, № 12. С. 1591.
2. Kopp J. et al. Sterile Neutrino Oscillations: The Global Picture. arXiv:1303.3011 [hep-ph].
3. Abdurashitov J. N. et al. Measurement of the Response of a Gallium Metal Solar Neutrino Experiment to Neutrinos from the ^{51}Cr Source // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2246.
4. Abdurashitov J. N. et al. Measurement of the Response of a Ga Solar Neutrino Experiment to Neutrinos from the ^{37}Ar Source // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 045805.
5. Hampel W. et al. Final Results of the ^{51}Cr Neutrino Source Experiments in GALLEX // Phys. Lett. B. 1998. V. 420. P. 114.
6. Anselmann P. et al. First Results from the ^{51}Cr Neutrino Source Experiment with GALLEX Detector // Phys. Lett. B. 1995. V. 342. P. 440.
7. Veretenkin E. P. et al. Calorimetric Method for Determination of ^{51}Cr Neutrino Source Activity // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78, No. 14. P. 1606.
8. Горбачев В. В., Мальшикин Ю. М. Определение активности радиоактивных источников по измерениям непрерывного спектра γ -излучения // ПТЭ. 2015. № 3. С. 110.
9. Anderson E., Wheeler G. W., Watson W. W. Inner Bremsstrahlung Associated with K Capture in ^{37}Ar // Phys. Rev. 1953. V. 90, No. 4. P. 606.