

Построение функции отклика детектора γ -квантов для реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14 МэВ

А. В. Гореликов^{1,*}, Д. Н. Грозданов^{2,4}, Ю. Н. Копач², Т. Ю. Третьякова³,
Н. А. Фёдоров^{1,2}, С. Б. Дабылова^{2,5}, Д. К. Колядко⁶

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка,
Объединенный институт ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ).
Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

⁴Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук (ИЯИЯЭ БАН)
Болгария, 1784, София, бул. Цариградское шоссе, д. 72

⁵Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва
Казахстан, 010000, Астана, ул. К. Мунайтпасова, д. 5

⁶Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, д. 30

(Статья поступила 28.03.2019; Подписана в печать 01.04.2019)

Работа посвящена определению функции отклика BGO детектора для γ -излучения при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14,1 МэВ. Проведено моделирование функции отклика методом Монте-Карло, который позволяет учесть все возможные механизмы взаимодействия γ -квантов с веществом, а также геометрические особенности детектора. Для всех компонент функции подбран аналитический вид энергетических зависимостей и определены параметры в случае регистрации γ -квантов с энергиями в диапазоне от 500 кэВ до 10 МэВ.

PACS: 29.40.Mc

УДК: 539.122.04

Ключевые слова: функция отклика, рассеяние Комптона, BGO детектор гамма-излучения, метод Монте-Карло.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys) в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) исследуются ядерные реакции, происходящие под действием нейтронов с энергией 14.1 МэВ. Процессы неупругого рассеяния быстрых нейтронов имеют большое значение как для фундаментальных исследований в области ядерной физики и ядерной астрофизики, так и в области прикладных исследований, в частности, в области ядерной энергетики [1]. Конструкция экспериментальной установки включает в себя кольцевую детектирующую систему и позволяет измерять угловое распределение γ -квантов с высокой точностью [2, 3]. Информация об этих распределениях дает возможность протестировать модели, описывающие нейтрон-ядерные реакции, и необходима для повышения точности быстрого элементного анализа.

При обработке данных от детекторов γ -излучения с недостаточно высоким разрешением задача точного определения количества событий, соответствующих регистрации γ -квантов с определенной энергией, ста-

новится нетривиальной. Из-за многообразия физических процессов, происходящих при взаимодействии γ -квантов с веществом детектора, происходят как уширение пика полного поглощения энергии γ -кванта (фотопика), так и формирование различных компонент в энергетическом спектре. Для решения этой проблемы необходимо определить функцию отклика детектора γ -квантов, учитывающую наиболее значимые процессы, происходящие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом детектора. Экспериментальное получение функции отклика требует значительного количества источников монохроматического γ -излучения и занимает продолжительное время, поэтому в последние годы для расчета функции отклика детекторов широкое распространение получил метод Монте-Карло [4].

Целью данной работы является построение функции отклика, позволяющей аппроксимировать энергетические спектры γ -квантов, получаемые в экспериментах на установке TANGRA. Такая функция имеет семь компонент и учитывает комптоновское рассеяние γ -квантов в детекторе, а так же эффект образования электрон-позитронных пар с возможностью последующего вылета аннигиляционных фотонов [5]. Для каждой из компонент установлены зависимости подгоночных функций от энергии налетающих γ -квантов, а также получены значения параметров этих функций для $E_\gamma = 6000$ кэВ.

*E-mail: gorelikov.av15@physics.msu.ru

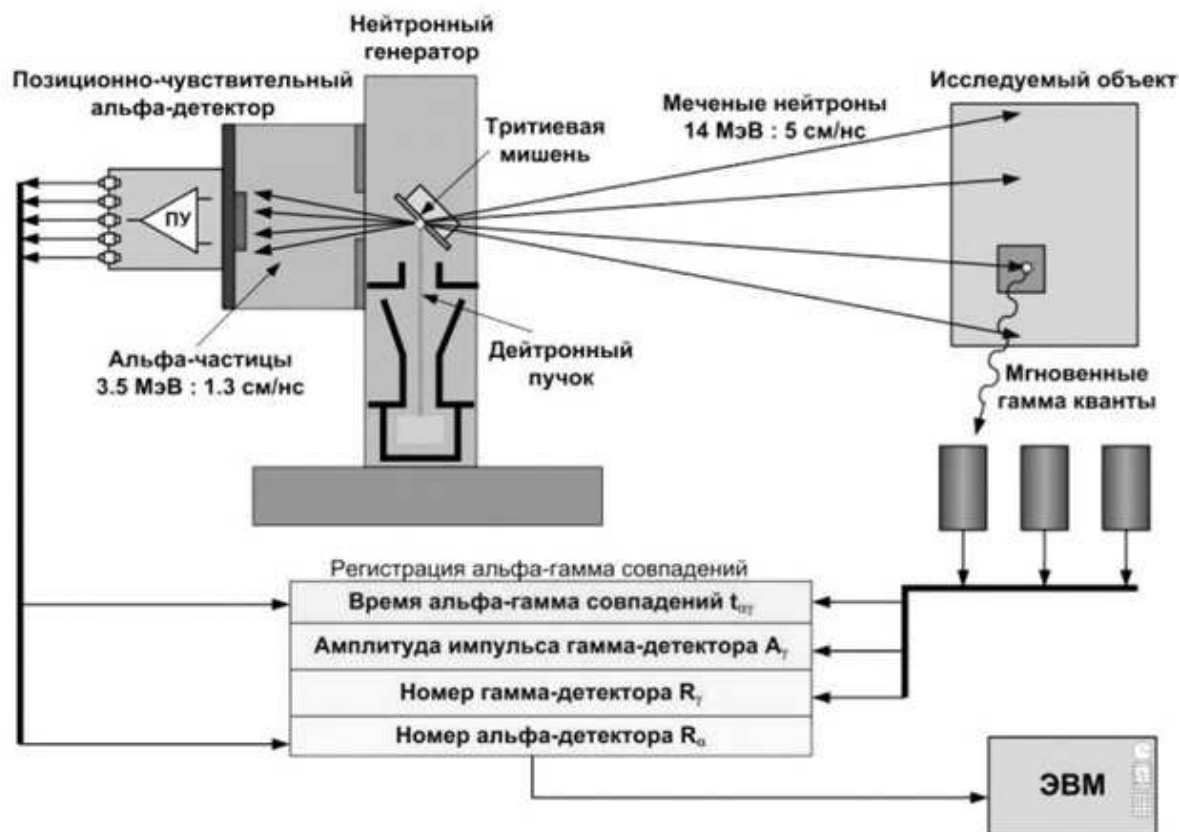


Рис. 1: Принципиальная схема эксперимента TANGRA

1. СХЕМА УСТАНОВКИ

Принципиальная схема эксперимента TANGRA показана на рис. 1. Для облучения мишени потоком быстрых нейтронов используется генератор ИНГ-27, в основе работы которого лежит реакция $d + t = \alpha(3.5 \text{ МэВ}) + n(14.1 \text{ МэВ})$. Дейтроны с энергией 100 кэВ сталкиваются с мишенью, обогащенной тритием. В результате реакции образуются нейтроны с энергией 14.1 МэВ и α -частицы, вылетающие в противоположном нейтронам направлении. Альфа-частицы регистрируются пиксельным детектором, расположенным внутри генератора [2].

Нейтроны, в свою очередь, взаимодействуют с исследуемой мишенью, и в результате процесса их неупругого рассеяния возникают γ -кванты, которые регистрируются системой из 18 сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BGO. Энергетическое разрешение данных детекторов для энергий γ -квантов 662 кэВ и 4–5 МэВ составляет 12% и 4%, соответственно. Разрешение по времени для γ -детекторов составляет около 3 нс.

Регистрация γ -квантов в совпадении с α -частицами позволяет реализовать так называемый метод меченых нейтронов (ММН), позволяющий установить соответствие между испущенными нейтронами и зарегистри-

рованными γ -квантами [1, 6].

Энергетический спектр γ -квантов может быть разложен на отдельные компоненты, и их корректный учет позволит улучшить определение количества зарегистрированных γ -квантов за счет качественного описания «подложек» под фотопиками (рис. 2). Каждая из компонент спектра аппроксимируется соответствующей ей функцией. Функция отклика детектора, определяемая в данной работе, представляет собой сумму этих компонент и описывает спектр регистрируемых фотонов.

Использование ММН позволяет существенно снизить вклад фоновых событий в получаемые γ -спектры, и поэтому при построении функции отклика детектора взаимодействие нейтронов с веществом детектора не учитывается.

В программе, моделирующей реакции, происходящие в эксперименте, была учтена геометрия установки и расположение γ -детекторов относительно исследуемого образца.

2. ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА γ -ДЕТЕКТОРА

В данной работе определяется функция отклика детекторов BGO для монохроматических пучков γ -

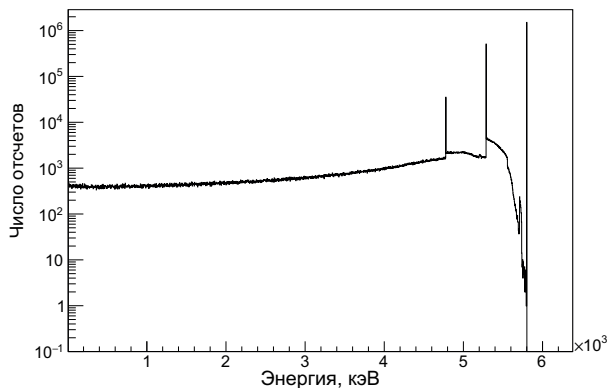


Рис. 2: Энергетический спектр для потока γ -квантов с энергией 6000 кэВ

квантов с энергией $E_\gamma = 6000$ кэВ.

Функция отклика детектора на монохроматическое излучение характеризует вероятность передачи чувствительному объему детектора энергии E при попадании в него γ -кванта с энергией E_γ . Определение функции отклика детектора в широком диапазоне энергий γ -излучения необходимо для правильной расшифровки экспериментальных данных и при расчете характеристик разрабатываемых приборов регистрации ядерных излучений. Поскольку экспериментальное определение функции отклика является затратным процессом, в настоящее время широко применяется ее численное моделирование. В данной работе моделирование процессов проводилось методом Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT4. Возможности GEANT4 позволяют выделить каждую из физических компонент функции отклика программным образом, в отличие от эксперимента, в котором можно наблюдать только полный энергетический отклик детектора [7, 8]. Функция отклика детектора определяется как

$$R(E, E_\gamma) = \sum_{i=1}^n f_i(E, E_\gamma),$$

где $f_i(E, E_\gamma)$ — функции отдельных компонент, и E — энергия, зарегистрированная в детекторе. В процессе моделирования были выделены семь основных компонент функции отклика, которые описываются различными математическими функциями:

1. Пик полного поглощения — соответствует полной передаче энергии налетающего γ -кванта детектору. Для аппроксимации пика была использована функция Гаусса с параметрами A , B и E_0 :

$$f_1(E) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi}B_1} \exp\left(-\frac{(E - E_0)^2}{2B_1^2}\right). \quad (1)$$

Результаты подгонки приведены на рис. 3,а. Значения параметров гауссоиды для $E_0 = 6000$ кэВ: $A_1 = 6891 \pm 69$, $B_1 = 51, 67$.

2. Пик одиночной утечки — полное поглощение, за исключением одиночного аннигиляционного фотона (511 кэВ). Параметры функции, описывающей данный вклад, связаны с параметрами функции пика полного поглощения:

$$f_2(E) = \frac{A_2}{\sqrt{2\pi}B_2} \exp\left(-\frac{(E - (E_0 - 511))^2}{2B_2^2}\right), \quad (2)$$

$$B_2 = B_1 \sqrt{\frac{E_0 - 511}{E_0}}.$$

На рис. 3,б представлены результаты подгонки. Значения параметров для $E_0 = 6000$ кэВ: $A_2 = 2460 \pm 34$, $B_2 = 49.2$.

3. Пик двойной утечки — полное поглощение, за исключением двух аннигиляционных фотонов (1022 кэВ). В данном случае параметризация также связана с параметрами функции пика полного поглощения:

$$f_3(E) = \frac{A_3}{\sqrt{2\pi}B_3} \exp\left(-\frac{(E - (E_0 - 1022))^2}{2B_3^2}\right), \quad (3)$$

$$B_3 = B_1 \sqrt{\frac{E_0 - 1022}{E_0}}.$$

Результаты подгонки показаны на рис. 3,в. Значения параметров для $E_0 = 6000$ кэВ: $A_3 = 1659 \pm 9$, $B_3 = 47.06$.

4. Континуум от комптоновского рассеяния для фотопика.

Для описания вклада комптоновского рассеяния используется формула Клейна–Нишины, поправленная на функцию ошибок:

$$f_4(E) = A_4 \left[\frac{E_0}{E_0 - E} + \frac{E_0 - E}{E_0} - 1 + \cos^2 \theta \right] \times \operatorname{erfc} \left[\frac{E - E_c}{\sqrt{2}B_4} \right] \exp \left[\frac{E - E_{KN}}{C} \right], \quad (4)$$

$$\text{где } \cos \theta = 1 + \left(\frac{m_e c^2}{E_0} \right) + \left(\frac{m_e c^2}{E_0 - E} \right),$$

$$B_4 = B_1 \sqrt{E_0/E_c}, \quad E_c = E_0 [1 + 2E_0/m_e c^2]^{-1},$$

$$m_e c^2 = 511 \text{ кэВ} — \text{масса электрона.}$$

Значения параметров для $E_0 = 6000$ кэВ: $A_4 = 214.5 \pm 0.5$, $B_4 = 94.2 \pm 0.5$, $C = 19830 \pm 366$, $E_{KN} = 5293 \pm 2$.

5. Континуум от комптоновского рассеяния для пика одиночного вылета.

Для описания этой компоненты $f_5(E)$ может быть использована формула для однократного рассеяния (4), но с другими оценочными параметрами [9]. Результаты аппроксимации вкладов комптоновского рассеяния представлены на рис. 4. Получены следующие значения параметров для $E_0 = 6000$ кэВ: $A_5 = 91.41 \pm 0.31$, $B_5 = 210.9 \pm 0.8$, $C = 3808 \pm 27$, $E_{KN} = 4953 \pm 3$.

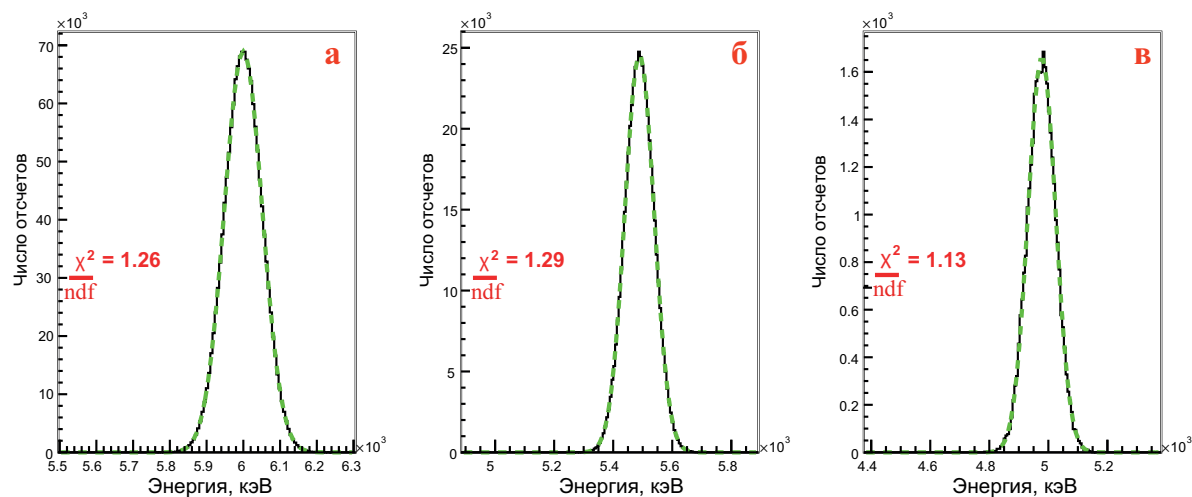


Рис. 3: Компоненты функции отклика детектора для γ -квантов с $E_\gamma = 6000$ кэВ: а — пик полного поглощения, б — пик одиночной утечки, в — пик двойной утечки

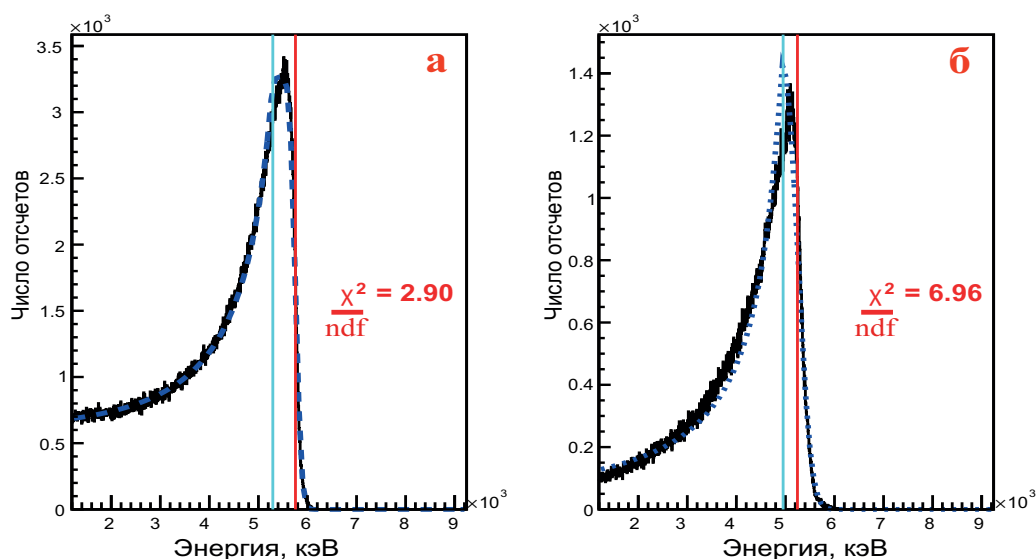


Рис. 4: Компоненты функции отклика детектора для γ -квантов с $E_\gamma = 6000$ кэВ: континуум от комптоновского рассеяния для а — фотопика и б — пика одиночного вылета

6. Континуум от комптоновского рассеяния и последующей утечки одного из аннигиляционных фотонов.

7. Континуум от комптоновского рассеяния и последующей утечки двух аннигиляционных фотонов.

Компоненты 6 и 7 были описаны суперпозицией функций Гаусса [10]:

$$f_{6,7}(E) = \frac{A_{6,7}}{\sqrt{2\pi}B_5} \exp\left(-\frac{(E-E_1)^2}{2B_5^2}\right) + \frac{A_{6,7}}{\sqrt{2\pi}B_6} \exp\left(-\frac{(E-E_2)^2}{2B_6^2}\right)$$

Результаты аппроксимации представлены на рис. 5.

Были получены следующие значения параметров подгоночных функций:

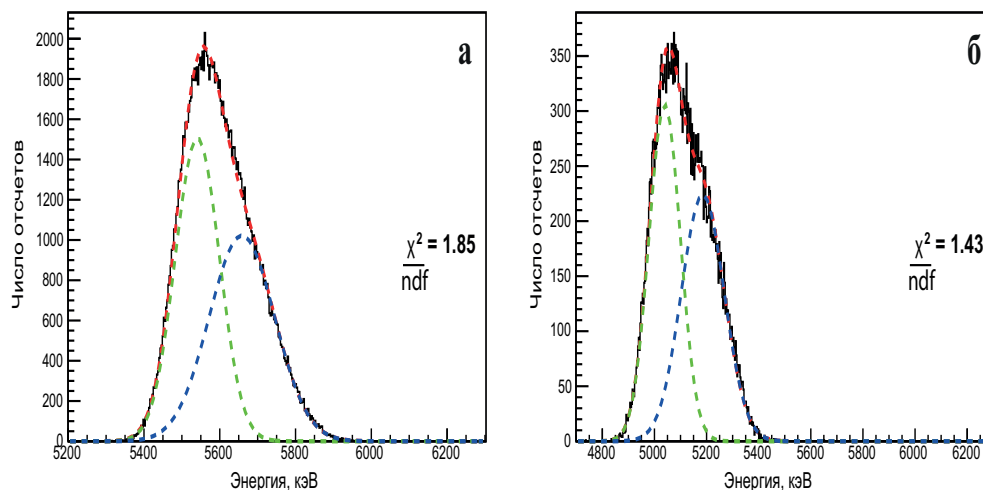


Рис. 5: Компоненты функции отклика детектора для γ -квантов с $E_\gamma = 6000$ кэВ: континуум от комптоновского рассеяния с учетом *a* — последующей утечки одного из аннигиляционных фотонов и *б* — последующей утечки двух аннигиляционных фотонов

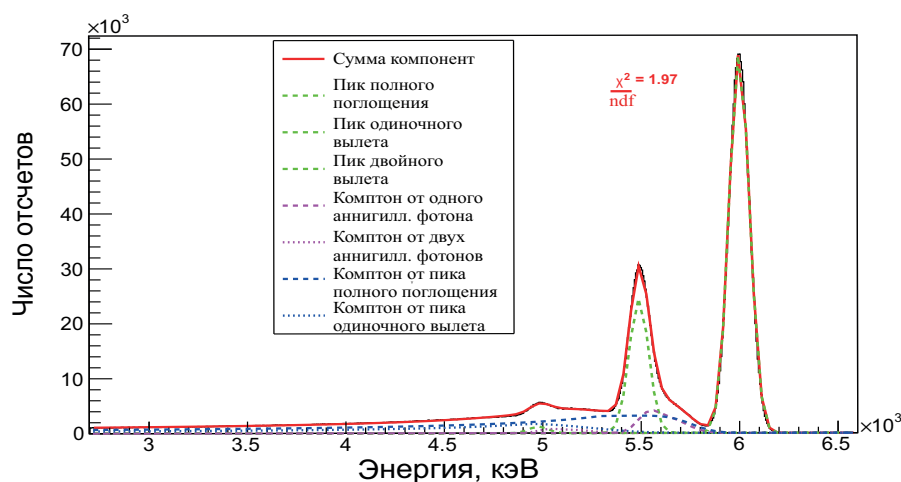


Рис. 6: Суммарная функция отклика детектора для γ -квантов с энергией 6000 кэВ

$$6: A_6 = 2209 \cdot 10^2 \pm 575, \quad E_1 = 5541 \pm 0.4, B_5 = 58.49 \pm 0.22, \quad E_2 = 5658 \pm 0.5, B_6 = 86.24 \pm 0.38.$$

$$7: A_7 = 461 \cdot 10^2 \pm 262, \quad E_1 = 5039 \pm 0.7, B_5 = 60.22 \pm 0.46, \quad E_2 = 5185 \pm 1.0, B_6 = 82.23 \pm 0.68.$$

Результатом выполнения работы является построенная функция отклика детектора γ -квантов, описывающая наблюдаемый при регистрации моноэнергетических фотонов спектр (рис. 6).

Функция отклика представляет собой сумму семи компонент, дающих основной вклад в спектр: пик полного поглощения, пики вылета одного и двух аннигиляционных фотонов, комптоновские континуумы, а так же комптоновское рассеяние фотонов, возникших

в результате аннигиляции позитронов, образовавшихся от первичных γ -квантов. С помощью аппроксимации в программной среде ROOT были определены параметры каждой из указанных компонент функции отклика для диапазона энергий налетающего пучка фотонов от 500 кэВ до 10 МэВ.

При решении задачи использовались программные среды ROOT и GEANT4. Построенная в ходе данной работы функция отклика с хорошей точностью описы-

вает энергетический спектр γ -квантов, смоделированный в GEANT4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была проведена работа по построению функции отклика сцинтилляционных детекторов на основе BGO с использованием модельных спектров, полученных с помощью пакета GEANT4, и определению параметров ее отдельных компонент для $E_\gamma = 6000$ кэВ. Дан-

ная работа была выполнена для определения параметров установки ROMASHA с целью дальнейшего использования установки в проекте TANGRA по изучению реакций неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ. Полученная функция отклика может в дальнейшем быть использована для более точного определения угловых корреляций, а также для дальнейших работ по гамма-спектроскопии с использованием сцинтилляционных детекторов на основе BGO.

-
- [1] *Valkovic V.* 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. CRC Press. New York. 2015.
- [2] *Ruskov I.N., Kopatch Yu.N., Bystritsky V.M.* et al. Physics procedia. 2015. **64**, №.2. P. 163.
- [3] *Bystritsky V.M., Grozdanov D.N., Zontikov A.O.* et al. Phys. Part. Nuclei Lett., 2016. **13**. P. 54.
- [4] *Sood A., Gardger R.* Nucl. Instr. Meth. B. 2004. **213**. P. 100.
- [5] *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Кэбин Э. И.* Частицы и ядра. Эксперимент. МАКС Пресс. Москва. 2013.
- [6] *Быстрицкий В. М., Замятин Н. И., Зубарев Е. В.* и др. Письма в ЭЧАЯ. 2013. **10**, №. 5. С. 639.
- [7] *Аккерман А. Ф., Никитушев Ю. М.* Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. Алма-Ата: Наука, 1972.
- [8] *Дабылова С. Б., Копач Ю. Н., Зонтиков А. О.* и др. Вестник университета «Дубна», Серия «Ест. и инж. науки» 2017. **37**. С. 3.
- [9] *Курносова Л. В.* УФН. 1954. **52**, №. 4. С. 603.
- [10] *Зайдель А. Н.* Элементарные оценки ошибок измерений М.: Наука. 1968.
-

Determination of the response function of the detector for γ -quanta in the reaction of inelastic neutron scattering

A. V. Gorelikov^{1,a}, D. N. Grozdanov^{2,4}, Yu. N. Kopatch², T.Yu. Tretyakova^{2,3}, N. A. Fedorov^{1,2}, S. B. Dabylova^{2,5}, D. K. Kolyadko⁶

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

²*Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 141980, Russia*

³*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

⁴*Institute of Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences. BG-1784 Sofia, Bulgaria*

⁵*L. N. Gumilev Eurasian National University. Astana 010000, Kazakhstan*

⁶*National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk 634050, Russia*

E-mail: ¹*gorelikov.av15@physics.msu.ru*

The aim of this work is to determine the response function for the detector of γ -quanta using the GEANT4 Monte-Carlo modeling. This function has 7 components and takes into account the γ -quanta Compton scattering in the detector, as well as the effect of the formation of electron-positron pairs with the possibility of subsequent escape of annihilation photons, and their scattering on the electrons of the scintillator.

PACS: 29.40.Mc.

Keywords: response function, Compton scattering, BGO detector, Monte Carlo method.

Received 28 March 2019.

Сведения об авторах

- Гореликов Андрей Владимирович — студент; e-mail: *gorelikov.av15@physics.msu.ru*.
 - Грозданов Димитър Николов — мл. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-31-13, e-mail: *dimitar@nf.jinr.ru*.
 - Копач Юрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, нач. сектора; тел.: (496) 216-37-96, e-mail: *kopatch(at)nf.jinr.ru*.
 - Третьякова Татьяна Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-36, e-mail: *tretyakova@sinp.msu.ru*.
 - Федоров Никита Александрович — инженер, аспирант; тел.: (496) 216-31-13, e-mail: *na.fedorov@physics.msu.ru*.
 - Дабылова Салтанат — инженер; тел.: (496) 216-21-87, e-mail: *pearl_04_94@mail.ru*.
 - Колядко Даниил Константинович — студент; тел.: e-mail: *dkk5@tpu.ru*.
-