

УДК 539.122.04 539.1.07

**С. Б. Дабылова, Ю. Н. Копач, А. О. Зонтиков, Д. Н. Грозданов,
Н. А. Федоров**

Определение функции отклика детектора NaI для γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах углерода

Работа посвящена определению функции отклика детектора NaI(Tl) для γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах ^{12}C . В гамма-спектрометрии регистрируются выходные импульсы, амплитуды которых пропорциональны энергии, потерянной в детектирующей среде падающими фотонами. Одной из основных задач детектирования излучений является восстановление характеристик излучения по сигналам, измеренным на выходах детекторов. Для этого необходимо знать, прежде всего, общие характеристики детекторов как преобразователей излучения в сигналы. Основная характеристика детектора – это его функция отклика, которую можно определить как вероятность того, что частица с заданными свойствами генерирует в детекторе определенный сигнал, который будет зарегистрирован прибором. В статье представлены результаты моделирования функции отклика сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl) для гамма-излучения из неупругого рассеяния быстрых нейтронов с целью изучения механизма ее формирования.

Ключевые слова: функция отклика, γ -кванты, сцинтилляционные детекторы.

Об авторах

Дабылова Салтанат Болаткызы – магистрант кафедры ядерной физики Государственного университета «Дубна». E-mail: dabylova_saltanat@mail.ru. Московская обл., г. Дубна, ул. Ленинградская, 10, кв. 308.

Копач Юрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, начальник сектора Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований.

Зонтиков Артем Олегович – инженер Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований.

Грозданов Дмитър Николов – младший научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований; младший научный сотрудник Института ядерных исследований и ядерной энергетики (ИЯИЯЭ) Болгарской академии наук (БАН), г. София, Болгария.

Федоров Никита Александрович – инженер Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований; магистрант кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ.

Сведения о функции отклика детектора и возможность ее расчета необходимы для понимания процессов формирования аналитического сигнала и фона. Они важны для расшифровки энергетических спектров, а также для выбора оптимальных условий регистрации.

Функция отклика детектора характеризует вероятность передачи чувствительному объему детектора энергии E при попадании в него γ -кванта с энергией $E\gamma$. Определение функции отклика детектора в широком диапазоне энергий

гамма-излучения необходимо для правильной расшифровки экспериментальных данных и при расчете характеристик разрабатываемых приборов для регистрации ядерных излучений [2; 8]. Экспериментальное получение функции отклика требует значительного количества источников моноэнергетического гамма-излучения и занимает продолжительное время. Поэтому в последние годы для расчета функции отклика детекторов широкое распространение получил метод Монте-Карло [1–4; 7].

В настоящей работе расчеты функции отклика также выполнены методом Монте-Карло,

который позволяет учесть как возможность многократных взаимодействий фотонов с веществом, так и геометрические особенности детектора.

Определение функции отклика детектора

В нашем случае для анализа данных по угловым корреляциям γ -квантов в реакции $^{12}\text{C}(n,n')^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C}$ достаточно определить функцию отклика детектора для одной гамма-линии – 4438 кэВ, т.к. гамма-спектр углерода, образующийся в этой реакции, состоит из этой единственной линии, соответствующей первому возбужденному состоянию ^{12}C [1].

В детекторах энергии и интенсивности γ -квантов определяются не непосредственно, а с помощью вторичных заряженных частиц (электронов и позитронов), которые возникают в результате взаимодействия детектируемых гамма-квантов с веществом детектора. Когда γ -квант попадает в детектор, заряженные частицы образуются в результате трех процессов: фотоэффекта, эффекта Комптона и образования электрон-позитронных пар.

Для определения функции отклика детектора был смоделирован энергетический спектр, зарегистрированный детектором NaI(Tl) при попадании в него γ -кванта с энергией 4,43 МэВ. Моделирование проводилось методом Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT4 [5].

В процессе моделирования были выделены семь основных компонент функции отклика, которые имеют различные формы энергетической зависимости и которые были описаны соответствующими математическими функциями:

- 1) пик полного поглощения – соответствует полной передаче энергии налетающего гамма-кванта детектору вследствие фотоэффекта или многократных процессов;
- 2) пик одиночной утечки – полное поглощение, за исключением одиночного аннигиляционного фотона (511 кэВ);
- 3) пик двойной утечки – полное поглощение, за исключением двух аннигиляционных фотонов (1022 кэВ);
- 4) континуум от однократного комптоновского рассеяния;
- 5) континуум от многократного комптоновского рассеяния;
- б) континуум от комптоновской утечки одного или двух аннигиляционных фотонов.

Следует заметить, что возможности кода GEANT4 позволяют выделить каждую из этих компонент программным образом, в отличие от эксперимента, в котором можно наблюдать только полный энергетический отклик детектора.

На рис. 1 показана расчетная функция отклика и ее разложение на вышеуказанные компоненты.

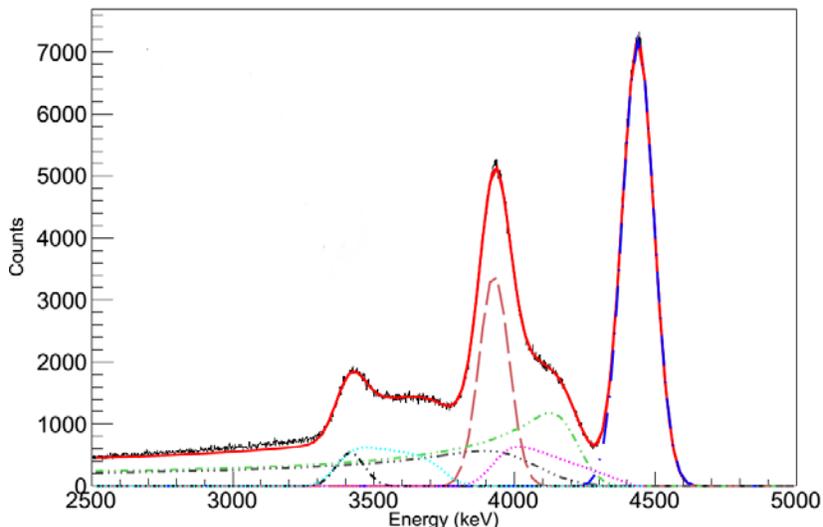


Рис. 1. Модельная функция отклика и ее компоненты

В этой гистограмме длинной штрихпунктирной тонкой линией (темно-синий) описан пик полного поглощения, штриховой (бордовый) – это одиночный вылет, короткий штрихпунктирный (черный) – двойной вылет, штрихпунктирная линия с двумя точками (зеленый) – однократный континуум Комптона, штрихпунктирная линия с тремя точками (серый) – многократный континуум Комптона, пунктирные линии (ярко-синий и розовый) – комптоновские компоненты, сопровождающие однократный и двойной пики утечки.

Функция отклика, описывающая взаимодействие фотона с энергией $E\gamma$, определяется как

$$R(E, E\gamma) = \sum_{i=1}^7 f_i(E, E\gamma), \quad (1)$$

где E – энергия, зарегистрированная в детекторе. Предполагается, что энергетическая калибровка детектора проведена соответствующим образом и энергии налетающего гамма-кванта, а

также зарегистрированных вторичных частиц в детекторе измеряются в одних и тех же единицах (кэВ). Семь частей, f_i , функции отклика детектора, которые зависят от энергии фотона, а также их параметры и методы подгонки описаны в деталях ниже.

Пик полного поглощения

Первая часть гистограммы (рис. 2) – это пик полного поглощения. Подгонка этой гистограммы проводилась функцией Гаусса, которая имеет следующий вид

$$f(x) = \frac{A}{(\sqrt{2\pi} \cdot B_1)} \exp\left(\frac{-(E - E_0)^2}{2 \cdot B_1^2}\right), \quad (2)$$

где A – площадь под пиком; $B_1 = \sigma$ – дисперсия функции (определяет ширину пика); E_0 – энергия, равная 4438 кэВ (положение пика).

Результат подгонки этой компоненты показан на рис. 2.

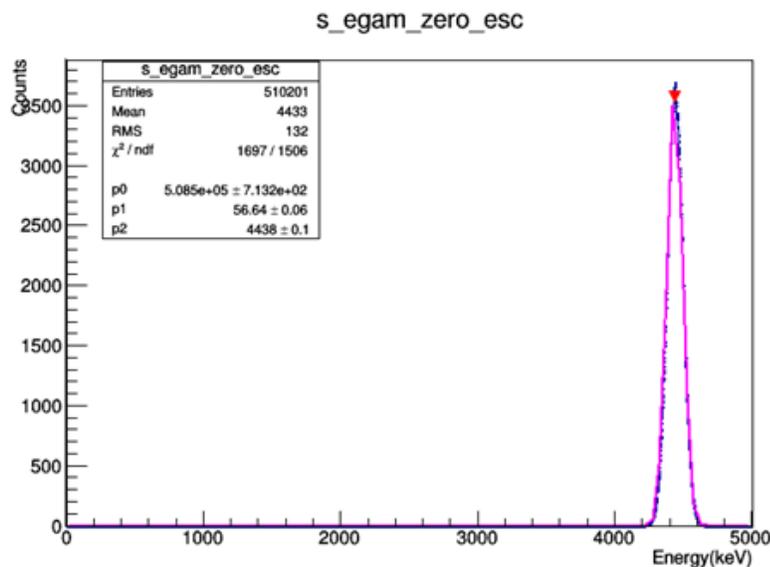


Рис. 2. Пик полного поглощения

Полное поглощение фотона представлено распределением Гаусса с амплитудой $A(p0)$, дисперсией $\sigma(p1)$ и центридой $E_0(p2)$.

При энергии γ -кванта выше 1022 кэВ в детектирующем объеме возможно образование пар электрон-позитрон. При этом вся энергия γ -

кванта передается электрону и позитрону. Если и электрон, и позитрон поглощаются в веществе детектора, то суммарный импульс будет пропорционален энергии γ -кванта и событие будет зафиксировано в пике полного поглощения. Однако при аннигиляции позитрона образуются

два γ -кванта, каждый с энергией 511 кэВ, которые могут покинуть детектор.

Пик одиночного вылета

Если один из этих аннигиляционных γ -квантов, не вступив во взаимодействие, вылетит

из детектора, то суммарная поглощенная энергия в детекторе будет равна $E_0 - 511$ кэВ. Такие события будут вносить вклад в так называемый пик одиночного вылета. И результат подгонки этого пика показан на рис. 3.

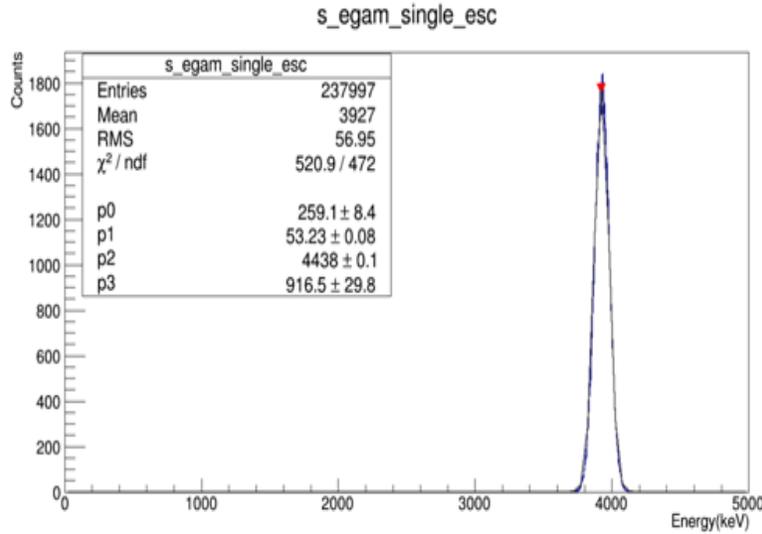


Рис. 3. Пик одиночного вылета

Подгонка этой гистограммы проводилась функцией Гаусса:

$$f(x) = \frac{A \cdot R_0}{\sqrt{2\pi} \cdot B_2} \exp\left(-\frac{(E - (E_0 - 511))^2}{2 \cdot B_2^2}\right), \quad (3)$$

$$B_2 = \sigma \left(\frac{\sqrt{E_0}}{\sqrt{E_0 - 511}} \right), \quad (4)$$

где $A(p0)$ – площадь под пиком; $R_0(p3)$ – параметр, определяющий отношение амплитуд фотопика и одиночного вылета; $E_0(p2)$ – энергия, равная 4438 кэВ. Здесь следует заметить, что для этой функции свободным параметром является только площадь пика, в то время как его ширина (дисперсия) и положение связаны с шириной и

положением пика полного поглощения соотношениями (3) и (4).

Пик двойного вылета

Если из детектора вылетят оба аннигиляционных γ -кванта, то это событие будет зафиксировано в пике двойного вылета ($E_0 - 1022$ кэВ). Этот пик показан на рис. 4. Пик двойного вылета описывается также функцией Гаусса:

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi} \cdot B_3} \exp\left(-\frac{(E - (E_0 - 1022))^2}{2 \cdot B_3^2}\right), \quad (5)$$

$$B_3 = \sigma \left(\frac{\sqrt{E_0}}{\sqrt{E_0 - 1022}} \right). \quad (6)$$

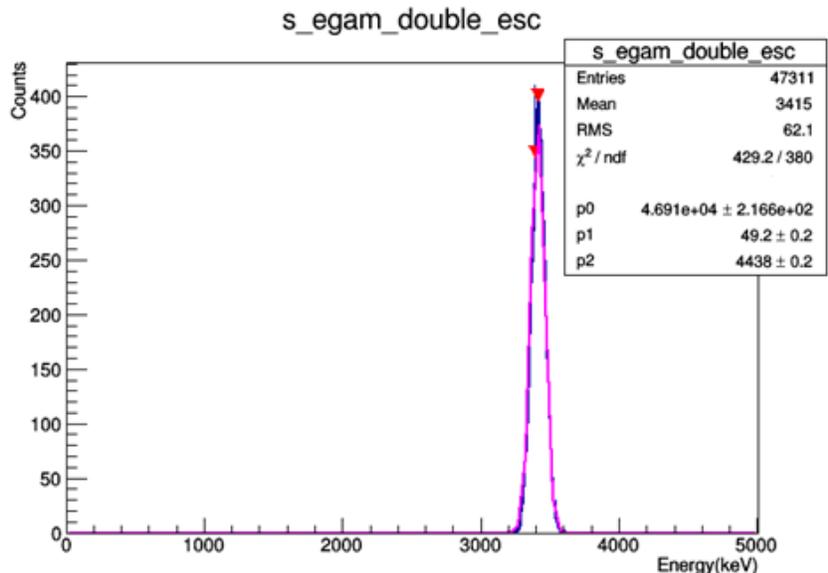


Рис. 4. Пик двойного вылета

Здесь также свободным параметром является только площадь пика, в то время как его ширина (дисперсия) и положение связаны с шириной и положением пика полного поглощения соотношениями (5) и (6).

Комптовский континуум от однократного комптоновского рассеяния

Комптовское рассеяние является главной причиной излучения от детектора и его труднее всего исключить, т.к. оно наблюдается при любых энергиях квантов, и его распределение очень чувствительно к геометрии источника, экрана и детектора.

Однократное комптовское рассеяние фотонов обычно описывается формулой Клейна – Нишины. В экспериментальных данных необходимо также учитывать уширение правого края комптовского спектра в соответствии с энергетическим разрешением детектора. Форма комптовского континуума описывается формулой Клейна – Нишины, умноженной на дополнительную функции ошибок, задающую уширение спектра от комптовской границы E_c из-за конечного разрешения детектора.

Полная формула для описания комптовского континуума выглядят так:

$$f(x) = A \left[\left(\frac{E_0}{E_1} \right) + \left(\frac{E_1}{E_0} \right) - 1 + \cos^2 \theta \right] \operatorname{erfc} \times \left[\frac{(E - C_0)}{\sqrt{2} \cdot B_4} \right], \quad (7)$$

где $\cos \theta = 1 + \left(\frac{m_0 \cdot c^2}{E_0} \right) + \left(\frac{m_0 \cdot c^2}{E_1} \right)$,
 $E_1 = E_0 - E$, $B_4 = \sigma \cdot \frac{\sqrt{E_0}}{\sqrt{C_0}}$,

$C_0 = E_c = \left[\frac{E_0}{1 + \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot E_0}} \right]$ – это энергия комптовского края и $m_0 \cdot c^2$ – это энергия покоя электрона.

В этой формуле свободным параметром является только амплитуда A .

Результат подгонки спектра однократного комптовского рассеяния с помощью функции (7) показан на рис. 5.

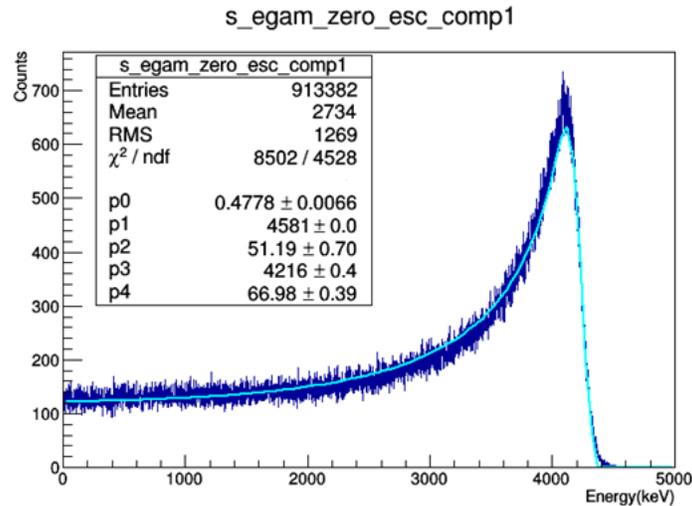


Рис. 5. Однократный континуум Комптона

В формуле (7) $A(p_0, p_2)$ – это относительная амплитуда и $\sigma(p_4)$ – дисперсия в функции ошибок.

Комптоновский континуум от многократного комптоновского рассеяния

Весь комптоновский континуум не может быть описан одной сравнительно простой формулой Клейна – Нишины, которая корректно отражает только однократное комптоновское рассеяние. Поэтому полный комптоновский спектр был разделен на несколько компонент, каждая из которых имеет свой смысл. Пятая часть гистограммы (рис. 6) – это комптоновский континуум от многократного комптоновского рассеяния, а также от утечек электронов, позитронов, т.е. все,

что не описывается компонентами 4 и 6. Для описания этой компоненты может быть использована также формула (7) с тремя свободными параметрами: амплитуда A , дисперсия σ и положение правого края спектра C_0 . Результат подгонки показан на рис. 6. Так как эта компонента, условно обозначенная как комптоновский континуум от многократного комптоновского рассеяния, составлена из нескольких компонент, имеющих различную физическую природу, ее описание с помощью формулы (7) неидеально. Тем не менее, мы считаем, что точность описания этой компоненты достаточна для практических применений, т.к. ее вклад в полный спектр функции отклика незначителен.

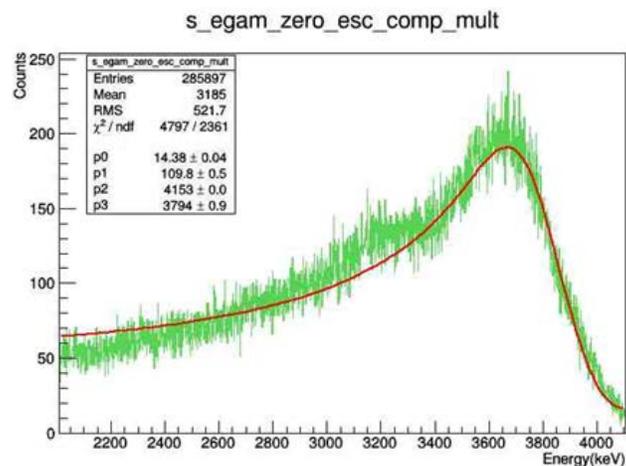


Рис. 6. Континуум Комптона для аннигиляционного фотона

Комптоновский континуум от аннигиляционных фотонов

Шестая и седьмая части являются важными компонентами функции отклика. Эти компоненты видны на рис. 1 в виде бугорков справа от пиков одиночного и двойного вылета. Физический смысл этих компонент – это неполная утечка аннигиляционных γ -квантов, т.е. один или оба фотона с энергией 511 кэВ испытывают комптоновское рассеяние, оставляют часть энергии в детекторе, а часть уносят за пределы детектора. Так как уносимая часть энергии меньше, чем 511 и 1022 кэВ соответственно, то поглощенная энергия в детекторе больше, чем $E_0 - 511$ и $E_0 - 1022$,

поэтому эти компоненты находятся справа от соответствующих пиков утечки.

Эти гистограммы (рис. 7 и 8) были описаны следующей функцией:

$$f(x) = A \cdot (E_0 + k_1 x) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{E - C_1}{\sqrt{2} B_5} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{E - C_2}{\sqrt{2} B_6} \right),$$

$$B_5 = \sigma \left(\frac{\sqrt{E_0}}{\sqrt{C_1}} \right), \quad B_6 = \sigma \left(\frac{\sqrt{E_0}}{\sqrt{C_2}} \right). \quad (8)$$

В этой формуле A – амплитуда; B_5 и B_6 – параметры, зависящие от ширины.

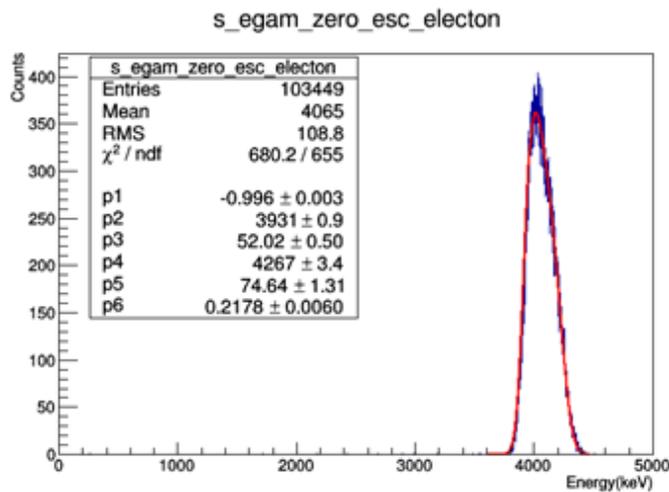


Рис. 7. Вылет электрона

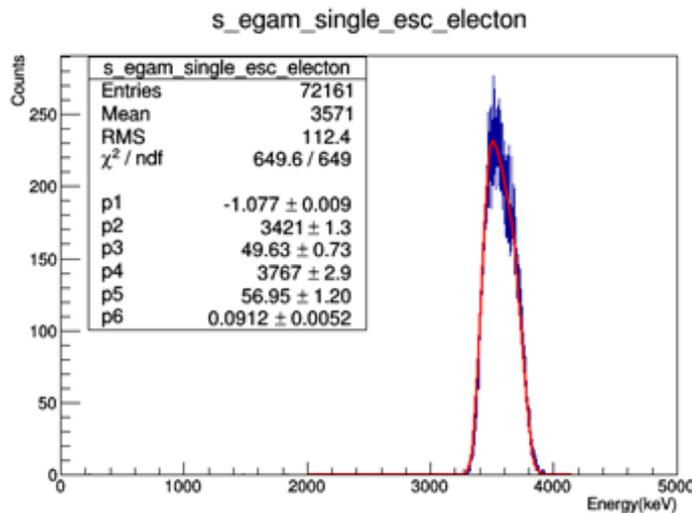


Рис. 8. Вылет электрона

На рис. 9 показано суммарное описание модельной функции отклика, построенное на основе вышеописанных компонент. Всего в таком

описании использовалось 14 независимых параметров подгонки. Как видно, функция отклика корректно отражает все эти компоненты, а также их зависимость от энергии.

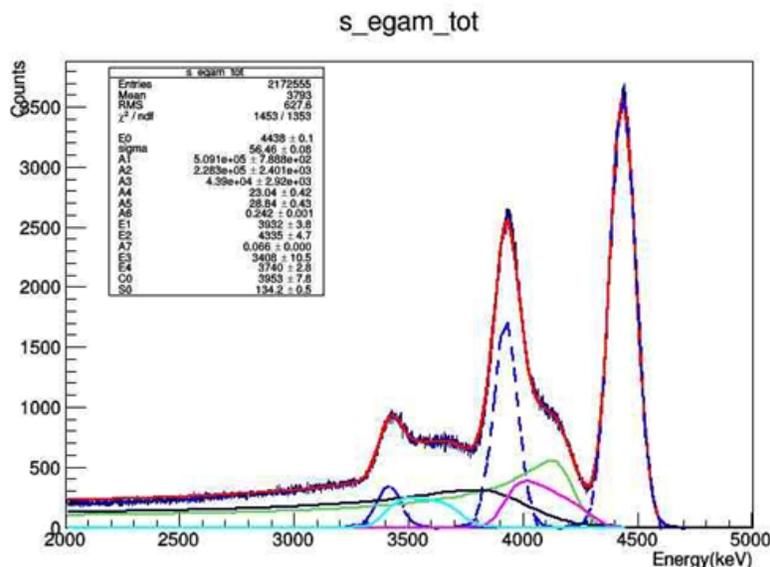


Рис. 9. Полная функция отклика

Заключение

Была проведена работа по определению параметров функции отклика сцинтилляционных детекторов на основе NaI[Tl] с использованием модельных спектров, полученных с помощью пакета GEANT4. Данная работа была проведена для определения параметров установки «РОМАШКА» с целью последующего использования установки в проекте «ТАНГРА» [6]. Полученная функция отклика может быть использована в дальнейшем для более точного определения угловых корреляций в данной реакции, а также для последующих работ по гамма-спектроскопии с использованием сцинтилляционных детекторов на основе NaI[Tl].

Авторы выражают благодарность И.Н. Рускову и В.М. Быстрицкому за многочисленные полезные советы. Работа была частично поддержана грантом РФФИ №:16-52-45056.

Библиографический список

1. Быстрицкий В.М., Грозданов Д.Н., Зонтиков А.О., Копач Ю.Н., Рогов Ю.Н., Русков И.Н., Садовский А.Б., Ской В.Р., Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Рыжков В.И., Юрков Д.И. Угловое распределение γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 4(202). С. 793–807.
2. Даниленко В.Н., Ковальский Е.А., Скубо Ю.В. Моделирование экспериментов с помощью детекторов гамма-излучения на основе сжатого ксенона // Атомная энергия. 2008. Т. 105, вып. 1. С. 38–44.
3. Захарченко А.А., Наконечный Д.В., Шляхов И.Н. Моделирование энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов гамма-излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. № 1. С. 28–31.
4. Jin Y., Gardner R.P., and Verghese K. A semi-empirical model for the gamma-ray response function of germanium detectors based on fundamental interaction mechanisms // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A242. North – Holland, Amsterdam. 1986. P. 416–426.
5. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506. 2003. P. 250–303.

6. Ruskov I.N., Kopatch Yu.N., Bystritsky V.M., Skoy V.R., Shvetsov V.N., Hamsch F.J., Oberstedt S., Capote Noy R., Sedyshev P.V., Grozdanov D.N., Ivanov I.Zh., Aleksakhin V.Yu., Bogolubov E.P., Barmakov Yu.N., Khabarov S.V., Krasnoperov A.V., Krylov A.R., Obho J. &353;, Pikelner L.B., Rapatskiy V.L., Rogachev A.V., Rogov Yu.N., Ryzhkov V.I., Sadovsky A.B., Salmin R.A., Sapozhnikov M.G., Slepnev V.M., Sudac D., Tarasov O.G., Valković V., Yurkov D.I., Zamyatin N.I., Zeynalov Sh.S., Zontikov A.O., Zubarev E.V.. TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission Induced by 14.1 MeV Neutrons // Phys. Procedia. 2015. V. 64. P. 163–170.

7. Steljic M., Milosevic M., Belicev P. Monte Carlo simulations of the pulse – height response function of germanium detector // Proceedings 52nd ETRAN Conference, Palie, June 8–12, 2008. NT2. 4. P. 1–4.

8. Sood A., Gardger R. A new Monte Carlo assisted approach to detector response function // Nucl. Instr. & Meth B. 2004. Vol. 213. P. 100–104.

*Поступила в редакцию
14.04.2017*