

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СЦИНТИЛЛЯТОРОВ GAGG И LYSO ДЛЯ
ПРИМЕНЕНИЯ В ГАММА-ЛОКАТОРЕ**

Научный руководитель
ассистент

_____ Ф. А. Дубинин

Студент

_____ А. П. Зверев

Москва 2022

Содержание

Введение	3
Моделирование GAGG:Ce и LYSO:Ce	4
Кристалл 3x3x10 мм ³	6
Кристалл 3x3x10 мм ³ : графики зависимости числа поглощенных гамма-квантов от длины кристалла	7
Кристалл 3x3x10 мм ³ : излучение в рамках заданного телесного угла	8
Кристалл 3x3x1 мм ³	10
Заключение	11
Список литературы	12
Приложение 1	13

Введение

Гамма-локатор – миниатюрный детектор гамма-излучения на основе неорганического сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя (SiPM), предназначенный для применения в ядерной медицине с целью определения пространственного распределения радиоактивного фармпрепарата в организме пациента.

Существуют две основные области применения гамма-локатора: интраоперационный поиск (с лат. *in vitro* - "в стекле") «сторожевых» лимфатических узлов и неинвазивное (с лат. *in vivo* - "в теле") сканирование поверхности тела пациента. В первом случае радиофармпрепарат перед операцией вводят в тело пациента, и хирург во время удаления опухоли проверяет лимфоузлы на наличие метастаз. Второй способ позволяет при помощи гамма-локатора определить опухоли, расположенные в приповерхностной области организма пациента с высокой точностью определения их границ.

Выбор SiPM в качестве фотоприемника гамма-локатора обусловлен его высокой эффективностью регистрации, небольшим напряжением смещения, компактными размерами и высоким коэффициентом усиления.[1]

В рамках данного семестра производился анализ эффективности различных сцинтилляционных кристаллов (GAGG:Ce, LYSO:Ce) в случае их применения в качестве рабочего вещества гамма-локатора. Было проведено моделирование, целью которого являлась оценка эффективности регистрации по каналу фотоэффекта и по всем остальным включенным каналам.

Гамма-локатор при диагностики заболеваний может быть совмещен с эндоскопом. Медицинские эндоскопы - это диагностическое и терапевтическое оборудование с широкой сферой применения. Их основное назначение – проведение диагностических обследований органов ЖКТ и терапевтического лечения под видеонаблюдением или контролем УЗИ.

Эндоскоп, в котором в качестве рабочего вещества используется сцинтилляционный кристалл, может состоять из следующих основных конструктивных элементов: в устройство эндоскопа может быть включена гибкая трубка, на конце которой расположены: видеокамера, фонарик, выводной канал для инструментов. Позади камеры располагаются провода, расположенные таким образом, что между проводами есть небольшое свободное пространство, в которое можно поместить щуп, расположив его за камерой (за фонариком) на расстоянии 1 см от торца.

Объем детектора, применяемого в эндоскопе, сильно ограничен. На расстоянии 1 см от торца располагается детектор, который находится в катетере. На размещение кристалла приходится диаметр примерно 4 мм. Также требуется корпус, скрепленный с фотоприемником, на который потребуется примерно 1 мм пространства. Детектор обернут в светоотражающее покрытие, на которое также требуется примерно 1 мм свободного пространства.

Характерная толщина эндоскопа - 9 мм. Размеры кристалла, предельные для применения в эндоскопе, составляют (с учетом внешнего корпуса и компонент, связанных с совмещением деталей эндоскопа в единое целое) $3 \times 3 \text{ мм}^2$ (площадь поперечного сечения). Характерный размер злокачественных образований во внутренних органах составляет примерно 0.5 - 1 см (на начальной стадии). Моделирование, проведенное в этом семестре, было построено на предположении, что максимальная эффективность регистрации будет достигнута, если подобрать детектор, сопоставимый с размерами опухоли.

Порог срабатывания прибора ставится под фотопик (значение энергии $\varepsilon = 140 \text{ кэВ}$); если гамма-квант испытывает рассеяние по комптон-эффекту, то в таком случае сигнал бу-

дет ниже порогового значения, данное срабатывание детектора не будет засчитано. В связи с этим необходимо понимать, произошло ли энерговыделение гамма-квантом в размере 140 кэВ; если этого энерговыделения нет, то в таком случае подобные гамма-кванты не отсчитываются; возникает необходимость вычисления эффективности регистрации именно по фотоэффекту.

Итак, толщина кристалла может варьироваться, в предельном случае достигая ≈ 10 мм - предельного размера злокачественного образования на начальных этапах.

Исследованный в данной работе сцинтилляционный кристалл GAGG:Ce является неорганическим. Можно отметить, что механизмы его люминесценции имеют много общего с происходящим в классическом представителе данного типа сцинтилляторов - NaI:Tl [2]. В случае GAGG:Ce, в отличие от NaI:Tl, спектральное распределение лежит в области более длинных длин волн (≈ 520 нм, в то время как у NaI:Tl рабочей длиной волны является 415 нм).

Моделирование GAGG:Ce и LYSO:Ce

Моделирование осуществлялось при помощи программного пакета Geant4. Далее описаны: структура построенной модели, учтенные виды взаимодействий, физическая модель эксперимента.

В модели были рассмотрены сцинтилляционные кристаллы: GAGG:Ce - новый перспективный сцинтилляционный кристалл, LYSO:Ce - кристалл, широко применяемый в ядерной медицине в различных видах диагностик.

Модель состояла из:

- Сцинтиллятор GAGG:Ce/LYSO:Ce
- Тефлоновое покрытие $(C_2F_4)_n$
- Источник гамма-квантов
- Воздух (наполнение объема модели)

Сцинтиллятор находился в рабочем объеме $20 \times 20 \times 20$ мм³. Размеры кристалла соответствовали предельным размерам сцинтиллятора, который может быть использован в гамма-локаторе при диагностике: $3 \times 3 \times 10$ мм³. В дальнейшем размеры кристалла и настройка источника гамма-квантов варьировались. Состав и плотность кристалла соответствовали характеристикам исследованного ранее сцинтиллятора:

- GAGG $\equiv Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$
- Плотность $\rho = 6630$ кг/м³

Состав и плотность кристалла LYSO:

- LYSO $\equiv (Lu, Y)_2SiO_5$
- Плотность $\rho = 7150$ кг/м³

Располагался кристалл по отношению к границам заданного объема на расстоянии 5 мм относительно обоих торцов. Заданный объем был наполнен воздухом. Относительно кристалла было размещено внешнее покрытие, используемое для улучшения светосбора, состоящее из тефлона. В силу наличия ограничения на размеры внешнего покрытия, его толщина соответствовала почти предельному случаю - 0,3 мм; располагалось покрытие на расстоянии 0,01 мм от кристалла.

Частицы, присутствовавшие в модели:

- Гамма-кванты
- Электроны
- Позитроны

Эффективность регистрации гамма-излучения может быть определена по графикам зависимости числа поглощенных гамма-квантов от длины кристалла. Чем больше длина рабочего вещества - тем выше эффективность регистрации. Эффективность регистрации гамма-излучения определяется как отношение числа поглощенных гамма-квантов к полному числу излученных частиц.

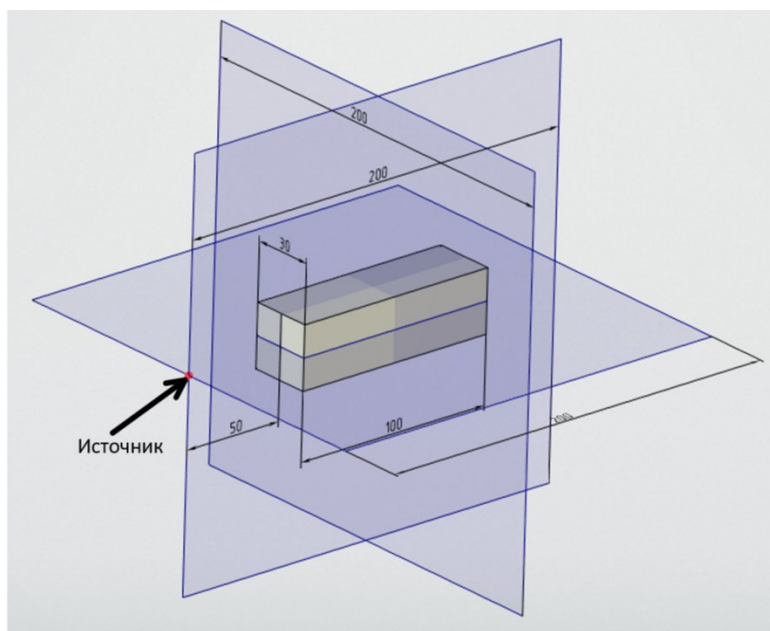


Рисунок 1 — Структура модели

Использованный в модели источник располагался на расстоянии 5 мм от одного из двух торцов (см. Рисунок 1). Рисунок 1 соответствует геометрии модели с учетом масштабирования 1:10. Точка пересечения плоскостей на близлежащем к источнику торце соответствует точке, в направлении которой происходит движение гамма-квантов, излученных источником.

Энергия гамма-квантов соответствовала энергии источника $Tc-99m$, нашедшему широкое применение в медицине: $\varepsilon = 140$ кэВ. В рамках модели задавалось определенное число событий - взаимодействий заданных частиц - гамма-квантов - с заданным объемом рабочего вещества - сцинтиллятором. Рабочее вещество представляло из себя чувствительный

объем (Sensitive Detector), в котором фиксировались всевозможные виды взаимодействия гамма-квантов с рабочим веществом и воздухом (фотоэффект, комптон-эффект, рождение e^+e^- пар).

В силу малости энергии гамма-квантов, испускаемых источником, рассмотрение рождения e^+e^- пар можно опустить.

Основной интерес в рамках созданной модели представляли: комптон-, фотоэффекты; далее будут рассмотрены все полученные в рамках моделирования спектры.

Стоит отметить, что первичные частицы - гамма-кванты, излученные источником, участвуют во взаимодействиях вплоть до полной потери исходной энергии. Вторичные частицы, регистрируемые в рамках чувствительного объема (гамма-кванты, электроны) участвуют во взаимодействии только один раз (происходит полная потеря энергии в результате первого процесса взаимодействия вторичных частиц).

Возможны различные интерпретации наблюдаемых отсчетов в спектрах, полученных в рамках построенной модели.

Кристалл $3 \times 3 \times 10$ мм³

Были получены спектры зависимости числа отсчетов событий от энергии частиц для кристаллов GAGG:Ce, LYSO:Ce (в качестве примера приведен спектр для кристалла GAGG:Ce размером $3 \times 3 \times 10$ мм³, остальные спектры см. Приложение 1):

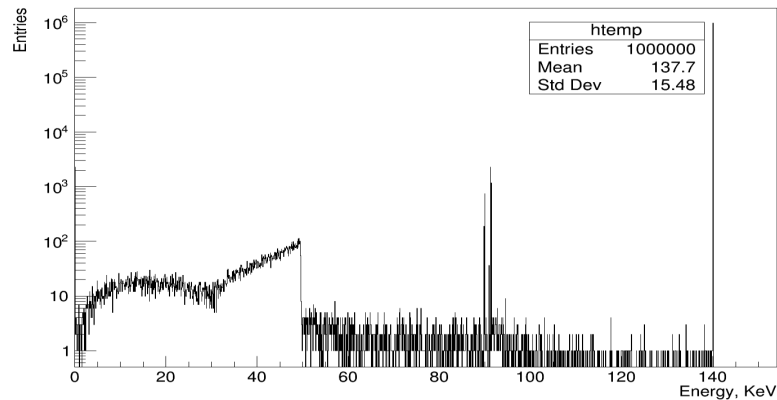


Рисунок 2 — Комптон- и фотоэффекты для GAGG:Ce $3 \times 3 \times 10$ мм² (lg-масштаб)

В силу высокой плотности как GAGG:Ce, так и LYSO:Ce, в случае данного спектра наблюдался преимущественно фотоэффект (≈ 970000 событий). Комптон-эффект в рамках данной структуры модели наблюдался, но число взаимодействий по последнему (по сравнению с фотоэффектом) было пренебрежимо мало (≈ 22000 событий). Гамма-кванты (в данном фрагменте модели) запускались перпендикулярно по отношению к одному из торцов заданного объема рабочего вещества детектора.

По числу отсчитанных событий (Entries) можно видеть, что во взаимодействиях участвовали практически все запущенные гамма-кванты. Это связано с тем, что толщина кристалла в несколько раз превышает длину ослабления в e раз исходного числа гамма-квантов энергии $\varepsilon = 140$ кэВ.

Кристалл 3x3x10 мм³: графики зависимости числа поглощенных гамма-квантов от длины кристалла

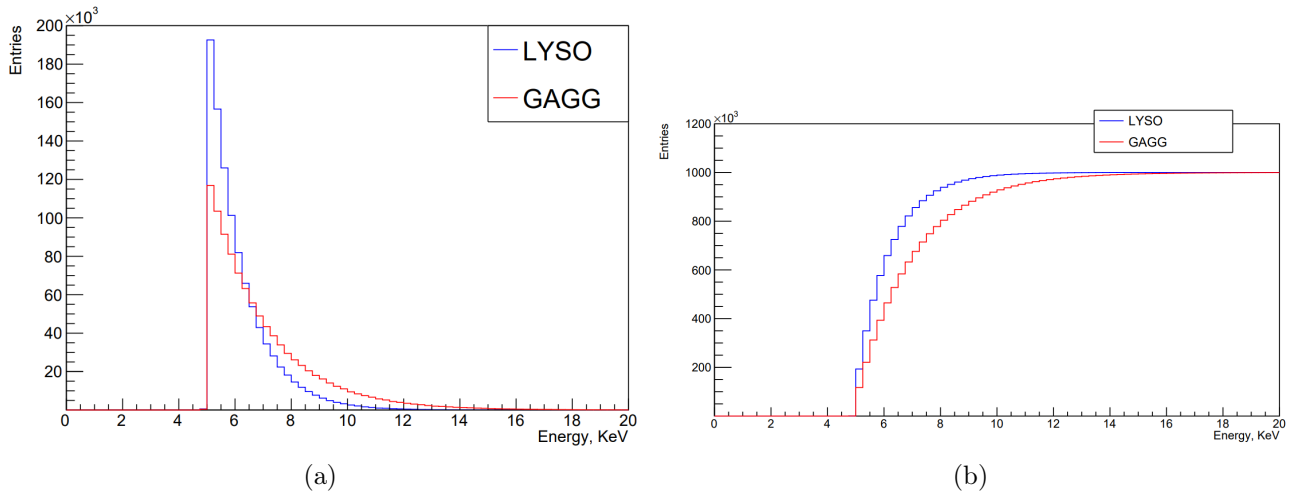


Рисунок 3 — Графики зависимости числа поглощенных гамма-квантов от длины кристалла
 (a) - Дифференциальные спектры для GAGG:Ce и LYSO:Ce;
 (b) - Интегральные спектры для GAGG:Ce и LYSO:Ce

Спектры представляют собой зависимость числа поглощенных гамма-квантов от конкретной глубины прохождения в кристалле.

Как было упомянуто ранее, кристалл располагался в объеме модели от 5 до 15 мм (что легко видеть по полученным диаграммам). При помощи полученных спектров можно определить эффективность регистрации гамма-излучения в зависимости от длины рабочего вещества. В случае LYSO:Ce поглощение гамма-квантов происходит значительно быстрее (практически полное поглощение в случае LYSO:Ce происходит примерно на 4 мм ширины рабочего вещества раньше, чем в случае GAGG:Ce).

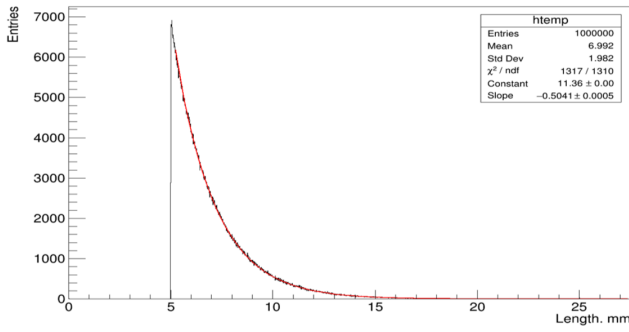
Фитирование полученных дифференциальных спектров осуществлялось посредством функции exp([0]+[1]*x), где [0] - Constant, [1] - Slope. Ширину рабочего вещества, на которой происходит ослабление в e раз, можно определить следующим образом:

$$\lambda_e = \frac{1}{[1]}.$$

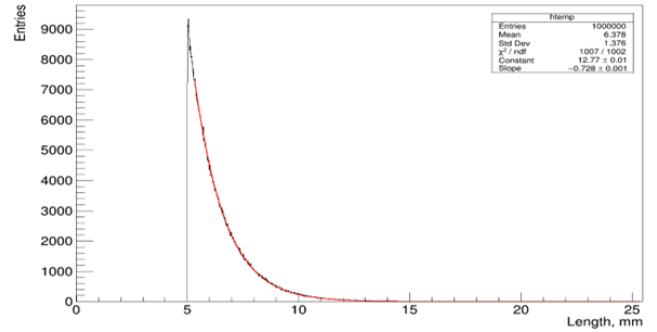
Полученные значения длин прохождения частиц, на которых наблюдается ослабление в e раз:

$$\text{GAGG:Ce} : \lambda_e^{\text{GAGG:Ce}} = \frac{1}{[1]_{\text{GAGG:Ce}}} = \frac{1}{0,5041 \frac{1}{\text{мм}}} = 1,984 \pm 0,002 \text{мм};$$

$$\text{LYSO:Ce} : \lambda_e^{\text{LYSO:Ce}} = \frac{1}{[1]_{\text{LYSO:Ce}}} = \frac{1}{0,728 \frac{1}{\text{мм}}} = 1,374 \pm 0,002 \text{мм}.$$



(a)



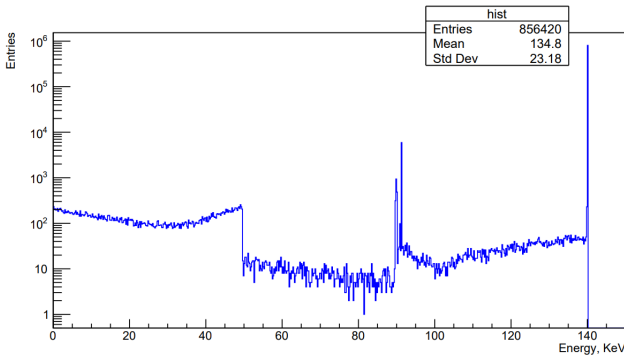
(b)

Рисунок 4 — Графики зависимости числа поглощенных гамма-квантов от длины кристалла (аппроксимация экспоненциальным спадом)

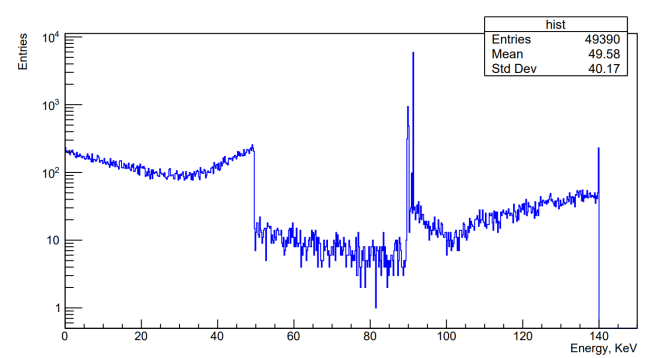
(a) - Ослабление в e раз (GAGG:Ce);

(b) - Ослабление в e раз (LYSO:Ce)

Кристалл $3 \times 3 \times 10$ мм³: излучение в рамках заданного телесного угла



(a)



(b)

Рисунок 5 — Типы взаимодействий для GAGG:Ce

(a) - Комpton- и фотоэффекты (lg-масштаб);

(b) - комpton-эффект

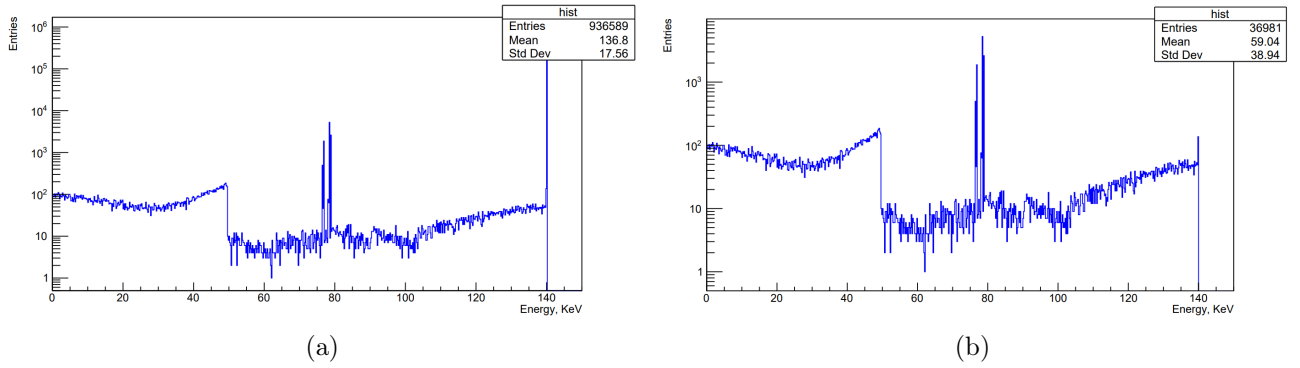


Рисунок 6 — Типы взаимодействий для LYSO:Ce

- (a) - Комптон- и фотоэффекты (lg-масштаб);
 (b) - комптон-эффект

В случае данного варианта построенной модели источник излучал гамма-кванты в пределах заданного телесного угла: конуса с углом полураствора $\pi/4$. Комптон-эффект и совместные графики комптон- и фотоэффектов (в lg-масштабе) были рассмотрены по отдельности. В каждом случае было задано одинаковое количество частиц: 1000000. В обоих случаях (в силу произвольности направления вылета) во взаимодействиях участвовало неполное число запущенных частиц. Часть из них не попала в сцинтиллятор. Часть (вылетев под углом, близким к $\pi/4$) рассеялась на электронах рабочего вещества (участвовала в комптон-эффекте).

Легко видеть, что плотность сцинтиллятора играет существенную роль. Так, в комптон-эффекте (в случае GAGG:Ce) участвовало большее число частиц.

В случае кристалла GAGG:Ce можно видеть характерный пик, соответствующий значению энергии $\varepsilon = 90$ кэВ (в случае кристалла LYSO:Ce данный пик находится в окрестности 80 кэВ). Можно показать, что данные пики являются пиками вылета, возникающими в результате фотоэффекта, происходящего на оболочках определенных химических элементов, входящих в состав рассматриваемого кристалла. Пик с меньшей энергией соответствует: Gd (в случае GAGG), Lu (в случае LYSO). Пик с большей энергией в случае обоих кристаллов соответствует случаю фотоэффекта, происходящего на оболочках атомов Ce. Пики вылета соответствуют значениям энергий, получаемым при учете энергии релаксационного гамма-кванта (высокая работа выхода: $A_{\text{вых}} \approx 50 - 60$ кэВ). В связи с тем же явлением происходит движение электронов, которым была передана энергия гамма-квантов, испытавших комптоновское рассеяние. Данные электроны можно наблюдать в промежутке энергий $(0, 50]$ кэВ.

По оси значений энергии в промежутке $(100, 140]$ кэВ отсчитываются электроны, рождающиеся в результате обратного комптон-эффекта (рассеяния на угол, соответствующий промежутку $(\frac{\pi}{2}, \pi)$).

В результате перехода электрона между оболочками образуется гамма - квант, обладающий энергией $(90, 140]$ кэВ. Данный гамма - квант может либо поучаствовать во взаимодействии еще раз, либо покинуть объем кристалла.

Можно видеть, что в обоих случаях фотопик, находящийся в значении энергии $\varepsilon = 140$ кэВ, соответствует дельта-функции (в силу отсутствия ошибок, возникающих в случае реального эксперимента).

Примеры исключенных в рамках моделирования ошибок: до кристалла доходит

полное число излученных гамма-квантов (с пренебрежимо малой поправкой на взаимодействие с атмосферой модели); отсутствует параметр отклика SiPM, который необходимо учитывать в случае реального эксперимента - квантовая эффективность регистрации (вероятность выбивания излученным гамма-квантом электрона из рабочей площади фотомножителя).

Вполне вероятно, что в промежутке энергий [50 , 140) кэВ регистрируется фотоэффект на гамма-квантах низких энергий, в промежутке энергий (90,140] кэВ отсчитываются электроны более высоких энергий, возникающие из-за фотоэффекта, происходящего в связи с присутствием в рабочем веществе детектора гамма-квантов, которые предварительно поучаствовали в комптоновском рассеянии.

"Провал" в количестве отсчетов, возникающий в окрестности значения энергии $\varepsilon = 30$ кэВ, связан с рассеянием на угол, равный $\pi/2$. Данный "провал" легко объяснить, если обратиться к формуле, описывающей энергию рассеянного гамма-кванта:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)}$$

Кристалл 3x3x1 мм³

Также были получены энергетические спектры для кристаллов GAGG:Ce и LYSO:Ce толщиной 1 мм (комптон- и фотоэффекты (в lg-масштабе)).

В связи с недостаточной толщиной кристалла практически половина гамма-квантов не участвует ни в каких видах взаимодействий. Связано это с тем, что толщина кристалла в данном варианте модели меньше длины ослабления в e раз (длины, по прохождении которой число частиц, содержащихся в исходном потоке, уменьшается в e раз ($\lambda_e^{GAGG:Ce} = 1,98$ мм, $\lambda_e^{LYSO:Ce} = 1,37$ мм)). Фотопик, в связи с причинами, описанными ранее, представляет собой дельта-функцию; комптон-эффект содержит количество событий и форму диаграммы, сравнимые со случаем источника, излучающим в пределах заданного телесного угла. Данные явления (как и в случае 1.3) можно объяснить, сославшись на геометрию созданной модели.

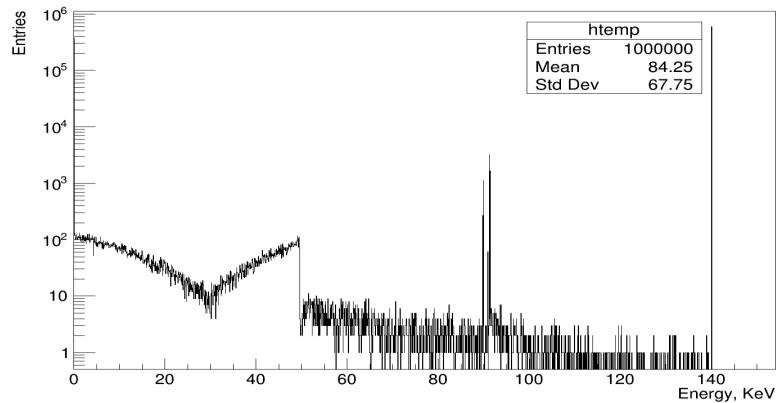


Рисунок 7 — Комптон- и фотоэффекты для GAGG:Ce 3x3x1 мм² (lg-масштаб)

Заключение

Была построена модель сцинтилляционного детектора, в качестве рабочего вещества которого выступали сцинтилляционные кристаллы GAGG:Ce, LYSO:Ce. На сцинтилляторах были получены значения длин, по прохождении частицами которых происходит ослабление пучка гамма-квантов по числу частиц в e раз:

$$\lambda_e^{GAGG:Ce} : 1,984 \pm 0,002\text{мм};$$

$$\lambda_e^{LYSO:Ce} : 1,374 \pm 0,002\text{мм}.$$

Из полученных значений длин ослабления в e раз можно сделать вывод, что кристалл LYSO:Ce, в сравнении с кристаллом GAGG:Ce, обладает лучшей эффективностью регистрации гамма-излучения.

В противовес лучшей эффективности регистрации LYSO:Ce в сравнении с GAGG:Ce можно поставить факт наличия собственного фона - побочного счёта в случае сцинтиллятора LYSO:Ce. В связи с данным явлением стоит остановиться на кристалле GAGG:Ce, также обладающим хорошей эффективностью регистрации гамма-излучения, и в дальнейшем проводить работы с выбранным сцинтилляционным кристаллом.

Исследованы спектры зависимости числа отсчетов от энергии частиц, числа поглощенных частиц от глубины прохождения в рабочем веществе сцинтилляторов, получены энергетические распределения электронов, приведены их интерпретации.

Список литературы

- [1] Ягнюкова А.К., Болоздыня А.И., Канцеров В.А., Сосновцев В.В. ГАММА-ЛОКАТОР ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ. Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии, ИСМАРТ-2014.
- [2] Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.

Приложение 1

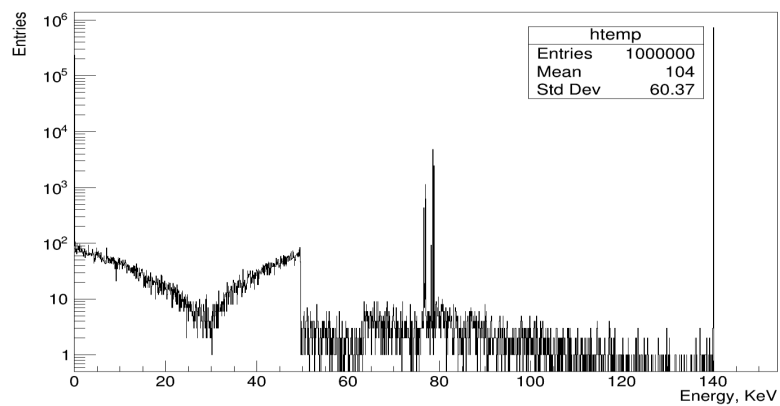


Рисунок 8 — Комптон- и фотоэффекты для LYSO:Ce 3x3x1 мм² (lg-масштаб)

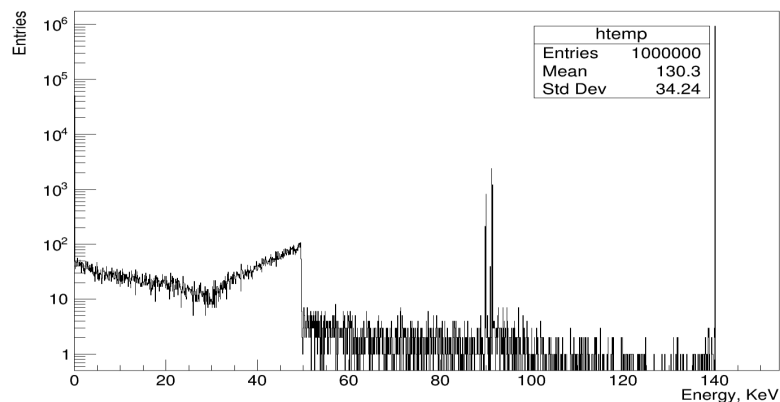


Рисунок 9 — Комптон- и фотоэффекты для GAGG:Ce 3x3x3 мм² (lg-масштаб)

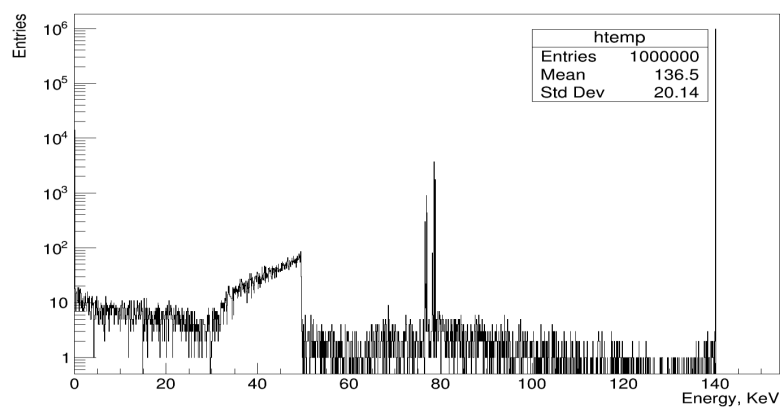


Рисунок 10 — Комптон- и фотоэффекты для GAGG:Ce 3x3x3 мм² (lg-масштаб)

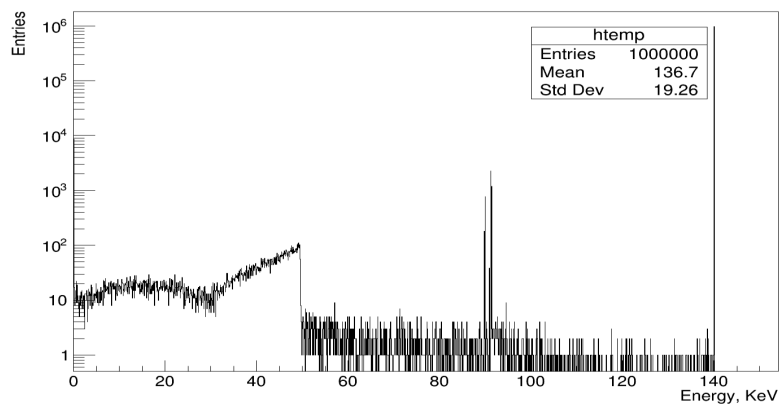


Рисунок 11 — Комптон- и фотоэффекты для GAGG:Ce 3x3x5 мм² (lg-масштаб)

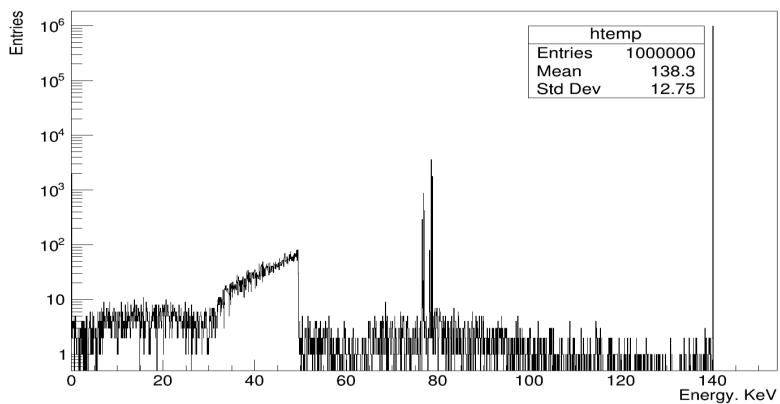


Рисунок 12 — Комптон- и фотоэффекты для LYSO:Ce 3x3x5 мм² (lg-масштаб)

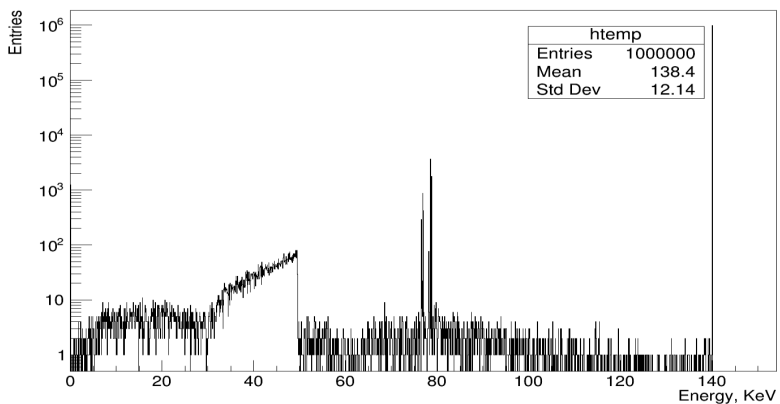


Рисунок 13 — Комптон- и фотоэффекты для LYSO:Ce 3x3x10 мм² (lg-масштаб)