

МФТИ

ФРКТ

Лабораторная работа 5.1.2

Исследование эффекта Комптона.

Добровольская Ксения
Гаврилин Илья
Б01-110

1 Аннотация

В данной работе предлагалось с помощью сцинтилляционного спектрометра исследовать энергетический спектр γ -квантов, рассеянных на графите. Определить энергию рассеянных γ -квантов в зависимости от угла рассеяния, а также энергию покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние. Ее значение составило $E = (523 \pm 13) \text{кэВ}$, что отличается от табличного всего лишь на 2% и совпадает с учетом погрешности.

2 Теоретические сведения

Рассеяние γ -лучей в веществе относится к числу явлений, в которых особенно ясно проявляется двойственная природа излучения. Волновая теория, хорошо объясняющая рассеяние длинноволнового излучения, испытывает трудности при описании рассеяния рентгеновских и γ -лучей. Эта теория, в частности, не может объяснить, почему в составе рассеянного излучения, измеренного Комптоном, кроме исходной волны с частотой ω_0 появляется дополнительная длинноволновая компонента, отсутствующая в спектре первичного излучения.

Появление этой компоненты легко объяснимо, если считать, что γ -излучение представляет собой поток квантов (фотонов), имеющих энергию $\hbar\omega$ и импульс $p = \hbar\omega/c$. Эффект Комптона — увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с падающим — интерпретируется как результат упругого соударения двух частиц: γ -кванта (фотона) и свободного электрона.

Нетрудно получить, что изменение длины волны рассеянного излучения равно

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \Lambda_k(1 - \cos\theta)$$

, где λ_0 и λ_1 — длины волн γ -кванта до и после рассеяния, а величина

$$\Lambda_k = \frac{h}{mc} = 2,42 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$

— комптоновская длина волны электрона.

Кроме рассеяния γ -кванты испытывают в среде поглощение, вызываемое фотоэффектом и рождением электрон позитронных пар. Процесс рождения пар пороговый, он возможен лишь при энергии γ -квантов больше $2mc^2 = 1,02 \text{ МэВ}$ и в рассматриваемом энергетическом диапазоне не происходит. При фотоэффекте из атома выбивается электрон, а квант поглощается. Импульс кванта делится между вылетевшим электроном и атомом, а его энергия частично передается электрону, а частично тратится на возбуждение атома. Атом практически мгновенно (за время порядка 10^{-8} с) возвращается в нормальное состояние. Его энергия возбуждения либо излучается в виде мягкого фотона, либо передается какому-нибудь другому электрону, который покидает атом (Оже-эффект). И в том, и в другом случае энергия возбуждения обычно поглощается соседними атомами рассеивателя. Основной целью данной работы является проверка соотношения для $\Delta\lambda$. Применительно к условиям нашего опыта эту формулу следует преобразовать от длин волн к энергии γ -квантов. Как нетрудно показать, соответствующее выражение имеет вид

$$\frac{1}{\varepsilon(\theta)} - \frac{1}{\varepsilon(0)} = 1 - \cos\theta$$

, где $\varepsilon(0) = \frac{E_0}{mc^2}$ — выраженная в единицах mc^2 энергия γ -квантов, падающих на рассеиватель, $\varepsilon(\theta)$ — выраженная в тех же единицах энергия квантов, испытавших комптоновское рассеяние на угол θ , а m — масса электрона.

Заменим в формуле энергию квантов, испытавших комптоновское рассеяние на угол θ , номером канала $N(\theta)$, соответствующего вершине фотопика при указанном угле θ . Обозначая буквой A неизвестный коэффициент пропорциональности между $\varepsilon(\theta)$ и $N(\theta)$, найдем:

$$\frac{1}{N(\theta)} - \frac{1}{N(0)} = A(1 - \cos \theta)$$

$$\frac{1}{N(\theta)} = \frac{1}{N(0)} + A(1 - \cos \theta)$$

Возвращаясь от переменной ε к энергии E , мы получаем, что при $\theta = 90^\circ$ формула принимает вид

$$mc^2 \left(\frac{1}{E(90)} - \frac{1}{E(0)} \right) = 1$$

или

$$mc^2 = E(0) \frac{E(90)}{E(0) - E(90)} = E_\gamma \frac{N(90)}{N(0) - N(90)}$$

В этой формуле $E(0) = E_\gamma$ – энергия электронов, рассеянных вперед, – просто равна энергии γ -лучей, испускаемых источником.

3 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

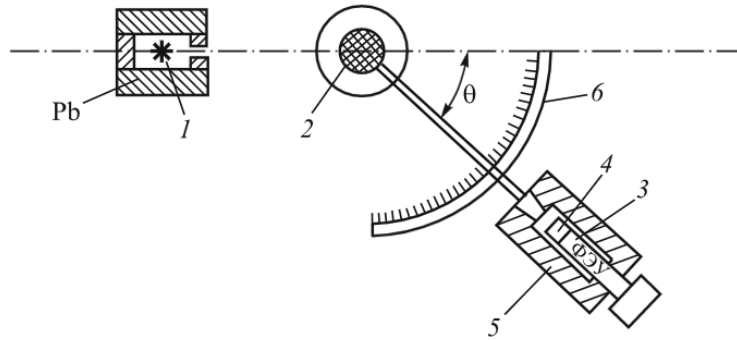


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

Источником излучения 1 служит ^{137}Cs , испускающий γ -лучи с энергией 662 кэВ. Он помещен в толстостенный свинцовый контейнер с коллиматором. Сформированный коллиматором узкий пучок γ -квантов попадает на графитовую мишень 2 (цилиндр диаметром 40 мм и высотой 100 мм).

Кванты, испытавшие комптоновское рассеяние в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком. Счетчик состоит из фотоэлектронного умножителя 3 (далее ФЭУ) и сцинтиллятора 4. Сцинтиллятором служит кристалл NaI(Tl) цилиндрической формы диаметром 40 мм и высотой 40 мм, его выходное окно находится в оптическом контакте с фотокатодом ФЭУ. Сигналы, возникающие на аноде ФЭУ, подаются на ЭВМ для амплитудного анализа. Кристалл и ФЭУ расположены в светонепроницаемом блоке, укрепленном на горизонтальной штанге. Штанга вместе с этим блоком может вращаться относительно мишени, угол поворота отсчитывается по лимбу 6.

Головная часть сцинтилляционного блока закрыта свинцовым коллиматором 5, который формирует входной пучок и защищает детектор от постороннего излучения. Основной вклад в это излучение вносят γ -кванты, проходящие из источника 1 через 6-сантиметровые стенки

защитного контейнера. Этот фон особенно заметен при исследовании комптоновского рассеяния на большие углы ($\simeq 120^\circ$), когда расстояние между детектором и источником уменьшается.

Под действием монохроматического излучения на выходе ФЭУ возникает распределение электрических импульсов. В амплитудном распределении импульсов имеется так называемый фотопик, возникающий в результате фотоэффекта, и обязанное комптоновскому рассеянию сплошное распределение. Часто фотопик называется также пиком полного поглощения, его положение однозначно связана с энергией регистрируемого γ -излучения. Нас будет интересовать положение (номер канала) вершины этого пика в зависимости от угла поворота детектора.

4 Измерения и обработка результатов

1. Включим все измерительные устройства и компьютер.
2. Запустим программу и войдем в режим измерения спектра.

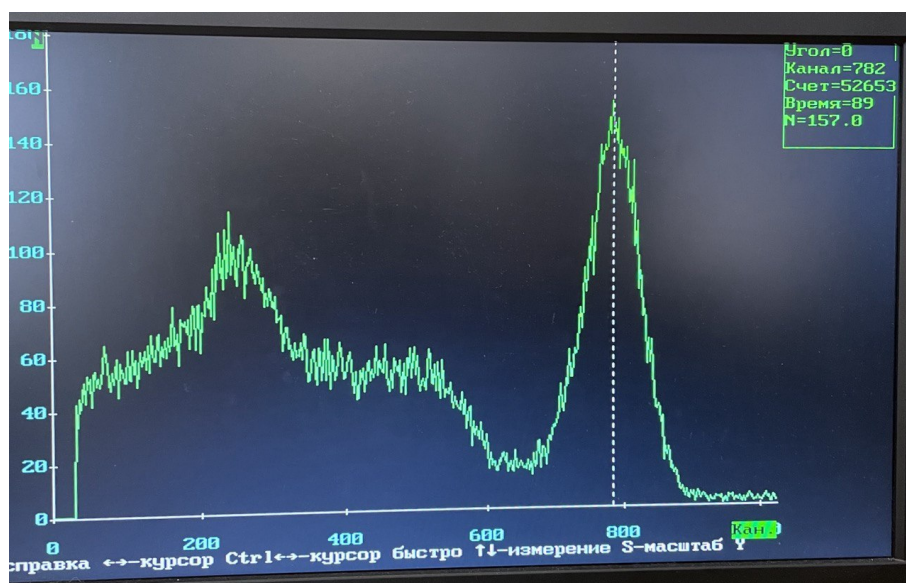


Рис. 2: Амплитудные спектры.

3. Устанавливая сцинтилляционный счетчик под разными углами θ к первоначальному направлению полета γ -квантов и вводя значения этих углов в ЭВМ, снимем амплитудные спектры и определим положения фотопиков для каждого значения угла θ ; измерения проведем с шагом 10° в диапазоне от 0° до 120° . Результаты запишем в таблицу:

$\theta, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$N, \text{шт}$	783	779	681	651	580	505	457	412	360	328	304	282	264
$\Delta_N, \text{шт}$	8	8	7	7	6	5	5	4	4	3	3	3	3

, где абсолютная погрешность измерения по счетчику

$$\Delta_N = \sqrt{(\Delta_N)_{\text{приб}}^2 + (\Delta_N)_{\text{изм}}^2}$$

$$(\Delta_N)_{\text{приб}} = 0.01N, (\Delta_N)_{\text{изм}} = 1$$

4. Используя экспериментальные результаты, построим график, откладывая по оси абсцисс величину $1 - \cos \theta$, по оси ординат — $1/N(\theta)$ и ее ошибку. Проведем через полученные точки наилучшую прямую:

$$\frac{1}{N(\theta)} = \frac{1}{N(0)} + A(1 - \cos \theta) = k(1 - \cos \theta) + b$$

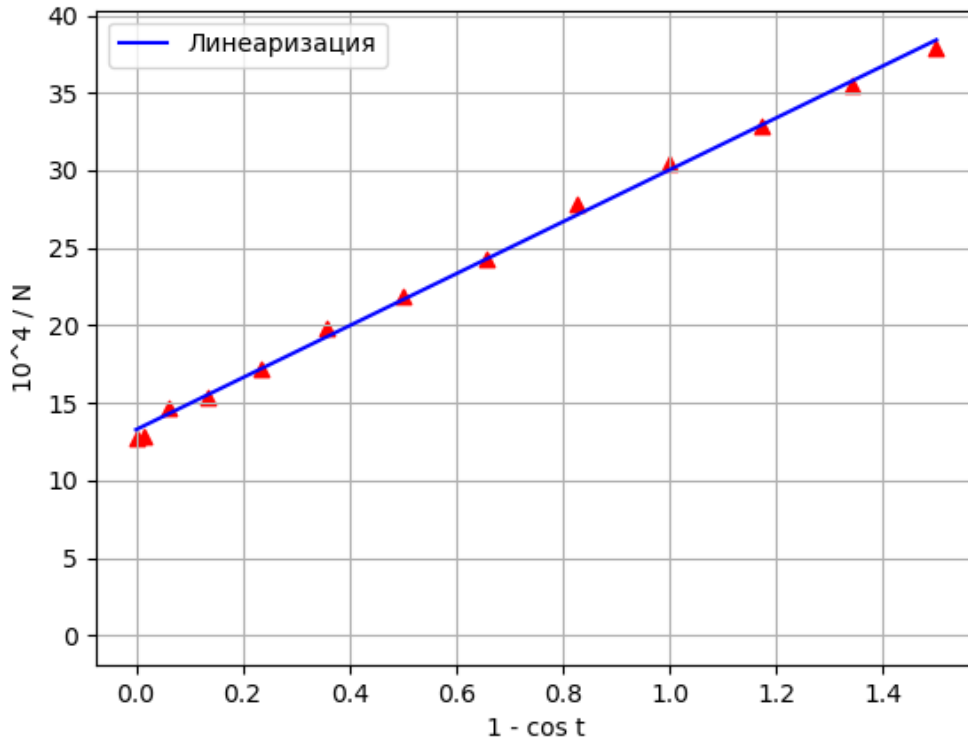


Рис. 3: График зависимости $10^4 / N$ от $(1 - \cos \theta)$.

5. Коэффициенты определяем из графика:

$$k = (16,8 \pm 0.2) * 10^4$$

$$b = (13,28 \pm 0.13) * 10^4$$

6. Определив коэффициенты в графике, найдем энергию покоя частицы, на которой происходит комптоновское рассеяние первичных γ -квантов, $E_\gamma = 662 \text{кэВ}$:

$$E = mc^2 = E(0) \frac{E(90)}{E(0) - E(90)} = E_\gamma \frac{N(90)}{N(0) - N(90)}$$

, где

$$\frac{1}{N(0)} = b \Rightarrow N(0) = \frac{1}{b} = (7.53 \pm 0.08) * 10^6$$

$$\frac{1}{N(90)} = k + b \Rightarrow N(90) = \frac{1}{k + b} = (3.32 \pm 0.03) * 10^6$$

$$E = mc^2 = (0.79 \pm 0.02) E_\gamma = (523 \pm 13) \text{кэВ}$$

7. Табличное значение покоя электрона - $E_e = 511 \text{кэВ}$. Таким образом, отклонение от табличного значения - 2%.

5 Выводы

В данной работе мы исследовали эффект Комптона. Наблюдали энергетический спектр рассеянных γ -квантов в зависимости от угла рассеяния. Также определили энергию покоя частиц, на которых происходит рассеяние, ее значение составило $E = (523 \pm 13) \text{кэВ}$, что подтверждает рассеяние именно на электронах. Табличное значение энергии покоя электрона - 511 кЭв, то есть измеренное значение отличается от табличного всего лишь на 2 % и совпадает с учетом погрешности, что говорит о хорошей точности измерений и применимости данного метода.