

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.1.2

Исследование эффекта Комптона

Гришаев Григорий С01-119

Цель работы: С помощью сцинтилляционного спектрометра исследуется энергетический спектр γ -квантов, рассеянных на графите. Определяется энергия рассеянных γ -квантов в зависимости от угла рассеяния, а также энергия покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние.

1 Теория

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.

Рассмотрим элементарную теорию эффекта Комптона. Пусть электрон до соударения покоился (его энергия равна энергии покоя mc^2), а γ -квант имел начальную энергию $\hbar\omega_0$ и импульс $\hbar\omega_0/c$. После соударения электрон приобретает энергию γmc^2 и импульс γmv , где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = v/c$, а γ -квант рассеивается на некоторый угол θ по отношению к первоначальному направлению движения. Энергия и импульс γ -кванта становятся соответственно равным $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_1/c$. Запишем для рассматриваемого процесса законы сохранения энергии и импульса:

$$\begin{aligned} mc^2 + \hbar\omega_0 &= \gamma mc^2 + \hbar\omega_1 \\ \frac{\hbar\omega_0}{c} &= \gamma mv \cos \varphi + \frac{\hbar\omega_1}{c} \cos \theta \\ \gamma mv \sin \varphi &= \frac{\hbar\omega_1}{c} \sin \theta \end{aligned}$$

Решая совместно эти уравнения и переходя от частот ω_0 и ω_1 к длинам волн λ_0 и λ_1 , нетрудно получить, что изменение длины волны рассеянного излучения равно

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) = \Lambda_K(1 - \cos \theta) \quad (1)$$

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

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

Основной целью данной работы является проверка соотношения (1). Применительно к условиям нашего опыта формулу (1) следует преобразовать от длин волн к энергии γ -квантов. Как нетрудно показать, соответствующее выражение имеет вид

$$\frac{1}{\varepsilon(\theta)} - \frac{1}{\varepsilon_0} = 1 - \cos \theta \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon_0 = E_0/(mc^2)$ - 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 , m - масса электрона.

2 Экспериментальная установка

Блок-схема установки изображена на Рис.1. 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).

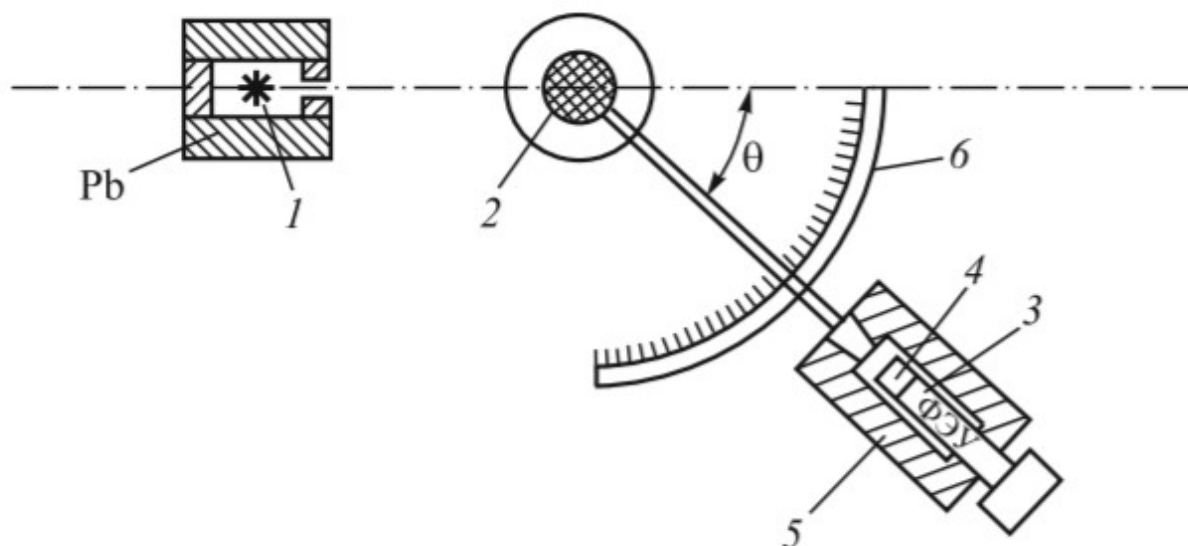


Рис. 1: Экспериментальная установка

Кванты, испытавшие комптоновское рассеяние в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком, принцип работы которого рассмотрен в работе 5.3. Счетчик состоит из фотоэлектронного умножителя 3 (далее ФЭУ) и сцинтиллятора 4. Сцинтиллятором служит кристалл $\text{NaI}(\text{Tl})$ 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.

3 Обработка результатов

Для обработки результатов используется формула (2) с замененными энергиями квантов на $N(\theta)$.

$$\frac{1}{N(\theta)} - \frac{1}{N(0)} = A(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

4 Ход работы

Графики для углов $\theta = 0^0 - 110^0$ представлены на фотографиях ниже (Рис.2).

Коэффициент A найдем с помощью графика зависимости $1 - \cos \theta$ от $\frac{1}{N(\theta)} - \frac{1}{N(0)}$. В таблицу занесем все измеренные величины:

$\theta, ^\circ$	$\sigma_{\theta, ^\circ}$	$N(\theta)$	$\sigma_{N(\theta)}$
0	1	860	20
10	1	847	20
20	1	743	20
30	1	672	20
40	1	623	20
50	1	521	20
60	1	461	20
70	1	427	20
80	1	376	20
90	1	343	20
100	1	315	20
110	1	288	20

Таблица 1: Измерение $N(\theta)$

В итоге: $A = 0.001767$. Теперь, для уменьшения погрешности, мы можем использовать коэффициент A для вычисления $N(0)$ и $N(90)$: $N(0) = 860$, $N(90) = 341$.

Получаем, что соотношение (3) справедливо и эффект Комптона в данном эксперименте имеет место быть.

Теперь посчитаем энергию γ -кванта по формуле, полученной из формулы (2). Получаем формулы для энергии и погрешности

$$E_\gamma = mc^2 \frac{N(0) - N(90)}{N(90)} \approx 771.5 \text{ кэВ} \quad (4)$$

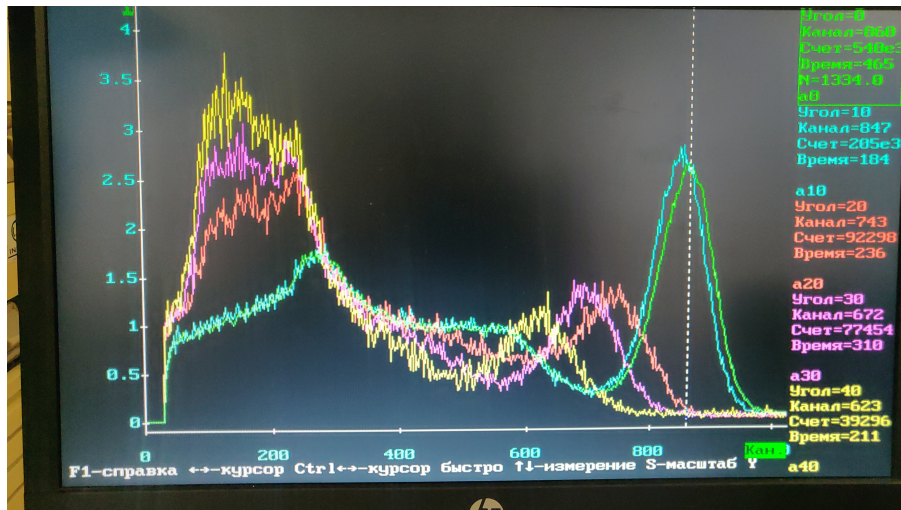
$$\sigma_{E_\gamma} = \sqrt{\left(\frac{mc^2}{N(90)}\right)^2 \cdot \sigma_{N(90)}^2 + \left(\frac{mc^2 N(0)}{N^2(90)}\right)^2 \cdot \sigma_{N(90)}^2} \approx 80.6 \text{ кэВ} \quad (5)$$

Итого,

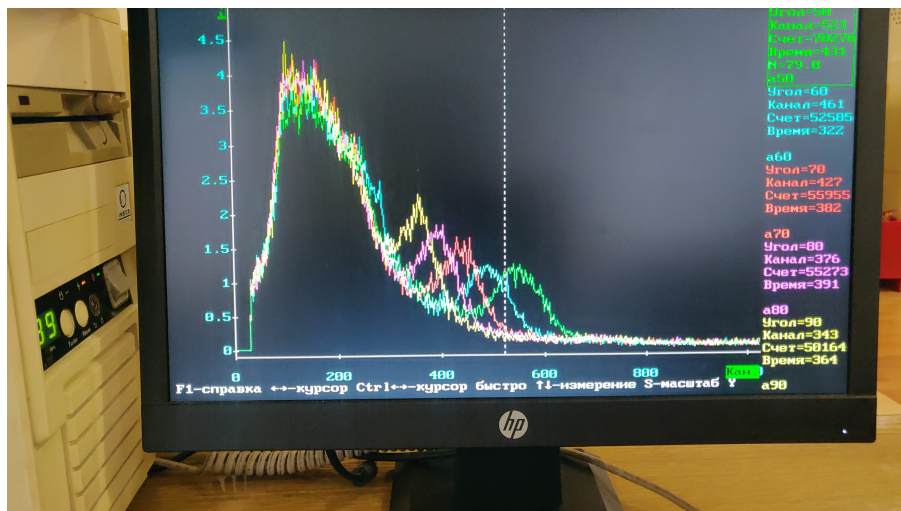
$$E_\gamma = (771.5 \pm 80.6) \text{ кэВ}$$

5 Вывод

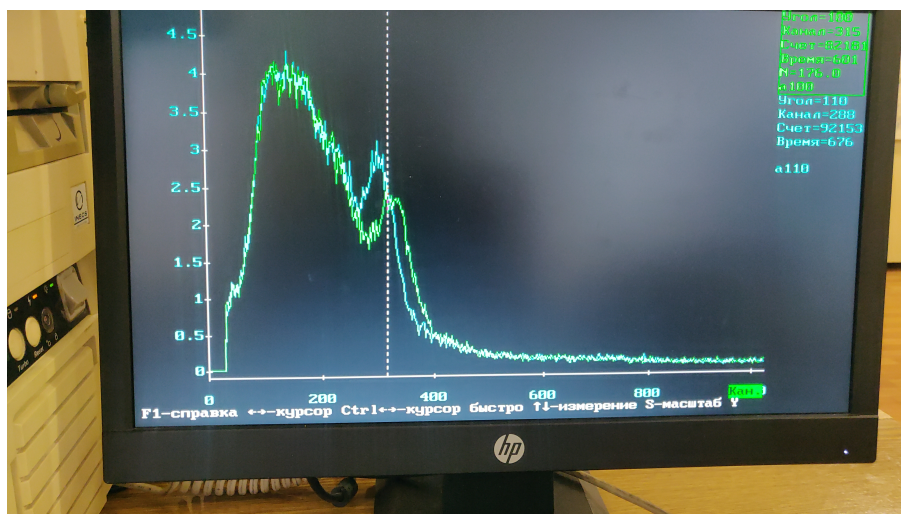
В работе мы исследовали спектр излучения γ -квантов на графите и получили, что соотношение (3), приведенное в теории, справедливо. Также мы убедились в том, что эффект Комптона в принципе возникает в нашем опыте. Мы измерили энергию γ -кванта: (771.5 ± 80.6) кэВ.



(а) Проверка для $\theta = 0 - 40^{\circ}$



(б) Проверка для $\theta = 50 - 90^{\circ}$



(с) Проверка для $\theta = 100 - 110^{\circ}$

Рис. 2: Графики для $\theta = 0 - 90^{\circ}$

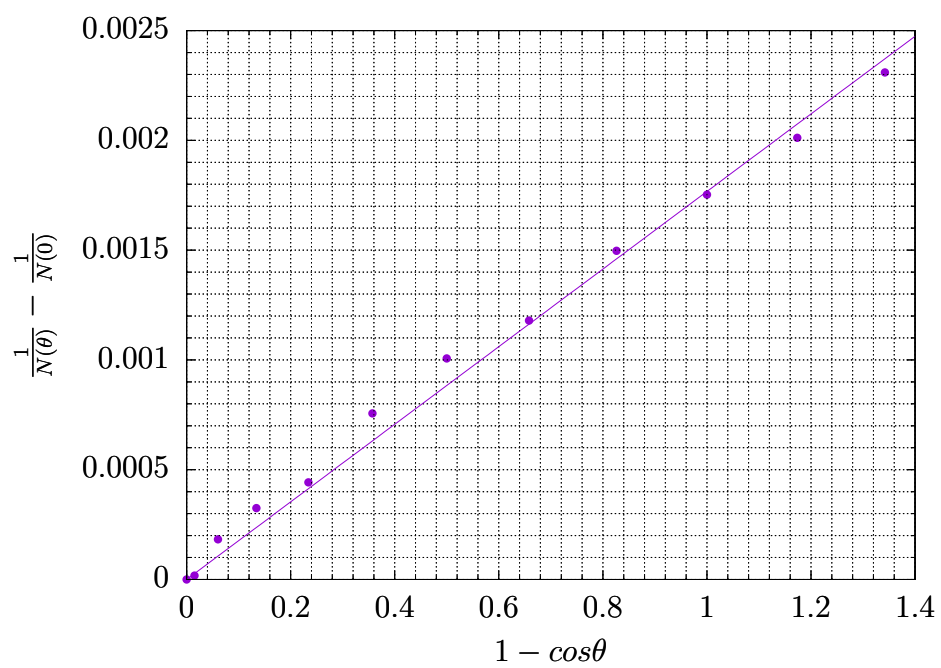


Рис. 3: График зависимости $\frac{1}{N(\theta)} - \frac{1}{N(0)}$ от $1 - \cos(\theta)$