

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Отчёт по лабораторной работе 5.1.2
Исследование эффекта Комптона

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

Сериков Алексей Романович

группа: Б03-102

Москва, 2023 г.

Аннотация

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.

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 и $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_1/c$ (рис. 1). 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.

Экспериментальная установка:

Блок-схема установки изображена на рис. 3. 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).

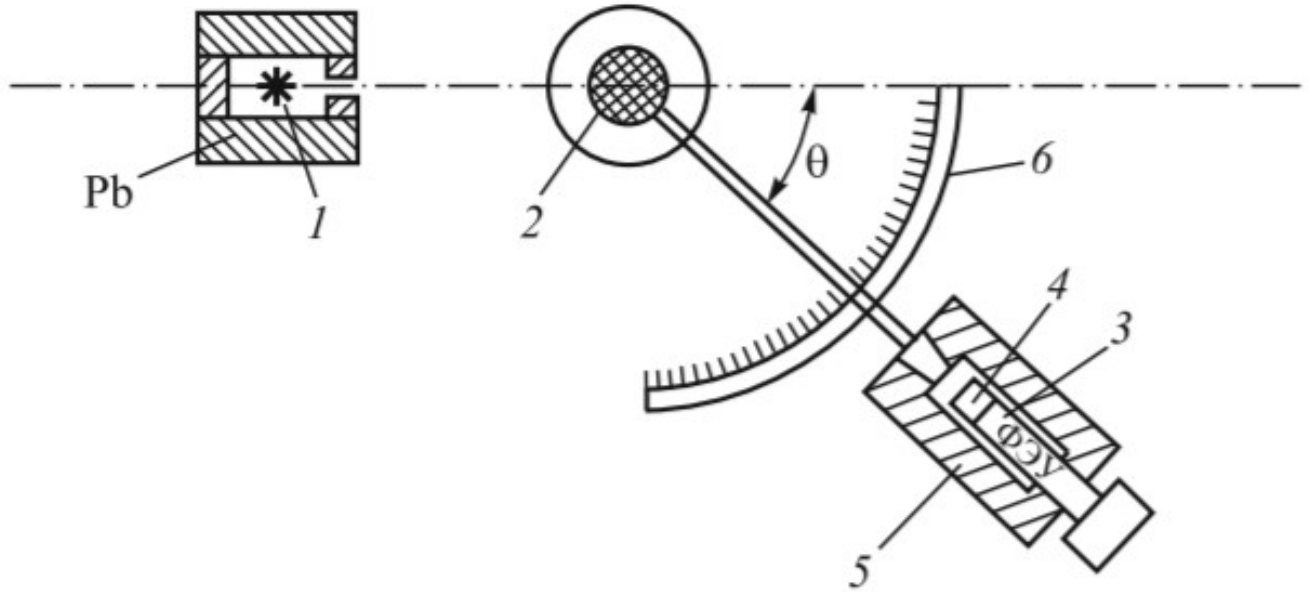


Рис. 1: Экспериментальная установка

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 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.

Пусть $\varepsilon(\theta) = AN(\theta)$, A – коэффициент пропорциональности, $N(\theta)$ – номер соответствующего канала. Тогда (2) переписывается как

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

Отсюда можно определить энергию покоя электрона как

$$mc^2 = E_\gamma \frac{N(90)}{N(0) - N(90)}, \quad (4)$$

где $E_\gamma = E_0$ – энергия испускаемых источником γ -квантов.

Ход работы:

1. Снимем зависимость числа отсчетов N от номера канала и определим положение пика для различных значений угла θ . Полученные значения занесем в таблицу 1. Погрешность измерения σ_N номера канала N возьмем за полуширину интервала на котором находится максимум (для всех углов θ $\sigma_N \approx 30$). $\sigma_\theta = 1^\circ$

| $\theta, ^\circ$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N | 937 | 877 | 852 | 777 | 731 | 588 | 543 | 477 | 436 | 394 | 358 | 333 | 310 |

Таблица 1: Результаты измерений зависимости $N(\theta)$.

2. По полученным данным построим график зависимости $\frac{1}{N(\theta)} = k(1 - \cos \theta)$. Полученный график изобразим на Рис2.

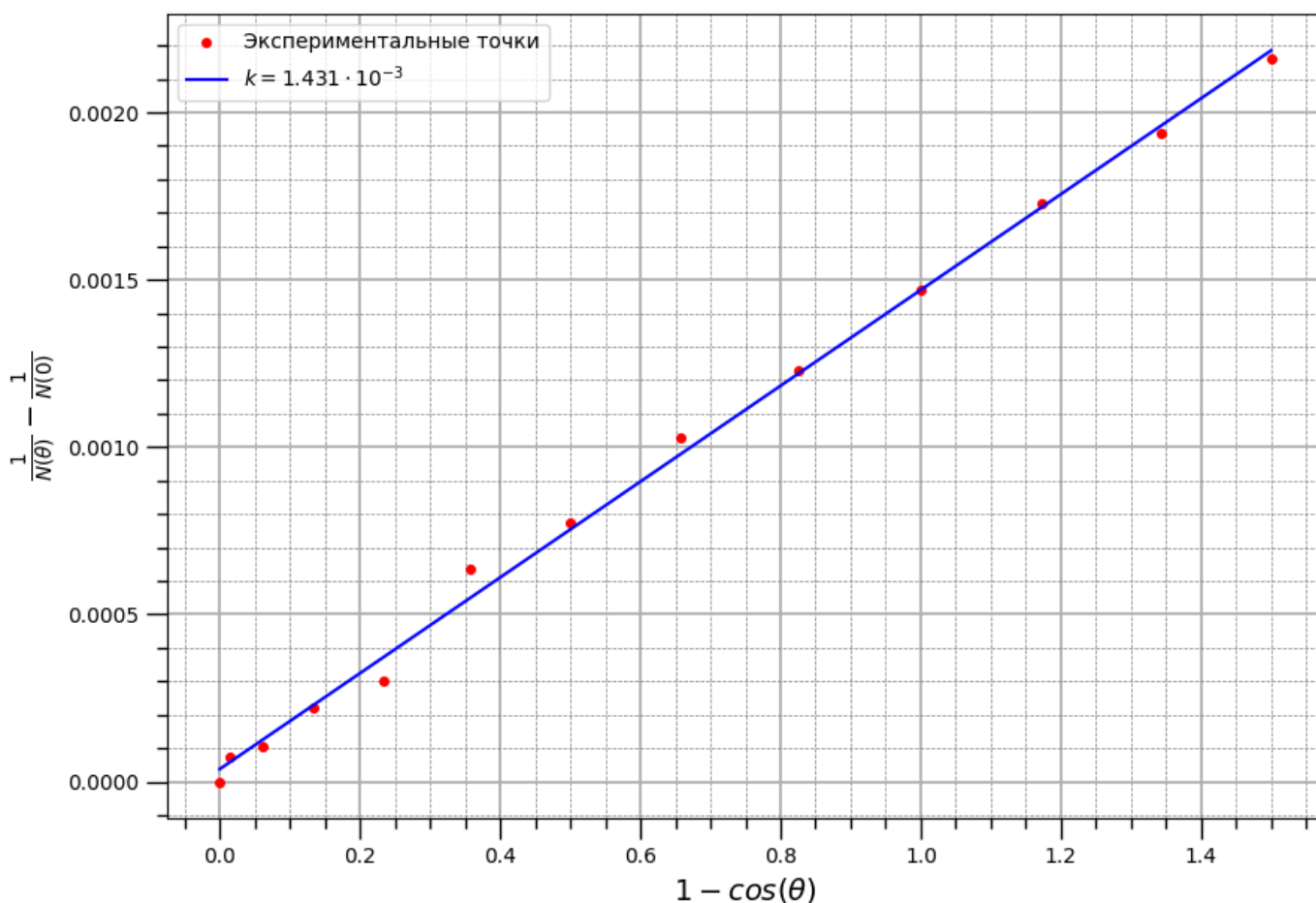


Рис. 2: График зависимости $\frac{1}{N(\theta)} = k(1 - \cos \theta)$

3. Подсчет погрешности по формулам:

$$\sigma_{1-\cos\theta} = \sin\theta \cdot \sigma_\theta$$

$$\sigma_k = k \sqrt{\frac{\sigma_{(1-\cos\theta)}^2}{(1-\cos\theta)^2} + \frac{\sigma_{\frac{1}{N(\theta)}}^2}{\left(\frac{1}{N(\theta)}\right)^2}} = 0,05k = 0,07 \cdot 10^{-3}$$

4. По полученным результатам и формуле:

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

определим энергию покоя частицы на которой происходит комптоновское рассеяние γ квантов. $E_\gamma = 661,66$ кэВ

$$\sigma_{mc^2} = mc^2 \cdot \frac{\sigma_{N(\theta)}}{N(\theta)} \sqrt{2}$$

$$mc^2 = 0.48 \pm 0,03 \text{ МэВ}$$

Обсуждение результатов и выводы:

В ходе данной работы мы исследовали энергетический спектр γ - квантов. Определили, что рассеяние γ - квантов является комптоновским, так как формула $\Delta\lambda = \lambda_K(1 - \cos\theta)$ подтверждается экспериментально, что видно из линейной зависимости на Рис2. Также установили, что рассеяние происходит на электронах, так как расчет массы покоя показал значение $mc^2 = 0.48 \pm 0,03$ МэВ, что в пределах погрешности совпадает с массой покоя электрона $m_e c^2 = 0.51$ МэВ. Вклад в ошибку дают погрешности угла θ и погрешность определения канала N на котором находится максимум.