

*Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования*

**«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**Лабораторная работа №1.2.**

по курсу общей физики  
на тему:

**«Исследование эффекта  
Комптона»**

*Работу выполнил:  
Баринев Леонид  
(группа Б02-827)*

Долгопрудный  
2020

## 1. Цель работы

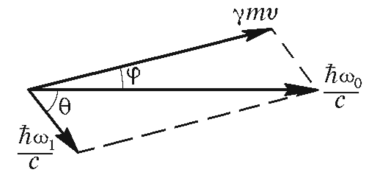
Провести исследование энергетического спектра  $\gamma$ -квантов, рассеянных на графите. Определить зависимость энергии рассеянных  $\gamma$ -квантов от угла рассеяния, а также получить энергию покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние.

## 2. Суть исследуемого явления

*Эффект Комптона* — увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с падающим. Интерпретируется как результат упругого соударения двух частиц:  $\gamma$ -кванта (фотона) и свободного электрона.

## 3. Теория явления

Пусть электрон до соударения покоился, а  $\gamma$ -квант имел начальную энергию  $\hbar\omega_0$  и импульс  $\hbar\omega_0/c$ . После соударения электрон приобретает энергию  $\gamma mc^2$  и импульс  $\gamma mv$ , где  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $\beta = v/c$ , а  $\gamma$ -квант рассеивается на некоторый угол  $\theta$  по отношению к первоначальному направлению движения. Энергия и импульс  $\gamma$ -кванта становятся соответственно равными  $\hbar\omega_1$  и  $\hbar\omega_1/c$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Векторная диаграмма рассеяния  $\gamma$ -кванта на электроне

Запишем для рассматриваемого процесса законы сохранения энергии и импульса:

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

Решая совместно эти уравнения и переходя от частот  $\omega_0$  и  $\omega_1$  к длинам волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$ , 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  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  — длины волн  $\gamma$ -кванта до и после рассеяния, а величина

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

называется комптоновской длиной волны электрона. Из формулы (1) следует, что комптоновское смещение не зависит ни от длины волны первичного излучения, ни от рода вещества, в котором наблюдается рассеяние. В приведенном выводе электрон в атоме считается свободным.

Применительно к условиям нашего опыта формулу (1) следует преобразовать от длин волн к энергии  $\gamma$ -квантов. Выражение будет иметь вид:

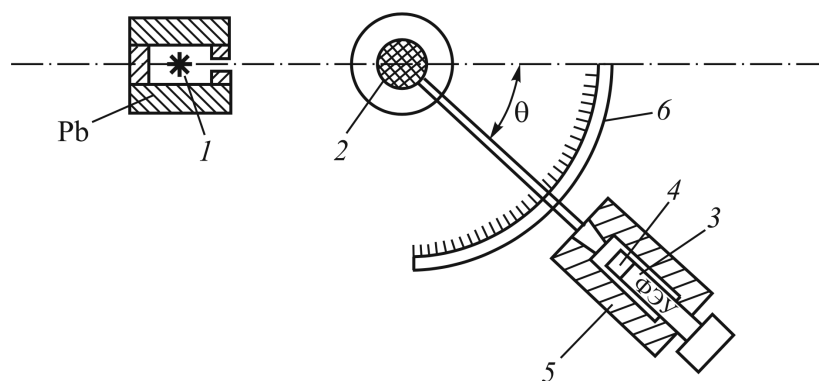
$$\frac{1}{\varepsilon(\theta)} - \frac{1}{\varepsilon_0} = 1 - \cos \theta \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon_0 = E_0/(mc^2)$  — выраженная в единицах  $mc^2$  энергия  $\gamma$ -квантов, падающих на рассеиватель,  $\varepsilon(\theta)$  — выраженная в тех же единицах энергия квантов, испытавших комптоновское рассеяние на угол  $\theta$ ,  $m$  — масса электрона.

## 4. Эксперимент

### 4.1. Экспериментальная установка

Блок-схема установки изображена на *рис. 2*. Источником излучения *1* служит  $^{137}\text{Cs}$ , испускающий  $\gamma$ -лучи с энергией 662 кэВ. Он помещен в толстостенный свинцовый контейнер с коллиматором. Сформированный коллиматором узкий пучок  $\gamma$ -квантов попадает на графитовую мишень *2* (цилиндр диаметром 40 мм и высотой 100 мм).



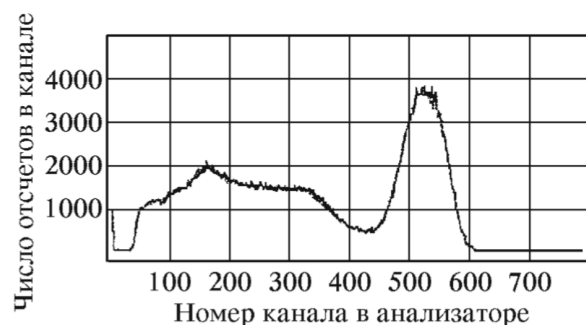
**Рис. 2.** Блок-схема установки по изучению рассеяния  $\gamma$ -квантов

Кванты, испытывающие комптоновское рассеяние в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком. 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*.

Головная часть сцинтилляционного блока закрыта свинцовым коллиматором *5*, который формирует входной пучок и защищает детектор от постороннего излучения. Основной вклад в это излучение вносят  $\gamma$ -кванты, проходящие из источника *1* через 6-сантиметровые стенки защитного контейнера. Этот фон особенно заметен при исследовании комптоновского рассеяния на большие углы ( $\approx 120^\circ$ ), когда расстояние между детектором и источником уменьшается.

Существуют три механизма взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом: комптоновское рассеяние, фотоэффект и рождение электрон-позитронных пар (в нашем случае этот механизм не реализуется, так как энергия  $\gamma$ -квантов не превосходит порог рождения пар). Во всех этих случаях в веществе появляется быстрый электрон, который за счет кулоновского взаимодействия эффективно возбуждает на своем пути атомы и молекулы.

При фотоэффекте  $\gamma$ -квант целиком поглощается атомом, а один из электронов внутренней оболочки выбрасывается за пределы атома, унося все переданную  $\gamma$ -квантом энергию и теряя ее затем в кристалле. При комптоновском рассеянии электрону передается только часть энергии  $\gamma$ -кванта, а оставшаяся часть уносится рассеянным  $\gamma$ -квантом.



**Рис. 3.** Амплитудное распределение импульсов, возникающих под действием монохроматических  $\gamma$ -квантов в сцинтилляторе NaI(Tl)

Таким образом, под действием монохроматического излучения на выходе ФЭУ возникает распределение электрических импульсов, показанное на рис. 3. В амплитудном распределении импульсов имеется так называемый фотопик, возникающий в результате фотоэффекта, и обязанное комптоновскому рассеянию сплошное распределение. Его положение однозначно связано в энергией регистрируемого  $\gamma$ -излучения.

Слева от фотопика после большого провала начинается непрерывный спектр комптоновских электронов. Этот фон сохраняется при любом угле рассеяния и мешает определению фотопика рассеянных  $\gamma$ -квантов. Его положение легко идентифицируется при рассмотрении всех зарегистрированных спектров.

Для определения энергии  $\gamma$ -квантов нужно исследовать кривую распределения энергетических потерь в кристалле, т.е. распределение по амплитуде электрических импульсов на выходе ФЭУ. Такое распределение измеряется в данной работе с помощью компьютера, работающего в режиме амплитудного анализатора.

## 5. Результаты эксперимента

$\theta, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60
$N$	824	839	704	685	595	531	491
$\theta, ^\circ$	70	80	90	100	110	120	
$N$	432	384	352	332	288	253	

**Таблица 1.** Зависимость номера канала  $N$  от угла рассеяния  $\theta$

Построим график зависимости величины, обратной к номеру канала  $1/N$  от  $(1 - \cos \theta)$ .

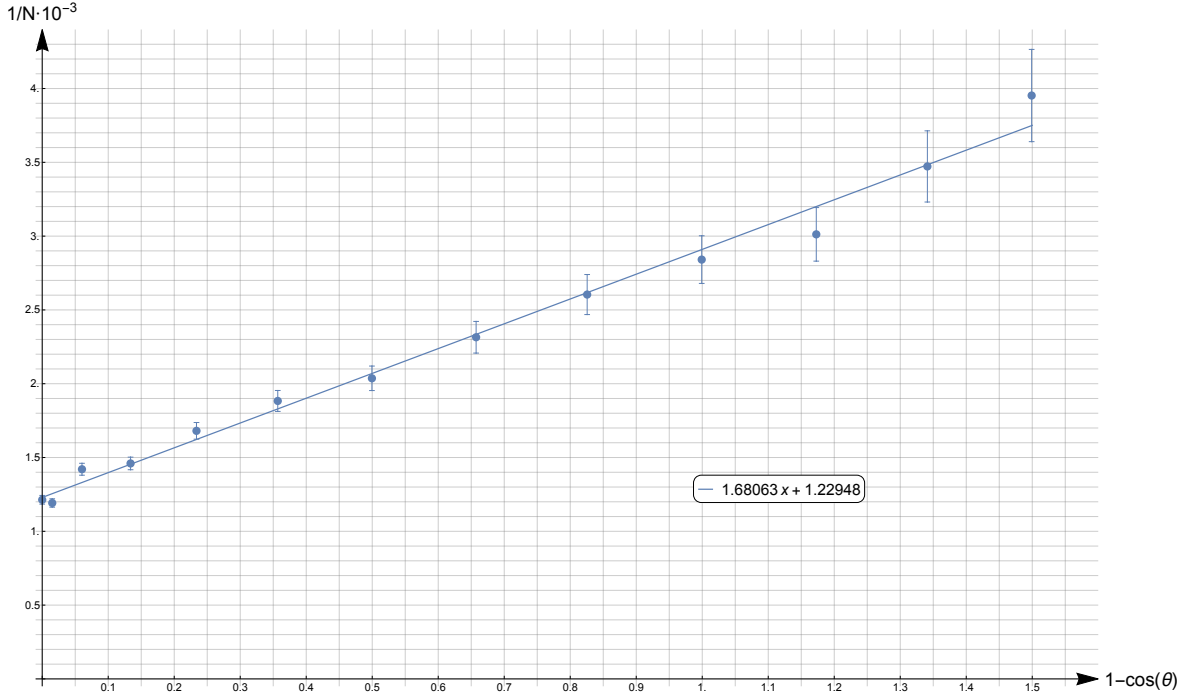


Рис. 4. График зависимости величины, обратной к номеру канала  $1/N$  от  $(1 - \cos \theta)$

## 6. Анализ результатов

Заменим в формуле (2) энергию квантов, испытавших комптоновское рассеяние на угол  $\theta$ , номером канала  $N(\theta)$ , соответствующего вершине фотопика при указанном угле  $\theta$ . Обозначая буквой  $A$  неизвестный коэффициент пропорциональности между  $\varepsilon(\theta)$  и  $N(\theta)$ , найдем:

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

Пересечение прямой на рис. 4 с осью ординат определяет наилучшее значение  $N_{\text{наил}}(0)$ .

$$\begin{aligned} 1/N_{\text{наил}}(0) &= (1,23 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \\ N_{\text{наил}}(0) &= 813 \pm 26 \end{aligned}$$

Пересечение линии (рис. 4) с прямой  $\cos \theta = 0$  позволяет найти наилучшее значение  $N_{\text{наил}}(90)$ .

$$\begin{aligned} 1/N_{\text{наил}}(90) &= (2,91 \pm 0,09) \cdot 10^{-3} \\ N_{\text{наил}}(90) &= 343 \pm 10 \end{aligned}$$

Найдем энергию покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние. Вернемся от переменной  $\varepsilon$  к энергии  $E$  в формуле (2). При  $\theta = 90^\circ$  формула принимает вид

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

$E(0) = E_\gamma$  — энергия электронов, рассеянных вперед, — просто равна энергии  $\gamma$ -лучей, испускаемых источником.

$$mc^2 = (0,48 \pm 0,3) \text{ МэВ}$$

## 7. Выводы

В работе был исследован энергетический спектр  $\gamma$ -квантов, рассеянных на графите. Была определена энергия рассеянных  $\gamma$ -квантов в зависимости от угла рассеяния (*рис. 4*), что подтверждает справедливость формулы (2). Из полученной зависимости на *рис. 4* найдена энергия покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние:

$$mc^2 = (0,48 \pm 0,3) \text{ МэВ}$$

Величина в пределах погрешности совпадает с табличной энергией покоя электрона:

$$(m_e c^2)_{\text{табл}} = 0,512 \text{ МэВ}$$

Это подтверждает гипотезу о том, что комптоновское рассеяние происходит на свободных электронах.