

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
Физтех-школа физики и исследований имени Ландау

Лабораторная работа № 5.1.2  
**Исследование эффекта Комптона**

Полубояринов Иван  
Соколов Игорь  
Группа Б02-210с

Долгопрудный, 2024 г.

# 1 Аннотация

Исследовано комптоновское рассеяние фотонов. Подтверждено теоретическое описание явления и проверено, что рассеяние происходит на электронах.

## 2 Теоретическое описание

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

Рассмотрим элементарную теорию эффекта Комптона. Пусть электрон до соударения покоился (его энергия покоя  $mc^2$ ), а  $\gamma$ -квант имел начальную энергию  $\hbar\omega_0$ ; пусть также после соударения электрон приобрел некоторую энергию  $\gamma mc^2$  и импульс  $\mathbf{p}$ , где  $\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$  ( $v$  – приобретённая электроном скорость), а  $\gamma$ -квант рассеивается на некоторый угол  $\theta$  по отношению к первоначальному направлению движения, а его энергия становится равной  $\hbar\omega_1$ . Введём ортонормированный базис в трёхмерном пространстве, считая ось  $x$  сонаправленной с первоначальным направлением движения.

Пусть  $p^\mu$  – 4-вектор импульса электрона до соударения,  $K^\mu$  – 4-вектор импульса  $\gamma$ -кванта до соударения, а  $p'^\mu$  – 4-вектор импульса электрона после соударения,  $K'^\mu$  – 4-вектор импульса  $\gamma$ -кванта после соударения. Тогда:

$$p^\mu = \begin{pmatrix} mc \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad K^\mu = \begin{pmatrix} \hbar\omega_0/c \\ \hbar\omega_0/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad p'^\mu = \begin{pmatrix} mc \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}, \quad K'^\mu = \begin{pmatrix} \hbar\omega_1/c \\ \hbar\omega_1 \cos(\theta)/c \\ \hbar\omega_1 \sin(\theta)/c \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Пользуясь законом сохранения 4-импульса для всей системы из электрона и  $\gamma$ -кванта и переходя к длинам волны  $\lambda$ , мы получаем:

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

где  $\Lambda_c = \frac{h}{mc} = 2,4 \text{ пм}$  – комптоновская длина волны электрона.

Основной целью данной работы является проверка соотношения (1). Применительно к условиям нашего опыта данную формулу следует преобразовать от длин волн к энергии  $\gamma$ -квантов:

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

где  $\varepsilon_0 = E_0/mc^2$  – 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.

Отметим, что всё вышесказанное применительно в том случае, когда электрон свободный, что справедливо для лёгких атомов, где энергия связи не больше нескольких килоэлектрон-вольт (а чаще всего меньше), и  $\gamma$ -квантов с энергией в несколько десятков-сотен килоэлектрон-вольт.

## 3 Описание установки

На рис. 1 изображена блок-схема установки.

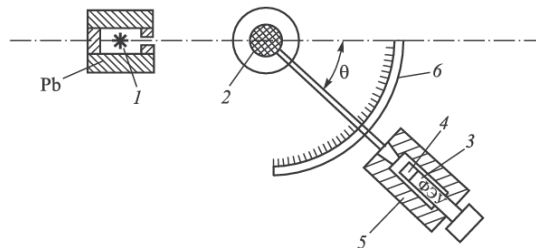


Рис. 1: Блок-схема установки по изучению рассеяния  $\gamma$ -квантов

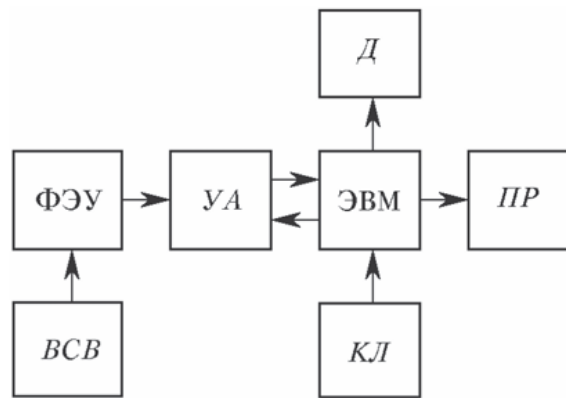


Рис. 2: Блок-схема измерительного комплекса

Источником (1) служит  $^{137}\text{Cs}$ , испускающий  $\gamma$ -лучи с энергией 662 кэВ, который помещён в толстостенный свинцовый контейнер с коллиматором. Сформированный коллиматором узкий пучок  $\gamma$ -квантов попадает на графитовую мишень (2), испытывает рассеяние и регистрируется сцинтилляционным счётчиком, состоящим из фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и сцинтиллятора – выходное окно сцинтиллятора находится в оптическом контакте с фотокатодом ФЭУ. Сигналы, возникающие в аноде ФЭУ, подаются на компьютер для амплитудного анализа. Кристалл  $\text{NaI(Tl)}$  (играющий роль сцинтиллятора) и ФЭУ расположены в светонепроницаемом блоке, укреплённого на горизонтальной штанге, которая может вместе с ним вращаться, угол поворота отсчитывается по лимбу (6). Головная часть сцинтилляционного блока закрыта свинцовым коллиматором (5), который формирует входной пучок и защищает детектор от постороннего излучения, в основном  $\gamma$ -квантов, проходящих через стенки защитного контейнера источника. При больших углах измерения для дополнительной защиты между контейнером и источником и детектором ставился свинцовый экран.

На рисунке 2 представлена функциональная блок-схема измерительного комплекса, который состоит из ФЭУ, питаемого от высоковольтного выпрямителя ВСВ, обеспечивающего работу ФЭУ в спектрометрическом режиме, усилителя-анализатора УА, являющегося входным интерфейсом ЭВМ, управляемой с клавиатуры КЛ. В ходе проведения эксперимента информация отражается на экране дисплея Д. При работе ФЭУ в спектрометрическом режиме величина выходного электрического импульса, снимаемого с анода ФЭУ, пропорциональна энергии регистрируемого  $\gamma$ -кванта, при этом световая вспышка в сцинтилляторе вызывается не самими  $\gamma$ -квантами, а образующимися в кристалле под действием  $\gamma$ -квантов электронами.

В итоге на выходе ФЭУ возникает распределение электрических импульсов, показанное на 3. 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  $\gamma$ -излучения. Нас будет интересовать положение (номер канала) вершины этого пика в зависимости от угла поворота детектора. Точность определения положения фотопика составляет примерно 1%.

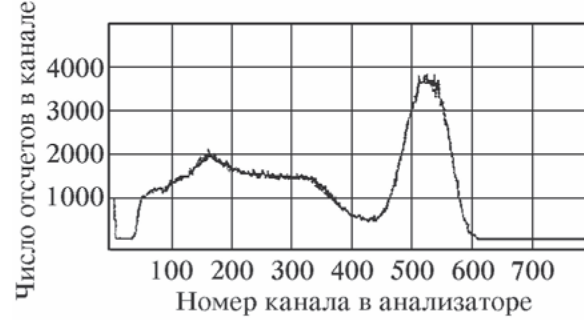


Рис. 3: Амплитудное распределение импульсов, возникающих под действием монохроматических  $\gamma$ -квантов в сцинтилляторе NaI(Tl)

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  $N(\theta)$ , найдём:

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

Отсюда может быть найдена энергия покоя электрона по формуле:

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

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

## 4 Результаты и обсуждение

По измеренным значениям (табл. 1) построим график зависимости (рис. 4).

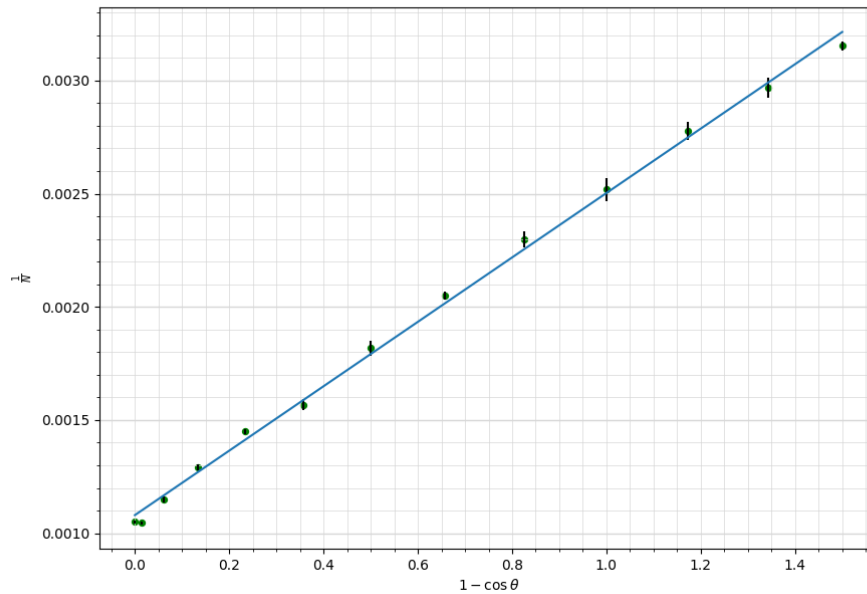


Рис. 4: Зависимость номера канала детектора  $N$  от угла рассеяния  $\theta$

Видно, что экспериментальные точки достаточно хорошо ложатся на прямую, что подтверждает теоретическое описание явления. Методом МНК уравнение аппроксимирующей прямой

$$\frac{1}{N} = 0.00142 * (1 - \cos \theta) + 0.00108. \quad (5)$$

Подстановкой в это уравнение  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , найдем  $N(0)$  и  $N(90)$  соответственно:

$$N(0) = 925 \text{ кэВ}, \quad (6)$$

$$N(90) = 399 \text{ кэВ}. \quad (7)$$

Наконец, по формуле (4) найдем энергию покоя рассеивающей частицы (учитывая, что энергия фотонов, испускаемых источником  $E_\gamma = 622 \text{ кэВ}$ ):

$$mc^2 = 502 \text{ кэВ}. \quad (8)$$

Энергия покоя электрона равна  $m_{\text{эл}}c^2 = 510 \text{ кэВ}$ . Следовательно, в данном опыте рассеивание производится на электронах, как и предполагалось.

## 5 Вывод

Исследовано комптоновское рассеяние фотонов на графите. Подтверждено теоретическое описание явления, вычислена энергия покоя рассеивающих частиц, которая оказалась крайне близка к энергии покоя электронов. Следовательно, подтверждено предположение, что рассеивание происходит на электронах.

## Приложение

$\theta^\circ$	$N$	$\sigma_N$
0	951	6
10	956	5
20	869	10
30	774	8
40	690	5
50	638	10
60	550	10
70	488	4
80	435	7
90	397	8
100	360	5
110	337	5
120	317	2

Таблица 1: Экспериментальные данные