

---

Московский Физико-Технический Институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 5.1.2

---

# Эффект Комптона

---

**Автор:**

Филиппенко Павел Б01-009



Долгопрудный, 2022

## Цель работы

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

## Теоретическая часть

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

Из закона сохранения 4-импульса для системы «фотон + электрон» следует формула для изменения длины волны рассеянного излучения:

$$\Delta\lambda = \Lambda_K(1 - \cos\theta), \quad (*)$$

где величина  $\Lambda_K = h/(mc) = 2,42 \cdot 10^{-10}$  см называется комптоновской длиной волны электрона.

Из формулы (\*) следует, что комптоновское смещение не зависит ни от длины волны первичного излучения, ни от рода вещества, в котором наблюдается рассеяние. В общем случае комптоновское рассеяние происходит на свободных электронах в атоме. Для  $\gamma$ -квантов с энергией в несколько десятков, а тем более сотен килоэлектрон-вольт, связь электронов в атоме мало существенна, так как энергия их связи в легких атомах не превосходит нескольких килоэлектрон-вольт, а для большинства электронов еще меньше.

При рассеянии на связанных электронах изменение импульса кванта воспринимается атомом в целом. Поскольку масса атома очень велика, передача импульса не сопровождается сколь-нибудь заметной передачей энергии, и наблюдается несмещенная (по энергии) компонента в спектре рассеянного излучения. Таким образом, рассеяние  $\gamma$ -квантов на связанных электронах можно рассматривать как упругое столкновение квантов с атомами.

Основной целью данной работы является проверка соотношения (\*). Применительно к условиям нашего опыта формулу (\*) следует преобразовать от длин волн к энергиям  $\gamma$ -квантов. Как нетрудно показать, соответствующее выражение имеет вид:

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

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.

Заменим в формуле (\*\*) энергию квантов, испытавших комптоновское рассеяние на угол  $\theta$ , номером канала  $N(\theta)$ , соответствующего вершине фотопика при указанном угле  $\theta$ :

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

где  $A$  – неизвестный коэффициент пропорциональности между  $\varepsilon(\theta)$  и  $N(\theta)$ .

## Экспериментальная установка

Источником излучения служит  $^{137}\text{Cs}$ , испускающий  $\gamma$ -лучи с энергией 662 кэВ. Он помещен в свинцовый контейнер с коллиматором. Сформированный коллиматором узкий пучок  $\gamma$ -квантов попадает на графитовую мишень.

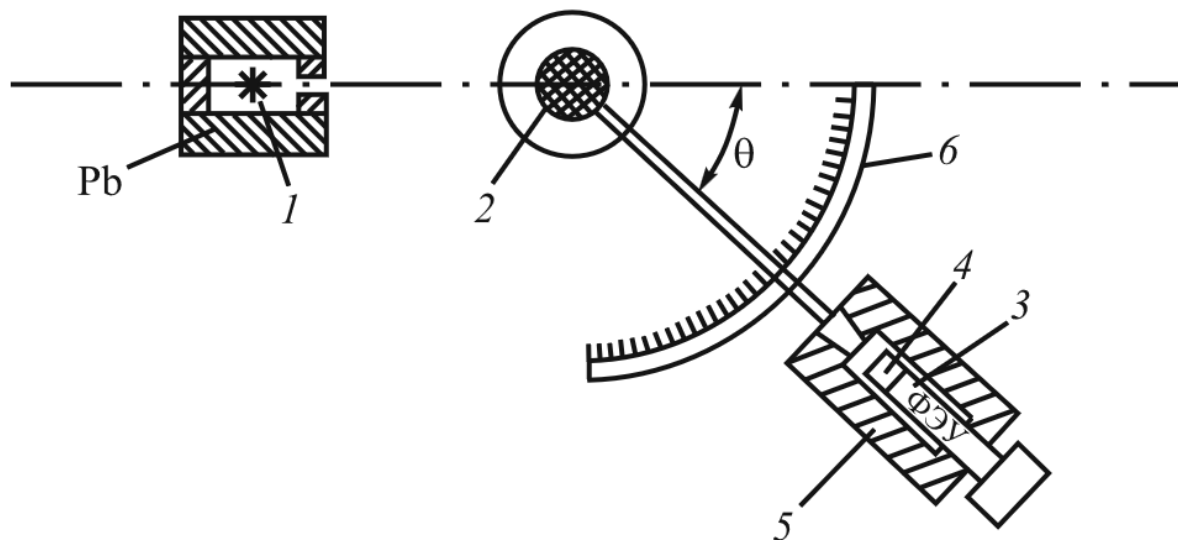


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Кванты, испытавшие комптоновское рассеяние в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком. Счетчик состоит из фотоэлектронного умножителя 3 (далее ФЭУ) и сцинтиллятора 4. Сцинтиллятором служит кристалл  $\text{NaI(Tl)}$  цилиндрической формы диаметром 40 мм и высотой 40 мм, его выходное окно находится в оптическом контакте с фотокатодом ФЭУ. Сигналы, возникающие на 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.

## Обработка экспериментальных данных

В формуле для эффекта Комптона

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

перейдем от длин волн к энергиям фотонов

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

где  $\varepsilon(\theta) = \frac{E(\theta)}{mc}$  – приведенная энергия фотона. При этом  $m$  – масса электрона, соответственно  $\varepsilon(0) = \varepsilon_0$  – энергия фотонов, падающих на рассеиватель.

Теперь заменим в последней формуле приведенную энергию фотона на номер канала  $N$ , соответствующего вершине фотопика при указанном угле  $\theta$ .

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

Погрешность угла  $\theta$  считаем равным  $1^\circ$ , погрешность определения канала  $1\%$ . В таком случае, если  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_N$  – абсолютные погрешности измерения угла и канала соответственно, то справедливо

$\theta^\circ$	$\theta$	$N$	$\sigma_N$	$1 - \cos \theta$	$\sigma_{1-\cos \theta}$	$1/N$	$\sigma_{1/N} \cdot 10^{-5}$
0	0,000	968	9,68	0,000	0,000	0,0010	1,03
10	0,175	843	8,43	0,015	0,003	0,0012	1,19
20	0,349	852	8,52	0,060	0,006	0,0012	1,17
30	0,524	742	7,42	0,134	0,009	0,0013	1,35
40	0,698	664	6,64	0,234	0,011	0,0015	1,51
50	0,873	583	5,83	0,357	0,013	0,0017	1,72
60	1,047	518	5,18	0,500	0,015	0,0019	1,93
70	1,222	459	4,59	0,658	0,016	0,0022	2,18
80	1,396	414	4,14	0,826	0,017	0,0024	2,42
90	1,571	366	3,66	1,000	0,017	0,0027	2,73
100	1,745	332	3,32	1,174	0,017	0,0030	3,01
110	1,920	303	3,03	1,342	0,016	0,0033	3,30
120	2,094	288	2,88	1,500	0,015	0,0035	3,47

Таблица 1: Таблица экспериментальных данных

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

$$\sigma_{1/N} = \frac{\sigma_N}{N^2}$$

По экспериментальным данным построим график зависимости  $\frac{1}{N}(1 - \cos \theta)$ . Как видно из формулы, график должен получиться линейным.

Как видно, экспериментальный график и правда линейный. Пересечение этого графика с осью ординат есть наилучшее приближение канала при  $\theta = 0$ , пересечение графика с прямой  $1 - \cos \theta = 1$  есть наилучшее приближение канала при  $\theta = 90^\circ$ . Погрешности данных величин рассчитывались исходя из погрешностей линеаризации и закона вычисления косвенных погрешностей.

$$N_{best}(0) = (898 \pm 13) \quad N_{best}(90) = (368 \pm 5)$$

Возвращаясь обратно к формуле, содержащей энергии фотонов получем при  $\theta = 90^\circ$

$$mc^2 \left( \frac{1}{E(90^\circ)} - \frac{1}{E(0)} \right) = 1 \quad (4)$$

С учетом, что  $E(0) = E_\gamma = 662$  кэВ можем получить энергию покоя электрона

$$mc^2 = E_\gamma \frac{N(90^\circ)}{N(0) - N(90^\circ)} \quad (5)$$

Расчитаем погрешность величины  $mc^2$ . По закону расчета косвенных погрешностей получим

$$\sigma_{mc^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial(mc^2)}{\partial N(0)} \right)^2 \sigma_{N(0)}^2 + \left( \frac{\partial(mc^2)}{\partial N(90)} \right)^2 \sigma_{N(90)}^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(mc^2)}{\partial N(0)} = \frac{-E_\gamma N(90)}{(N(0) - N(90))^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(mc^2)}{\partial N(90)} = \frac{E_\gamma N(0)}{(N(0) - N(90))^2} \quad (8)$$

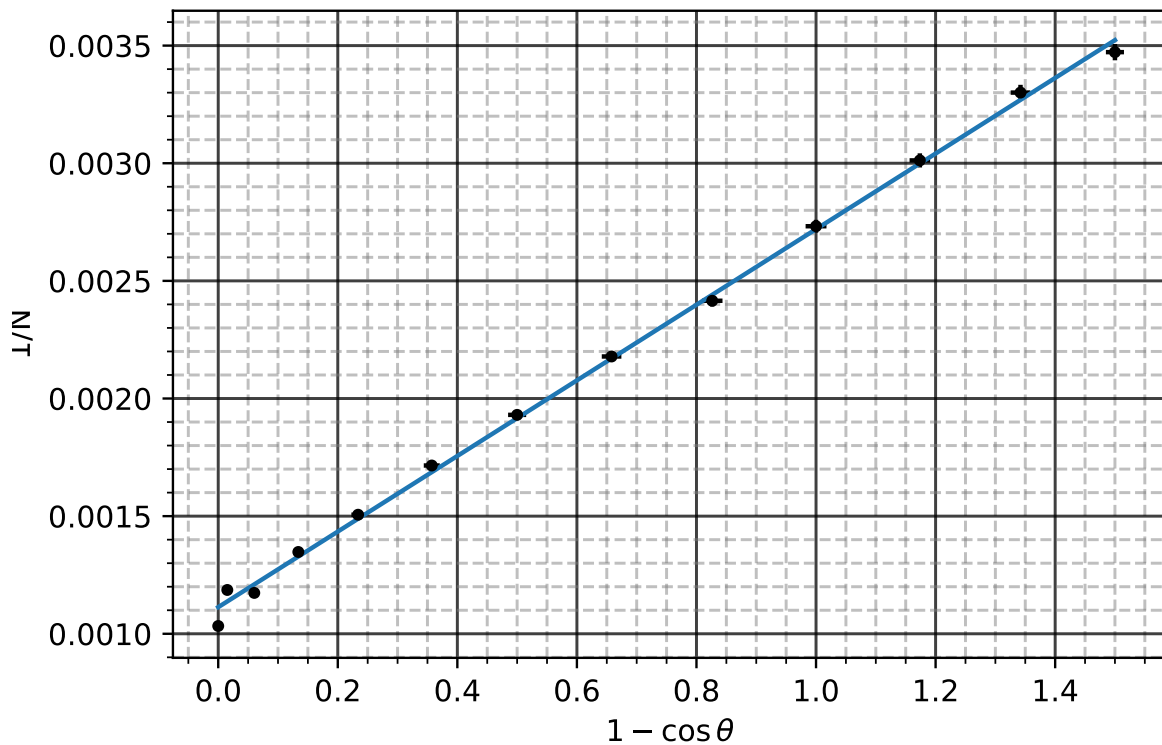


Рис. 2: График зависимости  $\frac{1}{N}(1 - \cos \theta)$

Полученное значение энергии покоя электрона  $mc^2 = (459.65 \pm 15)$  кэВ (погрешность рассчитана с учетом того что значение  $E_\gamma$  известно нам точно). Как мы знаем, табличное значение энергии покоя электрона  $mc^2 = 511$  кэВ, так что, полученное нами значение несколько отличается от табличного.

## Вывод

В данной работе мы исследовали эффект Комптона. Получив линейный график мы убедились в справедливости формулы (\*), то есть  $\gamma$ -кванты действительно испытывают рассеяние на свободных частицах, это доказывает корпускулярную природу фотонов (эффект Рамзауэра доказывает их полную природу). По численным значениям мы получили энергию покоя электрона, численное значение полученное нами лежит в  $3\sigma$  от реального табличного значения.