

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по квантовой физике

**Исследование эффекта Комптона [1.2]**

Талашкевич Даниил Александрович  
Группа Б01-008

Долгопрудный  
2022

# Содержание

1	Аннотация	1
2	Теоретические положения	1
3	Экспериментальная установка	2
4	Ход работы	2
5	Вывод	4

## 1 Аннотация

**Цель работы:** исследование энергетического спектра  $\gamma$ -квантов, рассеянных на графите, с помощью сцинтилляционного спектрометра, определение энергии рассеянных  $\gamma$ -квантов в зависимости от угла рассеяния, определение энергии покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние.

**В работе используются:** источник излучения, графитовая мишень, сцинтилляционный счётчик, ФЭУ, ЭВМ

## 2 Теоретические положения

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

Пусть электрон до соударения покоился, а  $\gamma$ -квант имел начальную энергию  $\omega_0$  и импульс  $\omega_0/c$ . После соударения электрон приобретает энергию  $\gamma mc^2$ , где  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ,  $\beta = v/c$ , а  $\gamma$ -квант рассеивается на некоторый угол  $\theta$  по отношению к первоначальному направлению движения. Энергия и импульс рассеянного излучения  $\propto \omega_1$ . Запишем для рассматриваемого процесса законы сохранения энергии и импульса:

$$mc^2 + \hbar\omega_0 = \gamma mc^2 + \hbar\omega_1 \quad (1)$$

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

Решая совместно эти уравнения и переходя от частот к длинам волн, получаем изменение длины рассеянного излучения

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) = \Lambda_k(1 - \cos \theta), \quad (2)$$

где  $\Lambda_k = \frac{h}{mc} = 2.42 \cdot 10^{-10}$  см - комптоновская длина волны электрона.

Основной целью работы является проверка соотношения (1). Преобразуем его от длин волн к энергии  $\gamma$ -квантов:

$$\frac{1}{\varepsilon(\theta)} - \frac{1}{\varepsilon_0} = 1 - \cos \theta, \quad (3)$$

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

### 3 Экспериментальная установка

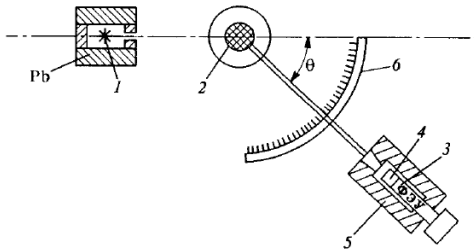


Рис. 1: Блок-схема установки по изучению рассеяния  $\gamma$ -квантов

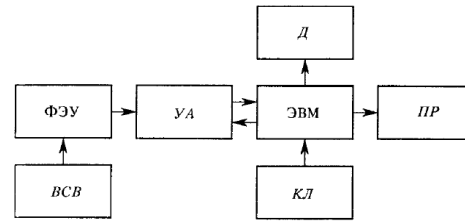


Рис. 2: Блок-схема измерительного комплекса

Источником излучения служит  $^{137}\text{Cs}(1)$ , испускающий  $\gamma$ -кванты с энергией 662 кэВ. Узкий пучок после коллиматора попадает на графитовую мишень (2). Кванты, испытавшие комптоновское рассеяния в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком и проходят на ФЭУ. Сигналы, возникающие на ФЭУ, подаются на ЭВМ для амплитудного анализа. Штанга с измерительным блоком может вращаться относительно мишени.

### 4 Ход работы

Устанавливая сцинтилляционный счётчик под разными углами  $\theta$ , произведём измерения, каждое примерно по десять минут, отмечая, какому каналу соответствует фотопик при каждом значении угла. Картина, наблюдаемая на дисплее компьютера, представлена на Рис. 3 Результаты измерений представлены в Таблице 1, как отмечалось выше, погрешность измерения канала – 1%, так как она для всех измерений больше, чем половина расстояния до соседнего возможного пика, учитывалась только она, погрешность измерения угла  $\theta$  берём ценой деления лимба  $\sigma_\theta = 2^\circ$ . По этим данным построим график зависимости  $1/N(\theta)$  от  $1 - \cos \theta$  (Рис.

$\theta, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$N$	931	918	819	784	713	608	533	471	417	382	352	319	311
$\sigma_N$	9	9	8	8	7	6	5	5	4	4	4	3	3

Таблица 1: Результаты измерений.

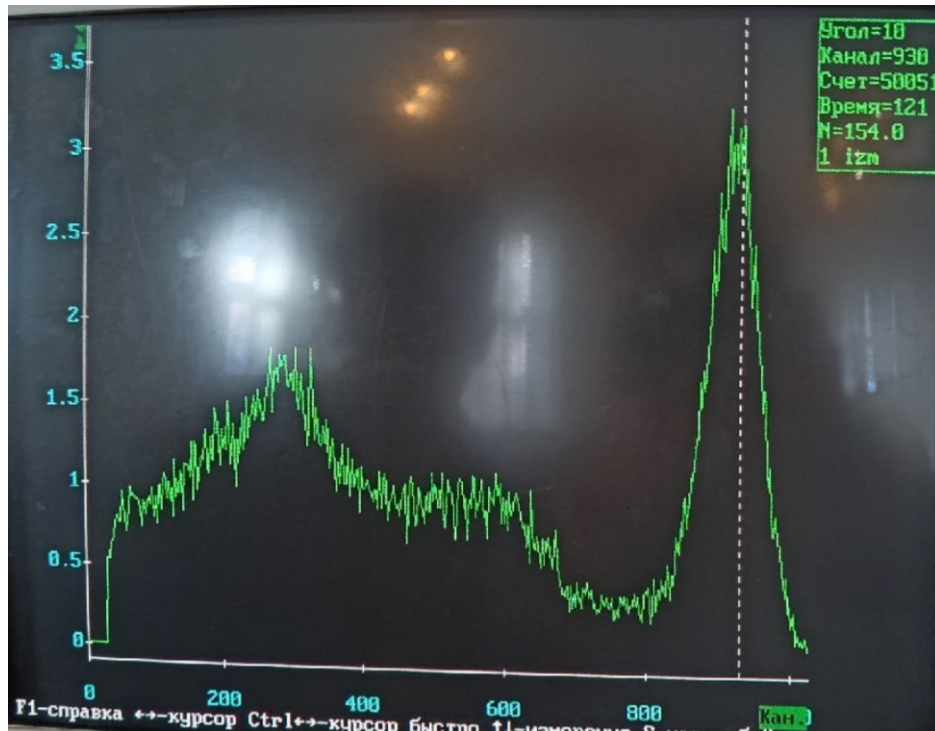


Рис. 3: Наблюдаемая на дисплее компьютера картина.

4). Здесь погрешности считали по формулам

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

$$\sigma_{1-\cos\theta} = \sin(\theta)\sigma_\theta.$$

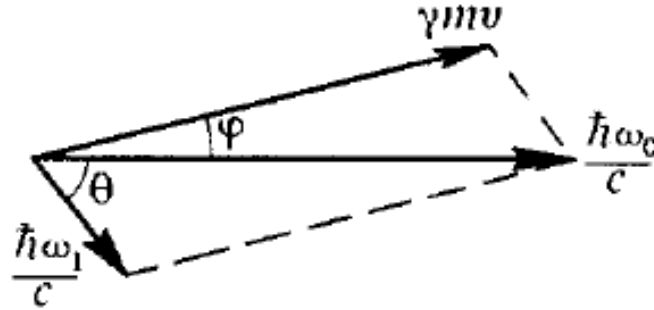
Заметим, что во все формулы  $\theta$  и  $\sigma_\theta$  подставляется в радианах. Из графика по МНК получим угловой коэффициент, в соответствии с (??) равный  $A$ , и точку пересечения с осью ординат, соответствующую  $1/N(0)$ . Формулы расчёта (здесь  $x = 1 - \cos\theta$  и  $y = 1/N$ ):

$$A = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}, \quad \sigma_A = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - A^2},$$

$$\frac{1}{N(0)} = \langle y \rangle - A \langle x \rangle, \quad \sigma_{1/N(0)} = \sigma_A \sqrt{\langle x^2 \rangle},$$

где  $\langle \cdot \rangle$  обозначает среднее значение,  $n = 13$  – число опытов.

Из аппроксимации получим «наилучшие» значения каналов для  $\theta =$

Рис. 4: График зависимости  $1/N$  от  $1 - \cos \theta$ .

$0^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ :

$$N_{\text{наил}}(0) = \frac{1}{\frac{1}{N(0)}} = 920 \pm 20,$$

$$N_{\text{наил}}(90) = \frac{1}{\frac{1}{N(0)} + A} = 384 \pm 7,$$

где погрешности считались по формулам

$$\sigma_{N_{\text{наил}}(0)} = \frac{\sigma_{\frac{1}{N(0)}}}{\left(\frac{1}{N(0)}\right)^2},$$

$$\sigma_{N_{\text{наил}}(90)} = \frac{\sigma_{\frac{1}{N(0)}} + \sigma_A}{\left(\frac{1}{N(0)} + A\right)^2}.$$

Наконец, по формуле 1 (для  $N(0)$  и  $N(90)$  брались наилучшие значения) получим энергию покоя электрона

$$mc^2 = 480 \pm 20 \text{ кэВ},$$

погрешность считалась по формуле

$$\sigma_{mc^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial(mc^2)}{\partial N_{\text{наил}}(0)}\right)^2 \sigma_{N_{\text{наил}}(0)}^2 + \left(\frac{\partial(mc^2)}{\partial N_{\text{наил}}(90)}\right)^2 \sigma_{N_{\text{наил}}(90)}^2}$$

Здесь использовалось, что  $E_\gamma = 662 \text{ кэВ}$  (значение взято из [1]). Истинная энергия покоя электрона  $510 \text{ кэВ}$  лежит в двух сигмах от полученного результата.

## 5 Вывод

Итак, в настоящей лабораторной работе нами была проведена проверка соотношения (2). Экспериментально установлено, что  $\gamma$ -кванты действи-

тельно испытывают упругое рассеяние на свободных частицах.

Обратим наше внимание на то, что с увеличением угла  $\theta$  погрешность измерения номера канала  $\sigma_N$  увеличивается, что связано со смещением фотопика в сторону сплошного распределения, обязанного комптоновскому рассеянию. При  $\theta = 110^\circ$  уже было невозможно увидеть пик полного поглощения.

На основании полученных данных можно определить энергию покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеивание. Путем несложных преобразований формула (??) принимает вид:

$$mc^2 = E(0) \frac{N_{\text{наил}}(90)}{N_{\text{наил}}(0) - N_{\text{наил}}(90)},$$

где  $E(0)$  – энергия  $\gamma$ -лучей, испускаемых источником (в нашем случае  $^{137}\text{Cs}$ ), то есть 662 кэВ. Имеем:

$$mc^2 = 430 \pm 20 \text{ кэВ}.$$

Видно, что результат на 16% меньше 511 кэВ – энергии покоя электрона. Почему? Погрешность должна быть больше...

Отметим, что колебания напряжения на ФЭУ № 4012 практически не вносят погрешности в измерения, ведь в работе было использовано напряжение  $U = 1,6$  кэВ, при котором счетная характеристика выходит на константу, как видно из рисунка ??.

## Список литературы

- [1] Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М. *Лабораторный практикум по общей физике: Учеб. пособие для вузов. Т. 3 Квантовая физика.* М.: Физматкнига, 2005.