

Лабораторная работа 5.1.2 Исследование эффекта Комптона

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится исследование энергетического спектра γ -квантов, рассеянных на графите с помощью сцинтилляционного спектрометра. Определяется энергия рассеянных γ -квантов в зависимости от угла рассеяния, а также энергия покоя частиц, на которых происходит комптоновское рассеяние.

2 Теоретические сведения

Эффект Комптона – увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с падающим – интерпретируется как результат упругого соударения двух частиц: γ -кванта (фотона) и свободного электрона. 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 $\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$, а γ -квант рассеивается на некоторый угол θ по отношению к первоначальному направлению движения. Энергия и импульс γ -кванта становятся соответственно равными $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_1/c$.

Запишем для рассматриваемого процесса ЗСЭ и ЗСИ:

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

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

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

где

$$\Lambda_K = \frac{h}{mc} = 2.42 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$

называется комптоновской длиной волны электрона.

В приведенном выводе электрон в атоме считается свободным. Для γ -квантов с энергией в несколько десятков, а тем более сотен кэВ, связь электронов в атоме, действительно, мало существенна, так как энергия их связи в легких атомах не превосходит нескольких кэВ, а для большинства электронов еще меньше.

2.1 Расчётные формулы

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

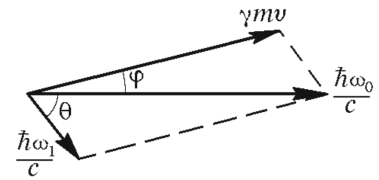


Рис. 1: Векторная диаграмма рассеяния γ -кванта на электроне

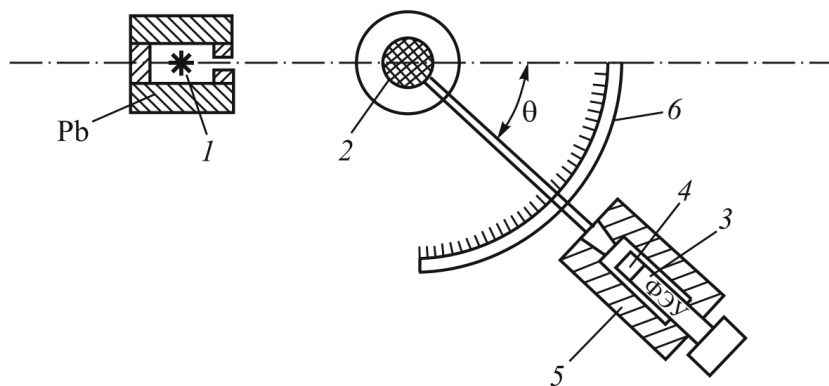


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

3 Оборудование и инструментальные погрешности

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 2. Сформированный коллиматором узкий пучок γ -квантов попадает на графитовую мишень. Кванты, испытавшие комptonовское рассеяние в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком, состоящим из сцинтиллятора и ФЭУ, работающего от высоковольтного источника напряжения. Сигнал, генерируемый ФЭУ, обрабатывается АЦП компьютера, и соответствующий график выводится на экран.

В работе используются:

- **Источник γ -излучения ^{137}Cs в свинцовом коллиматоре**
- **Фотоэлектронный умножитель на градуированном подвижном кронштейне: $\Delta = \pm 1^\circ$**
- **Компьютер с 10-разрядным АЦП: $\Delta = \pm 1$ канал**

4 Результаты измерений и обработка данных

Запишем формулу (2) в удобном виде:

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

Здесь $N(\theta)$ – номер канала. Представим экспериментальные результаты в виде графика на рис. 3, откладывая по оси абсцисс $1 - \cos(\theta)$, а по оси ординат — $1/N(\theta)$. Заметим, что данные плохо ложатся на прямую. Это в первую очередь может быть связано с погрешностью определения пика «на глаз», а также с недостаточной экспозицией при получении спектров.

По данным графика, уравнение прямой имеет вид

$$y = (198 \pm 5) \cdot 10^{-5}x + (129 \pm 1) \cdot 10^{-5}.$$

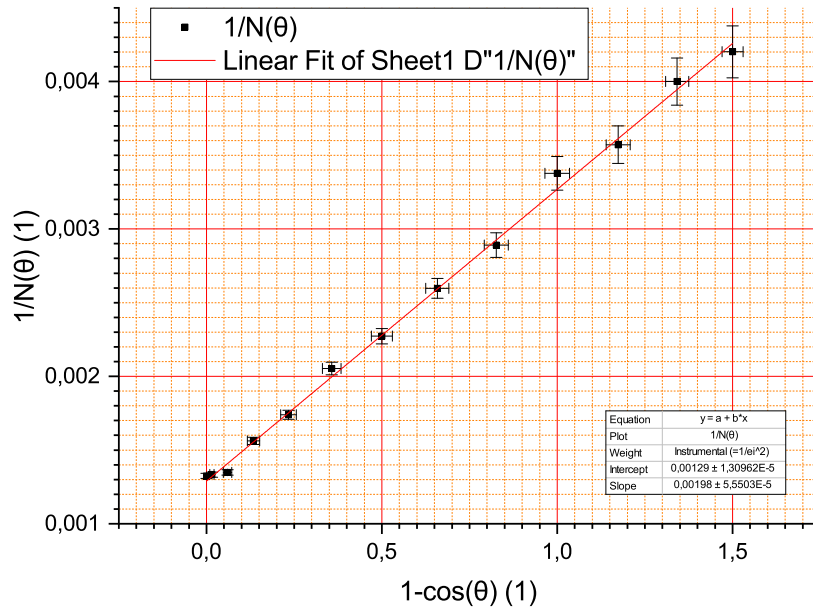
Отсюда

$$\begin{aligned} N_{\text{наил}}(0) &= 775 \pm 6 \\ \frac{1}{N_{\text{наил}}(90^\circ)} &= (327 \pm 5) \cdot 10^{-5} \\ N_{\text{наил}}(90^\circ) &= 306 \pm 5 \end{aligned}$$

Исходя из этих данных определим энергию покоя частицы, на которой происходит комptonовское рассеяние (по всем признакам – электрона):

$$mc^2 = E_\gamma \frac{N(90^\circ)}{N(0) - N(90^\circ)} = 662 \cdot 10^3 \cdot \frac{306}{775 - 306} = 450 \pm 20 \text{ кэВ}$$

Это значение существенно не совпадает с табличным для энергии покоя электрона, что может быть связано как с неточным проведением эксперимента, так и с тем, что электрон в составе атома не является свободным, поэтому исходная формула (1) не является достаточно точной в данном случае.

Рис. 3: График зависимости $\frac{1}{N} = f(1 - \cos \theta)$

4.1 Оценка погрешностей

Оценка погрешностей проводится при помощи пакета *Wolfram Mathematica* по общей формуле:

$$\Delta_{u(x,y,z,\dots)}^2 = f_x'^2 \Delta_x^2 + f_y'^2 \Delta_y^2 + f_z'^2 \Delta_z^2 + \dots, \quad (4)$$

где Δ_i – случайные или инструментальные погрешности величины i . В частности, при расчёте энергии покоя электрона применяется формула

$$\Delta_{mc^2} = \sqrt{\frac{E_\gamma^2 \left(N(90)^2 \Delta_{N(0)}^2 + N(0)^2 \Delta_{N(90)}^2 \right)}{(N(0) - N(90))^4}}$$

Для значений $N(\theta)$ изначальную погрешность в 1 канал пришлось увеличить до 10 каналов, так как определение точки пика затруднительно. Частично можно было исправить ситуацию увеличением времени экспозиции или при помощи компьютерной аппроксимации пиков. Также в этом опыте не была учтена погрешность, вызываемая перепадами напряжения на диодах ФЭУ.

5 Вывод

По результатам работы, исследовали эффект Комптона на графитовом образце с помощью сцинтилляционного спектрометра. Выяснили зависимость энергии рассеянного γ -кванта от угла рассеяния, а также определили по порядку величины энергию покоя электрона.

А Необработанные результаты опытов

«Сырые» данные, полученные по результатам опытов, представлены в табл. 1.

Угол θ , °	$\Delta\theta$, °	Канал N	ΔN
0	± 1	755	± 1
10		750	
20		742	
30		613	
40		594	
50		487	
60		423	
70		385	
80		346	
90		296	
100		280	
110		250	
120		238	

Таблица 1: Необработанные данные эксперимента

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 5*, 1989
- [2] Фаддеев М. А., Чупрунов Е. В. *Лекции по атомной физике*, 2008
- [3] Ципенюк Ю. М. *Квантовая микро- и макрофизика*, 2006
- [4] Игошин Ф. Ф., Самарский Ю. А., Ципенюк Ю. М. *ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ. Квантовая физика: Учеб. пособие для вузов*; Под ред. Ципенюка Ю.М.