МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 5.1.2

Исследование эффекта Комптона

Выполнили:

Гисич Арсений

Вазюля Василиса

Б03-101

Долгопрудный

2023

1 Аннотация

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

2 Теоретические сведения

Рассеяние γ-лучей в веществе относится к числу явлений, в которых особенно ясно проявляется двойственная природа излучения. Волновая теория, хорошо объясняющая рассеяние длинноволнового излучения, испытывает трудности при описании рассеяния рентгеновских и γ-лучей. Эта теория, в частности, не может объяснить, почему в составе рассеянного излучения, измеренного Комптоном, кроме исходной волны с частотой ω_0 появляется дополнительная длинноволновая компонента, отсутствующая в спектре первичного излучения.

Появление этой компоненты легко объяснимо, если считать, что γ-излучение представляет собой поток квантов (фотонов), имеющих энергию $\hbar\omega$ и импульс $p = \hbar\omega/c$. Эффект Комптона — увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с падающим — интерпретируется как результат упругого соударения двух частиц: γ-кванта (фотона) и свободного электрона.

Рассмотрим элементарную теорию эффекта Комптона. 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 $\gamma = \left(1-\beta^2\right)^{-1/2}, \beta = v/c$, а γ-квант рассеивается на некоторый угол θ по отношению к первоначальному направлению движения. Энергия и импульс γ-кванта становятся соответственно равным и $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_1/c$ (рис. 1). Запишем для рассматриваемого процесса законы сохранения энергии и импульса:

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

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

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1-\cos\theta) = \Lambda_{\mathrm{K}}(1-\cos\theta)$$

где λ_0 и λ_1 — длины волн γ-кванта до и после рассеяния, а величина

$$\Lambda_{\mathrm{K}} = \frac{h}{mc} = 2,42\cdot 10^{-10}\mathrm{cm}$$

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

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

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

3 Методика измерений

Блок-схема установки изображена на рис. 3. Источником излучения 1 служит Cs^{137}, испускающий γ-лучи с энергией 662 кэВ. Он помещен в толстостенный свинцовый контейнер с коллиматором. Сформированный коллиматором узкий пучок γ-квантов попадает на графитовую мишень 2 (цилиндр диаметром 40 мм и высотой 100 мм).

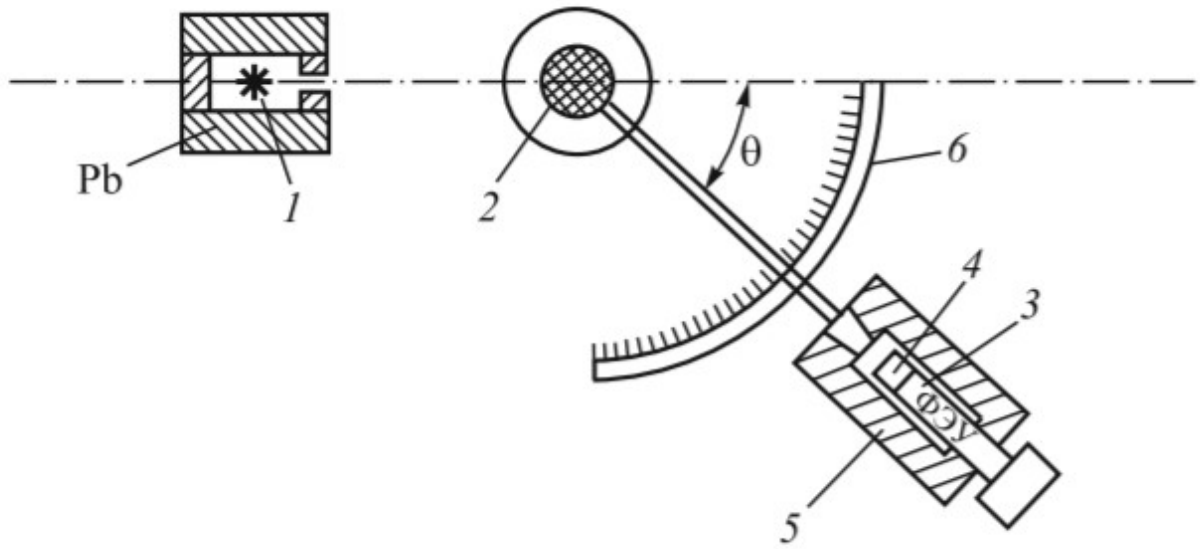


Рис. 1: Экспериментальная установка

Кванты, испытавшие комптоновское рассеяние в мишени, регистрируются сцинтилляционным счетчиком, принцип работы которого рассмотрен в работе 5.3. Счетчик состоит из фотоэлектронного умножителя 3 (далее ФЭУ) и сцинтиллятора 4*). Сцинтиллятором служит кристалл NaI(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.

4 Используемое оборудование

1. компьютер;
2. источник излучения;
3. графитовая мишень;
4. счётчик γ-квантов;

5 Результаты измерений и обработка данных

Для обработки результатов используется формула (2) с замененными энергиями квантов на $N(\theta)$.

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

Сначала снимем спектр при $\theta = 0^0$:

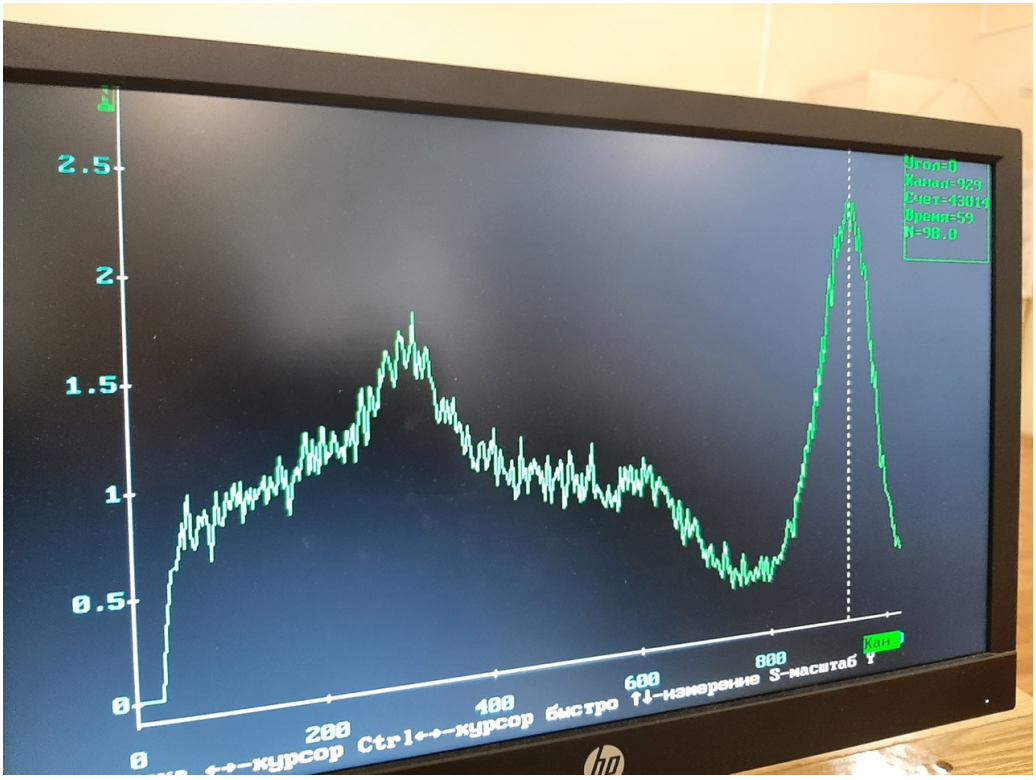


Рис. 2: $\theta = 0^0$

Далее устанавливая счётчик под разными углами, снимем амплитудные спектры при $\theta = 0 \div 120^0$.

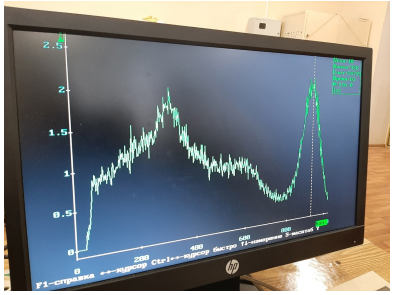


Рис. 3: $\theta = 10^0$

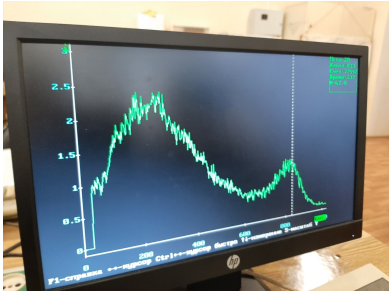


Рис. 4: $\theta = 20^0$

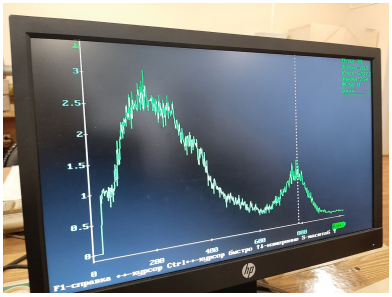


Рис. 5: $\theta = 30^0$

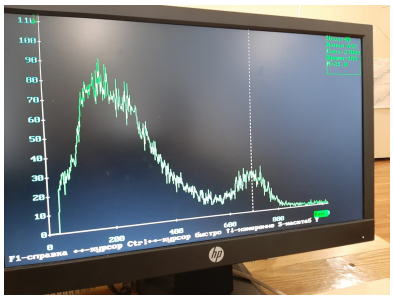


Рис. 6: $\theta = 40^0$

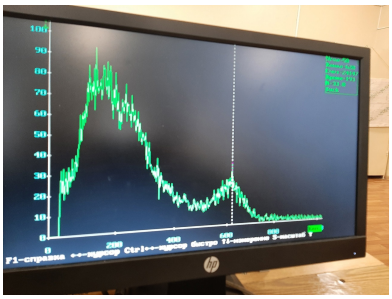


Рис. 7: $\theta = 50^0$

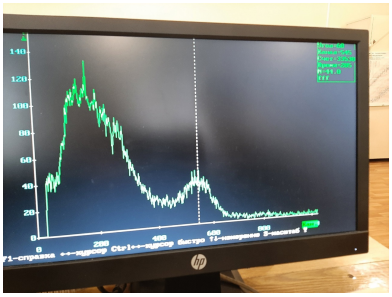


Рис. 8: $\theta = 60^0$

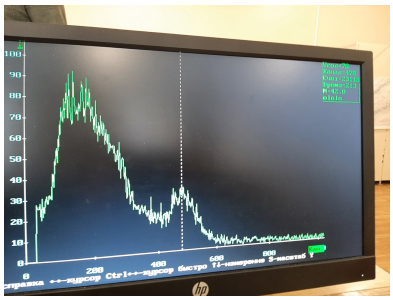


Рис. 9: $\theta = 70^0$

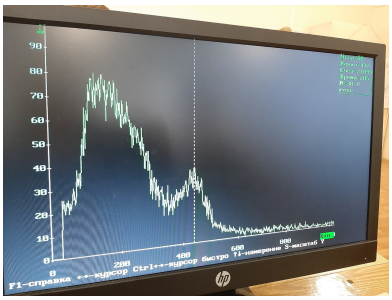


Рис. 10: $\theta = 80^0$

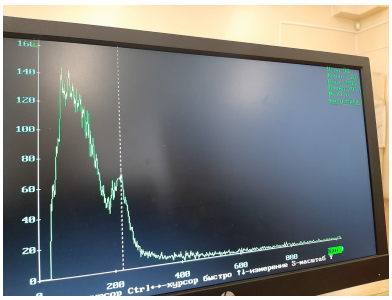


Рис. 11: $\theta = 90^0$

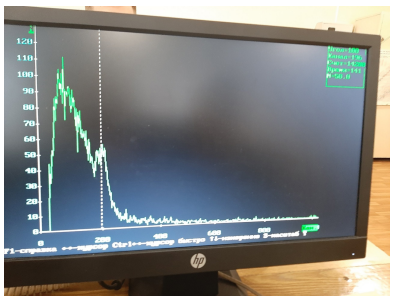


Рис. 12: $\theta = 100^0$

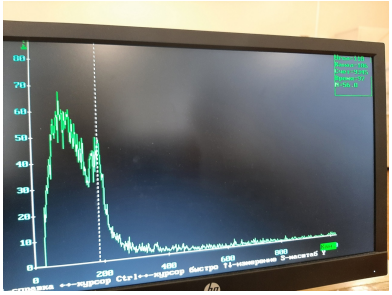
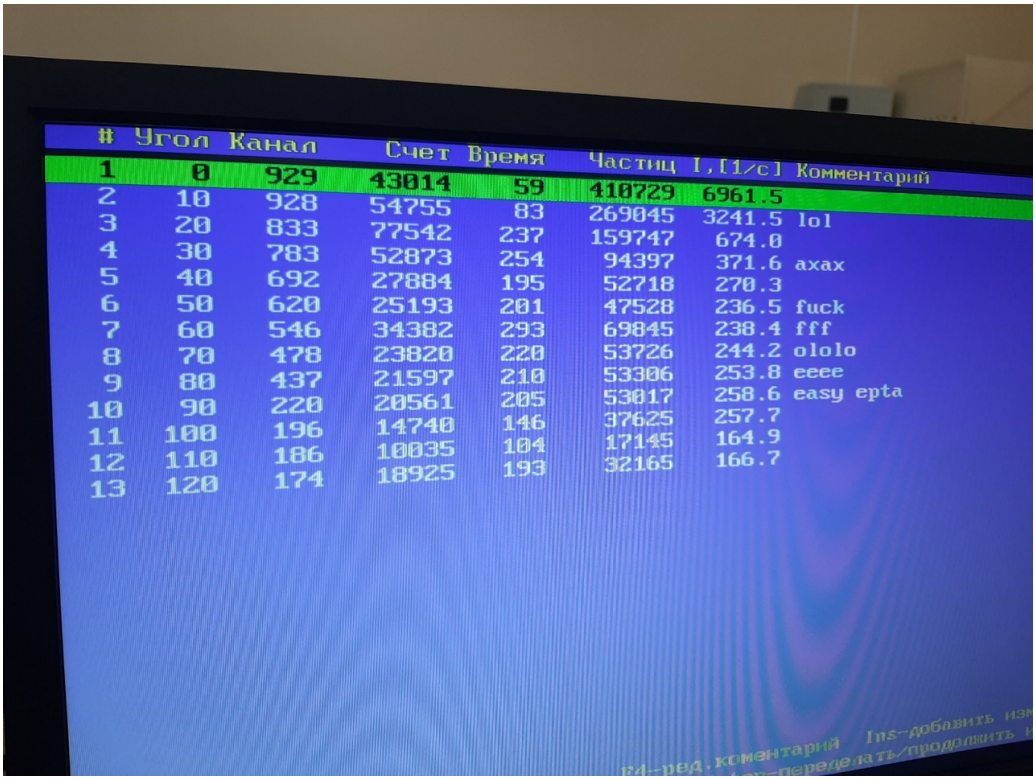


Рис. 13: $\theta = 110^0$

Рис. 14: $\theta = 120^0$

По полученным спектрам определим положения фотопиков для каждого значения угла. Результаты представлены на рис. 15.



#	Угол	Канал	Счет	Время	Частиц	I,[1/c]	Комментарий
1	0	929	43014	59	410729	6961.5	
2	10	928	54755	83	269045	3241.5	lol
3	20	833	77542	237	159747	674.0	
4	30	783	52873	254	94397	371.6	axax
5	40	692	27884	195	52718	270.3	
6	50	620	25193	201	47528	236.5	fuck
7	60	546	34382	293	69845	238.4	fff
8	70	478	23820	220	53726	244.2	ololo
9	80	437	21597	210	53306	253.8	eeee
10	90	220	20561	205	53017	258.6	easy epta
11	100	196	14740	146	37625	257.7	
12	110	186	10035	104	17145	164.9	
13	120	174	18925	193	32165	166.7	

Рис. 15: Результаты измерений

По этим данным, использую (3), построим график на рис. 16.

По графику определим $N(0) = 1449 \pm 483$, $N(90) = 250 \pm 33$. Теперь посчитаем энергию покоя частицы из формулы (2), где $E_\gamma = 662$ *кэВ* — энергия γ-квантов Cs^{137}. В итоге получаем:

$$mc^2 = E_\gamma \frac{N(90)}{N(0) - N(90)} = 0,14 \pm 0,06 \ \text{МэВ}.$$

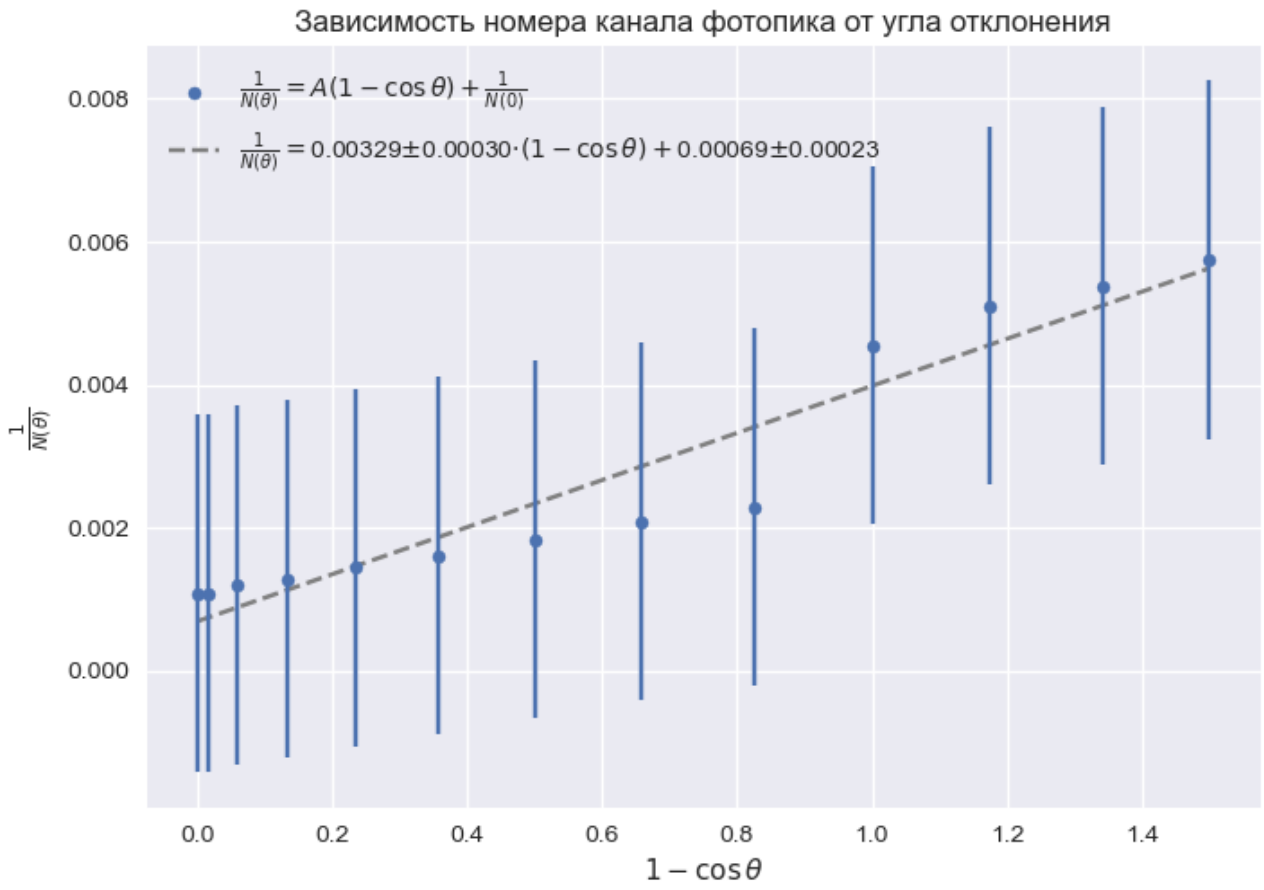


Рис. 16: Зависимость $1/N(\theta)$ от $1-\cos\theta$

6 Обсуждение результатов и выводы

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. Полученное значение:

$$\boxed{mc^2 = 0,14 \pm 0,06\ МэВ}$$

Это значение существенно отличается от табличного 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 (2) не является достаточно точной в данном случае.