

# Лабораторная работа 5.1.2

## Эффект Комптона

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

### 1 Цель работы:

С помощью сцинтиляционного 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.

### 2 Оборудование:

Источник  $\gamma$ -квантов

Фотоэлектронный умножитель

АЦП, компьютер с ПО для визуализации

### 3 Теоретическая справка

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:

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

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:

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

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  $\theta$ :

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

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

## 4 Экспериментальная установка

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

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

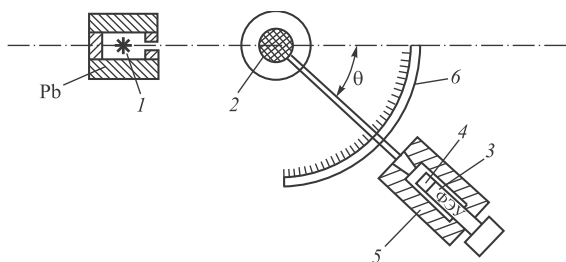


Рис. 1

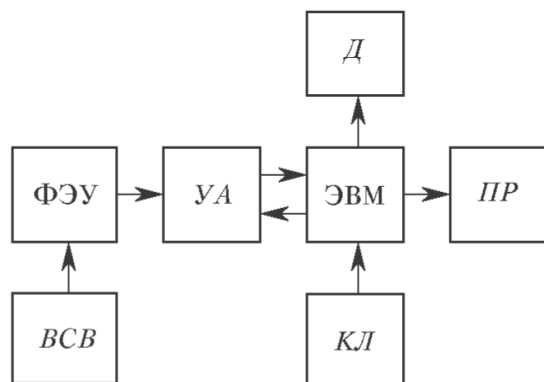


Рис. 2

Рис. 3: Установка

блоке, укрепленном на горизонтальной штанге. Штанга вместе с этим блоком может вращаться относительно мишени, угол поворота отсчитывается по лимбу 6.

На рис.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, окончательные результаты в виде таблиц и графиков могут быть выведены на принтер ПР.

## 5 Измерения

Продолжительность измерений разная - занесем её в таблицу, чтобы затем отнормировать  $N$  на 100 секунд.

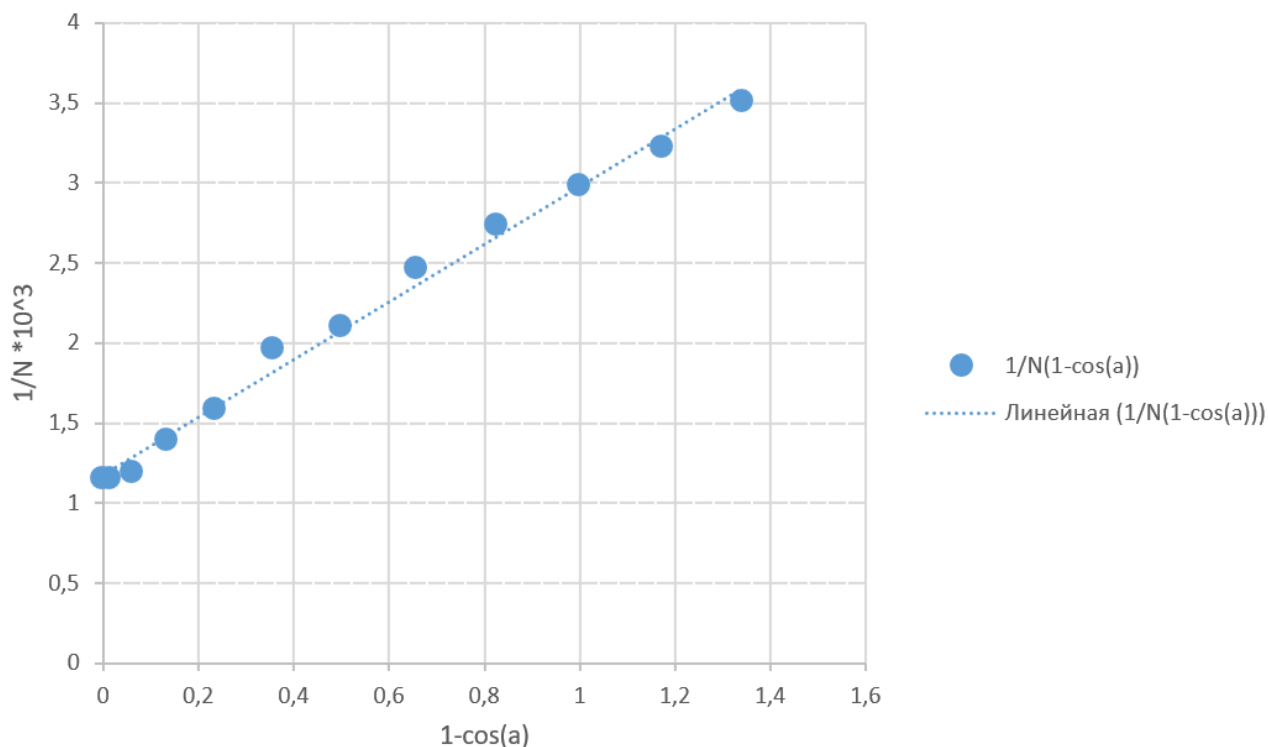
Довольно хороший способ регистрации истинной энергии пика - смотреть на пересечение его боковых сторон. Поскольку стороны пика близки к линиям в некоторой окрестности, с хорошей точностью, считая шумовой профиль также линейным, можно оценить реальную энергию.

Для регистрации числа отсчета выполняется вычитание измеренного шумового профиля с закрытым источником (хотя с точностью до погрешности самого максимума  $N$  это делать не так уж оправданно).

Измерения приведены в электронной таблице, приложенной к работе.

## 6 Обработка

Погрешность номера канала определяется не столько шириной пика, его дисперсией и временем выдержки, сколько неточностью выставления пунктирного указателя во время эксперимента и дальнейшей оцифровкой значений с использованием описанного выше метода. Для простоты разумно принять погрешность номера канала за 20 пунктов, тогда относительная погрешность составит 4%. Нанесем её размером точек на график.



Найдем уравнение прямой(как видно, график линеаризован) для зависимости по МНК.

$$a = \frac{\langle x_i y_i \rangle - \langle x \rangle \langle y_i \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2}$$

$$b = \langle y_i \rangle - a \langle x_i \rangle$$

Также рассчитаем её погрешности

$$S_a^2 = \frac{\langle x_i^2 \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2} \cdot \frac{\langle b_i - b \rangle^2}{n - 2}$$

Итоговое уравнение

$$\frac{1}{N} = (a \pm S_a) + (b \pm S_b) \cdot (1 - \cos(\alpha)) = (1.174 \pm 0.035) + (1.803 \pm 0.051) \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

Подставим в уравнение  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  и получим значения

$$N(0^\circ) = 850 \pm 30$$

$$N(90^\circ) = 336 \pm 10$$

Исходя из этих данных, по формуле (3) определим энергию покоя частицы, на которой происходит комптоновское рассеяние (по всем признакам – электрон):

$$mc^2 = E_\gamma \frac{N(90^\circ)}{N(0) - N(90^\circ)} = 662 \cdot 10^3 \times \frac{336}{850 - 336} = 430 \pm 50 \text{ кэВ}$$

## 7 Вывод

Полученное значение  $430 \pm 50$  кэВ отличается от табличного значения энергии покоя электрона (511 кэВ), хоть и не сильно, что может быть связано как с неточным проведением эксперимента (требуется более точный метод отождествления максимума пика сигнала, и дальнейшая запись энергии), так и с тем, что электрон в составе атома не является свободным, поэтому исходная формула не является достаточно точной в данном случае.

Тем не менее, был исследован энергетический спектр Комптоновского рассеяния  $\gamma$ -квантов на графите, определена масса покоя электрона. В электронной таблице дополнительно был построен график зависимости интенсивности излучения от угла рассеяния.

Итак, эффект Комптона был успешно зарегистрирован.

## 8 Ресурсы

Расчет по МНК: метод-наименьших-квадратов.рф