

# Исследование эффекта Комптона

Илларионов Владислав  
группа Б04-855

## ВВЕДЕНИЕ

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 фотона и свободного электрона.

Изменение длины волны равно:

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

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  – длины волн фотона до и после рассеяния на угол  $\theta$ , а  $\Lambda_k = 2.42 \cdot 10^{-10}$  см – комптоновская длина волны электрона.

Преобразуем формулу (1), перейдя от длин волн к энергиям фотонов:

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

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема установки изображена на рисунке 2. Источником излучения 1 служит  $^{137}\text{Cs}$ , испускающий  $\gamma$ -лучи с энергией 662 кэВ. Он помещен в толстостенный 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  $\text{NaI}(\text{Ti})$  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 рассчитывается по лимбу 6.

Головная часть сцинтилляционного блока закрыта свинцовым коллиматором 5, который формирует входной пучок и защищает детектор от постороннего излучения.

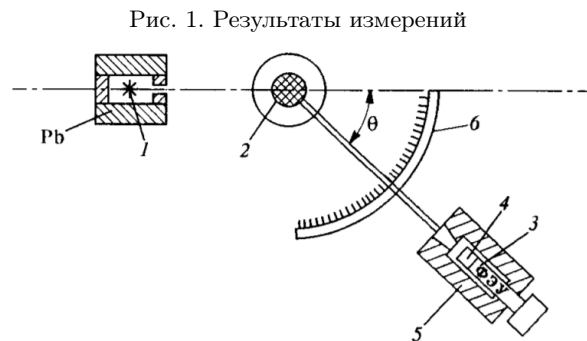


Рис. 1. Результаты измерений

Рис. 2. Блок-схема установки по изучению рассеяния  $\gamma$ -квантов

На рисунке 3 представлена функциональная блок-схема измерительного комплекса, который состоит из ФЭУ, питаемого от высоковольтного выпрямителя ВСВ, усилителя-анализатора УА, являющегося входным интерфейсом ЭВМ, управляемой с клавиатуры КЛ. В ходе проведения эксперимента информация отображается на экране дисплея Д.

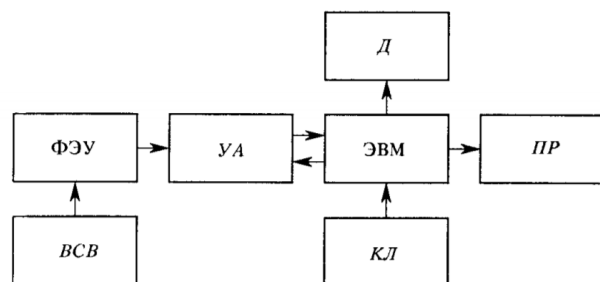


Рис. 3. Блок-схема измерительного комплекса

Под действием монохроматического излучения на выходе ФЭУ возникает распределение электрических импульсов (рис. 4). В амплитудном распределении им-

пульсов имеется так называемый фотопик, возникающий в результате фотоэффекта, и обязанное комптоновскому рассеянию сплошное распределение. Положение фотопика однозначно связано с энергией регистрируемого  $\gamma$ -излучения. Соответственно нас будет интересовать положение (номер канала) вершины этого пика в зависимости от угла поворота детектора.

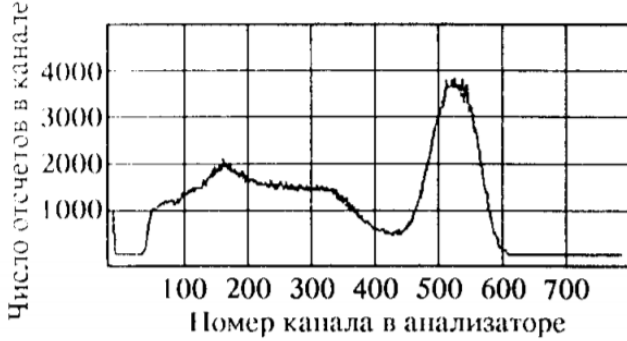


Рис. 4. Амплитудное распределение импульсов, возникающих под действием монохроматических  $\gamma$ -квантов в сцинтиляторе NaI(Tl)

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

1. Включим все измерительные устройства и компьютер
2. Запустим программу и войдём режим измерения спектра
3. Устанавливая сцинтиляционный счетчик под разными углами  $\theta$  к первоначальному направлению полета фотонов и вводя значения этих углов в ЭВМ, снимем амплитудные спектры и определим положение фотопиков для каждого  $\theta$ ; измерения проводим с шагом в  $10^\circ$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $120^\circ$ . Также учтем, что с увеличением угла интенсивность рассеянных фотонов уменьшается, поэтому будем увеличивать время проведения замера.

Заменим в формуле (2)  $\varepsilon(\theta)$  номером канала  $N(\theta)$ , соответствующего вершине фотопика в спектре для угла  $\theta$ . Обозначая буквой  $A$  неизвестный коэффициент пропорциональности между  $\varepsilon(\theta)$  и  $N(\theta)$ , получим:

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

Используя экспериментальные данные, построим график, откладывая по оси абсцисс величину  $1 - \cos \theta$ , а по оси ординат величину  $1/N(\theta)$ . Согласно формуле (3) получится линейная зависимость.

Для аппроксимации будем использовать взвешенный МНК, минимизируем взвешенную сумму квадратов остатков:

$$\text{WRSS} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta y_i}{\sigma_i} \right)^2 \rightarrow \min$$

Здесь  $\Delta y_i = y_i - kx_i - b$ ,  $\sigma_i$  — погрешность определения  $1/N(\theta)$ . Погрешность коэффициентов линейной модели определяется из оценки ковариационной матрицы.

По полученной аппроксимации рассчитываются значения  $N_{\text{наил}}(0^\circ)$ ,  $N_{\text{наил}}(90^\circ)$ .

Возвращаясь от переменной  $\varepsilon$  к энергии  $E$ , получаем, что при  $\theta = 90^\circ$ , формула (2) принимает вид:

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

или:

$$mc^2 = E_\gamma \frac{N(90^\circ)}{N(0^\circ) - N(90^\circ)} \quad (4)$$

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Проведём измерения описанные в предыдущем разделе и занесём результаты в таблицу I.

По полученным данным построим график зависимости  $1/N(\theta)$  от  $(1 - \cos \theta)$  (см. рис. 5). Аппроксимируем график прямой  $y = kx + b$ . Полученные коэффициенты:

$$k = (167 \pm 7) \cdot 10^{-5}$$

$$b = (123 \pm 2) \cdot 10^{-5}$$

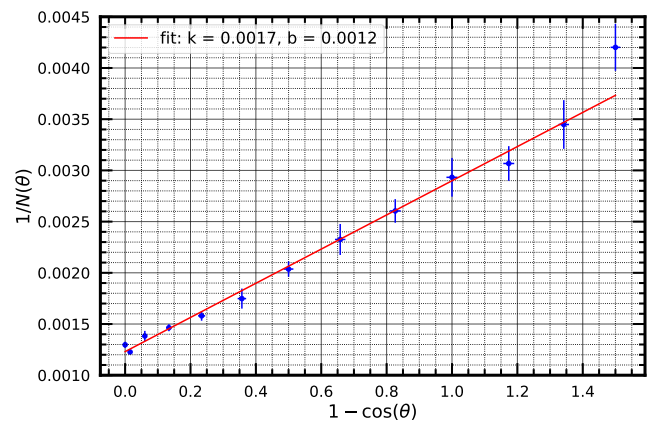


Рис. 5. График зависимости  $1/N(\theta)$  от  $(1 - \cos \theta)$

Теперь можем найти  $N_{\text{наил}}(0^\circ)$ ,  $N_{\text{наил}}(90^\circ)$ :

$$N_{\text{наил}}(0^\circ) = 813 \pm 11$$

$$N_{\text{наил}}(90^\circ) = 345 \pm 9$$

Из формулы (4), учитывая, что  $E_\gamma = 662$  кэВ, найдем энергию покоя электрона:

$$mc^2 = 488 \pm 27 \text{ кэВ}$$

### ВЫВОД

В ходе данной работы был исследован эффект Комптона. Была рассчитана энергия покоя электрона  $mc^2 = 488 \pm 27$  кэВ, значение которой совпадает с табличным 511 кэВ в пределах погрешности, что подтверждает справедливость квантового описания эффекта Комптона.

Точность измерения составила 5.5%. Основной вклад в погрешность вносят большие значения для ширины фотопиков. Можно снизить эту погрешность, увеличив время измерений.

### Приложение А: Таблицы

Таблица I. Результаты измерений

$\theta$	$N(\theta)$	$1/N(\theta) \cdot 10^3$	$1 - \cos \theta$
$0^\circ$	$771 \pm 18$	$1.30 \pm 0.03$	$0 \pm 0.0003$
$10^\circ$	$815 \pm 13$	$1.23 \pm 0.02$	$0.015 \pm 0.003$
$20^\circ$	$723 \pm 26$	$1.38 \pm 0.05$	$0.060 \pm 0.006$
$30^\circ$	$683 \pm 16$	$1.46 \pm 0.03$	$0.134 \pm 0.009$
$40^\circ$	$633 \pm 19$	$1.58 \pm 0.05$	$0.234 \pm 0.011$
$50^\circ$	$572 \pm 32$	$1.75 \pm 0.10$	$0.357 \pm 0.013$
$60^\circ$	$491 \pm 18$	$2.04 \pm 0.07$	$0.500 \pm 0.015$
$70^\circ$	$438 \pm 28$	$2.28 \pm 0.15$	$0.658 \pm 0.016$
$80^\circ$	$384 \pm 17$	$2.60 \pm 0.12$	$0.826 \pm 0.017$
$90^\circ$	$341 \pm 22$	$2.93 \pm 0.19$	$1.000 \pm 0.017$
$100^\circ$	$326 \pm 18$	$3.07 \pm 0.17$	$1.173 \pm 0.017$
$110^\circ$	$290 \pm 20$	$3.45 \pm 0.24$	$1.342 \pm 0.016$
$120^\circ$	$238 \pm 13$	$4.20 \pm 0.23$	$1.500 \pm 0.015$

### Приложение В: Иллюстрации

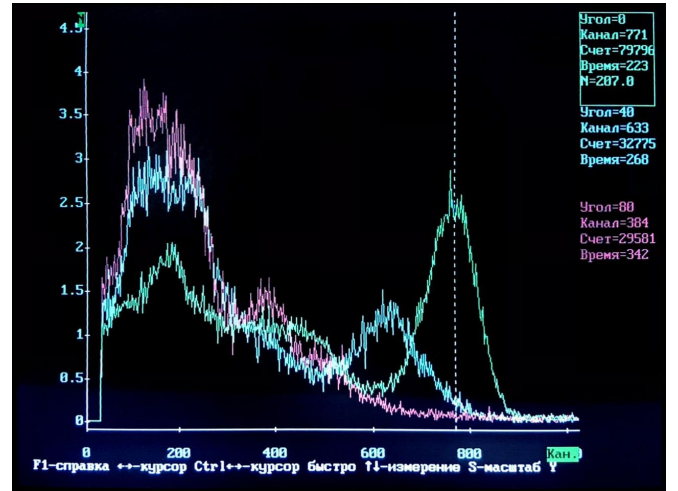


Рис. 6. Амплитудное распределение импульсов для различных значений  $\theta$