

# Эффект Комптона - прямое измерение дисперсионного поглощения



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твёрдый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



Время выполнения

45+ Минут

**PHYWE**  
excellence in science

# Общая информация

## Описание

**PHYWE**  
excellence in science

Экспериментальная установка

Большинство применений рентгеновских лучей основано на их способности проходить сквозь вещество. Поскольку эта способность зависит от плотности вещества, становится возможным получение изображений внутренних частей объектов и даже людей. Это находит широкое применение в таких областях, как медицина или безопасность.

## Дополнительная информация (1/2)

### Предварительные

знания



Предварительные знания, необходимые для этого эксперимента, приведены в разделе "Теория"

### Принцип



Фотоны рентгеновской линии  $K_{\alpha}$  молибдена рассеиваются на квазисвободных электронах кубоида из акрилового стекла. Энергия рассеянных фотонов определяется в зависимости от угла с помощью поворотного полупроводникового детектора и многоканального анализатора.

## Дополнительная информация (2/2)



### Обучение

цель



### Задачи

Цель этого эксперимента - исследовать эффект Комптона.

1. Откалибруйте детектор энергии.
2. Определите энергии фотонов  $W - L_{\alpha}$ -линии, которые рассеиваются через элемент из акрилового стекла в зависимости от угла рассеяния.
3. Сравните измеренные значения энергии линий рассеяния с рассчитанными значениями энергии.
4. Вычислите комптоновскую длину волны электронов и сравните это значение с соответствующим значением рассеяния на  $90^{\circ}$ .

## Теория (1/2)

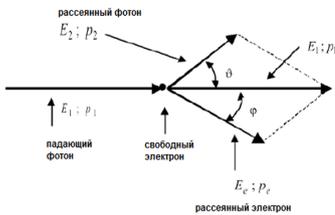


Рис. 1: Соотношение импульса и энергии в эффекте Комптона

На рисунке 1 схематически показан эффект Комптона.

Из-за взаимодействия со свободным электроном в твердом элементе падающий фотон теряет энергию и отклоняется от своего первоначального направления на угол рассеяния  $\theta$ . Покоящийся ранее электрон поглощает дополнительную кинетическую энергию и покидает точку столкновения под углом  $\phi$ .

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta))} \quad (1)$$

Энергия фотонов до и после столкновения	$E_1$ соотв. $E_2$
Эквивалент 1 эВ	$= 1.6021 \cdot 10^{-19}$ Дж
Угол рассеяния	$\theta$
Скорость света в вакууме	$c = 2.988 \cdot 10^8$ м/с
Масса покоя электрона	$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ кг

## Теория (2/2)

После столкновения фотон имеет более низкий энергетический уровень  $E_2$  и большую длину волны  $\lambda_2$ .  
 $E = h \cdot \nu$ , (1) можно преобразовать в:

$$\frac{1}{h\nu_2} - \frac{1}{h\nu_1} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta)) \quad (2)$$

При  $\lambda = c/\nu$ , (2) приводит к:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)) \quad (3)$$

Для рассеяния на  $90^\circ$  разница в длине волны, которая состоит только из трех универсальных компонентов, дает так называемую комptonовскую длину волны  $\lambda_C$  для электронов.

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \text{ пм}$$

Что касается частных случаев прямого и обратного рассеяния при  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 180^\circ$ , изменение длины волны составляет  $\Delta\lambda = 2\lambda_C$ .

Квант действия Планка  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Джс

Частота фотонов  $\nu$

## Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	<a href="#">XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ</a>	09057-99	1
2	<a href="#">XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки, 35 кВ</a>	09057-10	1
3	<a href="#">XR4 Съёмная рентгеновская трубка Plug-in Cu tube</a>	09057-51	1
4	<a href="#">XR 4.0 X-ray Рентгеновский анализ материалов, расширение</a>	09165-88	1

**PHYWE**  
excellence in science



# Подготовка и выполнение работы

## Подготовка (1/2)

**PHYWE**  
excellence in science

- Навинтите переходное кольцо на входную трубку детектора энергии и подключите сигнальный и питающий кабели к соответствующим портам детектора с помощью угловых штекеров.
- Подключите сигнальный и питающий кабели к соответствующим портам в экспериментальной камере рентгеновской установки. На рис. 2 порт для сигнального кабеля обозначен красным цветом, а порт для кабеля питания - зеленым. Подключите внешние порты X RED рентгеновской установки (см. рис. 3) к многоканальному анализатору (MCA). Подключите сигнальный кабель к порту "Вход", а питающий кабель - к порту "Детектор энергии рентгеновского излучения" MCA.

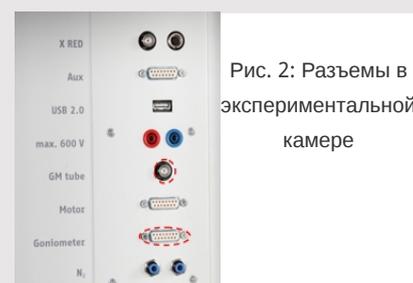


Рис. 2: Разъемы в экспериментальной камере



Рис. 3: Подключение многоканального анализатора

## Полготовка (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

- Закрепите детектор энергии в держателе поворотного кронштейна гониометра. Проложите два кабеля достаточной длины, чтобы гониометр можно было свободно поворачивать во всем диапазоне.
- Соедините многоканальный анализатор и компьютер с помощью USB-кабеля.
- Вставьте трубку с отверстием 2 мм.
- Переместите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения справа.



Рис. 4: Установка гониометра

## Выполнение работы (1/5)

**PHYWE**  
excellence in science

- Приведите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения справа.
- Вставьте трубку с отверстием 1 мм в выходную трубку рентгеновской трубки.
- Включите рентгеновскую установку и заблокируйте дверцу, переведите детектор в положение  $0^\circ$ . Затем сместите детектор на несколько десятых градуса из нулевого положения, чтобы уменьшить общую скорость.
- Рабочие характеристики вольфрамовой или медной рентгеновской трубки: Выберите анодное напряжение  $U_A = 25 \text{ кВ}$  и анодный ток  $I_A = 0,02 \text{ мА}$  и подтвердите эти значения нажатием кнопки Enter
- Включить рентгеновское излучение.

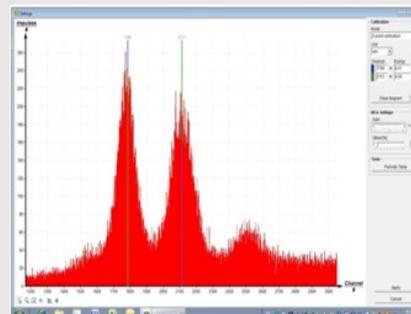


Рис. 5: калибровка многоканального анализатора

## Выполнение работы (2/5)

- В программе MEASURE выберите "Многоканальный анализатор" в разделе "Датчик". Затем выберите "Настройки и калибровка". После нажатия кнопки "Калибровка" можно измерить спектр. Скорость счета должна быть  $< 300$  имп/с. Настройки калибровки по энергии: - калибровка по 2 точкам, - единица измерения = кэВ, усиление = 2 - установите смещение так, чтобы подавить низкоэнергетические сигналы шума (обычно достаточно нескольких процентов), см. рис. 6.
- Время измерения: 5 минут. Используйте таймер рентгеновской установки.
- Сделайте две цветные калибровочные линии совпадающими с центрами линий двух характеристических рентгеновских линий. Соответствующие значения энергии  $E(L_3M_5/L_3M_4) = 8,41$ кэВ и  $E(L_2N_4) = 9,69$  кэВ вводятся в соответствующие поля, в зависимости от цвета. (Примечание: Поскольку разделение линий  $L_3M_4$  и  $L_3M_5$  не представляется возможным, в качестве энергии линии вводится среднее значение обеих линий).
- Назовите и сохраните калибровку.

## Выполнение работы (3/5)

### Комптоновское рассеяние

Установите детектор в нулевое положение и выберите следующие рабочие параметры: диафрагменная трубка с  $d = 1$  мм,  $U_A = 30$  кВ,  $I_A = 0,08$  мА.

- Введите следующие параметры в поле "Управление" в окне "Запись спектра": - Усиление = 2, - Смещение = 5%, - X-Data = кэВ, - Ширина интервала [каналы] = 1
- Включите рентгеновскую трубку. Время измерения должно составлять примерно 5 минут, чтобы интенсивность  $K_\alpha$ -пика составляла примерно 200-300 импульсов. Примите данные и сохраните их.
- Поместите элемент из акрилового стекла (рассеиватель) в держатель образца и установите его в положение  $10^\circ$ . Установите детектор в положение  $20^\circ$ .

## Выполнение работы (4/5)

- Теперь добавьте трубку с отверстием 5 мм и увеличьте рабочие данные рентгеновской трубки до  $U_A = 35$  кВ и  $I_A = 0,3$  мА.
- Начните измерение. Время измерения составляет приблизительно 10 минут. Интенсивность  $K_\alpha$ -пика должна составлять приблизительно 200 импульсов. Остановите измерение, нажав "Принять данные".
- Оставьте рассеиватель из акрилового стекла на своем месте и проведите дополнительные измерения. Для этого изменяйте угол наклона детектора с шагом  $10^\circ$  до конечного значения  $160^\circ$ .

## Выполнение работы (5/5)

### Оценка кривых измерения

- Чтобы определить энергию линии, переключитесь с отображения полос на отображение кривых. Для этого нажмите "Параметры отображения", а затем "Интерполяция и прямые линии".
- Увеличить соответствующий участок линии с помощью функции масштабирования 
- Затем выберите участок кривой с помощью  Откройте окно "Подгонка функции". Затем выберите "Масштабированное нормальное распределение" и подтвердите 
- Найдите центр тяжести линии нормального распределения с помощью функции "Анализ пиков"  или определите его с помощью функции "Обзор" 

PHYWE  
excellence in science

# Оценка

## Задание 2

PHYWE  
excellence in science

На рис. 6 показана часть рентгеновского спектра молибдена. Для зависящей от угла смещения энергии рассеянного излучения следует учитывать только высокоинтенсивную  $L_{\alpha}$ -линию.

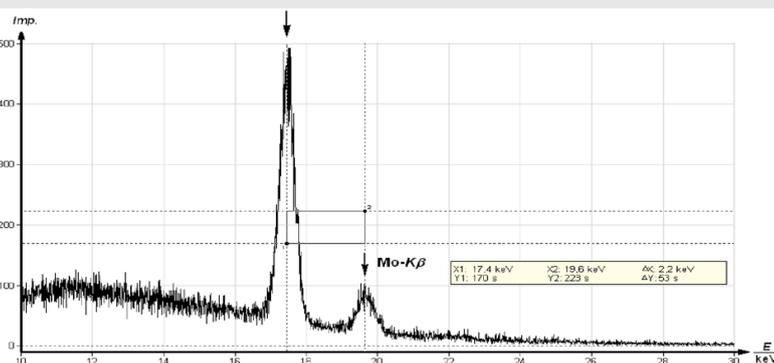


Рис. 6: Рентгеновский спектр молибдена (часть)

## Задание 3

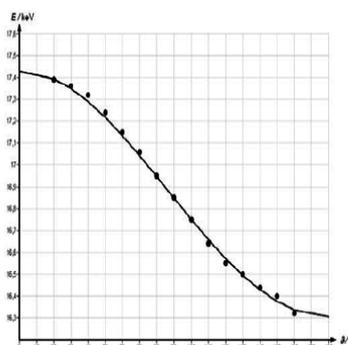


Рис. 7: Энергия  $K_{\alpha}$ -линии молибдена как функция угла рассеяния.

В столбце *B* таблицы 1 приведены экспериментальные значения энергии пиков  $W-L_{\alpha}$ -линии в зависимости от угла рассеяния (столбец *A*).

Для сравнения в столбце *C* показаны значения энергии, которые были рассчитаны с помощью  $E_1(\text{Mo} - K_{\alpha}) = 17,43 \text{ кэВ}$  на основе уравнения (1).

На рисунке 7 для наглядности показано содержание таблицы 1 в графической форме.

A	B	C
$\theta / ^{\circ}$	$E_2$ (exp.) / keV	$E_2$ (theor.) / keV
20	17,39	17,394
30	17,36	17,350
40	17,32	17,290
50	17,24	17,218
60	17,15	17,134
70	17,06	17,043
80	16,95	16,947
90	16,85	16,849
100	16,75	16,752
110	16,64	16,659
120	16,55	16,572
130	16,50	16,495
140	16,44	16,429
150	16,40	16,376
160	16,32	16,337

Таблица 1: Энергия  $E_2$  рассеянных фотонов как функция угла рассеяния  $\theta$ .

## Задание 4

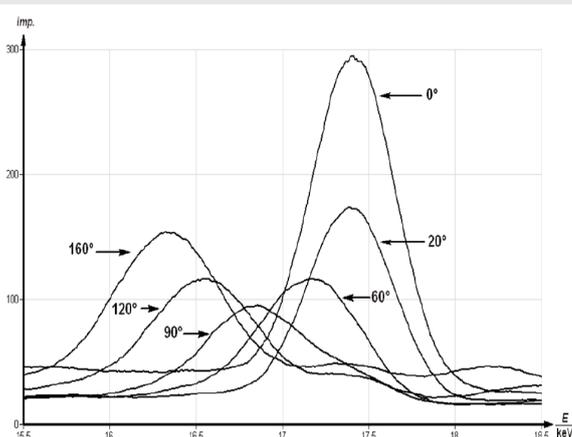


Рис. 8:  $K_{\alpha}$ -линия молибдена с различными углами рассеяния  $\theta$ .

Для того, чтобы определить длину волны Комптона  $\lambda_C$  на основе рассеяния на  $90^{\circ}$ , уравнение (3) преобразуется следующим образом:  $\lambda = hc/E$ :

$$\lambda_C = \lambda_2 - \lambda_1 = hc \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \quad (4)$$

При  $E_2(90^{\circ}) = 16,64 \text{ кэВ}$  (см. таблицу) и  $E_1(0^{\circ}) = 17,43 \text{ кэВ}$ , где  $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . На основании эксперимента можно получить следующую комптоновскую длину волны:

$$\lambda_C = 2,49 \text{ пм}$$



# Приложение

## Закон сохранения импульса:

$$p_1 = p_2 + p_3 \rightarrow p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \quad (5)$$

Следующее относится к углу  $\theta$ , образованному двумя векторами импульса  $p_1$  и  $p_2$ :

$$\cos(\theta) = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{|p_1|^2 |p_2|^2}} \quad (6)$$

С учетом (6) и преобразованиями импульса и энергии  $p_1 = E_1/c$  и  $p_2 = E_2/c$  (соотношение импульса и энергии, основанное на комбинации  $E = h\nu$  и импульса фотона  $p = h/\lambda$  (де Бройль) и  $c = \lambda\nu$ ), уравнение (5) приводит к:

$$p_e^2 = \frac{1}{c^2} (E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos(\theta)) \quad (7)$$

## Сохранение энергии:

Если учесть релятивистские эффекты для электрона со скоростью  $v$ , то получится следующее:

$$E_1 + m_0c^2 = E_2 + E_e = E_2 + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (8)$$

Из уравнений  $E = mc^2$  и  $p_e = mv$  следует:

$$v^2 = \frac{c^4 p_e^2}{E_e^2} \quad (9)$$

Если подставить (9) в (8), то получится следующее:

$$p_e^2 = \frac{1}{c^2} (E_1^2 + E_2^2 + 2m_0c^2(E_1 - E_2) - 2E_1E_2) \quad (10)$$

Комбинация (7) и (10) приводит к следующему для  $E_2$ :

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_0c^2}(1 - \cos(\theta))} \quad (11)$$