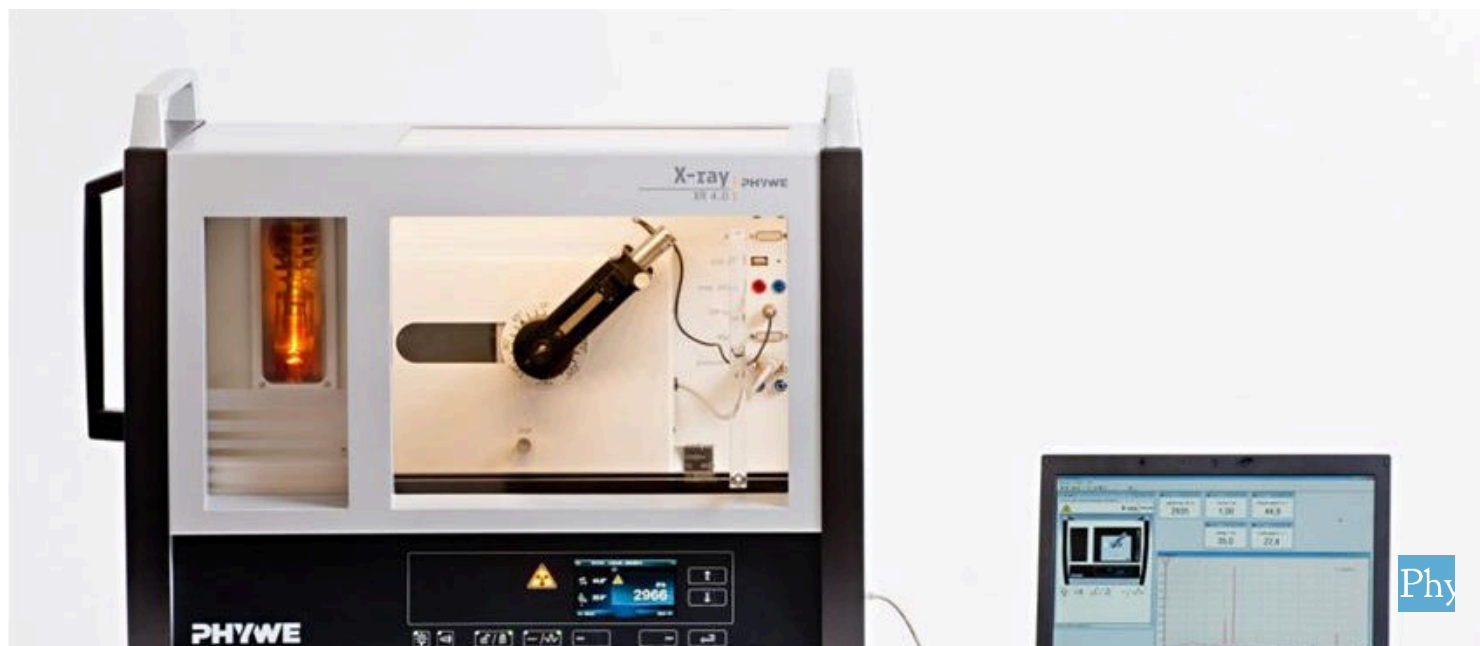


# Монохроматизация рентгеновских лучей меди



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твёрдый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



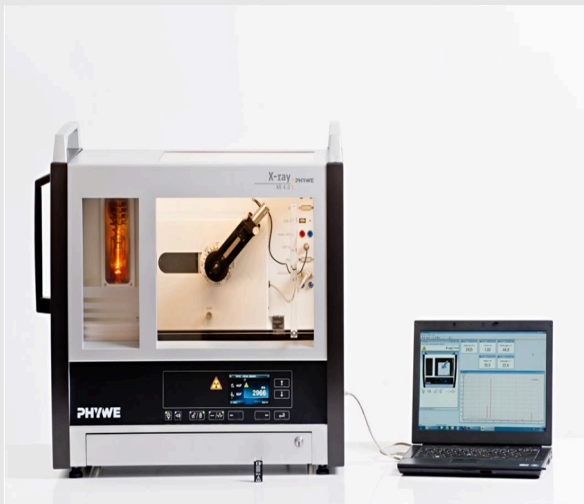
Время выполнения

45+ Минут

**PHYWE**  
excellence in science

# Общая информация

## Описание

**PHYWE**  
excellence in science

Настройка

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)

**PHYWE**  
excellence in science

Приор  
знания



Главная  
принцип

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

Однако многочисленные эксперименты (например, эксперименты Дебая-Шеррера, касающиеся кристаллических структур) требуют монохроматического рентгеновского излучения, которое может быть получено путем фильтрации рентгеновских лучей с помощью монокристаллов или металлической фольги.

## Дополнительная информация (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

Обучение  
цель



Задачи

Цель этого эксперимента - исследовать монохроматическое характеристическое рентгеновское излучение меди.

1. Анализ интенсивности рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга и с помощью LiF и KBr монокристаллы. Определите энергию характерных рентгеновских линий.
2. Используйте монокристалл LiF, чтобы отфильтровать характеристическую линию из полихроматического спектра.
3. Монохроматизируйте рентгеновский спектр с помощью никелевого фильтра.

## Теория (1/2)

**PHYWE**  
excellence in science

Рентгеновские лучи, генерируемые рентгеновской трубкой, являются полихроматическими. Линии, энергия которых зависит не от напряжения анода, а от материала анода, накладываются на тормозной спектр (см. Эксперимент P2540105). Поскольку некоторые эксперименты (эксперименты Дебая-Шеррера, касающиеся кристаллических структур) требуют монохроматического рентгеновского излучения, это излучение создается путем фильтрации с помощью монокристаллов или с помощью металлической фольги.

Когда рентгеновские лучи с длиной волны  $\lambda$  падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения  $\theta$  лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, конструктивно интерферируют друг с другом при условии, что их разность хода соответствует целому кратному числу длин волн. Это объясняется законом Брэгга:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (1) \quad (d: \text{межплоскостное расстояние}; n = 1, 2, 3, \dots)$$

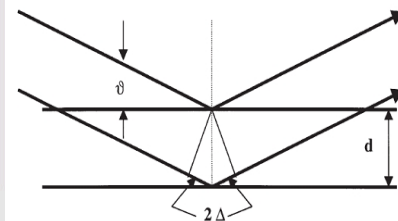


Рис. 1: Брэгговское рассеяние на паре плоскостей решетки

## Теория (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

Если известно межплоскостное расстояние  $d$ , то длину волны  $\lambda$  можно определить с помощью угла скольжения  $\theta$ . Энергия излучения возникает в результате:

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Объединяя (2) и (3), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} \quad (4)$$

### Примечание:

Данные диаграммы уровней энергии были взяты из «Справочника по химии и физике», CRC Press Inc., Флорида

Постоянная Планка  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  Джс

Скорость света  $c = 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Межплоскостное расстояние LiF (200)  $d = 2,014 \cdot 10^{-10}$  м

Межплоскостное расстояние KBr (200)  $d = 3.290 \cdot 10^{-10}$  м

## 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 Рентгеновские характеристики, расширение</a>	09135-88	1

**PHYWE**  
excellence in science



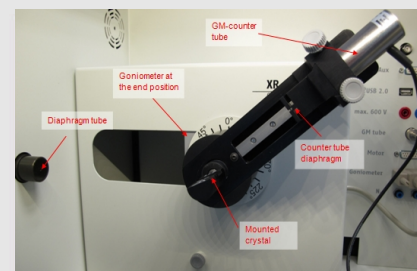
# Подготовка и выполнение работы

## Подготовка

**PHYWE**  
excellence in science

Подключите гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (см. красные метки на рис. 2). Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем положении с правой стороны. Закрепите трубку счетчика Гейгера-Мюллера с держателем на заднем упоре направляющих. Не забудьте установить перед счетчиком диафрагму (см. рис. 3). Вставьте диафрагменную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока подключения трубки.

**Для калибровки:** Убедитесь, что в параметры гониометра введен правильный кристалл. Затем выберите "Меню", "Гониометр", "Автокалибровка". Теперь прибор определит оптимальные положения кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем и положения пиков.



## Выполнение работы (1/4)


 PHYWE  
 excellence in science

- Подключите рентгеновскую установку через USB-кабель к USB-порту компьютера (нужный порт рентгеновской установки отмечен на рисунке 4).
- Запустите программу "Измерение". На экране появится виртуальная рентгеновская установка.
- Вы можете управлять рентгеновской установкой, нажимая на различные функции на виртуальной рентгеновской установке и под ней. Кроме того, Вы можете изменить параметры на реальной рентгеновской установке. Программа автоматически примет настройки.



Рис. 4: Подключение компьютера

## Выполнение работы (2/4)


 PHYWE  
 excellence in science


Рис. 5: Часть пользовательского интерфейса программы обеспечена

- Нажмите на экспериментальную камеру (см. красную маркировку на рисунке 5), чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите параметры, как показано на рисунке 6, для кристалла LiF. Если Вы используете кристалл KBr, выберите начальный угол 3° и конечный угол 75°.
- Если Вы нажмете на рентгеновскую трубку (см. красную метку на Рис. 5), вы сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите параметры, как показано на рис. 7.

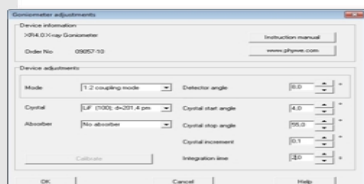


Рис. 6: Настройки гониометра (кристалл LiF)

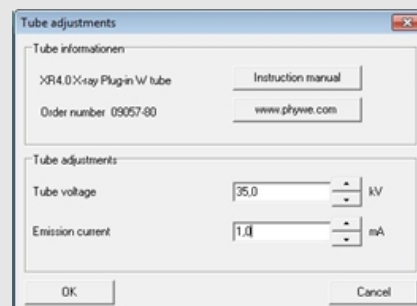
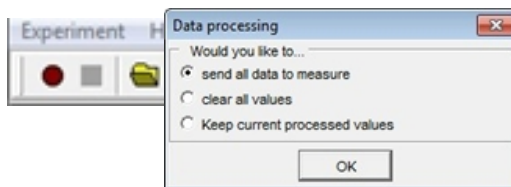


Рис. 7: Настройки напряжения и силы тока

## Выполнение работы (3/4)

- Начните измерение, нажав на красный круг:
- После измерения появится следующее окно:



- Выберите первый пункт и подтвердите выбор нажатием кнопки ОК. Теперь измеренные значения будут переданы непосредственно в программу measure.
- В конце данного руководства вы найдете краткое введение в оценку полученных спектров.

### Обзор настроек гониометра и рентгеновского аппарата для задания 1:

- Режим сопряжения 1:2
- Время выхода 2 с; ширина углового шага 0,1°
- Диапазон сканирования 4°-55° (монокристалл LiF) и 3°-75° (монокристалл KBr)
- Анодное напряжение  $U_A = 35$  кВ; анодный ток  $I_A = 1$  мА

## Выполнение работы (4/4)

### Задание 2: Монохроматизация с помощью монокристаллов

Если требуется только узкий диапазон полихроматического спектра (например, характеристическая линия  $K_\alpha$ ), настройки гониометра должны быть изменены следующим образом: кристалл анализатора устанавливается в положение угла скольжения  $\theta = 22,6^\circ$  ( $n = 1$ ) фиксированным образом. Детектор Гейгера-Мюллера вращает кристалл анализатора, например в следующем диапазоне сканирования: начальный угол  $10^\circ < 2\theta < 30^\circ$ . Соответствующие настройки гониометра приведены на рис.8.

### Задание 3: Монохроматизация с помощью фильтров

Процедура выполнения этого задания соответствует выполнению задания 1. Однако в этом случае необходимо трубку диафрагмы (2 мм) заменить на никелевый фильтр.

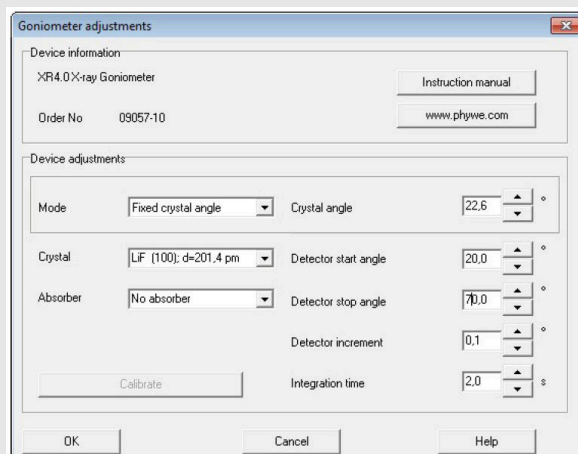


Рис. 8: Настройки гониометра; задание 2





# Оценка

## Задание 1

### Задача 1: Анализ рентгеновского спектра с помощью монокристаллов LiF и KBr

На рисунке 9 показана интенсивность рентгеновского спектра молибдена в зависимости от угла скольжения,  $\theta$ , с кристаллом LiF, используемым в качестве анализатора.

В таблице 1 показаны значения энергии для характеристических рентгеновских линий, которые являются результатом углов скольжения  $\theta$  характеристических линий на рис. 9 и из межплоскостного расстояния ( $d = 201,4 \text{ пм}$ )

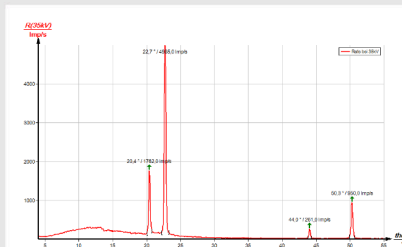


Рис. 9: Рентгеновский спектр меди с кристаллом LiF (200) в качестве анализатора

Угол обзора $\theta$	Значения энергии
$\theta = 22.7^\circ; n = 1$	$E_{K_\alpha} = 7,974 \text{ кэВ}$
$\theta = 20.4^\circ; n = 1$	$E_{K_\alpha} = 8,830 \text{ кэВ}$
$\theta = 50.3^\circ; n = 2$	$E_{K_\alpha} = 8,005 \text{ кэВ}$
$\theta = 44.0^\circ; n = 2$	$E_{K_\alpha} = 8,857 \text{ кэВ}$

## Задание 2

**PHYWE**  
excellence in science

### Задание 2: Монохроматизация с помощью монокристаллов

На рисунке 10 видно, что только под углом  $2\theta = 45^\circ$  рентгеновские лучи выходят из кристалла анализатора.

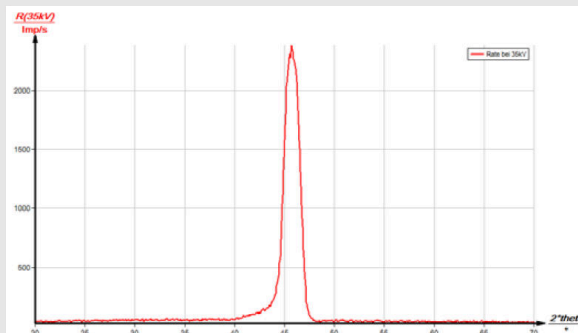


Рис. 10: Монохроматизация рентгеновского излучения меди с помощью монокристалла; длина волны фильтрации:  $\lambda_{K_\alpha}$

## Задание 3

**PHYWE**  
excellence in science

### Задача 3: Монохроматизация с помощью абсорбционной фольги

Если тонкую металлическую фольгу толщиной  $x$  поместить на пути рентгеновского луча с энергией  $E$  и интенсивностью  $I_0$ , интенсивность за фольгой из-за поглощения будет следующей:

$$I(E, x) = I_0 e^{-\mu(E) \cdot x} \quad (\mu[\text{cm}^{-1}] = \text{линейный коэффициент поглощения}). \quad (4)$$

Хотя коэффициент поглощения зависит от энергии, он обычно не показывает резких изменений в интервале энергий в несколько кэВ. Однако это резко меняется, когда энергия квантов рентгеновского излучения достаточно высока для выброса электронов с нижних энергетических уровней материала поглотителя. В таком случае в процессе поглощения появляется так называемый край поглощения. Никель, например, способен почти полностью поглощать энергию характеристической линии  $K_\beta$  меди, потому что энергия уровня К никеля немного меньше, чем энергия линии  $K_\beta$ . Напротив, энергия характеристической линии  $K_\alpha$  меди слишком мала для ионизации никеля на К-оболочке. В результате никелевый фильтр лишь незначительно снижает интенсивность линии  $K_\alpha$  в соответствии с (4).

## Задание 3 (часть 2)

**PHYWE**  
excellence in science

На рисунке 11 показан результат анализа рентгеновского спектра меди с никелевым фильтром и монокристаллом LiF в качестве анализатора. По приближению интенсивность спектральной линии пропорциональна максимуму интенсивности линии. Основываясь на этом приближении, сравнение обоих спектров на рисунках 9 и 11 (для  $n = 1$ ) показывает, что отношение интенсивностей  $I(K_\alpha)/I(K_\beta)$  резко увеличилось благодаря фильтрации.

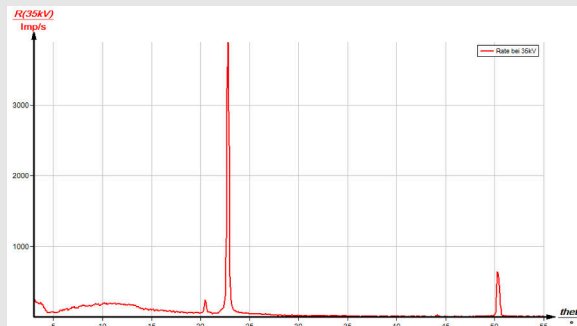


Рис. 11: Рентгеновский спектр меди с никелевым фильтром и кристаллом LiF в качестве анализатора

## Задание 3 (часть 3)

**PHYWE**  
excellence in science

Если в качестве анализатора использовать монокристалл KBr, результаты будут такими же с точки зрения уменьшения интенсивности линии  $K_\beta$  (рис. 12 и 13).

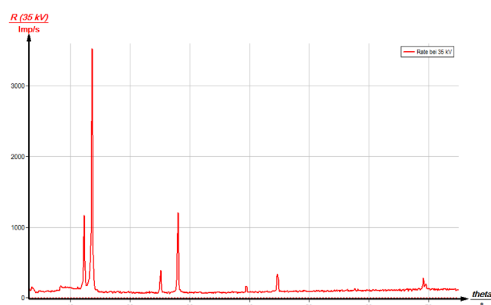


Рис. 12: Рентгеновский спектр меди с кристаллом KBr в качестве анализатора

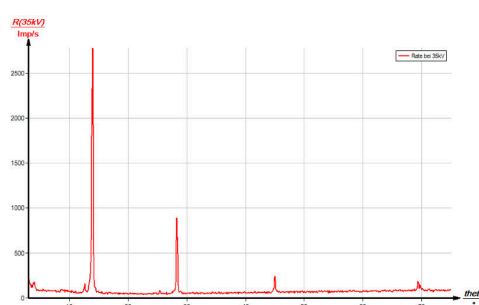




Рис. 13: Рентгеновский спектр меди с никелевым фильтром  $K_\beta$  и кристаллом KBr в качестве анализатора

## Примечание

**PHYWE**  
excellence in science

### программное обеспечение measure

С помощью программного обеспечения measure пики в спектре могут быть определены довольно легко:

- Нажмите кнопку "метка" и выберите область для определения пика. 
- Нажмите на кнопку "Анализ пика". 
- Появится окно "Анализ пиков" (см. рис. 14). Затем нажмите "Рассчитать".
- Если вычислены не все пики (или их слишком много), скорректируйте допустимую погрешность
- Выберите "Визуализация результатов", чтобы отобразить данные пиков непосредственно в спектре

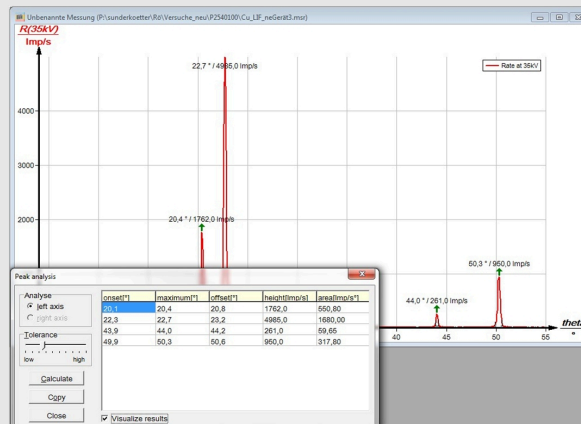


Рис. 14: Автоматический анализ пиков с помощью measure