



# Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

При падении рентгеновских лучей на образец происходят процессы рассеяния и истинного поглощения.

Процессы рассеяния:

- Томсоновское рассеяние (когерентное);
- Комptonовское рассеяние (некогерентное – с увеличением длины волны).

Истинное поглощение

- вторичное (флуоресцентное) характеристическое излучение;
- Оже – эффект.

# Эффект Комптона

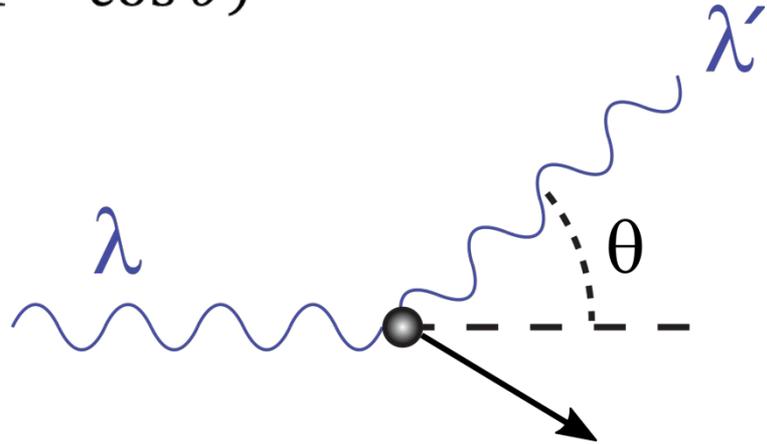
Некогерентное рассеяние фотонов на свободных электронах. Эффект сопровождается изменением частоты фотонов, часть энергии которых после рассеяния передается электронам.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta)$$

$$\frac{h}{m_0c} = \Lambda_K$$

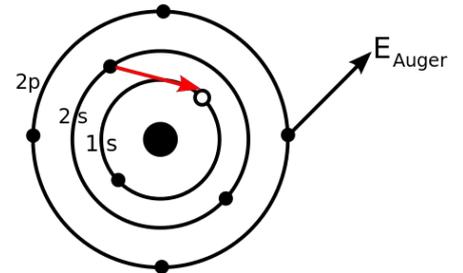
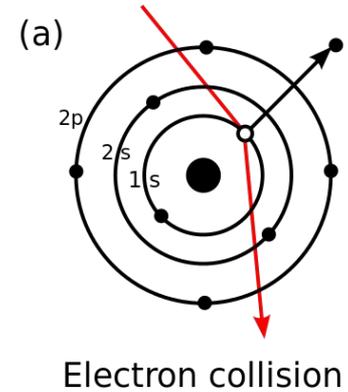
– КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ:

$$\Lambda_K = 2.42 \text{ пм} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$



# Эффект Оже

Эмиссия электрона из атома, происходящая в результате безызлучательного перехода при наличии в атоме вакансии на внутренней электронной оболочке.



Auger electron emission

# Задача 1

Рентгеновское излучение с длиной волны 56,3 пм рассеивается плиткой графита. Определить длину волны лучей рассеянных под углом  $120^\circ$  к первоначальному направлению рентгеновских лучей.

$$\Lambda_k = 2,42 \text{ пм} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

# Задача 1 - Решение

- 

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda' = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) + \lambda = \Lambda_K (1 - \cos \theta) + \lambda$$

$$\lambda' = 2.42 \cdot 10^{-12} (1 - \cos 120^\circ) + 56.3 \cdot 10^{-12} = 59.93 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

## Задача 2

Первоначальная длина волны падающего рентгеновского излучения  $\lambda=0,003$  нм, скорость электрона отдачи равна  $0,6c$ . Определите изменение длины волны и угол рассеяния фотона.

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

# Задача 2 - Решение

- $$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta)$$

$$\frac{hc}{\lambda} + m_0c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + mc^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

# Задача 2 - Решение

- $$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 0.36 \cdot c^2/c^2}} = 1.25m_0$$

$$\lambda' = \frac{hc\lambda}{hc - 0.25m_0c^2\lambda} =$$
$$= \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^{-12}}{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 - 0.25 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 3 \cdot 10^{-12}} = 4.34 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 4.34 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-12} = 1.34 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

# Задача 2 - Решение

- $$\cos \theta = 1 - \frac{\Delta \lambda m_0 c}{h} = 1 - \frac{\Delta \lambda}{\Lambda_K} = 1 - \frac{1.34 \cdot 10^{-12}}{2.42 \cdot 10^{-12}} = 0.4463$$

$$\theta = 63.5^\circ$$

# Ослабление рентгеновского излучения

- $I_x = I_0 e^{-\mu_x x}$   
 $\mu_x$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения [ $\text{см}^{-1}$ ]

$$\mu_x = \rho \cdot \mu_m$$

- $\mu_m$  – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения [ $\text{см}^2/\text{г}$ ]

$$\mu(\lambda) = \sum_i C_i \mu_i(\lambda)$$

$$I_x = I_0 e^{-\mu_m \rho x}$$

# Задача 3

● определить толщину слоя железа ( $Z=26$ ) и свинца ( $Z=82$ ), ослабляющего в 100 раз интенсивность рентгеновского излучения молибдена ( $\lambda_{MoK\alpha} = 0.710 \text{ \AA}$ ;  $\rho_{Fe} = 7.86 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho_{Pb} = 11.34 \text{ г/см}^3$ ).

$$\mu_{Fe}(\lambda) = 39.1 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\mu_{Pb}(\lambda) = 130 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

# Задача 3 - Решение

$$I_x = I_0 e^{-\mu_m \rho x}$$

$$x = \frac{\ln I_0 / I_x}{\mu_m \rho}$$

$$x_{Fe} = \frac{\ln 100}{39.1 \cdot 7.86} = 0.015 \text{ см} = 0.15 \text{ мм}$$

$$x_{Pb} = \frac{\ln 100}{130 \cdot 11.34} = 0.0031 \text{ см} = 0.03 \text{ мм}$$

# Задача 4

Показать, что атмосфера полностью экранирует поверхность Земли от космического рентгеновского излучения с длинами волн  $\lambda > 0.11 \text{ \AA}$ . При оценочных расчетах принять, что воздух состоит из азота и его плотность соответствует нормальным условиям. Полным экранированием считать ослабление в  $10^6$  раз.

$$\rho_N = 0.00125 \text{ г}^1 \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_N(\lambda) = 0.135 \text{ см}^2 \text{ г}^{-1}$$

# Задача 4 - Решение

•

$$I_x = I_0 e^{-\mu_m \rho x}$$

$$x = \frac{\ln I_0 / I_x}{\mu_m \rho}$$

$$x = \frac{\ln(10^6)}{0.135 \cdot 0.00125} \approx 8.2 \cdot 10^4 \text{ см} = 820 \text{ м}$$

# Задача 5

Рассчитать коэффициенты ослабления рентгеновского излучения в стали ( $C_{Cr}=20\%$ ;  $C_{Fe}=70\%$ ;  $C_{Ni}=10\%$ ) для длин волн  $\lambda=1.7 \text{ \AA}$  и  $\lambda=1.9 \text{ \AA}$ .

Объяснить изменение  $\mu(\lambda)$ .

# Задача 5 - Решение

При  $\lambda = 1.7 \text{ \AA}$

$$\mu_{Cr}(\lambda) = 336.2 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\mu_{Fe}(\lambda) = 412.5 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\mu_{Ni}(\lambda) = 60.4 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\begin{aligned}\mu(\lambda) &= C_{Cr}\mu_{Cr}(\lambda) + C_{Fe}\mu_{Fe}(\lambda) + C_{Ni}\mu_{Ni}(\lambda) = \\ &= 0.2 \cdot 336.2 + 0.7 \cdot 412.5 + 0.1 \cdot 60.4 = \\ &= 362.03 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}\end{aligned}$$

# Задача 5 - Решение

При  $\lambda = 1.9 \text{ \AA}$

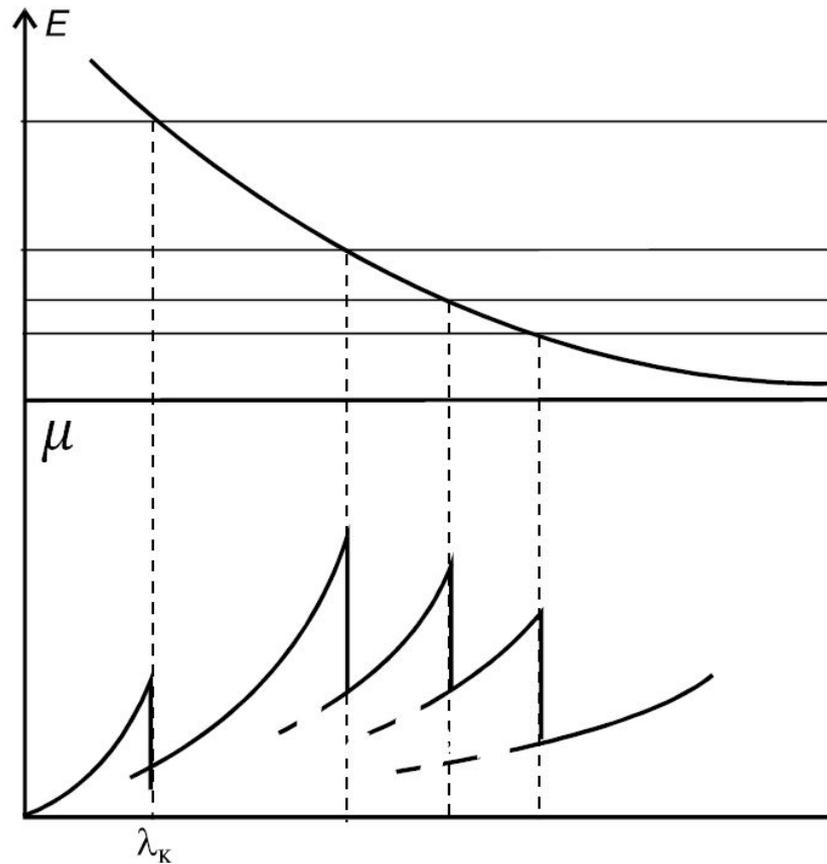
$$\mu_{Cr}(\lambda) = 455.8 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\mu_{Fe}(\lambda) = 66.6 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\mu_{Ni}(\lambda) = 81.8 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}$$

$$\begin{aligned}\mu(\lambda) &= C_{Cr}\mu_{Cr}(\lambda) + C_{Fe}\mu_{Fe}(\lambda) + C_{Ni}\mu_{Ni}(\lambda) = \\ &= 0.2 \cdot 455.8 + 0.7 \cdot 66.6 + 0.1 \cdot 81.8 = \\ &= 145.96 \text{ см}^2\text{Г}^{-1}\end{aligned}$$

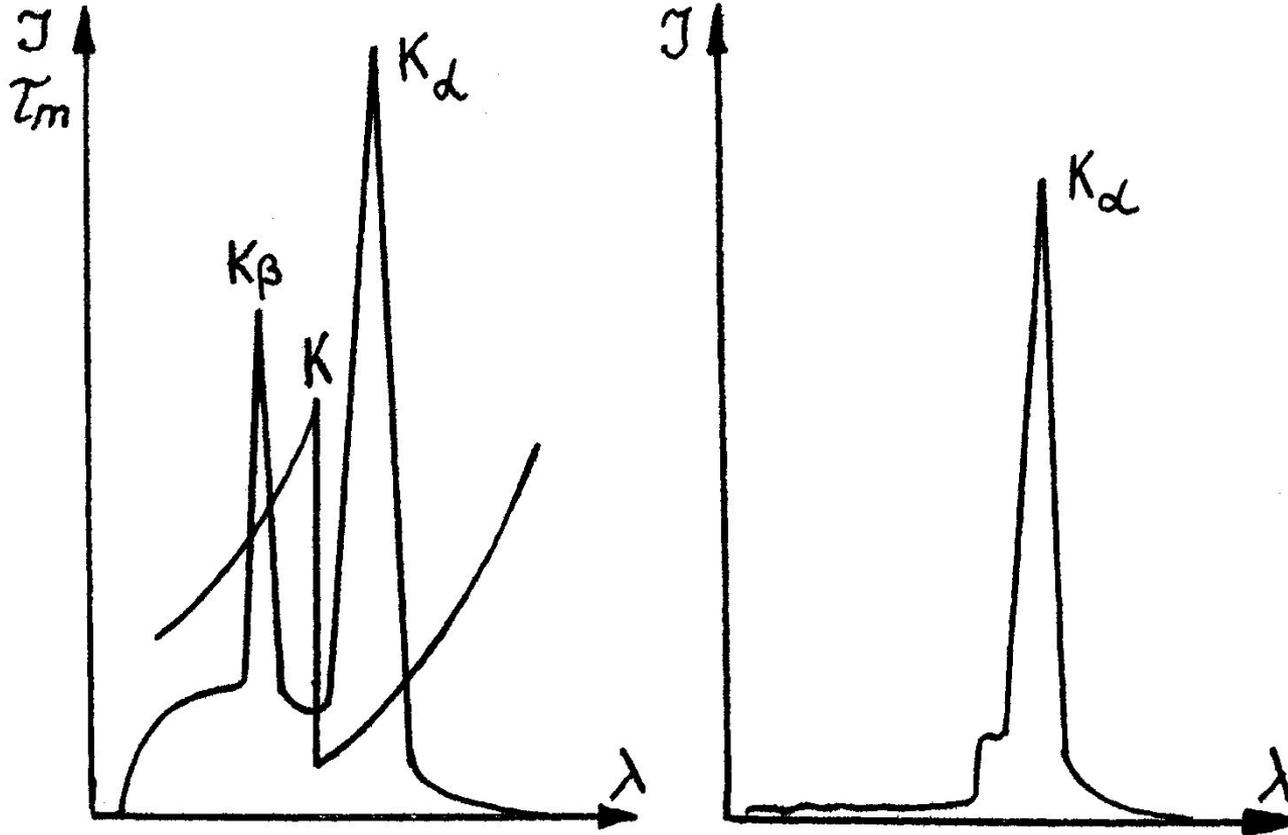
# Скачки поглощения



# Рентгеновские фильтры

	$K\alpha$	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$	$K\beta_2$
<b>Fe</b>	0,193735	0,193604	0,193998	0,17566	0,17442
<b>Cu</b>	0,154184	0,154056	0,154439	0,139222	0,138109
<b>Ag</b>	0,0560834	0,0559363	0,0563775		
<b>Cr</b>	0,2291	0,22897	0,229361		
<b>Co</b>	0,179026	0,178897	0,179285		
<b>Mo</b>	0,071073	0,07093	0,071359		
<b>W</b>	0,0210599	0,0208992	0,0213813		
<b>Zr</b>		0,078593	0,079015	0,070173	0,068993
<b>Ni</b>		0,165791	0,166175	0,15001	0,14886

# Рентгеновские фильтры





# Дифракция рентгеновских лучей

Отраженные лучи усилят друг друга, если их разность хода будет кратна длине волны, т.е.

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

– формула Брегга - Вульфа

$n$  – целое число, называемое порядком отражения.

# Задача 6

Узкий параллельный пучок монохроматического рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda = 1.92 \text{ \AA}$ , падает на грань кристалла NaCl. Каково расстояние между атомными слоями кристалла, если под углом  $20^\circ$  к плоскости грани наблюдают дифракционный максимум первого порядка?

# Задача 6 - Решение

- $$2d\sin\theta = n\lambda$$

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} = \frac{1 \cdot 1.92 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot \sin(20^0)} = \frac{1.92 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 0.342} = 2.8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

# Задача 7

Определить максимальную длину волны рентгеновского излучения при которой возможна дифракция на кристалле NaCl ( $d=0.28$  нм).

# Задача 7 - Решение

- $$2d\sin\theta = n\lambda$$

$$\sin\theta \leq 1$$

$$\lambda \leq 2d$$

$$\lambda_{max} = 2d = 5.6\text{\AA}$$

# Методы рентгенографии

- **Метод Лауэ**

Кристалл неподвижен, источником электромагнитных волн является рентгеновская трубка, излучающая непрерывный спектр.

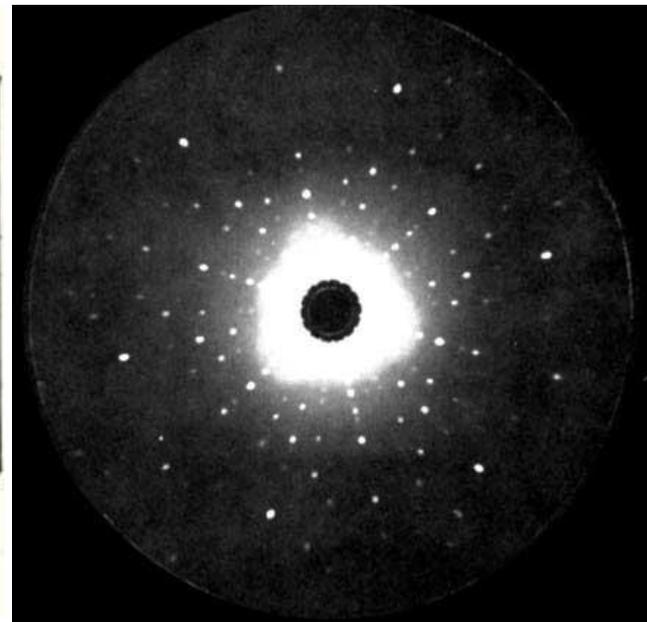
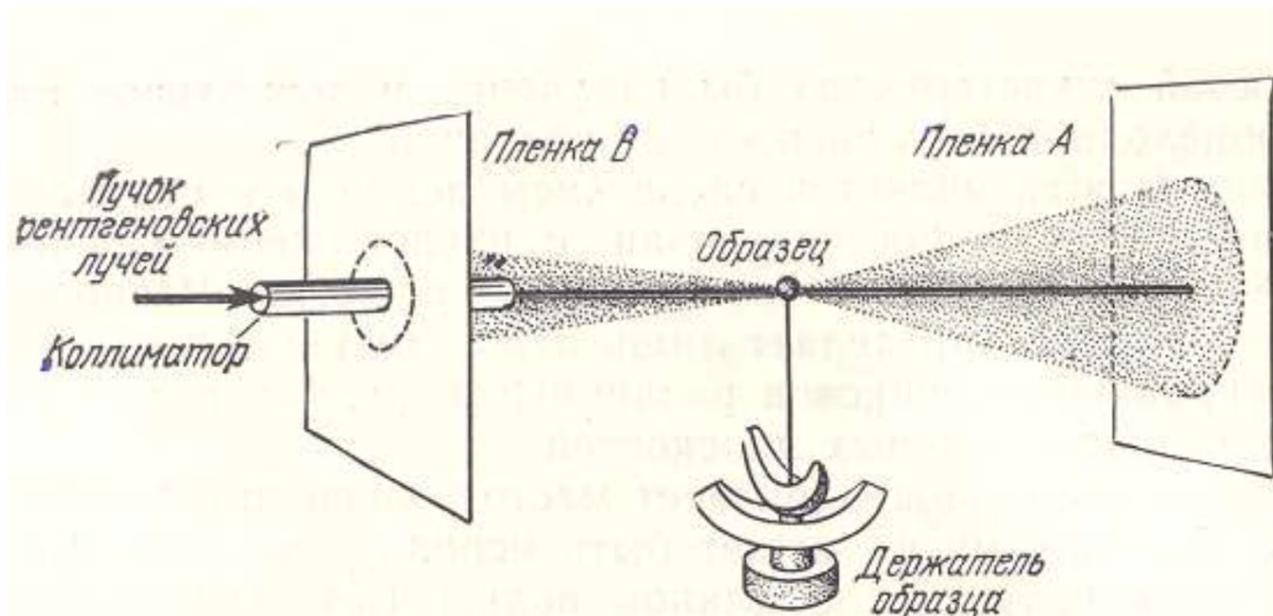
- **Метод вращения кристалла**

Кристалл вращается вокруг какой-то выбранной оси симметрии, рентгеновское излучение монохроматическое.

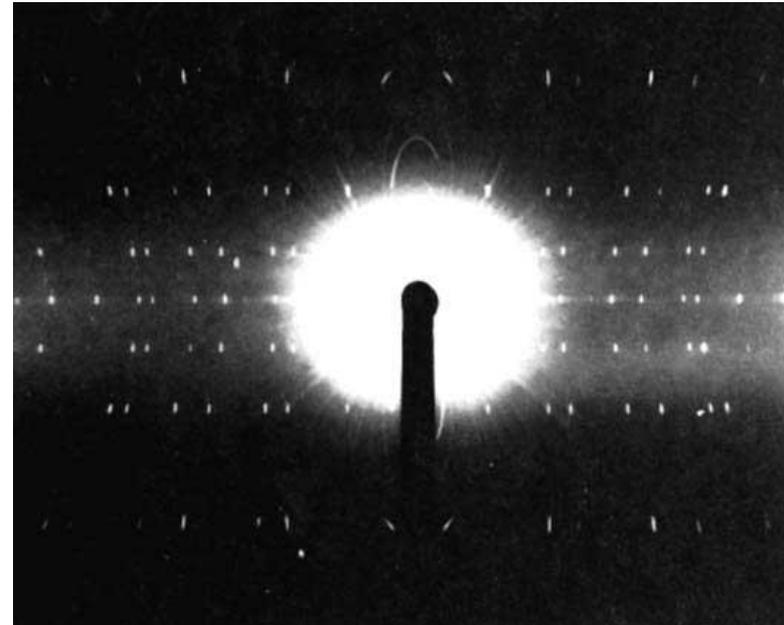
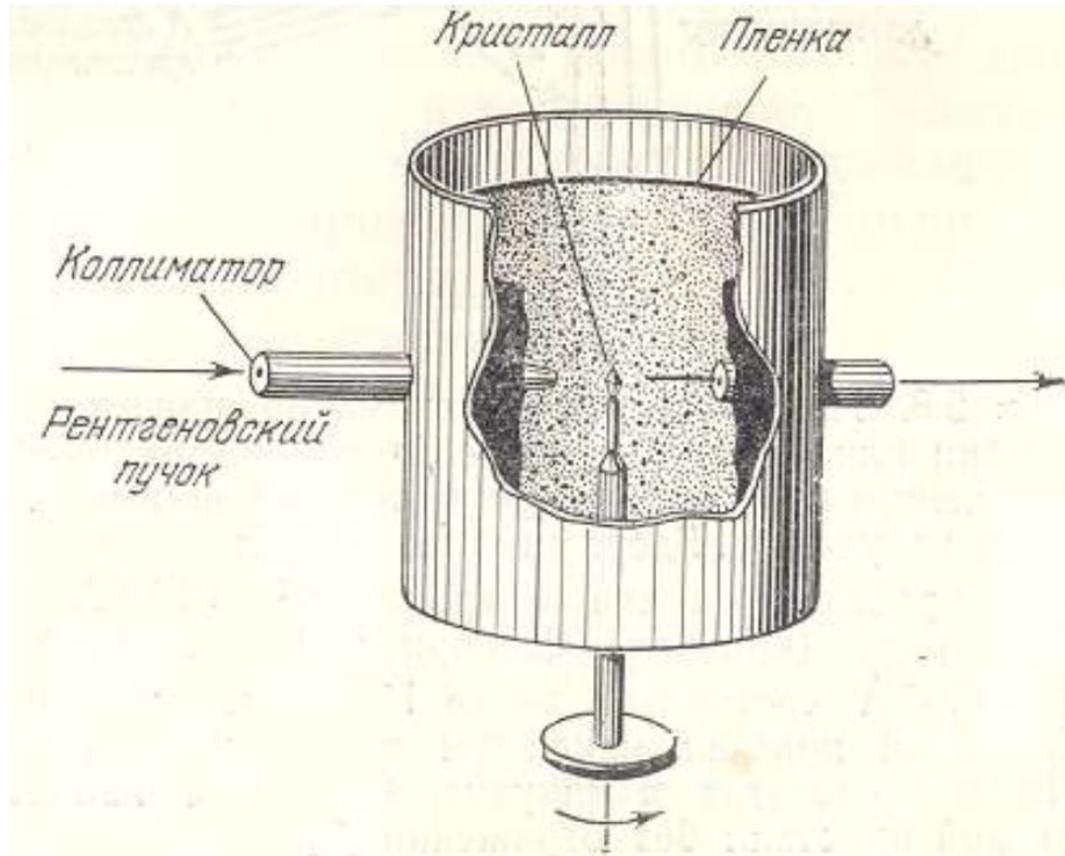
- **Метод порошка, метод Дебая-Шерера**

Используются поликристаллические порошки, в которых присутствуют почти все ориентации кристаллитов. Рентгеновское излучение монохроматическое.

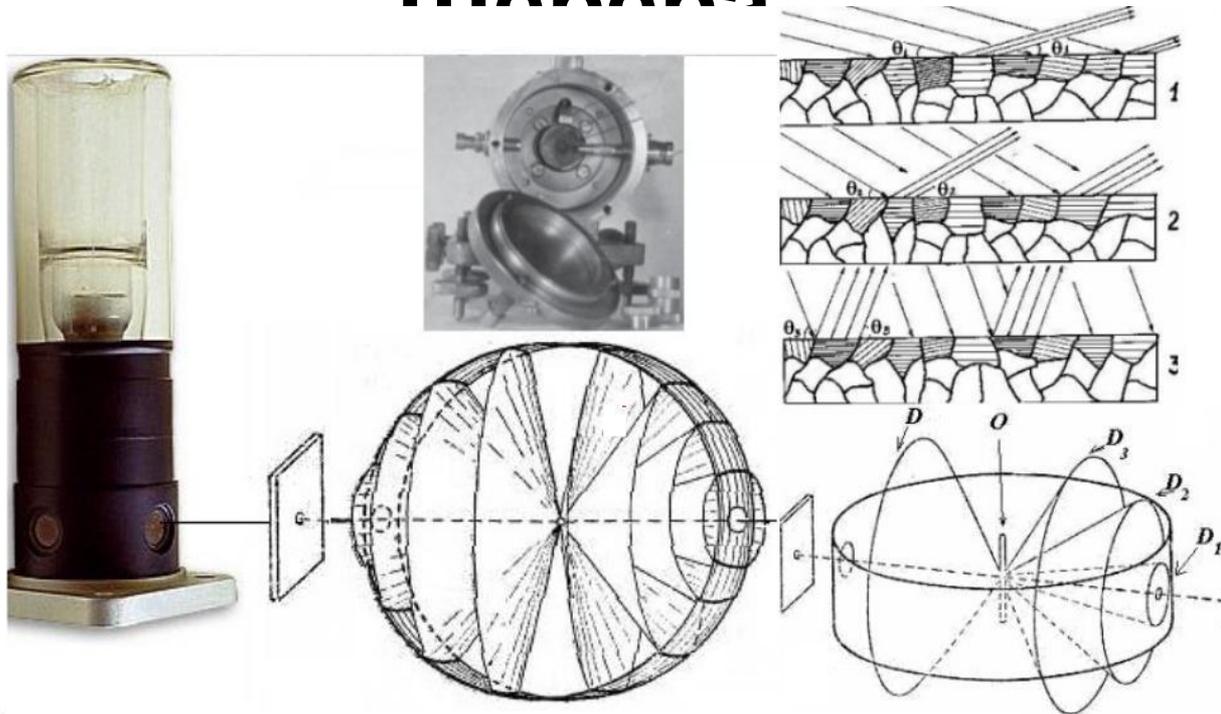
# Метод Лауэ



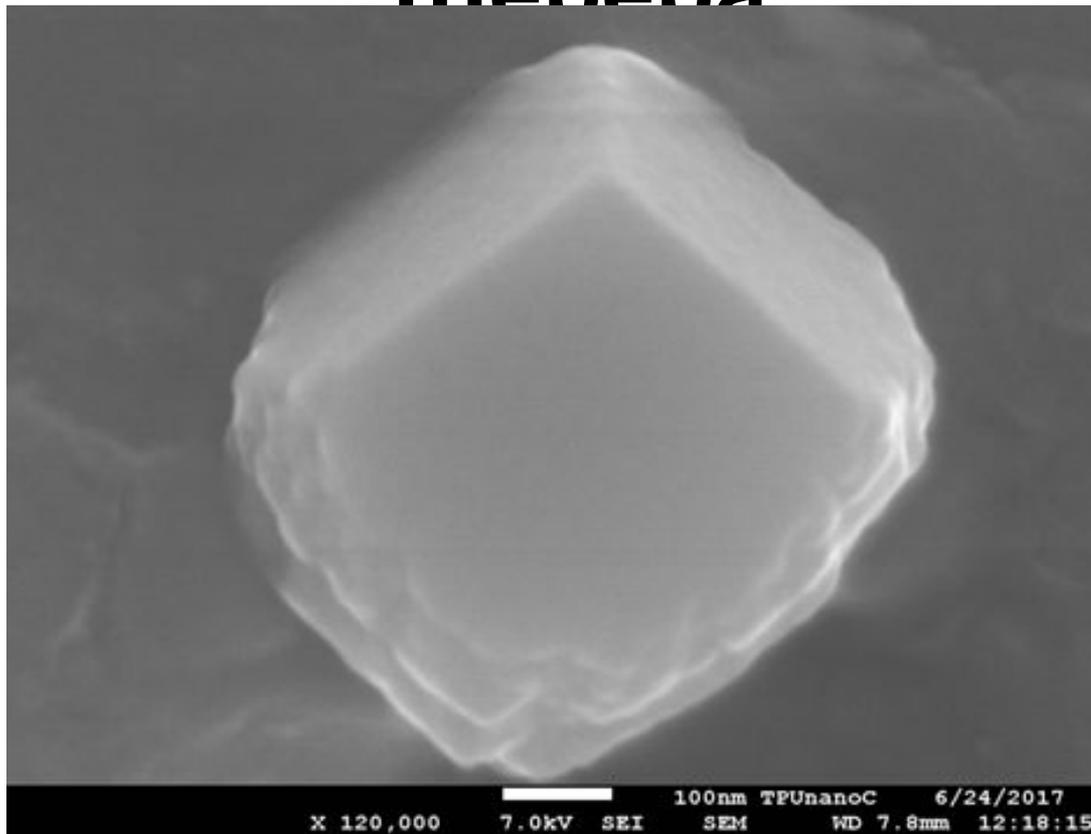
# Метод вращения кристалла



# Метод порошка, метод Дебая-Шерера



# Метод порошка, метод Дебая-Шерера



# Метод порошка, метод Дебая-Шерера

