

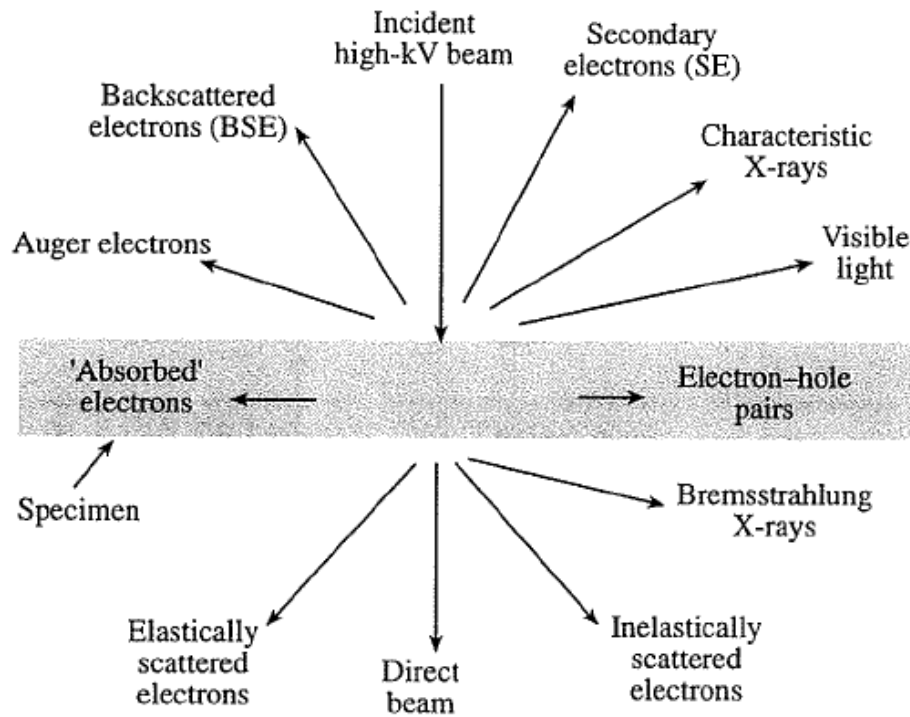
# Микроскопия, концепция разрешающей способности

Зависимость разрешающей способности от длины волны

$$\delta = \frac{0.61\lambda}{\mu \sin \beta}$$

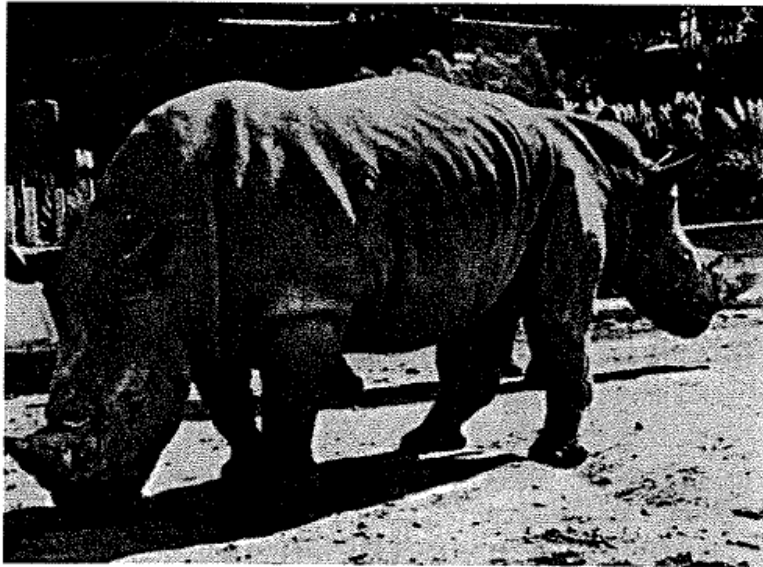
Зависимость энергии излучения от длины волны (без учета релятивистских эффектов)

$$\lambda \sim \frac{1.22}{E^{1/2}}$$



Взаимодействие высокоэнергетического пучка электронов с материей

## Ограничения метода



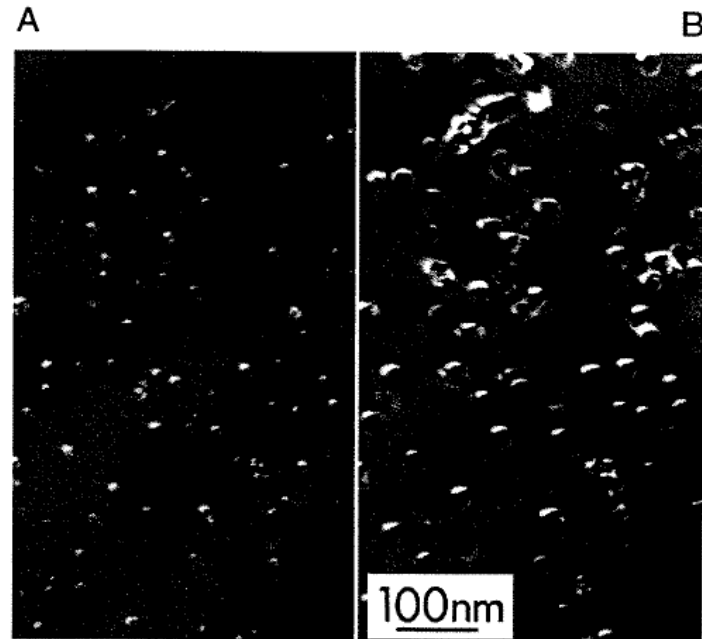
Пример двумерной картины

Двумерная картина

Малый размер пробы

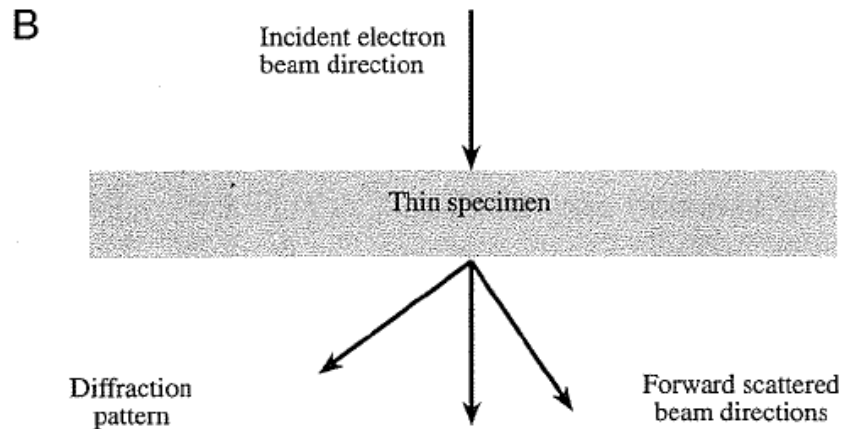
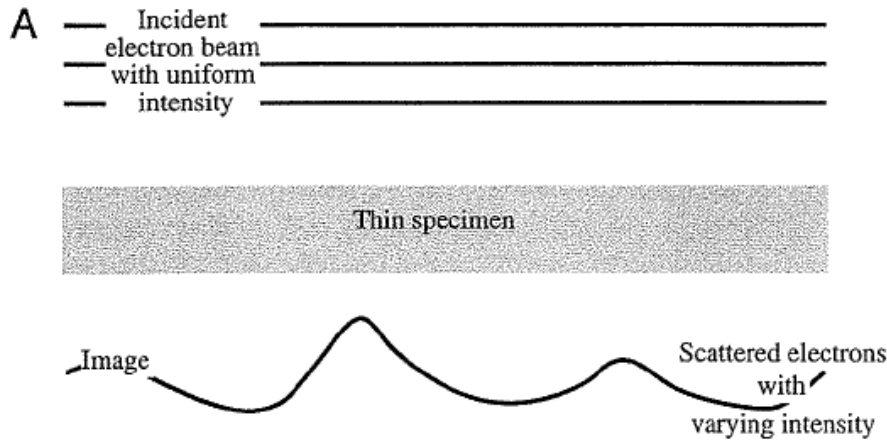
Повреждение образца электронным пучком

Сложность приготовления образца

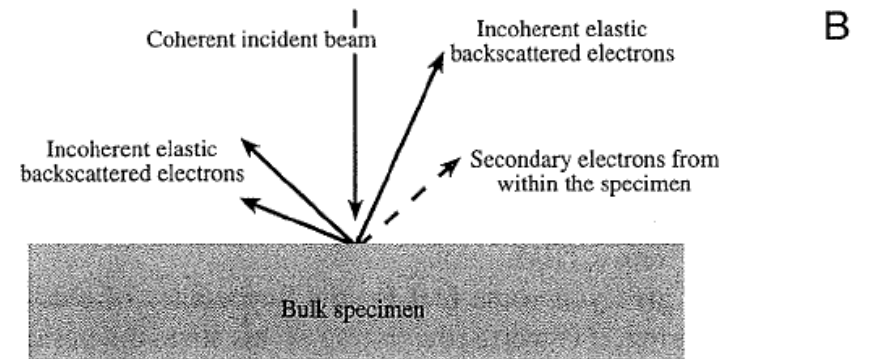
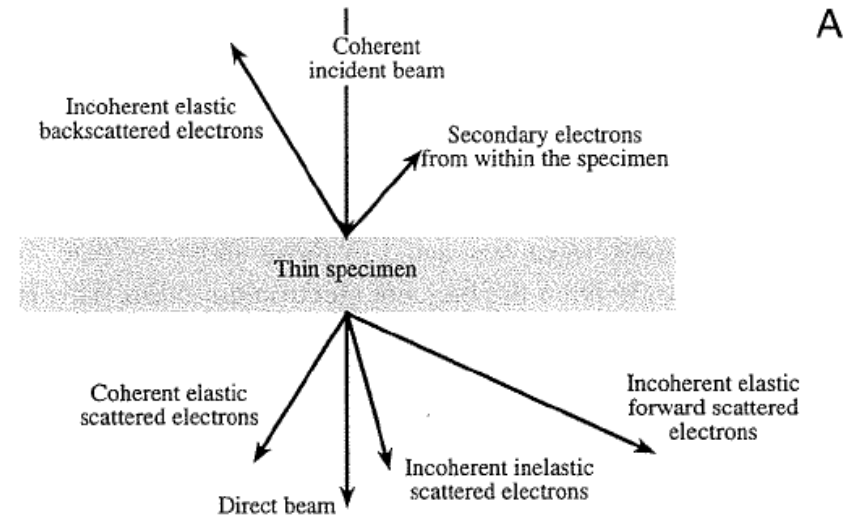


Пример повреждения кварца электронным пучком

# Дифракция и рассеяние электронов

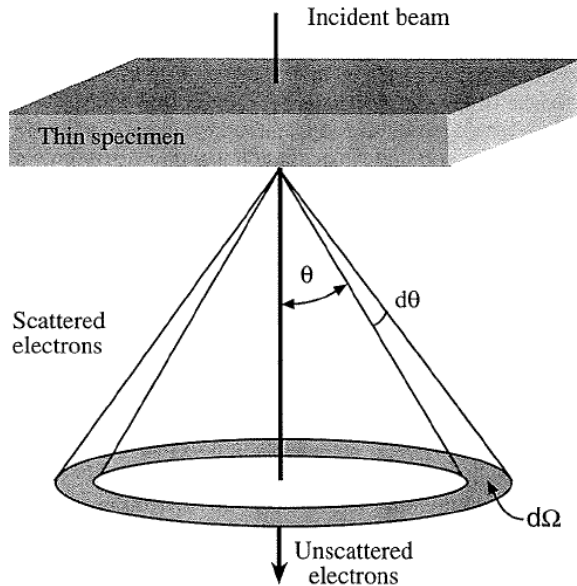


Проходя через образец пучок электронов меняет свою интенсивность и направление



Различные типы рассеяния электронов в зависимости от толщины образца

# Рассеяние электронов



Площадь поперечного сечения рассеяния электронов измеряется в барнах =  $10^{-24}$  см<sup>2</sup>

$$\sigma_T = \sigma_{\text{elastic}} + \sigma_{\text{inelastic}}$$

Рассеяние складывается из упругого и неупругого рассеяния

$$\sigma = \pi r^2$$

Мы можем определить эффективный радиус рассеяния

$$r_{\text{elastic}} = \frac{Ze}{V\theta}$$

Радиус упругого рассеяния,  $V$  - потенциал электрона

$$Q_T = N \sigma_T = \frac{N_0 \sigma_T \rho}{A}$$

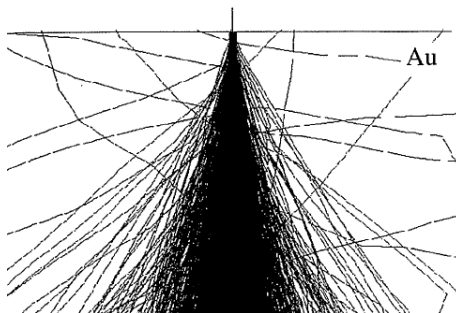
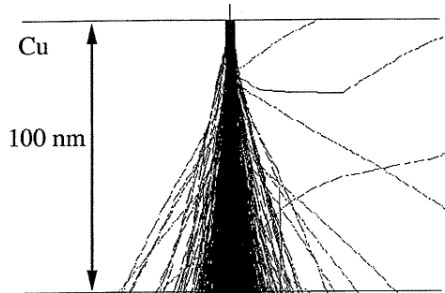
Общая рассеивающая способность образца

Дает представления о контрасте состава

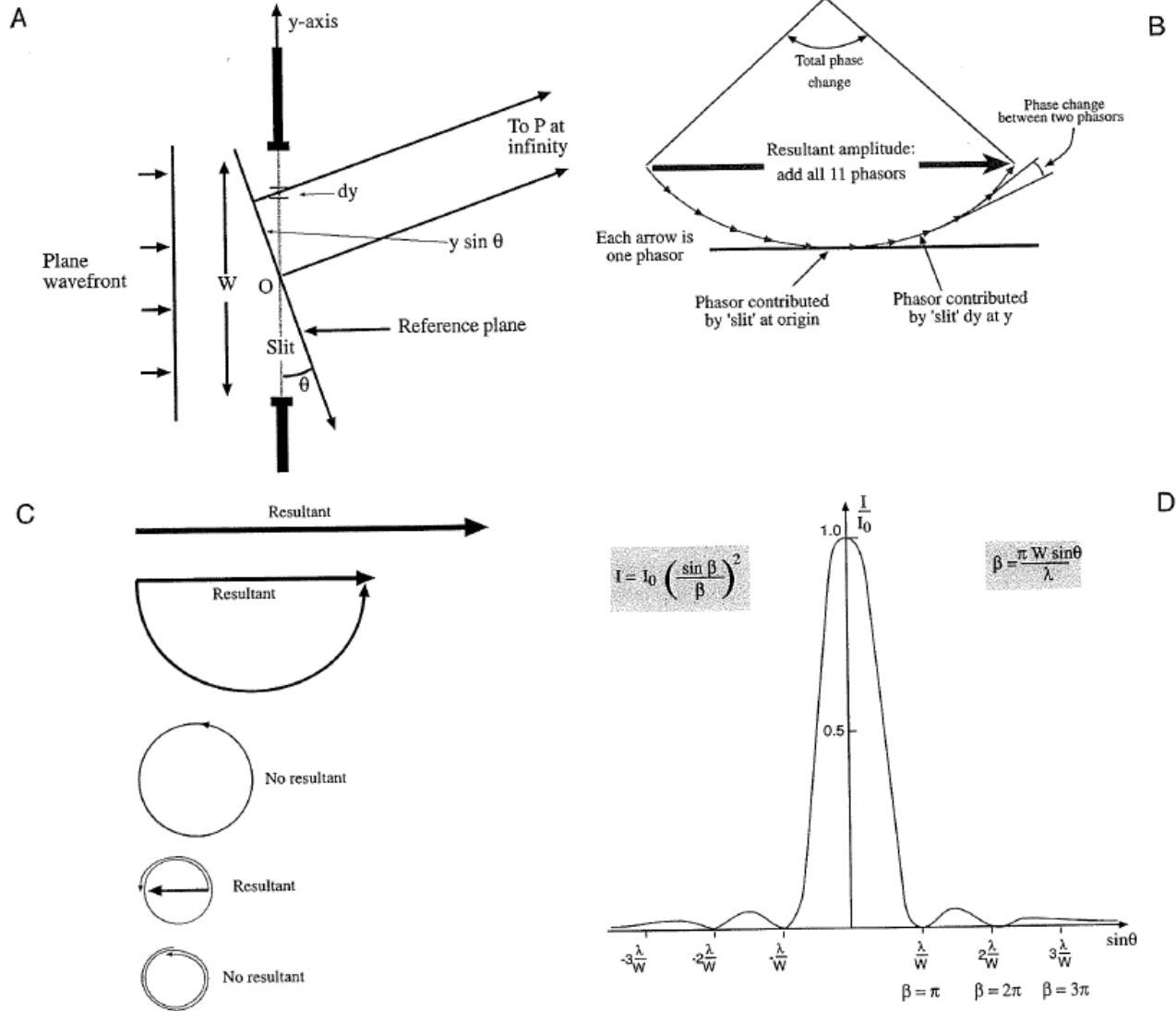
$$\lambda = \frac{1}{Q} = \frac{A}{N_0 \sigma_T \rho}$$

Длина свободного пробега

Рассеяние электронов происходит от каждого атома

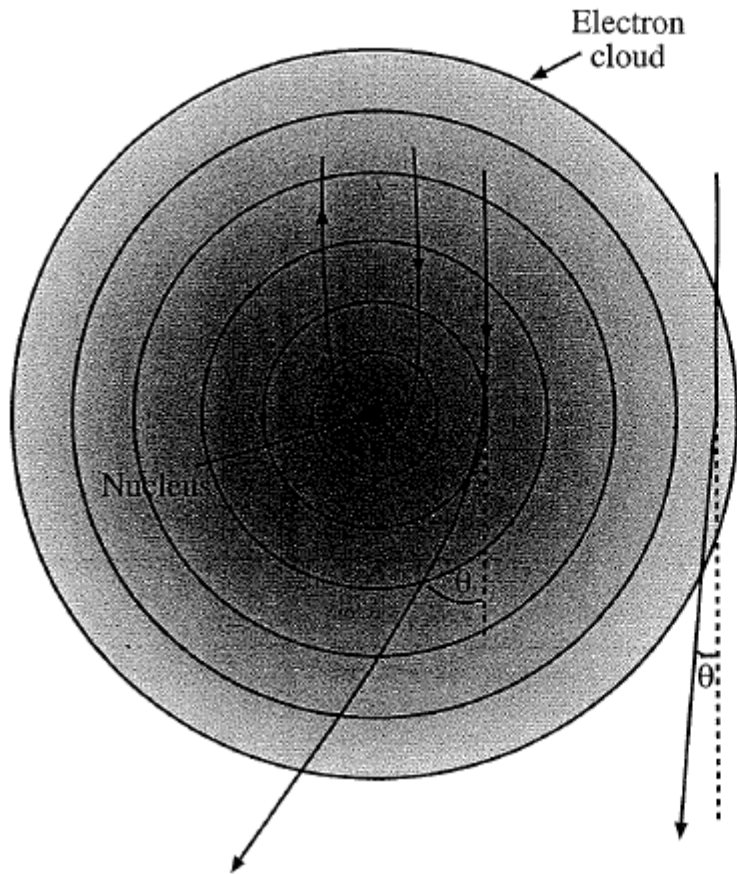


# Интерференция электронного пучка

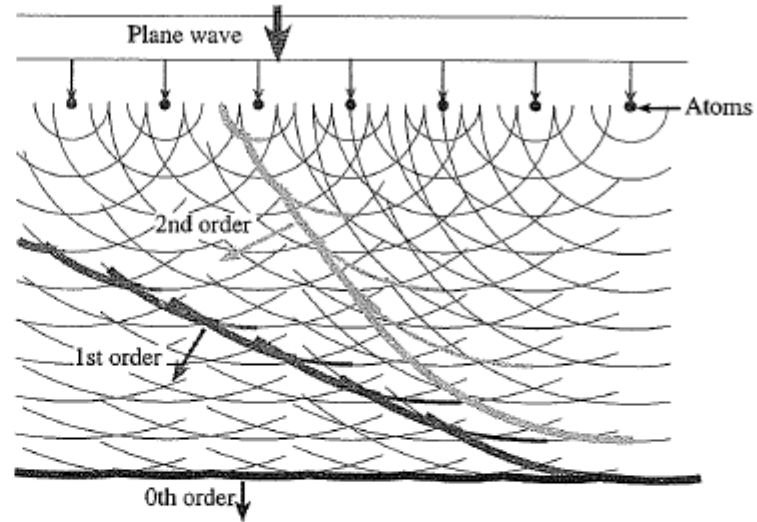


А) Геометрия рассеяния от одной щели, В) прибавление волнового вектора для получения результирующего волнового вектора, С) получение нулевой амплитуды от единственной щели, D) Изображение распределения интенсивностей интерферировавшего излучения полученного от одной щели

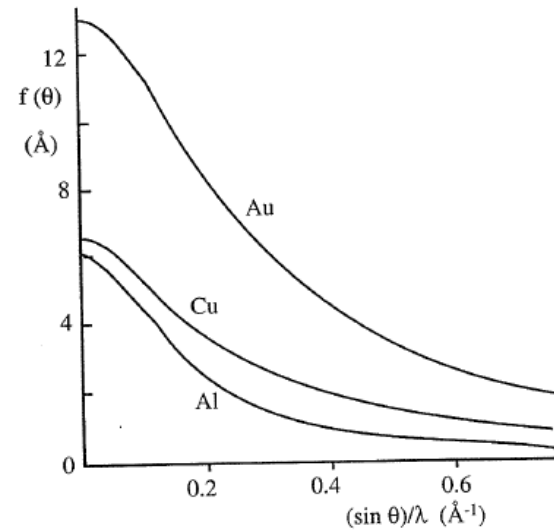
# Упругое рассеяние



Угол рассеивания в зависимости от электронной плотности



## Рассеивание от нескольких атомов



Зависимость атомного рассеивающего фактора от атомного номера

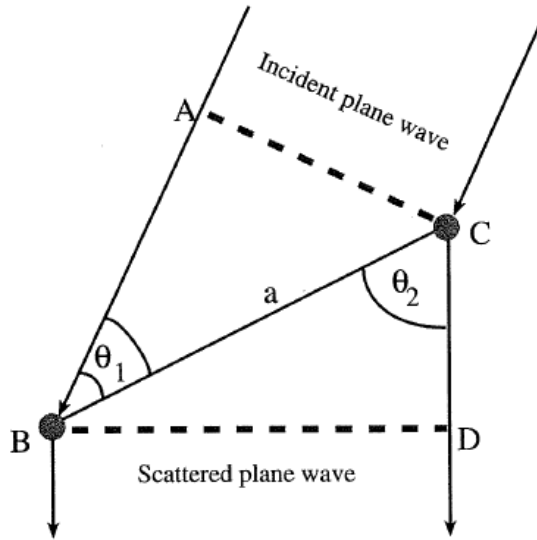
# Явление электронной дифракции

## Уравнения Лауэ

$$a(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = h\lambda$$

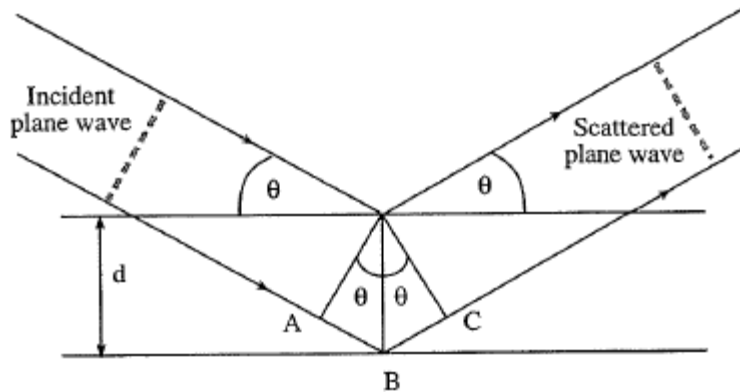
$$b(\cos \theta_3 - \cos \theta_4) = k\lambda$$

$$c(\cos \theta_5 - \cos \theta_6) = \ell\lambda$$

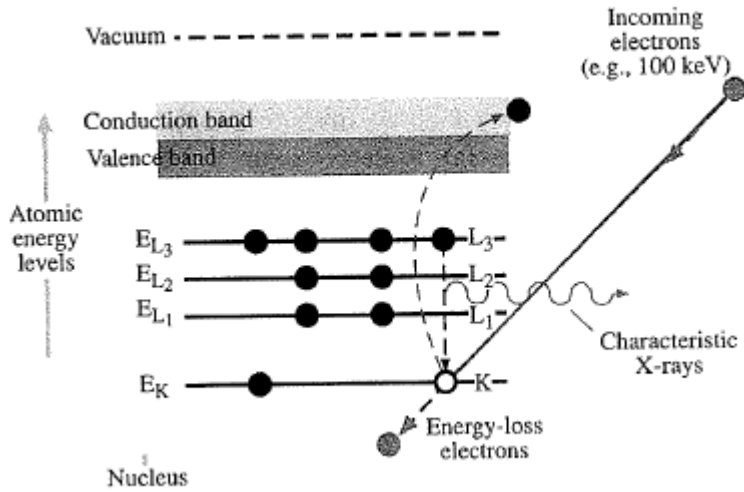


## Уравнение Брегга

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



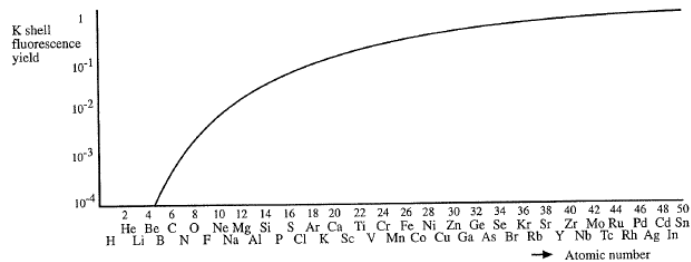
# Неупругое рассеяние электронов



$$\sigma_T = \left( \frac{\pi e^4 b_s n_z}{E_0 E_c} \right) \log \left( \frac{c_s E_0}{E_c} \right)$$

Площадь поперечного сечения неупругого рассеяния

Испускание излучения при выбивании электрона с низших оболочек



Зависимость интенсивности флуоресценции от порядкового номера атомов

Рассеяние вторичных электронов

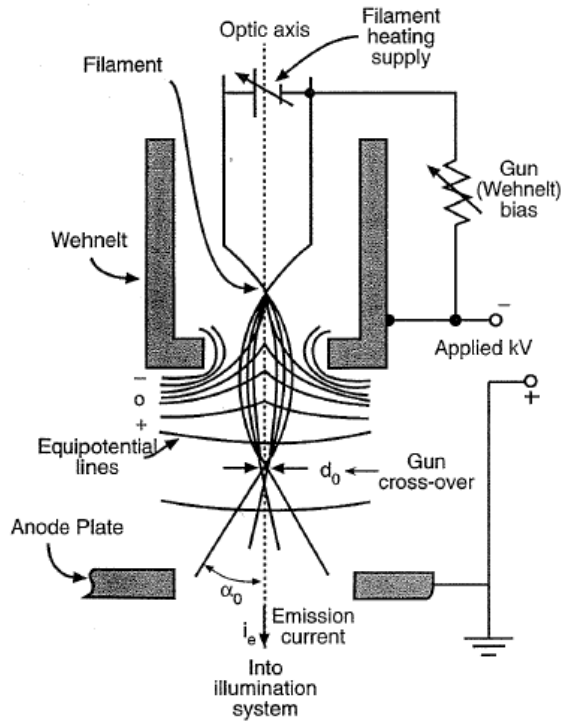
Рентгеновское излучение при взаимодействии электрона и ядра

Образование Оже электронов

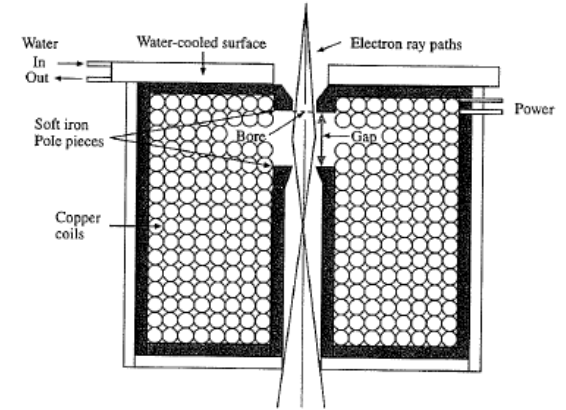
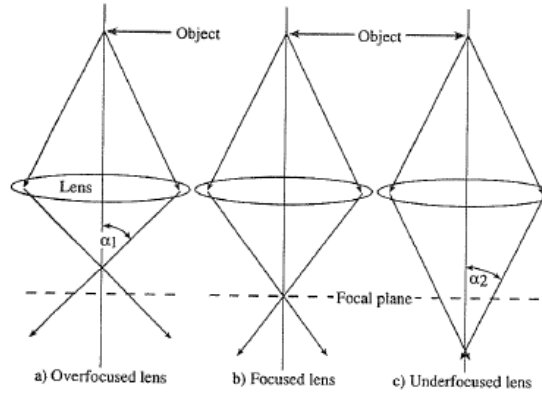
Плазмоны, фононы



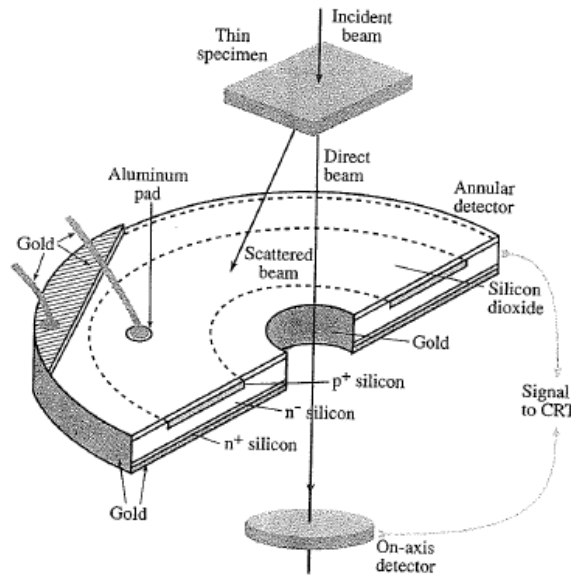
# Основные узлы колонны микроскопа



Электронная пушка

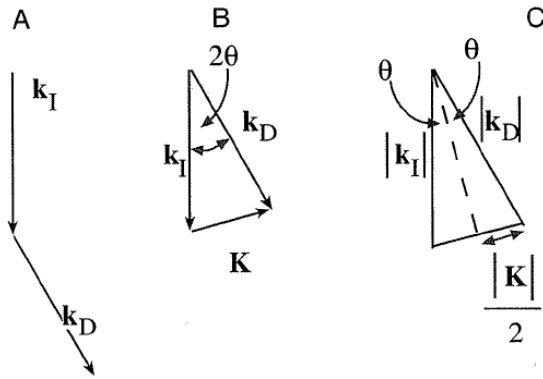


## Магнитные линзы



Образец и фосфоресцирующий экран для детектирования электронов

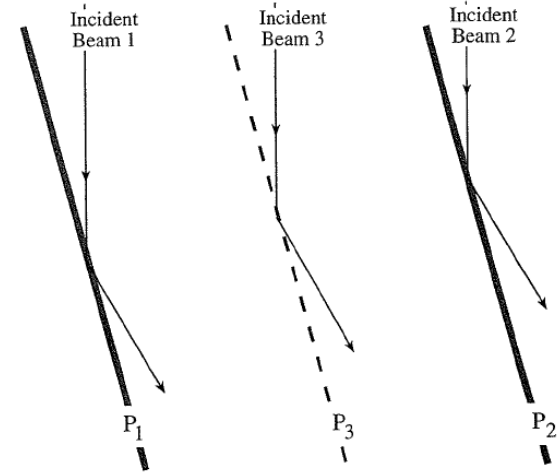
# Дифракция электронов, понятие обратного пространства



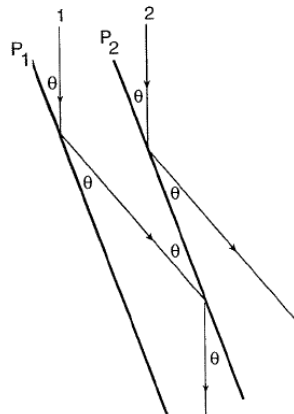
$k_I$  – волновой вектор падающего пучка,  
 $k_D$  – волновой вектор  
 дифрагировавшего пучка,  $K$ - разница  
 между векторами

$$\frac{2 \sin \theta_B}{\lambda} = \frac{n}{d} = |\mathbf{K}|$$

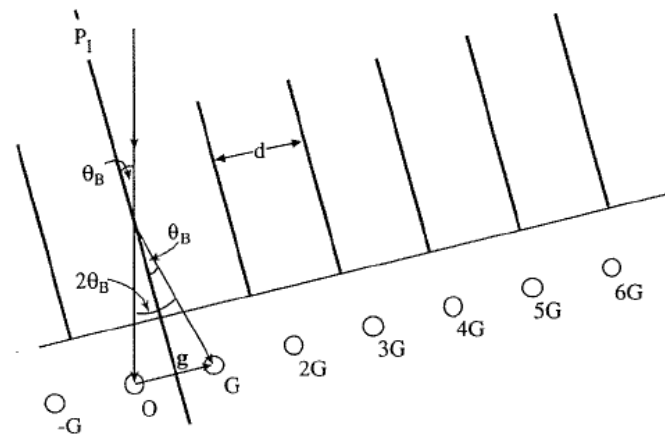
Уравнение Брэгга



Дифракция электронов от трех атомов

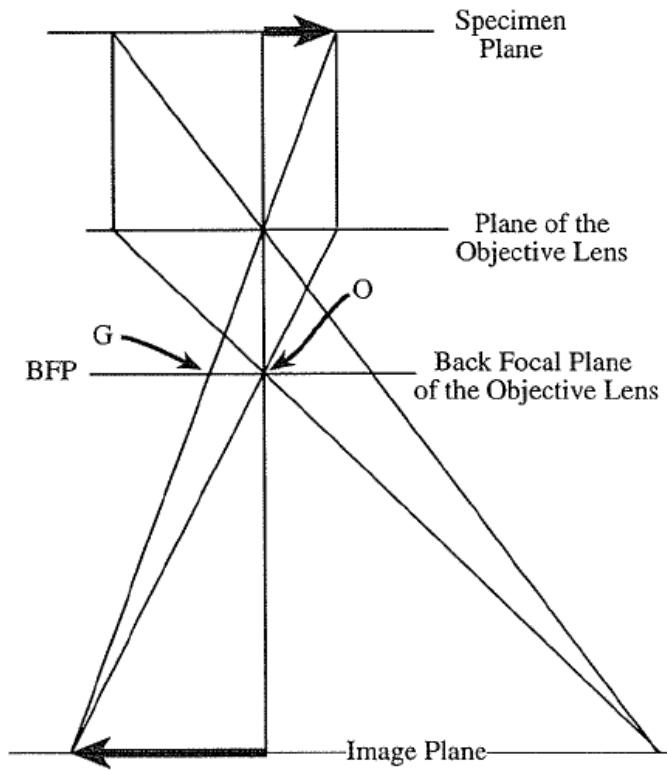


Условия динамической дифракции,  
 появление двойной дифракции

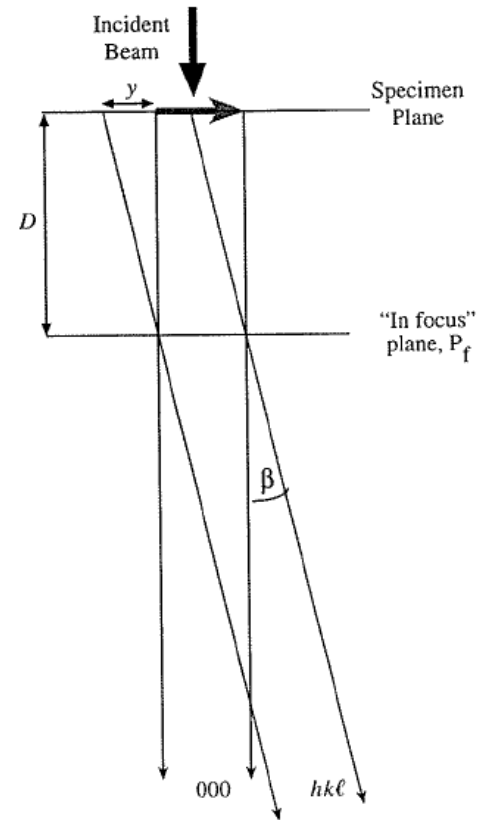


При дифракции на кристалле мы наблюдаем группы рефлексов

# Принципы формирования изображений

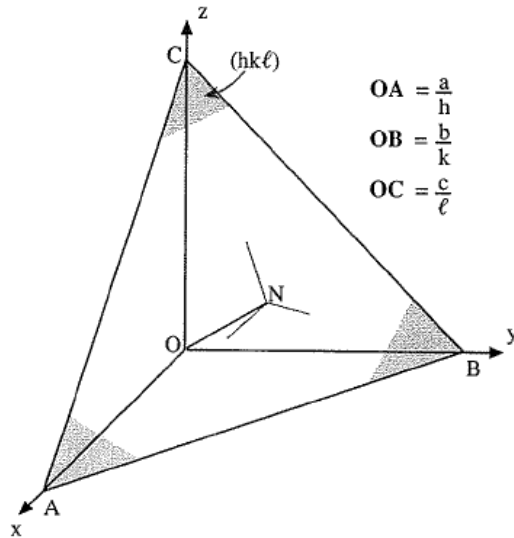


Дифракционная картина с выбранной области формируется на задней фокальной плоскости объективной линзы



Формирование изображения рефлекса от дифрагировавшего пучка плоскости  $hkl$

# Понятие об обратном пространстве



$$\begin{aligned} OA &= \frac{a}{h} \\ OB &= \frac{b}{k} \\ OC &= \frac{c}{l} \end{aligned}$$

$$\mathbf{r}_n = n_1 \mathbf{a} + n_2 \mathbf{b} + n_3 \mathbf{c}$$

Вектор в элементарной ячейки

$$\mathbf{r}^* = m_1 \mathbf{a}^* + m_2 \mathbf{b}^* + m_3 \mathbf{c}^*$$

Представление вектора элементарной ячейки в обратном пространстве

$$\mathbf{a}^* \cdot \mathbf{b} = \mathbf{a}^* \cdot \mathbf{c} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{c} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{b} = 0$$

$$\mathbf{a}^* \cdot \mathbf{a} = 1; \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{b} = 1; \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{c} = 1$$

Взаимосвязь векторов прямого и обратного пространства

$$\mathbf{a}^* = \frac{\mathbf{b} \wedge \mathbf{c}}{V_c}$$

Параметр обратной ячейки представляется следующим произведением

$$\mathbf{K} = \xi \mathbf{a}^* + \eta \mathbf{b}^* + \zeta \mathbf{c}^*$$

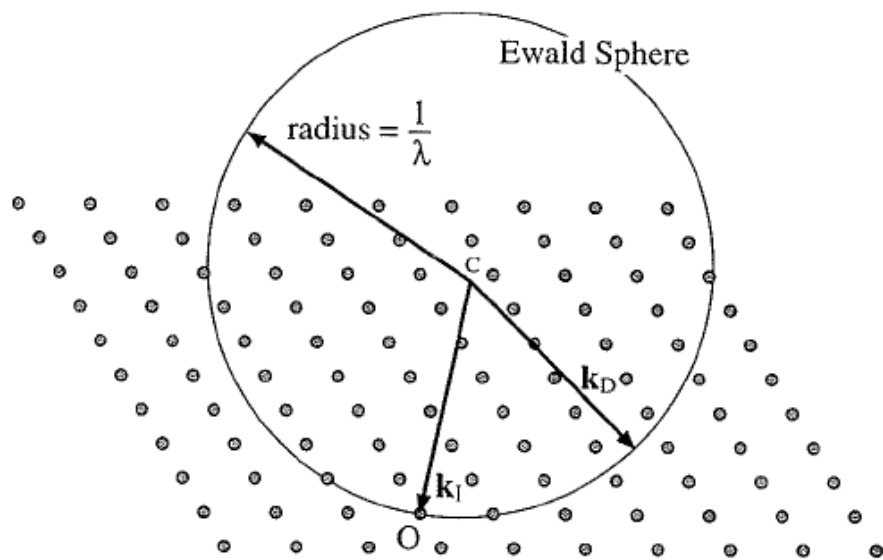
Из уравнения Брегга можно определить вектор K

$$\mathbf{g}_{hkl} = h \mathbf{a}^* + k \mathbf{b}^* + l \mathbf{c}^*$$

или

$$d_{hkl} = \frac{1}{|\mathbf{g}|}$$

Практическое значение имеют следующие представления дифракционного вектора



Сфера Эвальда, пространственное представление взаимодействия пучка электронов с узлами обратной решетки кристалла

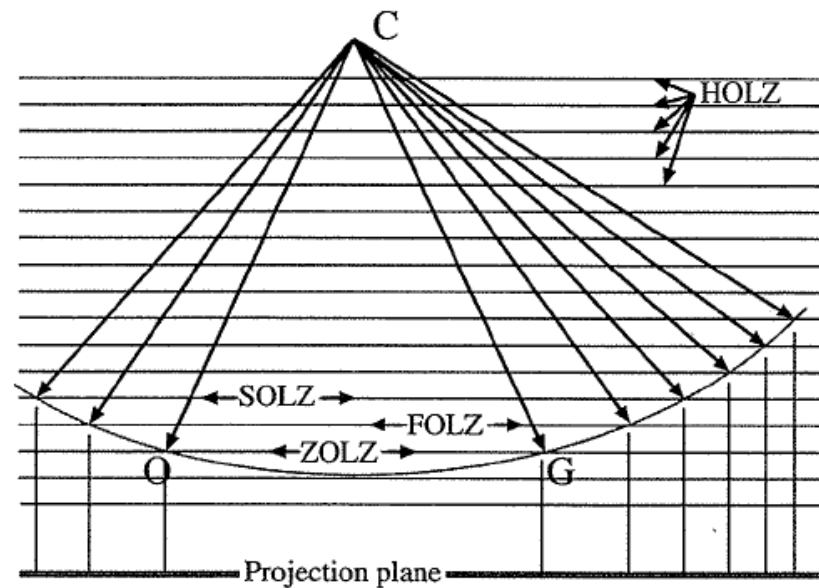
$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{a} = h$$

$$n d_{nh, nk, n\ell} = d_{hkl}$$

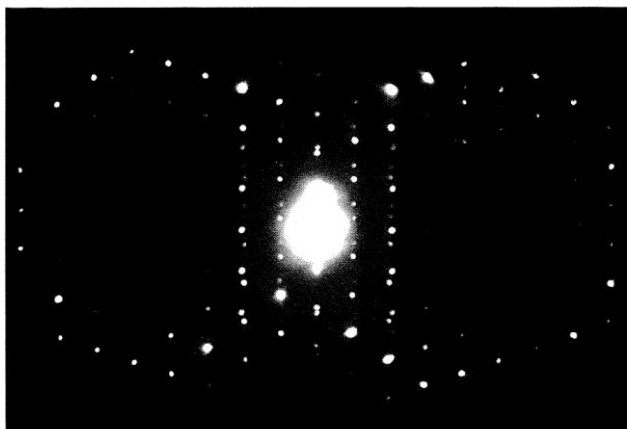
$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{b} = k$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{c} = \ell$$

Взаимосвязь параметров элементарной ячейки и межплоскостных расстояний с индексами Миллера

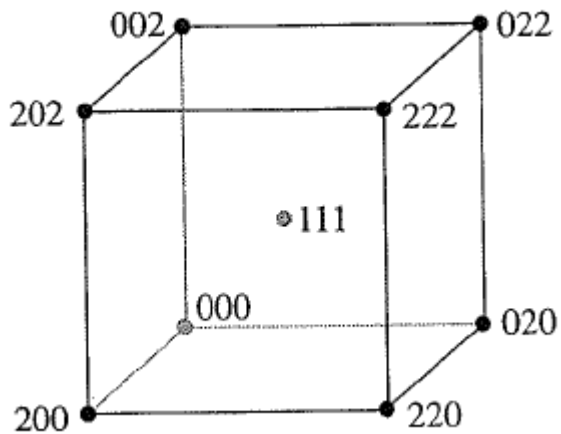


Выполнение условий возникновения дифракционной картины

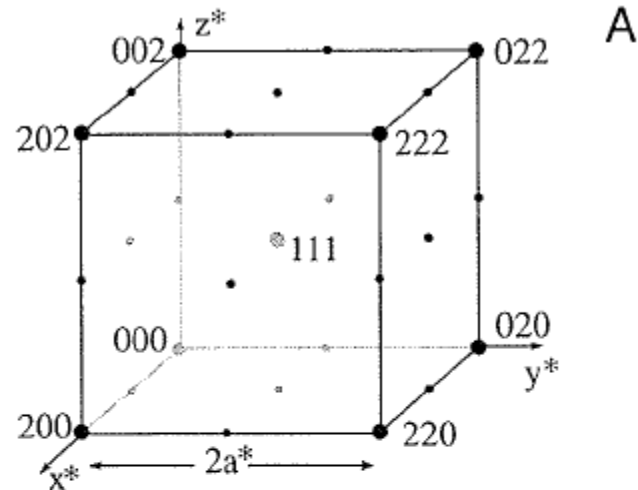


Дифракция с двойника  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , появление рефлексов первого порядка на картине дифракции

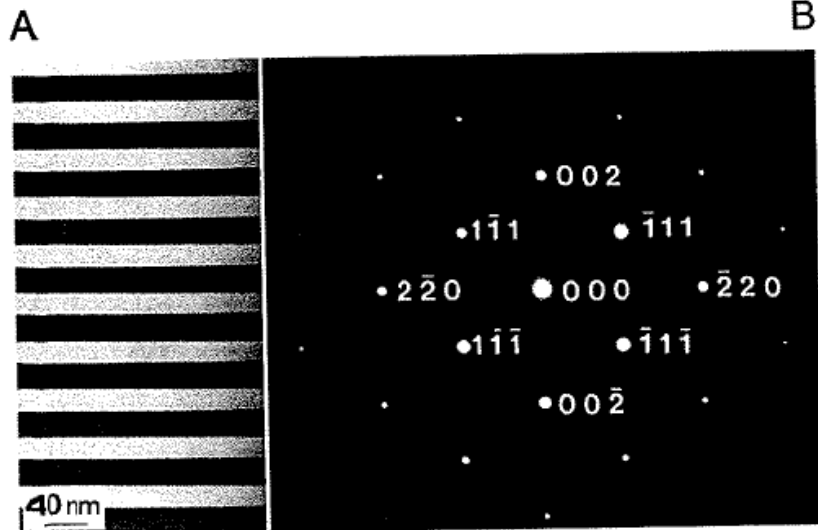
# Пример дифракции с кристалла



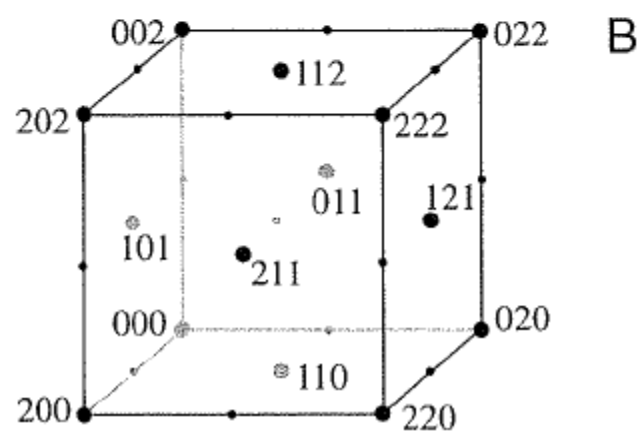
Представление обратной ячейки без центрировки



- Fundamental reflection
- Superlattice reflection



Изображение обратной ячейки на экране микроскопа



Представление обратной ячейки с центрировкой

