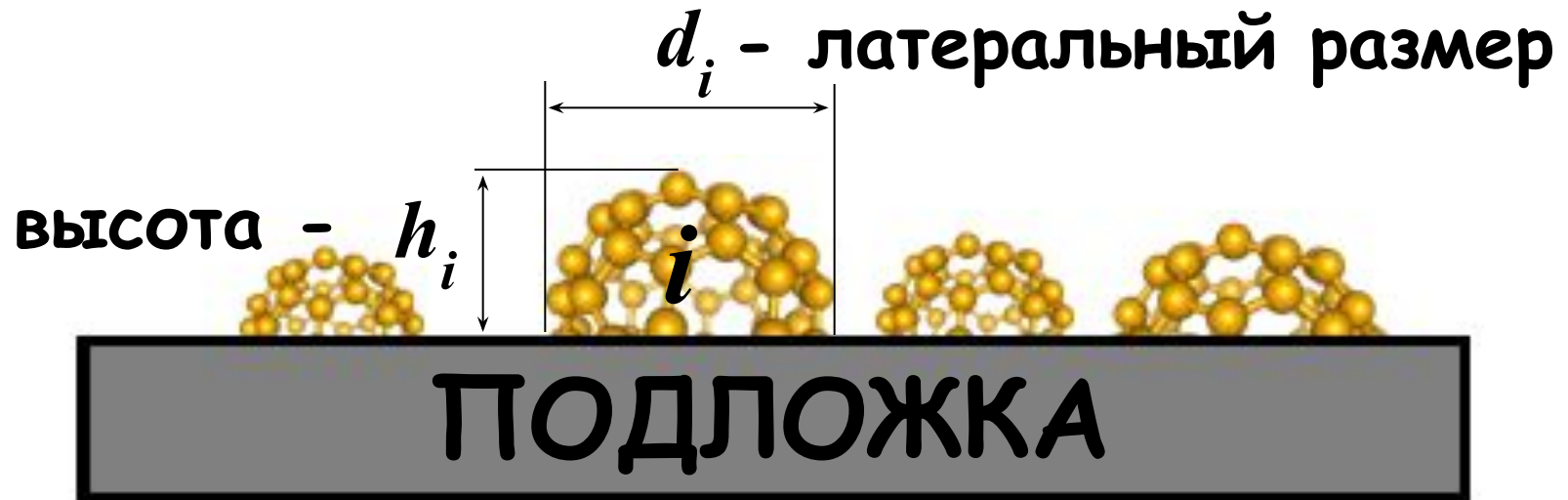


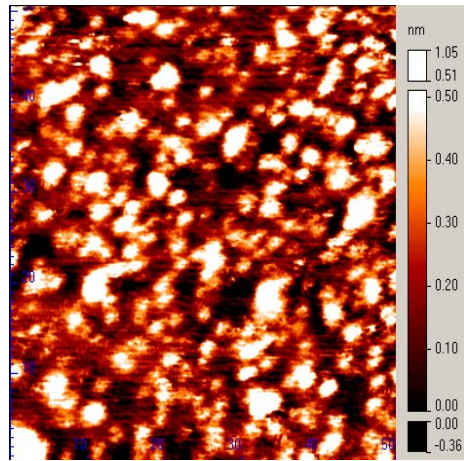
Лекция 7 Методика определения среднего размера ансамбля нанокластеров на поверхности подложки при помощи методов РФЭС, ОЭС, ОРР. Приближение двумерной и полусферической формы. Спектроскопия рассеяния медленных ионов. Определение степени покрытия поверхности. Определение режимов роста тонких пленок (островковый или послойный рост).



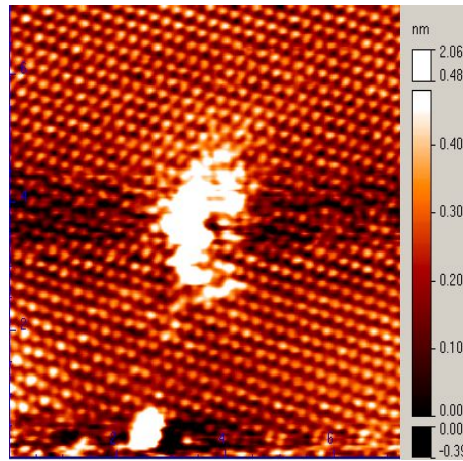
$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad \langle h \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N}$$

**$N$  - количество кластеров на ед. площади**

# СТМ и ПЭМ изображения нанокластеров Au



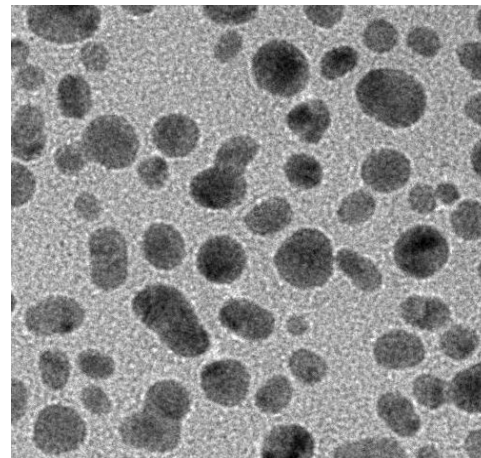
50×50 нм<sup>2</sup>



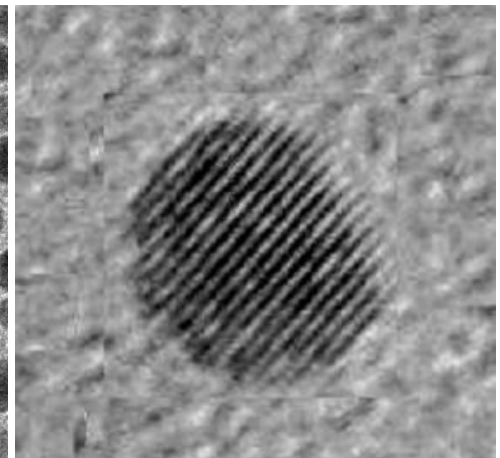
7×7 нм<sup>2</sup>

Нанокластеры Au/VOТГ

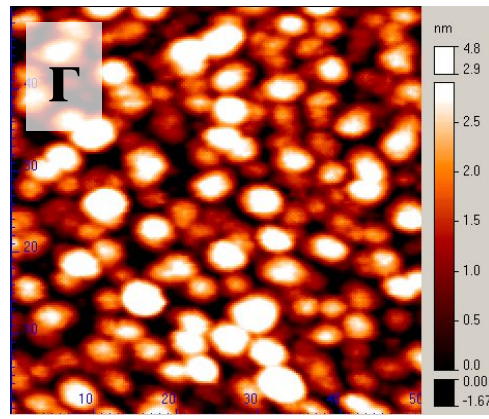
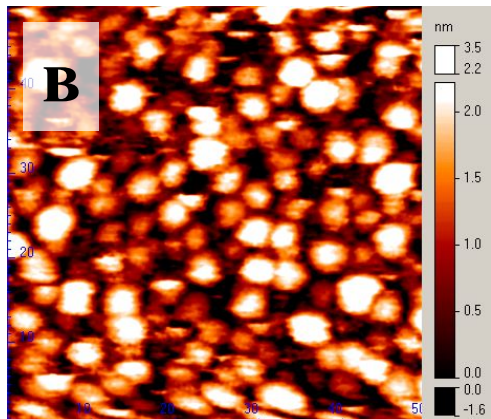
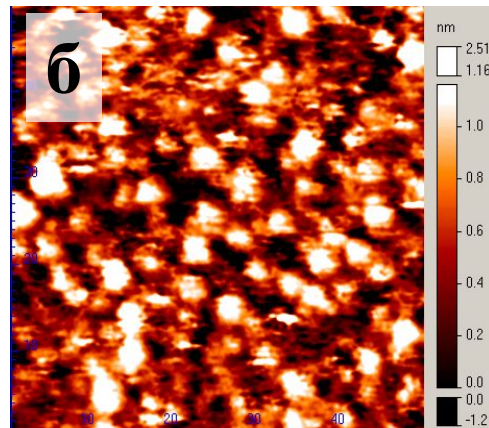
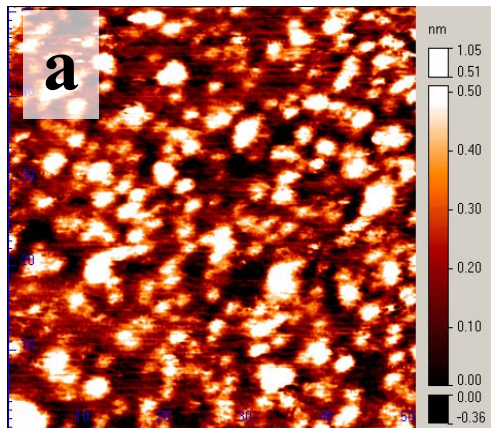
Нанокластеры Au/SiO<sub>2</sub>



50×50 нм<sup>2</sup>

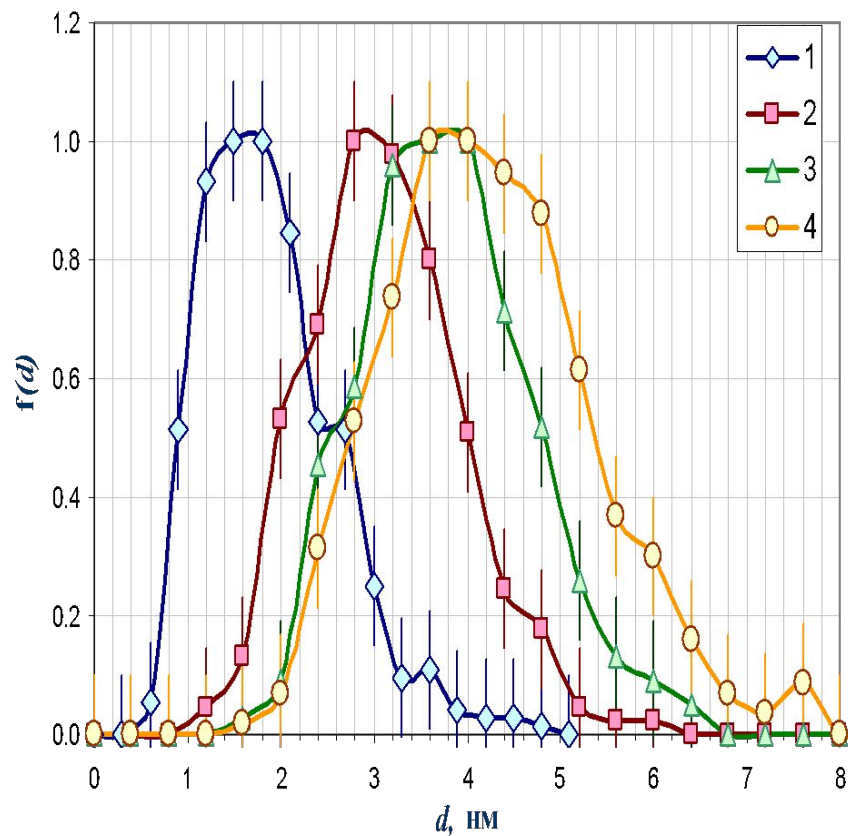


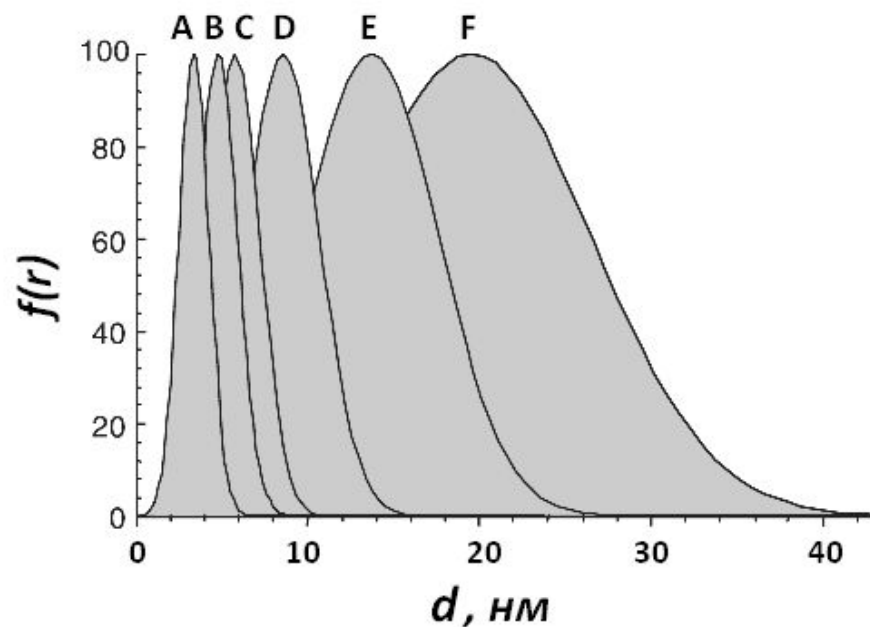
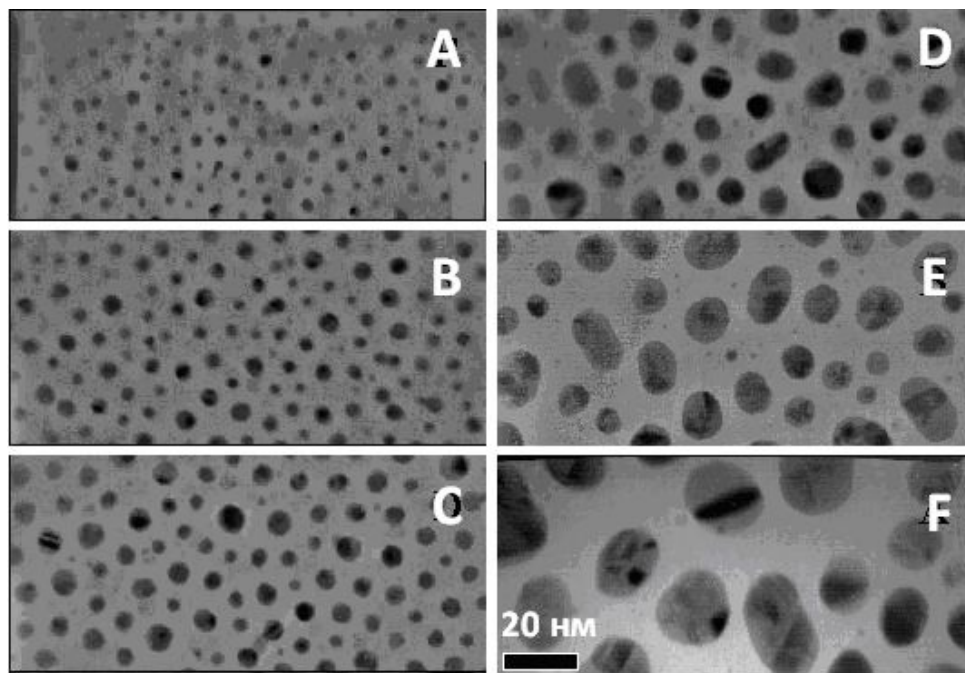
7×7 нм<sup>2</sup>



СТМ-изображения нанокластеров Au/VOPG, сформированных методом ИЛО за  $N=10$  (а), 100 (б), 200 (в) и 400 (г) импульсов осаждения. Размер изображений  $50 \times 50$  нм.

Распределения по диаметрам нанокластеров Au/VOPG, полученных ИЛО за  $N=10$  (1),  $N=100$  (2),  $N=200$  (3),  $N=400$  (4) импульсов при концентрации осажденного вещества  $C=0.9 \div 25.5$  ат.%, построенные по результатам обработки СТМ изображений, нормированные на наиболее вероятное значение диаметра нанокластера  $d_{\max}$ .

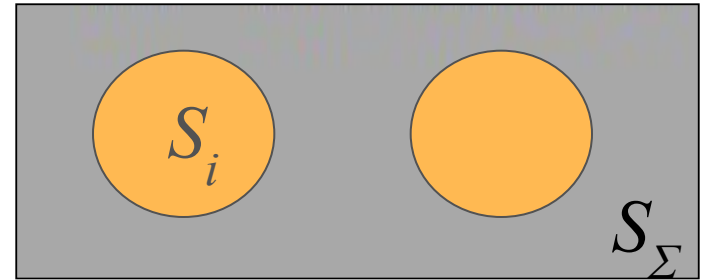




ТЭМ изображения нанокластеров Au, полученных магнетронным напылением на поверхность углеродной пленки и полученные из них распределения кластеров по размерам [D. Dalacu, E.V. Klemberg-Sapieha, L. Martinu // Surf. Sci. 472 (2001) 33]

Что делать, если изображений нанокластеров нет?

## Приближение двумерной формы



$$h_{эфф} = \theta h$$

степень покрытия  
поверхности

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{S_{\Sigma}}$$

суммарная площадь  
кластеров

общая площадь  
поверхности

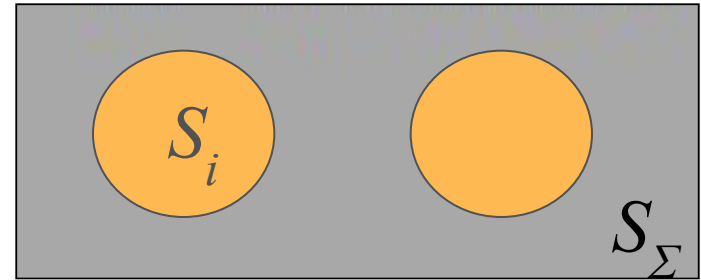
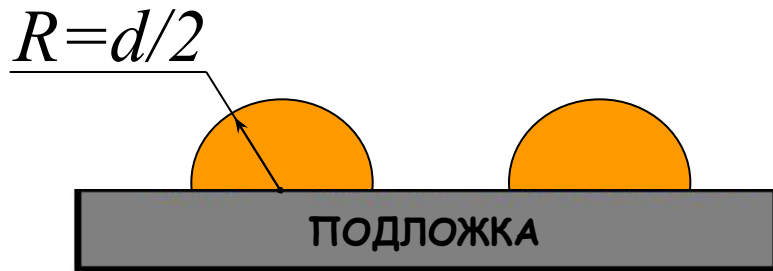
Интенсивность рассеянных

- Электронов
- Ионов
- Фотоэлектронов

$$\frac{I_{кл}(h)}{I_{кл}(h \rightarrow \infty)} = \theta \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{\lambda_{кл}}\right) \right]$$

$$\frac{I_{подл}(h)}{I_{подл}(h = 0)} = 1 - \theta \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{\lambda_{подл}}\right) \right]$$

## Приближение полусферической формы



степень покрытия  
поверхности

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{S_\Sigma}$$

суммарная площадь  
кластеров

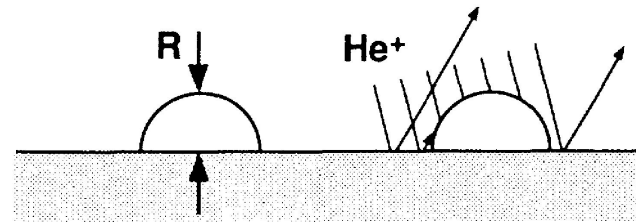
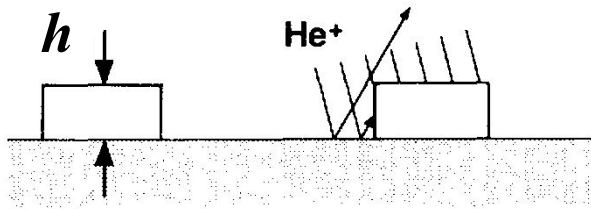
общая площадь  
поверхности

$$\frac{I_{\text{кл}}(R)}{I_{\text{кл}}(R \rightarrow \infty)} = \theta \left[ 1 - 2 \left( \frac{\lambda_{\text{кл}}}{R} \right)^2 \left[ 1 - \left( 1 + \frac{R}{\lambda_{\text{кл}}} \right) \exp \left( -\frac{R}{\lambda_{\text{кл}}} \right) \right] \right]$$

$$\frac{I_{\text{подл}}(R)}{I_{\text{подл}}(R=0)} = 1 - \theta \left[ 1 - 2 \left( \frac{\lambda_{\text{подл}}}{R} \right)^2 \left[ 1 - \left( 1 + \frac{R}{\lambda_{\text{подл}}} \right) \exp \left( -\frac{R}{\lambda_{\text{подл}}} \right) \right] \right]$$

Приближения:

- Ансамбль монодисперсных частиц, то есть полагается, что все частицы абсолютно одинакового размера
- Не учитывается эффект затенения



- Не учитывается зависимость длины свободного пробега электрона (иона) от размера кластеров
- Необходимость в дополнительном измерении одного из параметров  $d$  (и/или  $h$ ) и  $\theta$

$$h_{\text{эфф}} = \theta h \quad \text{Определяется через ОРР}$$

# Спектроскопия рассеяния медленных ионов.

## Классификация методов рассеяния ионов:

- СРМИ (LEIS),  $E=0,1 - 10$  кэВ;
- СРСИ (MEIS)
- СРБИ (HEIS),  $E=0,01 - 2$  МэВ;
- ОРР (RBS),  $E > 2$  МэВ

## Получаемая информация:

- 1) Элементный состав поверхности образца (положение линий);
- 2) Относительная концентрация поверхностных атомов (интенсивность линий);
- 3) Структура поверхностной решетки (угловые зависимости);
- 4) Химическое состояние поверхностных атомов (тонкая структура, иногда).

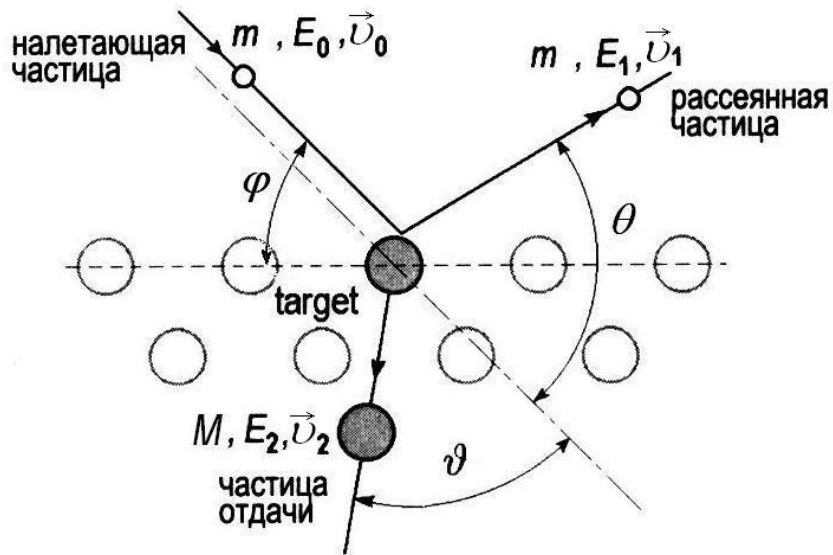
Особенности метода СРМИ: Глубина зондирования один-два атомных слоя поверхности, вследствие:

- 1) ослабления интенсивности ионного пучка по мере его проникновения вглубь образца вследствие большого сечения рассеяния;
- 2) увеличения вероятности нейтрализации ионов, рассеянных на глубоких поверхностных слоях.

Историческая справка. Первое применение РМИ для исследования поверхности (1967).



# СРМИ. Кинематический фактор.



$$E_1 = kE_0$$

$$k = \frac{1}{(1 + \mu)^2} \left[ \cos \theta \pm (\mu^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right]^2$$

$$\mu = M / m$$

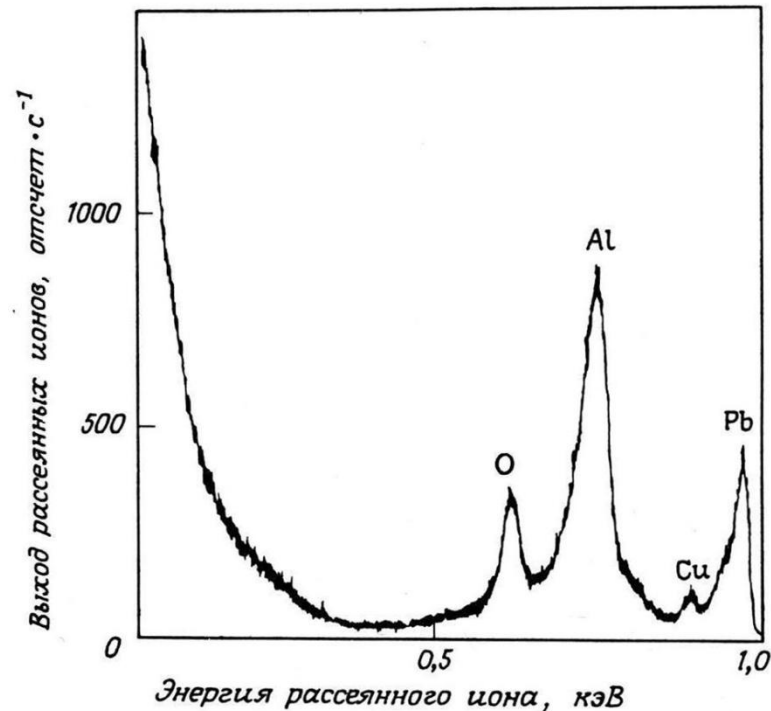
знак «+» при рассеянии на тяжелом атоме,  
знак «-» при рассеянии на легком атоме

**Учет неупругих потерь энергии – фактор Q:**

$$k = \frac{1}{(1 + \mu)^2} \left[ \cos \theta \pm \left( \mu^2 - \sin^2 \theta - \mu(1 + \mu) \frac{Q}{E_0} \right)^{1/2} \right]^2$$

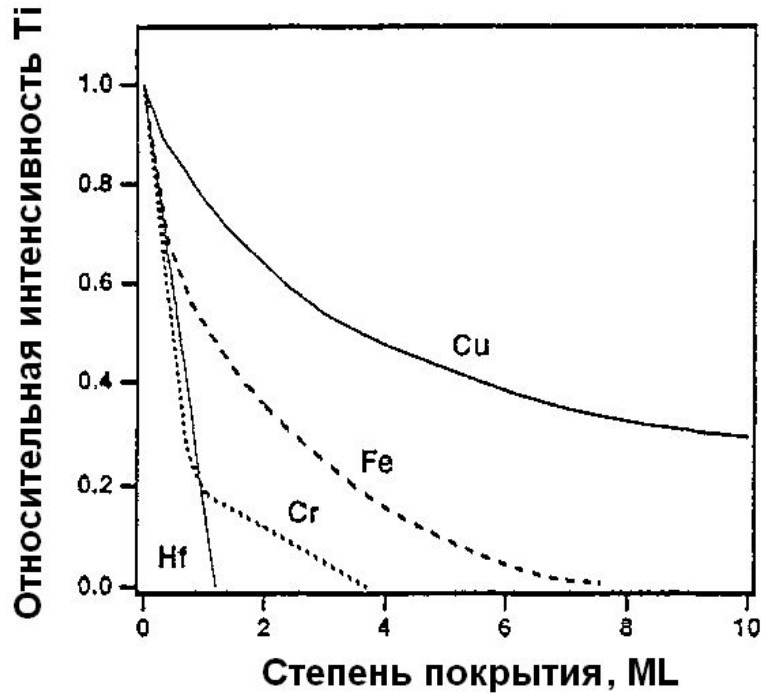
$$I = I_0 N \frac{d\sigma}{d\Omega} \Omega_0 P_i$$

**Сечение рассеяния** определяется потенциалом взаимодействия иона и атома-рассеивателя



# Применение метода СРМИ для определения степени покрытия поверхности

$$\theta = I(\theta) / I^{\infty}$$



островковый рост (механизм Фолмера-Вебера)



послойно-островковый рост (механизм Франка - Ван-дер-Мерве)



послойный рост (механизм Странского-Крастанова)



$\text{TiO}_2(110)$