

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**Научно-образовательный центр по нанотехнологиям**

межфакультетский курс лекций

# **«Фундаментальные основы нанотехнологий»**

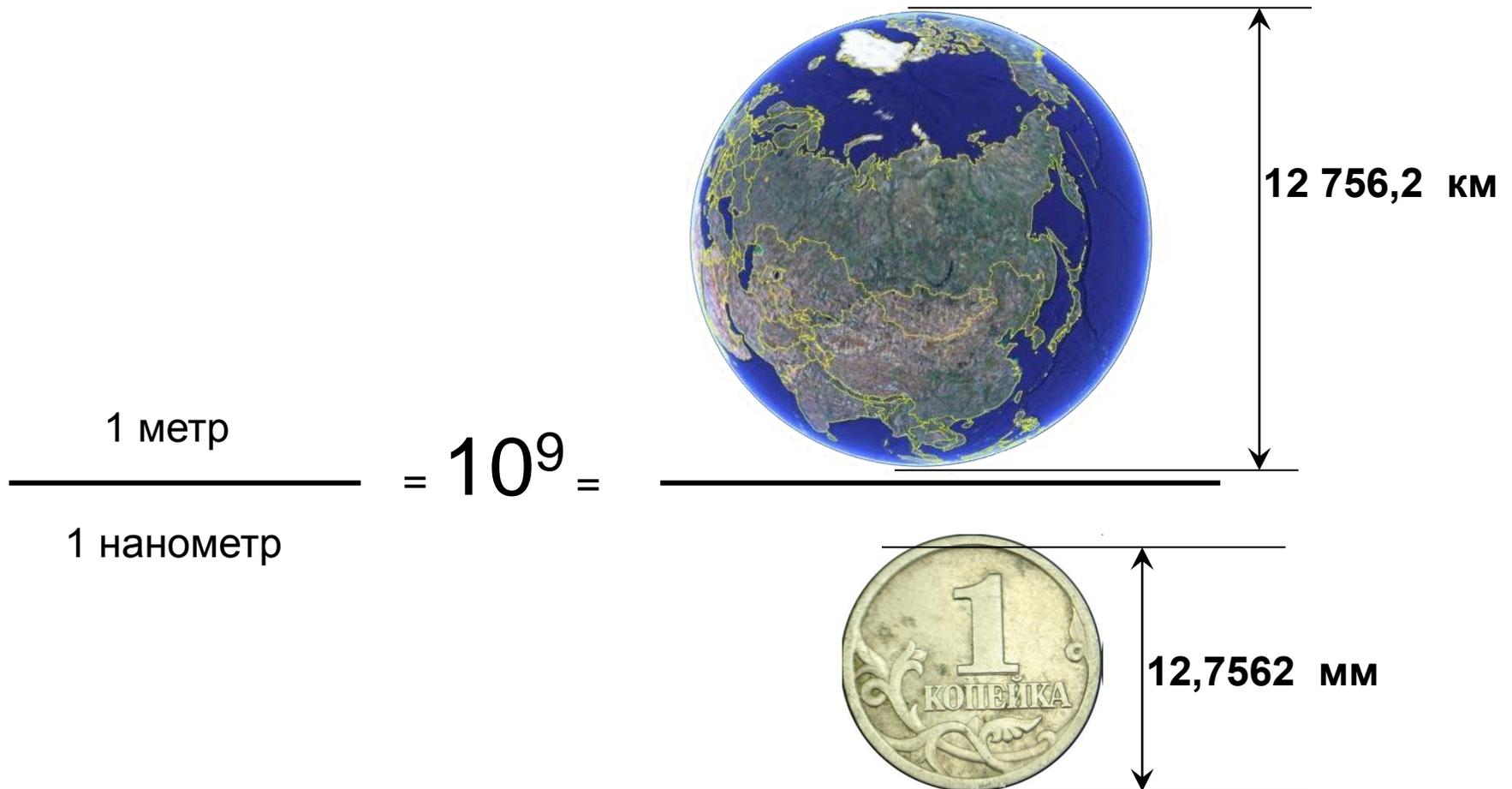
**Лекция 2**: Методы исследования и диагностика нанообъектов и наносистем.

**Образцов Александр Николаевич**

профессор, Физический факультет МГУ

«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними - к нанотехнологиям.»

Ж.И. Алферов. «Микросистемная техника» №8, 2003, стр. 3 – 13



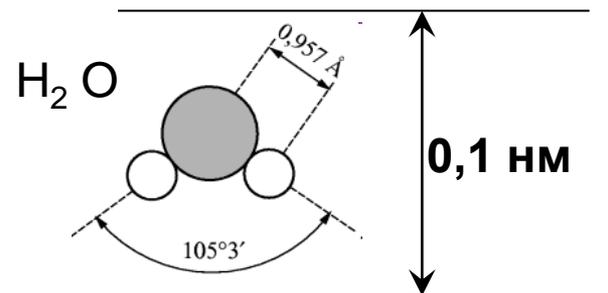
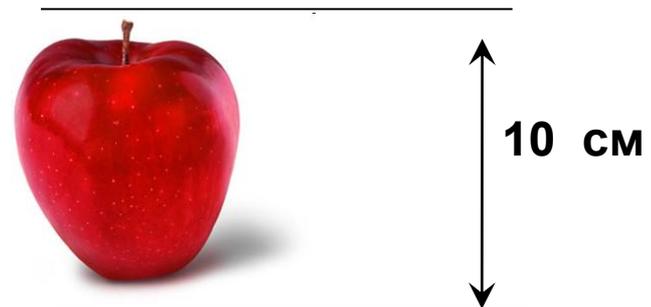
«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними - к нанотехнологиям.»

Ж.И. Алферов. «Микросистемная техника» №8, 2003, стр. 3 – 13

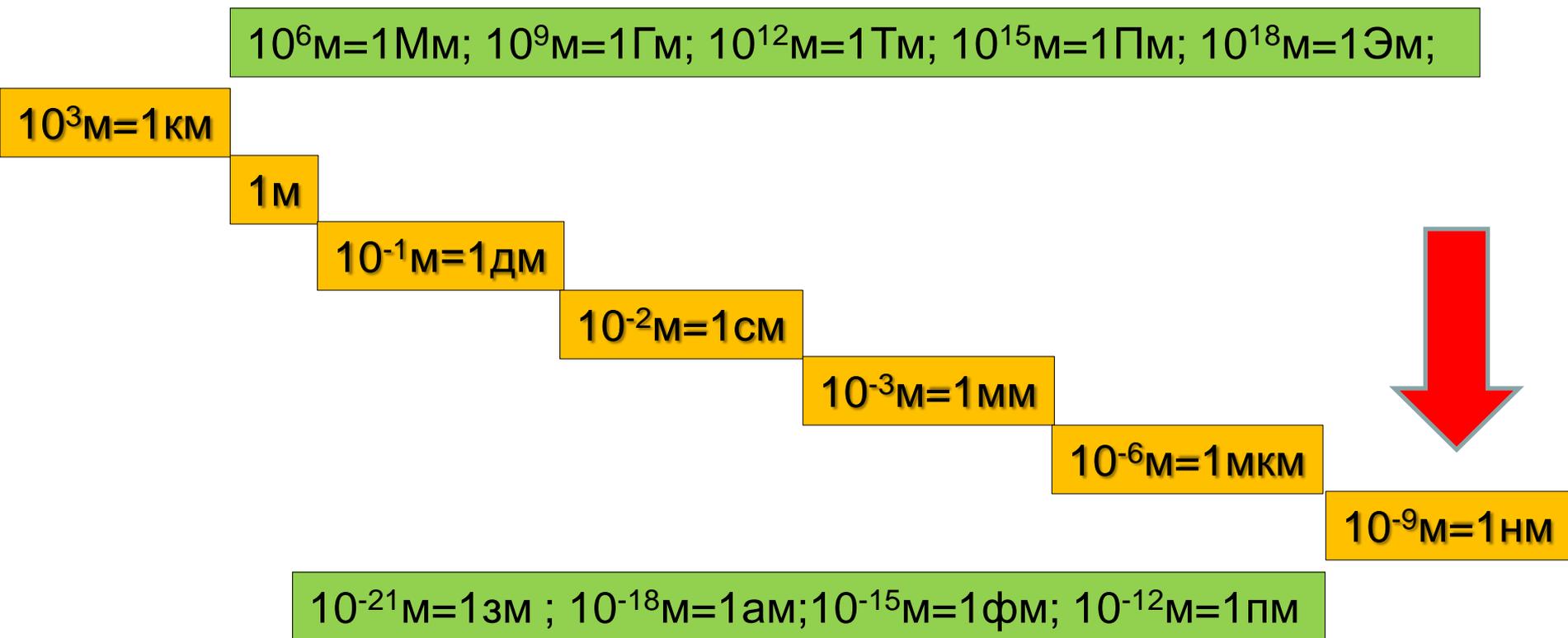
Линейный размер структурных единиц наноматериалов изменяется в пределах примерно от 1 до 1000 атомных (молекулярных) слоев.

Объем – от  $10^6$  до  $10^9$  атомов (молекул).

$$\frac{1 \text{ метр}}{1 \text{ нанометр}} = 10^9 =$$

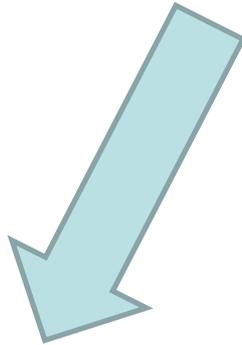


Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) отражает пространственный масштаб рассматриваемых явлений, процессов, структурированности (неоднородности) вещества.

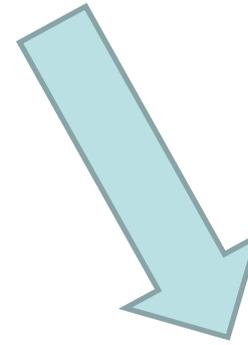


Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) подразумевает наличие качественных особенностей в закономерностях, определяющих протекание явлений и процессов и отсутствующих при других характерных масштабах.

# Методы исследования и диагностика нанообъектов и наносистем.

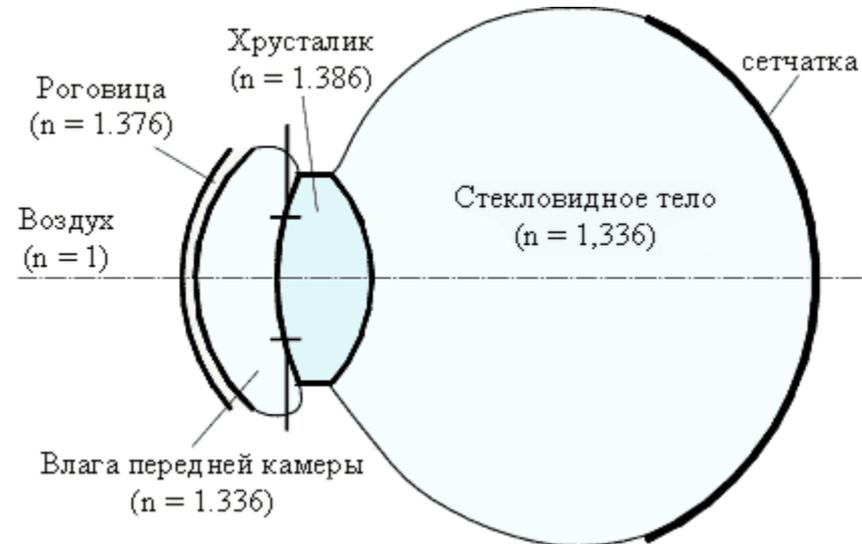
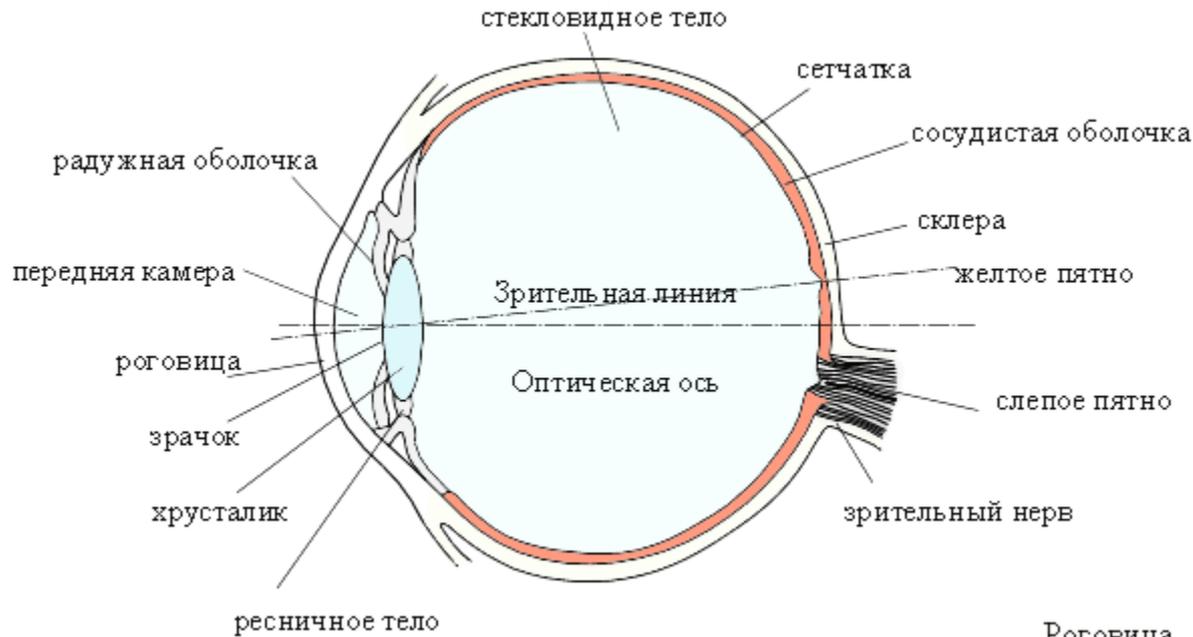


Изучение структуры материалов с нанометровым пространственным разрешением.

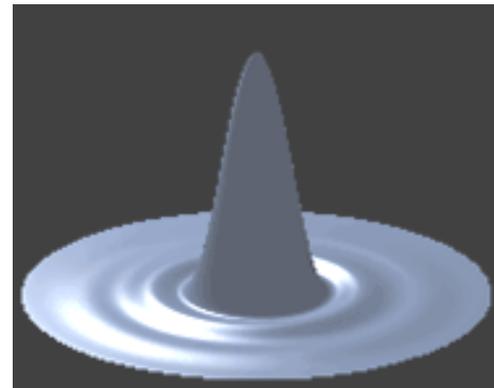
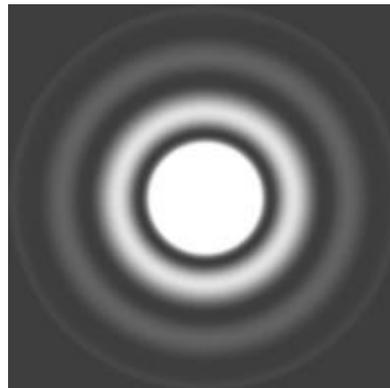
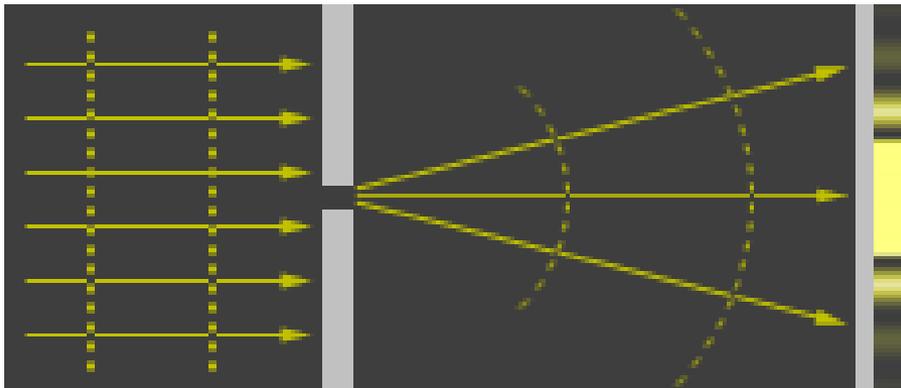


Изучение особенностей поведения и свойств наносистем, наноустройств, наноматериалов.

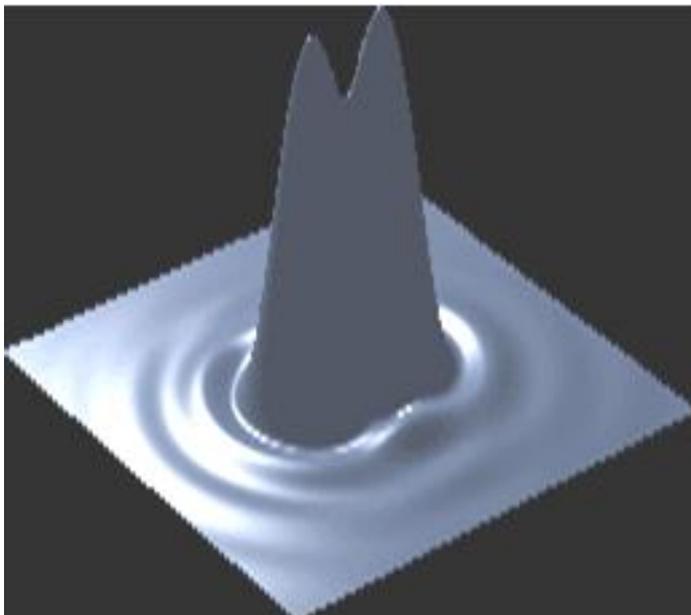
# Пространственное разрешение: понятие, критерии



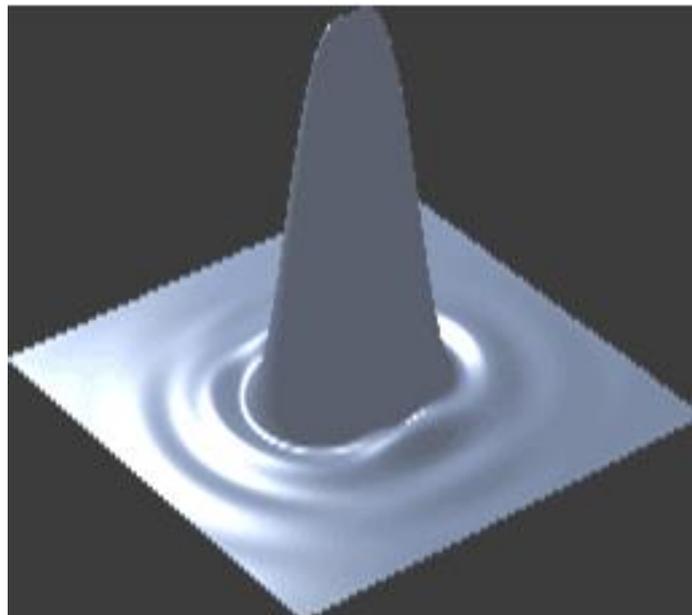
# Дифракционный предел разрешающей способности



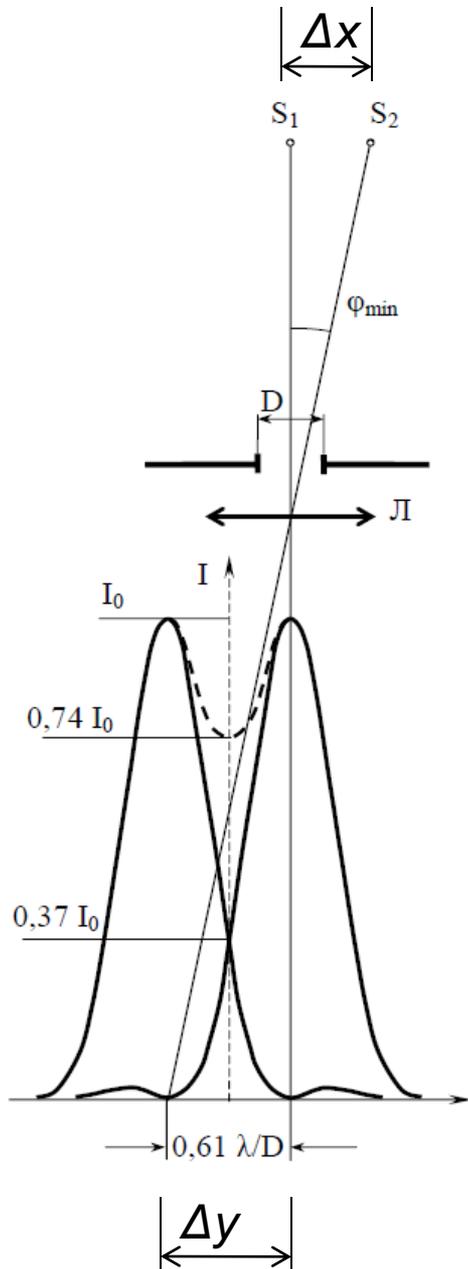
Два различных точечных источника



Точечные источники неразличимы



# Дифракционный предел разрешающей способности



$$\varphi_{\min} = \arcsin \left( 1,22 \frac{\lambda}{D} \right)$$

$$D \gg \lambda$$

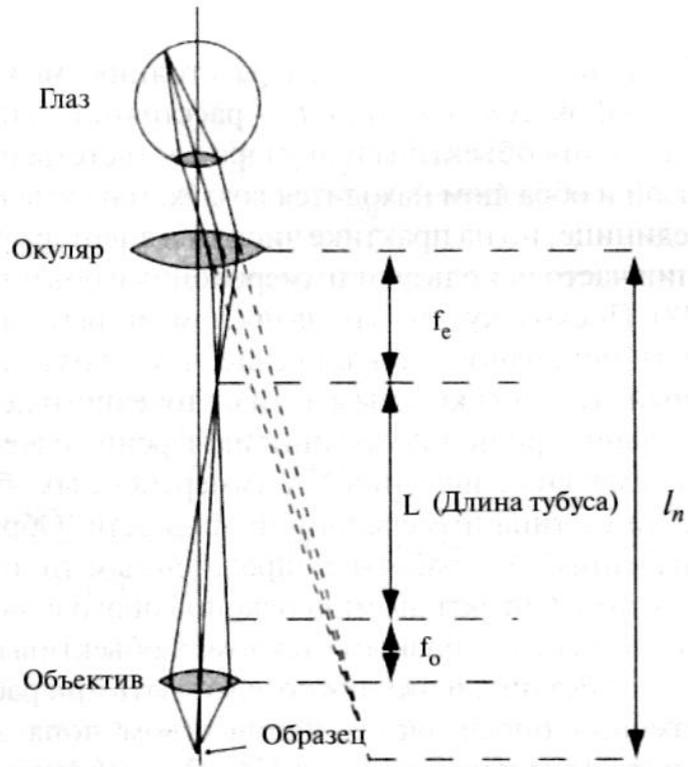
$$\varphi > 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Критерий разрешения Рэля:  $0,74I_0$

Разрешение «среднего» глаза:  $0,85I_0$

Линейное разрешение определяется увеличением:  $\Delta y = M \Delta x$

# Дифракционный предел разрешающей способности



Увеличение простейшего микроскопа:

$$M = - \frac{L l_n}{f_o f_e}$$

Минимальное разрешаемое расстояние:

$$d_{\min} = k \frac{\lambda}{NA}$$

Фактор  $k \sim 0,55 \dots 0,8$

Числовая апертура  $NA = n \sin \alpha$

$\alpha \sim 70^\circ$  ( $\sin \alpha \sim 0,94$ )

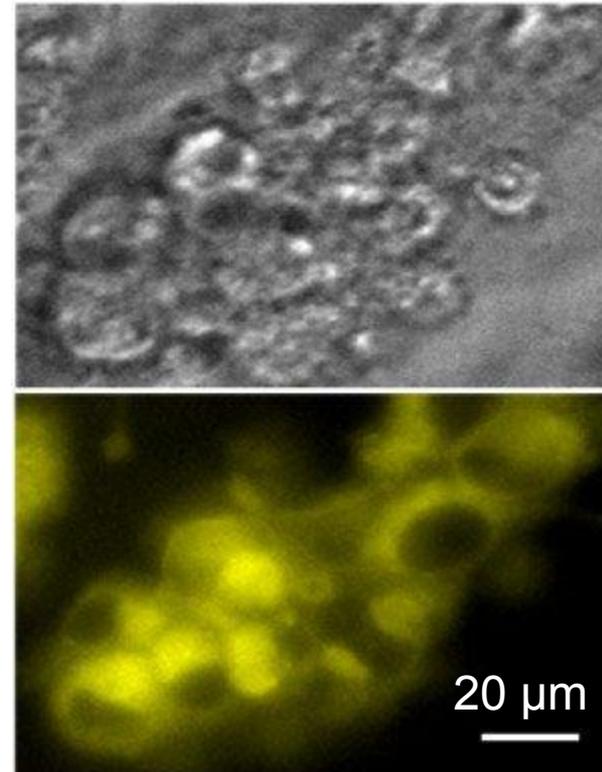
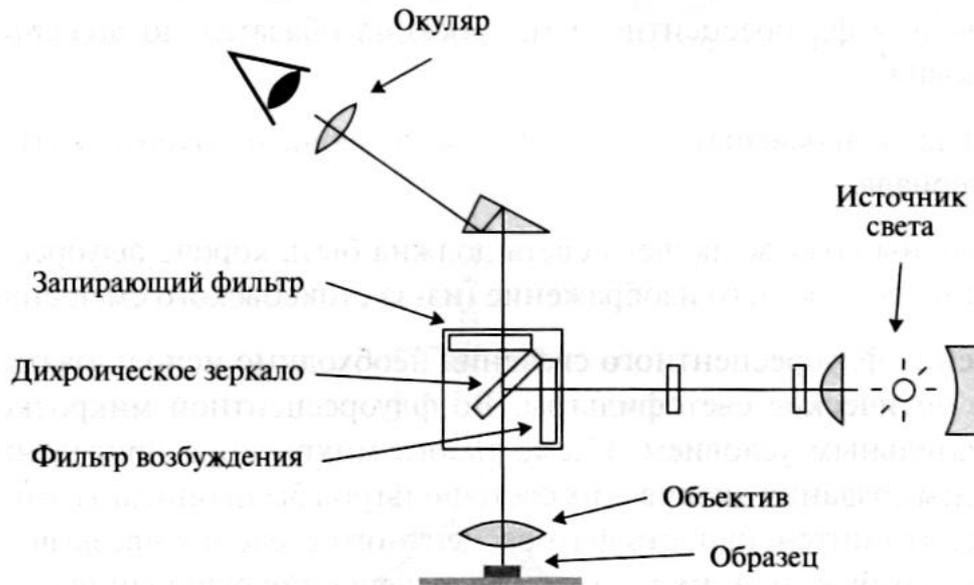
$n \sim 1,56$

$\lambda \sim 450 \text{ nm}$

$$d_{\min} \sim 200 \text{ nm}$$

# Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

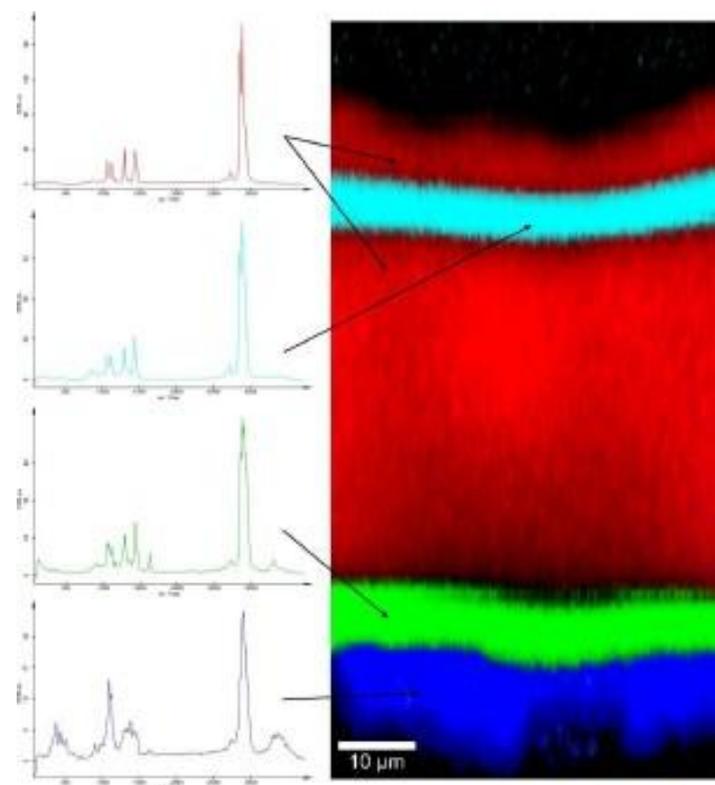
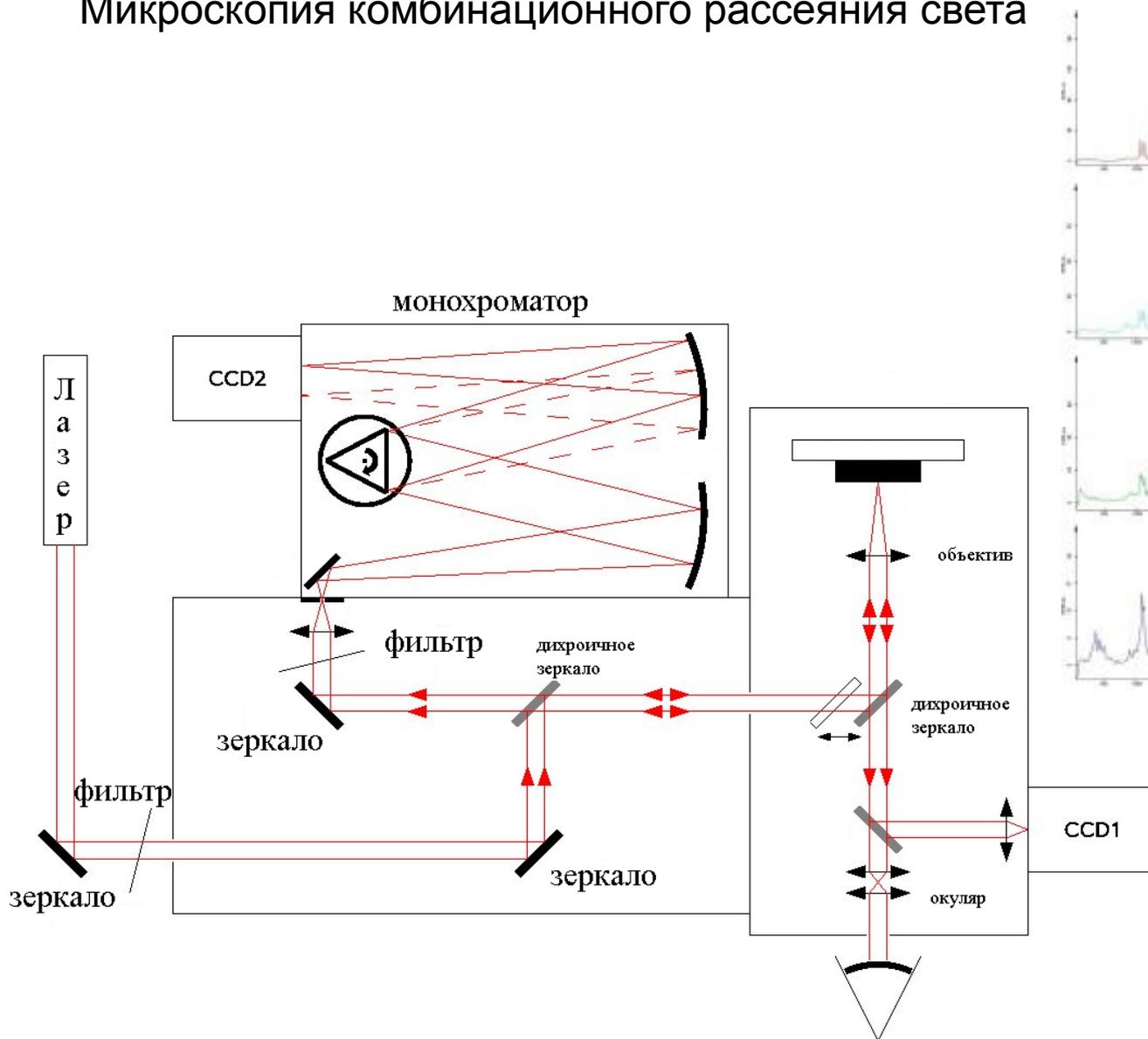
## Флуоресцентная микроскопия



Изображение клеток в обычном и флуоресцентном микроскоп (после насыщения люминесцирующим составом). J. American Chemical Society 131, 10077–10082 (2009)

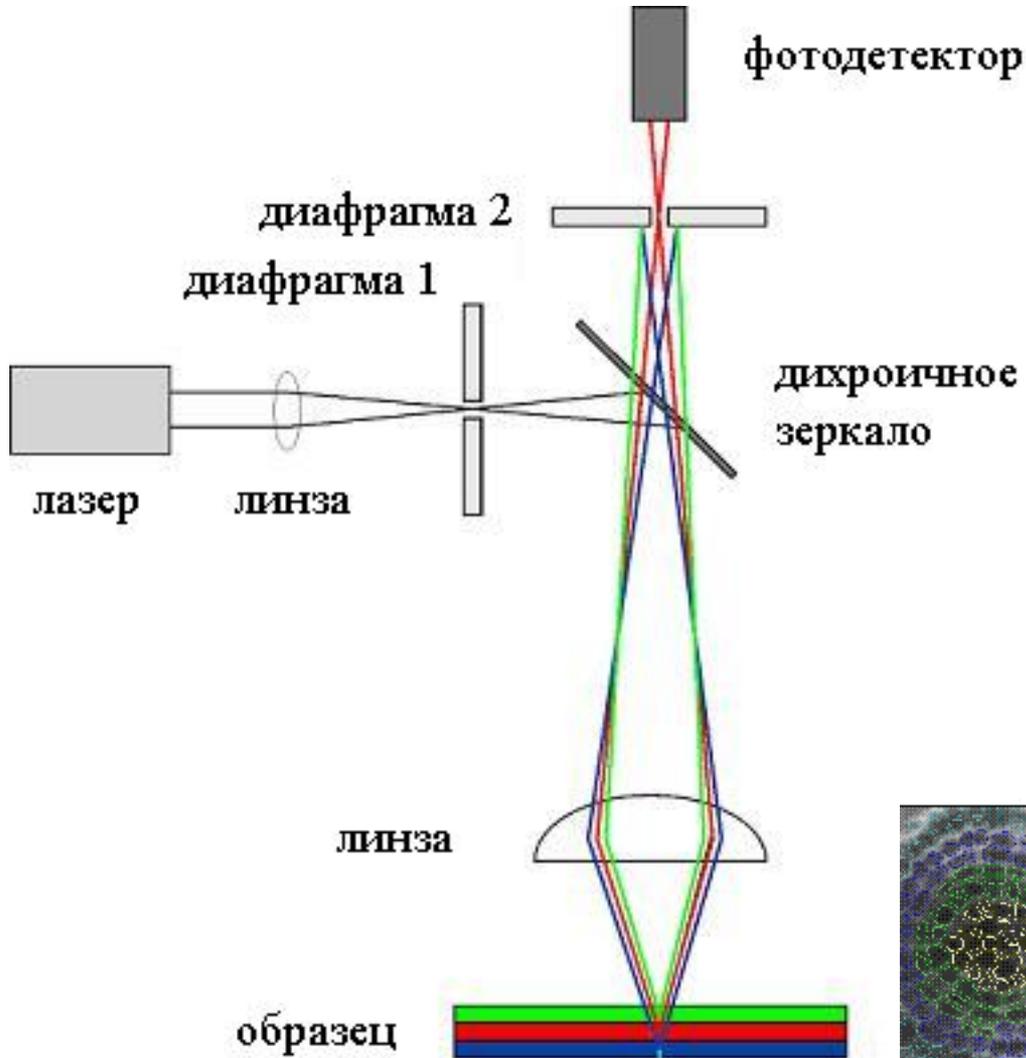
# Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

## Микроскопия комбинационного рассеяния света

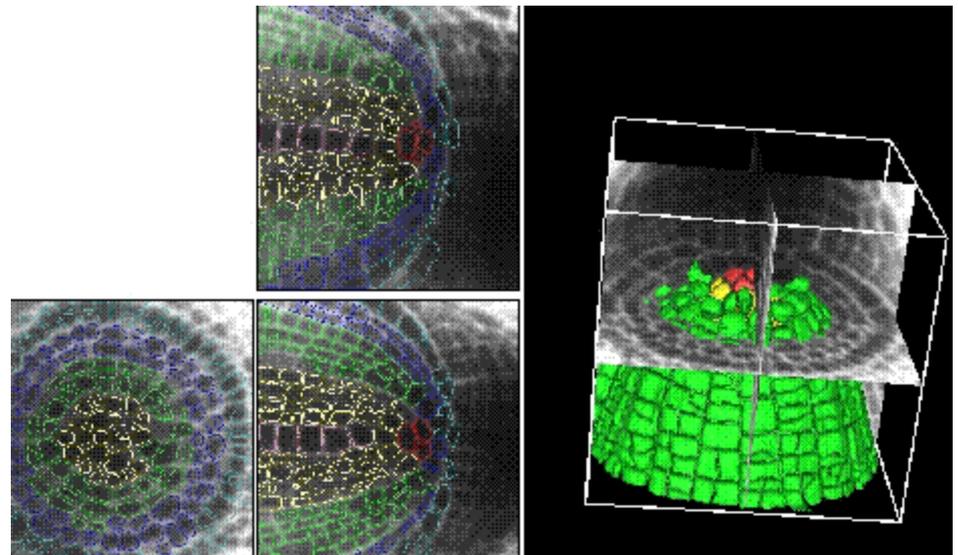


# Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

## Конфокальная микроскопия

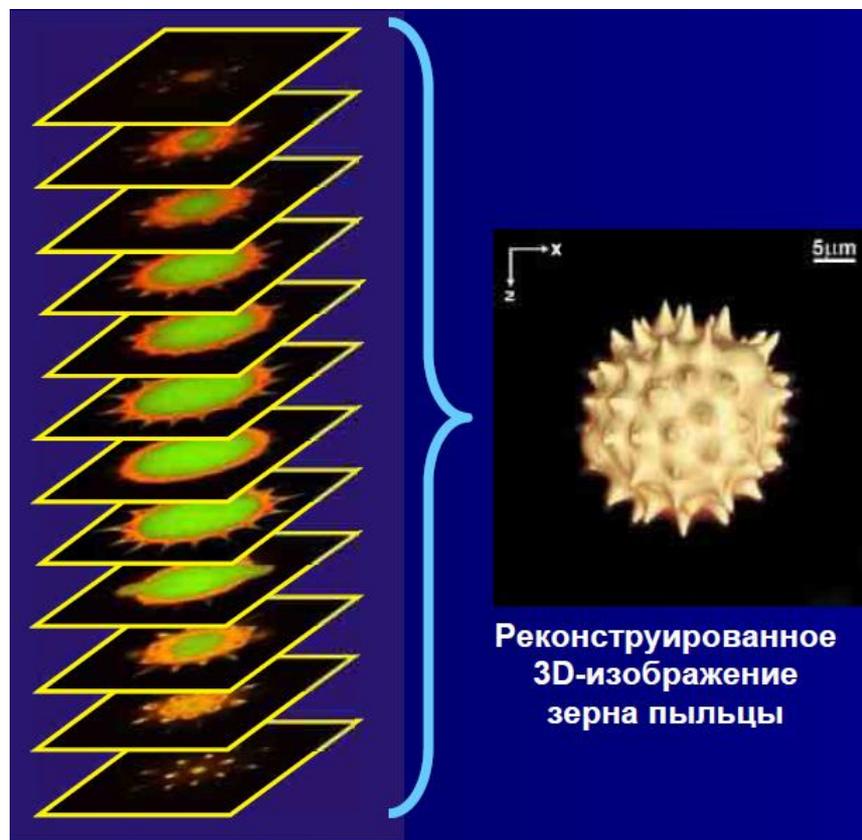
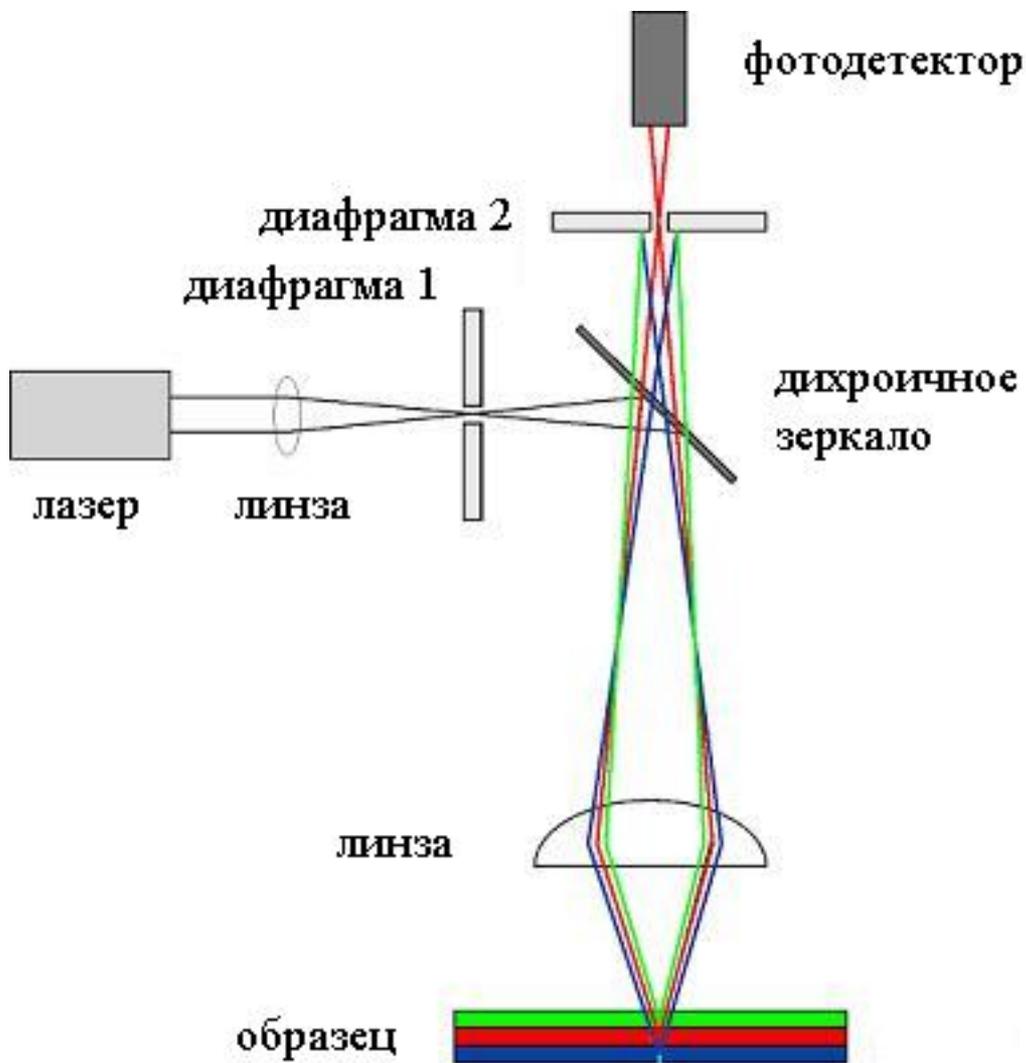


3D изображение биологической клетки, полученное с помощью конфокальной люминесцентной микроскопии.



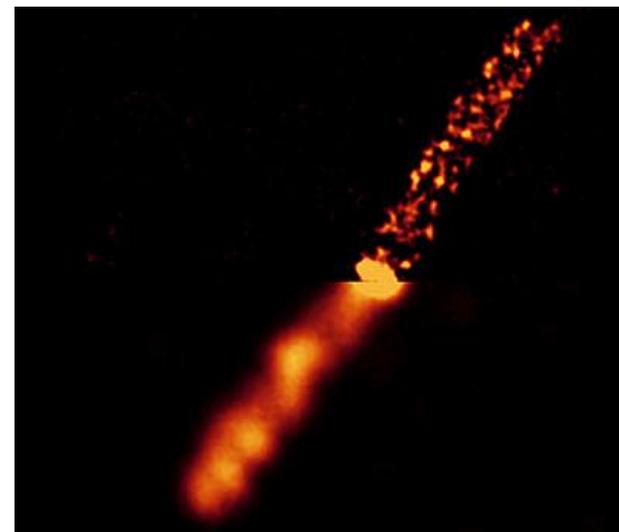
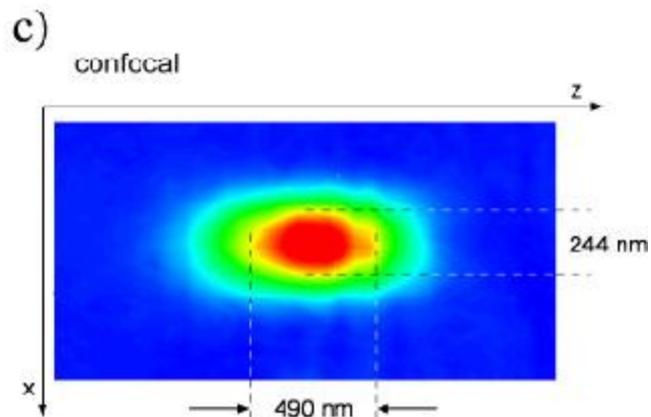
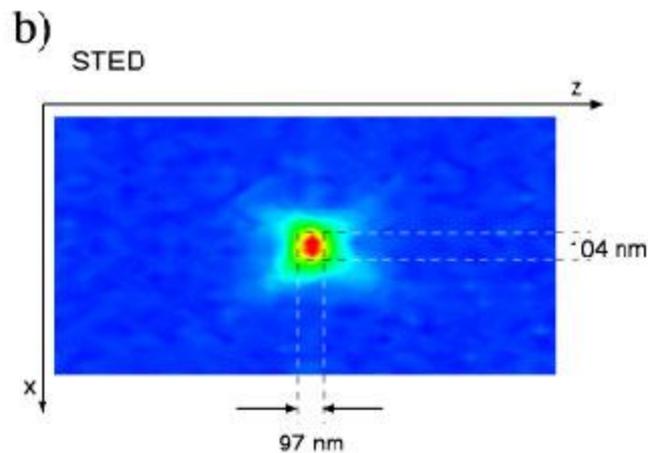
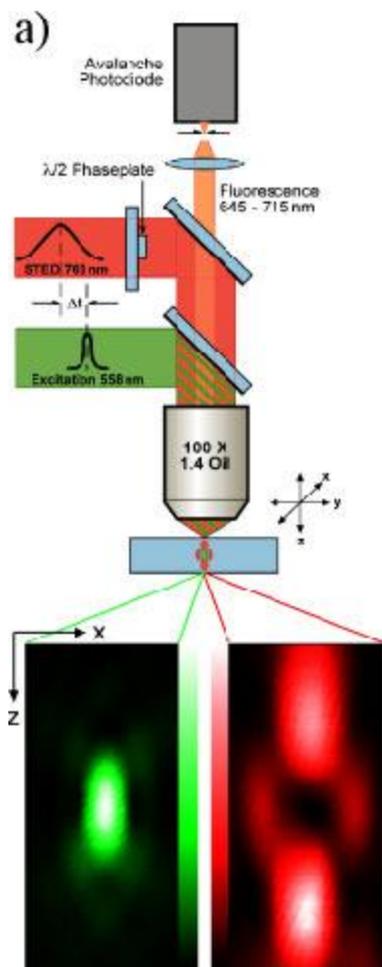
# Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

## Конфокальная микроскопия



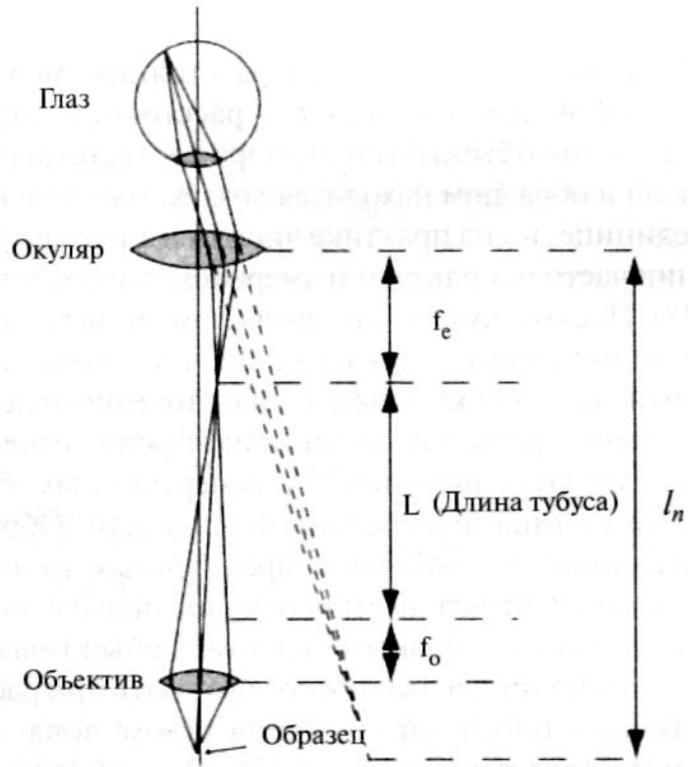
# Оптическая микроскопия для исследования нанобъектов

## Микроскопия с насыщением люминесценции (STED)



Сравнение STED и конфокальной микроскопии

# Дифракционный предел разрешающей способности



Увеличение простейшего микроскопа:

$$M = - \frac{L l_n}{f_o f_e}$$

Минимальное разрешаемое расстояние:

$$d_{\min} = k \frac{\lambda}{NA}$$

Фактор  $k \sim 0,55 \dots 0,8$

Числовая апертура  $NA = n \sin \alpha$

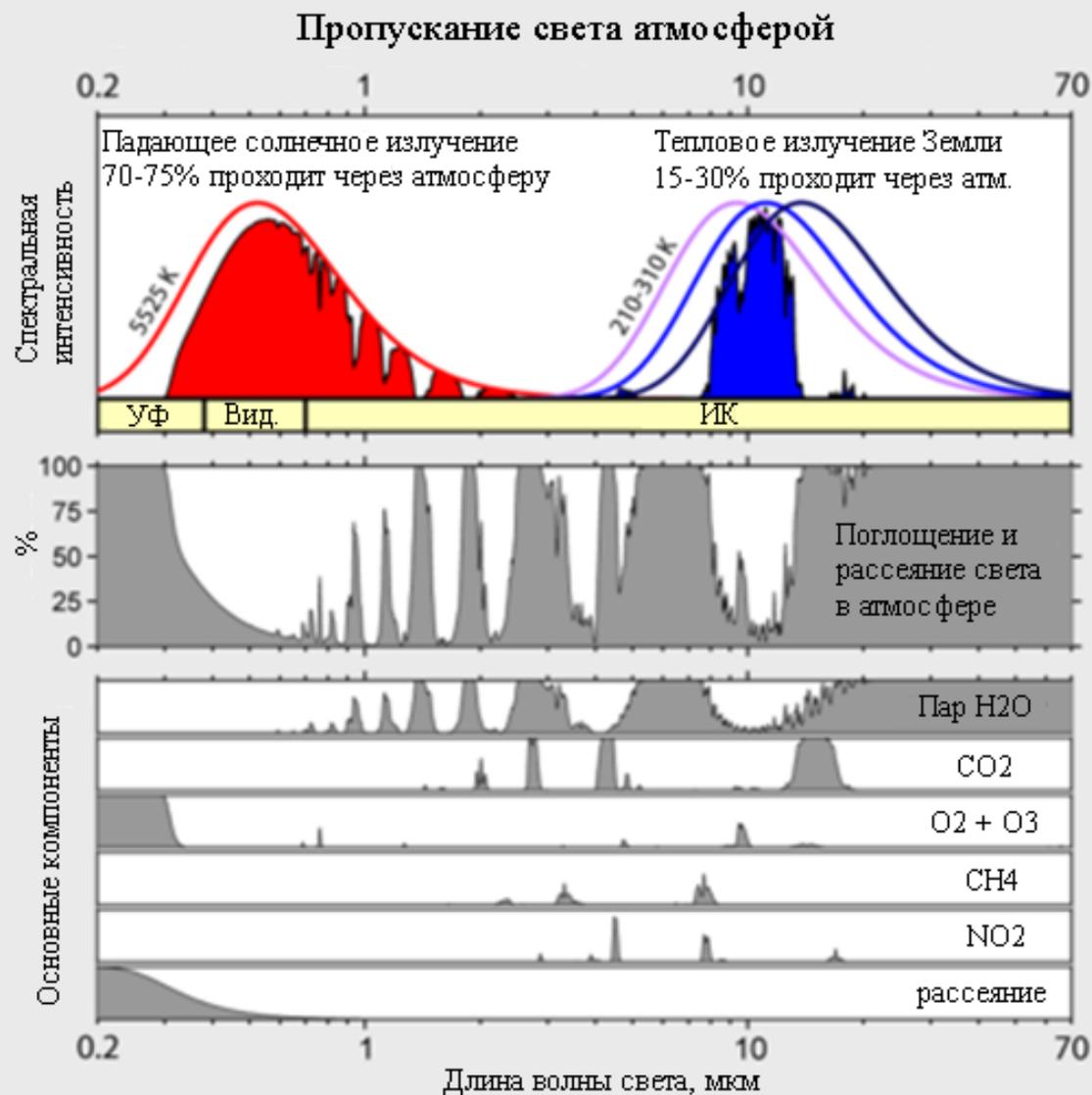
$\alpha \sim 70^\circ$  ( $\sin \alpha \sim 0,94$ )

$n \sim 1,56$

$\lambda \sim 450 \text{ nm}$

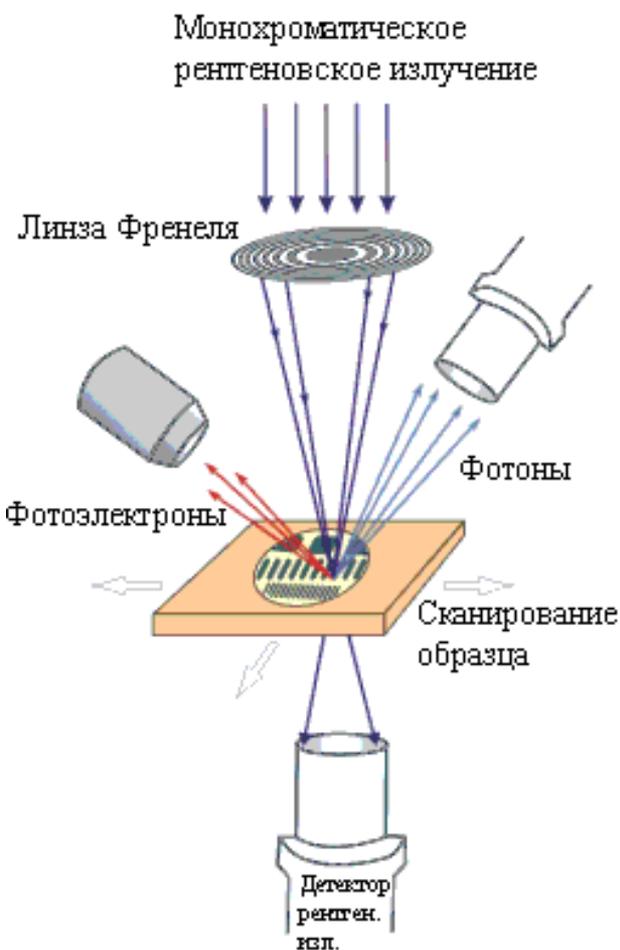
$$d_{\min} \sim 200 \text{ nm}$$

# Использование оптической микроскопии ограничено окном прозрачности атмосферы

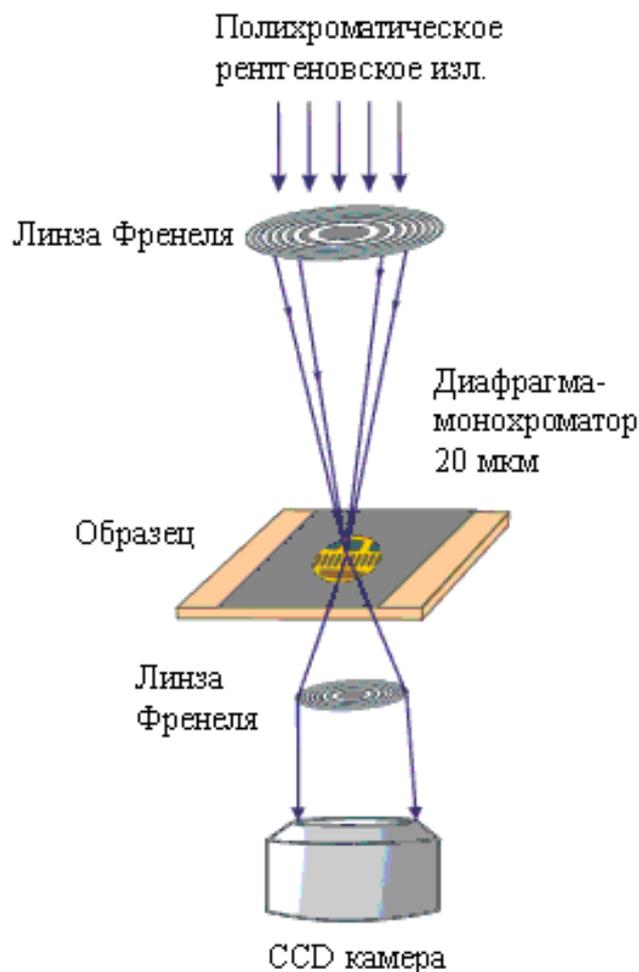


# Рентгеновская микроскопия (длина волны $\sim 0,1$ нм)

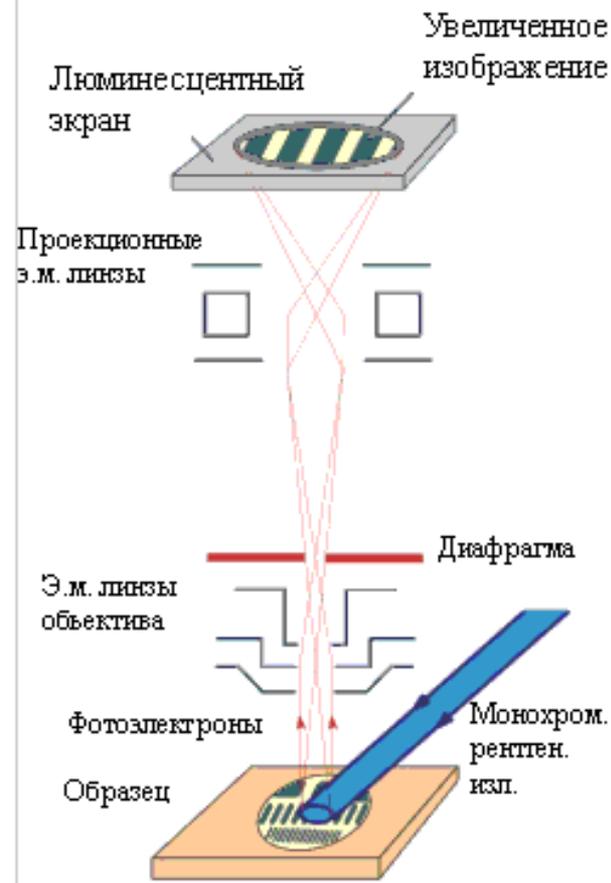
Сканирующий просвечивающий рентгеновский микроскоп



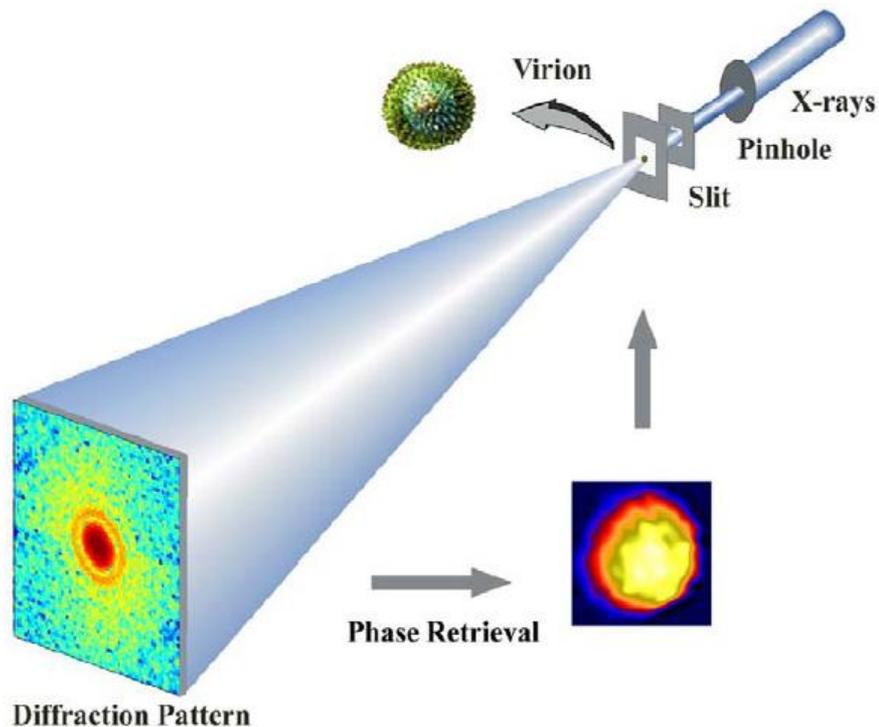
Просвечивающий рентгеновский микроскоп



Флуоресцентный рентгеновский микроскоп

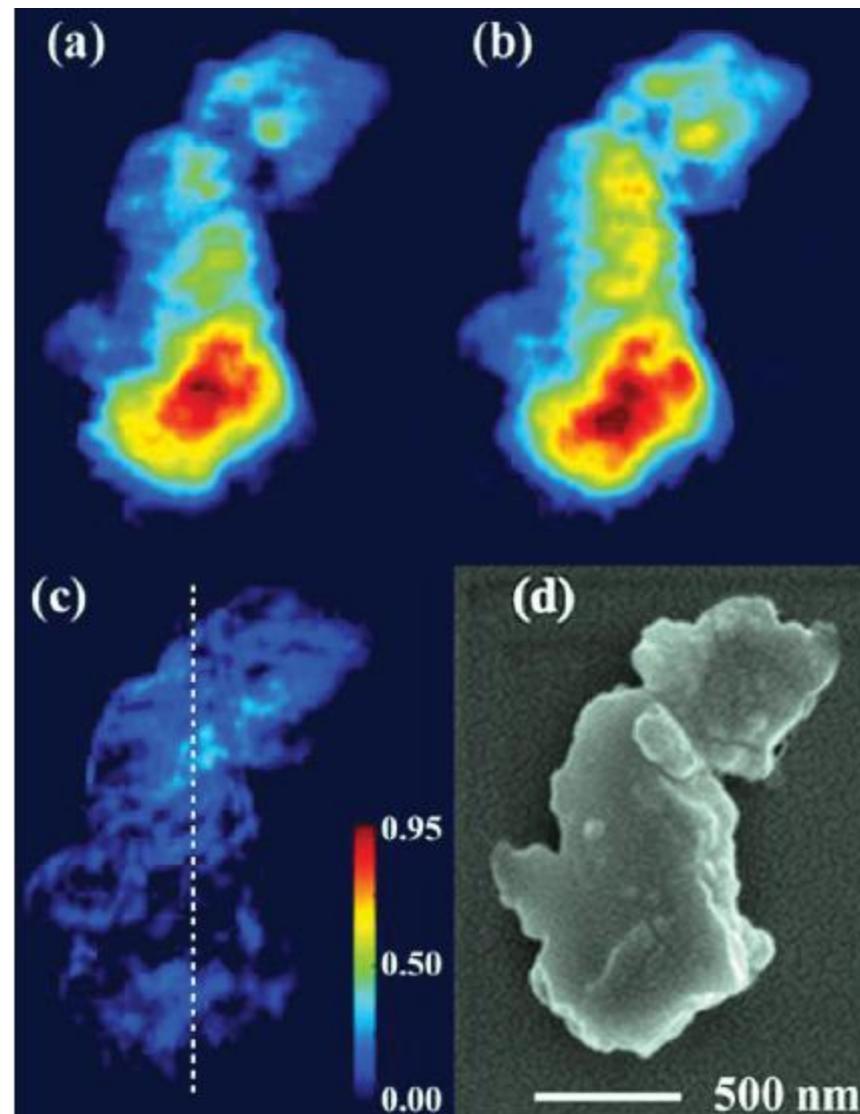


# Рентгеновская микроскопия (длина волны $\sim 0,1$ нм)



Рентгеновский снимок мышиноного  
вируса герпеса

PHYSICAL REVIEW LETTERS  
100, 025504 (2008)



Распределение висмута в  
кристалле кремния

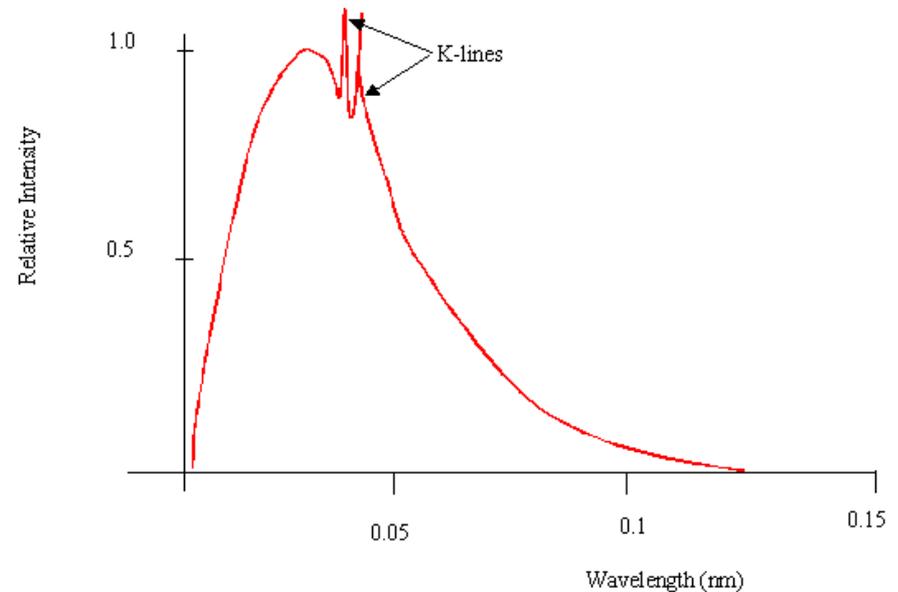
Рентгеновское излучение:  $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$ ,

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж сек – постоянная Планка;  $\varepsilon$  - энергия кванта;  $c$  – скорость света;  $\nu$  - частота и  $\lambda$  - длина э. м. волны.

1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$  см,  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см сек<sup>-1</sup> получаем  $\lambda(\text{\AA}) = 12,4 / \varepsilon(\text{кэВ})$ .

Источник рентгеновского излучения – тормозное излучение при бомбардировке металлической мишени электронами.

$K_{\alpha 1}$  линия меди:  $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$ ;  $K_{\alpha 1}$  линия молибдена:  $\lambda = 0,709 \text{ \AA}$



Нейтроны:  $\varepsilon = p^2 / (2M_n) = h^2 / (2M_n \lambda^2)$ , где  $M_n = 1,675 \cdot 10^{-24}$  г масса нейтрона;

$\lambda = h/p$  – длина волны де Бройля

$$\lambda(\text{Å}) \approx 0,28 / [\varepsilon(\text{эВ})]^{1/2}$$

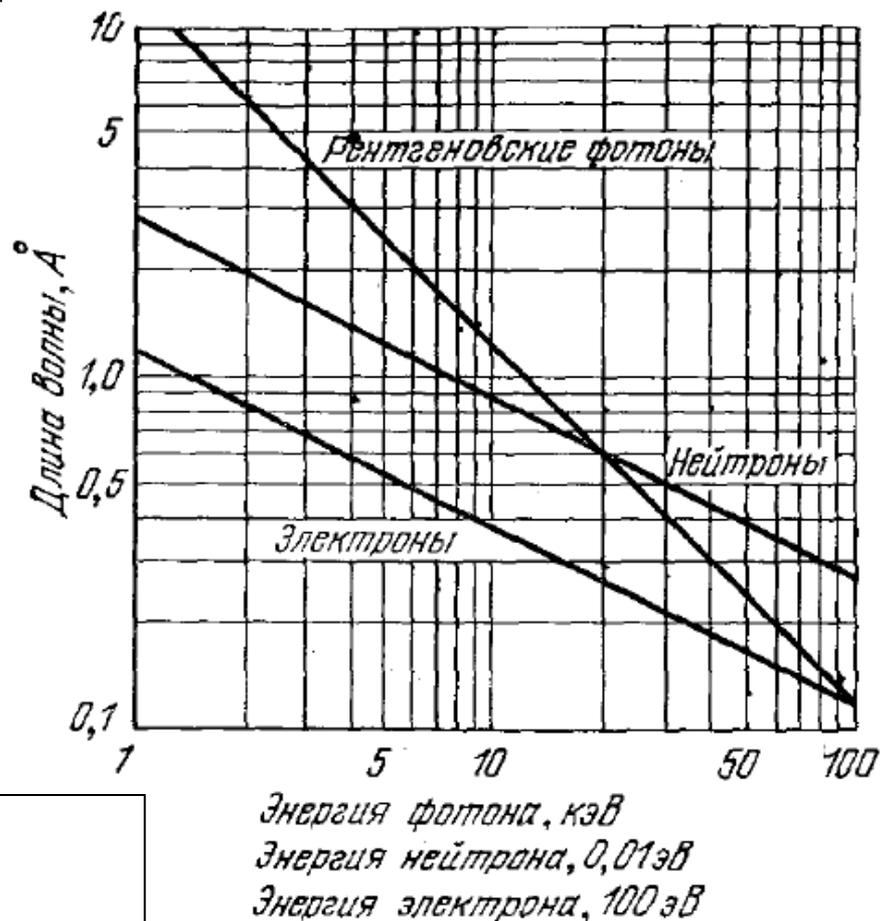
Для  $\lambda = 1 \text{ Å}$ , энергия нейтронов должна быть  $\varepsilon \approx 0,08 \text{ эВ}$ .

Электроны: энергия электрона связана с длиной волны де-Бройля соотношением  $\varepsilon = h^2 / (2m\lambda^2)$ , где  $m = 0,911 \cdot 10^{-27}$  г – масса электрона.

$$\lambda(\text{Å}) \approx 12 / [\varepsilon(\text{эВ})]^{1/2}$$

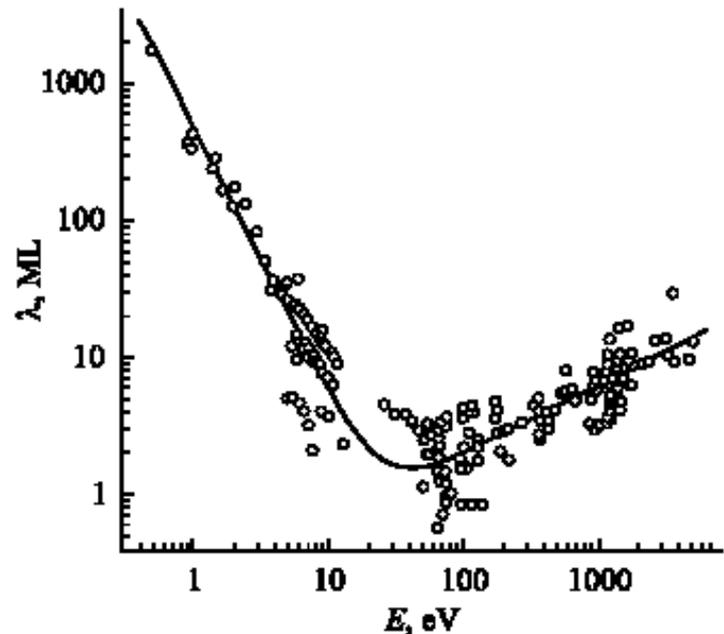
Длина волны де-Бройля порядка 1-2 Å соответствует электронам с энергией 30 - 200 эВ.

Глубина проникновения таких электронов около 5 - 10 Å.



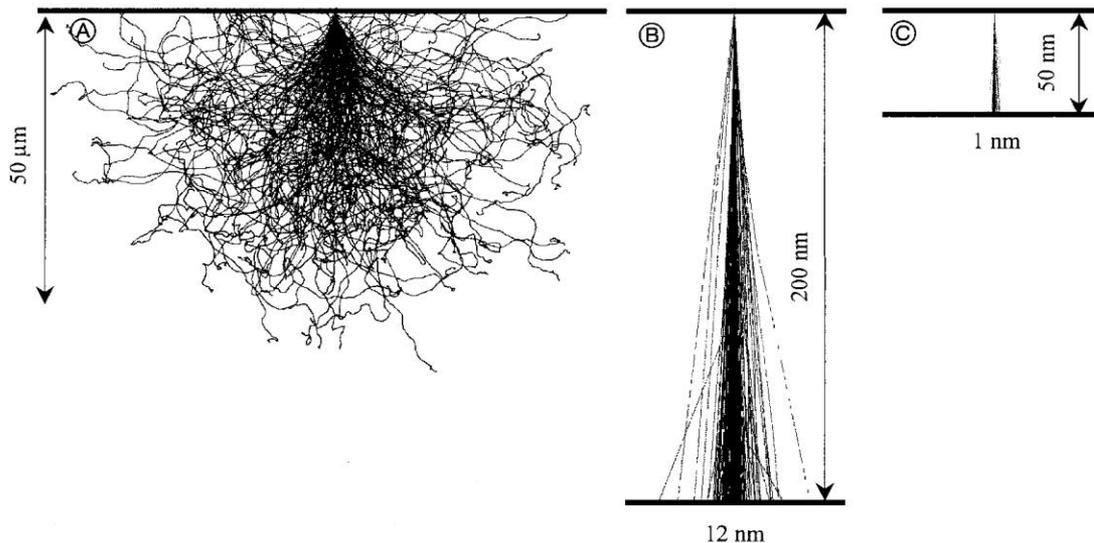
Зависимость длины волны от энергии частиц для фотонов, нейтронов и электронов.

## Взаимодействие электронов с веществом



Экспериментальные данные о длине свободного пробега электронов (количество монослоев) с различной кинетической энергией (эВ).

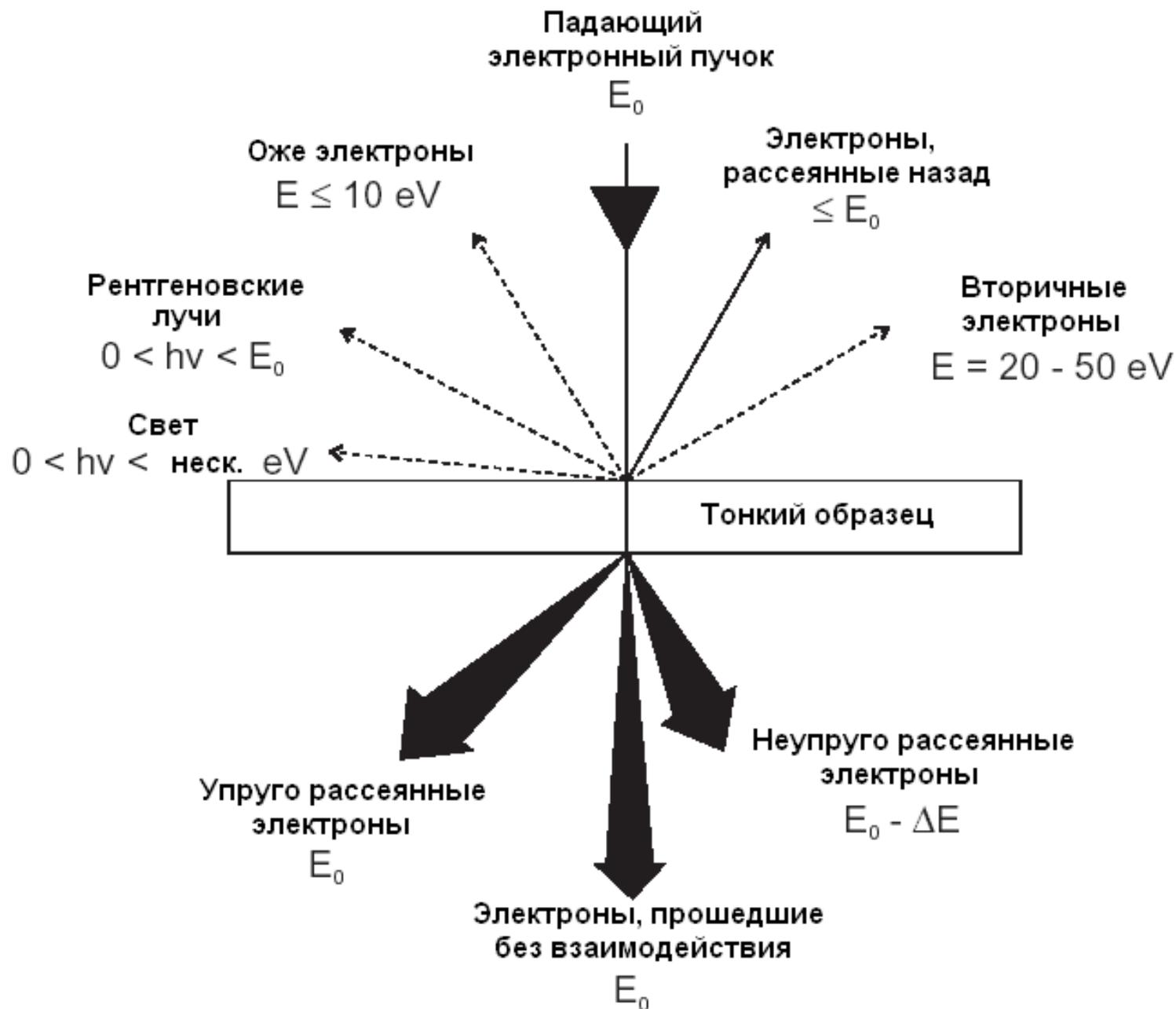
Глубина проникновения или выхода электрона при взаимодействии с конденсированным веществом составляет несколько ангстрем в диапазоне энергий 5...5000 эВ.



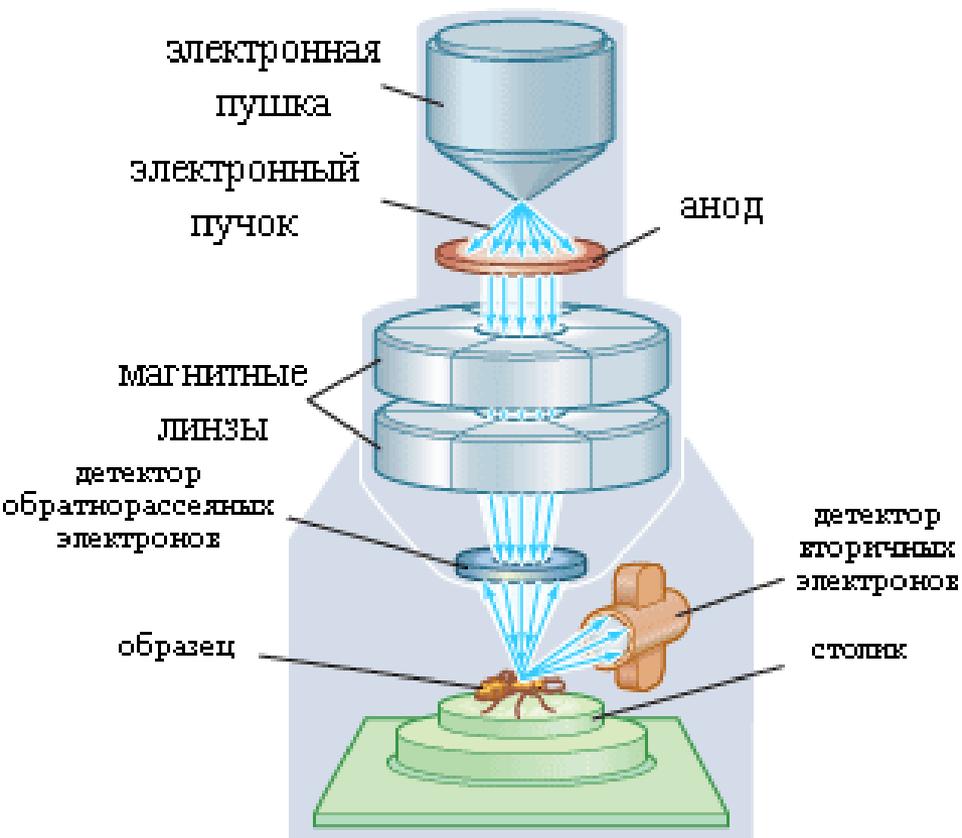
Электроны с высокой энергией проникают на большую глубину.

Пример: результат моделирования формы пучка электрона с энергией 100 кэВ в кремнии - (A) объемный образец 50 мкм; (B) – образец толщиной 200 нм; (C) – образец 50 нм.

# Взаимодействие электронов с веществом

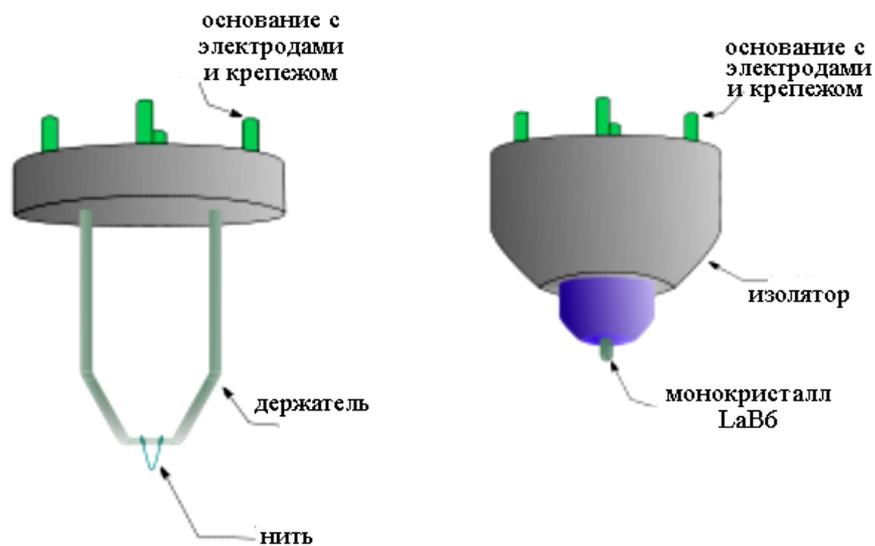
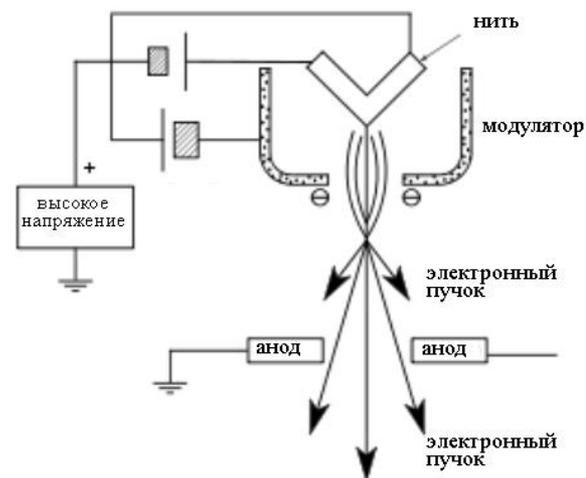
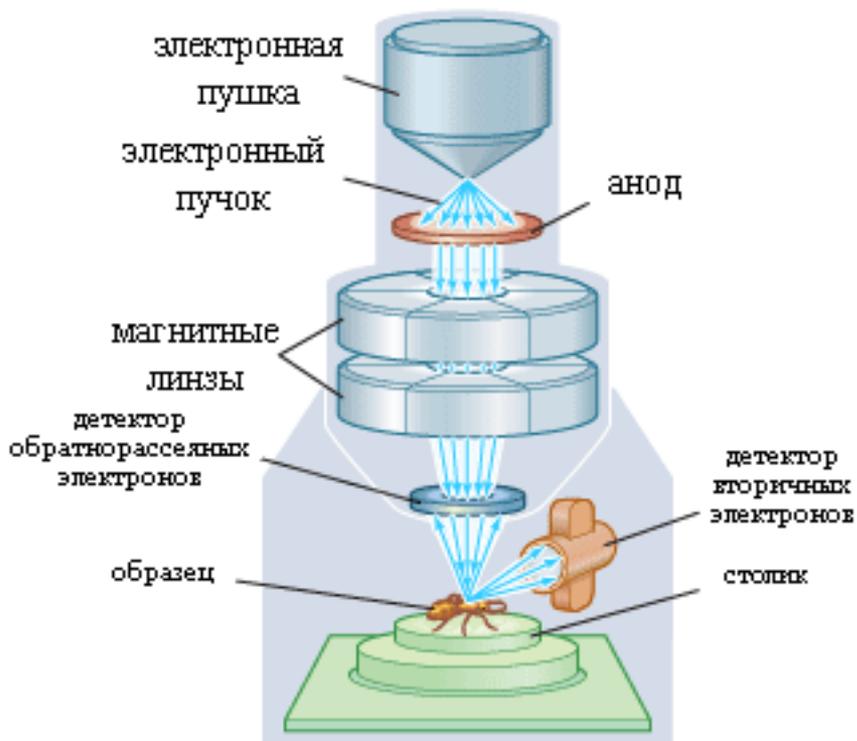


# Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

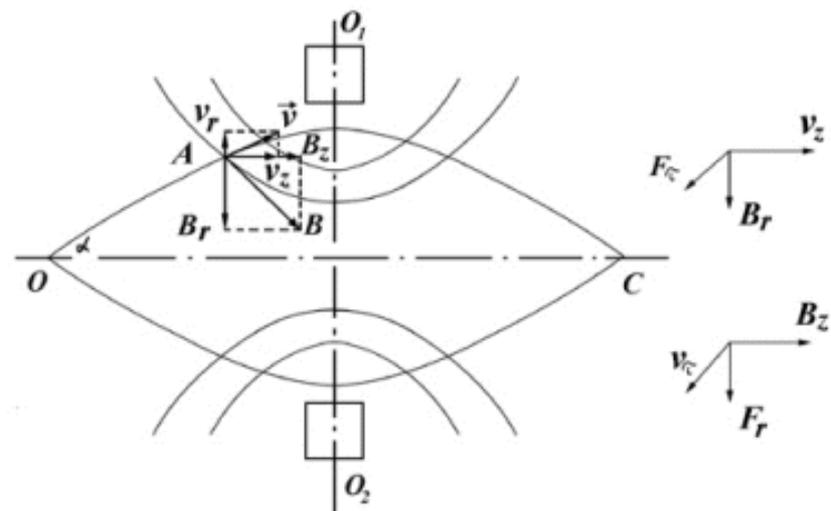
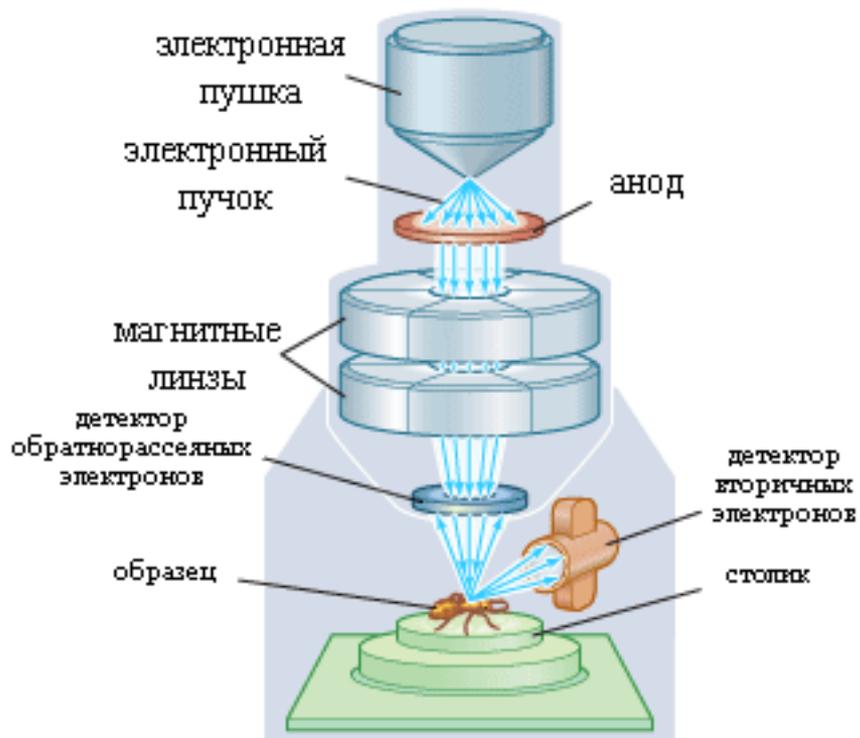


# Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

Схема устройства электронной пушки.

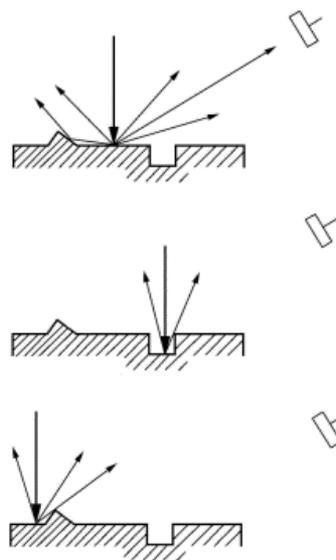
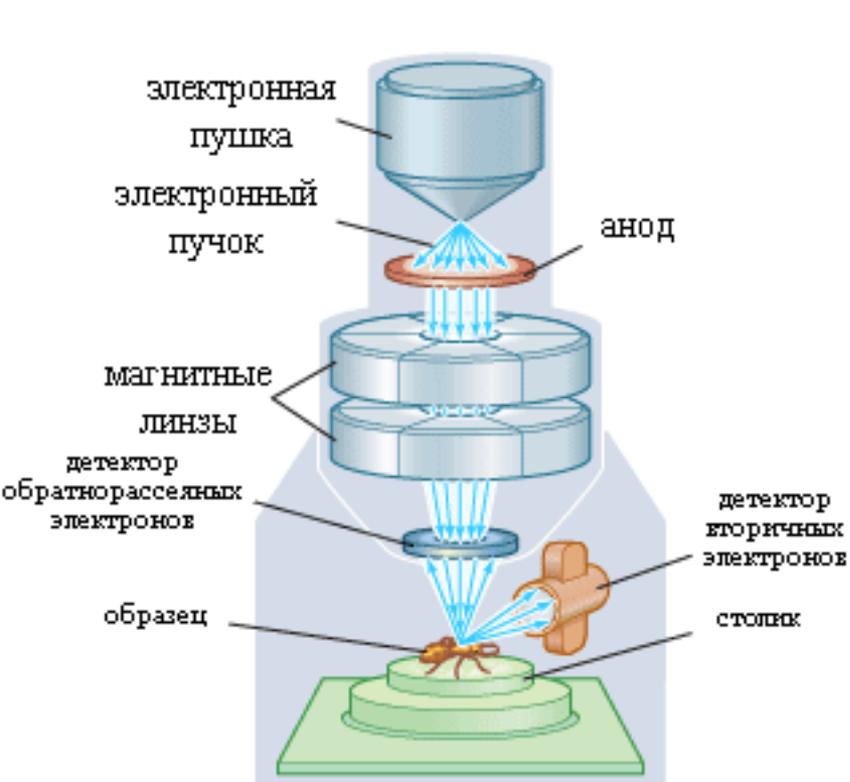


# Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)



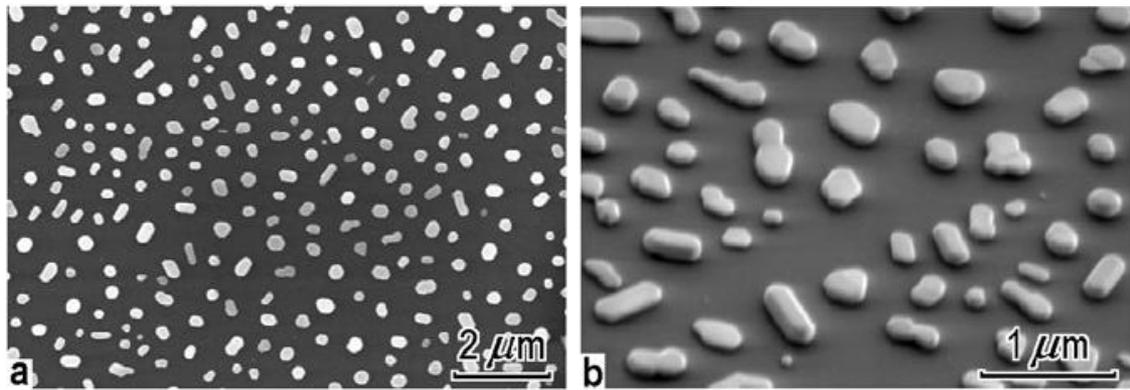
Движение электронов в магнитной линзе.

# Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

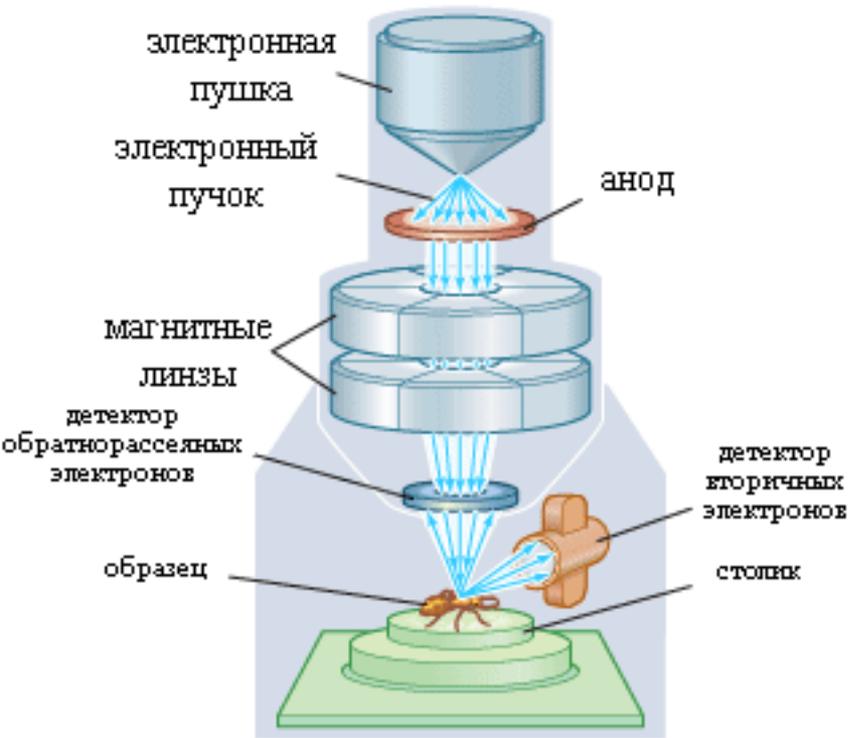


Интенсивность потока вторичных электронов, попадающих в детектор определяется наклоном оси детектора и профилем поверхности.

РЭМ изображения пленки золота при нормальном (а) и 45° (b) освещении электронным пучком.



# Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)



**Вторичные электроны (ВЭ)** выходят из тонкого слоя (5-20 нм) и дают информацию о топографии поверхности.

**Обратнорассеянные электроны (ОРЭ)** имеют более высокую энергию и дают информацию об элементном составе.

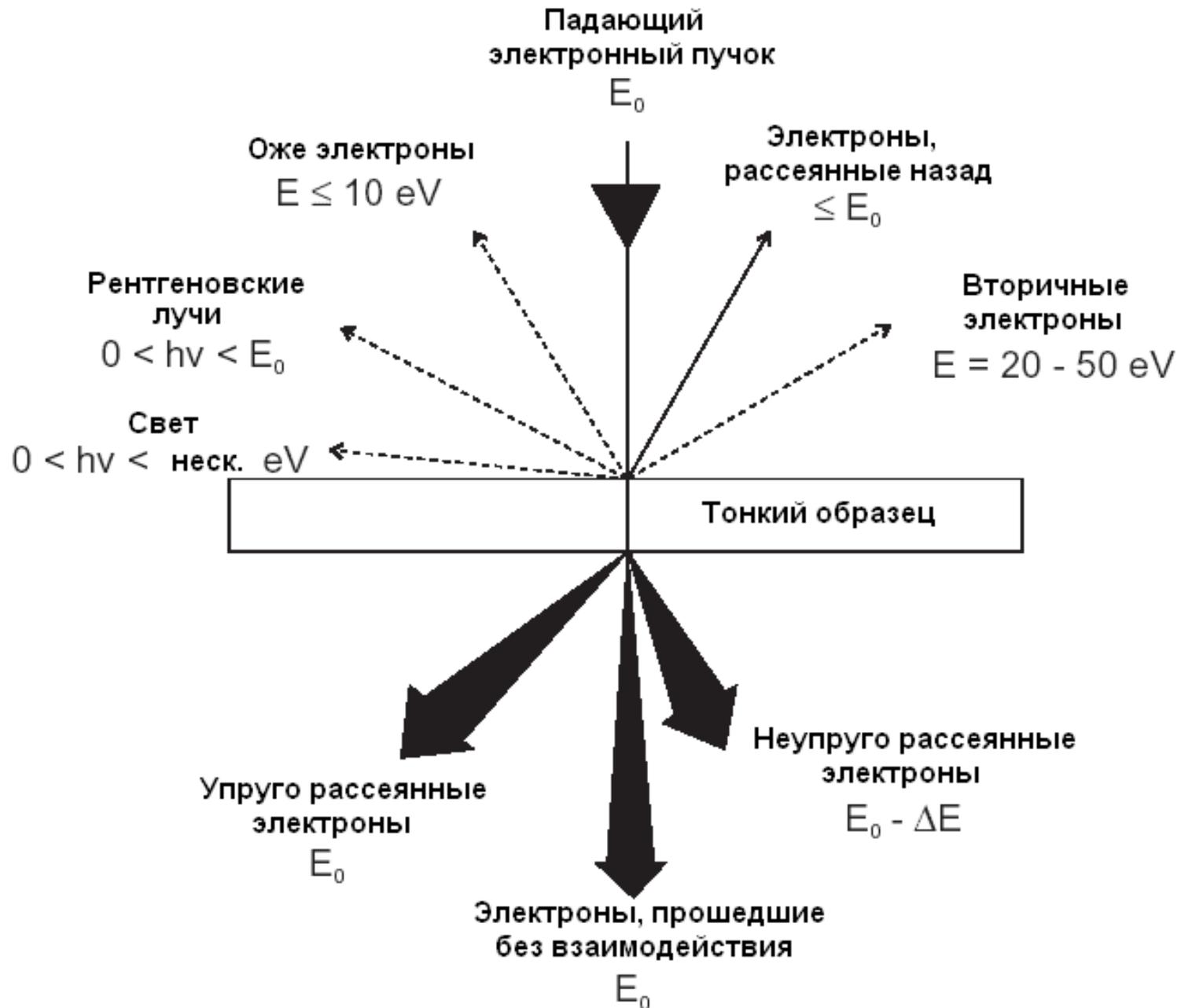
**Ток через образец** – разность тока первичного пучка и суммы токов ВЭ и ОРЭ

**Рентгеновское излучение** дает информацию об элементном составе (тип, распределение по поверхности).

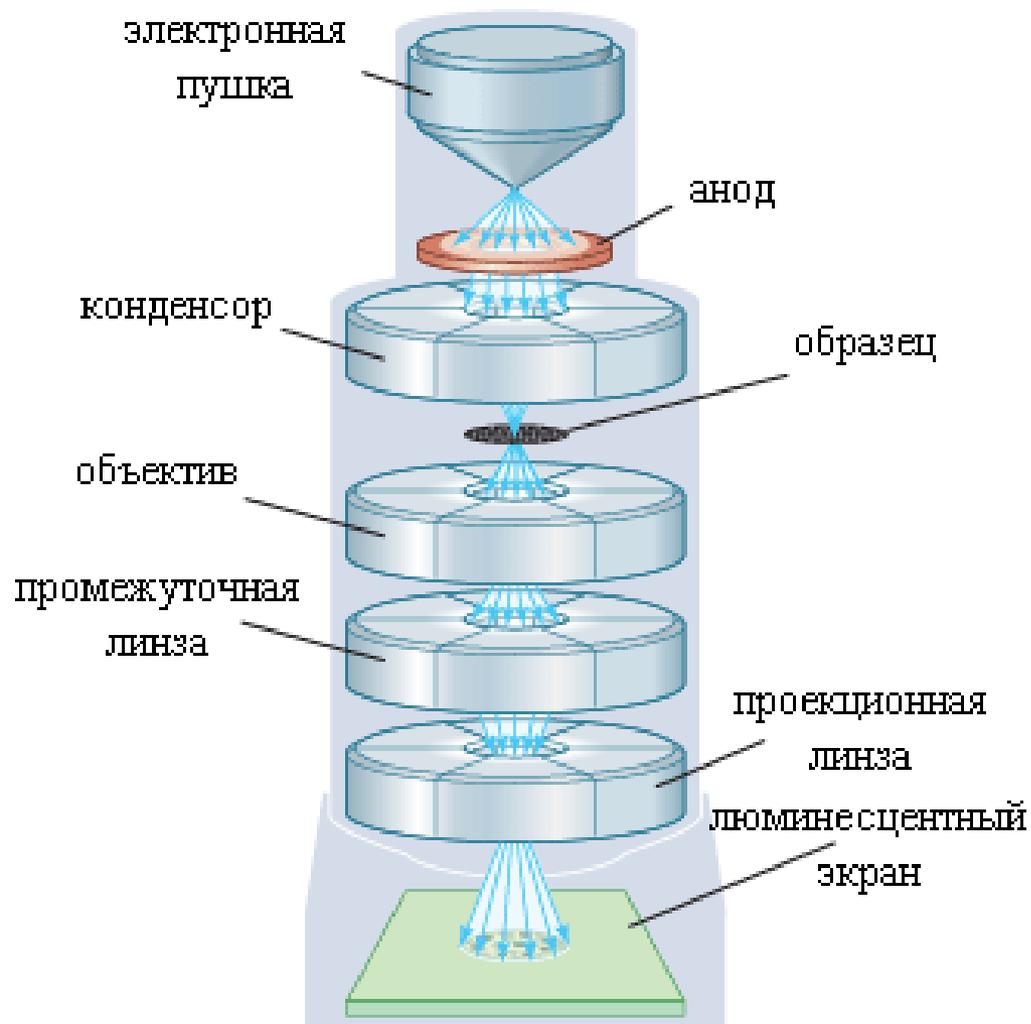
**Ток, индуцированный электронным пучком** – визуализация электрически активных областей (p-n переходы, дефекты).

**Катодолюминесценция** – изучение рекомбинации носителей заряда.

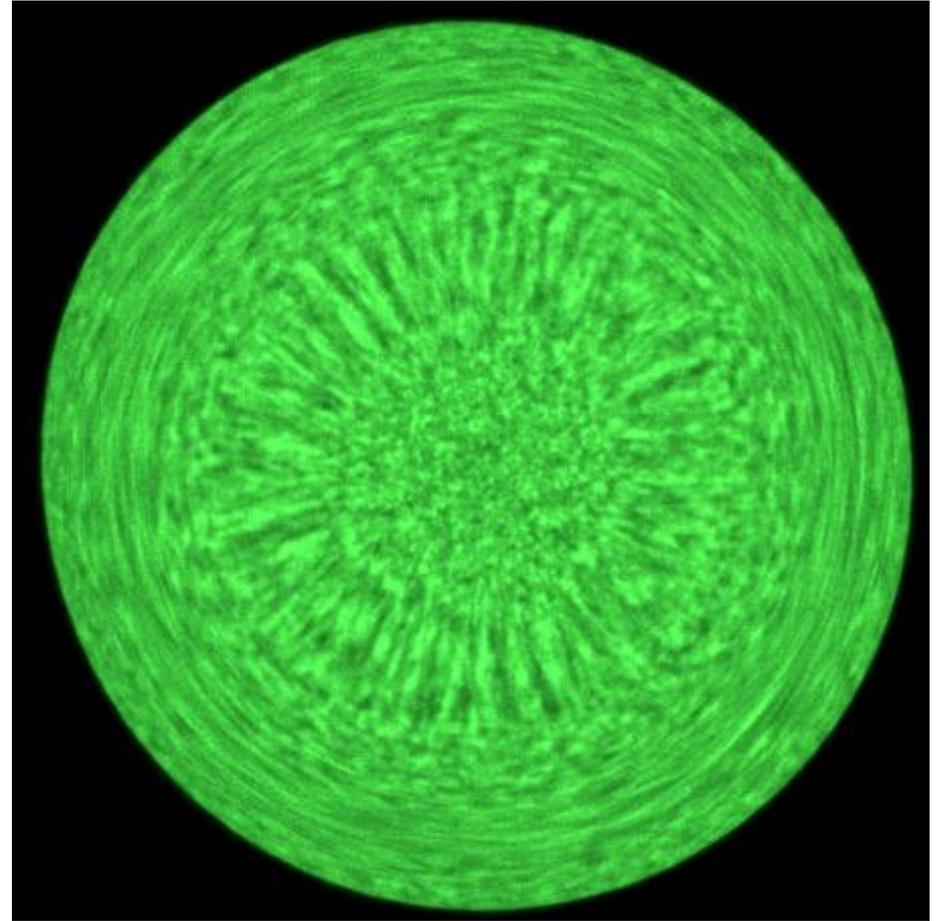
# Взаимодействие электронов с веществом



# Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, ТЕМ)



## Ограничение разрешения электронной оптикой

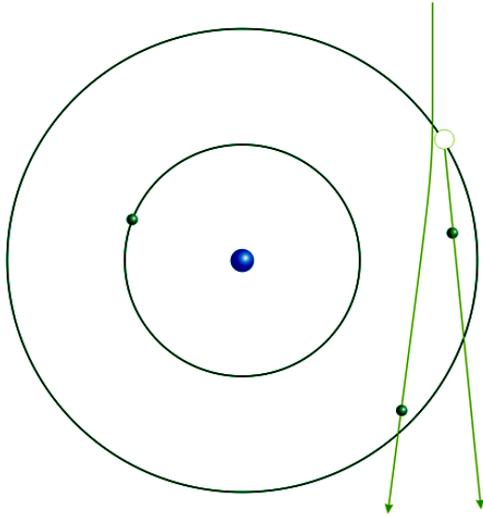


Качество изображений, создаваемых электронной линзой, значительно хуже качества оптических изображений.

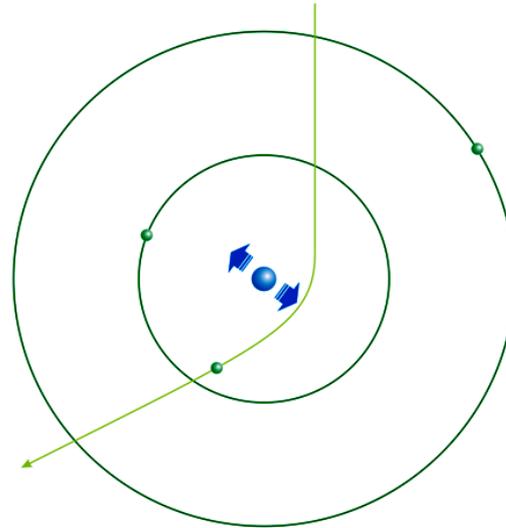
# Ограничения разрешения из-за радиационных дефектов

Длина волны де-Бройля:  $\lambda(\text{Å}) \approx 12/[\varepsilon(\text{эВ})]^{1/2}$

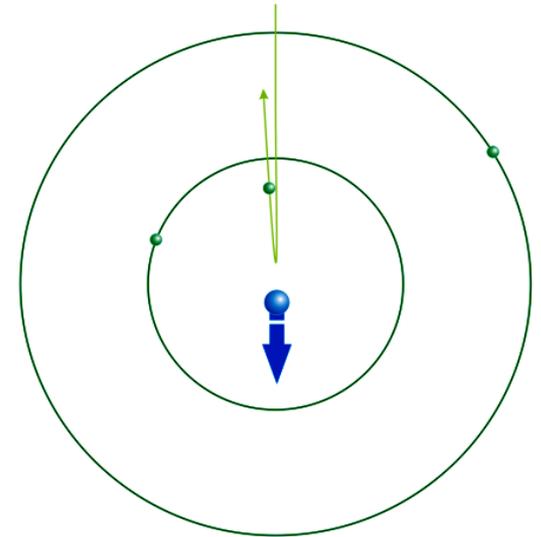
ионизация



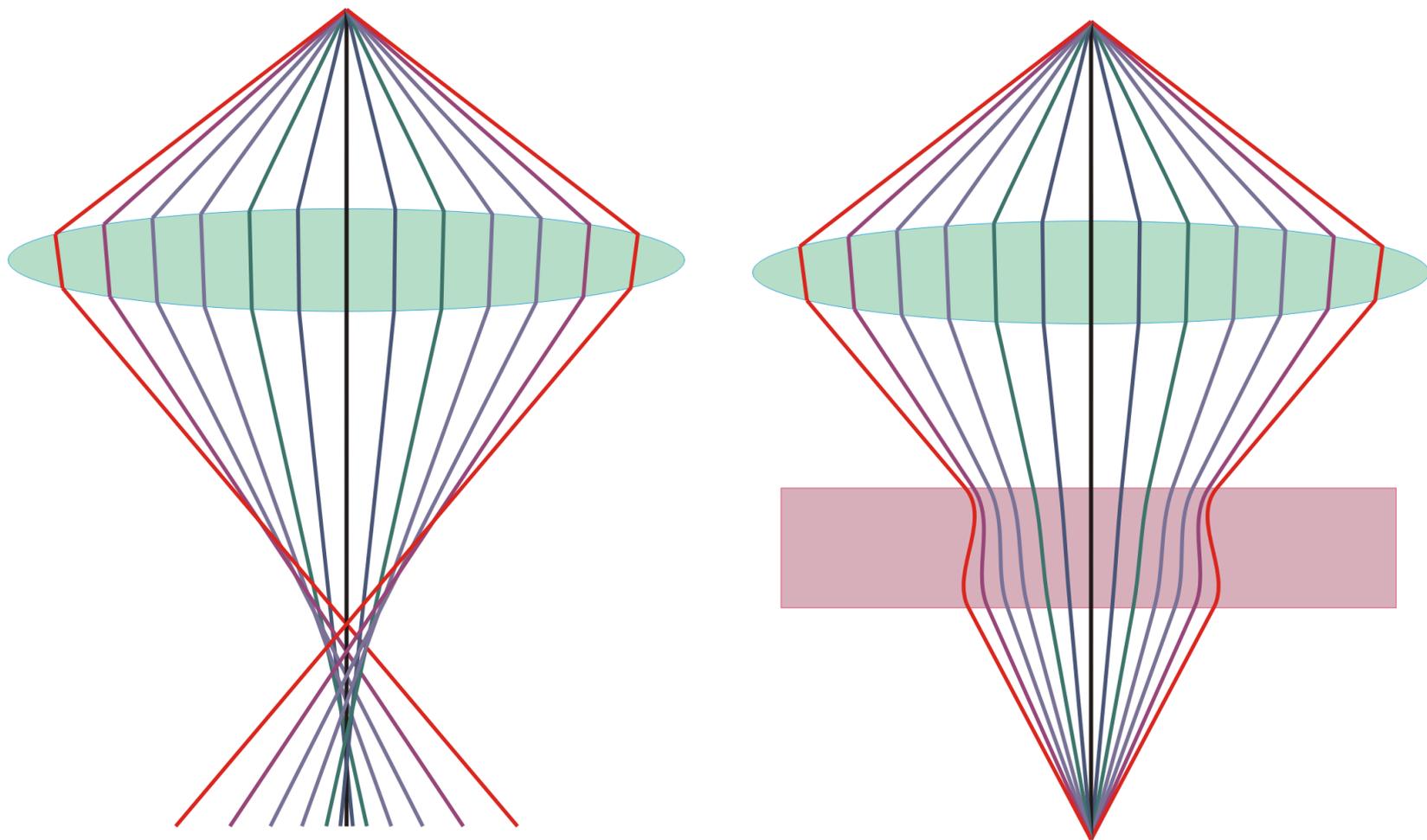
ионизация и нагрев



образование дефектов

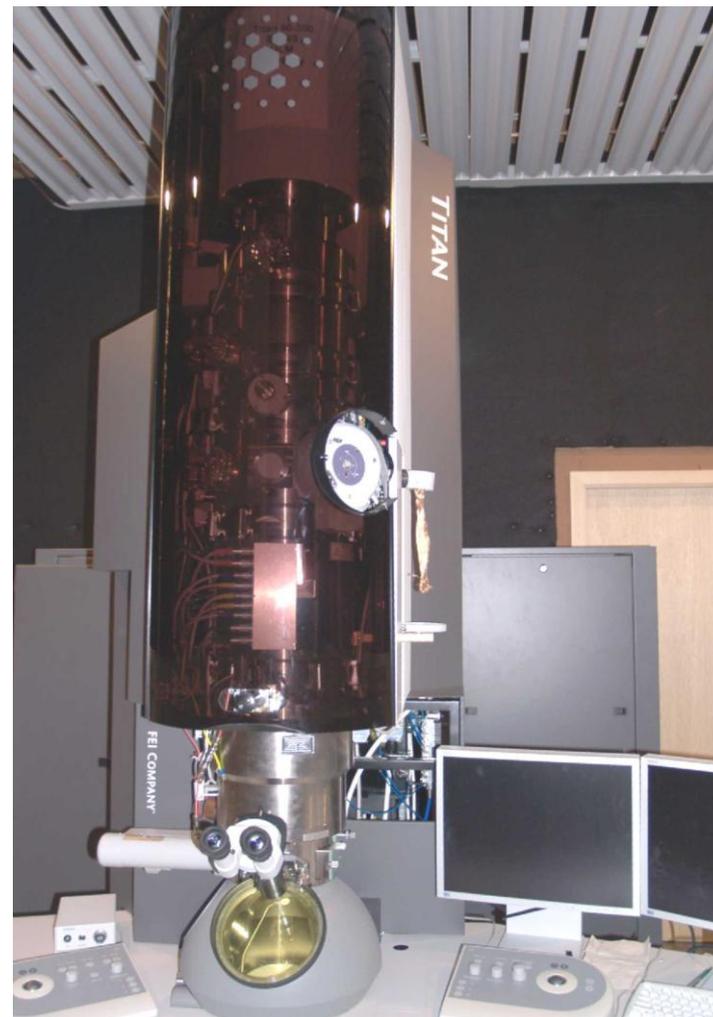
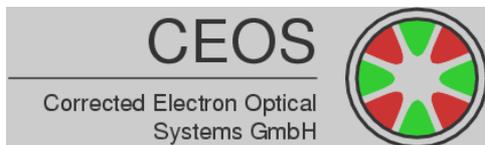
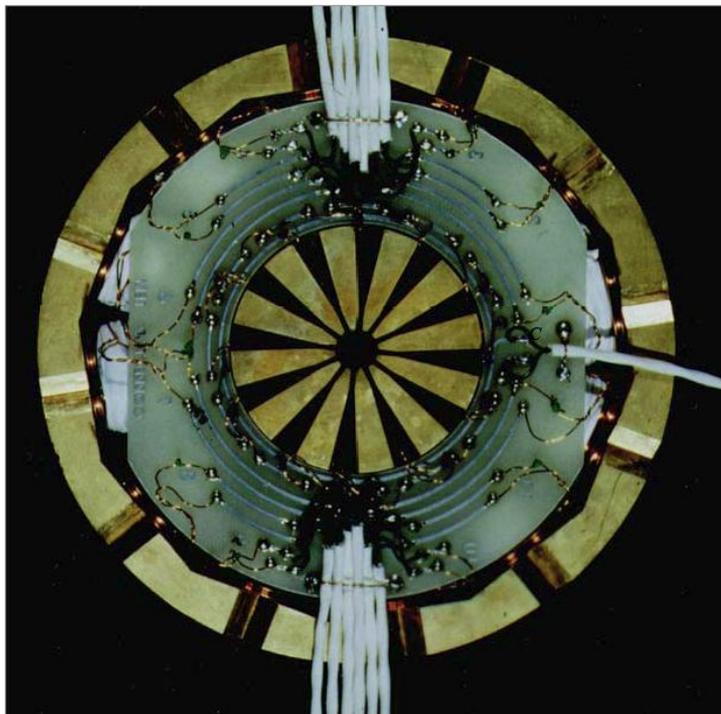


# Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций



Схематическое изображение траекторий электронов при фокусировке обычной системой магнитных линз (слева) и системой с коррекцией сферических aberrаций (справа)

# Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций



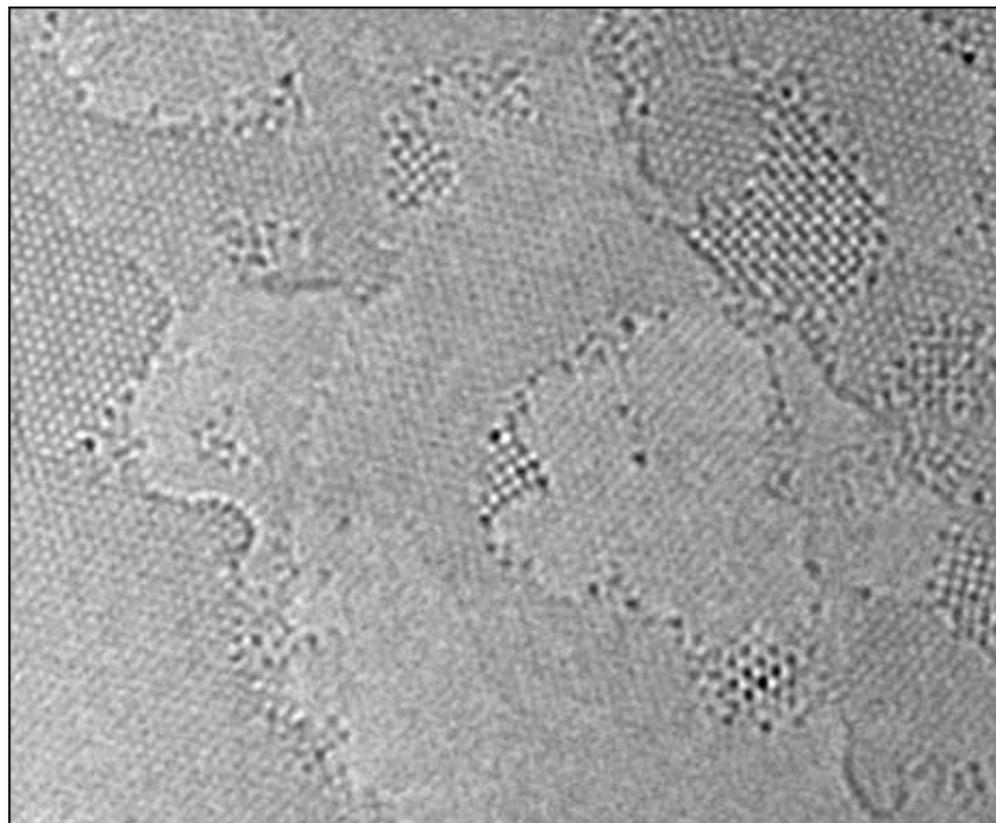
**TITAN 80-300  
(FEI, NETHERLANDS)**

Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций  
(примеры использования – А.Л. Чувилин, Ulm University, Germany)

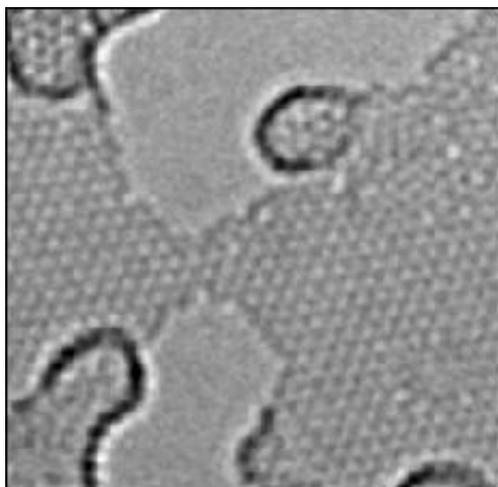
(Dy@C82)@SWNT



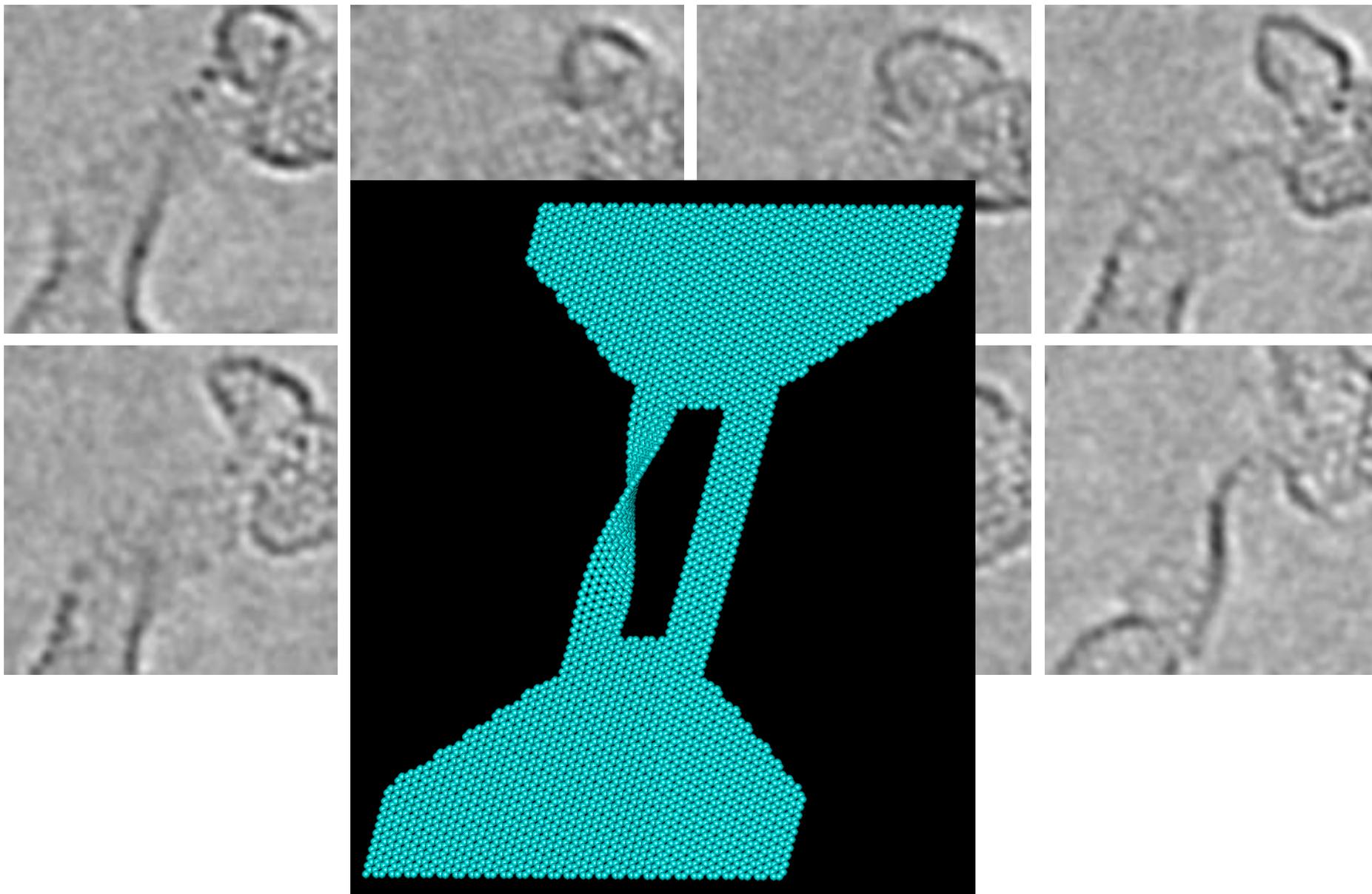
Ag @Graphene



Graphene



Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций  
(примеры использования – А.Л. Чувилин, Ulm University, Germany)



# Ионные микроскопы

Электроны: энергия электрона связана с длиной волны де-Бройля соотношением  $\varepsilon = h^2 / (2m\lambda^2)$ , где  $m = 0,911 \times 10^{-27}$  г – масса электрона.

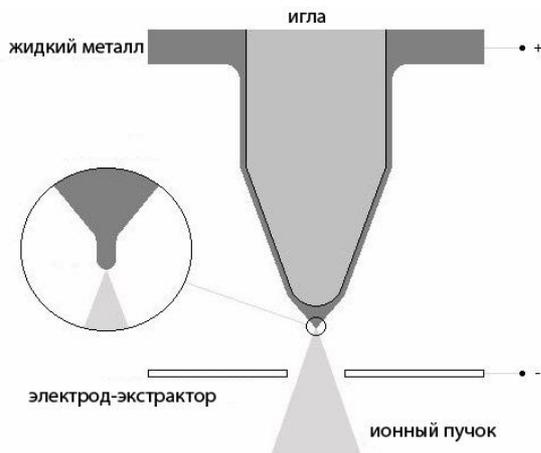
$$\lambda(\text{Å}) \approx 12 / [\varepsilon(\text{эВ})]^{1/2}$$

Длина волны де-Бройля порядка 1-2 Å соответствует электронам с энергией 30 - 200 эВ.

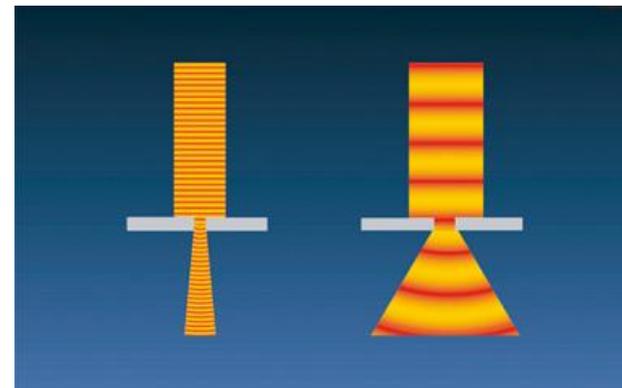
Глубина проникновения таких электронов около 5 -10 Å.

Для ионов длина волны де-Бройля оказывается существенно меньше из-за увеличения массы частиц.

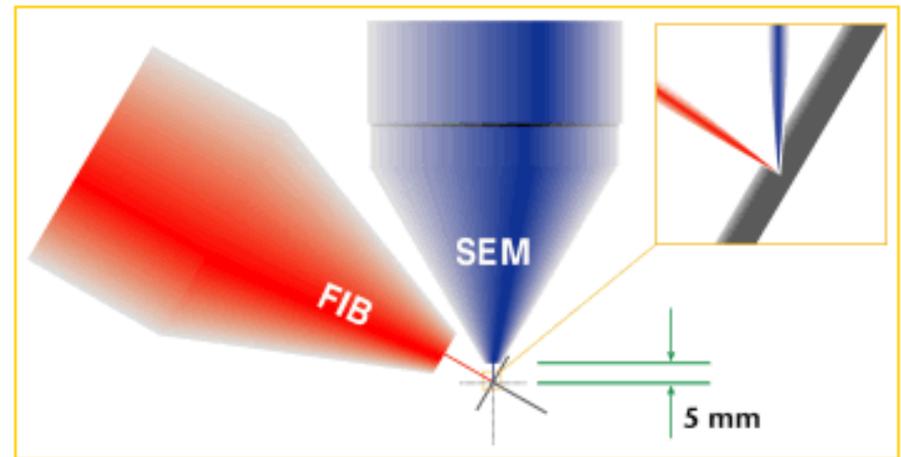
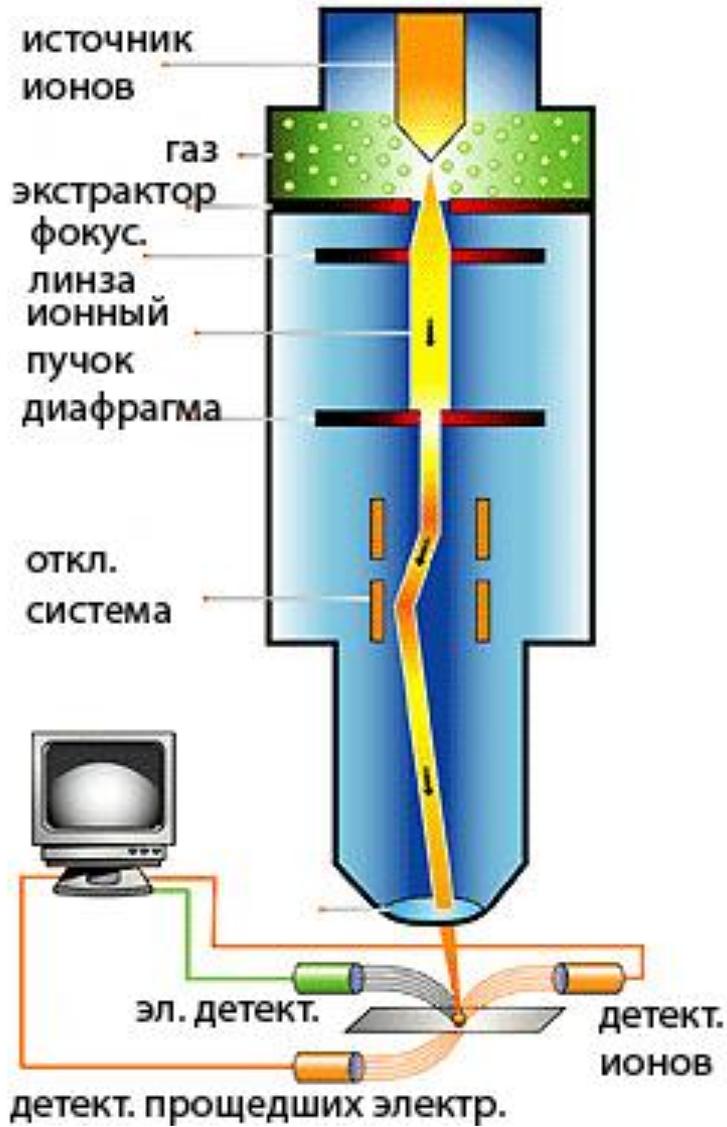
Источник тяжелых ионов (As, Ga, In).



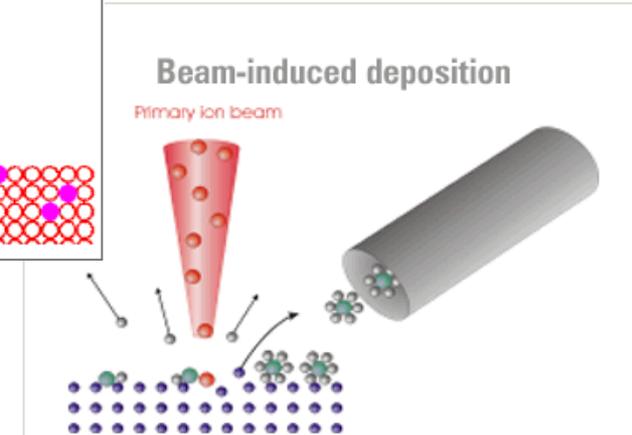
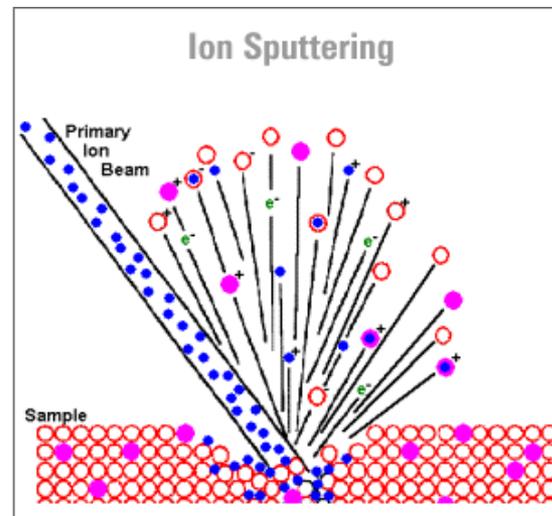
Источник легких ионов (He).



# Ионные микроскопы

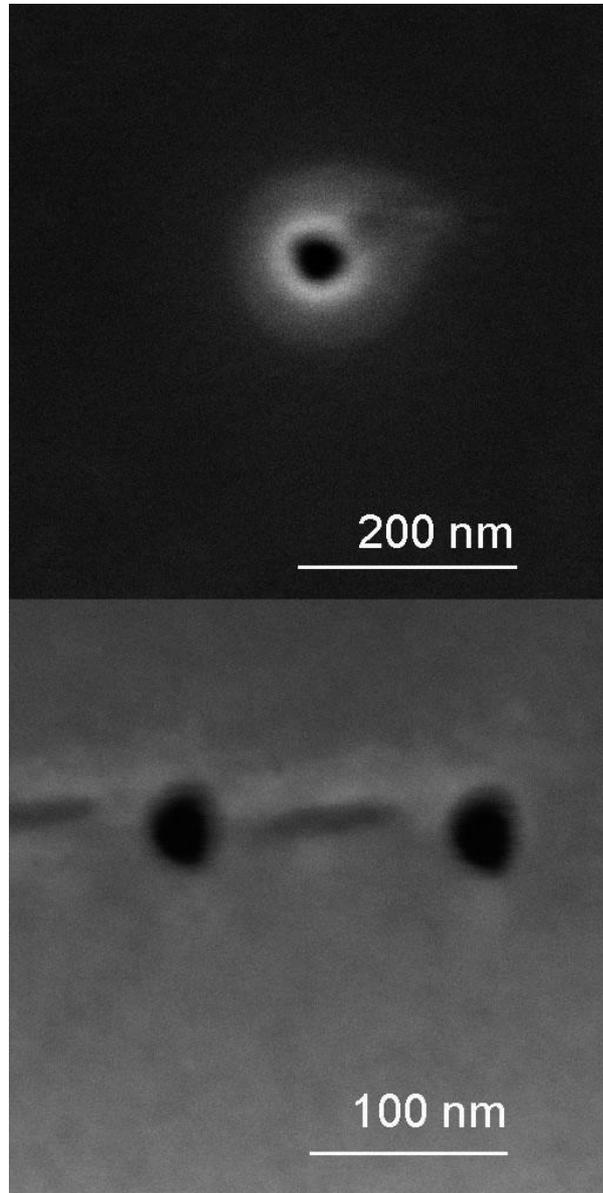


Dual beam geometry

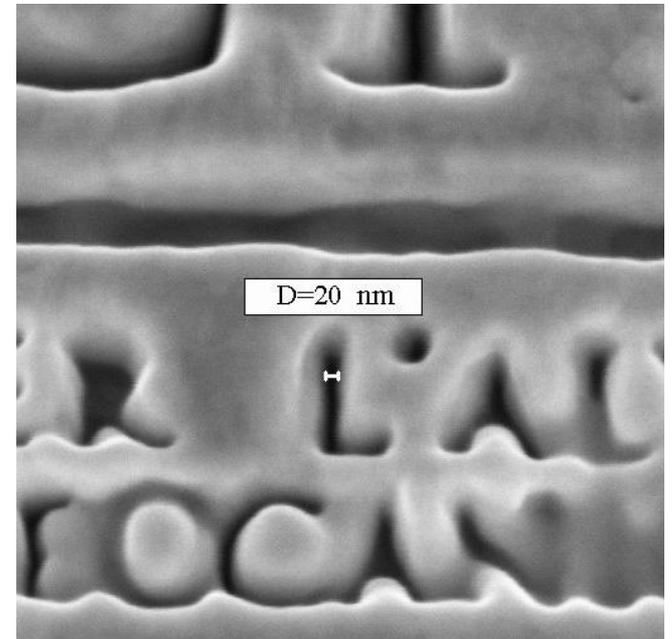


## Ионные микроскопы

45 нм отверстия в Si (верхн. рис.) и 30 нм отверстия в MgO (нижн. рис.)

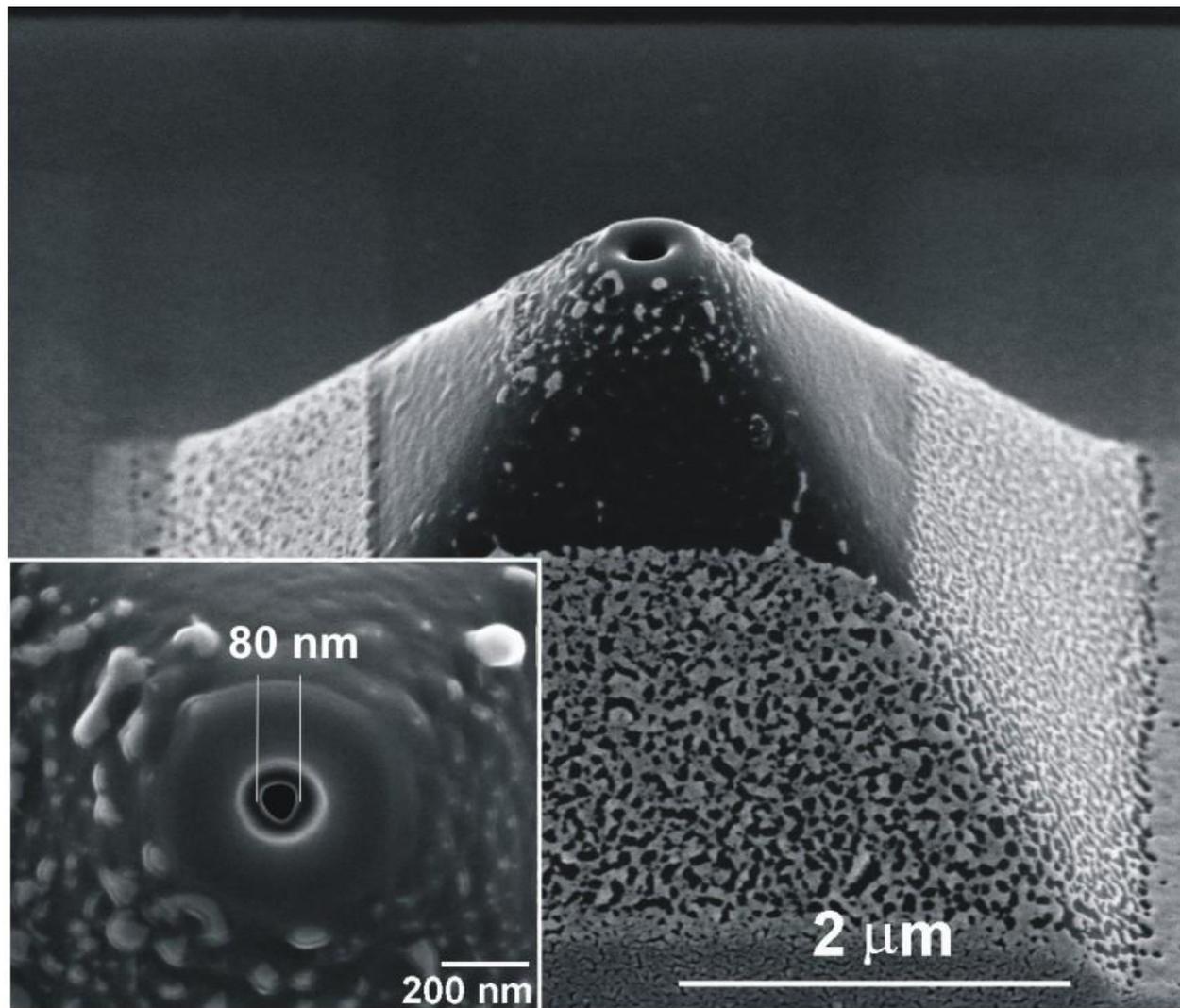


Гравировка с разрешением 20 нм.



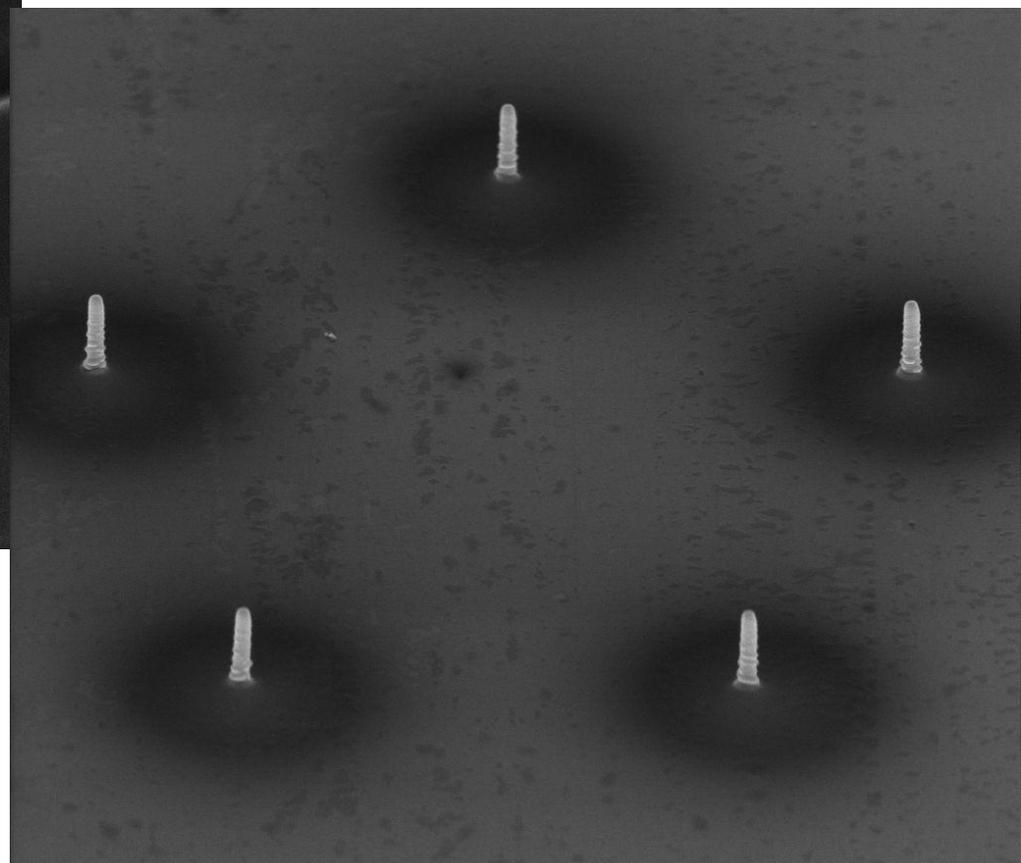
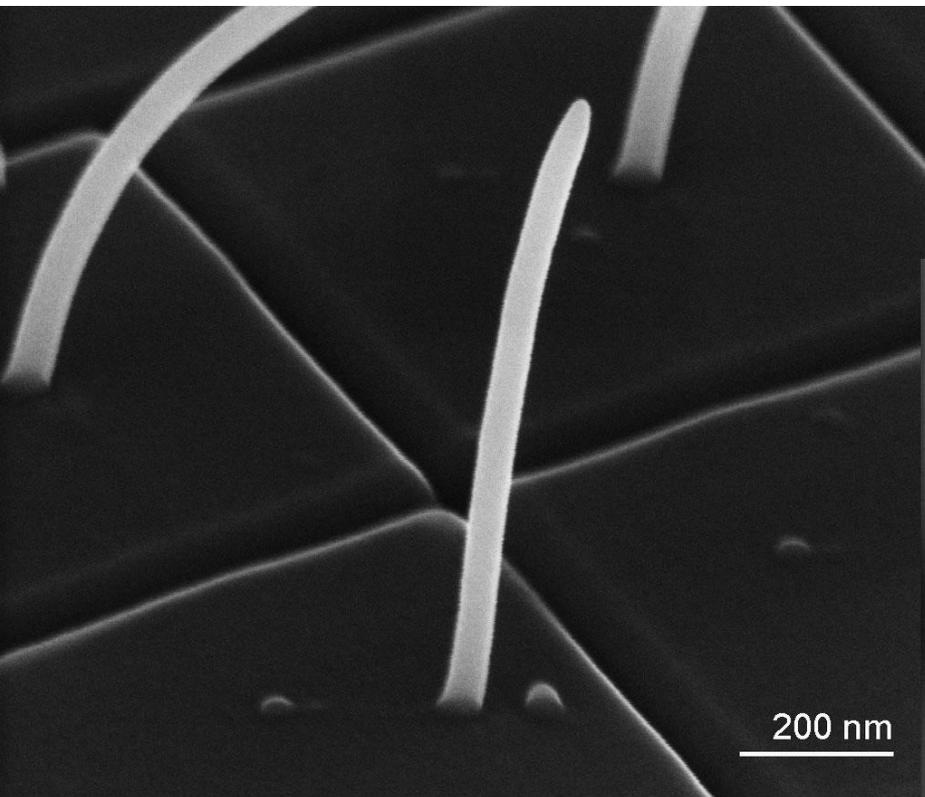
## Ионные микроскопы

Сквозное отверстие в пирамидке из кремния.



# Ионные микроскопы

Примеры металлических (Pt) нитей нанометрового диаметра, полученных с помощью ионного пучка.



E-Beam	Det	Mag	Spot	Tilt	HFV	2 μm
5.00 kV	TLD-S	35.0 kX	3	52.0°	8.69 μm	STONEHENGE

# Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)

1988 г. Февраль

Том 154, вып. 2

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ—1986

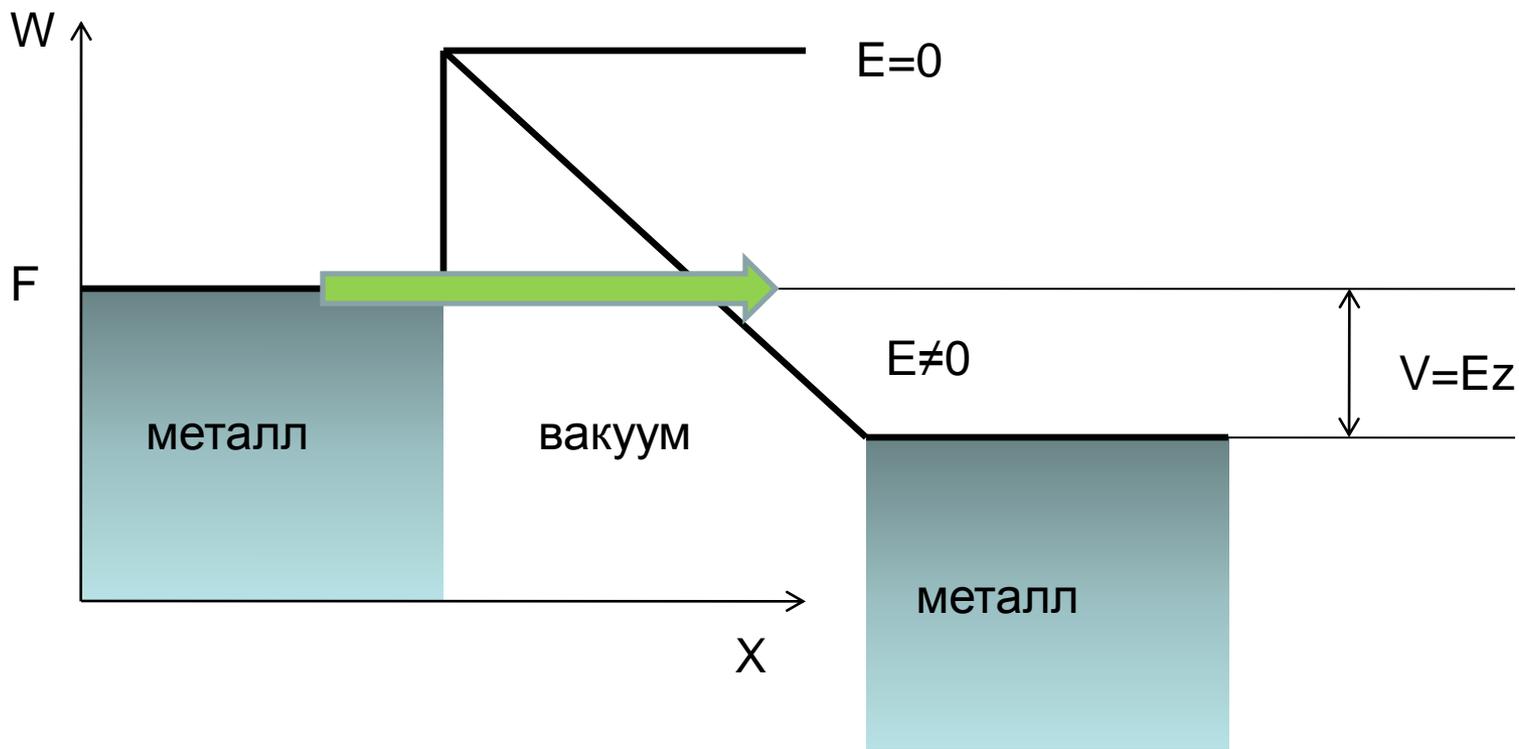
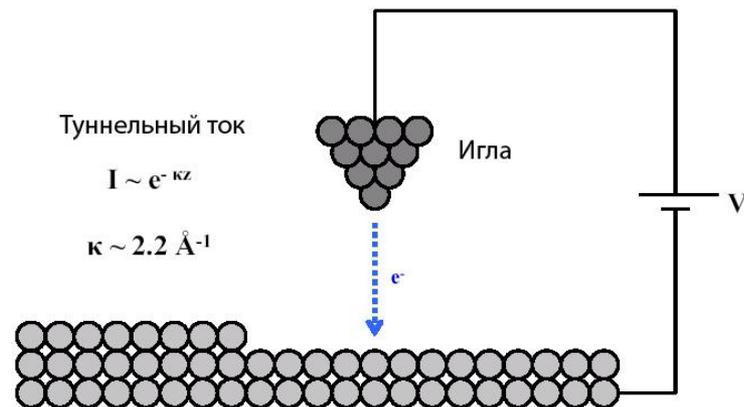
537.533.35

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ — ОТ РОЖДЕНИЯ  
К ЮНОСТИ

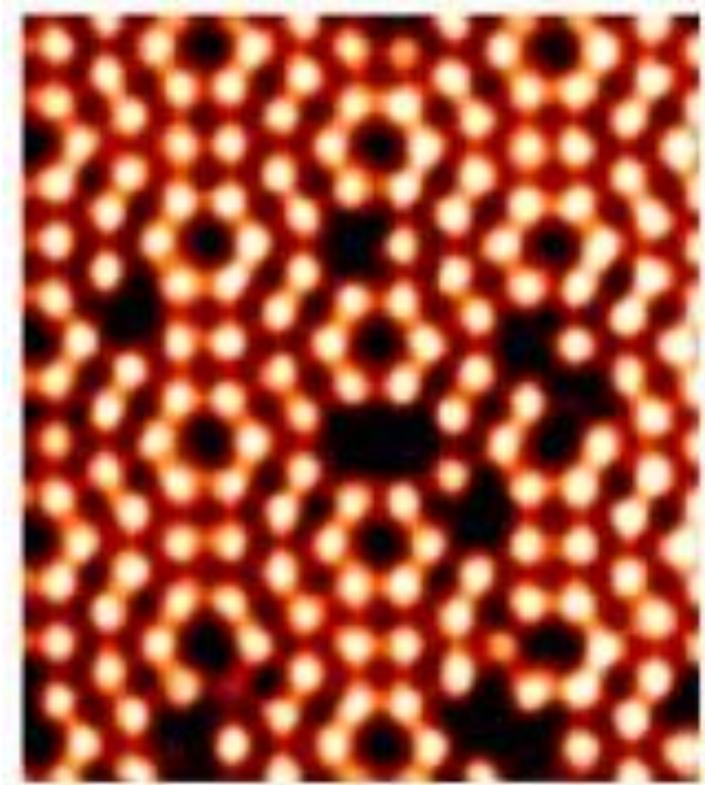
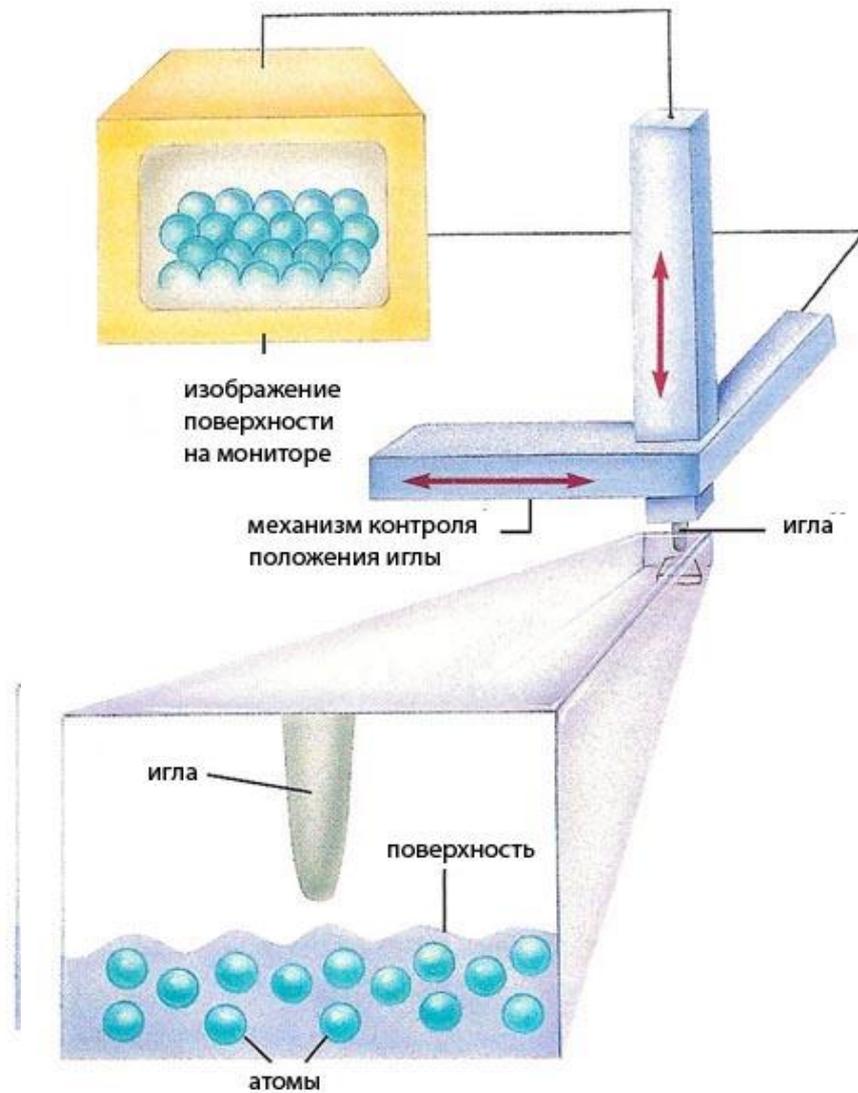
Г. Бинниг, Г. Рорер\*)

\*) Binnig G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy — From Birth to  
Adolescence: Nobel Lecture. Stockholm December 8, 1986.— Перевод В. Г. Терзиева.

Герд Бинниг и Генрих Рорер — сотрудники Исследовательского отдела фирмы  
IBM, Цюрихская научная лаборатория, Рюмликон, Швейцария.

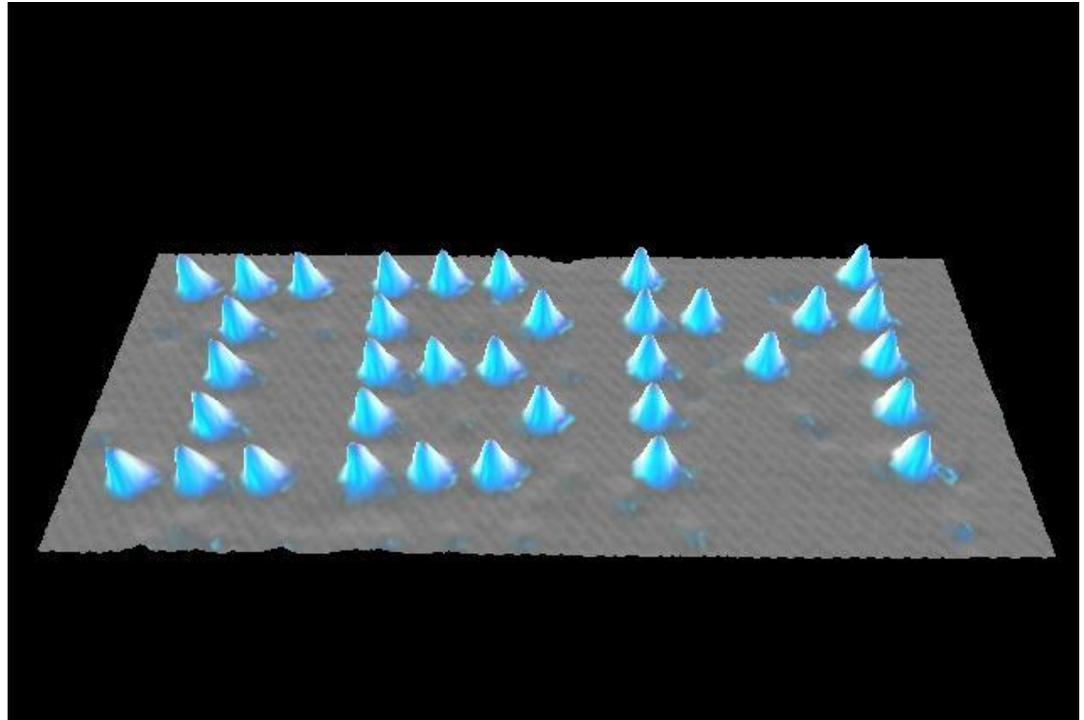
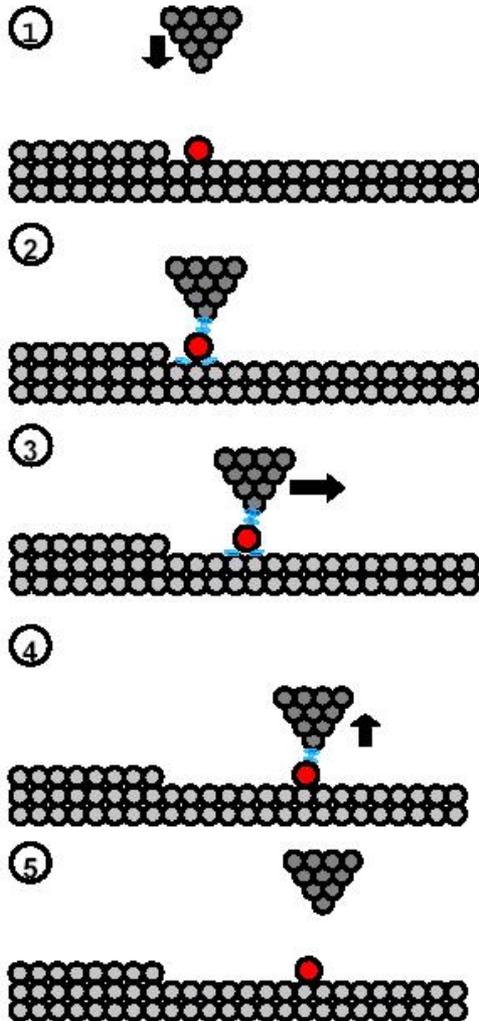


# Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)



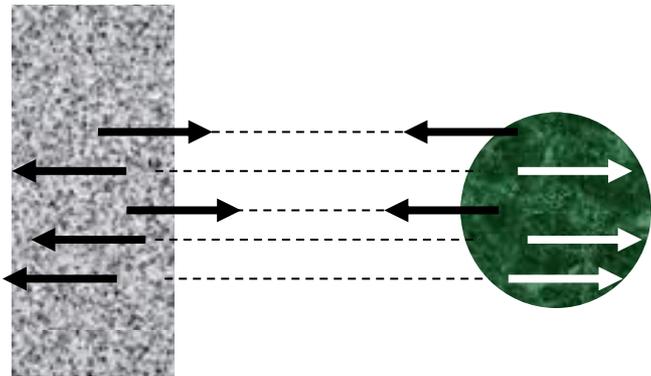
СТМ изображение поверхности кремния – видно упорядоченное расположение атомов и структурные дефекты (вакансии).

# Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)



Атомы ксенона на никеле в форме букв IBM, локализованные с помощью иглы СТМ.

# Сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ)

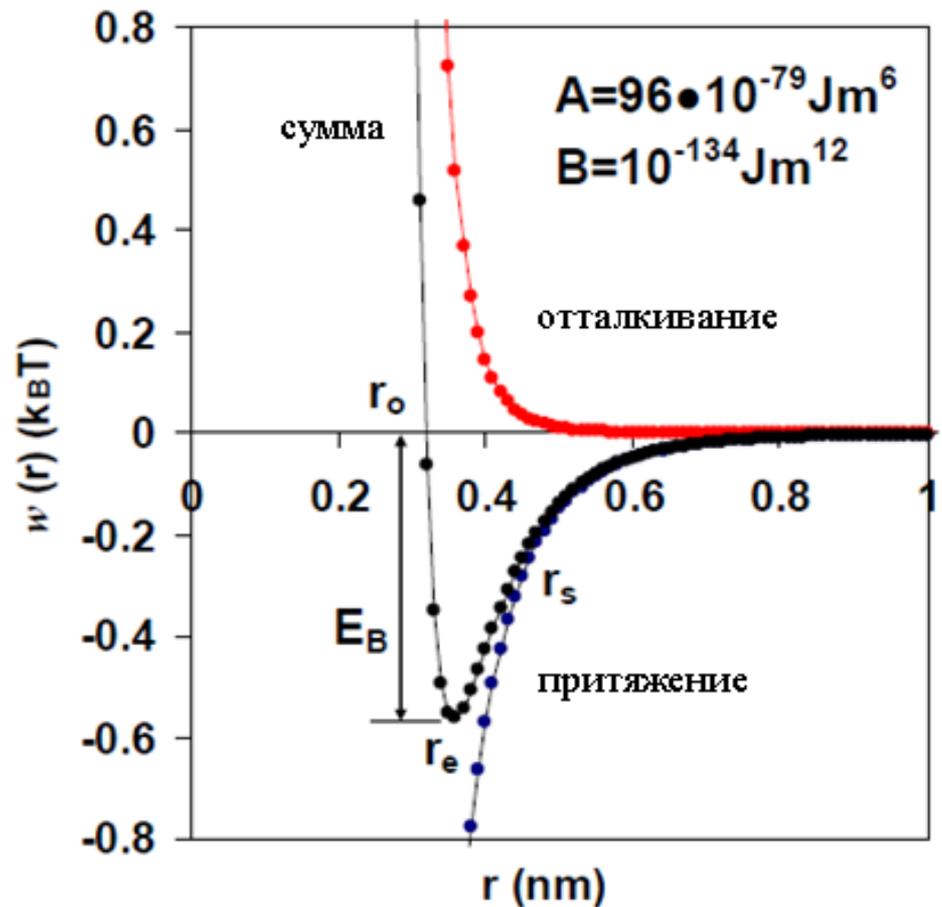


## Потенциал Леннарда-Джонса

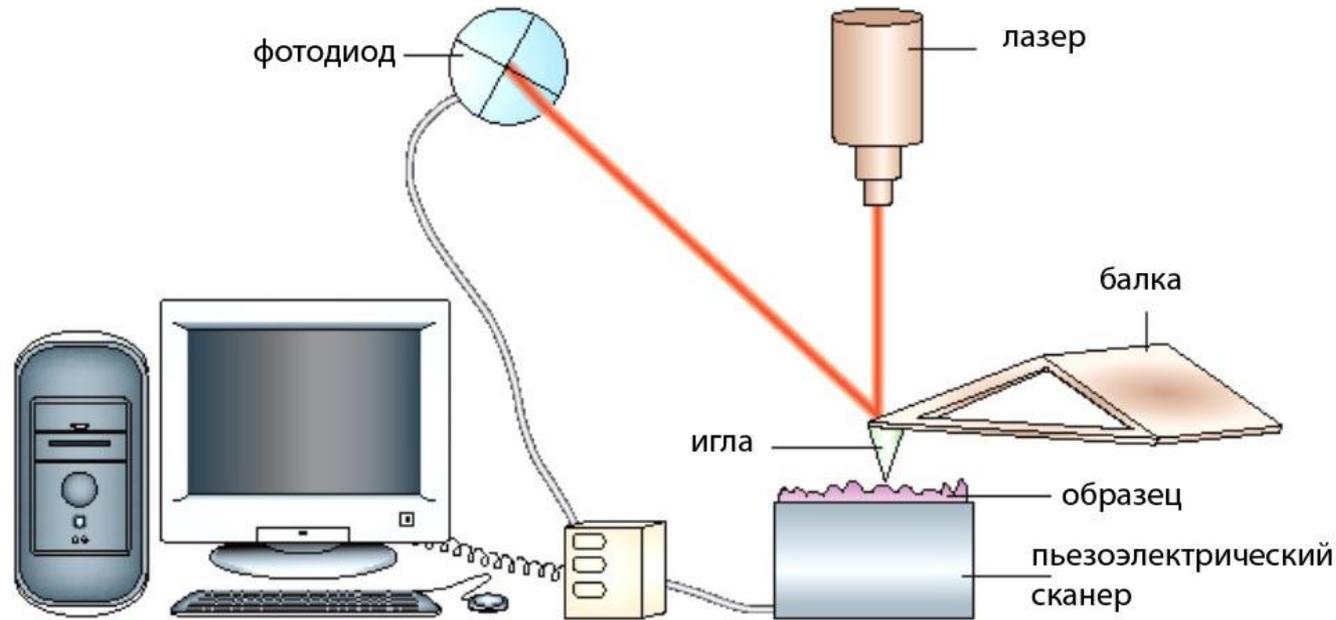
$$U_{ЛД} = \frac{-A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}} = 4E_B \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

Сила взаимодействия:

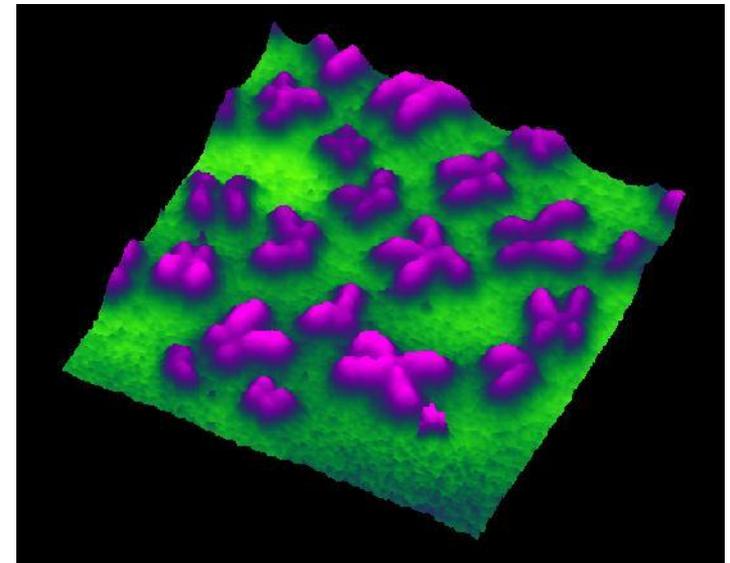
$$F_{ЛД} = \frac{-6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}}$$



# Сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ)

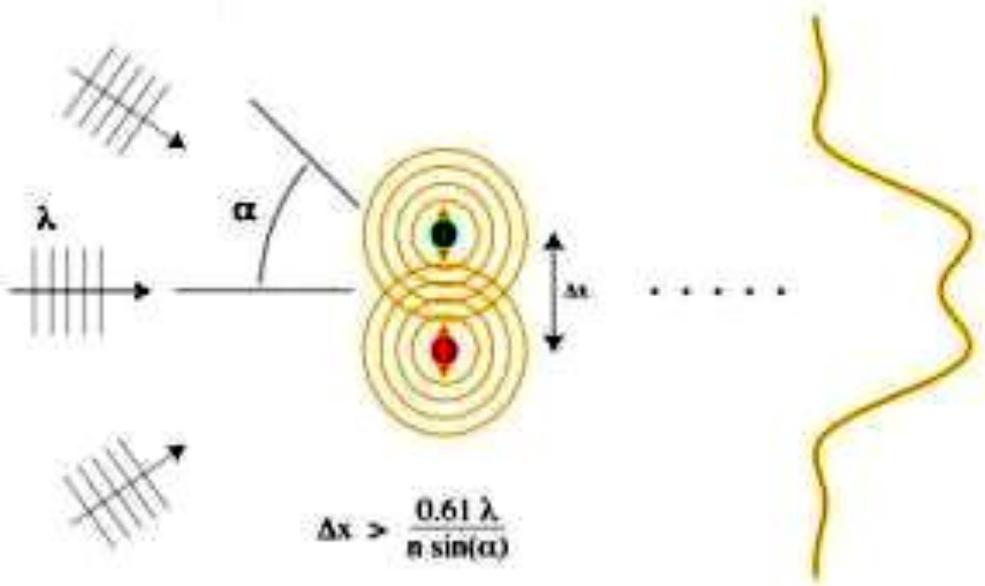


АСМ изображение хромосом



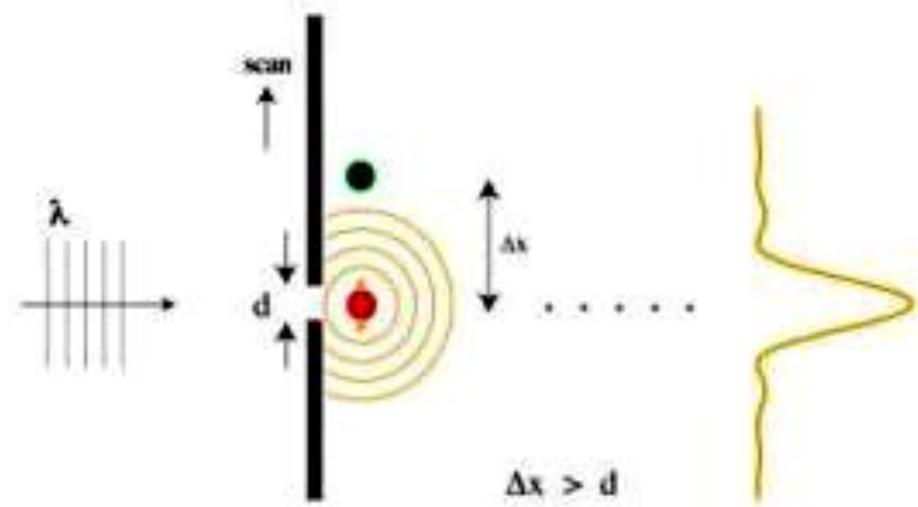
# Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

## Оптическая микроскопия

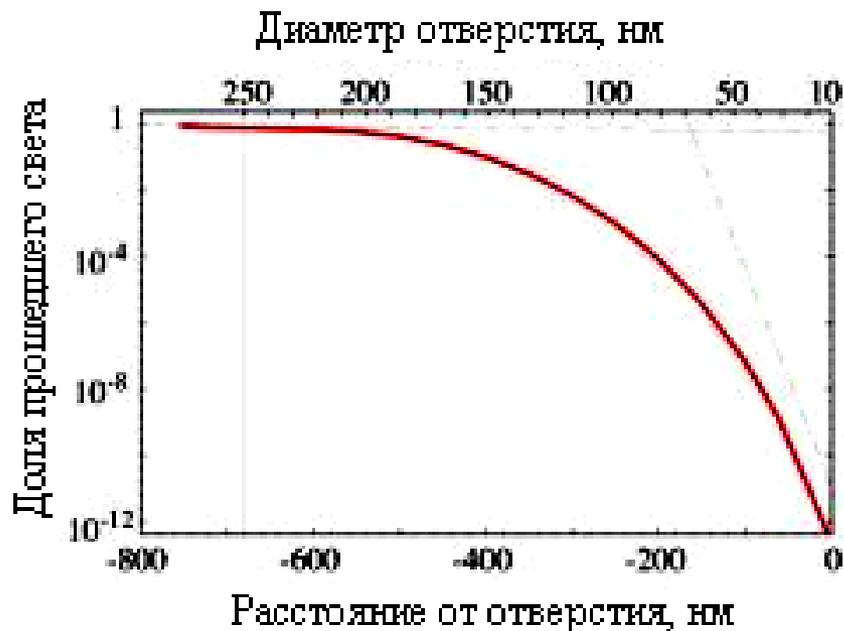


В результате дифракции свет проникает через отверстия, которые могут иметь диаметр меньше длины волны.

Разрешение ограничено дифракцией – правило Рэля

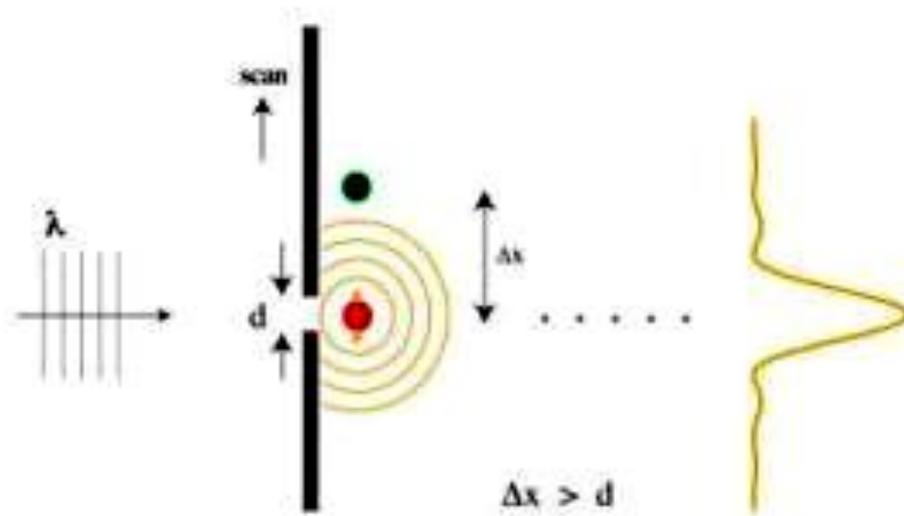


# Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

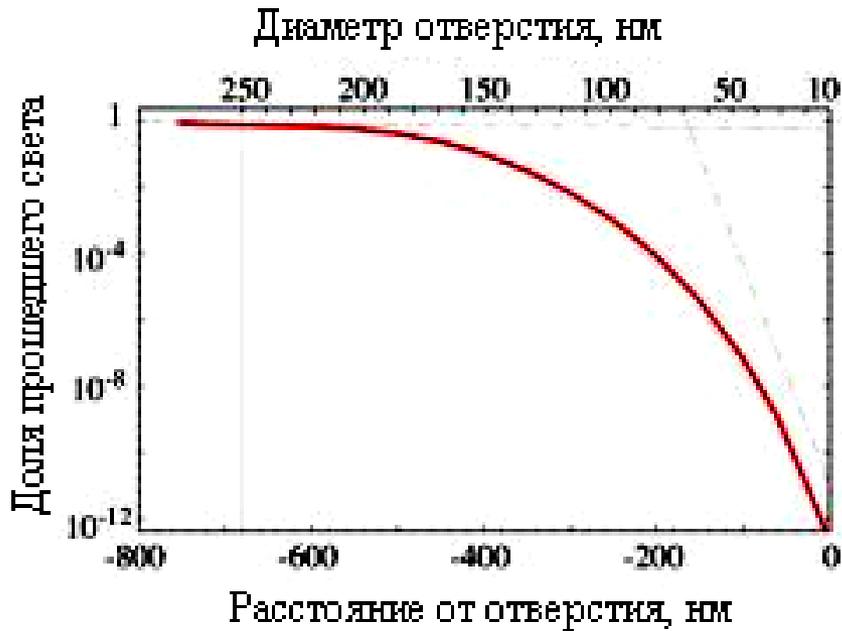


L. Novotny and D. W. Pohl, in *Photons and Local Probes*, NATO ASI Series E, p.21-33, Kluwer Academic, 1995.

В результате дифракции свет проникает через отверстия, которые могут иметь диаметр меньше длины волны.

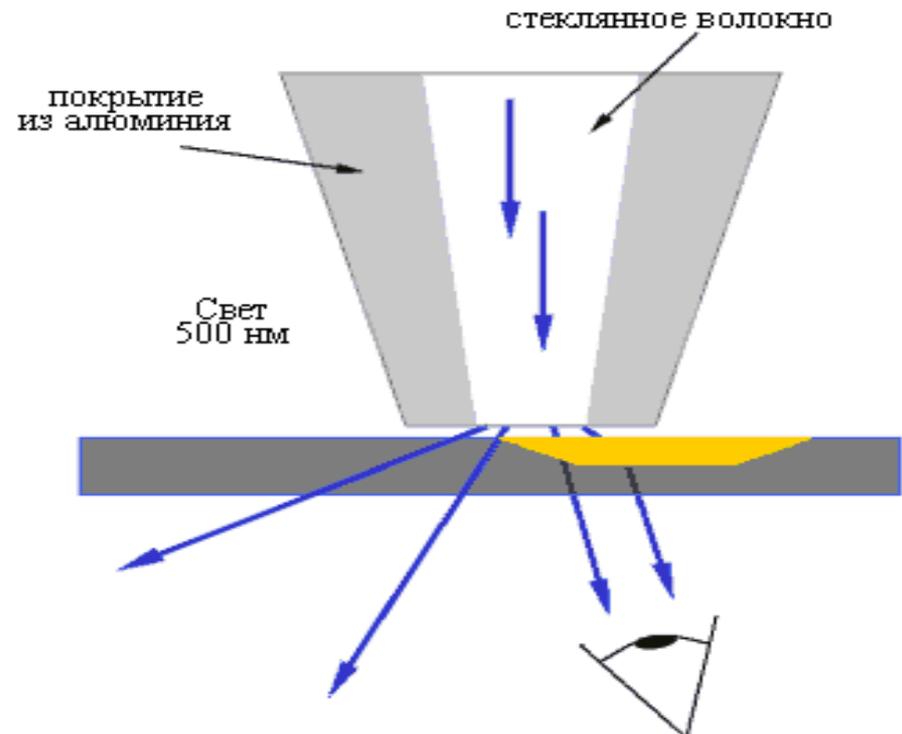
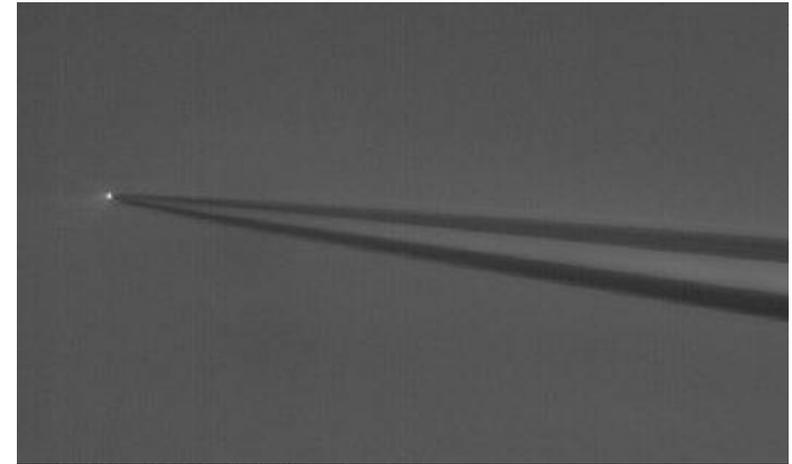


# Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

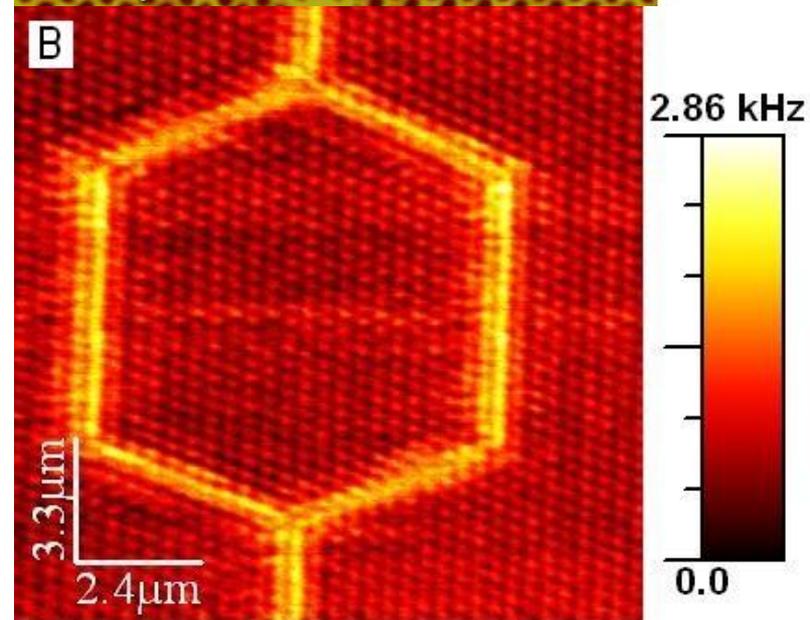
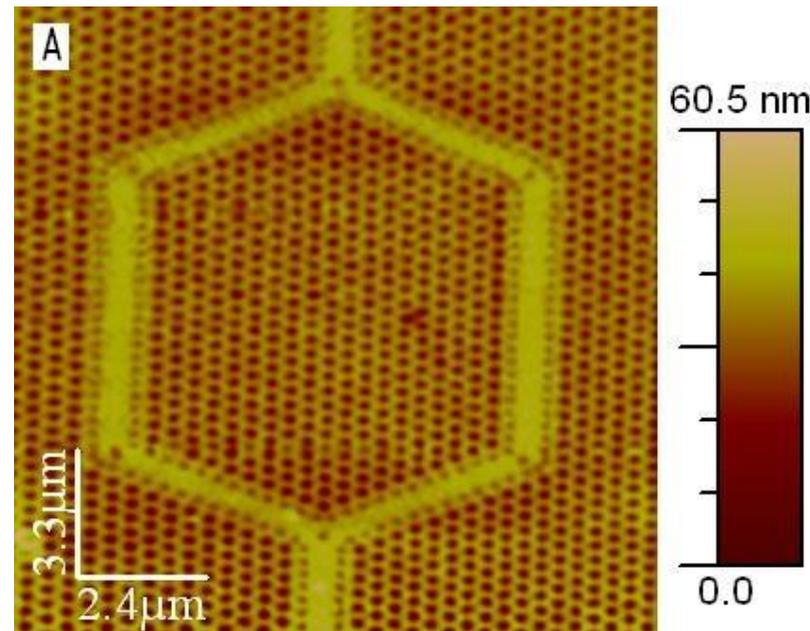
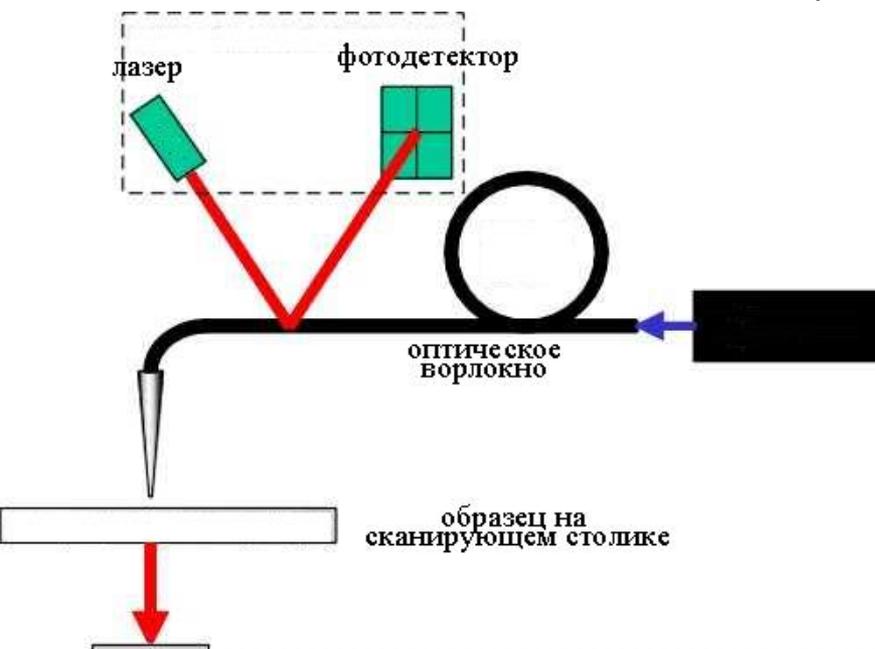


L. Novotny and D. W. Pohl, in *Photons and Local Probes*, NATO ASI Series E, p.21-33, Kluwer Academic, 1995.

Использование дифракции в области ближнего поля позволяет получить с помощью оптической системы разрешение, превышающее дифракционный предел.

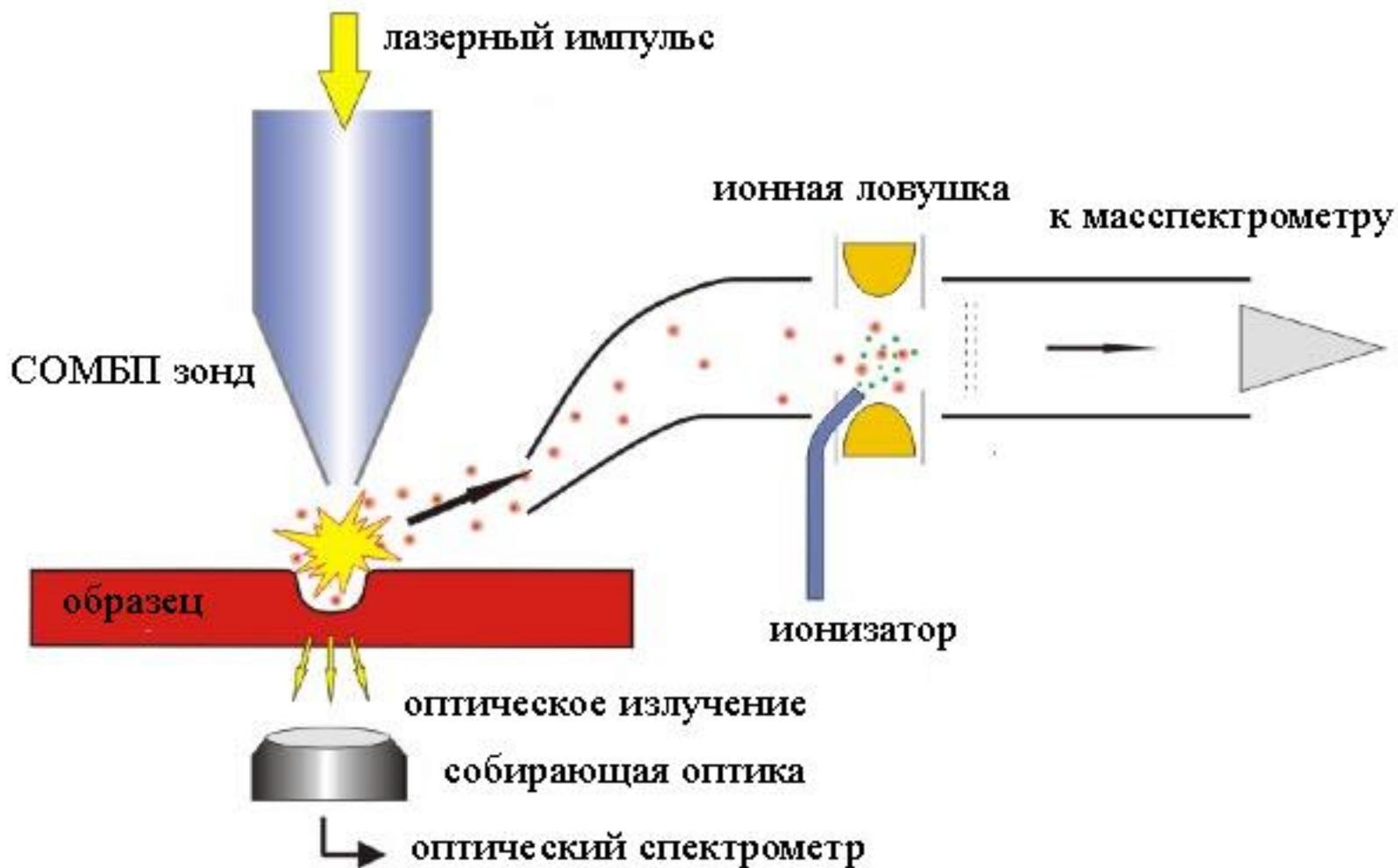


# Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

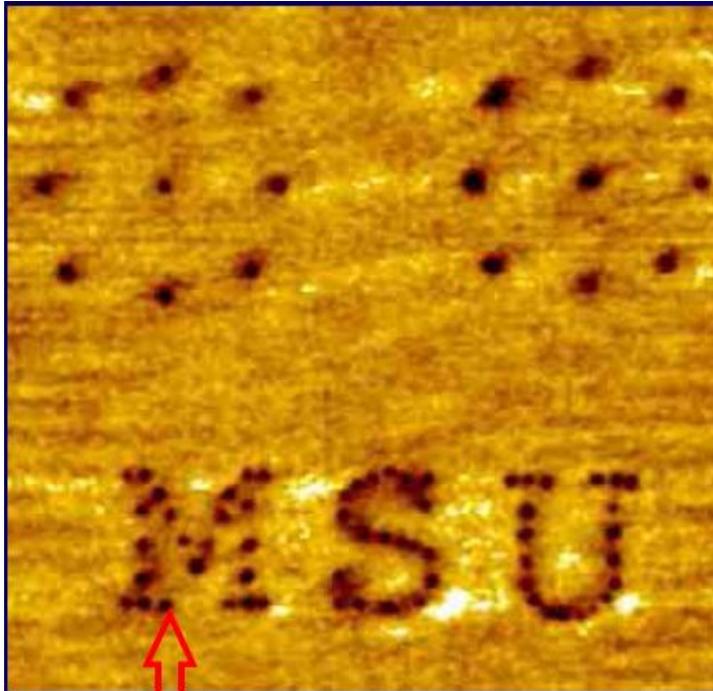


АСМ (А) и СОМБП (В)  
изображения фотонных  
кристаллов – разрешение  
100 нм.

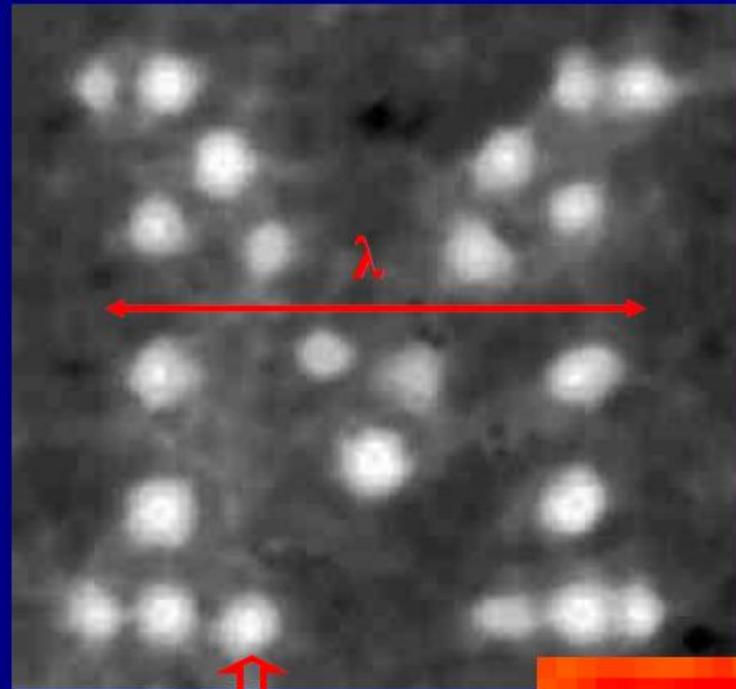
# Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)



# Использование сканирующего оптического микроскопа ближнего поля для сверхплотной оптической записи



Топография



Средний диаметр ямки 50 нм.

