

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Научно-образовательный центр по нанотехнологиям

межфакультетский курс лекций

«Фундаментальные основы нанотехнологий»

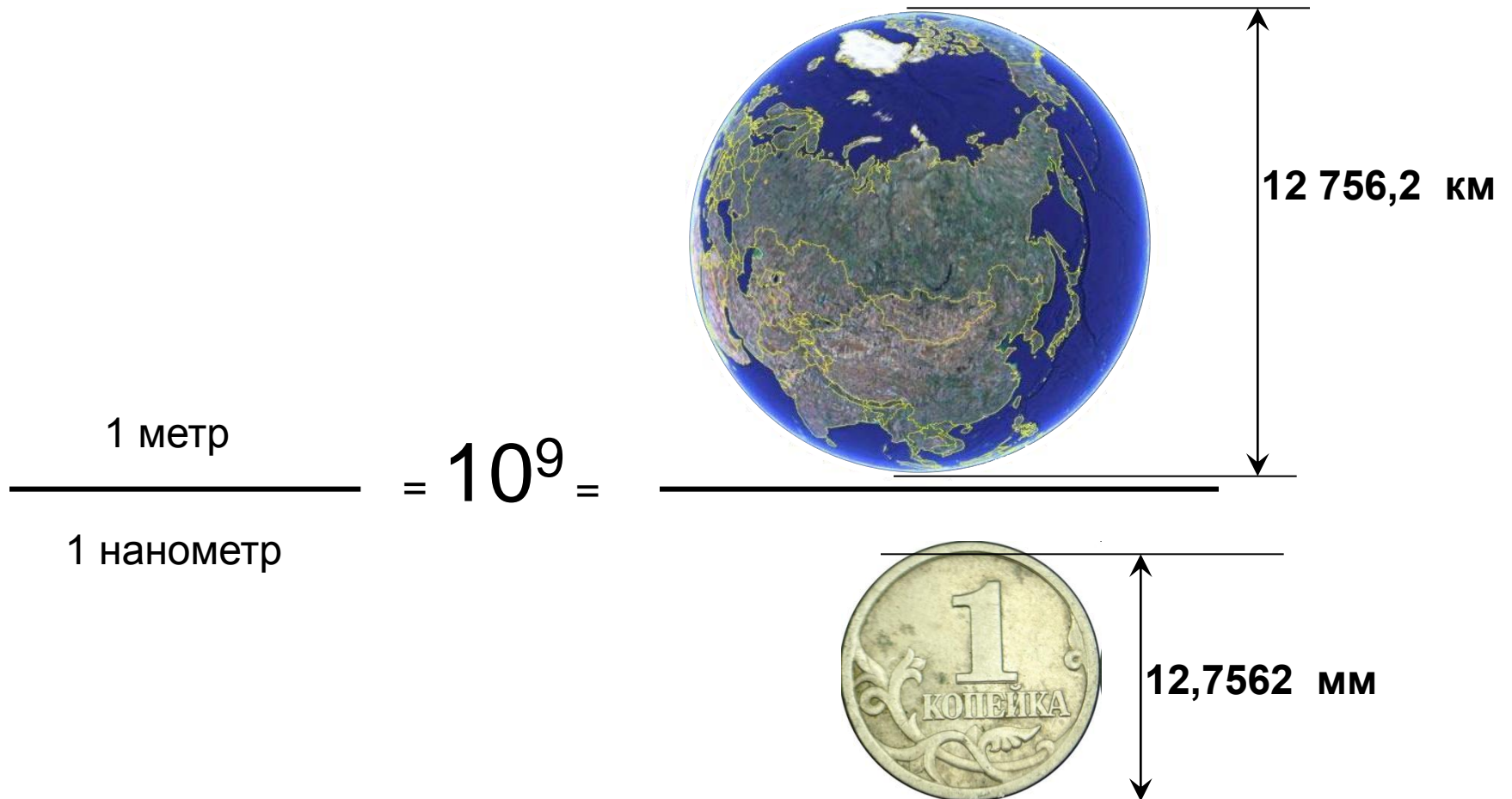
Лекция 2: Методы исследования и диагностика нанообъектов и наносистем.

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



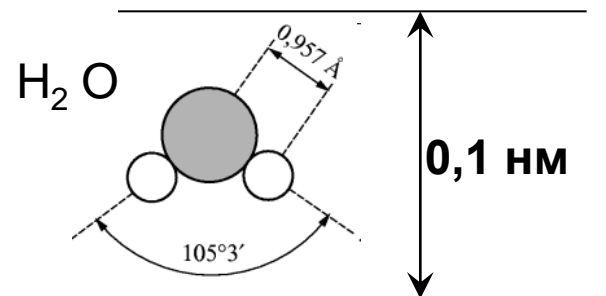
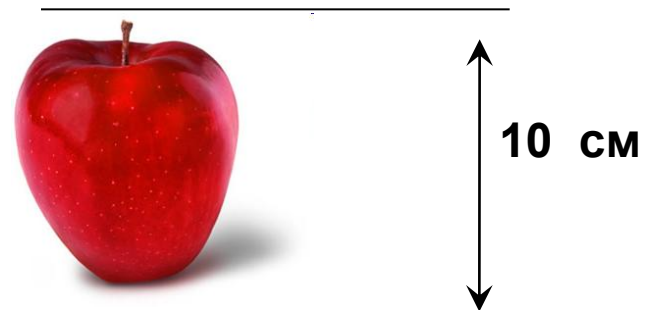
«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу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

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

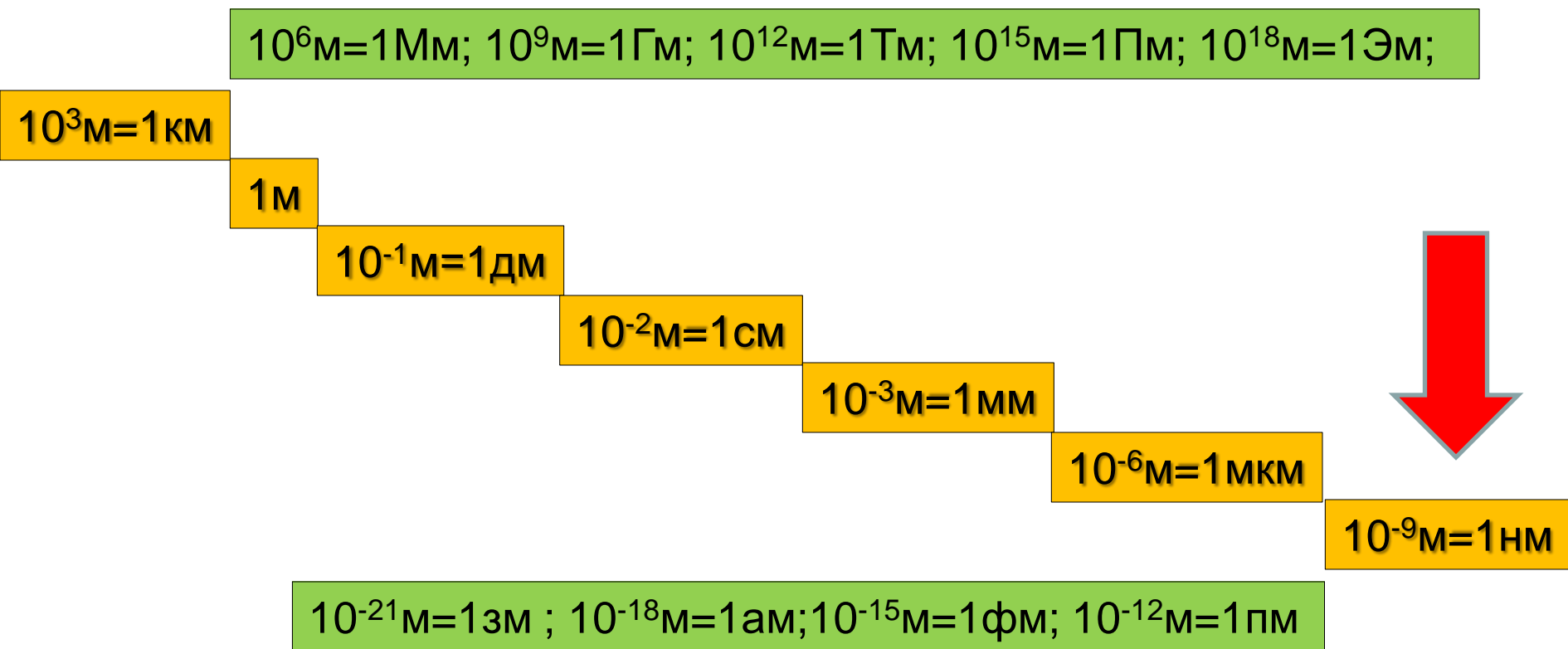
Линейный размер структурных единиц наноматериалов изменяется в пределах примерно от 1 до 1000 атомных (молекулярных) слоев.

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

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

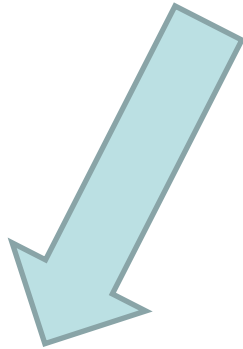


Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) отражает пространственный масштаб рассматриваемых явлений, процессов, структурированности (неоднородности) вещества.

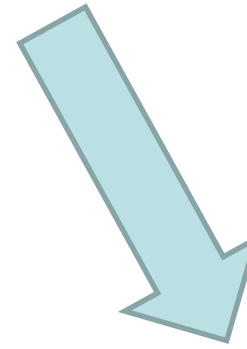


Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) подразумевает наличие качественных особенностей в закономерностях, определяющих протекание явлений и процессов и отсутствующих при других характерных масштабах.

Методы исследования и диагностика нанообъектов и наносистем.

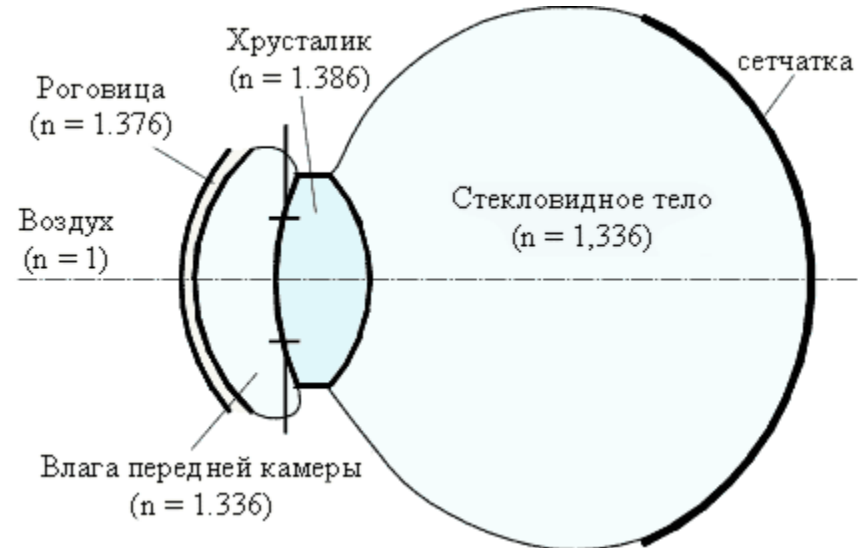
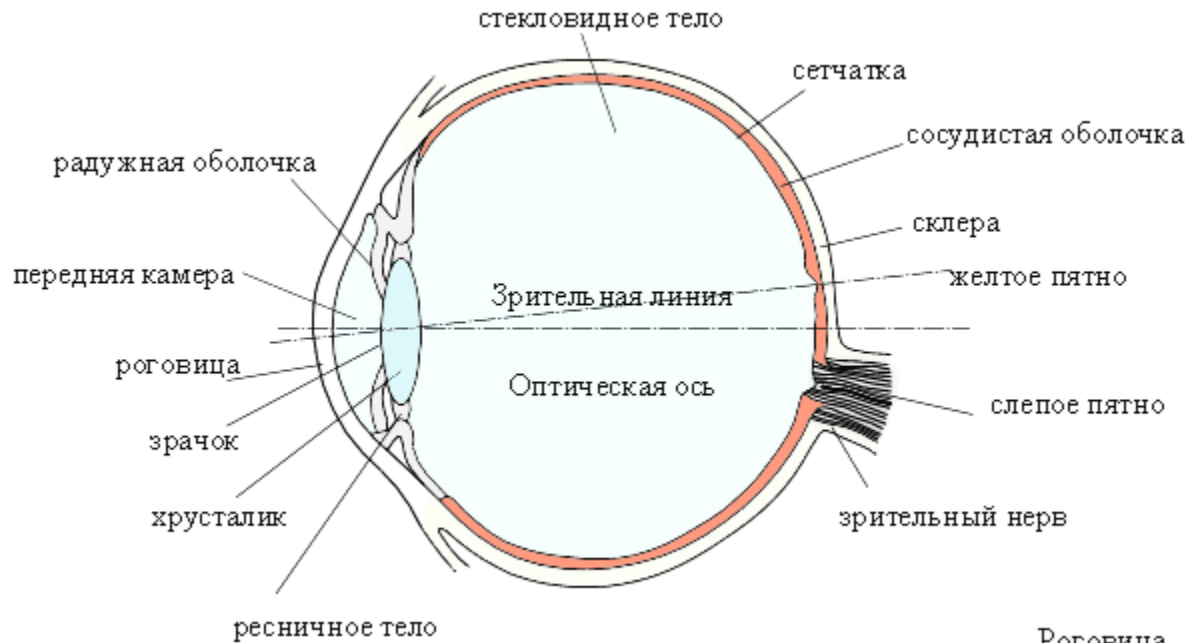


Изучение структуры материалов с нанометровым пространственным разрешением.

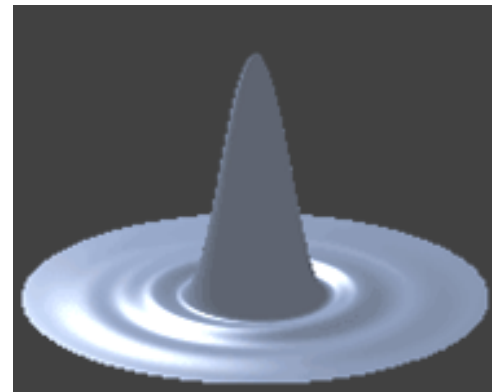
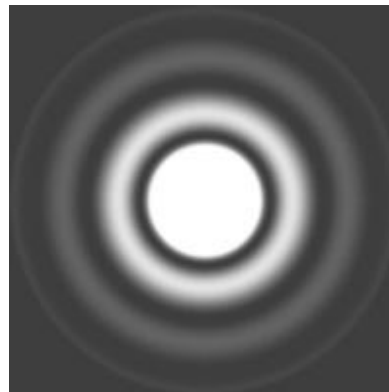
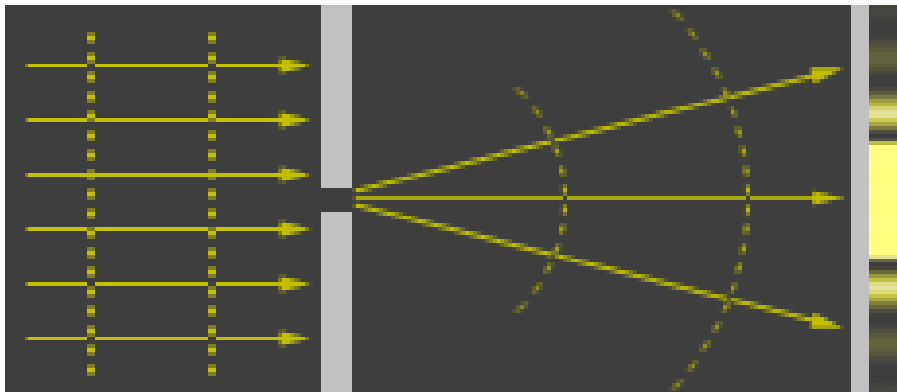


Изучение особенностей поведения и свойств наносистем, наноустройств, наноматериалов.

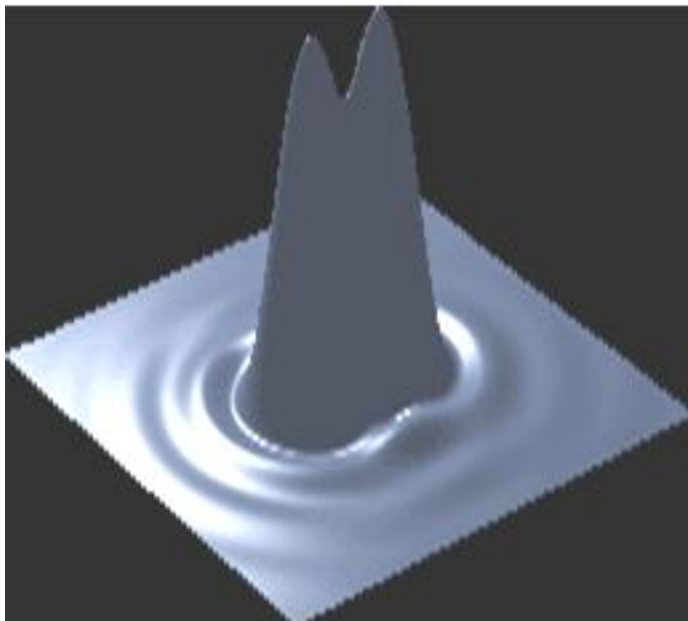
Пространственное разрешение: понятие, критерии



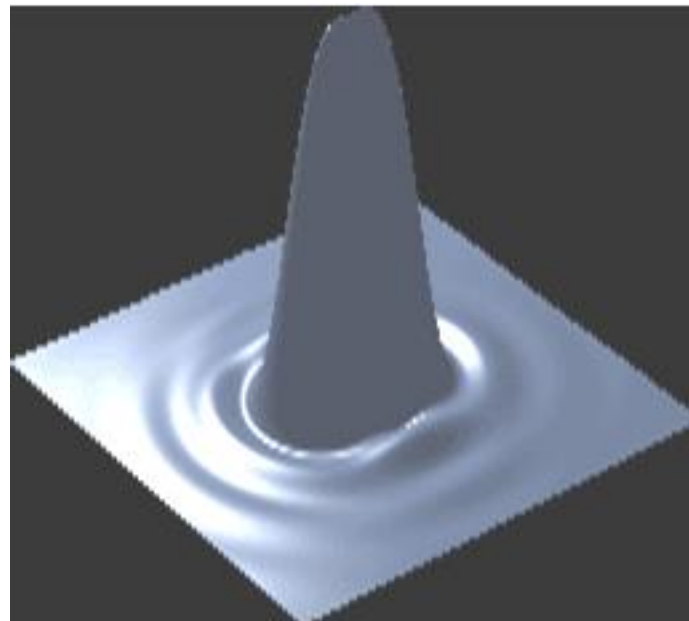
Дифракционный предел разрешающей способности



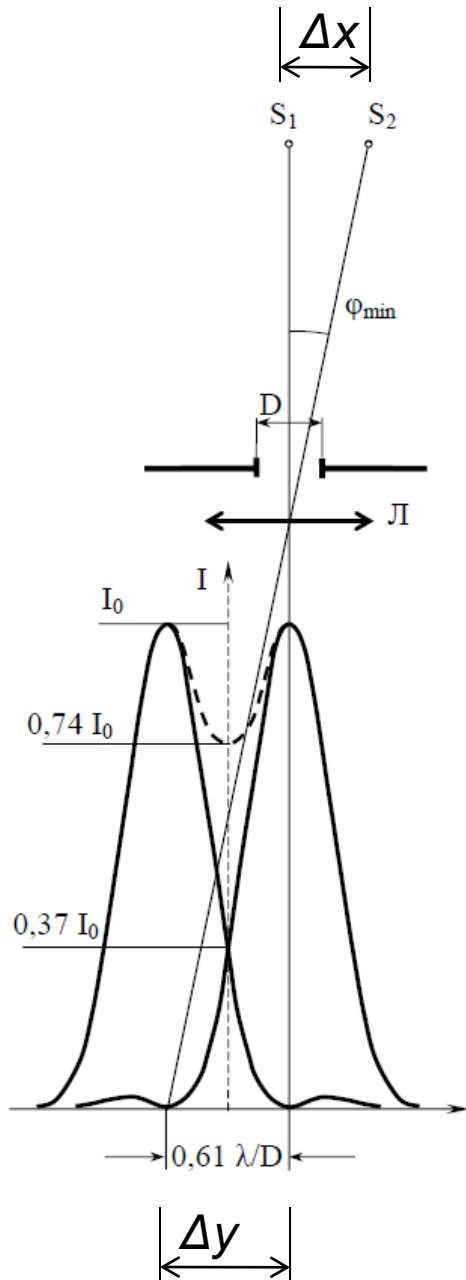
Два различных точечных источника



Точечные источники неразличимы



Дифракционный предел разрешающей способности



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

$$D \gg \lambda$$

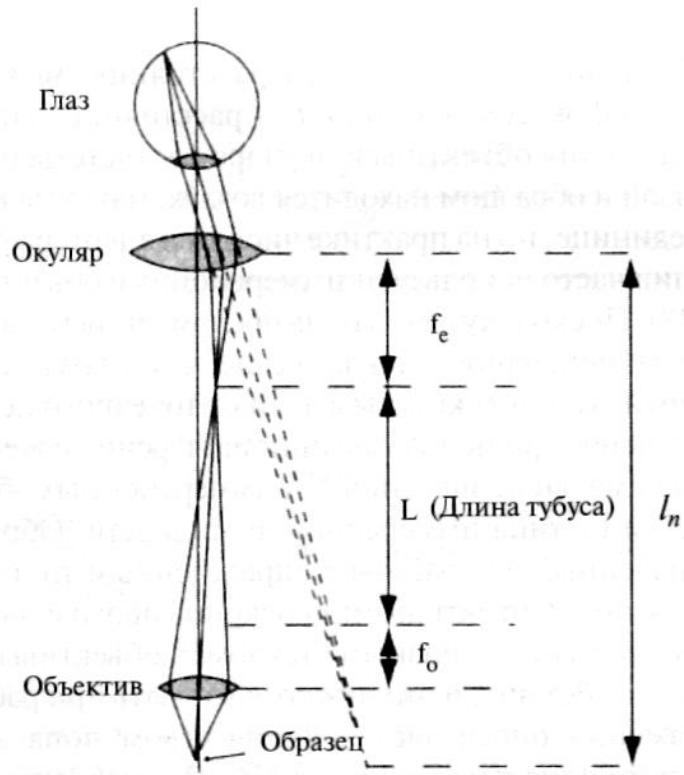
$$\varphi > 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Критерий разрешения Рэля: $0,74 I_0$

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

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 $NA = n \sin \alpha$

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

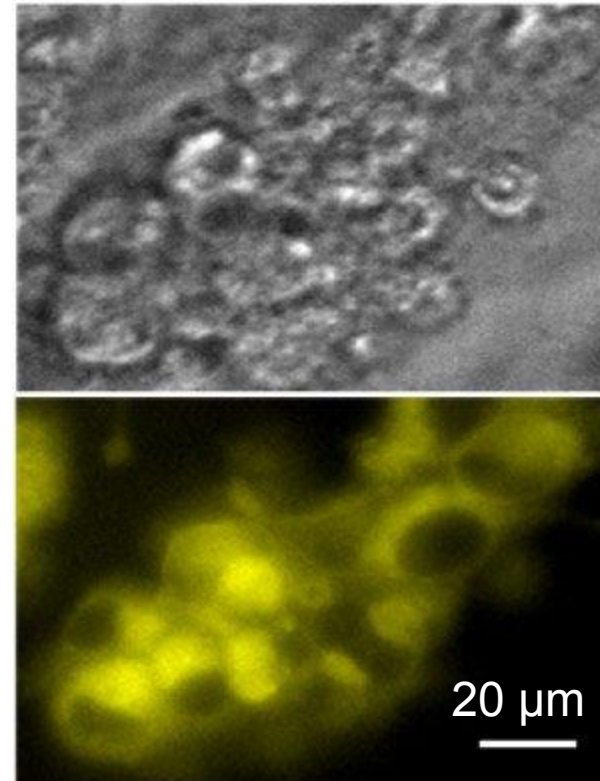
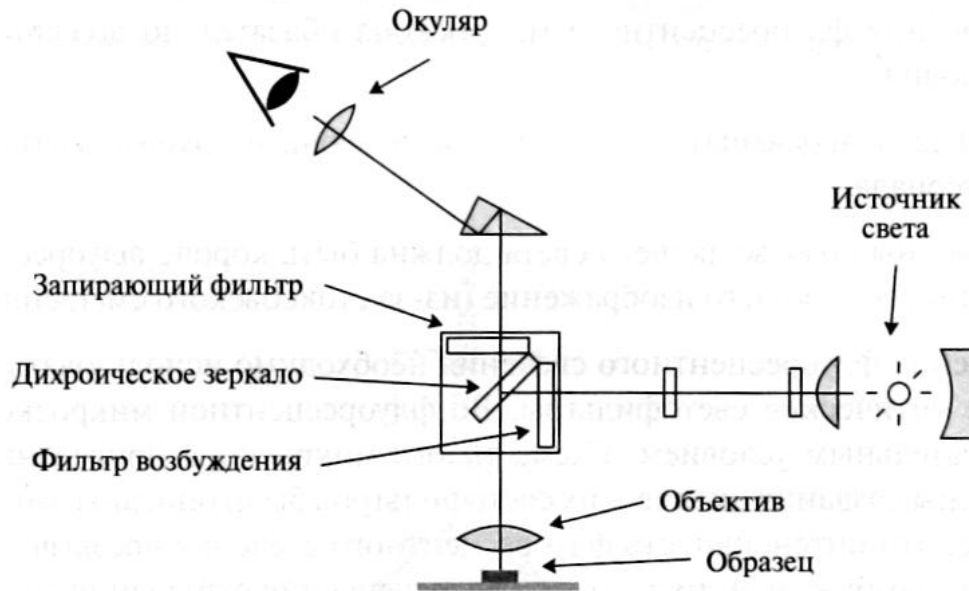
$n \sim 1,56$

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

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

Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

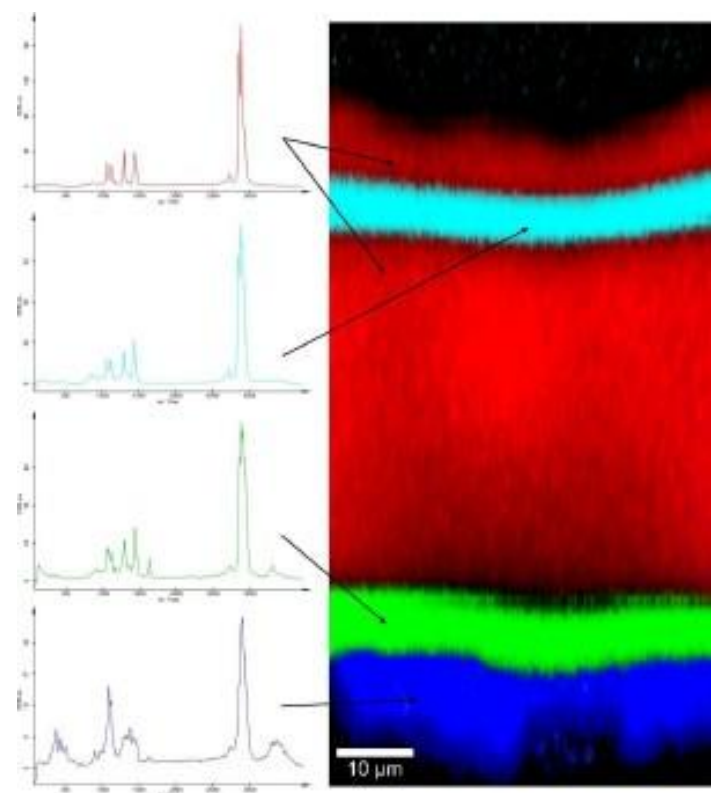
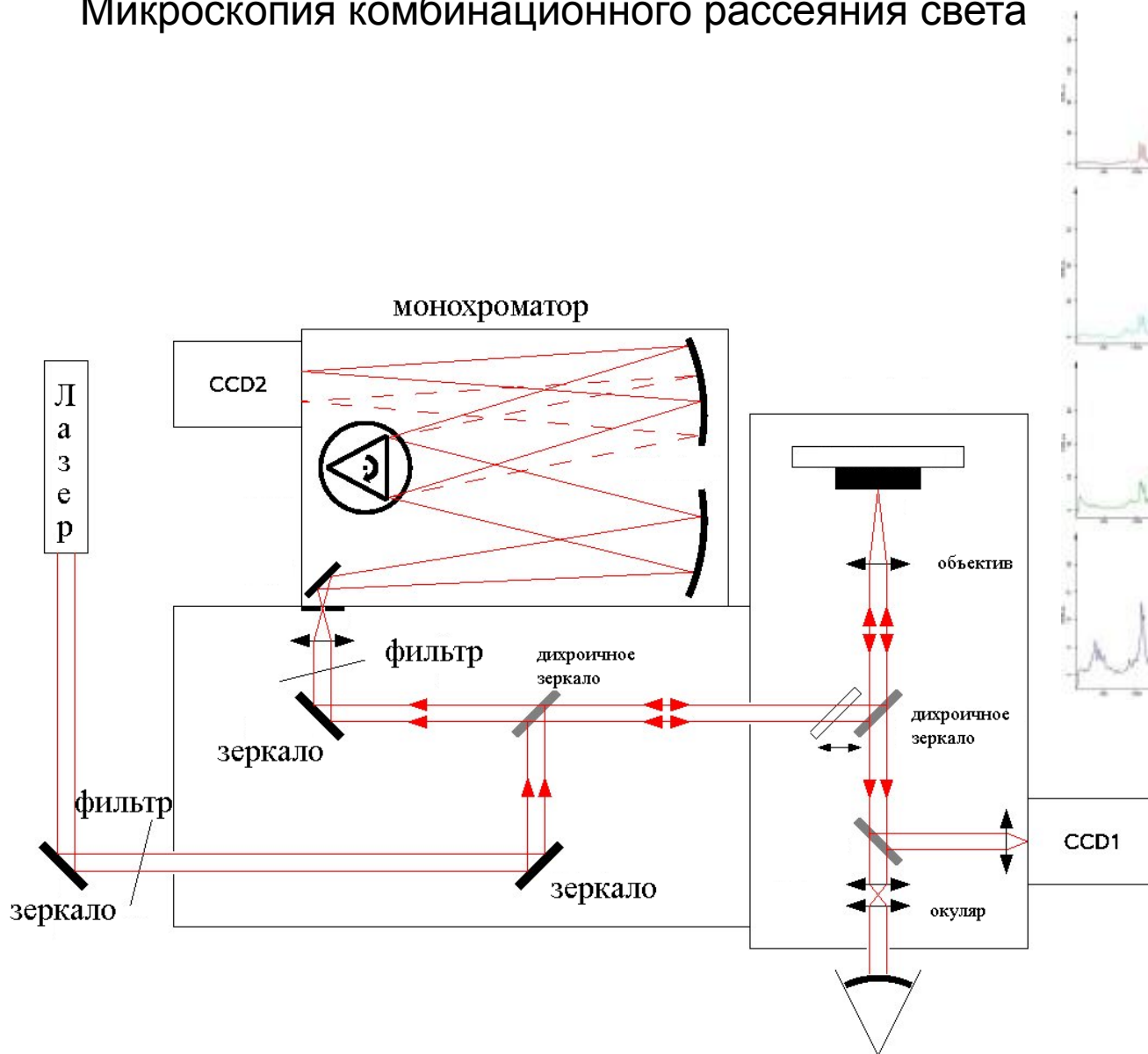
Флуоресцентная микроскопия



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

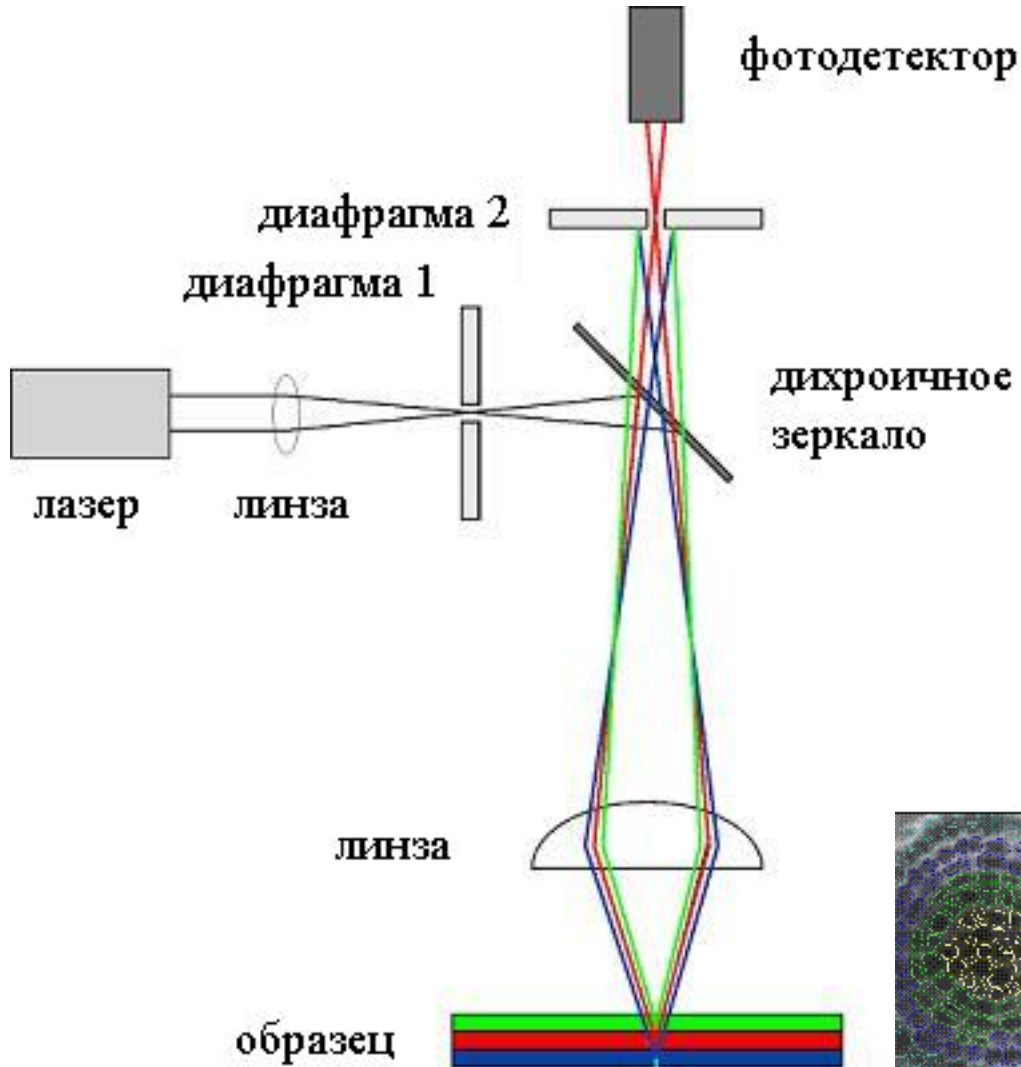
Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

Микроскопия комбинационного рассеяния света

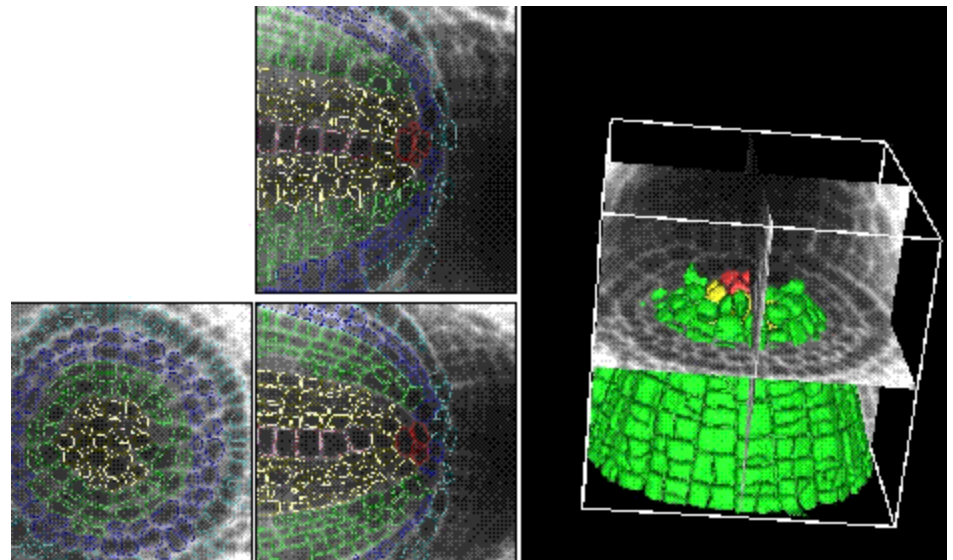


Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

Конфокальная микроскопия

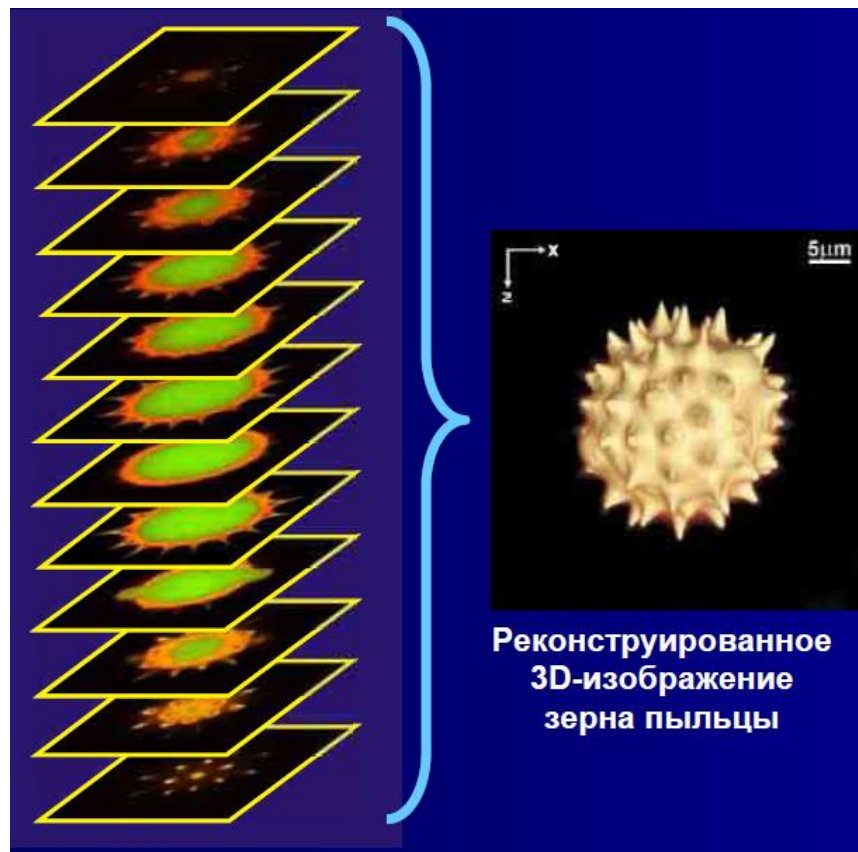
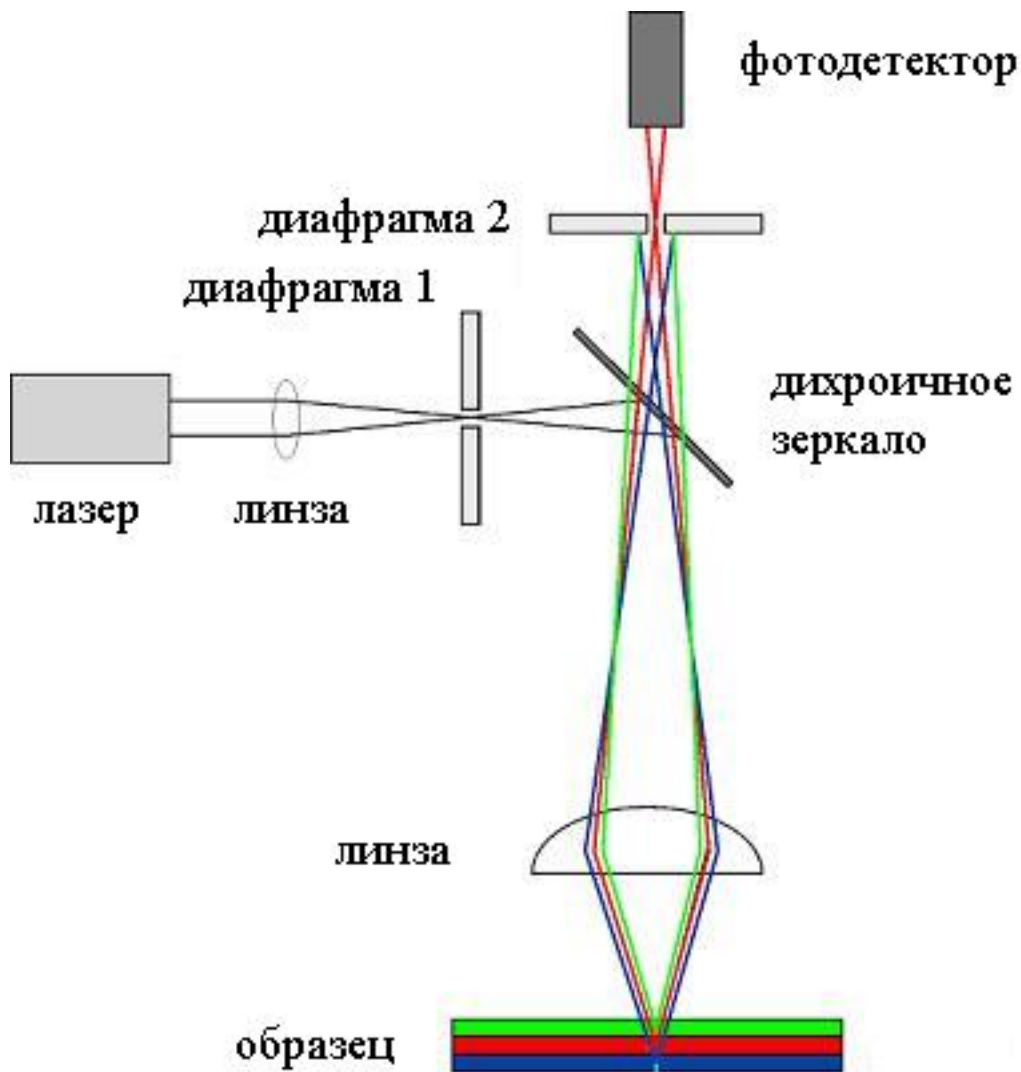


3D изображение биологической клетки, полученное с помощью конфокальной люминесцентной микроскопии.



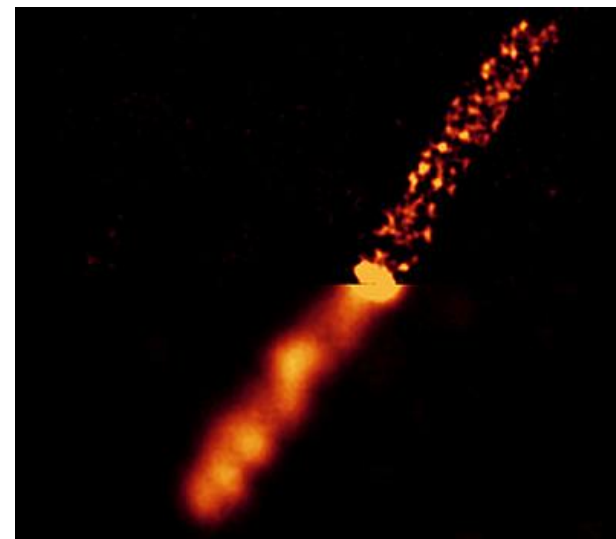
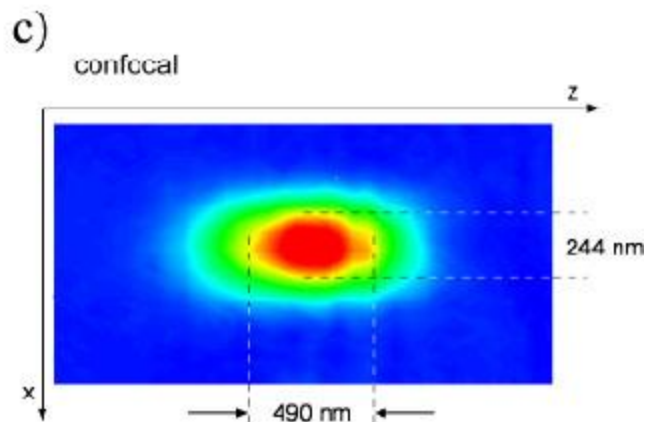
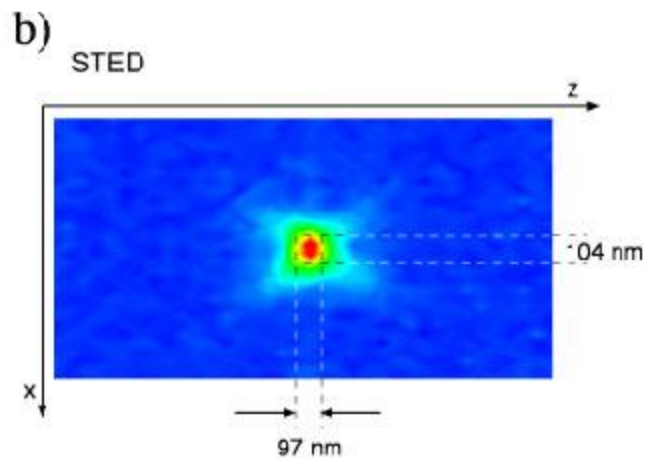
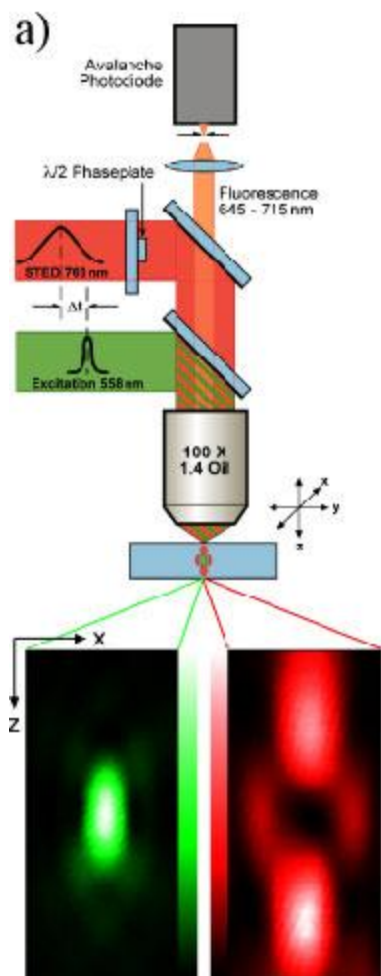
Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

Конфокальная микроскопия



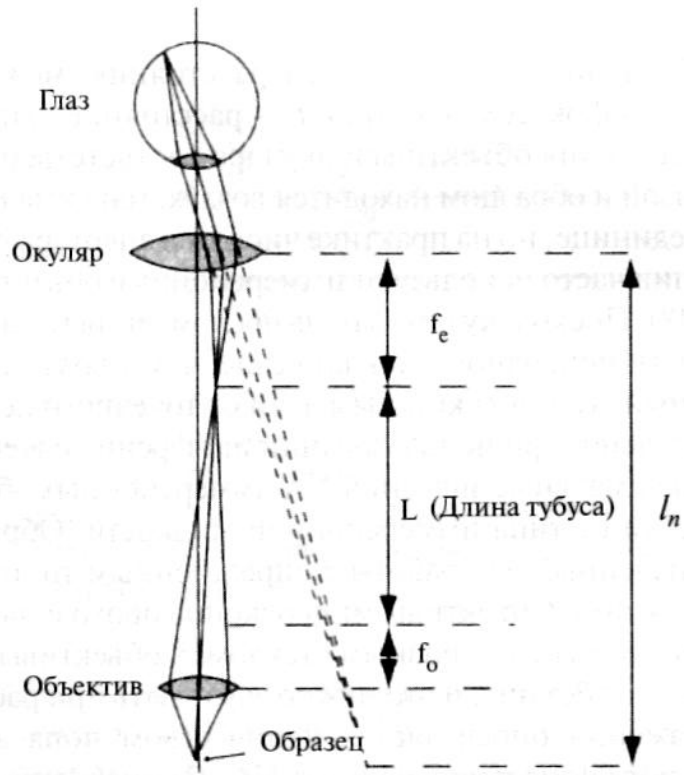
Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

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 $NA = n \sin \alpha$

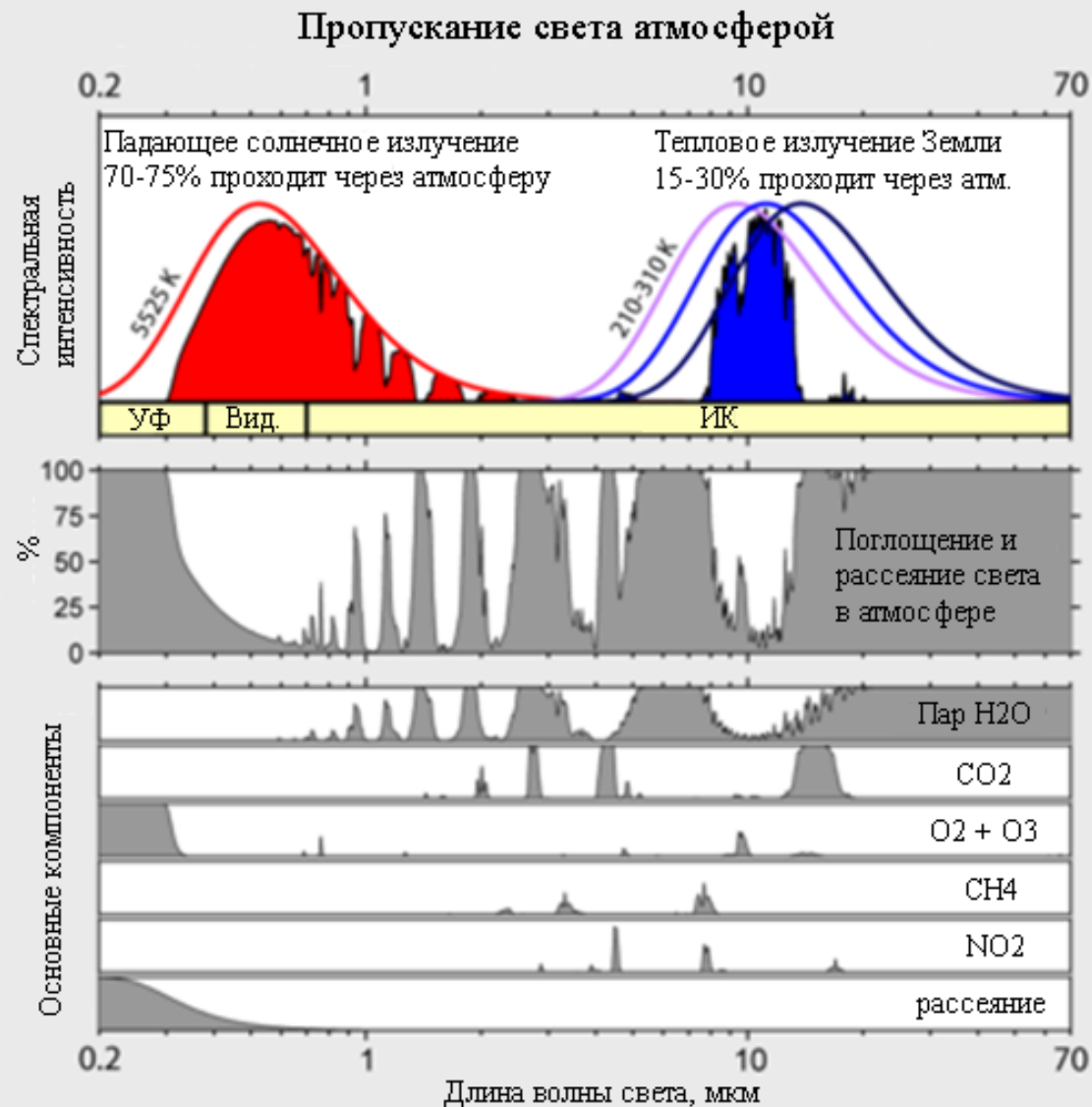
$\alpha \sim 70^\circ$ ($\sin \alpha \sim 0,94$)

$n \sim 1,56$

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

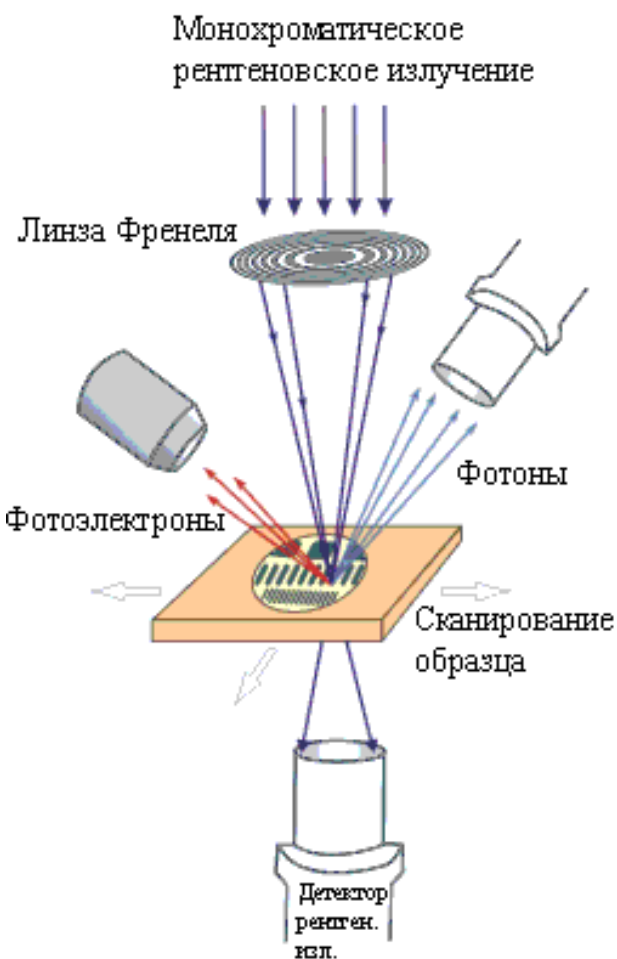
$$d_{\min} \sim 200 \text{ nm}$$

Использование оптической микроскопии ограничено окном прозрачности атмосферы

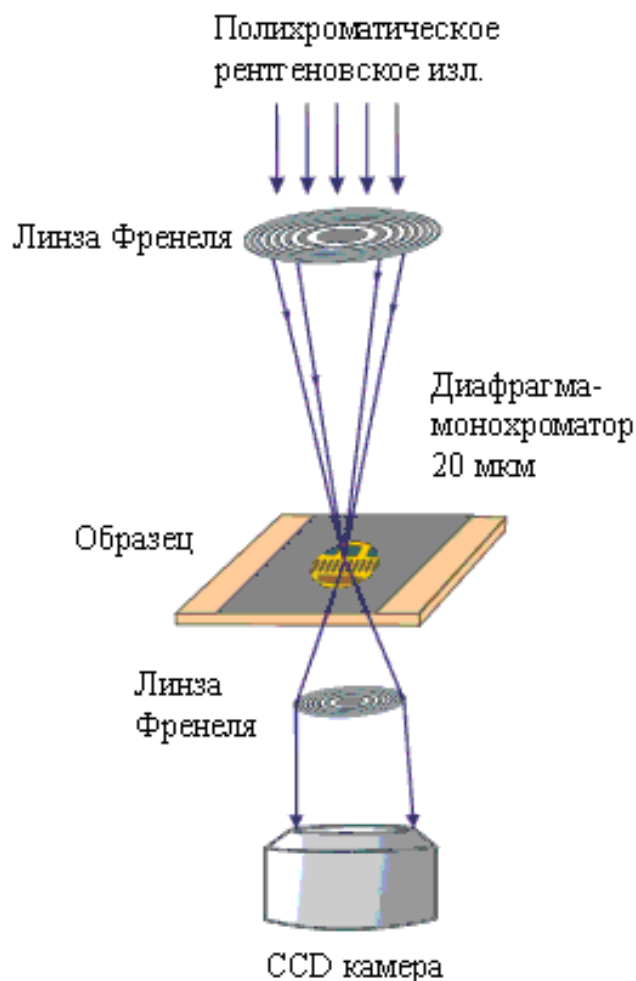


Рентгеновская микроскопия (длина волны $\sim 0,1$ нм)

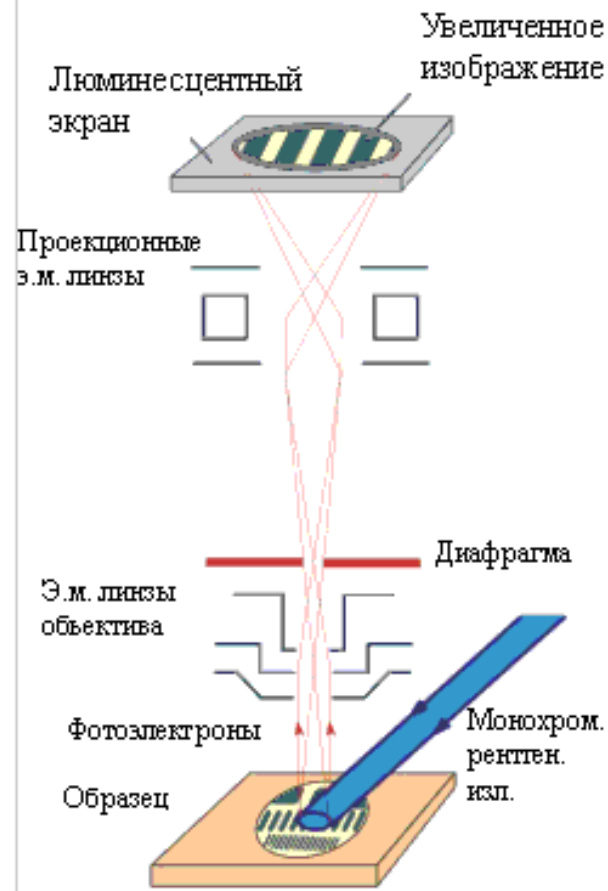
Сканирующий просвечивающий рентгеновский микроскоп



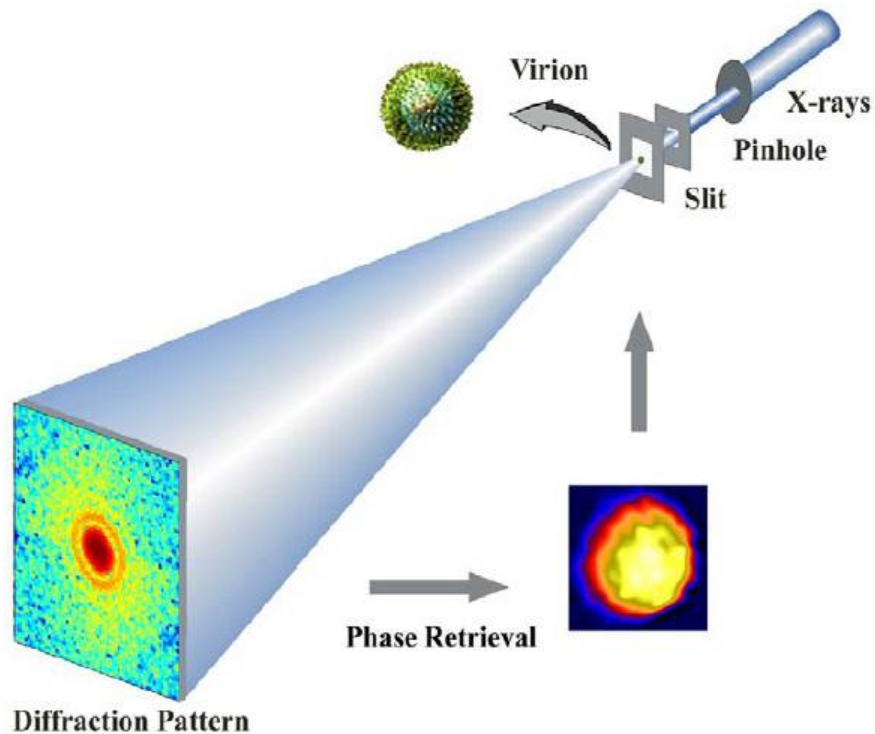
Просвечивающий рентгеновский микроскоп



Флуоресцентный рентгеновский микроскоп

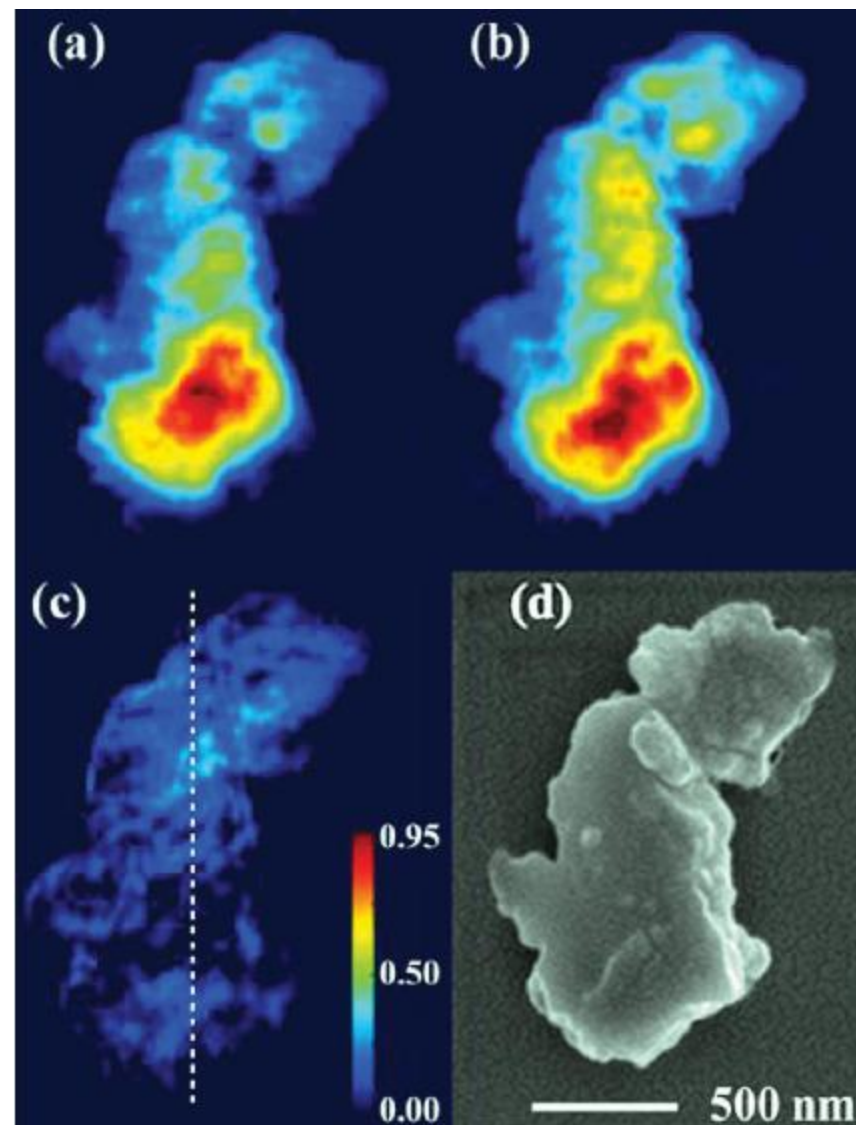


Рентгеновская микроскопия (длина волны $\sim 0,1$ нм)



Рентгеновский снимок мышиноного
вируса герпеса

PHYSICAL REVIEW LETTERS
100, 025504 (2008)



Распределение висмута в
кристалле кремния

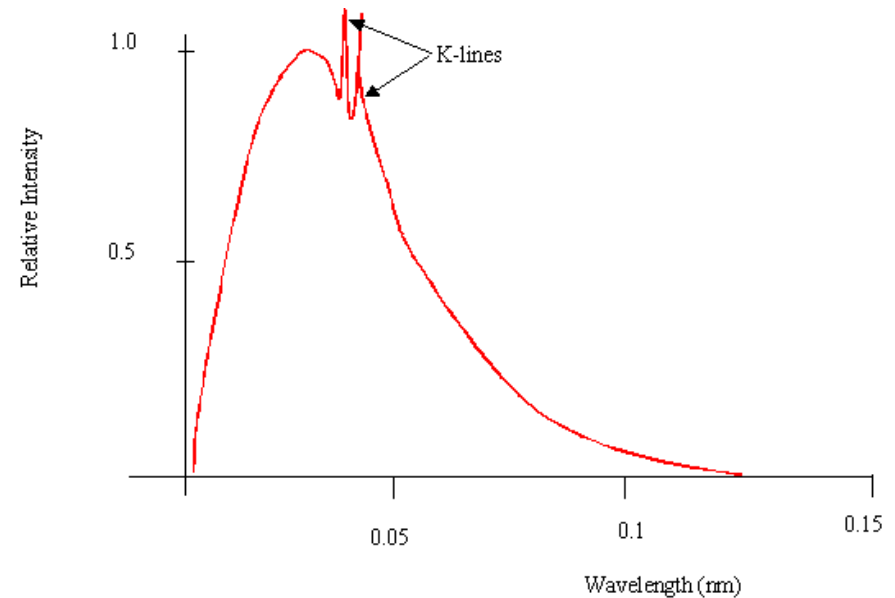
Рентгеновское излучение: $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$,

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж сек – постоянная Планка; ε - энергия кванта; c – скорость света; ν - частота и λ - 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⁻¹ 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

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

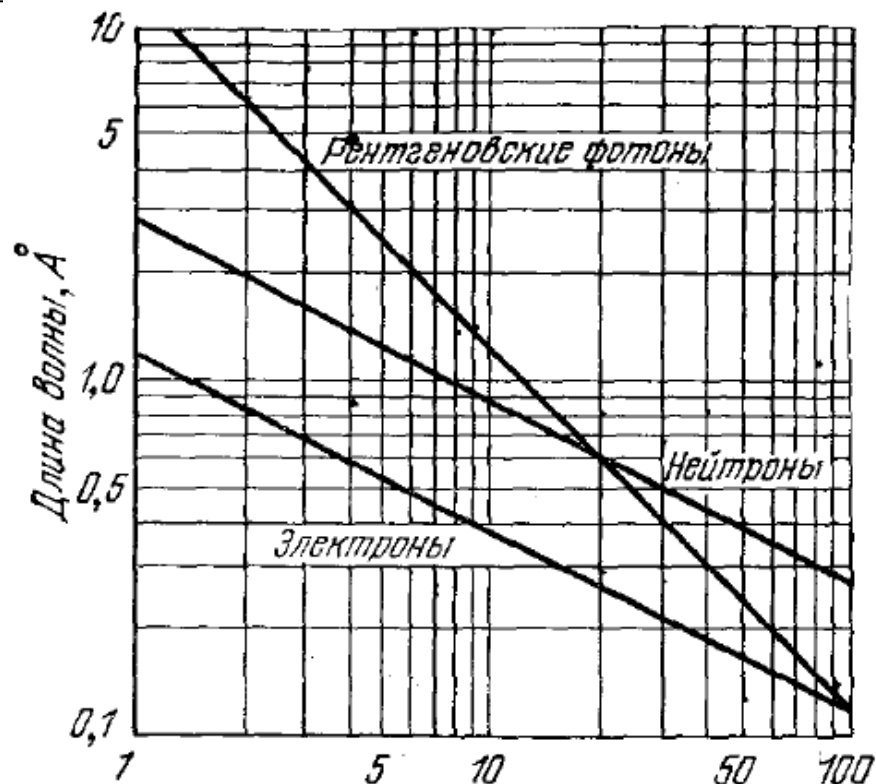
Для $\lambda = 1 \text{ Å}$, энергия нейтронов должна быть $\varepsilon \approx 0,08 \text{ эВ}$.

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.

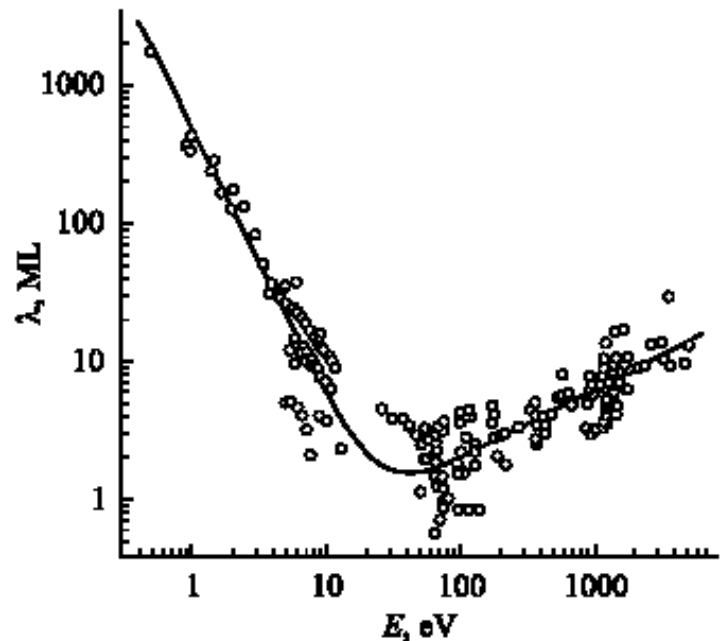
Глубина проникновения таких электронов около 5 - 10 Å.



Энергия фотона, кэВ
Энергия нейтрона, 0,01эВ
Энергия электрона, 100эВ

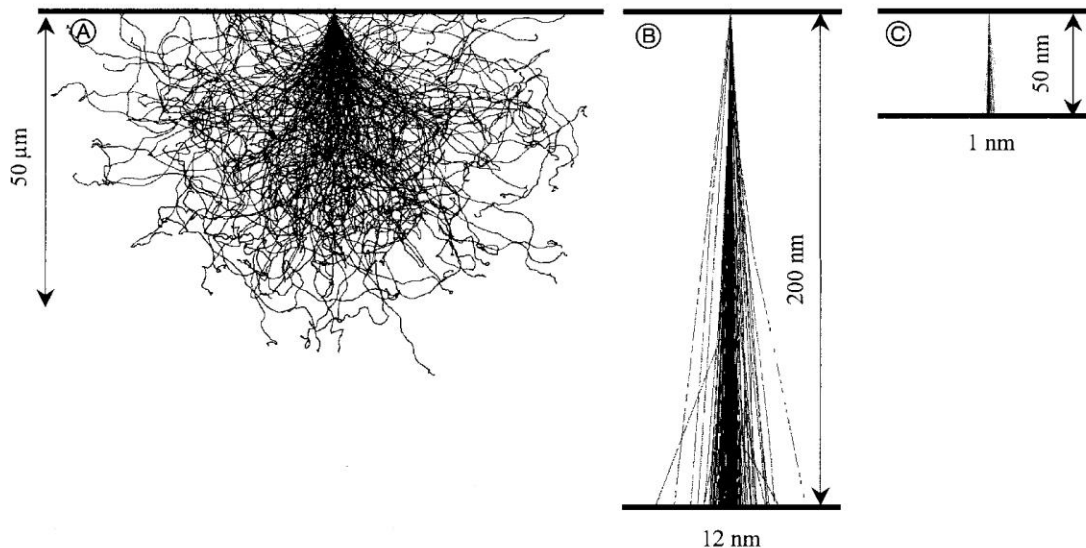
Зависимость длины волны от энергии частиц для фотонов, нейтронов и электронов.

Взаимодействие электронов с веществом



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

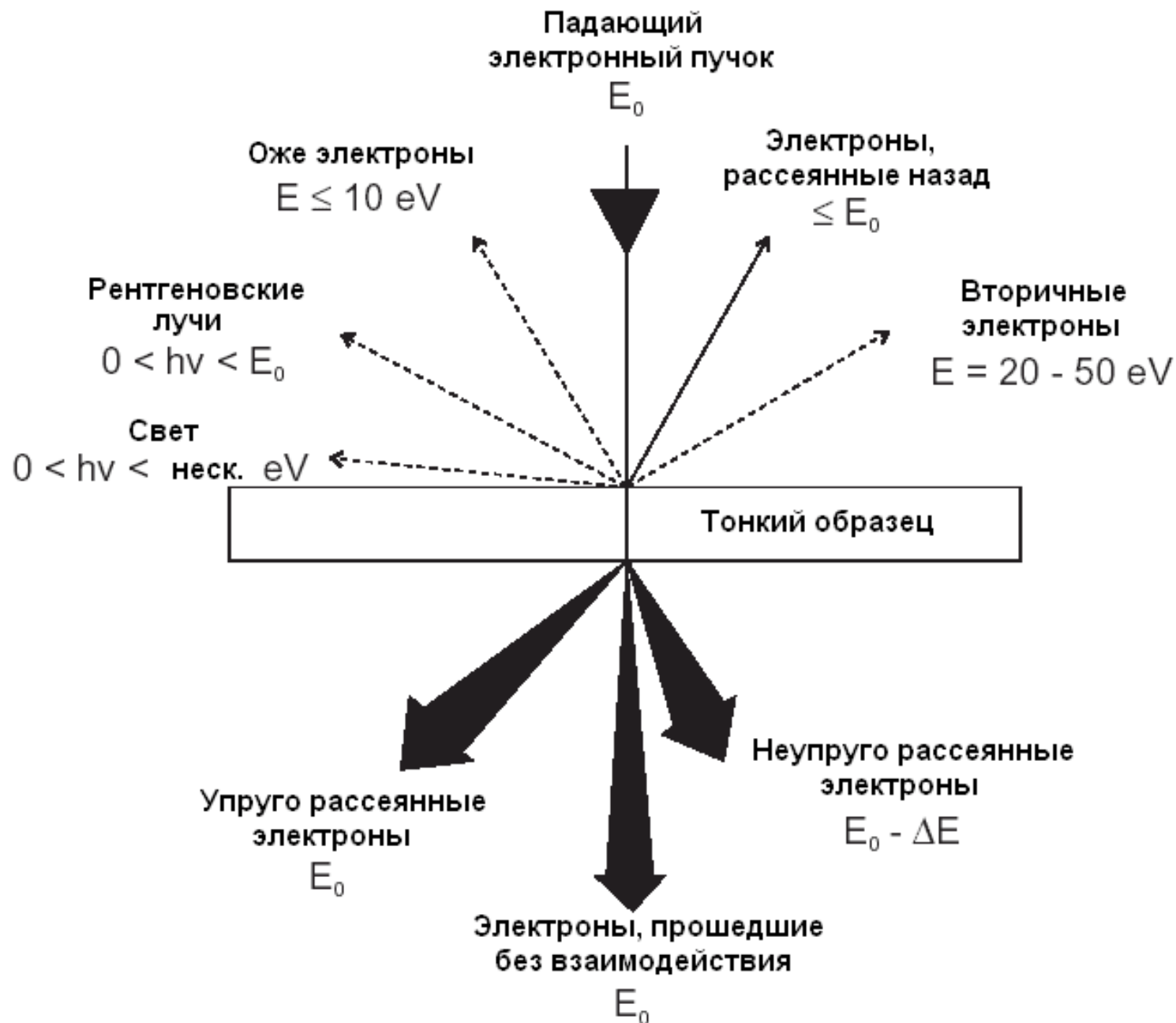
Глубина проникновения или выхода электрона при взаимодействии с конденсированным веществом составляет несколько ангстрем в диапазоне энергий 5...5000 эВ.



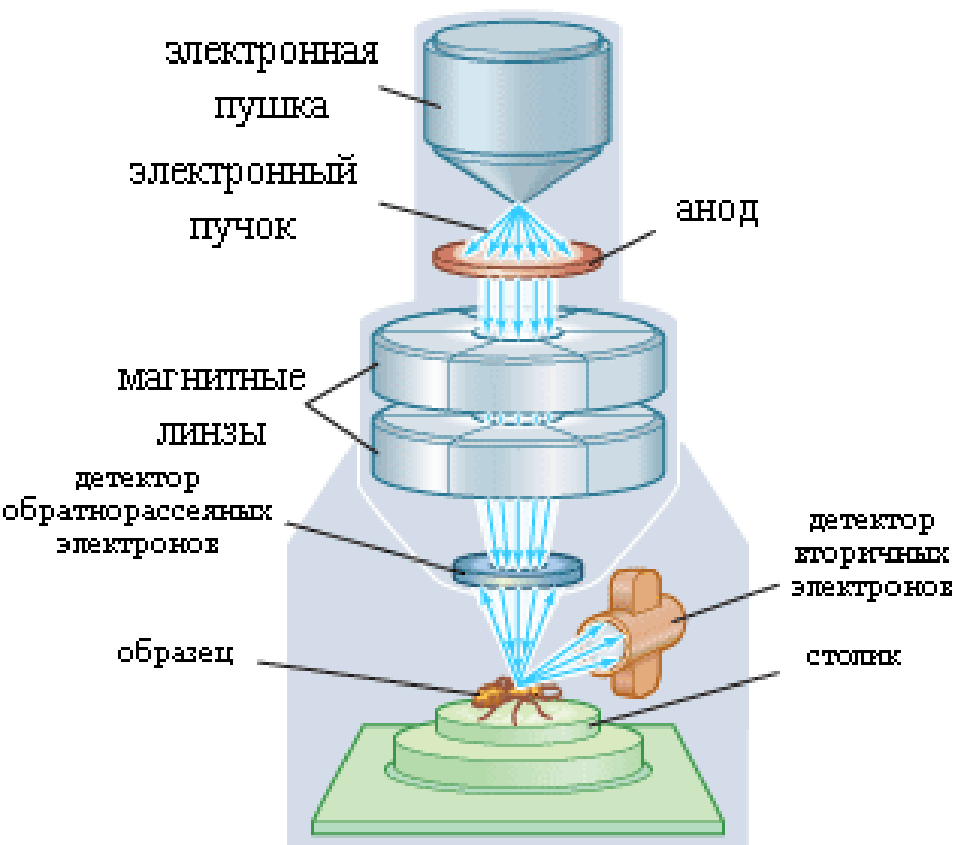
Электроны с высокой энергией проникают на большую глубину.

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

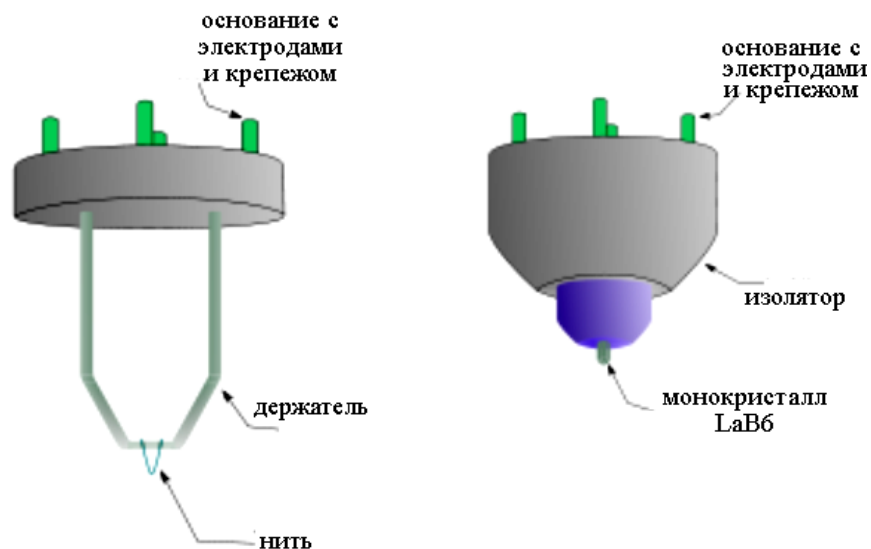
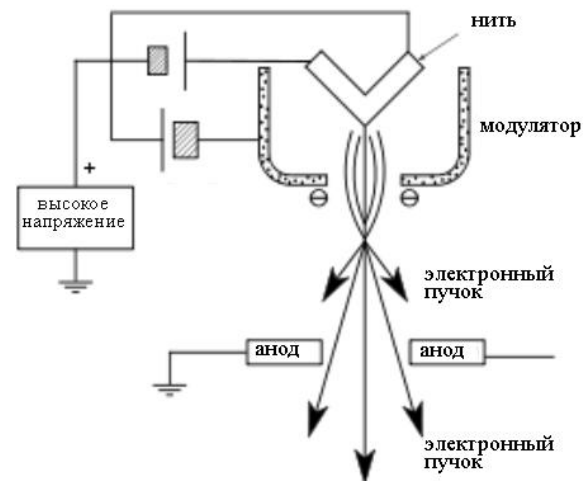
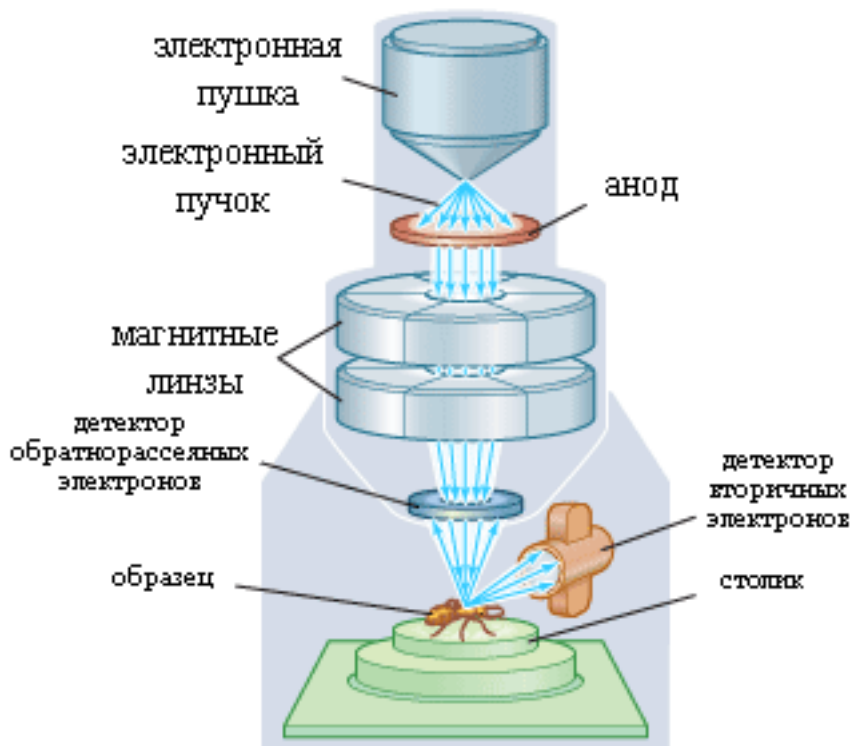


Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

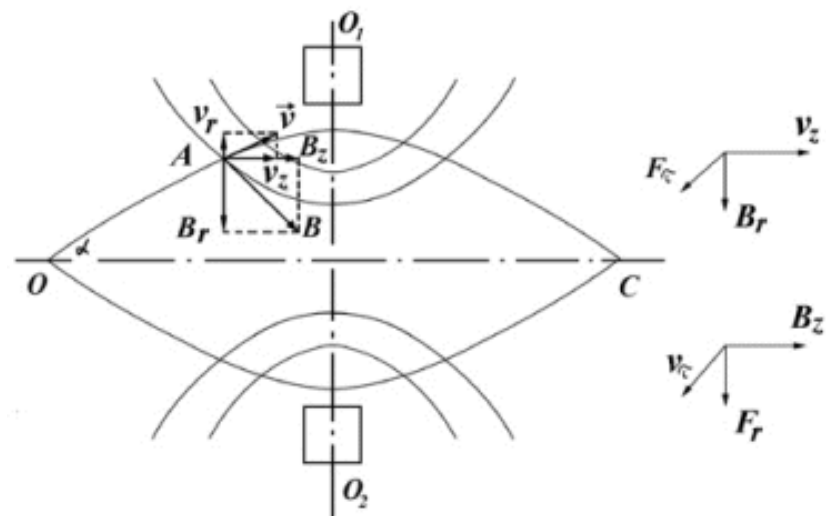
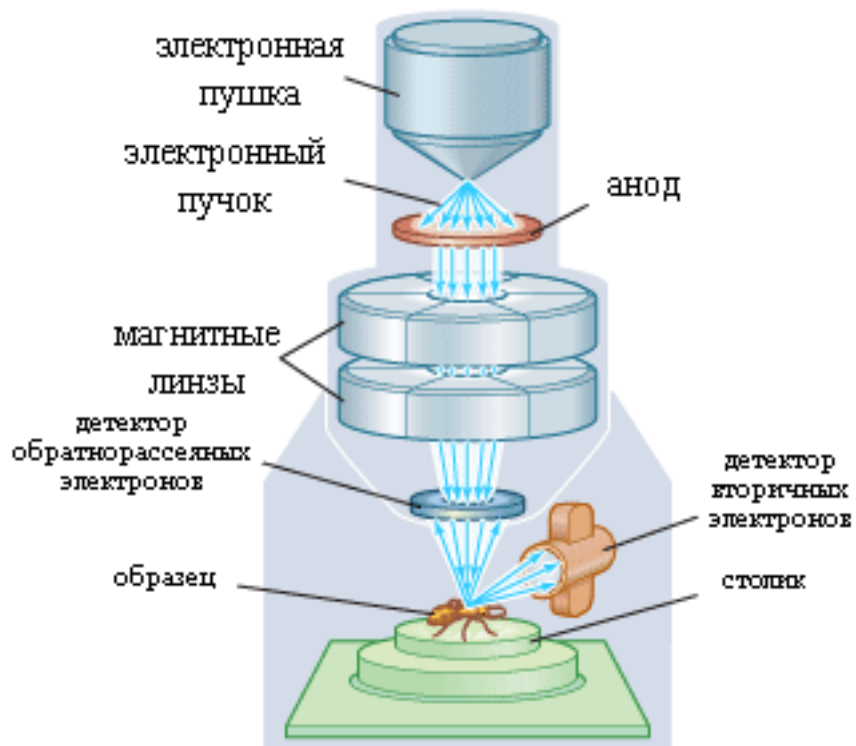


Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

Схема устройства электронной пушки.

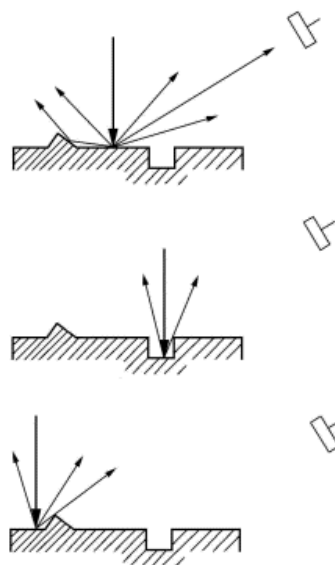
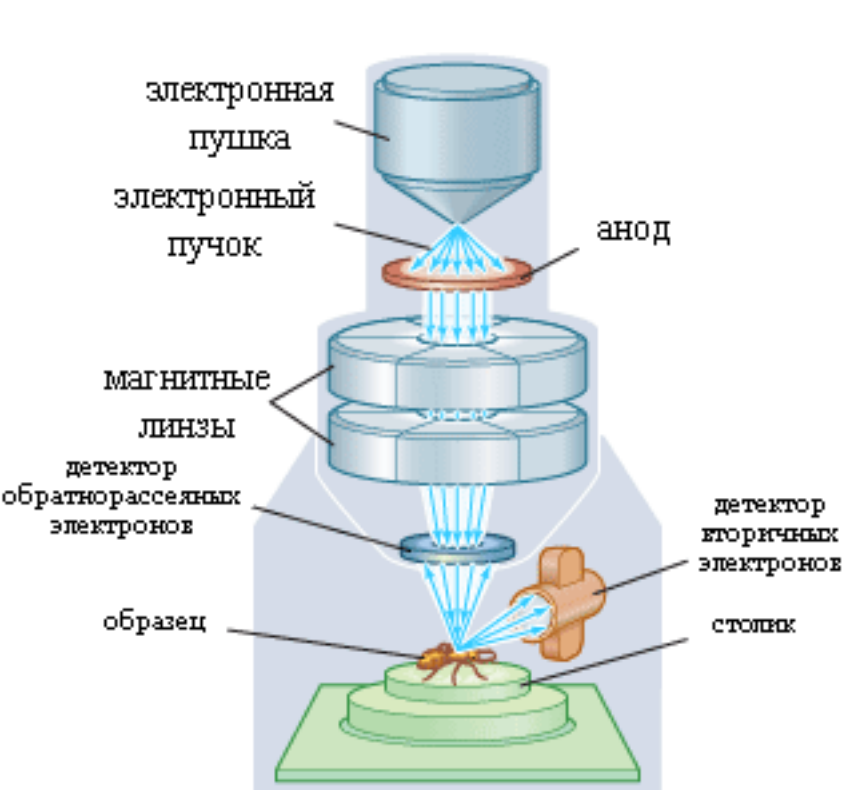


Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)



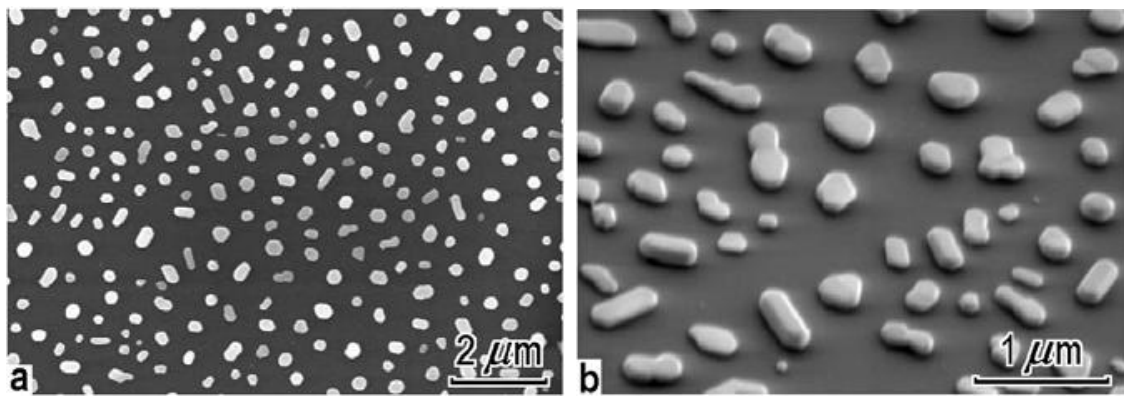
Движение электронов в магнитной линзе.

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

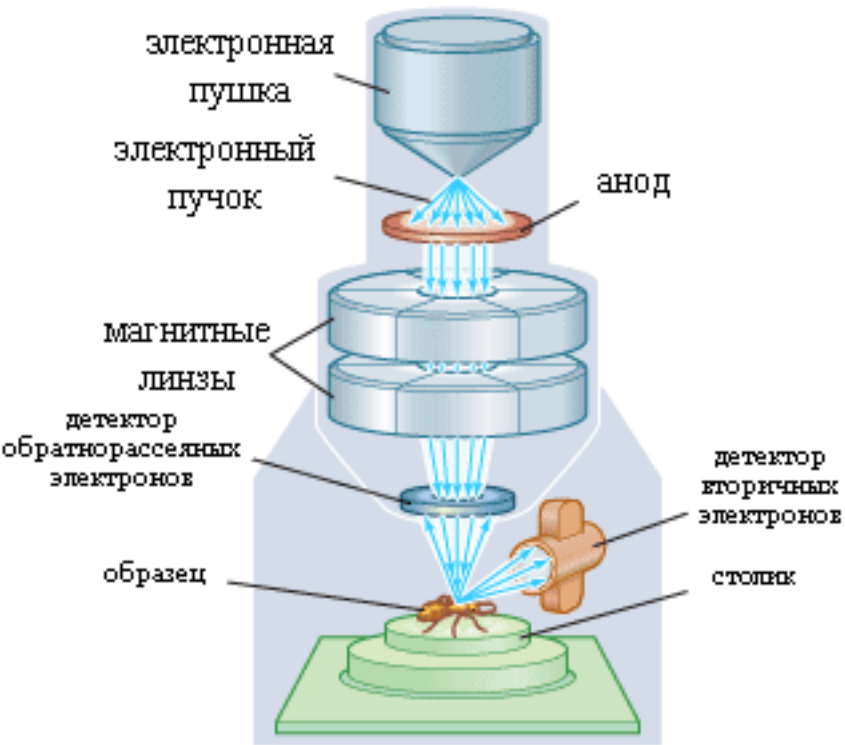


Интенсивность потока вторичных электронов, попадающих в детектор определяется наклоном оси детектора и профилем поверхности.

РЭМ изображения пленки золота при нормальном (a) 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.

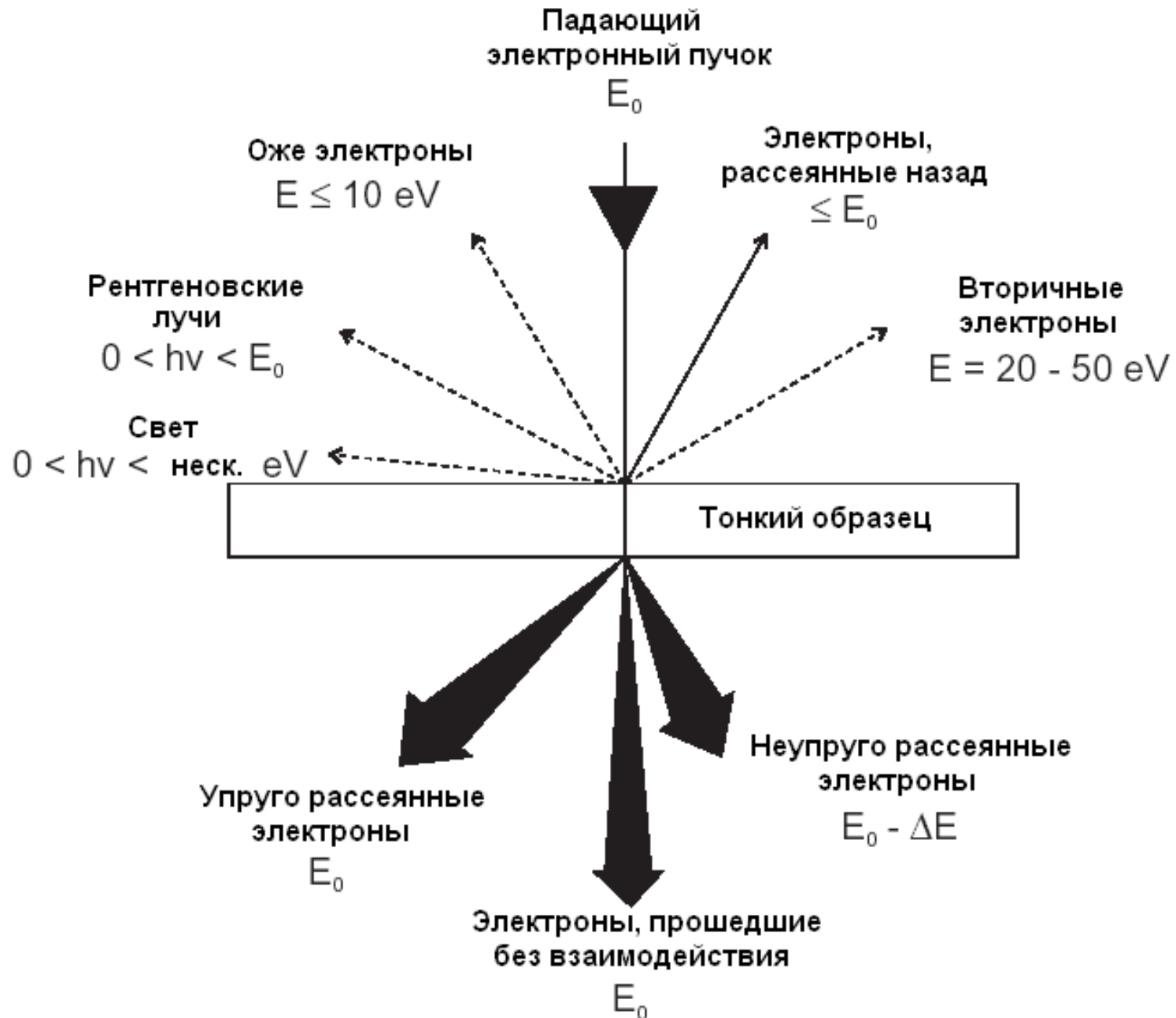
Ток через образец – разность тока первичного пучка и суммы токов ВЭ и ОРЭ

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

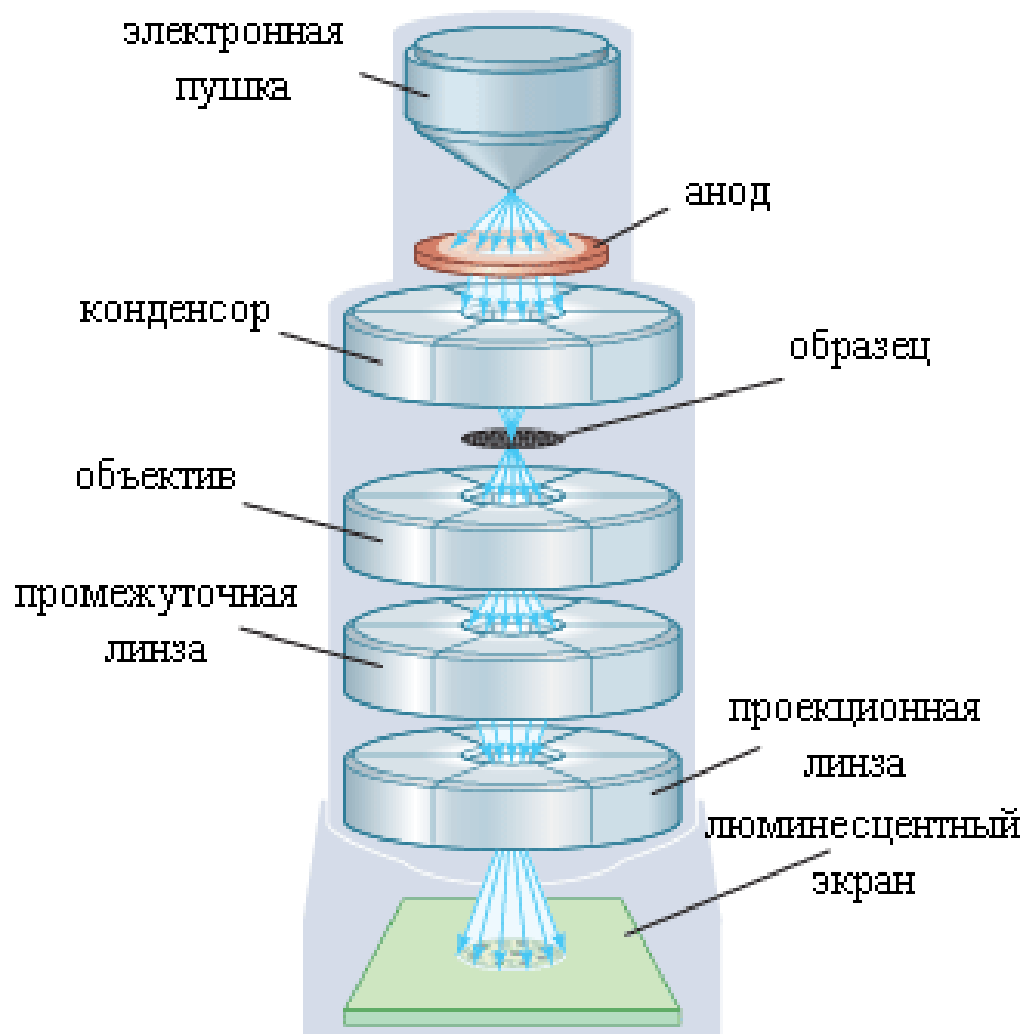
Ток, индуцированный электронным пучком – визуализация электрически активных областей (p-n переходы, дефекты).

Катодолюминесценция – изучение рекомбинации носителей заряда.

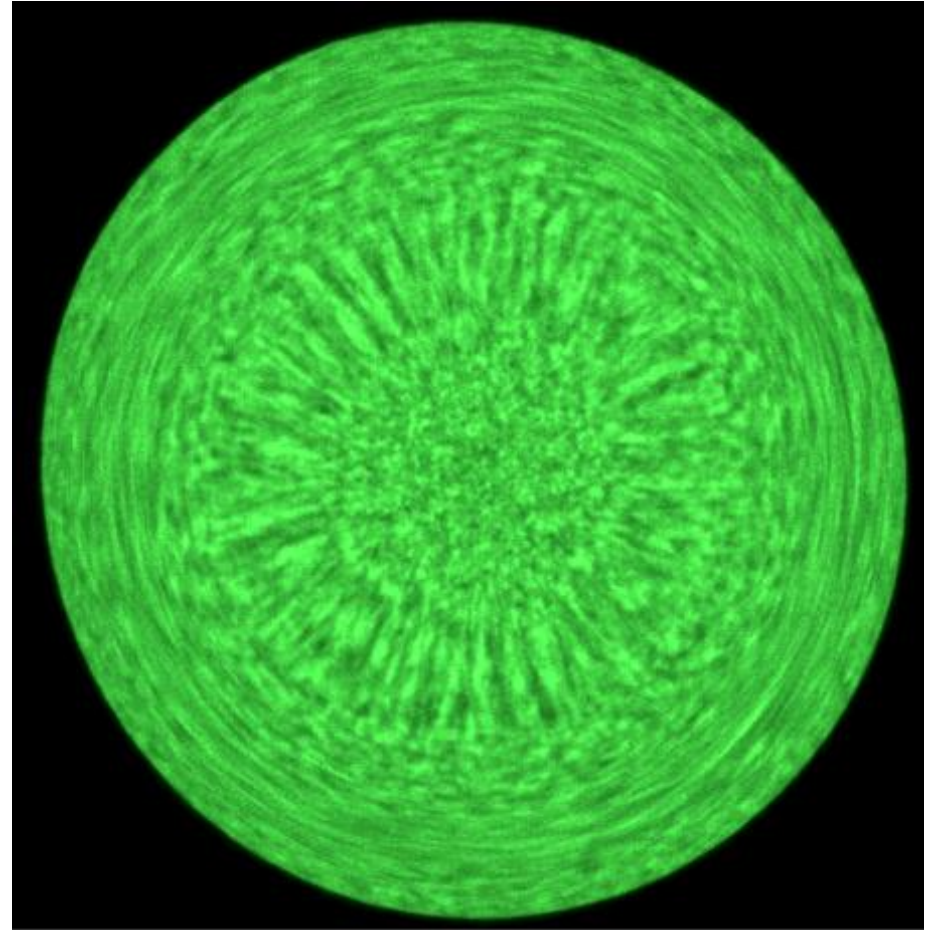
Взаимодействие электронов с веществом



Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, ТЕМ)



Ограничение разрешения электронной оптикой

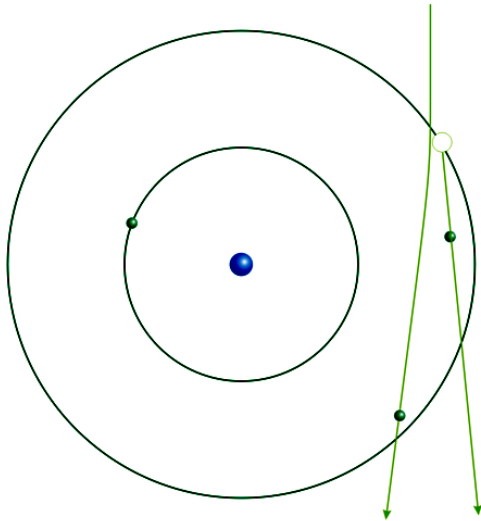


Качество изображений, создаваемых электронной линзой, значительно хуже качества оптических изображений.

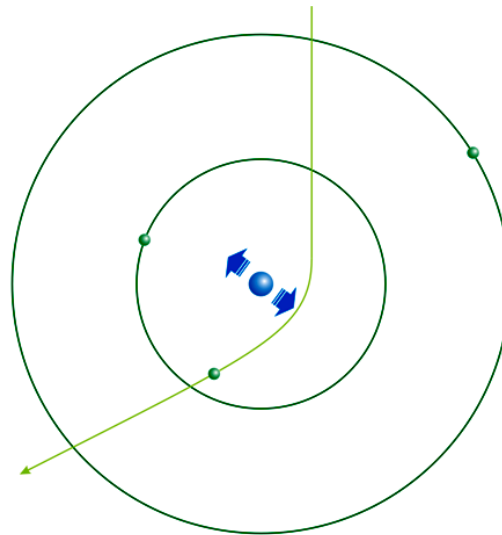
Ограничения разрешения из-за радиационных дефектов

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

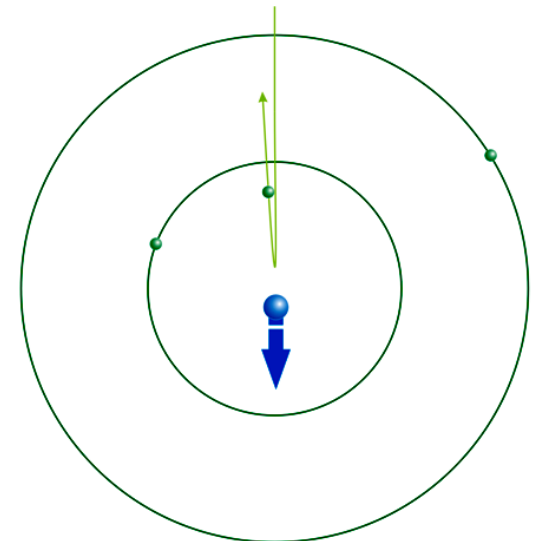
ионизация



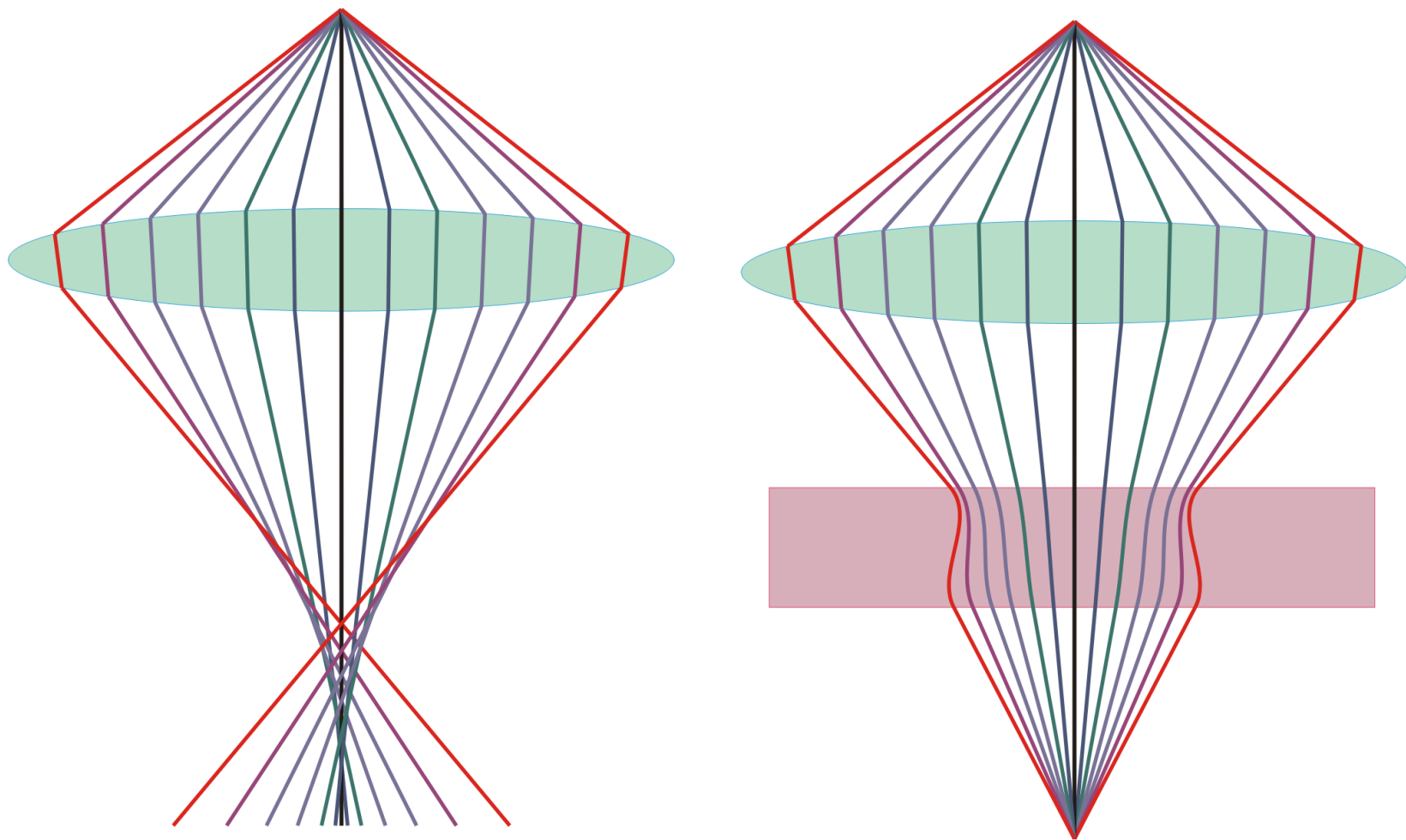
ионизация и нагрев



образование дефектов

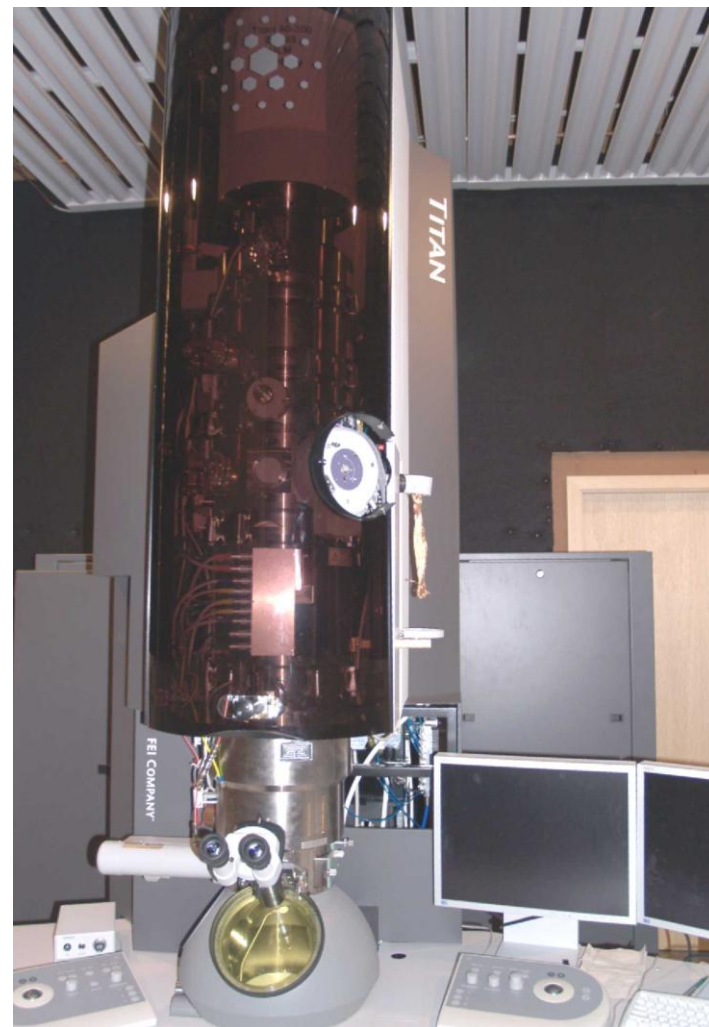
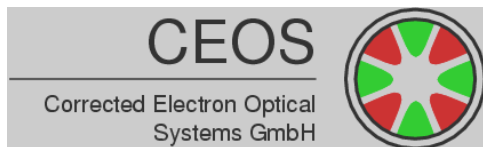
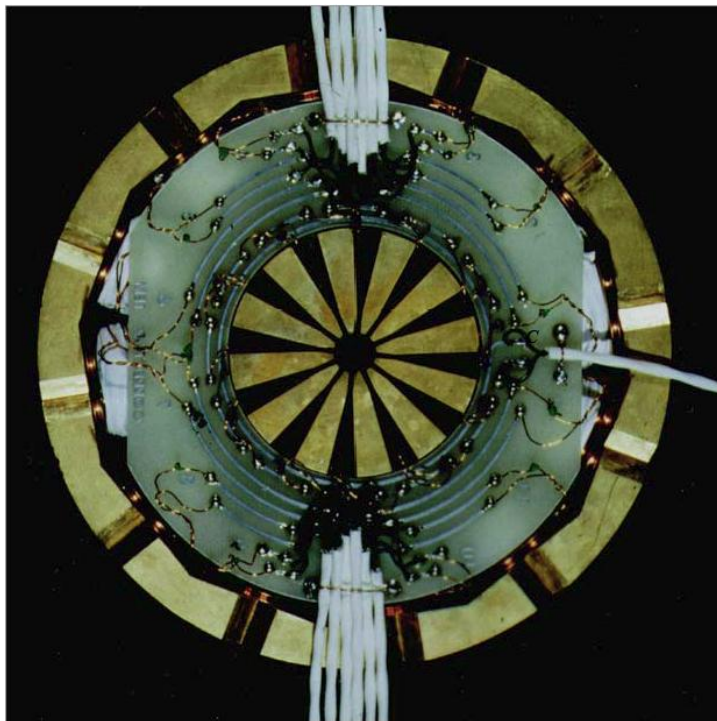


Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций



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

Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций



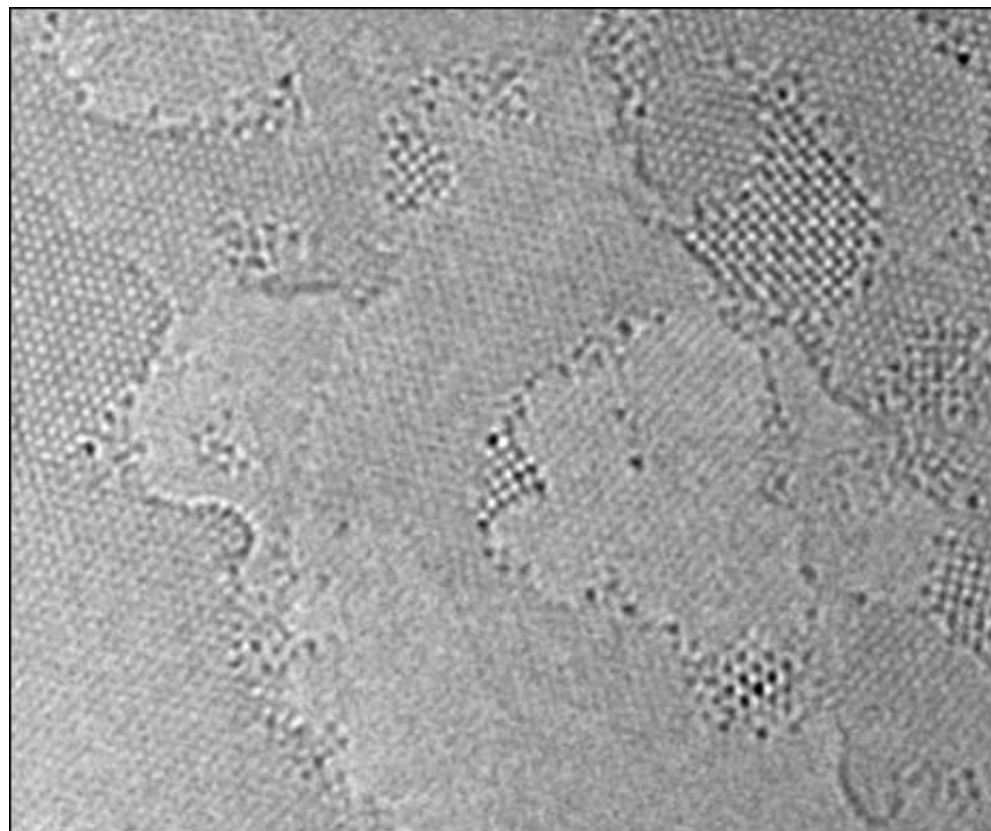
**TITAN 80-300
(FEI, NETHERLANDS)**

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

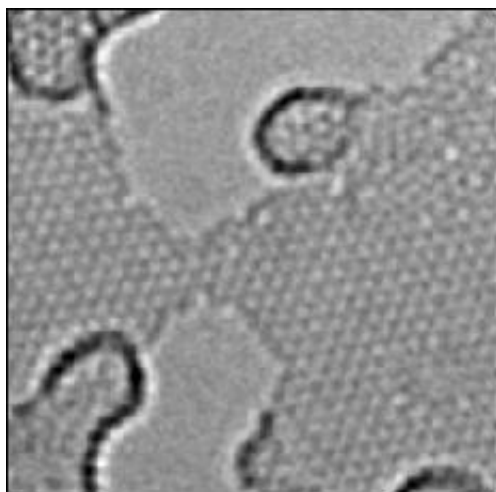
(Dy@C82)@SWNT



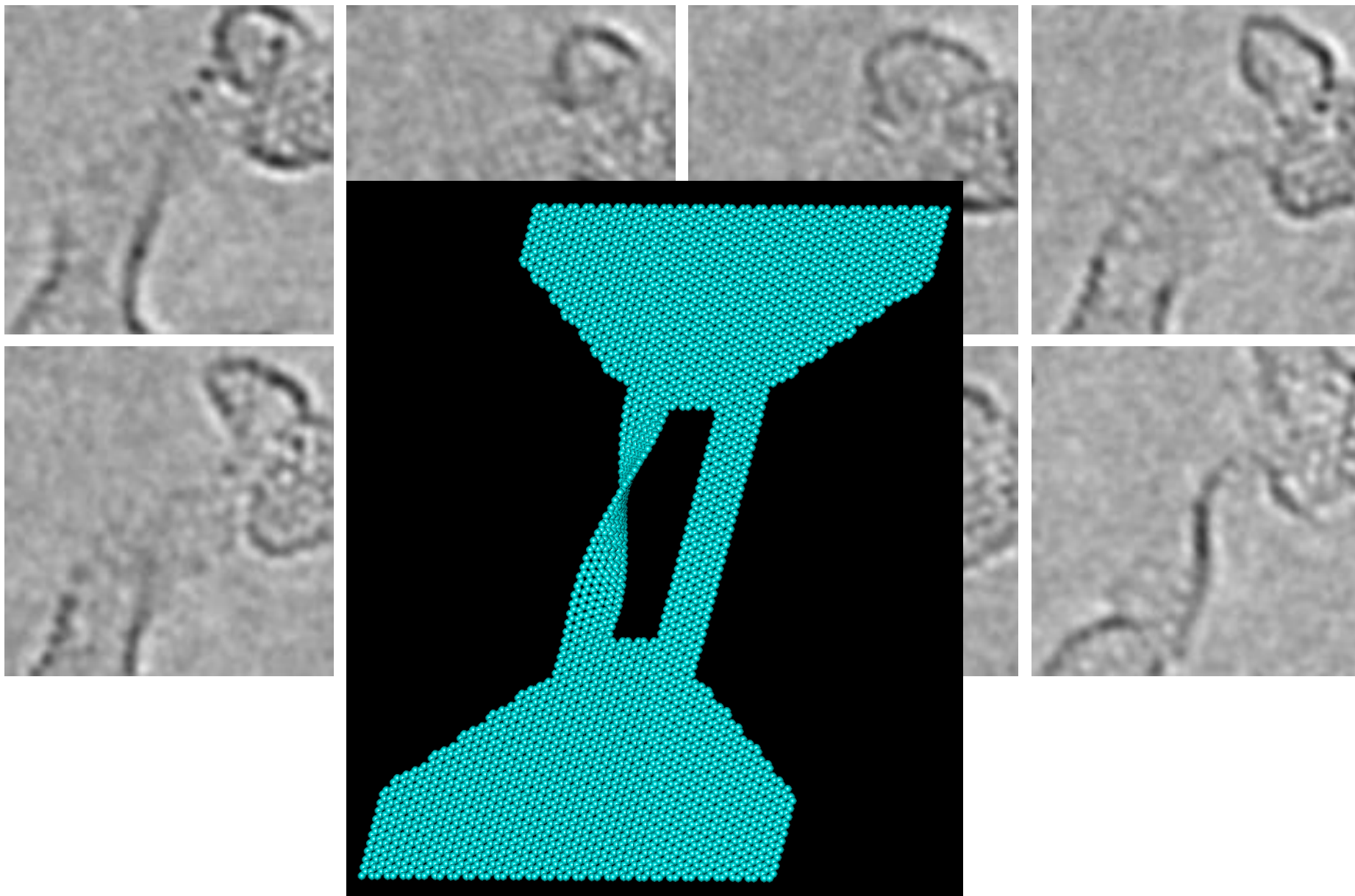
Ag @Graphene



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.

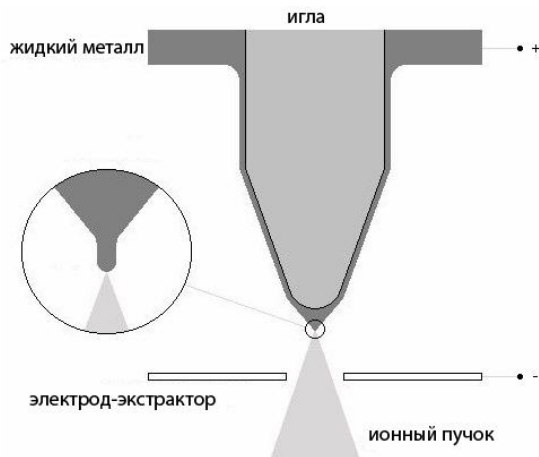
$$\lambda(\text{Å}) \approx 12 / [\varepsilon(\text{эВ})]^{1/2}$$

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

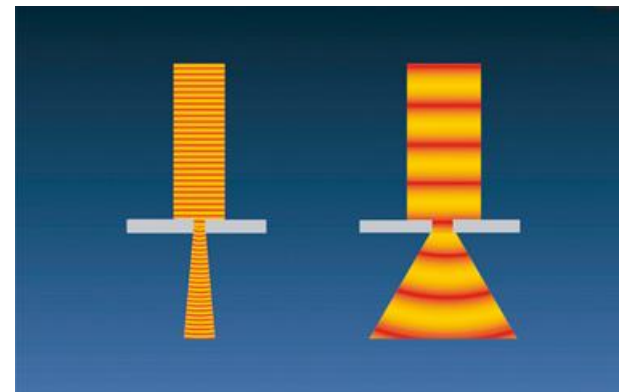
Глубина проникновения таких электронов около 5 -10 Å.

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

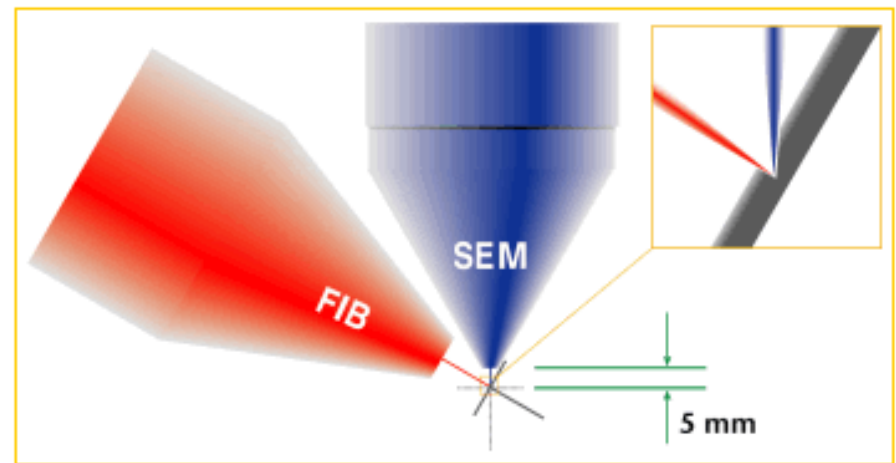
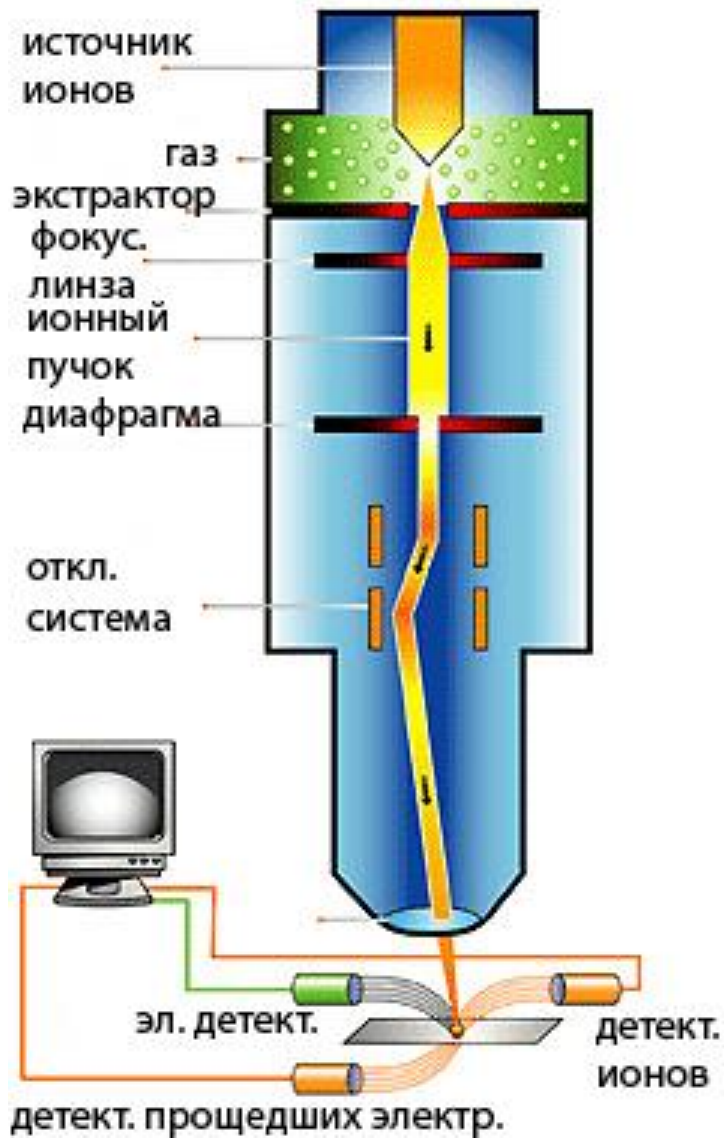
Источник тяжелых ионов (As, Ga, In).



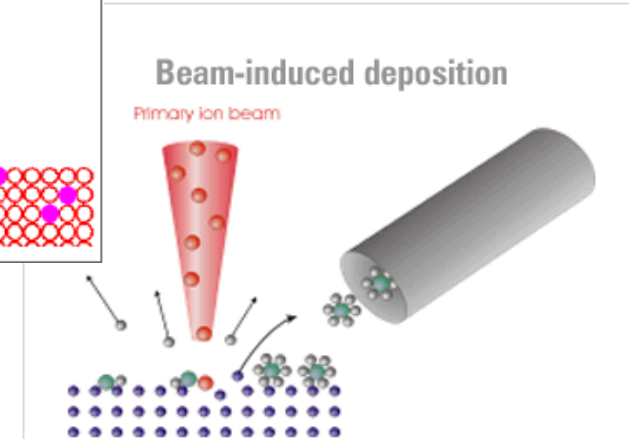
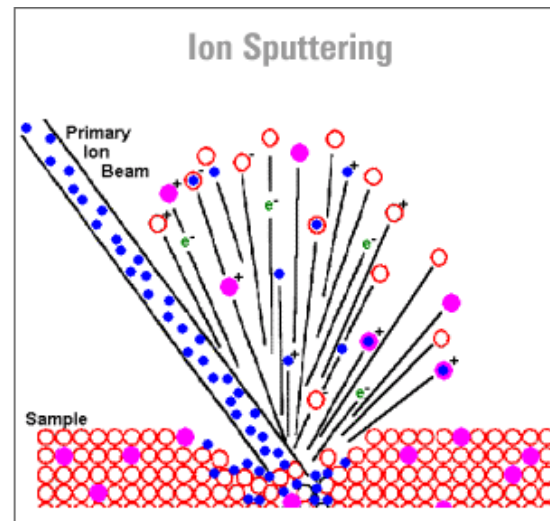
Источник легких ионов (He).



Ионные микроскопы

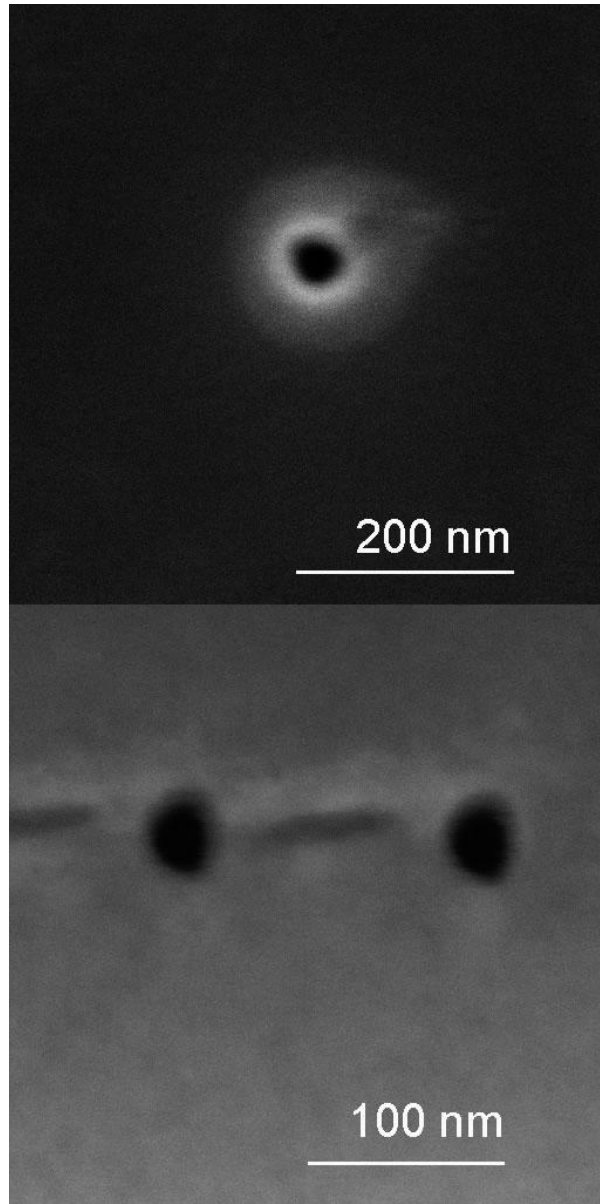


Dual beam geometry

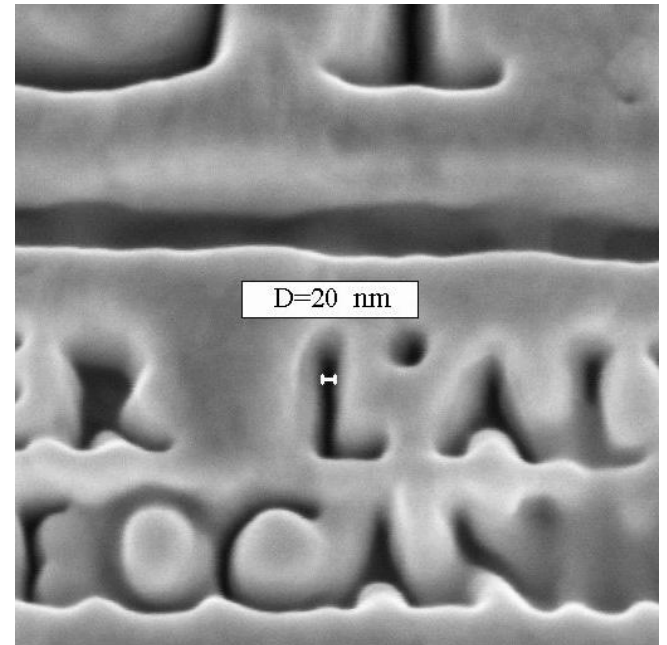


Ионные микроскопы

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

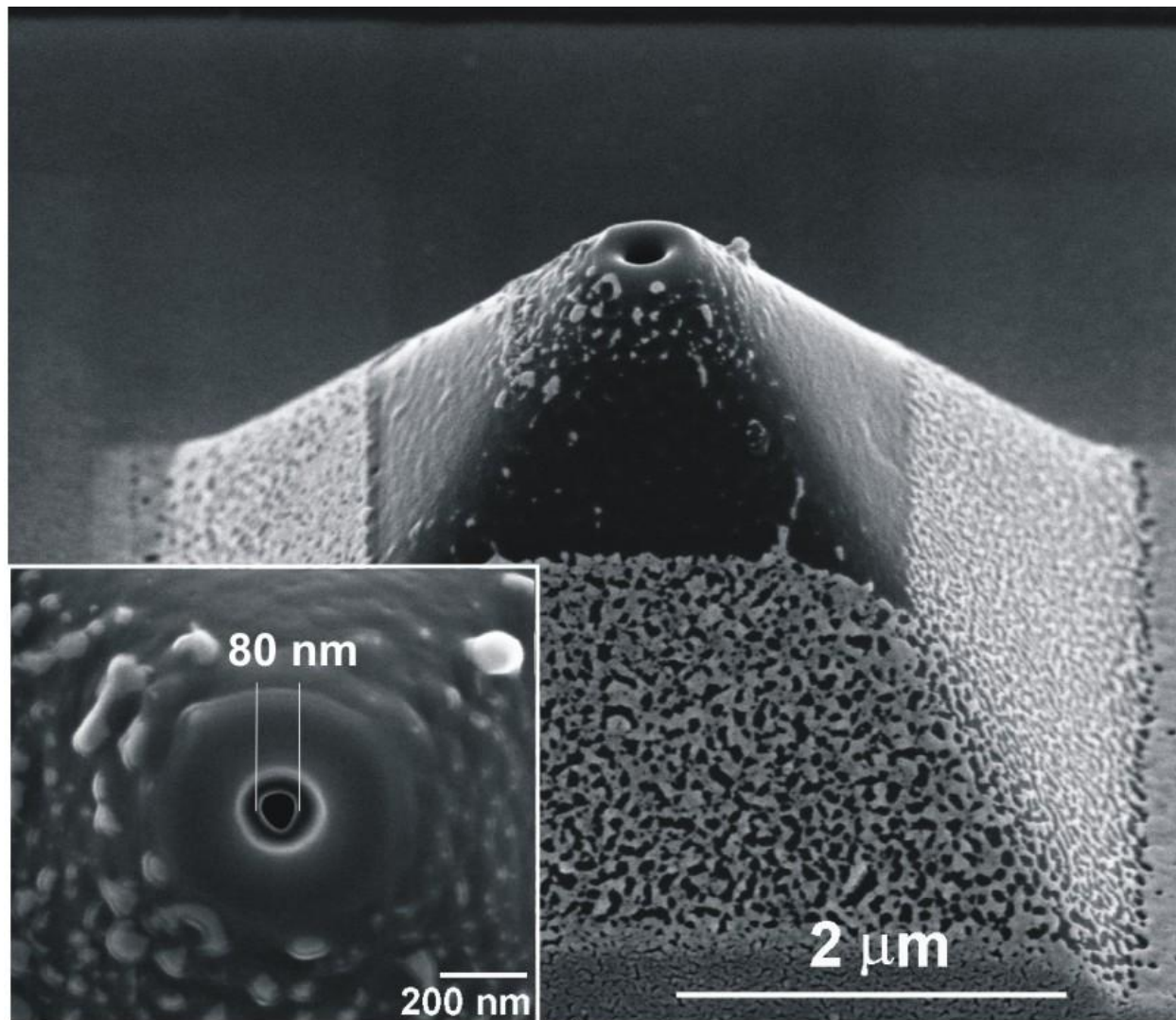


Гравировка с разрешением 20 нм.



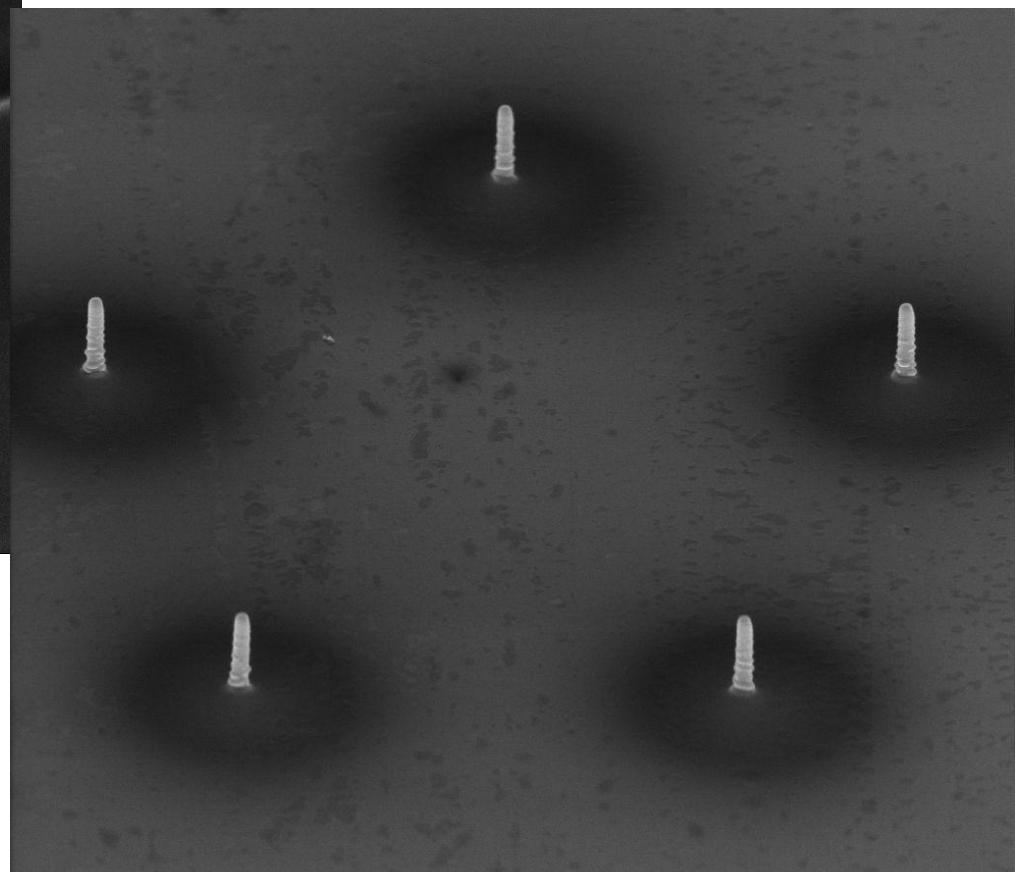
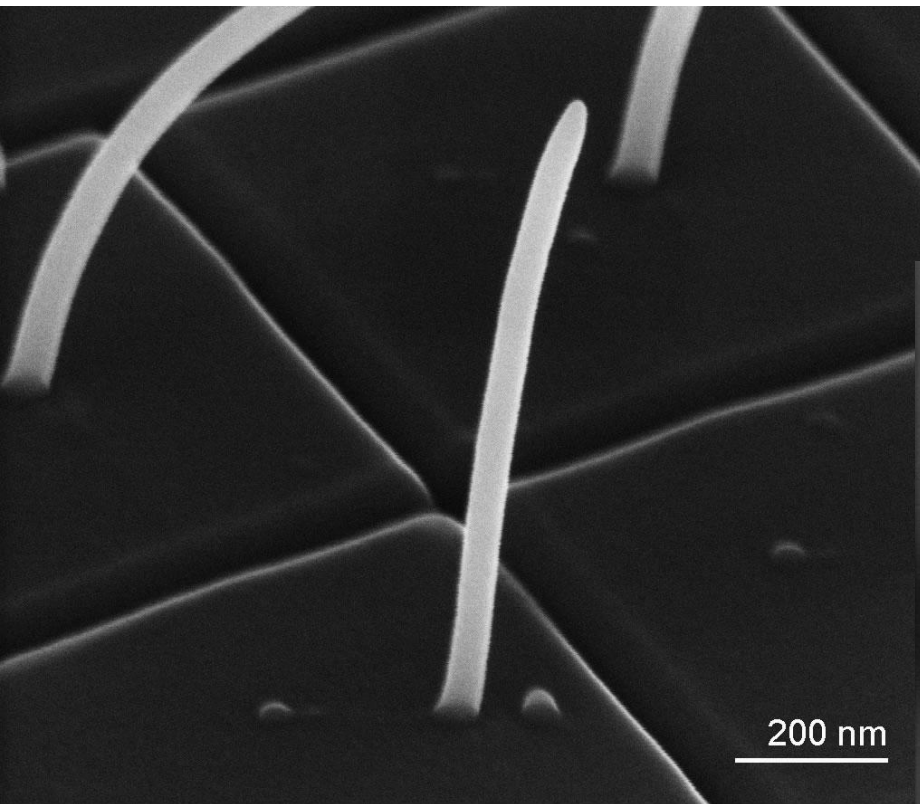
Ионные микроскопы

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

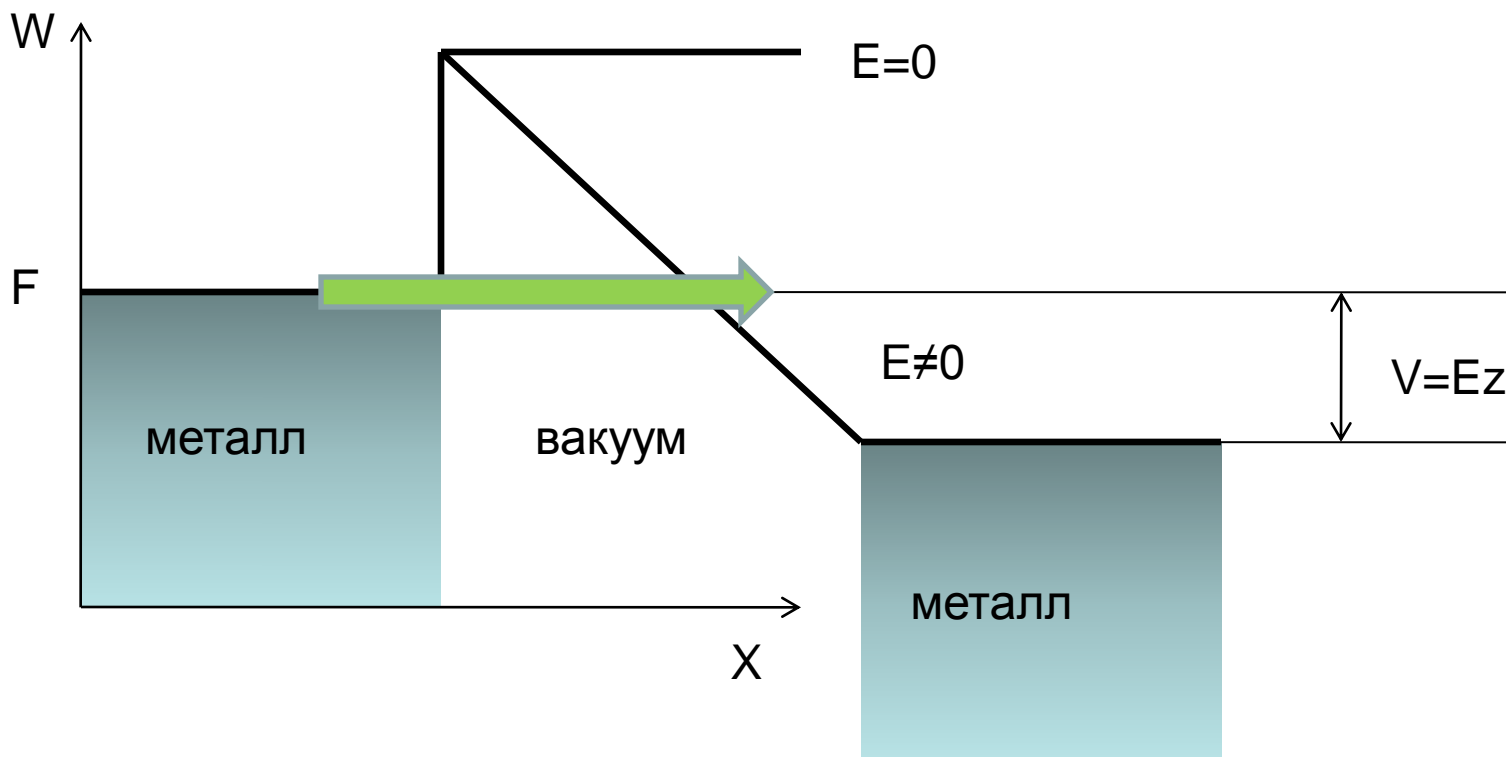
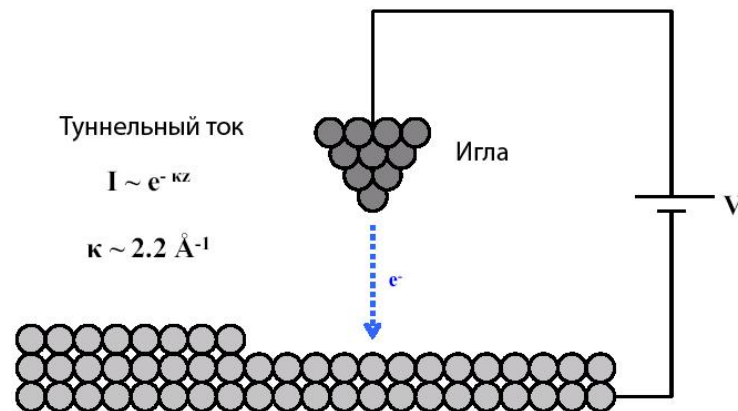
НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ—1986

537.533.35

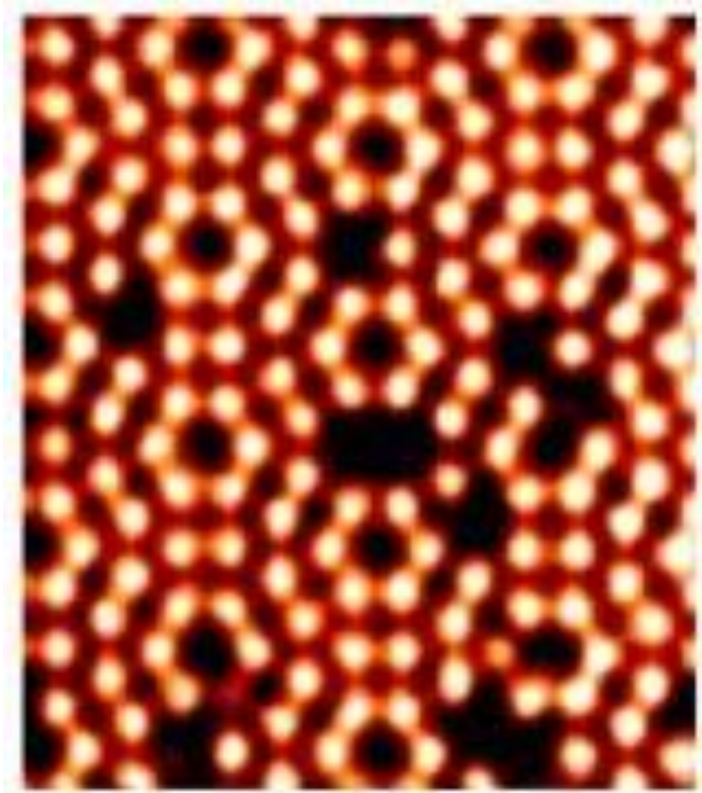
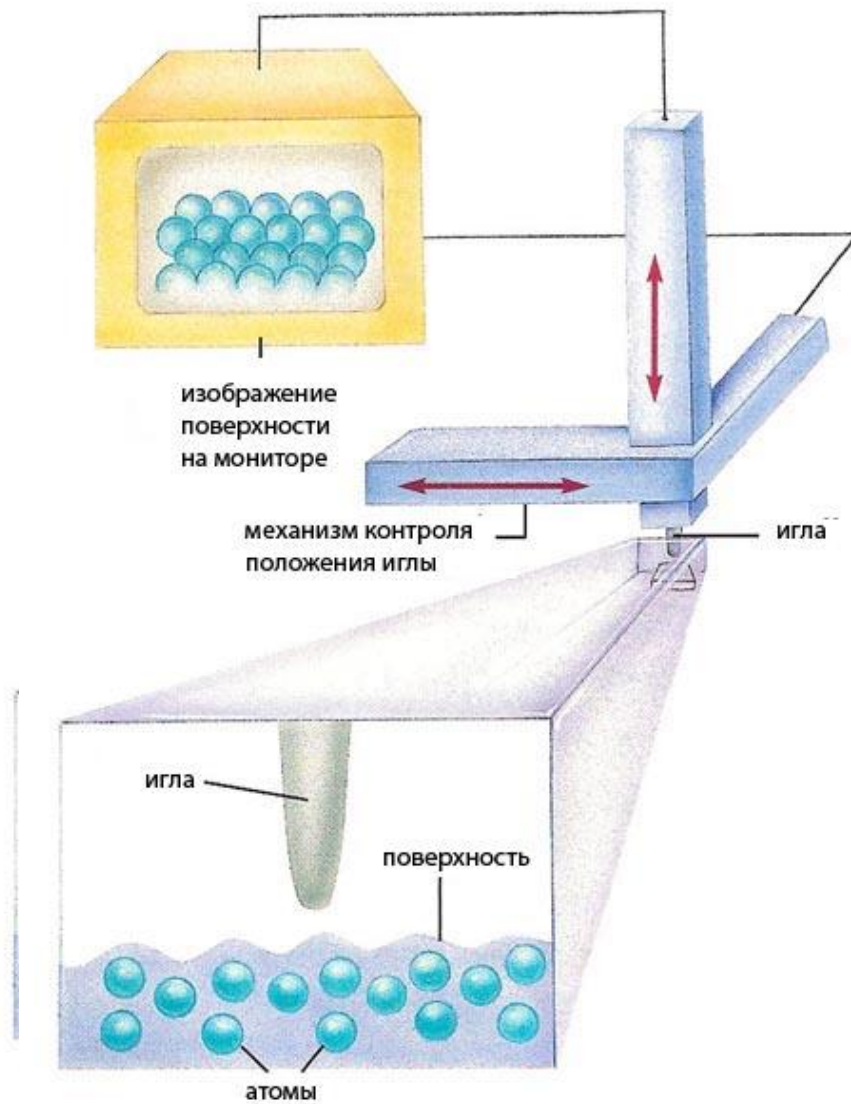
СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ — ОТ РОЖДЕНИЯ
К ЮНОСТИ

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.

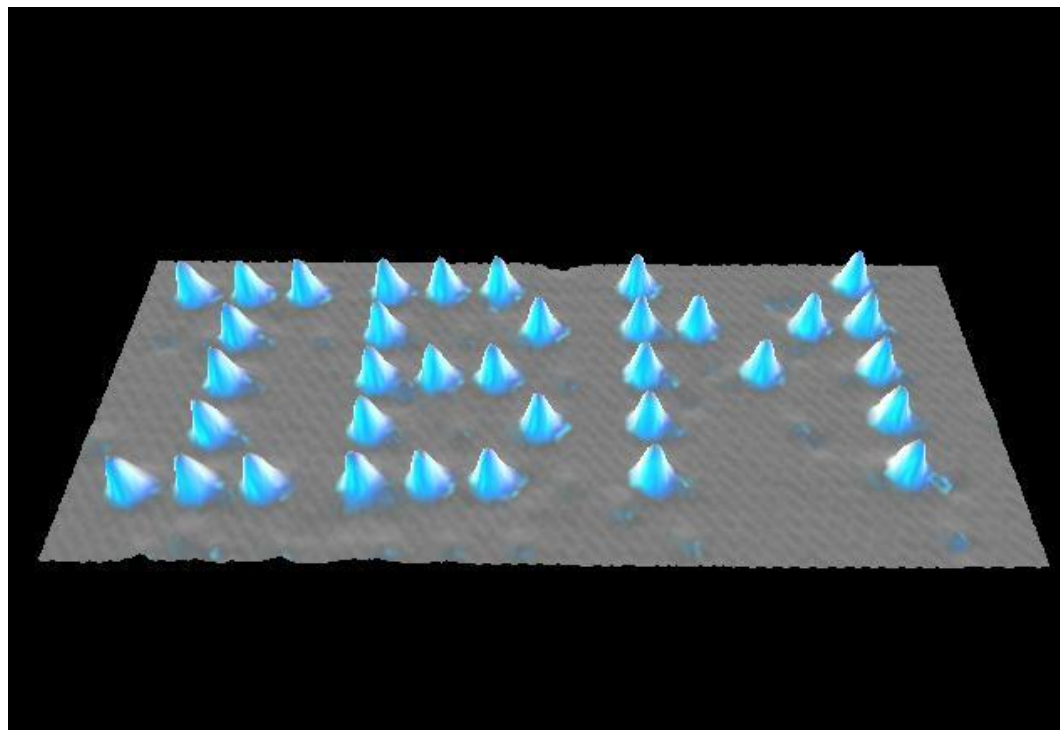
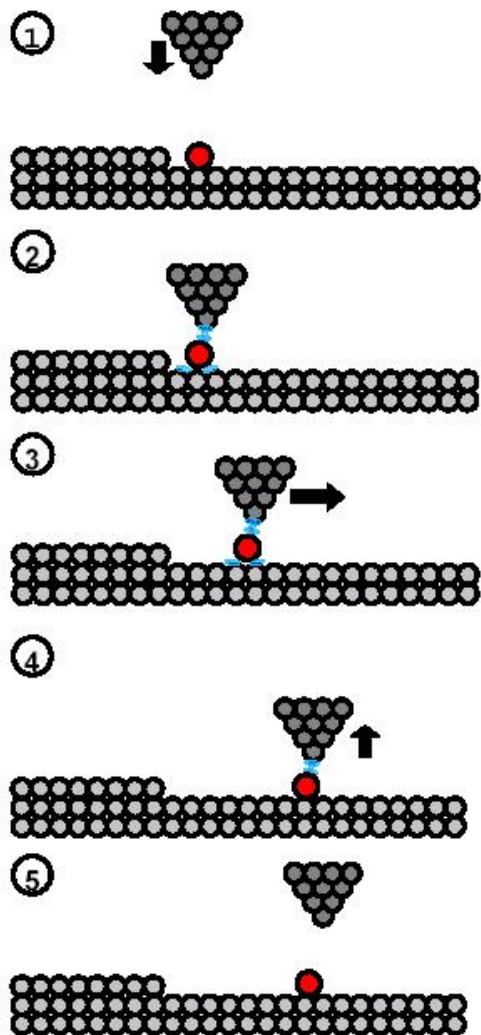


Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)



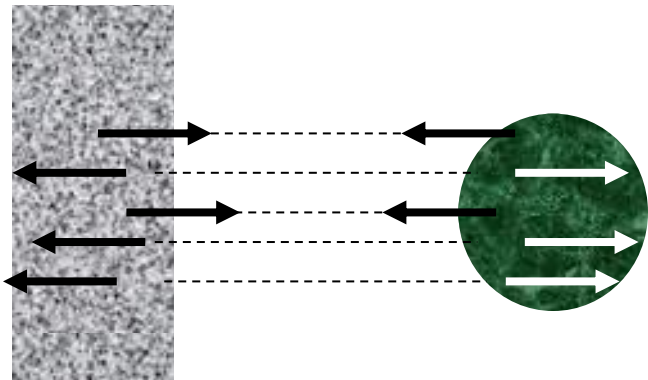
СТМ изображение поверхности кремния – видно упорядоченное расположение атомов и структурные дефекты (вакансии).

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)



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

Сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ)

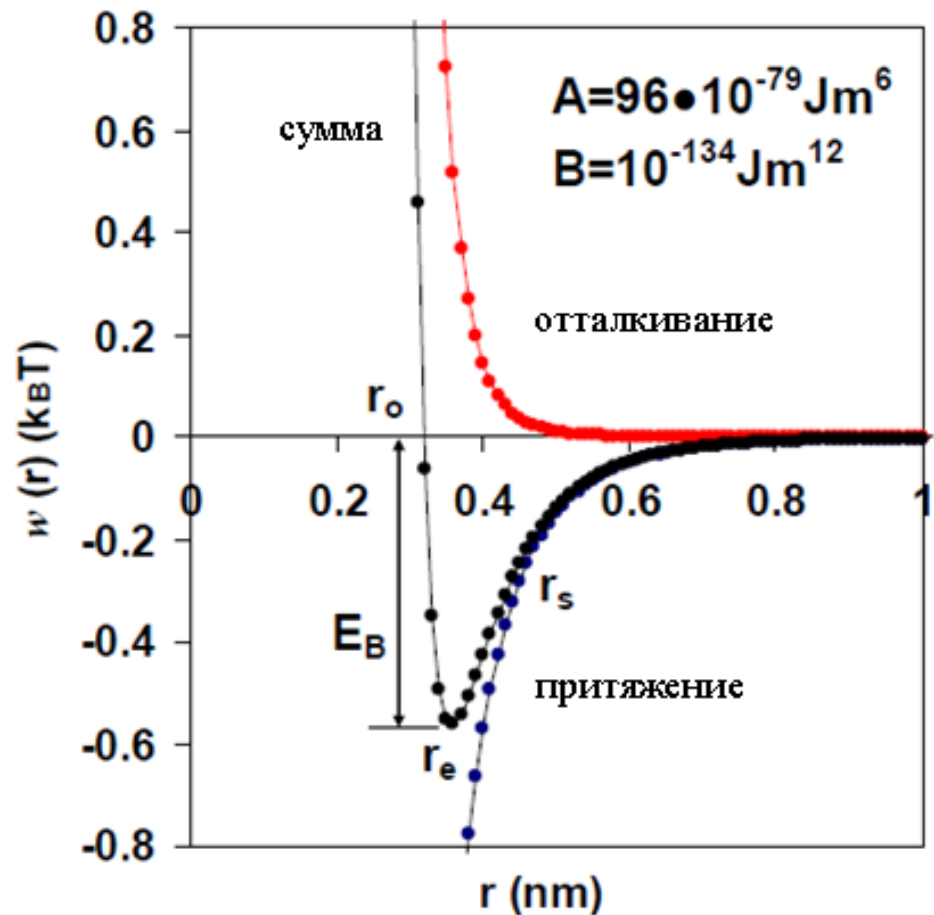


Потенциал Леннарда-Джонса

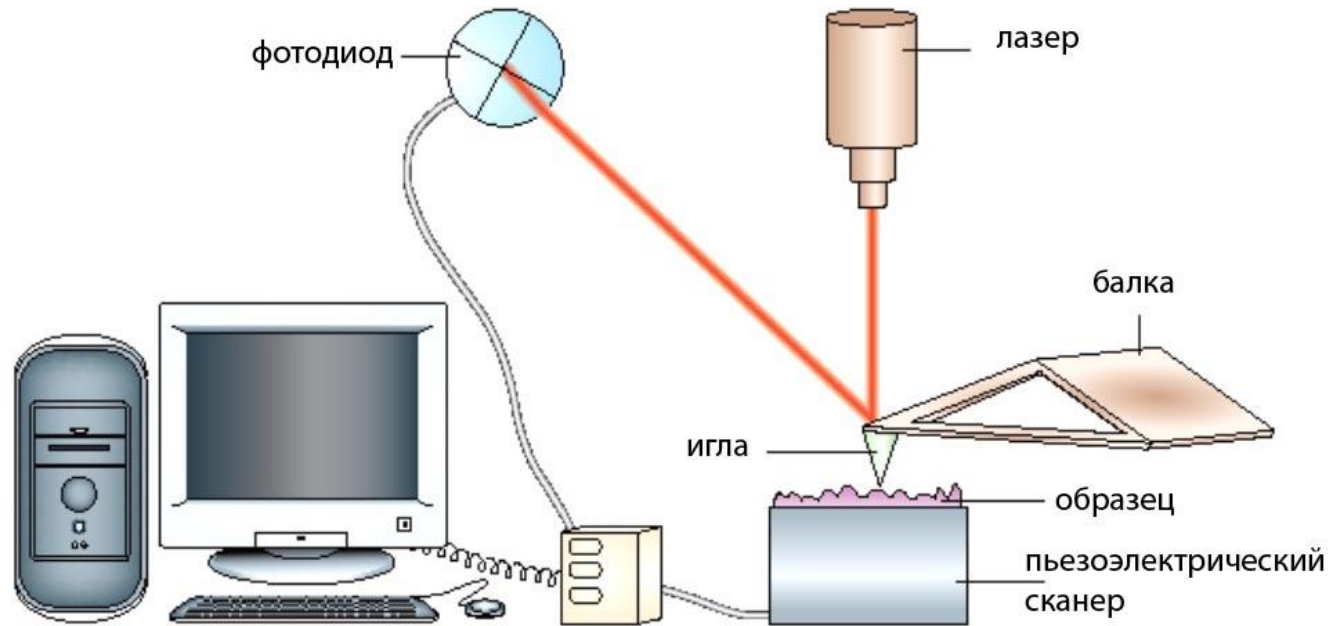
$$U_{ЛД} = \frac{-A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}} = 4E_B \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

Сила взаимодействия:

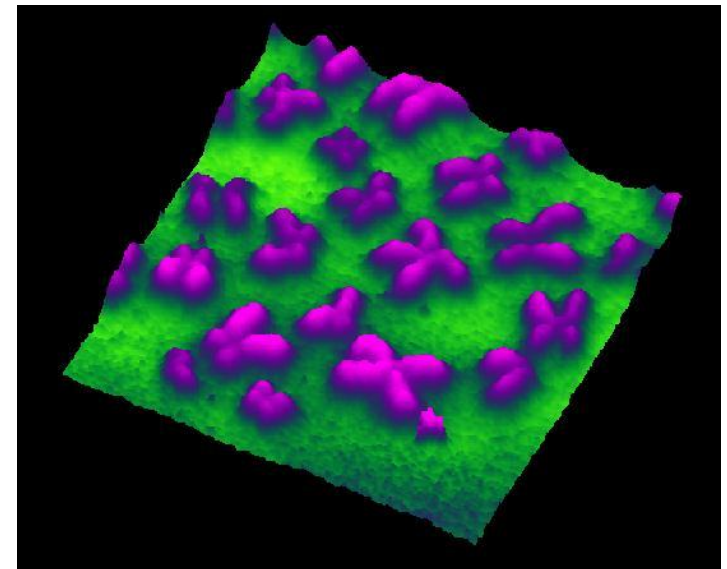
$$F_{ЛД} = \frac{-6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}}$$



Сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ)

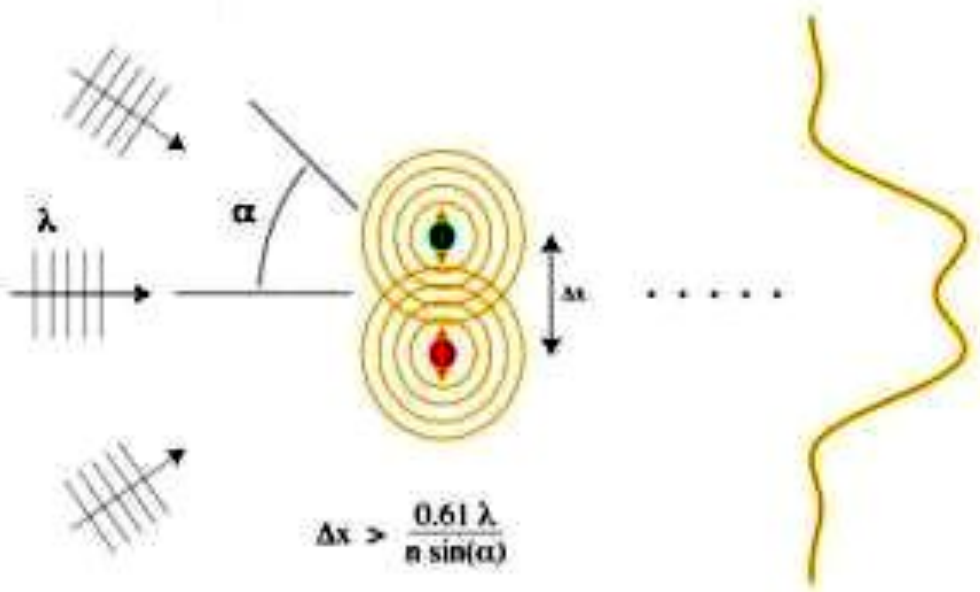


АСМ изображение хромосом



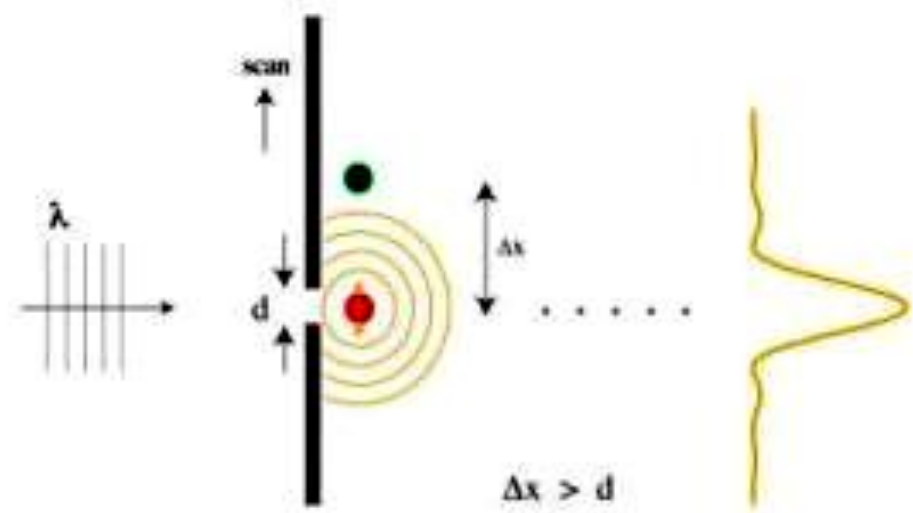
Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

Оптическая микроскопия

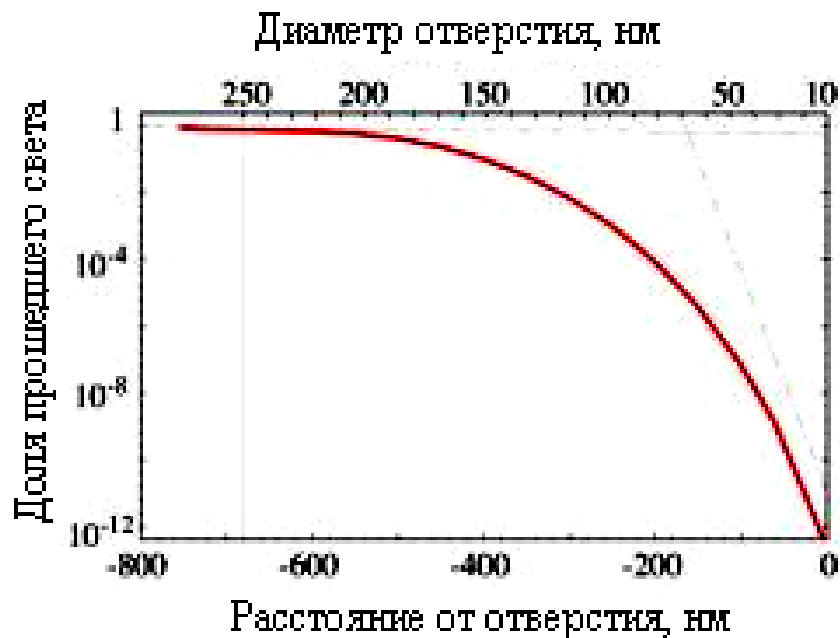


Разрешение ограничено дифракцией – правило Рэля

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

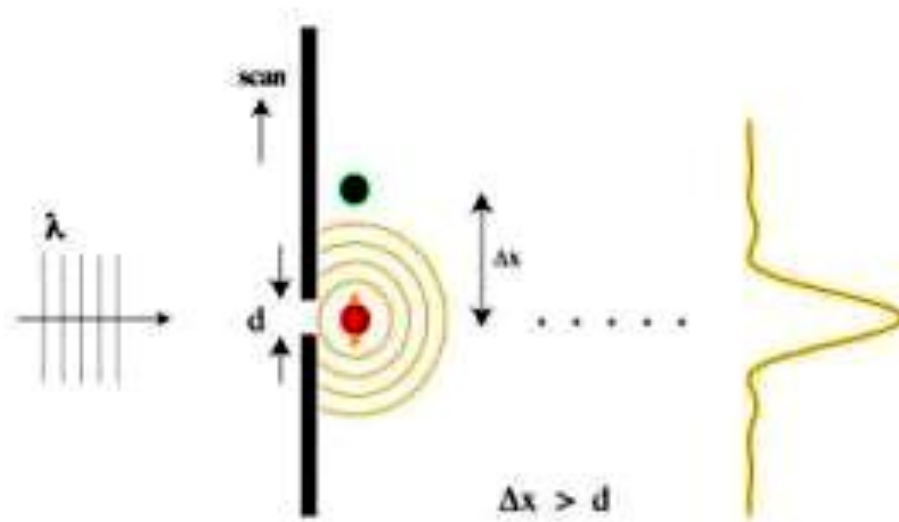


Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

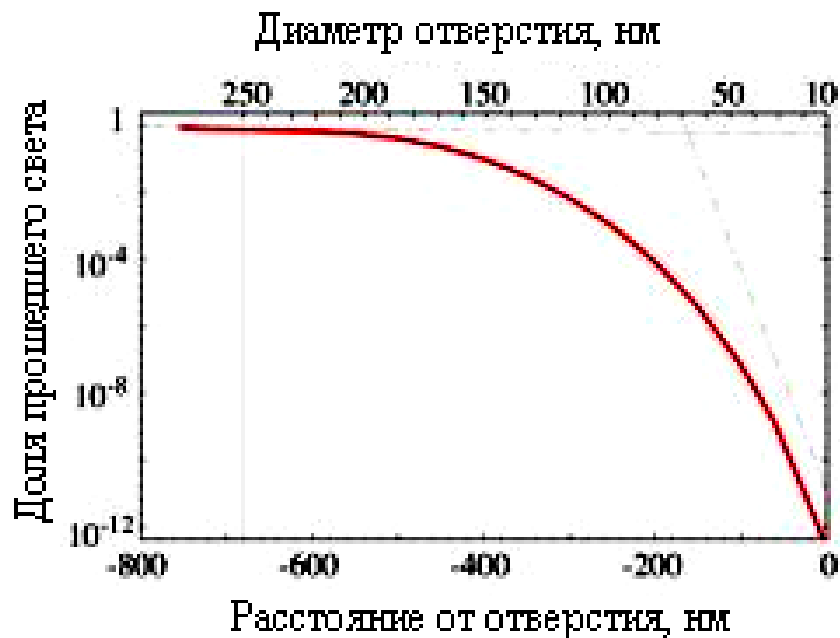


L. Novotny and D. W. Pohl, in *Photons and Local Probes*, NATO ASI Series E, p.21-33, Kluwer Academic, 1995.

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

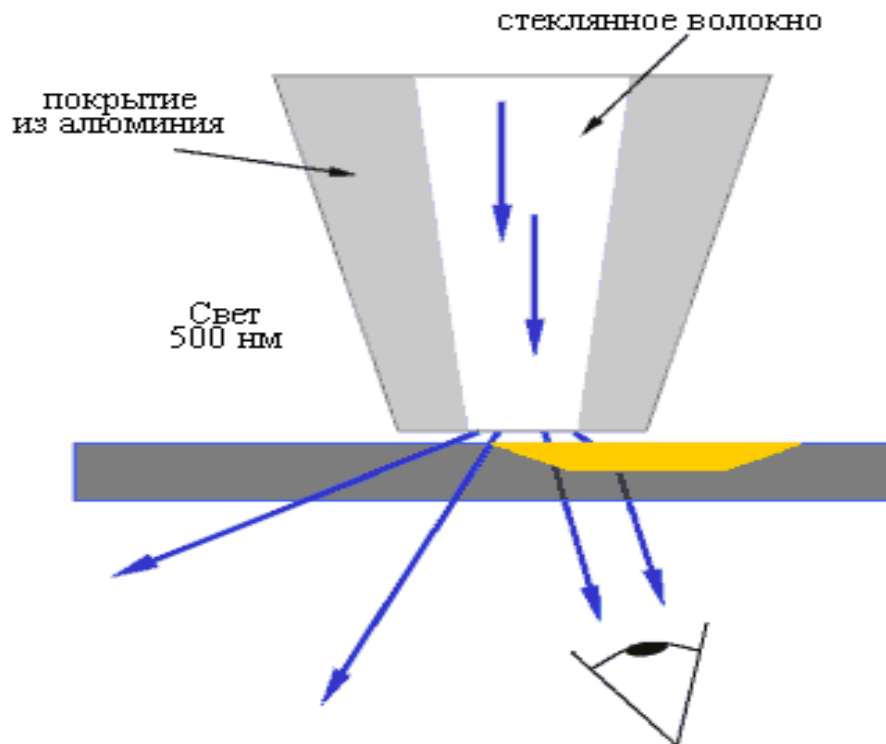
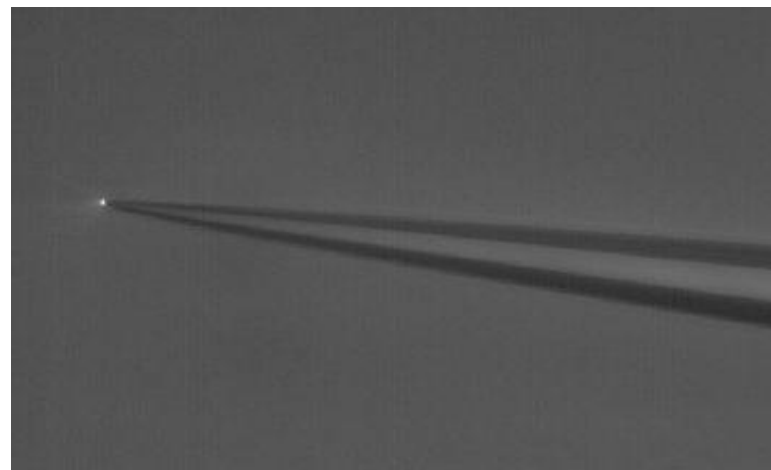


Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

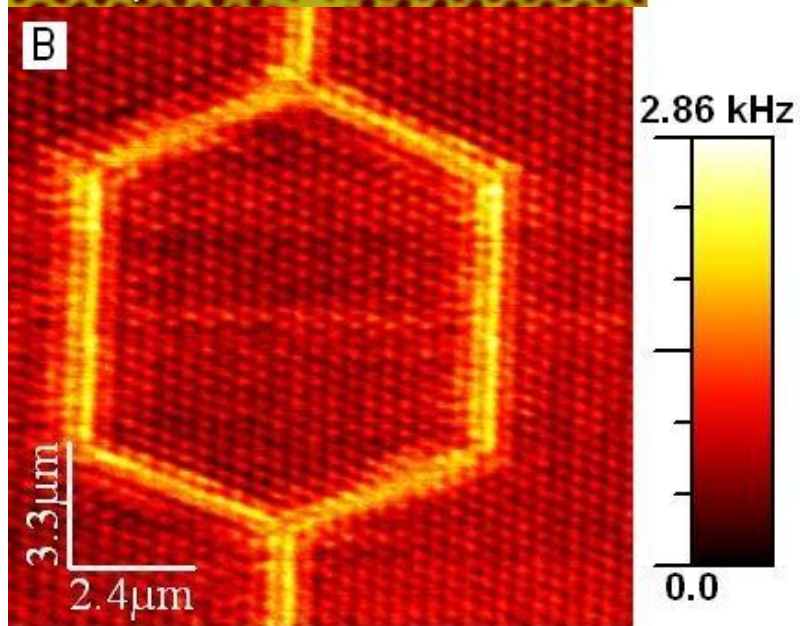
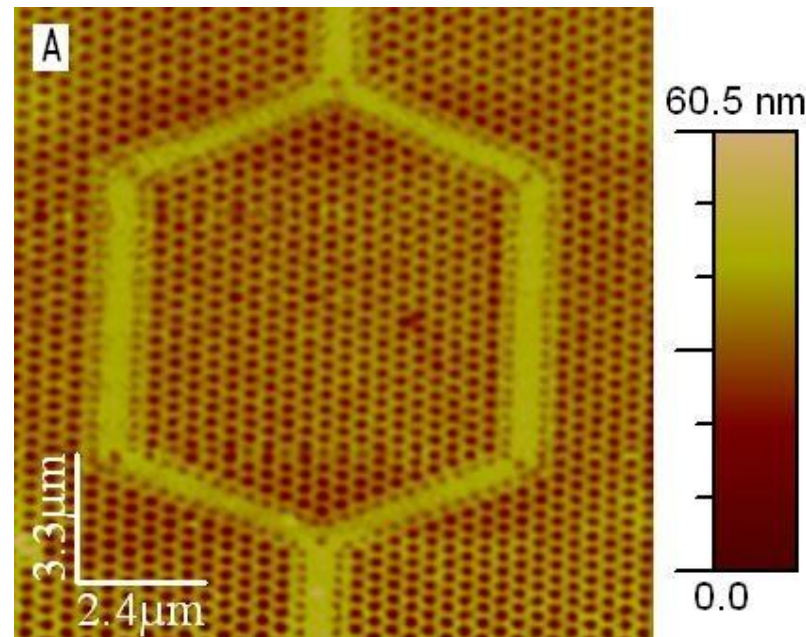
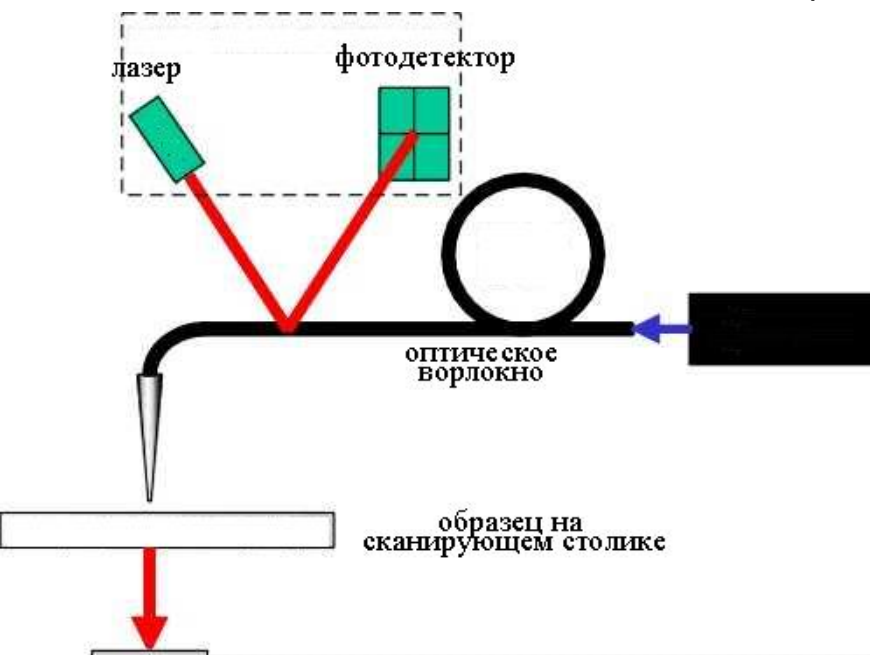


L. Novotny and D. W. Pohl, in *Photons and Local Probes*, NATO ASI Series E, p.21-33, Kluwer Academic, 1995.

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

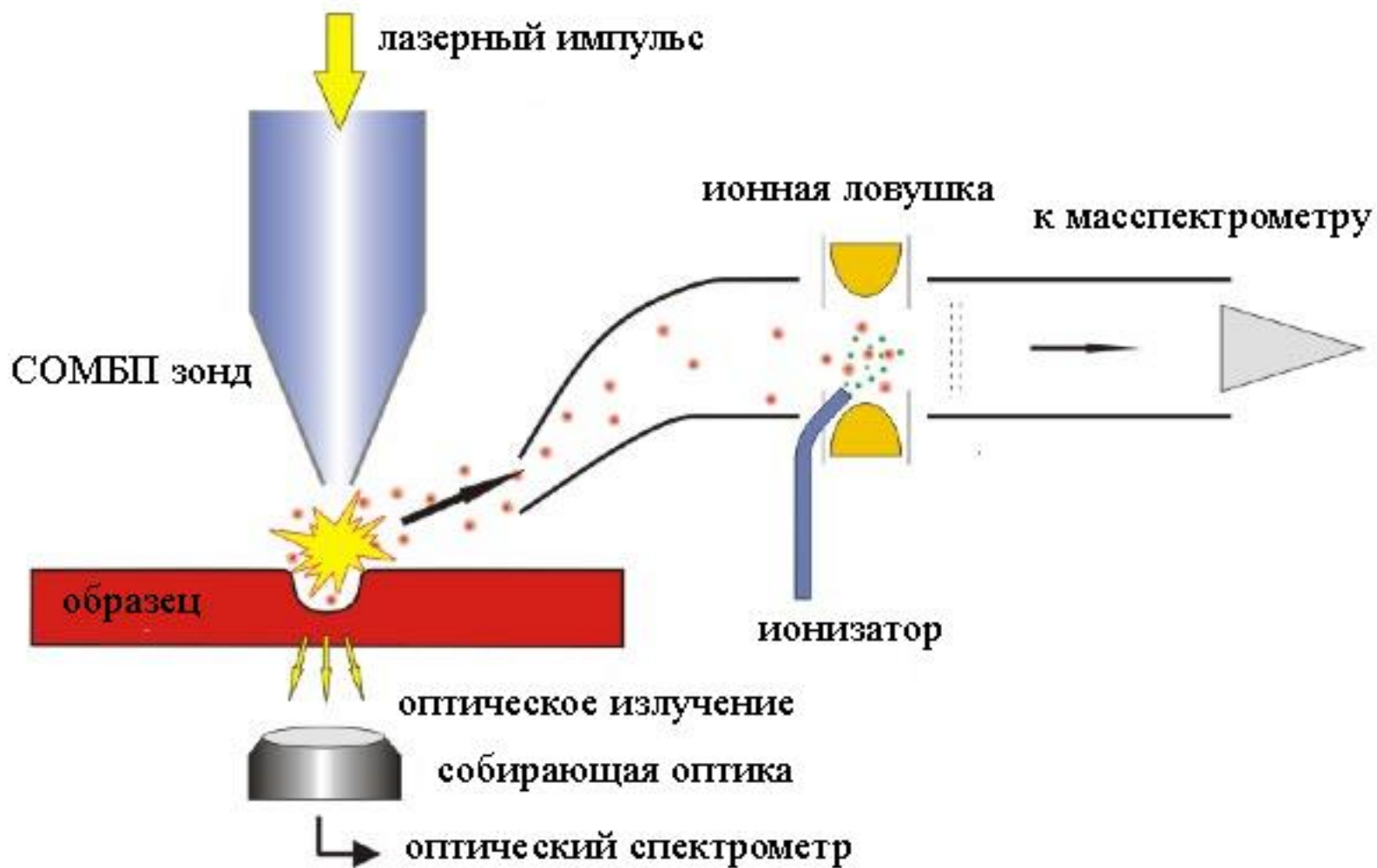


Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

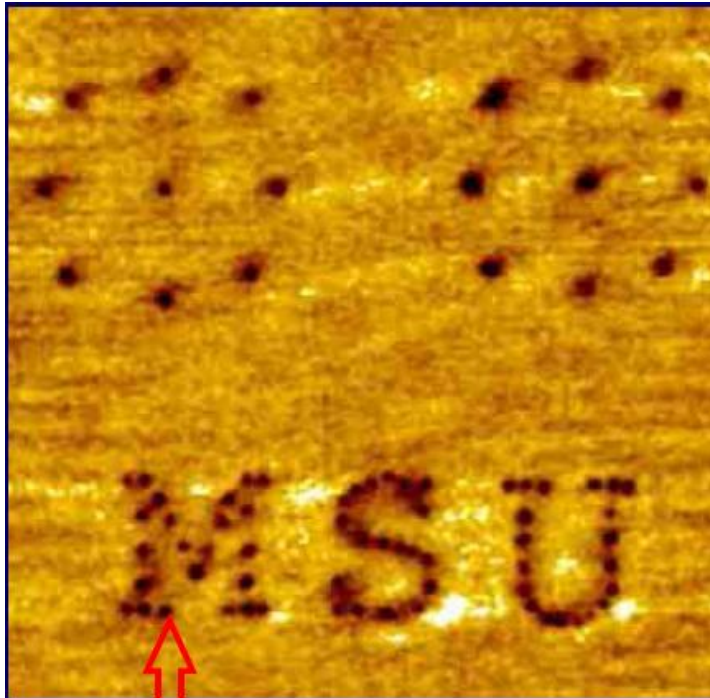


АСМ (А) и СОМБП (В)
изображения фотонных
кристаллов – разрешение
100 нм.

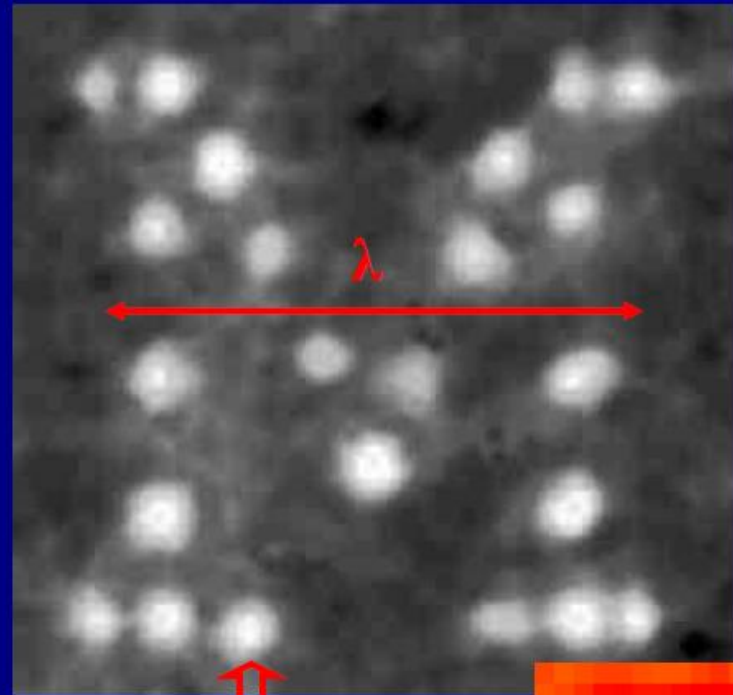
Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)



Использование сканирующего оптического микроскопа ближнего поля для сверхплотной оптической записи



Топография



Средний диаметр ямки 50 нм.

