

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Научно-образовательный центр по нанотехнологиям

межфакультетский курс лекций

«Фундаментальные основы нанотехнологий»

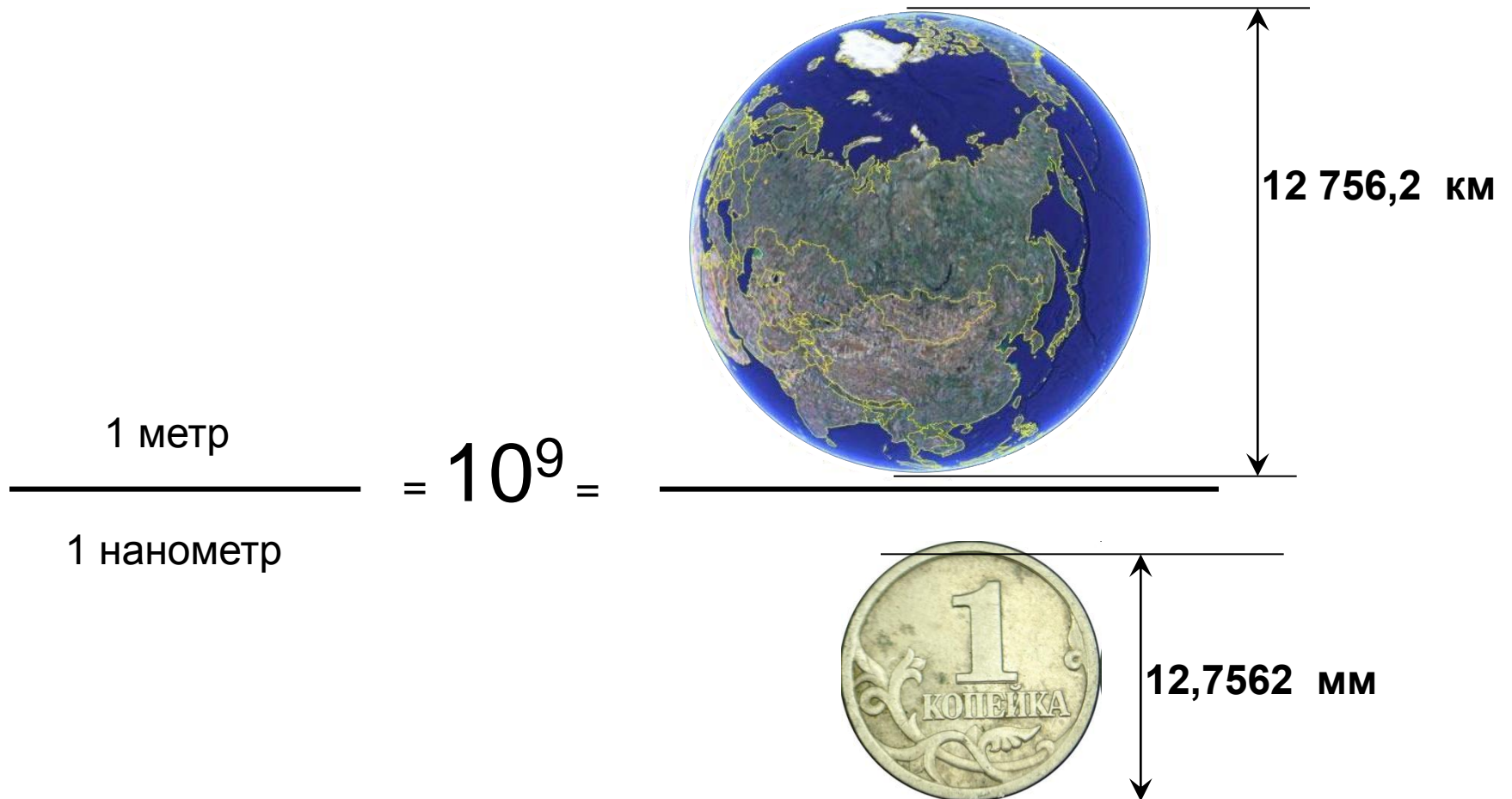
Лекция 2: Методы исследования и диагностика нанообъектов и наносистем.

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



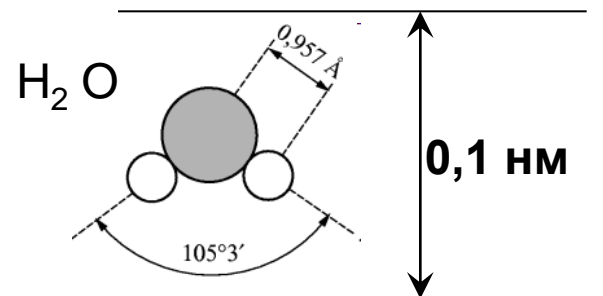
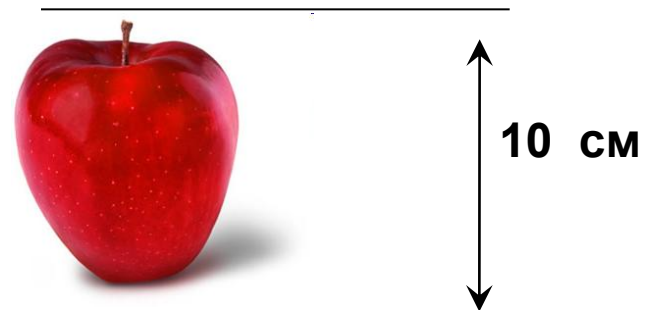
«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу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

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

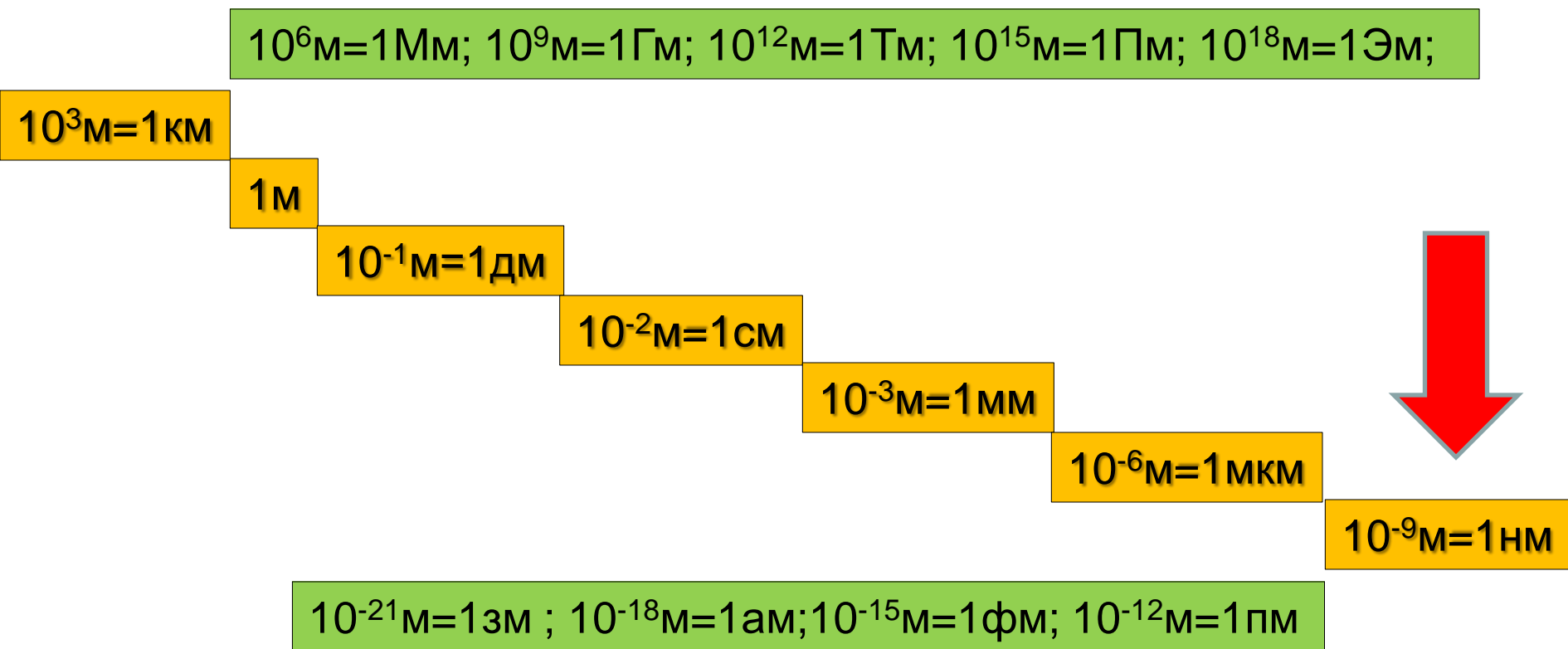
Линейный размер структурных единиц наноматериалов изменяется в пределах примерно от 1 до 1000 атомных (молекулярных) слоев.

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

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

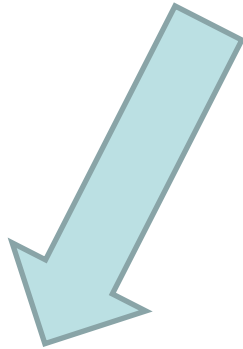


Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) отражает пространственный масштаб рассматриваемых явлений, процессов, структурированности (неоднородности) вещества.

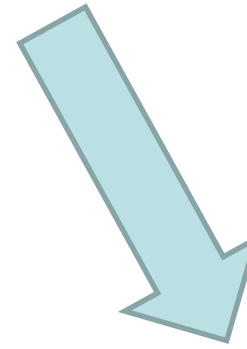


Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) подразумевает наличие качественных особенностей в закономерностях, определяющих протекание явлений и процессов и отсутствующих при других характерных масштабах.

Методы исследования и диагностика нанообъектов и наносистем.

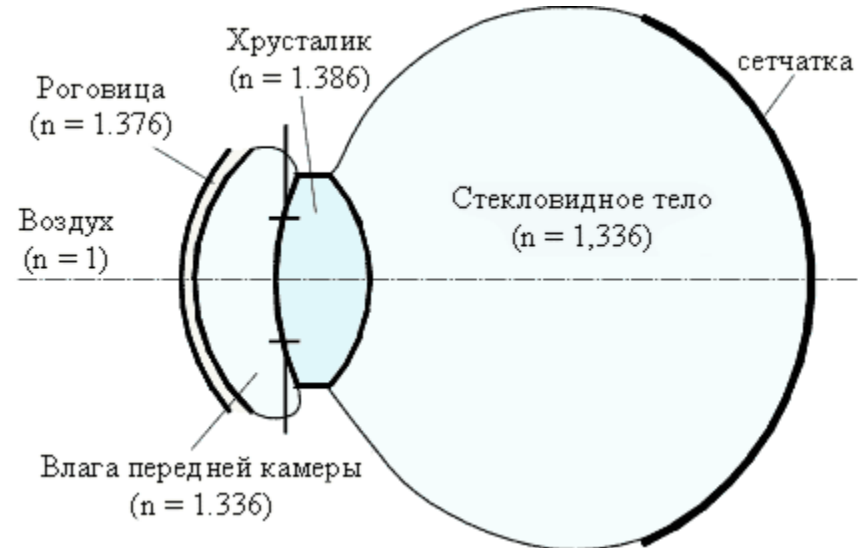
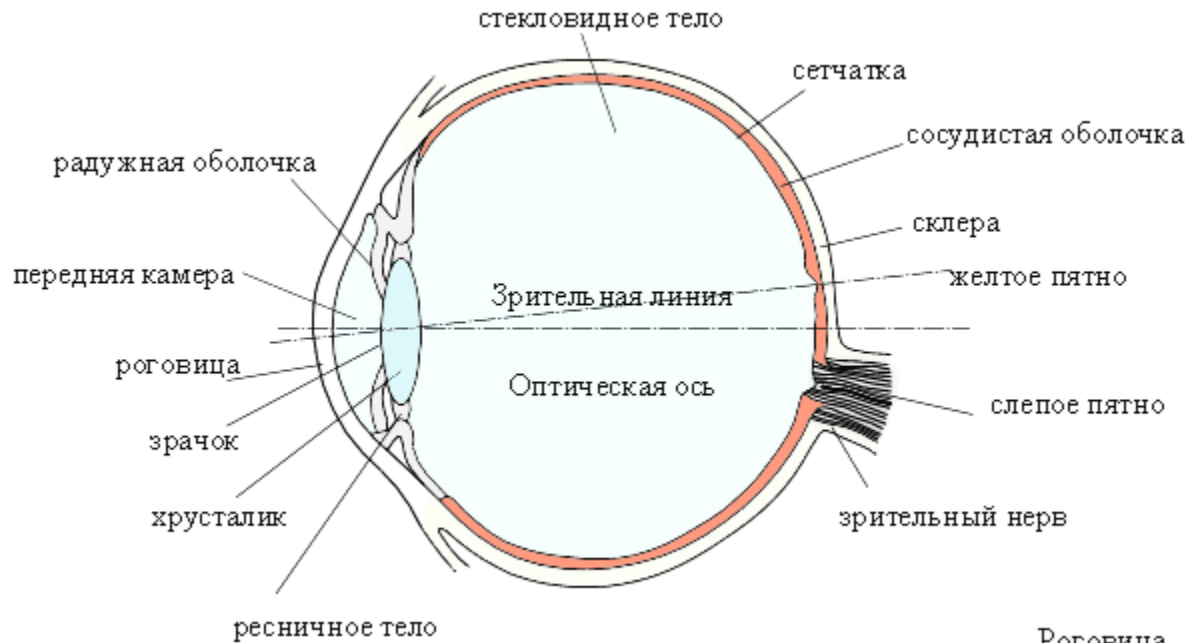


Изучение структуры материалов с нанометровым пространственным разрешением.

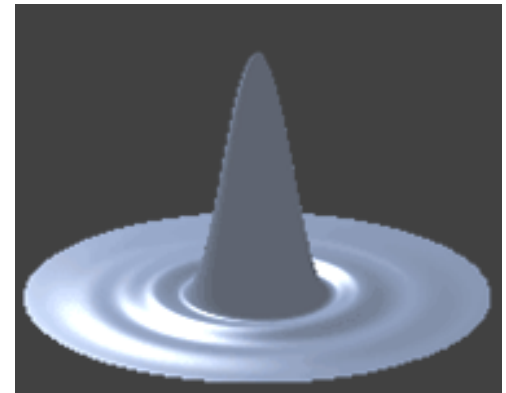
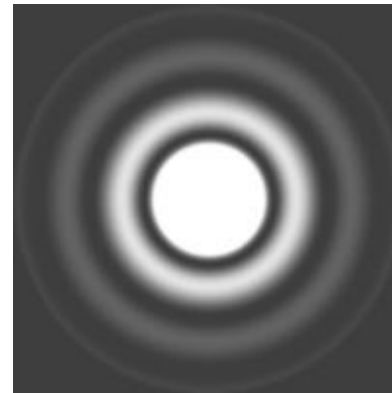
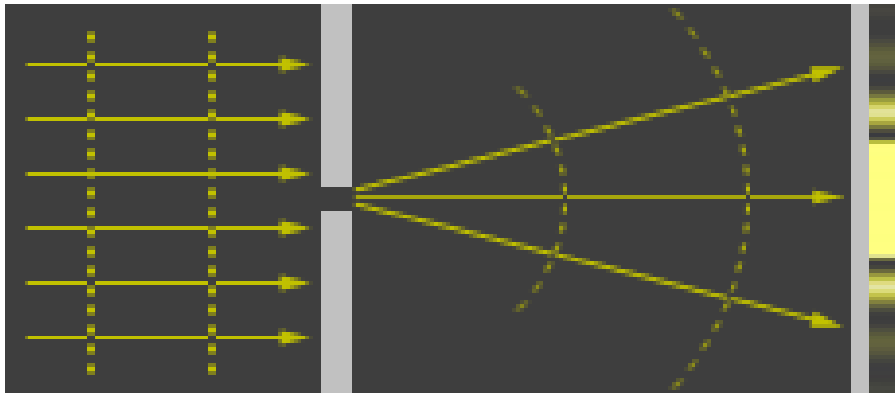


Изучение особенностей поведения и свойств наносистем, наноустройств, наноматериалов.

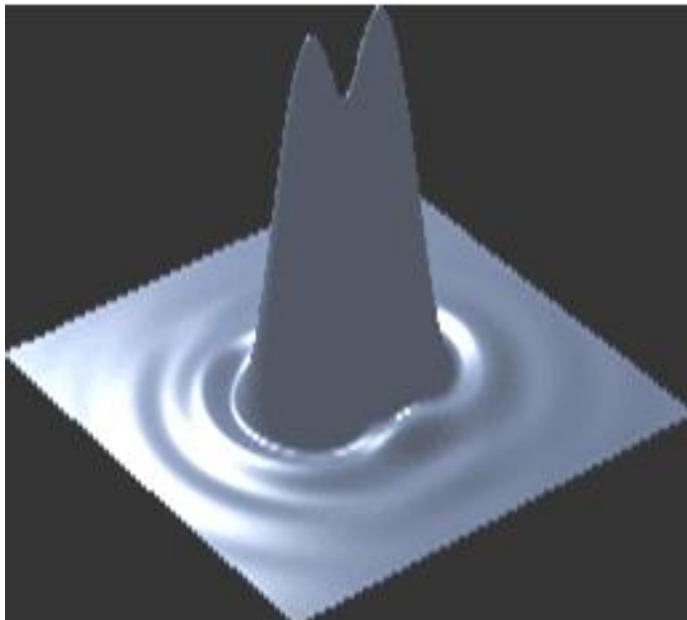
Пространственное разрешение: понятие, критерии



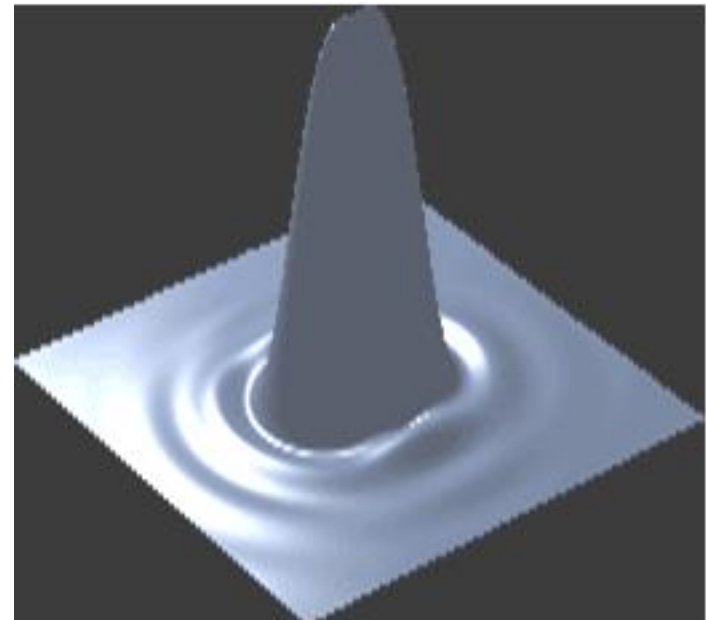
Дифракционный предел разрешающей способности



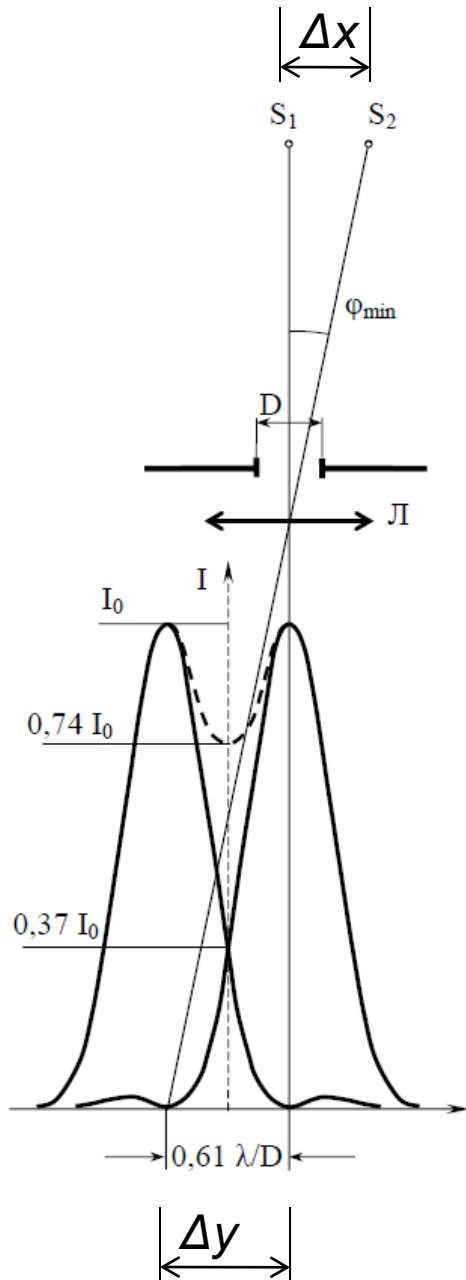
Два различных точечных источника



Точечные источники неразличимы



Дифракционный предел разрешающей способности



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

$$D \gg \lambda$$

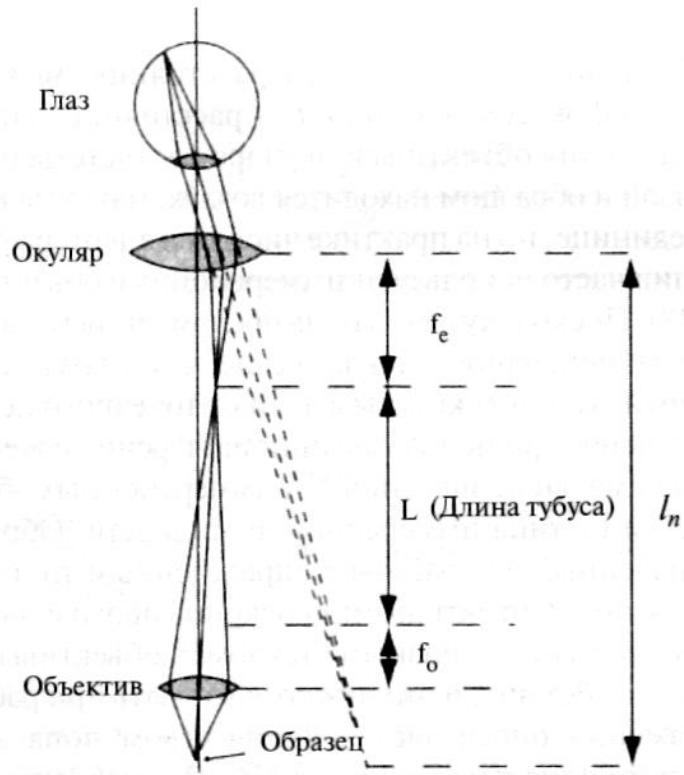
$$\varphi > 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

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:

$$M = -\frac{Ll_n}{f_0f_e}$$

Минимальное разрешаемое расстояние:

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

Фактор $k \sim 0,55 \dots 0,8$

Числовая апертура $NA = n \sin \alpha$

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

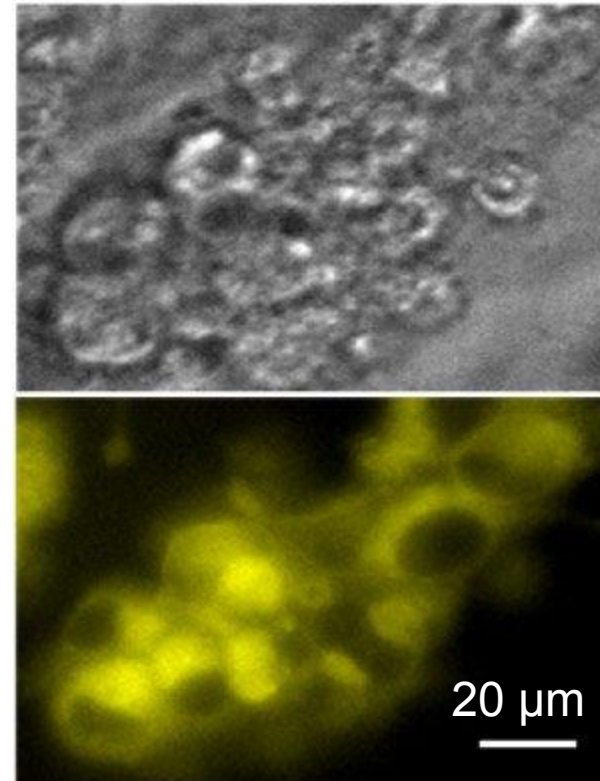
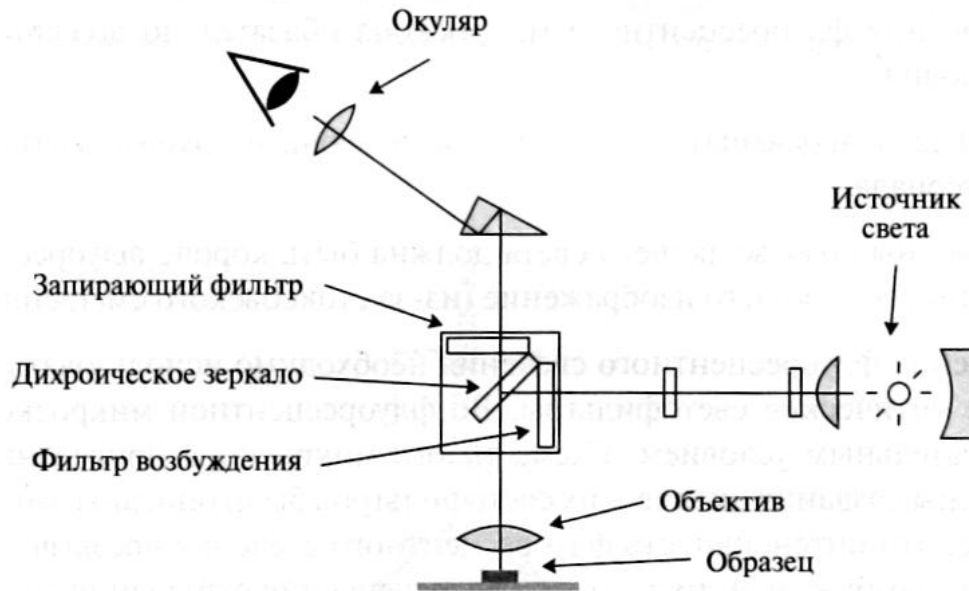
$n \sim 1,56$

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

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

Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

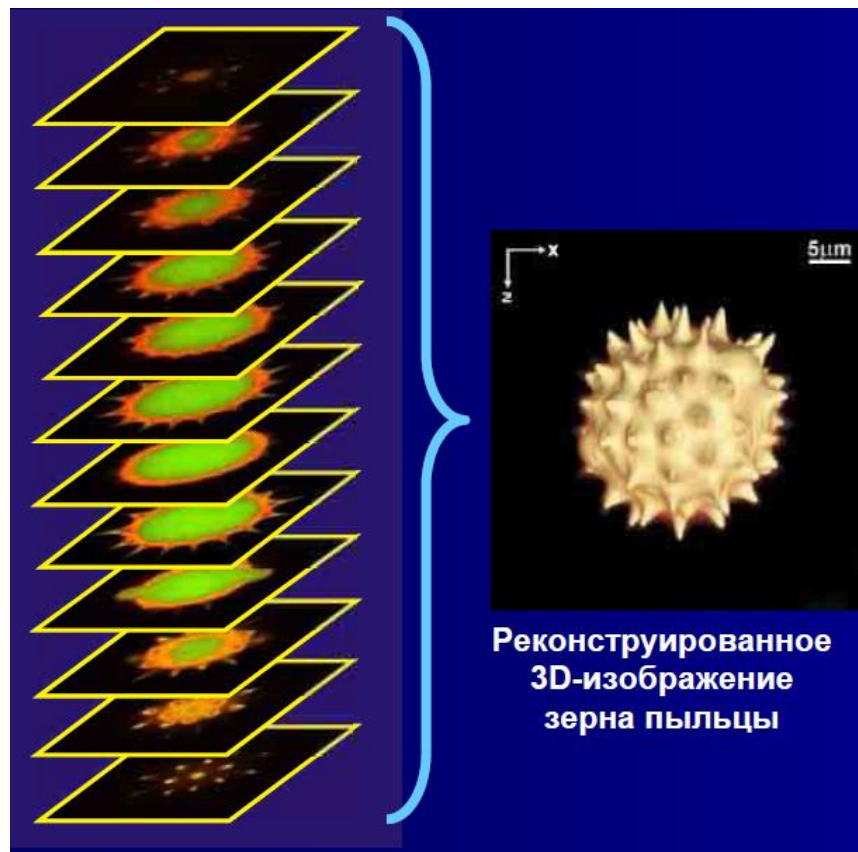
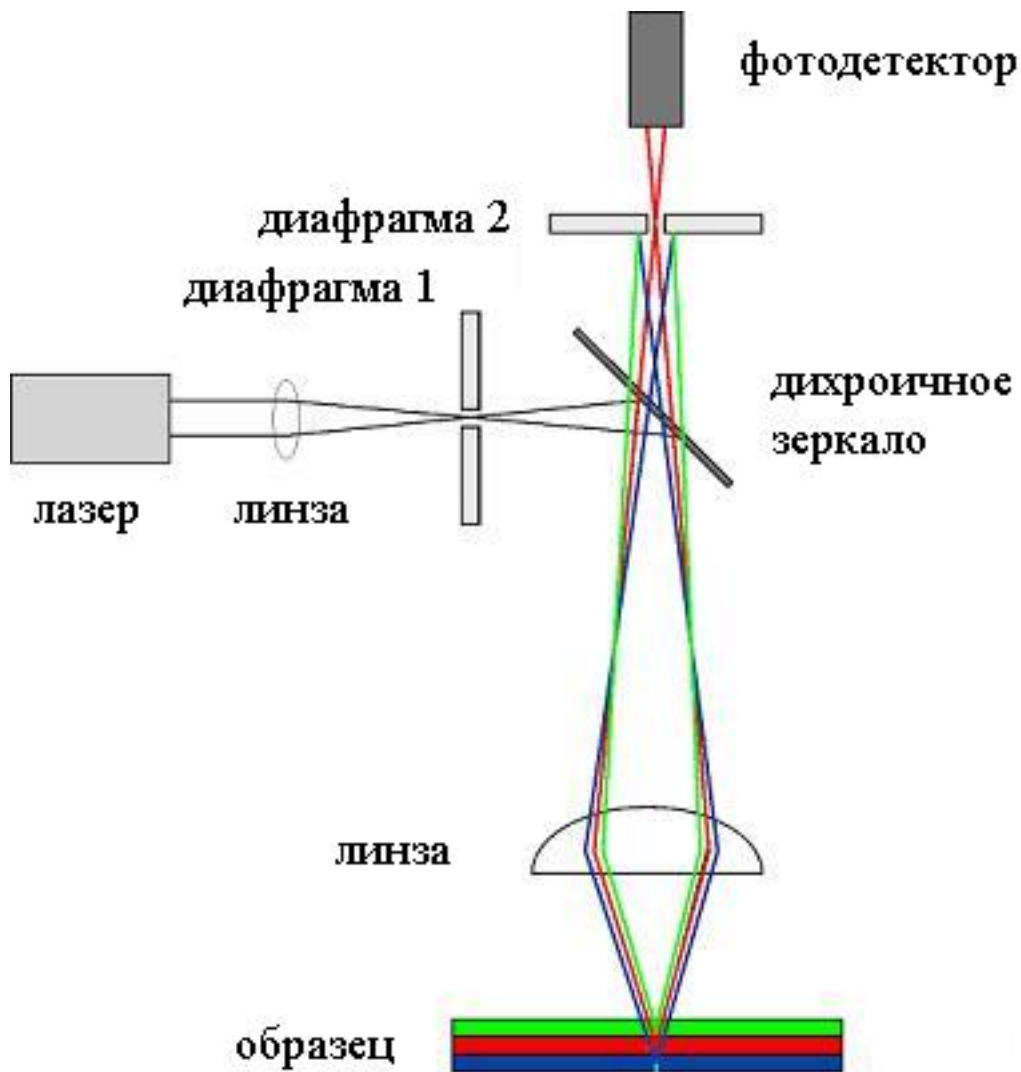
Флуоресцентная микроскопия



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

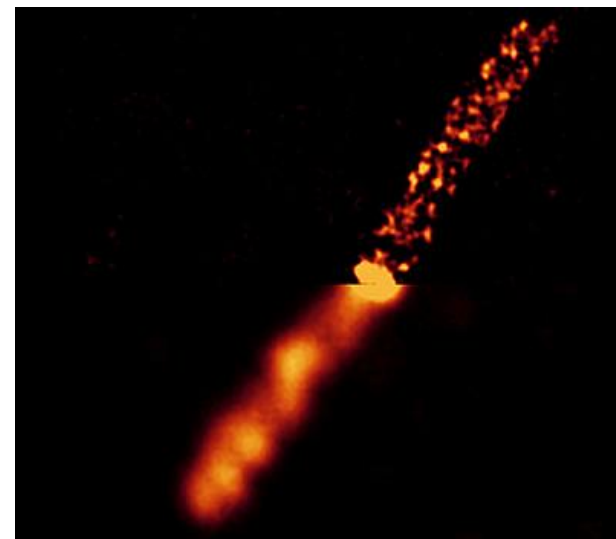
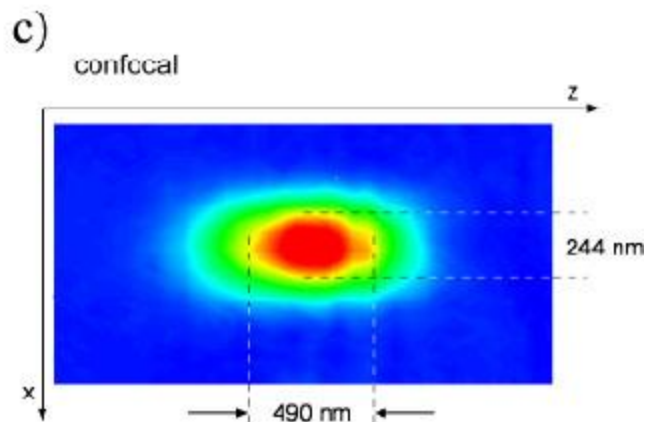
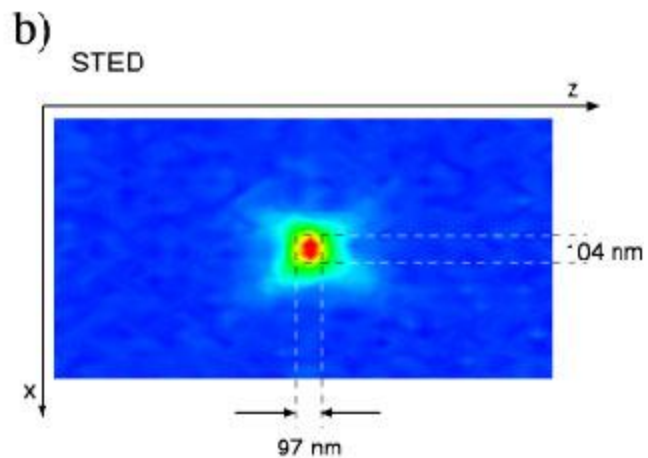
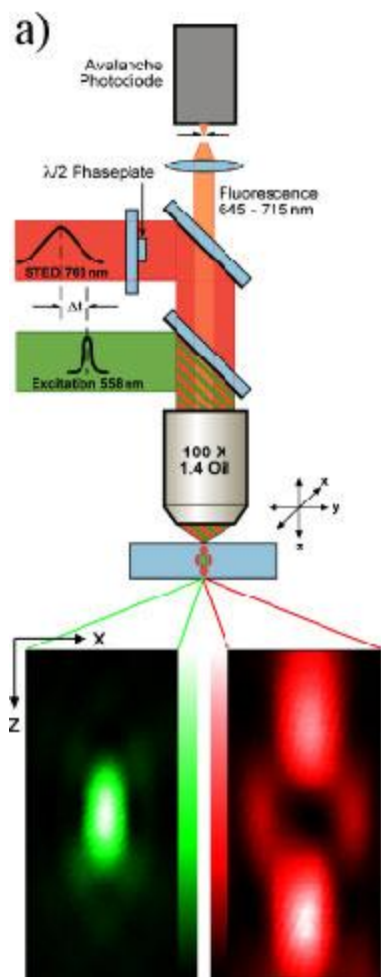
Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

Конфокальная микроскопия



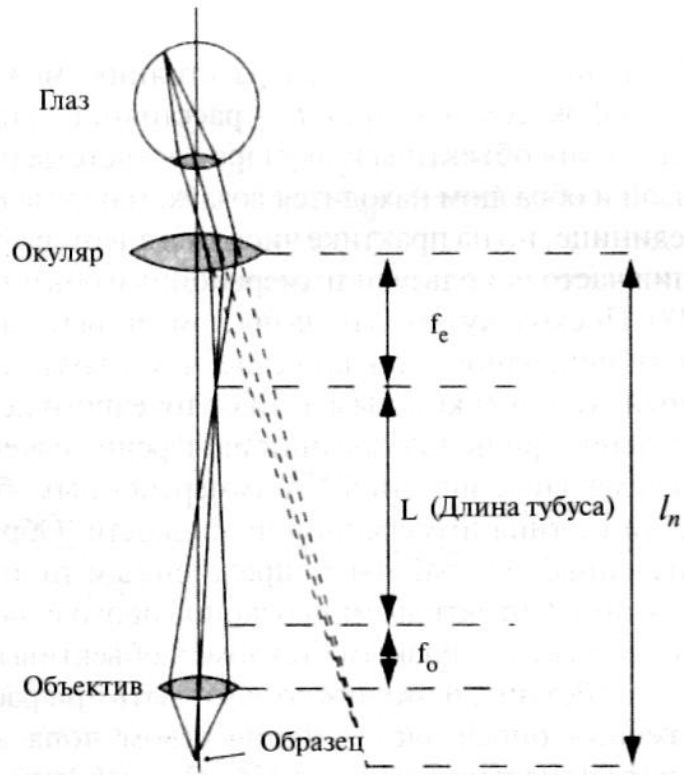
Оптическая микроскопия для исследования нанообъектов

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 $NA = n \sin \alpha$

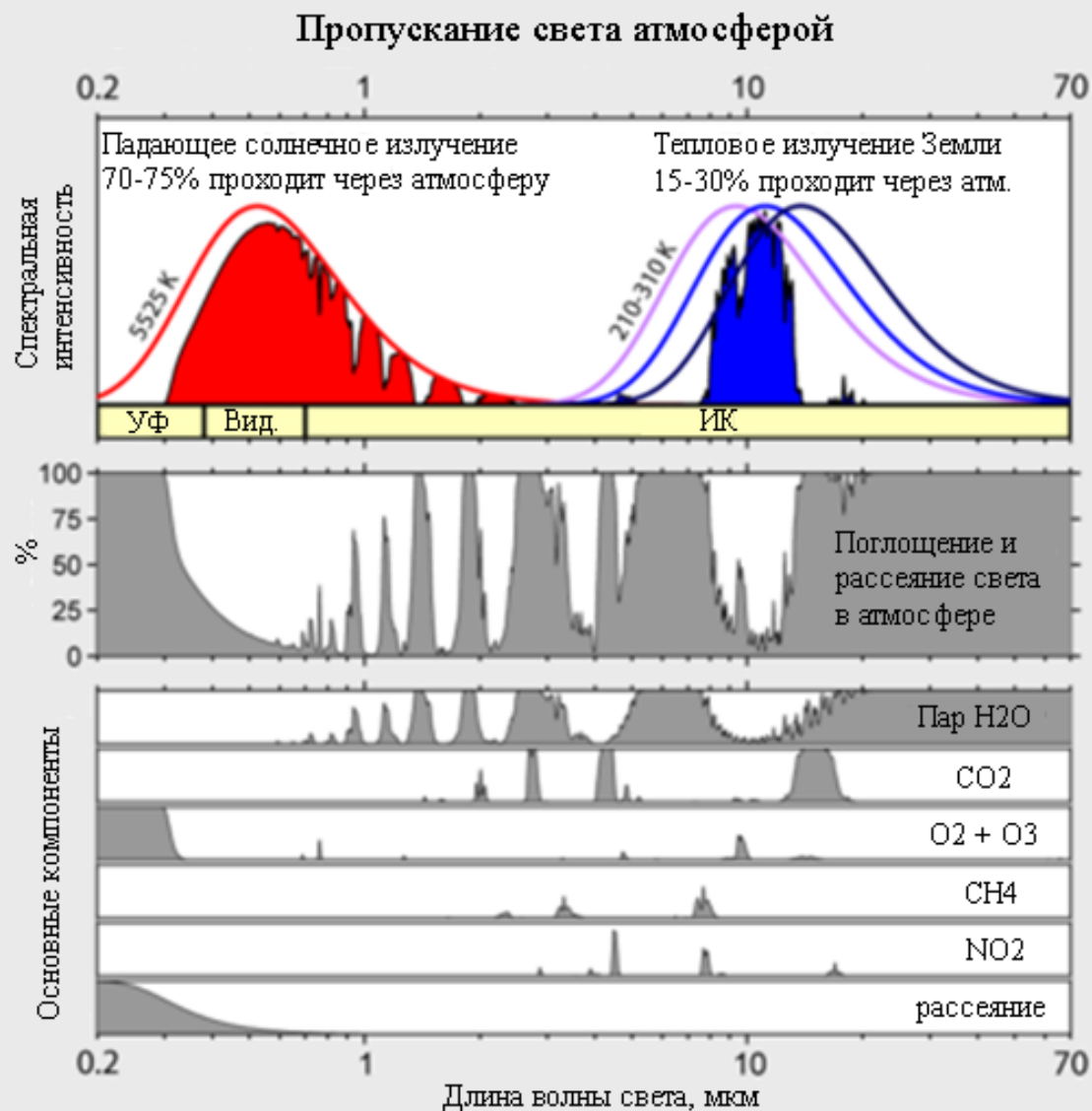
$\alpha \sim 70^\circ$ ($\sin \alpha \sim 0,94$)

$n \sim 1,56$

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

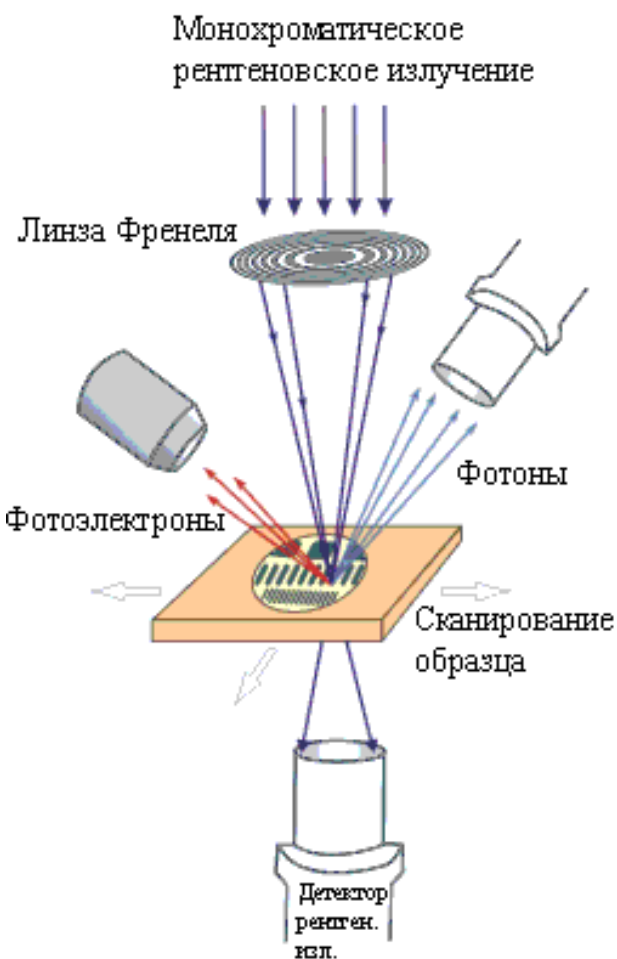
$$d_{\min} \sim 200 \text{nm}$$

Использование оптической микроскопии ограничено окном прозрачности атмосферы

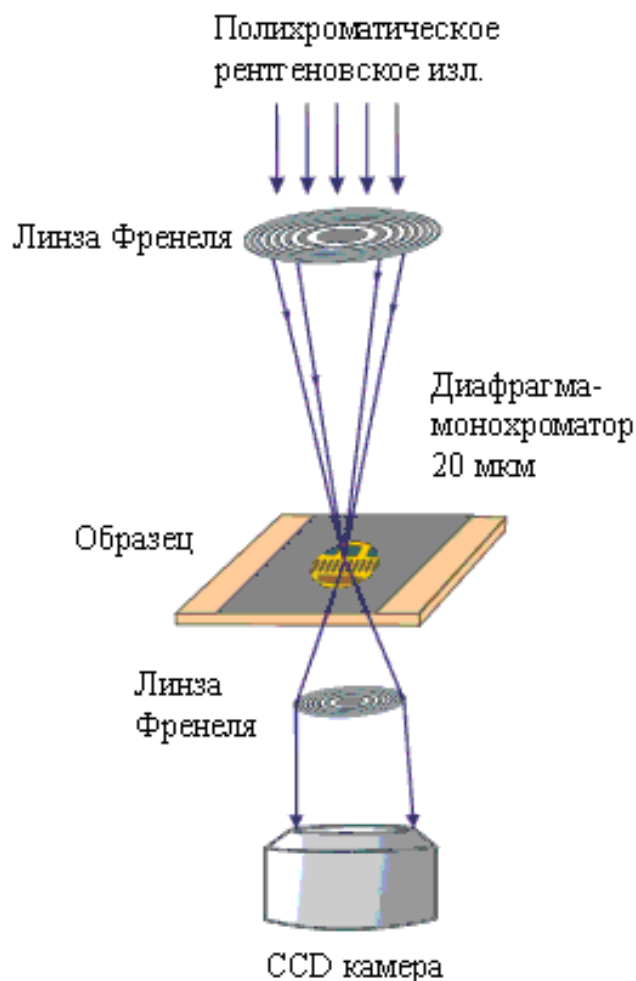


Рентгеновская микроскопия (длина волны $\sim 0,1$ нм)

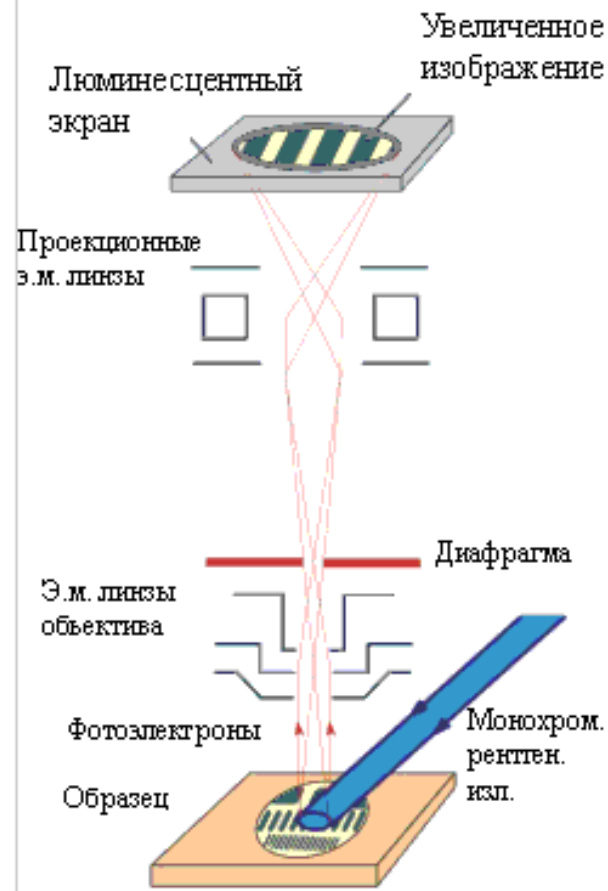
Сканирующий просвечивающий рентгеновский микроскоп



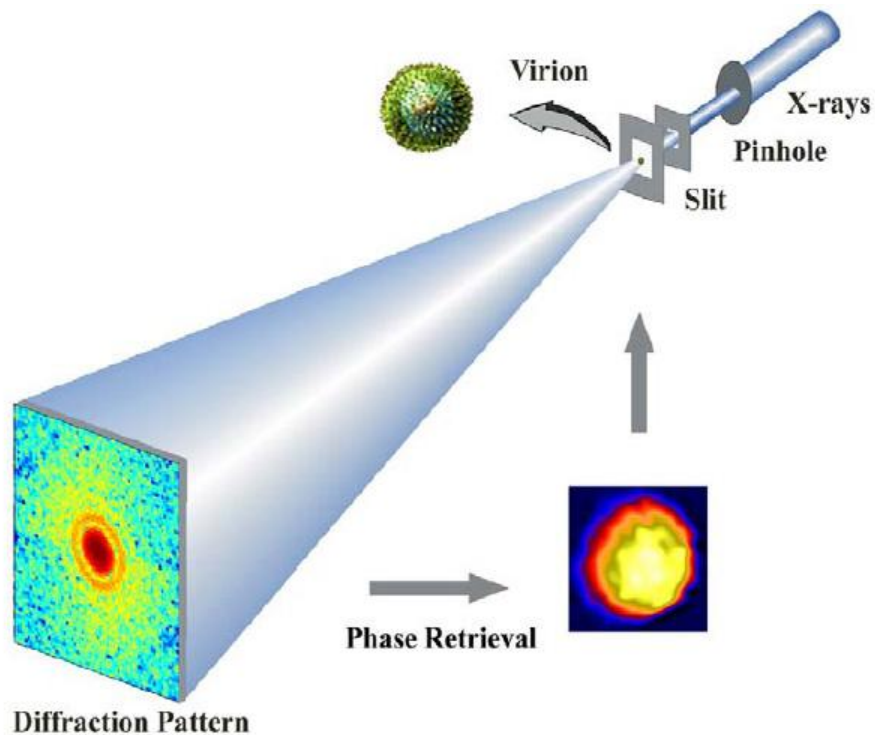
Просвечивающий рентгеновский микроскоп



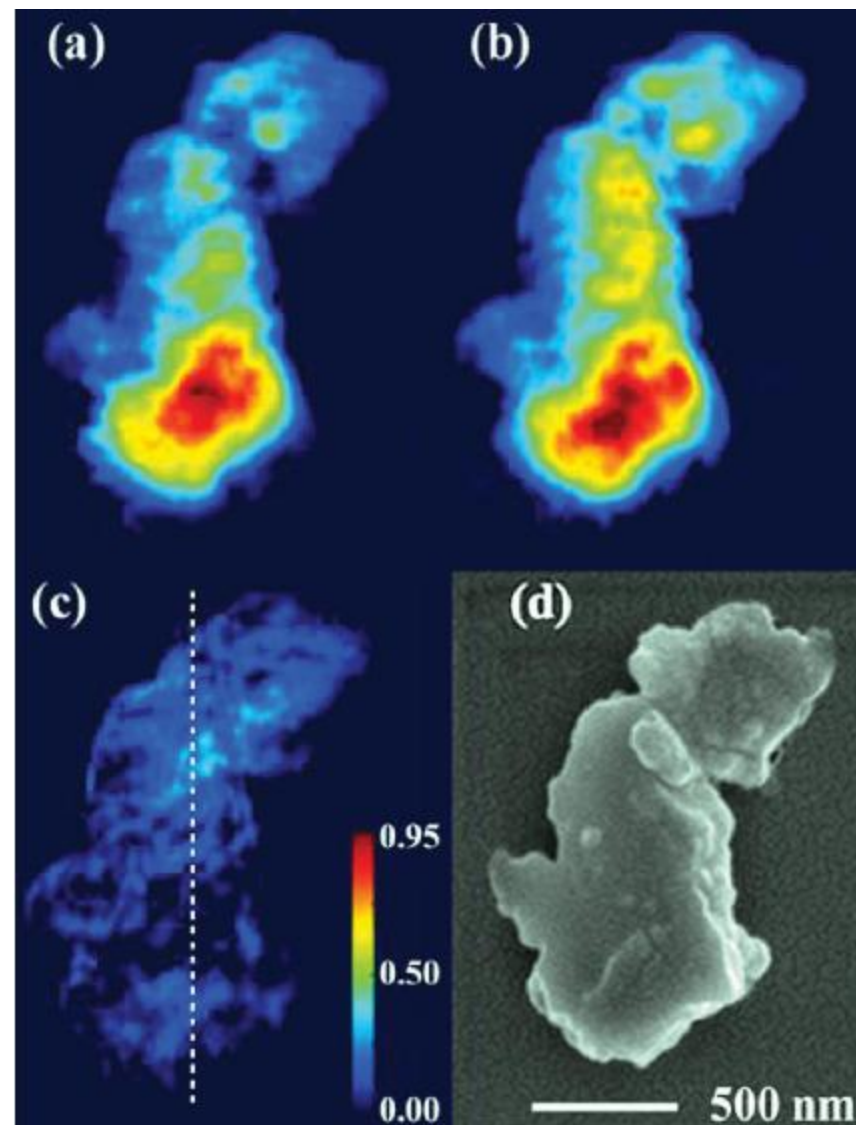
Флуоресцентный рентгеновский микроскоп



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



Рентгеновский снимок мышиноного вируса герпеса



Распределение висмута в кристалле кремния

PHYSICAL REVIEW LETTERS
100, 025504 (2008)

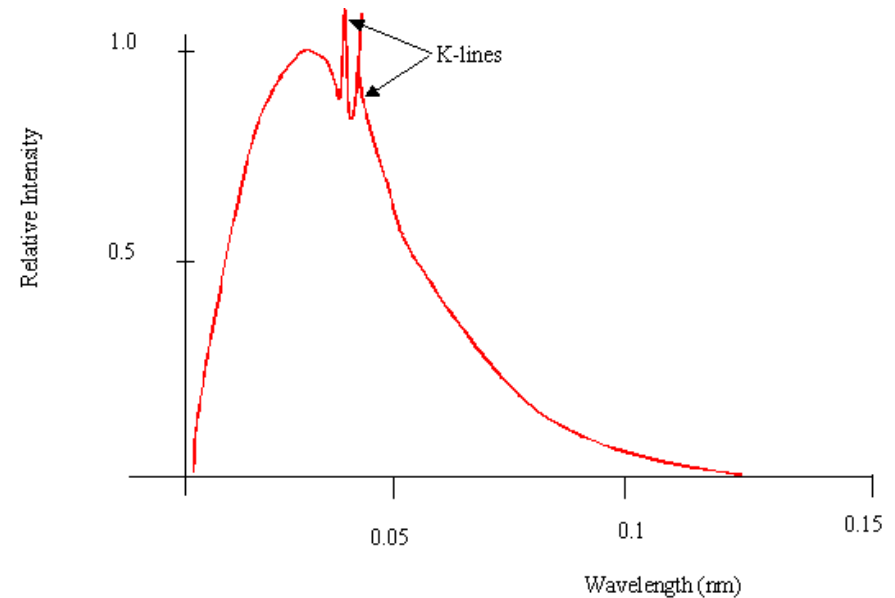
Рентгеновское излучение: $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$,

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ 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

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

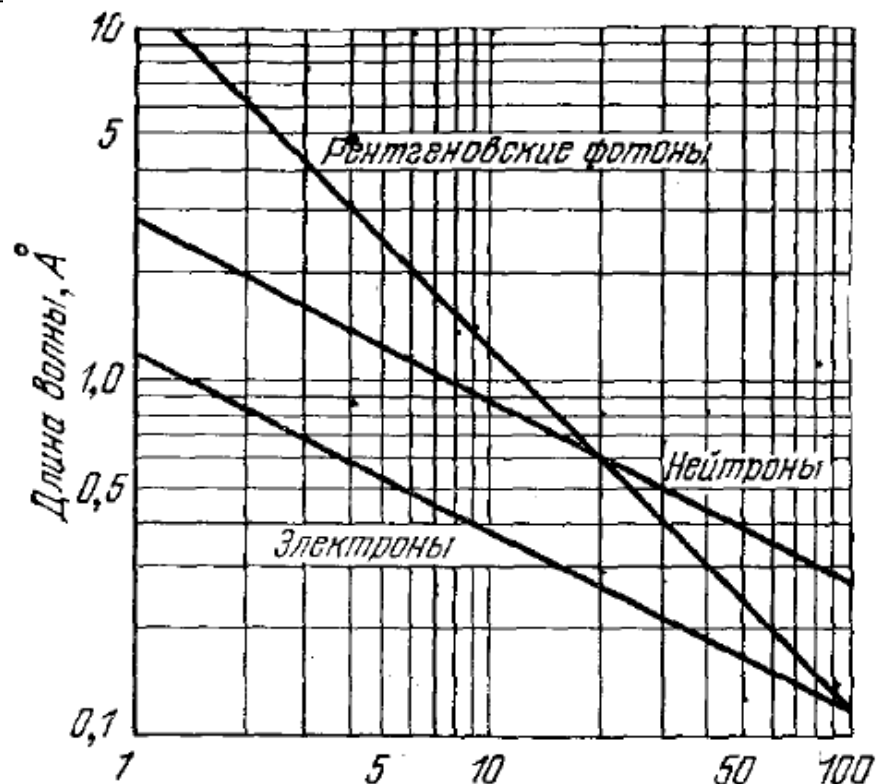
Для $\lambda = 1 \text{ Å}$, энергия нейтронов должна быть $\varepsilon \approx 0,08 \text{ эВ}$.

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.

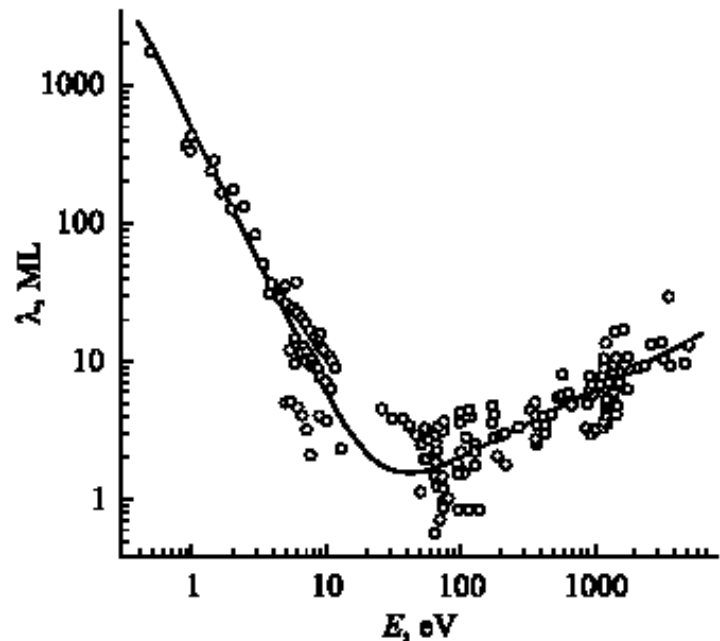
Глубина проникновения таких электронов около 5 - 10 Å.



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

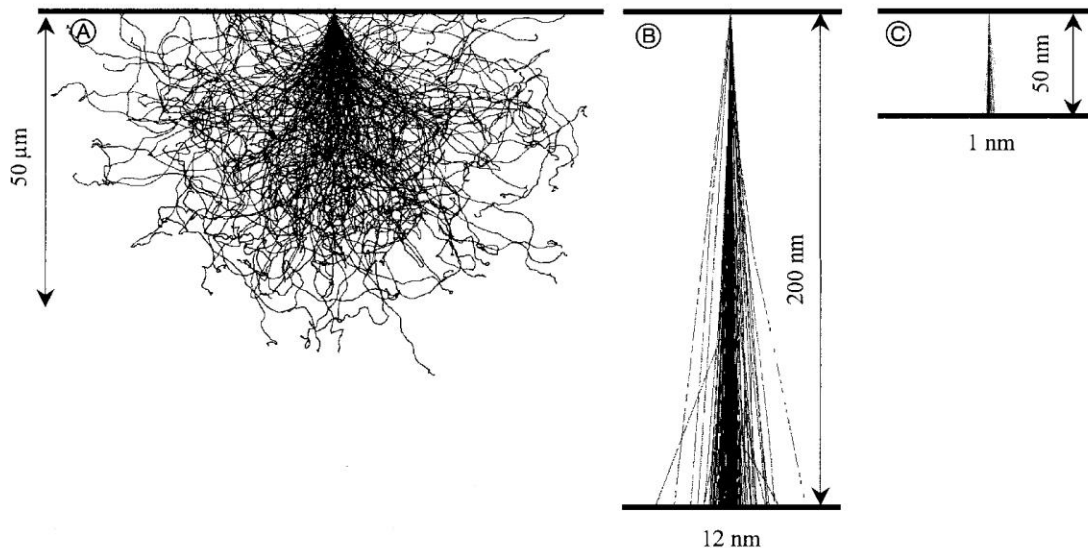
Зависимость длины волны от энергии частиц для фотонов, нейтронов и электронов.

Взаимодействие электронов с веществом



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

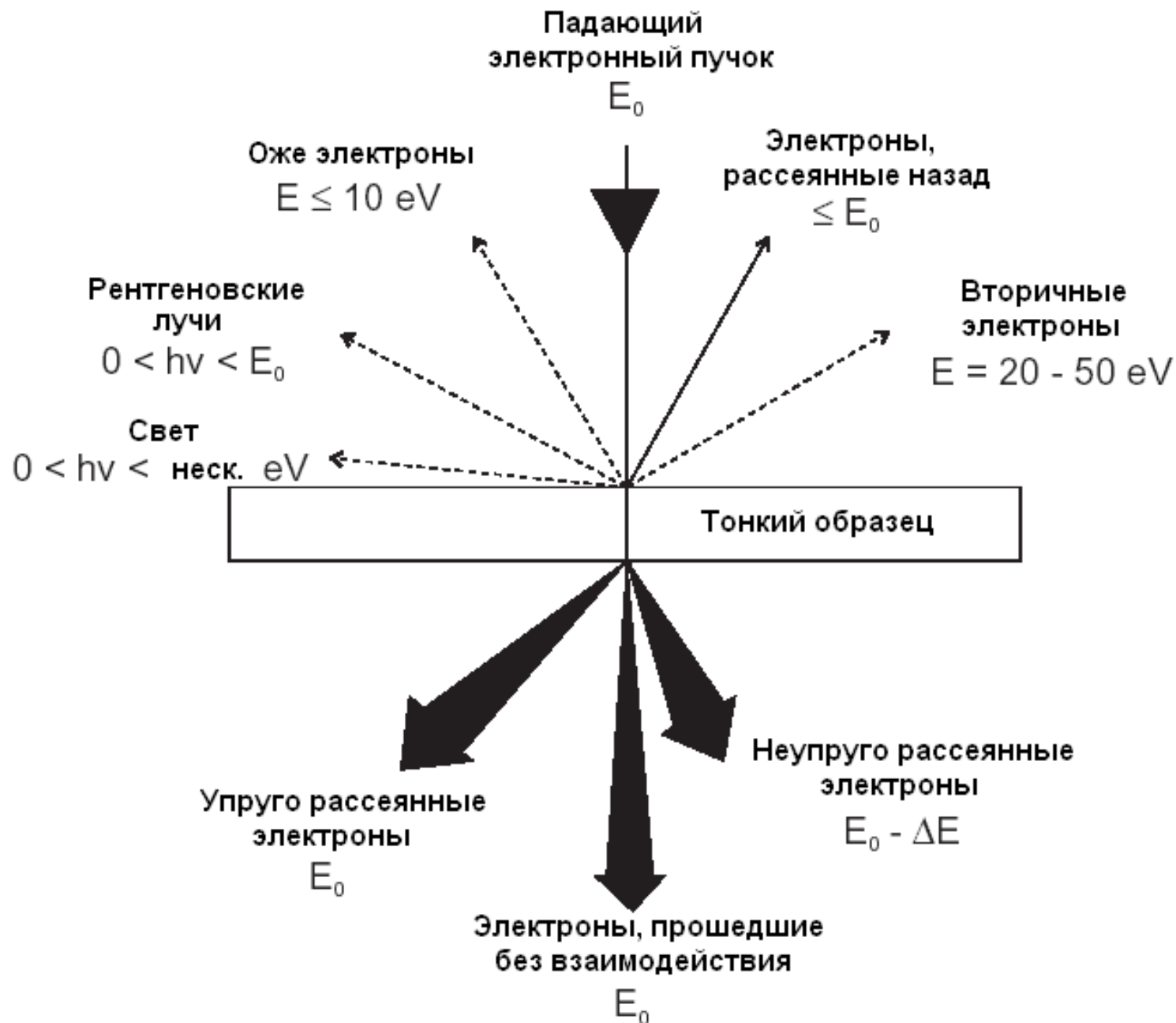
Глубина проникновения или выхода электрона при взаимодействии с конденсированным веществом составляет несколько ангстрем в диапазоне энергий 5...5000 эВ.



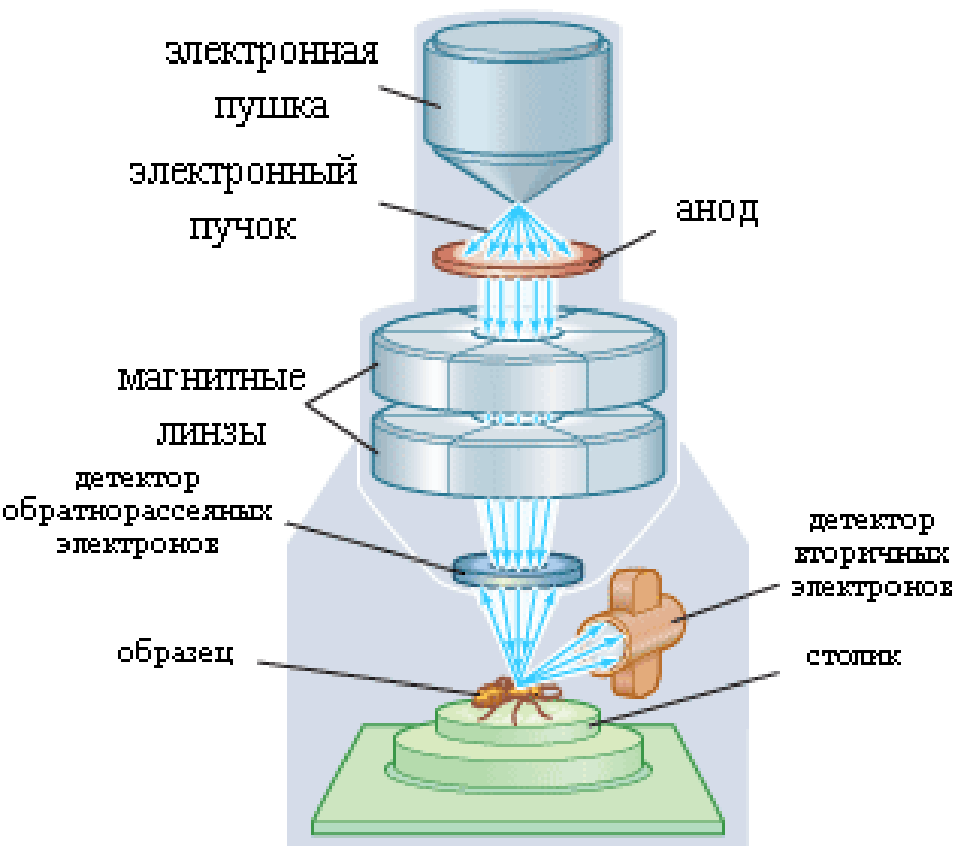
Электроны с высокой энергией проникают на большую глубину.

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

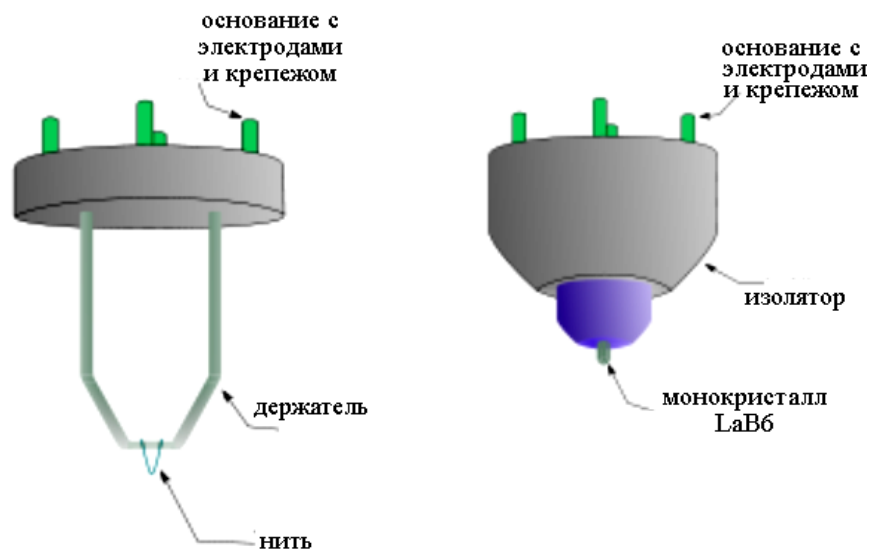
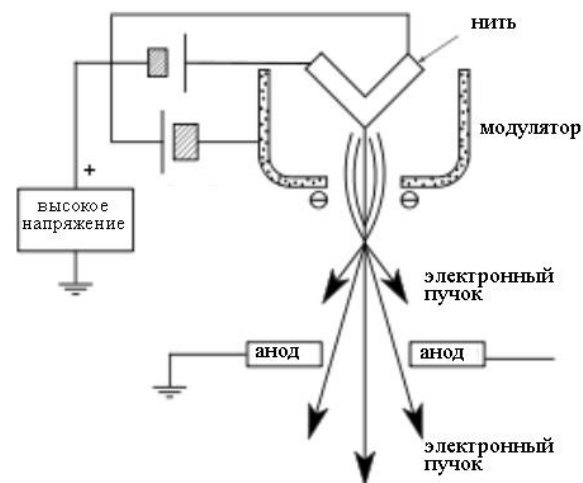
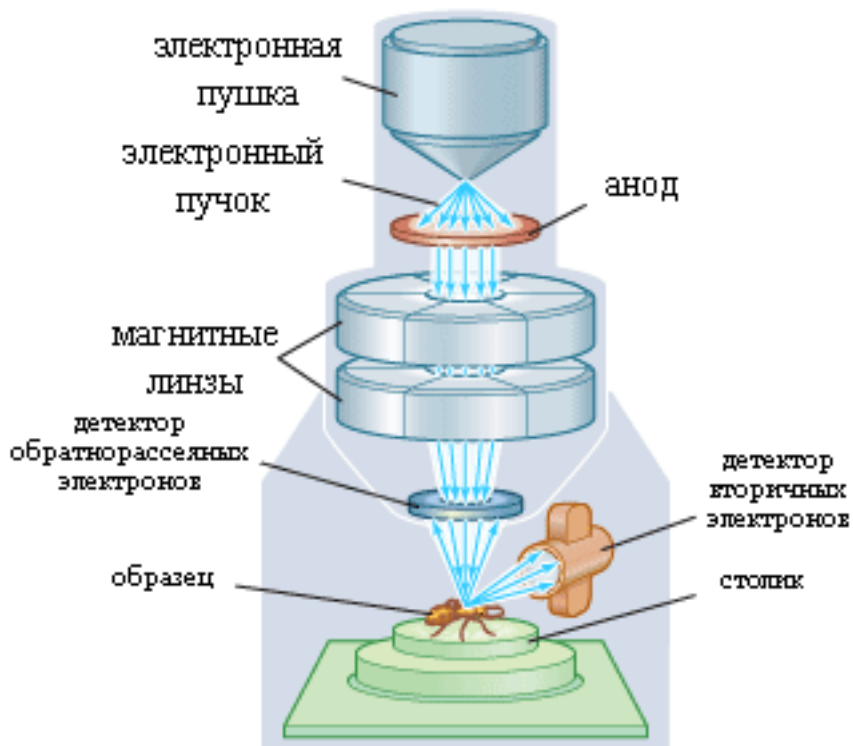


Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

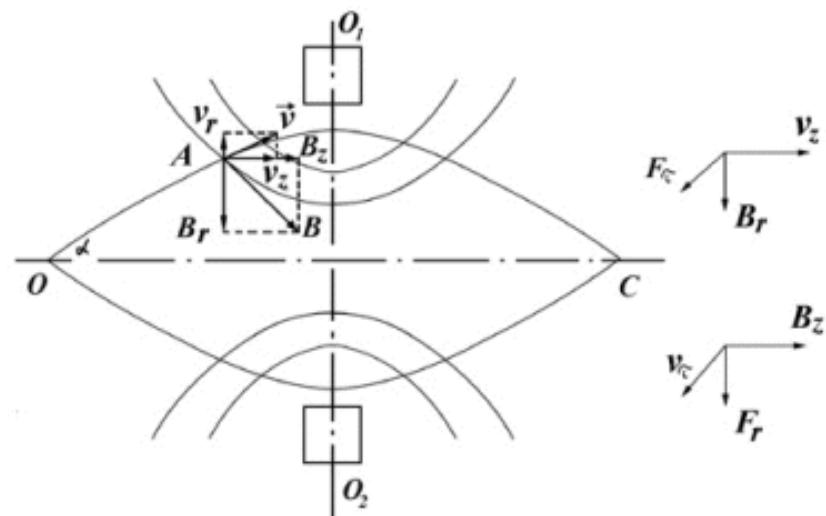
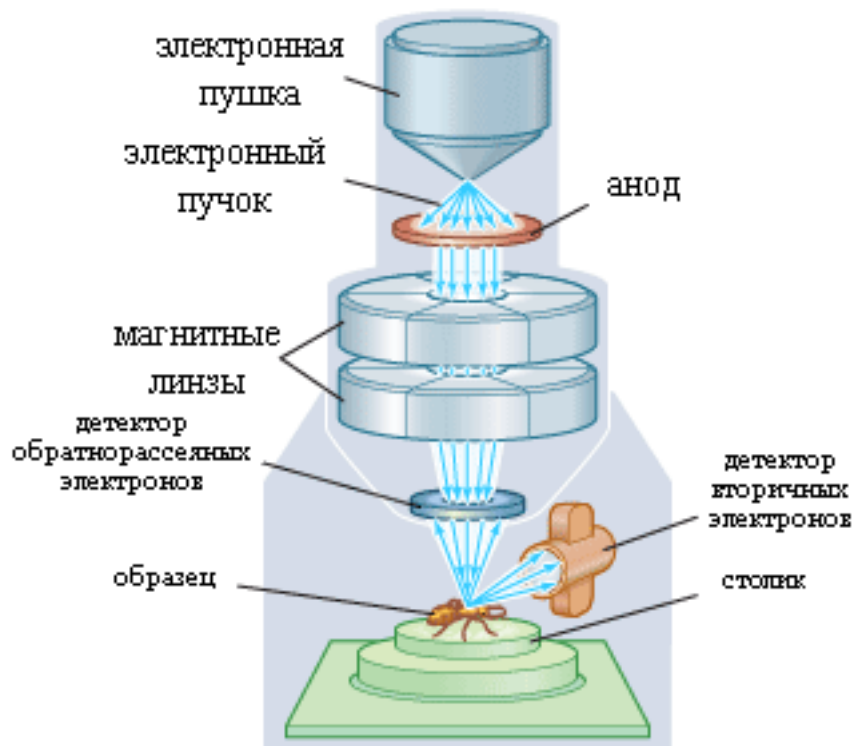


Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)

Схема устройства электронной пушки.

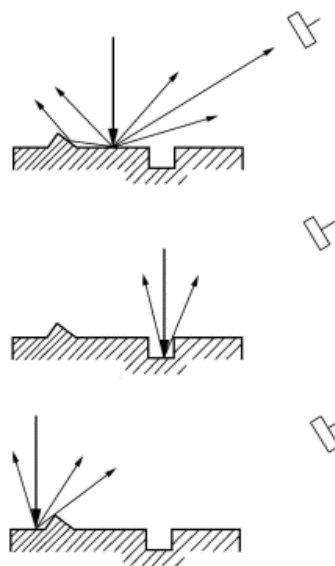


Растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)



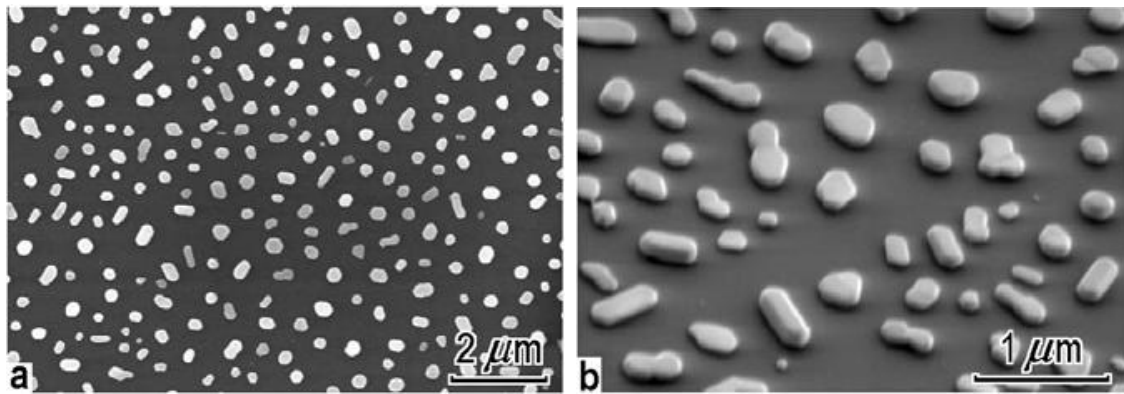
Движение электронов в магнитной линзе.

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

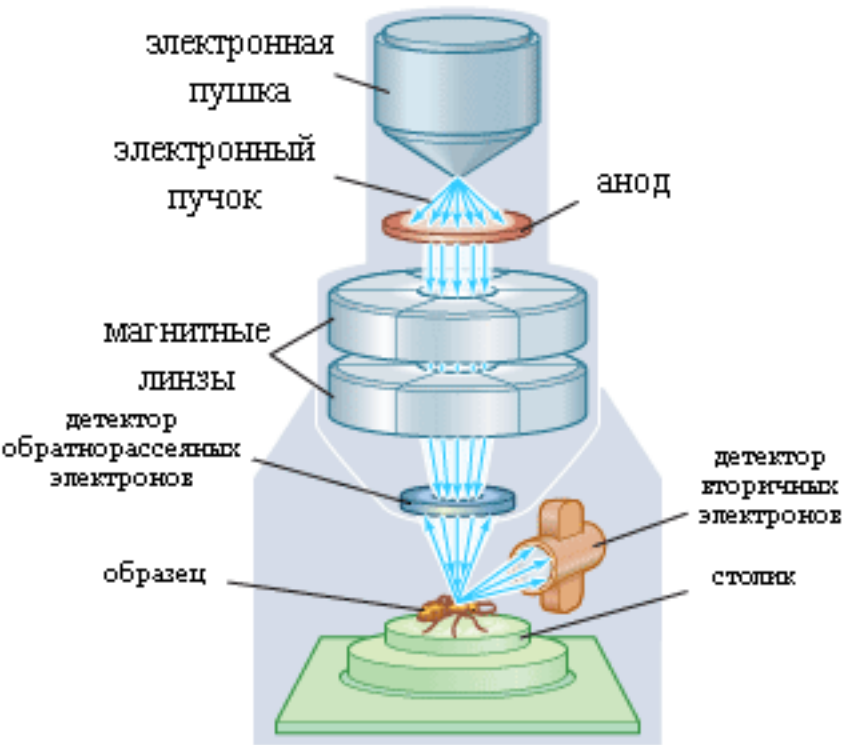


Интенсивность потока вторичных электронов, попадающих в детектор определяется наклоном оси детектора и профилем поверхности.

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.

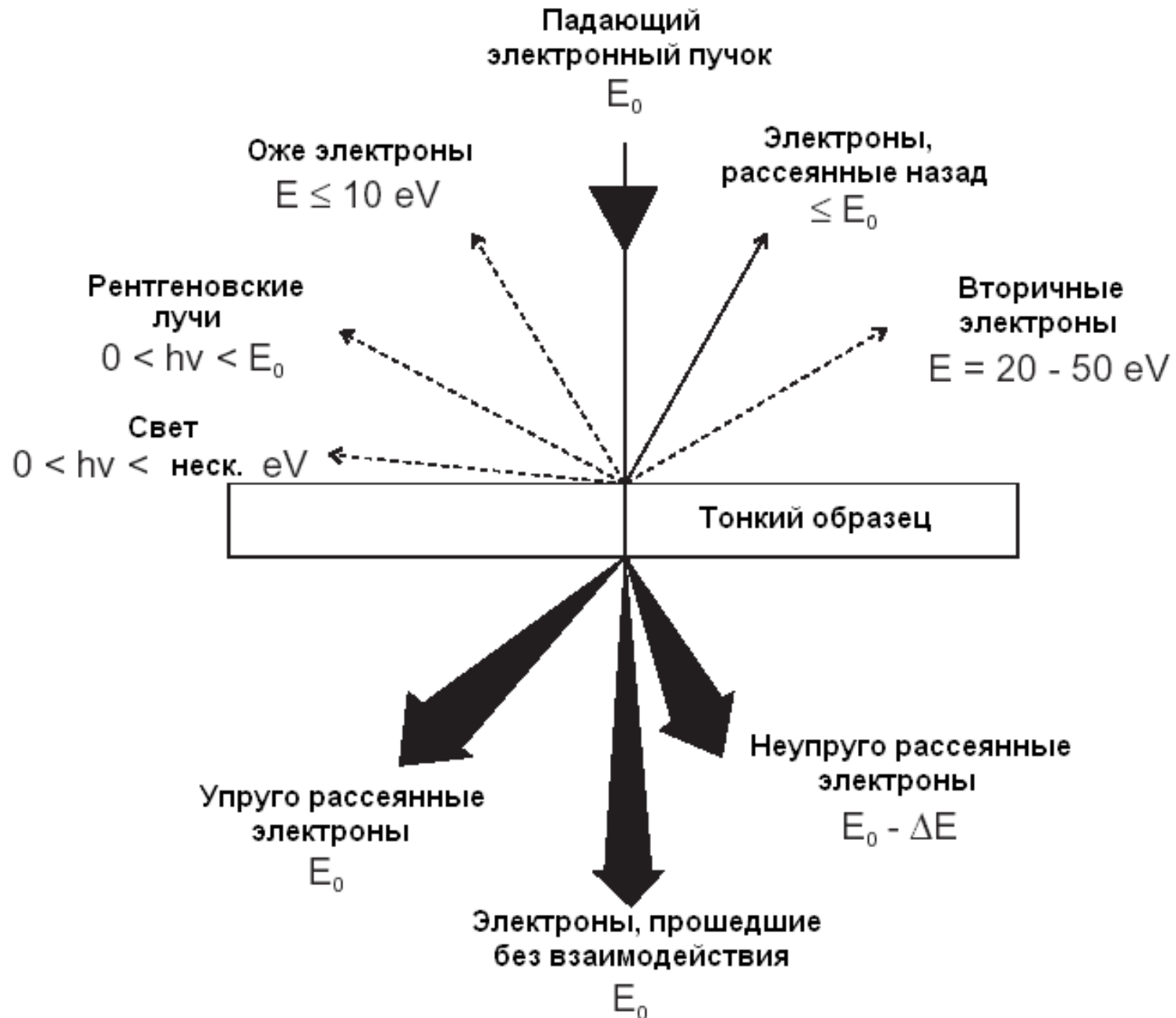
Ток через образец – разность тока первичного пучка и суммы токов ВЭ и ОРЭ

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

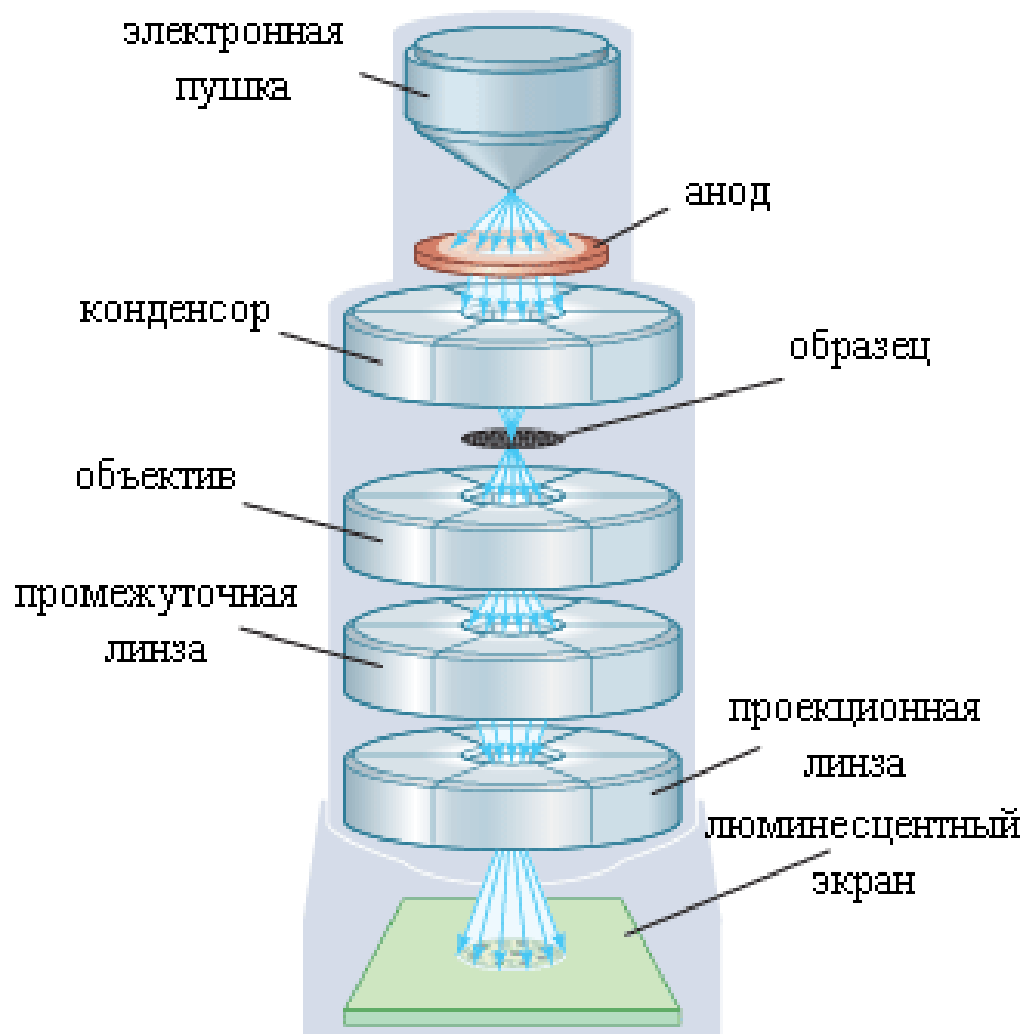
Ток, индуцированный электронным пучком – визуализация электрически активных областей (p-n переходы, дефекты).

Катодолюминесценция – изучение рекомбинации носителей заряда.

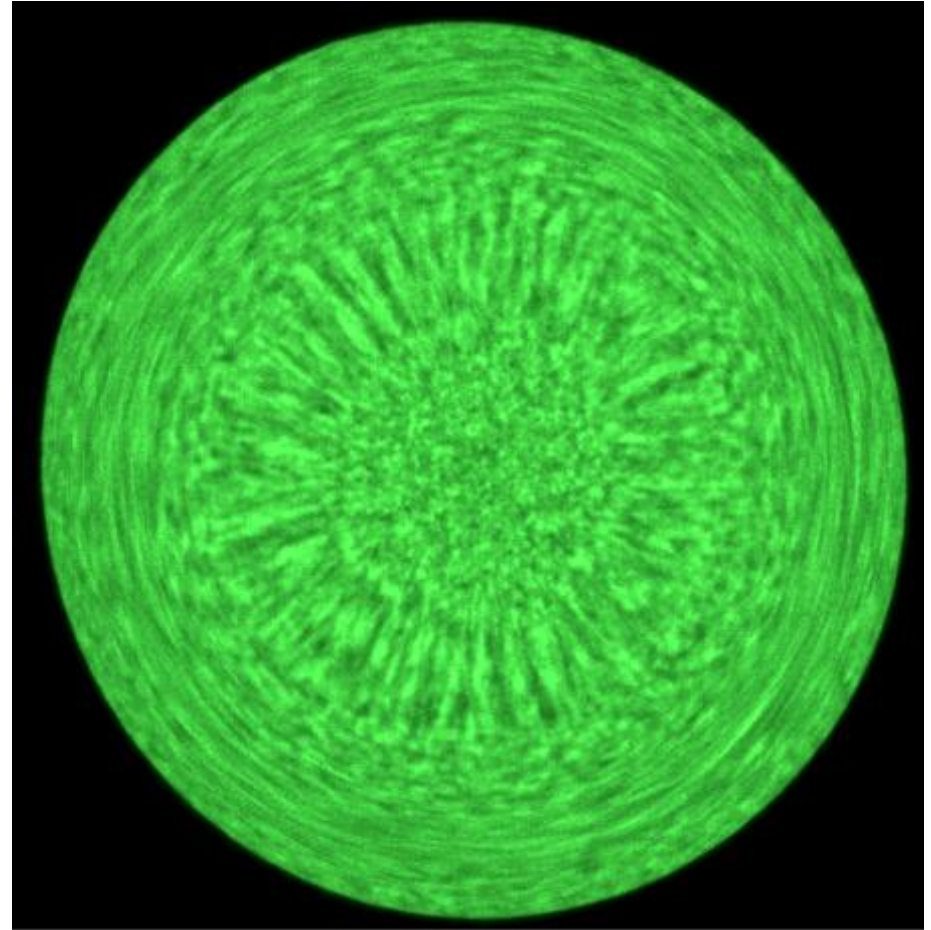
Взаимодействие электронов с веществом



Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, ТЕМ)



Ограничение разрешения электронной оптикой

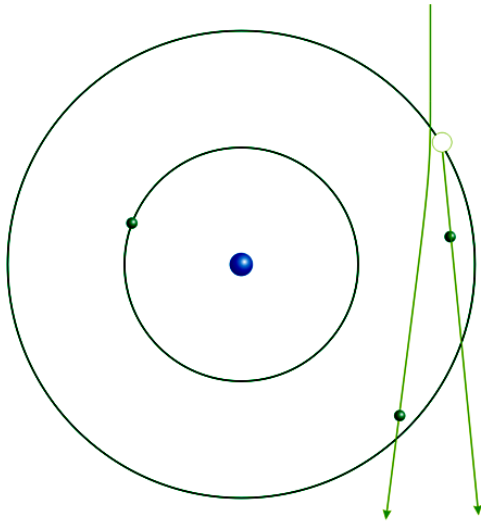


Качество изображений, создаваемых электронной линзой, значительно хуже качества оптических изображений.

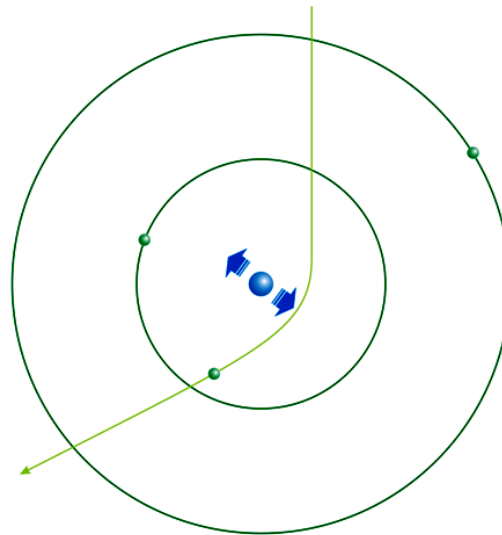
Ограничения разрешения из-за радиационных дефектов

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

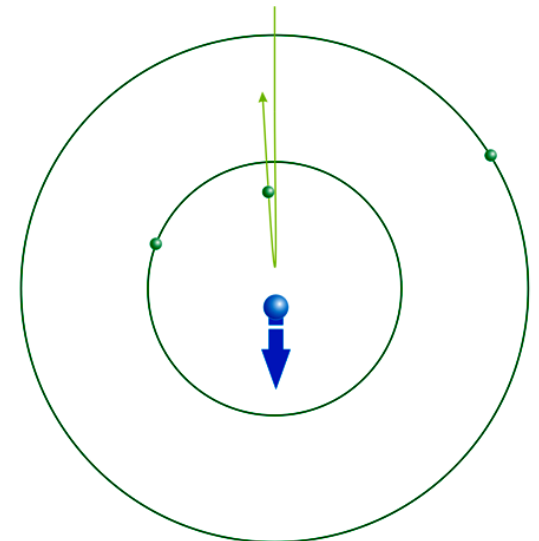
ионизация



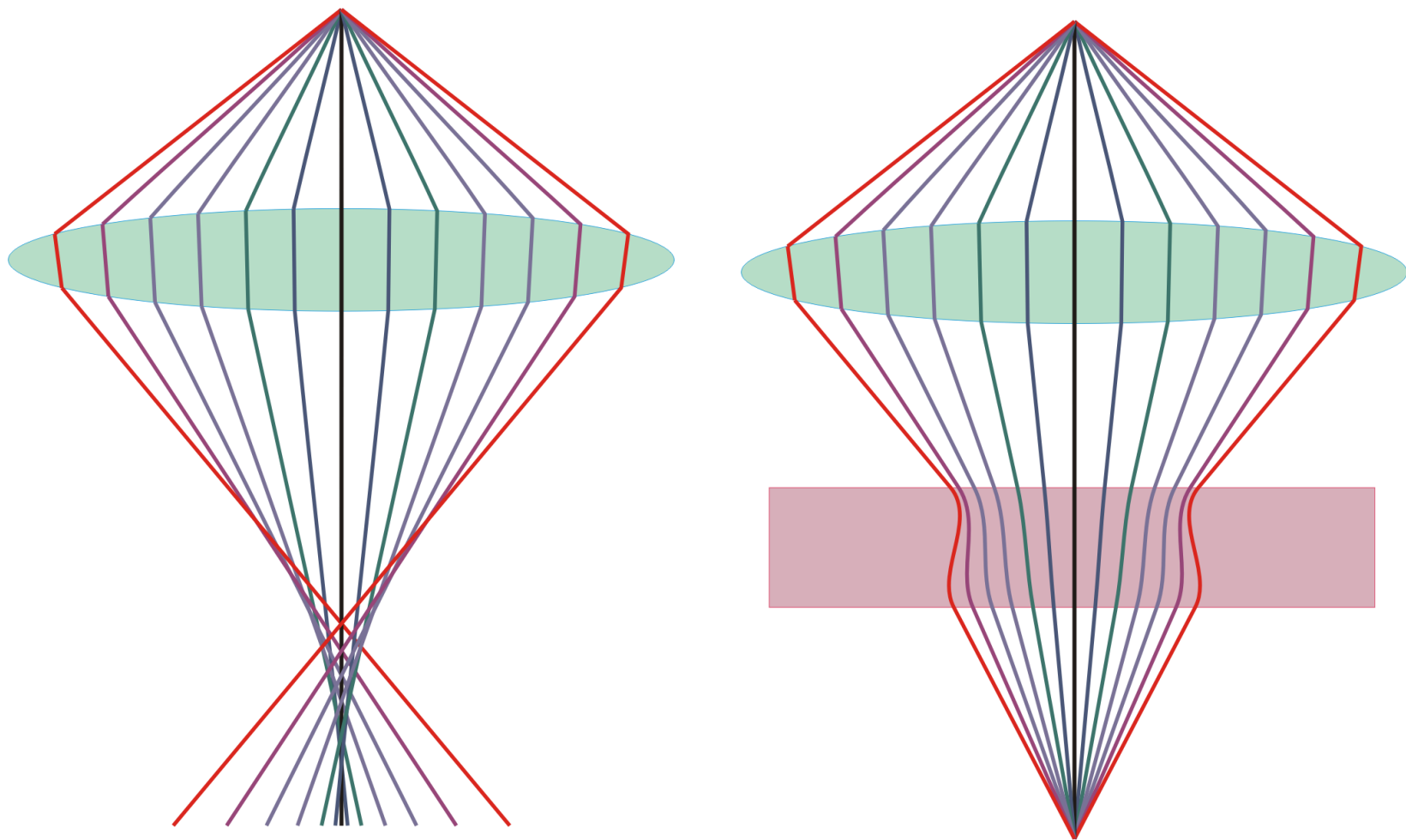
ионизация и нагрев



образование дефектов

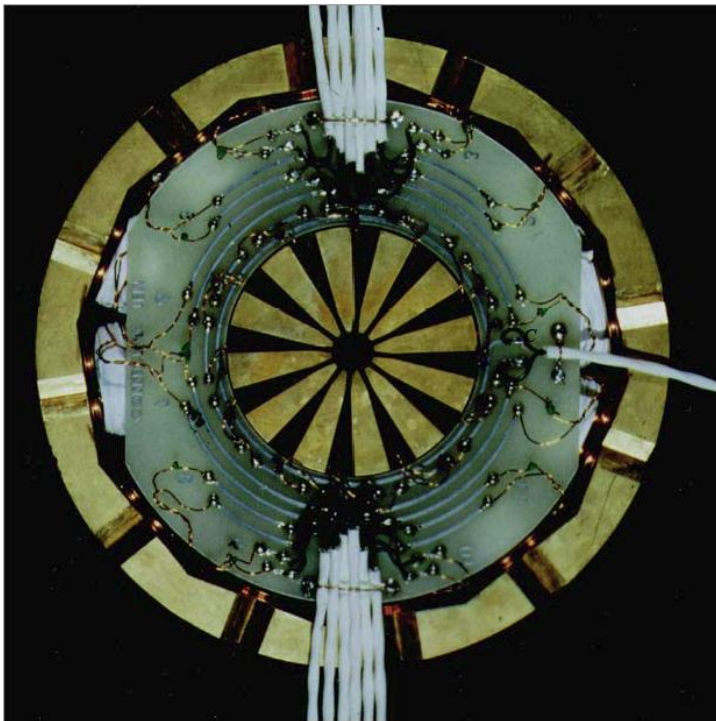


Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций

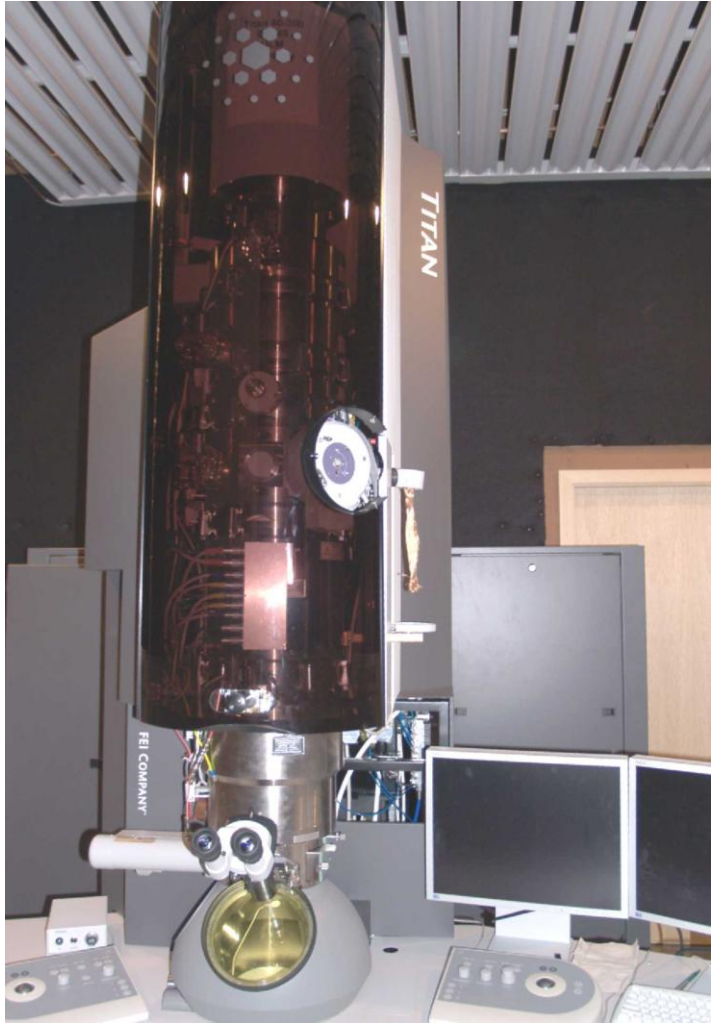


Схематическое изображение траекторий электронов при фокусировке обычной системой магнитных линз (слева) и системой с коррекцией сферических aberrаций (справа)

Просвечивающие микроскопы с коррекцией сферических aberrаций



CEOS
Corrected Electron Optical
Systems GmbH



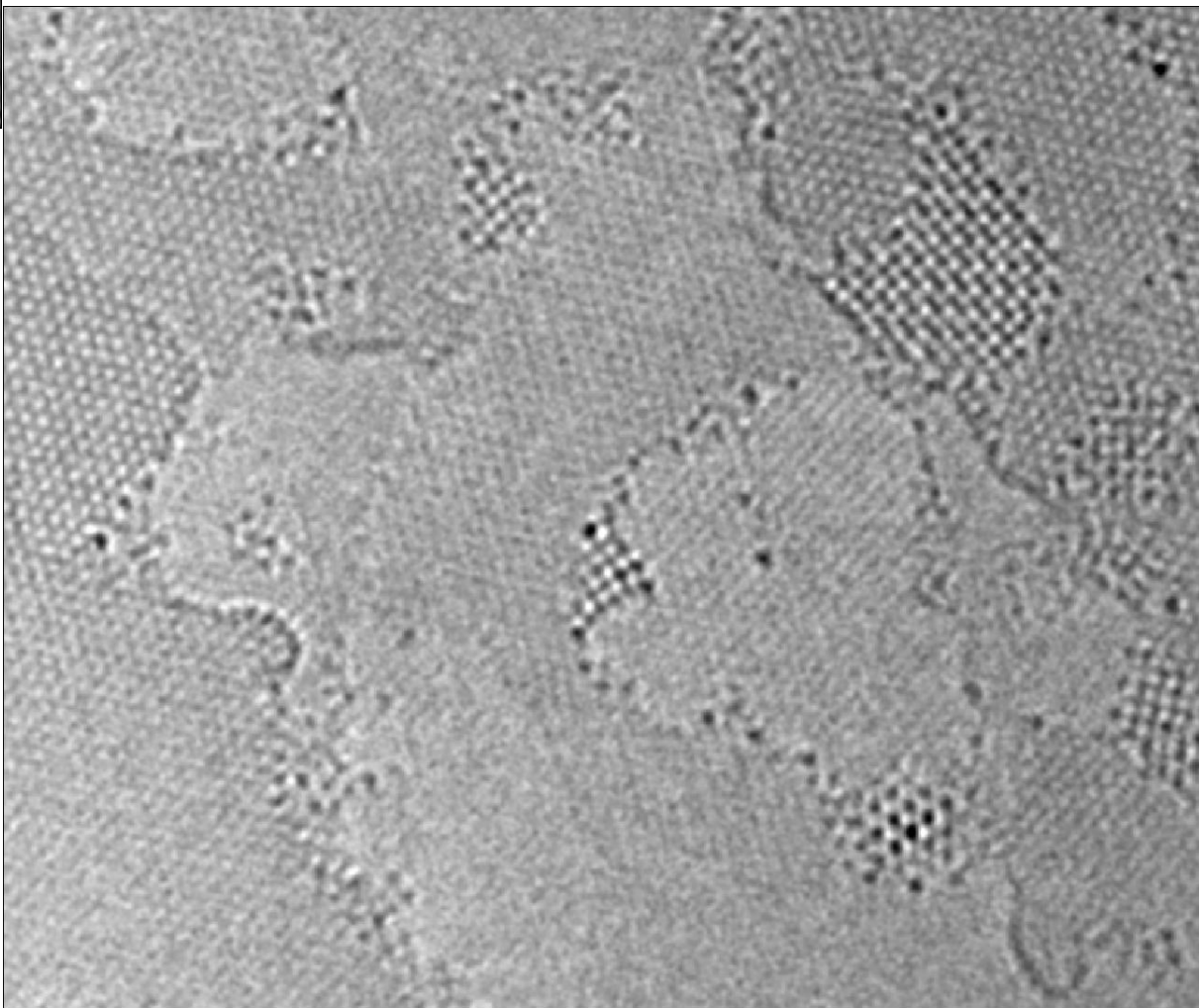
**TITAN 80-300
(FEI, NETHERLANDS)**

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

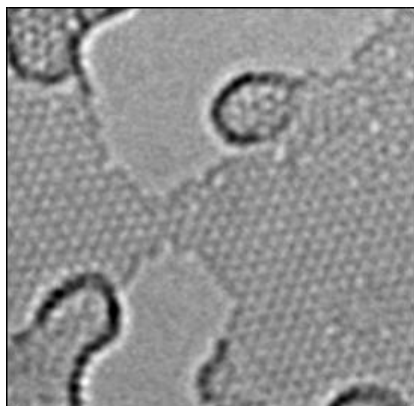
(Dy@C82)@SWNT



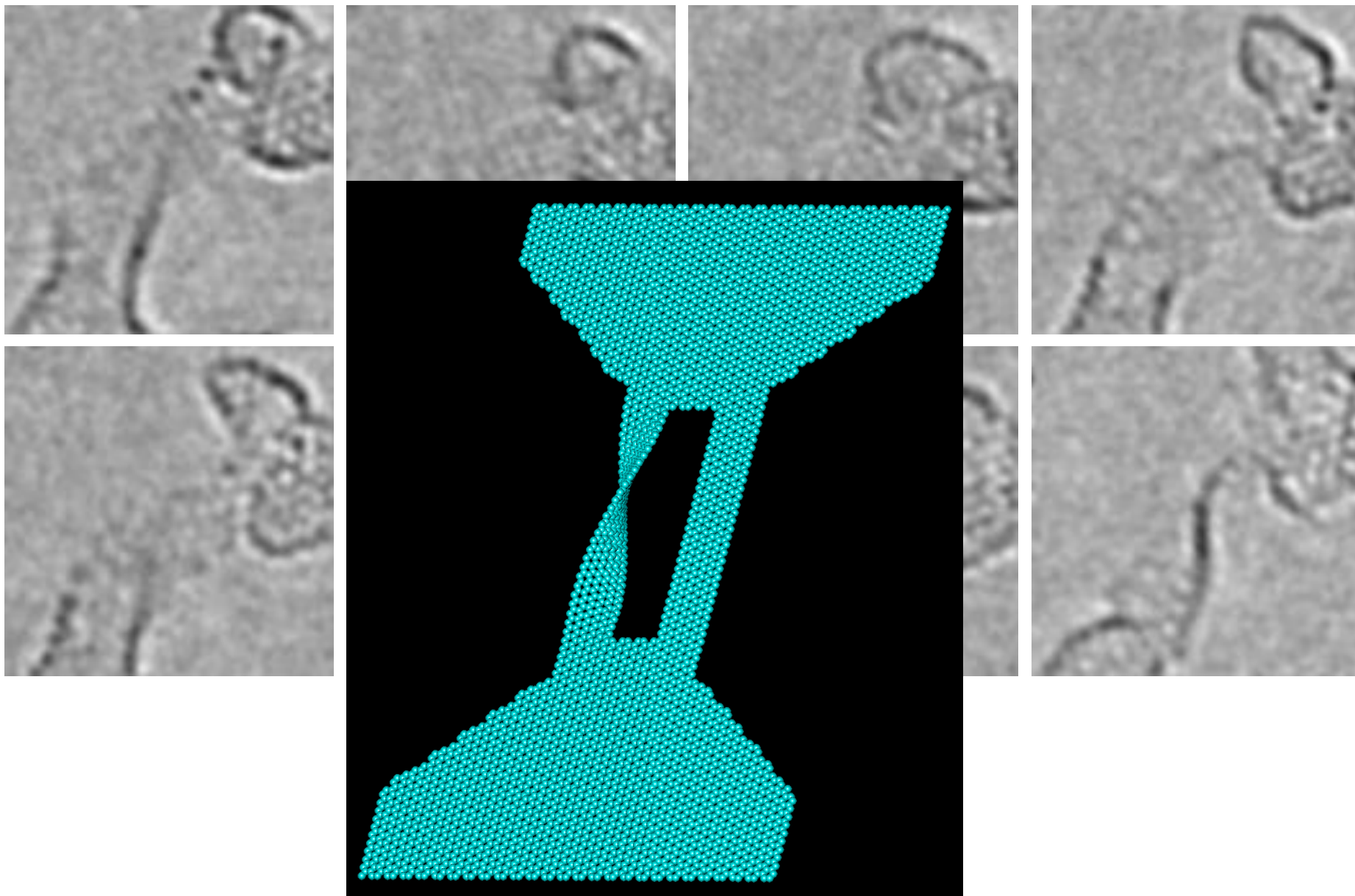
Ag @Graphene



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.

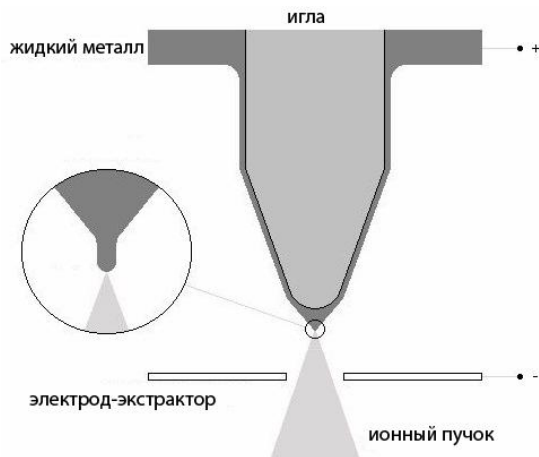
$$\lambda(\text{Å}) \approx 12 / [\varepsilon(\text{эВ})]^{1/2}$$

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

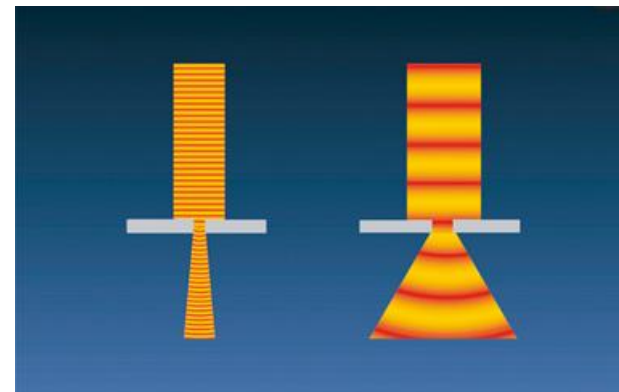
Глубина проникновения таких электронов около 5 -10 Å.

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

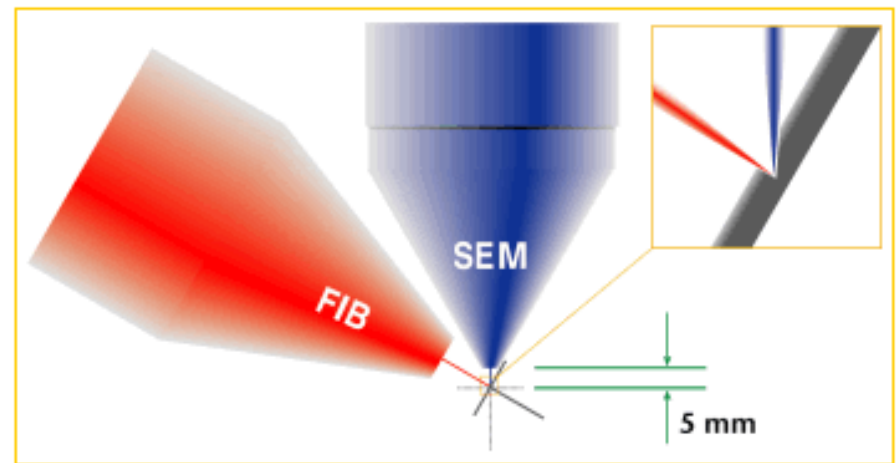
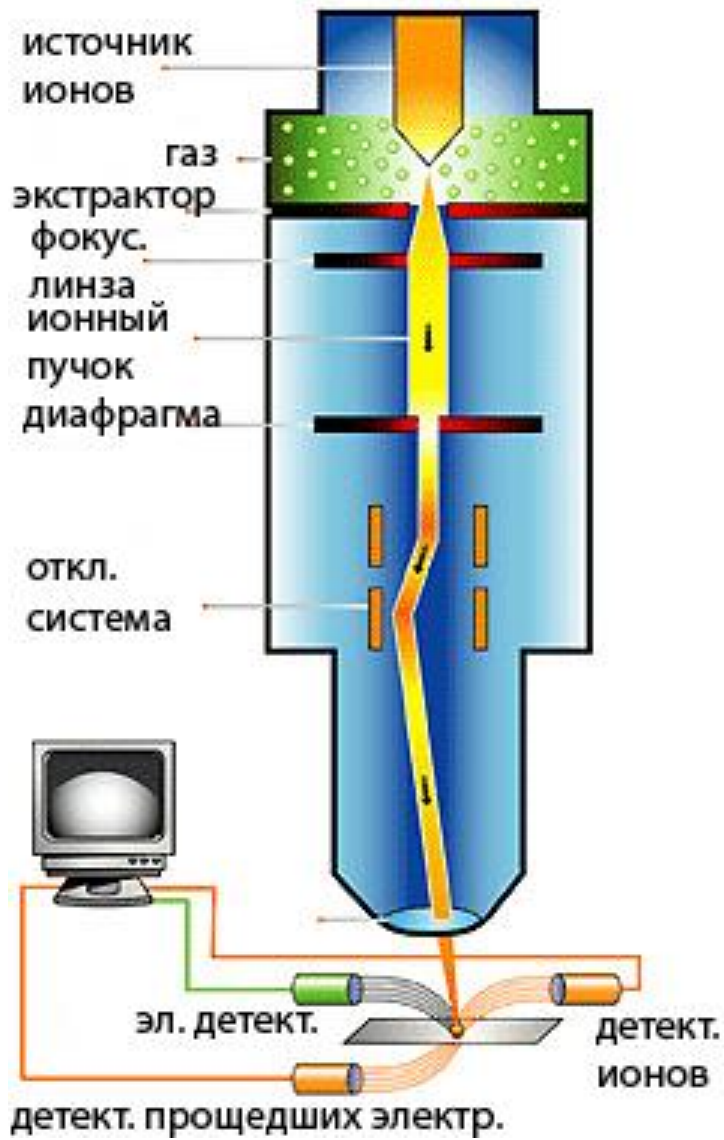
Источник тяжелых ионов (As, Ga, In).



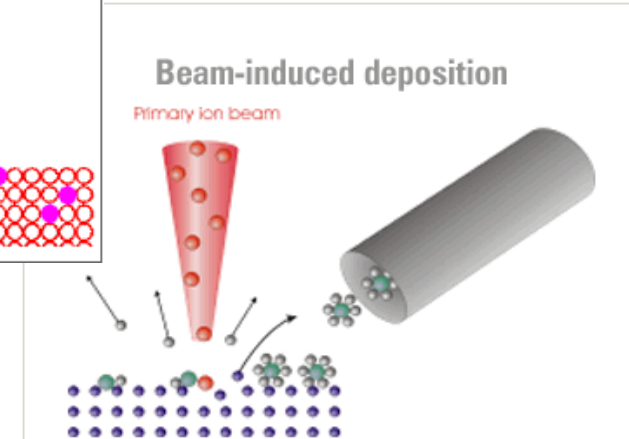
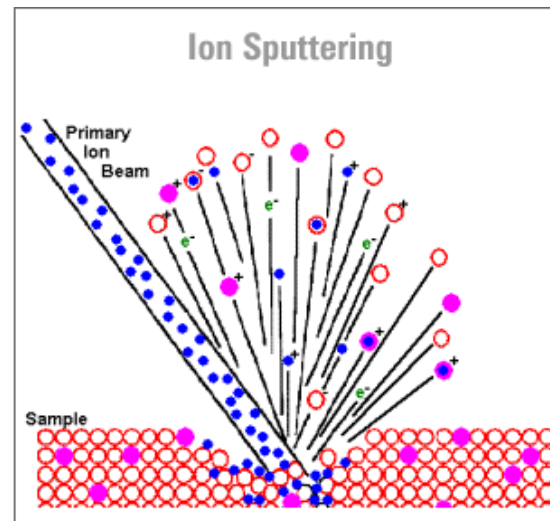
Источник легких ионов (He).



Ионные микроскопы

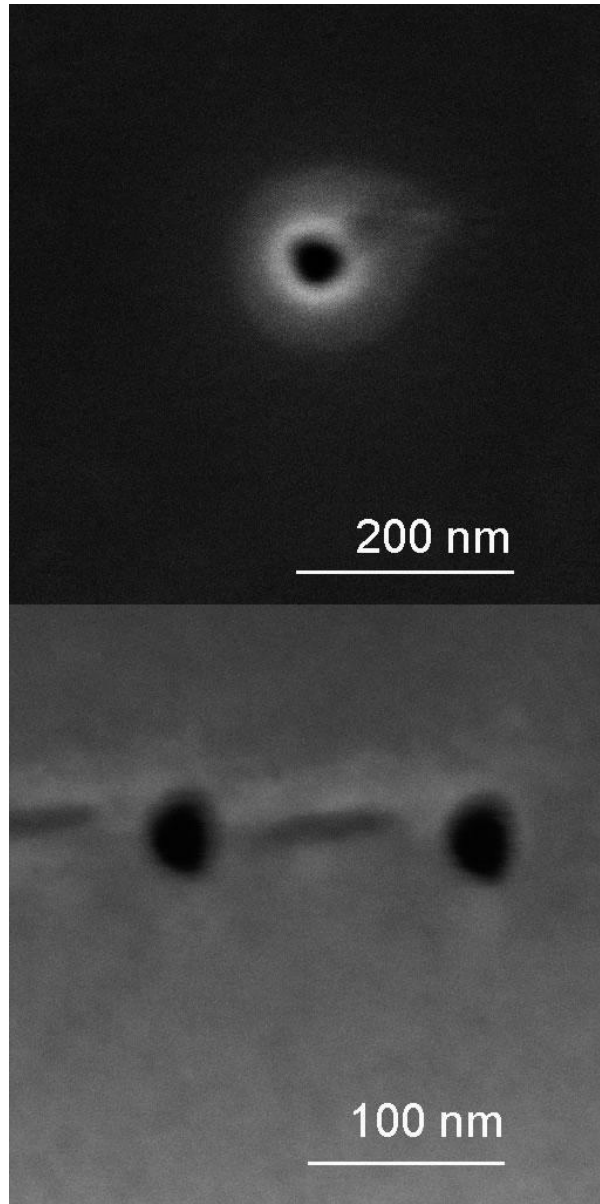


Dual beam geometry

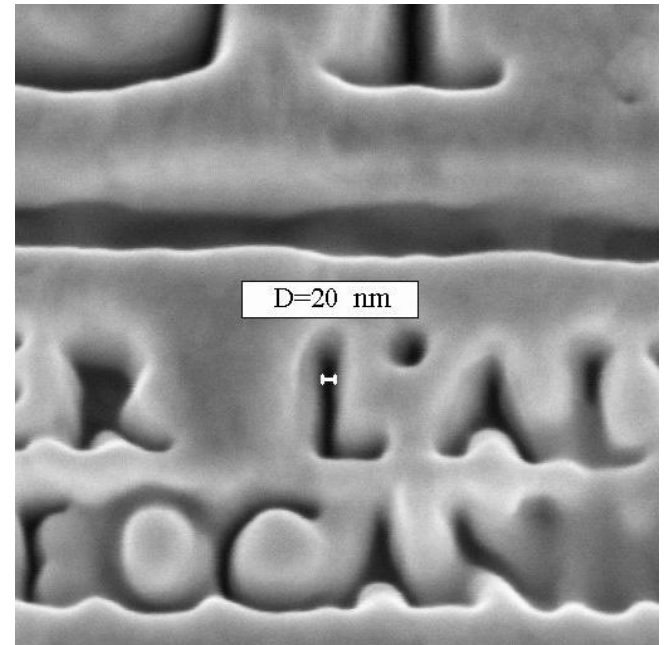


Ионные микроскопы

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

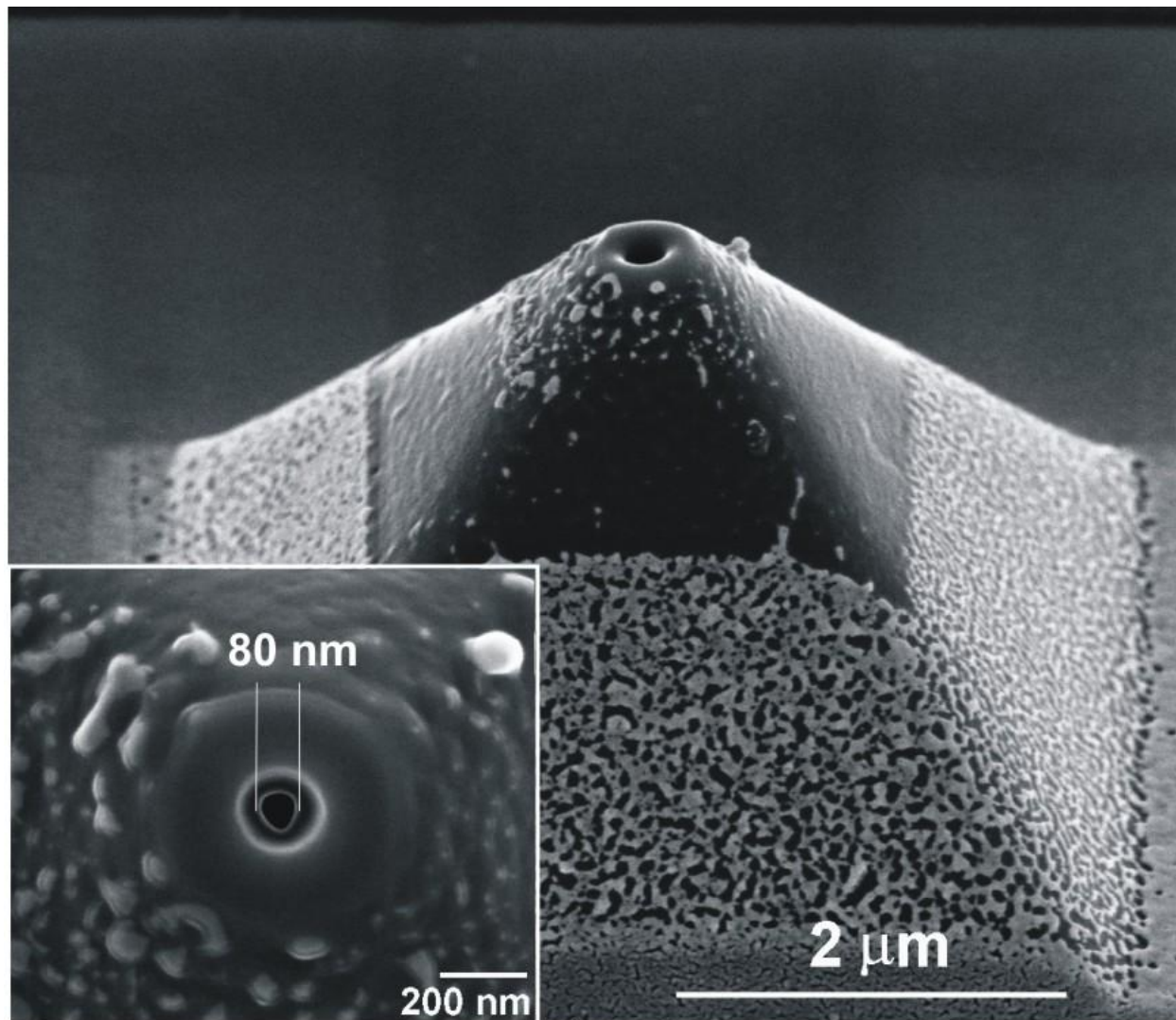


Гравировка с разрешением 20 нм.



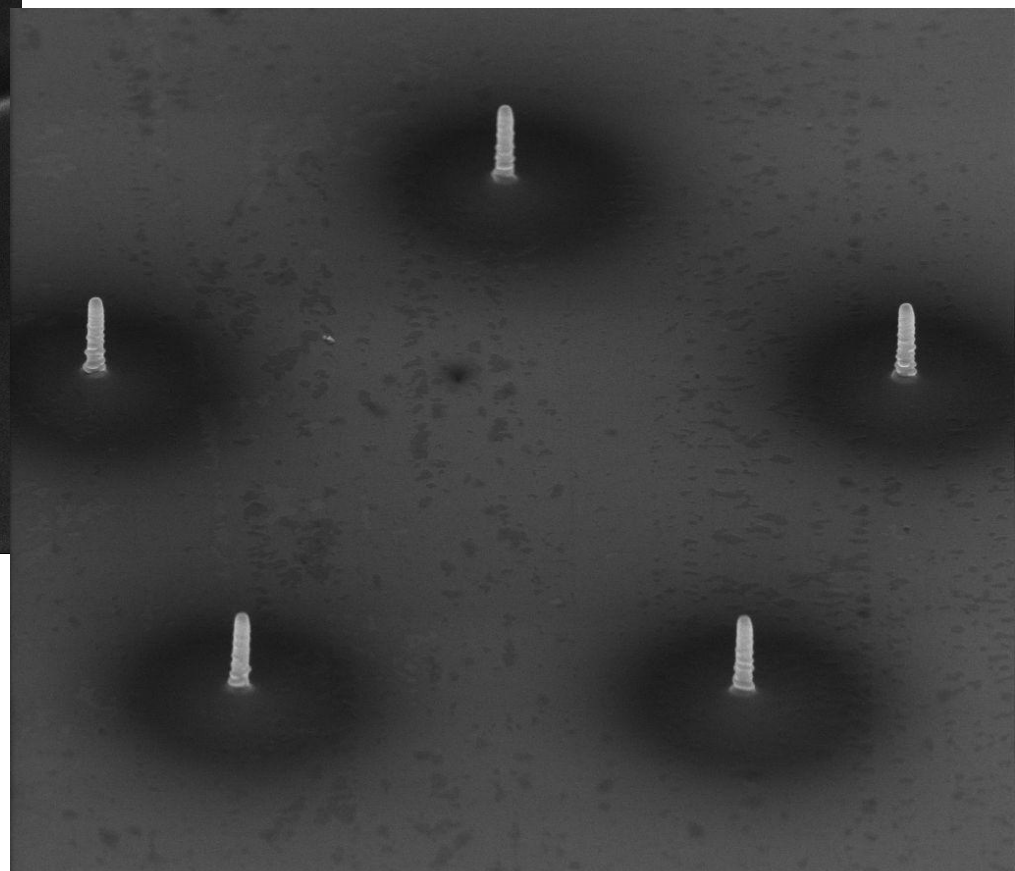
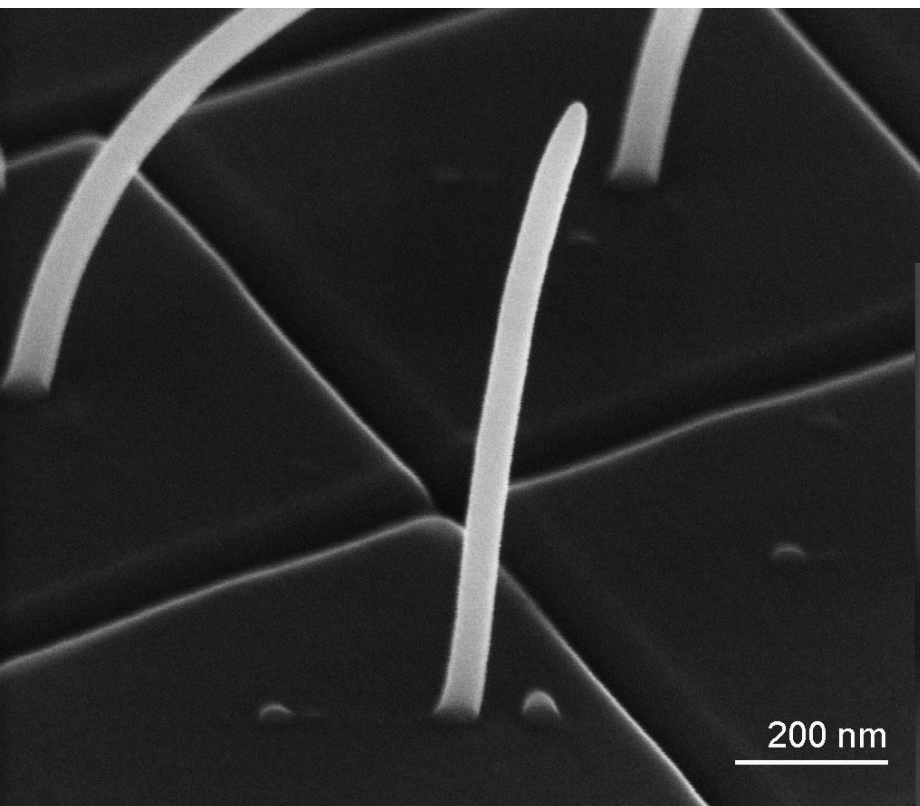
Ионные микроскопы

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

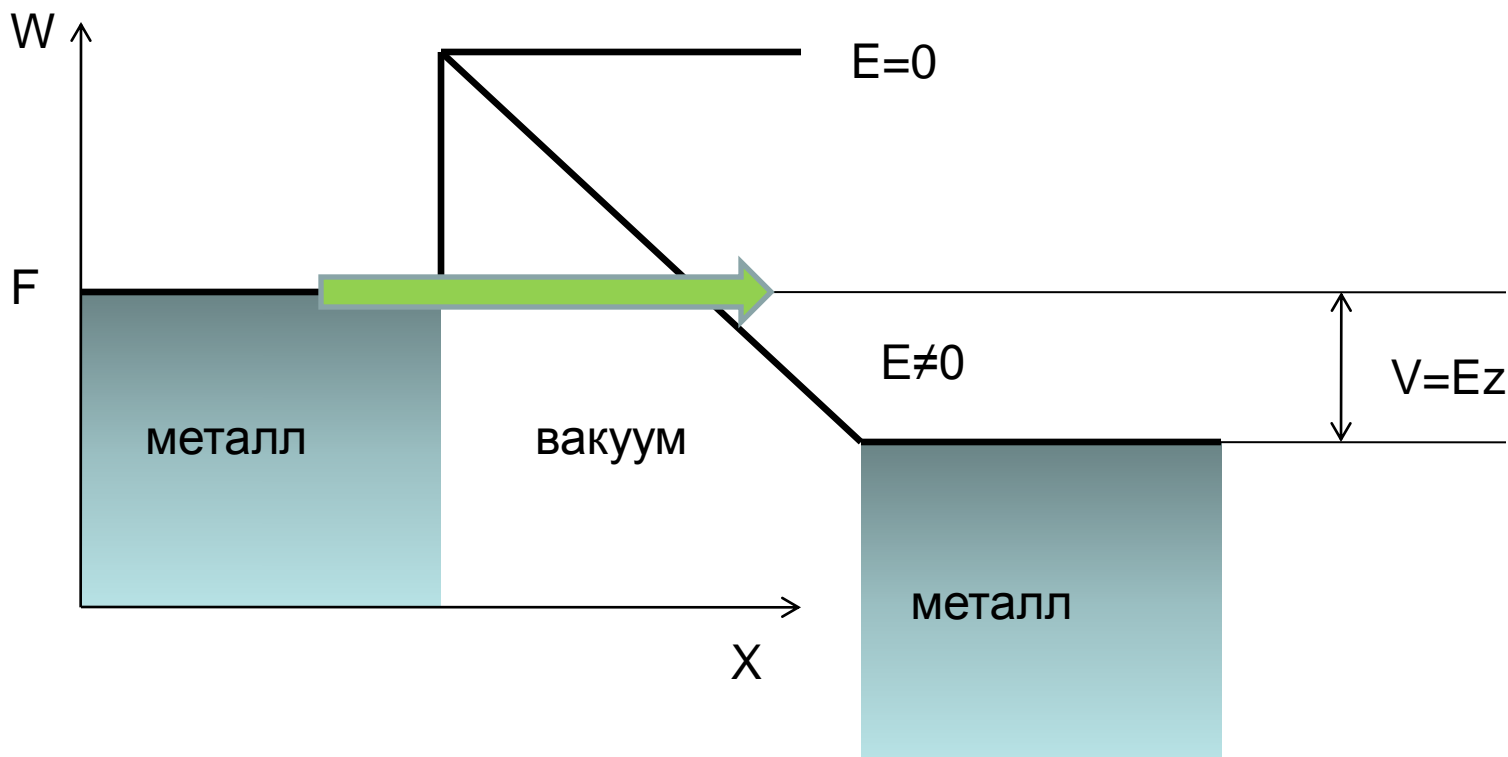
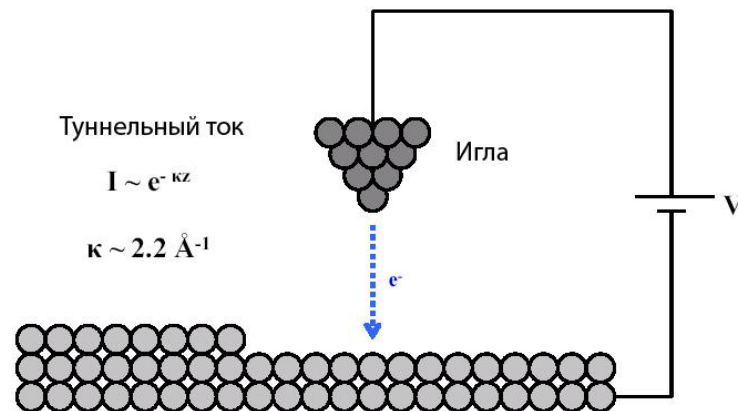
НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ—1986

537.533.35

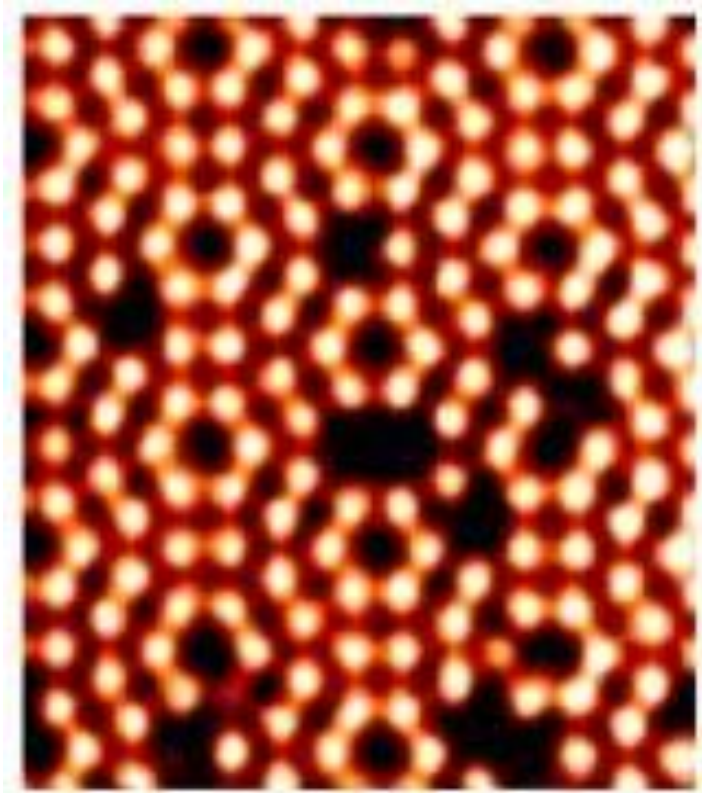
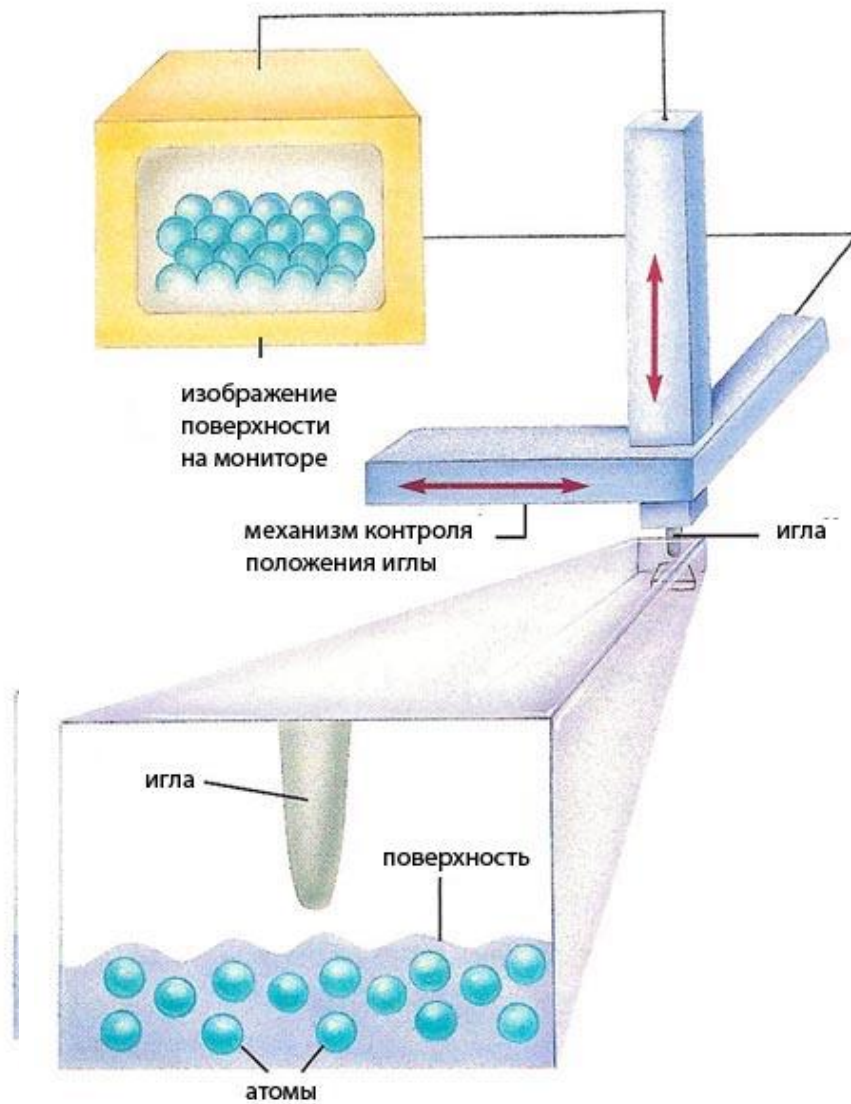
СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ — ОТ РОЖДЕНИЯ
К ЮНОСТИ

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.

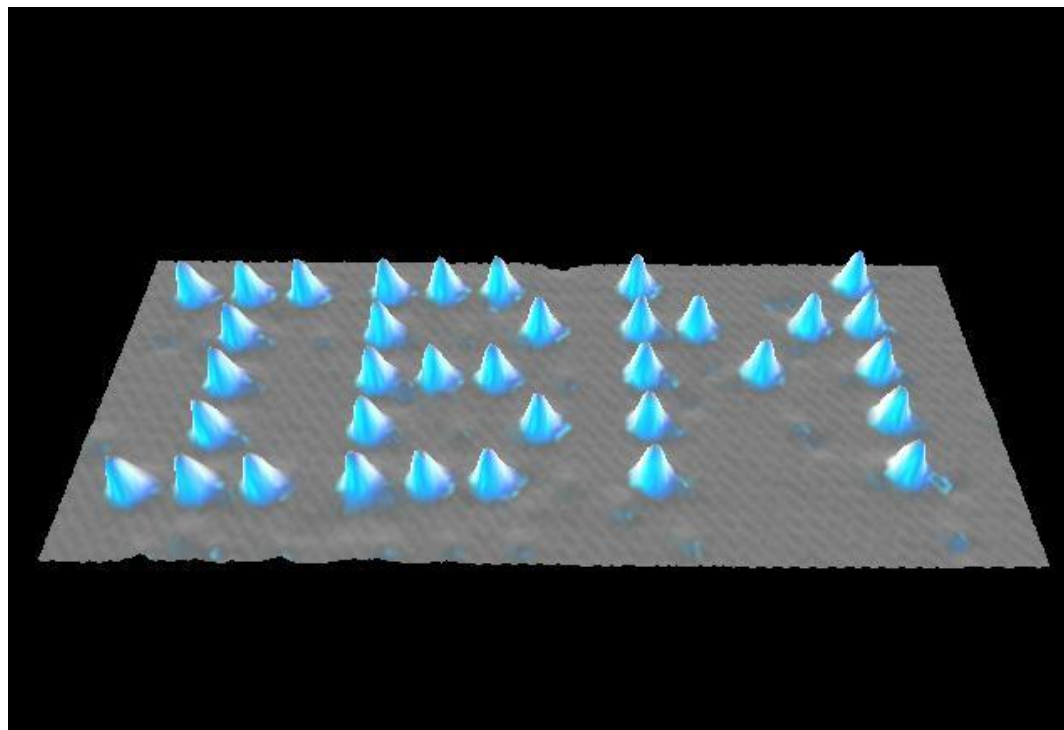
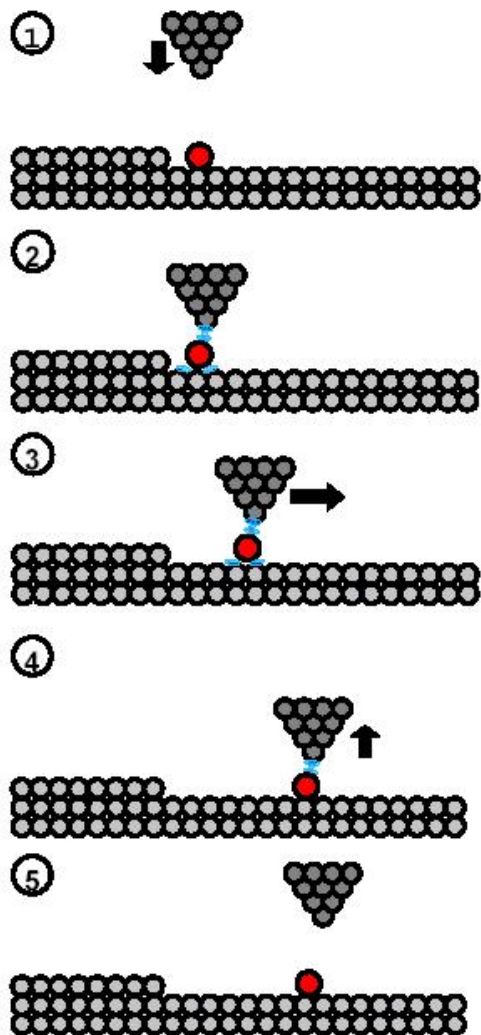


Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)



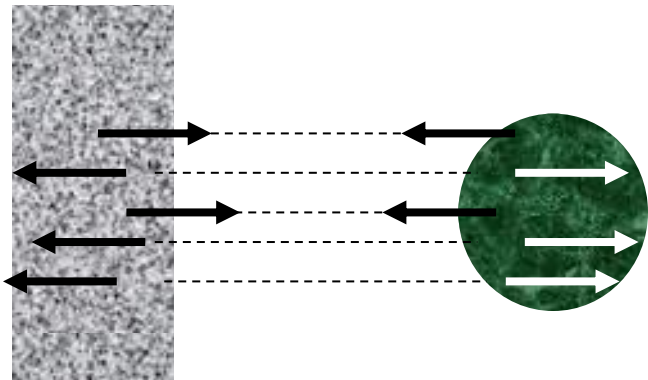
СТМ изображение поверхности кремния – видно упорядоченное расположение атомов и структурные дефекты (вакансии).

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)



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

Сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ)

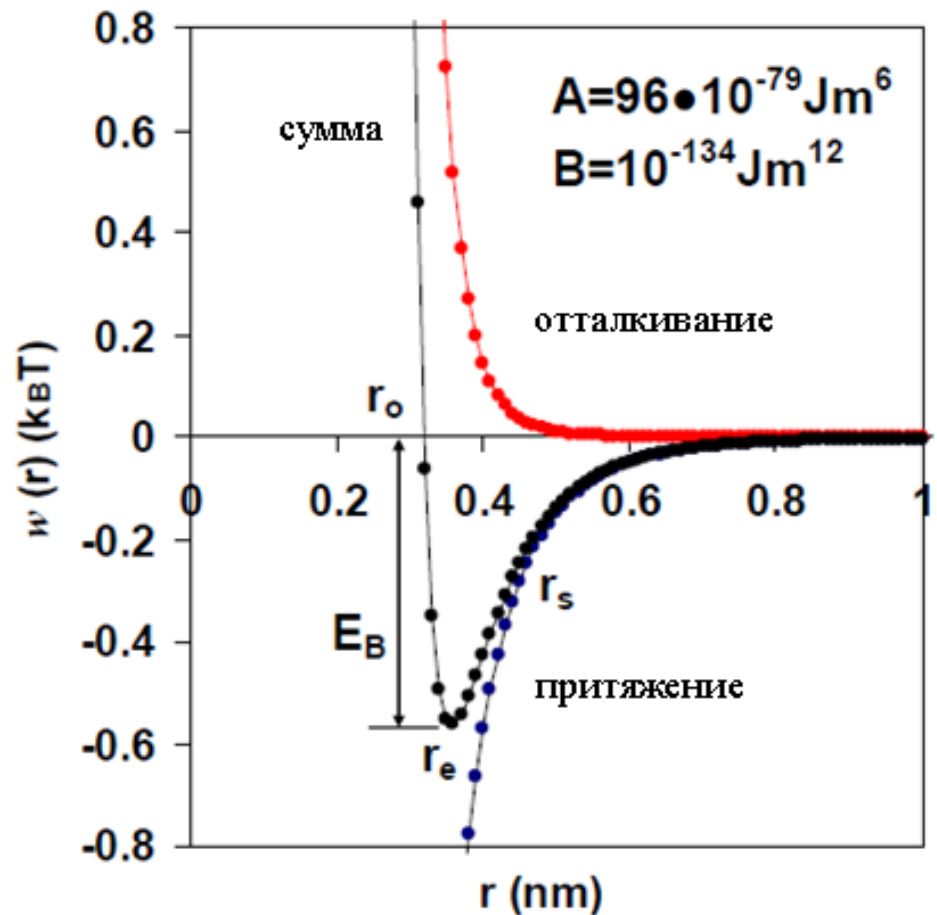


Потенциал Леннарда-Джонса

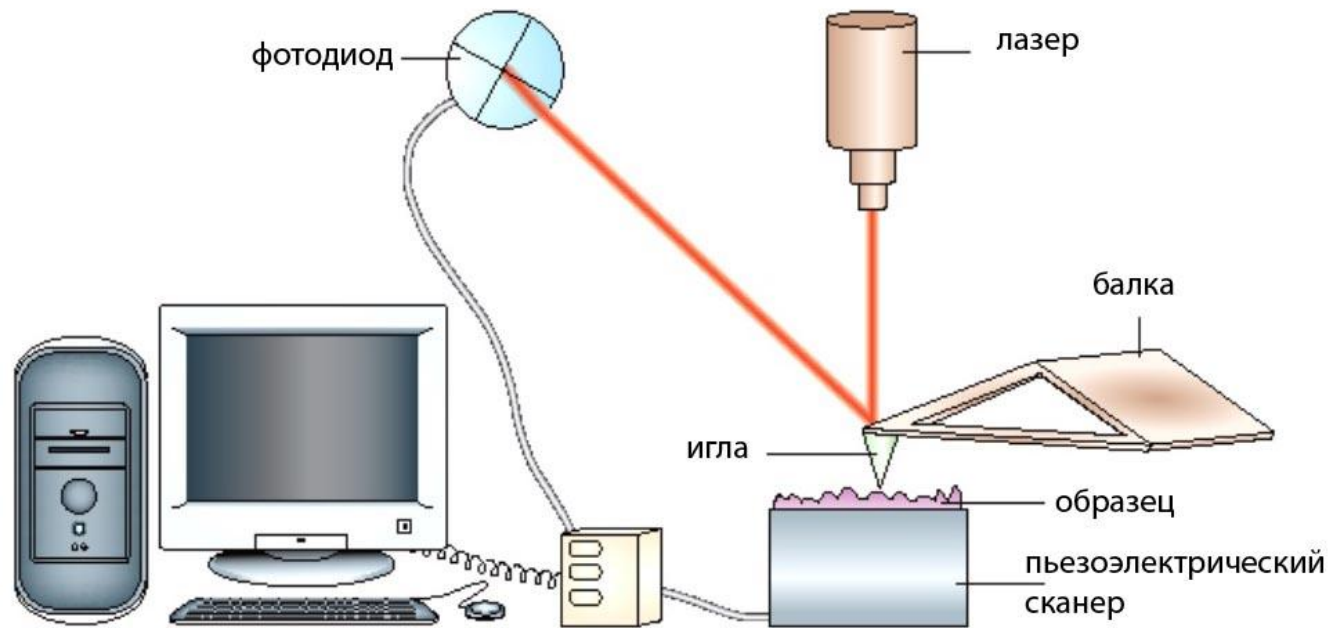
$$U_{ЛД} = \frac{-A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}} = 4E_B \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

Сила взаимодействия:

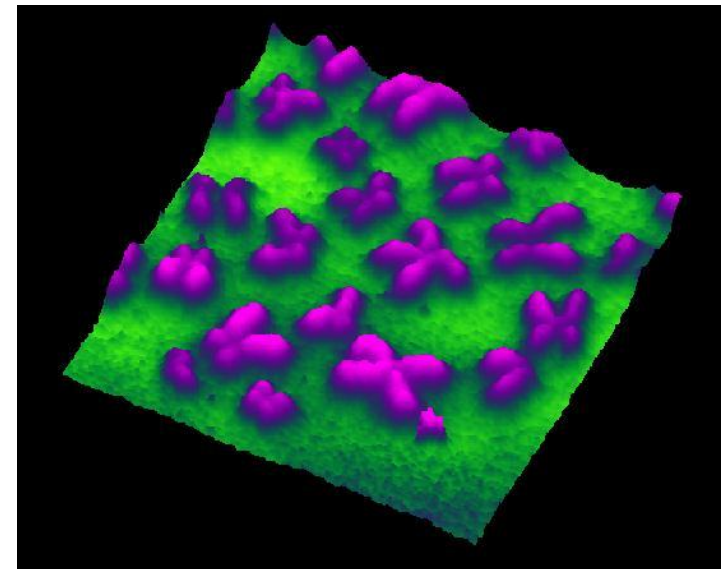
$$F_{ЛД} = \frac{-6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}}$$



Сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ)

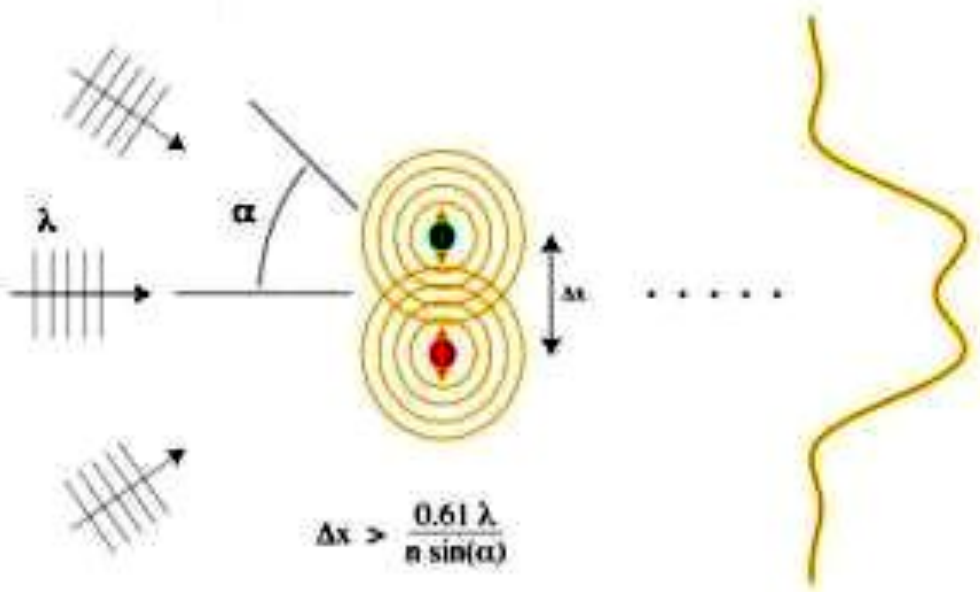


АСМ изображение хромосом



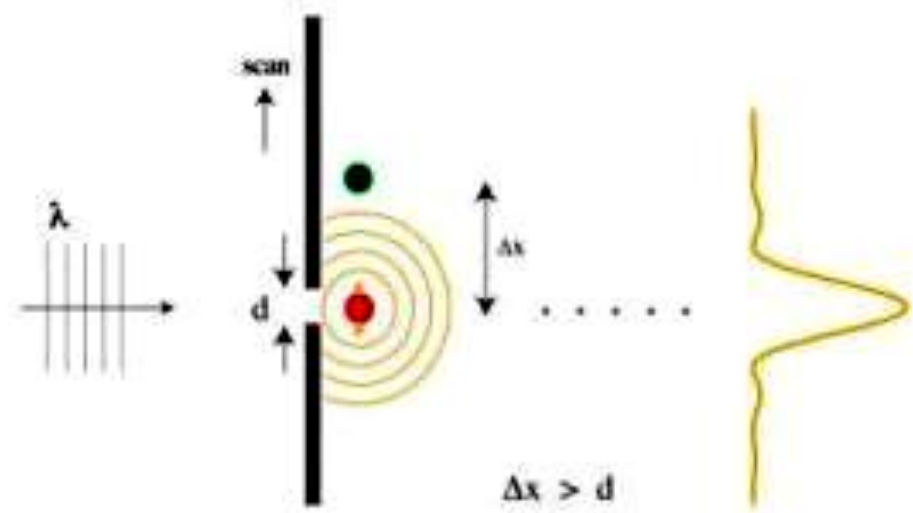
Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

Оптическая микроскопия

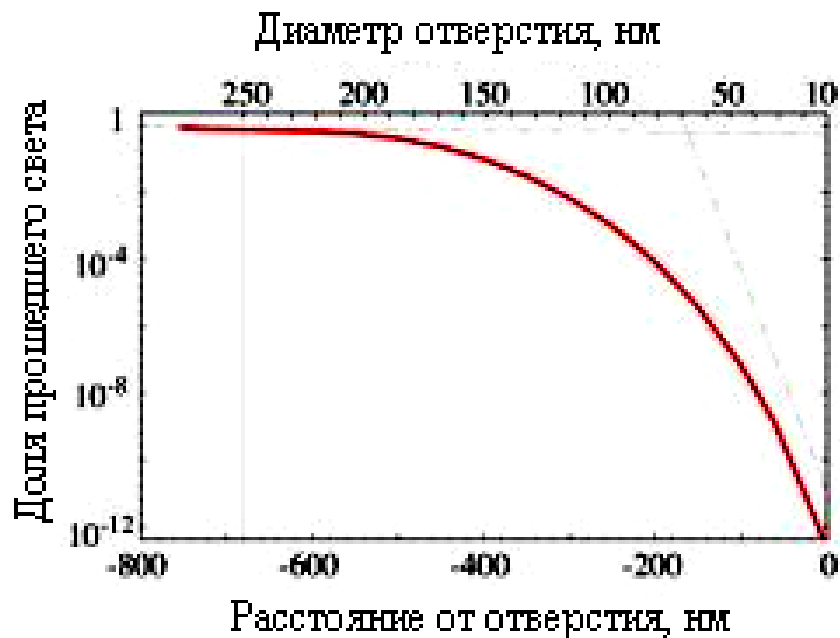


Разрешение ограничено дифракцией – правило Рэля

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

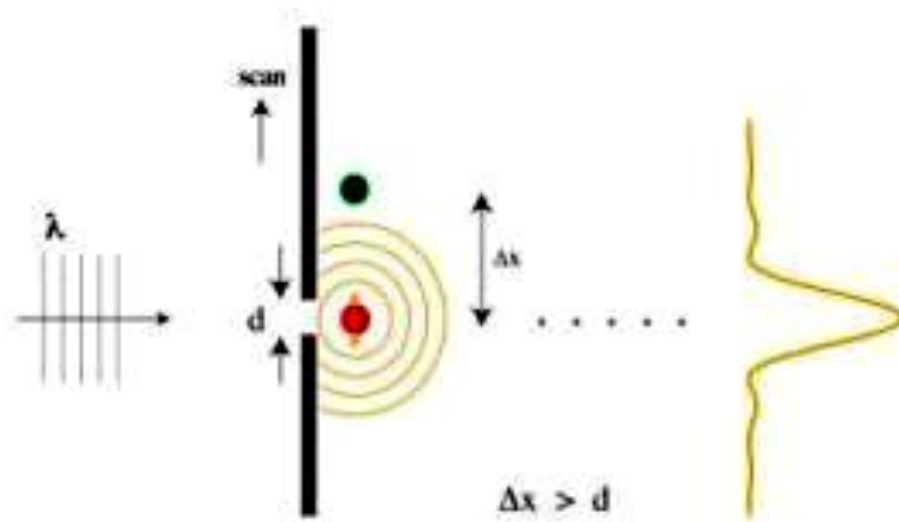


Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

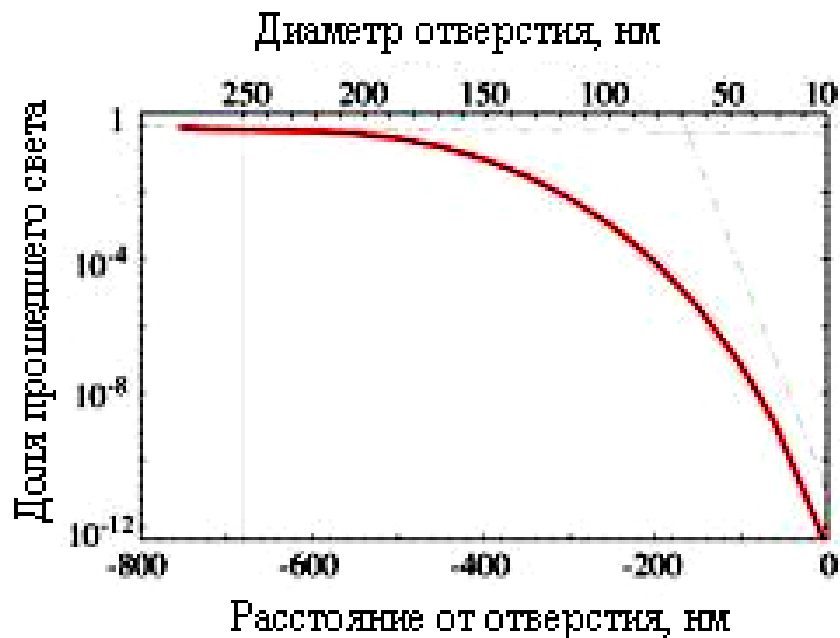


L. Novotny and D. W. Pohl, in *Photons and Local Probes*, NATO ASI Series E, p.21-33, Kluwer Academic, 1995.

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

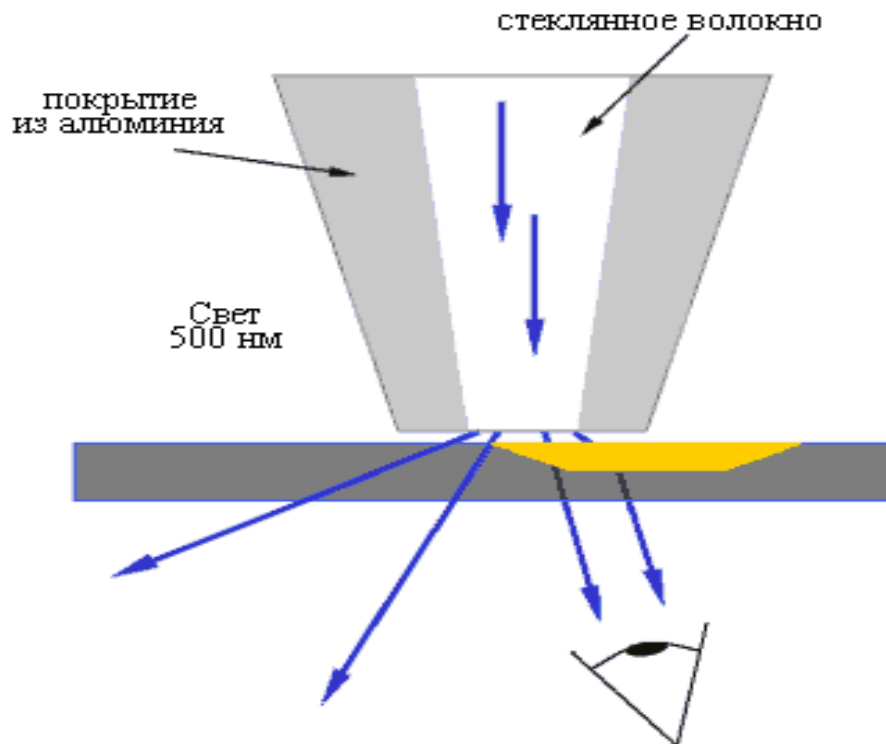
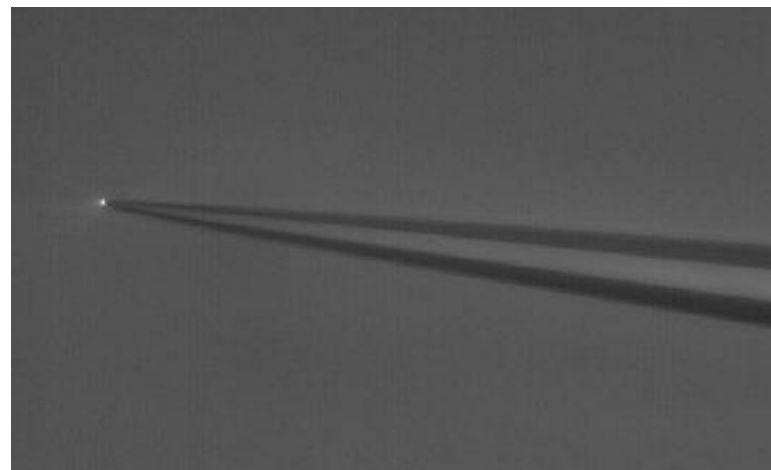


Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

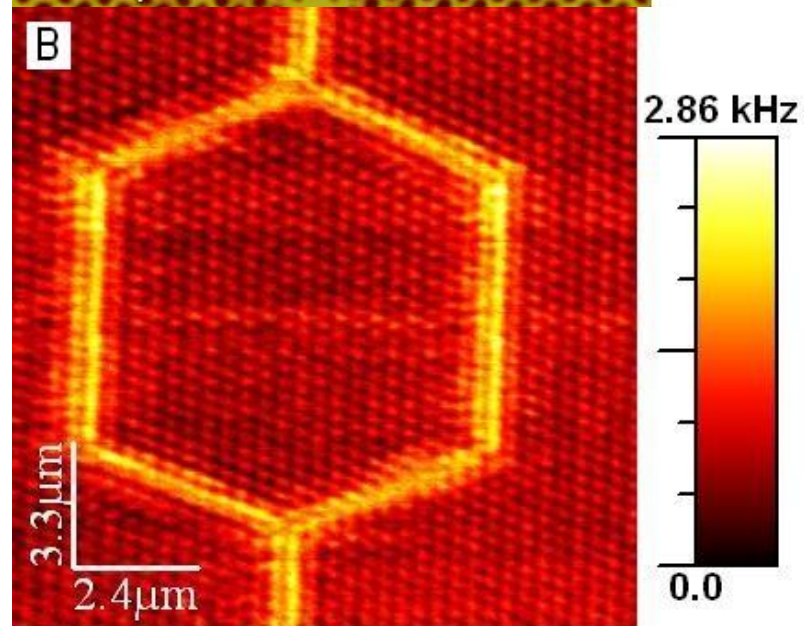
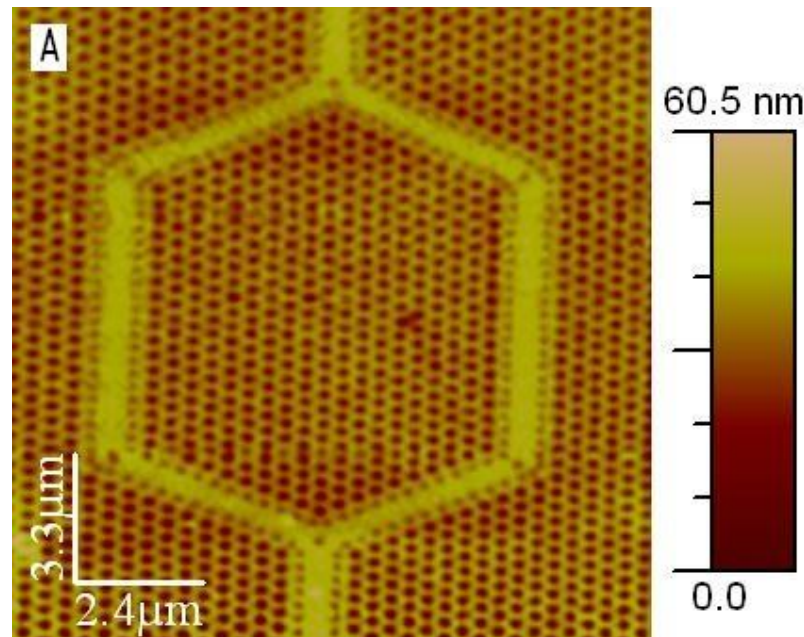
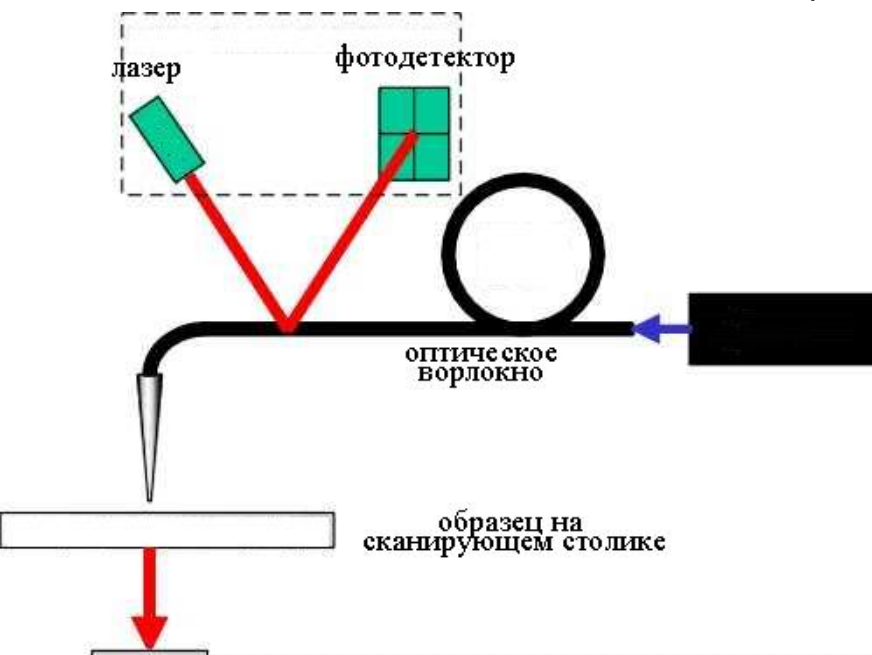


L. Novotny and D. W. Pohl, in *Photons and Local Probes*, NATO ASI Series E, p.21-33, Kluwer Academic, 1995.

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

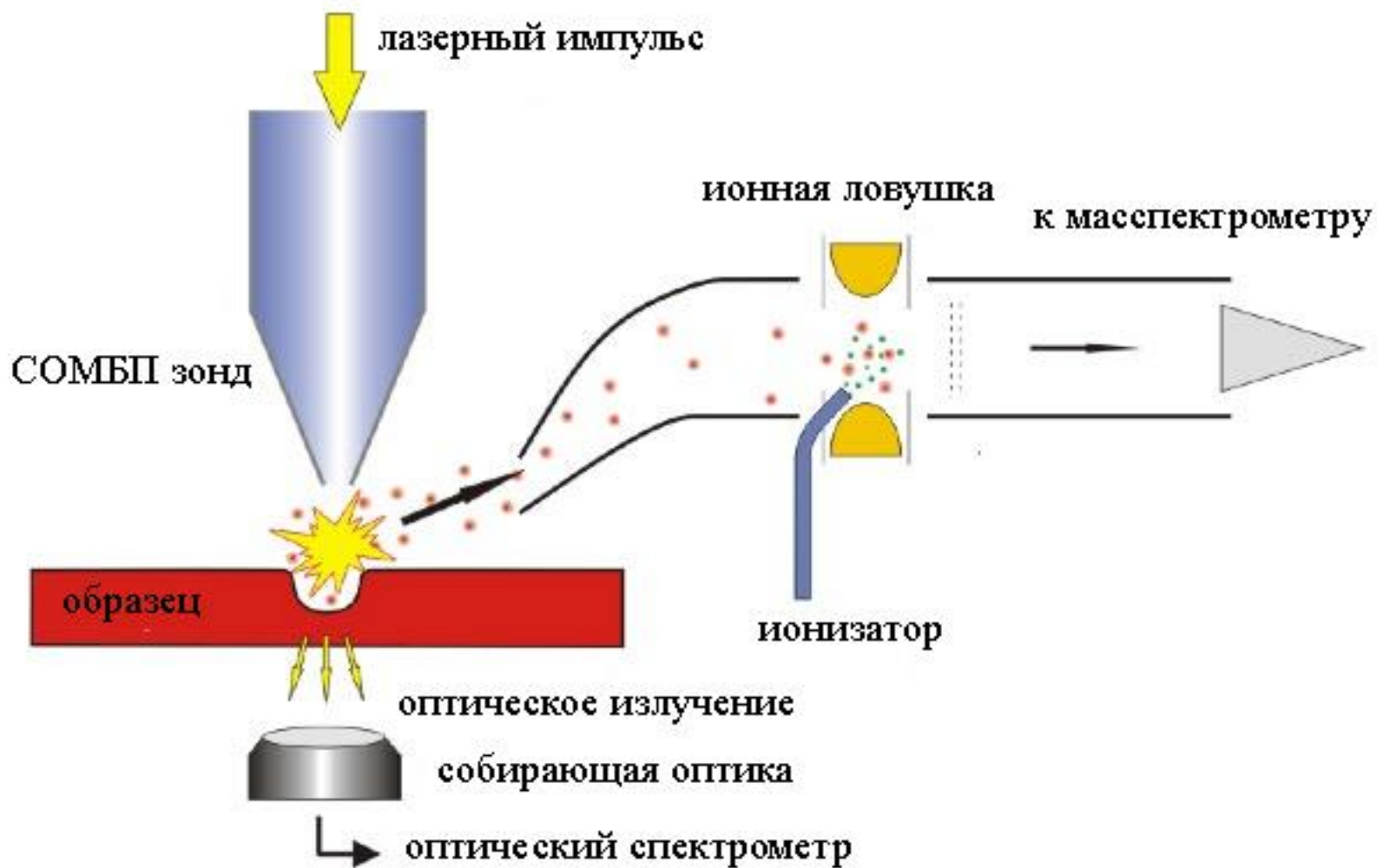


Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)

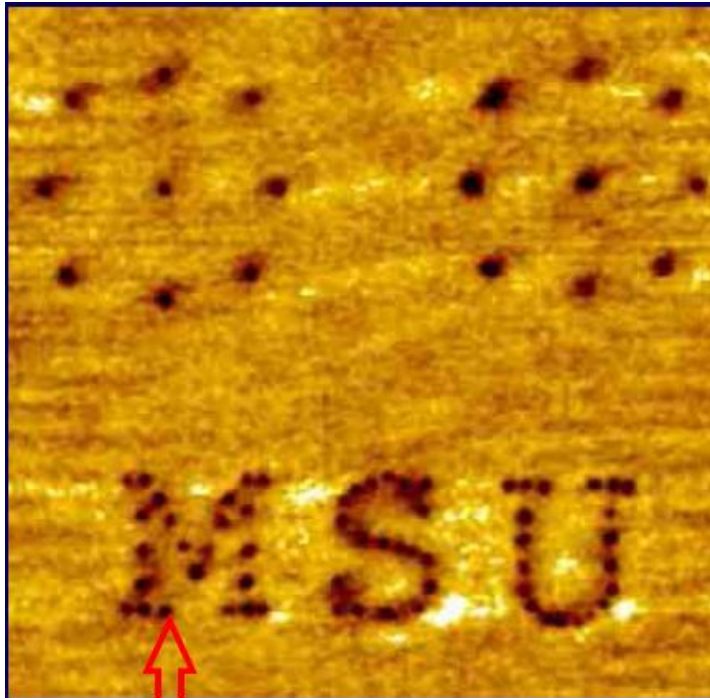


АСМ (А) и СОМБП (В)
изображения фотонных
кристаллов – разрешение
100 нм.

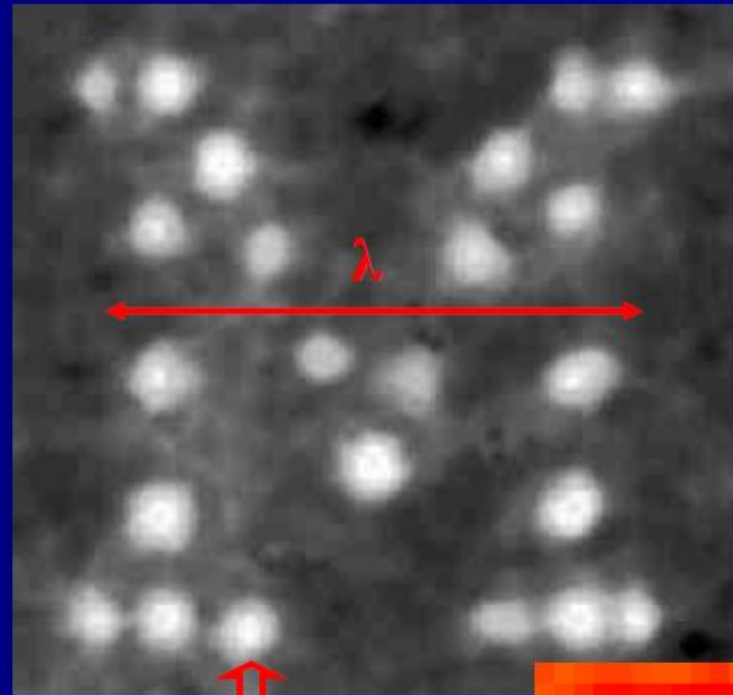
Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля (СОМБП, SNOM)



Использование сканирующего оптического микроскопа ближнего поля для сверхплотной оптической записи



Топография



Средний диаметр ямки 50 нм.

