

# Физические методы исследования состава и структуры веществ

## Микроскопия: Вводная лекция

### •Микроскопия: Вводная лекция

Акустические и электромагнитные волны.  
Акустический и оптический микроскопы. Краткая история микроскопии.



Павел В. Зинин

# Учебные цели данного курса

Последние достижения в области наук о Земле, планетах и материалах делают возможным и даже более желательным изображение геологических и функциональных материалов на микро - ( $10^{-6}$  м) и нано-уровне ( $10^{-9}$  м). Полная характеристика функциональных, геологических и планетарных материалов (Луна, Марс, астероиды, кометы, недра земли) в микро-и нано-размерном масштабе может быть достигнута только при использовании полного набора передовых методов. Она включает в себя (а) рентгеновскую дифракцию, (а) электронно-микроскопические методы (включая EDX, электронную дифракцию и т. д.) В сочетании с (в) комбинационным рассеянием и (г) атомно-силовой микроскопией. Каждый из этих методов обеспечивает уникальный набор информации и понимание структуры и свойств геологических и функциональных материалов.

1. Этот курс предназначен для того, чтобы дать студенту фундаментальные знания в области передовых методов, используемых в геофизике, планетологии и материаловедении. Студент изучит принципы и принцип действия каждого из инструментов.

2. В конце этого курса вы поймёте, как получить интерпретацию результатов (изображений или спектров), полученных с использованием последних разработок в области микроскопии и спектроскопии.

# Учебные цели данного раздела курса

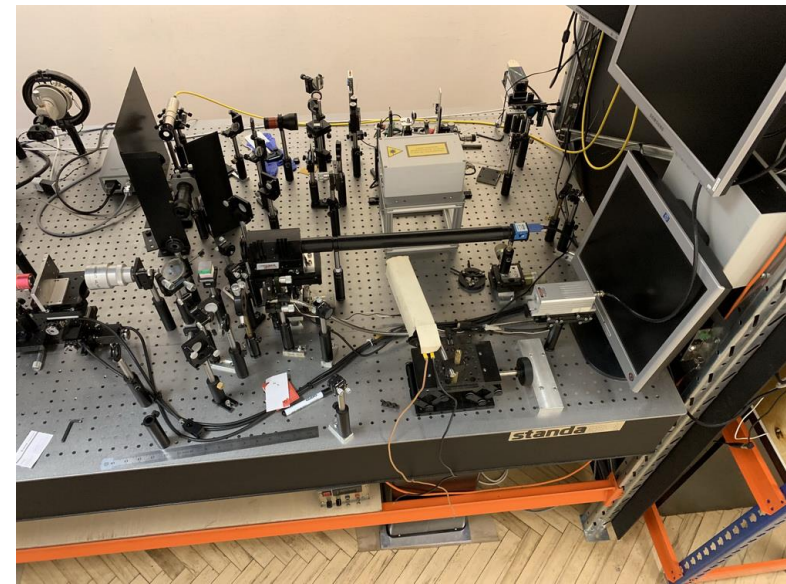
В конце этого курса вы будете:

1. Научитесь использовать методы геометрической оптики для построения изображения в оптическом микроскопе
2. Разбираться в основах оптической микроскопии
3. Знать выражения для аксиального и латерального разрешения микроскопа
4. Получите представления об анализе двумерных и трёхмерных изображений
5. Получите представления о методах Фурье оптики
6. Понимать принцип действия атомно-силового микроскопа
7. Понимать принцип действия электронного микроскопа

# Микроскопия

**Микроскоп** - (от греческого mikros - малый и skopeo - смотрю), оптический прибор для получения увеличенного изображения мелких объектов и их деталей, не видимых невооружённым глазом.

Глаз человека способен различать детали объекта, отстоящие друг от друга не менее чем на 0,08 мм. С помощью светового микроскопа можно видеть детали, расстояние между которыми составляет до 0,2 мкм. Электронный микроскоп позволяет получить разрешение до 0,1-0,01 нм.

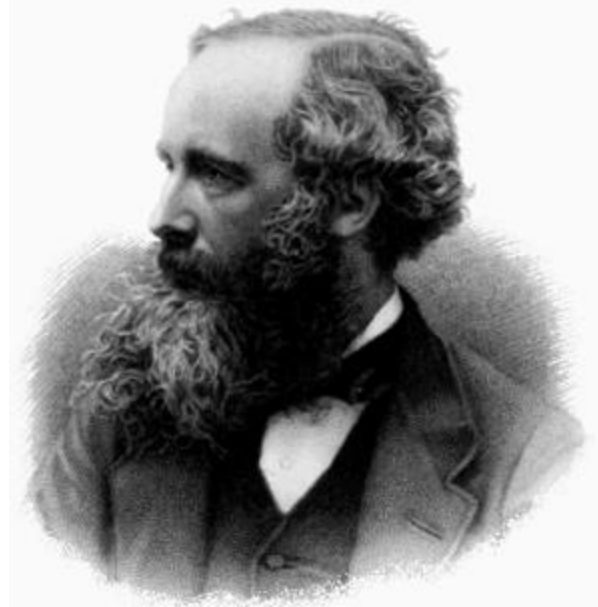


Спектрометрическая (левое фото) и микроскопическая (правое фото) части установки лазерного нагрева в ячейке высокого давления, созданной в НТЦ УП РАН.

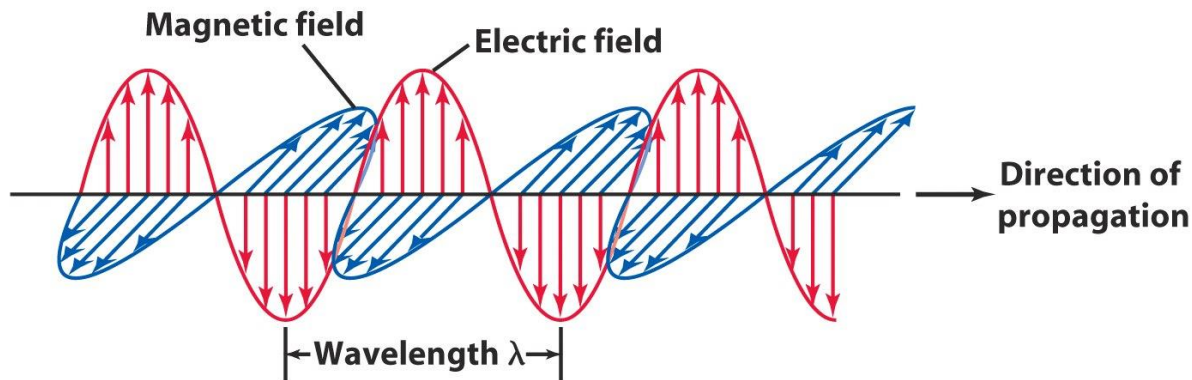
# Свет

Природа света-это электромагнитное излучение В 1860-х годах Джеймсу Клерку Максвеллу удалось описать все основные свойства электричества и магнетизма в четырёх уравнениях: уравнениях электромагнетизма Максвелла.

Максвелл показал, что электрическое и магнитное поля должны перемещаться в пространстве с постоянной скоростью, называемой скоростью света.

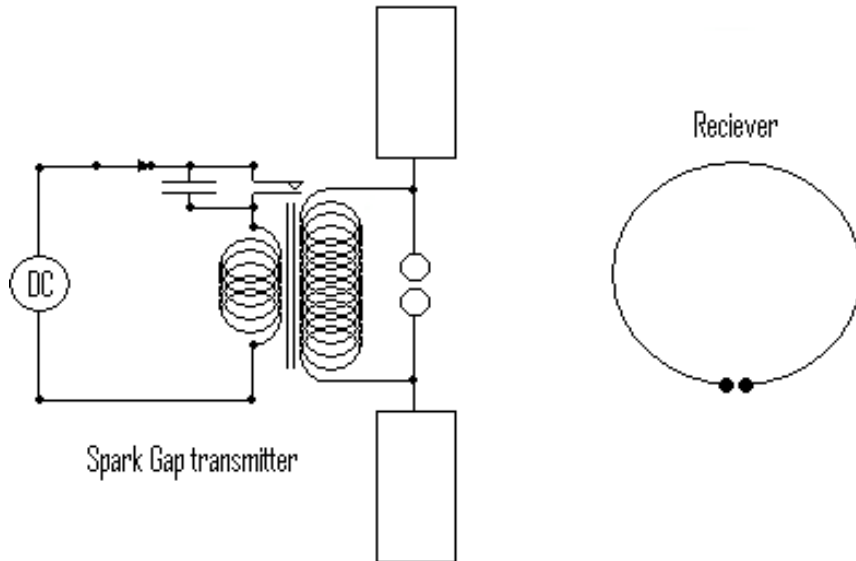


Джеймс Клерк  
Максвелл (1831 – 1879)



# Генерация электромагнитного излучения

Герц был немецким физиком, который прояснил и расширил электромагнитную теорию света, выдвинутую Максвеллом. Он был первым, кто убедительно продемонстрировал существование электромагнитных волн, построив аппарат для получения и обнаружения СВЧ-волн.



**Генрих Рудольф Герц**  
(1857 – 1894)

1887 experimental setup of Hertz's apparatus

# Свет: длина волны и частота

Частота и длина волны электромагнитных волн

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$f$  = частота электромагнитных волн (in Hz)

$c$  = скорость света =  $3 \times 10^8$  м/с =  $3 \times 10^6$  км/с

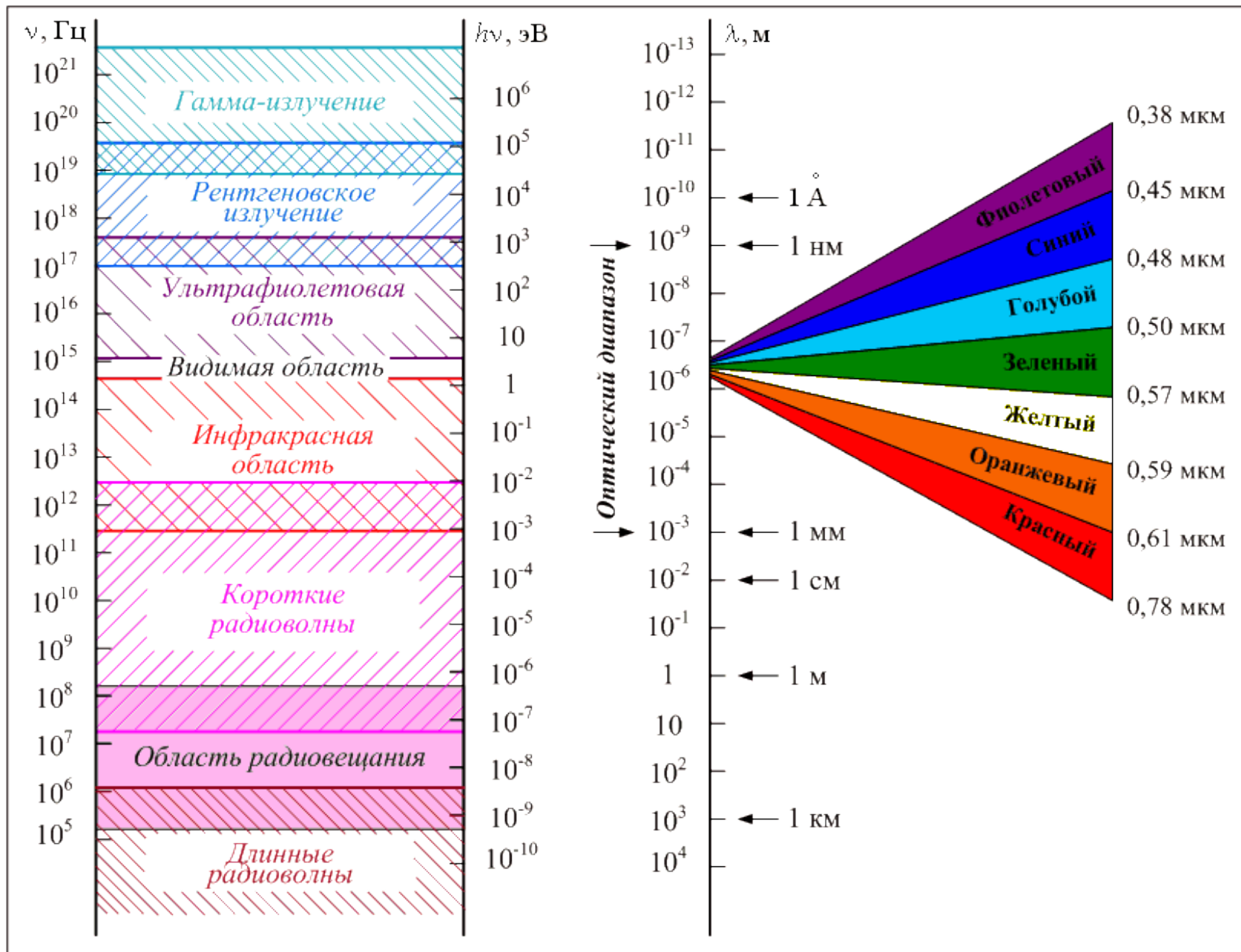
$\lambda$  = длина волны (в метрах)

- Примеры

- FM radio, e.g.,  $f = 96.3 \times 10^6$  Hz (Hawaiian station)  $\Rightarrow \lambda = 3.1$  m

- Видимый свет, например, красный свет, 700 nm  $\Rightarrow f = 4.3 \times 10^{14}$  Hz

# Спектр электромагнитных волн





# Терагерцевое излучение

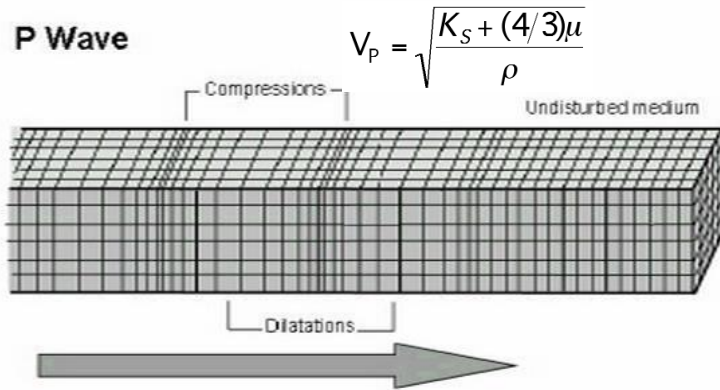
## ТЕРАГЕРЦЕВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

$$300 \text{ ГГц} (3 \times 10^{11} \text{ Гц}) \div 3 \text{ ТГц} (3 \times 10^{12} \text{ Гц})$$

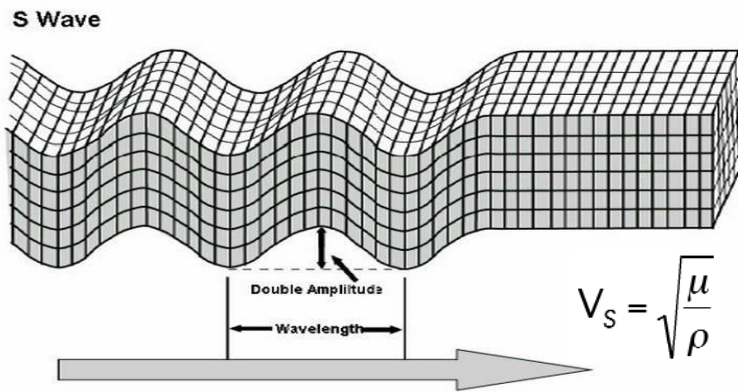


До 90-х годов технически недоступная область спектра!

# Акустически волны



**Longitudinal (Compression) Waves** - The particles of the medium undergo displacements in a direction parallel to the direction of wave motion.



**Transverse Waves** - The particles of the medium undergo displacements in a direction perpendicular to the wave velocity.

Галилео Галилей(1564-1642), а также Марин Марсенн (1588-1648) независимо друг от друга открыли полные законы колебаний струн (завершив то, что Пифагор начал 2000 лет назад). Галилей писал: "волны создаются вибрациями звучащего тела, которые распространяются по воздуху, принося в барабанную перепонку уха раздражение, которое разум интерпретирует как звук", - замечательное утверждение, указывающее на начало физиологической и психологической акустики. Экспериментальные измерения скорости звука в воздухе были успешно проведены между 1630 и 1680 годами рядом исследователей, в частности Мерсенном. Тем временем Ньютон (1642-1727) вывел соотношение для скорости волн в твёрдых телах, краеугольный камень физической акустики.

Звук-это бегущая волна, которая представляет собой колебание давления, передаваемое через твёрдые тело, жидкость или газ, состоящее из частот в пределах слышимости и уровня, достаточно сильного, чтобы быть услышанным, или ощущение, стимулированное в органах слуха такими вибрациями.

# Акустическая и оптические микроскопы

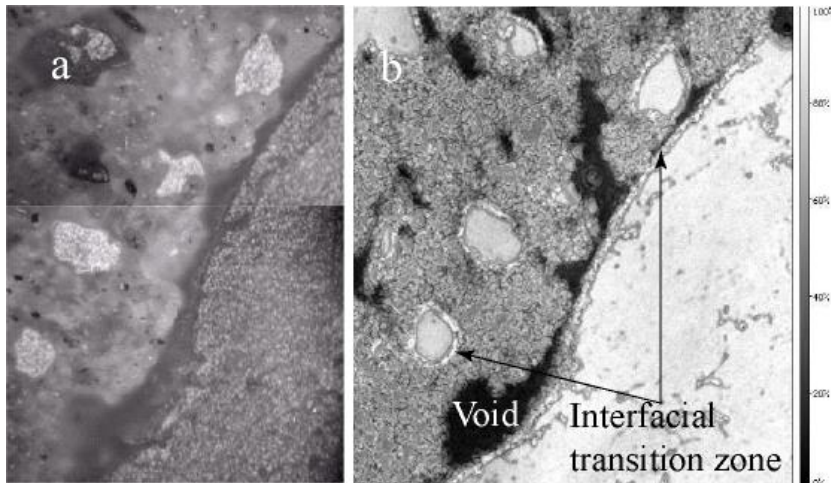


Optical Microscope

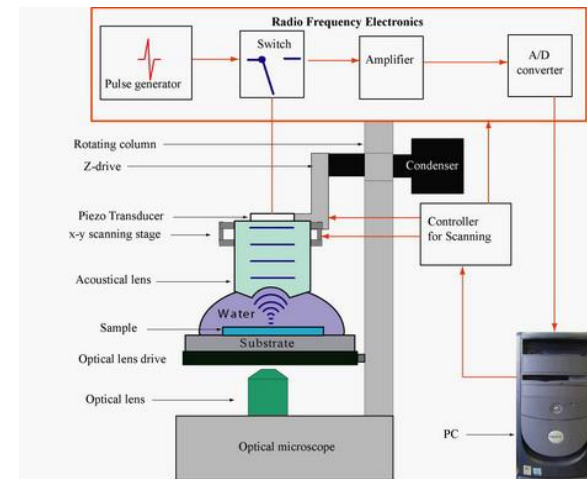
A **microscope** (from the Greek: μικρός, *mikrós*, "small" and σκοπεῖν, *skopeîn*, "to look" or "see") is an instrument to see objects too small for the naked eye.



Scanning Acoustical Microscope



Оптическое (а) и акустические (б) изображения бетона

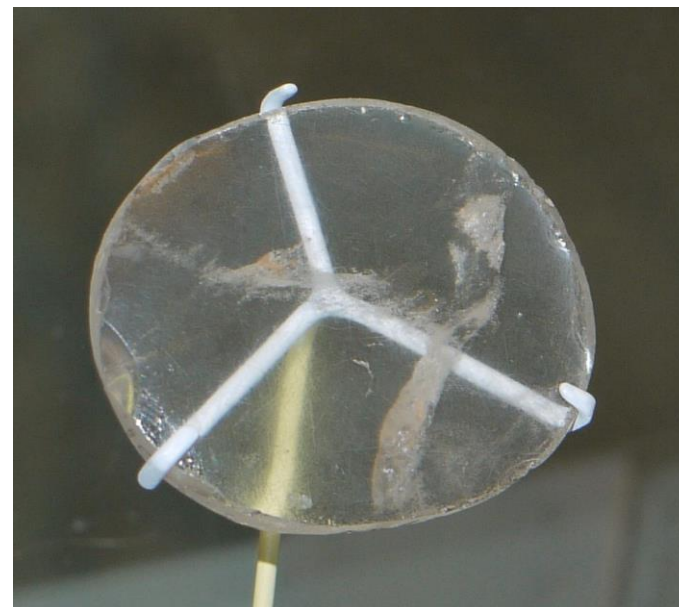


P. Zinin and W. Weise, "Theory and applications of acoustic microscopy", in T. Kundu ed., *Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Engineering and Biological Material Characterization*. CRC Press, Boca Raton, chapter 11, 654-724 (2004).

## История микроскопии: первые линзы

Слово линза происходит от латинского названия чечевицы (lentil), потому что двояковыпуклая линза имеет форму чечевицы. Чечевица и дала название геометрической фигуре.

Старейшей линзой является линза из Нимруда, датируемая 2700 годом до нашей эры (древняя Ассирия). Дэвид Брюстер предположил, чтобы эта линза, возможно, использовалась в качестве увеличительного стекла, или, зажигательного стекла, чтобы получить огонь путём концентрации солнечного света. Другая ранняя ссылка на увеличительное стекло относится ко времени древних египетских иероглифов в 8-м веке до нашей эры, которые изображают "простые стеклянные менисковые линзы".

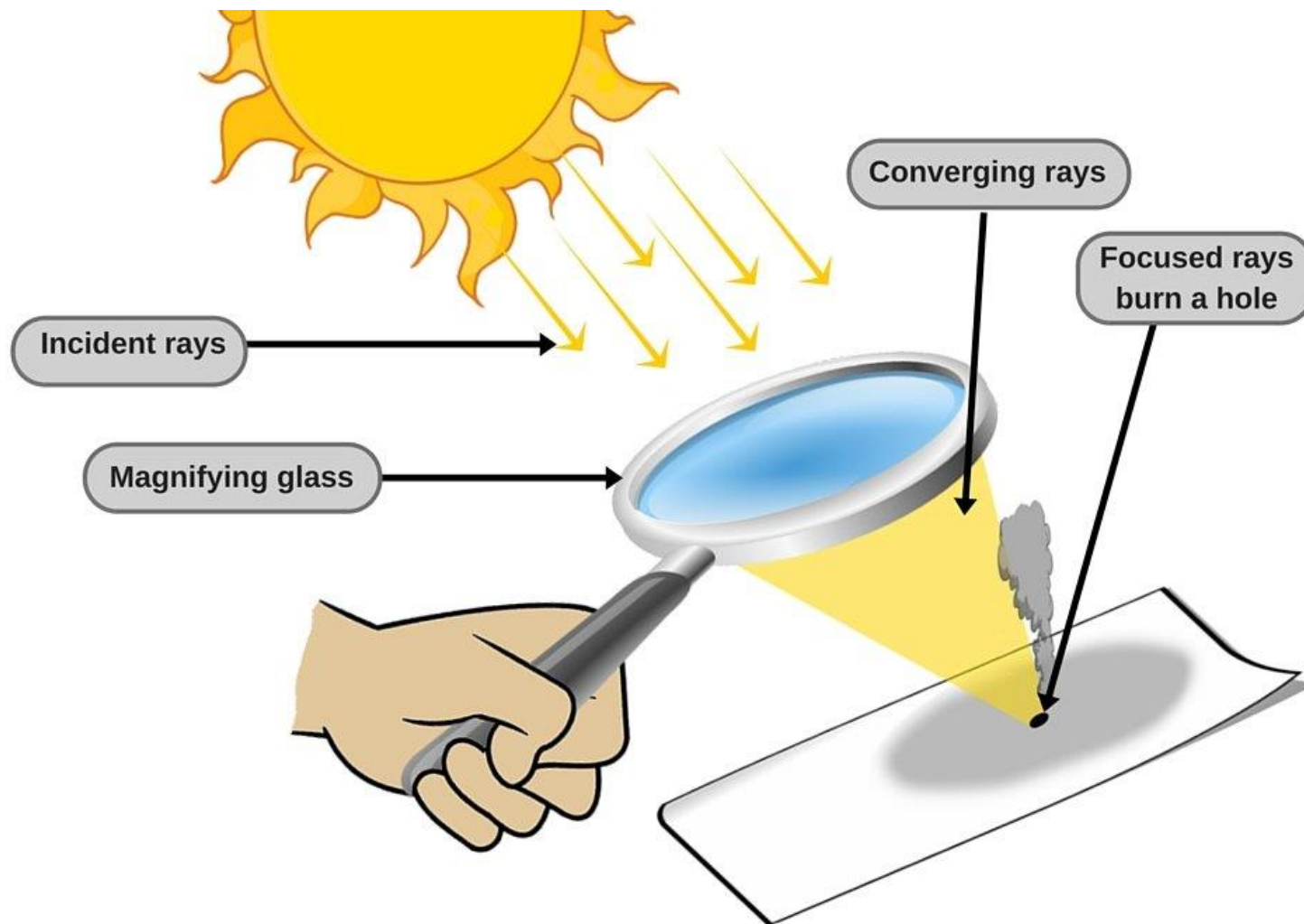


[http://www.laserportal.ru/content\\_1080 /](http://www.laserportal.ru/content_1080/)

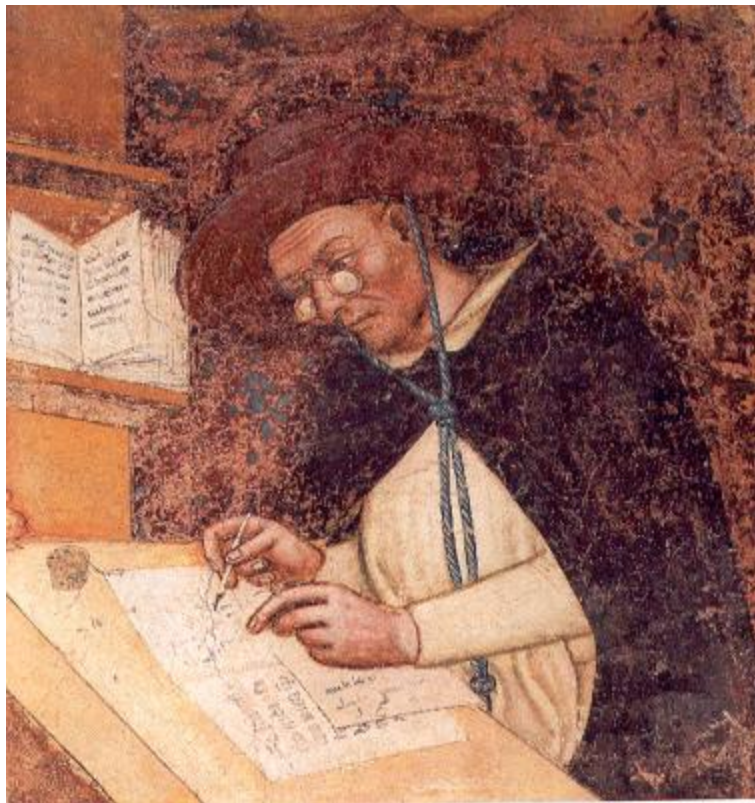
Во время раскопок в гавани города викингов Фреджель, (Готланд, Швеция) обнаружили в 1999 году линзы из горного хрусталя, произведённые с помощью токарных станков с 11 по 12 века, с качеством изображения, сопоставимым с асферическими линзами из 1950-х годов. Линзы викингов были способны концентрировать достаточно солнечного света, чтобы зажигать огонь.

Между 11-м и 13-м веке были изобретены "камни для чтения". Часто используемые монахами, чтобы помочь в чтении рукописей, это были примитивные плоско-выпуклые линзы, первоначально сделанные с помощью резки стеклянного шара пополам.

# Увеличивающая линза



# Очки



Первое изображение очков содержится на фреске церкви Тревизо (Италия), сделанной в 1352 г. монахом Томмазо да Модена.

До появления очков в качестве приборов, улучшающих зрение, использовались отдельные полированные кристаллы или куски стекла для одного глаза.

Очки были изобретены, по-видимому, в Италии в XIII веке. Предполагаемый год изобретения — 1284, а создателем первых очков считается Сальвино Арматти (итал.), хотя документальных подтверждений этим данным нет. Первые документальные свидетельства существования очков относят к 1289 году.

23 февраля 1305 года во Флоренции брат-доминиканец Джордано да Ривалто (итал.) упоминал в проповеди: «Не прошло и 20 лет с тех пор, как было открыто искусство изготовления очков, призванных улучшить зрение. Это одно из самых лучших и необходимых искусств в мире. Как мало времени прошло с тех пор, как было изобретено новое, никогда не существовавшее искусство. Я видел человека, первым создавшего очки, и я беседовал с ним.»

# История микроскопии: первые микроскоп

Линзы получили широкое распространение в Европе с изобретением очков. Это положило начало оптической промышленности шлифования и полировки линз для очков, сначала в Венеции и Флоренции в тринадцатом веке, а позже и в фабриках по изготовлению очков в Нидерландах и в Германии. Производители очков создали улучшенные типы линз для коррекции зрения, основанные больше на эмпирических знаниях, полученных из наблюдений за свойствами линз (вероятно, без знания элементарной оптической теории). Практическая разработка и экспериментирование с линзами привело к изобретению составного оптического микроскопа приблизительно в 1595 г.

Считается, что первый микроскоп создали в 1590 г. голландский оптик Ганс Янсен и его сын Захарий Янсен. Так как линзы в те времена шлифовали вручную, то они имели различные дефекты: царапины, неровности. Дефекты на линзах искали с помощью другой линзы - лупы. Оказалось, что если рассматривать предмет с помощью двух линз, то происходит его многократное увеличение. Смонтировав 2 выпуклые линзы внутри одной трубки, Захарий Янсен получил прибор, который напоминал подзорную трубу. В одном конце этой трубки находилась линза, выполняющая функцию объектива, а в другом - линза-окуляр. Но в отличие от подзорной трубы прибор Янсена не приближал предметы, а увеличивал их.



Первый микроскоп создал нидерландский мастер по изготовлению очков Захарий Янсен. Это была обычная трубка с двумя линзами на концах. Настройку изображения выполняли, выдвигая трубку (тубус). Этот простой микроскоп стал основой для создания более сложных приборов. Увеличение  $\times 3-10$ .

# История микроскопии: первые микроскопы

В 1609 г. итальянский учёный Галилео Галилей разработал составной микроскоп с выпуклой и вогнутой линзами. Он называл его «оккиолино» - маленький глаз.

10 лет спустя, в 1619 г. нидерландский изобретатель Корнелиус Якобсон Дреббель сконструировал составной микроскоп с двумя выпуклыми линзами.

Мало кто знает, что своё название микроскоп получил только в 1625 г. Термин «микроскоп» предложил друг Галилео Галилея немецкий доктор и ботаник Джованни Фабер.

Все созданные в то время микроскопы были довольно примитивными. Так, микроскоп Галилея мог увеличивать всего в 9 раз. Усовершенствовав оптическую систему Галилея, английский учёный Роберт Гук в 1665 г. создал свой микроскоп, который обладал уже 30-кратным увеличением.

В 1674 г. нидерландский натуралист Антони ван Левенгук создал простейший микроскоп, в котором использовалась всего одна линза. Нужно сказать, что создание линз было одним из увлечений учёного. И благодаря его высокому мастерству в шлифовании, все сделанные им линзы получались очень высокого качества. Левенгук называл их «микроскопиями». Они были маленькие, размером с ноготь, но могли увеличивать в 100 или даже в 300 раз.



Галилео Галилей доработал трубу Янсена, заменив одну из выпуклых линз на вогнутую. При выдвижении тубуса этот микроскоп служил ещё и телескопом. Предположительно микроскоп Галилея изготовил мастер Джузеппе Кампани из дерева, картона и кожи и поставил на трёхногую подставку из металла.



# Составной микроскоп Роберта Гука

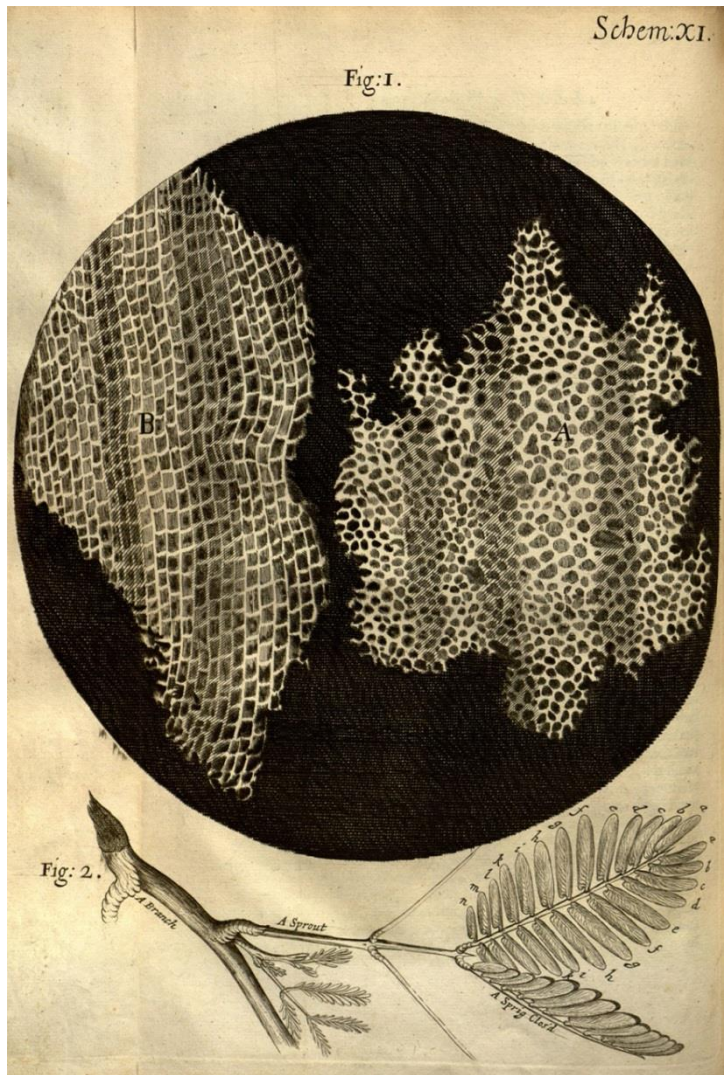


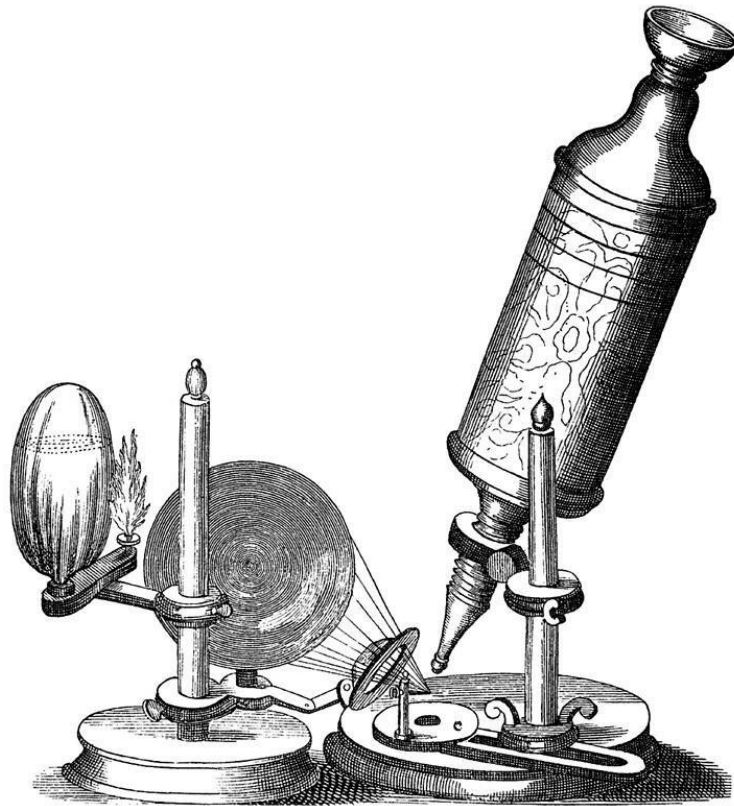
Рисунок из книги Р. Гука Микрография

Английский учёный Роберт Гук регулярно устраивал демонстрации для нового королевского общества. Эти демонстрации начались в 1663 году, а два года спустя Гук опубликовал фолиант под названием «Микрография», в котором представил широкий спектр микроскопических представлений о знакомых объектах (среди них блохи, вши и крапива). В этой книге он ввёл термин "клетка« (x30).



Помимо объектива и окуляра микроскоп имел 2 дополнительные линзы и диафрагму

# Составной микроскоп Роберта Гука



×50

# Микроскоп Левенгука

•В 1674 г. нидерландский натуралист Антони ван Левенгук создал простейший микроскоп, в котором использовалась всего одна линза. Нужно сказать, что создание линз было одним из увлечений учёного. И благодаря его высокому мастерству в шлифовании, все сделанные им линзы получались очень высокого качества. Левенгук называл их «микроскопиями». Всего учёным было изготовлено более 25 микроскопов. 9 из них сохранились до наших дней. Они способны увеличивать изображение в 275 раз.

В те времена было мало известно о строении органов человека. С помощью своих линз Левенгук обнаружил, что кровь состоит из множества крошечных частиц - эритроцитов, а мышечная ткань - из тончайших волокон. В растворах он увидел мельчайшие существа разной формы, которые двигались, сталкивались и разбегались. Теперь мы знаем, что это бактерии: кокки, бациллы и др. Но до Левенгука об этом не было известно.

Микроскоп Левенгука представлял собой металлическую пластину, в центре которой находилась линза. Наблюдатель смотрел через неё на образец, закреплённый с другой стороны. И хотя работать с таким микроскопом было не совсем удобно, Левенгук смог сделать с помощью своих микроскопов важные открытия.



Портрет Левенгука



## Микроскоп фирмы Шевалье (XIX век)



Шарль Шевалье родился 18 апреля 1804 г. в Париже в семье известного оптика Винсента Жак-Луи-Шевалье (1771-1841) - владельца и руководителя оптической фирмы «Дом Шарль-Шевалье», основанной в 1760 г. В эти годы отец и сын Шевалье изобрели первые солнцезащитные очки с напылением и разработали технологию их изготовления.

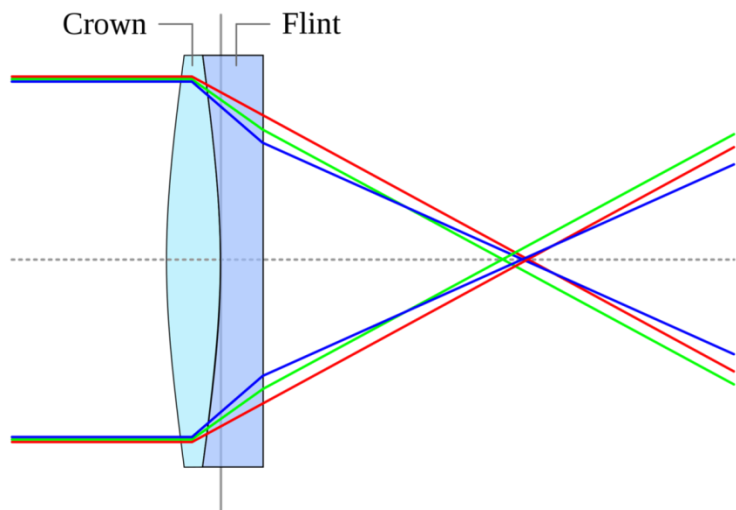
В 1825 г. Ш. Шевалье обращается к работам Эйлера по устранению хроматизма. Опытным путём ему удаётся установить, что наилучшие результаты достигаются в склеенном объективе, состоящем из отрицательной и положительной линз. Ахроматический объектив Ш. Шевалье сконструировал из двояковыпуклой линзы из крона (сорт стекла с малым показателем преломления) и плоско-вогнутой линзы из флинта (сорт стекла с большим показателем преломления), склеенных канадским бальзамом. По степени коррекции ахроматический микроскоп Ш. Шевалье можно было поставить рядом с самым совершенным оптическим инструментом того времени - ахроматическим телескопом.

В 1827 г. отец и сын Шевалье приступили к производству горизонтальных микроскопов собственной конструкции. На Выставке товаров национальной индустрии в 1834 г. этот микроскоп был отмечен золотой медалью. В том же году Ш. Шевалье создал ахроматический портативный дорожный микроскоп, который в сложенном виде легко помещался в сумку. Этот микроскоп Ш. Шевалье описал в своей работе «Руководство по микрографии».

# The issues between simple and compound microscope

Простые микроскопы могли достигать разрешения около 2 микрон, в то время как лучшие составные микроскопы были ограничены примерно 5 микронами из-за хроматической aberrации

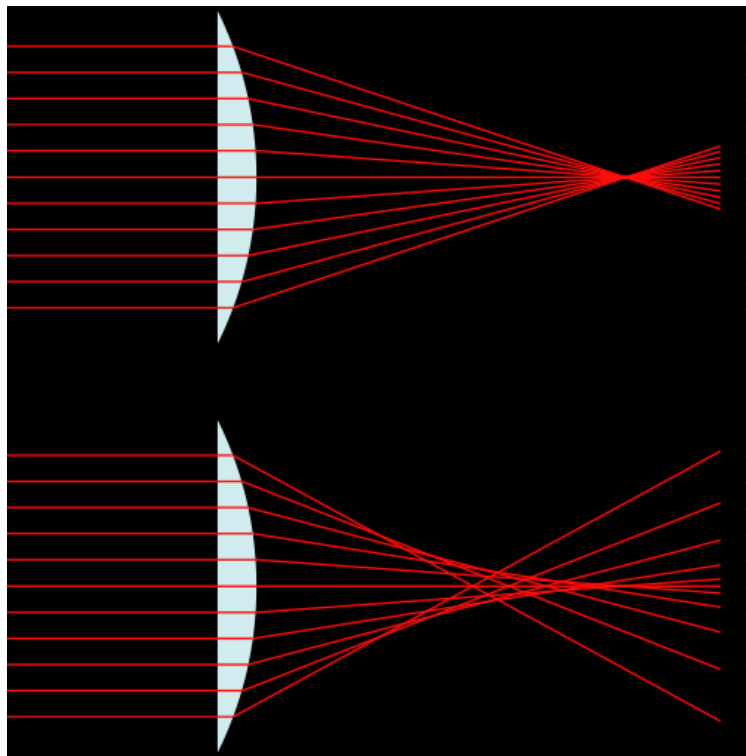
С того самого момента как изобрели линзу происхождение aberrаций связывали с дефектами сферической поверхности линзы и оптики пытались их исправить изменяя степень кривизны сферической поверхности линзы. Исаак Ньютон, выявив, что хроматическая aberrация происходит на самом деле из-за неравного преломления света, в то время когда он проходит через границы оптических сред. Ньютон некоторое время экспериментировал с составами оптического стекла для линз, но потерпел неудачу, заявив, что от aberrаций избавиться невозможно. Честь изобретения такой линзы принадлежит английскому адвокату и по совместительству оптику Честеру Муру Холлу.



Холл хотел сохранить своё изобретение втайне настолько, (видимо ждал открытия первого патентного бюро ну, на, то он и юрист, в конце концов) что работая над созданием ахроматической линзы, остроумно, но недалековидно заказывал крону и флинт (линзы из разных типов оптического стекла с разной преломляющей силой) у двух разных производителей

# Сферические аберрации

В 1830 году Джозеф Листер решил проблему сферической аберрации (свет изгибается под разными углами в зависимости от того, где он попадает на линзу), поместив линзы на точных расстояниях друг от друга. В совокупности эти два открытия способствовали заметному улучшению качества изображения.



Сферическую [аберрацию](#) принято рассматривать для пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной на оптической оси. В результате сферической аберрации цилиндрический пучок лучей, после преломления линзой (в пространстве изображений) получает вид не конуса, а некоторой воронкообразной фигуры, наружная поверхность которой, вблизи узкого места, называется [каустической](#) поверхностью. Сферическая аберрация [линзы](#) (системы линз) объясняется тем, что её преломляющие поверхности встречают отдельные лучи сколько-нибудь широкого пучка под различными углами. Вследствие чего, более удалённые от оптической оси лучи преломляются сильнее, нежели нулевые лучи, и образуют свои точки схода удалённые от [фокальной плоскости](#). (Wikipedia, 2010).

# Эрнст Лейтц и Эрнст Аббе

В 1849 году Карл Келлнер основал оптический институт в Вецларе, Германия. Первоначально акцент делался на телескопы, но уже через несколько лет основным продуктом стали микроскопы. В 1865 году компания наняла очень способного инженера по имени Эрнст Лейтц, который вскоре стал ее партнером. Лейтц возглавил компанию в 1869 году и переименовал ее в оптический институт имени Эрнста Лейтца. К 1900 году Эрнст Лейтц произвел 50000 инструментов.

**Карл Цейсс** (1816-1888) был оптиком, широко известным благодаря основанной им компании Carl Zeiss Jena. Компания Zeiss внесла свой вклад в производство линз, что способствовало современному производству линз. В 1866 году, когда Карл Цейсс нанял Эрнста Аббе в качестве своего директора по исследованиям на оптическом заводе Цейсса. Аббе разработал теорию, что является основным инструментом современной вычислительной оптики. Он ясно показал разницу между увеличением и разрешением, и раскритиковал практику использования очков со слишком большим увеличением как "пустое увеличение". К 1869 году его работа создала новое запатентованное осветительное устройство-конденсатор Аббе.

Работа Аббе над волновой теорией микроскопического изображения (условие синуса Аббе) позволила разработать диапазон из семнадцати новых микроскопических объективов - три из них были первыми иммерсионными объективами, и все они были разработаны на основе математического моделирования.



# Дальнейшее развитие оптической микроскопии

Abbe и Zeiss разработали микроскопы, в которых использовались иммерсионные жидкости, такие как масло. Использование иммерсионных жидкостей позволило увеличить числовую апертуру до 1,4, что позволило световым микроскопам разрешать две точки, находящиеся на расстоянии всего 200 нм друг от друга (теоретическое максимальное разрешение микроскопов видимого света).

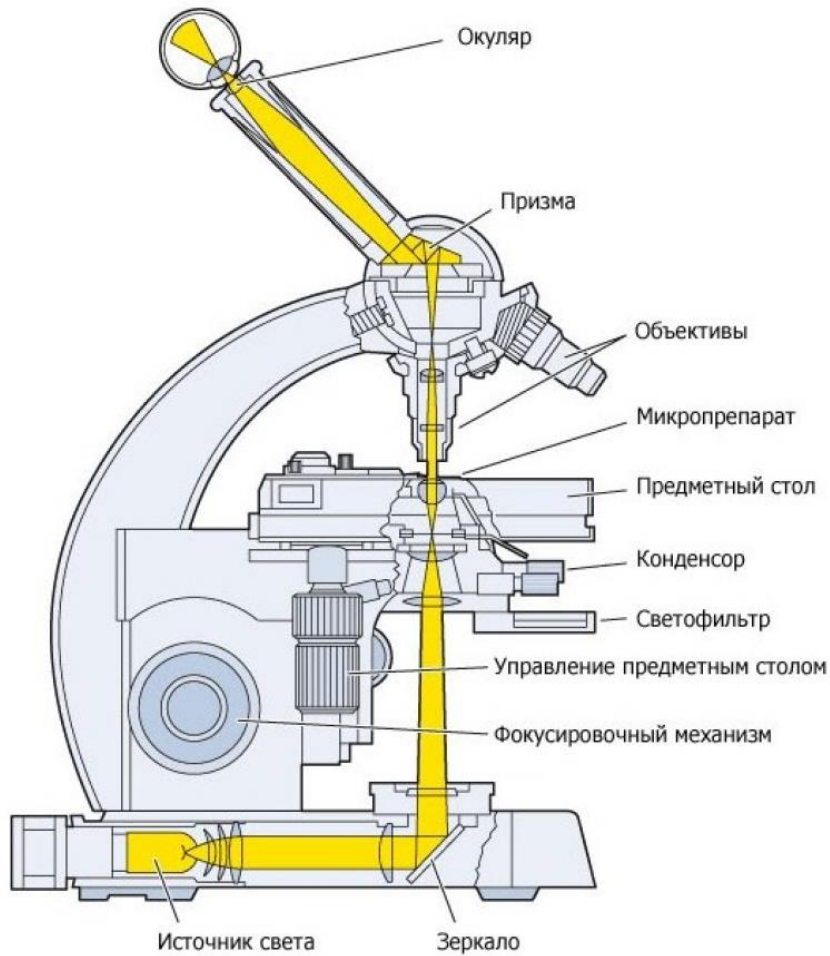
Освещение Кёллера: изобретено Августом Кёллером в 1893 году для использования полной разрешающей способности объектива. Это метод правильного выравнивания светового пути таким образом, чтобы поле было равномерно освещено и получалось яркое изображение с минимальными бликами и освещенного образца.



Студенческий микроскоп Zeiss 1880

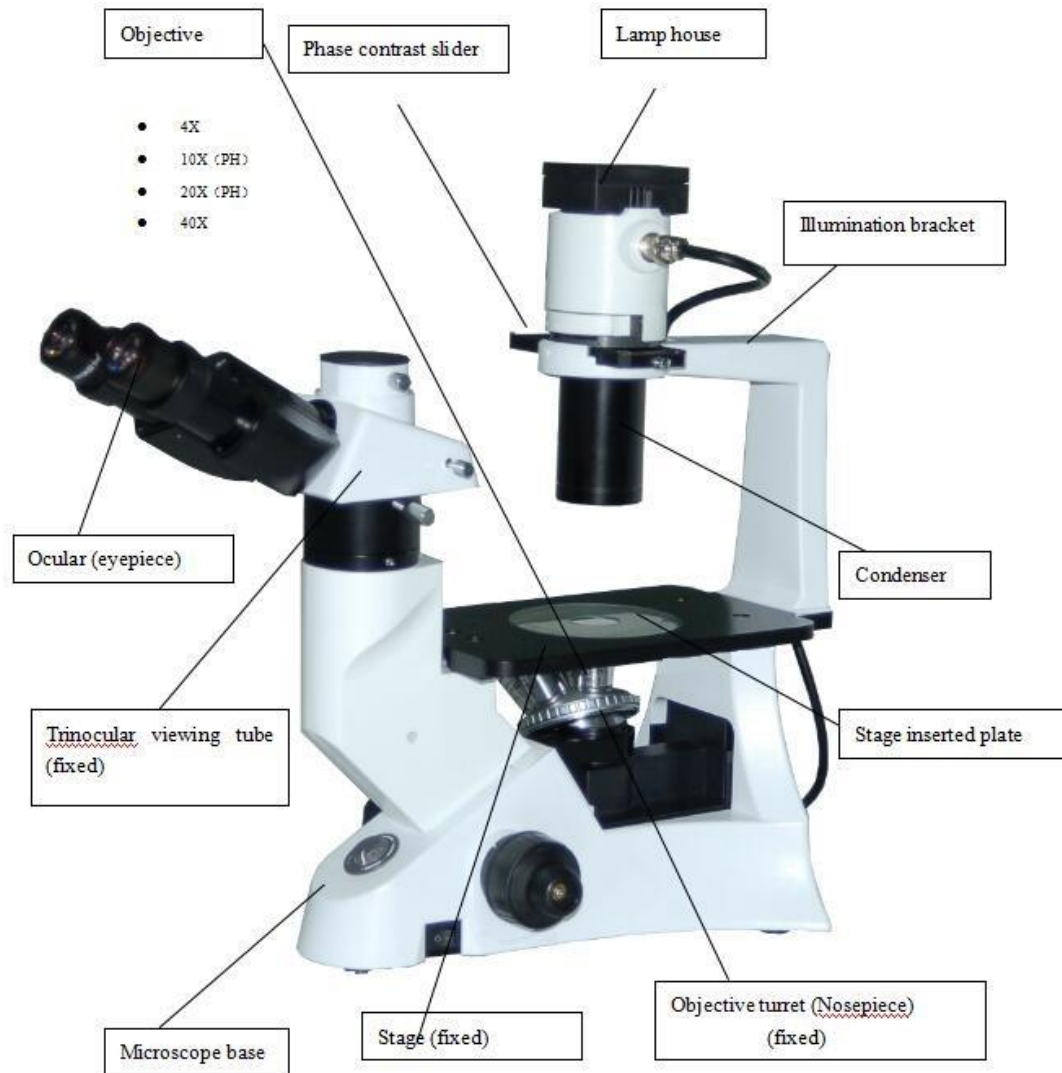


# Современный микроскоп



**Nikon Eclipse E600  
with U-III Film  
Camera System  
(circa early 1990s)**

# Инвертированный микроскоп



## Стереомикроскоп



**Стереомикроскоп, бинокляр — микроскоп** для рассматривания предметов с объёмным их восприятием. Изображения предмета образуют стереопару, что обеспечивает передачу объектов в соответствии с тем, как их отдельно видит правый и левый глаз человека.

Микроскоп стерео Микромед МС-4-ZOOM LED

# Использование лазеров

Лазер-это устройство, которое излучает свет (электромагнитное излучение) через процесс, называемый стимулированным излучением. Термин лазер является аббревиатурой для усиления света за счет стимулированного излучения

Николай Басов и Александр Прохоров из Советского Союза независимо работали над квантовым генератором и решили проблему систем непрерывного вывода с использованием более чем двух энергетических уровней и создали первый мазер. Эти системы могли бы высвободить стимулированное излучение, не переходя в основное состояние, тем самым поддерживая инверсию численности населения. В 1955 году Прохоров и Басов предложили оптическую накачку многоуровневой системы в качестве метода получения инверсии населенности, которая впоследствии стала одним из основных методов лазерной накачки.

В 1953 году Чарльз Х. Таунс и аспиранты Джеймс П. Гордон и Герберт Дж. Зейгер создали первый микроволновый усилитель-устройство, работающее на принципах, сходных с лазерным, но усиливающее микроволновое, а не инфракрасное или видимое излучение

Таунс, Басов и Прохоров разделили Нобелевскую премию по физике в 1964 году "за фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию генераторов и усилителей на основе принципа мазер-лазера."



Nikolay Basov



Aleksandr Prokhorov



Charles H. Townes

# Свойства лазеров

## Направленность

На Луне (384 400 км) лазерный луч имеет диаметр 3 км

## Монохроматичность

Спектральная ширина может быть узкой до 1 Гц (несущая частота 1015 Гц)

## Яркость

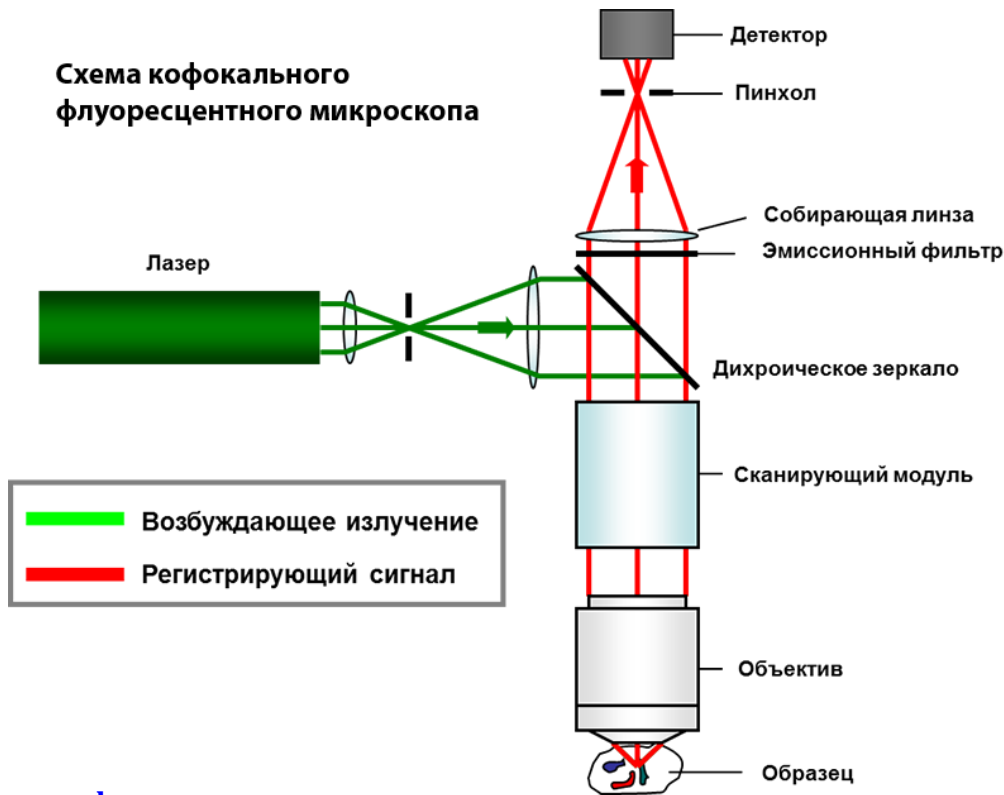
Мощность света от 100-ваттной лампы, проходящей через 2-мм щель на расстоянии 1 м, составляет всего 0,05 МВт, в то время как лазер CD-плеера дает 5 МВт

## Способность фокусировать внимание

Лазерный луч может быть сфокусирован на пятно размером с длину волны ( $\sim 0,5$  мкм)

# Конфокальный лазерный микроскоп

Схема конфокального  
флуоресцентного микроскопа

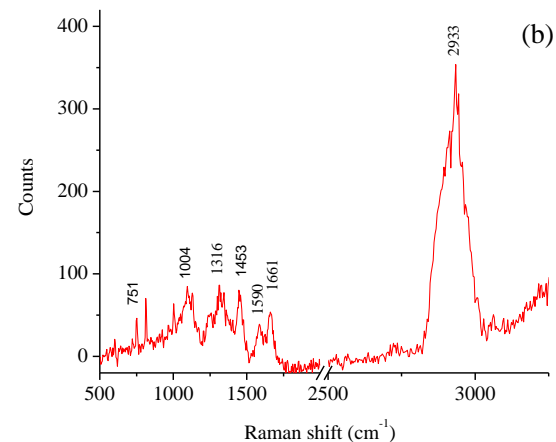
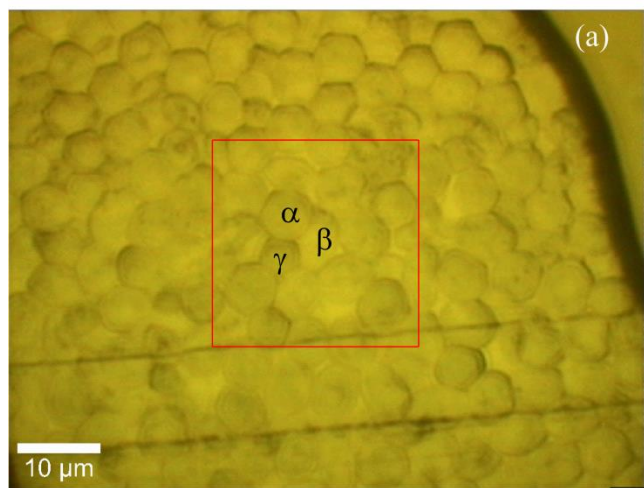


[czl.ru](http://czl.ru)

Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (CLSM или LSCM)-это метод получения оптических изображений высокого разрешения с глубинной селективностью. Ключевой особенностью конфокальной микроскопии является ее способность получать изображения в фокусе с выбранных глубин, процесс, известный как оптическое секционирование. Изображения получаются точно и реконструируются с помощью компьютера, что позволяет проводить трехмерные реконструкции топологически сложных объектов

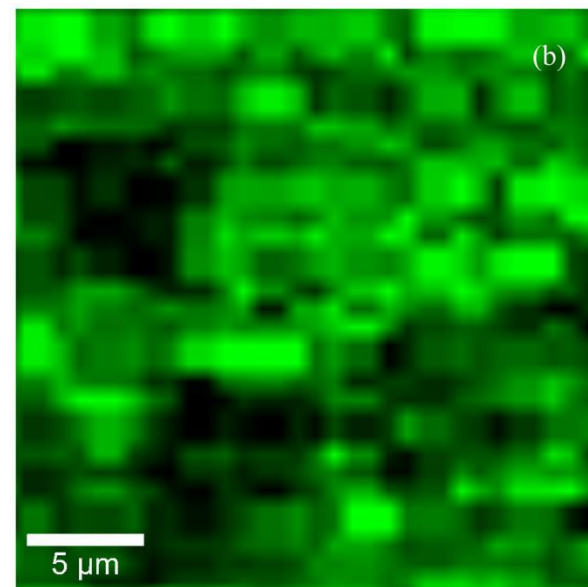
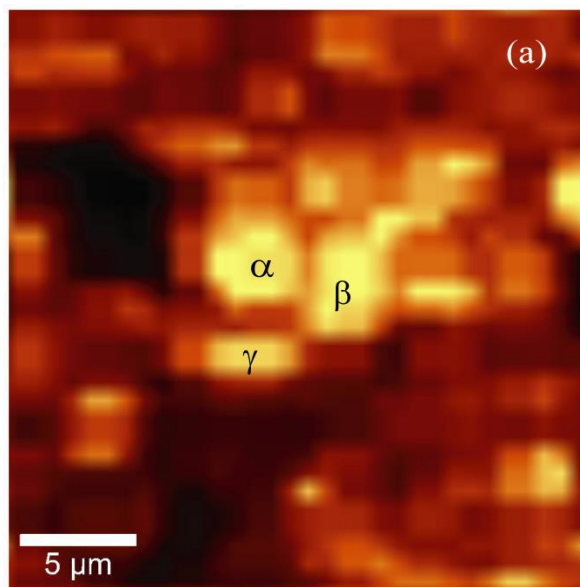
Основная концепция конфокальной микроскопии была первоначально разработана Марвином Мински в середине 1950-х годов (запатентована в 1961 году), когда он был аспирантом Гарвардского университета. Мински хотел изобразить нейронные сети в неокрашенных препаратах мозговой ткани. Изобретение Мински оставалось в значительной степени незамеченным, скорее всего, из-за отсутствия интенсивных источников света, необходимых для визуализации, и компьютерной мощности, необходимой для обработки больших объемов данных. Следуя творчеству Минского, М. Дэвид Эггер и Мохмир Петран в конце 1960-х годов создали многолучевой конфокальный микроскоп, который использовал вращающийся диск (Nipkow) для исследования неокрашенных участков мозга и ганглиозных клеток(Claxton et al, Confocal Microscopy).

# Конфокальная Микроскопия Комбинационного рассеяния



Оптическое изображение дрожжевых хлебопекарных клеток в отражательной конфокальной микроскопии. Прямоугольник показывает область комбинационного отображения. а) Рамановские спектры ячейки  $\alpha$ , измеренные при возбуждении зеленым лазером (532 нм, система WiTec).

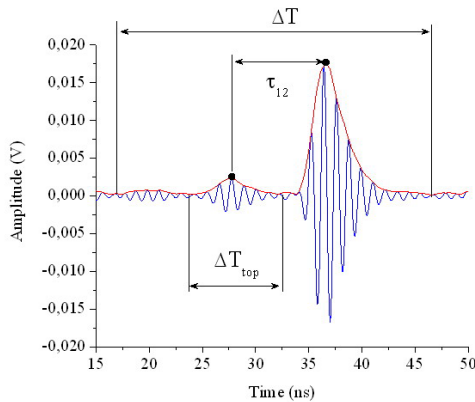
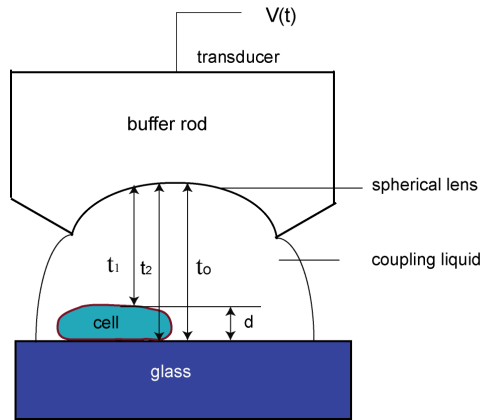
(а) Карта интенсивности пика комбинационного рассеяния с центром в 2933  $\text{cm}^{-1}$ . Интенсивность пика 2933  $\text{cm}^{-1}$  показана желтым светом. (b) карта интенсивности пика комбинационного рассеяния с центром в 1590  $\text{cm}^{-1}$ . Интенсивность пика 1590  $\text{cm}^{-1}$  показана зеленым цветом.



# История создания акустического микроскопа

Первые эксперименты относятся ко времени 1940-ых, когда высокочастотные акустические изображения были получены Ленинградским учёным Соколовым (Соколов 1949). Он наблюдал акустическое изображение, используя трубу, названную в честь него, в котором акустическая картина была преобразована в телевизионный сигнал. Первый просвечивающий акустический микроскоп был создан Lemons и Quate в Стэнфордском университете в 1973 (Лемонс и др. 1974). Современные акустические микроскопы работают в способе отражения (Quate и др. 1979).

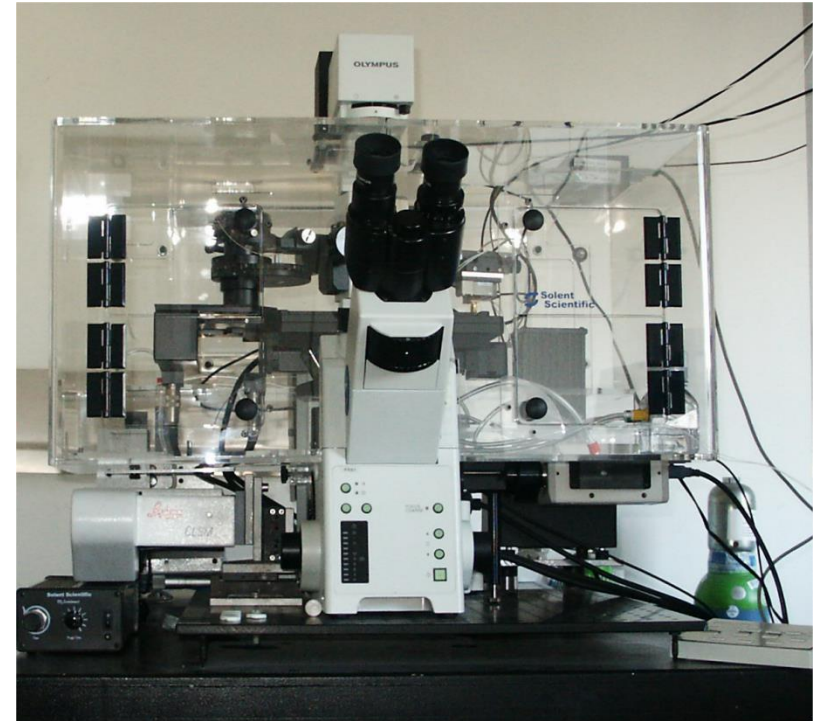
Подробное описание было дано в монографии «Акустическая Микроскопия» (Briggs 1992). Значительные успехи акустической микроскопии твёрдых структур были сделаны с тех пор. Развитие теории формирования изображения подповерхностных дефектов (Lobkis и др. 1995) и трёхмерных объектов (Weise и др. 1996; Zinin и др. 1997a), позволили определять размеры и местоположение объектов в твёрдых телах. Развитие импульсной акустической микроскопии позволяет исследовать микроструктура маленьких сверхтвёрдых образцов (Levin и др. 2000) и делящиеся биологические клетки (Вайс и др. 2007a). Акустическая микроскопия может быть также использована для визуализировать напряжение в твёрдых материалах (Drescher-Krasicka и др. 1996). С развитием ультразвукового атомно-силового микроскопа (Колосов и др. 1993a) и акустического атомно-силового микроскопа (Rabe и др. 1994) разрешающая способность акустического микроскопа была расширена до нанометра (Briggs и др. 2010).



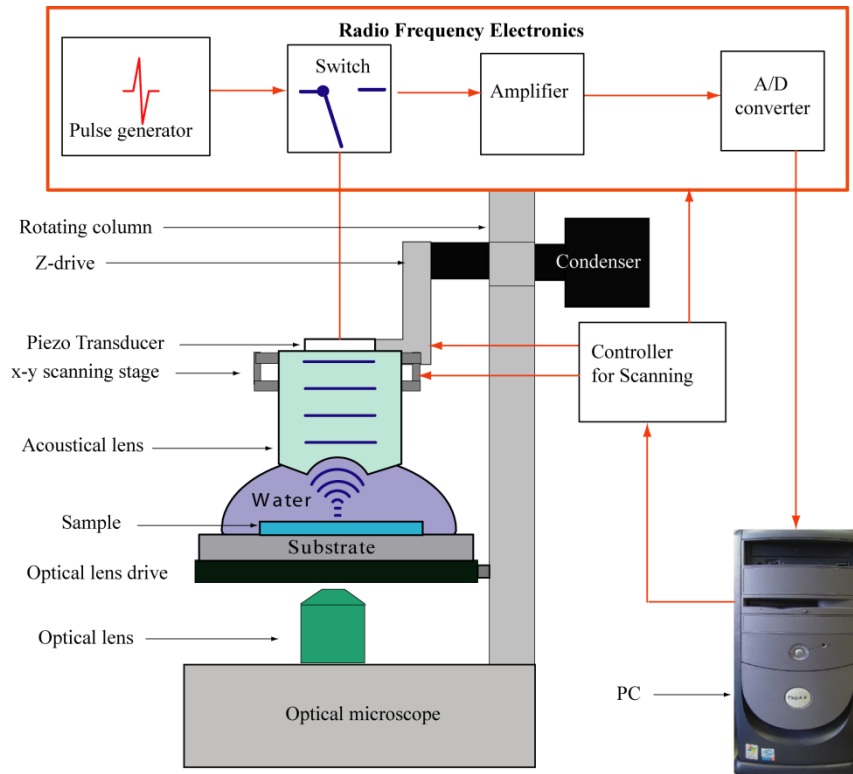


# Принципиальная схема импульсного акустического микроскопа совмещенного с оптическим микроскопом

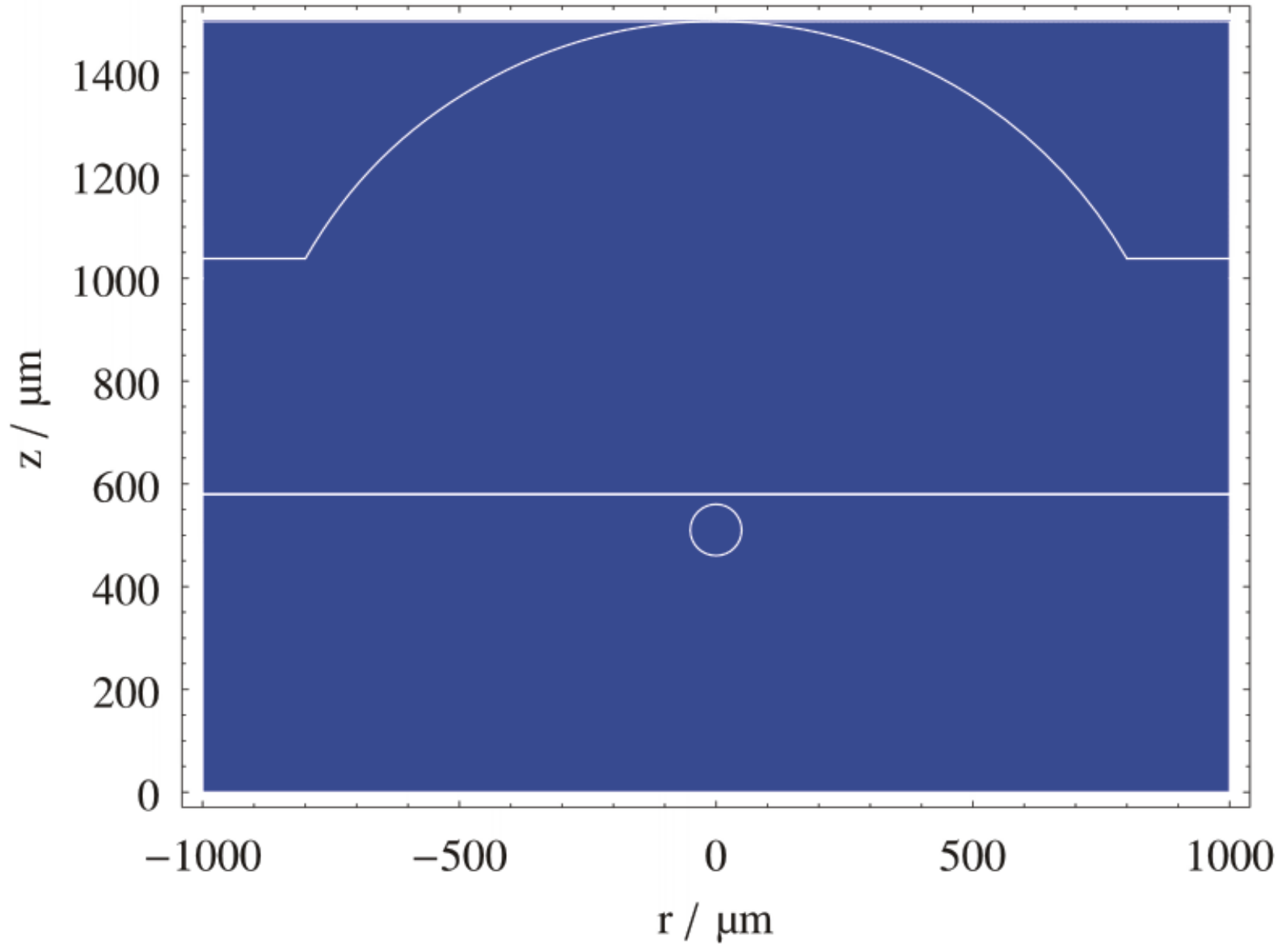
Фотография акустического микроскопа совмещенного с оптическим микроскопом (Olympus IX81).



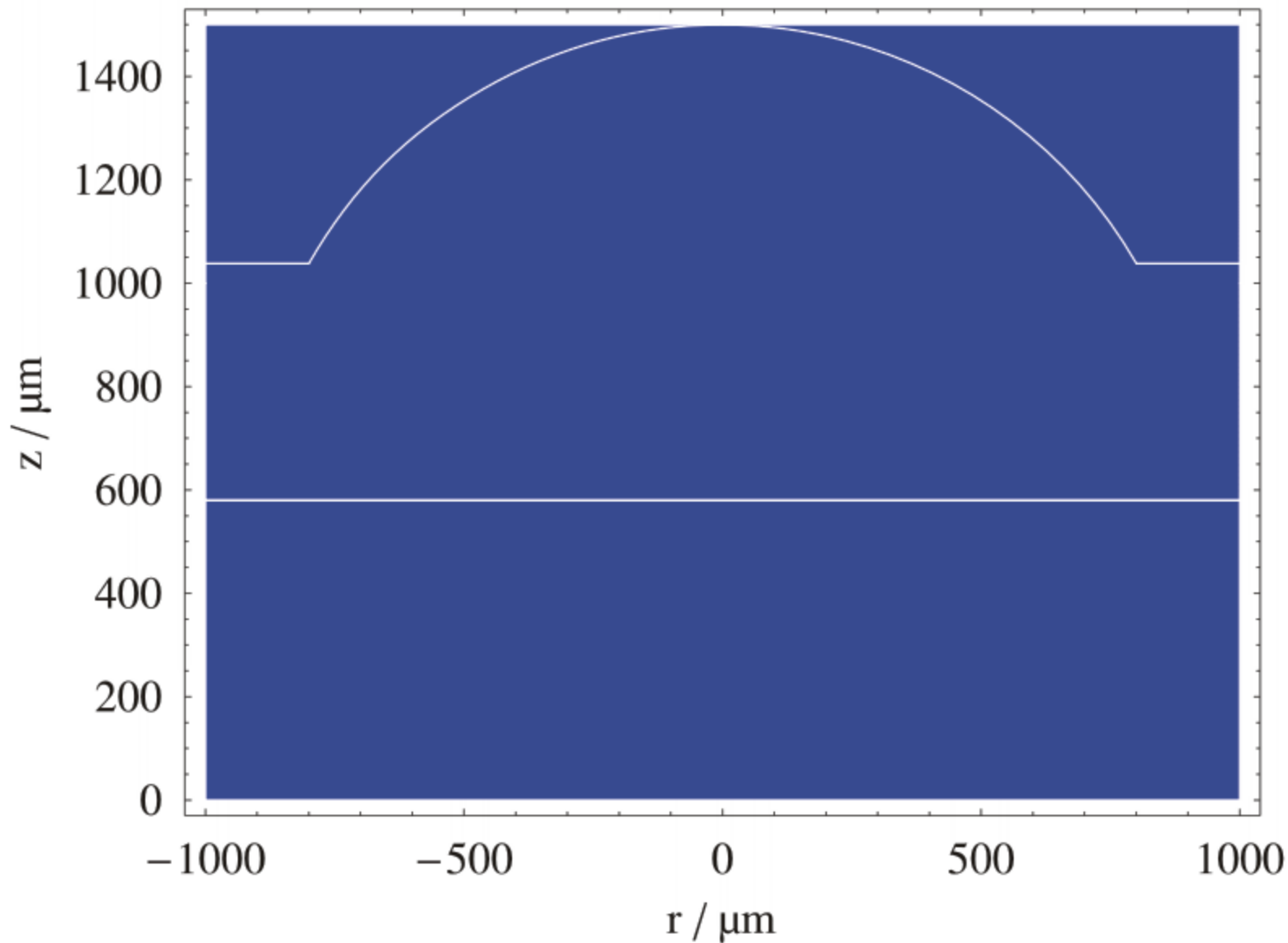
Часть сканирующего микроскопа находится внутри камеры из плексигласа для постоянной температуре 37 °.



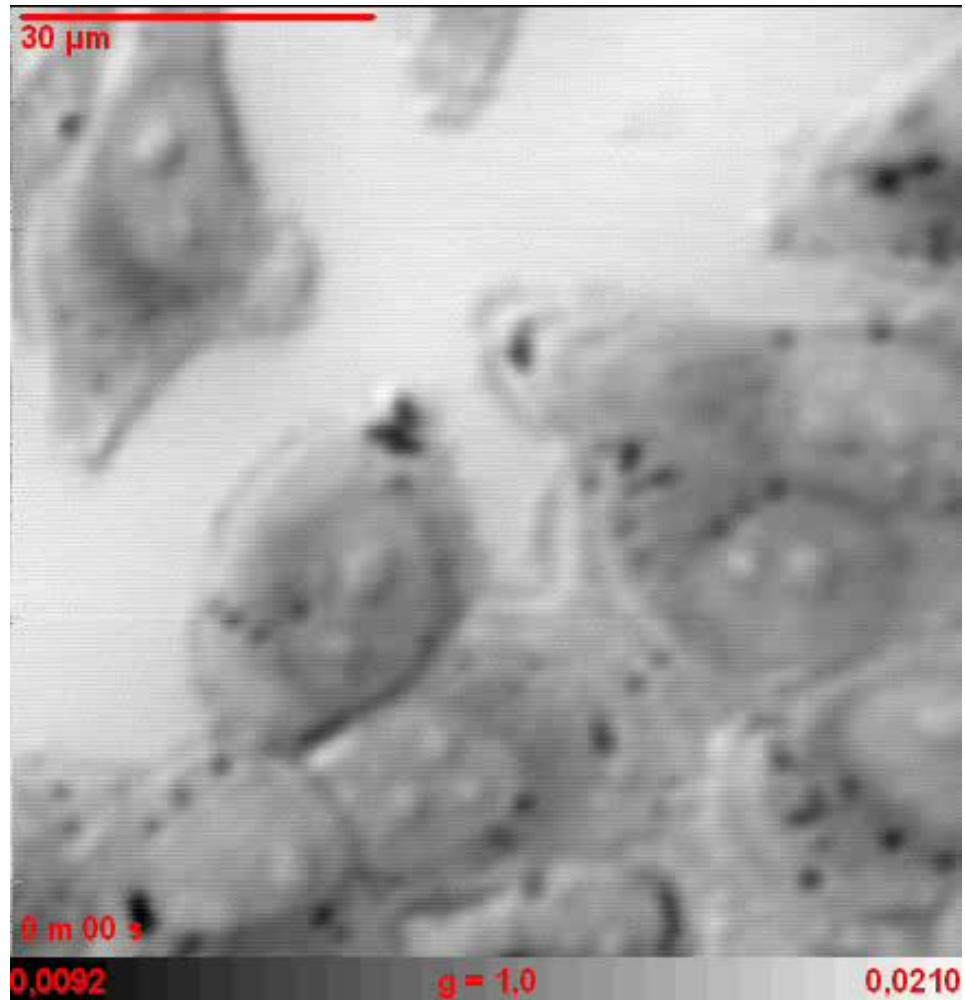
# Импульсная акустическая микроскопия. Сфера



# Импульсная акустическая микроскопия. Полупространство



# Визуализация клеток HeLa на разных стадиях клеточного цикла

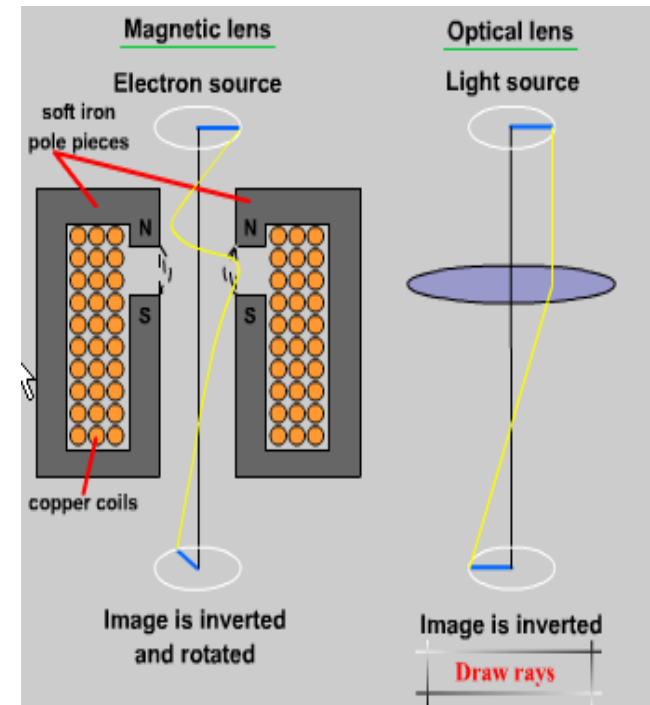


# История создания электронного микроскопа

История электронной микроскопии началась с теоретических работ немецкого физика Ганса Буша о влиянии электромагнитного поля на траекторию заряженных частиц. В 1926 году он доказал, что такие поля могут быть использованы в качестве электромагнитных линз, установив таким образом основополагающие принципы геометрической электронной оптики.



В 1986 году половину Нобелевской премии получил немецкий физик Эрнст Руска «За работу над электронным микроскопом».



В ответ на это открытие возникла идея электронного микроскопа. Две команды — Макс Кнолл и Эрнст Руска (1906 - 1988) из Берлинского технического университета и Эрнст Бруш из лаборатории EAG, попробовали реализовать эту идею на практике. И в 1932 году Кнолл и Руска создали первый просвечивающий электронный микроскоп.

# Электронная микроскопия

Растровый электронный микроскоп (РЭМ, англ. Scanning Electron Microscope, SEM) — прибор класса электронный микроскоп, предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким (до 0,4 нанометра) пространственным разрешением, также информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв. Основан на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым объектом.

Разрешающая способность прибора ограничена длиной волны фотонов видимого света. Мощный растровый электронный микроскоп можно использовать для просмотра деталей 0,3-0,4 нм. У оптических приборов этот показатель равен всего 0,2 мкм.



Сегодня возможности растровой электронной микроскопии используются практически во всех областях науки и промышленности, от биологии до наук о материалах. Существует огромное число выпускаемых рядом фирм разнообразных конструкций и типов РЭМ, оснащённых детекторами различных типов. (Wikipedia)

# Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)

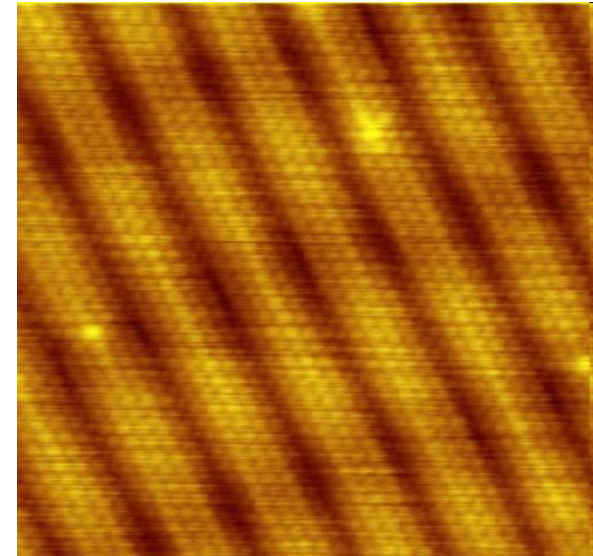
Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) - это мощный метод для наблюдения поверхностей на атомарном уровне. Его разработка в 1981 году принесла его изобретателям Герду Биннигу и Генриху Рореру (в IBM Zurich) Нобелевскую премию по физике в 1986 году. СТМ зондирует плотность состояний материала с помощью туннельного тока. Для СТМ хорошим разрешением считается боковое разрешение 0,1 нм и осевое разрешение 0,01 Нм



Binnig

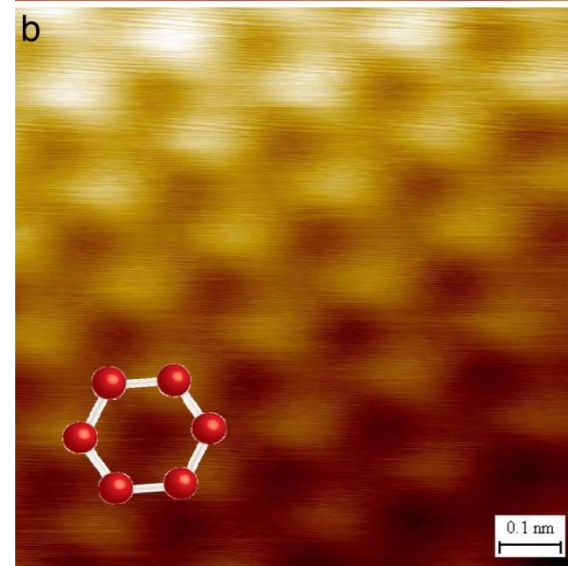
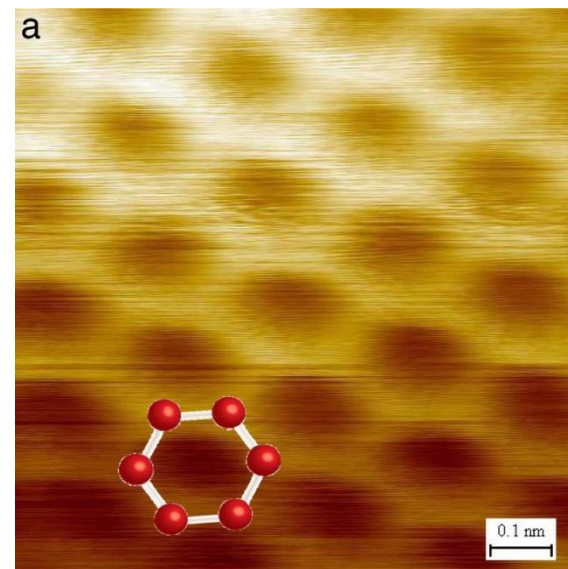
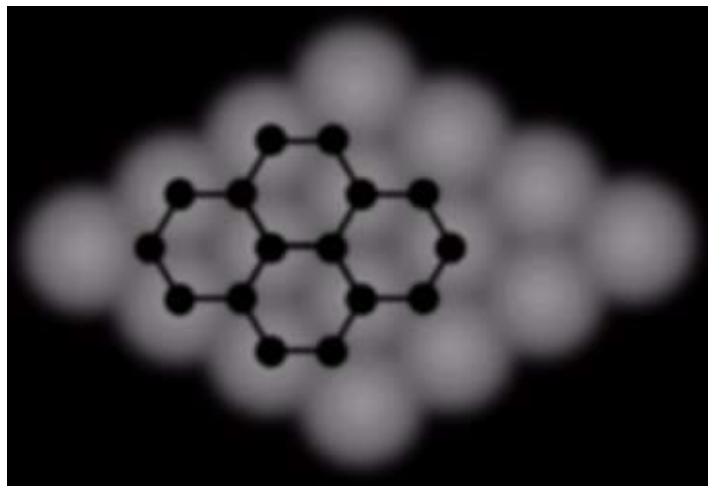
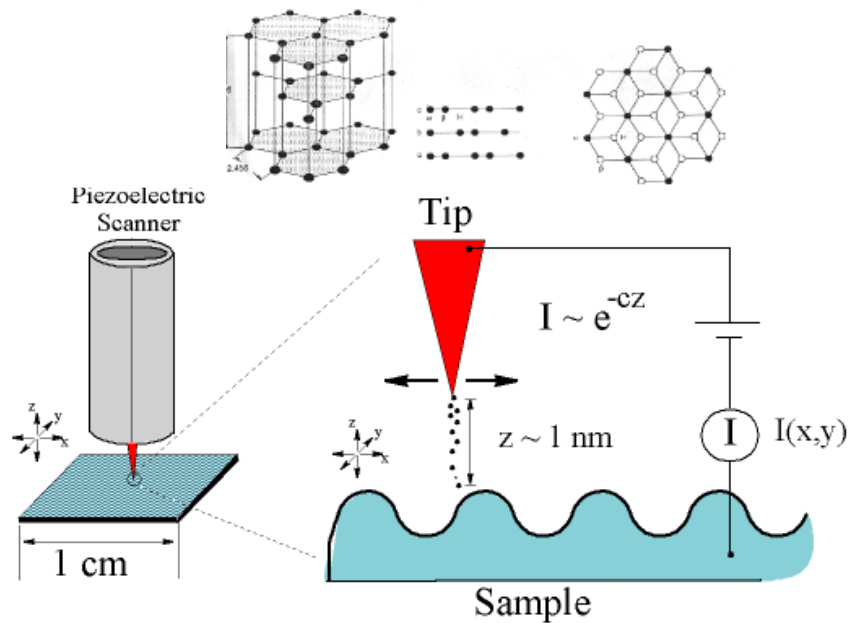


Rohrer



Изображение чистой (100) поверхности золота (From Wikipedia, 2009).

# СТМ изображения графита

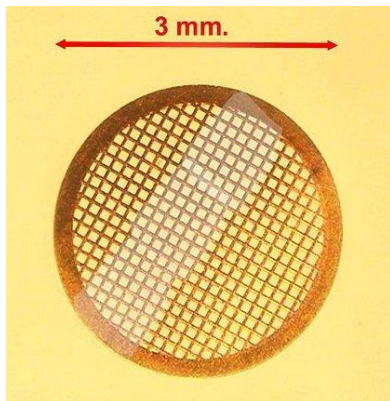




# Просвечивающая Электронная Микроскопия

**JEOL 2000-FX** промежуточное напряжение (200 000 вольт) сканирующий просвечивающий исследовательский электронный микроскоп (сконфигурированный как для биологических, так и для физических образцов)

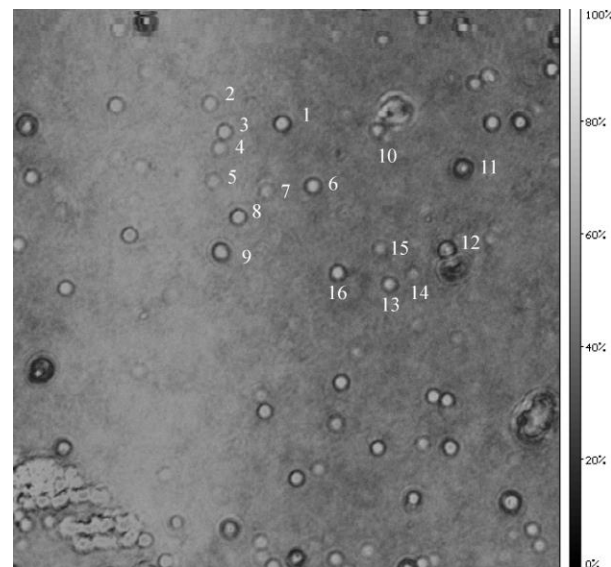
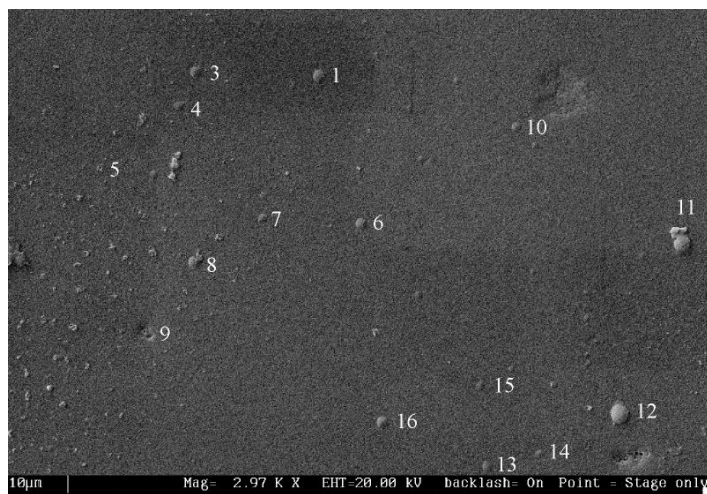
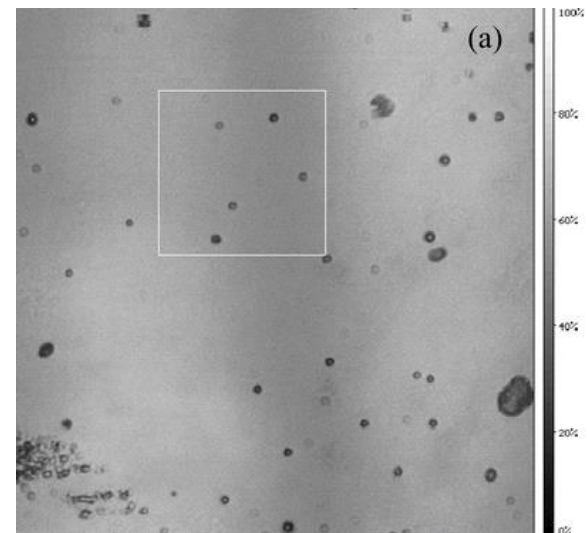
- Увеличение: X 50 to X 1,000,000
- 1.4 Ångstrom разрешение (LaB6 source)
- детекторы обратного рассеяния и вторичных электронов
- Gatan Digi-PEELS Electron Energy Loss Spectrometer, программное обеспечение и внеосевая камера визуализации
- Kevex Quantum 10 mm<sup>2</sup> X-ray детектор (обнаруживает элементы вплоть до бора), с пространственным разрешением всего до 20 нанометров (на тонких участках)
- IXRF X-ray анализатор совмещенный цифровой камерой, X-ray картирование
- Gatan Be double-tilt analytical holder for quantitative X-ray work
- Gatan cryo-TEM specimen holder (to -150°C)
- \$700,000 as currently configured at current prices



Сетка для поддержки образца в ПЭМ (Wikipedia, 2010).

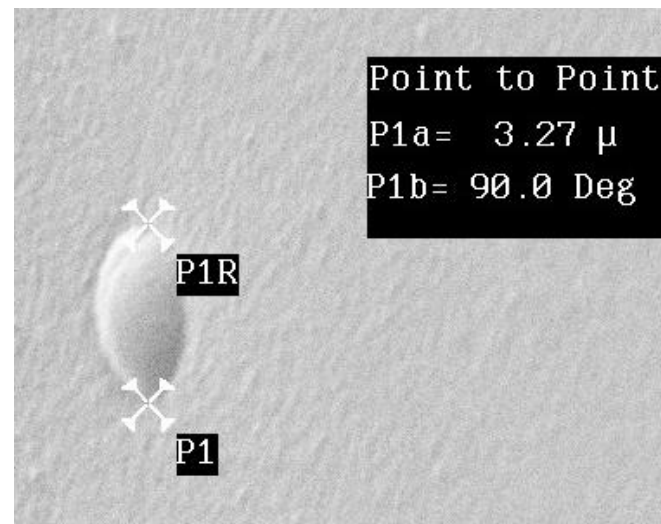
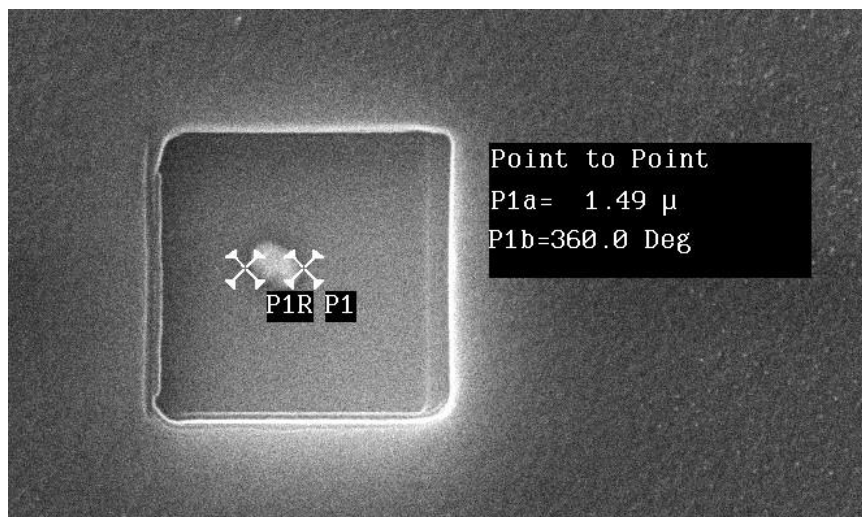


# Электронная микроскопия



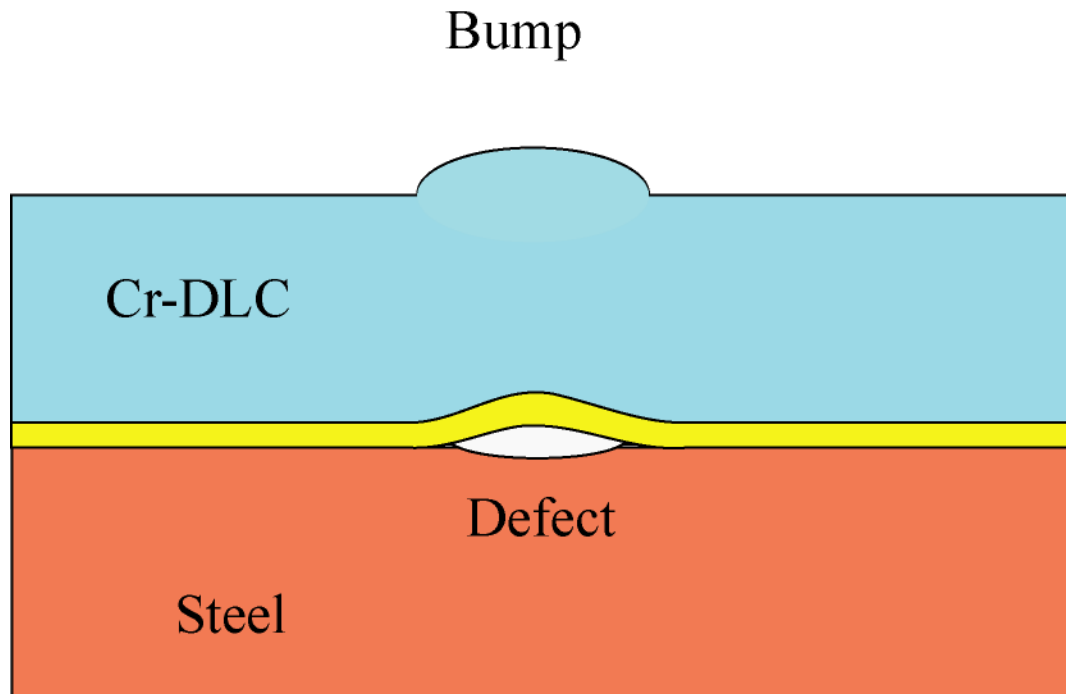
Акустические изображения алмазоподобной пленки Cr-DLC на частоте 1.0 ГГц: (a) поверхность; под поверхностью, дефокусировка - 4 μm.

# Электронная микроскопия



SEM images of the defect BLD#C: (a) Defect C prior to sputtering, SEM image with 60° tilt; (b) Defect BLD#C after sputtering. The depth of the trench is approximately 1.9  $\mu$ m. P1a denotes a distance between two crosses P1 and PR1.

# Электронная микроскопия



Sketch of the model of the subsurface defect in Cr-DLC film.