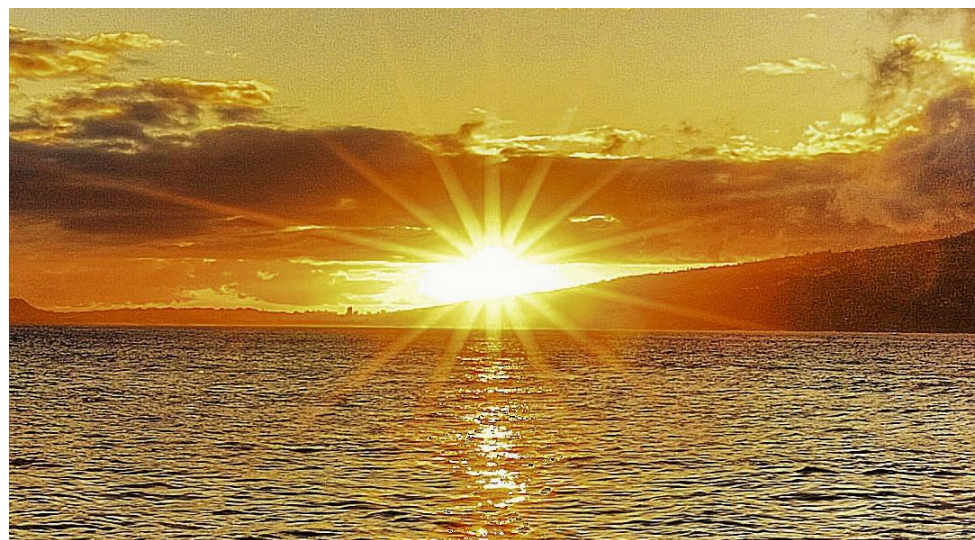


Физические методы исследования состава и структуры веществ

Оптическая микроскопия: Лекция 3

Геометрическая оптика



Павел В. Зинин

Геометрическая оптика

В основе геометрической оптики лежат несколько простых эмпирических законов:

1. Закон прямолинейного распространения света
2. Закон независимого распространения лучей
3. Закон отражения света
4. Закон преломления света (Закон Снеллиуса)
5. Дисперсия света
6. Закон обратимости светового луча. Согласно ему, луч света, распространившийся по определённой траектории в одном направлении, повторит свой ход в точности при распространении и в обратном направлении.

Поскольку геометрическая оптика не учитывает волновой природы света, в ней действует постулат, согласно которому если в какой-то точке сходятся две (или большее количество) систем лучей, то освещённости, создаваемые ими, складываются. (Википедия 2020).

Лучевое распространение света

Термин «спектр» (в переводе с латыни spectrum означает изображение в душе) был введён Исааком Ньютоном в 1671—1672 годах для обозначения многоцветной световой полосы, которая была им получена в результате экспериментов по прохождению солнечного луча через стеклянную призму. В 1704 году он опубликовал свой труд «Оптика», в котором изложил результаты опытов с призмой – разложение белого света на отдельные спектральные компоненты.




Рис. 1. Классический опыт И. Ньютона по открытию дисперсии света (1672)

Сэр Исаак Ньютон (1642-1727) экспериментировал с лучом света, который проникал в тёмную комнату через щель в оконных ставнях. На пути луча света Ньютон поместил стеклянную призму и спроецировал изображение на экран. Он показал, что белый свет состоит из нескольких цветов. Фиолетовый свет преломляется призмой сильнее, а красный слабее. Радугу видели и до него, но он первый правильно описал явление.

Закон прямолинейного распространения света

В прозрачной однородной среде световые лучи являются прямыми линиями

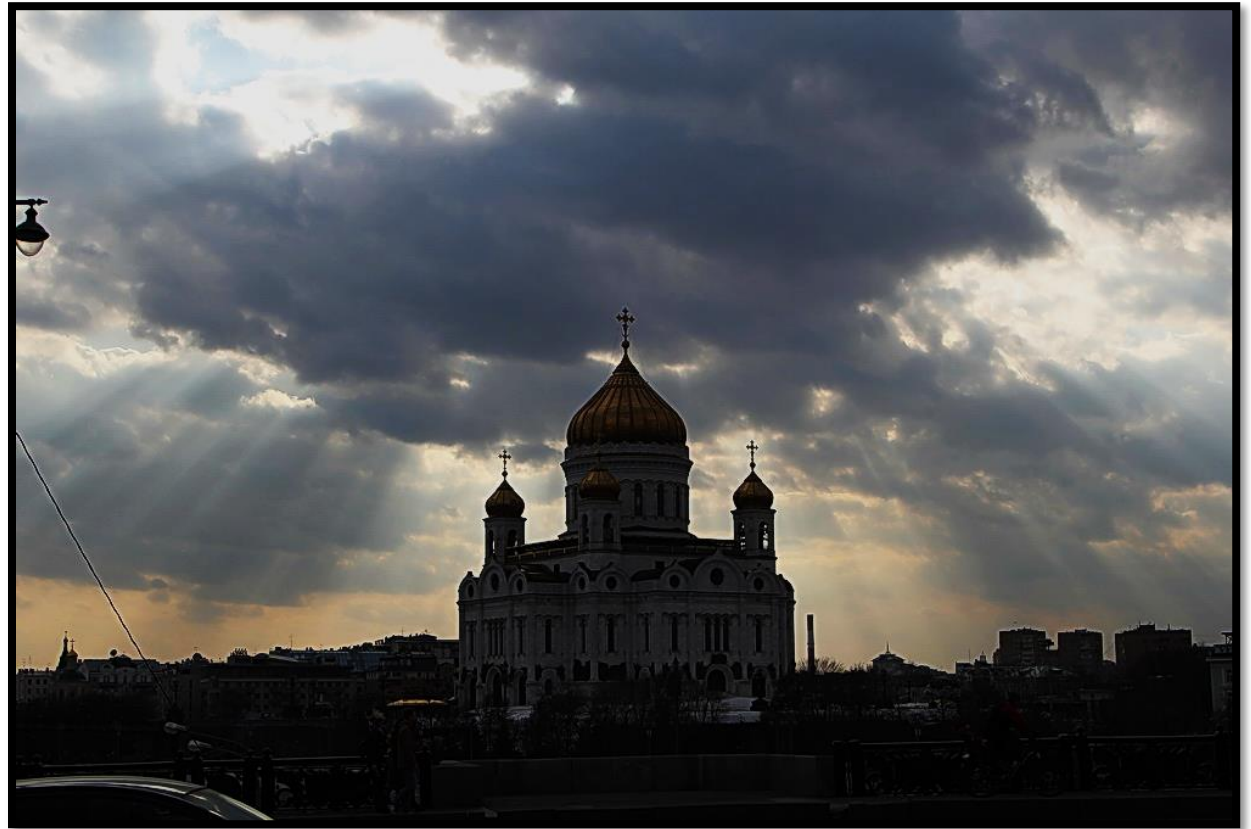


Принцип Ферма - постулат в геометрической оптике, согласно которому свет выбирает из множества путей между двумя точками тот путь, который потребует наименьшего времени. То есть луч света движется из начальной точки в конечную точку по пути, минимизирующему время.

Закон независимого распространения лучей

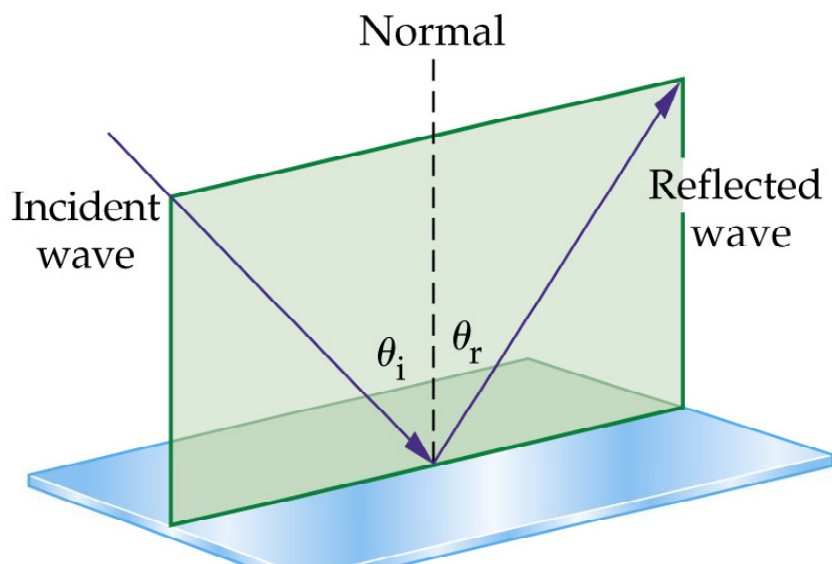
Закон независимого распространения лучей — второй закон геометрической оптики, который утверждает, что световые лучи распространяются независимо друг от друга. Так, например, при установке непрозрачного экрана на пути пучка световых лучей экранируется (исключается) из состава пучка некоторая его часть..

Или при пересечении световых лучей каждый из них продолжает распространяться в прежнем направлении.



Закон отражения света

Закон отражения света - устанавливает изменение направления хода светового луча в результате встречи с отражающей (зеркальной) поверхностью: падающий и отражённый лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения, и эта нормаль делит угол между лучами на две равные части. Широко распространённая, но менее точная формулировка «угол отражения равен углу падения» не указывает точное направление отражения луча. Тем не менее, выглядит это следующим образом:



$$\theta_i = \theta_r$$



Отражение и преломление

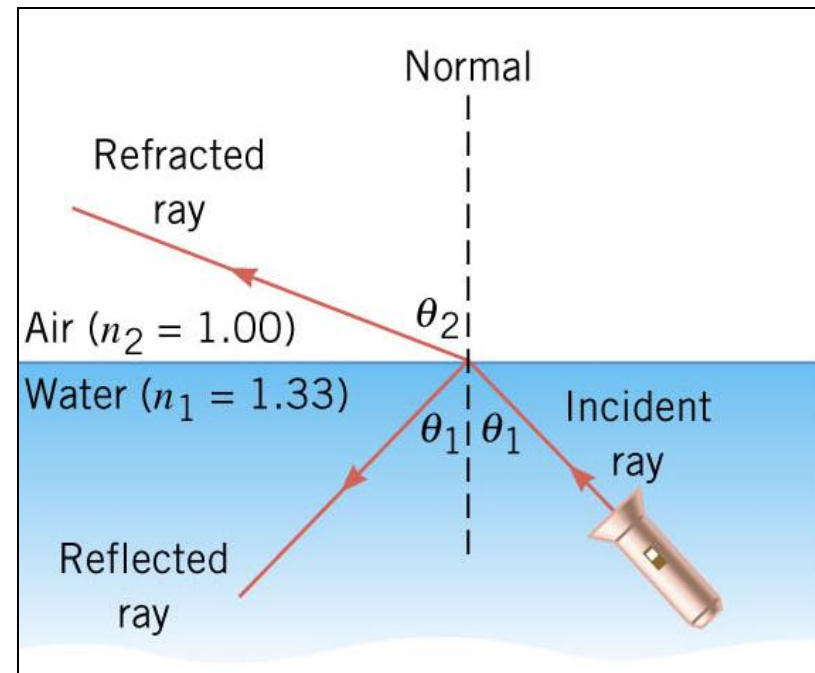
Закон Снеллиуса описывает преломление света на границе двух прозрачных сред. Также применим и для описания преломления волн другой природы, например, звуковых. Закон был открыт в 1621 году голландским математиком Виллебрордом Снеллиусом. Несколько позднее опубликован (и, возможно, независимо переоткрыт) Рене Декартом. Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Где: n_1 - показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела; θ_1 - угол падения света — угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности; n_2 - показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела; θ_2 - угол преломления света — угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности

Определение: Отношение скорости света в вакууме, c , к скорости v света в данном материале называется показателем преломления, n , этого материала

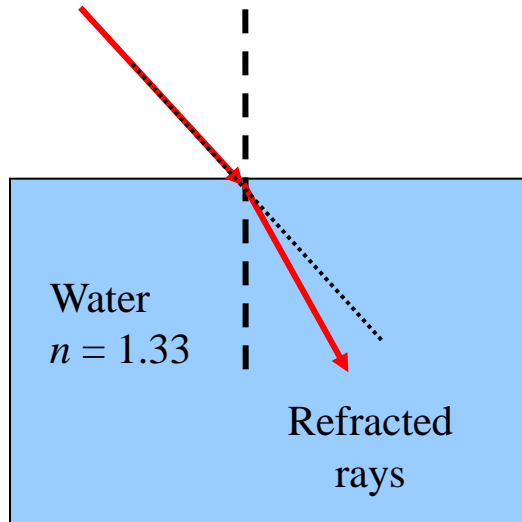
$$n = \frac{c}{v}$$



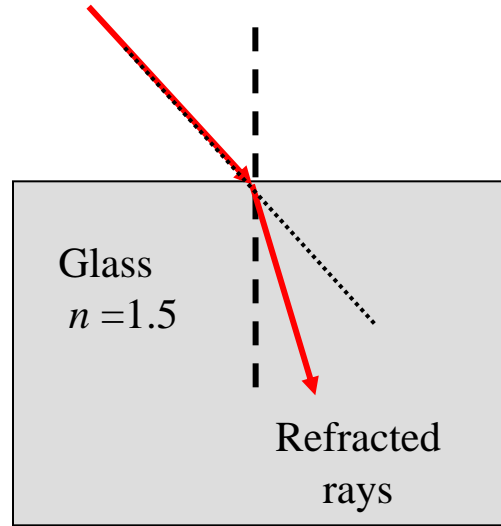
Преломление света на границе двух сред с различным показателем преломления.

Показатели преломления для различных сред

Incident ray



Incident ray



The refracted ray is bent more in the glass

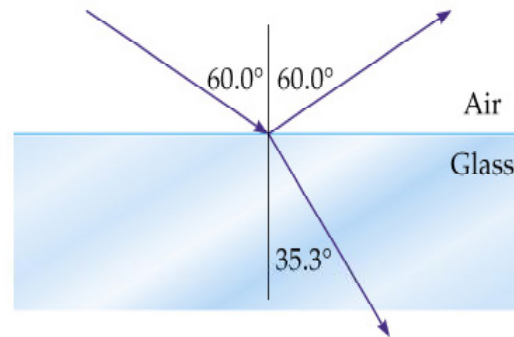
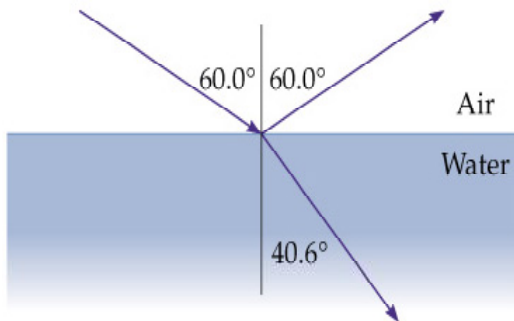
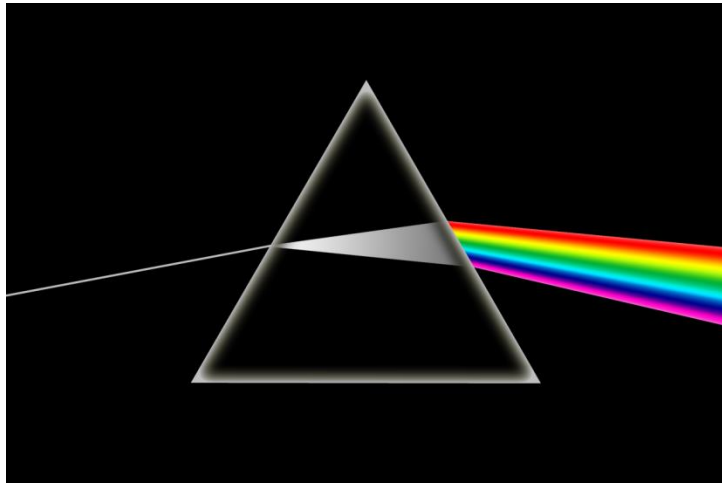


Table. Indices of Refraction

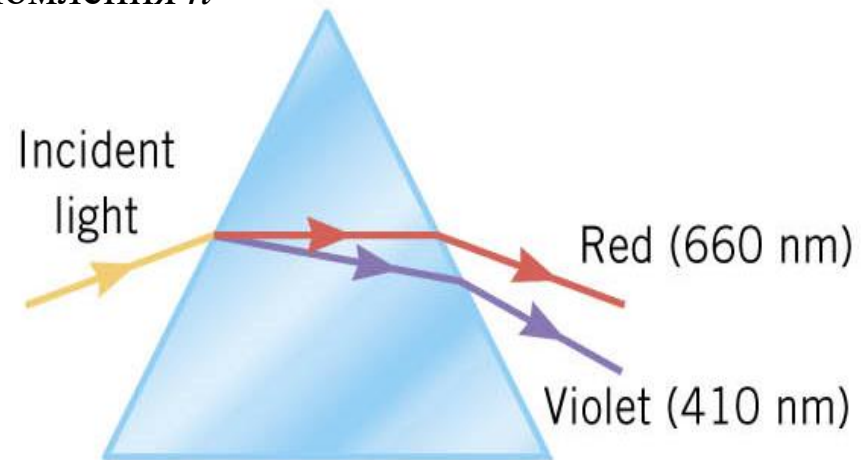
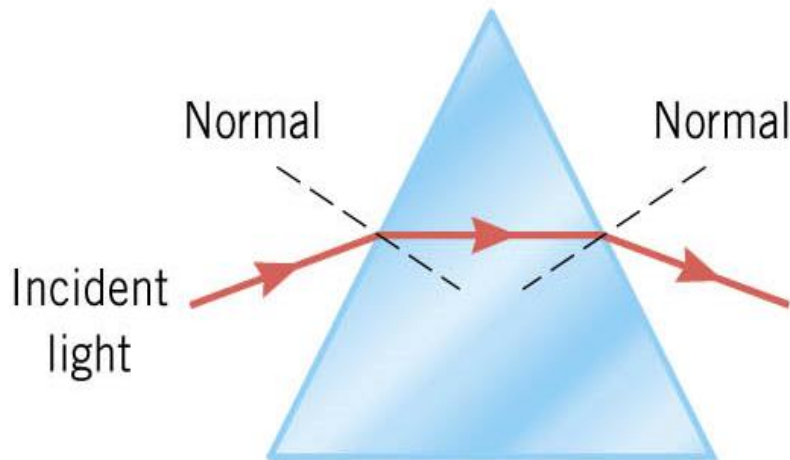
Medium	$n=c/v$
Vacuum	1.0000
Air	1.0003
Water	1.33
Ethyl alcohol	1.36
Glass	
Fused quartz	1.46
Grown glass	1.52
Light flint	1.58
Lucite or Plexiglas	1.52
Sodium chloride	1.53
Diamond	2.42
$\lambda = 589 \text{ nm}$	

Дисперсия света



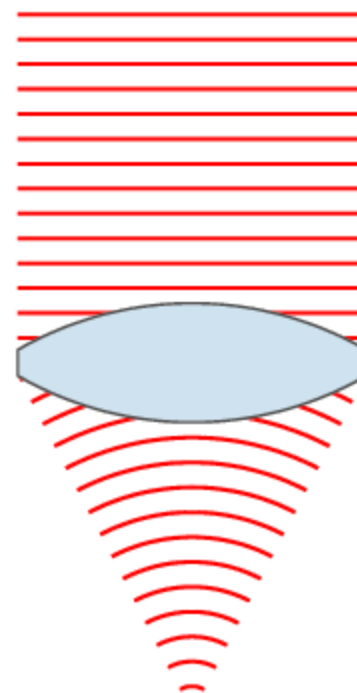
Дисперсия свет - зависимость преломления показателя n вещества от частоты ν (длины волны) света или зависимость фазовой скорости световых волн от их частоты. Следствие дисперсии света разложение в спектр пучка белого света при прохождении его сквозь призму. Изучение этого спектра привело И. Ньютона (1672) к открытию дисперсии света.

Glass prism



Тонкая линза

Линза – это прозрачное тело, ограниченное двумя, чаще всего, сферическими преломляющими поверхностями. Обычно линзы делают стеклянными. Линзы бывают собирающими и рассеивающими.



Самым древним артефактом линз является линза Нимруда, которой более трех тысяч лет и которая восходит к древней Ассирии. Дэвид Брюстер предположил, что его можно было использовать как увеличительное стекло или как горящее стекло, чтобы разжечь огонь, концентрируя солнечный свет. Ассирийские мастера делали замысловатые гравюры и могли использовать такую линзу в своей работе. Ещё одно раннее упоминание об увеличении относится к древнеегипетским иероглифам 8 века до нашей эры, которые изображают "простые стеклянные менисковые линзы". (Wikipedia, 2010)

Тонкая линза



Not proper focusing



Proper focusing

Thin Lenses; Ray Tracing

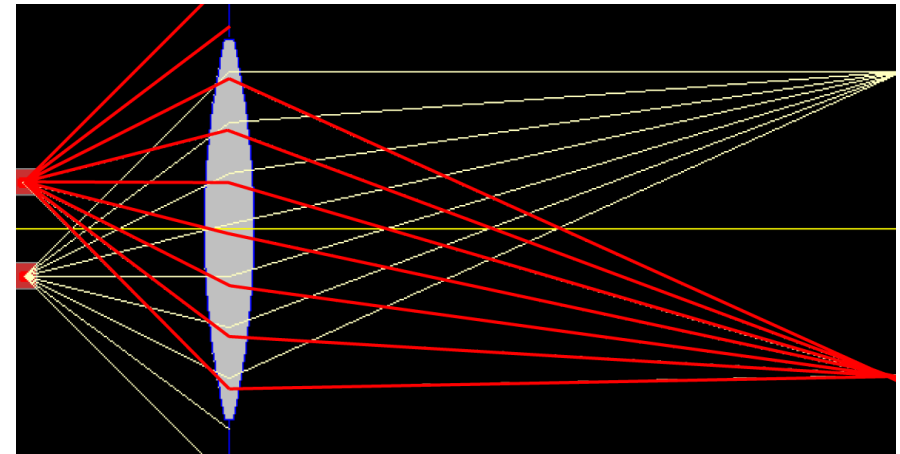
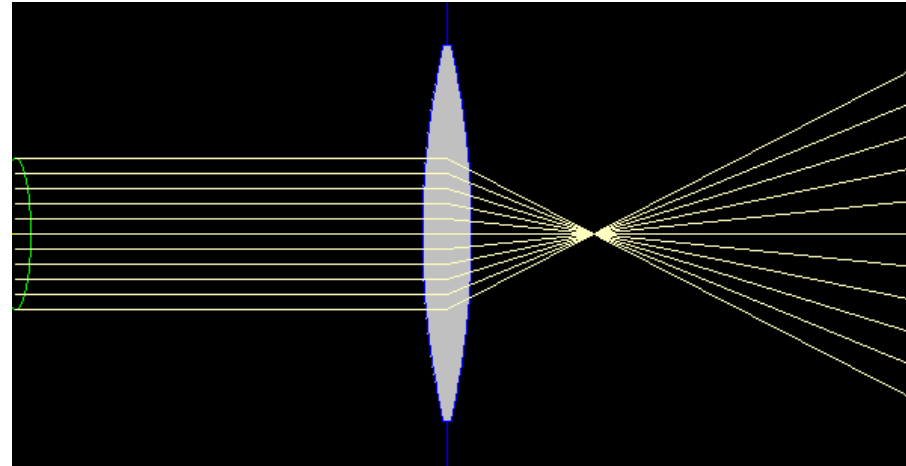
Линза - это любой элемент, который фокусирует свет для формирования изображений (“The Encyclopedia of Physics”, VNR, 1985).

Фокальная точка это точка, в которой параллельные световые лучи от бесконечно далёкого объекта сходятся после прохождения через линзу. Плоскость, перпендикулярная оптической оси, на которой находится эта точка, называется **фокальной** плоскостью.

Оптическая сила — величина, характеризующая преломляющую способность осесимметричных линз и центрированных оптических систем из таких линз. Измеряется в диоптриях (обозначение: **дптр**): $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

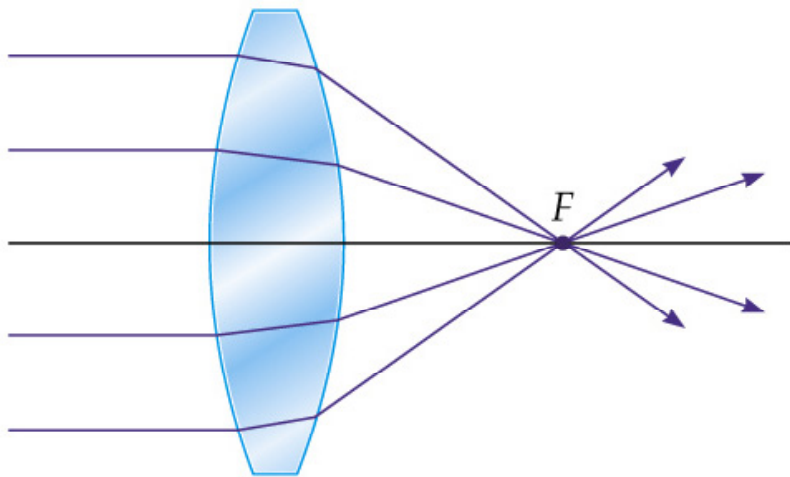
Диоптрия не входит в Международную систему единиц (СИ) и считается внесистемной единицей.

$$P = \frac{n}{f}$$

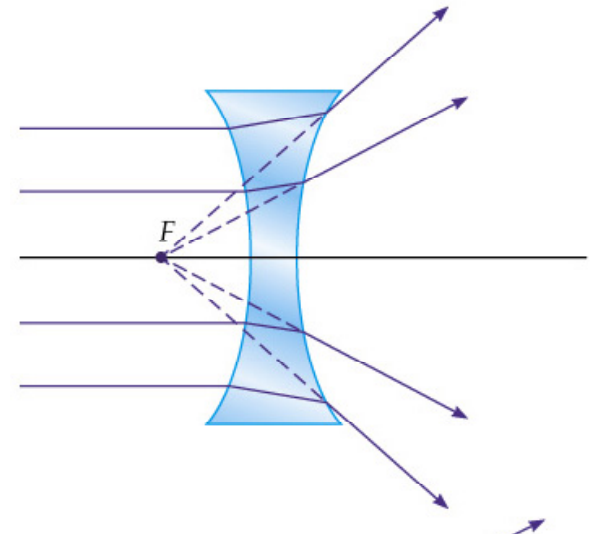


Тонкая линза. Фокусное расстояние

Расстояние от оптического центра до фокуса называется *фокусным расстоянием* линзы.

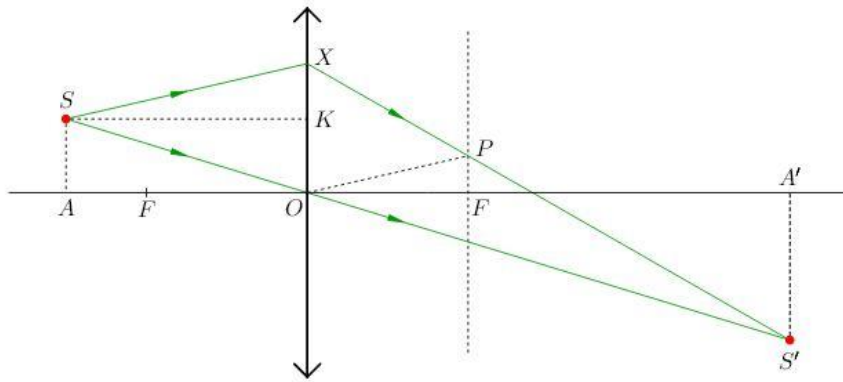


Собирающая линза в средней части толще и отклоняет лучи к оптической оси, если показатель преломления линзы больше показателя преломления среды,



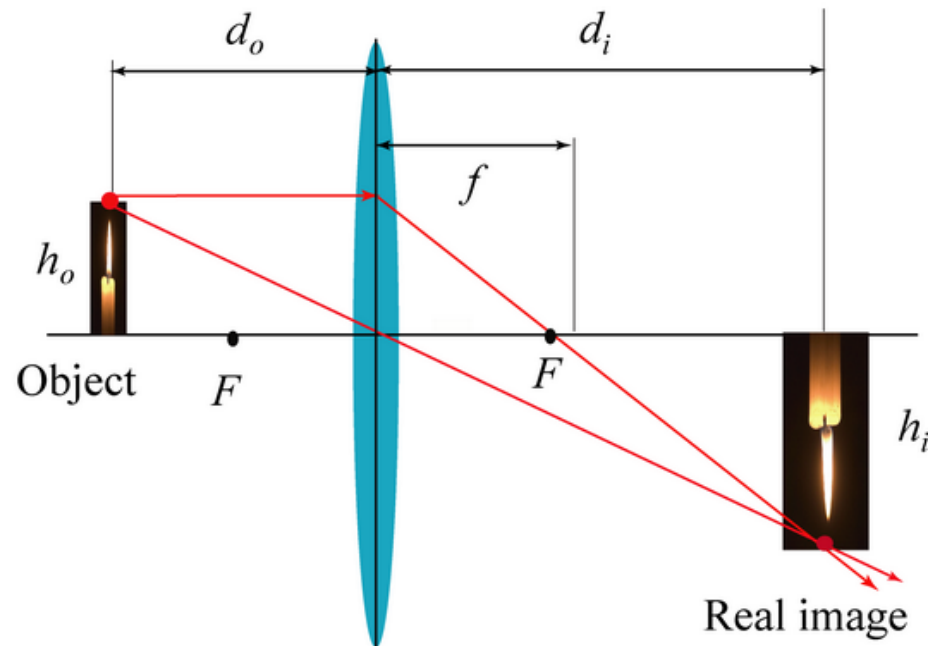
Рассеивающая линза: Рассеивающая линза в средней части тоньше и отклоняет лучи от оптической оси.

Теорема об изображении



Теорема об изображении. Если перед линзой находится светящаяся точка, то после преломления в линзе все лучи (или их продолжения) пересекаются в одной точке.

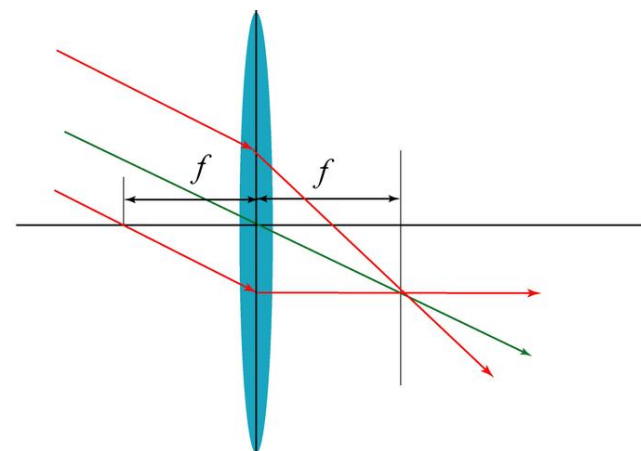
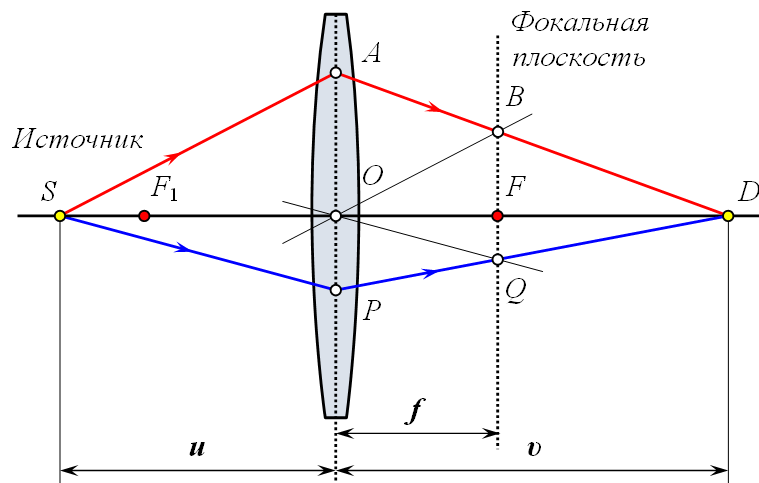
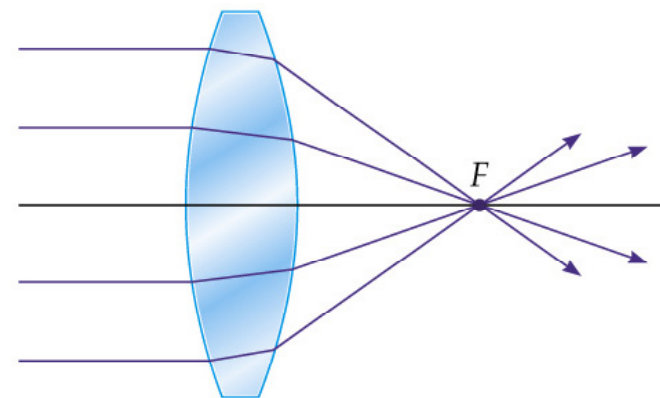
Линза является *тонкой*, если толщина линзы много меньше радиусов кривизны её сферических границ и расстояния от линзы до предмета.



Ход основных лучей в тонкой линзе

Линза, для которой толщина принята равной нулю, в оптике называется «тонкой»..

1. Лучи, проходящие через центр линзы не меняют своего направления
2. Лучи, параллельные оптической оси проходят через фокус
3. Параллельные лучи сходятся в точке на фокальной плоскости



Фокусировка параллельных наклонных лучей тонкой линзой

Расширитель пучка: (а) схема Галилея и (б) схема Кеплера

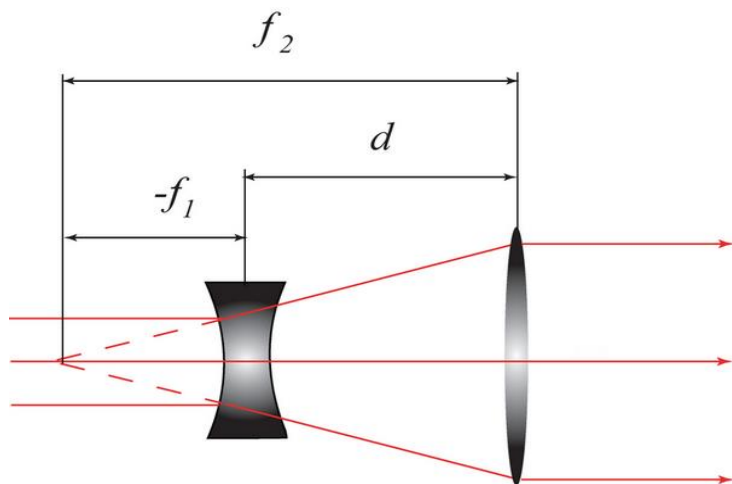


схема Галилея

В телескопической системе по схеме Галилея в качестве объектива используется положительная оптическая система, а в качестве окуляра — отрицательная. Задний фокус положительного объектива совпадает с передним фокусом отрицательного окуляра. При таком расположении промежуточное изображение отсутствует. Система Галилея также применяется для систем сумеречного и ночного наблюдения и в видеоискателях фотоаппаратов и видеокамер.

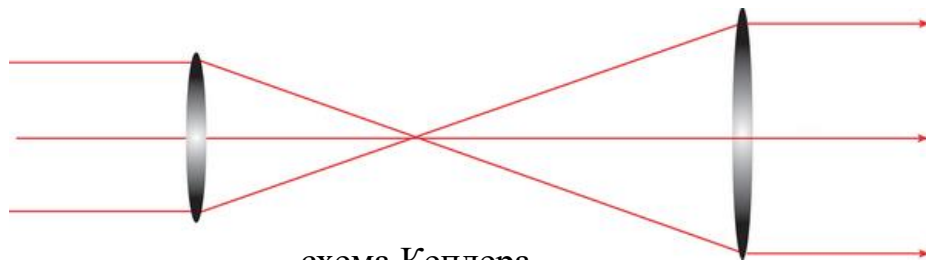
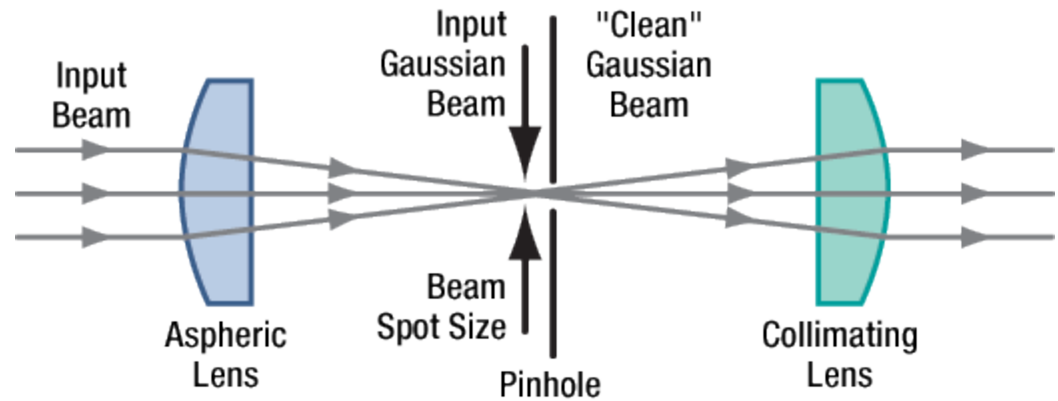
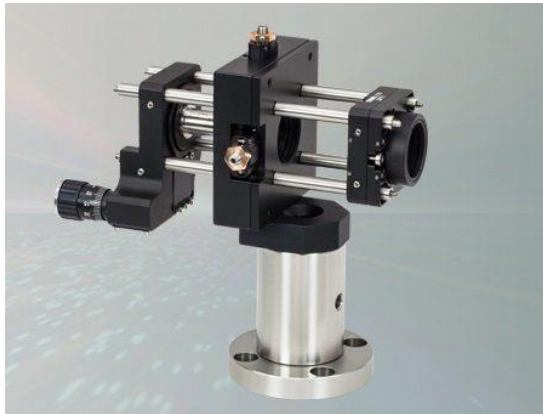


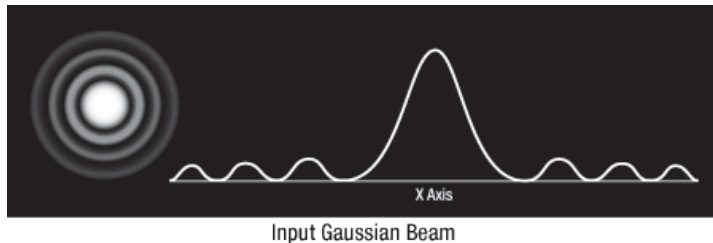
схема Кеплера

В схеме Кеплера объективом и окуляром является положительная оптическая система. Объектив создаёт перевёрнутое действительное изображение в своей задней фокальной плоскости, которое можно наблюдать с помощью окуляра. Задняя фокальная плоскость объектива совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра, так что падающий на объектив параллельный пучок лучей выходит из окуляра также параллельным.

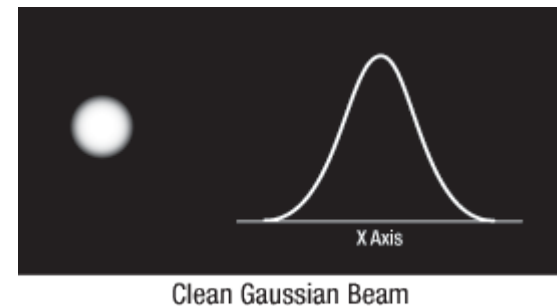
Пространственный фильтр



Во многих приложениях, где используются лазерные технологии, неизбежными являются пространственные искажения лазерного пучка, которые оказывают непосредственное влияние на результат эксперимента. Во избежание подобных неточностей используют системы пространственной фильтрации – например, системы, с помощью которых можно получить чистый Гауссов пучок.



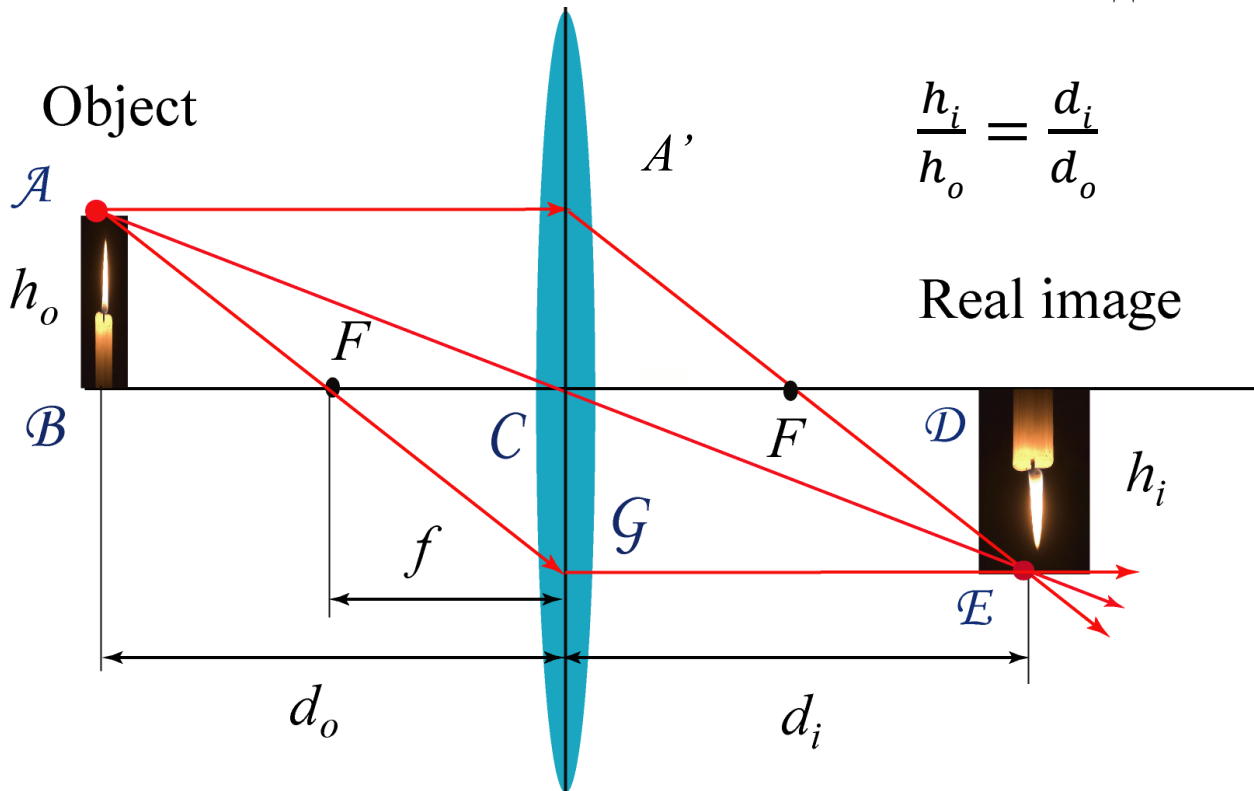
Входной Гауссов пучок



Чистый Гауссов пучок

Увеличение тонкой линзы

1. $\triangle ADC$ и $\triangle CDE$ подобны 2. $\triangle A'CF$ и $\triangle FDE$ подобны



$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o}$$

$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i - f}{f}$$

$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{d_i - f}{f}$$

Уравнение тонкой линзы

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$$

Линейное увеличение m определяется как отношение размера изображения к h_i к размеру объекта h_o :

Увеличение тонкой линзы

Если объект находится между фокусной точкой и объективом, то сила увеличения равна

$$m = -\frac{d_i}{d_o}$$

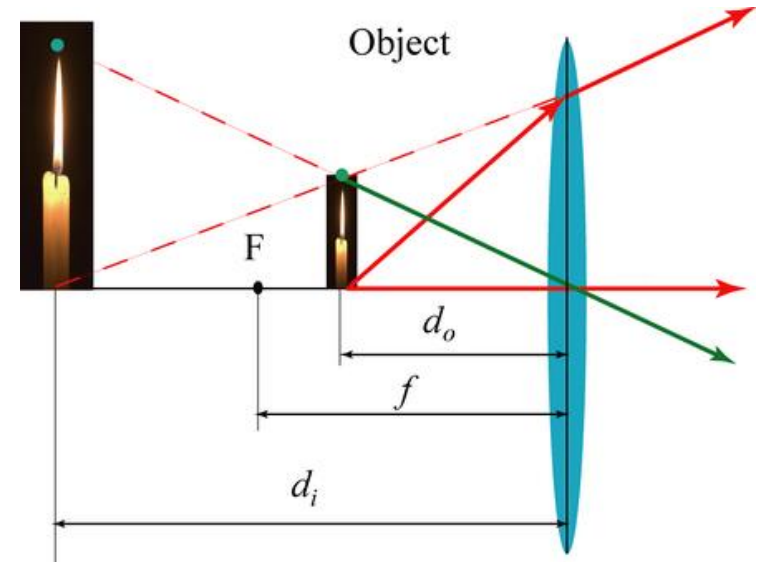
Изображение виртуальное. Используя формулу тонкой линзы получим

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \longrightarrow m = \frac{f}{f - d_o}$$

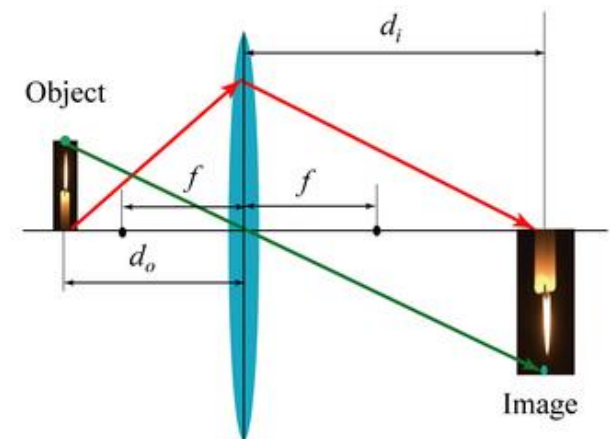
Если объект помещён за фокусом

Изображение реальное и перевёрнутое.
Увеличение описывается формулой

$$m = \frac{f}{f - d_o}$$



Объект должен быть помещён снаружи и вблизи фокуса.



Увеличение линзы

Вы видели 1000-кратное увеличительное стекло? Что в этом плохого.

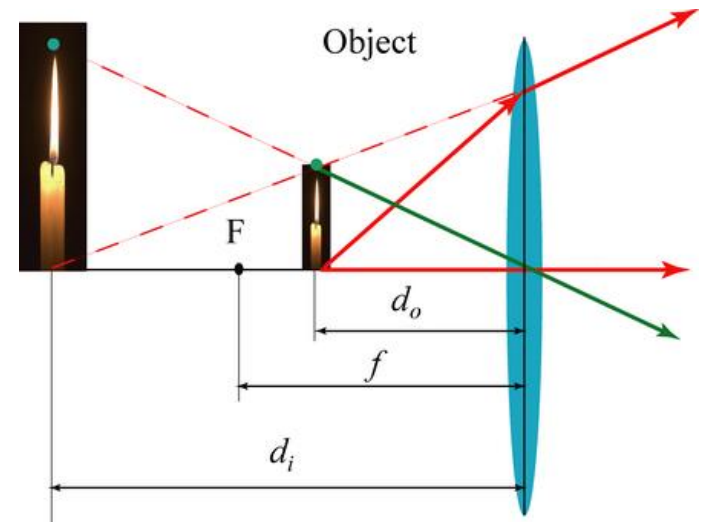
Сделаем $f - d_o$ малым $m = \frac{f}{f - d_o}$

$$d_o \rightarrow f \Rightarrow m = \frac{f}{f - d_o} \rightarrow \infty$$

Изображение больше, но оно далеко. Не помогает увидеть больше деталей. Обычно $d_i = 25$ см для удобства просмотра

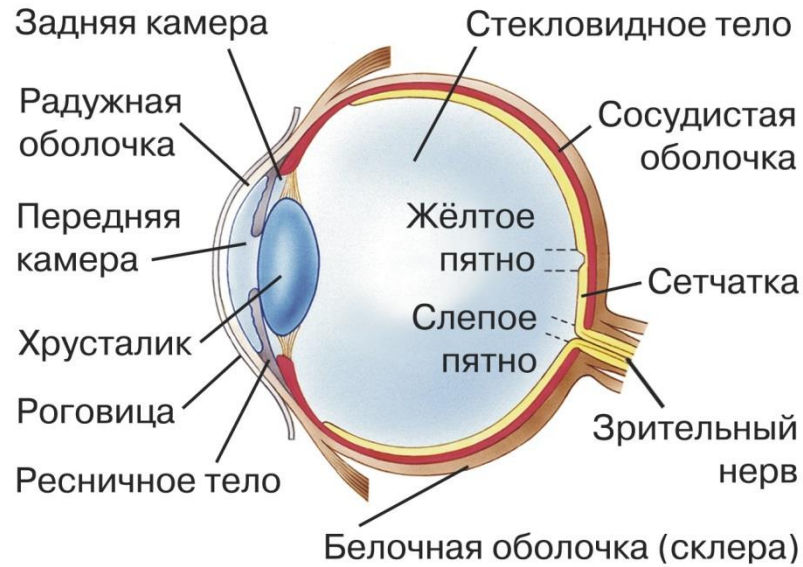
Может лучше взять линзы с малым фокусным расстоянием f ?

Объект должен располагаться за фокусом f !

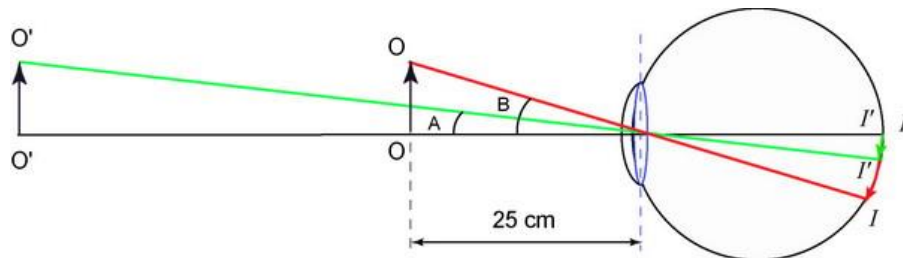


$$m = -\frac{d_i}{d_o} = \frac{25\text{cm}}{f}$$

Глаз как оптическая система

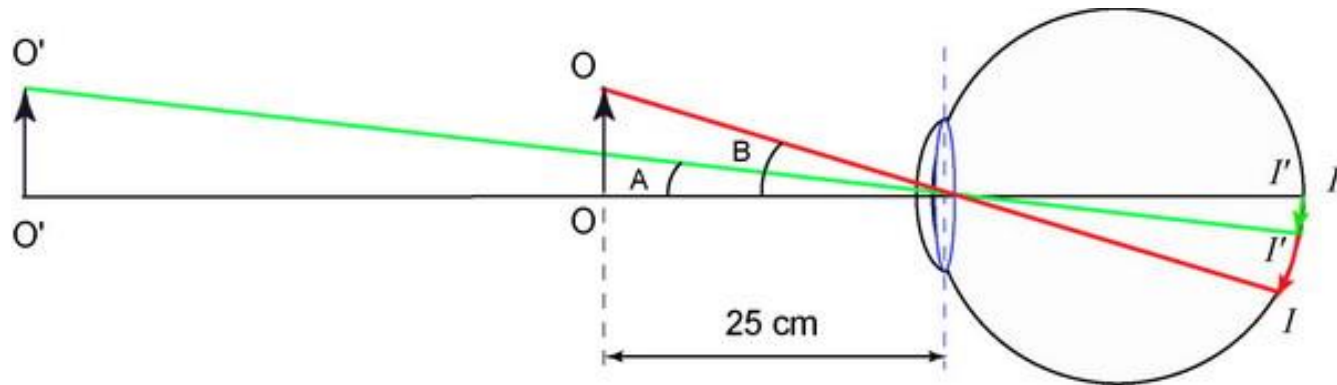


Человеческий глаз состоит из линзы переменной геометрии (хрусталик), которая производит реальное изображение на “экране” (сетчатке), который передаётся в мозг через зрительный нерв. Радужная оболочка - кольцо с радиальными мышцами. Зрачок - отверстие в радужной оболочке глаза, через которое в глаз проникают световые лучи. За регулирование размеров зрачка отвечает автономная нервная система.



Хрусталик автоматически настраивается таким образом, что мы хорошо видим любой объект, расположенный между бесконечностью и расстоянием, называемым “ближней точкой” (около 25 см для типичного 20-летнего человека). “Расстояние изображения” - это диаметр глаза ~2 см.

Глаз как оптическая система

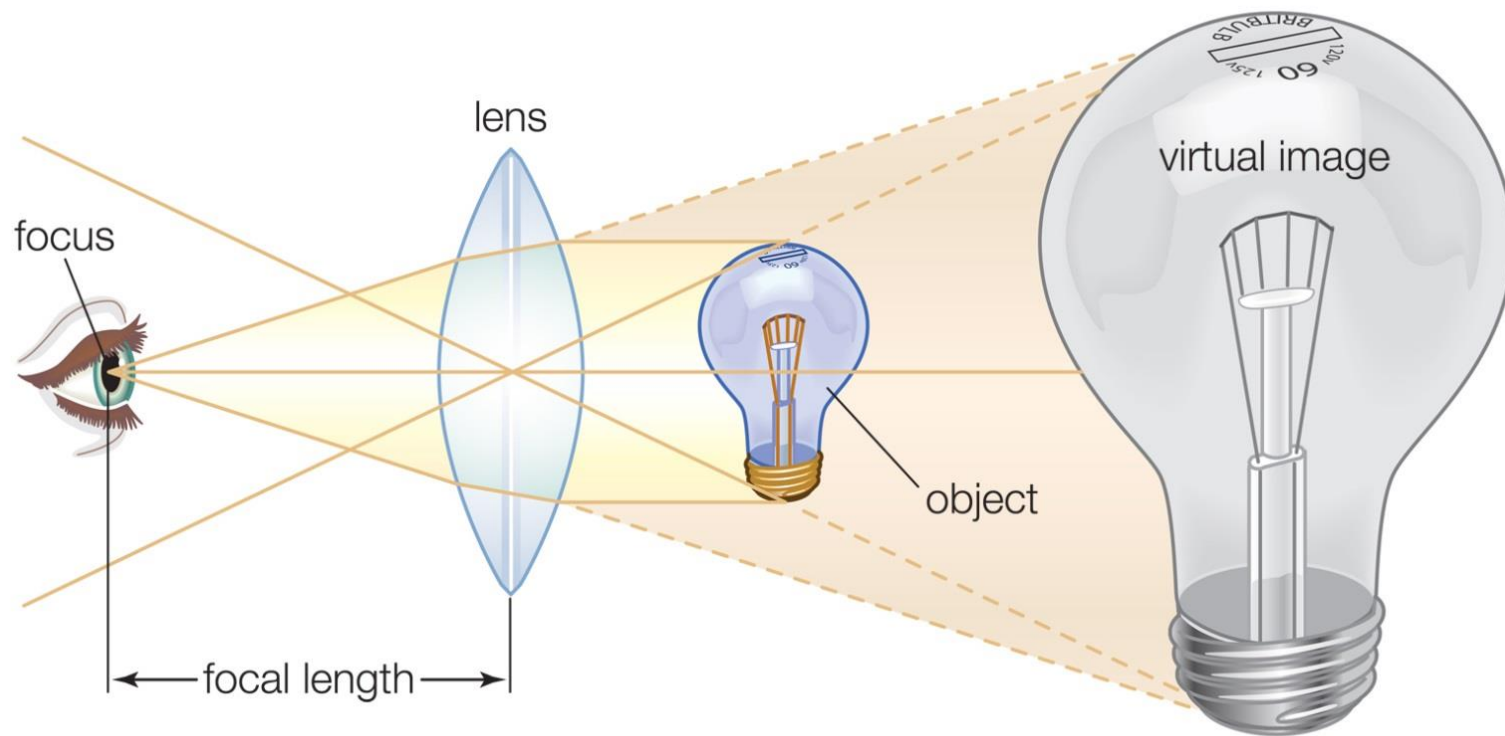


Наименьшее расстояние, на котором глаз может ясно видеть предметы без напряжения, называют расстоянием наилучшего зрения. Принято считать, что для людей с нормальным зрением $L = 25$ см. Именно на таком расстоянии от глаз человек держит книгу при чтении. Зрительный угол на расстоянии наилучшего (отчётливого) зрения (25 см), является углом B ; если он превышает примерно 1 минуту дуги, то ретинальное изображение $I - I'$ покажет эти точки как отдельные. Если одни и те же точки находятся на большем расстоянии ($O - O'$), то угол обзора A составляет менее одной минуты дуги и точки не воспринимаются как отдельные.

Максимальное увеличение глаза: $d_i(\text{eye}) = 2$ см, диаметр, $d_o = N = 25$ см.

$$m = \frac{d_i}{d_o} = \frac{2}{25} = 0.08$$

Увеличительное стекло



Увеличительное стекло

Угловое увеличение

Если расстояние между объектом и линзой равно f , а изображение находится от глаза в точке наилучшего зрения, $N = 25$ см, то расстояние объекта, соответствующее этому расстоянию изображения, может быть вычислено

$$\alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h'}{25 \text{ см}}$$

$$\beta = \operatorname{tg} \beta = \frac{h}{f}$$

$$m_{\theta} = \frac{\beta}{\alpha}$$

$$m_{\theta} = \frac{25 \text{ см}}{f}$$

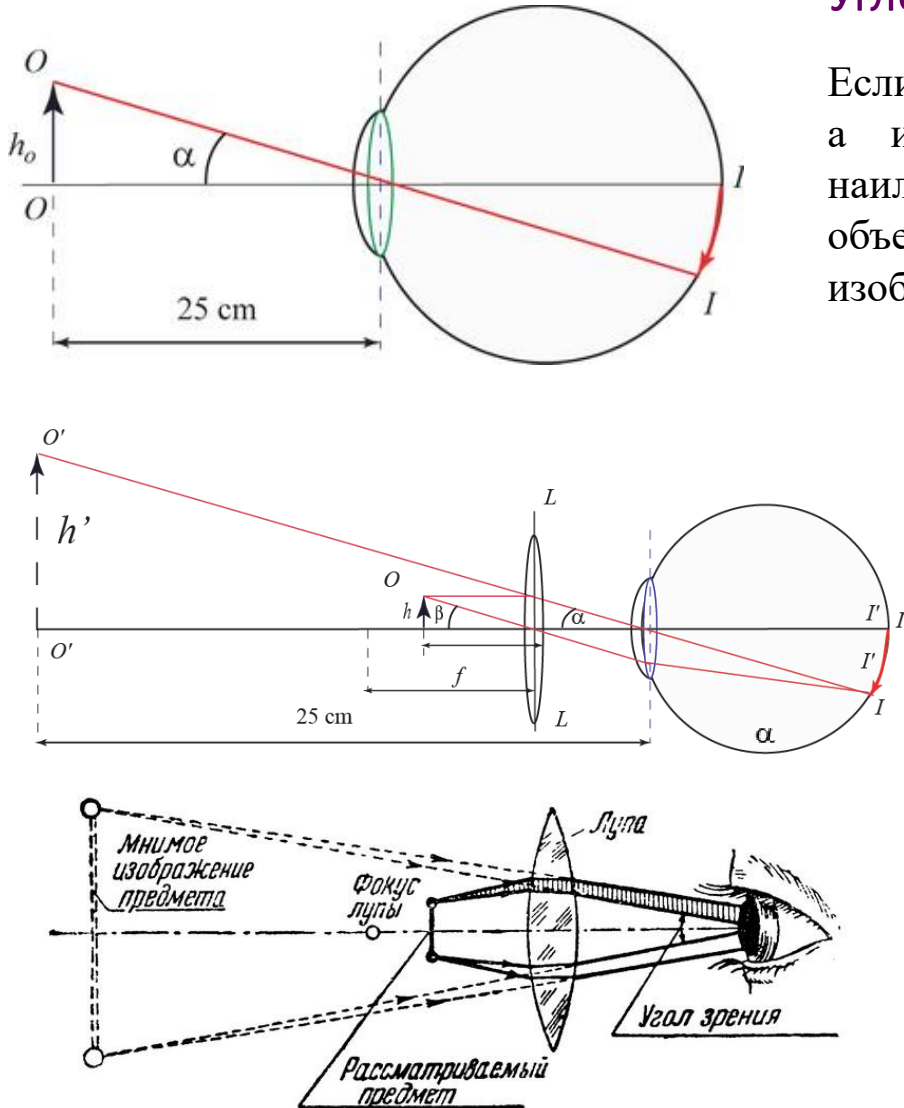


Рис. 12. Ход лучей в лупе.

Первые микроскопы

Антони ван Левенгук родился в семье мастера-корзинщика Филиппа Тонисзона (*Philips Thoniszoon*). Левенгук прочёл труд английского естествоиспытателя Роберта Гука «Микрография» вскоре после его публикации в 1665 году, что вызвало интерес к изучению окружающей природы с помощью линз. Освоив ремесло шлифовальщика, стал очень искусным и успешным изготовителем линз. Линзы, которые он изготавливал, были неудобны и малы, для работы с ними нужен был определённый навык, однако с их помощью был сделан ряд важнейших открытий. Всего за свою жизнь он изготовил более 500 линз и как минимум 25 микроскопов, 9 из которых дошли до наших дней.

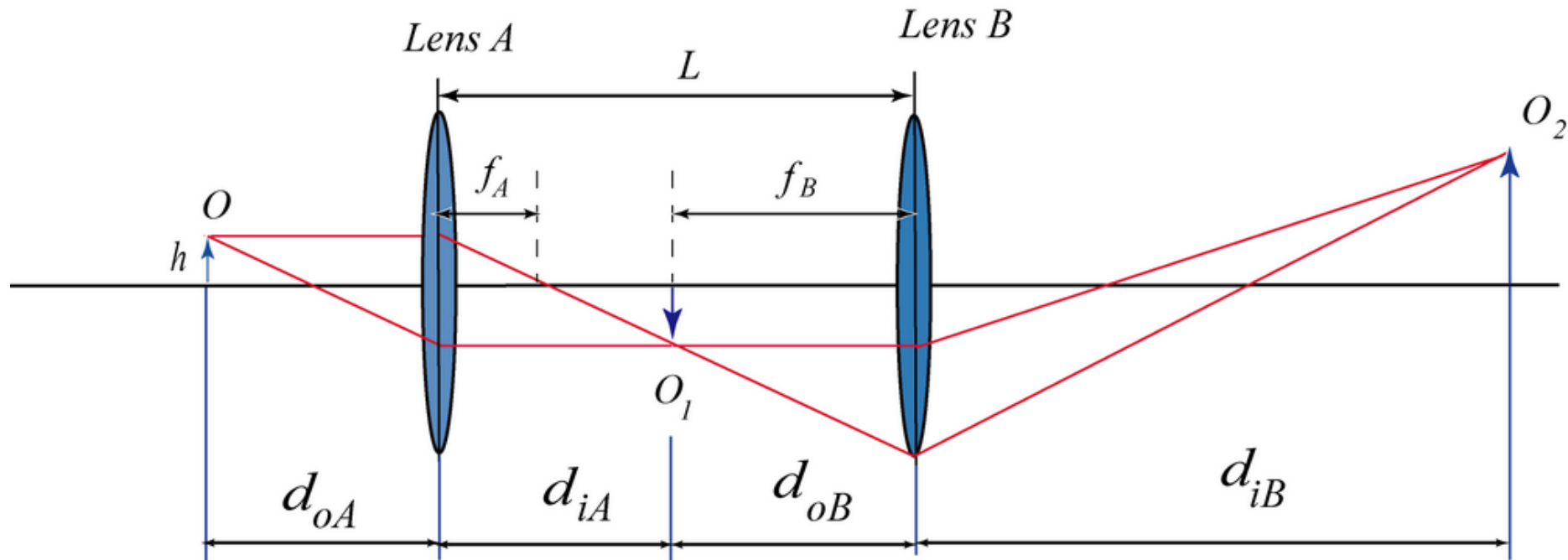
Наблюдаемые объекты зарисовывал, а наблюдения описывал в письмах (общим количеством около 300), которые на протяжении более чем 50 лет отсылал в Лондонское королевское общество, а также некоторым учёным. В 1673 году его письмо впервые было опубликовано в журнале Лондонского королевского общества «Философские записки». Однако в 1676 году достоверность его исследований была поставлена под сомнение, когда он отослал копию своих наблюдений одноклеточных организмов, о существовании которых до этого времени ничего не было известно. Несмотря на репутацию исследователя, заслуживающего доверия, его наблюдения были встречены с некоторым скептицизмом. Чтобы проверить их достоверность, в Делфт отправилась группа учёных во главе с Неемией Грю, который подтвердил подлинность всех исследований. В числе прочего, первым открыл эритроциты, описал бактерии, дрожжи, простейших, волокна хрусталика, чешуйки эпидермиса кожи, зарисовал сперматозоиды, строение глаз насекомых и мышечных волокон, нашёл и описал ряд коловраток, почкование гидр, открыл инфузории и описал многие их формы (Википедия, 2020).



Микроскоп Левенгука XVII века с увеличением до 300х

Составной микроскоп

В комбинациях линз изображение, сформированное первой линзой, становится объектом для второй линзы (в этом случае расстояния между объектами могут быть отрицательными).



Linear *magnification* of two lenses

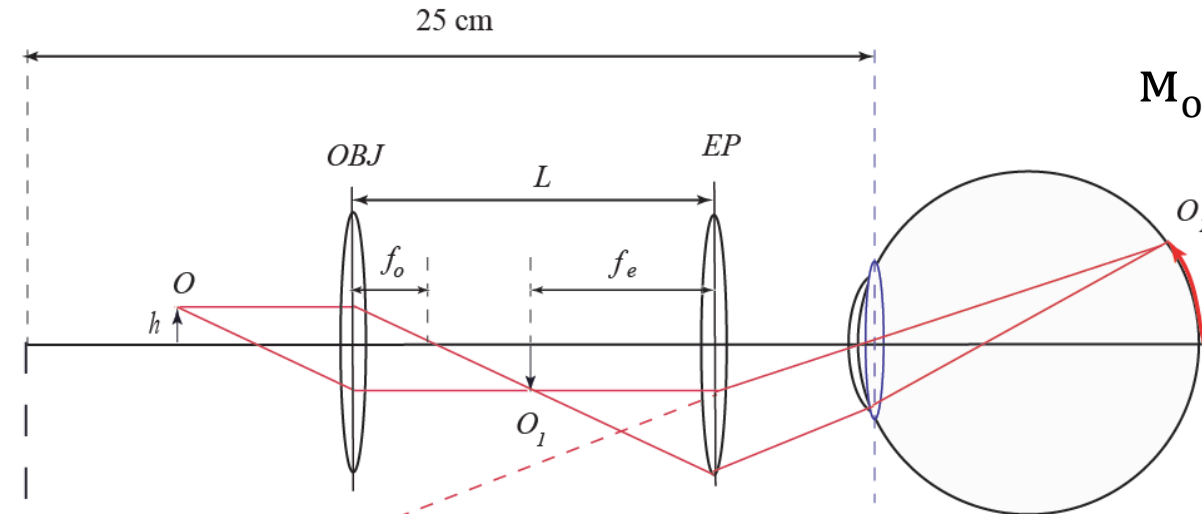
$$m = m_A \times m_B = \frac{d_{iA} \times d_{iB}}{d_{oA} \times d_{oB}}$$

Две линзы и составной микроскоп

В комбинациях линз изображение, сформированное первой линзой, становится объектом для второй линзы (именно здесь расстояния между объектами могут быть отрицательными). Изображение объекта объективом (*OBJ*) с фокусным расстоянием f_o попадает в фокус окуляра (*EP*), тогда увеличение даваемое объективом равно

$$M_o = \frac{d_i}{d_o} = \frac{L - f_e}{d_o} \approx \frac{L}{d_o}$$

предположим, что изображение формируется из бесконечности и $N=25$ см для нормального глаза



$$M_e = \frac{N}{f_e}$$

$$M = m_o \cdot m_e = \frac{L \cdot N}{d_o \cdot f_e} \approx \frac{L \cdot N}{f_o \cdot f_e} = \frac{25 \text{ cm} \cdot L}{f_o \cdot f_e}$$

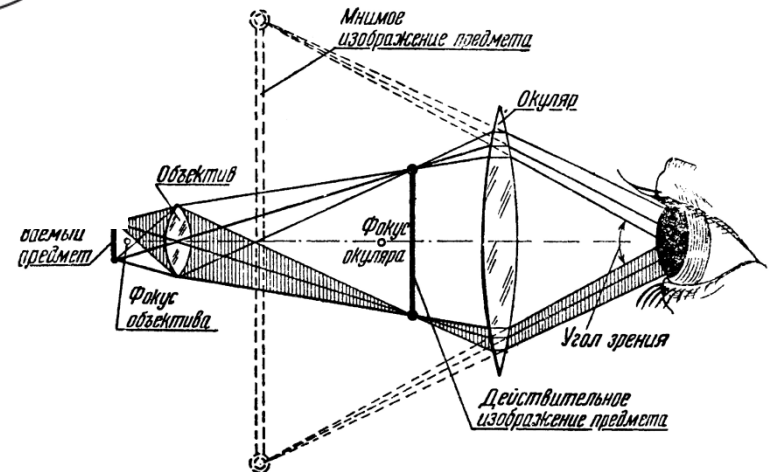
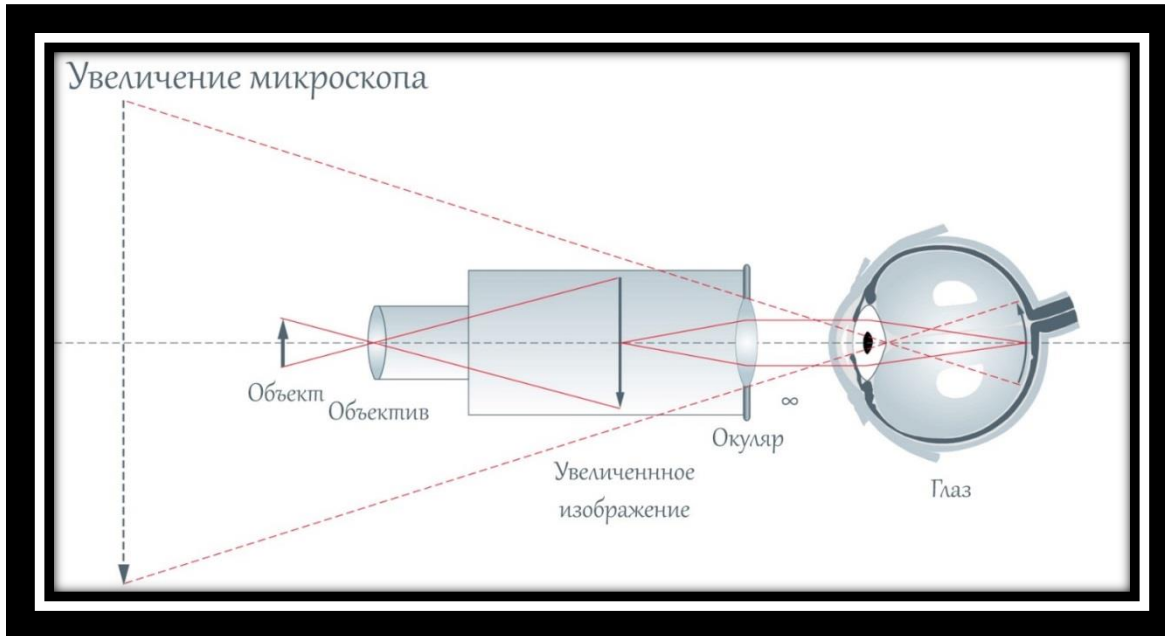


Рис. 13. Ход лучей в микроскопе.

Составной микроскоп



Linear *magnification* of two lenses

$$m = m_A \times m_B = \frac{d_{iA} \times d_{iB}}{d_{oA} \times d_{oB}}$$

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.

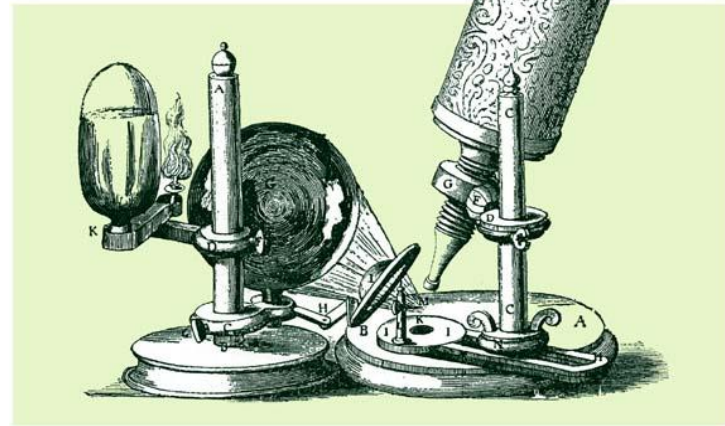


Первый микроскоп создал нидерландский мастер по изготовлению очков Захарий Янссен. Это была обычная трубка с двумя линзами на концах. Настройку изображения выполняли, выдвигая трубку (тубус). Этот простой микроскоп стал основой для создания более сложных приборов. Увеличение $\times 3-10$.

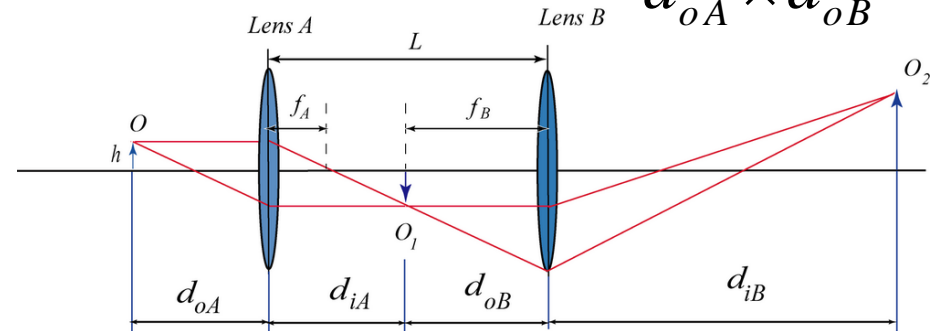
Составные Микроскопы



Robert Hooke's Microscope
(1665)



$$m = m_A \times m_B = \frac{d_{iA} \times d_{iB}}{d_{oA} \times d_{oB}}$$



1. окулярная линза или окуляр
2. объективная револьверная головка
3. линза объектива
4. ручка грубой регулировки
5. ручка тонкой регулировки
6. держатель объекта или сцена
7. зеркало или свет (осветитель)
8. диафрагма и конденсатор

Первые микроскопы



1021 - Самое раннее свидетельство того, что увеличительное стекло создает увеличенное изображение, восходит к книге оптики, опубликованной Ибн аль-Хайтамом (Альхазеном) в 1021 году. После того как книга была переведена на латынь, Роджер Бэкон описал свойства увеличительного стекла в Англии XIII века. Затем последовало развитие очков в Италии в XIII веке.

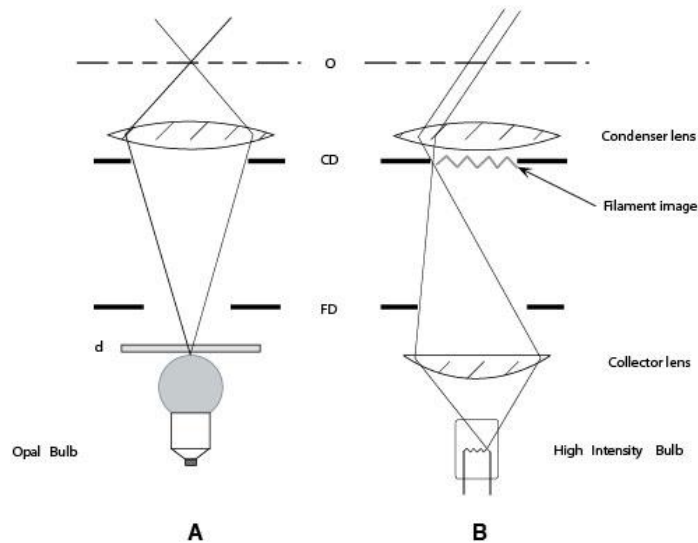
1590-голландские изготовители стекол, Ганс Янссен и его сын Захария Янссен. Им приписывают изобретение первого составного микроскопа в 1590 году, но это было заявлено Захарией Янссеном в середине 1600-х гг. Еще одним фаворитом на звание "изобретателя микроскопа" был Галилей.

•**1665**-Роберт Гук (1635-1703) навеки вошел в историю науки, не только как создатель собственного оригинального микроскопа, но и как человек, сделавший при его помощи великое научное открытие. Именно он первым увидел через микроскоп органическую клетку, и предположил, что все живые организмы состоят из клеток, этих мельчайших единиц живой материи. Результаты своих наблюдений Роберт Гук опубликовал в своем фундаментальном труде – Микрографии.

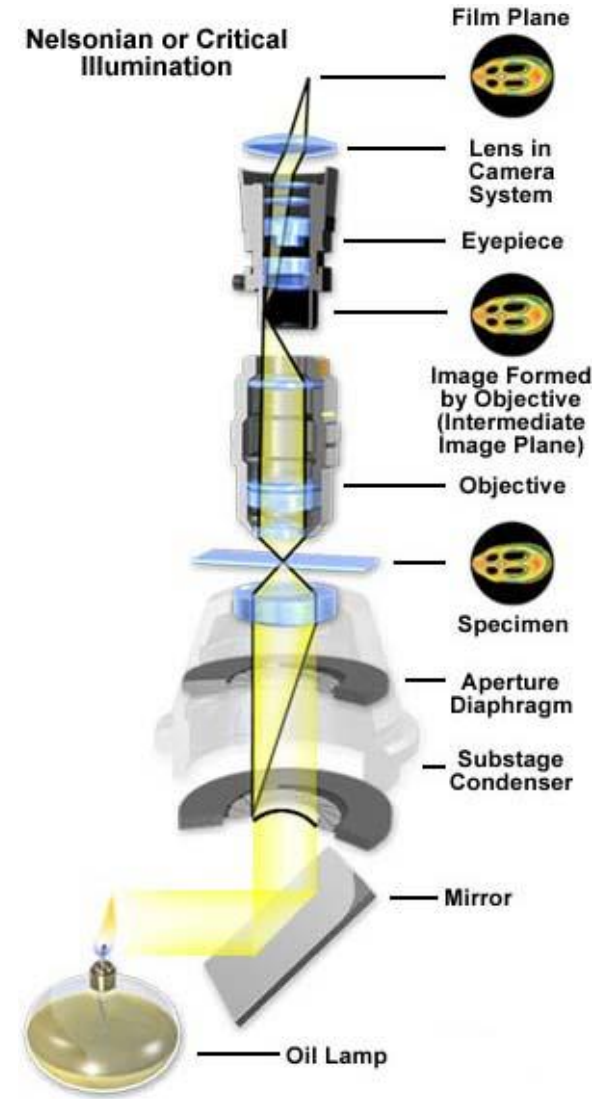


Русский изобретатель И.П. Кулибин построил свой первый микроскоп, не имея никаких знаний о том, как это делали за границей. Он создал производство стекла для линз, придумал приспособления для их шлифовки. Великий русский учёный Михаил Васильевич Ломоносов первым из русских учёных стал использовать микроскоп в своих научных исследованиях.

Освещение в оптической микроскопии



Этот метод освещения микроскопа был впервые разработан британским микроскопистом Эдвардом Нельсоном с использованием оптических принципов, выдвинутых Эрнстом Аббе. Нельсоновское освещение очень успешно использовалось микроскопистами со второй половины XIX века до начала XX века.



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

Дальнейшее развитие оптической микроскопии

Келлеровское освещение - это метод освещения образца, используемый для оптической микроскопии в проходящем и отражённом свете (транс- и эпистошении). Освещение по Келлеру действует для создания равномерного освещения образца и гарантирует, что изображение источника освещения (например, нити накала галогенной лампы) не будет видно на полученном изображении. Келлеровское освещение - преобладающий метод освещения образцов в современной научной световой микроскопии. Это требует дополнительных оптических элементов, которые более дороги и могут отсутствовать в более простых световых микроскопах.

Принципы метода: 1. Линза, находящаяся впереди источника света, формирует изображение источника света не в плоскости препарата.

•2. Вторая линза (конденсор) переносит изображение поверхности первой линзы на исследуемый образец. Она имеет минимальное фокусное расстояние, чем достигается максимальный раствор конуса света, падающего на образец.

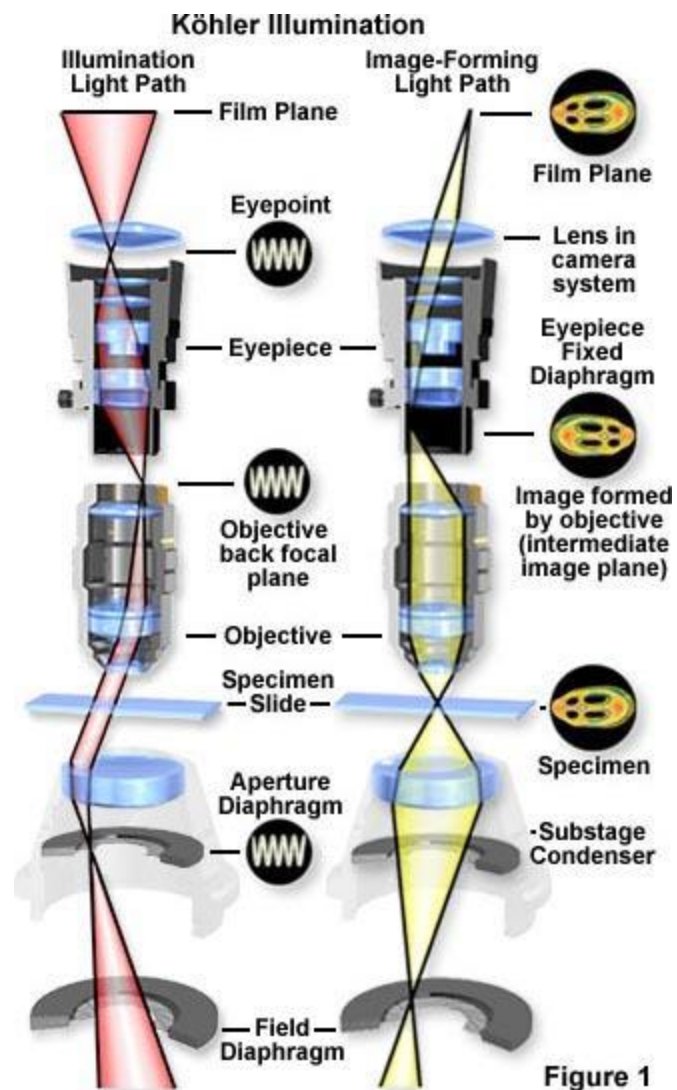
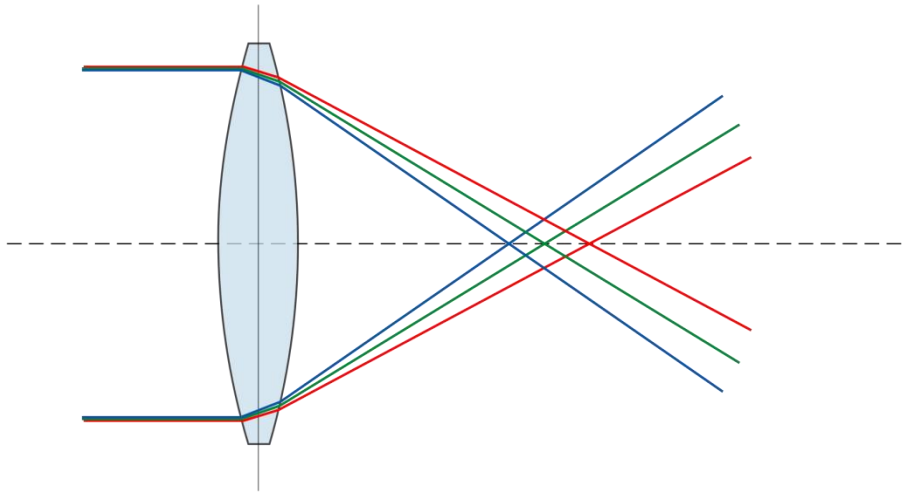


Figure 1

Аберрации оптической системы

Аберрации оптической системы — ошибка или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе. Аберрацию характеризуют различного вида нарушения гомоцентричности в структуре пучков лучей, выходящих из оптической системы. Простые микроскопы могли достигать разрешения около 2 микрон, в то время как лучшие составные микроскопы были ограничены примерно 5 микронами из-за хроматической аберрации

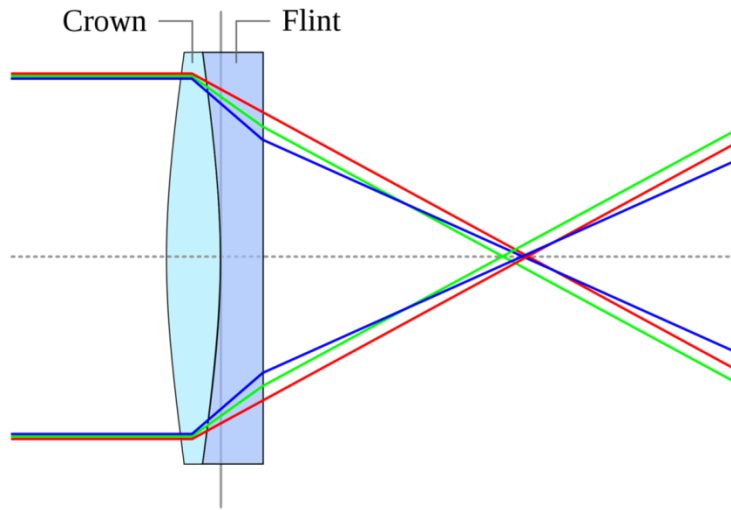


Хроматическая аберрация

Такие погрешности изображений присущи всякой реальной оптической системе, и принципиально неустранимы. Их возникновение объясняется тем, что преломляющие поверхности неспособны собрать в точку широкие пучки лучей, падающие на них под большими углами.

С того самого момента как изобрели линзу происхождение аберраций связывали с дефектами сферической поверхности линзы и оптики пытались их исправить изменяя степень кривизны сферической поверхности линзы. Исаак Ньютон, выявив, что хроматическая аберрация 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 аберраций избавиться невозможно.

Ахроматическая линза



1747 г. Эйлер впервые высказал идею о возможности создания объектива, свободного от хроматической aberrации. Он предлагал создать ахроматический объектив, полученный сочетанием стекла и водяной линзы. Для проверки своих расчётов Эйлер приступил к опытам с линзами и водой.

Ахроматическая линза: Схема ахроматического объектива: 1 — крон, 2 — флинт, 3 — зелёный луч, 4 — точка сведения синего и красного лучей

Честер Холл предложил способ исправления хроматической aberrации с помощью стекла двух типов: крона и флинт (линзы из разных типов оптического стекла с разной преломляющей силой).

1. Английский оптик Доллонд приступил к опытам над преломлением света различными прозрачными средами (1760). В результате Доллонд принужден был признать правоту Эйлера и принялся за усовершенствование объектива телескопа. Впоследствии он получил патент на это изобретение. (Г.Н. Виноградова, В.В. Захаров Основы микроскопии. ИТМО. 2018)

Ахроматический микроскоп

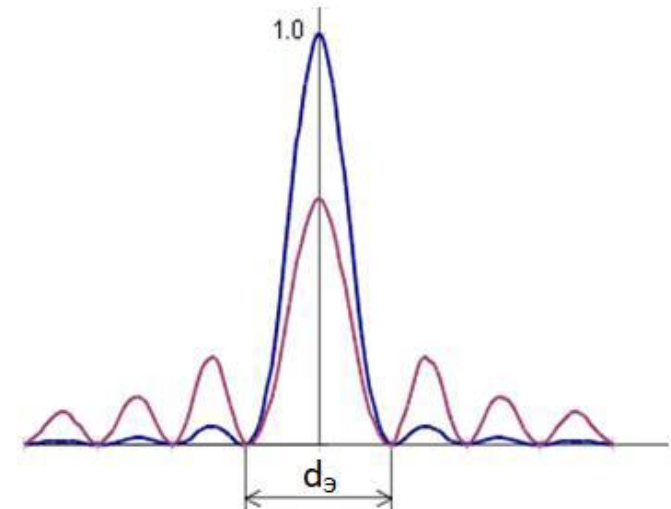
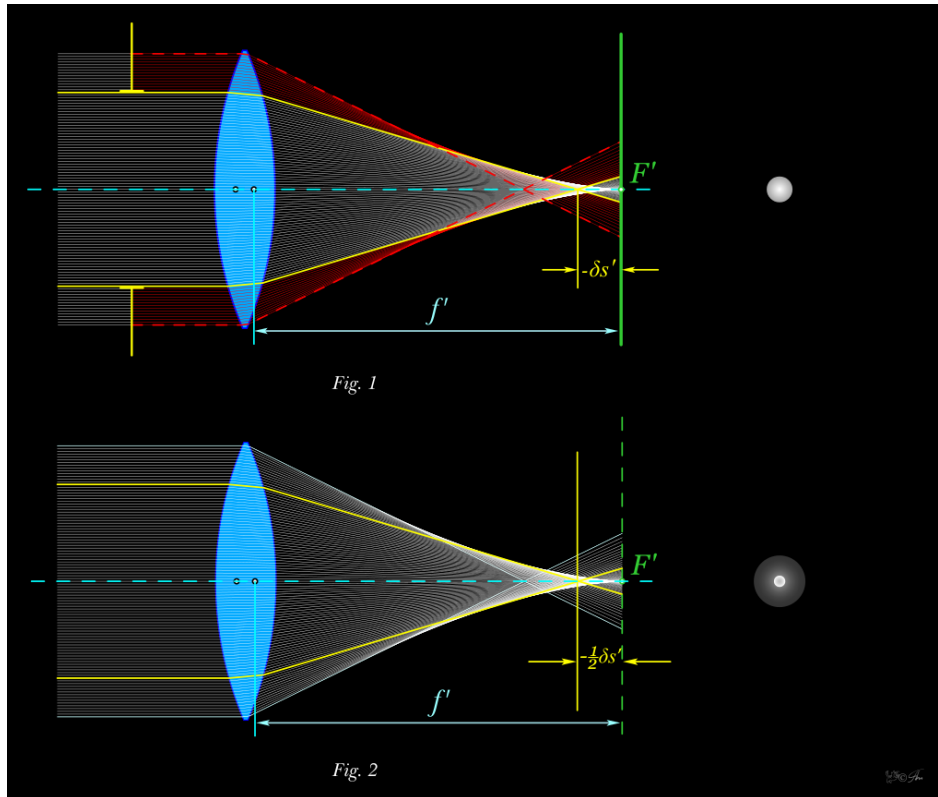


По указанию Эйлера в мастерских Академии Наук началась разработка ахроматического микроскопа. Через год после смерти Эйлера академик Эпинус опубликовал сообщение об изобретении ахроматического микроскопа. В самом начале 1784 года он сам сконструировал первый опытный экземпляр своего ахроматического микроскопа. Название «телескопический микроскоп» он получил из-за длины тубуса (около метра) и некоторых особенностей конструкции штатива, напоминающих телескоп

В период с 1805 по 1808 г. Эпинус создал вторую, более совершенную конструкцию этого микроскопа, который хранится сейчас в Государственном политехническом музее (Москва).

Сферические aberrации

Сферическая aberrация — aberrация оптических систем из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси.

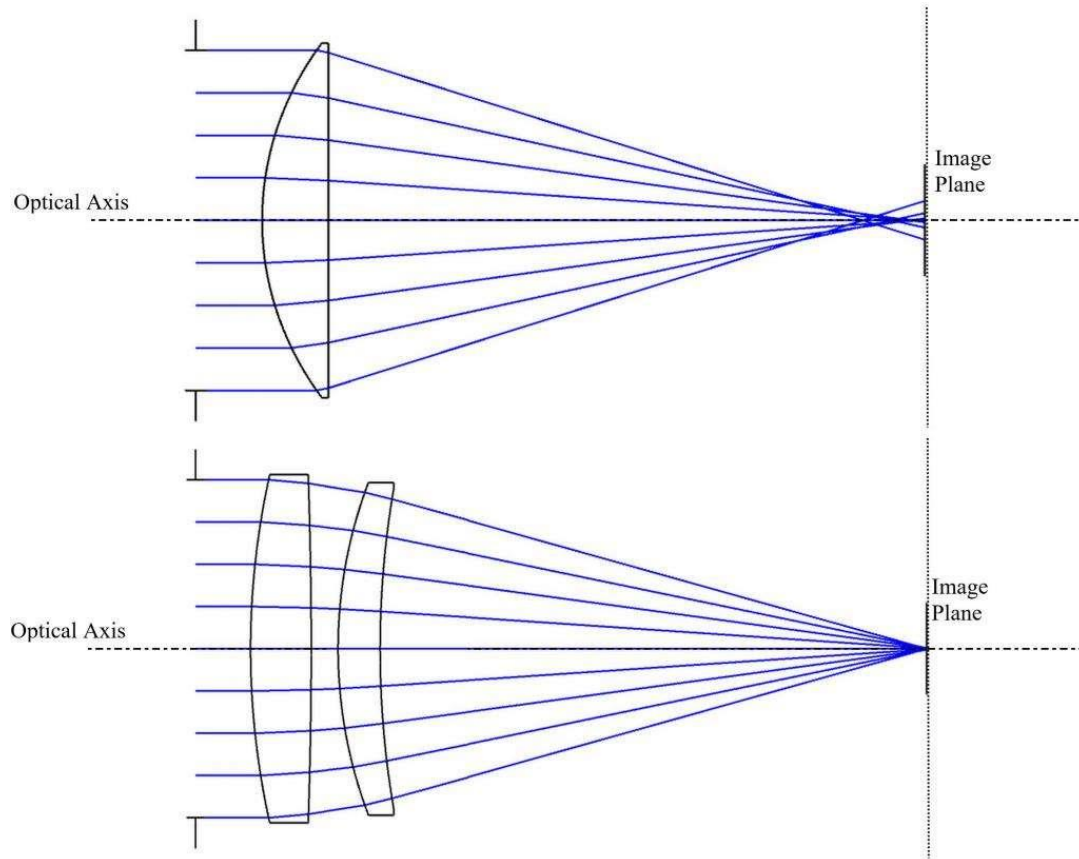


Перераспределение энергии из-за сферической aberrации, где $d_Э$ - диаметр диска Эйри. (Г.Н. Виноградова, В.В. Захаров Основы микроскопии. ИТМО 201)

Сферическая aberrация 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).

Сферические aberrации

Сферическая aberrация — aberrация оптических систем из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси. Приводит к нарушению гомоцентричности пучков лучей от точечного источника, без нарушения симметрии строения этих пучков.



Снизить явление сферической aberrации можно, используя линзу с увеличенным радиусом поверхности. <https://1ku.ru/obrazovanie/28621-aberracii-jeto-cto-takoe-kakie-byvajut-aberracii>

Кома

Аберрация, приводящая к нарушению гомоцентричности широких световых пучков, входящих в систему под углом к оптической оси.

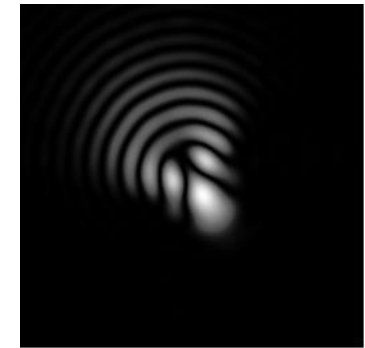
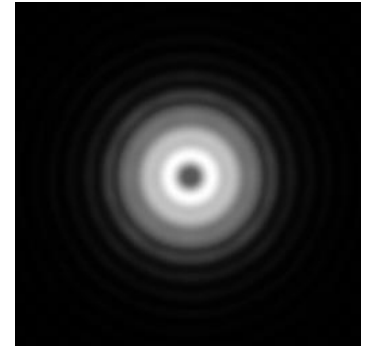
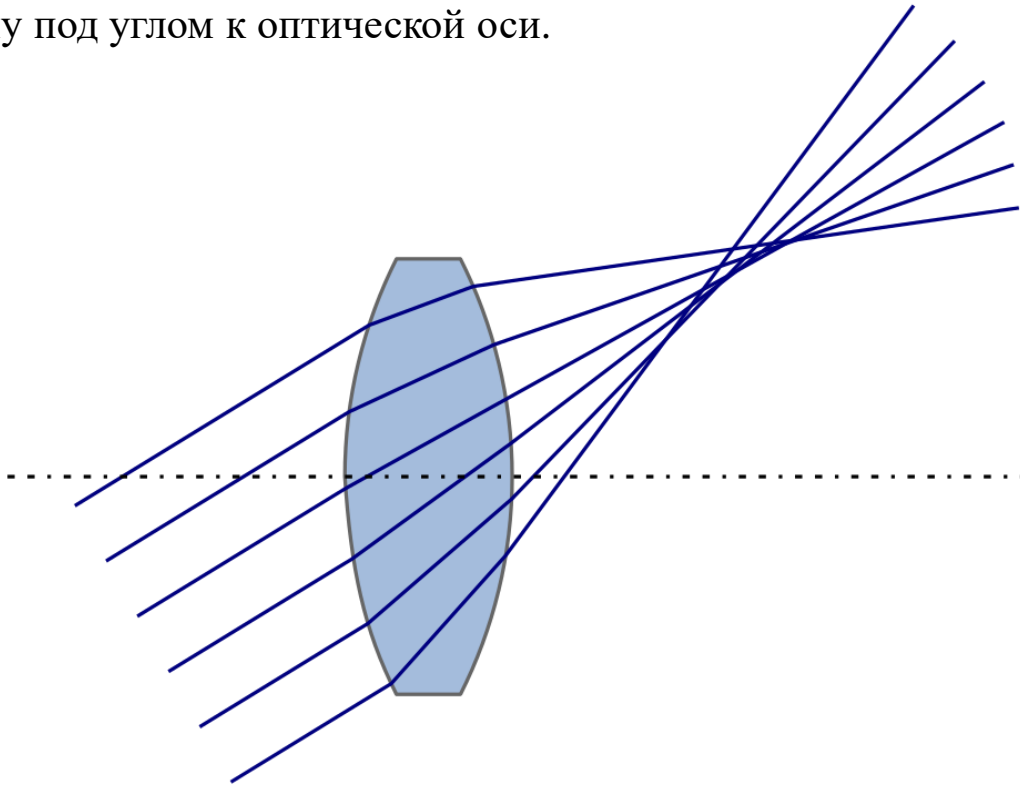
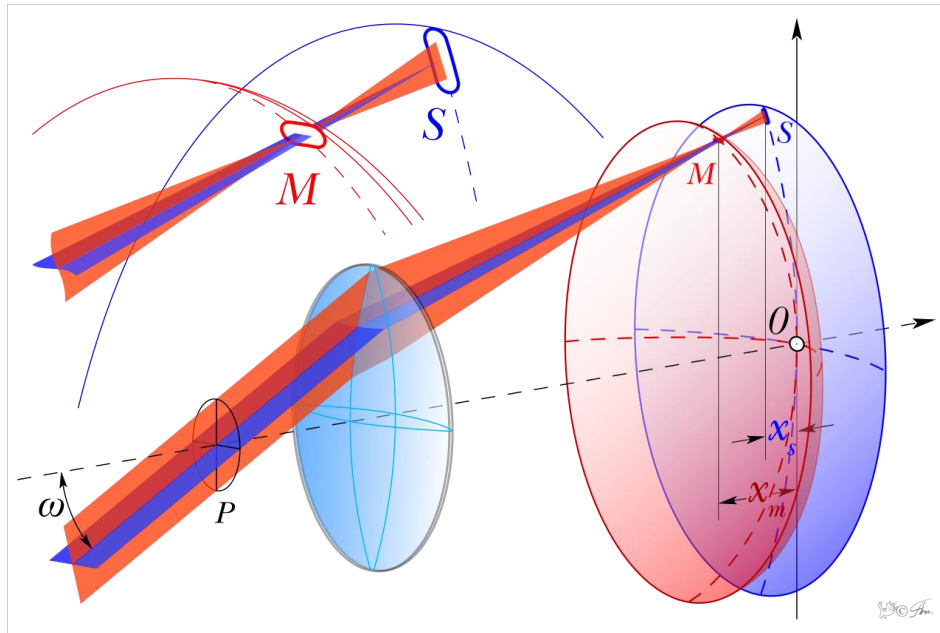


Схема образования комы: лучи, приходящие под углом к оптической оси собираются не в одной точке. В сложных оптических системах кому обычно исправляют совместно со сферической аберрацией подбором линз. Оптические системы с исправленными коматической и сферической аберрацией называются *аплататами*. (Wikipedia,2020)

Все аберрационные эффекты Комы повернуты яркими центрами к оптической оси и напоминают раскрытый веер (БЛОГ Дмитрия Ефремова).

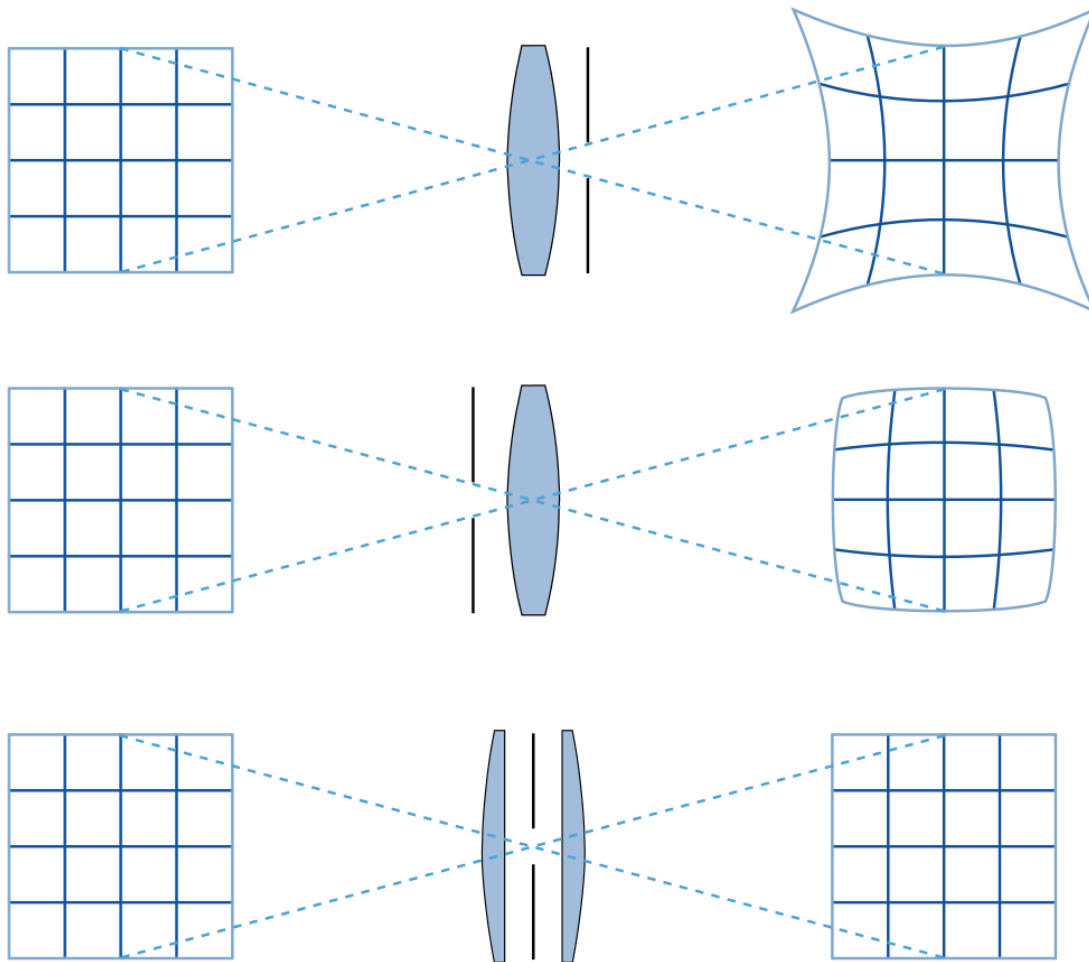
Астигматизм



Астигматизм — аберрация при которой изображение точки, находящейся вне оптической оси, и образуемое узким пучком лучей, представляет собой не круглое пятно рассеяния, а два отрезка прямой. Эти отрезки расположены перпендикулярно друг другу на разных расстояниях от плоскости безаберрационного фокуса (плоскости Гаусса).

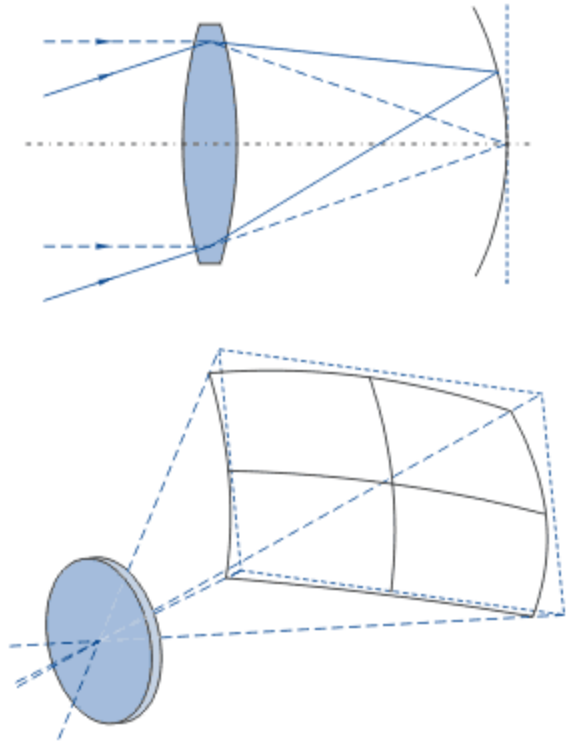
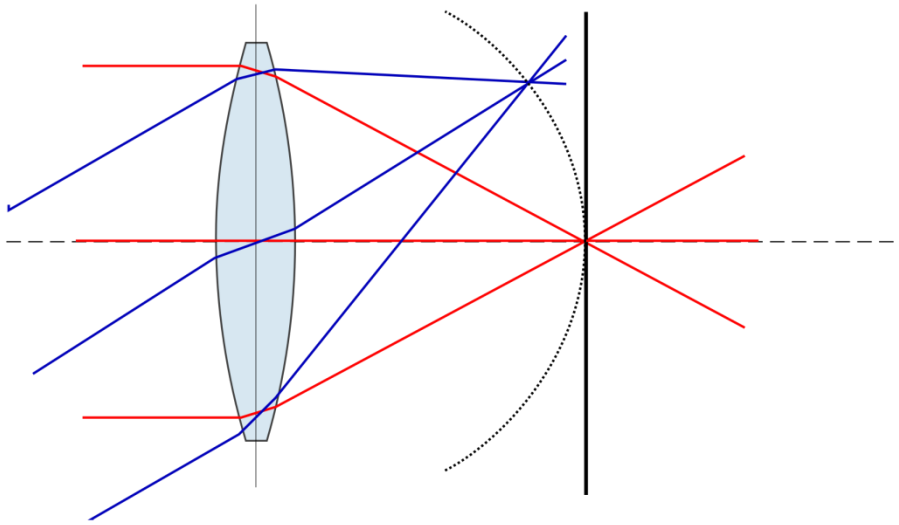
Астигматизм объясняется зависимостью углов преломления лучей пучка от углов их падения. Так как отдельные лучи наклонного пучка падают на преломляющую поверхность под разными углами, то и преломляются на разные углы, пересекаясь на разном же расстоянии от преломляющей поверхности. Причём, можно найти такое положение для поверхности изображения, когда все лучи пучка расположенные в одной из плоскостей (меридиональной или сагиттальной) пересекутся на этой поверхности. Таким образом, астигматический пучок формирует изображение точки в виде двух астигматических фокальных линий, на соответствующих фокальных поверхностях, которые имеют форму поверхностей вращения кривых с различными параметрами, и касаются одна другой в точке оси системы.

Дисторсия



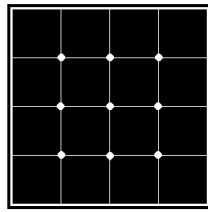
Дисторсия (от лат. *distorsio*, *distortio* — искривление) — аберрация оптических систем, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется по мере удаления отображаемых предметов от оптической оси. При этом нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением. Дисторсия неприемлема в оптике, предназначенной для фотограмметрической аэрофотосъёмки и изготовления фотошаблонов.

Кривизна поля изображения

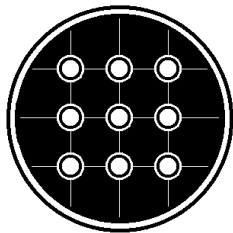
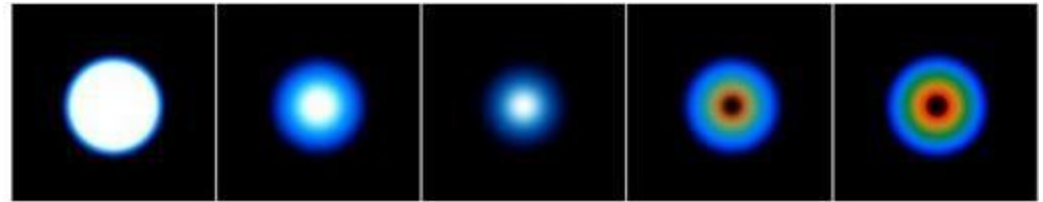


Кривизна поля изображения — aberrация, в результате которой изображение плоского объекта, перпендикулярного к оптической оси объектива, лежит на поверхности, вогнутой либо выпуклой к объективу. Эта aberrация вызывает неравномерную резкость по полю изображения. Поэтому, когда центральная часть изображения сфокусирована резко, то его края будут лежать не в фокусе и изображаться нерезко. Если установку на резкость производить по краям изображения, то его центральная часть будет нерезкой.

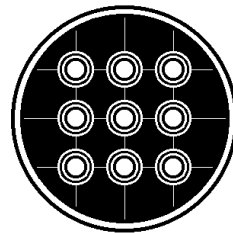
Кома



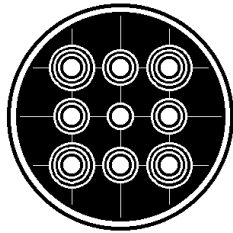
1



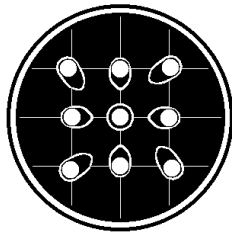
2



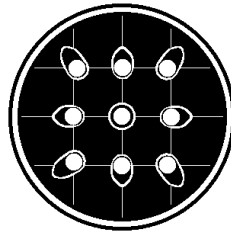
3



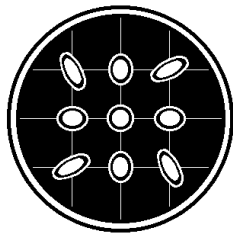
4



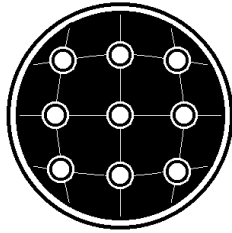
5



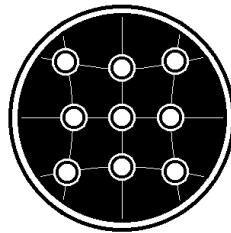
6



7



8



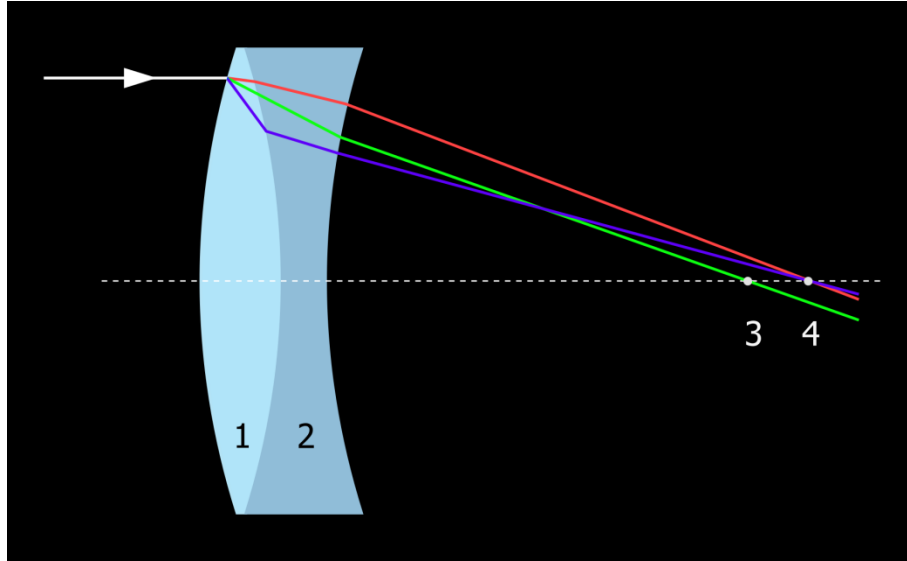
9

Цветные каёмки, наблюдаемые при наличии хроматической аберрации как в плоскости фокусировки, так и при дефокусировке.

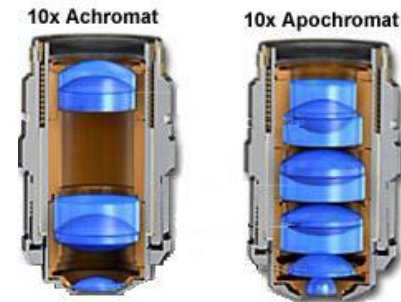
Точечный препарат (1) типа «звёздное небо» и примеры полей зрения при различных аберрациях. 2 — изображение без аберраций; 3 — сферическая аберрация; 4 — кривизна поля; 5, 6 — кома; 7 — астигматизм; 8, 9 — дисторсия.

Г.Н. Виноградова, В.В. Захаров
Основы микроскопии. ИТМО 2018

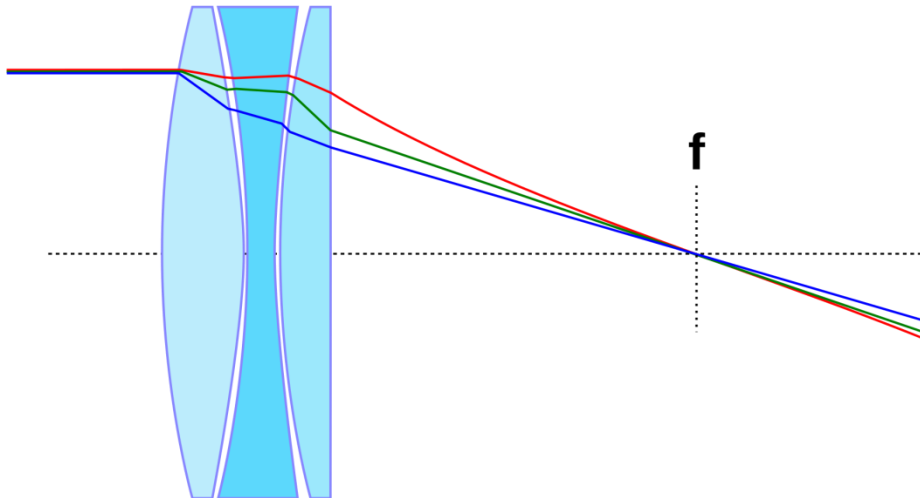
Ахроматическая линза



Ахроматический объектив, ахромат - объектив, в котором исправлена хроматическая aberrация для лучей света двух различных длин волн и частично — сферическая aberrация.

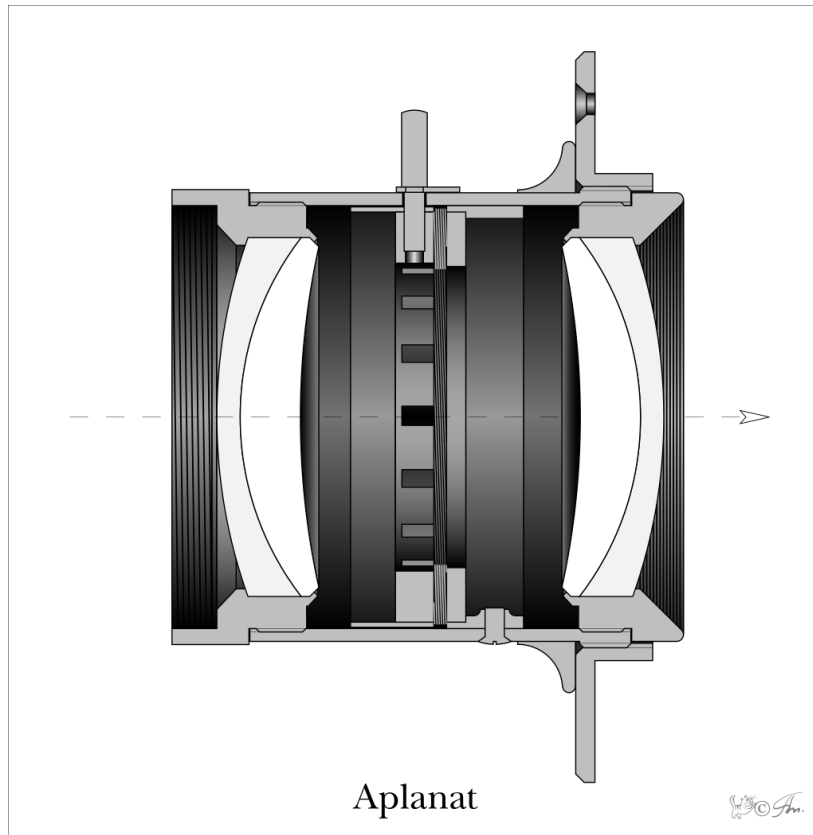


Объективы с разной степенью коррекции aberrаций: ахромат (слева) и апохромат (справа).



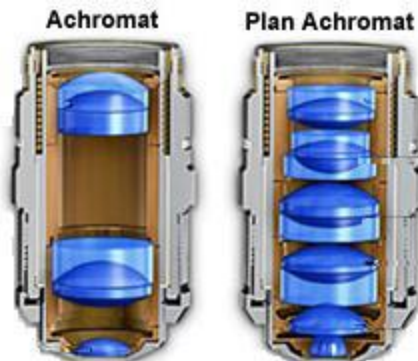
Апохромат - оптическая конструкция, у которой исправлены сферическая aberrация и хроматические aberrации для трёх и более цветов. Как правило, является усложнённым ахроматом с линзами из стекла специальных сортов (например, курцфлинт) и некоторых кристаллов (флюорит, кварцы).

Линза апланат



Апланат (от греч. *a* — отрицательная частица и *plane* — блуждание, отклонение, ошибка) — объектив в котором исправлены *сферическая и хроматическая аберрации, кома и дисторсия, а астигматизм исправлен для сравнительно небольшого углового поля*. Апланат состоит из двух ахроматических линз, между которыми расположена диафрагма.

Само название «Апланат» было дано Хуго Штейнхелем своему объективу, созданному в 1866 году. Практически одновременно, с разницей в несколько недель, идентичный объектив был предложен Джоном Далльмейером под названием *Rapid Rectilinear*.



Слева - объектив-ахромат, справа - объектив-ахромат с исправленной кривизной поля.

Эрнст Аббе

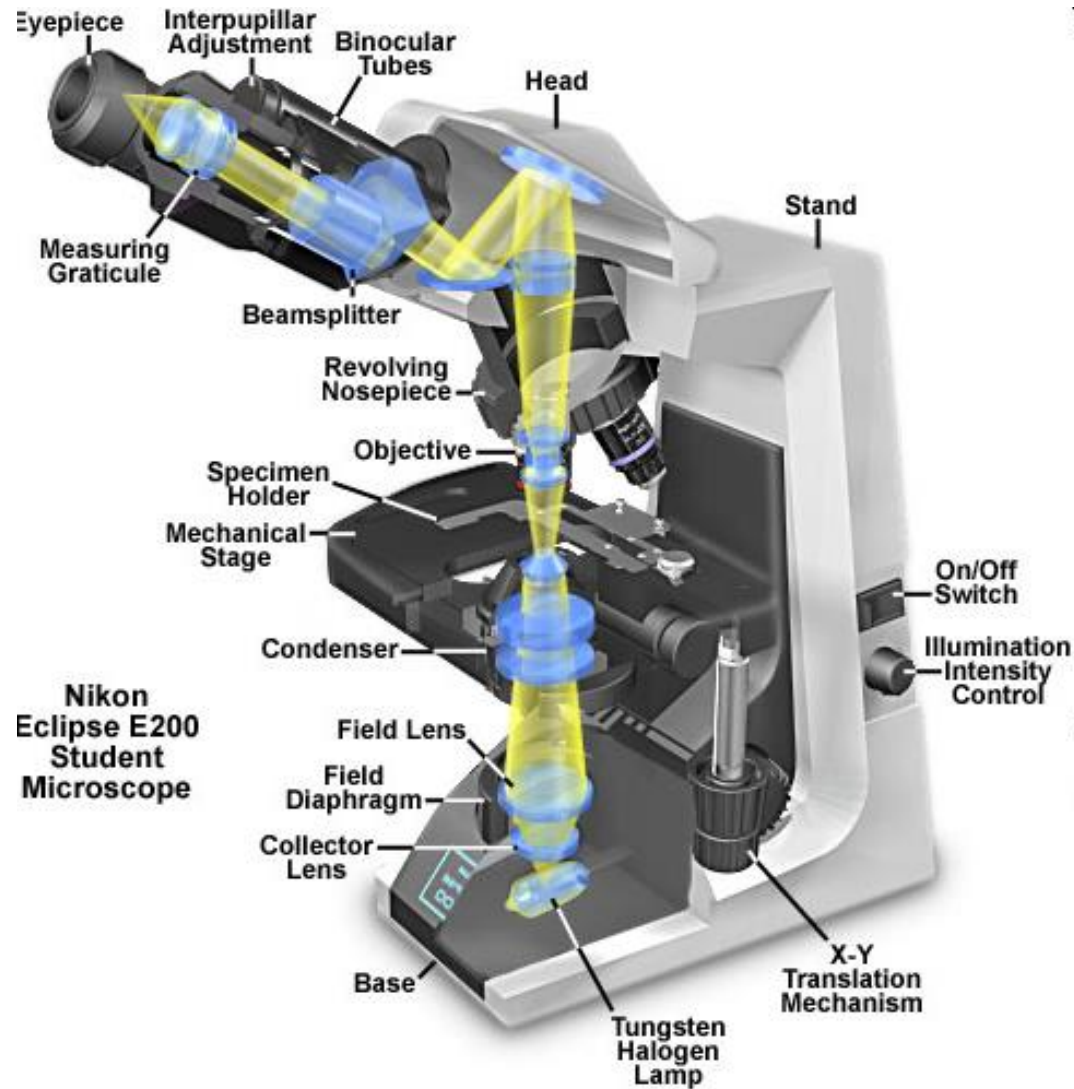
Карл Цейсс (1816-1888) был оптиком, широко известным благодаря основанной им компании Carl Zeiss Jena. В 1866 году, когда Карл Цейсс нанял Эрнста Аббе в качестве своего директора по исследованиям на оптическом заводе Цейсса. Аббе разработал теорию, что является основным инструментом современной вычислительной оптики. Он ясно показал разницу между увеличением и разрешением, и раскритиковал практику использования окуляров со слишком большим увеличением как "пустое увеличение"

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$

Аббе удалось совершенно по-новому, с позиций волновой оптики, объяснить действие простой линзы. Он показал, что изображение предмета строится линзой сложным образом. Сначала в плоскости, перпендикулярной оси линзы, возникает интерференционная картина. При этом упомянутая плоскость играет роль своеобразной дифракционной решётки. Световой поток, проходящий от линзы через эту решётку, взаимодействует с решёткой и только после этого на небольшом расстоянии от плоскости решётки появляется изображение, которое можно увидеть на матовом стекле или сфотографировать. (В.А. Гуриков Эрнст Аббе. "Наука", М., 1985)



Further Development of Optical Microscopy



Summary Lecture 1

- Refraction, absorption, dispersion, diffraction
- Index of refraction
- Magnification of the magnifying glass
- Magnification of the compound microscope

Reading:

1. R. A. Serway, J. S. Faughn. “*College Physics*”. Saunders Cooleg Publ. (1985).
2. P. G. Hewitt. “*Conceptual Physics*”. Pearson Prentice Hall (2005).
3. Olympus. Microscopy Research Center. www.olympusmicro.com
4. Г.Н. Виноградова, В.В. Захаров Основы микроскопии. ИТМО 2018