

Лекция 3

**Ограничение разрешающей способности
лупы и микроскопа – аберрации**

**Компенсация аберраций – условие
апланатизма, условие синусов**

**Объектив микроскопа – конструкция и
основные характеристики**

Аберрации

Аберрации – отклонения хода лучей от идеального, обусловленные несовершенством сферической линзы.

Зеркала (например, параболическое зеркало) могут быть свободны от аберраций, и поэтому получили распространение в астрономии, но их трудно использовать в микроскопии. Сферические зеркала также имеют аберрации, обусловленные их формой.

Причины аберраций:

Отклонение лучей, участвующих в построении изображения, от главной оптической оси линзы на значительный угол (сферические аберрации).

Зависимость оптических свойств стекла от длины световых волн (хроматические аберрации).

Типы аберраций

Для устранения аберраций в сложных оптических системах был создан специальный математический аппарат. В нем аберрации классифицируются, и для минимизации их проводятся расчеты по сложной системе уравнений. Эта система уравнений не дает возможности свести аберрации к нулю, но позволяет в определенных пределах уменьшить суммарную аберрацию сложной оптической системы для определенной области пространства изображений, используя набор линз с различными свойствами.

Расчеты величин аберраций производятся приближенно (численными методами) для выбранных лучей и длин волн.

Аберрации монохроматического света:

поперечная – лучевая

продольная – волновая.

Для смешанного света дополнительно появляются хроматические аберрации (также поперечные и продольные).

Классификация аберраций (Зайделя)

Сферическая

Кома (косого света)

Дисторсия

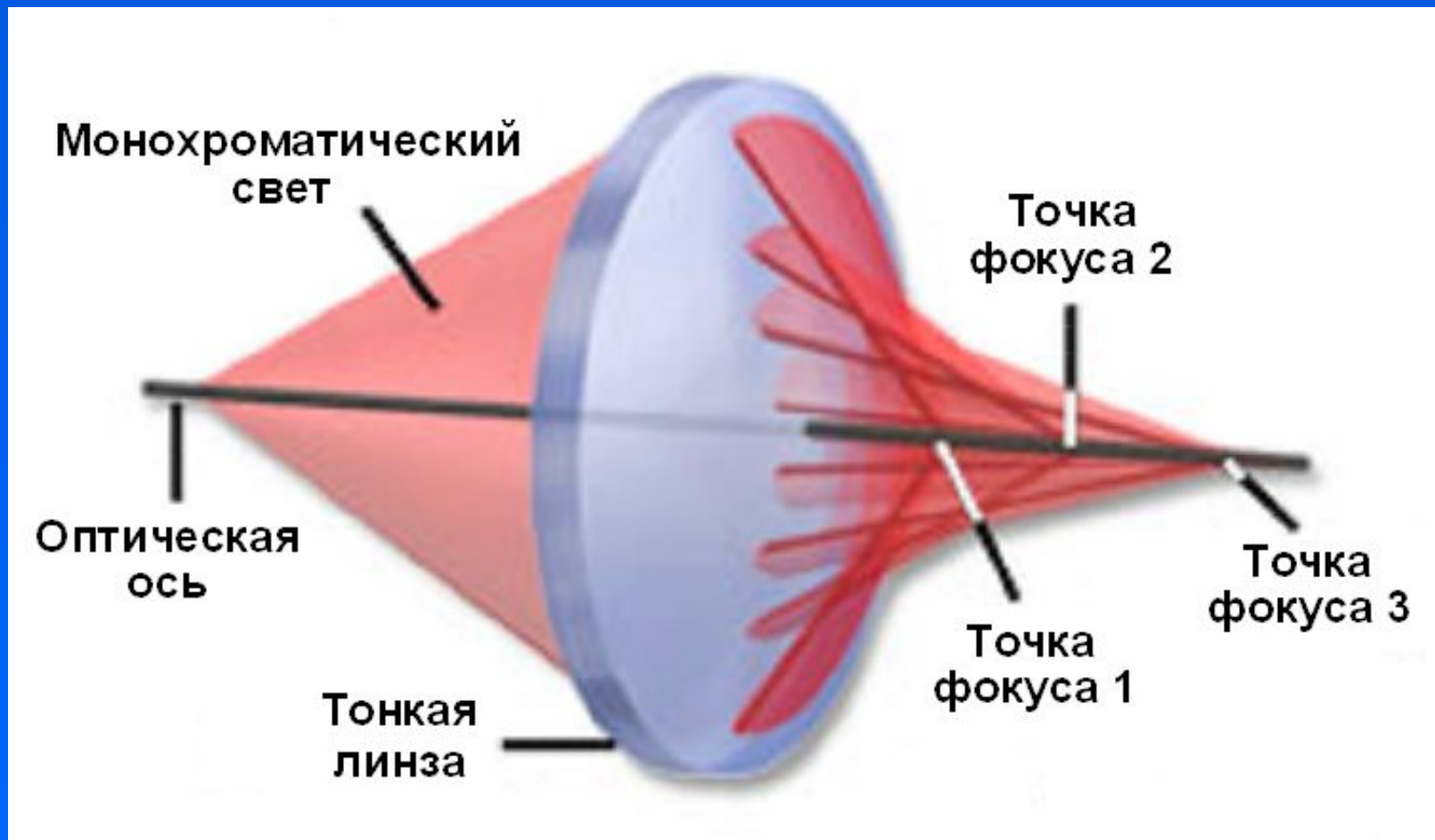
Астигматизм

Сферичность поля зрения

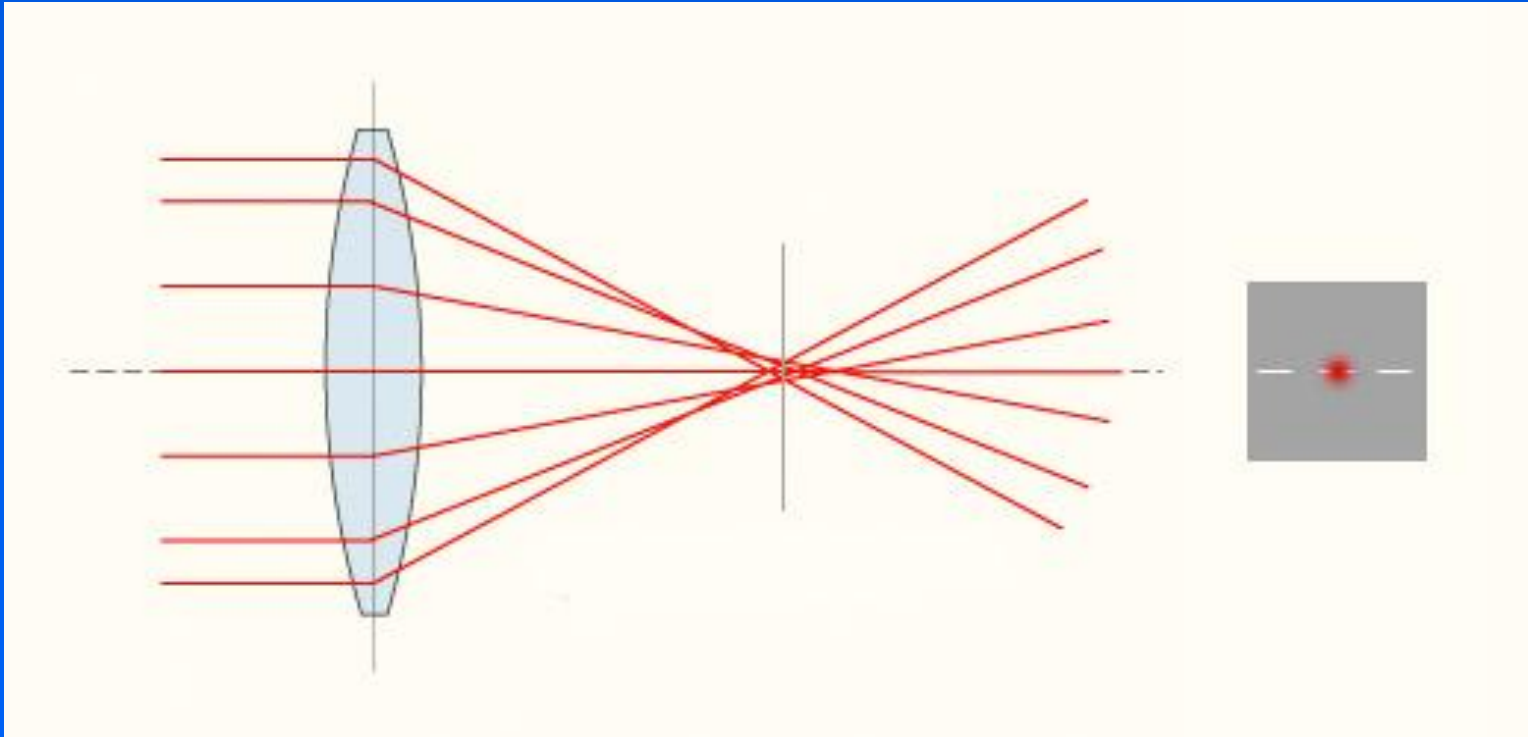
Хроматическая (продольная)

Хроматическая разность увеличений
(поперечная)

Сферическая абберрация

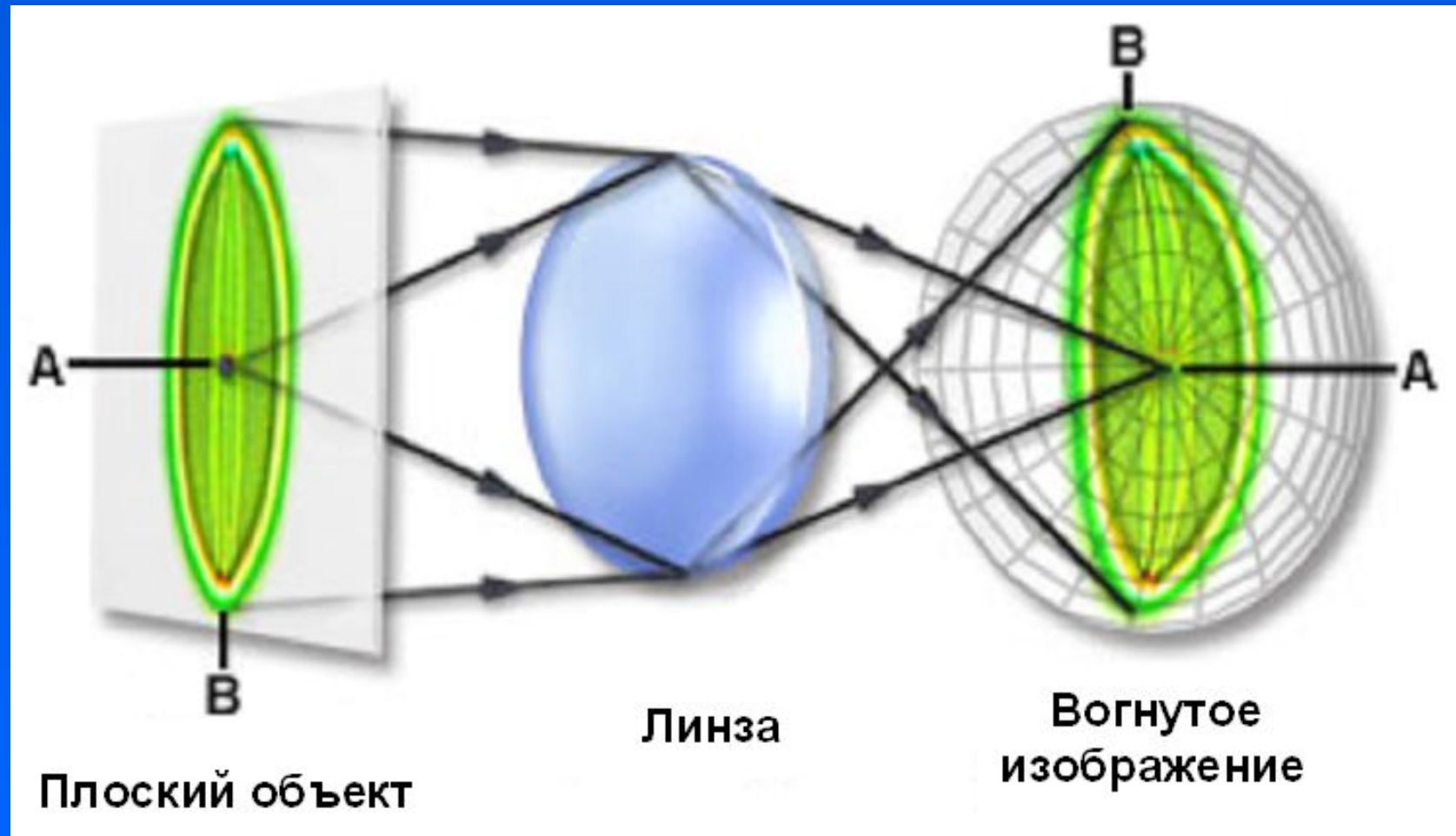


Формирование кружка нерезкости

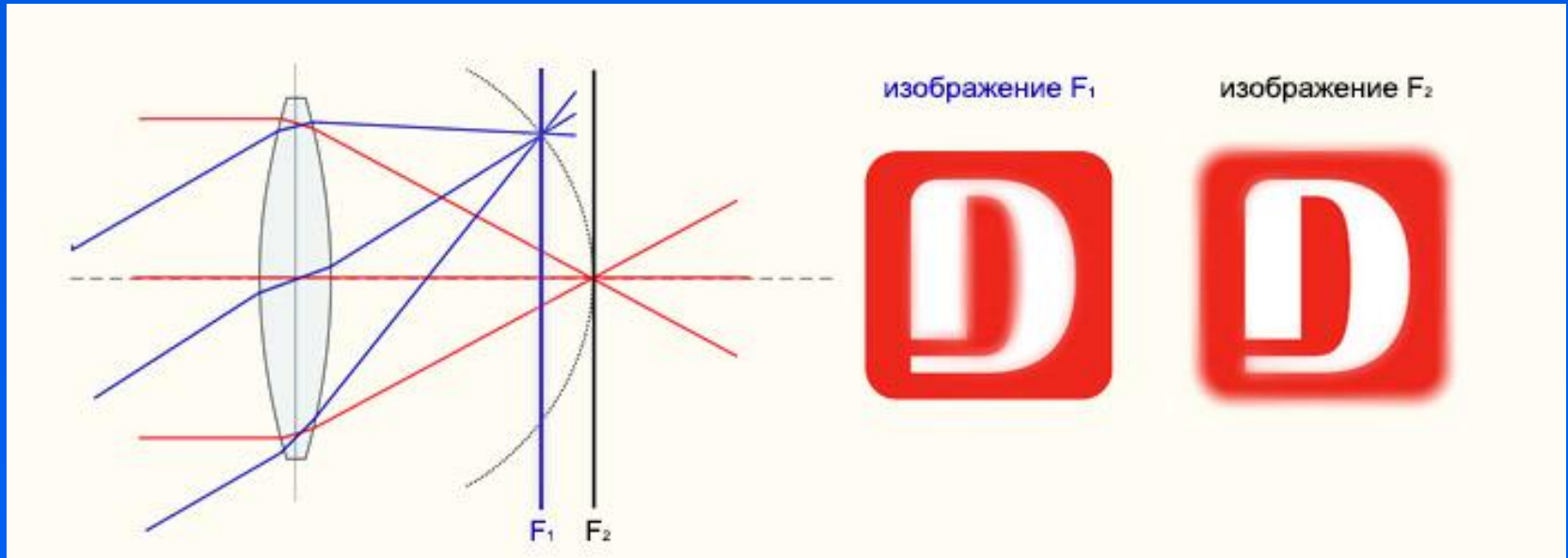


Сферическая аберрация оптической системы. Лучи, параллельные оси оптической системы сходятся не в точке, а в перетяжке.

Сферичность поля зрения

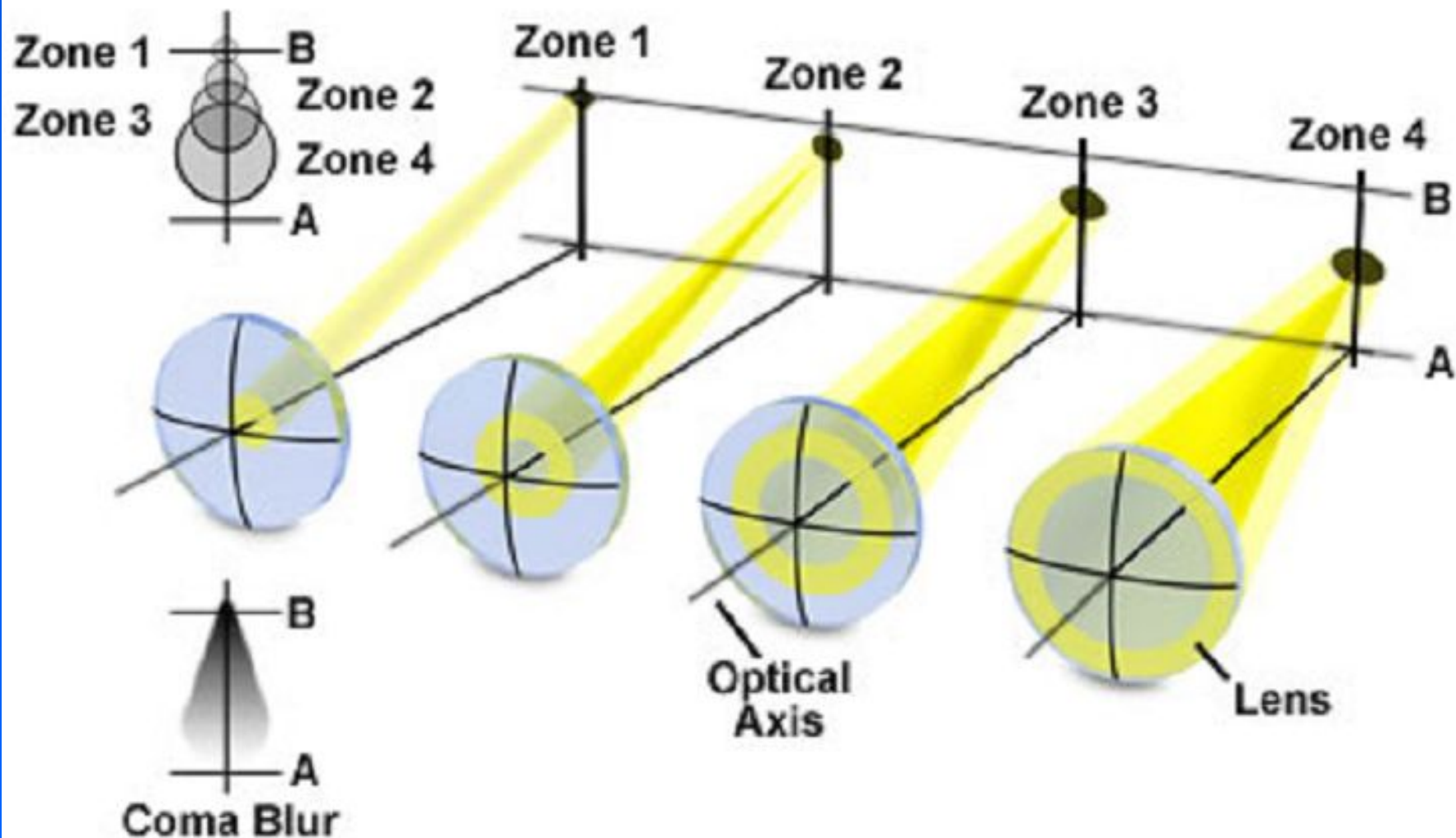


Формирование изображения при кривизне поля зрения

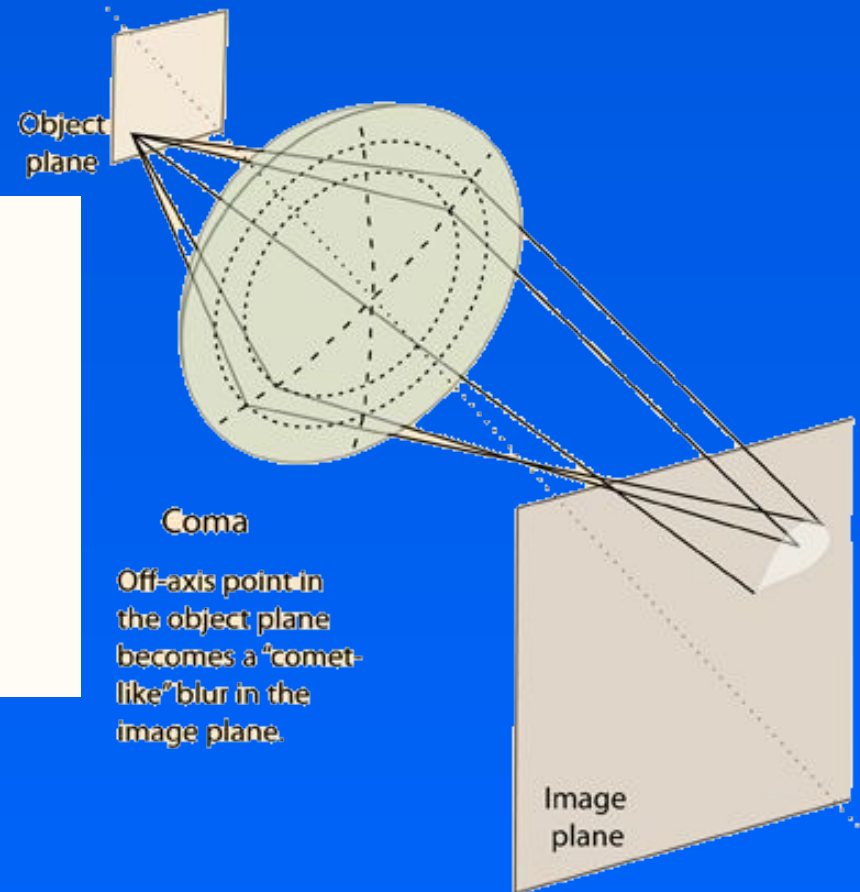
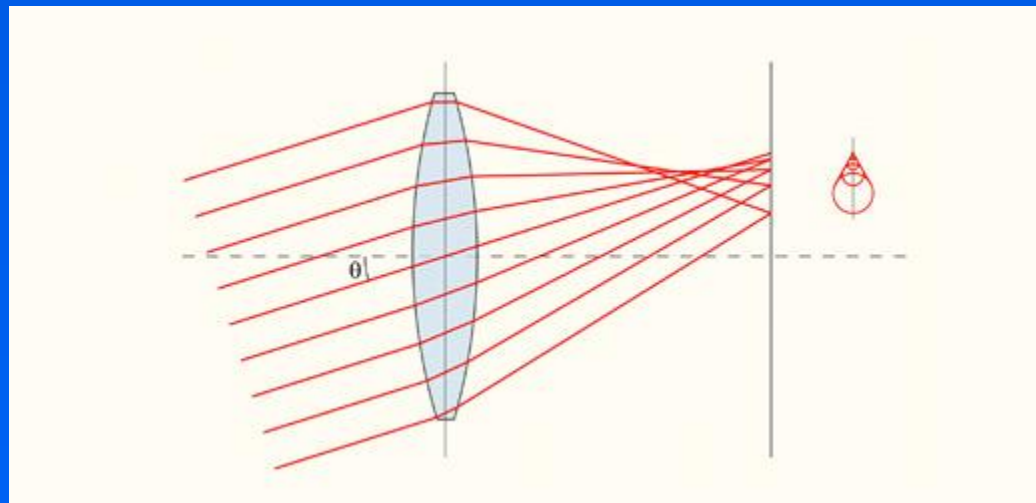


Изображение плоского объекта перпендикулярного оси оптической системы в плоскостях F_1 и F_2 формирует два кружка нерезкости

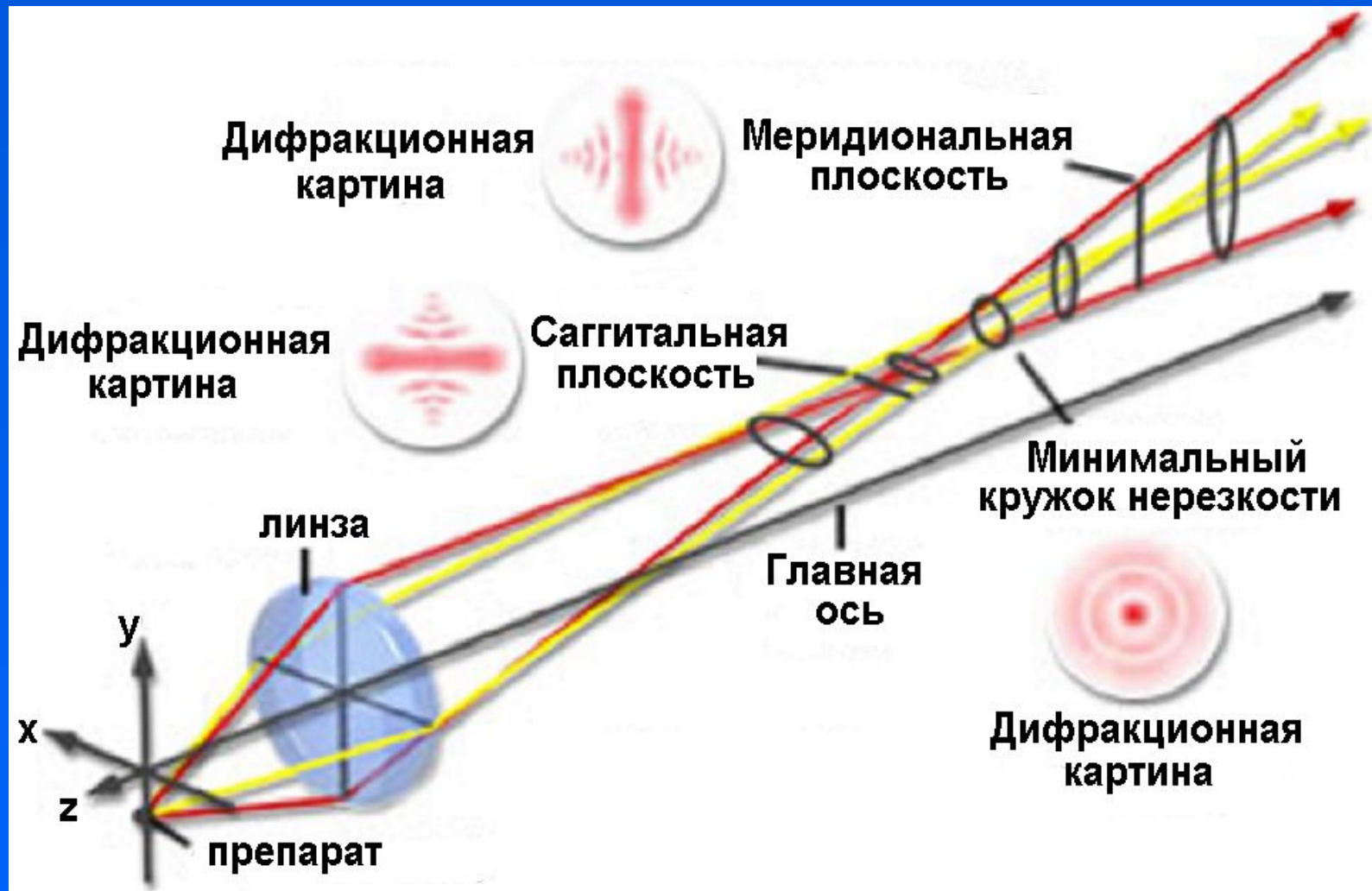
Кома косо́го света



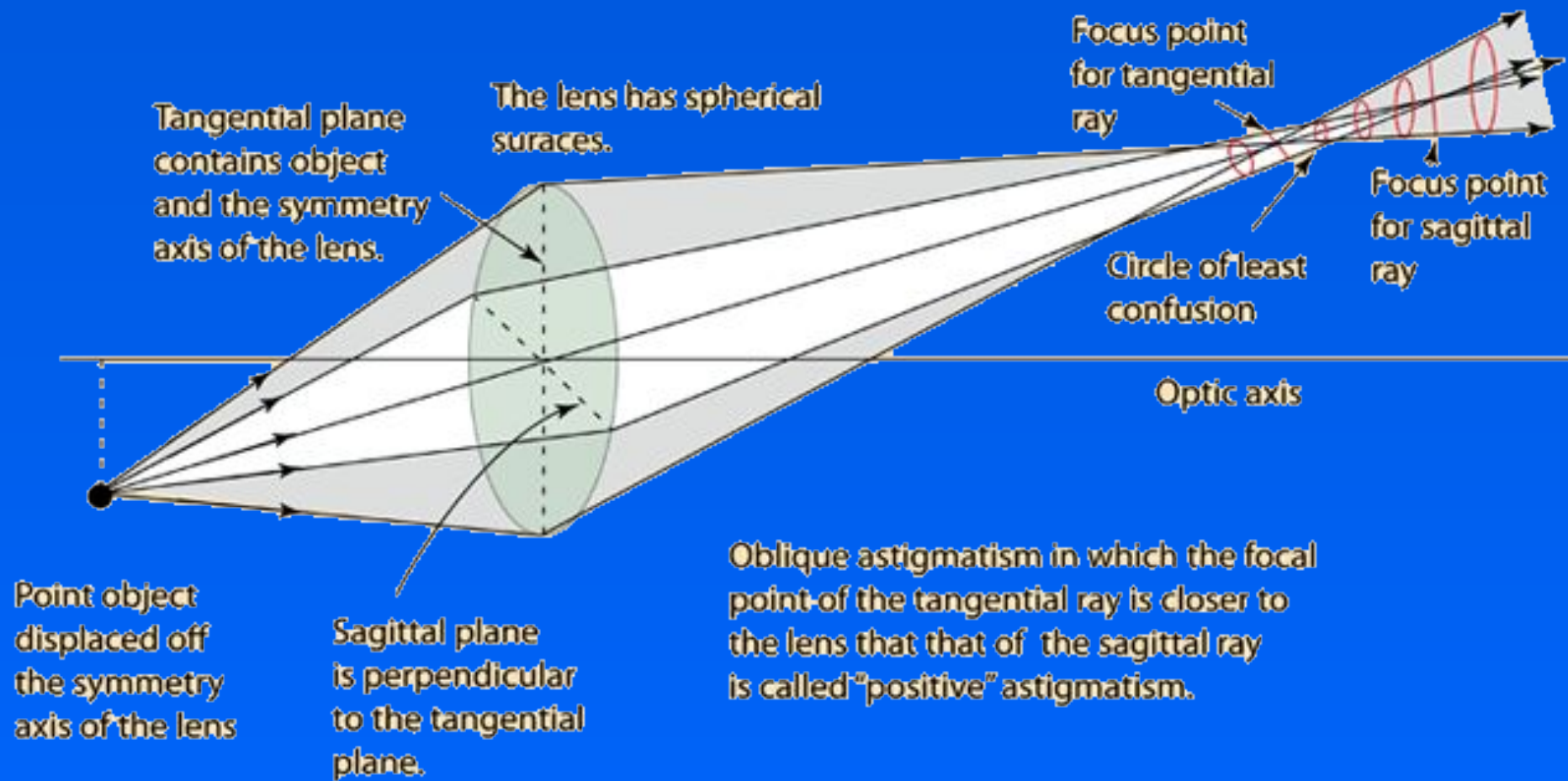
Ход лучей в коме косого света



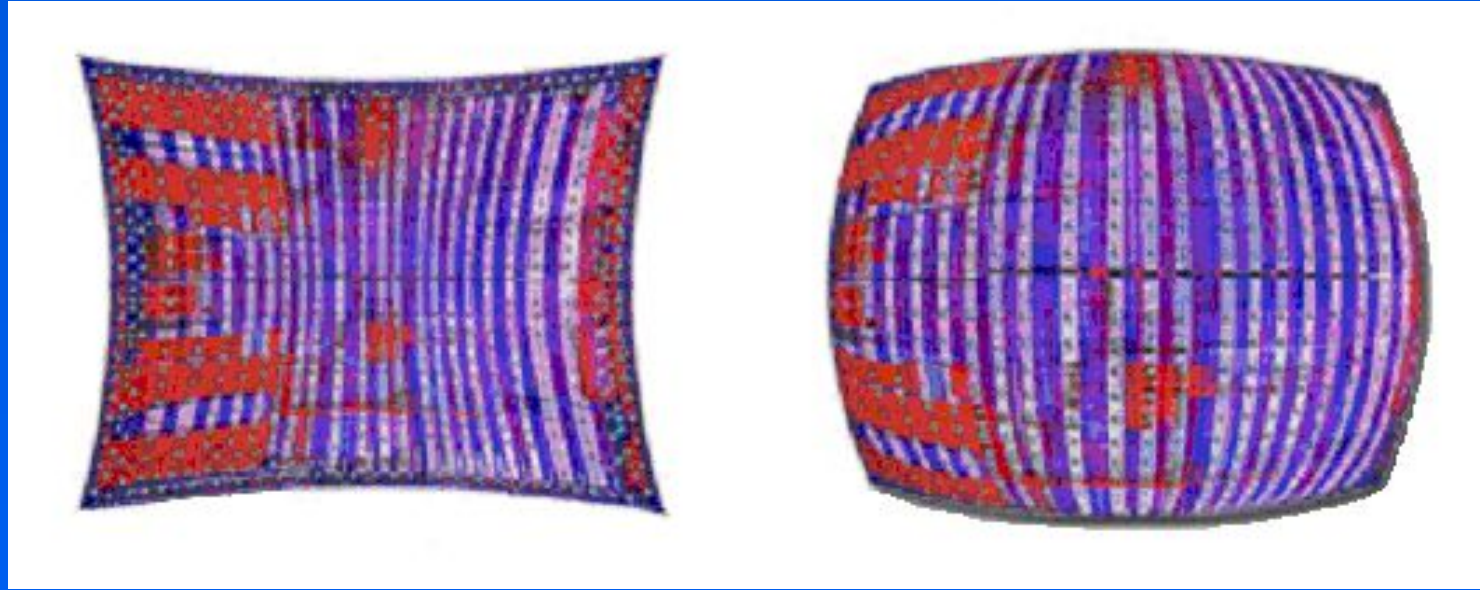
Астигматизм



Разность увеличений по двум осям – отклонение от сферической формы



Дисторсия

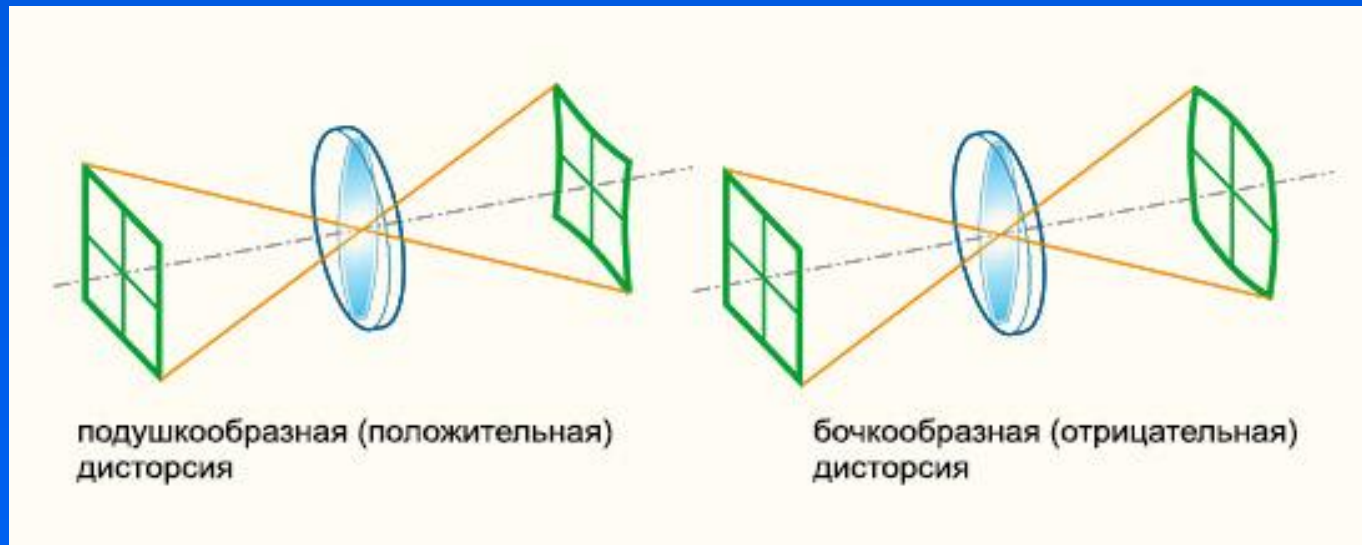


положительная

отрицательная

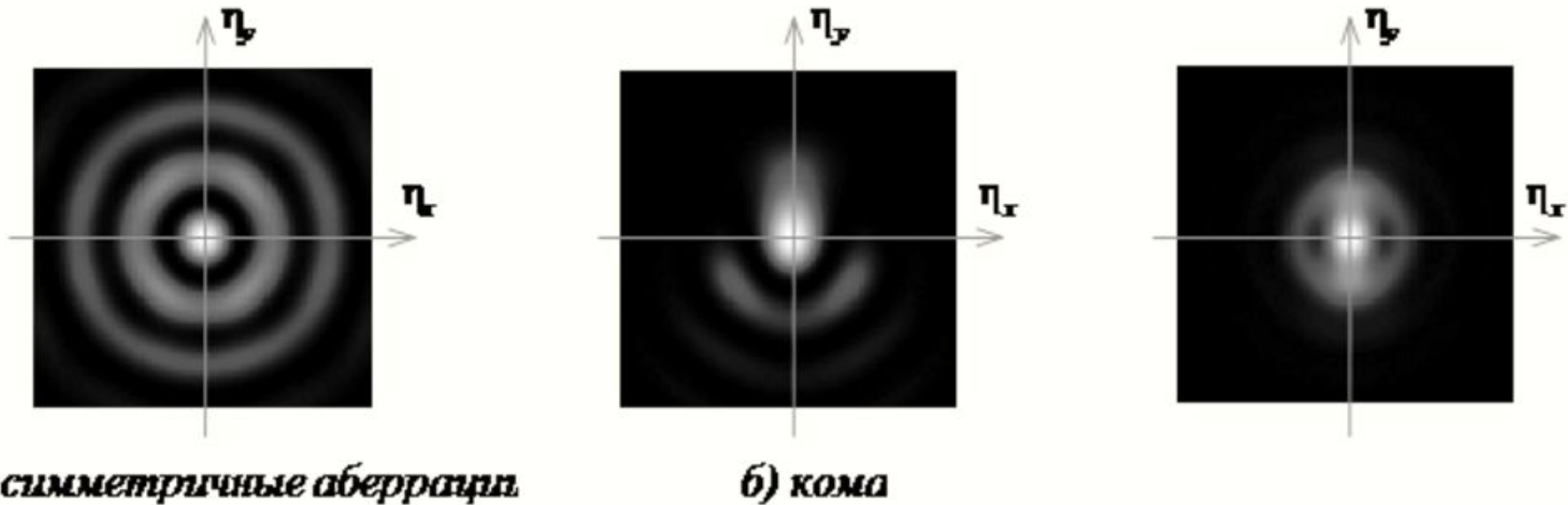
Дисторсия означает переменное увеличение в пределах поля зрения. Положительная – увеличение растёт по мере удаления от главной оптической оси.

Формирование изображения для дисторсии



При дисторсии меняется коэффициент
линейного увеличения в разных точках
поля зрения

Картины Эри для аберраций различных типов



Аберрации по-разному влияют на вид пятна рассеяния (картину Эри). В случае симметричных аберраций (расфокусировка, сферическая) сохраняется радиальная симметрия пятна (а). В случае несимметричных аберраций (кома, астигматизм) симметрия пятна нарушается (б, в)

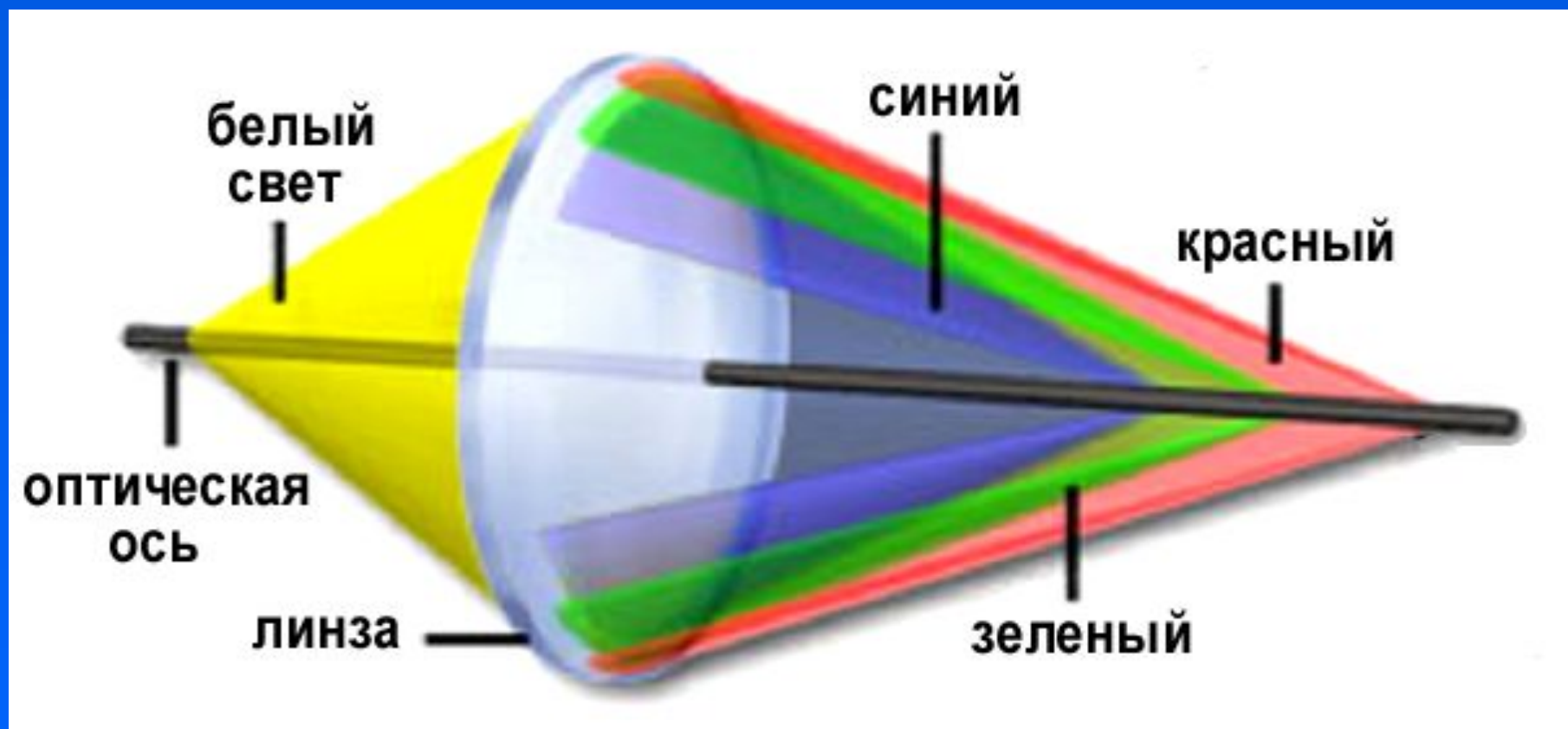
Устранение (компенсация) аберраций

Устранение (минимизация) аберраций может производиться для определенной длины волны (сферические аберрации), а также одновременно для нескольких длин волн (хроматические аберрации).

Минимизация всех аберраций в объективе микроскопа достигается для небольшой окрестности так называемой апланатической точки, располагающейся вблизи фокуса на главной оптической оси системы.

Если объект располагается на удалении от апланатической точки, то аберрации (в первую очередь – сферическая) объектива быстро возрастают.

Хроматическая абберрация (продольная)



Дисперсия стекла

Зависимость показателя преломления стекла от длины волны – дисперсия.

Число Аббе:

$$v = (n_d - 1) / (n_f - n_c),$$

где d, f и c – линии в спектре натрия с длиной волны 587.6, 486.1, и 656.3 нм,

соответственно.

Сорта оптического стекла

С различными показателями преломления и дисперсии:

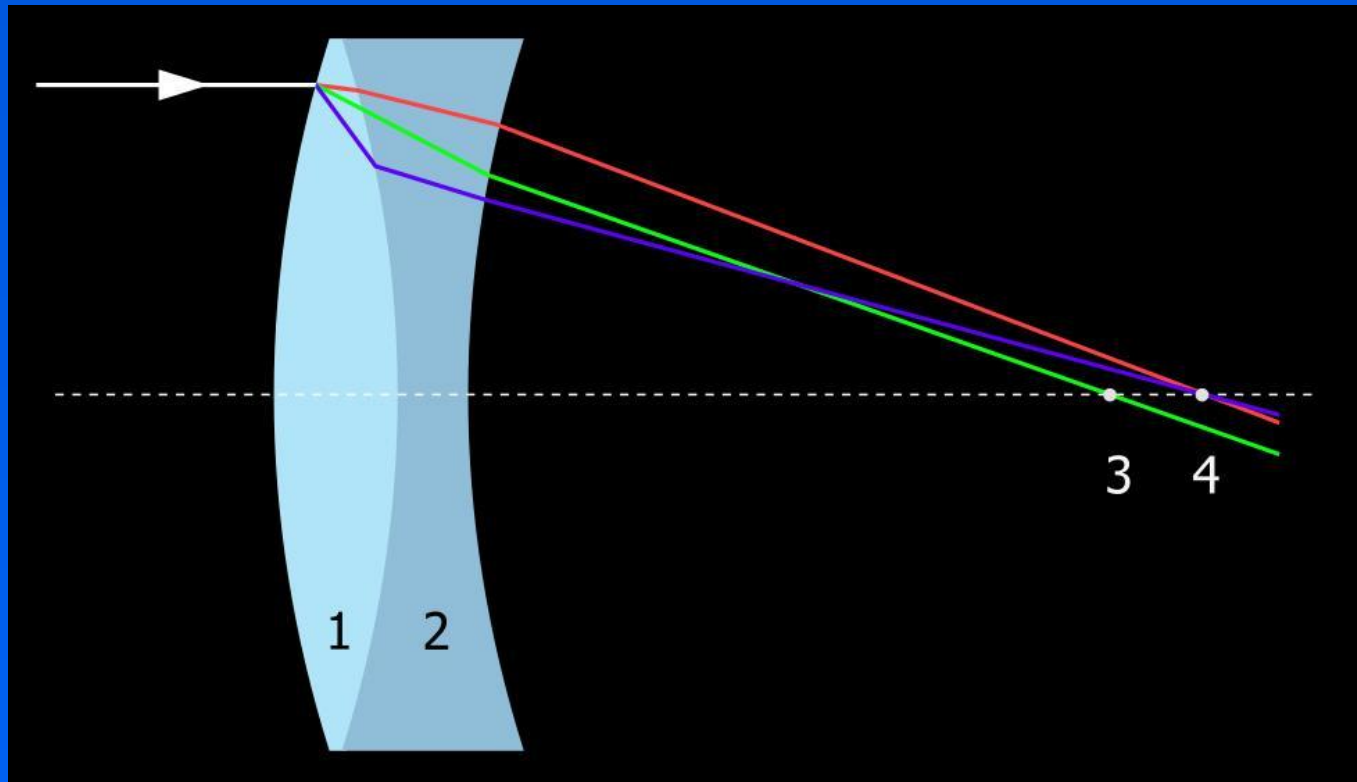
крон (легкое, $n < 1,7$; число Аббе более 50),

флинт (тяжелое, $n > 1,8$, содержит PbO ; число Аббе менее 50),

флюорит (CaF_2 ; $n \sim 1,5$; число Аббе менее 50)

Применение флюоритового стекла позволяет значительно уменьшить остаточные хроматические aberrации, используя небольшое число линз.

Ахроматическая система



Ахроматическая пара состоит из склеенных линз с различными показателями дисперсии (крон/флинт – 1 и 2) и представляет собой выпукло-вогнутую систему.

Ахроматическая пара линз позволяет значительно уменьшить хроматическую aberrацию, за счет сведения точек пересечения для синего и красного лучей (4).

Конструирование объектива из пар сферических линз

Для пары склеенных тонких линз фокусное расстояние системы f определяется по формуле:

$$1/f = 1/f_1 + 1/f_2$$

Для пары положительных линз оно составляет:

$$f = f_1 * f_2 / (f_1 + f_2)$$

Для пары из положительной и отрицательной линз оно составляет:

$$f = f_1 * f_2 / (f_1 - f_2).$$

Таким образом, суммарное увеличение пары меньше, чем исходной линзы, но не равно нулю, если их фокусные расстояния различаются.

Ахроматическая система

Условие ахроматизма для пары сферических линз:

$$v_1 f_1 + v_2 f_2 = 0 \quad (1)$$

При различной дисперсии ($v_2 > v_1$) из уравнения (1) следует, что,

$$|f_2| < |f_1|$$

То есть для пары линз (собирающая, $f_1 > 0$ и рассеивающая, $f_2 < 0$)

$1/f = 1/f_1 + 1/f_2 > 0$, и они дают в сумме положительное увеличение

Ахроматический объектив

Простейший ахромат (малое увеличение) – две ахроматических пары линз (x8, x10).

Для получения большого увеличения (свыше x16), этой системы недостаточно.

Для исправления aberrаций при создании объектива большого увеличения рассчитывается более сложная система, состоящая из полусферической фронтальной линзы и нескольких менисковых линз, последовательно исправляющих ее aberrации.

В задней части объектива для достижения большого увеличения (то есть малого фокусного расстояния всей системы) и устранения хроматических aberrаций дополнительно располагается одна или две ахроматических пары линз.

Апланатическая система

Система, свободная при построении изображения от сферических aberrаций, называется апланатической.

Простейшая апланатическая система состоит из двух плоско-выпуклых линз обращенных выпуклыми поверхностями друг другу.

Можно показать, что для некоторых сферических линз имеется одна пара апланатических точек, расположенных на главной оптической оси.

При нахождении предмета в передней апланатической точке на главной оптической оси его изображение в задней апланатической точке получается без сферических aberrаций.

Исправление аберраций объектива

Полное исправление сферических аберраций объектива – расчетный размер кружка нерезкости меньше дифракционного предела (половины диска Эри).

Полным исправление хроматических аберраций считается тогда, когда величина продольной и поперечной хроматических аберраций для выбранных длин волн (ахромат – две: зеленая и желтая; апохромат – три: синяя, зеленая и красная; суперапохромат – 5: фиолетовая, синяя, зеленая, желтая и дальняя красная) меньше половины минимальной длины волны.

Для полного исправления аберраций необходимо соблюдение двух условий – объект находится в передней апланатической точке и объектив удовлетворяет условию синусов.

Формирование изображения оптической системой

Оптические системы не могут давать идеального изображения пространства, так как обладают аберрациями. Исключения могут составлять точечные объекты на главной оптической оси и случаи, когда оба условия (условие синусов и условие тангенсов) выполняются хотя бы для некоторых пар точек одновременно.

Наиболее важным является случай параксиальной оптики, когда углы, составляемые лучами с главной оптической осью, малы и оба условия выполняются одновременно из-за практического совпадения тангенсов и синусов. К этому случаю относятся большинство оптических приборов, но не микроскоп!

Вторым важным случаем являются так называемые апланатические системы, в которых законы геометрической оптики удаётся совместить с выполнением условия синусов для элемента поверхности в окрестности одной точки на оси системы или для пары сопряжённых поверхностей. Апланатические системы изображают без аберраций широким пучком лучей окрестность такой точки. Хорошим примером апланатической системы является сфера с коэффициентом преломления больше единицы.

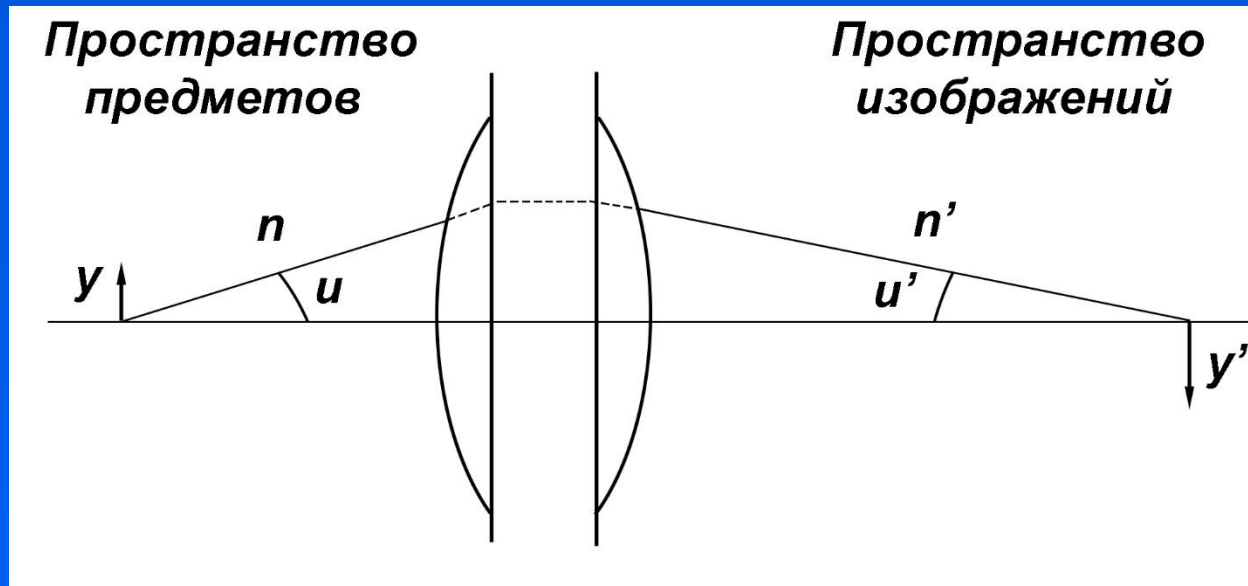
Апланатические свойства сферы используются при конструировании объективов микроскопов, где существенна большая апертура пучков, а положение предмета вдоль главной оптической оси может быть фиксировано.

Условие синусов Аббе

Для получения резкого изображения необходимо, чтобы все зоны оптической системы (объектива) давали отдельные изображения объекта одинаковой величины. Аббе показал, что для этого должно быть выполнено определенное условие, названное им "условием синусов". Это условие устанавливает, что для всех лучей, выходящих из точки на главной оси оптической системы и направляющихся после преломления к сопряженной точке изображения, отношение между синусами углов сопряженных лучей с осью должно оставаться постоянным.

Для практической проверки условия синусов используются специальные матрицы, состоящие из гипербол, которые для наблюдателя, смотрящего в объектив, превращаются в квадратную сетку.

Условие синусов Аббе

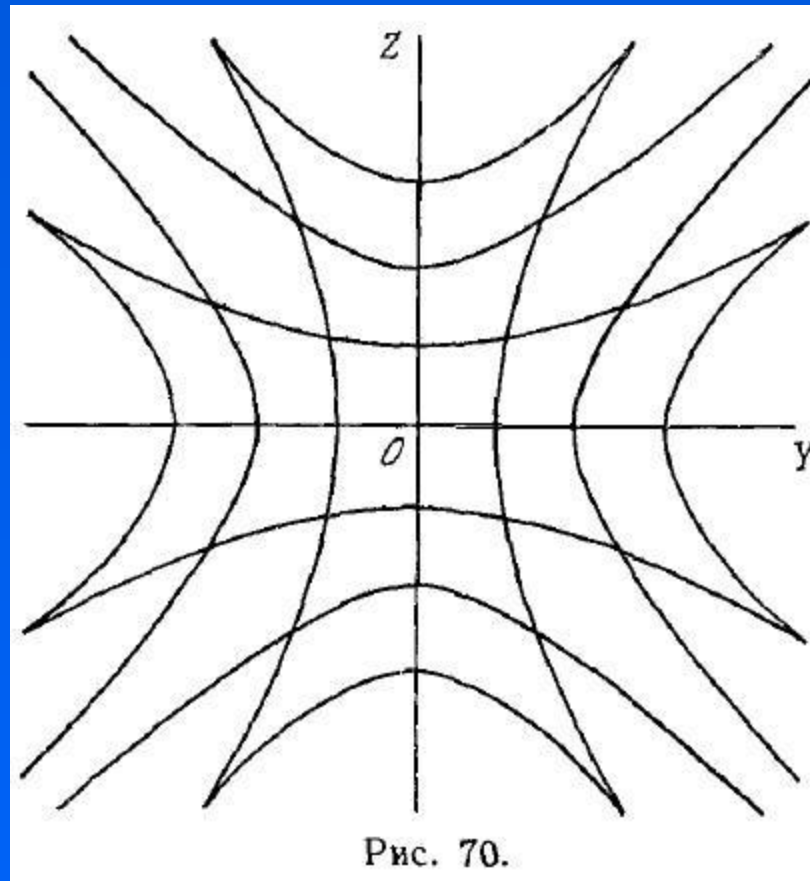


Для получения свободного от аберраций изображения для всех лучей, выходящих из передней апланатической точки на главной оптической оси и направляющихся после преломления в объективе к задней апланатической точке, отношение между синусами углов сопряженных лучей должно быть постоянно:

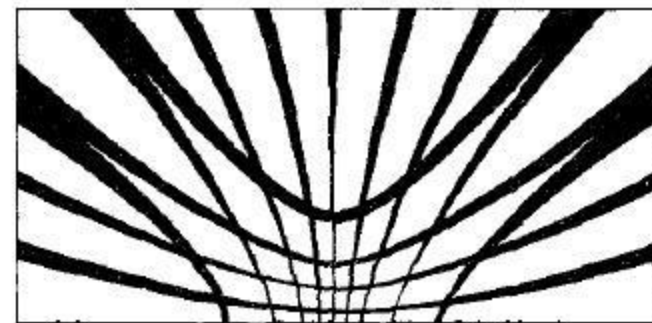
$(n \cdot \sin u) : (n' \cdot \sin u') = \nu$ для любого значения U от нуля до максимального, ограниченного входным зрачком объектива.

где n, n' – показатели преломления; ν – увеличение объектива.

Тестовые решетки Аббе

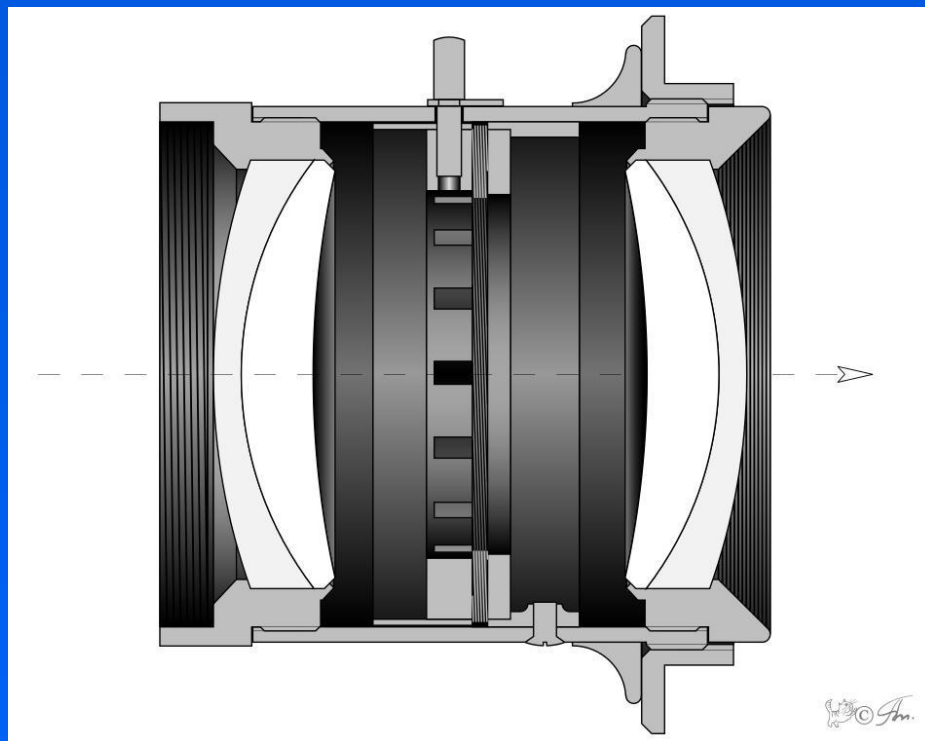


лучать одинаковые приращения. Тогда и приращения параметра C , как это видно из (18.4), также будут одинаковыми. Следовательно, если рис. 70 поместить на расстоянии q перед передней апланатической точкой P , то гиперболы изобразятся в виде квадратной сетки прямых. При $\omega^2 = 1/2(1 - A^2)$ уравнение (18.2) переходит в



Решетка располагается на расстоянии несколько сантиметров от объектива. При выполнении условия синусов, глаз видит ее изображение через диафрагму в виде прямоугольной сетки.

Апланатический объектив



Простейший апланатический фотообъектив, состоящий из двух пар склеенных ахроматических линз, разделенных диафрагмой, позволяет значительно уменьшить хроматическую aberrацию, сферическую aberrацию и кому.

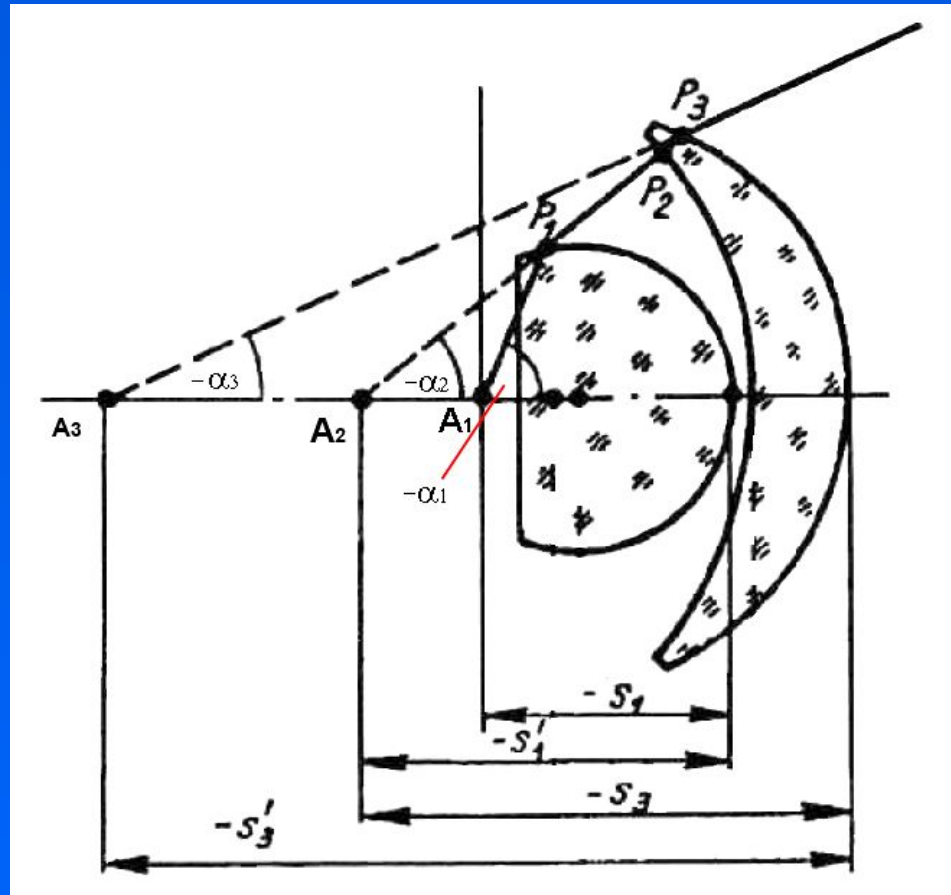
Апланатическая система

Важным элементом в практической оптике являются так называемые апланатические системы, в которых законы геометрической оптики удаётся совместить с выполнением условия синусов для элемента поверхности в окрестности одной точки на оси системы (телескоп) или для пары сопряжённых поверхностей (микроскоп).

Апланатические системы изображают без аберраций широким пучком лучей окрестность такой точки. Примером апланатической системы является сфера с коэффициентом преломления n и радиусом R . Точки, лежащие на сферах радиусов nR и R/n , изображаются друг в друга без аберраций. Точки поверхности с радиусом nR мнимые, т.е. в них пересекаются не лучи, а их продолжения.

Апланатические свойства сферы используются при конструировании объективов микроскопов (фронтальная линза объективов с большим увеличением представляет собой полусферу), где существенна большая апертура пучков, а положение предмета может быть фиксировано.

Апланатический объектив Амичи

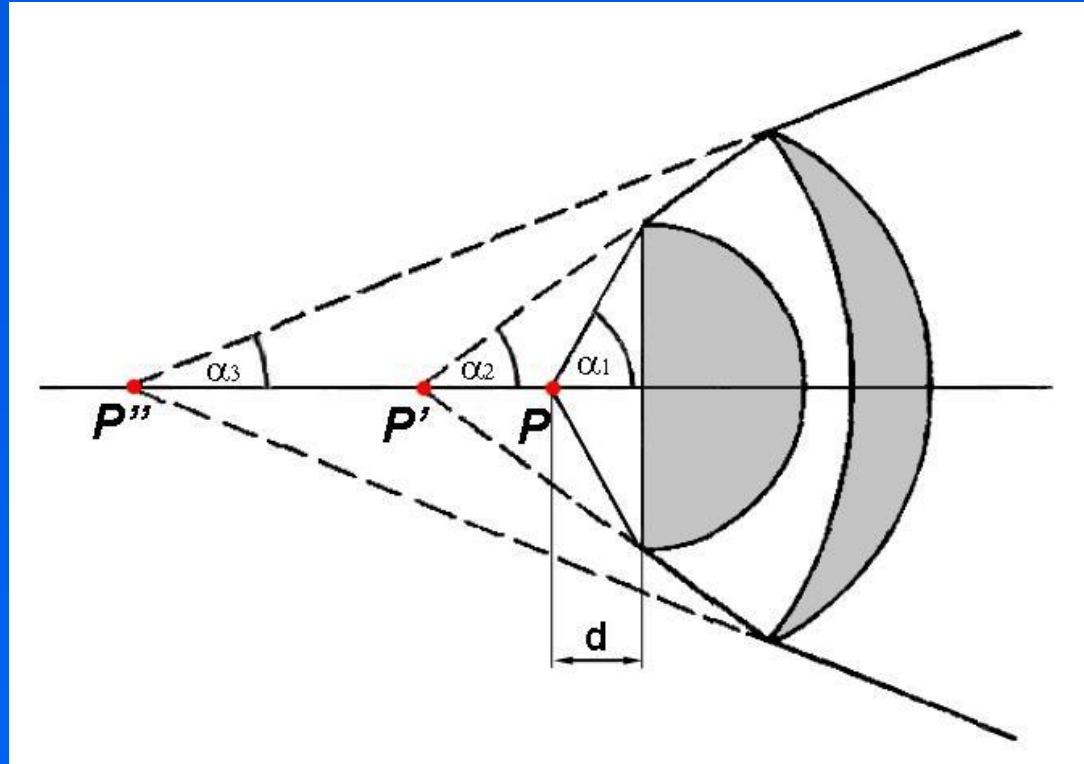


Препарат располагается в передней апланатической точке (A_1) полусферической фронтальной линзы на расстоянии $d=R/n$ от ее плоской поверхности. Между препаратом и линзой находится иммерсионная жидкость. Первая поверхность преломления (P_1) – задняя поверхность сферической линзы.

Вторая и третья поверхности преломления находятся на менисковой линзе.

В результате кажущееся положение предмета ($A_2 - A_3$) удаляется, и мы уменьшаем угол наблюдения предмета, что позволяет приблизиться к выполнению условия синусов.

Апланатический объектив большого увеличения



Препарат располагается в передней апланатической точке (P) полусферической фронтальной линзы на расстоянии $d=R/n$ от ее плоской поверхности.

R – радиус линзы, n – показатель преломления стекла.

Расходящийся пучок света от фронтальной линзы дополнительно собирается менисковой линзой.

P' – кажущееся положение объекта для сферической линзы; P'' – кажущееся положение объекта для пары сферической и менисковой линз.

Условие формирования безабберационного изображения объективом

Максимальное исправление aberrаций в микроскопе достигается только для одной плоскости, когда объект находится в передней апланатической точке объектива, и оптические среды между препаратом и фронтальной линзой объектива по своим показателям преломления соответствуют расчетным параметрам объектива.

Для гомогенной масляной иммерсии толщина покровного стекла не имеет значения, если препарат заключен в канадский бальзам. Для препаратов, находящихся в водной среде толщина покровного стекла и толщина препарата имеют критическое значение.

Устранение aberrаций в объективе микроскопа

Строгая центровка всех линз в оптической системе – все объективы собираются и тестируются вручную.

Продольная юстировка оптической системы – условие апланатизма выполняется одновременно для всей системы линз.

Ограничение оптических пучков – диафрагмы.

Комбинации линз с различной дисперсией – ахроматы.

Введение асферических линз и применение специальных сортов стекла (бездисперсионных).

В современных микроскопах часть aberrаций компенсируется промежуточной линзой.

Остаточные аберрации объективов для микроскопа

Ахромат – хроматическая аберрация для синего и красного света; сферичность поля зрения.

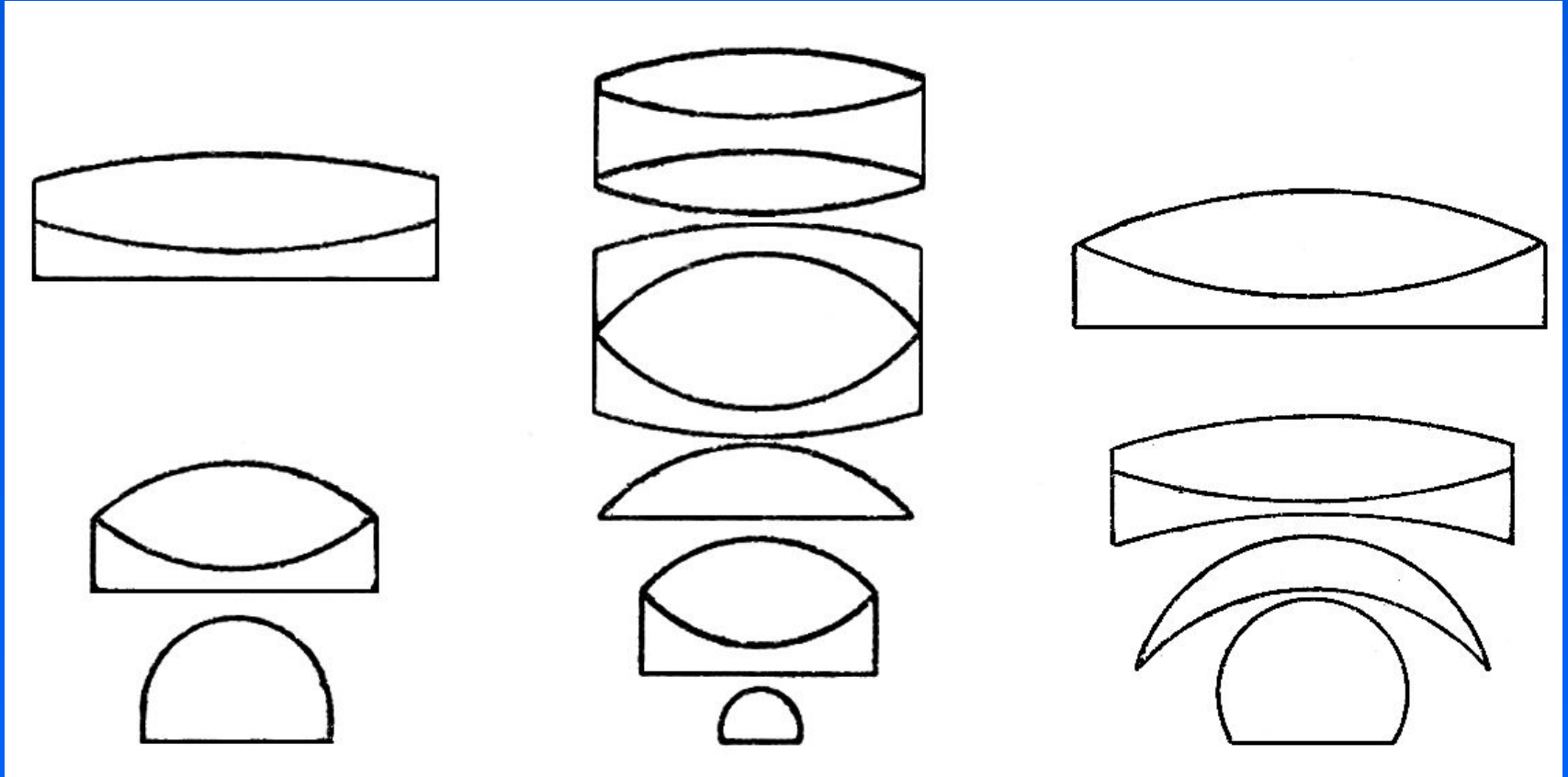
Апохромат – хроматическая разность увеличений; сферичность поля зрения, остаточная хроматическая аберрация для сине-фиолетового и дальнего красного света.

Флюоритовый объектив – небольшая хроматическая аберрация для синего и красного света; сферичность поля зрения.

Планапохромат – остаточные аберрации в апланатической точке практически отсутствуют, но объектив очень «чувствителен» к толщине покровного стекла и показателю преломления иммерсионного масла.

УФ (кварцевый) – значительные аберрации в видимой области спектра.

Объективы большого увеличения (разрез)



**Ахромат
сухой**

**Апохромат
сухой**

**Иммерсионный
ахромат**

Микроскопические объективы

Компенсация хроматических aberrаций для апохроматического объектива требует значительного количества промежуточных линз.

Поэтому часто применяются системы так называемых полуапохроматов – объективов, в которых используется флюорит, за счет чего достигается значительное (хотя и неполное) исправление хроматических aberrаций при меньшем числе линз.

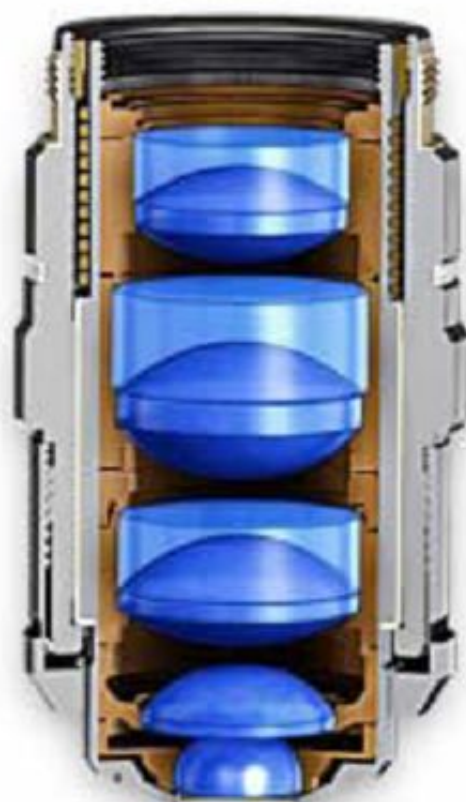
Флюоритовые объективы имеют большее светопропускание и увеличенный, по сравнению с апохроматами, рабочий отрезок.

Типы объективов

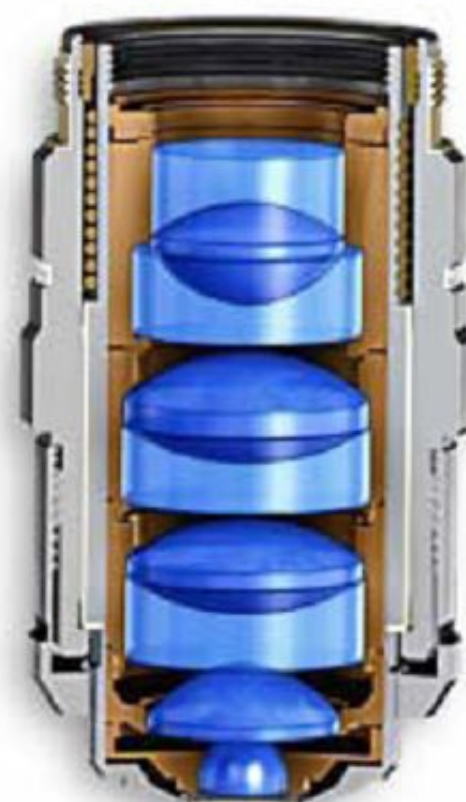
Achromatic Objective



Fluorite Objective



Apochromatic Objective



Типы объективов для микроскопа

Ахромат (510-580 нм)

Апохромат (450-660 нм) -- Apo

Флюоритовый объектив -- Fl

Планахромат -- Plan

Планапохромат -- PlanApo

Супер планапохромат – компенсация для 5 точек спектра (от 405 до 700 нм)

Планфлюорит -- PlanFluor

УФ (кварцевый, 280 нм) -- UV

Маркировка объектива



Ограничение разрешающей способности объектива (лупы)

Полезное увеличение лупы ограничено кружком нерезкости, который обусловлен ее апертурой и аберрациями.

Величина кружка нерезкости зависит от размеров входного и выходного зрачков оптической системы.

В сложной оптической системе размеры кружка нерезкости могут быть уменьшены по сравнению с простой лупой путем комбинирования линз из различных сортов стекла.

Два подхода к борьбе с аберрациями: устранение их в широком пространстве изображений (фотообъектив) или на малом участке одной плоскости (объектив микроскопа).

Для объектива микроскопа существует единственный участок плоскости в пространстве предметов, перпендикулярный главной оптической оси, где аберрации в пространстве изображений данного участка минимальны.