ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Лекция 2.2 «Хроматические аберрации»

Хроматические аберрации появляются из-за того, что оптические системы изготовлены из оптических стекол с показателями преломления, зависящими от длины волны $n = n(\lambda)$, и приводят к тому, что в изображениях неокрашенных предметов появляется окрашенность.

8.3.1. Хроматизм положения

Хроматизм положения	**Вторичный хроматизм (вторичный спектр)**
Хроматизм положения– это аберрация, при которой изображения одной точки предмета расположены на разном расстоянии от оптической системы для разных длин волн.	
Разность положений плоскости изображениядля крайних длин волн: $\Delta S'_{\lambda_1-\lambda_2} = S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2}$	Разность положений изображения для центральной λ_0 и крайних (λ_1, λ_2) длин волн: $\Delta S_\lambda = \frac{S'_{\lambda_1} + S'_{\lambda_2}}{2} - S'_{\lambda_0}$

Принципы ахроматизации оптических систем

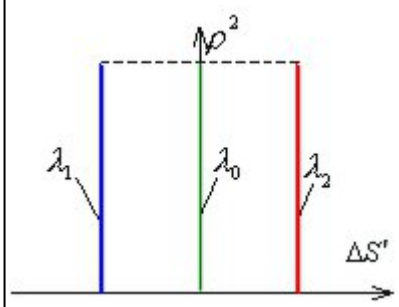
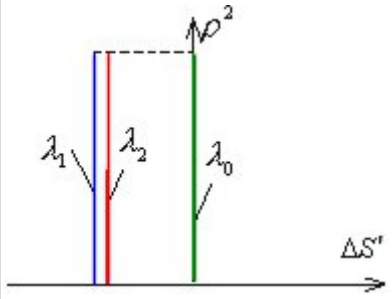
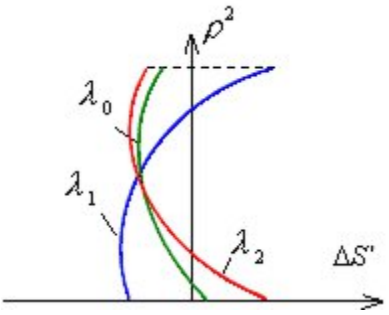
Хроматизм возникает в оптической системе, если все линзы сделаны из одного сорта стекла. В таком случае оптическая система **неахроматизована**.

Коррекция хроматизма может быть произведена двумя способами:

- использование зеркальных систем, где хроматизм в принципе отсутствует,
- использование в линзовых системах нескольких сортов стекла с различными коэффициентами дисперсии ν_e.

Задача ахроматизации сводится к тому, чтобы оптическая сила системы линз не зависела от длины волны. Если две тонкие линзы из разных сортов стекла расположить вплотную друг к другу, то получается тонкая система с оптической силой $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$. **Уравнение ахроматизации** для двух сортов стекла: $\begin{cases} \Phi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \cdot \Phi \\ \Phi_2 = -\frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \cdot \Phi \end{cases}$ где ν_1, ν_2 –коэффициенты дисперсии стекла первой и второй линз.

Для исправления вторичного спектра требуется не меньше трех сортов стекла с различной общей дисперсией относительной частной дисперсией (такие системы называются **апохроматы**). Если при коррекции хроматизма используется еще больше стекол, то такая система называется **суперапохроматом**.

Продольный хроматизм первого порядка		**Хроматизм сферической аберрации 3 и 5 порядка**
 *неахроматизированная система*	 *ахроматизированная система*	

8.3.2. Хроматизм увеличения

Хроматизм увеличения– это аберрация, при которой увеличение оптической системы зависит от длины волны. Вследствие этого вместо изображения точки образуется цветная полоска.

Абсолютный хроматизм увеличения	**Относительный хроматизм увеличения**:
Первичный спектр - разность величины изображения для крайних длин волн	
$\Delta y'_{xp} = y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}$	$\Delta_{xp}(\%) = \frac{y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} \cdot 100\%$
Вторичный спектр- разность величины изображения для центральной и крайних длин волн	
$\Delta y'_{xp2} = \frac{y'_{\lambda_1} + y'_{\lambda_2}}{2} - y'_{\lambda_0}$	$\Delta_{xp2}(\%) = \left(\frac{y'_{\lambda_1} + y'_{\lambda_2}}{2y'_{\lambda_0}} - 1\right) \cdot 100\%$

Хроматизм увеличения измеряется в тех же единицах, что и величина изображения: для ближнего типа– в миллиметры, длядального типа– в угловой мере.

Если в системе исправлен первичный хроматизм увеличения, то это **ахромат по хроматизму увеличения**, если исправлен вторичный хроматизм увеличения, то это **апохромат по хроматизму увеличения**, если хроматизм увеличения не исправлен, то это **неахромат по хроматизму увеличения**.

Как уже было показано, ход лучей в реальной оптической системе и строение пучков значительно отличаются от того, которое имеет место в идеальной системе. В результате реальные оптические системы дают изображение, лишь более или менее приближающееся к идеальному. В связи с этим необходим критерий оценки, по которому можно судить о степени приближения реальной системы к идеальной и который оценивается качеством изображения.

Напомним три условия Максвелла для геометрически совершенной системы:

1) все лучи, вышедшие из точки предмета O(x,y) и прошедшие через данную систему, должны сойтись в точке изображения I(x', y');

2) каждый элемент плоскости, нормальной к оптической оси и содержащей точку O(x,y), должен быть изображен элементом плоскости, нормальной к оптической оси и содержащей точку I(x',y');

3) высота изображения h' должна быть пропорциональна высоте предмета h, причем коэффициент пропорциональности должен быть постоянным независимо от местоположения точки O(x, y) в плоскости предмета.

Отклонения от первого условия и называются ***аберрациями*** или (в общем случае) искажениями изображения. Отклонения второго типа соответственно ***кривизна поля и изображения*** и отклонения ***третьего рода называемого дисторсией.***

Итак, ***Аберрации*** - это погрешности изображений, обусловлены отклонениями лучей от тех направлений, по которым они должны были бы идти в идеальной оптической системе.

Геометрические и волновые аберрации — это отклонения от первого условия Максвелла. ***Геометрические аберрации*** описывают смещения (относительно геометрически идеальных положений) точек пересечения лучей с поверхностью изображения. ***Волновые аберрации характеризуют*** OPX для каждого луча относительно того же параметра для главного луча.

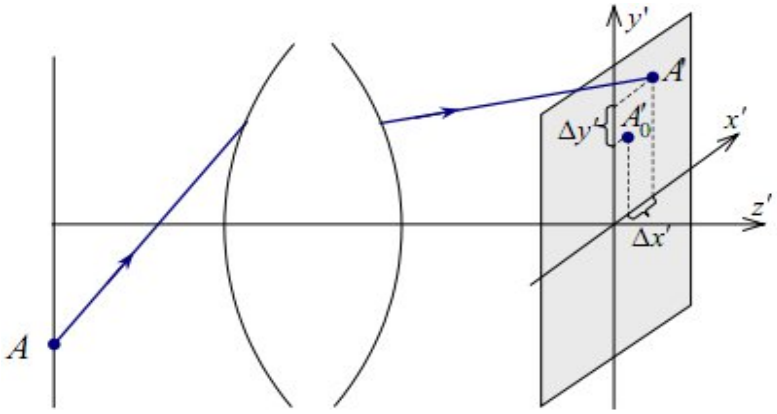
Геометрические аберрации подразделяются на классы в зависимости от их порядка: 1-го порядка , 3-го порядка, 5-го порядка и т. д.

Разные типы аберраций не одинаково влияют на качество изображения. В рамках введенных Линфутом критериев оценки качества изображения аберрации, обладающие круговой или ортогональной симметрией, влияют на «структурное содержание» изображения, но не на его «правдоподобие». Асимметричные же аберрации даже в пределах допуска с точки зрения критерия структурного содержания сильно влияют на правдоподобие изображения. Такое понимание влияющих факторов, исходя из конечных целей использования данной системы, весьма существенно, поскольку в процессе расчета объектива возможна взаимная

компенсация отдельных типов аберраций. Различия же во влиянии разных типов можно показать уже на примере аберраций 1-го и 3-го порядков.

Аберрации оптических систем делят на монохроматические и хроматические:

- ***Монохроматическими аберрациями*** называют погрешности изображения, которые имеют место для лучей определенной длины волны. К ним относятся: сферическая, кома, астигматизм и кривизна изображения, дисторсия.
- ***Хроматические аберрации*** - при прохождении через преломляющие поверхности излучения сложного спектрального состава оно разлагается на составные спектральные части вследствие дисперсии света. В этом случае изображение представляет собой сумму большого числа монохроматических изображений, которые не совпадают между собой ни по положению, ни по размерам. Изображение становится окрашенным.

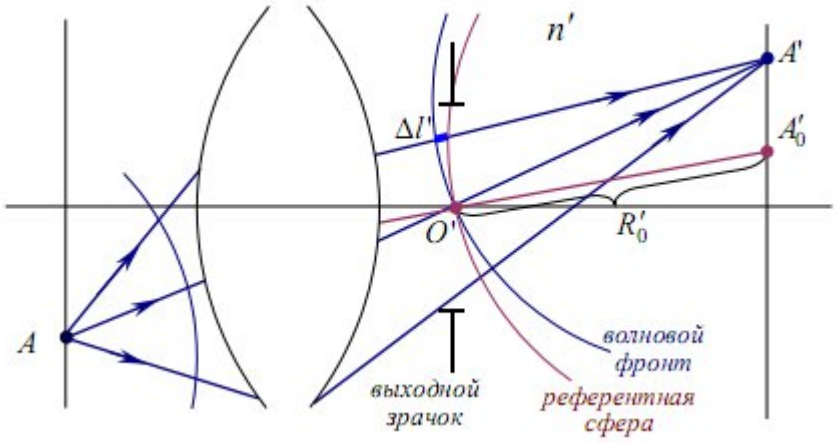


Поперечные аберрации (Δx′Δy′)-это отклонение координат точки $A^{/}$ пересечения реального луча с плоскостью изображения от координат точки $A_0^{/}$ идеального изображения в направлении, перпендикулярном оптической оси (рисунок 30).

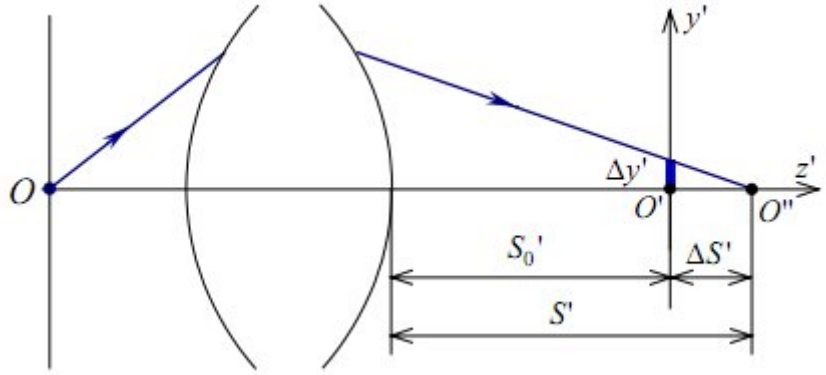
Поперечные аберрации

Волновая аберрация –это отклонение реального волнового фронта от идеального, измеренное вдоль луча в количестве длин волн.

$w = \frac{\Delta L' N'}{\lambda}$	(18)



Поперечные аберрации

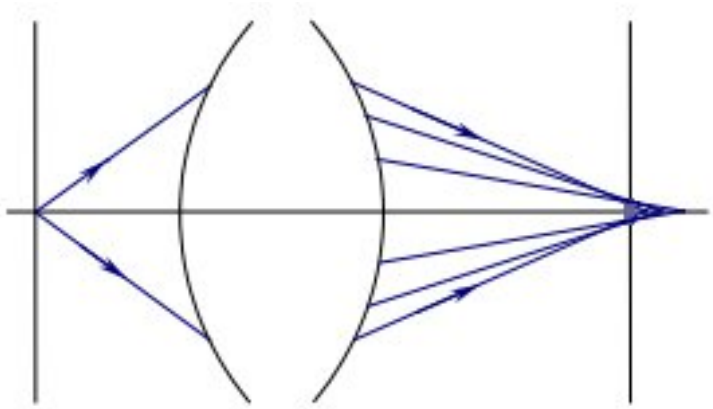


Референтная сфера –это волновой идеального пучка с центром в точке идеального изображения $A_0^{/}$, проходящий через центр выходного зрачка $O^{/}$.

Продольные аберрации — это отклонения координаты точки $O^{//}$ пересечения реального луча с осью от координаты точки $O^{/}$ идеального изображения вдоль оси.

Поперечные аберрации

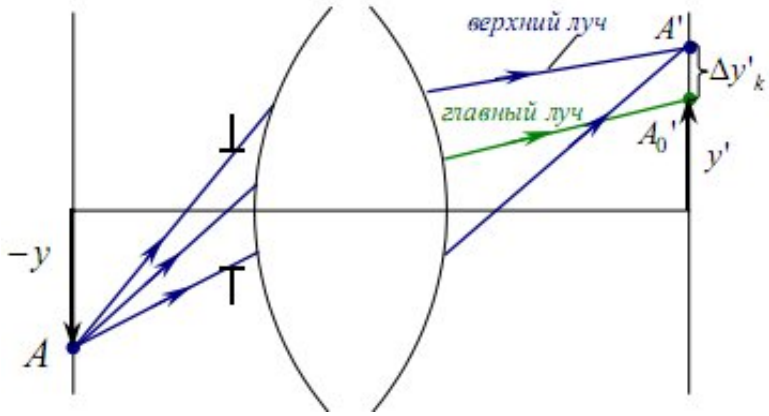
Все вышеперечисленные аберрации — это разные формы представления одного явления. При оценке качества изображения за исходную модель аберрационных свойств оптической системы берут волновую аберрацию. Однако если аберрации велики то целесообразно использовать для оценки качества изображения поперечные аберрации.



Сферическая аберрация 3 порядка **-** приводит к тому что лучи, выходящие из осевой точки предмета, не пересекаются в одной точке, образуя на плоскости идеального изображения кружок рассеяния. В простых положительных линзах она отрицательна, а в отрицательных положительна.

Сферическая аберрация 3 порядка.

Сферическая аберрация 5 порядка - по характеру искажения гомоцентричности пучка лучей сферическая аберрация 5 порядка полностью аналогична сферической аберрация 5 порядка, только имеет более высокий порядок кривых на графиках поперечной и продольной аберраций. В сложных системах сферические аберрации 3и 5 порядков имеют разные знаки и могут компенсировать друг друга.

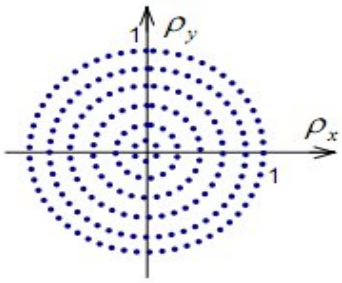


Кома (в пер. с гр.-хвост)- проявляется при смещениях точки предмета с оси.

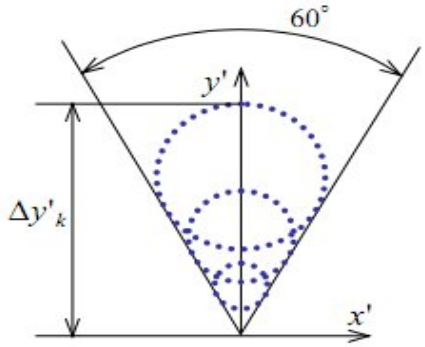
В первом приближении кома прямо пропорциональна смещению предмета с оптической оси. Таким образом, поперечная аберрация при наличии комы прямо пропорциональна величине предмета.

$\Delta y'_к \approx \delta \cdot y$	(19)

Кома



а) плоскость зрачка



б) плоскость изображения

Где δ - коэффициент пропорциональности, определяющий качество аберрационной коррекции оптической системы, чем оно меньше тем лучше.

Кома точечная диаграмма

Разобьём на точечной диаграмме лучей зрачок на множество площадок и рассмотрим лучи, проходящие через эти центры этих площадок. В результате получим картину лучей, равномерно распределённых по зрачку. В плоскости изображения при коме мы получим вторую картинку.

Изопланатизм - в окрестности оси оптической системы нет комы, но есть сферическая аберрация.

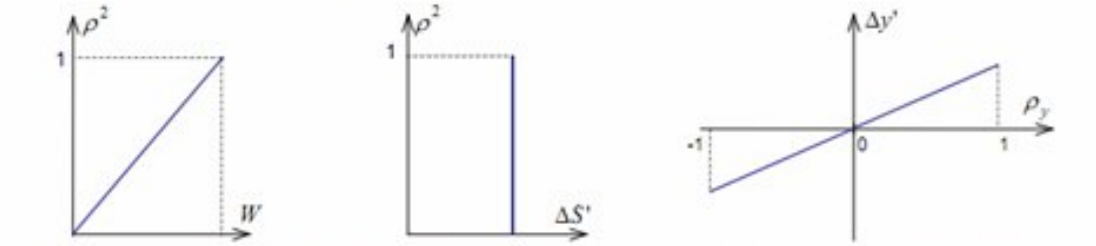
Апланатизм – нет ни комы, ни сферической аберрации. (Идеальное изображение разных точек предмета. Возможно только для какой-то части предмета в окрестностях оптической оси).

На рисунке приведены графики в зрачковых канонических координатах, рассмотренных выше аберрации и их компенсации.



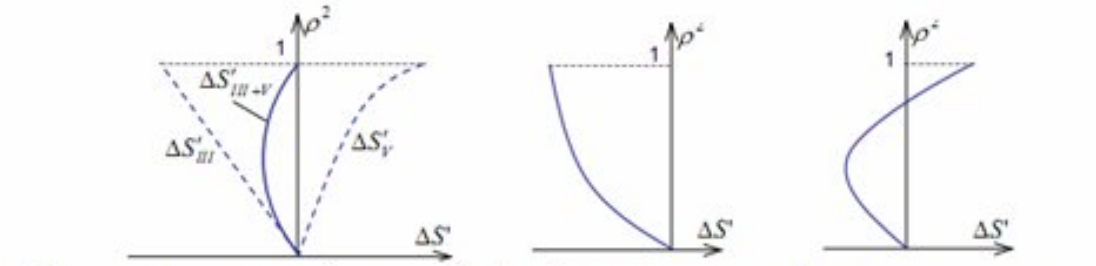
а) волновая аберрация *б) продольная аберрация* *в) поперечная аберрация*

Графики аберраций для сферической аберрации 3 порядка.



а) волновая аберрация *б) продольная аберрация* *в) поперечная аберрация*

Графики аберраций для расфокусировки.



Взаимокомпенсация сферической аберрации 3 и 5 порядков. *а) недоисправленная сферическая* *б) переисправленная сферическая*



а) меридиональное сечение *б) сагиттальное сечение.*

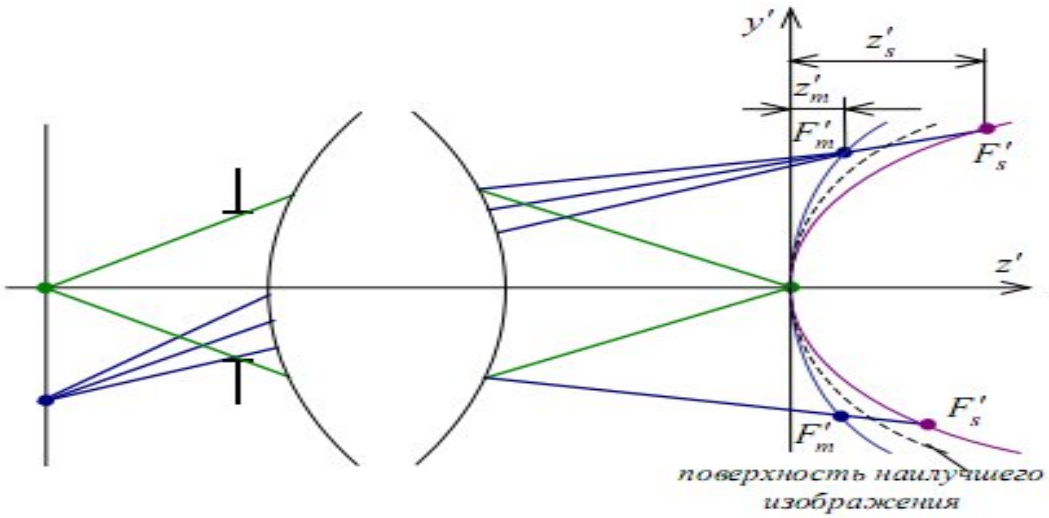
Поперечные аберрации при коме 3 порядка.

Графики аберраций

Астигматизм и кривизна изображения.

Астигматизм- заключается в том, что не совпадаю точки фокусов в меридиональной F'_m и сагиттальной F'_S плоскостях, поэтому лучи бесконечно узкого пучка не сходятся в одной точке

Кривизна- искривленная поверхность с наилучшим изображением.

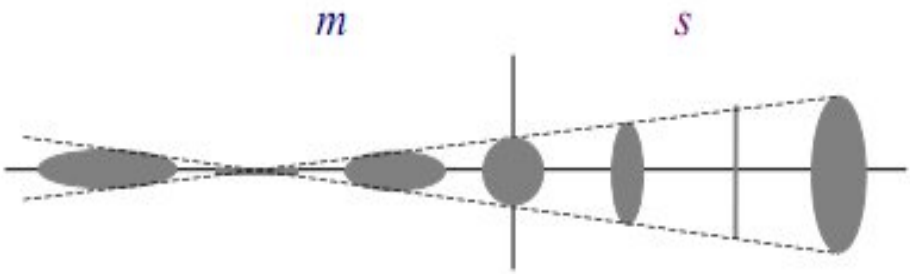


Астигматизм и кривизна изображения

Количественно астигматизм и кривизна характеризуются продольными ***астигматическими отрезками*** Z'_m и Z'_s .

Средняя кривизна определяется полусуммой астигматических отрезков и указывает положение наилучшего изображения для данного пучка.

$\Delta_{кр} = \frac{Z'_m - Z'_s}{2}$	(20)

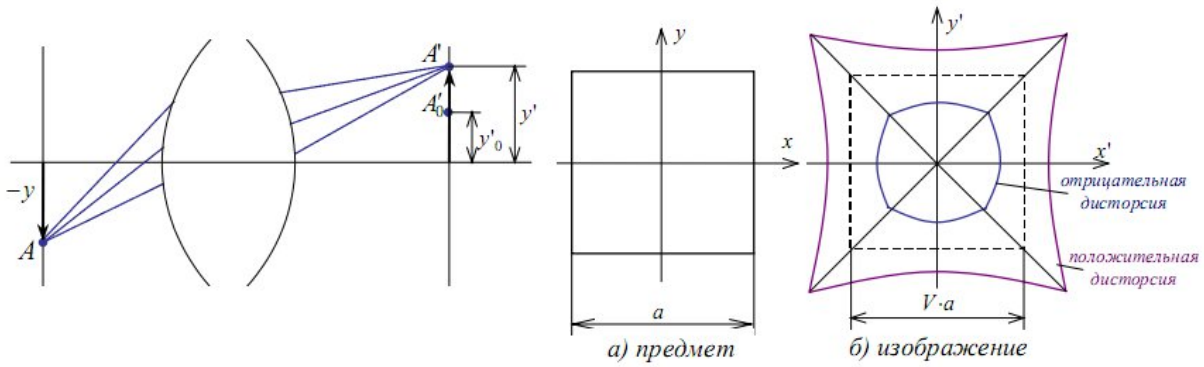


Пятна рассеяния астигматического пучка

Как показано на рисунке в зависимости от положения плоскости изображения пятно рассеяния может принимать различные формы.

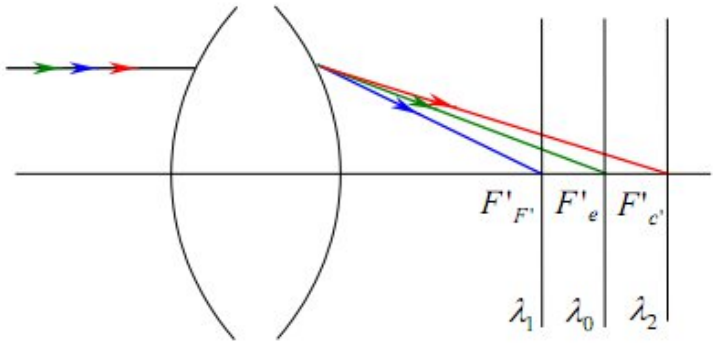
Дисторсия (от лат. Искажение)-если других аберраций нет, то точка изображается в виде точи смещённой от положения идеальной.

Наличие дисторсии приводит к искажению прямых линий, не проходящих через ось. Если квадратный предмет изображается в виде подушки, то это положительная дисторсия, если квадрат имеет выпуклые стороны, то это отрицательная дисторсия.



Дисторсия

Рассмотрим 2 основных вида хроматических аберраций, хроматизм положения и хроматизм увеличения.

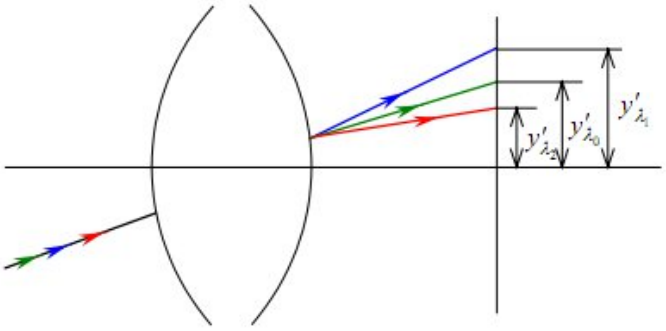


Хроматизм положения- изображения одной точки предмета расположены на разном расстоянии от оптической системы для разных длин волн.

Хроматизм положения

Устранение хроматизма осуществляется двумя способами:

- Использование зеркальных систем, где он отсутствует;
- Использование в линзовых системах несколько сортов стекла с различными коэффициентами дисперсии.



Хроматизм увеличения- аберрация при которой увеличение зависит от длинны волны.

Ахромат- исправлен первичный хроматизм увеличения.

Апохромат- исправлен вторичный хроматизм увеличения.

Неахромат- хроматизм увеличения не исправлен.