



Спецкурс ОСФИ

Лекция 7

06 апреля 2011

Основы фотографической оптики

Алексей Игнатенко, к.ф.-м.н.

Лаборатория компьютерной графики и
мультимедиа ВМК МГУ

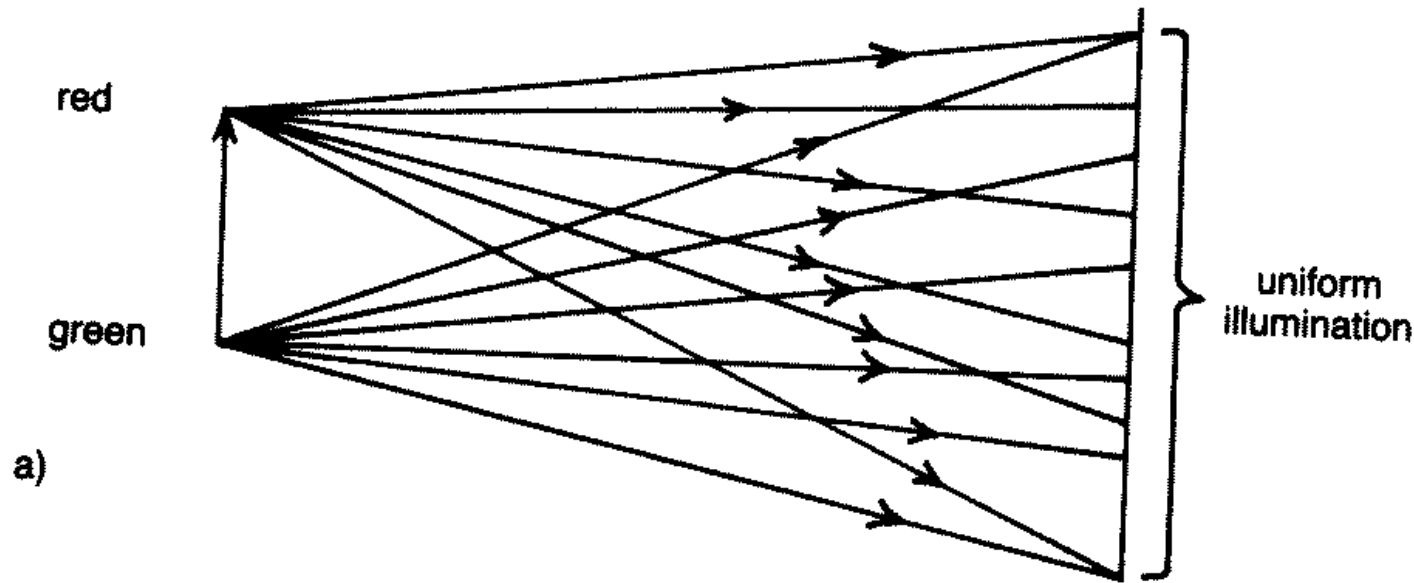
Цель

- Научиться моделировать фотокамеру
- Разбираться в терминологии соответствующей области

План лекции

- Принципы построения изображений с помощью оптических систем
- Геометрическая оптика. Сферические поверхности.
- Линзы. Формула тонкой линзы
- Аберрации. Монохроматические и хроматические аберрации
- На следующей лекции:
 - Гауссовы системы. Системы из набора линз.
 - Диафрагмы и зрачки оптической системы.
 - Поле зрения. Размеры сенсоров.
 - Глубина резкости. Глубина фокуса.
 - Экспозиция. F-число. Закон обратимости.
 - Фотографические линзы: фокус, зум
 - Расчет изображения на матрице фотоаппарата

Как построить изображение? Надо убрать лишний свет

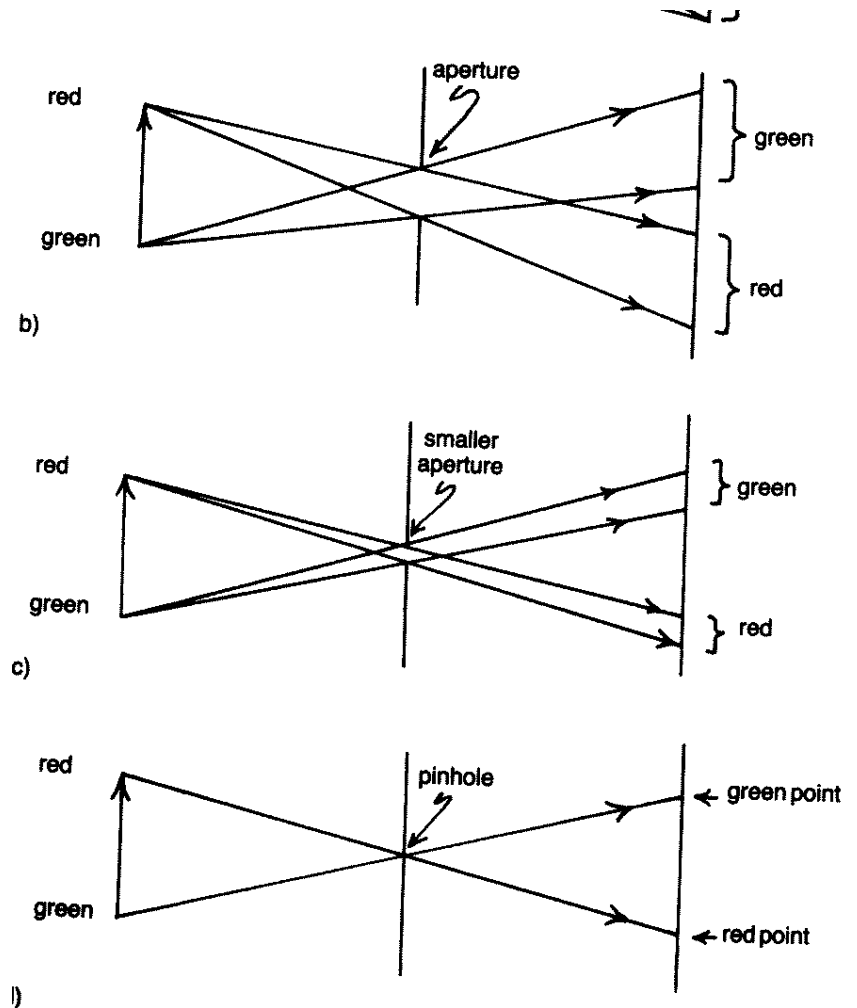


Способы убирания лишнего света:

- Минимизация размытия
- Фокусировка лучей

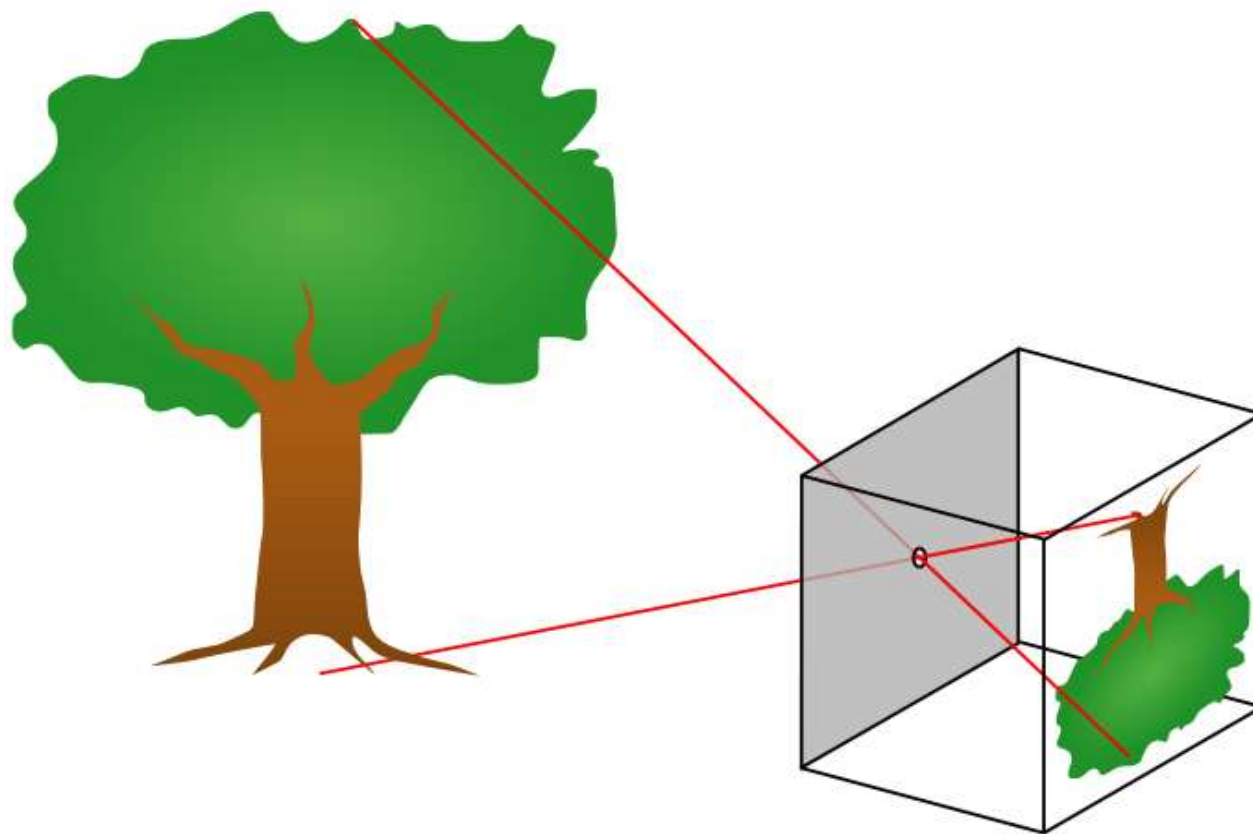
Как построить изображение? Убираем лишние лучи – получаем pinhole-камеру

- Получили резкое изображение

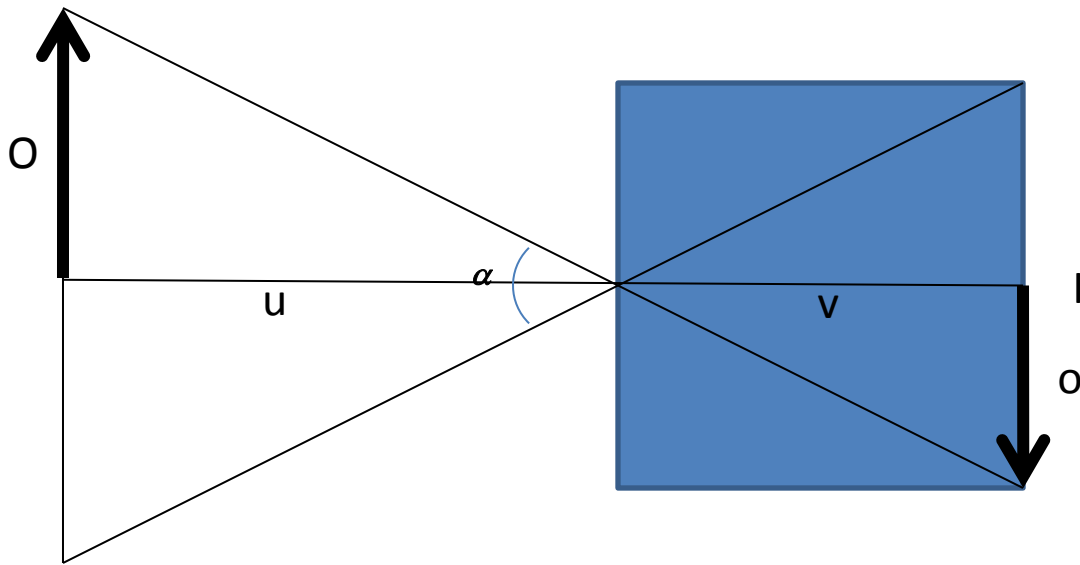


Pinhole-камера

Ящик, на задней стенке пленка



Геометрия pinhole-камеры



$$\alpha = 2 \arctan \frac{I}{2v} \quad m = \frac{O}{O} = \frac{v}{u}$$

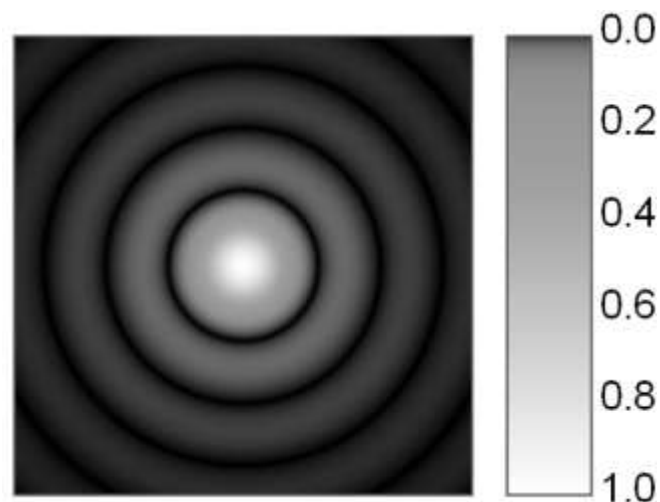
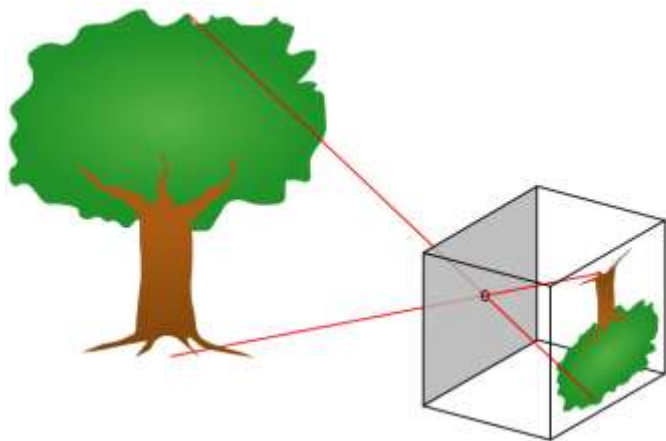
Pinhole: плюсы и минусы

Плюсы:

- Одинаковая резкость для точек на разных расстояниях
- Нет нелинейных искажений

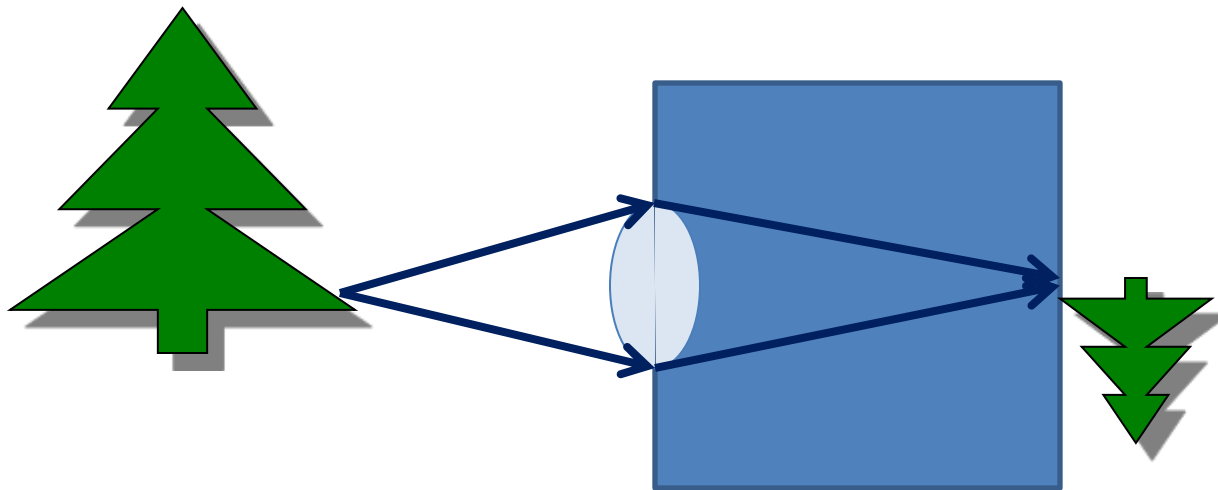
Минусы:

- Из-за дифракции невозможно достичь максимальной резкости
- Очень мало света, нужна большая чувствительность принимающего элемента



Как построить изображение? Напрямую проходит мало света, хочется увеличить «дырку» и оставить резкое изображение

Выход – линзы.



Далее переходим к обсуждению оптики, нам надо понимать, как работают линзы, чтобы уметь правильно рассчитывать свет и моделировать оптические системы фотоаппарата и глаза

Геометрическая оптика

- Рассматриваются лучи
- Луч – линия или кривая перпендикулярная фронту волны

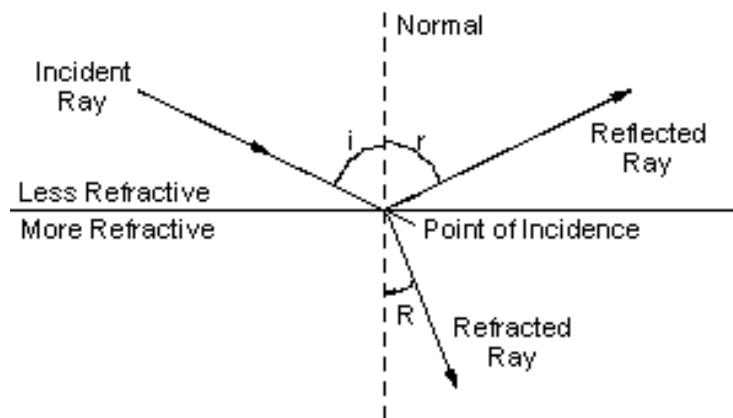
Основные положения геометрической оптики

- Закон прямолинейного распространения света
- Закон независимого распространения лучей
- Закон отражения света
- Закон преломления света (Закон Снелла)
- Закон обратимости светового луча

Преломление. Закон Снелла.

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_o)} = \frac{n_2}{n_1}$$

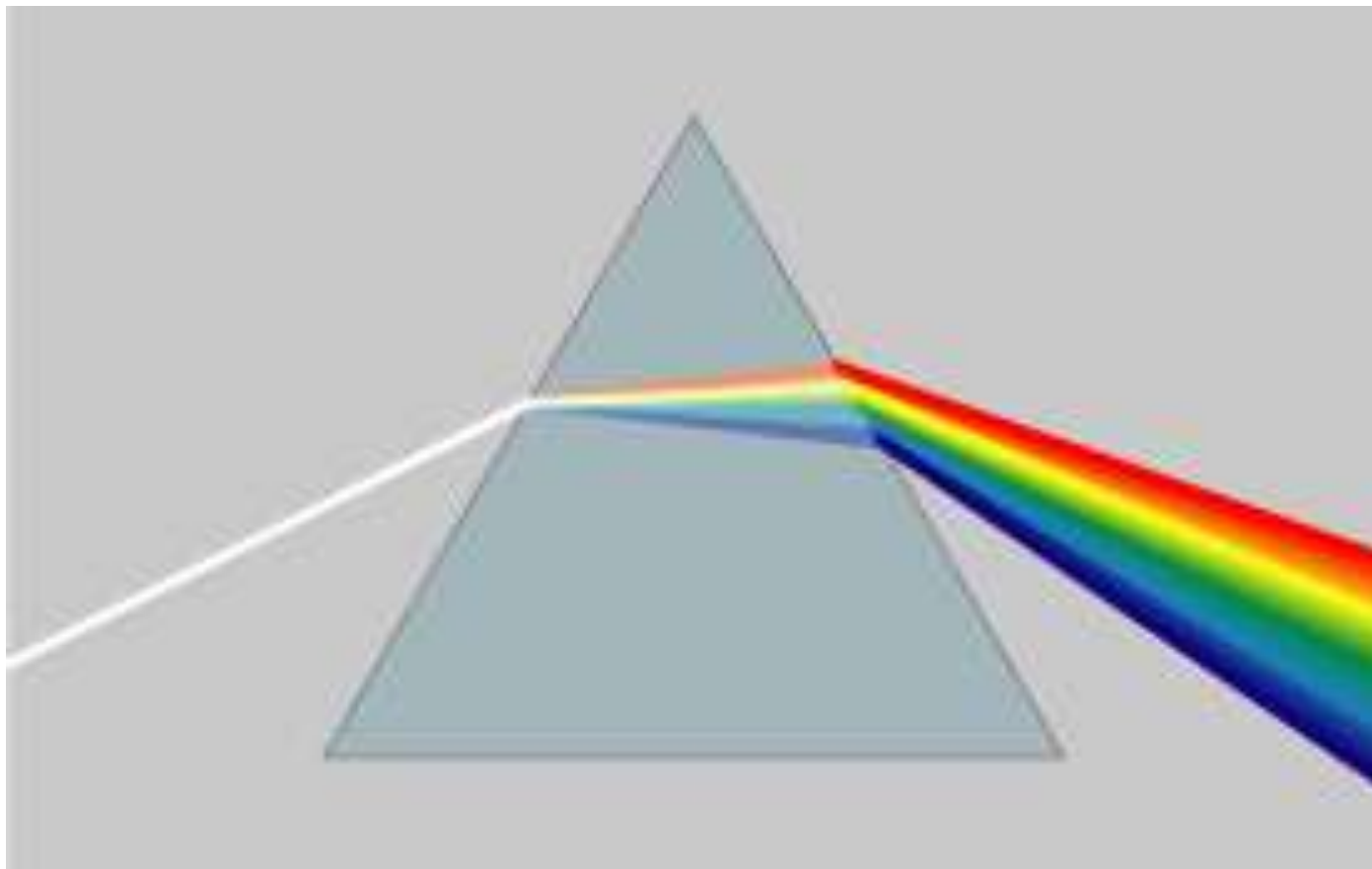
$$\sin(\theta_o) = \sin(\theta_i) \frac{n_1}{n_2}$$



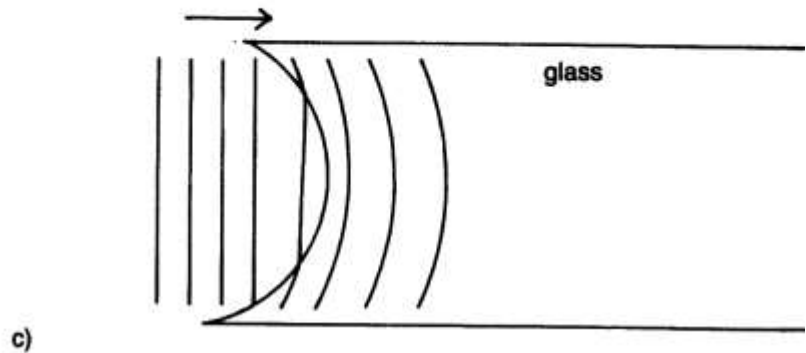
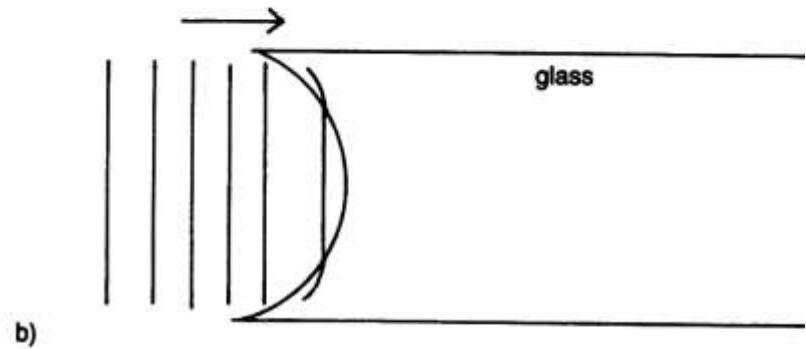
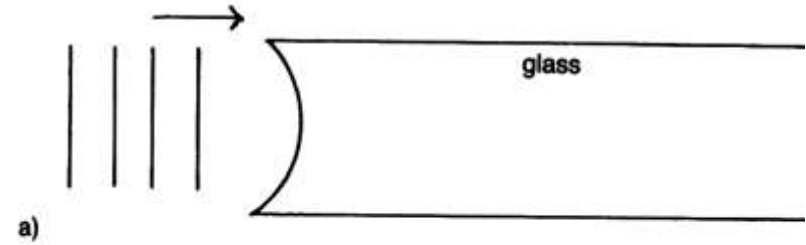
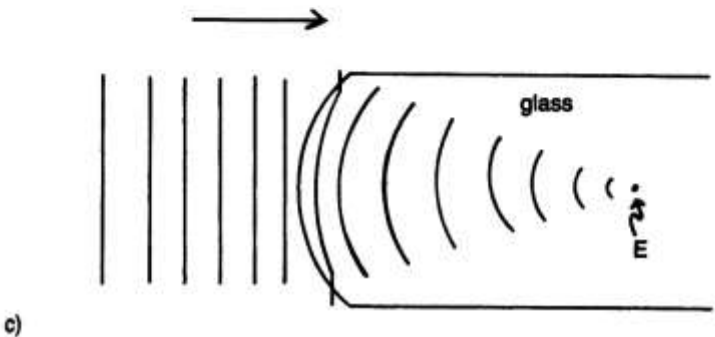
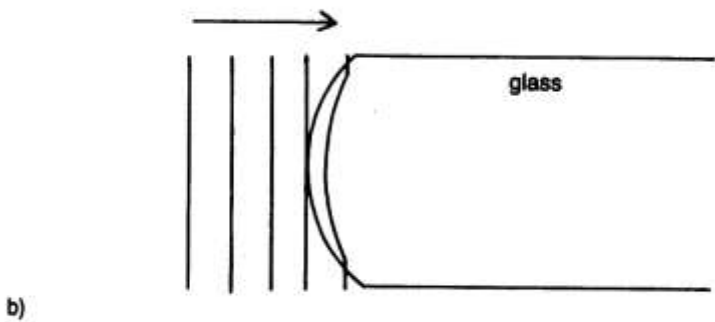
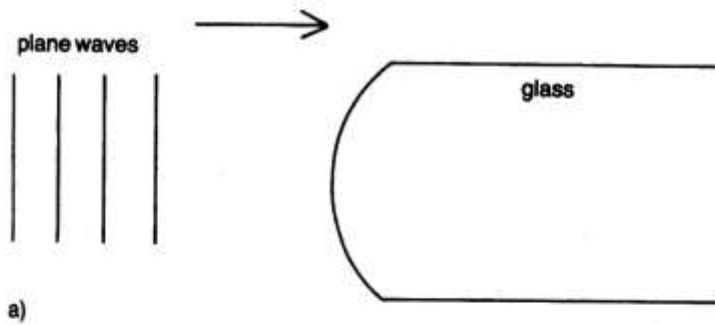
Среда	Коэффициент преломления
Вакуум	1.0
Воздух	1.0002
Стекло	1.5
CZ	2.17
Алмаз	2.42



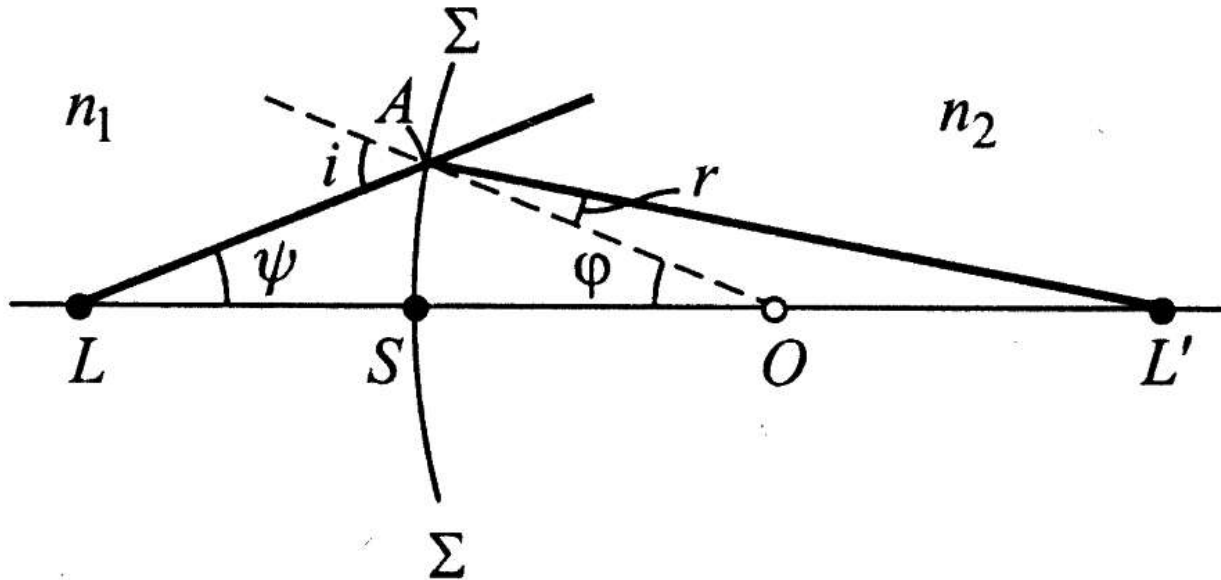
Дисперсия



Сферические поверхности. Как это работает?



Преломление и отражение на сферической поверхности

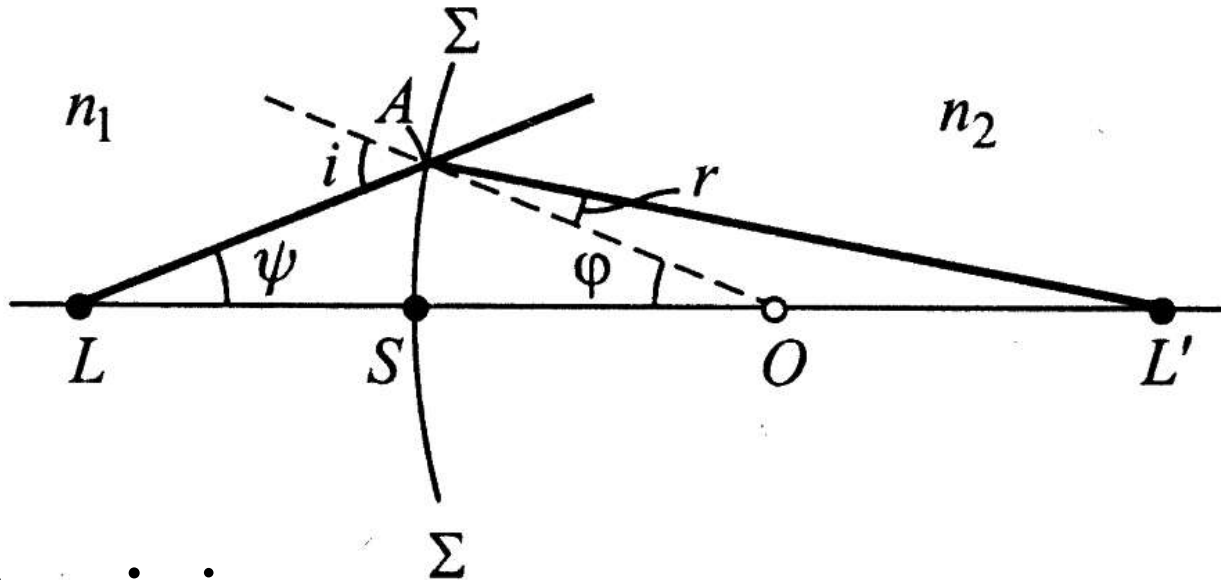


$$LS \approx LA$$

$$L'S \approx L'A$$

Параксиальный пучок
(приосевой)

Преломление и отражение на сферической поверхности

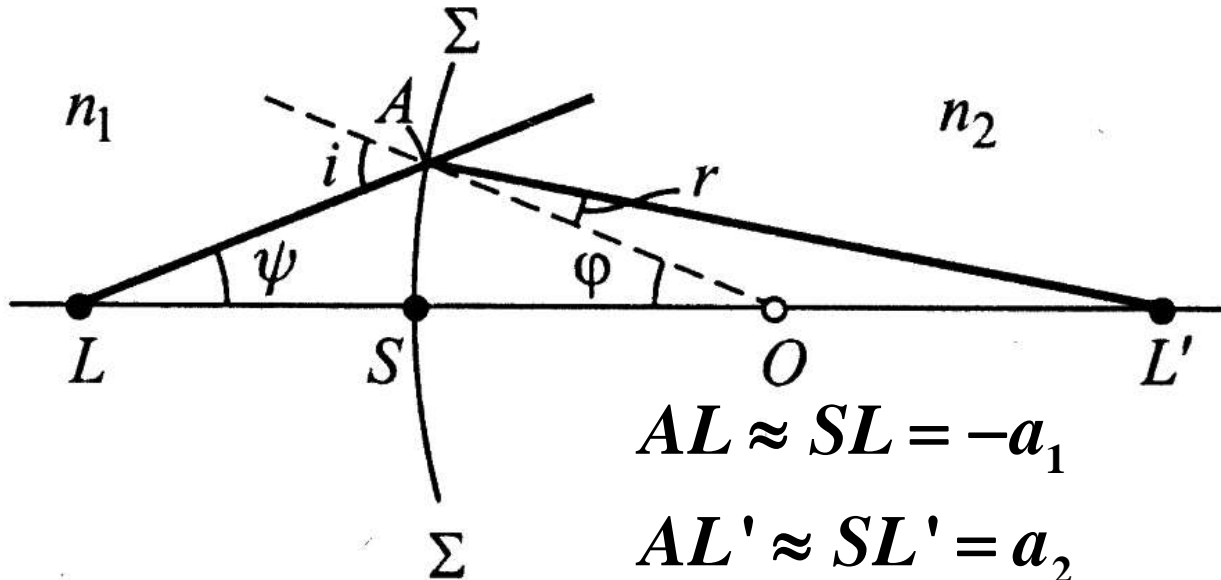


$$\frac{LO}{LA} = \frac{\sin i}{\sin \phi}$$

$$\frac{AL'}{OL'} = \frac{\sin \phi}{\sin r}$$

$$\frac{LO}{LA} \frac{AL'}{OL'} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Преломление и отражение на сферической поверхности



$$AL \approx SL = -a_1$$

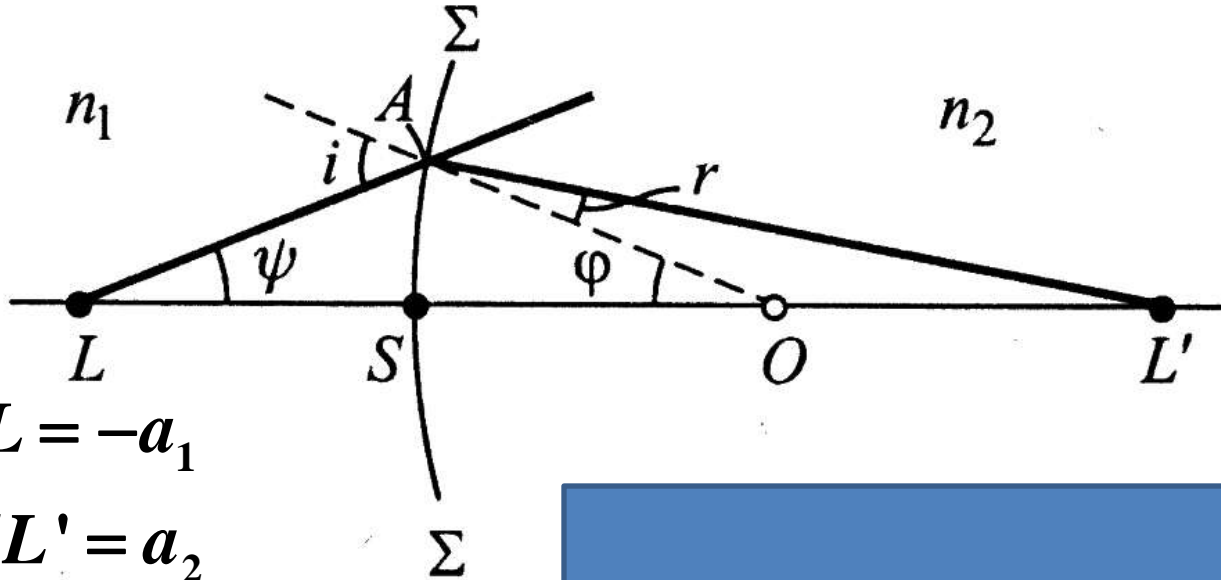
$$AL' \approx SL' = a_2$$

$$OS = R$$

$$\frac{LO}{LA} \frac{AL'}{OL'} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{-a_1 + R}{-a_1} \cdot \frac{a_2}{a_2 - R} = \frac{n_2}{n_1}$$

Преломление и отражение на сферической поверхности



$$AL \approx SL = -a_1$$

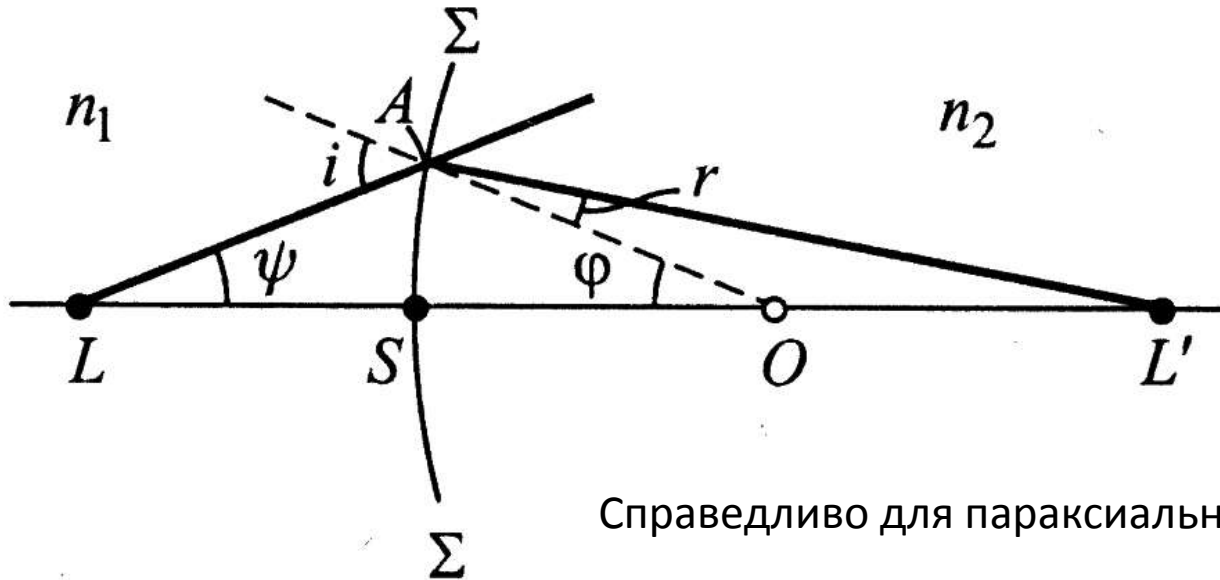
$$AL' \approx SL' = a_2$$

$$OS = R$$

$$\frac{-a_1 + R}{-a_1} \cdot \frac{a_2}{a_2 - R} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_1 - n_2}{R}$$

Преломление и отражение на сферической поверхности

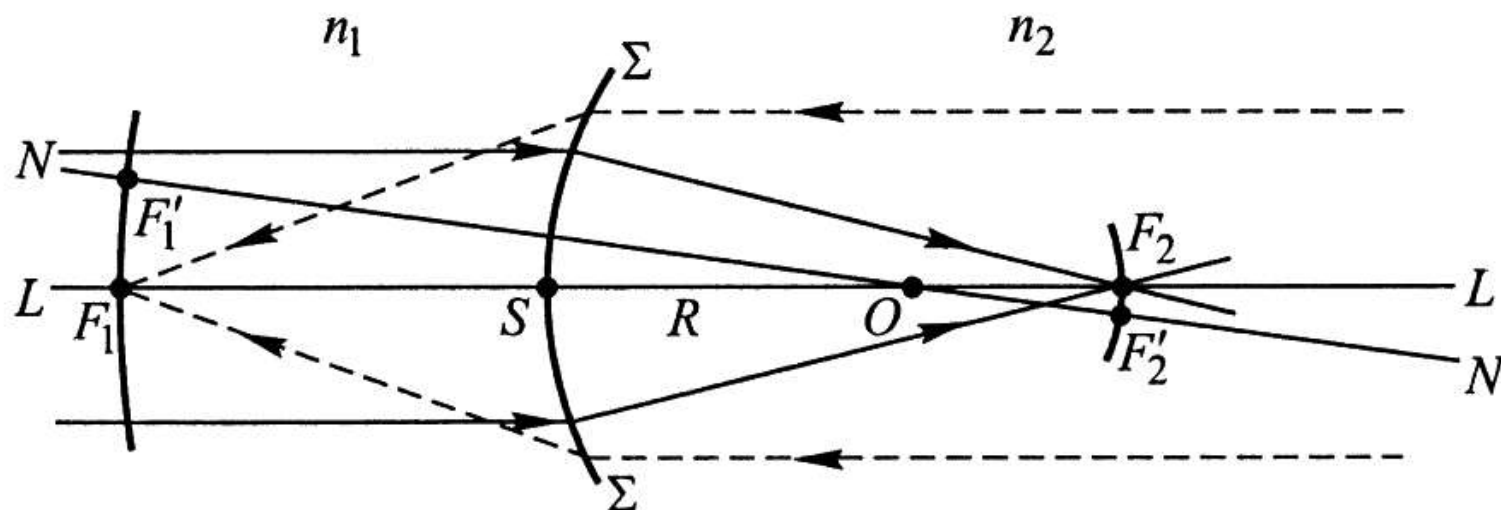


Справедливо для параксиальных пучков

a_2 зависит только от a_1 , т.е. все лучи пучка пересекают ось в одной точке!

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_1 - n_2}{R}$$

Фокусы сферической поверхности



при $a_1 = -\infty$

$$a_2 = \frac{n_2 R}{n_2 - n_1} = f_2$$

при $a_2 = \infty$

$$a_1 = -\frac{n_1 R}{n_2 - n_1} = f_1$$

f_1, f_2 – фокусные расстояния
(переднее и заднее)

Для всех параллельных лучей
образуется фокальные
поверхности

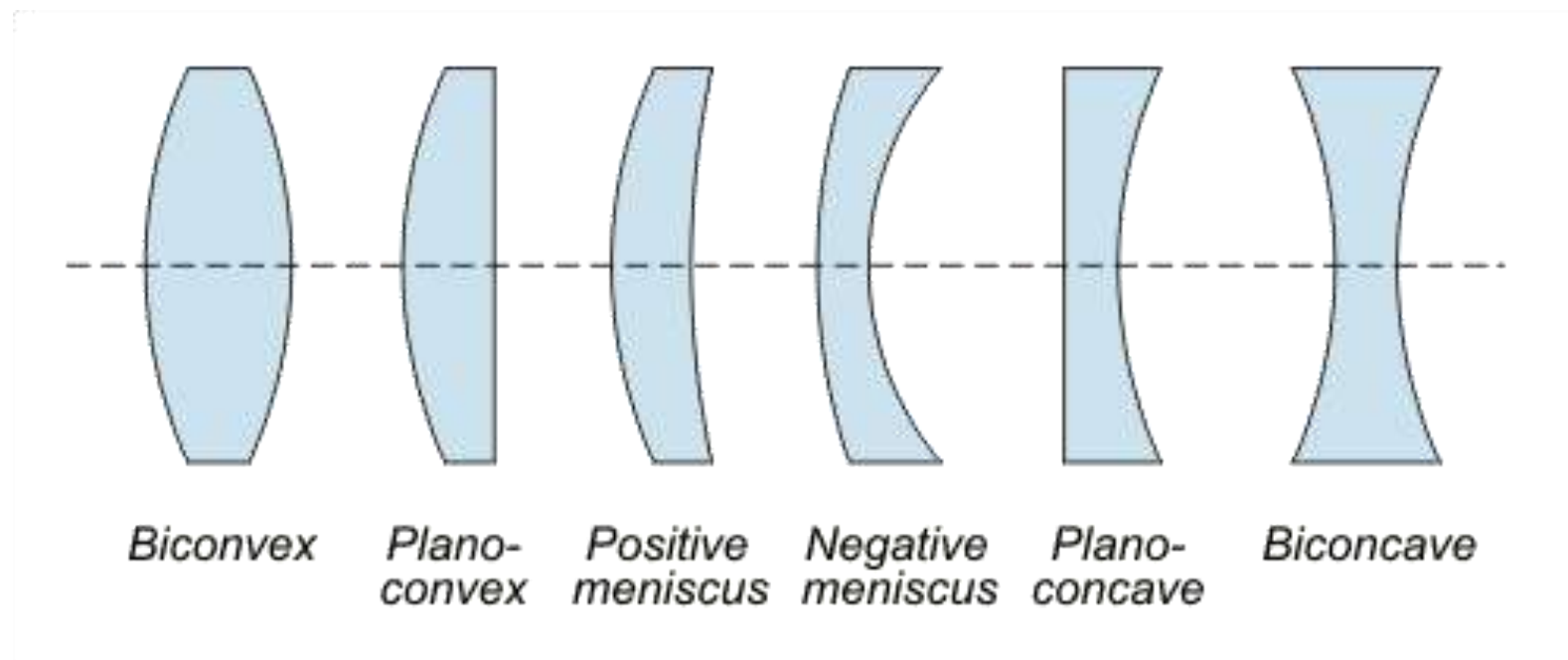
Около центральной оси
можно считать их плоскостями

Линза

- Большинство реальных преломляющих систем содержат по крайней мере две преломляющих поверхности
- Центрированная оптическая система – центры всех поверхностей лежат на одной прямой
- **Линза** -- центрированная оптическая система, состоящая из двух сферических поверхностей, ограничивающих прозрачный преломляющий материал

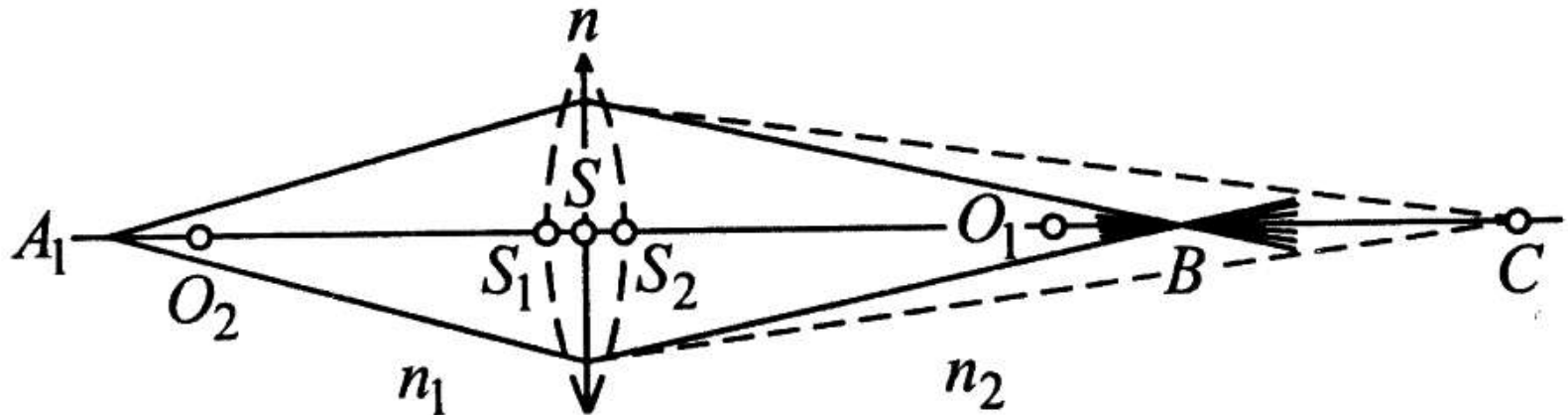


Примеры линз

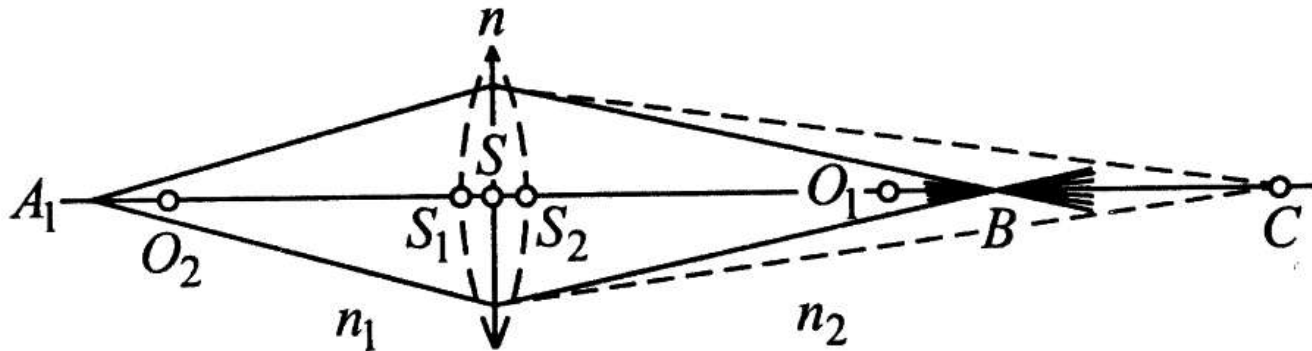


Тонкие линзы – математическое приближение линзы

- Линза имеет два радиуса кривизны R_1 и R_2
- Если толщина линзы мала по сравнению с радиусами ($d \ll R_1, d \ll R_2$), то будем считать, что точки S_1 и S_2 сливаются



Формула линзы – выводим из последовательности сферических поверхностей



Первая линзы даст изображение C на расстоянии a :

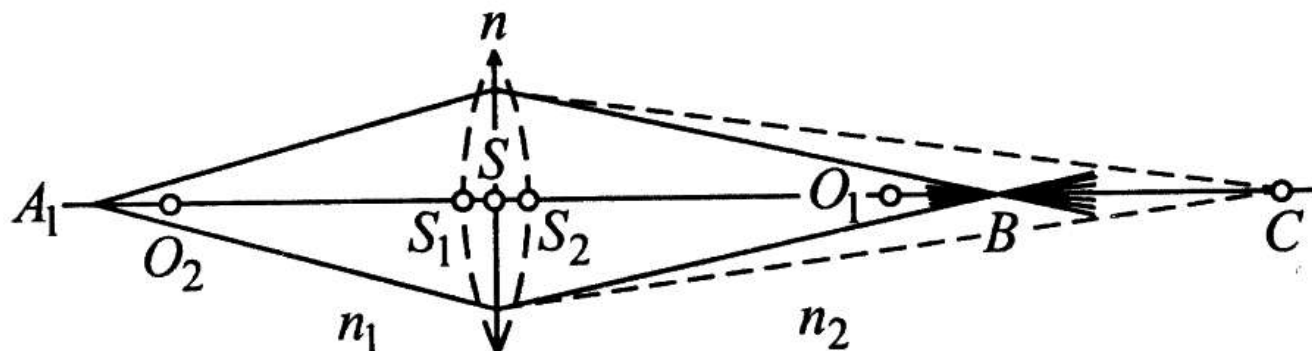
$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n}{a} = \frac{n_1 - n}{R_1}$$

Для второй линзы это будет мнимый источник света

Результат B на расстоянии a_2 :

$$\frac{n}{a} - \frac{n_1}{a_2} = \frac{n - n_1}{R_2}$$

Формула линзы



Складываем и получаем:

$$n_1 \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right) = (n - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Вводим относительный показатель преломления $N = \frac{n}{n_1}$:

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (N - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Фокусные расстояния линзы

- Для линзы **фокус** – точка схождения лучей бесконечно удаленного источника.
- **Фокусное расстояние** – расстояния от центра линзы до фокуса
- Лучи, не параллельные главной оси, пересекаются на **фокальной плоскости**

Значения фокусных расстояния линзы

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (N - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

При $a_1 = \infty$

$$a_2 = f_2 = \frac{1}{(N - 1)(1/R_1 - 1/R_2)}$$

При $a_2 = \infty$

$$a_1 = f_1 = -\frac{1}{(N - 1)(1/R_1 - 1/R_2)}$$

т.е. $f_1 = -f_2$

Для тонкой линзы переднее и заднее фокусные расстояния равны по значению, но отличаются по знаку.

Формула линзы – выводим через фокусное расстояние

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f}$$

Зная фокусное расстояние и точку, можно найти расстояние, на котором она будет сфокусирована линзой

Изображение, получаемое линзой



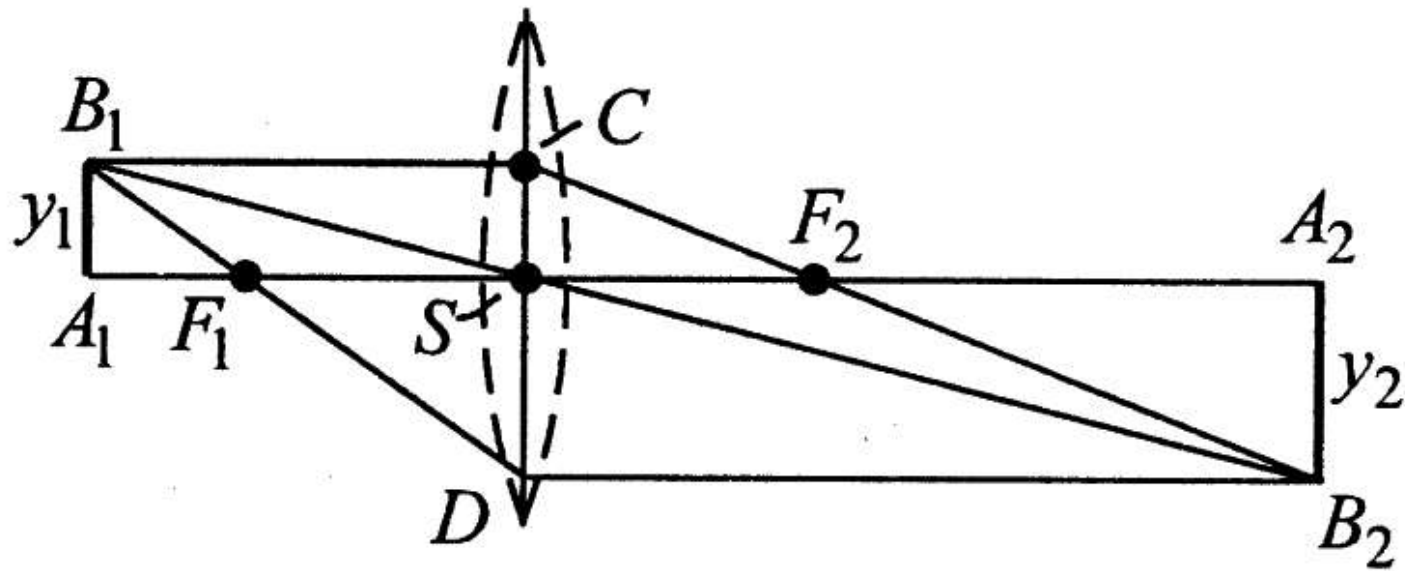
<http://neil.creek.name/blog/2008/03/11/projecting-light-with-a-magnifying-glass-p365-feb29/>

Фокусное расстояние и оптическая сила

- Оптической силой называется обратное заднее фокусное расстояние
- Пример: рассеивающая линза с фокусным расстоянием 20см ($1/5$ метра) имеет оптическую силу -5 диоптрий

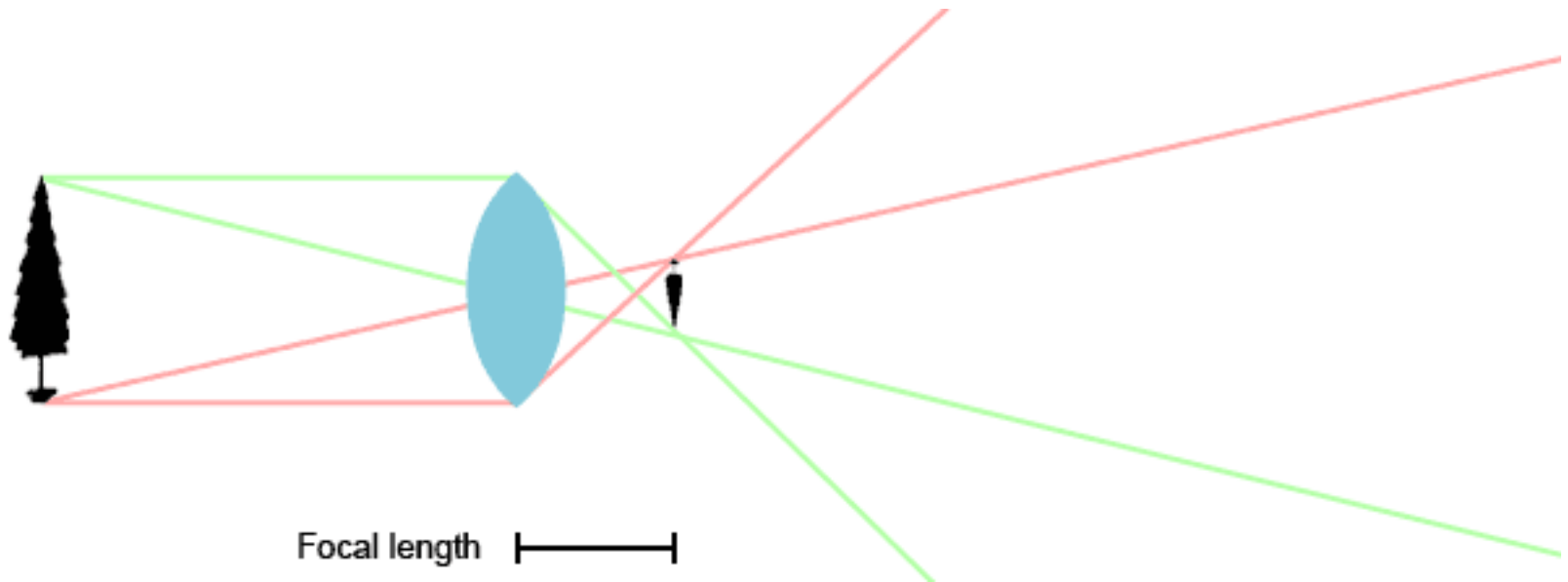
Изображение в тонкой линзе.

Увеличение.

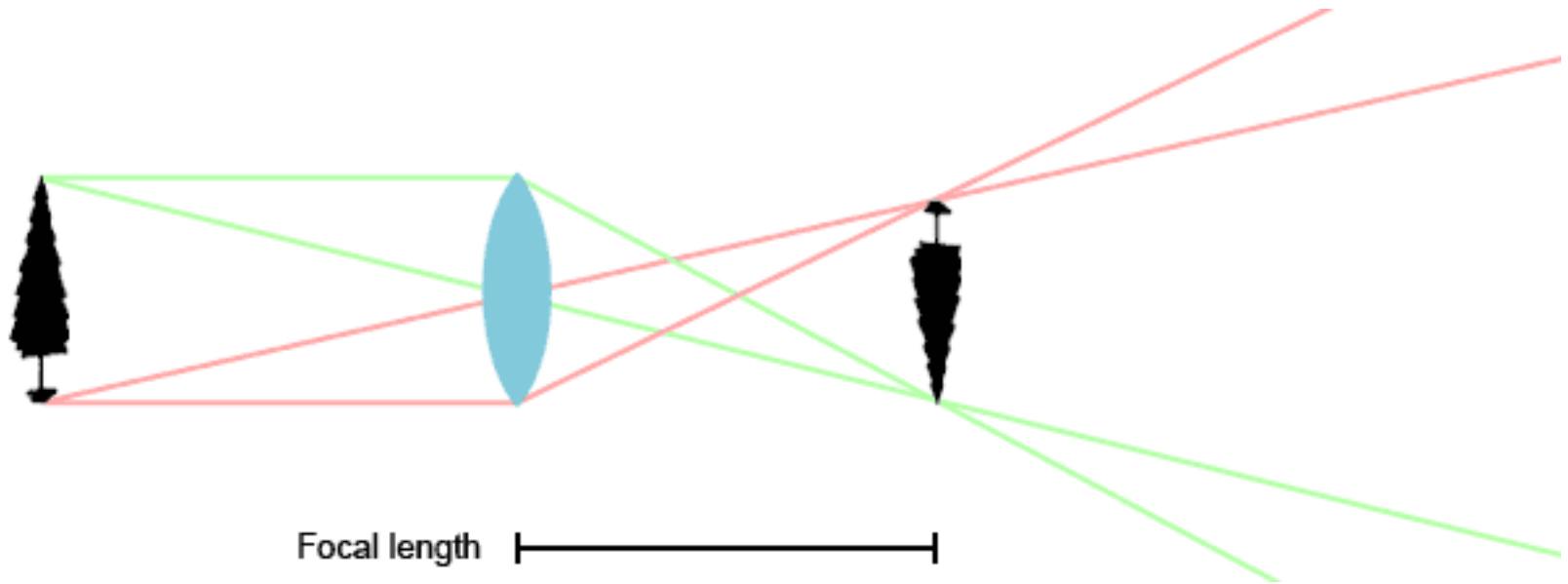


$$V = \frac{a_2}{a_1} = \frac{f}{a_1 + f} = \frac{1}{a_1 / f + 1}$$

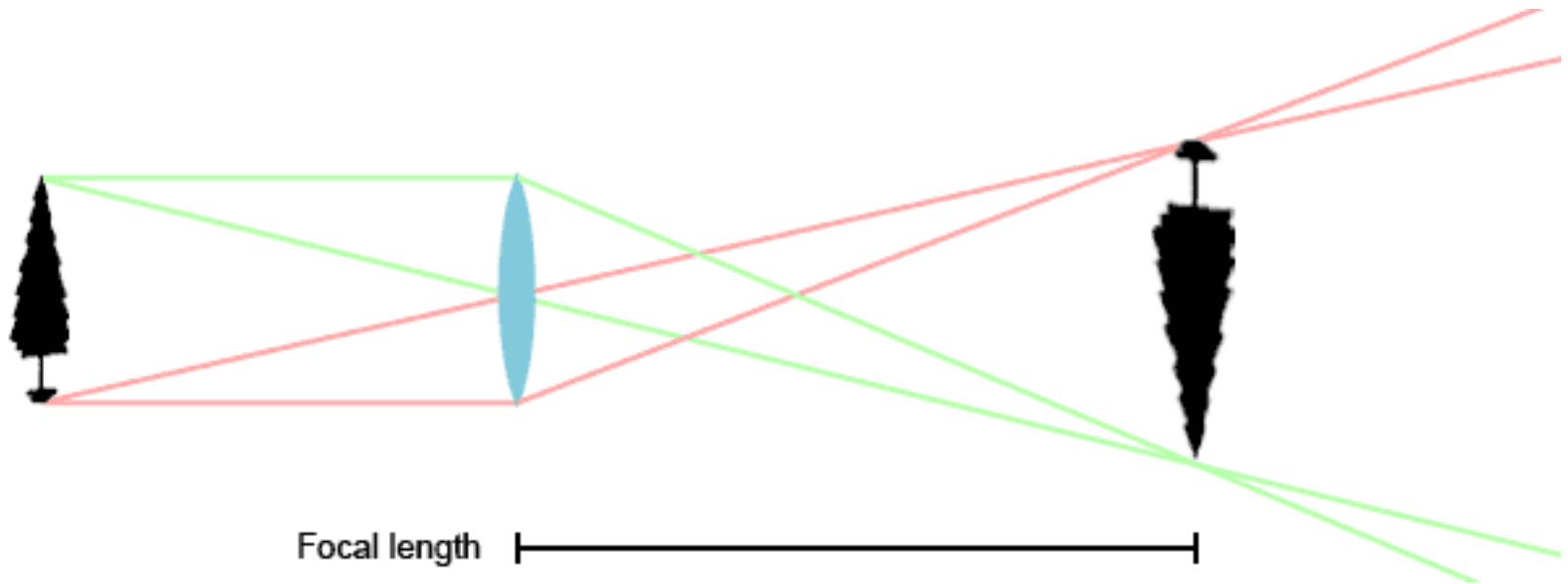
Пример увеличения для линз с разным фокусным расстоянием



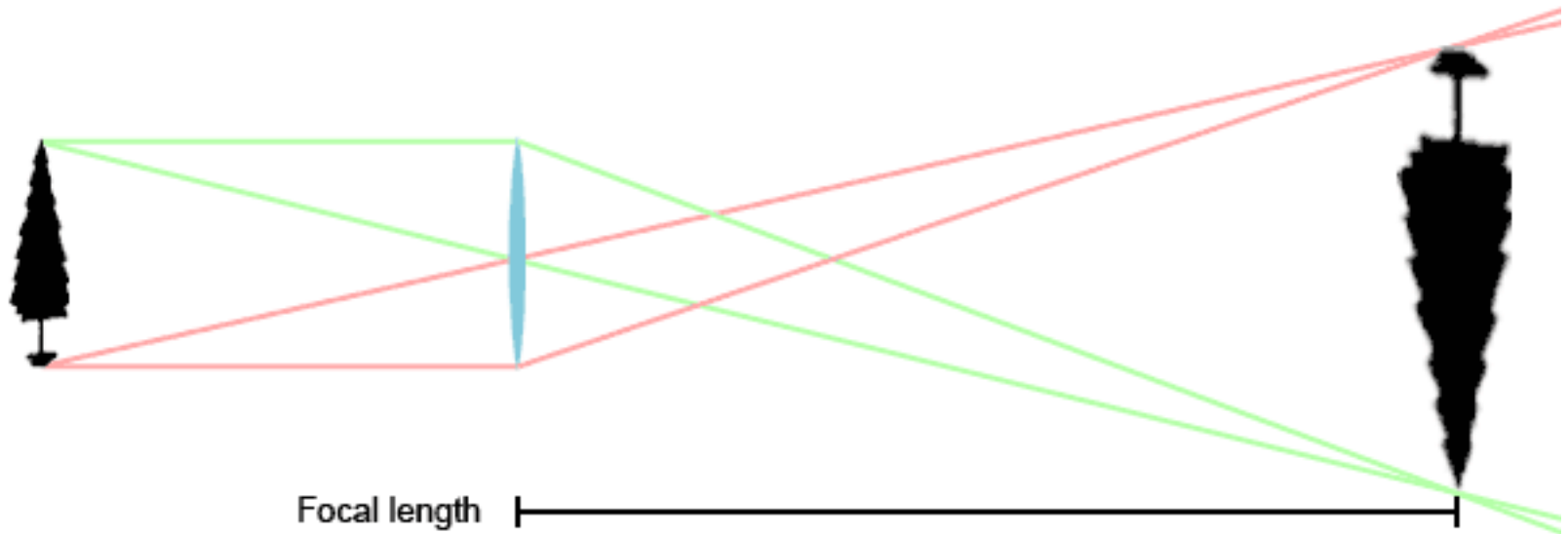
Пример увеличения для линз с разным фокусным расстоянием



Пример увеличения для линз с разным фокусным расстоянием



Пример увеличения для линз с разным фокусным расстоянием



Понятие об аберрациях

- **Аберрации оптических систем** — ошибки, или погрешности изображения в оптической системе
- Из-за отклонение луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе

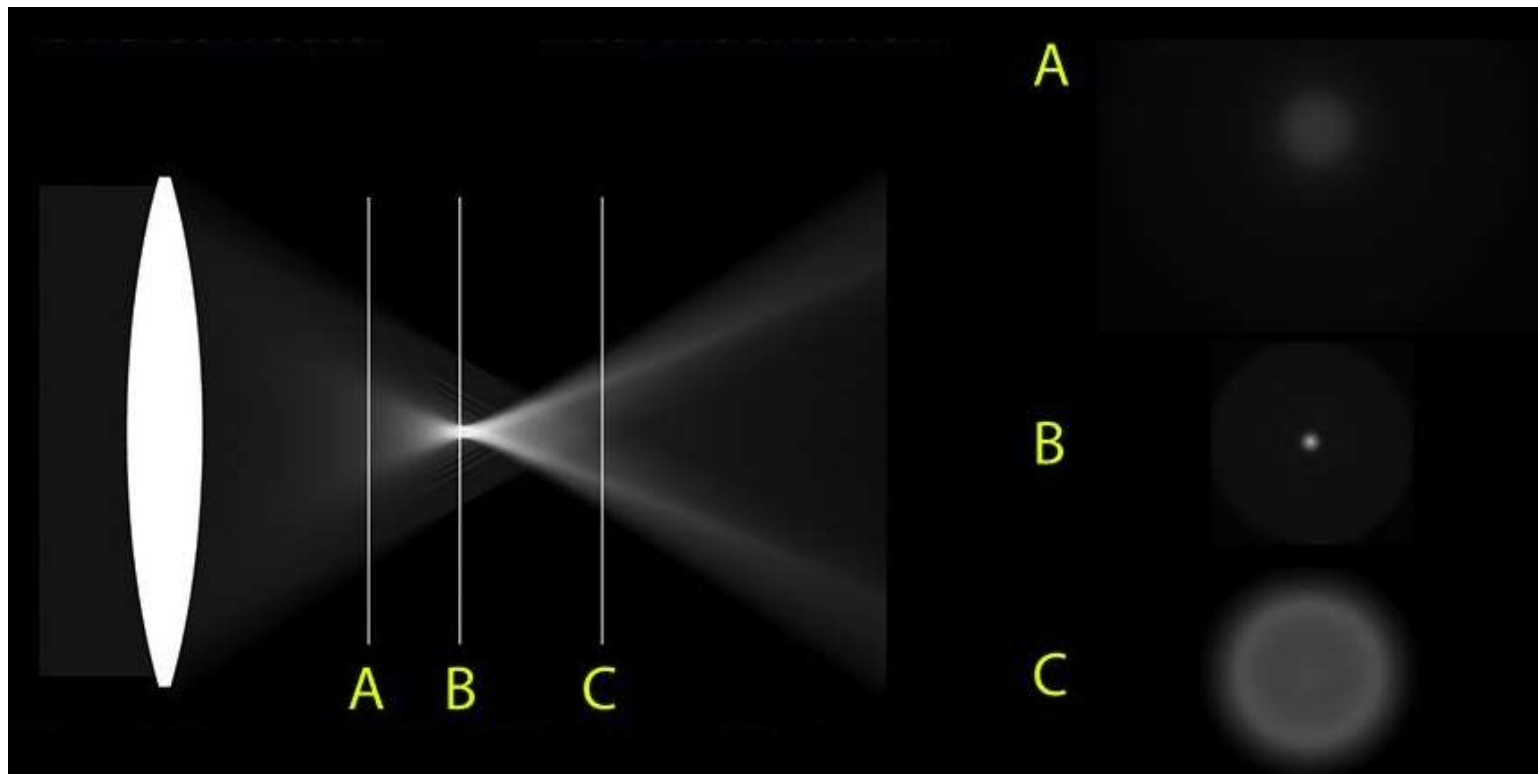
Типы аберраций

- Монохроматические
- Хроматические
- Дифракционные

Аберрации Зейделя

- Сферическая аберрация
- Кома
- Астигматизм
- Кривизна поля изображения
- Дисторсия

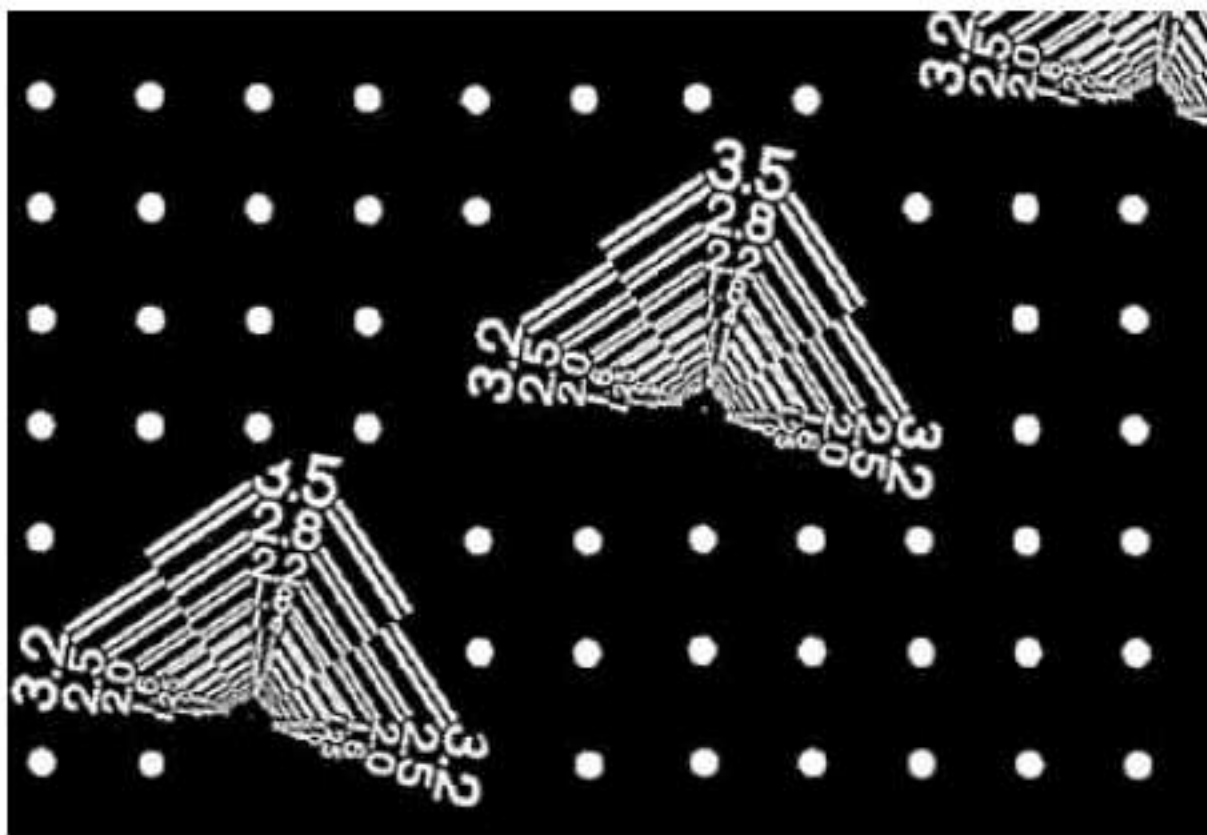
Сферическая абберрация



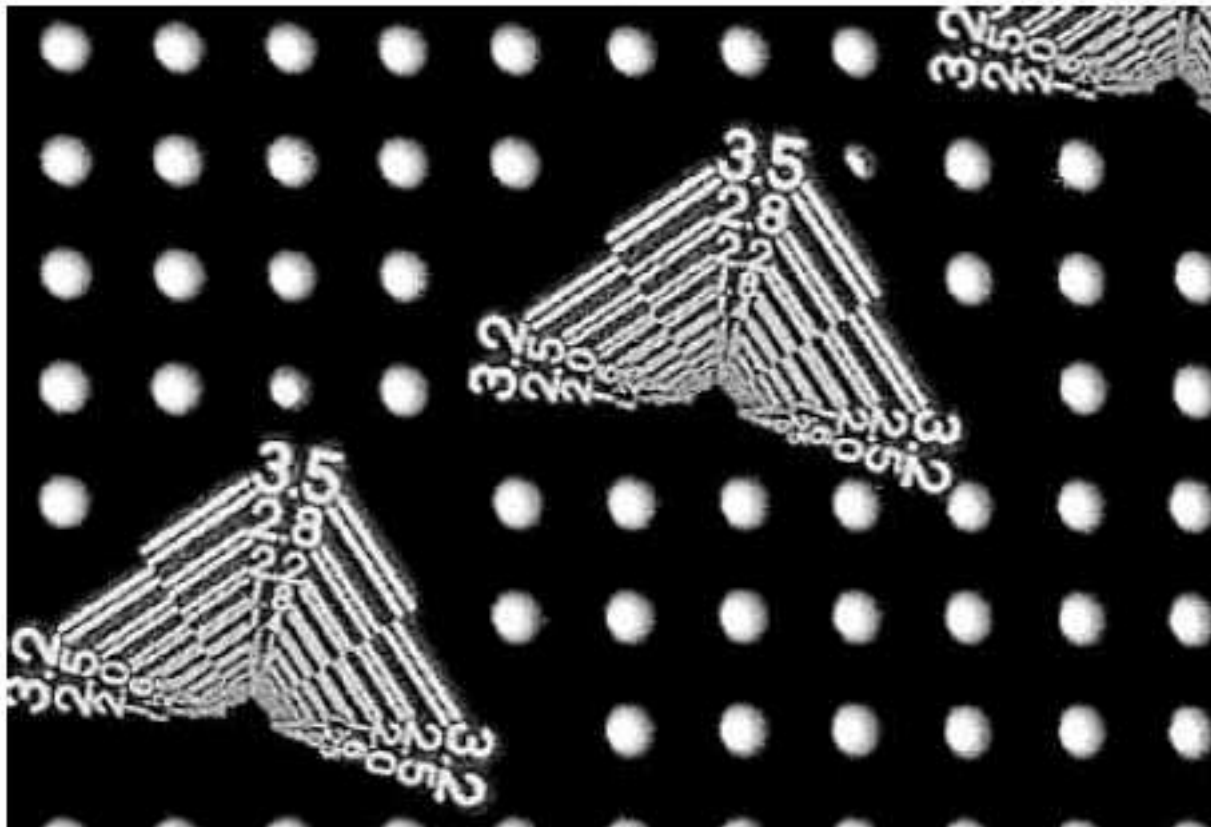
Сферическая абберрация

- **Сферическая абберрация** — лучи составляющие широкий пучок при прохождении через линзу во многих точках, расположенных на оптической оси на разном удалении от линзы
- Изображение получается нерезким

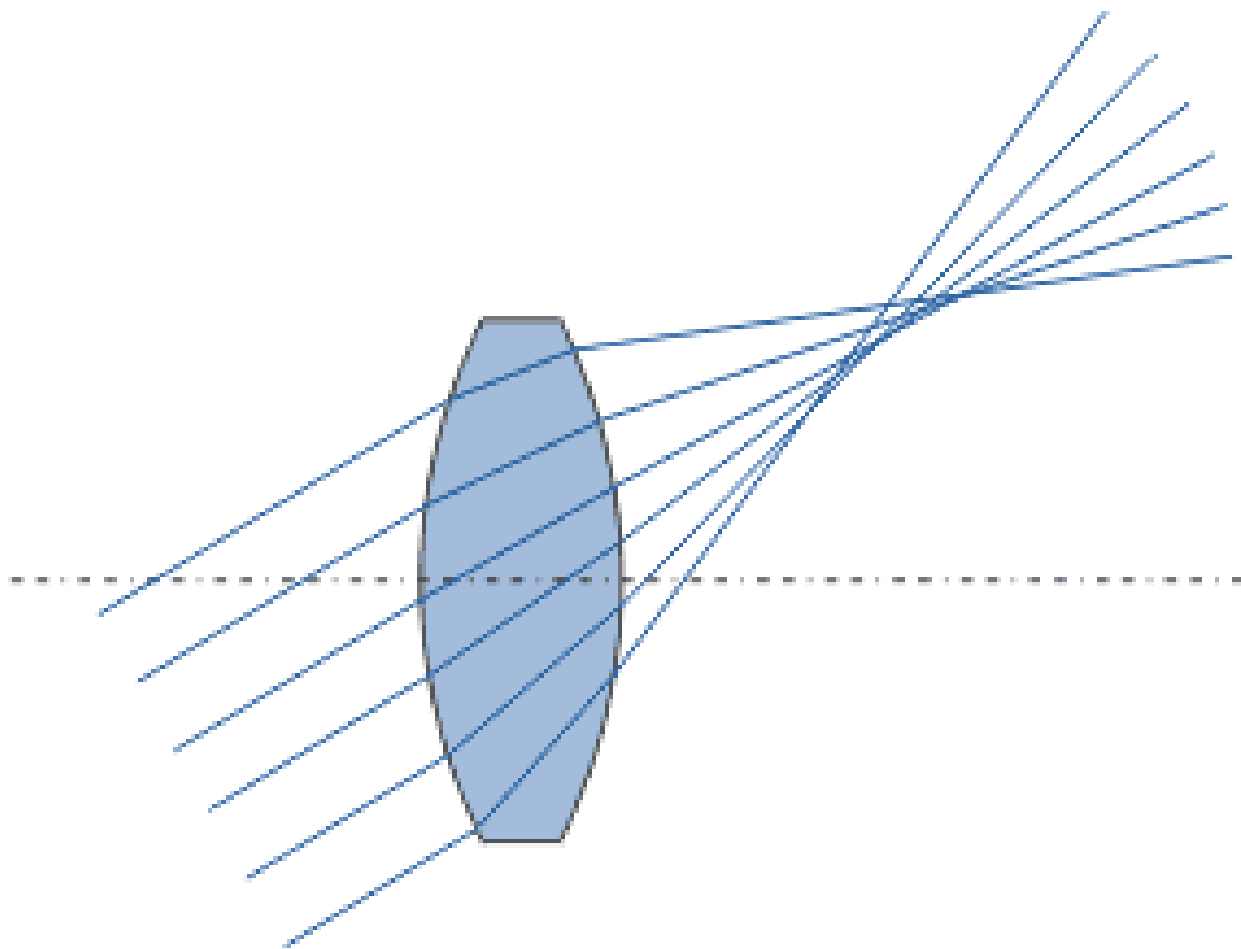
Сферическая абберрация



Сферическая абберрация



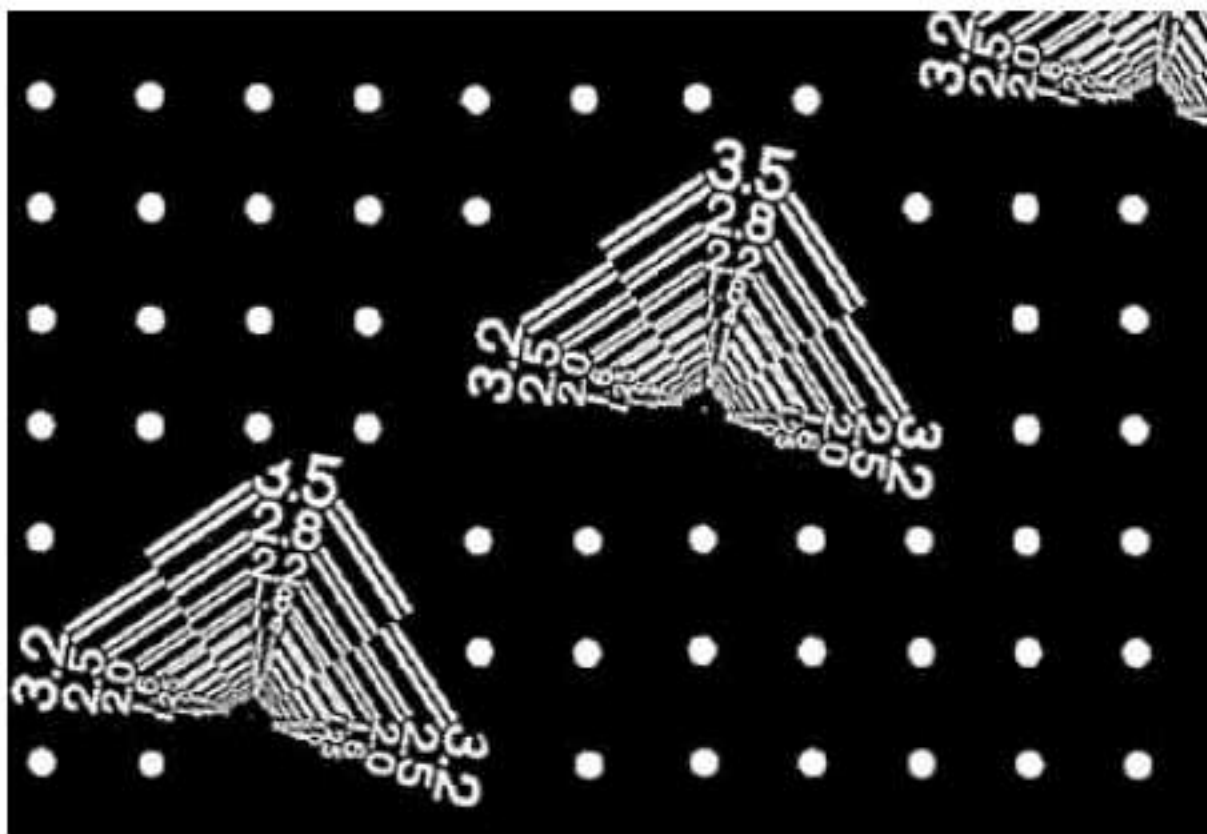
Кома



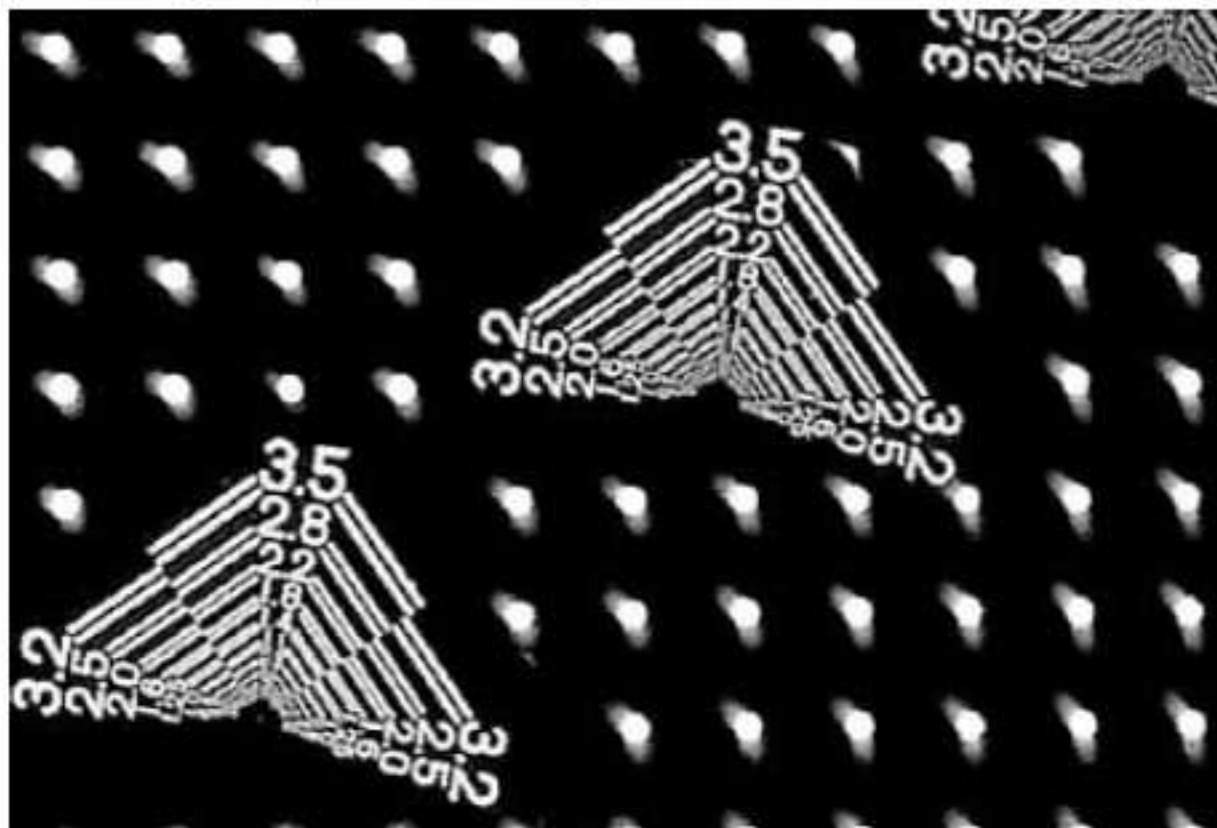
Кома

- **Кома** —каждый участок оптической системы, удалённый от её оси на расстояние d (кольцевая зона), даёт изображение светящейся точки в виде кольца, радиус которого тем больше, чем больше d .
- Центры колец не совпадают, в результате чего их наложение принимает вид несимметричного пятна рассеяния..

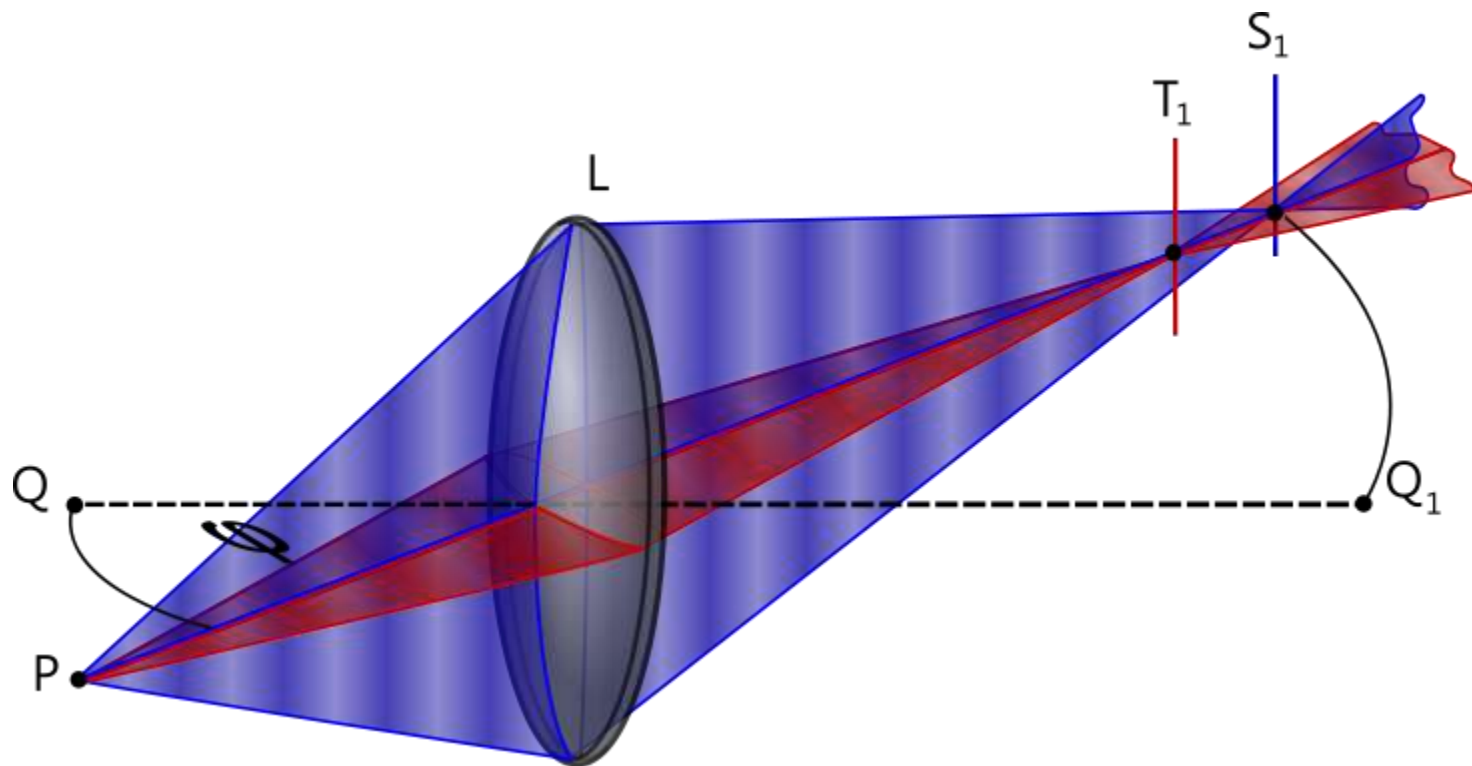
Кона



Кона



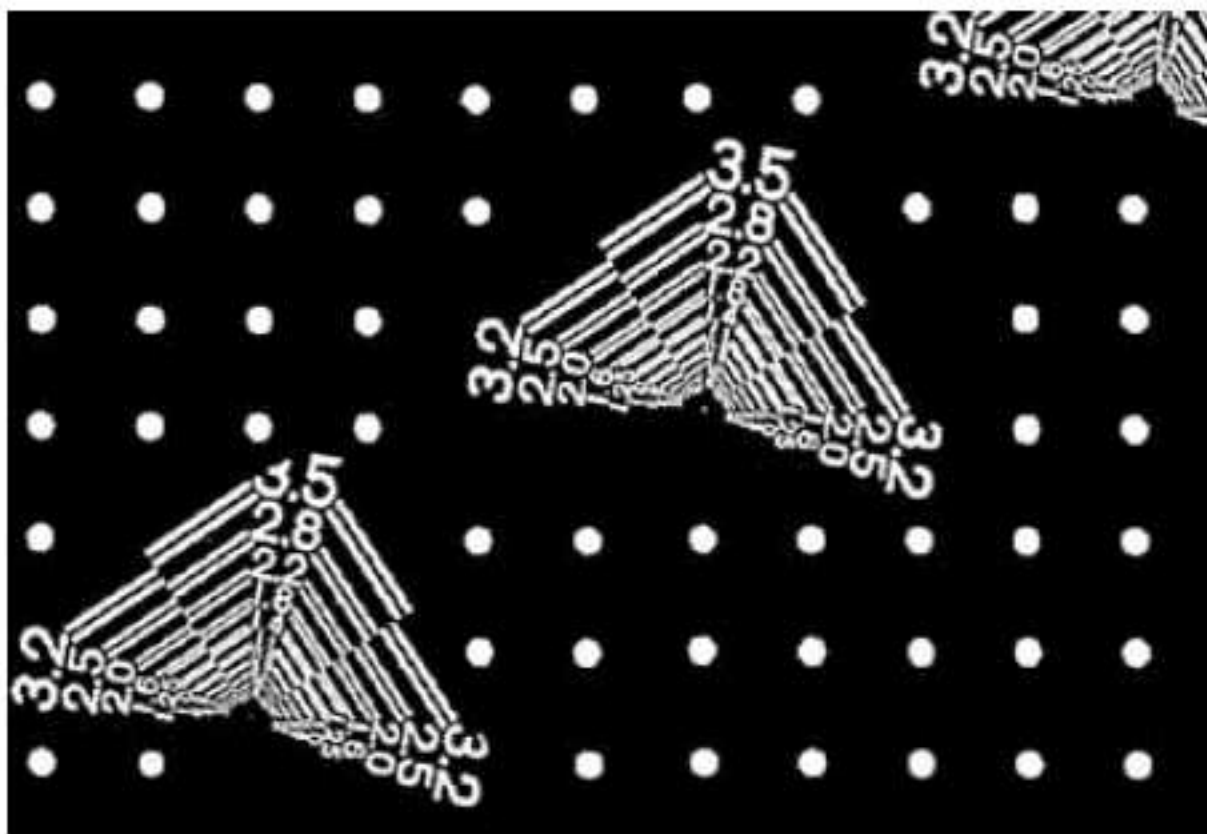
Астигматизм



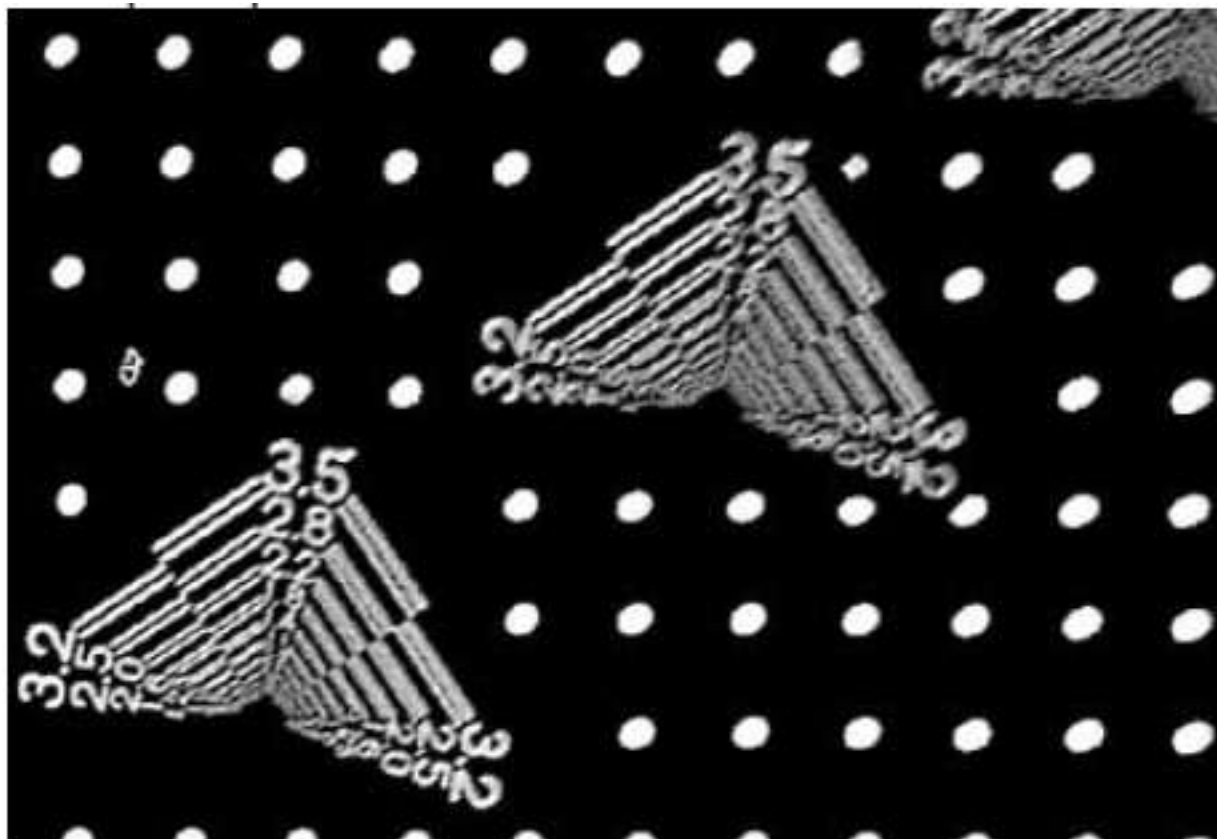
Астигматизм

- **Астигматизм** — погрешность из-за неодинаковой кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на нее светового пучка

Астигматизм



Астигматизм

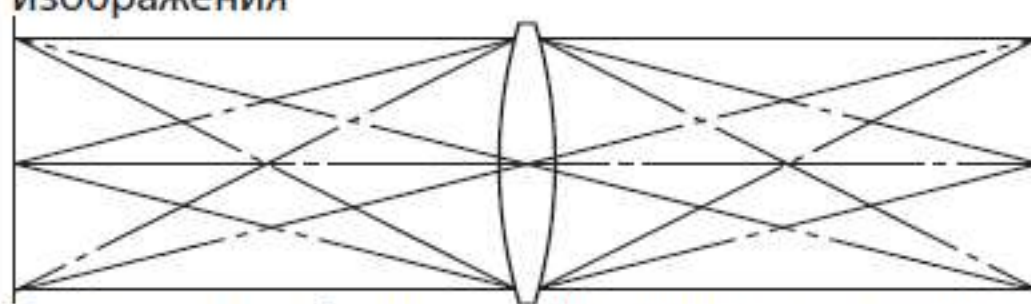


Кривизна поля изображения

- **Кривизна поля изображения** — аберрация, в результате которой изображение плоского объекта, перпендикулярного к оптической оси объектива, лежит на поверхности, вогнутой либо выпуклой к объективу.

Кривизна поля изображения

● Идеальный объектив, не дающий искривления изображения

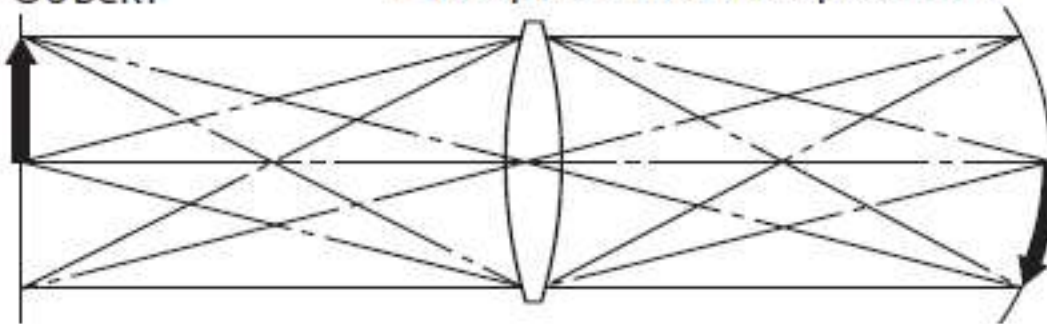


Поверхность объекта

Фокальная поверхность

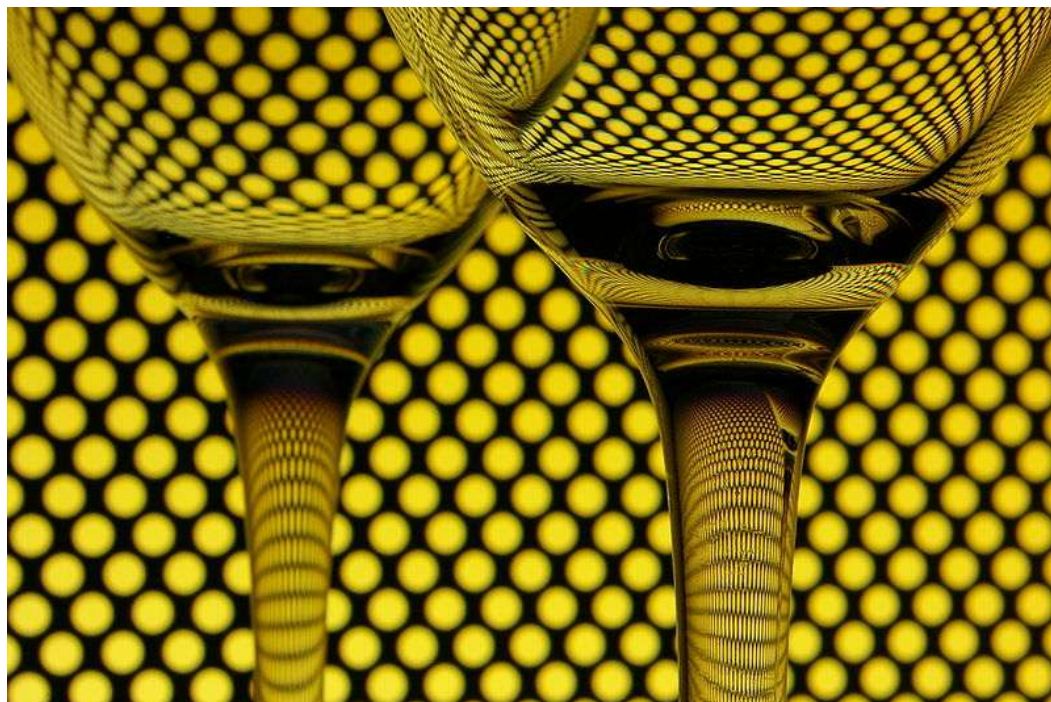
Объект

● Искривление изображения

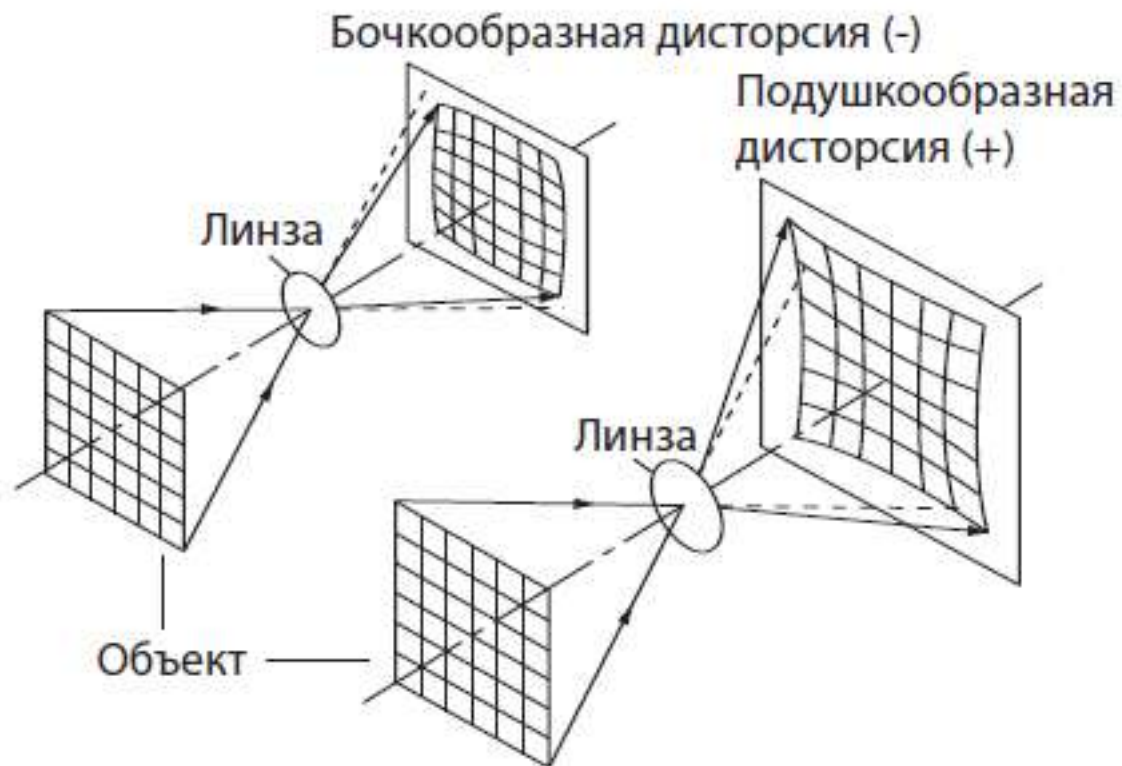


Дисторсия

- **Дисторсия** — аберрация оптических систем, при которой линейное увеличение изменяется по полю зрения.



Дисторсия



Дисторсия: пример

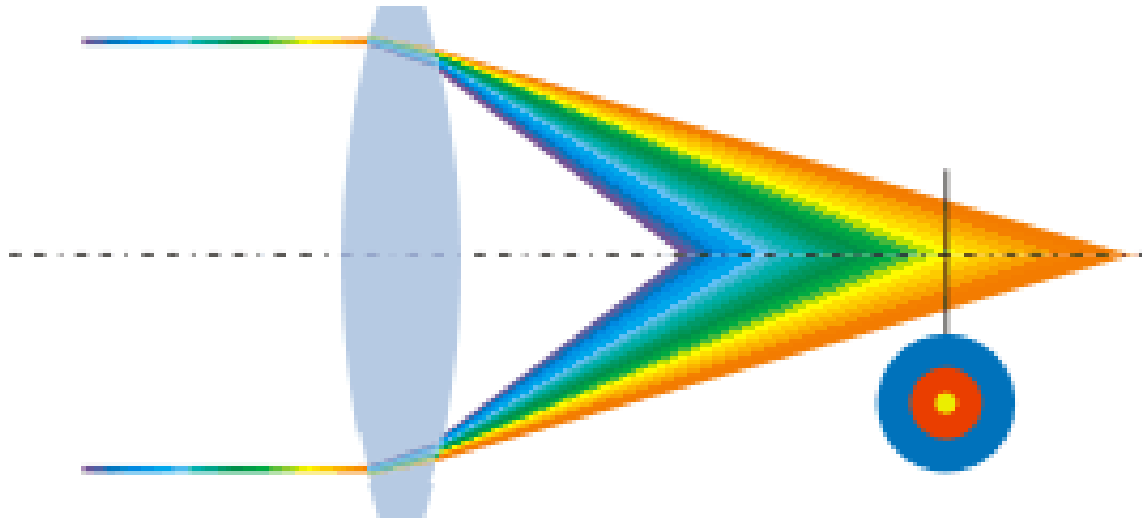


Типы аберраций

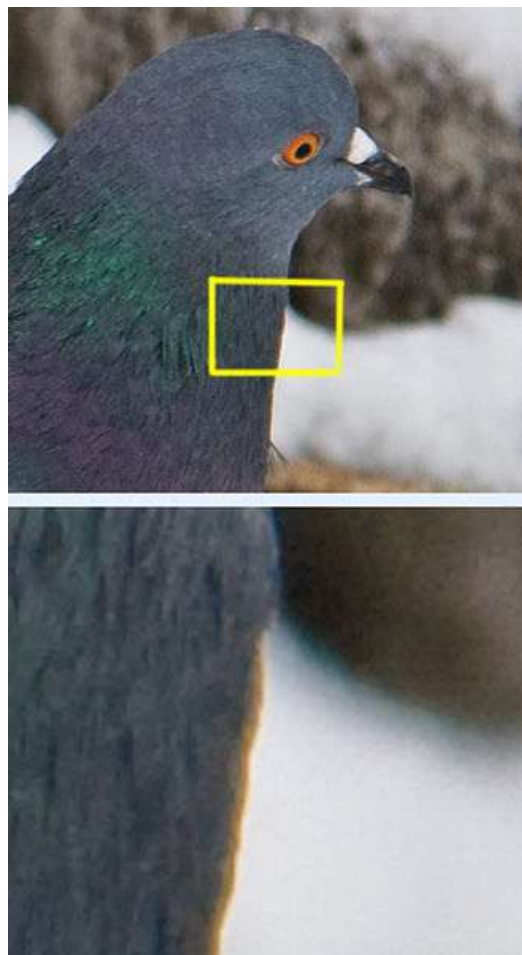
- Монохроматические
- **Хроматические**
- Дифракционные

Хроматическая абберрация

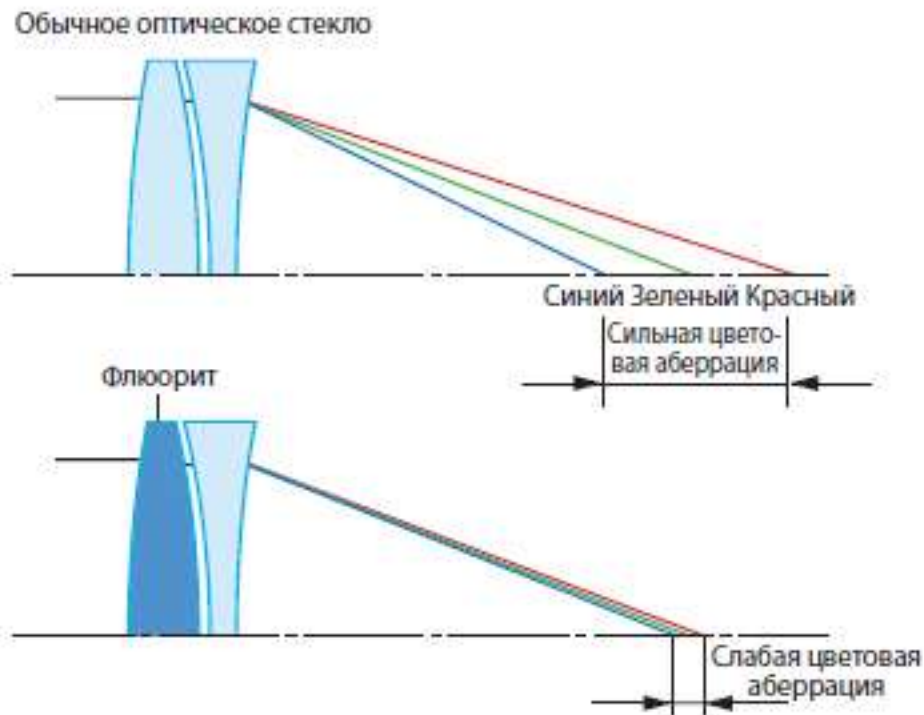
- **Хроматическая абберрация**
дисперсии света, проходящего через оптическую систему.



Хроматическая аберрация



Метод компенсации хроматической aberrации

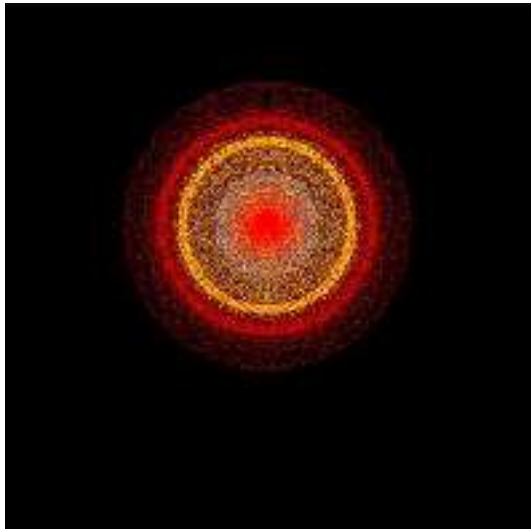


Типы аберраций

- Монохроматические
- Хроматические
- **Дифракционные**

Дифракционная абберация

- **Дифракционная абберация** возникает вследствие дифракции света на диафрагме и оправе фотообъектива.



Итог

- Для расчета положения сопряженных точек для оптических систем, представленных
 - 1) тонкой линзой
 - 2) параксиальными пучками

- Можно воспользоваться формулой

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f}$$

- Где
 - a_1 – расстояние от центра до первой точки (меньше 0, если влево от центра)
 - a_2 – расстояние от центра до второй точки (больше 0, если вправо от центра)
 - f – фокусное расстояние линзы (>0 если линза собирающая, <0 если рассеивающая)
- Реальные системы отличаются от идеальных наличием аберраций

На следующей лекции:

- Гауссовы системы
- Диафрагмы и зрачки оптической системы.
- Поле зрения. Размеры сенсоров.
- Глубина резкости. Глубина фокуса.
- Экспозиция. F-число. Закон обратимости.
- Фотографические линзы: фокус, зум
- Расчет изображения на матрице фотоаппарата