



# Основы теории оптических систем

Оптическая система (ОС) – совокупность преломляющих и отражающих поверхностей, способная создавать оптическое изображение.

1. Основные понятия геометрической оптики.

2. Основные законы геометрической оптики.

3. Оптические элементы:

плоские зеркала, плоскопараллельные пластинки, призмы, тонкие линзы.

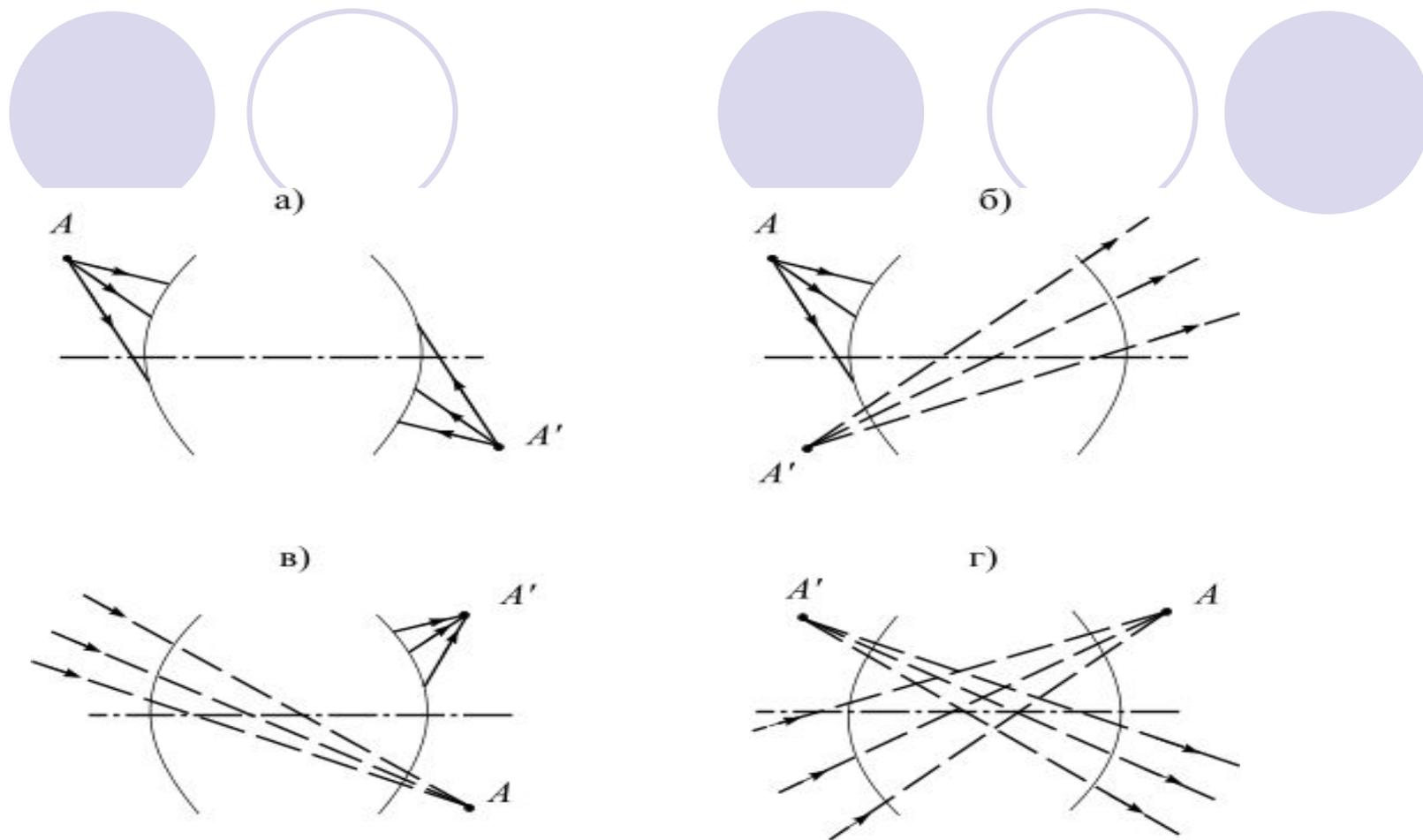
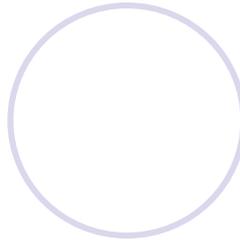
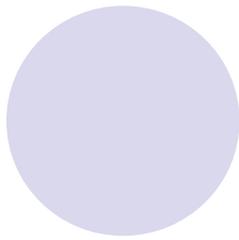
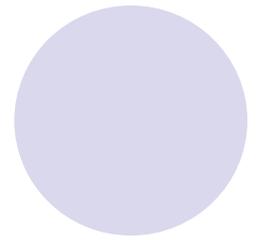
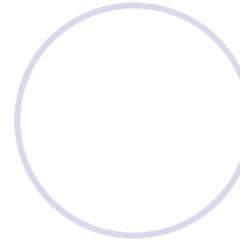


Рис. 2.2. Характеристики объектов и изображений:  
 а) действительный объект – действительное изображение;  
 б) действительный объект – мнимое изображение;  
 в) мнимый объект – действительное изображение;  
 г) действительный объект – мнимое изображение



## Правила знаков



- За положительное направление распространения света принято направление слева на право;
- Все отрезки и расстояния, откладываемые вправо от опорной точки, линии или поверхности, считаются положительными, а откладываемые влево – отрицательными (для радиусов кривизны опорной является определяемая ими сферическая поверхность);
- Толщины оптических элементов и расстояния между ними считаются положительными при прямом ходе и отрицательными при обратном ходе лучей

- 
- Все отрезки и расстояния, отсчитываемые вверх от оптической оси, считаются положительными, отсчитываемые вниз – отрицательными;
  - Углы, отсчитываемые поворотом от опорной линии (оптической оси, нормали) по часовой стрелке, считаются положительными, поворотом против часовой стрелки – отрицательными;
  - Показатели преломления сред считаются положительными при прямом ходе лучей и отрицательными при обратном ходе лучей.

### 3.1 Линзы конечной толщины.

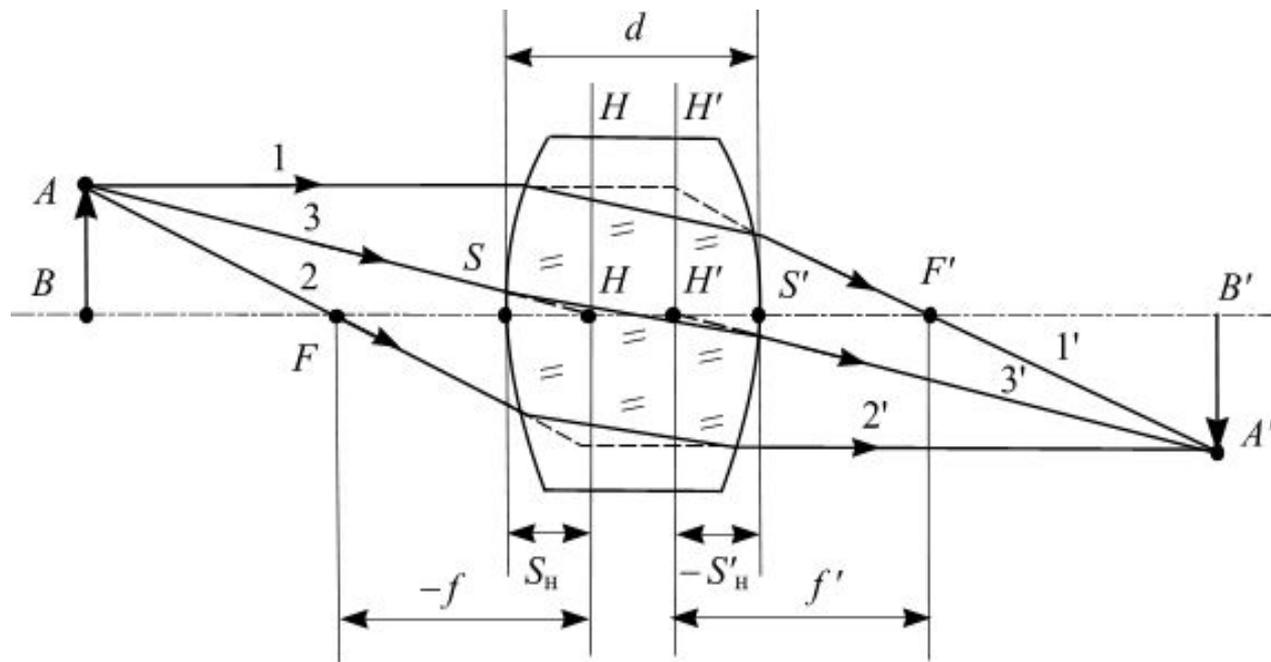


Рис. 2.6. Линза конечной толщины



Плоскости  $H$ ,  $H'$  – главные плоскости;  
 $F$  – передний фокус линзы;  
 $F'$  – задний фокус линзы;  
Точки  $H$ ,  $H'$  – главные точки;

$$f' = -f = rr' / (n - 1) [r' - r + d(n - 1) / n]$$

$$s_H = rd / [n(r' - r) + (n - 1)d],$$

$$s'_H = -r'd / [n(r' - r) + (n - 1)d].$$

# Характеристики изображений в 4 зонах.

Тип линзы	Зона в пр-ве предметов	Зона в пр-ве изображен.	Характеристики изображений
Положит.	$-\infty \div -2F$	$F' \div +2F'$	Д.,обр.,уменьш.
	$-2F \div -F$	$+2F' \div +\infty$	Д.,обр.,увелич.
	$-F \div 0$	$-\infty \div 0$	М.,пр.,увелич.
	$0 \div +\infty$	$0 \div +F'$	Д.,пр.,уменьш.
Отрицат.	$-\infty \div 0$	$-F' \div 0$	М.,пр.,уменьш.
	$0 \div +F$	$0 \div -\infty$	Д.,пр.,увелич.
	$+F \div +2F$	$-\infty \div -2F'$	М.,обр.,увелич.
	$+2F \div +\infty$	$-2F' \div -F'$	М.,обр.,уменьш.

## 3.2 Системы линз.

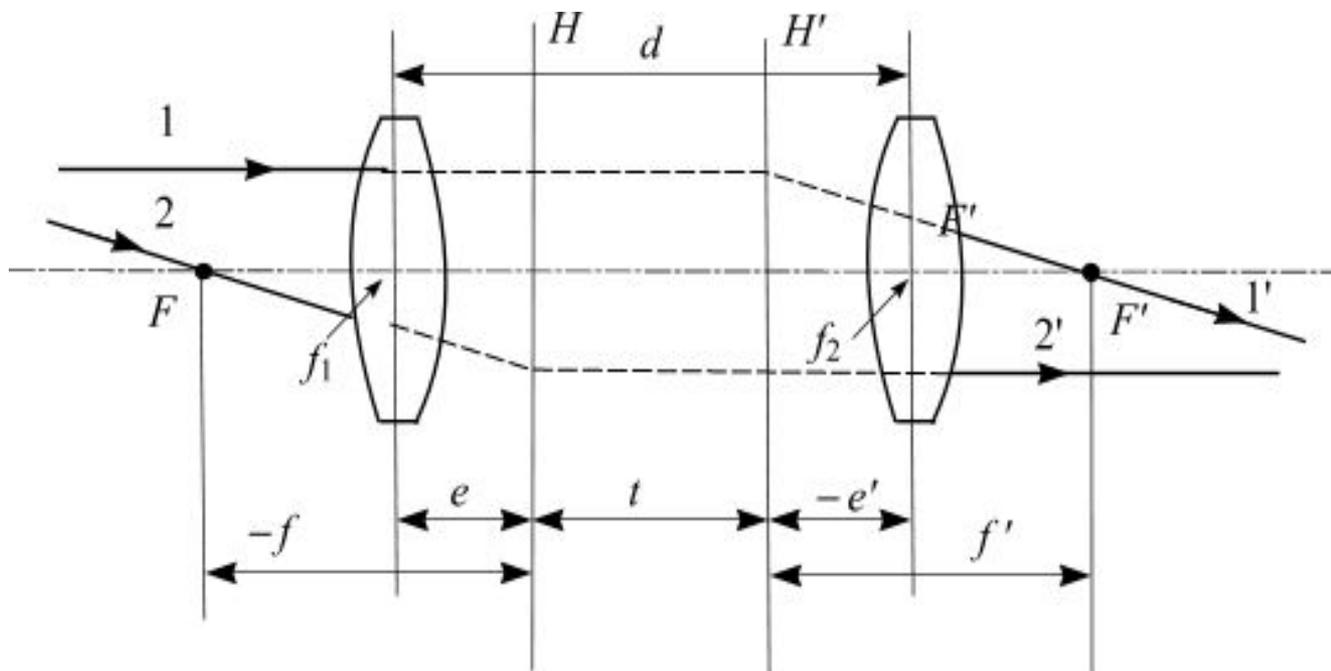
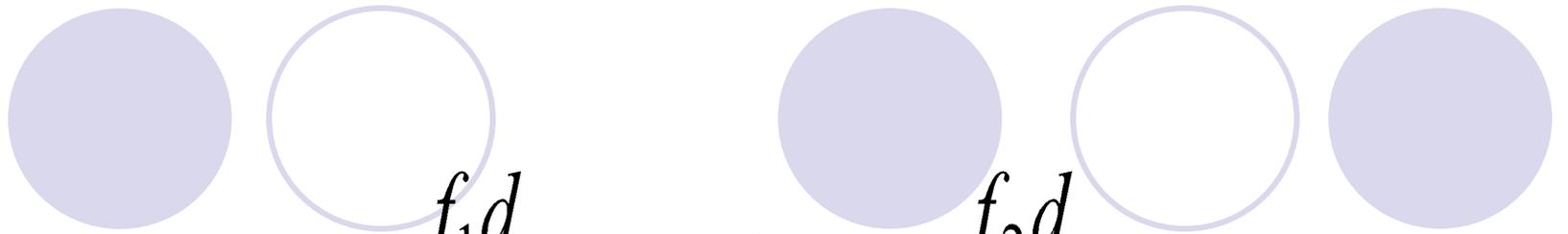


Рис. 2.7. Система двух линз



$$e = \frac{f_1 d}{f_1 + f_2 - d}; \quad e' = \frac{f_2 d}{f_1 + f_2 - d}$$

$$f' = -f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$$

$$t = d - (e + e') = -\frac{d^2}{f_1 + f_2 - d}$$



### 3.3. Аберрации оптических систем.

Аберрации – погрешности (искажения) изображений.

Монохроматические (геометрические) аберрации:

- сферическая аберрация;
- кома;
- астигматизм;
- кривизна поля изображения;
- дисторсия.

# Сферическая абберация

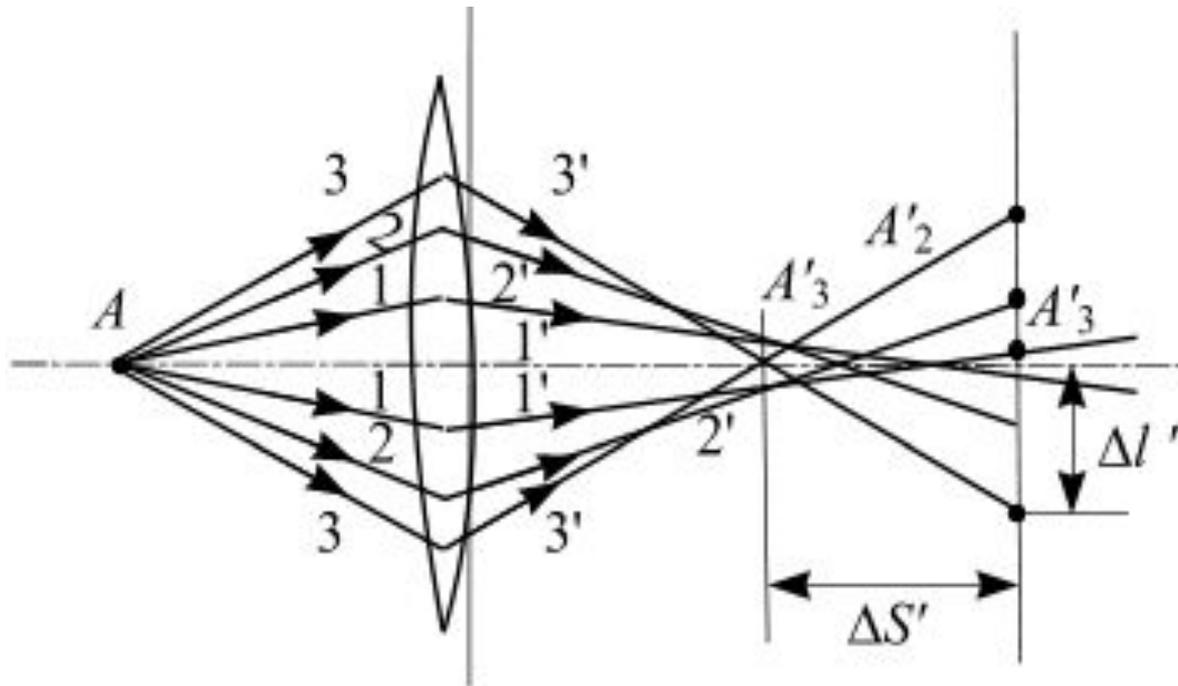
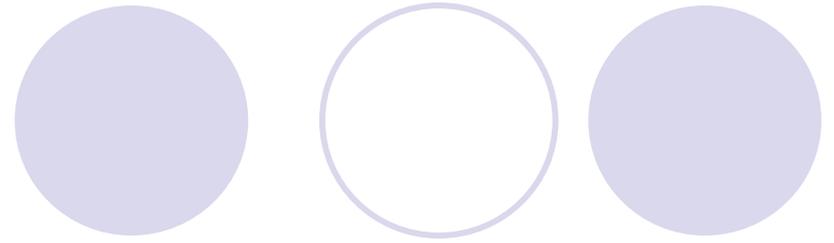
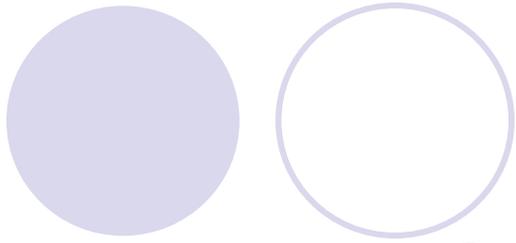
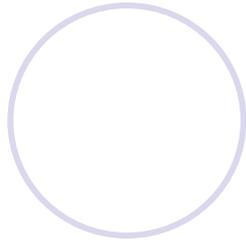
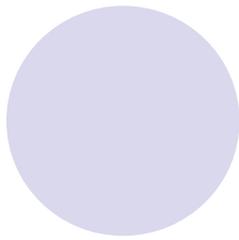


Рис. 2.8. Ход лучей при сферической абберации

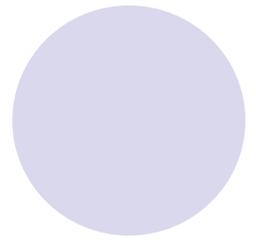
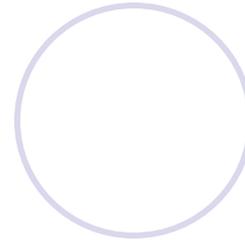
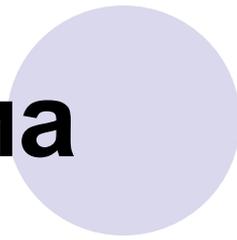


$\Delta s'$  - продольная абберация;

$\Delta l'$  - поперечная абберация (радиус кружка  
нерезкости).



# Кома



- **Кома**
- (от греческого *κομη* — волосы, локоны)
- погрешность изображений оптических систем, при которой нарушена симметричность хода наклонных лучей, проявляющаяся в изображении точки в виде запятой; вид aberrаций оптических систем. Возникает в результате неодинаковости углов падения наклонных параллельных лучей на поверхности оптической системы. В плохо отцентрированной оптической системе, в которой центры кривизны не лежат на одной прямой, проявляется и для точки предмета на оптической оси.

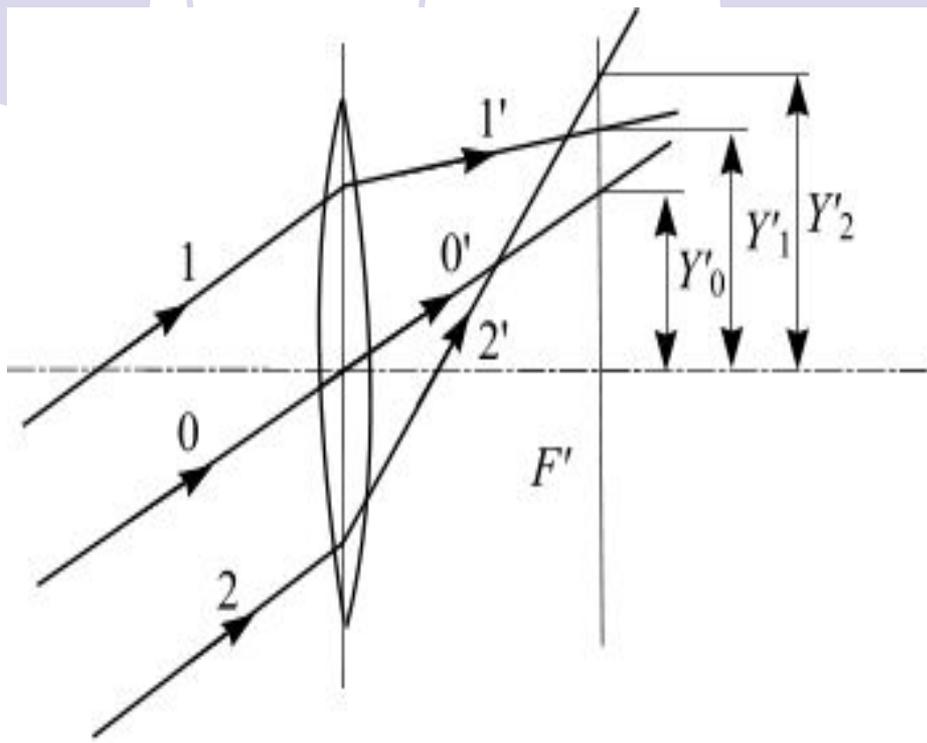
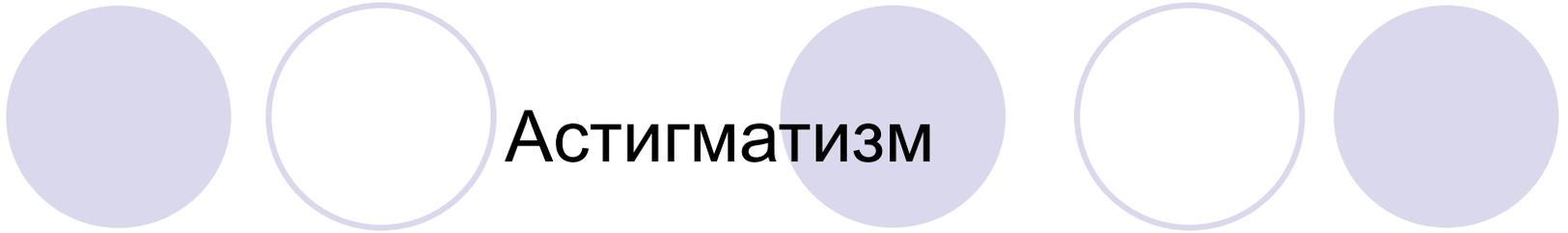


Рис. 2.9. Кома

$$k = (Y'_1 + Y'_2) / 2 - Y'_0$$



- Астигматизм
- (от греческих  $\alpha$  — не, и  $\sigma\tau\iota\upsilon\mu\epsilon$  — точка)
- одна из aberrаций оптических систем, проявляющаяся в том, что точки, расположенные не на главной оси оптической системы, изображаются двумя взаимно перпендикулярными отрезками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга. Вследствие астигматизма изображение получается нечётким. Устраняется специальным подбором линз разной кривизны и с разными показателями преломления, при котором астигматизм одной линзы компенсируется астигматизмом другой.

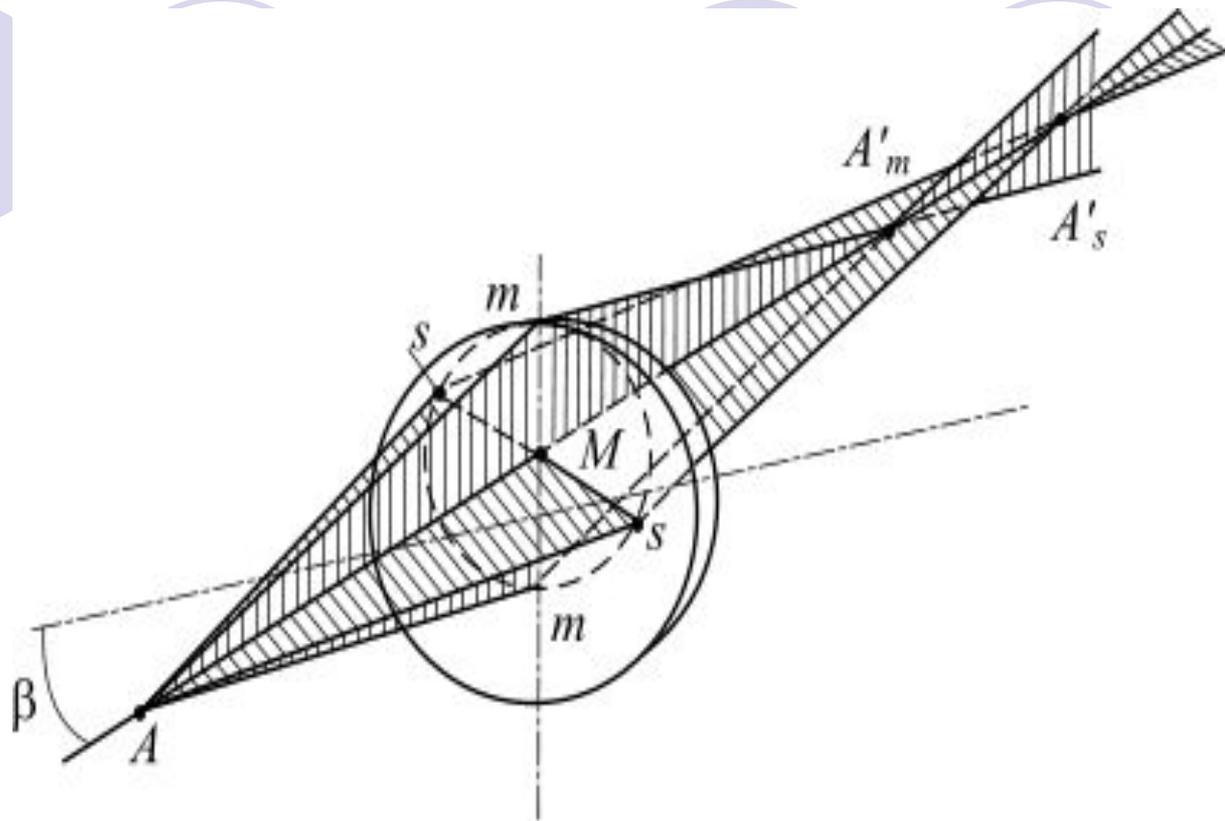


Рис. 2.10. Ход лучей при астигматизме

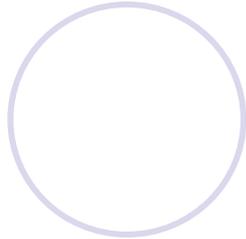
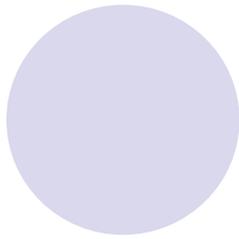
$m - m$  – меридиональная плоскость

$S - S$  – сагиттальная плоскость

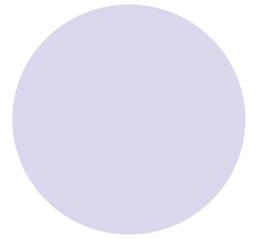
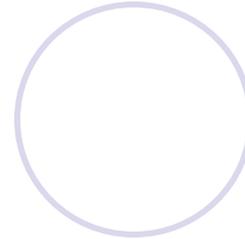
$A'_m$  – меридиональный фокус

$A'_s$  - сагиттальный фокус





## Дисторсия



- **Дисторсия**
- (от латинского *distorsio* — искривление)
- погрешность изображений оптических систем, при которой нарушено геометрическое подобие между объектом и его изображением; вид аберрации оптических систем. Возникает в результате неодинаковости линейного увеличения, даваемого системой, в различных точках поля изображения.

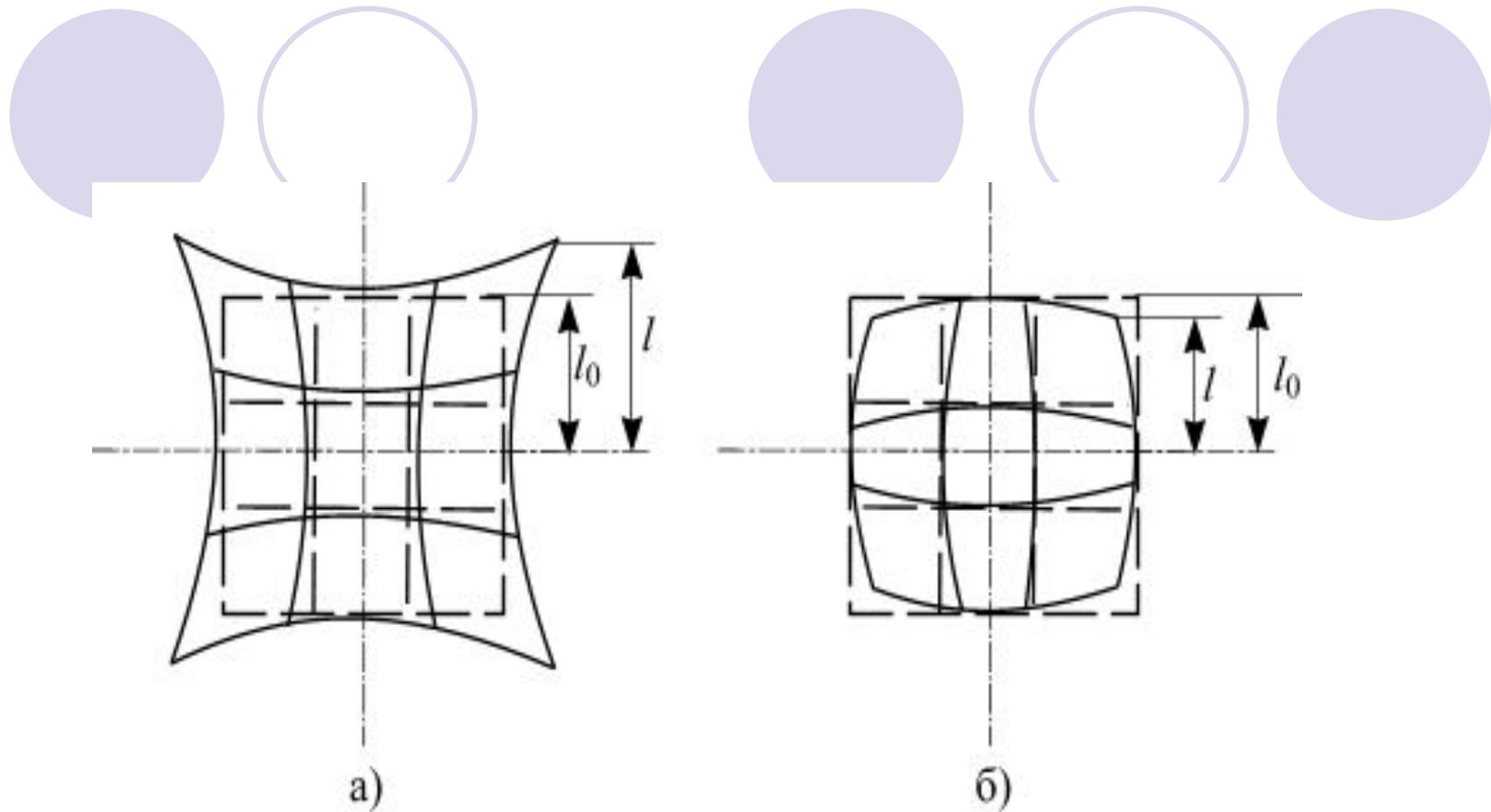


Рис. 2.12. Искажение изображения при дисторсии

$$\Delta = \left[ \frac{l - l_0}{l_0} \right] 100$$



# Хроматическая аберрация

- **Дисперсия света**
- (от латинского *dispersio* — рассеяние)
- **~~ в оптике:** явление разложения света на составляющие разных цветов из-за неодинаковости скорости распространения в среде лучей, имеющих различные длины волн.  
Дисперсия, при которой показатели преломления для цветных лучей растут от красного к фиолетовому, называется нормальной в отличие от дисперсии аномальной, с обратным ходом изменения показателя преломления. Большинство прозрачных сред имеет нормальную дисперсию.

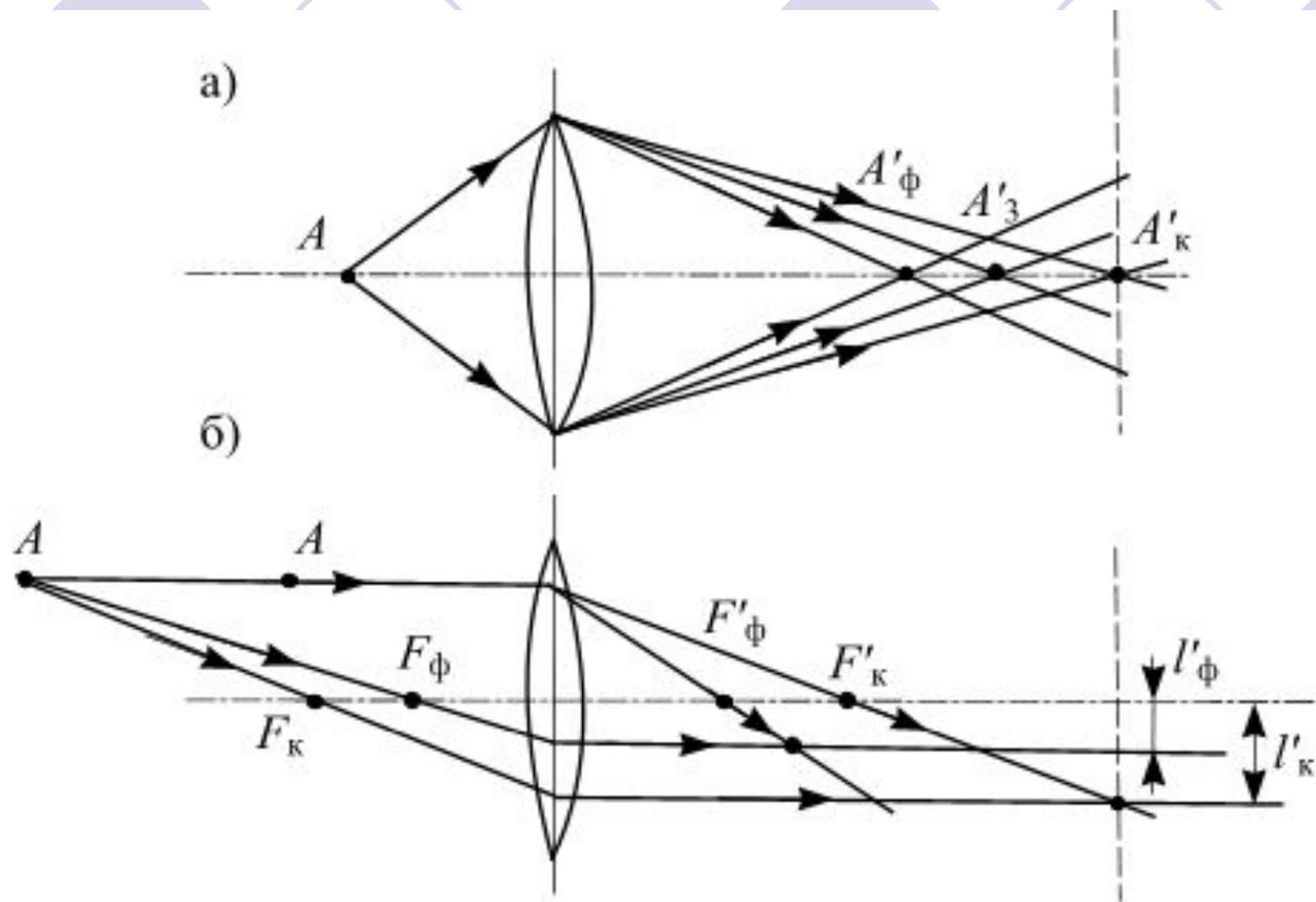
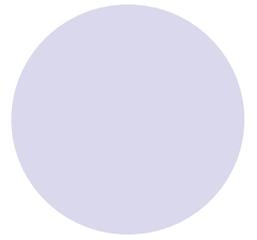
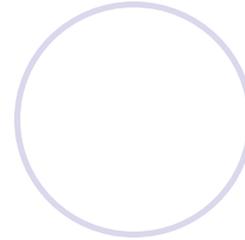
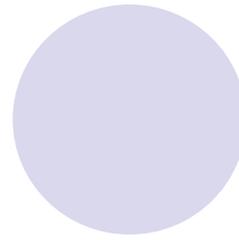
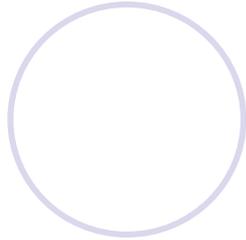
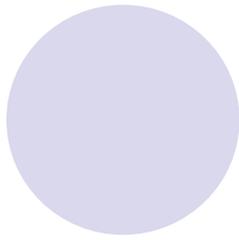


Рис. 2.13. Ход лучей при хроматической аберрации:  
 а) хроматизм положения; б) хроматизм увеличения

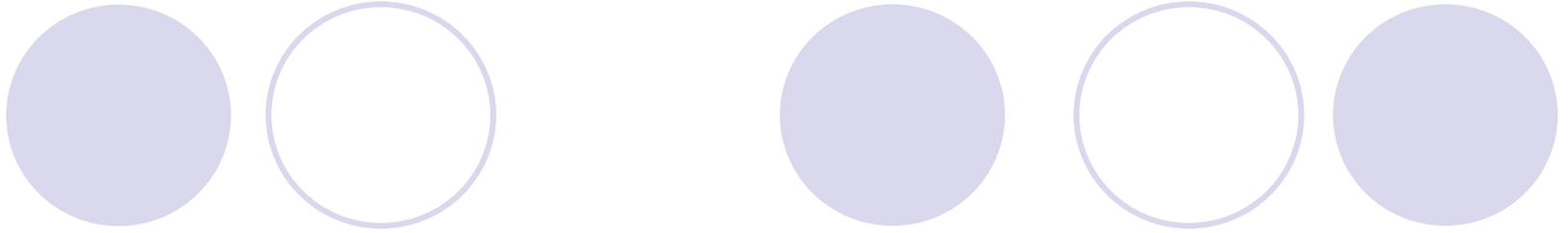


## Коррекция аберраций

- **Ортоскопический**
- (от греческих *орτος* — прямой и *σκοπέω* — смотрю)
- ~ объектив не имеющий дисторсионных искажений, удовлетворяющий условию ортоскопии, т.е. условию постоянства линейного увеличения по полю кадра. Наиболее строгие требования по ортоскопичности изображения предъявляются к аэросъёмочным объективам. Для кинематографических объективов дисторсия допускается в пределах 2–3%, для фотолюбительских — 3–4%.

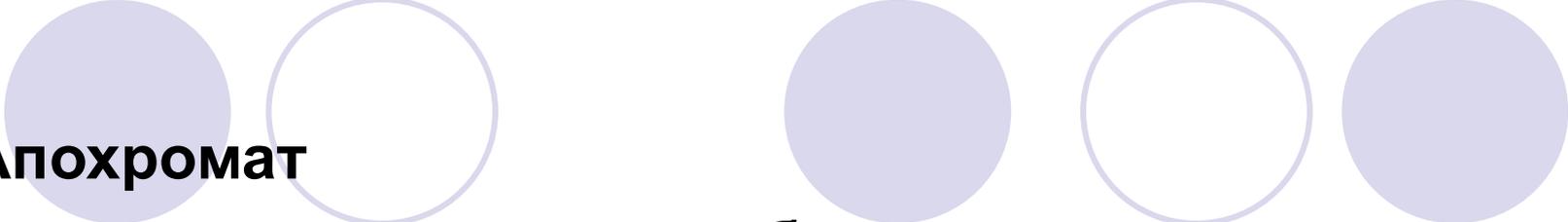


- **Апланат**
- (от греческих  $\alpha$  — не, и  $\pi\lambda\alpha\nu\epsilon$  — блуждание, отклонение, ошибка)
- объектив, в котором исправлены сферические и хроматические aberrации, кома. Астигматизм значительно ослаблен; не устранена кривизна поля, что снижает качество изображения на краю кадра.



- **Ахромат**
- (от греческого *αχρωματος* — бесцветный)
- объектив у которого исправлена хроматическая aberrация для двух цветов (например: для фиолетового и жёлтого), и частично сферическая aberrация, астигматизм не устранён. Состоит из двух (положительных и отрицательных) и более склеенных линз, изготовленных из неодинаковых по дисперсии света сортов стекла.

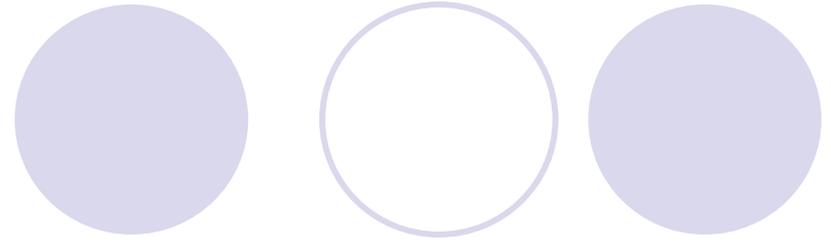
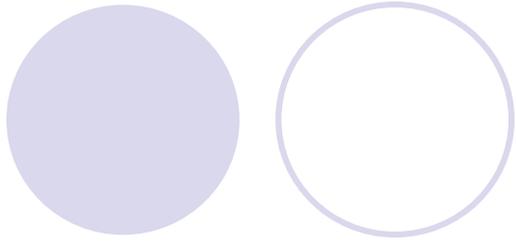




- **Апохромат**

- (от греческих *απο* — из, от, без, и *χρωματος* — цвет, краска)

- объектив, у которого исправлены хроматическая aberrация положения для трёх и более цветов (например: для фиолетового, зелёного и красного), сферическая aberrация и уменьшен вторичный спектр. Исправление aberrаций достигается использованием для положительных и отрицательных линз стёкол с одинаковыми относительными частными дисперсиями, введением зеркал в оптическую схему и усложнением (по сравнению с ахроматом) схемы и конструкции оптической системы.



- **Анастигмат**
- (от греческих  $\alpha\nu$  — без,  $\alpha$  — не, и  $\sigma\tau\iota\upsilon\mu\epsilon$  — точка)
- объектив, в котором специально подобранными линзами (три и более) исправлены практически все aberrации. Простейшим анастигматом является триплет.

### 3.4. Типы оптических систем

Классификация:

по признакам положения предмета и изображения

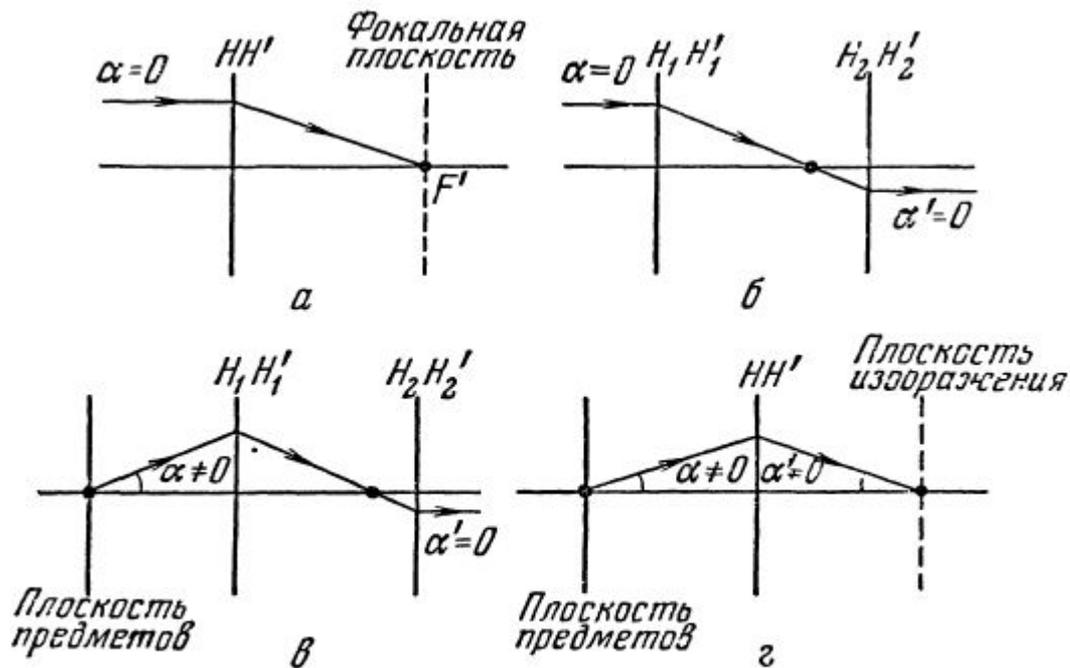
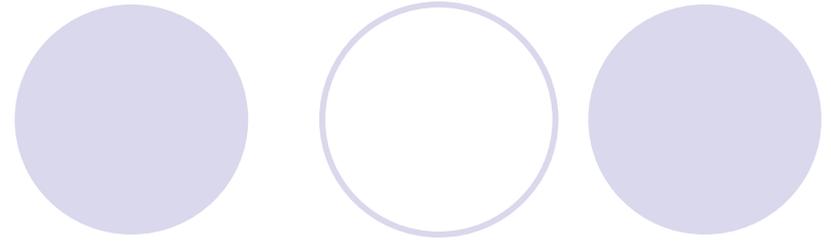
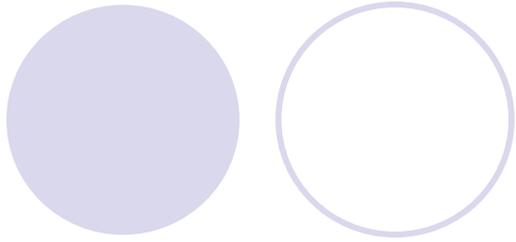


Рис. 61. Типы оптических систем: а — фотографический объектив; б — телескопическая система; в — система микроскопа; г — проекционная и репродукционная система



- **Фотографический объектив:**
  - дальний предмет
  - ближнее изображение
- **Телескопическая система:**
  - дальний предмет
  - дальнее изображение
- **Микроскоп:**
  - ближний предмет
  - дальнее изображение
- **Репродукционная система:**
  - ближний предмет
  - ближнее изображение

## 3.5. Основные характеристики оптических систем

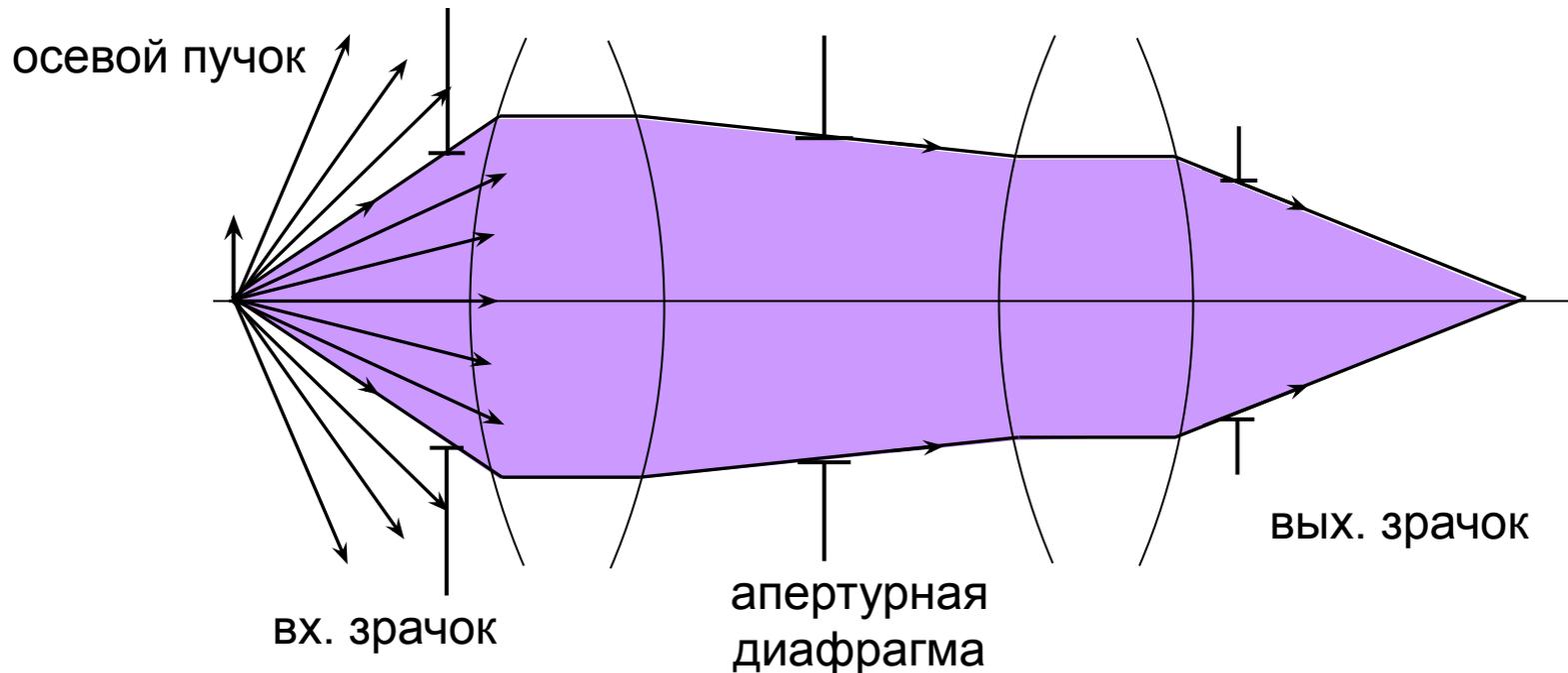
Объектив – оптическая система, образующая изображение плоских или протяженных предметов на плоской поверхности фотоприемника.

Характеристики :

- фокусное расстояние,
- относительное отверстие,
- светосила,
- поле зрения,
- светораспределение по полю изображения
- разрешающая способность,
- частотно-контрастная характеристика,
- спектральное пропускание.

# Апертурная диафрагма

**Апертурная диафрагма** – это диафрагма, которая ограничивает размер осевого пучка, то есть пучка, идущего из осевой точки предмета



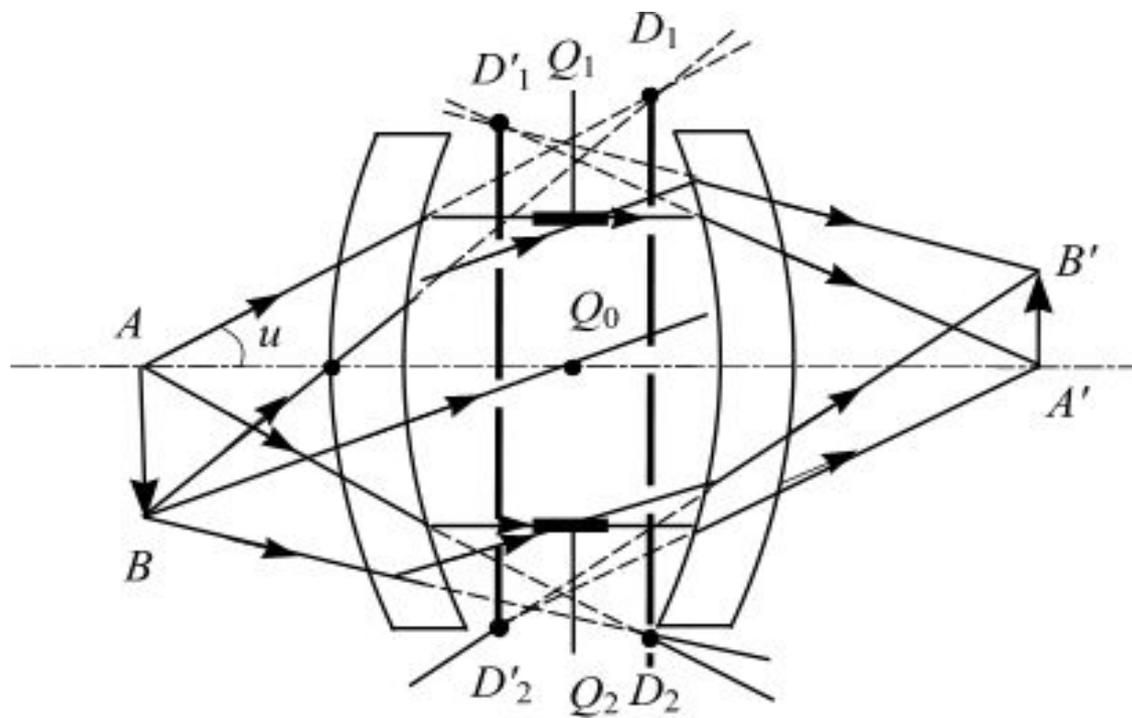


Рис. 2.14. Апертурная диафрагма



## Светосила оптической системы

- **Светосила** - фотометрическая характеристика оптической системы, характеризующая её способность передавать световую энергию от участков объектов к соответствующим участкам их изображений.

Относительное отверстие:

$$O = D / f',$$

где  $D$  – диаметр входного зрачка,  
 $f'$  – заднее фокусное расстояние объектива.

Светосила:

$$H = \tau O^2 = \tau (D / f')^2$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания объектива.

Освещенность изображения

$$E_0 = 0,25\pi L \tau (D / f')^2 = 0,25\pi L H$$

где  $E_0$  – освещенность в центре изображения;  
 $L$  – яркость предмета, кд/м<sup>2</sup>.



Диафрагменное число:

$$F = 1: ( D / f' )$$

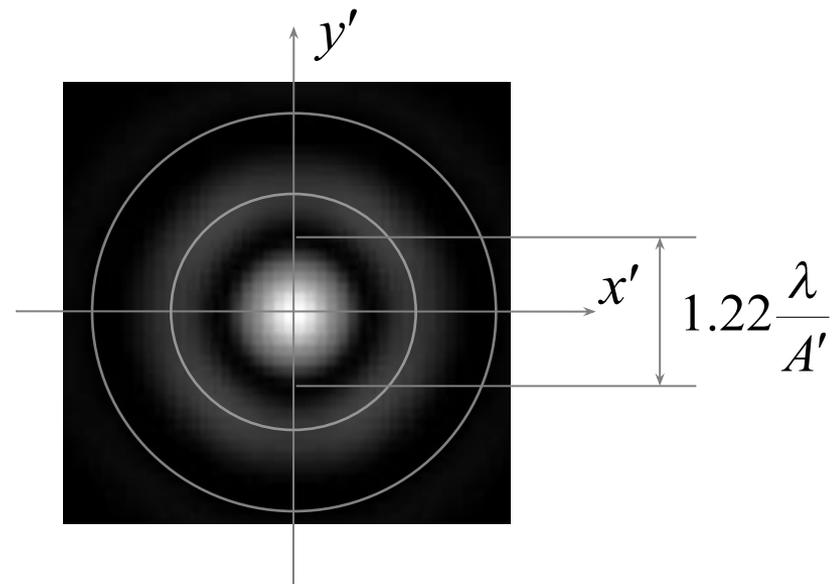
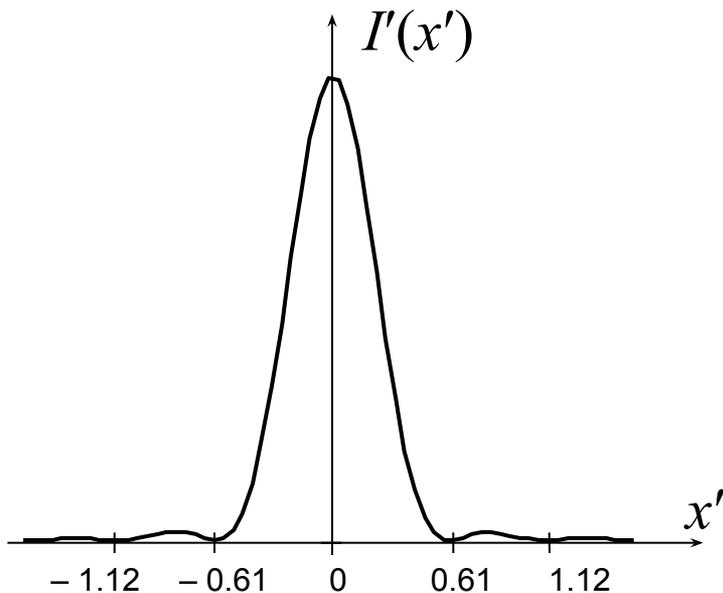
$$F = 0,5 \left( \sqrt{2} \right)^{N-1}$$

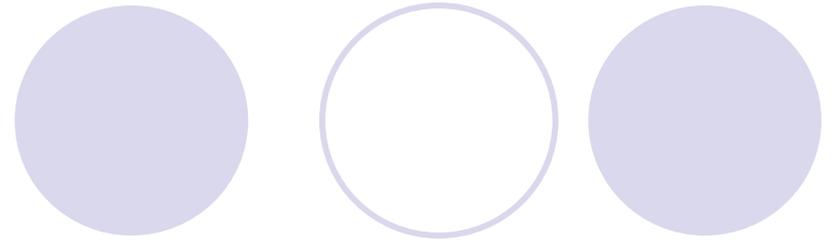
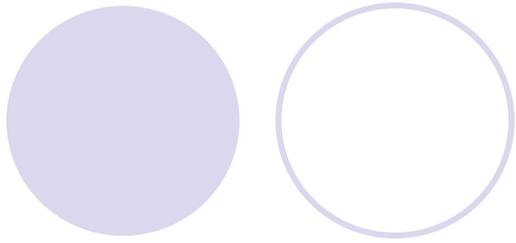
0,5; 0,7; 1,0; 1,4; 2,0; 2,8; 4,0; 5,6; 8,0; 11; 22; 32; 45; 64;  
90; 128



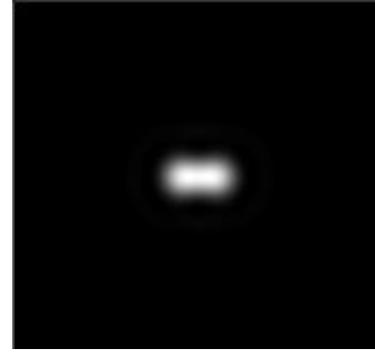
# Разрешающая способность

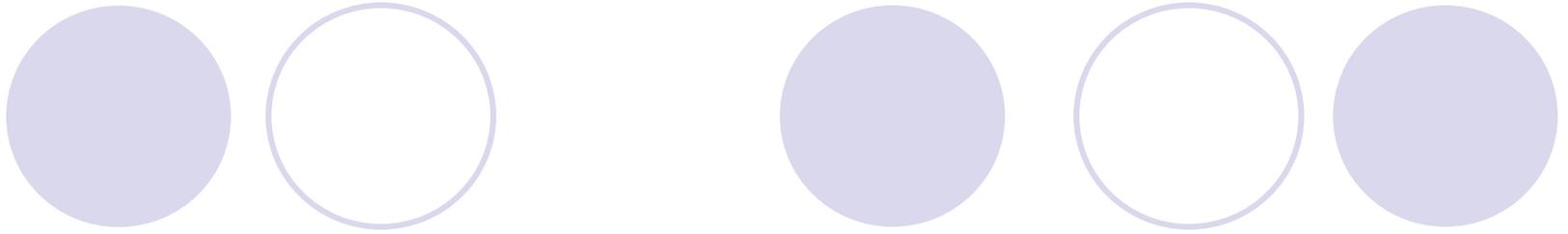
- **Функция рассеяния точки (ФРТ)** описывает распределение интенсивности в изображении светящейся точки. Изображение светящейся точки называют **пятном рассеяния**.



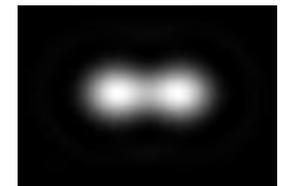
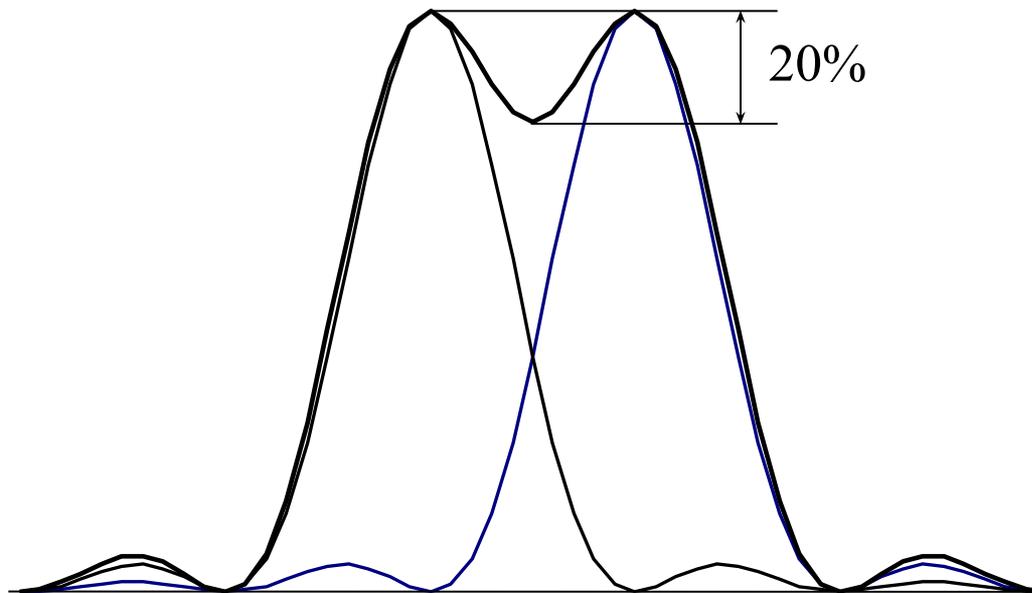


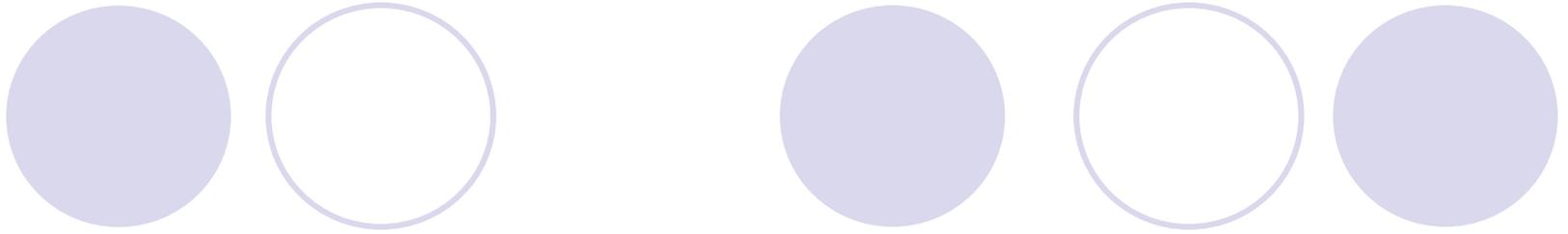
- **Разрешающая способность оптической системы** – это способность изображать отдельно два близко расположенных точечных предмета



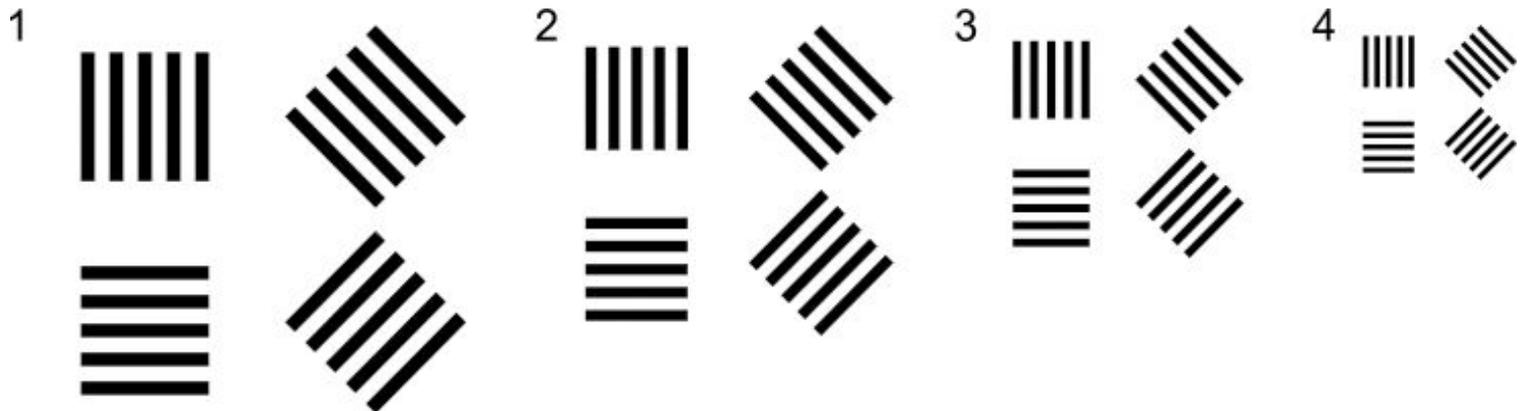


- **Предел разрешения** – минимальное расстояние, при котором два близко расположенных точечных предмета будут изображаться как раздельные

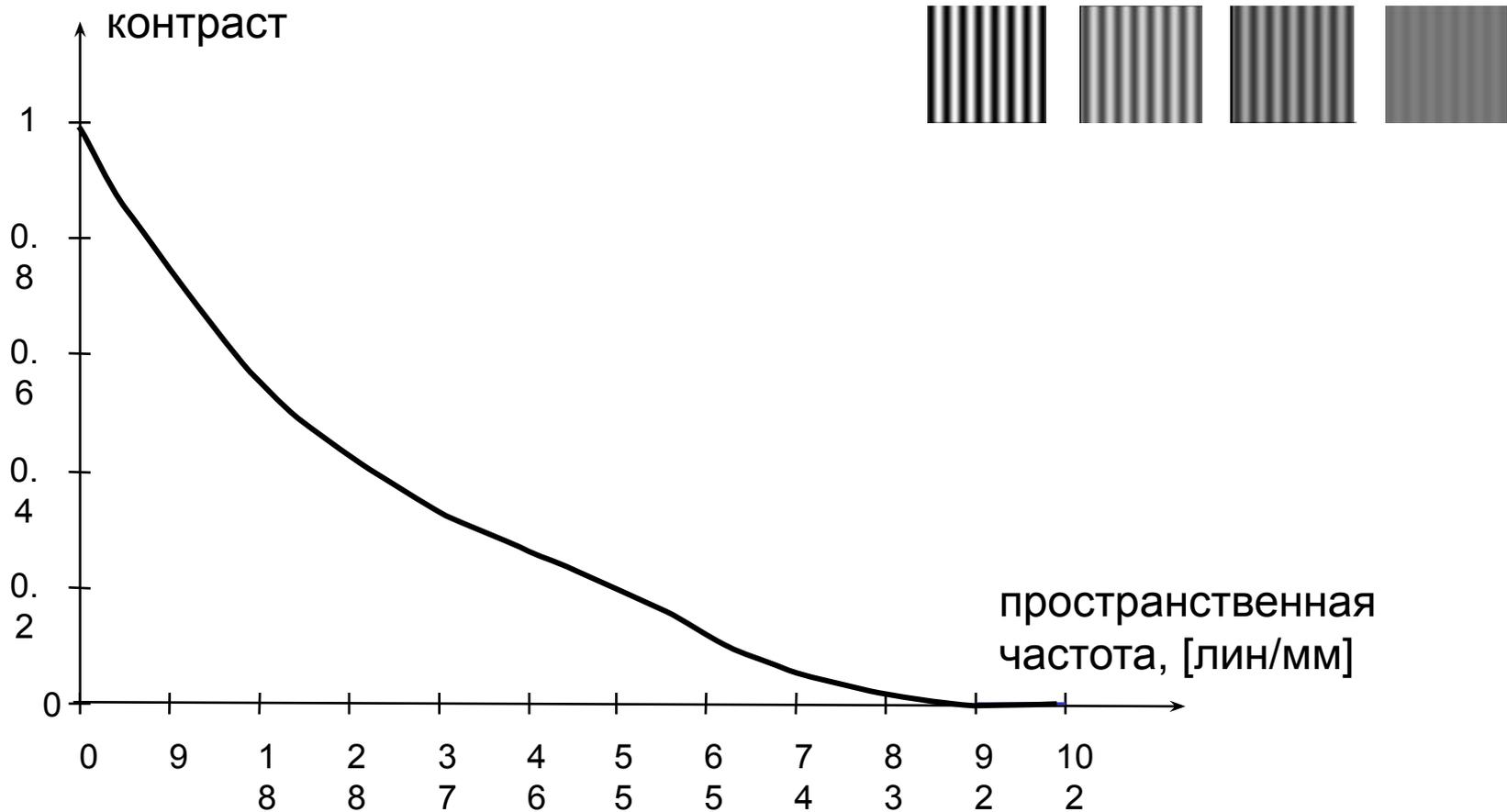




- **Разрешающая способность** определяется как максимальная пространственная частота периодического тест-объекта, в изображении которого еще различимы штрихи
- Пространственная частота измеряется:
  - для удаленного изображения [лин/рад]
  - для близкого изображения [лин/мм]



# Частотно-контрастная характеристика





# Глубина резкости

- **Глубина резкости** - расстояние вдоль оптической оси, измеренное между точками пространства изображений, определяющими границы резкого изображения оптической системой плоскости, заданной в пространстве предметов.
- **Глубина изображаемого пространства** – измеренное вдоль оптической оси расстояние между точками пространства предметов, определяющими границы его резкого изображения оптической системой в данной плоскости.

# Глубина резкости

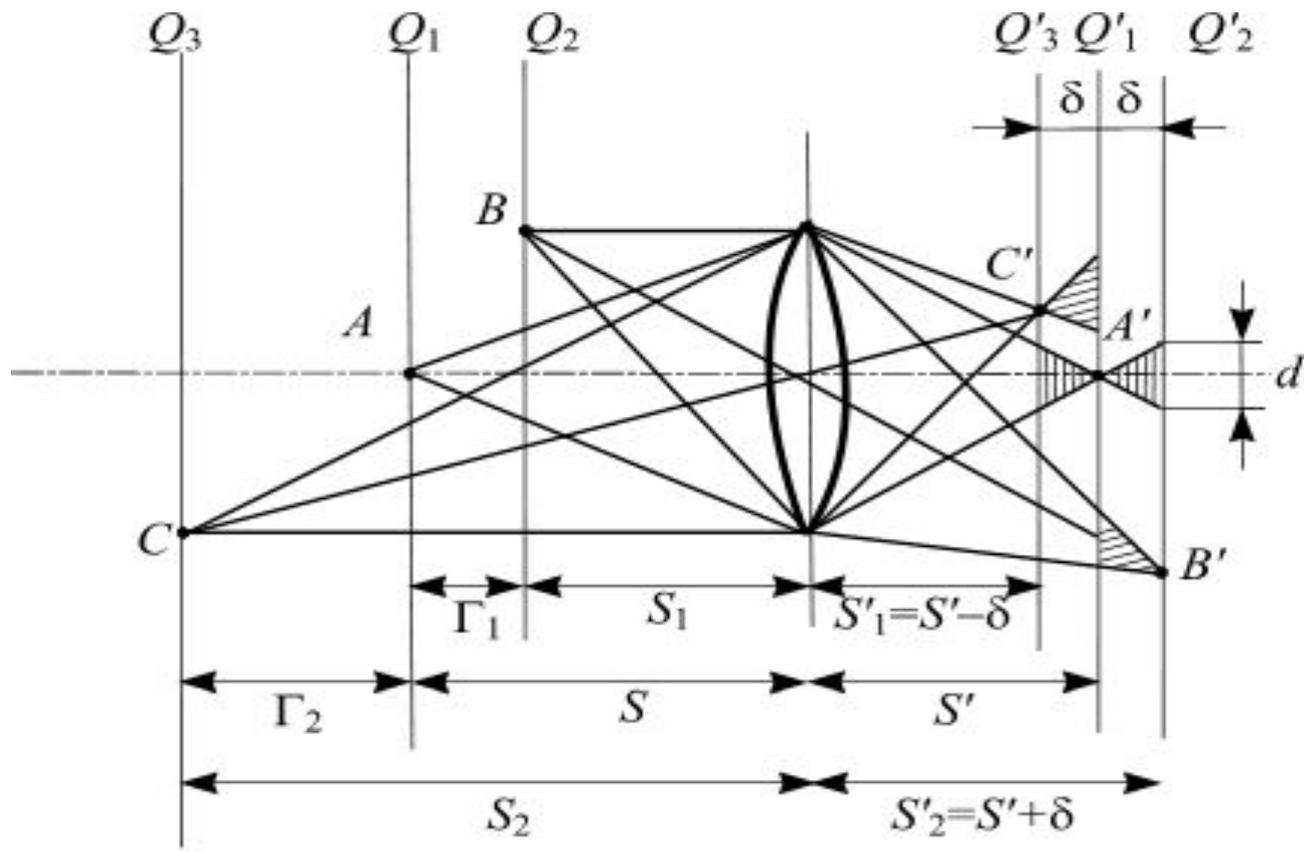


Рис. 2.16. Определение глубины резкости



$$S_1 = \frac{S f^2}{f^2 + (S - f)Fd}$$

$$S_2 = \frac{S f^2}{f^2 - (S - f)Fd}$$

где  $S$  – расстояние установки на резкость;  
 $f$  – фокусное расстояние;  
 $F$  – знаменатель относительного отверстия  
(диафрагменное число);  
 $d$  – диаметр допустимого кружка рассеяния.

$$S_1 \approx \frac{S f^2}{f^2 + SFd}$$

$$S_2 \approx \frac{S f^2}{f^2 - SFd}$$

$$S_1 = \frac{HS}{H + S}; \quad S_2 = \frac{HS}{H - S}$$

где  $H$  - гиперфокальное расстояние - расстояние от самого близкого к объективу плана, еще изображаемого резко при установке объектива на  $\infty$



$$S = 2 \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2}$$

$$S = 2 S_1$$

$$F = \frac{S_2 - S_1}{S_1 S_2} f^2$$

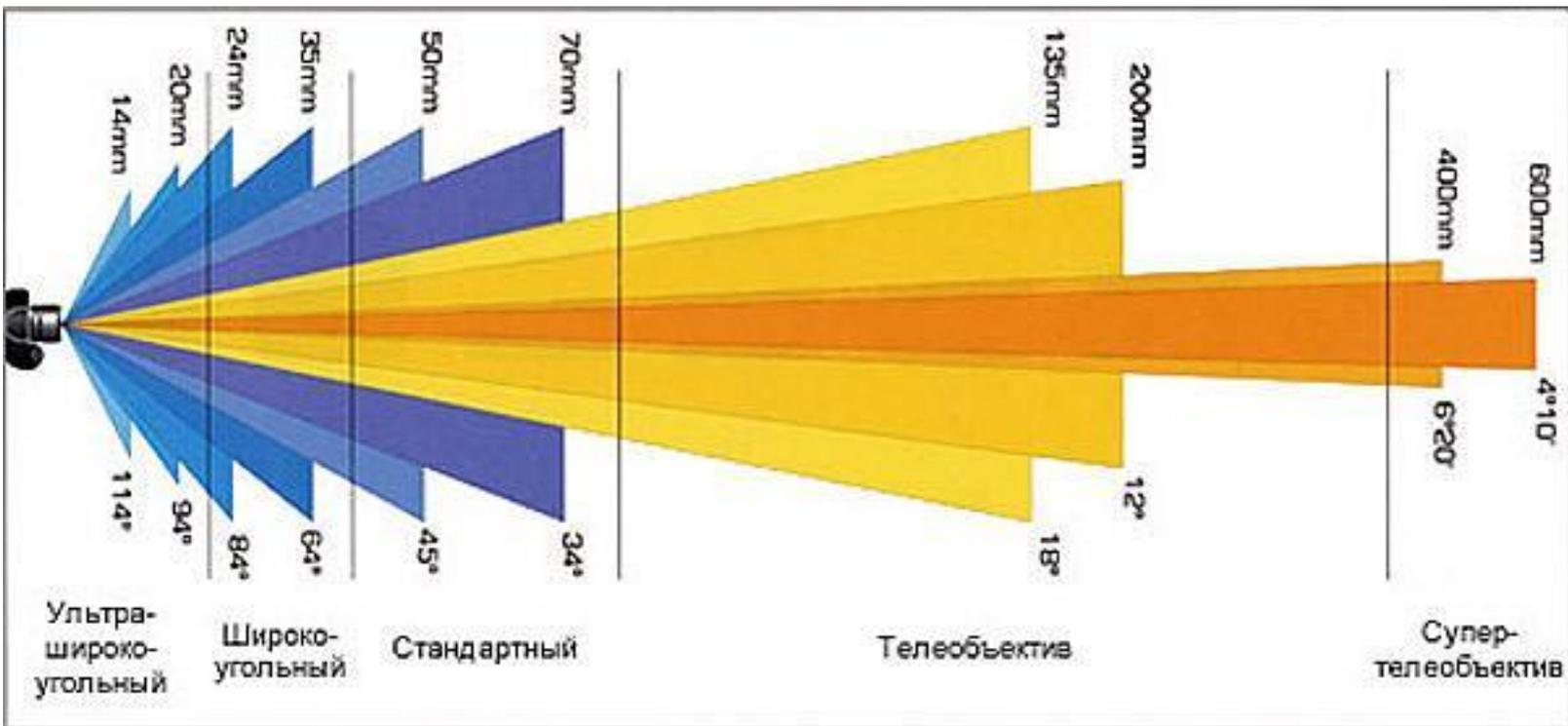
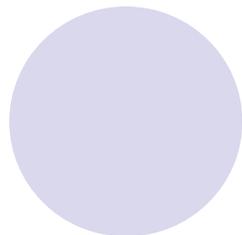
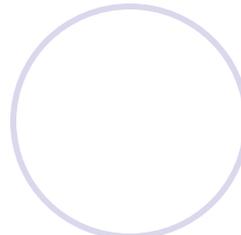
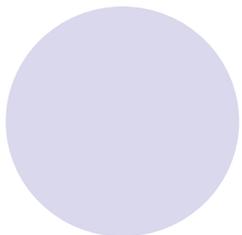
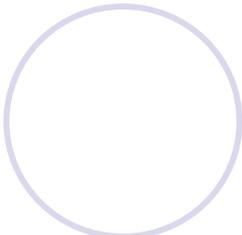
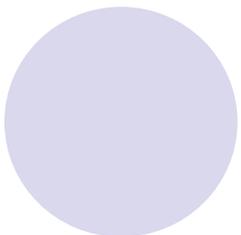
где  $S_1$  и  $S_2$  измеряются в метрах, а  $f$  – в сантиметрах

## 3.6. Объективы телевизионных передающих камер

### Классификация

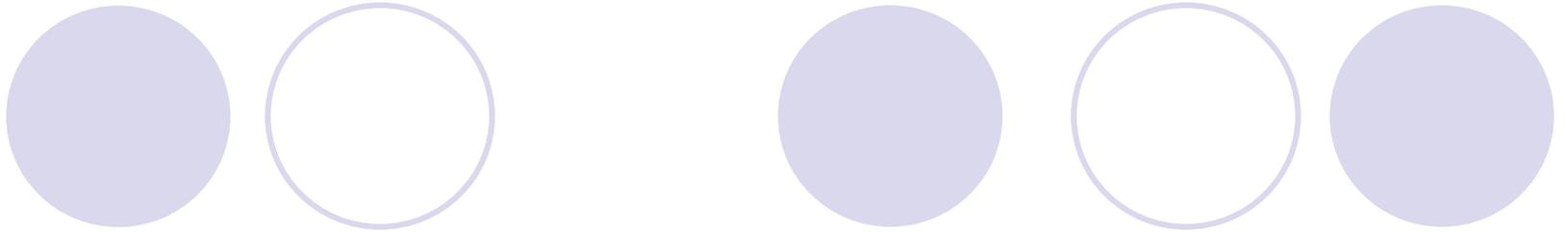
- По величине фокусного расстояния  $f$  :
  - короткофокусные ( $f < 40$  мм)
  - нормальные ( $f = 40 \dots 80$  мм)
  - длиннофокусные ( $f > 80$  мм)
- По относительному отверстию  $O$  (или светосиле  $H$ ) :
  - сверхсветосильные ( $O > 1:2$ )
  - светосильные ( $O = 1:2 \dots 1:2,8$ )
  - малосветосильные ( $O < 1:2,8$ )
- По углу поля зрения
  - с малым углом ( $2\beta < 15 \dots 20^\circ$ )
  - универсальные ( $2\beta = 20 \dots 60^\circ$ )
  - широкоугольные объективы ( $2\beta > 60^\circ$ )

- 1-я группа — объективы, у которых фокусное расстояние примерно равно диагонали кадра. Такие объективы принято называть *нормальными*. Для формата  $24 \times 36$  мм диагональ кадра приблизительно равна 43 мм, для формата кадра  $6 \times 6$  см диагональ кадра примерно равна 85 мм.
- 2-я группа — объективы, у которых фокусное расстояние меньше диагонали кадра (часто указывается: меньше 0,9 диагонали изображения). Такие объективы называются *короткофокусными*.
- 3-я группа — объективы, у которых фокусное расстояние больше диагонали кадра (часто указывается: больше 1,5 диагонали изображения). Такие объективы называются *длиннофокусными*.
- В последнюю группу также входят и так называемые *телеобъективы*



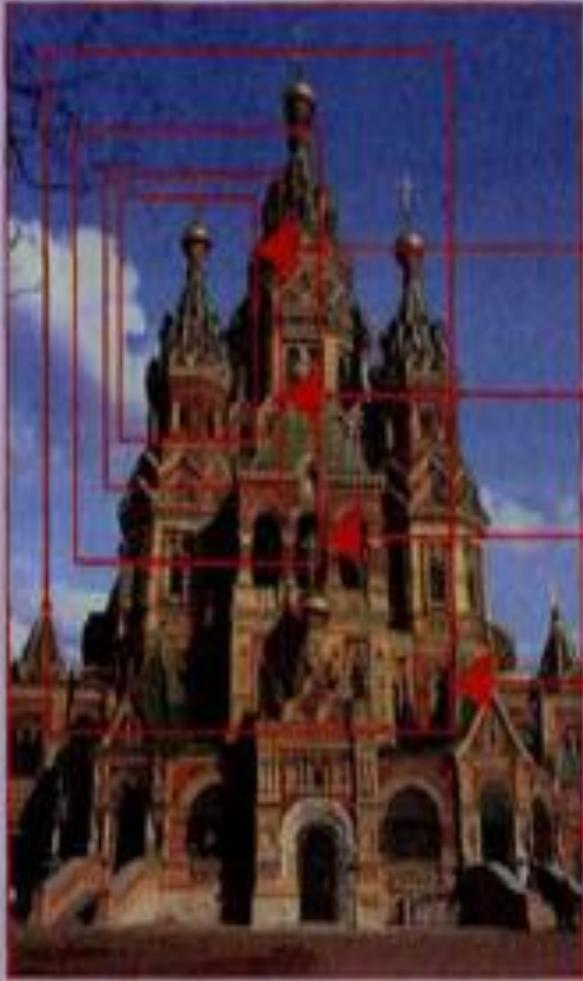
# Объективы с переменным фокусным расстоянием (панкратические)

$$f' = -f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$$



Вариообъектив – ОС с изменением фокусного расстояния в результате непрерывного перемещения одного или нескольких компонентов вдоль её оптической оси.

Трансфокатор – ОС, состоящая из афокальной панкратической насадки с изменяющимся угловым увеличением, и объектива, имеющего постоянное фокусное расстояние.



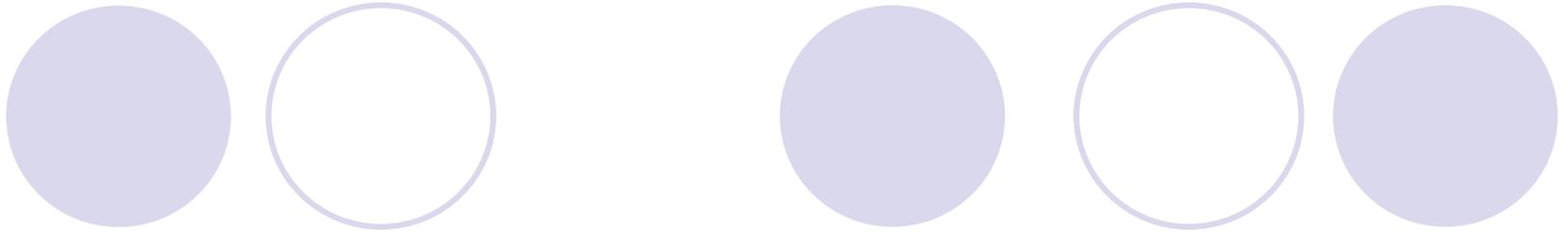
**135 MM**

**90 MM**

**50 MM**

**28 MM**

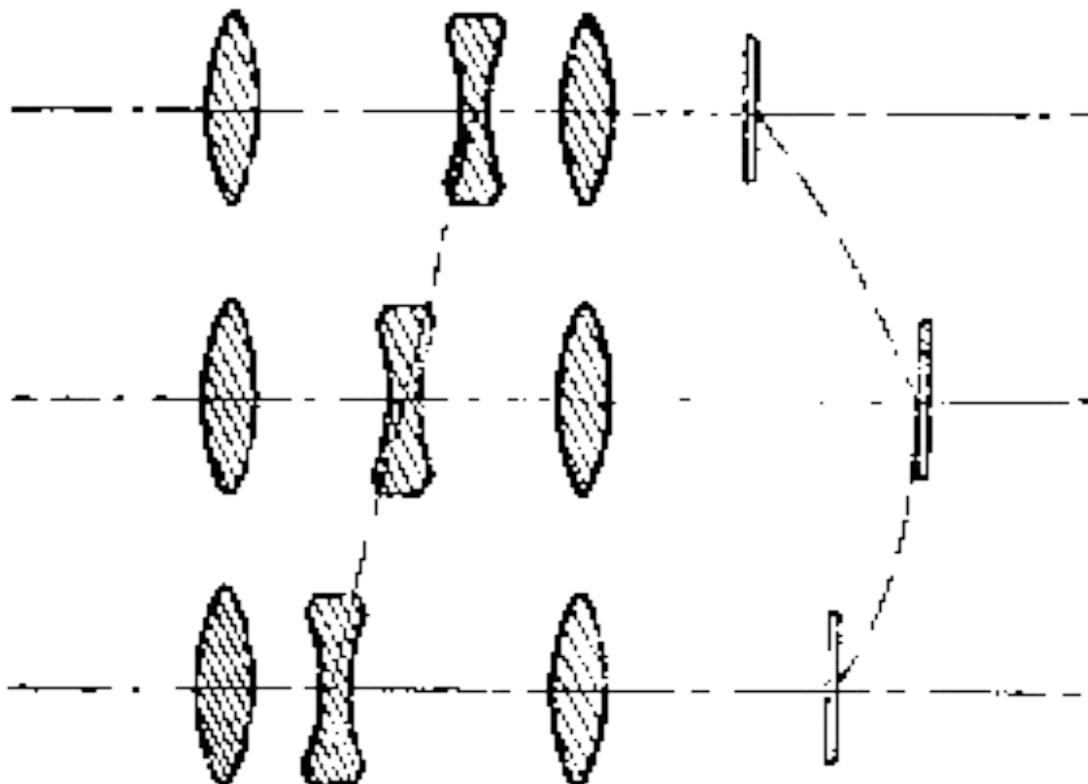
**21 MM**



## **Zoom обеспечивает:**

- возможность постоянного изменения фокусного расстояния;
- сохранение задаваемого максимально допустимого смещения плоскости изображения во всех диапазонах изменения фокусного расстояния;
- неизменное значение диафрагмы;
- соответствие линейному закону движения компонентов;
- достаточно высокое качество изображения.

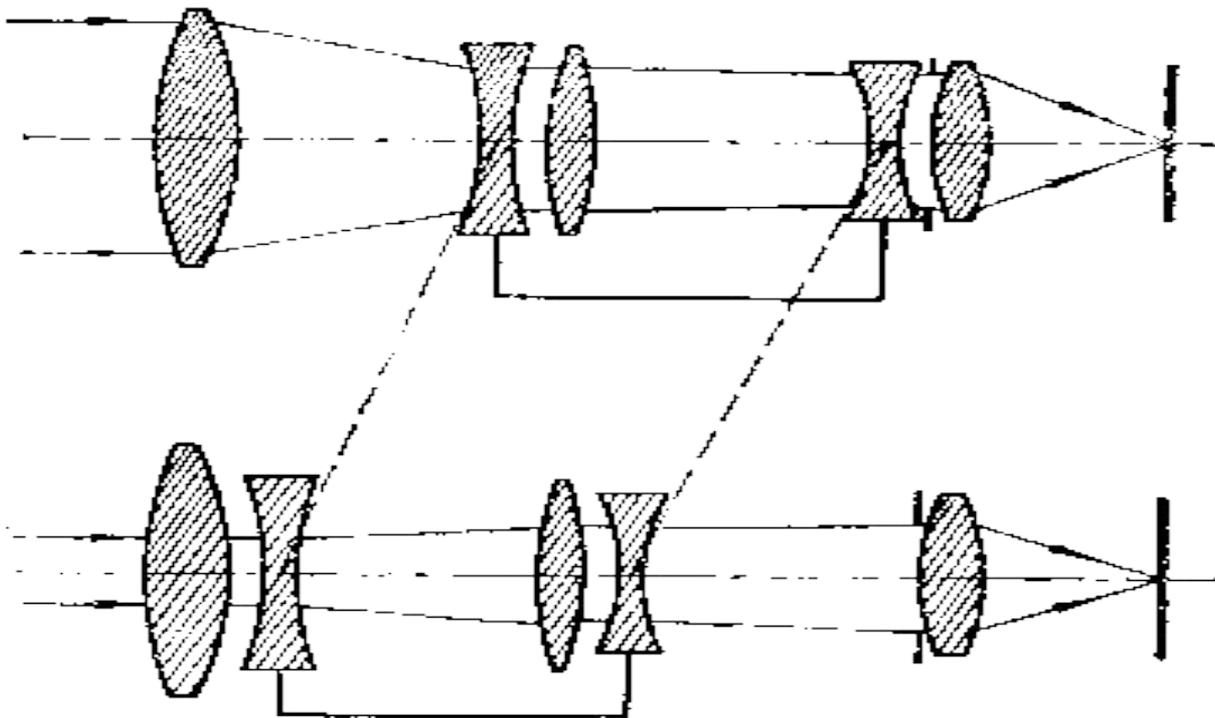
# . Смещение плоскости изображения при изменении фокусного расстояния



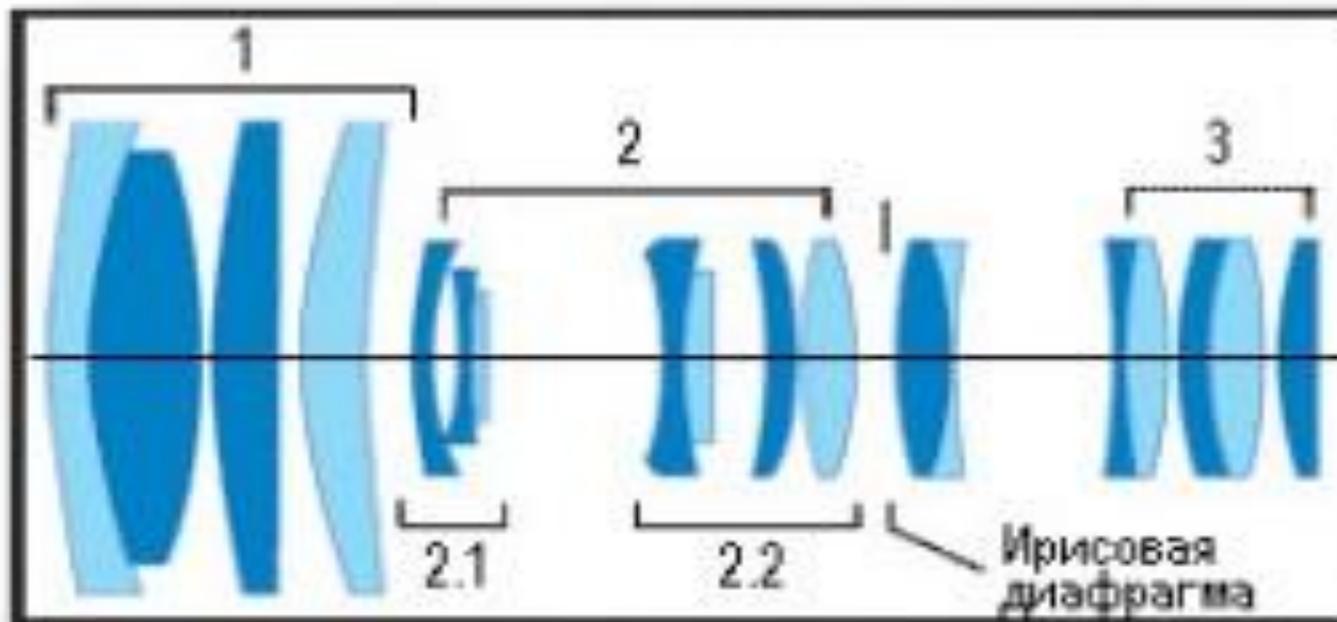
# Компенсация сдвига плоскости изображения при изменении фокусного расстояния

- Механическая – смещение всего объектива для сохранения плоскости фокусировки;
- Оптическая – линейное перемещение внутренних компонент

# Оптическая компенсация сдвига изображения при изменении фокусного расстояния

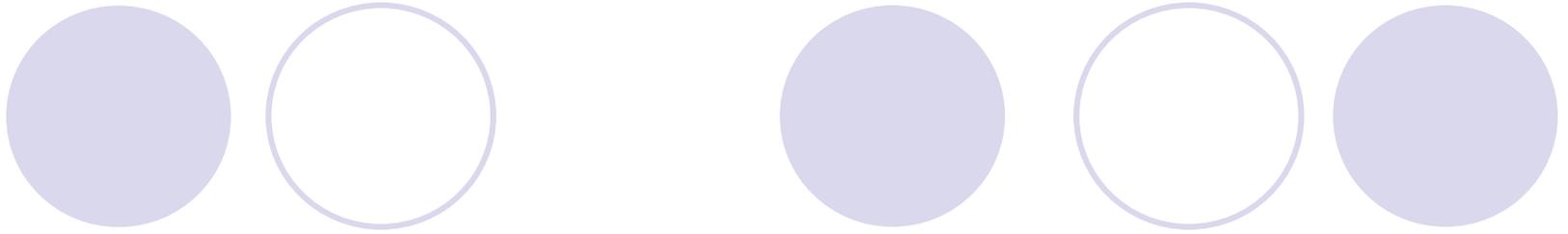


# Оптическая схема вариообъектива

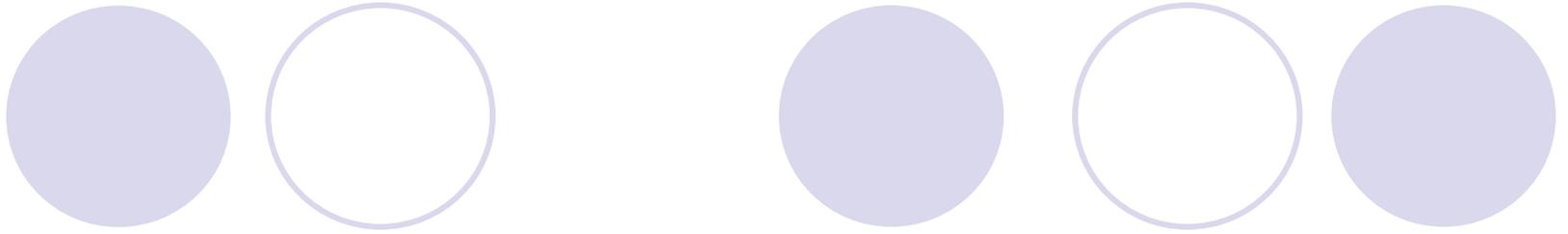


## Группы линз по функциональному назначению:

Группа 1 — фронтальная группа. Выполняет функцию фокусировки объектива. Эту группу принято называть объектной линзой объектива. Передняя и задняя линзы этой группы неподвижны. Для обеспечения фокусировки двигаются только внутренние линзы этой группы. Такая фокусировка называется внутренней фокусировкой (Inner Focus).

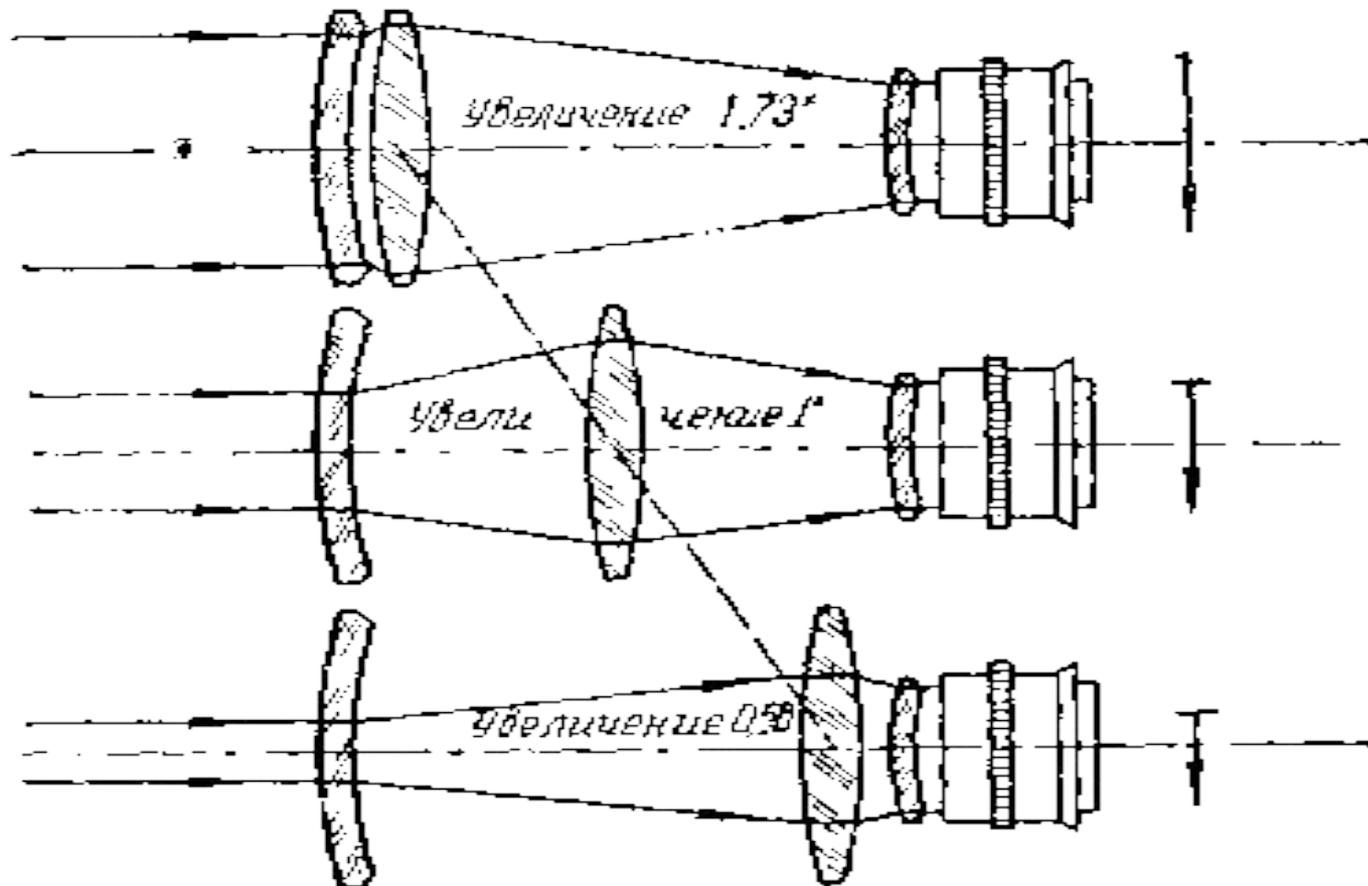


- Группа 2 — группа линз, которая осуществляет главную функцию **вариообъектива** — переменное фокусное расстояние. Эта группа состоит из двух подгрупп:
  - подгруппа 2.1 осуществляет перемещение по линейному закону,
  - подгруппа 2.2 перемещается по нелинейному закону.За вариогруппой линз располагается ирисовая диафрагма.



- Группа 3 — неподвижные линзы (представляют собой окуляр). Функция этой группы — обеспечивать неподвижность плоскости изображения.

# Оптическая схема трансфокатора



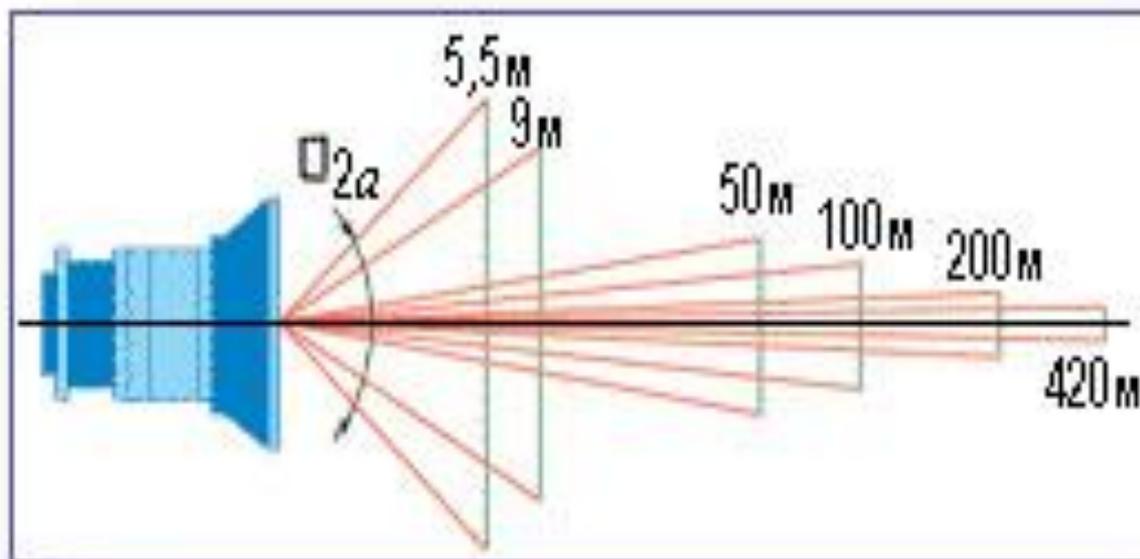
# Основные параметры объективов с переменным фокусным расстоянием

- Рабочий интервал фокусных расстояний  
Эти расстояния характеризуются значениями  $f_{\min}$  — минимальное фокусное расстояние и  $f_{\max}$  — максимальное фокусное расстояние объектива
- Кратность изменения фокусного расстояния (ZOOM):

$$M = f_{\max} / f_{\min}$$

- Угол поля зрения ( $2\sigma$ )
- Светосила

# Изменение угла поля зрения объектива



# Объективы с переменным фокусным расстоянием (панкратические)

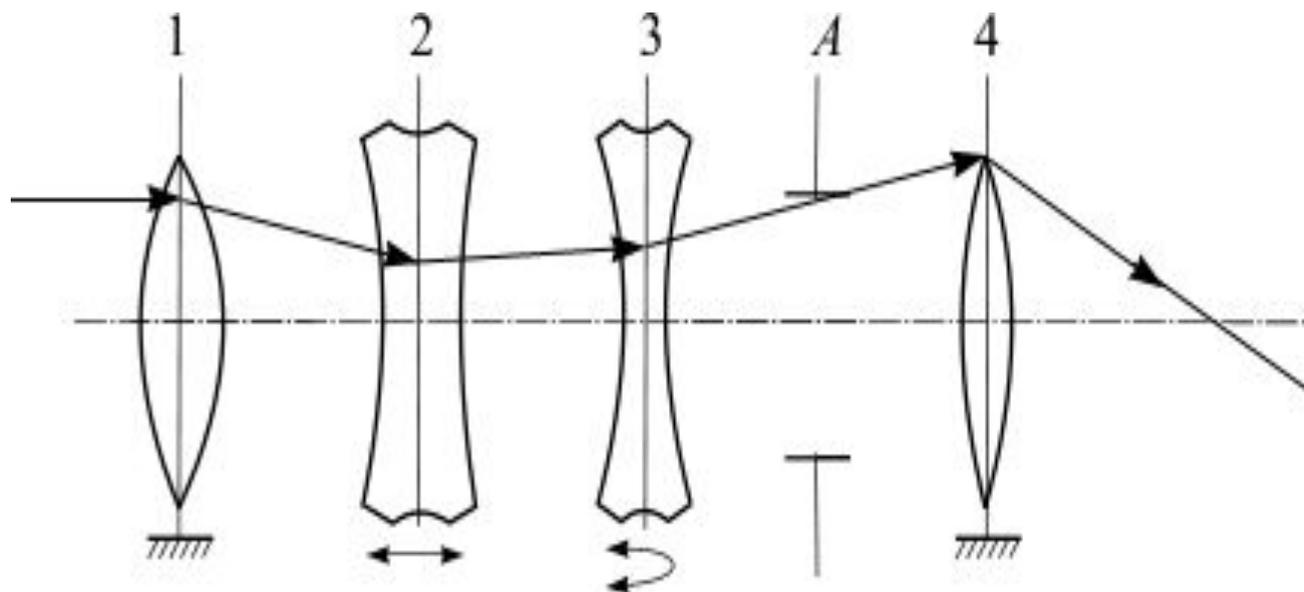
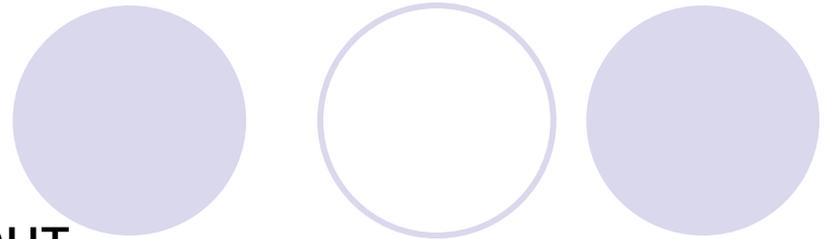
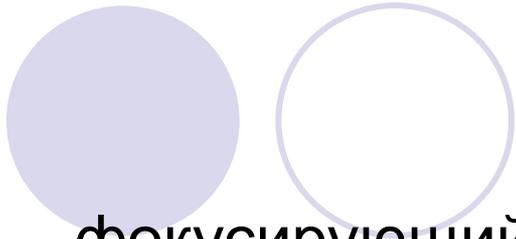


Рис. 2.17. Оптическая схема 4-компонентного панкратического объектива



- 1 – фокусирующий компонент
- 2 – вариатор
- 3 – компенсатор
- 4 - корректор