



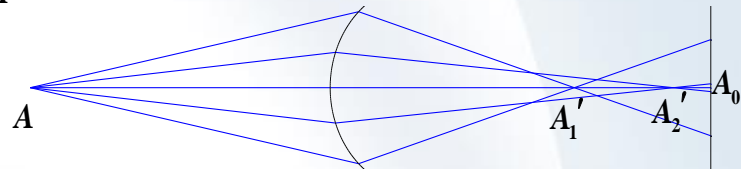
# 第八章

## 光学系统成像质量评价



实际光学系统：折射定律+转面公式

$$\begin{cases} \sin I = \frac{L-r}{r} \sin U, \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \\ \Rightarrow L+U \neq L'+U' \Rightarrow \text{非完善成像} \\ \text{转面公式} \begin{cases} L_2 = L'_1 - d \\ U_2 = U'_1 \end{cases} \end{cases}$$



近轴近似  
 $U \approx 0, I \approx 0$

近轴光路计算

$$\begin{cases} i = \frac{l-r}{r} u, i' = \frac{n}{n'} i \\ \Rightarrow l' \text{ 与 } u \text{ 无关} \Rightarrow \text{成完善像} \Rightarrow \text{结论用于} \\ u' = i + u - i', l' = r + r \frac{i'}{u'} \end{cases}$$



结论推广到任意大空间、  
任意宽光束都成完善像



理想光学系统  $\Rightarrow$  成像性质：

如果已知  $\begin{cases} \text{两对共轭面的位置、放大率;} \\ \text{或} \begin{cases} \text{一对共轭面的位置、放大率,} \\ \text{以及光轴上的两对共轭点} \end{cases} \end{cases}$  可据此确定物点对应的像点

近似表示实际光学系统成像位置、大小  
作为衡量成像质量的标准

实际光学系统成像与理想成像之间的差别：  
——像差

主点、主面、焦点、焦面  $\Rightarrow$

$\begin{cases} \text{作图法：找特殊光线} \\ \text{解析法：牛顿公式、高斯公式} \end{cases}$

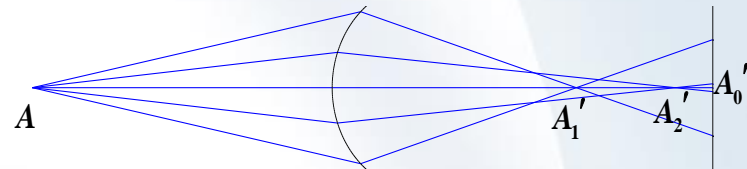


基点、基面





实际光学系统：折射定律+转面公式  $\Rightarrow L' \sim U \Rightarrow$  非完善成像



近轴近似  
 $U \approx 0, I \approx 0$

近轴光路计算  $\Rightarrow l'$  与  $u$  无关  $\Rightarrow$  成完善像  $\Rightarrow$  结论用于

{ 近似表示实际光学系统成像位置、大小  
作为衡量成像质量的标准



结论推广到任意大空间、  
任意宽光束都成完善像

实际光学系统成像与理想成像之间的差别：  
——像差



理想光学系统  $\Rightarrow$  成像性质：

主点、主面、焦点、焦面  $\Rightarrow$

{ 作图法：找特殊光线  
解析法：牛顿公式、高斯公式



基点、基面



如果已知 { 两对共轭面的位置、放大率；  
或 { 一对共轭面的位置、放大率，  
以及光轴上的两对共轭点 } 可据此确定物点对应的像点



## ◆像差的产生原因：

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} \dots\dots$$

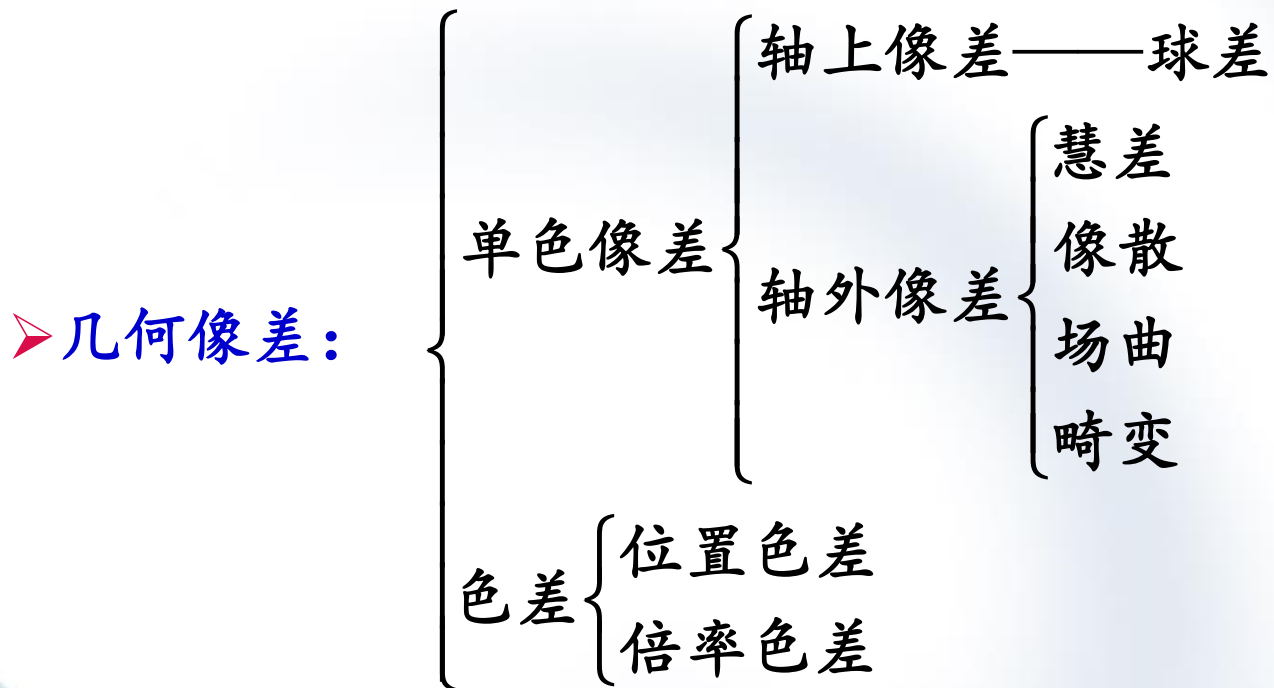
$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} \dots\dots$$

$$\tan \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \frac{2\theta^5}{15} \dots\dots$$

导出近轴公式时，利用三角函数级数展开式中的第一项代替函数本身，忽略了级数展开式中的高次项，这是产生像差的原因



## ◆ 像差分类：



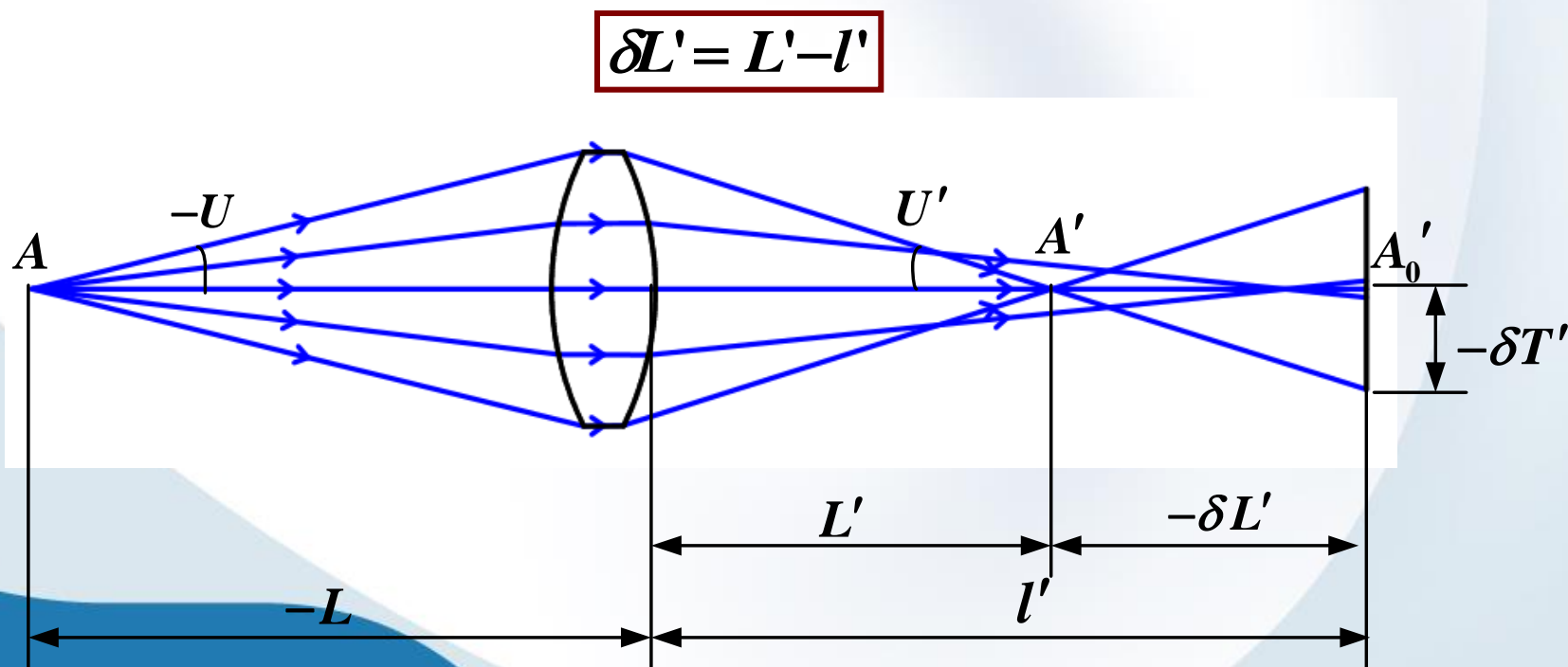
➤ 波像差： 实际波面与理想球面的偏差



# 球 差

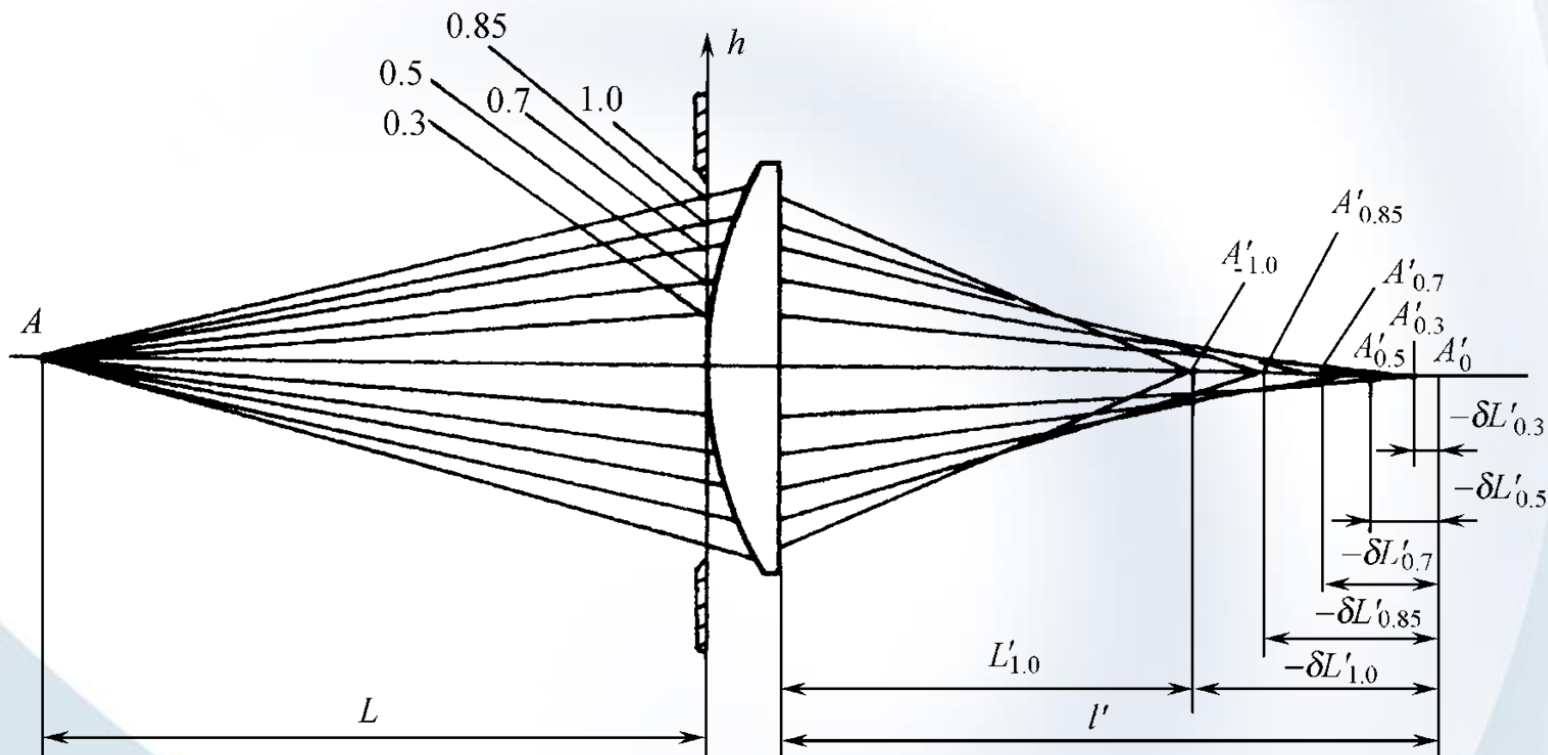
# 1、球差的定义

➤ **轴向球差**：轴上物点发出的不同孔径角 $U$ 的光线经光学系统后交光轴于不同位置，其相对于近轴像点(理想像点)的偏离称为**轴向球差**，即**球差**，用 $\delta L'$ 表示：





➤ 球差与光线孔径角或入射高度的关系：

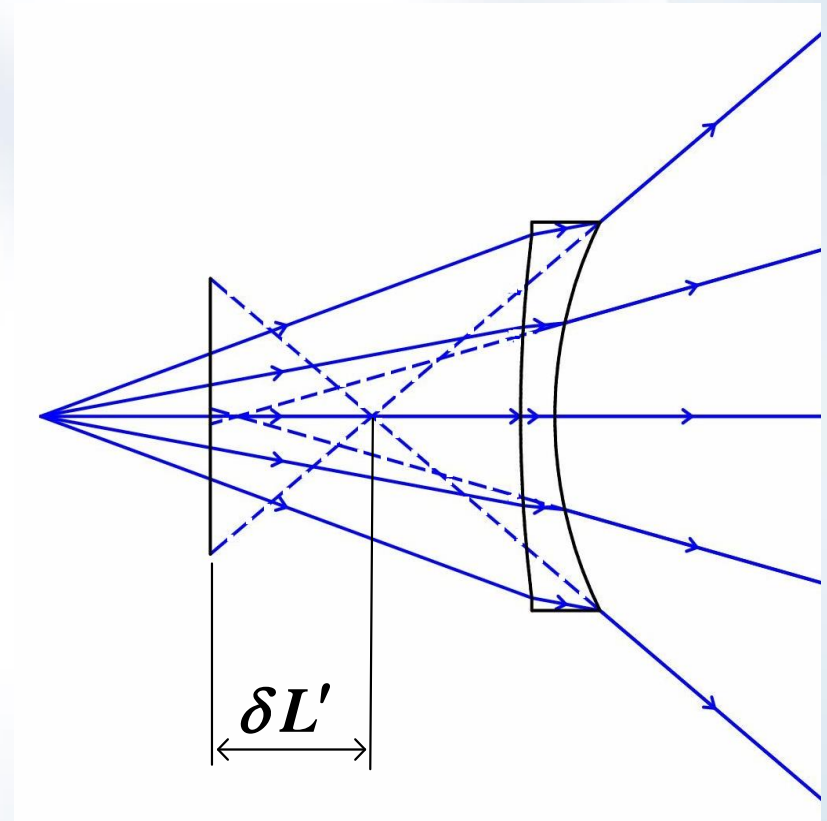
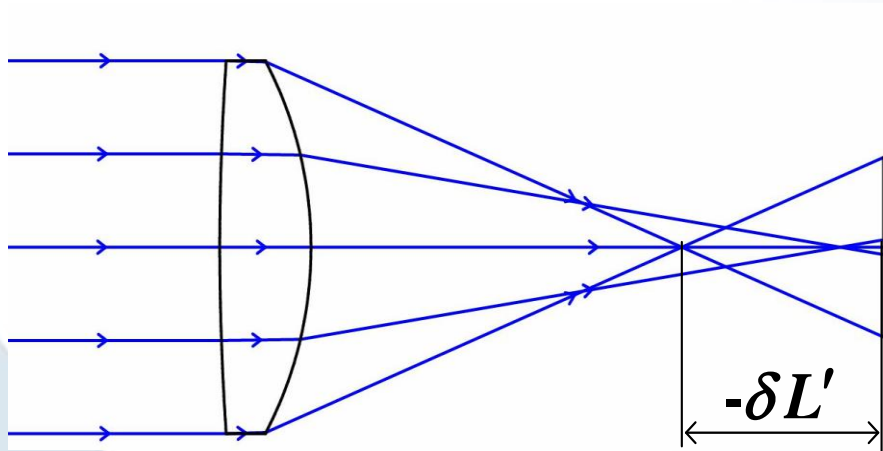


一般选取  $h = h_m$ 、 $0.85 h_m$ 、 $0.707 h_m$ 、 $0.5 h_m$ 、 $0.3 h_m$  的光线计算球差； $h_m$  为光线的最大入射高度



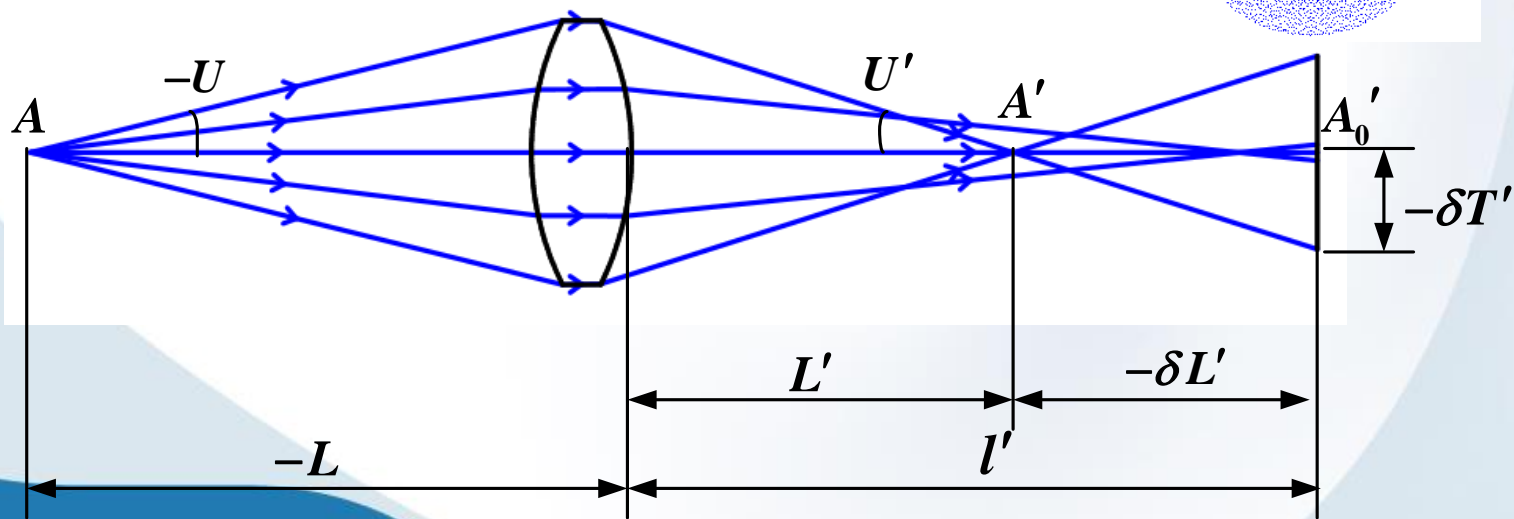


$$\delta L' = L' - l'$$



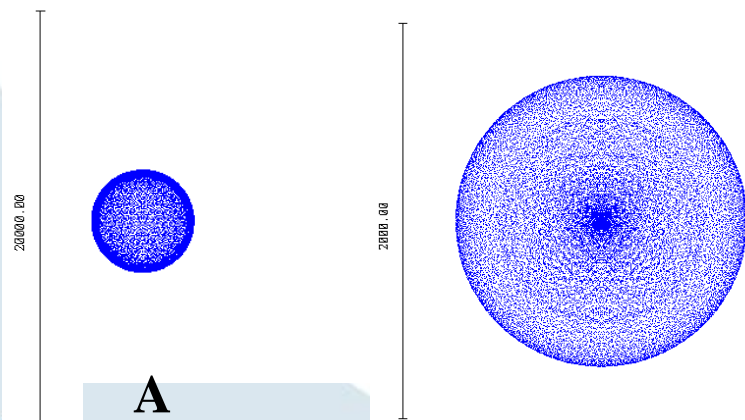
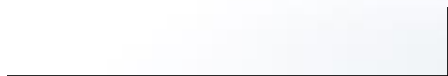
**垂轴球差**：由于球差的存在，轴上物点在高斯像面上形成一个圆形弥散斑，弥散斑的半径称为**垂轴球差**  $\delta T'$

$$\delta T' = \delta L' \tan U'$$



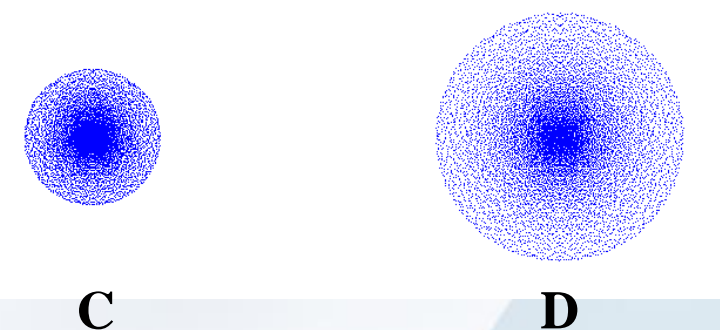


## 2、球差对成像的影响



A B C D

高斯像面



C  
高斯像面




## 2、球差对成像的影响

- 一个点形成的像为一个圆斑，破坏了理想成像的对应关系，使像点变得模糊，降低了成像的清晰度
- 球差是轴上点的像差，位于视场中心处，对整个像面的影响最为明显，必须加以校正



## 4、球差的展开

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 + A_3 h^6 + \dots = a_1 U^2 + a_2 U^4 + a_3 U^6 + \dots$$

初级      二级         
球差      球差      高级球差

- $A_1$ 、 $A_2$ ...分别为初级球差系数、二级球差系数...
- 小孔径系统主要考虑初级球差；大孔径系统必须考虑高级球差
- 大部分光学系统二级以上球差很小可忽略，球差表示为

$$\delta L' = A_1 h_1^2 + A_2 h_1^4 = a_1 U_1^2 + a_2 U_1^4$$



## 4、球差的展开

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 + A_3 h^6 + \dots = a_1 U^2 + a_2 U^4 + a_3 U^6 + \dots$$

### ➤ 不含奇次项

球差具有轴对称性，当 $h$ 或 $U$ 变号时球差不变

### ➤ 不含常数项

当 $h$ 或 $U$ 为零时，像方截距 $L'$ 等于 $l'$ ，球差 $\delta L' = 0$

### ➤ 没有 $y$ 或 $\omega$ 项

球差是轴上点像差，与视场无关

## 5、球差的校正

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 + \dots$$

➤ 在实际设计光学系统时，常通过使初级球差与高级球差相补偿，将边缘带（最大口径光束）的球差校正到零，只考虑初级球差和二级球差时：

$$\delta L'_m = A_1 h_m^2 + A_2 h_m^4 = 0$$

$$\Rightarrow A_1 = -A_2 h_m^2$$

$$\Rightarrow \delta L' = -A_2 h_m^2 h^2 + A_2 h^4$$

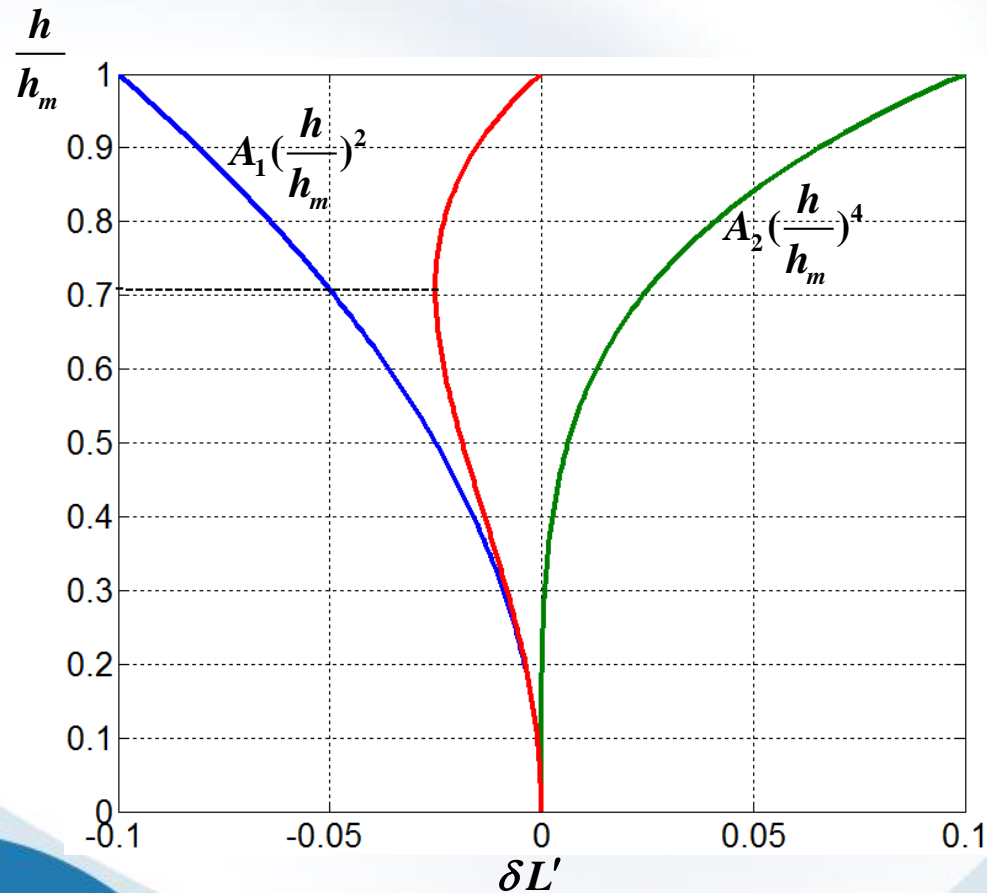
$\Rightarrow h = 0.707 h_m$  时有最大球差：

$$\delta L'_{0.707} = -A_2 h_m^2 (0.707 h_m)^2 + A_2 (0.707 h_m)^4 = -A_2 h_m^4 / 4$$



## 5、球差的校正

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 = -A_2 h_m^2 h^2 + A_2 h^4$$

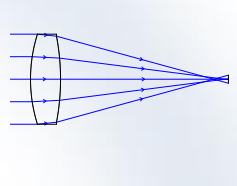
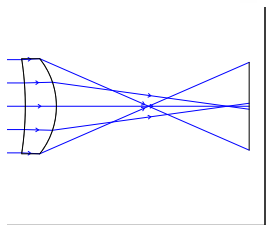






## 5、球差的校正

### 1) 调整透镜曲率





## 5、球差的校正

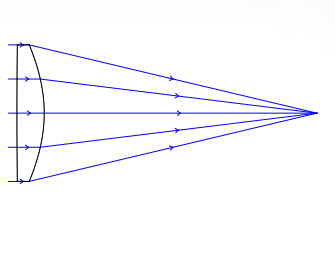
### 2) 正负透镜组合

LAYOUT	
LET USING A CROWN AND A FLINT. 16 126.37605 MM	
	DOUBLET.ZMX CONFIGURATION 1 OF 1



## 5、球差的校正

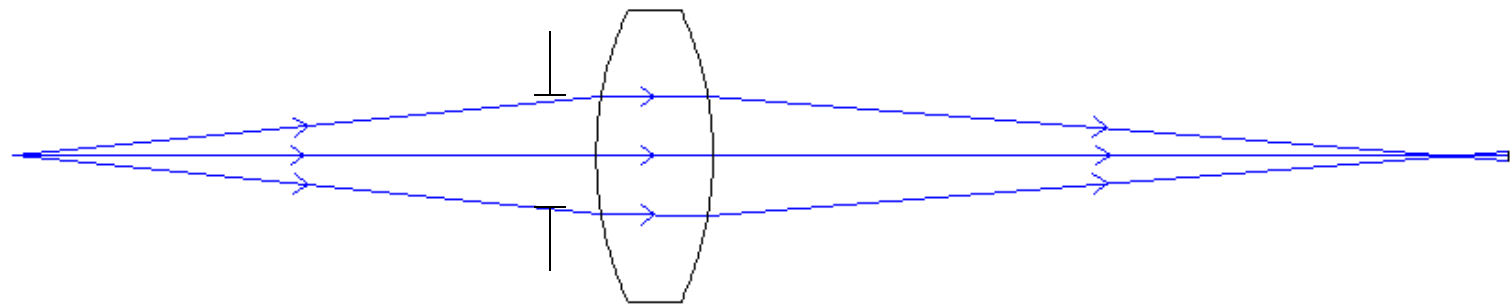
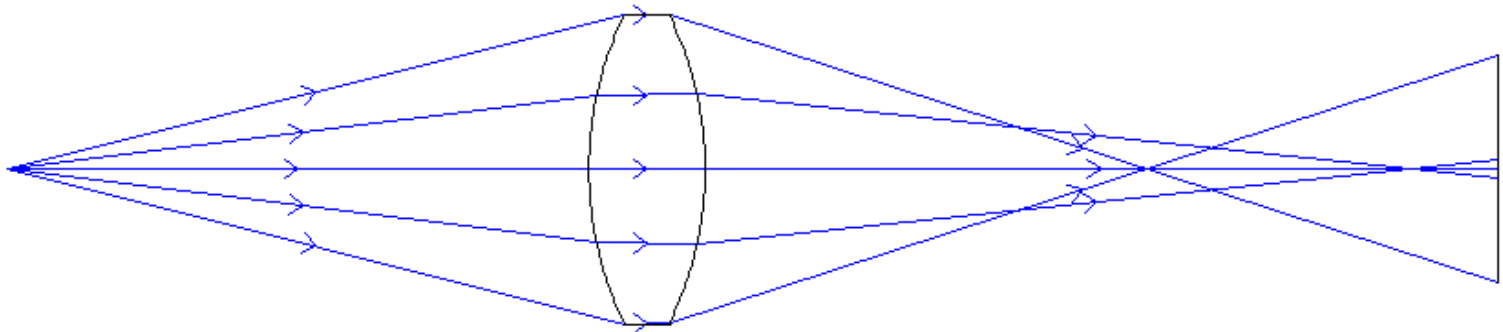
### 3) 非球面镜片





## 5、球差的校正

4) 在透镜前加一个光阑，只让近轴光线通过



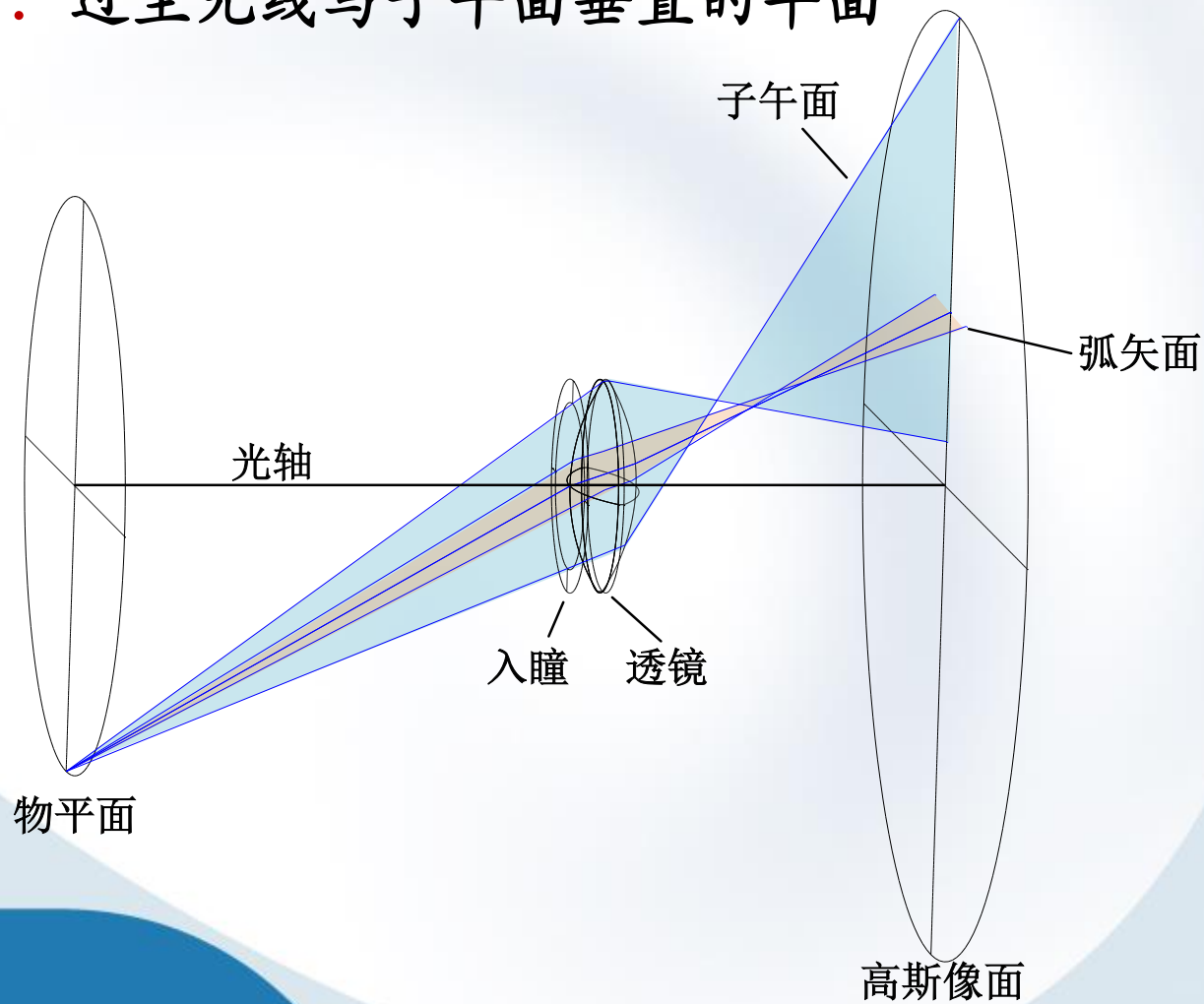


替 差



**子午面：**主光线（或轴外物点）与光轴决定的平面

**弧矢面：**过主光线与子午面垂直的平面





**彗差**：轴外物点发出的**宽光束**，经系统后所成的像对主光线失去对称的一种像差。

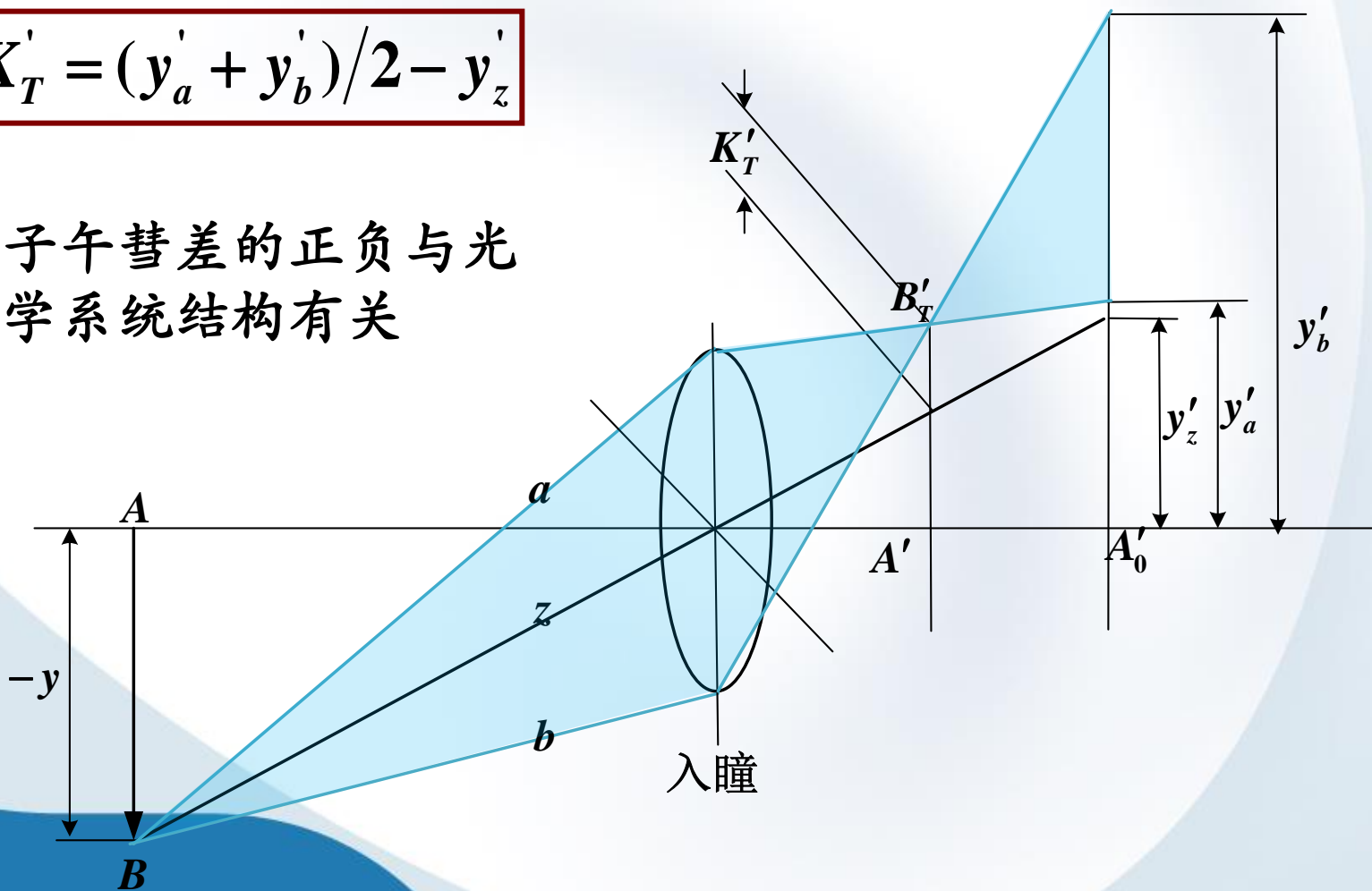
➤ 子午彗差

➤ 弧矢彗差

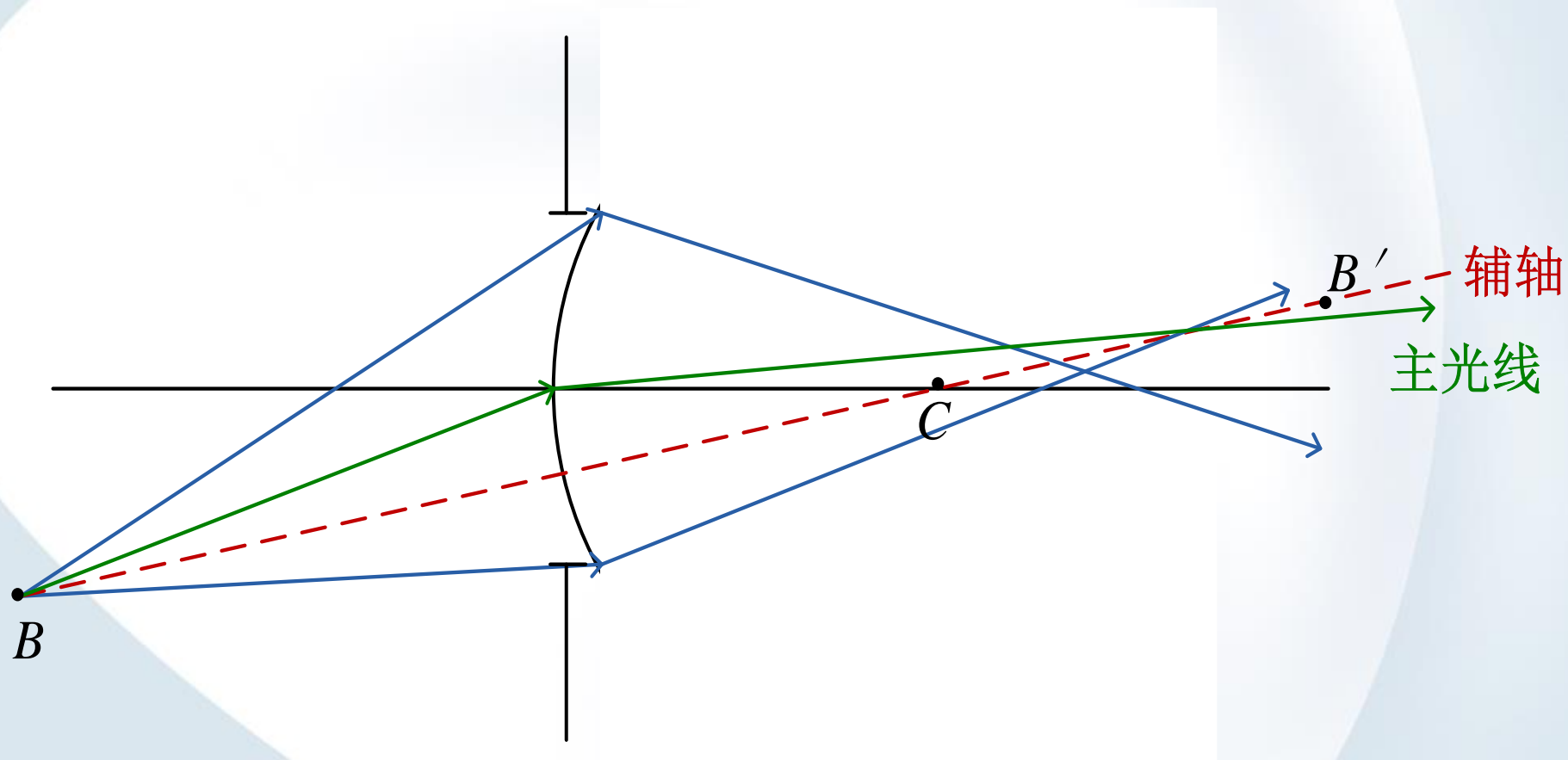
1) 子午彗差：子午面内的光线对(上下光线)的交点 $B_T'$ 到主光线的垂轴距离 $K_T'$

$$K_T' = (y_a' + y_b')/2 - y_z'$$

子午彗差的正负与光学系统结构有关



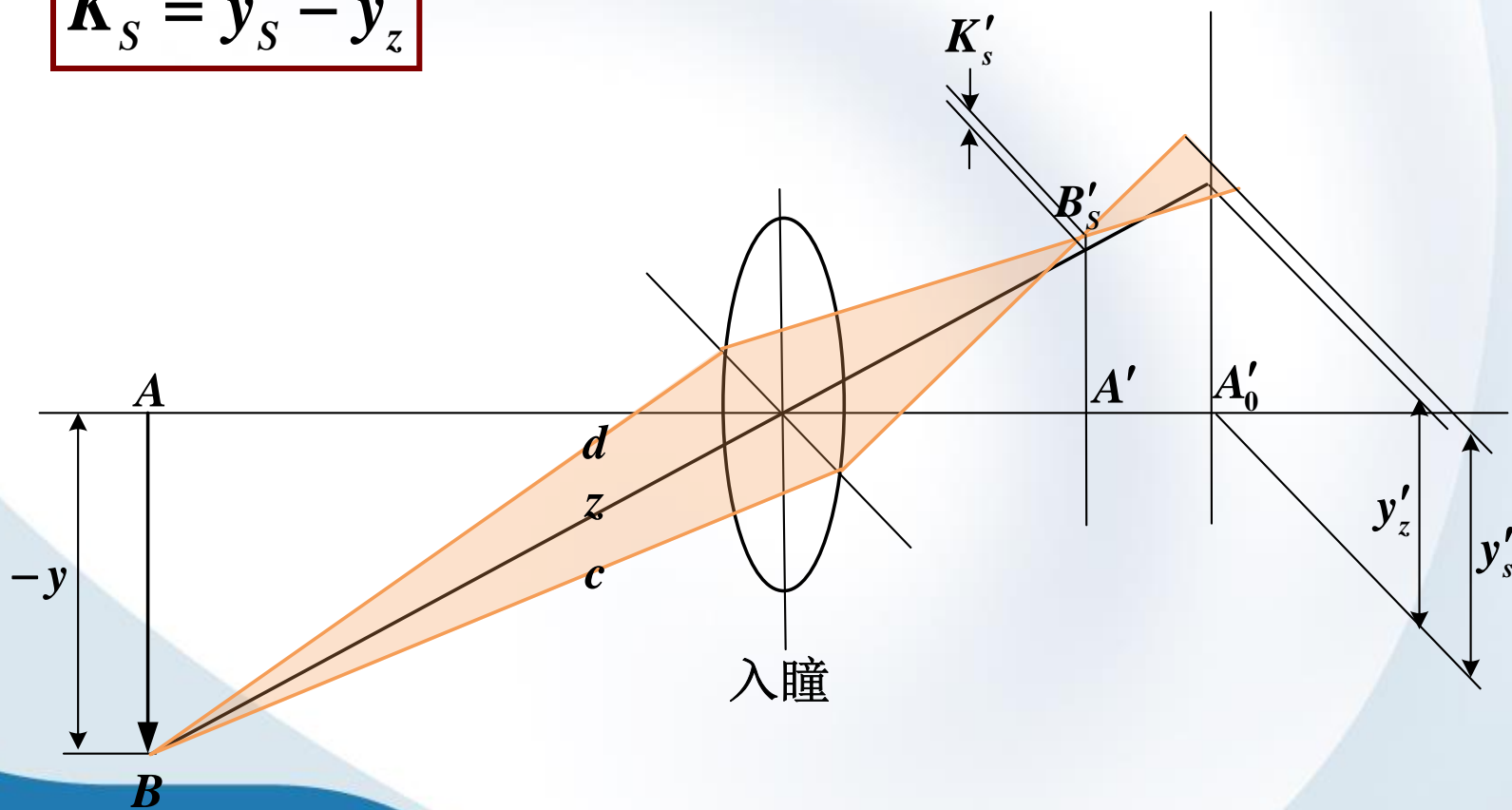




单个折射球面

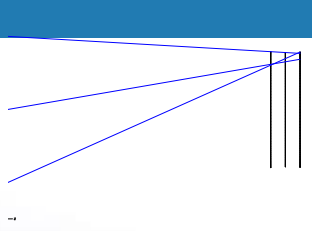
2) 弧矢彗差：前光线c、后光线d经系统后的交点 $B'_S$ 到主光线的垂直于光轴方向的距离，用 $K'_S$ 表示

$$K'_S = y'_S - y'_z$$



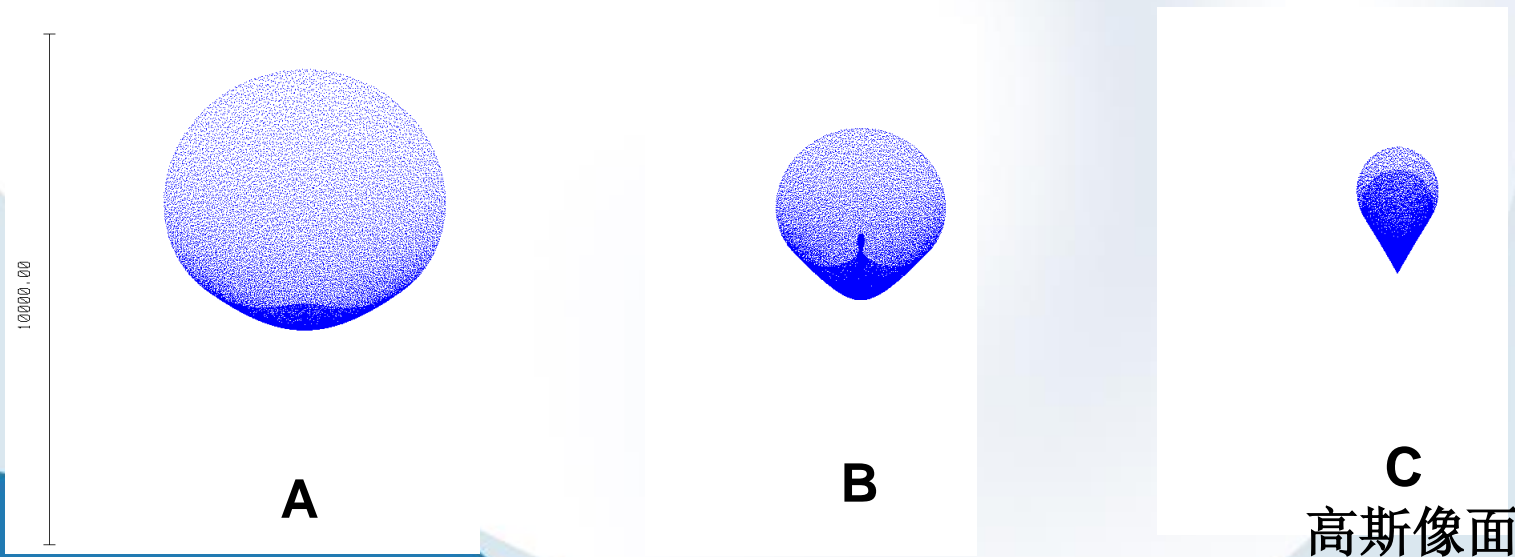


### 3) 彗差对成像的影响:



A B C

只考虑彗差时，轴外点物在像方A、B、C位置的弥散斑：



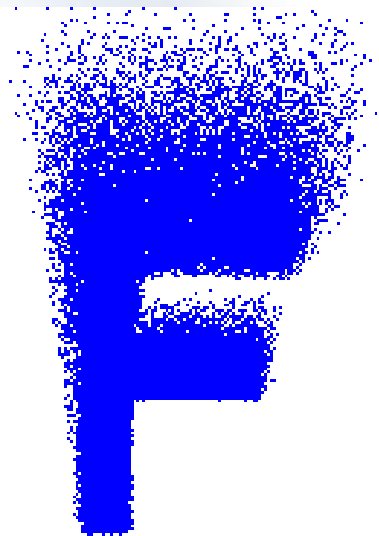


### 3) 彗差对成像的影响:

➤ 彗差是轴外像差之一，破坏了轴外视场成像的清晰度



物



像



#### 4) 彗差的展开式:

$$K'_s = A_1 y h^2 + A_2 y h^4 + A_3 y^3 h^2 + \dots$$

初级彗差      孔径二级彗差      视场二级彗差

➤ 彗差与视场（视场角 $\omega$ 或物高 $y$ ）有关，与孔径角 $u$ 或入射高度 $h$ 有关：

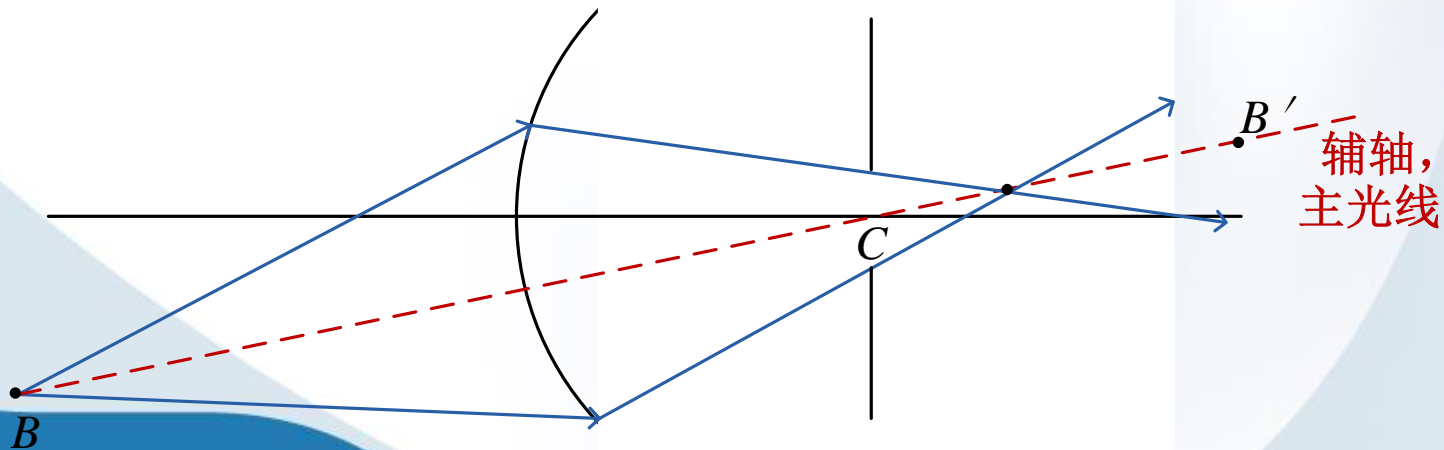
- ✓ 物点离光轴越远，彗差越大；
- ✓ 对给定的离轴物点，成像光束孔径角越大，彗差愈大；
- ✓ 当视场和孔径均为零时，没有彗差

➤ 可以对某一孔径带将彗差校正到0



## 5) 减小彗差的方法:

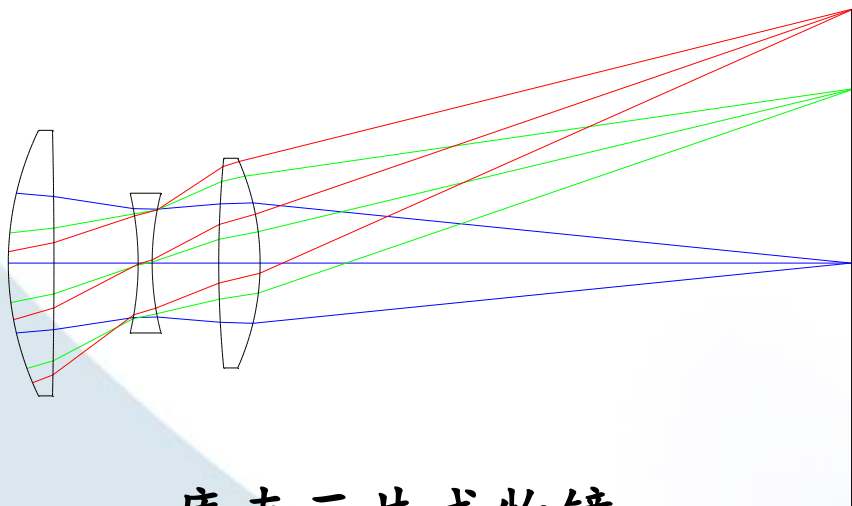
- 适当选取透镜的曲率半径
- 采用正负透镜的胶合
- 调整光阑与镜头的相对位置, 例如, 光阑通过单折射面的曲率中心时不产生彗差



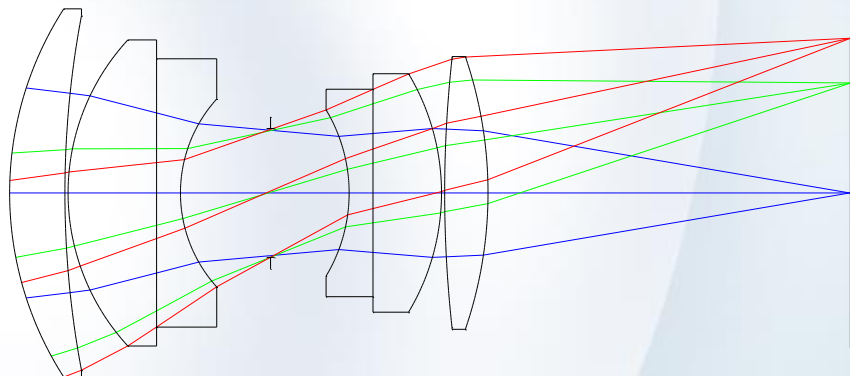


## 5) 减小彗差的方法:

➤ 对称式光学系统，当垂轴放大率 $\beta=-1$ 时，彗差自动校正



库克三片式物镜



双高斯物镜

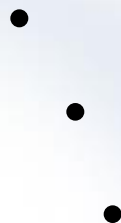
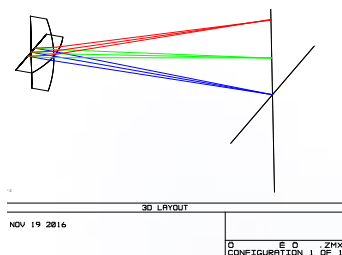
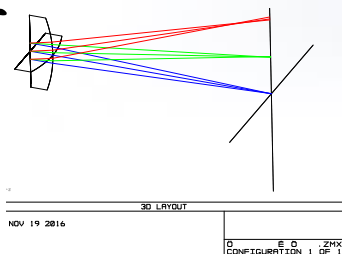


# 像散、场曲





轴外点发出的宽光束经光学系统后有慧差产生。若缩小光阑只允许主光线附近的无限**细光束**通过，则不存在慧差



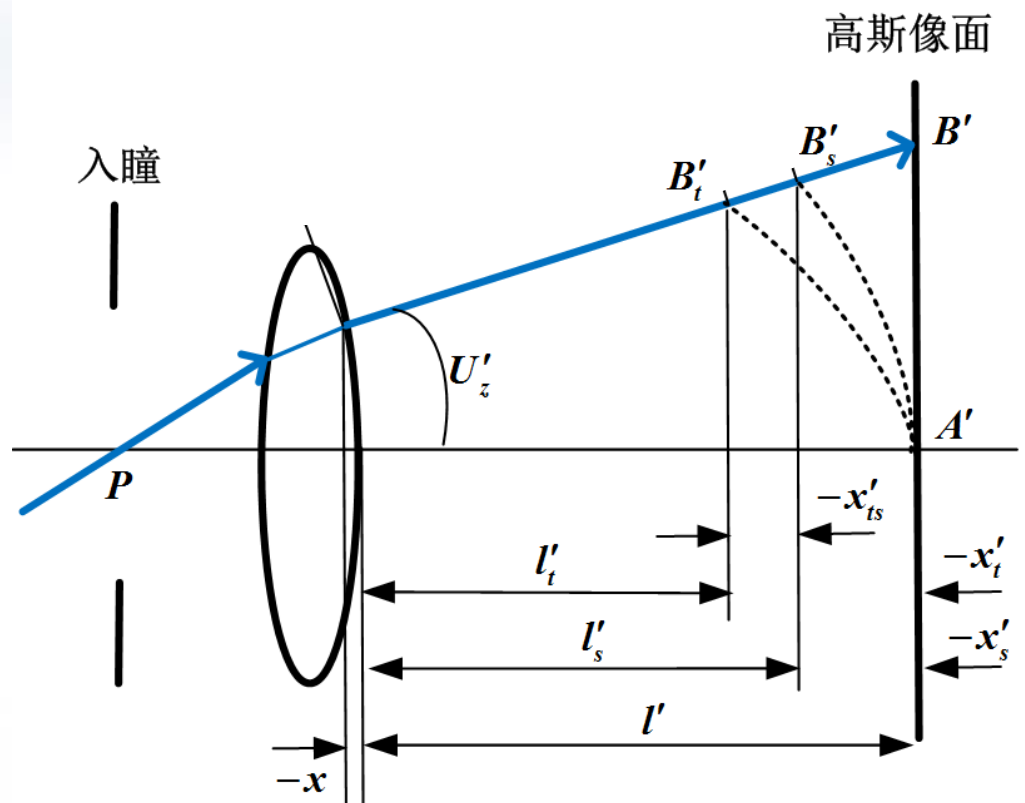
1) 场曲：轴外点发出光束的会聚点沿光轴方向偏离理想像面的距离。

◆子午场曲：

$$x'_t = l'_t - l'$$

◆弧矢场曲：

$$x'_s = l'_s - l'$$



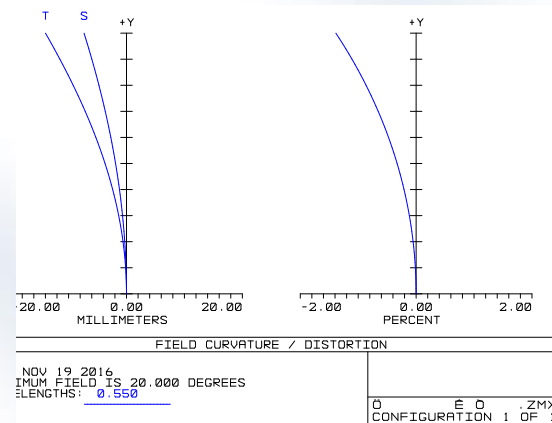


◆各视场的子午像点构成的像面称为**子午像面**

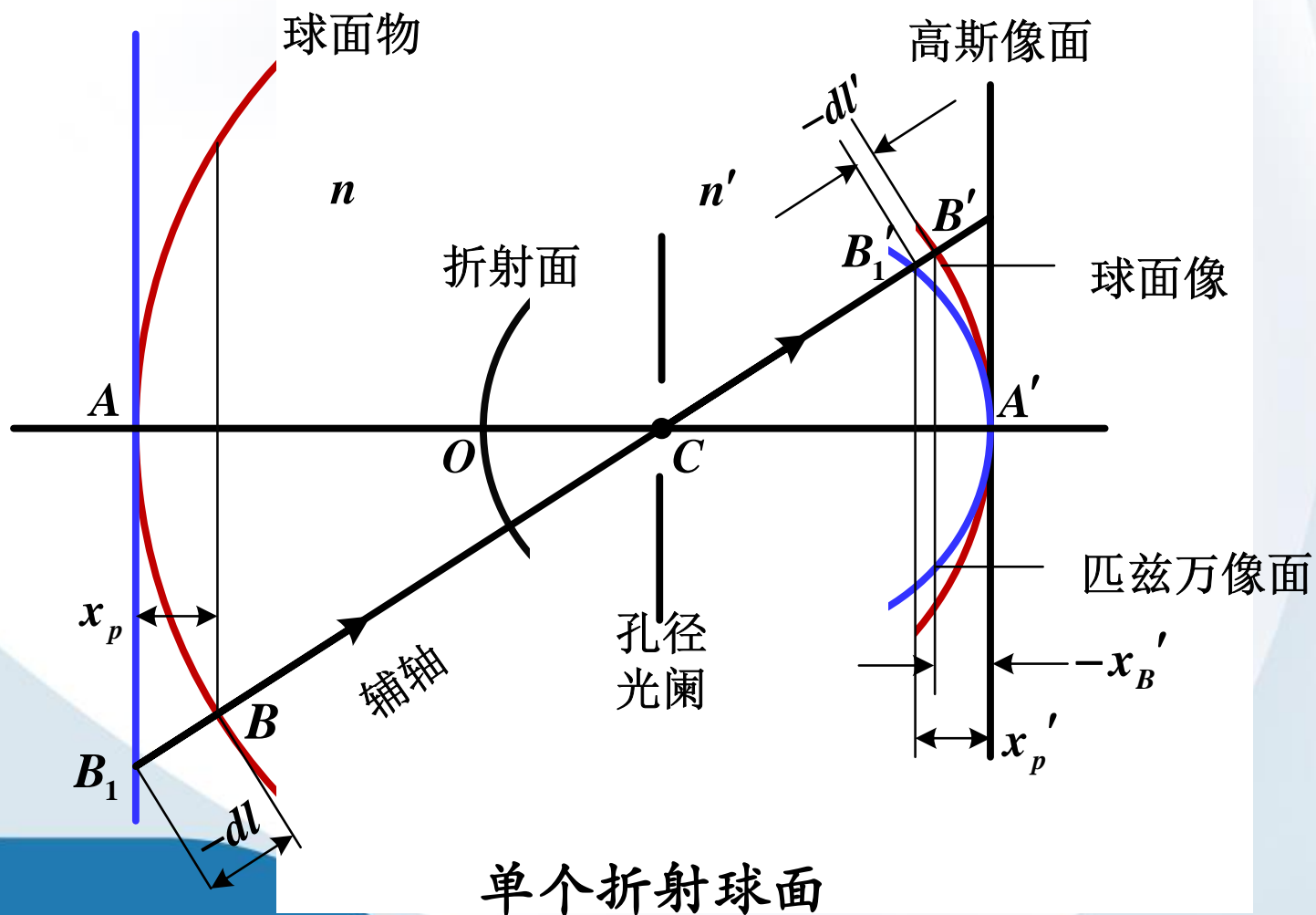
◆各视场的弧矢像点构成的像面称为**弧矢像面**

◆子午像面、弧矢像面均为对称于光轴的旋转曲面

◆细光束子午像点与弧矢像点重合时的像面弯曲称为**匹兹万场曲**： $x_p'$

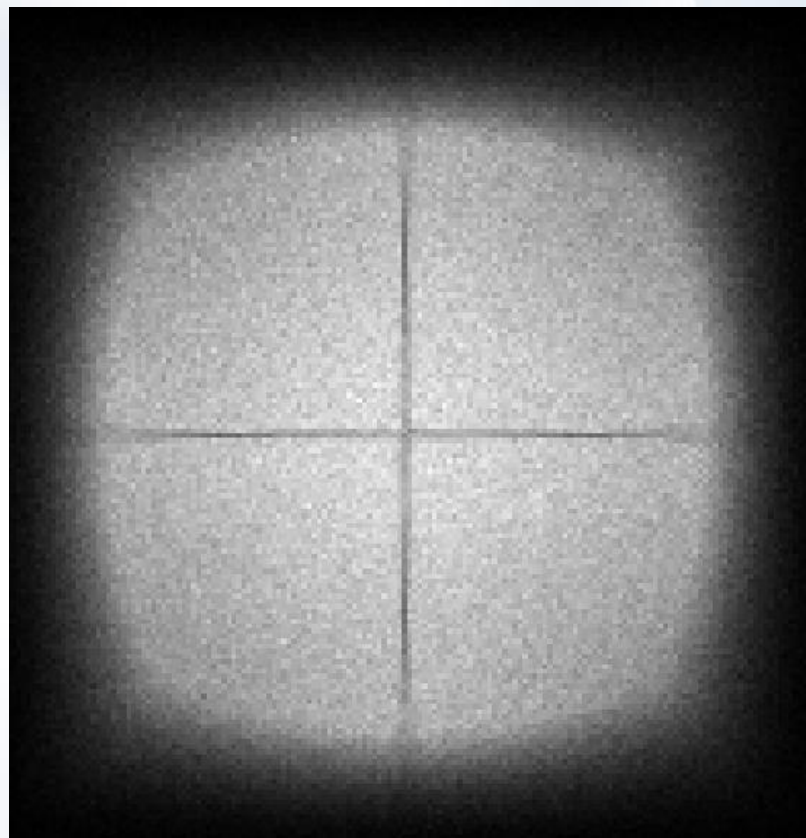
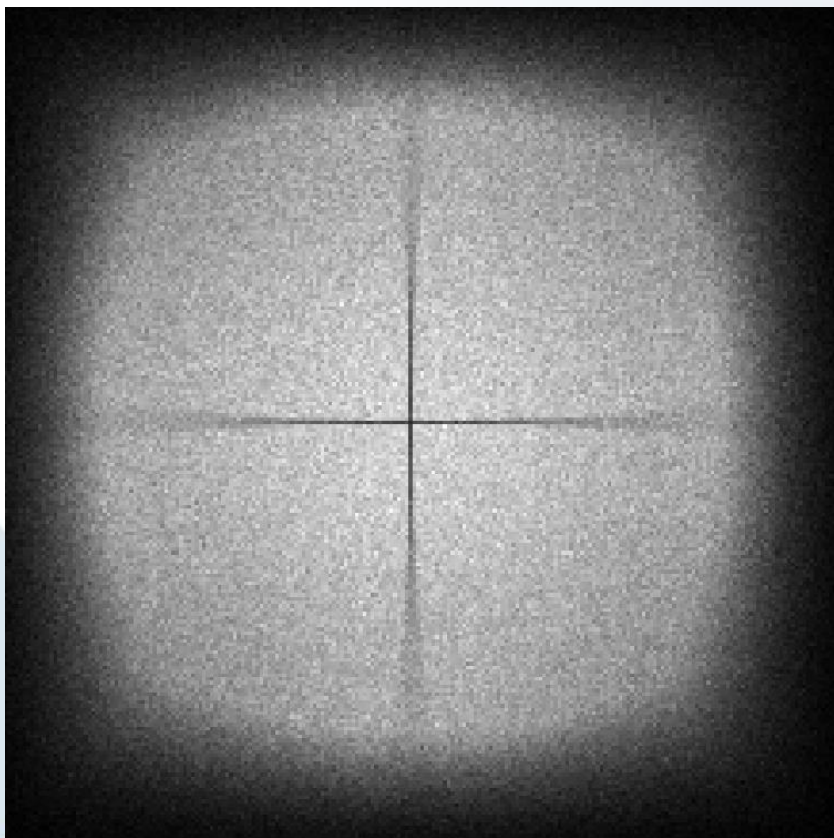


## ◆ 场曲是球面系统固有的性质





## ◆ 场曲对成像的影响



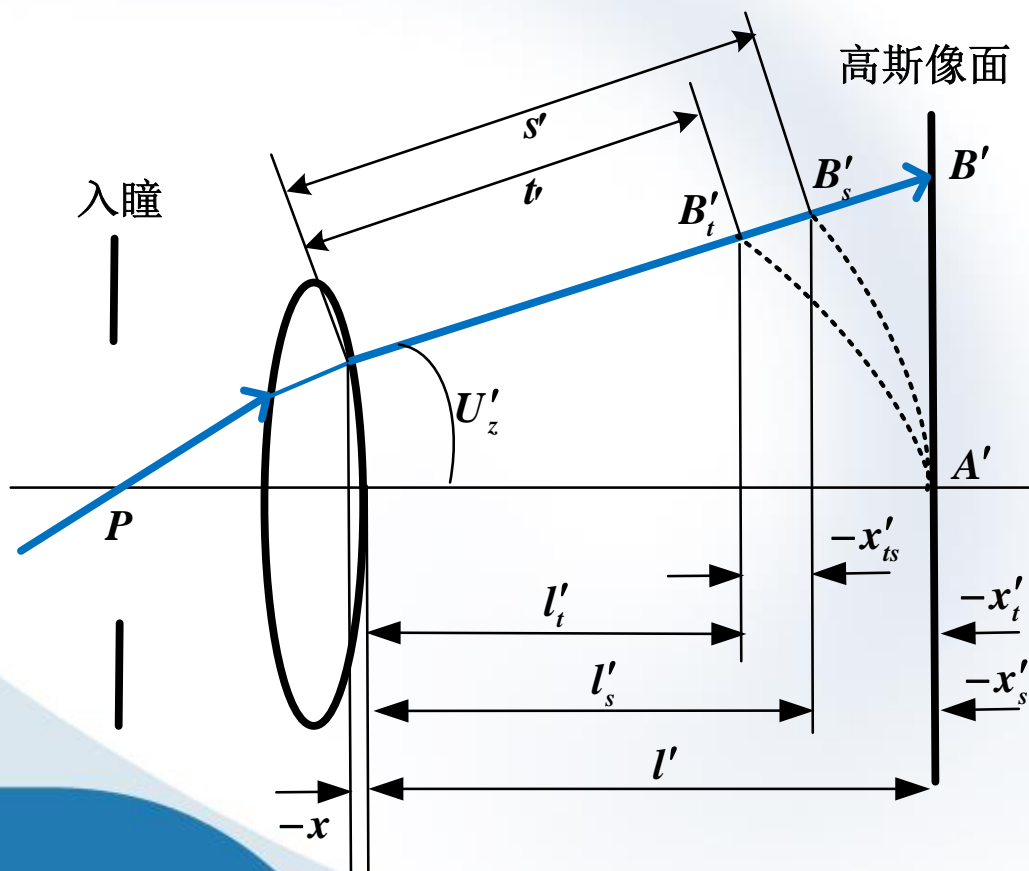


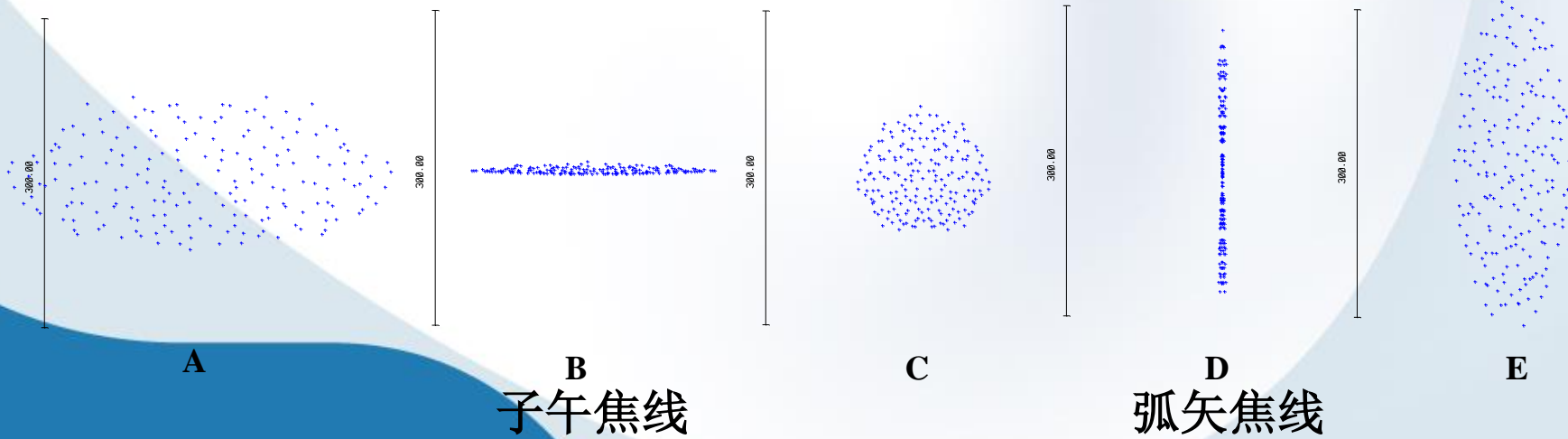
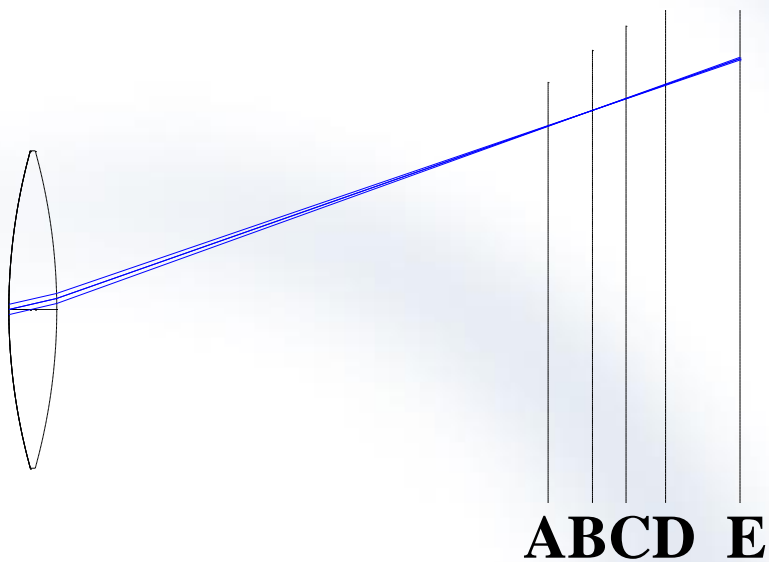
## ◆场曲的性质：

- 细光束的场曲与孔径 $u$ （或入射高度 $h$ ）无关，只是视场 $\omega$ （ $y$ ）的函数。
- 视场为零，则场曲为零。

## ◆场曲的展开式

$$x'_{t(s)} = A_1 y^2 + A_2 y^4 + A_3 y^6 + \dots$$









## ◆像散与场曲的关系

$$x'_{ts} = x'_t - x'_s$$

- 有像散必有场曲，但像散为零时，场曲不一定为零像面
- 像散为0时的像面弯曲为匹兹万场曲
- 像散可以依靠各面相互抵消，场曲是球面系统固有的性质，很难消除



## ◆ 像散和场曲的校正方法

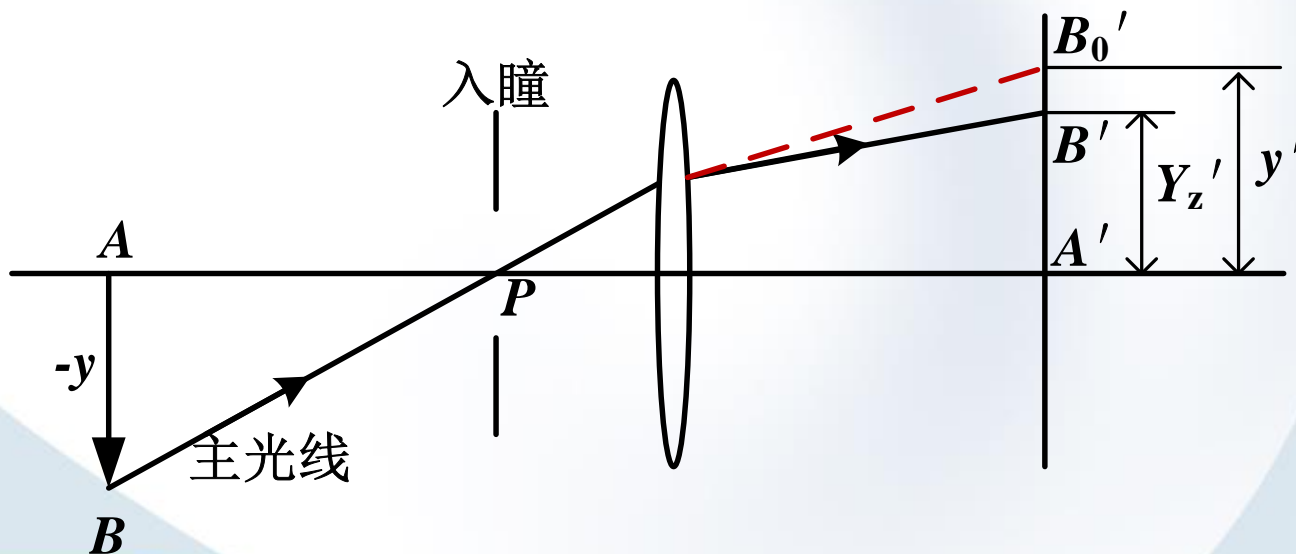
- 合理设置光阑位置
- 使用对称结构系统
- 使用匹兹万镜头消场曲



# 畸变

◆不同视场的主光线通过光学系统后与高斯像面的交点高度 $Y_z'$ 不等于理想像高 $y'$ ，其差别就是系统的畸变 $\delta y_z'$ ：

$$\delta y_z' = Y_z' - y'$$





◆ 光学设计中，常用相对畸变 $q'$ 来表征：

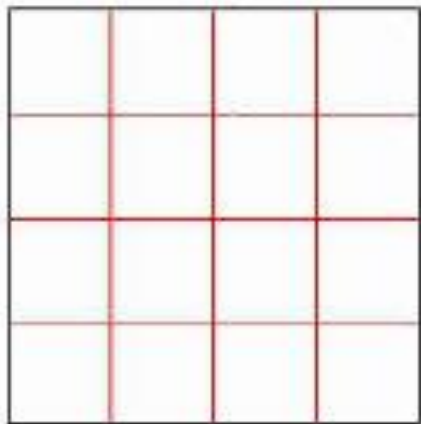
$$\begin{aligned} q' &= \frac{\delta y'_z}{y'} \times 100\% = \frac{Y'_z - y'}{y'} \times 100\% = \frac{Y'_z / y - y' / y}{y' / y} \times 100\% \\ &= \frac{\beta - \beta_0}{\beta_0} \times 100\% \end{aligned}$$

$\beta$ 为某视场的实际垂轴放大率，

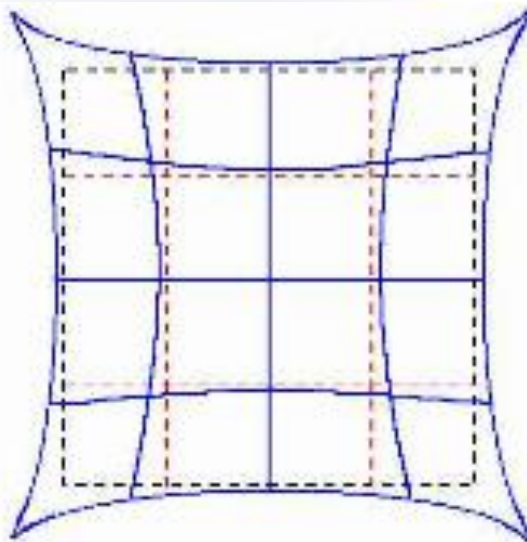
$\beta_0$ 为光学系统的理想垂轴放大率，

通常 $q' < 2 \sim 4\%$ 时，眼睛感觉不出像的明显变形。

## ◆畸变的类型:

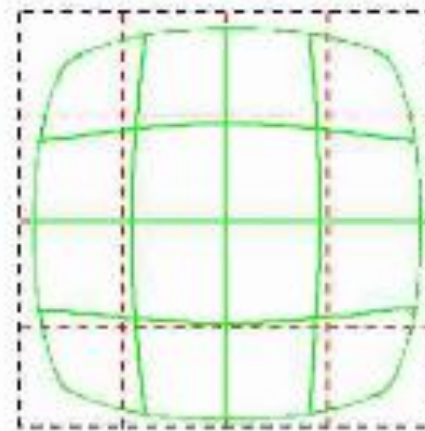


(a)



(b)

正畸变  
(枕形畸变)



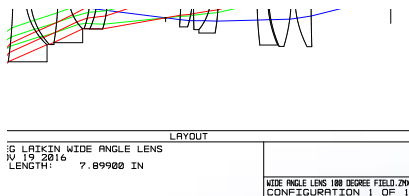
(c)

负畸变  
(桶形畸变)



## ◆畸变的特点:

- 畸变是主光线的像差
- 畸变是垂轴像差，只改变轴外物点在理想像面的成像位置，使像的形状失真，不影响像的清晰度
- 畸变仅是视场的函数，不同视场的实际垂轴放大倍率不同，畸变也不同。



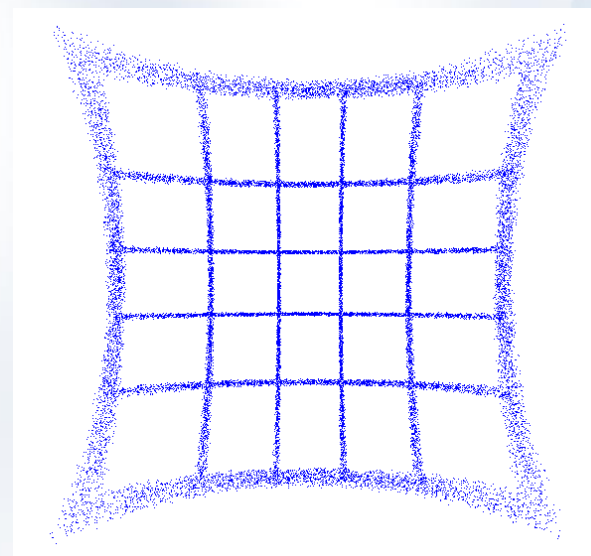
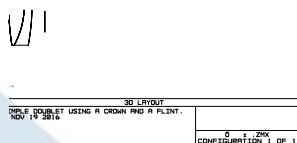
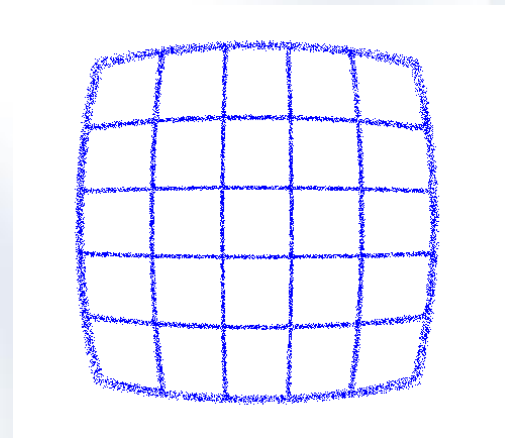
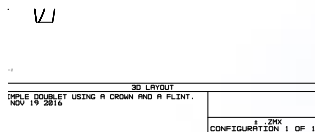
## 广角镜头







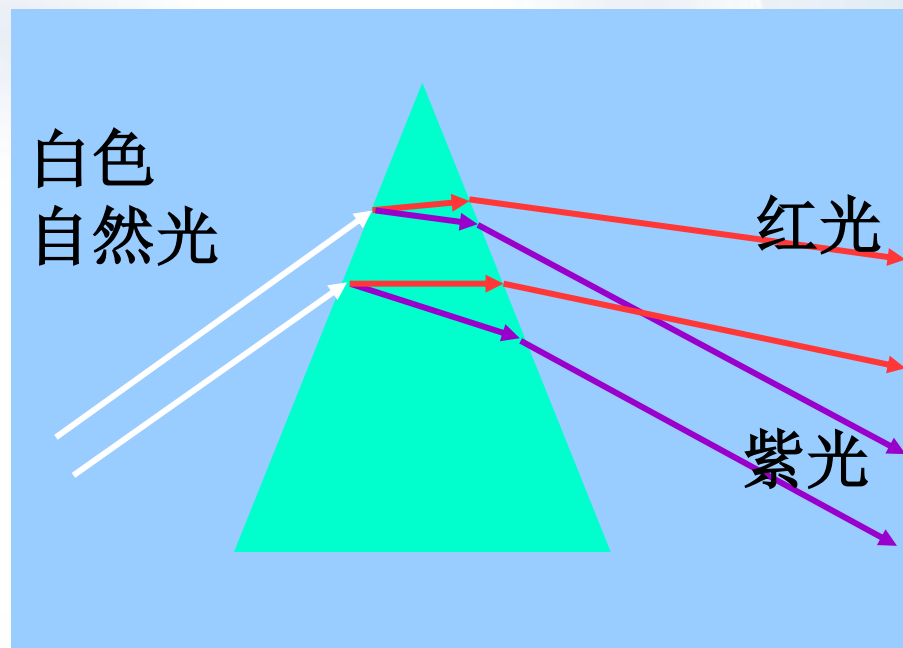
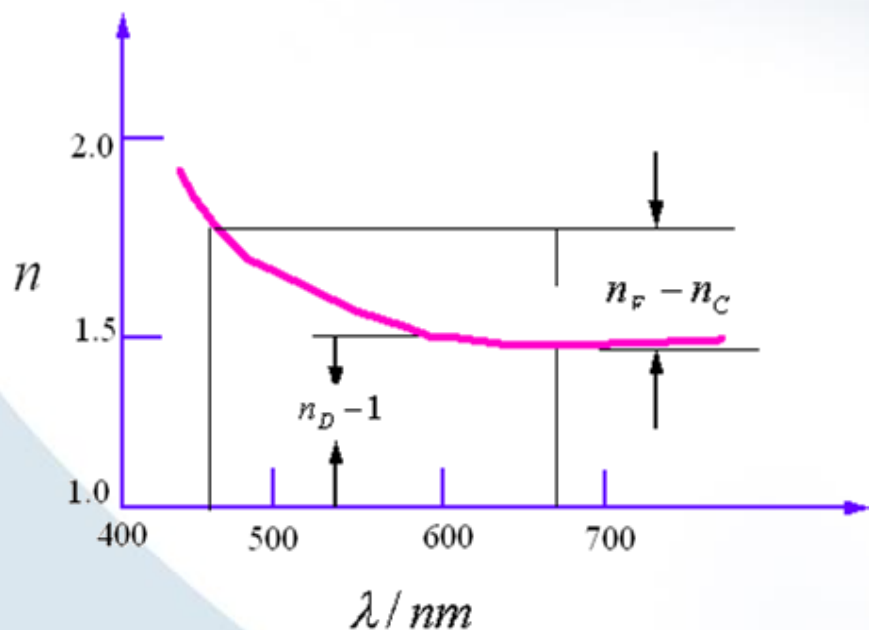
## ◆ 光阑位置对畸变的影响





# 色 差

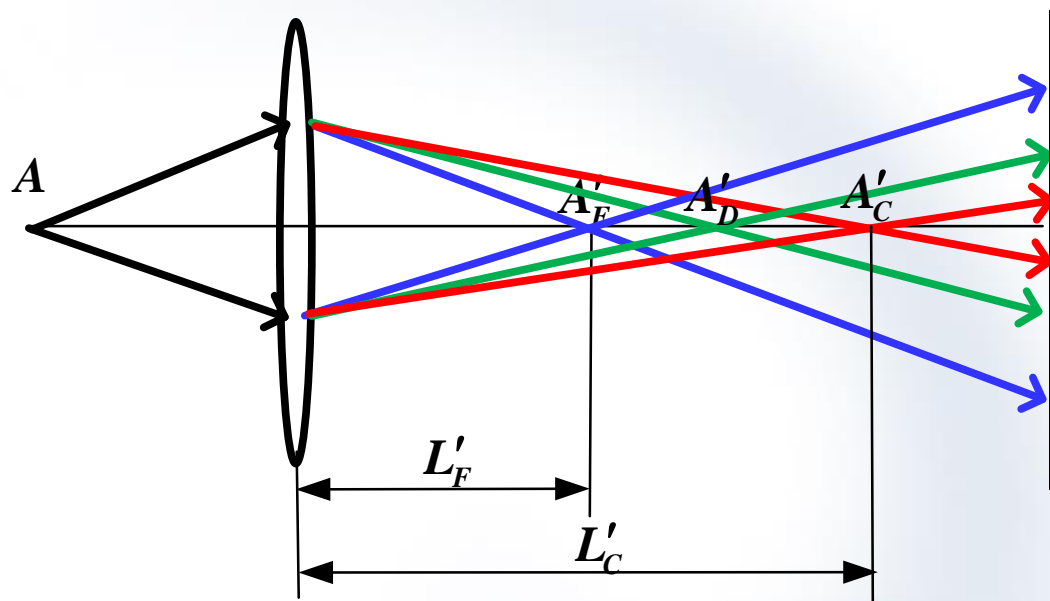
◆色散：对于不同波长的光线，光学材料具有不同的折射率，即 $n=f(\lambda)$



哈特曼公式:  $n = n_0 + \frac{C}{(\lambda_0 - \lambda)^a}$

肖特公式:  $n_{\lambda}^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + \frac{A_2}{\lambda^2} + \frac{A_4}{\lambda^4} + \frac{A_6}{\lambda^6} + \frac{A_8}{\lambda^8}$

## ◆产生色差的原因 ——材料的色散



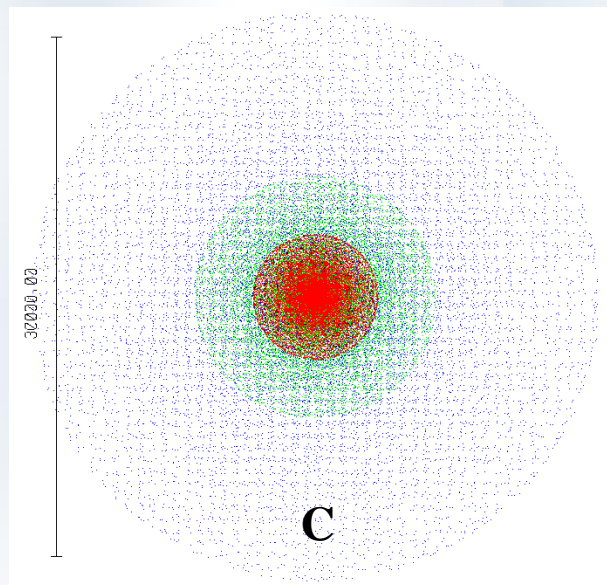
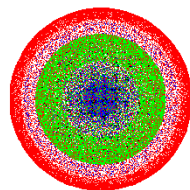
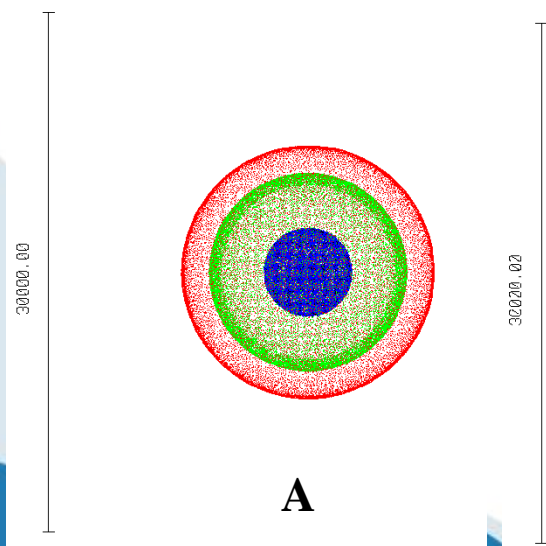
- 同一种光学材料，对不同波长的色光折射率不同。
- 各种色光之间成像位置和成像大小的差异称为**色差**



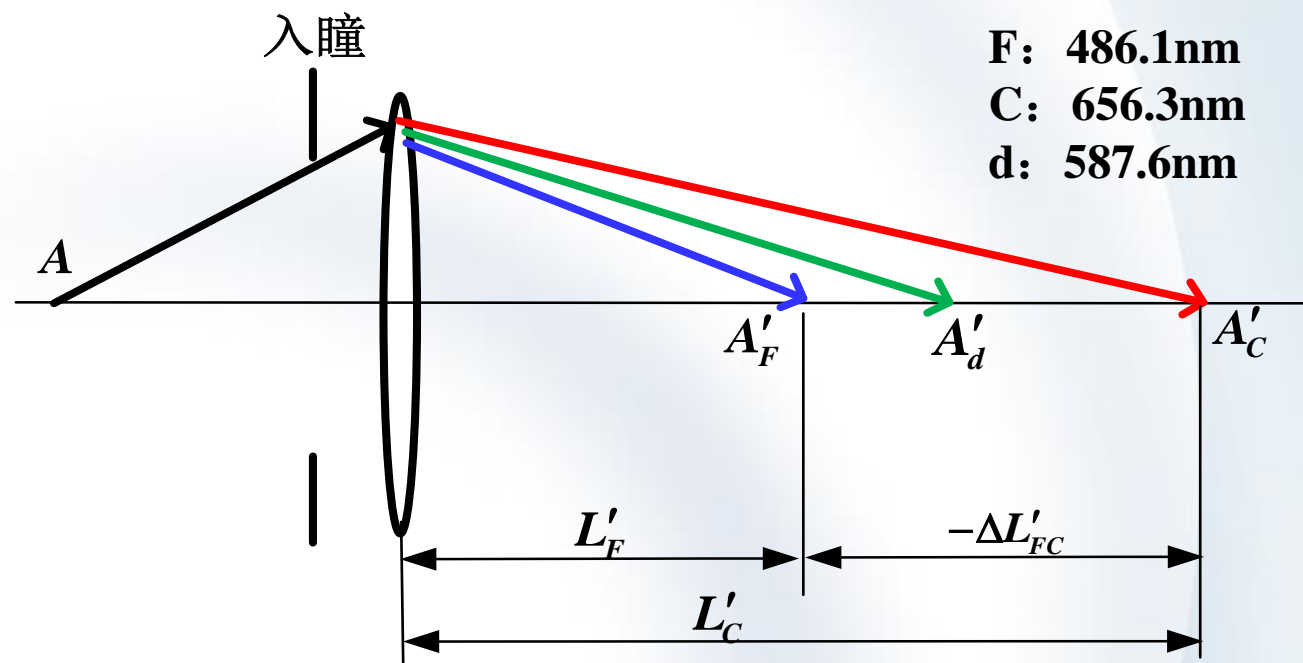
- ◆ 同一孔径、不同波长的光线经光学系统后与光轴有不同的交点。在任何像面位置，物点的像是一个**彩色的弥散斑**。

A B

C：D光的高斯像面



# 1、位置色差



- 轴上点两种色光成像位置的差异称为位置色差或轴向色差
- 目视光学系统需考虑对F光和C光消色差，目视光学系统的位置色差用 $\Delta L'_{FC}$ 表示：

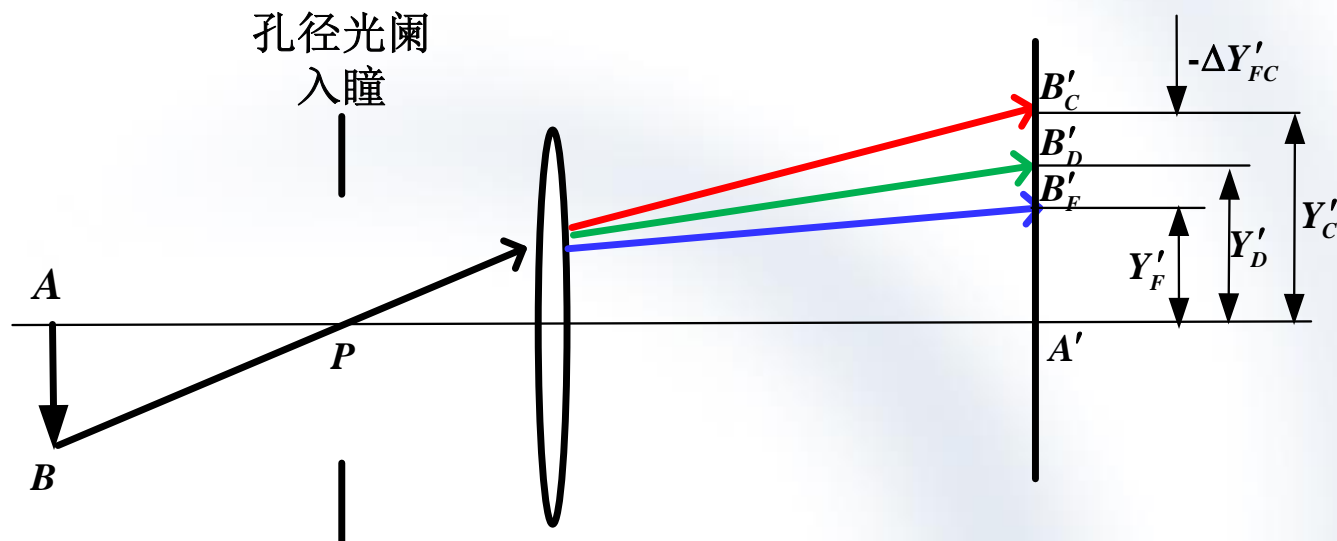
远轴区： $\Delta L'_{FC} = L'_F - L'_C$ ；近轴区： $\Delta l'_{FC} = l'_F - l'_C$



表 3-1 夫琅和费谱线的颜色、符号、波长及产生谱线的元素

谱线符号	红外	A'	b	C	C'	D	d	e	F	g	G'	h	紫外
颜色		红		橙		黄		绿	青		蓝	紫	
波长 /nm	> 770.0	766.5	709.5	656.3	643.9	589.3	587.6	546.1	486.1	435.8	434.1	404.7	< 400.0
对应元素		K	He	H	Cd	Na	He	Hg	H	Hg	H	Hg	

## 2、倍率色差



- 对于**轴外物点**，不同色光的垂轴放大率不相等，这种差异称为**倍率色差**或**垂轴色差**。
- **倍率色差**定义为轴外物点发出的两种色光的**主光线**在消单色光像差的高斯像面上交点高度之差

目视光学系统，倍率色差：  $\Delta Y'_{FC} = Y'_F - Y'_C$

近轴：  $\Delta y'_{FC} = y'_F - y'_C$





- ◆ **倍率色差**严重时，物体的像有彩色边缘，即各种色光的像轴外点不重合，破坏轴外点像的清晰度，造成白色像的模糊





### 3、色差校正

◆单透镜的色差无法消除，可以采用不同材料的透镜组合进行色差校正：

➤  $d=0$ ，胶合、密接，正、负透镜

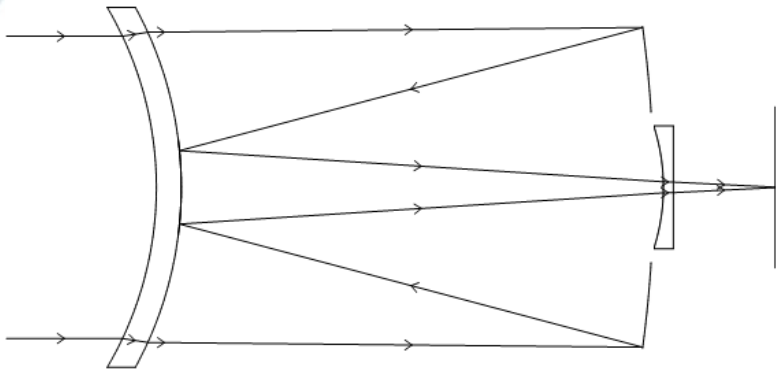
➤  $d \neq 0$ ，正、负透镜

◆对称式光学系统

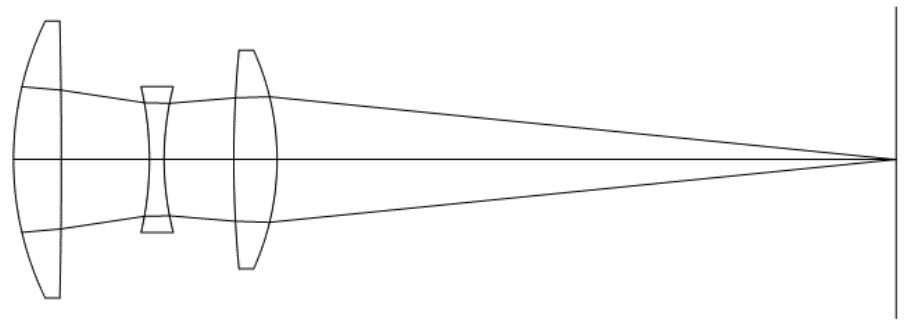
◆反射式光学系统



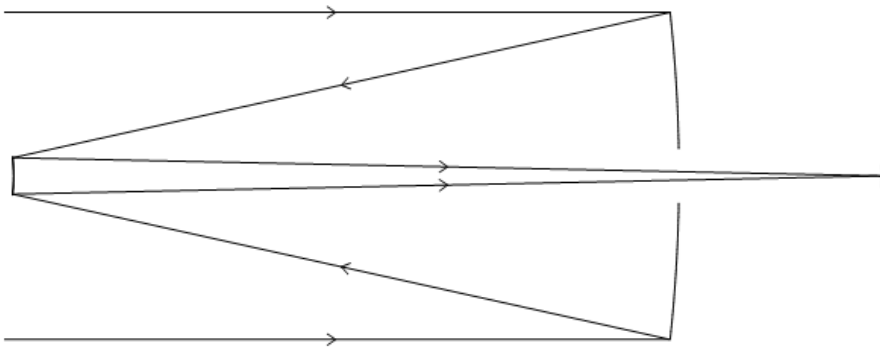
- 以下光学系统，不存在色差的是（ ）



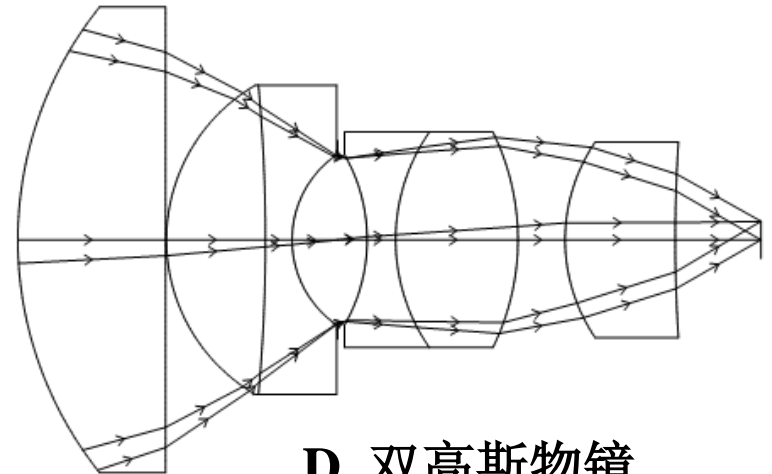
A. 马克苏托夫望远镜



B. 库克三片式物镜



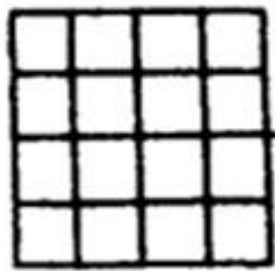
C. 卡塞格林望远镜



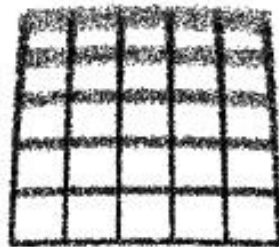
D. 双高斯物镜



- ◆ 一个光学系统由小孔光阑和透镜组成，如图2.1所示，由物平面上各点发出的光束经小孔光阑后变为细光束。光学系统的物、像如图2.2所示。由光路图及成像特性推测，主要像差为（ CD ）



物



像

- A. 球差
- B. 彗差
- C. 畸变
- D. 场曲



◆ 利用正负透镜的组合可以消球差，其原因是 D。

A. 正透镜的球差大于零、负透镜的球差小于零

B. 正负透镜的球差小于零

C. 正负透镜的球差大于零

D. 正透镜的球差小于零、负透镜的球差大于零

◆ 以下哪种像差不会造成像的模糊：（ D ）

A. 球差

B. 垂轴色差

C. 像散

D. 畸变



◆ 以下哪种情况不会产生彗差：（ ABD ）

- A. 轴外物点细光束成像
- B. 轴上物点宽光束成像
- C. 轴外物点宽光束成像
- D. 轴上物点细光束成像

◆ 什么是光学材料的色散，色散会引起什么像差？（ 2分）

- 色散：对于同一种光学材料，不同波长光的折射率不同（1分）
- 色散会引起色差（轴向、垂轴色差）（1分）



## ◆ 光学系统对轴上物点成像时会存在哪些像差？它们各自的成因是什么？

答：

- (1)球差：轴上物点发出的同心光束经过光学系统后，不同孔径角的光线会聚于轴上不同的位置，相对于理想像点有不同的偏离，这就是球差。球差只与系统的孔径有关。
- (2)位置色差：由于不同的波长在同一介质中的折射率不同，轴上点发出的不同波长的光经过光学系统后会聚于轴上不同的位置，这种现象就是位置色差。



# 像质评价方法



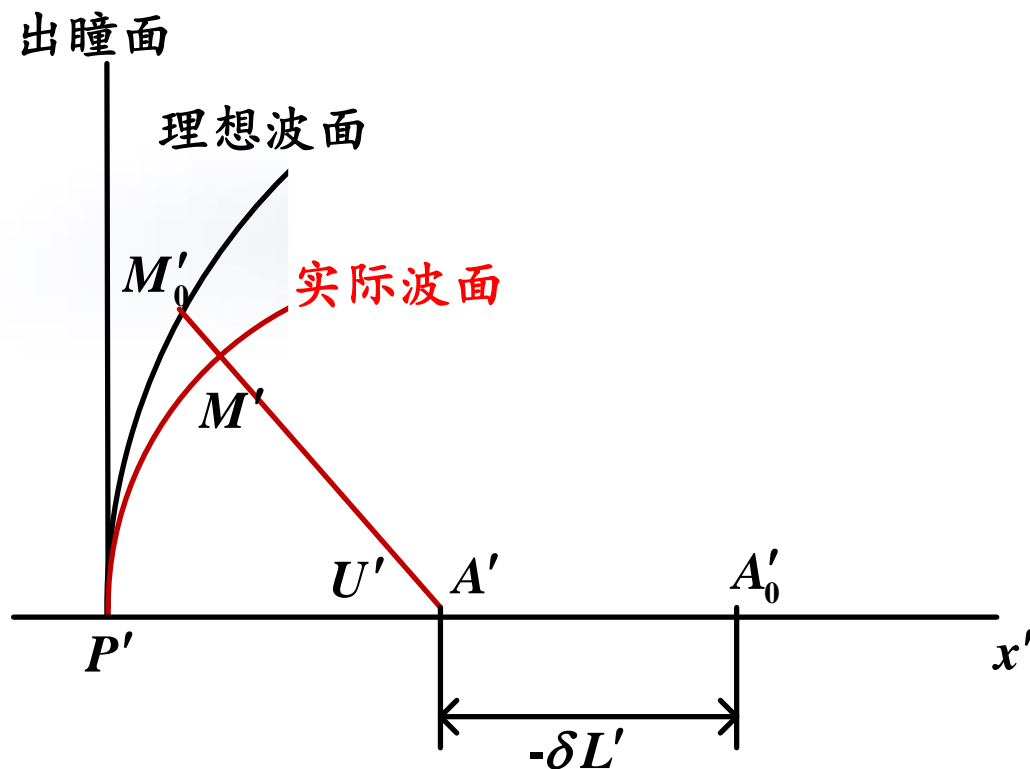


## 像质评价方法：

设计阶段：{ 瑞利判断、波前图、  
中心点亮度、包围圆能量  
制造完成后：分辨率检验、星点检验  
对设计和制造完成后都适用：光学传递函数



# 波像差、 波前图、 瑞利判断

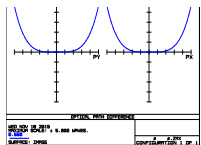


波像差：实际波面和理想波面之间的光程差称为波像差

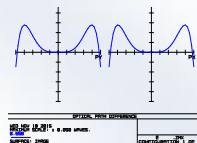
$$\text{轴上物点: } W = \frac{n'}{2} \int_0^{u_m'} \delta L' du'^2$$



## ◆ 光程差图：



单透镜



双胶合透镜



## ◆瑞利判断

- 根据成像波面相对理想球面波的变形程度来判断光学系统的成像质量
- 瑞利判断**：实际波面与理想波面的**最大波像差** $W < \lambda/4$ 为无缺陷成像



## ◆瑞利判断

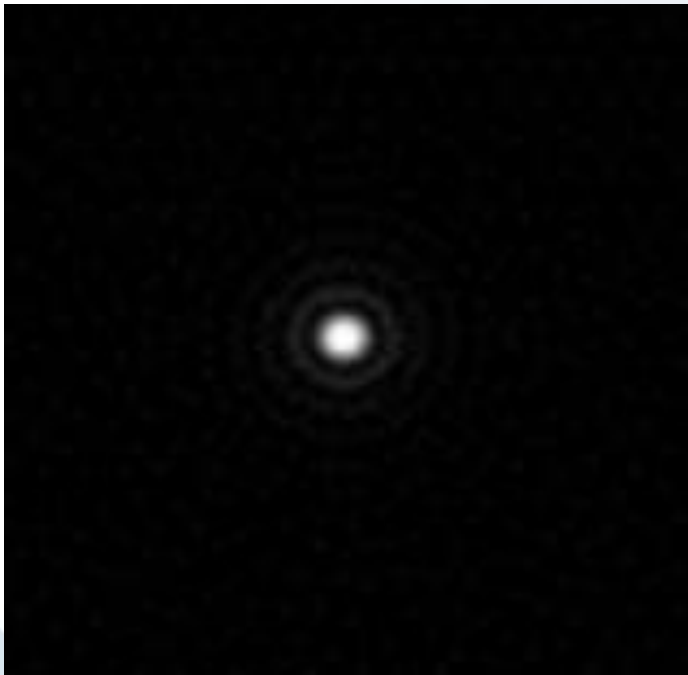
- 优点：指标单一，容易实现
- 缺点：要求严格
- 适用于小像差光学系统，如望远物镜、显微物镜、微缩物镜、制版物镜等对像质要求较高的系统



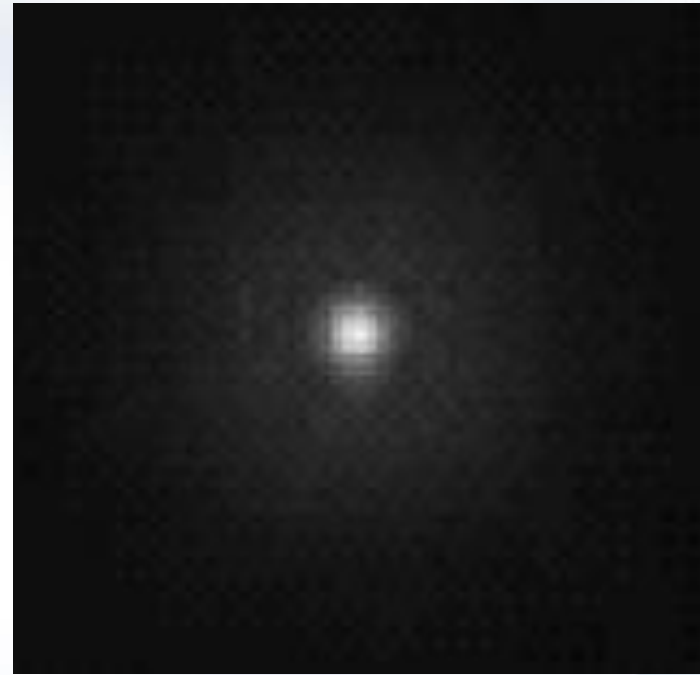
# 中心点亮度、 包围圆能量



## ◆ 中心点亮度

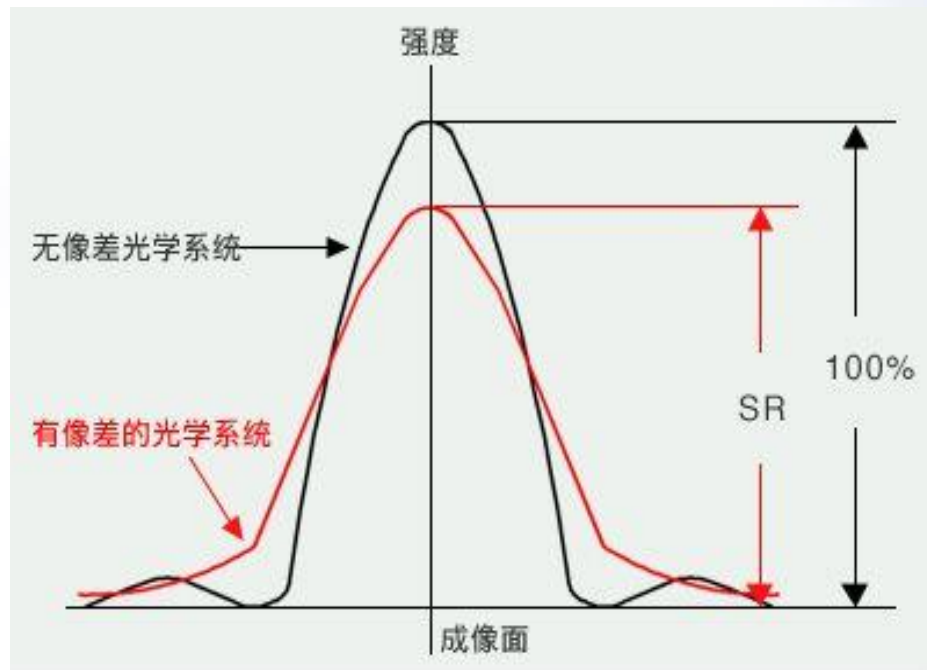


无像差系统的衍射光斑



有像差系统的衍射光斑



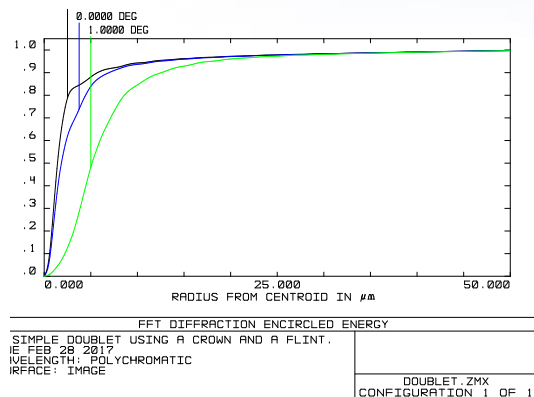


- 用实际光学系统和理想光学系统衍射光斑中心亮度之比 **S.D** 来表示成像质量。
- **$S.D \geq 0.8$**  时，认为实际系统成像是完善的——**斯托列尔 (K. Strehl) 准则**



## ◆包围圆能量

以高斯像点或弥散斑的中心为圆心，以离开此点的距离为半径做圆，此圆内的能量与总能量的比值

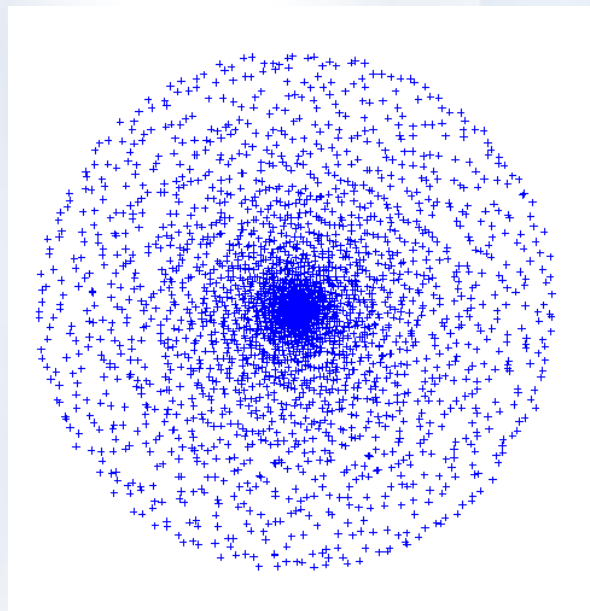
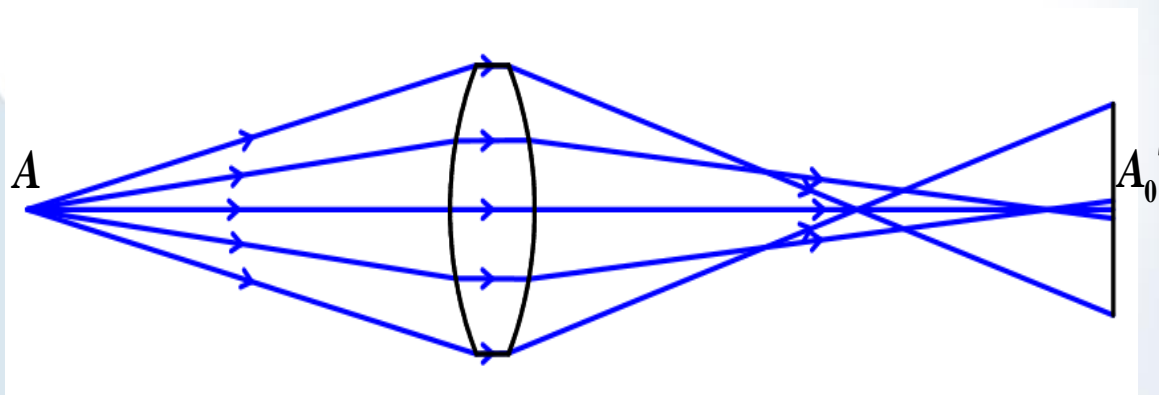




# 点列图

## ◆点列图

➤由一点发出的许多光线经光学系统后，因像差使其与像面的交点不再集中于同一点，而形成了一个散布在一定范围的弥散图形，称为点列图



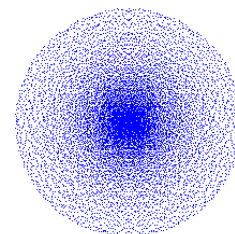
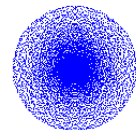
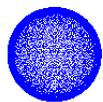


## ➤点列图评价方法的特点:

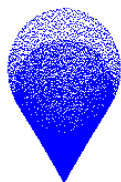
- ✓需要进行大量的光线计算
- ✓点列图的形状可以反映出几何像差的特征



球差：



彗差：



像散。





## ➤点列图评价方法的特点：

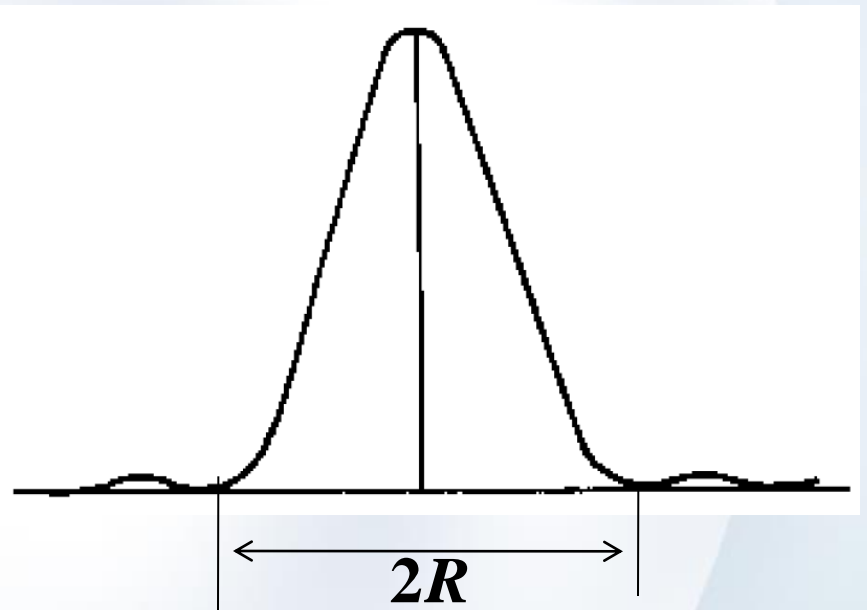
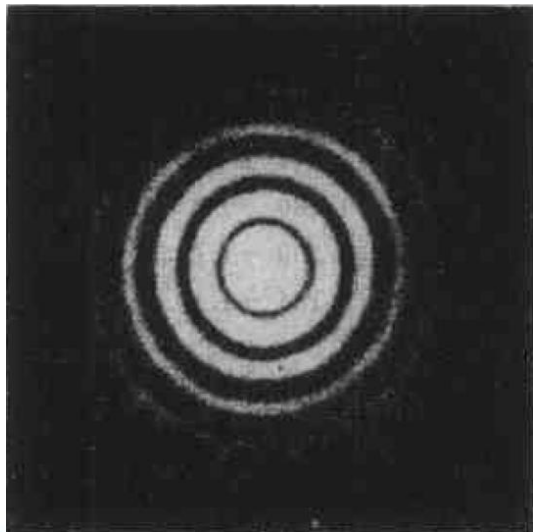
- ✓需要进行大量的光线计算
- ✓点列图的形状可以反映出几何像差的特征
- ✓集中30%以上点的圆形区域为有效的弥散斑
- ✓弥散斑直径（mm）的倒数为系统的分辨率
- ✓适用于大像差系统



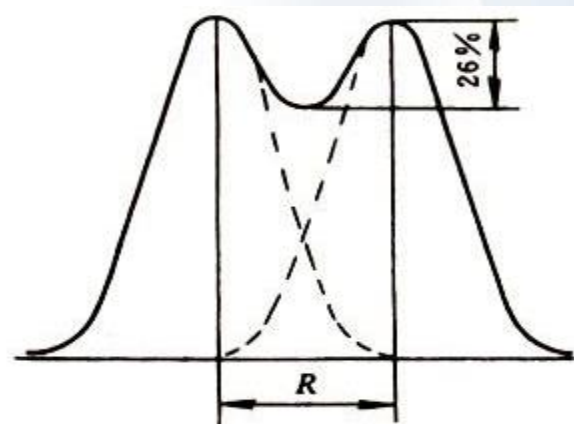
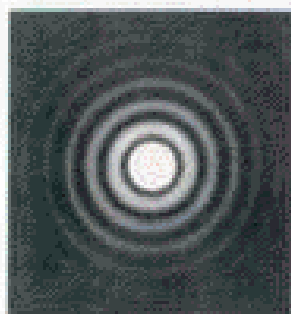
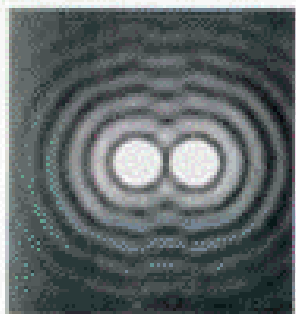
# 分辨率



➤ 孔径光阑口径有限——衍射



➤ **瑞利判据**：能分辨的两个亮点间的距离对应艾里斑的半径



➤ 两个衍射像间能分辨的最小间隔就是**理想光学系统的衍射分辨率**，反映光学系统能分辨物体细节的能力

$$\text{最小分辨角: } \Delta\theta = \frac{1.22\lambda}{D_{\text{入瞳}}}$$





投影鉴别率：适用于大批量生产的光学检验或调试使用





## ◆适用范围及局限性

- 适用于大像差系统（大像差系统分辨率与像差有关；小像差系统分辨率受相对孔径及衍射的影响较大、受像差影响很小）
- 分辨率用**鉴别率板**来检测，检测的分辨率与亮度背景、照明条件、接收器等有关



# 光学传递函数



## ◆几何像差、点列图、包围圆能量等像质评价方法：

➤把物体看做发光点的集合，以一点成像时能量的集中程度来表示光学系统成像质量

## ◆光学传递函数：

➤把物体看做由空间频谱组成，物体的光场分布函数展开成傅里叶级数或傅里叶积分的形式

✓高频——物体细节

✓中频——物体层次

✓低频——物体轮廓



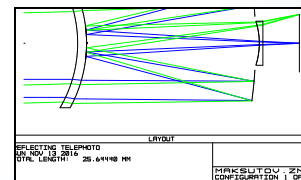
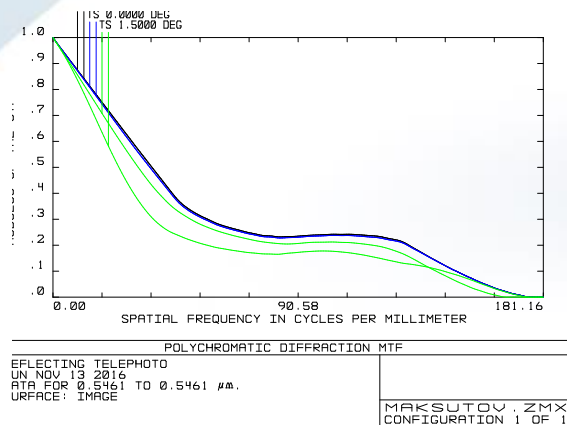


## ◆ 光学传递函数：

- 把光学系统视为线性不变系统，物体经过系统成像（传递）后，频率不变、对比度下降、相位发生偏移，并在某一空间频率（截止频率）的对比度为0
- 调制度的降低和位相的位移是空间频率的函数——**光学传递函数**







## Maksutov 望远镜

### MTF 曲线图

横坐标：空间频率 lp/mm

纵坐标：调制度(对比度)，最大值1



## ◆ 光学传递函数的特点

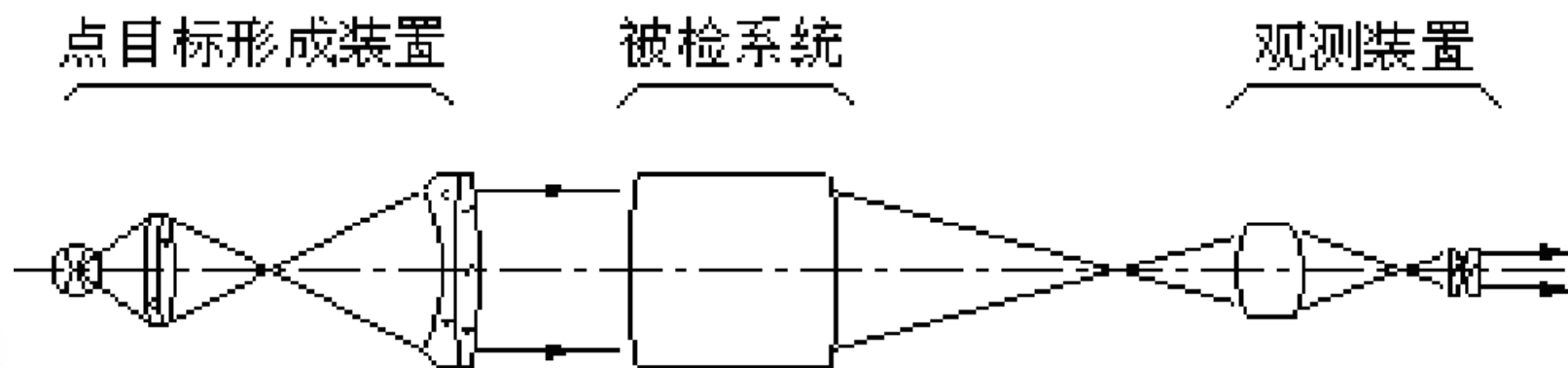
- 与光学系统的像差及衍射效应都有关，评价成像质量客观、可靠
- 可适用于大像差及小像差光学系统
- 传递函数不能反映光学系统的畸变



# 星点法

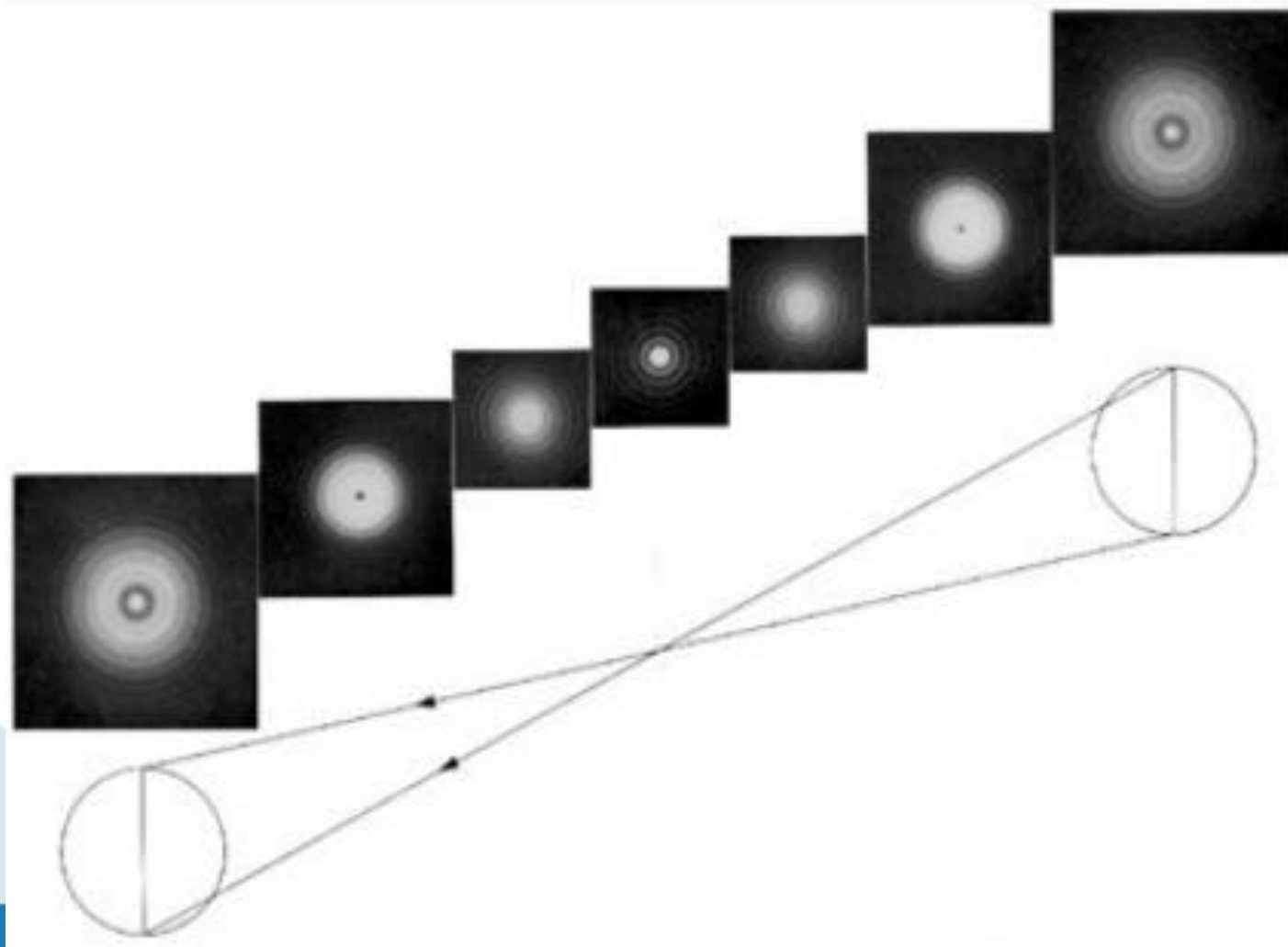


## ◆ 星点检测法:



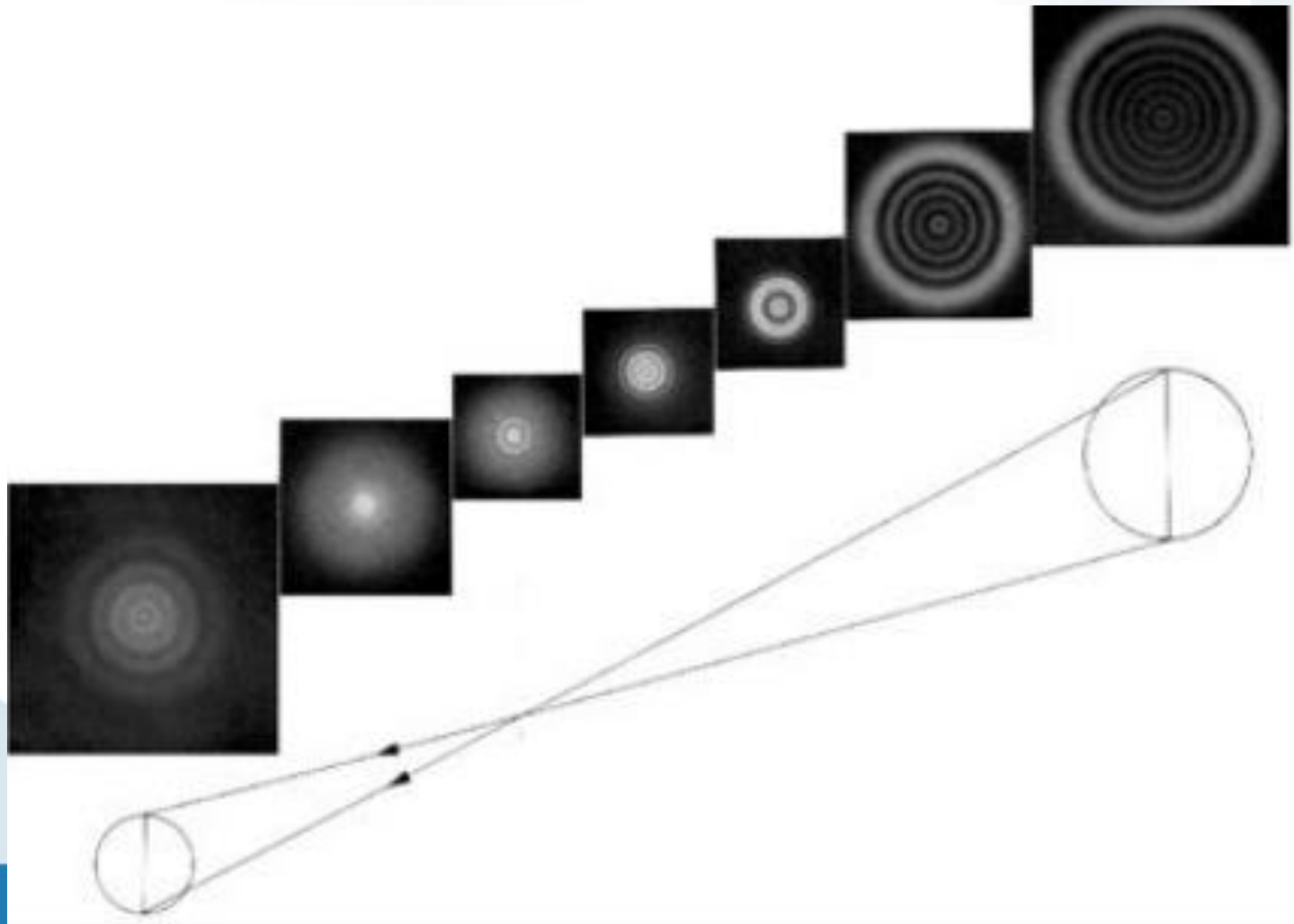


◆ 像差校正良好的光学系统，轴上物点的星点像





## ◆ 球差







# ◆ 彗差







## ◆ 像散

