



应用光学

Applied Optics

任课教师：陈瑞

电子邮箱：chenr229@mail.sysu.edu.cn

助教安排：柳夏、石福隆

答疑时间：周四下午2:30-3:30，爪哇堂307

中山大学 物理学院
2021-1



几何像差

单色像差

- 轴上点像差 — 球差 (Spherical Aberration)
Ch 7
- 轴外点像差
 - 彗差 (Coma)
 - 像散 (Astigmatism)
 - 场曲 (Field Curvature)
 - 畸变 (Distortion)Ch 8

Ch 9
色像差

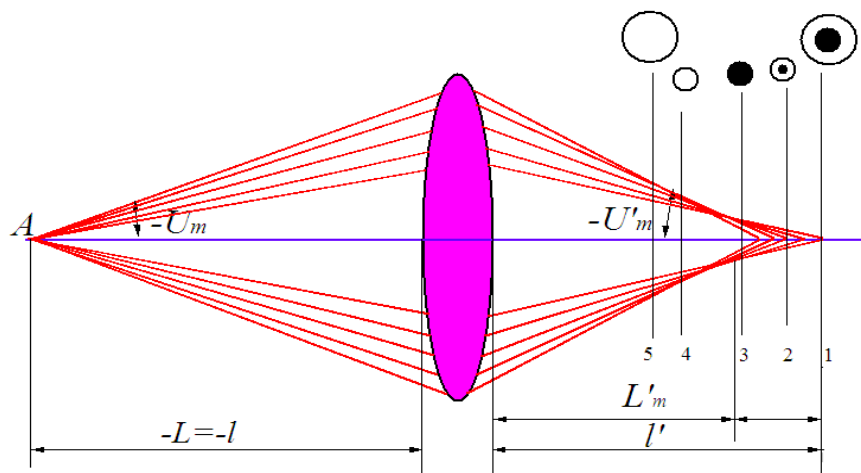
- 轴上点像差 --- 位置色差 (longitudinal CA)
- 轴外点像差 --- 倍率色差 (Lateral CA)

Ch 10 波像差：与像质评价指标和光学检测相联系；

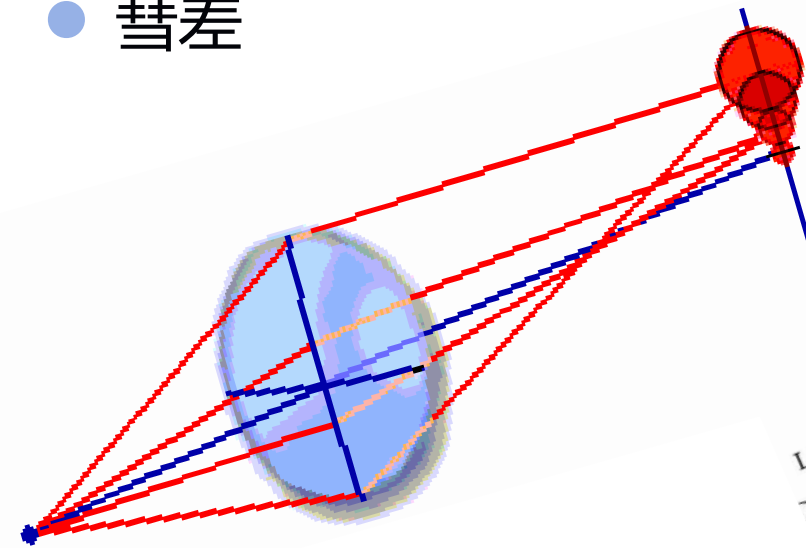
Ch 11 光线追迹-光路计算

像差理论-单色像差总结

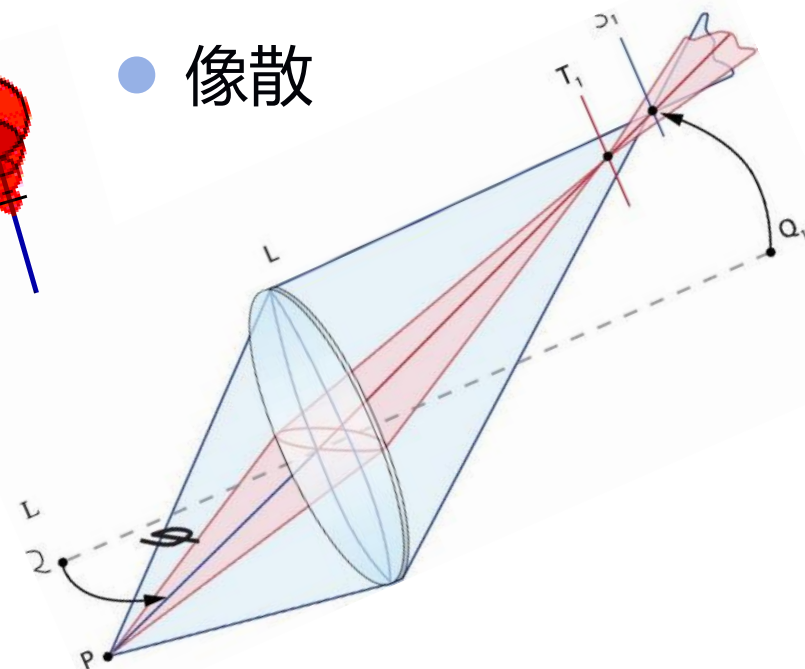
● 球差



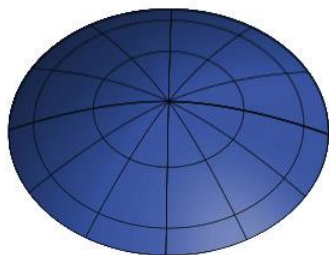
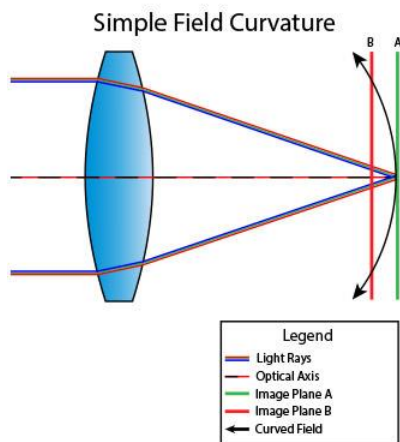
● 彗差



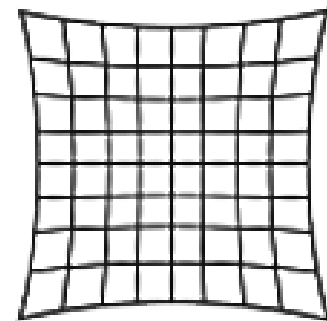
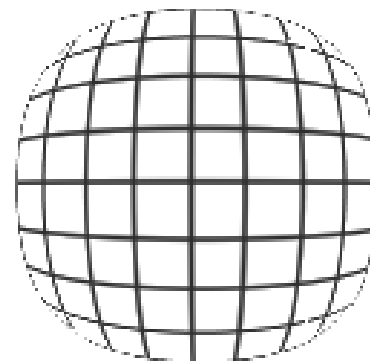
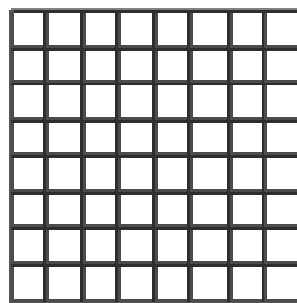
● 像散



● 场曲



● 畸变





像差理论-单色像差总结

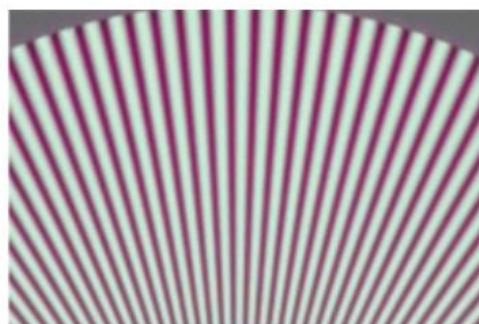
像差形式	形成原因	主要影响	决定因素	如何校正
球差	不同倾角的入射光线造成像点的位置偏离	圆形弥散斑，成像变得模糊	光学元件的形状和材料	初级球差与高级球差的相互补偿
彗差	轴外点宽光束的主光线与球面对称轴不重合	彗星状的弥散斑，破坏成像清晰度	与视场、孔径以及透镜形状都有关	选择光阑位置，使用对称结构
像散	两主截面的曲率不同，聚焦为子午和弧矢像点，形成像散	轴外点得不到清晰像	远离光轴的像差，随视场增大而增大	控制入瞳位置
场曲	球面固有性质决定的	较大的平面物体各点不能同时清晰成像	远离光轴的像差，随视场增大而增大	控制入瞳位置
畸变	通过入瞳中心的主光线的球差造成的	仅引起像的变形，不影响成像清晰度；	主光线决定的畸变与视场有关，与孔径无关	控制入瞳位置



8.5 正弦差

- **形成原因：**系统不满足等晕条件，等晕公式两端不相等，其偏差就是正弦差，它反映了小视场时宽光束成像时轴上点和近轴点不满足等晕成像引起的成像不对称性;
- **主要影响：**使用正弦差的好处是在于它不仅能反映小视场大孔径的彗差，而且不需要额外计算轴外点实际光线，只需利用轴上点光线的光路计算结果，再作一条第二近轴光线的光路计算(用其求出 $l_{p'}$ 值)即可计算出正弦差;
- ◆ **决定因素：**正弦差与视场 $\omega(y)$ 无关，只是入射高度 h 或孔径角 u 的函数。正弦差与孔径光阑的位置有关，因此改变光阑的位置可以使正弦差发生变化;
- **如何校正：**光阑可以作为校正正弦差的一个参数。

第九章 色像差





第九章 色像差

对白光成像的光学系统，由于材料对不同波长的光折射率不同，使得各色光线具有不同的成像位置和倍率，这种成像的色差异称为色差（Chromatic aberration）。

主要内容

- 9.1 位置色差
- 9.2 倍率色差
- 9.3 初级位置色差
- 9.4 初级倍率色差



3.6 光的色散和光学材料



一、光的色散

夫朗和费谱线颜色、符号、波长及产生相应谱线的元素

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
对应 元素		K	He	H	Cd	Na	He	Hg	H	Hg	H	Hg	

色散曲线：介质折射率随波长的变化的曲线表示。 p35



3.6 光的色散和光学材料

复习

二、光学材料

1. 透射光学材料

折射特性一般以夫琅和费特征谱线的折射率表示。在目视光学系统中，常规光学玻璃以D(589.3nm)或d光的折射率 n_D 或 n_d 、F光和C光的折射率 n_F 和 n_C 为主要特征。其中 n_D 定义为平均折射率。

折射率	谱线	C	D	d	e	F	g	h
色散	λ (nm)	656.3	589.3	587.6	546.1	486.1	435.8	404.7
	参数	n_C	n_D	n_d	n_e	n_F	n_g	n_h

人眼最灵敏波长555nm，两个极端C，F

$n_F - n_C$	$n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$	$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$	$\frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_F - n_C}$
平均色散	部分色散	阿贝常数 平均色散系数	部分色散系数 相对色散

阿贝常数越大，色散越低，反之，色散越大。



第九章 色像差

对白光成像的光学系统，由于材料对不同波长的光折射率不同，使得各色光线具有不同的成像位置和倍率，这种成像的色差异称为色差（Chromatic aberration）。

主要内容

- 9.1 位置色差
- 9.2 倍率色差
- 9.3 初级位置色差
- 9.4 初级倍率色差



9.1 位置色差

一. 产生与现象

位置色差：由同种材料对不同波长的光折射率不同，导致不同光的像点由近到远排列在光轴上的现象，也称为**轴向色差**。

折射球面物像关系：

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

轴上点A发出一束**近轴白光**，通过如下材料的透镜系统

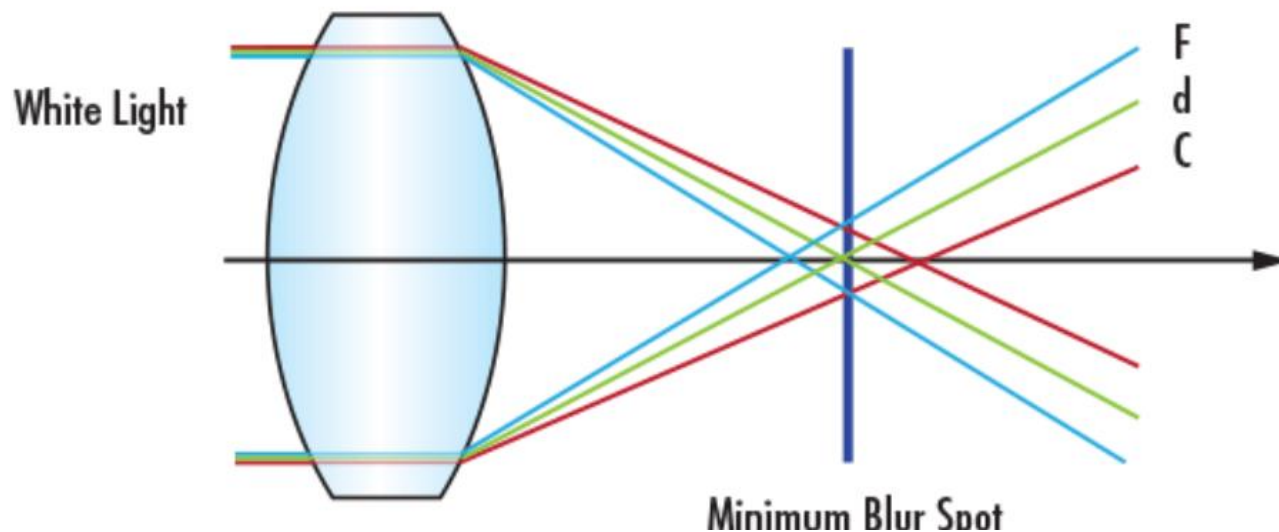
$$n_D = 1.51630$$

$$n_F = 1.52196$$

$$n_C = 1.51389$$

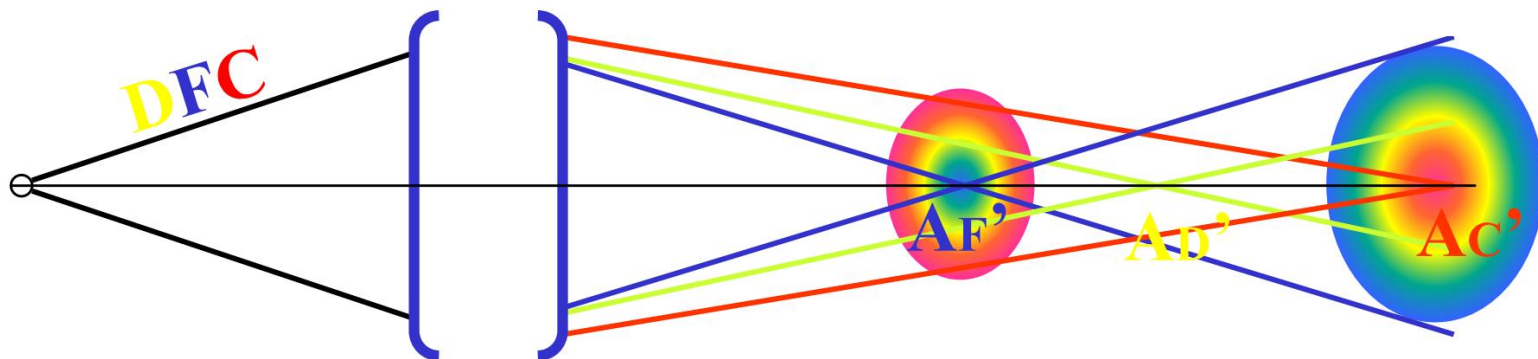
$$n_F - n_C = 0.00806$$

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 64.1$$



9.1 位置色差

一. 产生与现象

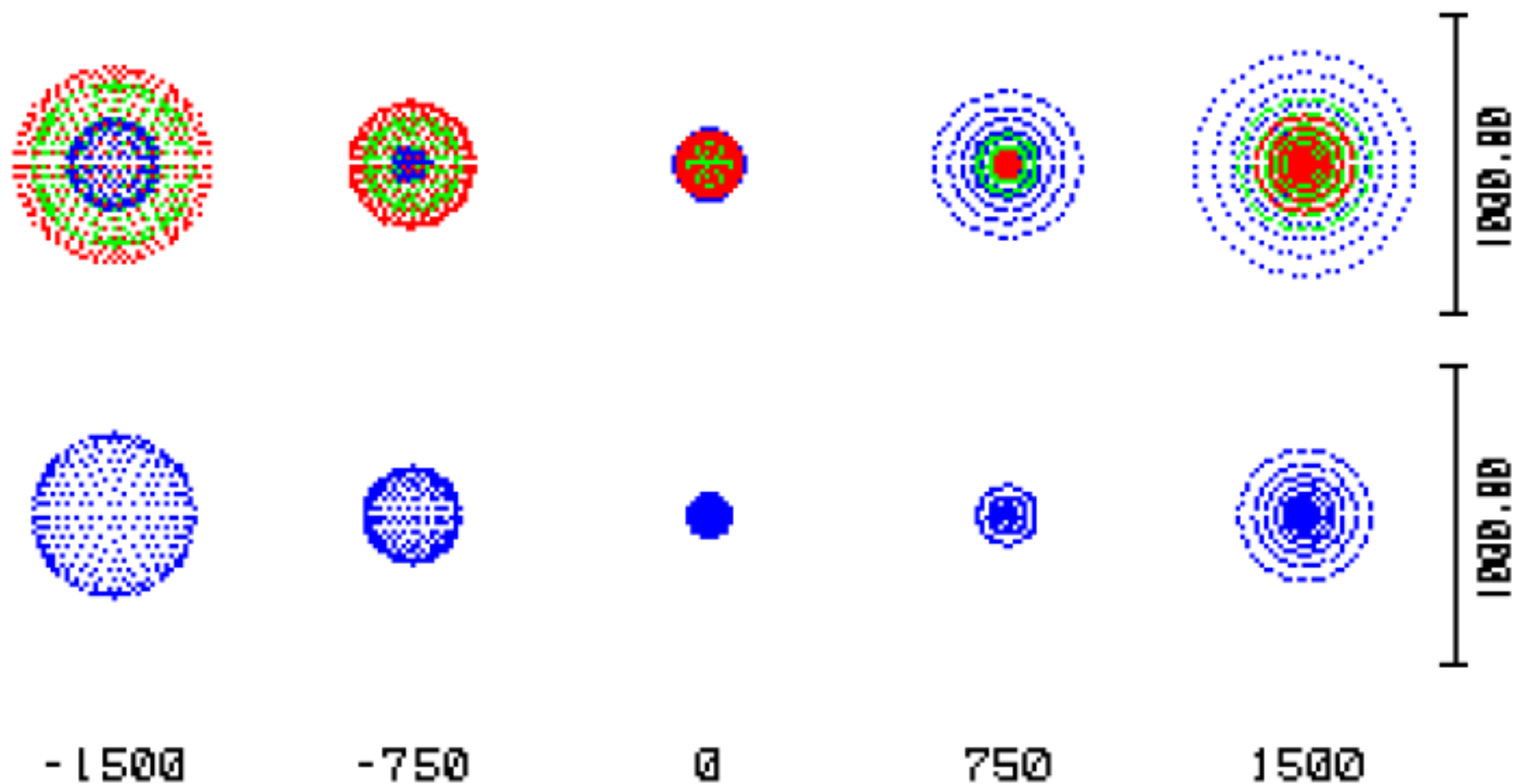


- 由于色差的存在，光轴上一点即使以近轴光成像也得不到清晰像；
- 如果轴上点只发出三种色光，呈现如图所示的现象；
- 色差严重影响光学系统的像质，所有成像用光学系统都必须校正色差；
- **消色差系统：**对二种选定的色光消位置色差的系统。



9.1 位置色差

一. 产生与现象



位置色差与球差异同

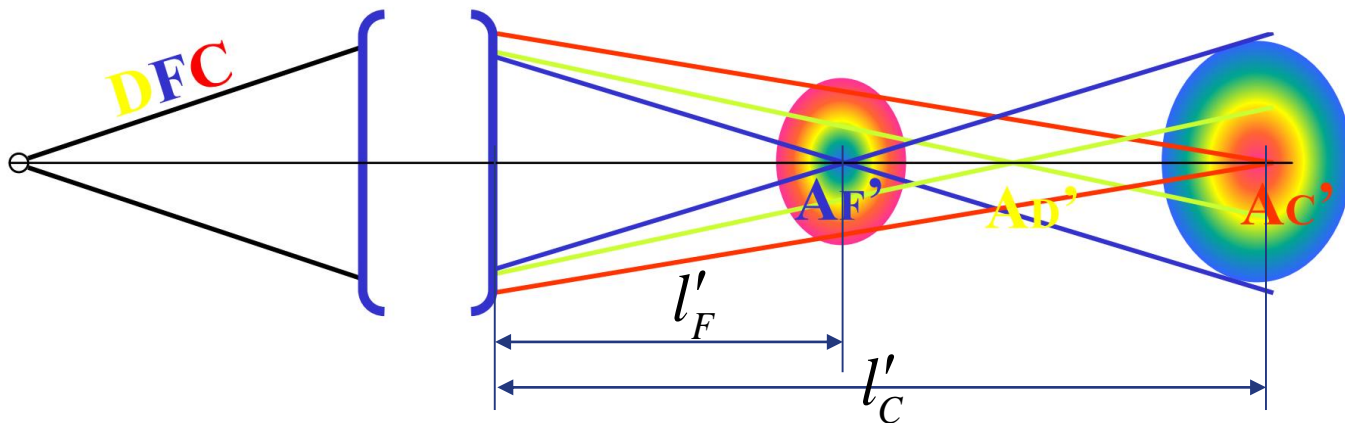
9.1 位置色差

二. 位置色差度量与曲线

位置色差

近轴区, u 很小: $\delta l'_{ch} = l'_F - l'_C$

一般情况非近轴区: $\delta L'_{ch} = L'_F - L'_C$



若 $\delta L'_{ch} = 0$, 称对光学系统消色差 (achromatism)。

实际中, 光学系统一般只能对光束中的某一带光线校正色差, 通常是对 0.707 带光来校正的。



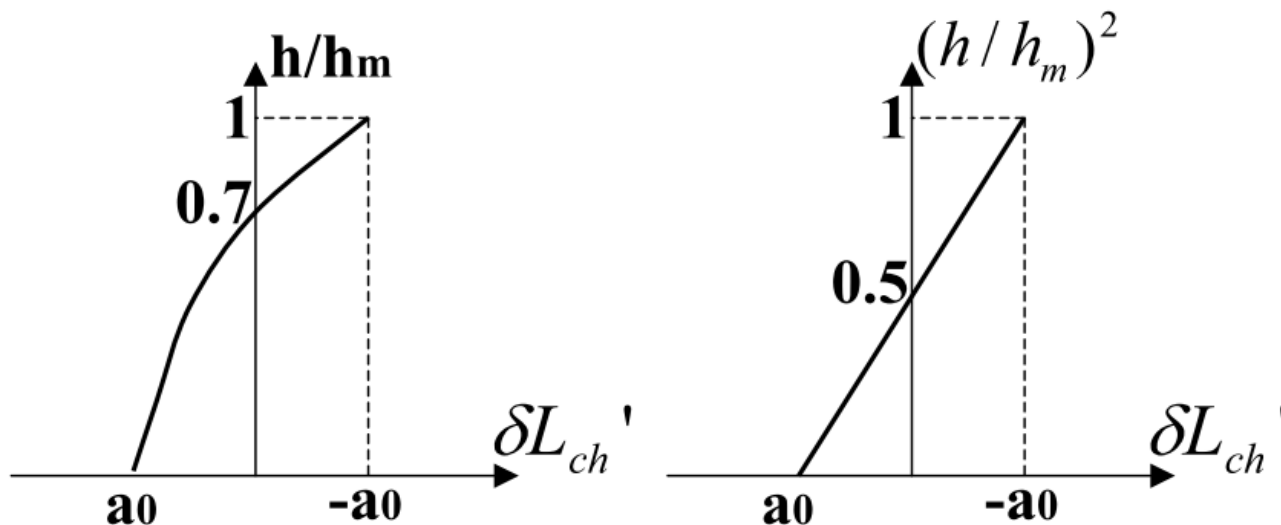
9.1 位置色差

二. 位置色差度量与曲线

位置色差写成级数形式: $\delta L'_{ch} = a_0 + a_1 h_1^2 + a_2 h_2^4 + \cdots = \delta l'_{ch} + a_1 h_1^2 + a_2 h_2^4 + \cdots$

对某一环带消色差, 一般而言, 在0.707带光消色差, 即:

$$\begin{aligned} \delta L'_{ch} &= a_0 + a_1 h_1^2 \\ \downarrow \\ a_0 + 0.5a_1 &= 0 \Rightarrow a_1 = -2a_0 \\ \downarrow \\ \delta L'_{ch} &= a_0 - 2a_0 h_1^2 \\ \downarrow \\ \delta l'_{ch} &= a_0, L'_{chM} = -a_0 \end{aligned}$$



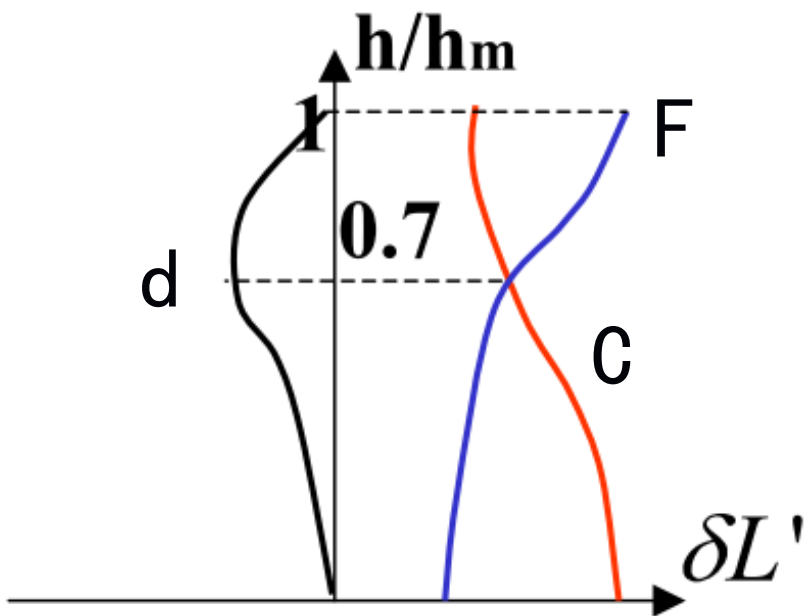


9.1 位置色差

二. 位置色差度量与曲线

对二种色光的计算结果以球差曲线形式与主色光的球差曲线画在一起，如图所示，称为**色球差曲线**。

- 了解色差随孔径变化的情况
- 球差随色光变化的情况



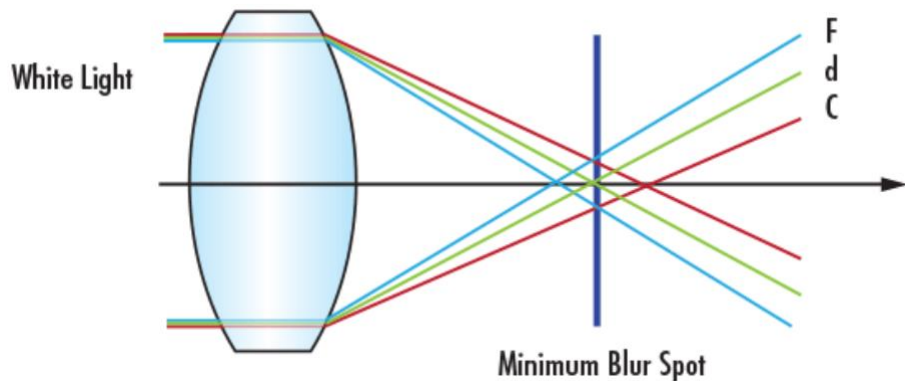
- 对F光和C光在0.707带校正色差后，但其公共焦点相对于主色光d线尚有较大的偏离，这种二色光的公共焦点相对于主色光的位置差异称为**二级光谱**；



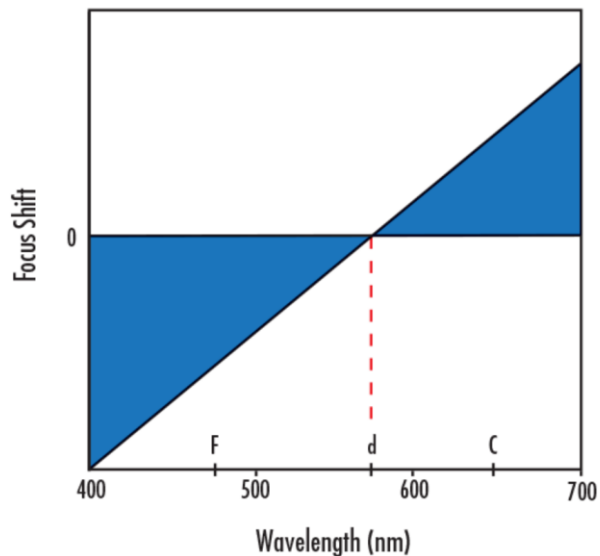
9.1 位置色差

二. 位置色差度量与曲线

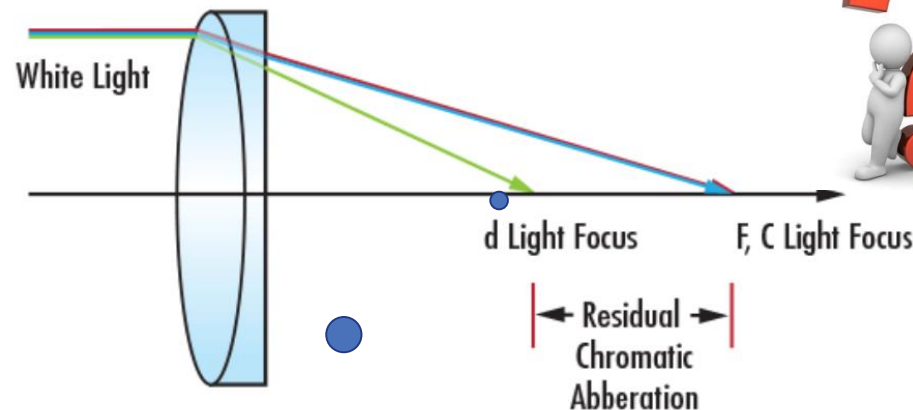
Single Positive Lens



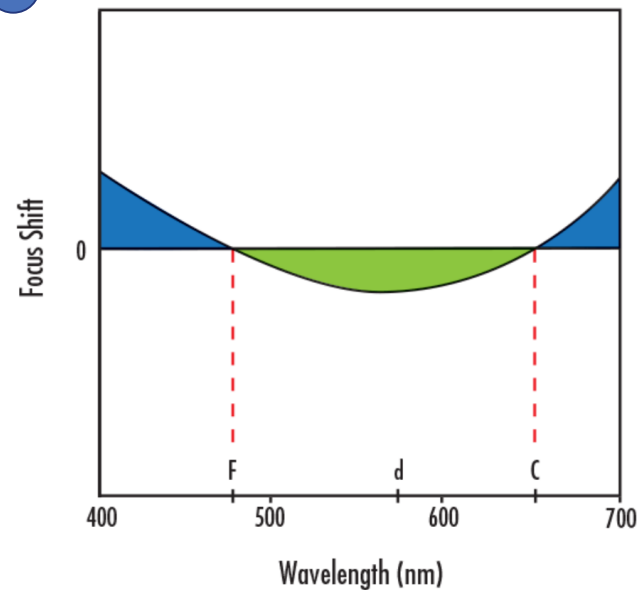
Chromatic



Achromatic Doublet Lens Correcting for Primary Longitudinal Chromatic Aberration



Achromatic



d是否可以
与F, C重合?

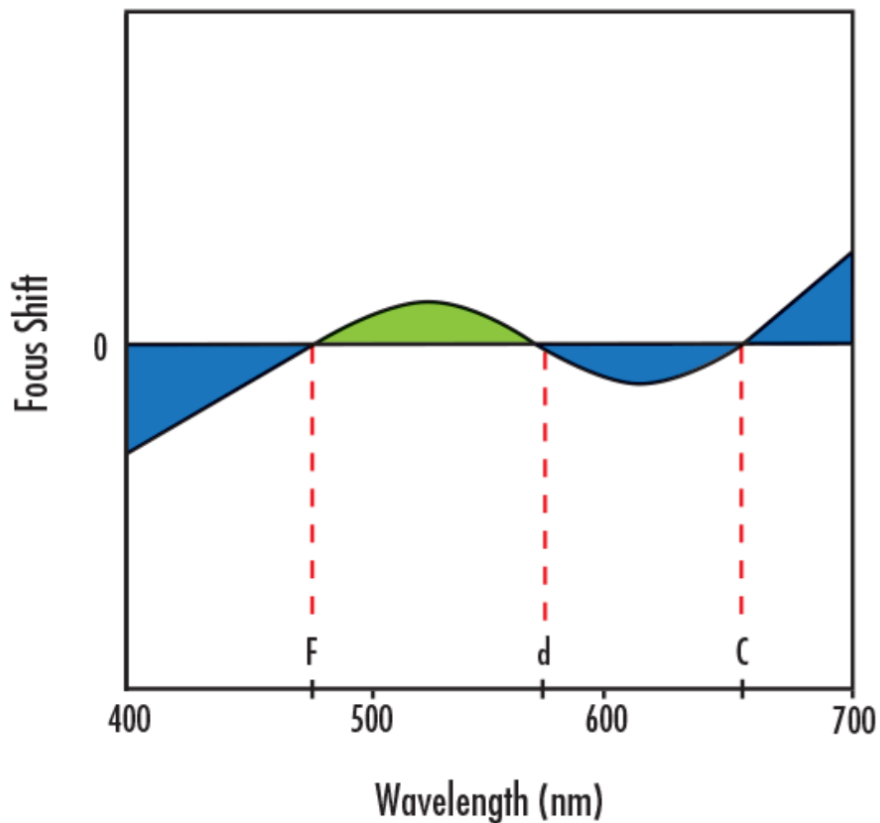


9.1 位置色差

二. 位置色差度量与曲线

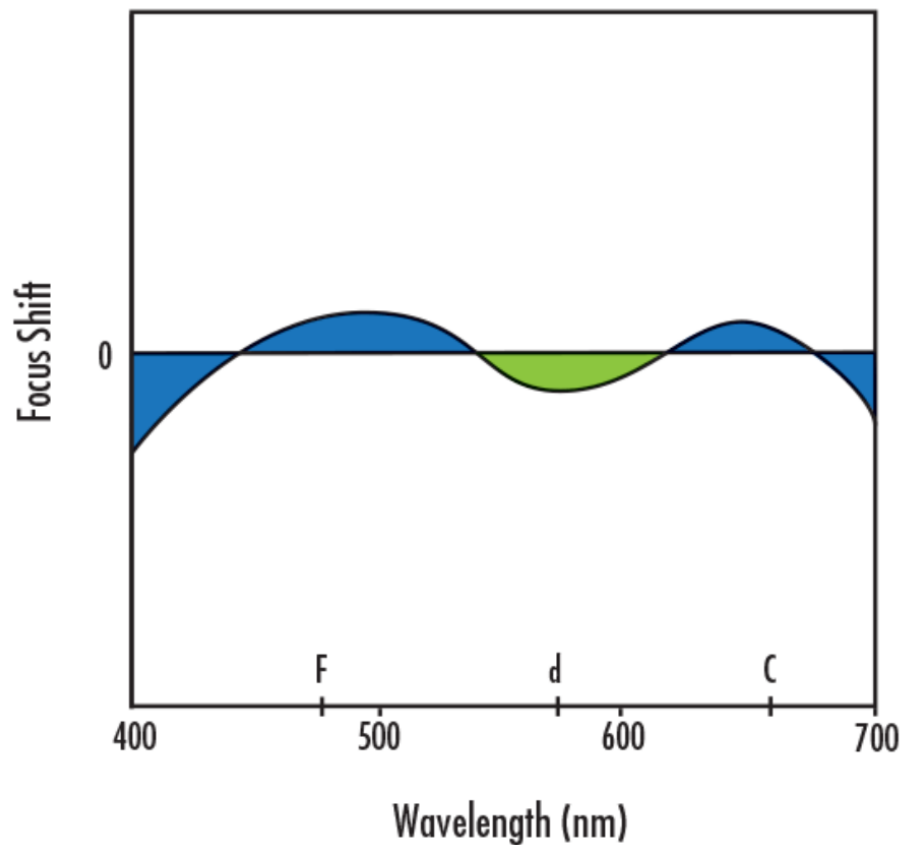
复消色差透镜

Apochromat



超消色差透镜

Superachromat





第九章 色像差

对白光成像的光学系统，由于材料对不同波长的光折射率不同，使得各色光线具有不同的成像位置和倍率，这种成像的色差异称为色差（Chromatic aberration）。

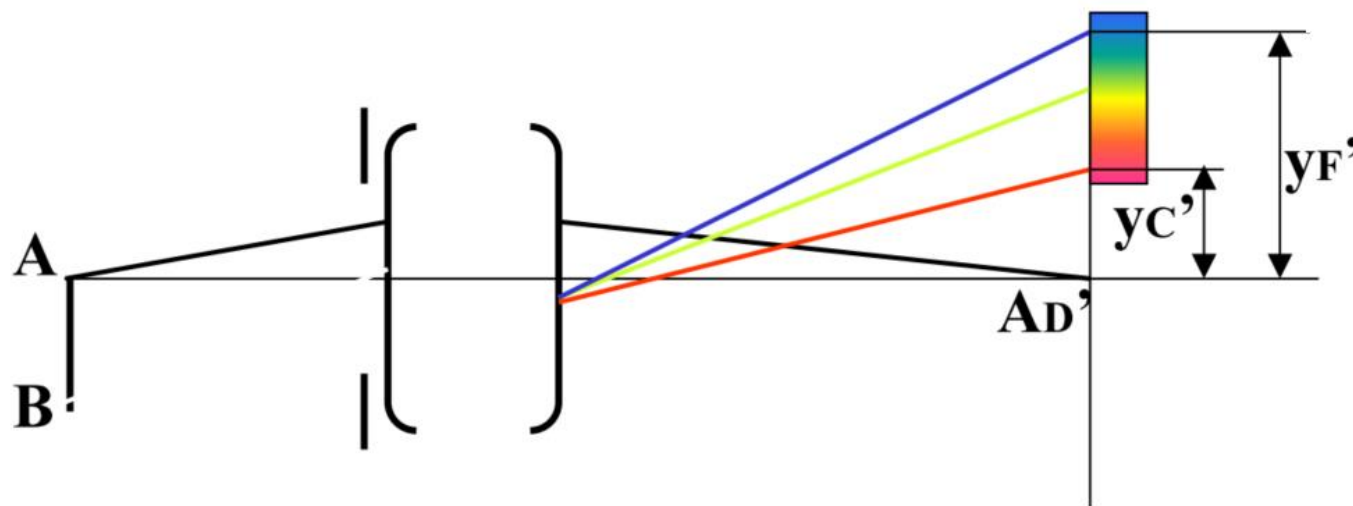
主要内容

- 9.1 位置色差
- 9.2 倍率色差
- 9.3 初级位置色差
- 9.4 初级倍率色差

9.2 倍率色差

一. 产生与现象

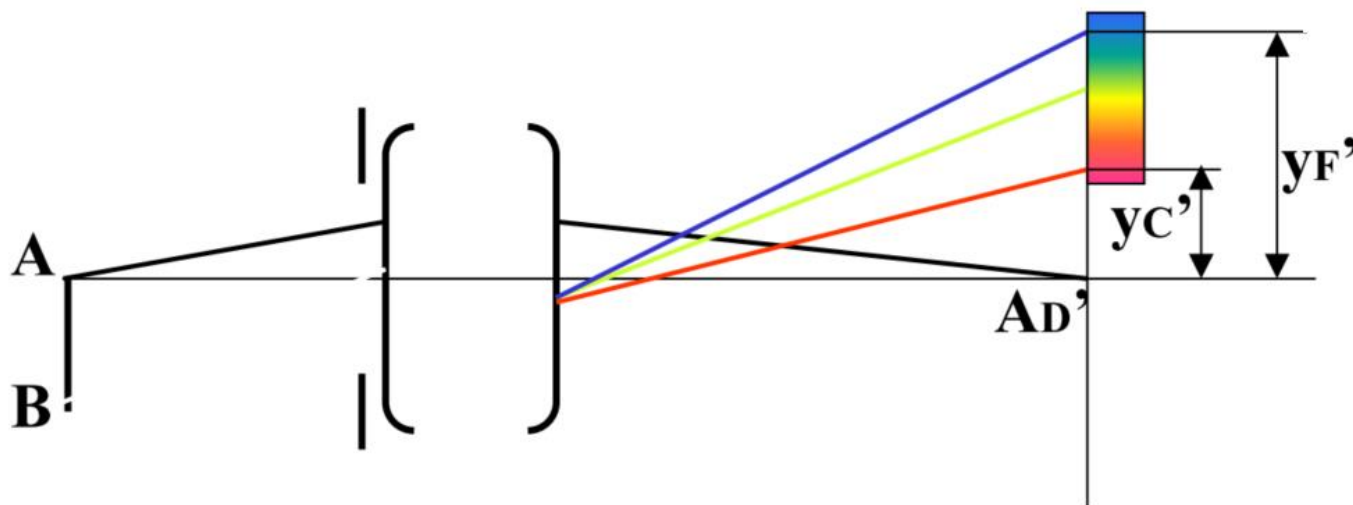
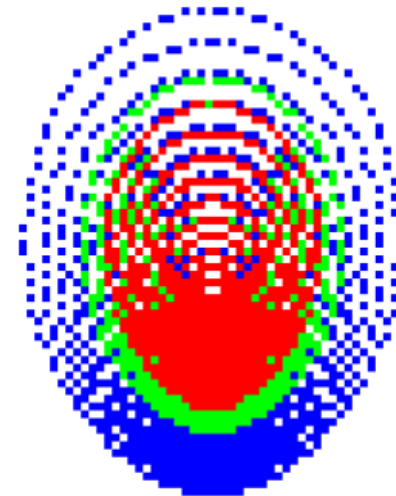
- **轴上点**：光学系统校正位置色差后，轴上点发出的两种色光通过光学系统后交于光轴上同一点，即可认为两种色光的像面重合在一起；
- **轴外点**：两种色光的垂轴放大率不一定相等，不同色光的焦距也不等时，放大率也不等，因此像高也不同。
- **倍率色差**：光学系统对不同色光的放大率差异，也可称为**垂轴像差**。



9.2 倍率色差

一. 产生与现象

- 物体的像有彩色的边缘，即各种色光的轴外点不重合；
- 倍率色差破坏了轴外点成像的清晰度，造成白光像的模糊。
- 倍率色差随视场的增大而变得严重，大视场光学系统必须校正倍率色差。

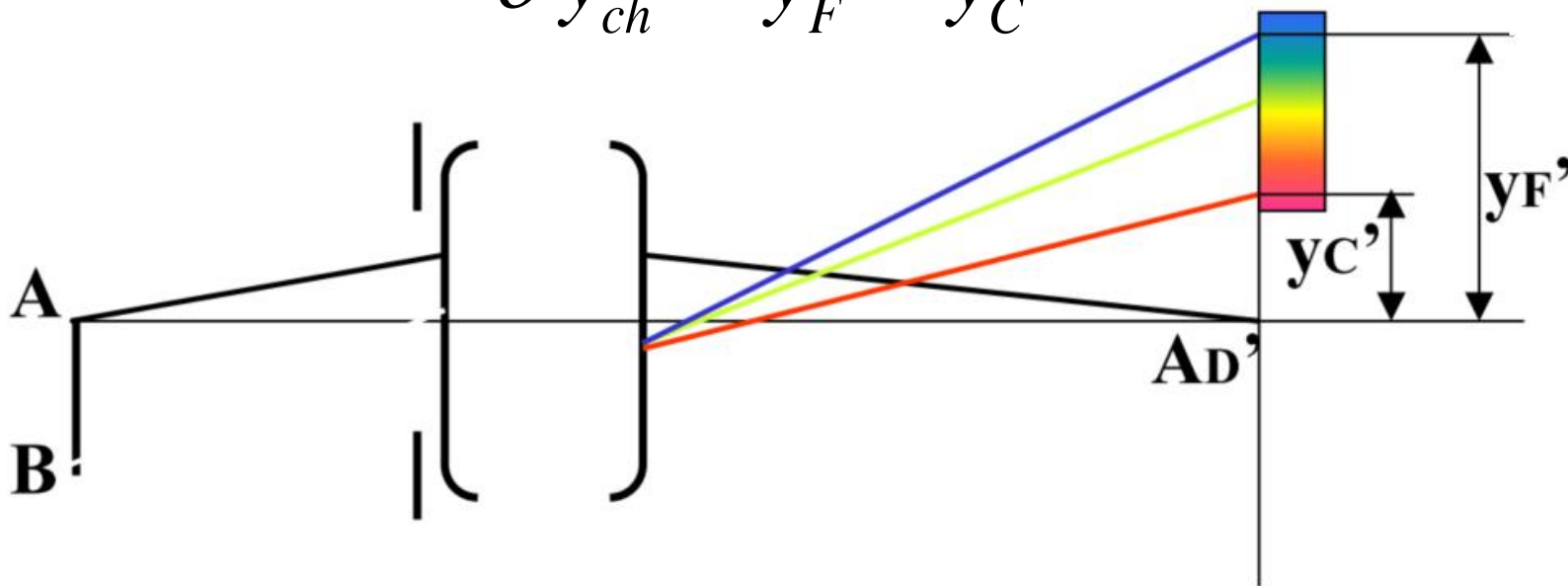


9.2 倍率色差

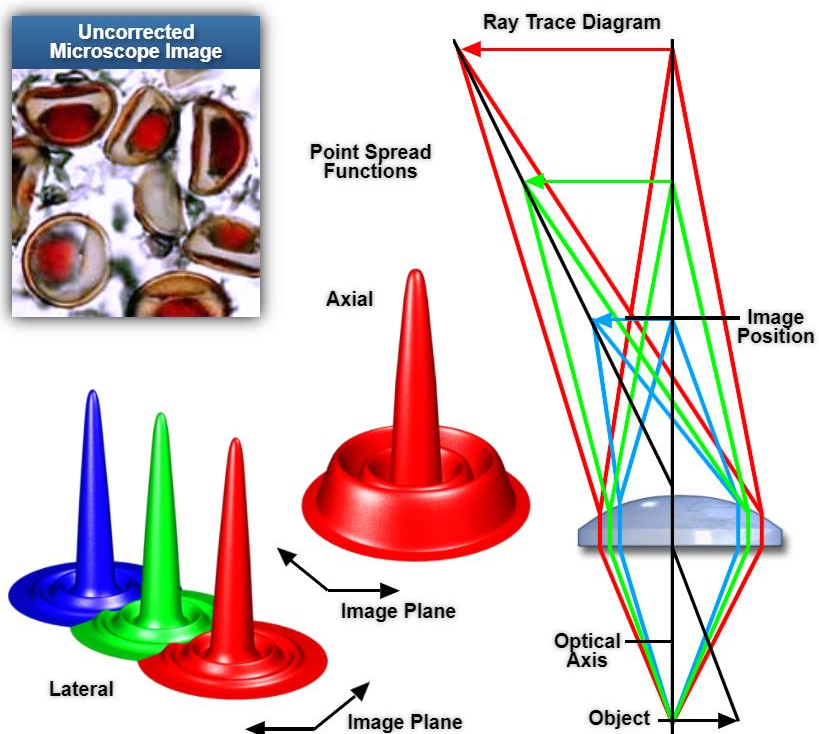
二. 色差的度量

- 作为垂轴像差的一种，倍率色差是在高斯像面上度量的。
- **倍率色差**：定义为轴外点发出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，且以波长较长的色光交点高度为基准，即

$$\delta y'_{ch} = y'_F - y'_C$$



Chromatic Aberration



Choose a Specimen

Crown Wart Fungus

Image Position

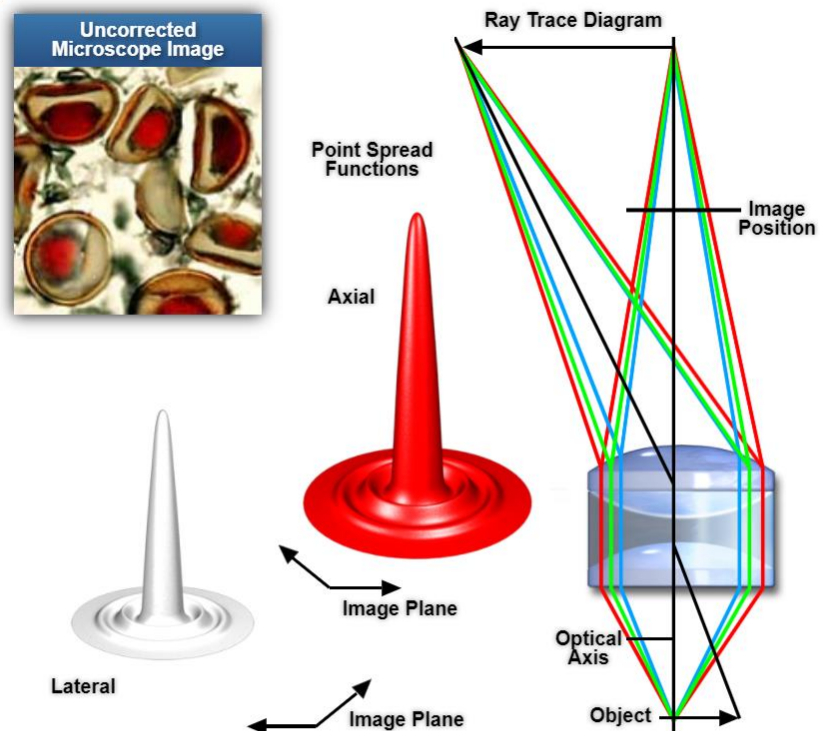
Uncorrected

Fluorite

Achromat

Apochromat

Chromatic Aberration



Choose a Specimen

Crown Wart Fungus

Image Position

Uncorrected

Fluorite

Achromat

Apochromat



第九章 色像差

对白光成像的光学系统，由于材料对不同波长的光折射率不同，使得各色光线具有不同的成像位置和倍率，这种成像的色差异称为色差（Chromatic aberration）。

主要内容

- 9.1 位置色差
- 9.2 倍率色差
- 9.3 初级位置色差
- 9.4 初级倍率色差



9.3 初级位置色差

一. 初级位置色差

位置色差级数形式：

$$\begin{aligned}\delta L'_{ch} &= a_0 + a_1 h_1^2 + a_2 h_2^4 + \cdots \\ &= \delta l'_{ch} + a_1 h_1^2 + a_2 h_2^4 + \cdots\end{aligned}$$

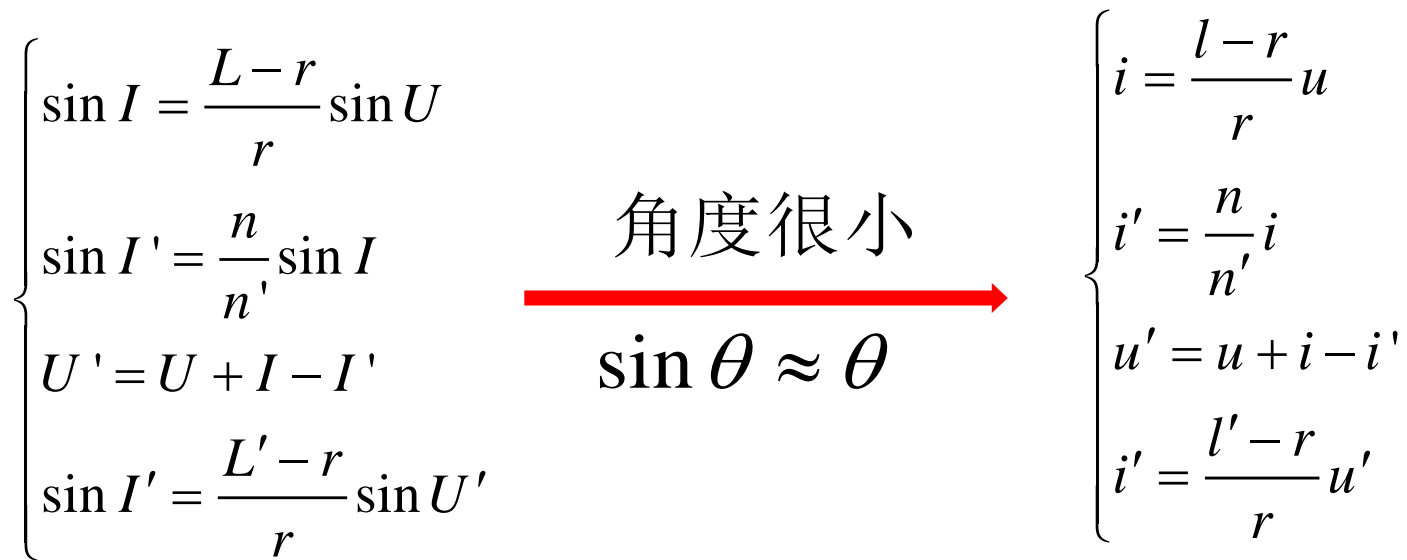
孔径为零时，色差值为常数，近轴光的计算结果不依赖于孔径大小，所以孔径为零时的位置色差就是近轴光的位置色差，可归结为**初级位置色差**。

单个的初级位置色差？折
射球面以及光学系统





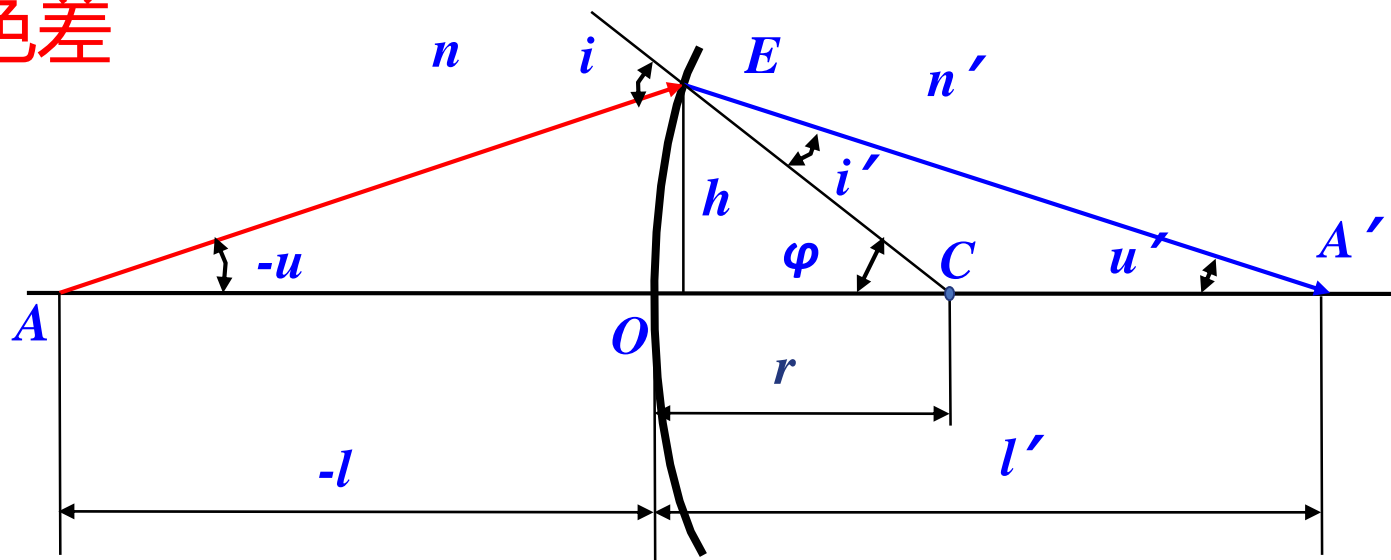
一. 初级位置色差





9.3 初级位置色差

一. 初级位置色差



物像位置公式:
$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

近轴成像

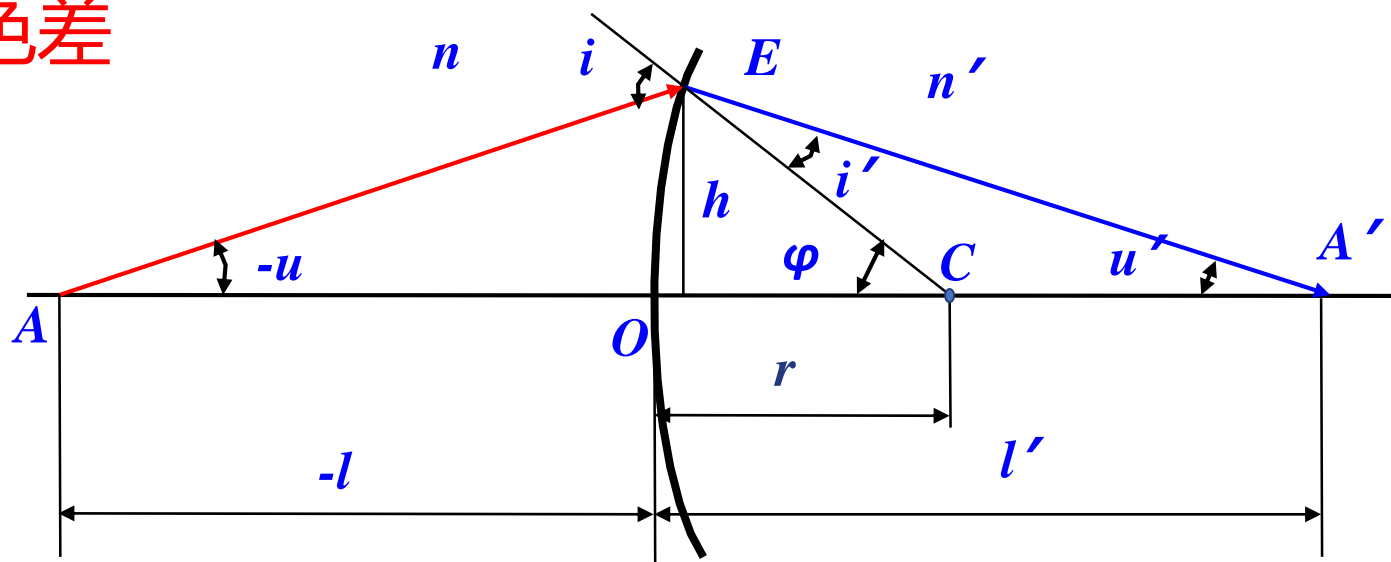
阿贝不变量Q:
$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = Q \quad lu = l'u' = h = r\varphi$$

折射前后夹角关系:
$$n'u' - nu = \frac{h(n' - n)}{r} \quad i = \varphi - u = \frac{h}{r} - u$$



9.3 初级位置色差

一. 初级位置色差



单个折射球面物像关系：

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

两种色光的折射率之差相对于折射率值是一个小量，对两种色光的折射率差物像位置关系进行微分：

$$\frac{dn'}{l'} - \frac{n' dl'}{l'^2} - \frac{dn}{l} + \frac{n dl}{l^2} = \frac{dn' - dn}{r}$$



9.3 初级位置色差

一. 初级位置色差

$$\frac{dn'}{l'} - \frac{n'dl'}{l'^2} - \frac{dn}{l} + \frac{ndl}{l^2} = \frac{dn' - dn}{r}$$



$$\frac{n'\delta l'_{ch}}{l'^2} - \frac{n\delta l_{ch}}{l^2} = -dn' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) + dn \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right)$$



$$\frac{n'\delta l'_{ch}}{l'^2} - \frac{n\delta l_{ch}}{l^2} = -n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$$



$$n'u'^2 \delta l'_{ch} - nu^2 \delta l_{ch} = -h^2 n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$$



$$n'u'^2 \delta l'_{ch} - nu^2 \delta l_{ch} = -h^2 Q \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$$

$$i = \varphi - u = \frac{h}{r} - u$$

dn 和 dn' 为折射面两边介质的色散

dl 和 dl' 为折射面两边的初级位置色差

$$dl = \delta l_{ch}, \quad dl' = \delta l'_{ch}$$

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = Q$$

$$lu = l'u' = h = r\varphi$$

$$\Rightarrow n'u'^2 \delta l'_{ch} - nu^2 \delta l_{ch} = -luni \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$$

单个折射球面初级位置色差公式



9.3 初级位置色差

一. 初级位置色差

单个折射球面初级位置色差公式

$$n'u'^2\delta l'_{ch} - nu^2\delta l_{ch} = -luni\left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n}\right)$$

对于包含 k 个折射球面的光学系统，可对每一面应用此式求和，中间项可以一一消去，最后的得到：

$$n'_k u_k'^2 \delta l'_{ch,k} - n_1 u_1^2 \delta l_{ch,1} = -\sum C_I$$

初级位置色差系数
(第一色差和数)

$$C_I = luni\left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n}\right) \quad \text{表示折射面上的色差分布。}$$

$$\delta l'_{ch,k} = \frac{n_1 u_1^2}{n'_k u_k'^2} \delta l_{ch,1} - \frac{1}{n'_k u_k'^2} \sum C_I \xrightarrow{\text{物体本身无色差时}} \delta l'_{ch,k} = -\frac{1}{n'_k u_k'^2} \sum C_I$$

光学系统的轴向放大率

光学系统初级位置色差

9.3 初级位置色差

二. 平行平板的初级位置色差

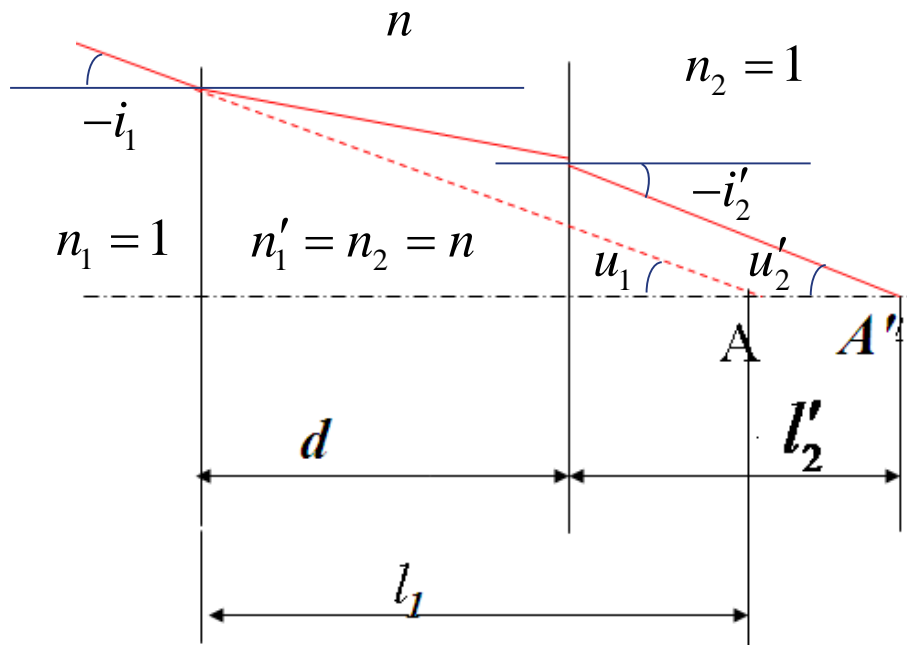
平行平板对光线的折射具有方向不变的特性，因而有

$$i_1 = -u_1 = -u'_2 = i'_2$$

$$\sum C_I = l_1 u_1 n_1 i_1 \left(\frac{dn'_1}{n'_1} - \frac{dn_1}{n_1} \right) + l_2 u_2 n_2 i_2 \left(\frac{dn'_2}{n'_2} - \frac{dn_2}{n_2} \right)$$

$$= -l_1 u_1^2 \frac{dn}{n} + (nl_1 - d) u_2^2 n \frac{dn}{n} = u_1^2 \frac{dn}{n^2} d$$

$$\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'_2 u'^2_2} \sum C_I = \frac{dn}{n^2} d = \frac{n-1}{n^2 \nu} d$$



- 平行平板恒产生正色差，其大小只与厚度 d 和玻璃的光学常数有关，与光路中所处的位置无关，
- 当平行平板处于平行光束中时，不产生色差；



9.3 初级位置色差

三. 薄透镜的初级位置色差

$$\sum C_I = l_1 u_1 n_1 i_1 \left(\frac{dn'_1}{n'_1} - \frac{dn_1}{n_1} \right) + l_2 u_2 n_2 i_2 \left(\frac{dn'_2}{n'_2} - \frac{dn_2}{n_2} \right)$$

$$\sum C_I = h(i_1 - i'_2) \frac{dn}{n}$$

$$\sum C_I = h^2 \left(\frac{l_1 - r_1}{hr_1} u_1 - \frac{l'_2 - r_2}{hr_2} u'_2 \right) \frac{dn}{n} = h^2 \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left(\frac{1}{l'_2} - \frac{1}{l_1} \right) \right] \frac{dn}{n}$$

$$\sum C_I = h^2 \left(\frac{\Phi}{n-1} + \Phi \right) \frac{dn}{n} = h^2 \Phi \frac{dn}{n-1} = h^2 \frac{\Phi}{v}$$

阿贝常数

单个薄透镜
的初级色差

$$\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'_2 u'^2_2} \sum C_I = -l'^2_2 \frac{\Phi}{v}$$

薄透镜的厚度为零, $d=0$,
且在空气中, 则有

$$n_1 = n'_2 = 1 \quad n'_1 = n_2 = n$$

$$dn_1 = dn'_2 = 0 \quad dn'_1 = dn_2 = dn$$

$$l_1 u_1 = l_2 u_2 = h$$

$$\begin{cases} i = \frac{l-r}{r} u \\ i' = \frac{n}{n'} i \\ u' = u + i - i' \\ i' = \frac{l'-r}{r} u' \end{cases}$$



9.3 初级位置色差

三. 薄透镜的初级位置色差

单个薄透镜的初级位置色差

$$\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'_2 u'_2{}^2} \sum C_I = -l'_2{}^2 \frac{\Phi}{\nu}$$

物体位于无限远时,

$$\delta l'_{ch} = \frac{f'}{\nu}$$

- 初级位置色差仅决定于**透镜的光焦度和制造透镜的玻璃**；
- 对于同一光焦度而言，阿贝常数 ν 越大，色差越小；
- 单薄透镜的色差的正负决定于透镜的光焦度，**正透镜产生负色差，负透镜产生正色差**；
- 消色差光学系统需要由正透镜和负透镜共同组成，达到互相补偿色差的效果。



9.3 初级位置色差

三. 薄透镜的初级位置色差

- 系统初级位置色差展开成光学系统的每一个折射面的和；
- 系统初级位置色差展开成每一个透镜分布之和，

薄透镜系统的色差系数就是要使各个单薄透镜的系数相加即可：

$$\sum C_I = \sum_1^M h^2 \frac{\Phi}{v}$$

$$\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'_2 u'_2{}^2} \sum C_I = -l'_2{}^2 \frac{\Phi}{v}$$

- 某透镜对位置色差的贡献与其所处位置有关。在h小的位置产生色差小，反之则大；
- 对系统选定材料后，消色差的问题就转化为在满足总光焦度的情况下，如何合理分配个透镜的光焦度问题。



9.3 初级位置色差

四. 位置色差的校正

- 双胶合或微小空气间隙的双分离镜组 p129

$$\frac{\Phi_1}{\nu_1} + \frac{\Phi_2}{\nu_2} = 0 \qquad \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi$$

- 有一定间隔的双分离透镜系统

$$h_1^2 \frac{\Phi_1}{\nu_1} + h_2^2 \frac{\Phi_2}{\nu_2} = 0 \qquad h_1 \Phi_1 + h_2 \Phi_2 = h_1 \Phi$$



第九章 色像差

对白光成像的光学系统，由于材料对不同波长的光折射率不同，使得各色光线具有不同的成像位置和倍率，这种成像的色差异称为色差（Chromatic aberration）。

主要内容

- 9.1 位置色差
- 9.2 倍率色差
- 9.3 初级位置色差
- 9.4 初级倍率色差



9.4 初级倍率色差

倍率色差时光学系统的放大率随折射面间介质的折射率变换而引起的，因此其近似表达式可由微分折射面的放大率公式而得到。

单个折射球面的放大率公式为： $\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l}$

折射球面初级倍率色差公式

$$n'u'^2\delta y'_{ch} - nu\delta y_{ch} = -luni_p \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$$

光学系统初级倍率色差公式

$$n'_k u'_k \delta y'_{ch,k} - n_1 u_1 \delta y_{ch,1} = -\sum C_{II}$$

$C_{II} = luni_p \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$ 表示折射面上的色差分布。

具体推导过程与初级位置色差类似，请大家自学这部分内容。P123，p130



像差理论

几何像差

单色像差

- 轴上点像差 — 球差 (Spherical Aberration)
Ch 7
- 轴外点像差
 - 彗差 (Coma)
 - 像散 (Astigmatism)
 - 场曲 (Field Curvature)
 - 畸变 (Distortion)Ch 8

Ch 9
色像差

- 轴上点像差 --- 位置色差 (longitudinal CA)
- 轴外点像差 --- 倍率色差 (Lateral CA)

Ch 10 波像差：与像质评价指标和光学检测相联系；

Ch 11 光线追迹-光路计算



例题

练习：P148，第九章习题1

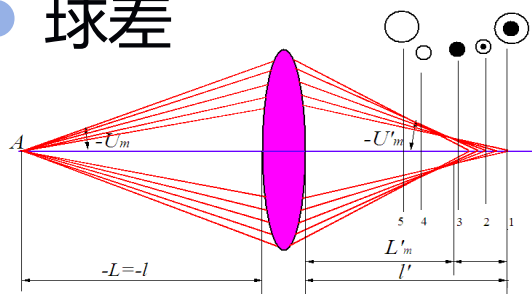


像差理论-七种像差

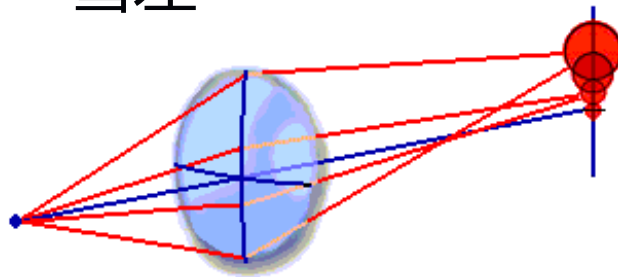
像差形式	形成原因	主要影响	决定因素	如何校正
球差	不同倾角的入射光线造成像点的位置偏离	圆形弥散斑，成像变得模糊	光学元件的形状和材料	初级球差与高级球差的相互补偿
彗差	轴外点宽光束的主光线与球面对称轴不重合	彗星状的弥散斑，破坏成像清晰度	与视场、孔径以及透镜形状都有关	选择光阑位置，使用对称结构
像散	两主截面的曲率不同，聚焦为子午和弧矢像点，形成像散	轴外点得不到清晰像	远离光轴的像差，随视场增大而增大	控制入瞳位置
场曲	球面固有性质决定的	较大的平面物体各点不能同时清晰成像	远离光轴的像差，随视场增大而增大	控制入瞳位置
畸变	通过入瞳中心的主光线的球差造成的	仅引起像的变形，不影响成像清晰度；	主光线决定的畸变与视场有关，与孔径无关	控制入瞳位置
位置色差	同种材料对不同波长的光折射率不同	彩色弥散斑，成像变得模糊	光学元件的形状和材料	相互补偿
倍率色差	放大率随折射面间介质折射率变化而引起的	破坏成像清晰度，造成白光像的模糊	随视场的增大而变得严重	相互补偿与抵消

七种像差

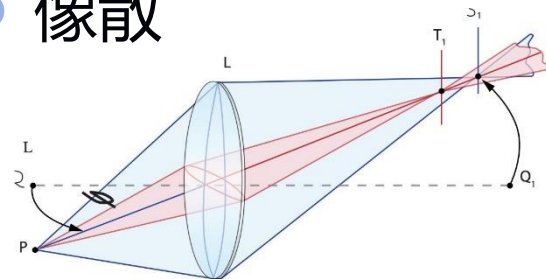
● 球差



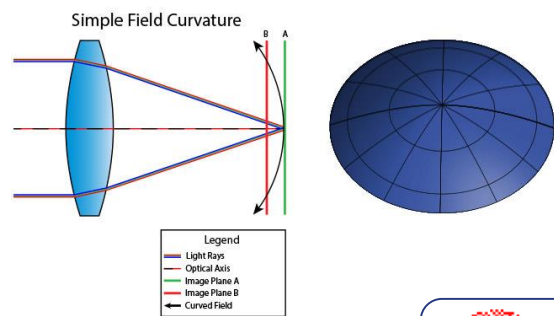
● 彗差



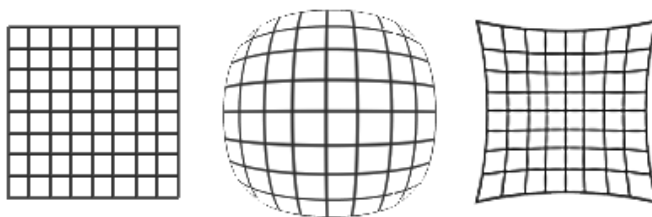
● 像散



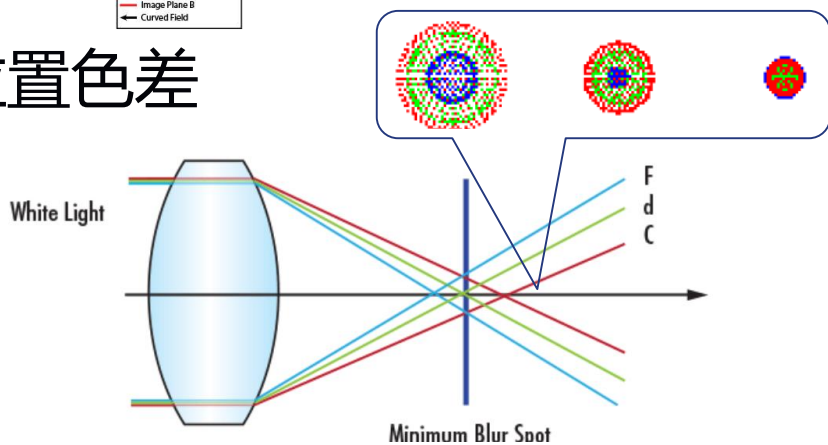
● 场曲



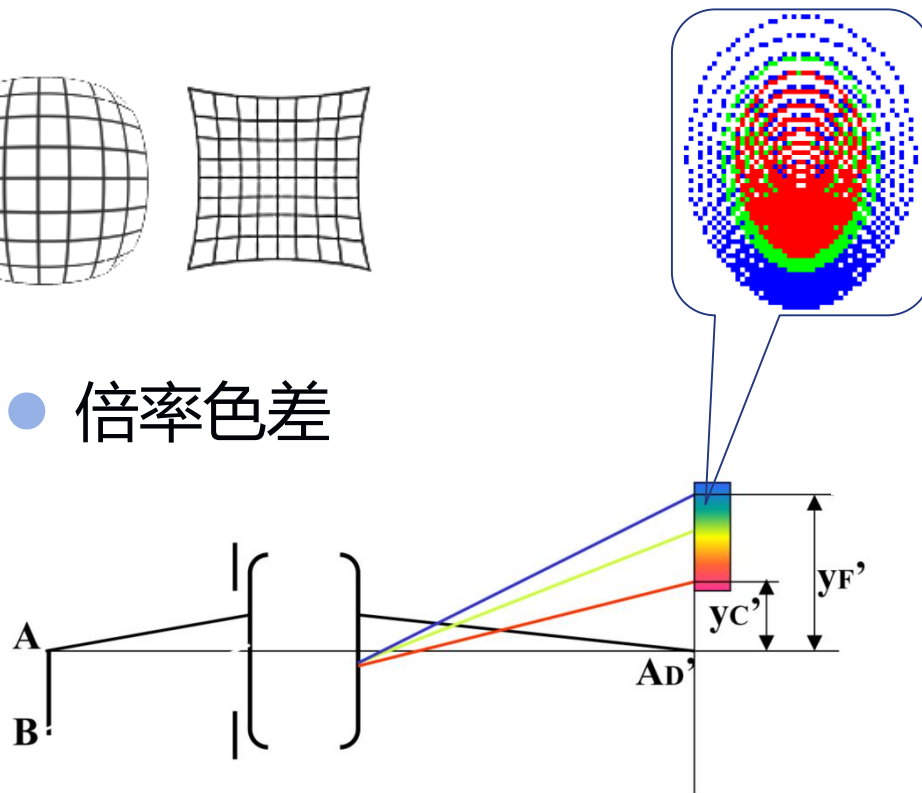
● 畸变



● 位置色差



● 倍率色差





初级像差 P143

球差: $\delta L'_0 = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_I, \quad \sum S_I = \sum l u n i (i - i') (i' - u) \propto u^3 W^0$

弧矢彗差: $K'_s = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_{II}, \quad \sum S_{II} = \sum S_I \frac{i_p}{i} \propto u^2 W^1$

像散: $x'_{sp} = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_{III}, \quad \sum S_{III} = \sum S_{II} \frac{i_p}{i}$

像面弯曲: $x'_p = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_{IV}, \quad \sum S_{IV} = J^2 \sum \frac{n' - n}{n' n r} \propto u^1 W^2$

畸变: $\delta y' = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_V, \quad \sum S_V = \sum (S_{III} + S_{IV}) \frac{i_p}{i} \propto u^0 W^3$

位置色差: $\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'u'^2} \sum C_I, \quad \sum C_I = \sum l u n i \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$

倍率色差: $\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'u'} \sum C_{II}, \quad \sum C_{II} = \sum C_I \frac{i_p}{i}$

塞得和数

色差和数



第九章 色像差

位置色差

- 产生与现象
- 度量与曲线

倍率色差

- 产生与现象
- 度量与曲线

第九章 色像差

初级位置像差

- 初级位置色差计算
- 平行平板初级位置色差
- 薄透镜的初级位置色差
- 薄透镜系统初级位置色差的校正

初级倍率色差

- 初级倍率色差计算
- 薄透镜的初级位置色差
- 薄透镜系统初级位置色差的校正