



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



实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



第四章 理想光学系统

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



4.1 理想光学系统与共线成像理论

一、共轴球面系统

- 共轴球面系统只有在近轴区才能成完善像,而对于宽光束, 当 u 较大时, 成像就不完善, 存在像差。
- 光束太细, 进入光学系统的能量太弱, 成像太暗。
- 只能对物面上很小的部分成像, 不能反映全貌。

只能对细光束成完善像的光学系统是无实用价值的!

寻找一个能对较大范围、较宽光束及较宽波段范围都能成满意像的光学系统, 就是应用光学所需要解决的**中心问题**。



4.1 理想光学系统与共线成像理论

二. 理想光学系统 Perfect optical system

- 为了揭示物、像、成像系统三者之间的内在联系，可暂时抛开成像系统的具体结构；
- 将一般仅在光学系统近轴区存在的完善像拓展成在**任意大**的空间以**任意宽光束**成**完善像**的理想模型，即称为**理想光学系统**；
- 又称为**高斯光学系统**（1841年由高斯提出）；
- 理想光组的成像作为衡量实际光学系统成像质量的标准；
- 光学设计时，光组的具体参数是未知的，无法由近轴光学公式计算。



4.1 理想光学系统与共线成像理论

二. 理想光学系统 Perfect optical system

为什么要研究理想光学系统?

- 光学设计时，光组的具体参数是未知的，无法由近轴光学公式计算；
- 以理想光组理论为基础，根据要求，寻找和确定一个能满足要求的光学系统的整体方案。
- 理想光组可有任意多个折、反射球面或多个光组组成。寻找理想光组的**特征点、面**就可以代表整个光组的光学特性，用以讨论成像规律。



4.1 理想光学系统与共线成像理论

二. 理想光学系统的成像性质

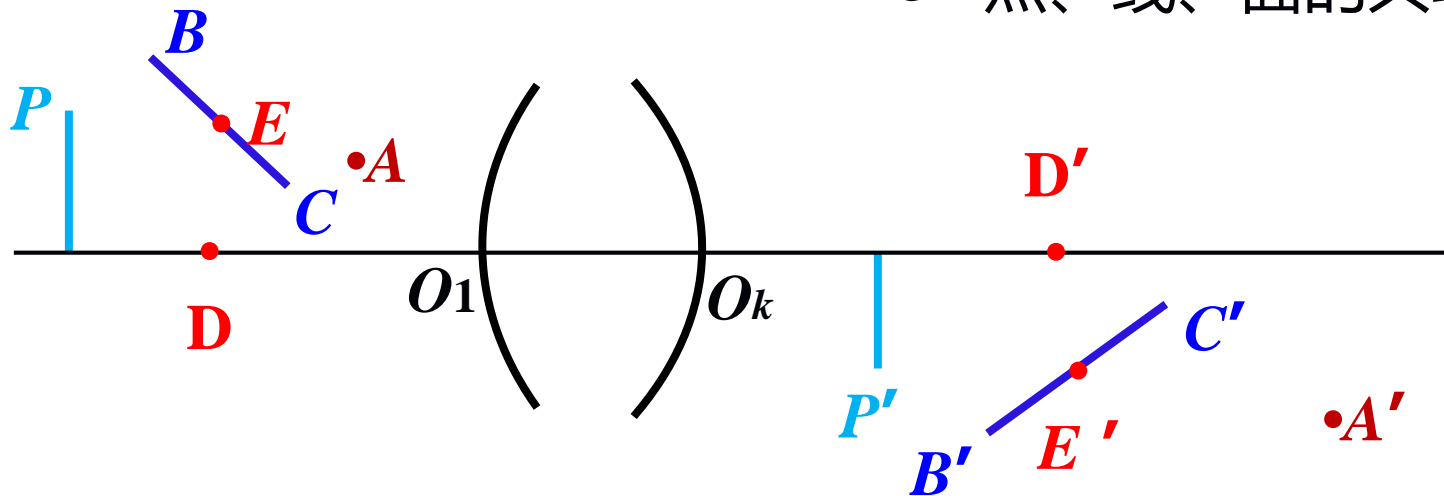
1. 物空间中一点对应与像空间唯一的一点，这一对对应点称为**共轭点** (conjugate point) ；
2. 物空间中一条直线对应于像空间中唯一的一条直线，这一对对应直线称为**共轭线** ；
3. 如果物空间一点位于直线上，其在像空间的共轭点必位于该直线的共轭直线上；
4. 推广：物空间中任意同心光束对应于像空间中一共轭的同心光束，物空间中任意平面对应于像空间中一共轭的平面。



4.1 理想光学系统与共线成像理论

二. 理想光学系统的成像性质

● 点、线、面的共轭关系



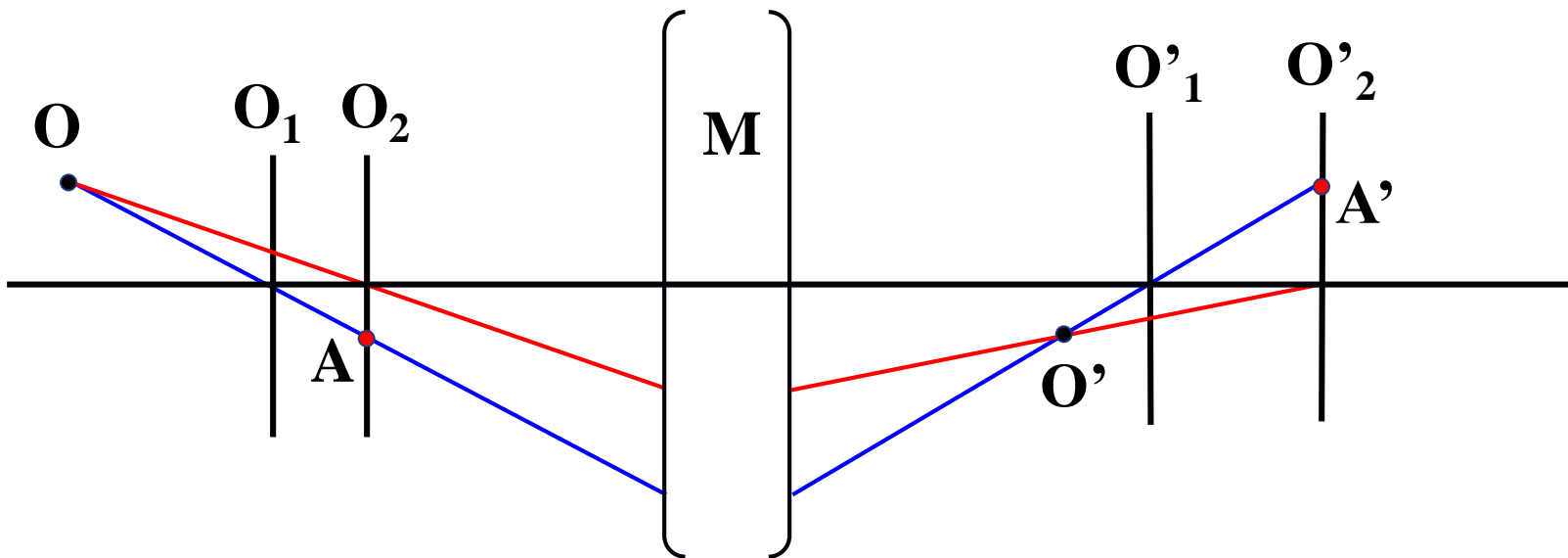
□ 把这种点对应点，直线对应直线，平面对应平面的成像变换称为共线成像，上述定义称为共线成像理论。



4.1 理想光学系统与共线成像理论

二. 理想光学系统的成像性质

练习： 已知：M为理想光学系统，像面 o_1' 与物面 o_1 共轭。其对应的放大率为 β_1 ；像面 o_2' 与物面 o_2 共轭。其对应的放大率为 β_2 。
求：物空间任意物点o的像点位置 o'



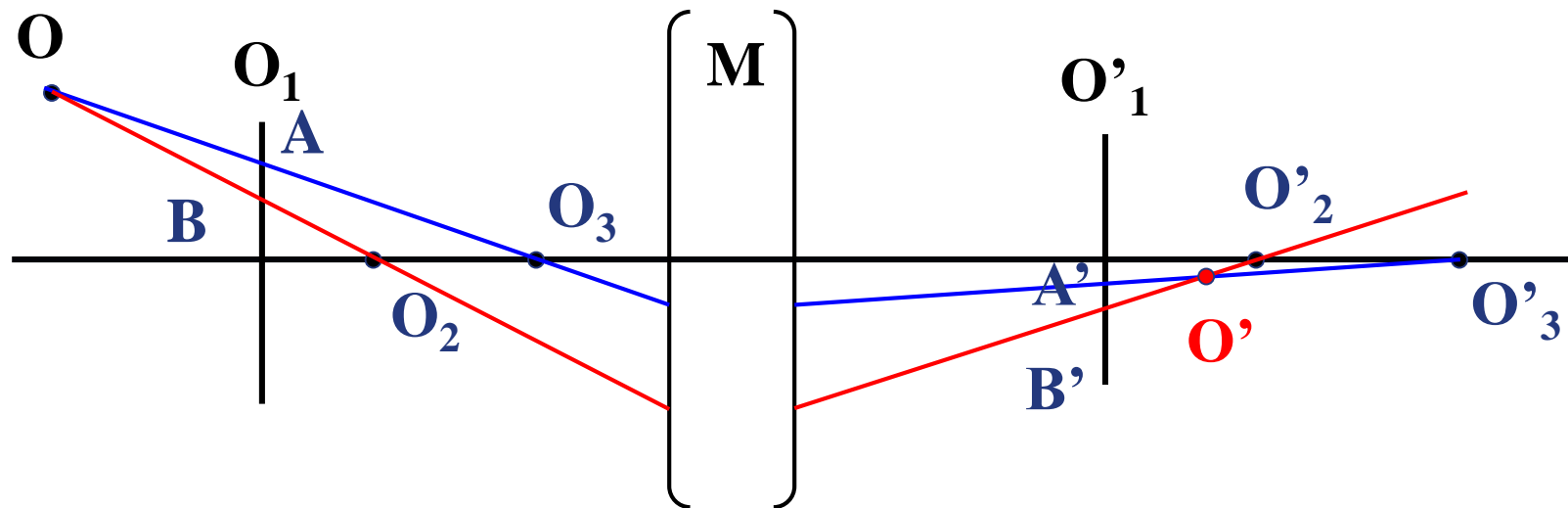


4.1 理想光学系统与共线成像理论

二. 理想光学系统的成像性质

练习：已知M为理想光学系统，像面 o_1' 与物面 o_1 共轭，其对应的放大率为 β_1 ；两对共轭点 o_2 与 o_2' 以及 o_3 与 o_3' ；

求：物空间任意物点 o 的像点位置 o' 。





第四章 理想光学系统

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

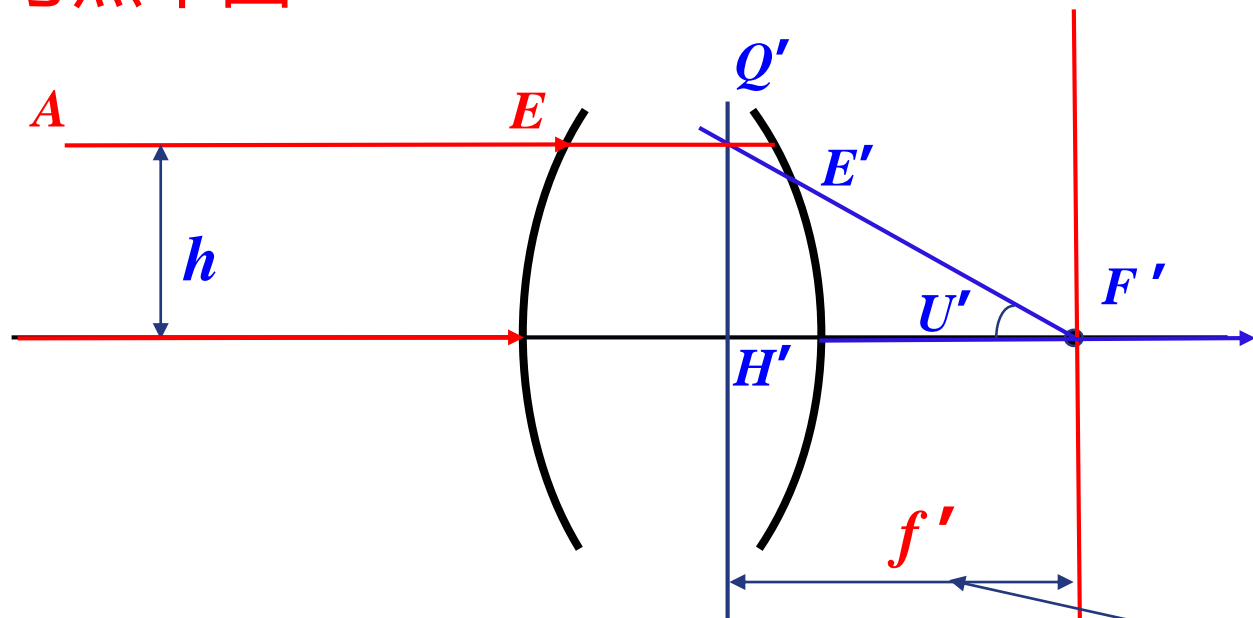
主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



4.2 理想光学系统的基点和基面

一. 焦点与焦平面



f' 也遵从符号规则，它的起始原点是像方主点 H'

$$f' = \frac{h}{\tan U'}$$

像方焦距

像方焦点：无限远轴上物点的像点 F' ；

像方焦平面：过 F' 且与光轴垂直的平面，它是物方无限远垂轴平面的共轭像平面；

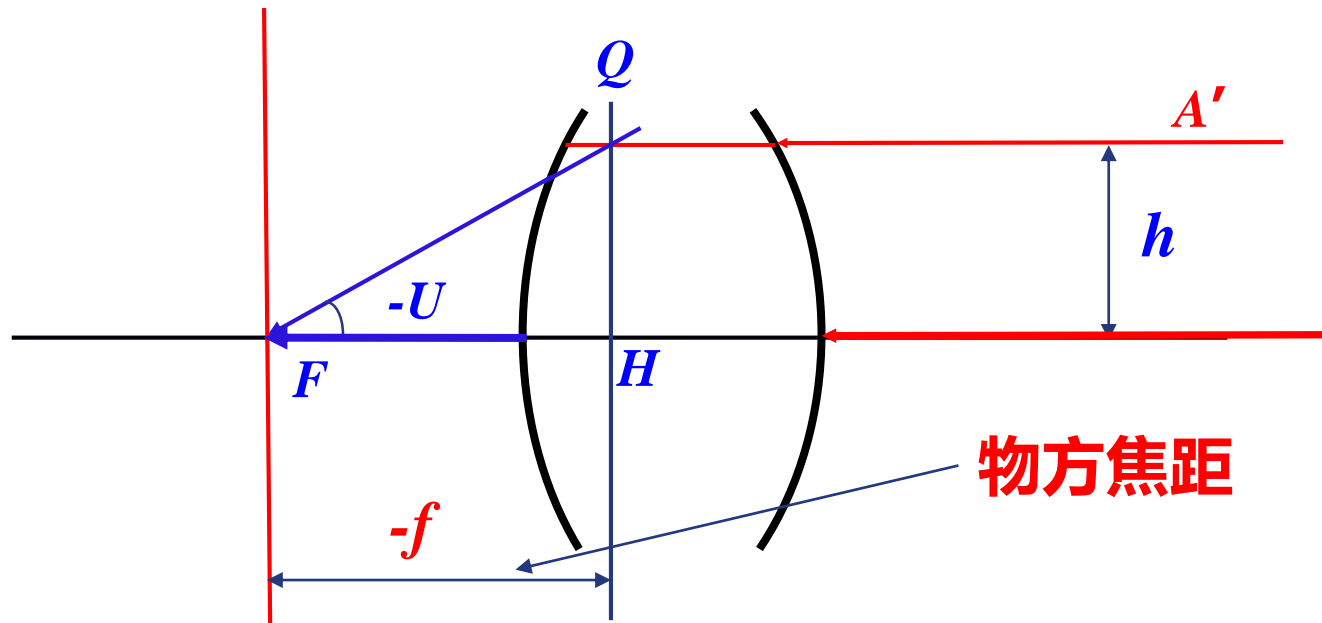
像方主平面： $Q'H'$ 平面

像方主点： H' 光轴与像方主平面的交点。



4.2 理想光学系统的基点和基面

一. 焦点与焦平面



f 也遵从符号规则，它的起始原点是物方主点 H

$$f = \frac{h}{\tan U}$$

物方焦点：像方无穷远轴上点的共轭点 F ；

物方焦平面：过 F 且与光轴垂直的平面，它是像方无限远垂轴平面的共轭物平面；

物方主平面： QH 平面

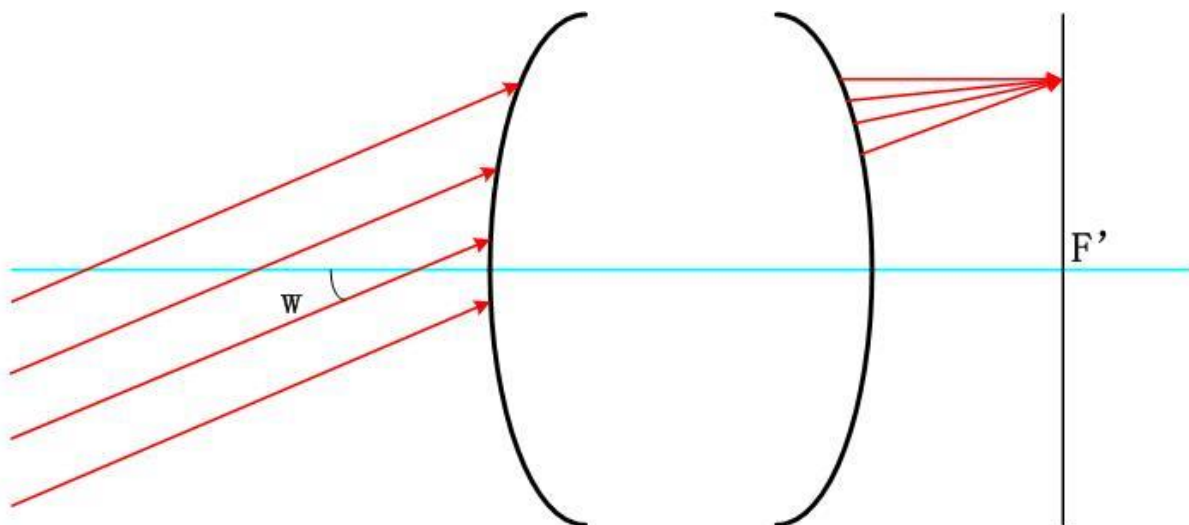
物方主点： H 光轴与物方主平面的交点。



4.2 理想光学系统的基点和基面

一. 焦点与焦平面

无限远轴外物点发出的光线



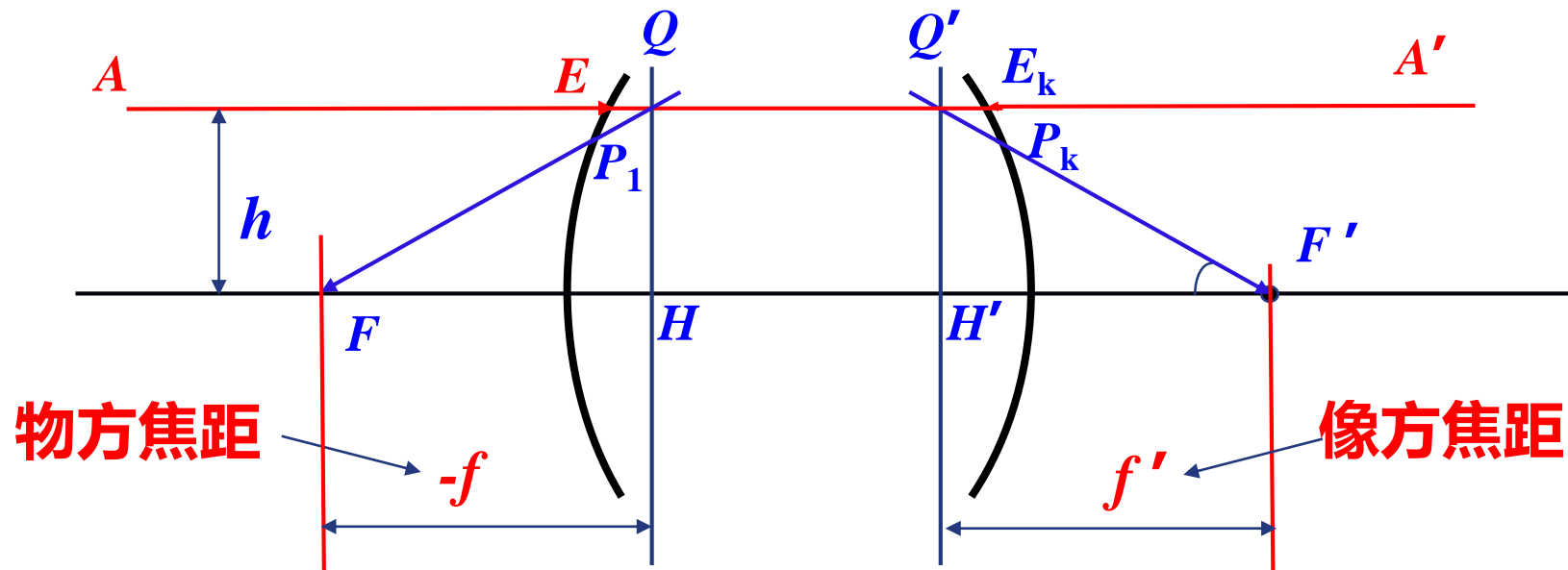
光线总是相互平行的，且与光轴有一定的夹角 ω 。这一束平行光线经过系统后，一定相交于像方焦平面上的某一点。

ω 的大小反映了轴外物点离开光轴的角距离；当 $\omega \rightarrow 0$ 时，轴外物点就重合于轴上物点。



4.2 理想光学系统的基点和基面

二. 主点和主平面



由于两组光线是共轭的， Q 与 Q' 点必是共轭点， QH 与 $Q'H'$ 是共轭面，具有相同高度，光轴同侧，放大率 $\beta=1$ 。

主平面：放大率为1的共轭平面 QH 与 $Q'H'$

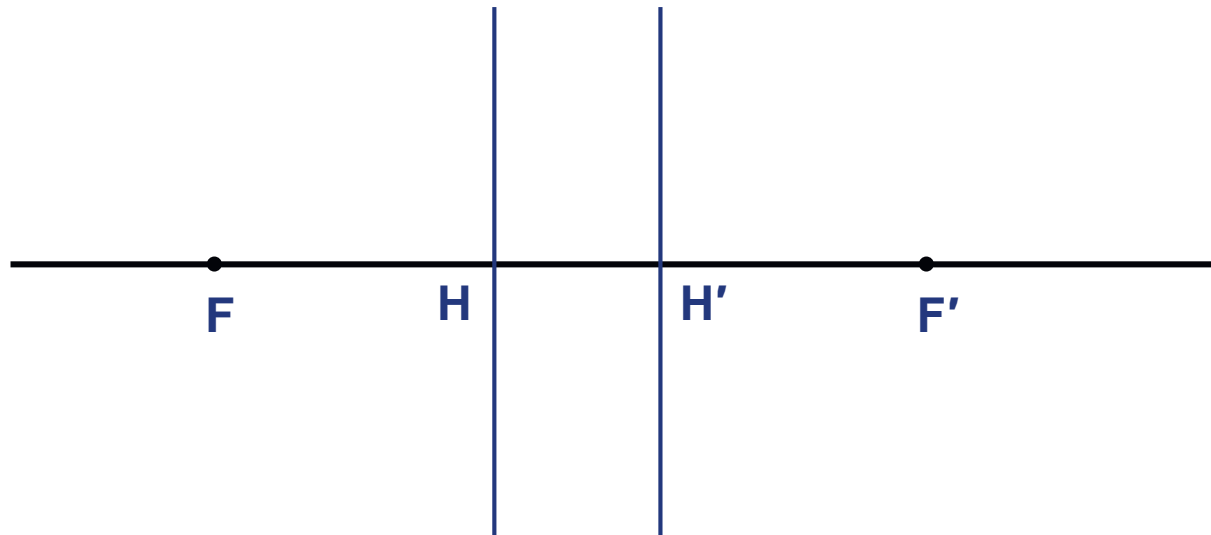
主点：主平面与光轴的交点 H 与 H'



4.2 理想光学系统的基点和基面

三. 共轴系统的基点与基面

- 一对主平面;
- 无限远轴上物点和像方焦点 F' ;
- 物方焦点 F 和像方无限远轴上点。



通常用一对主平面和两个焦点位置来表示一个光学系统。



4.2 理想光学系统的基点和基面

三. 共轴系统的基点与基面



实际光学系统的基点位置和焦距的计算,比如物镜?

方法: 在实际系统的近轴区追迹平行于光轴的光线, 就可以计算出实际系统的近轴区的基点位置和焦距。

- ◆ 为求物镜的像方焦距 f' 、像方焦点的位置 F' 、像方主点的位置 H' , 可沿正向光路追迹一条平行于光轴的光线, 利用近轴光线的光路计算公式逐面计算;
- ◆ 为求物镜的物方焦距 f 、物方焦点的位置 F 、物方主点的位置 H , 可沿反向光路追迹一条平行于光轴的光线,



4.2 理想光学系统的基点和基面

练习：计算单个折射球面的主平面和焦点，焦距

分析：在近轴区，单个折射球面成完善像。在这种情况下，可以看成理想光组，也具有基点、基面。

解：球面的主点位置

主平面上， $\beta = 1$ ，由近轴区横向放大率公式：

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} = 1 \Rightarrow nl' = n'l$$

显然，要使上式成立，只能 $l' = l = 0$ 。



4.2 理想光学系统的基点和基面

练习：计算单个折射球面的主平面和焦点，焦距

$$\because \beta = \frac{nl'}{n'l} = 1 \Rightarrow nl' = n'l$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \Rightarrow l'l \left(\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} \right) = n'l - nl' = \frac{n' - n}{r} l'l = 0$$

$$\Rightarrow \frac{n' - n}{r} l'l = \frac{n' - n}{r} \frac{n'}{n} l \cdot l = \frac{n' - n}{r} \frac{n'}{n} l^2 = 0 \Rightarrow \boxed{l = 0}$$

因此对于单个折射球面而言， H ， H' 和 O 相重合，而且物方主平面和像方主平面与球面顶点 O 相切。



4.2 理想光学系统的基点和基面

练习：计算单个折射球面的主平面和焦点，焦距

单个折射球面的物方和像方焦距为(注意物、像方主点为同一点，即折射面**顶点**):

$$\frac{n'}{f'} - \frac{n}{\infty} = \frac{n' - n}{r} \Rightarrow \frac{n'}{f'} = \frac{n' - n}{r} \Rightarrow f' = \frac{n'r}{n' - n}$$

$$\frac{n'}{\infty} - \frac{n}{f} = \frac{n' - n}{r} \Rightarrow -\frac{n}{f} = \frac{n' - n}{r} \Rightarrow f = -\frac{nr}{n' - n}$$

对于单个反射球面，有 $n' = -n$ 。由上两个公式可以得出：

$$f' = f = \frac{r}{2}$$



第四章 理想光学系统

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



4.3 理想光学系统物像关系

一. 基本概念

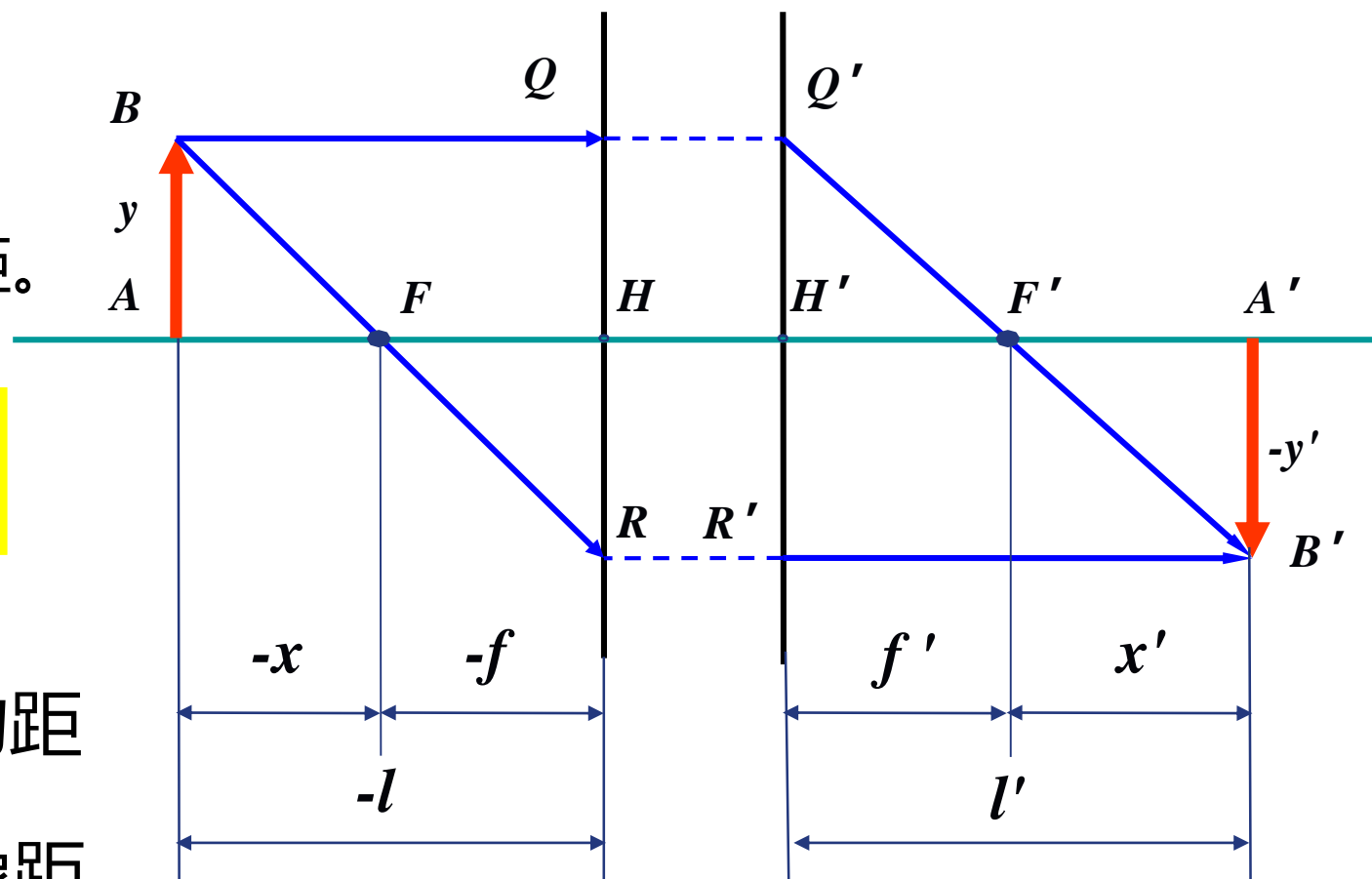
焦物距 x ：以物方焦点为原点的物距。

焦像距 x' ：以像方焦点为原点的像距。

符号确立：从对应原点出发，与光线方向一致为正，否则为负。

物距 l ：物方主点 H 为原点的物距

像距 l' ：像方主点 H' 为原点的像距





4.3 理想光学系统物像关系

二. 牛顿公式

物方：相似三角形 $\triangle BAF$ 和 $\triangle FHR$

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-x}$$

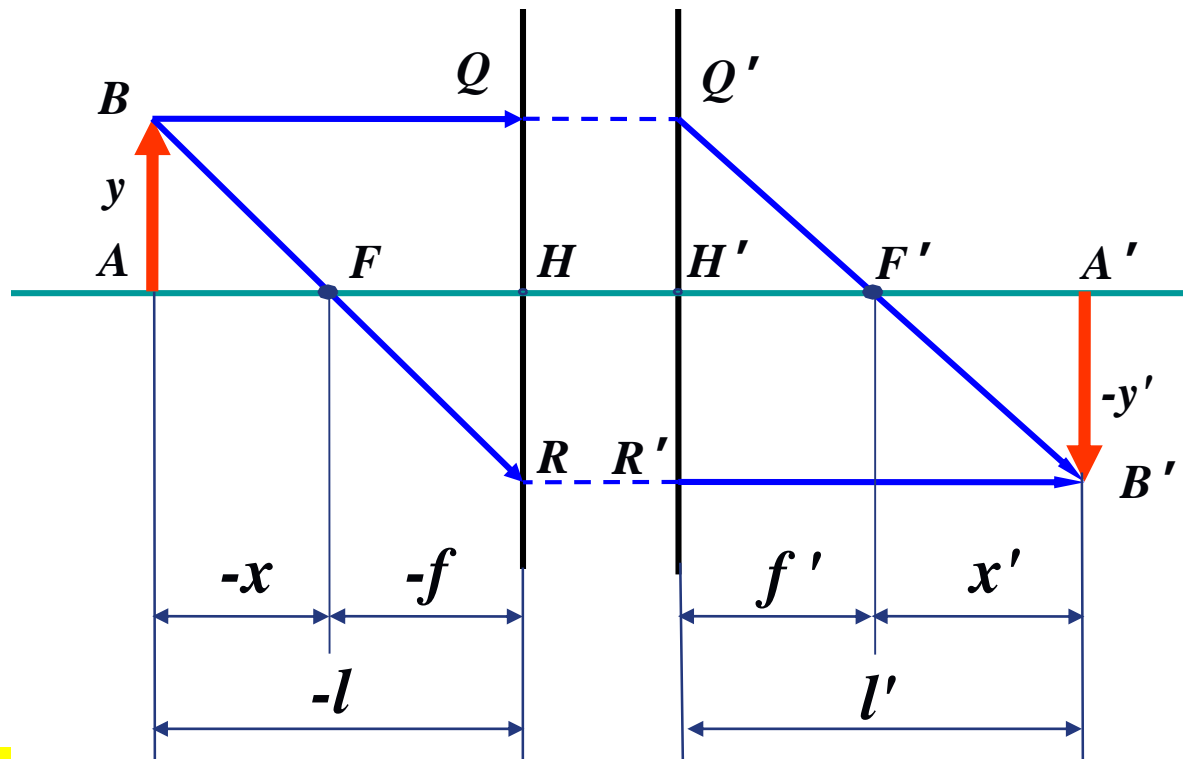
像方：相似三角形 $\triangle Q'H'F'$ 和 $\triangle F'A'B'$

$$\frac{-y'}{y} = \frac{x'}{f'}$$



牛顿公式： $xx' = ff'$

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x}$$



以焦点为原点的物像位置公式。



4.3 理想光学系统物像关系

三. 高斯公式

牛顿公式: $xx' = ff'$

$$\begin{aligned}x &= l - f \\x' &= l' - f'\end{aligned}$$

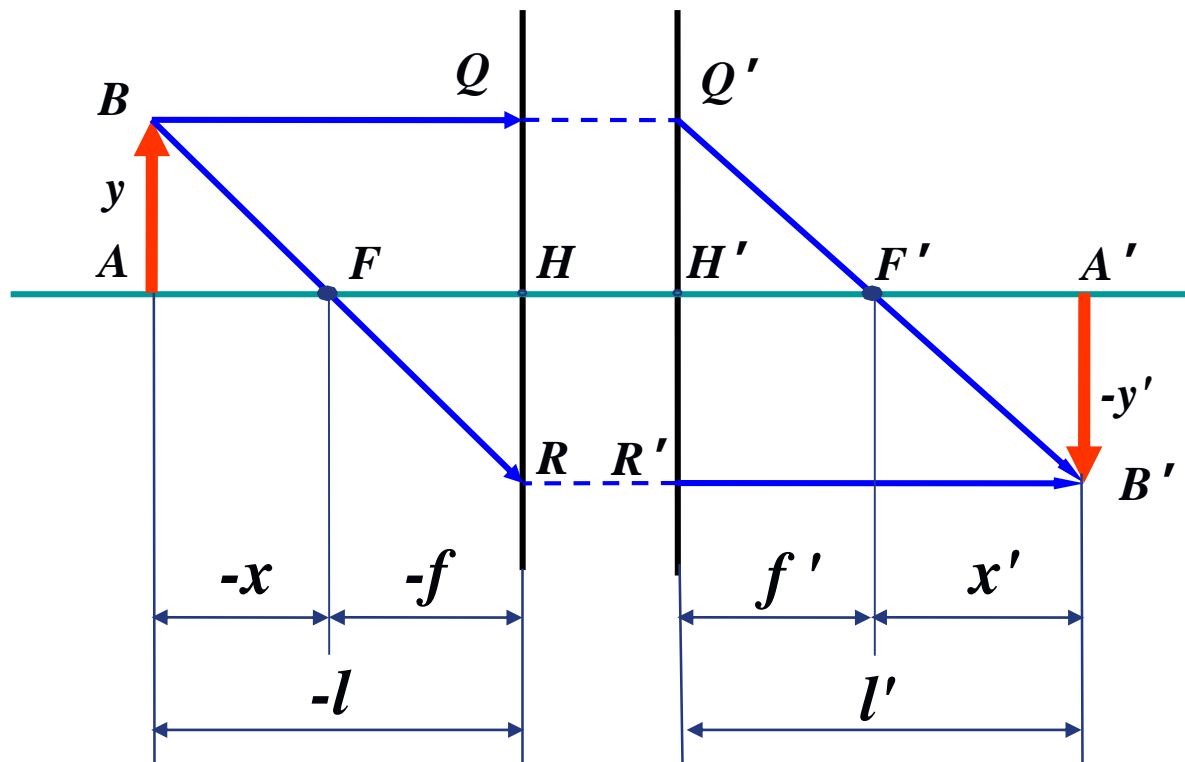


$$lf' + l'f = ll'$$



高斯公式:

$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$$



以主点为原点的物像位置公式。



四. 物方焦距和像方焦距关系

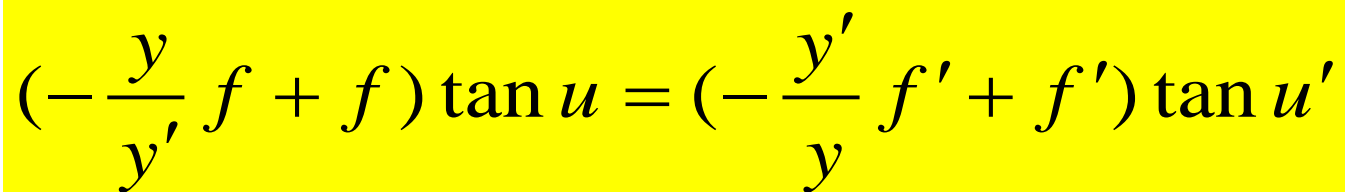
由直角三角形 AMH 和 $A'M'H'$ 得:

$$h = (x + f) \tan u$$

$$= (x' + f') \tan u'$$

$$\frac{-y'}{y} = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f'}$$

$$x = -\frac{y}{y'} f, \quad x' = -\frac{y'}{y} f'$$



$$yf \tan u = -y'f' \tan u'$$





4.3 理想光学系统物像关系

四. 物方焦距和像方焦距关系

近轴区:

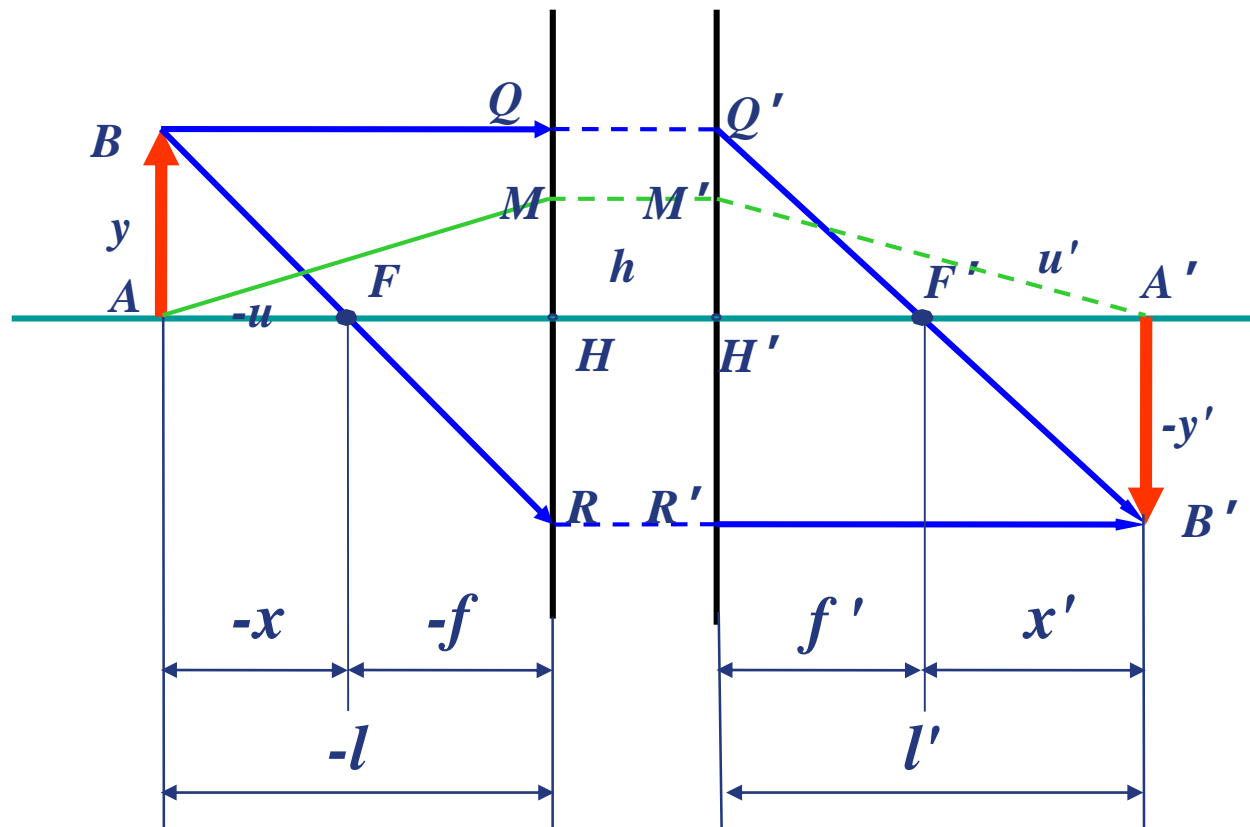
$$\tan u = u, \tan u' = u'$$

$$yfu = -y'f'u'$$

拉赫不变量:

$$nyu = n'y'u'$$

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$$



光学系统的像方焦距与物方焦距之比
等于相应介质折射率之比。



4.3 理想光学系统物像关系

复习

五. 放大率

横向放大率 β

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x}$$

用焦物距、焦像距与焦距的表达

$$x' + f' = \frac{ff'}{x} + f' = \frac{f'}{x}(x + f)$$

用物距、像距与焦距表达

$$\begin{aligned} x &= l - f \\ x' &= l' - f' \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \frac{l'}{l} = \frac{x' + f'}{x + f} = \frac{f'}{x} \quad \begin{aligned} xx' &= ff' \\ &= \frac{x'}{f} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \quad x &= \frac{lf'}{l'} \\ \text{or } x' &= \frac{l'f}{l} \end{aligned}$$

$$\beta = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x} = -\frac{f}{f'} \frac{l'}{l} = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l}$$



4.3 理想光学系统物像关系

五. 放大率

轴向放大率 α

定义：物体沿光轴移动一微小距离，与像点相应移动的位移之比。

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = \frac{dl'}{dl}$$

$$xx' = ff' \quad \rightarrow \quad xdx' + x'dx = 0$$

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = \frac{-x'}{x} = \frac{-x'}{f'} \cdot \frac{f}{x} \cdot \frac{f'}{f} = -\beta^2 \frac{f'}{f} = \frac{n'}{n} \beta^2$$

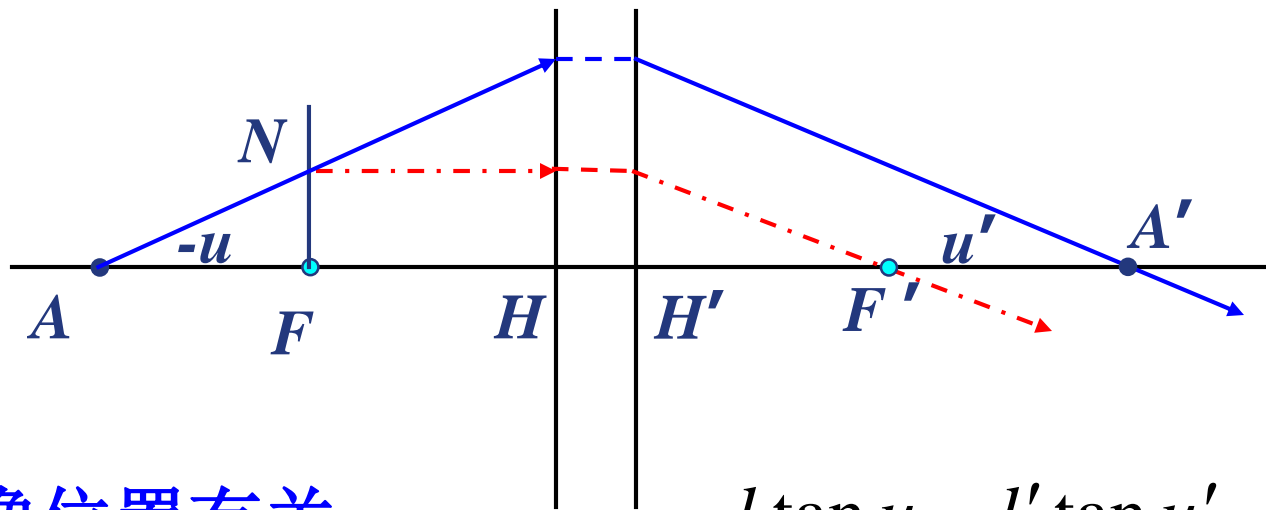
- 1) 与 共轴球面系统放大一致。
- 2) 立方体不再是立方体，失真。



4.3 理想光学系统物像关系

五. 放大率

角向放大率 γ



$$\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{l}{l'} \quad \text{与物像位置有关}$$

$$l \tan u = l' \tan u'$$

$$y f \tan u = -y' f' \tan u'$$

$$\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = -\frac{y f}{y' f'} = -\frac{f}{f'} \frac{1}{\beta} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$$



4.3 理想光学系统物像关系

五. 放大率

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x} \quad \beta = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l}$$

$$\gamma = -\frac{f}{f'} \frac{1}{\beta} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} \quad \alpha = \frac{n'}{n} \beta^2$$

$$\alpha \cdot \gamma = \beta$$

理想光学系统的性质可在实际系统的近轴区得到实现。



4.3 理想光学系统物像关系

五. 放大率

绝大多数光学系统是在同一介质，一般是空气中使用，因此：

当 $n = n'$ 时，有： $-f = f'$

牛顿公式： $x \cdot x' = -f'^2$

高斯公式： $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$

放大率： $\beta = \frac{l'}{l} \quad \alpha = \frac{n'}{n} \beta^2 = \beta^2$

$$\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta}$$

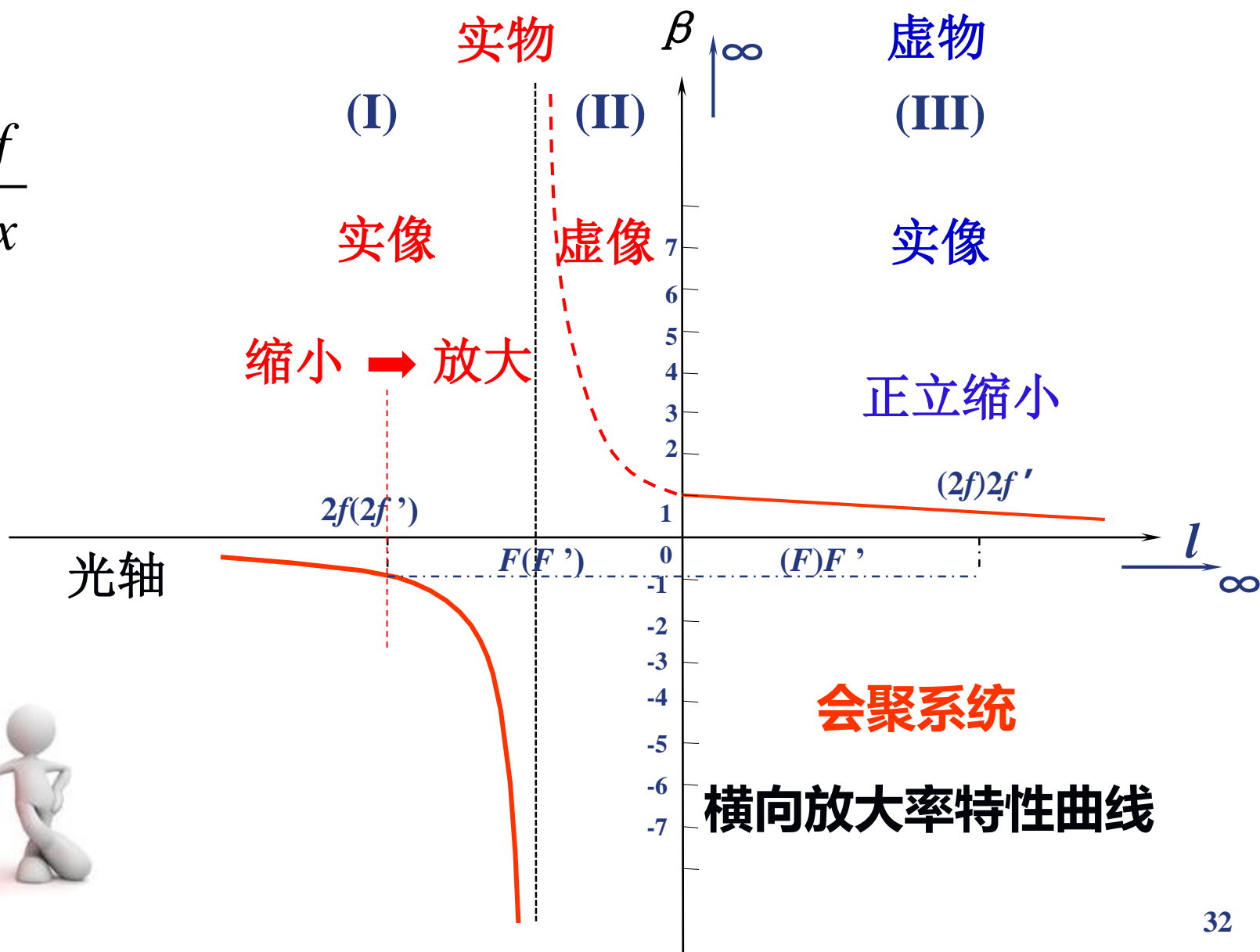


4.3 理想光学系统物像关系

五. 放大率

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x}$$

区域	物像关系
区域I	实物成倒立实像
区域II	缩小像
区域III	虚物成正立缩小实像



发散系统





4.3 理想光学系统物像关系

六. 节点

基点上的放大率

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x} \quad \beta = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l}$$

$$\gamma = -\frac{f}{f'} \frac{1}{\beta} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} \quad \alpha = \frac{n'}{n} \beta^2$$

- 物方焦面 $x = 0, x' = \pm\infty$, $\beta_F = \pm\infty, \alpha_F = \infty, \gamma_F = 0$

- 像方焦面 $x' = 0, x = \pm\infty$, $\beta_F = 0, \alpha_F = 0, \gamma_F = \pm\infty$

- 主平面 $x_H = -f, x'_H = -f'$, $\beta_H = 1, \alpha_H = \frac{n'}{n}, \gamma_H = \frac{n}{n'}$



$$n = n'$$

如果光学系统位于空气中，**角放大率为1**表示通过物方主点的光线，其共轭光线必从像方主点以相同的方向射出。



4.3 理想光学系统物像关系

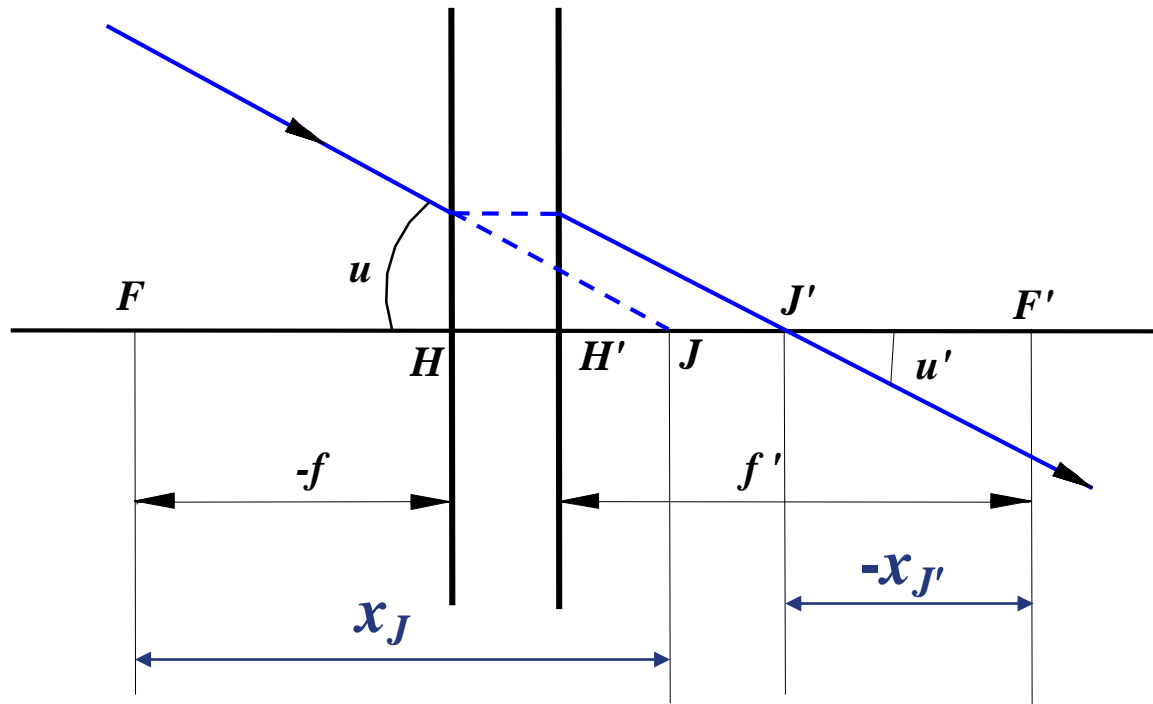
六. 节点

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x} = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l}$$

$$\gamma = -\frac{f}{f'} \frac{1}{\beta} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$$

节点nodal point: 角放大率 $\gamma = +1$ 的一对共轭点。

即: $\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = 1, \quad u' = u \quad \rightarrow \quad \beta = -\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}$



$$x = f',$$

$$x' = f$$

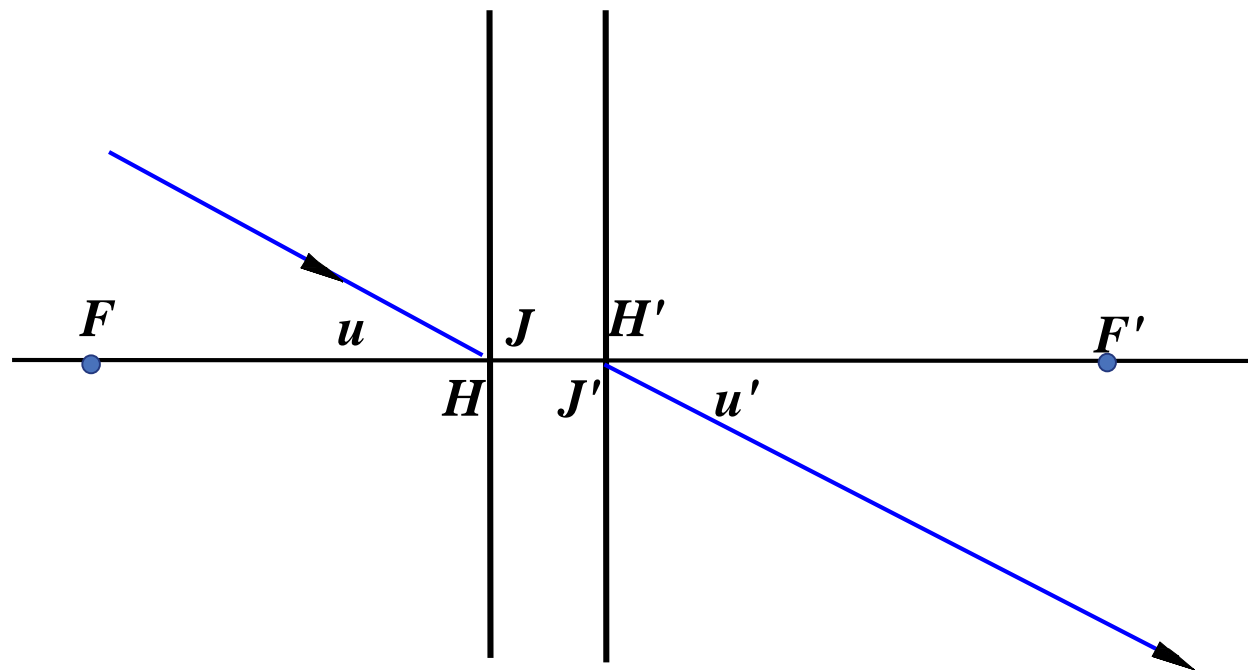


4.3 理想光学系统物像关系

六. 节点

性质:

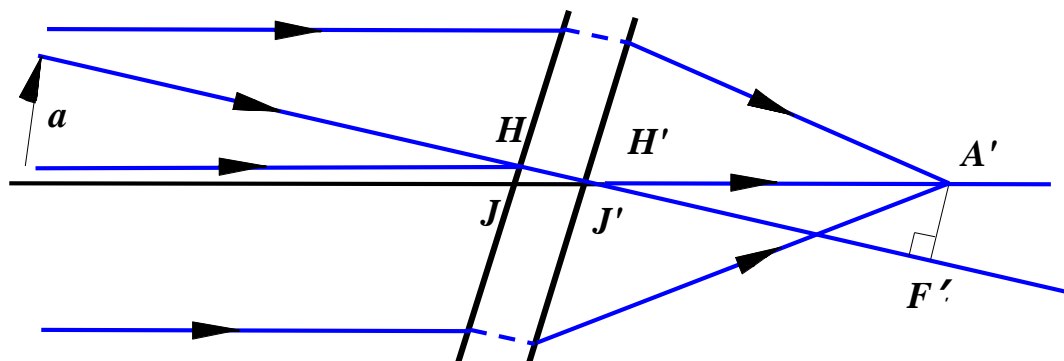
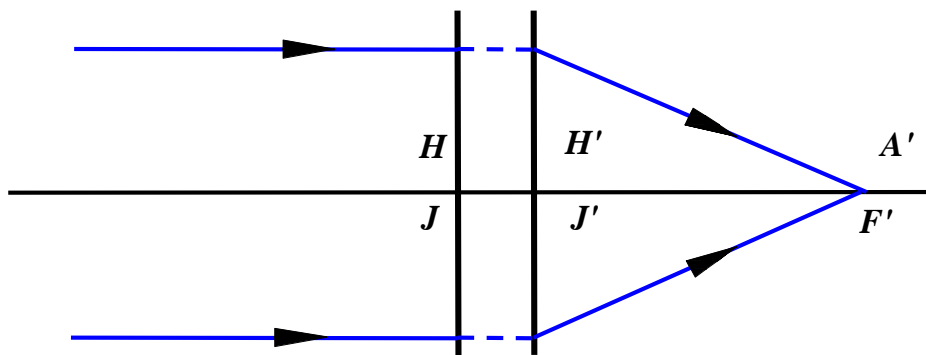
- 通过物方节点 J 的入射光线, 经光组后其出射光线必经过像方节点 J' , 且方向不变。
- 同一介质中, 节点与主点重合



4.3 理想光学系统物像关系

六. 节点

作用：利用节点性质测量系统的主点位置, 全景摄像机等。



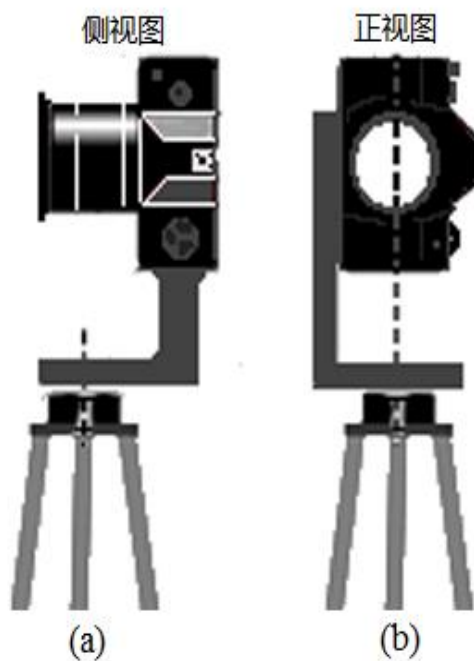
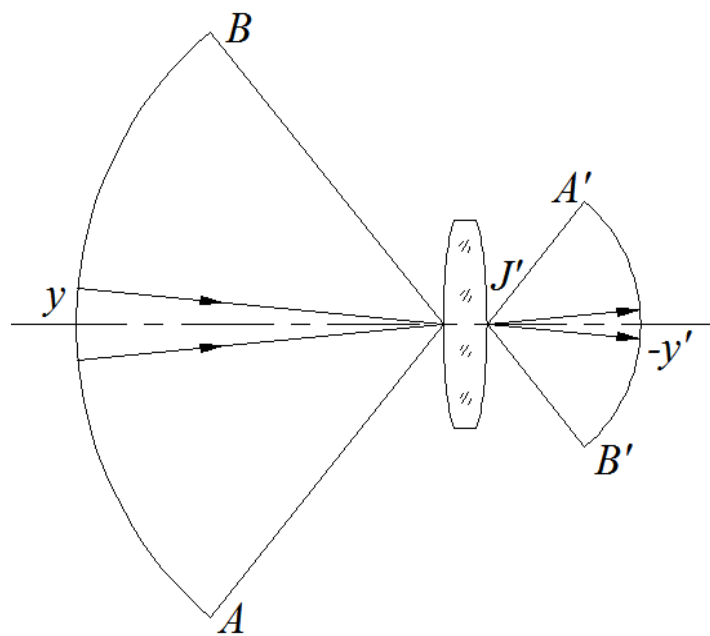
- 当光组绕通过像方节点 J' 的轴线摆动一个角度时, 像点位置不变。
- 测量方法：一边摆动光学系统, 同时连续改变转轴位置, 并观察像点, 当像点不动时, **转轴的位置便是像方节点的位置。**



4.3 理想光学系统物像关系

六. 节点

节点的一个重要应用就是全景照相机的全景摄像。





4.3 理想光学系统物像关系

练习：求单球面系统节点

由公式 $\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{l}{l'}$ 可知：

$$\gamma = \frac{l}{l'} = 1 \Rightarrow l = l'$$

物像关系 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$ 得： $l' = l = r$

结论：单个折射球面得一对节点（ J 、 J' ）均位于球心 C ，不与主点重合。

同样证明：单个反射球面的一对节点（ J 、 J' ）也均位于球心 C 。

由于单个折（反）射球面在近轴区可以看成是理想光组，因此它的成像特性可以应用理想光组中的所有公式。



4.3 理想光学系统物像关系

七. 光焦度

焦距关系: $\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$ \rightarrow $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$

高斯公式: $\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$

$$V' - V = \Phi$$

光线会聚度 (convergence)

$$V = \frac{n}{l}; \quad V' = \frac{n'}{l'}$$

光焦度 (focal power)

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

- 光焦度是光学系统对光束会聚或者发散能力大小的标志，光焦度为正对光束起会聚作用，反之起发散作用。
- 共轭点成像光线的会聚度之差等于光学系统的光焦度。



4.3 理想光学系统物像关系

七. 光焦度

空气中:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}$$

1. $\Phi > 0, (f' > 0)$, 会聚光组, Φ 愈大, 会聚本领愈大;
2. $\Phi < 0, (f' < 0)$, 发散光组, Φ 绝对值愈大, 发散本领愈大
3. 平行平板, f' 为 $+\infty$, $\Phi = 0$, 对光束不起会聚或发散作用。



4.3 理想光学系统物像关系

七. 光焦度

光焦度的单位：屈光度D (Diopter)，或者折光度

定义为空气中焦距为1m 的光学系统的光焦度 m^{-1} 。

例： $f' = 2\text{米}$ ， $\Phi = 1/f' = 0.5\text{D}$

$f' = -200\text{mm}$ ， $\Phi = 1/f' = -5\text{D}$



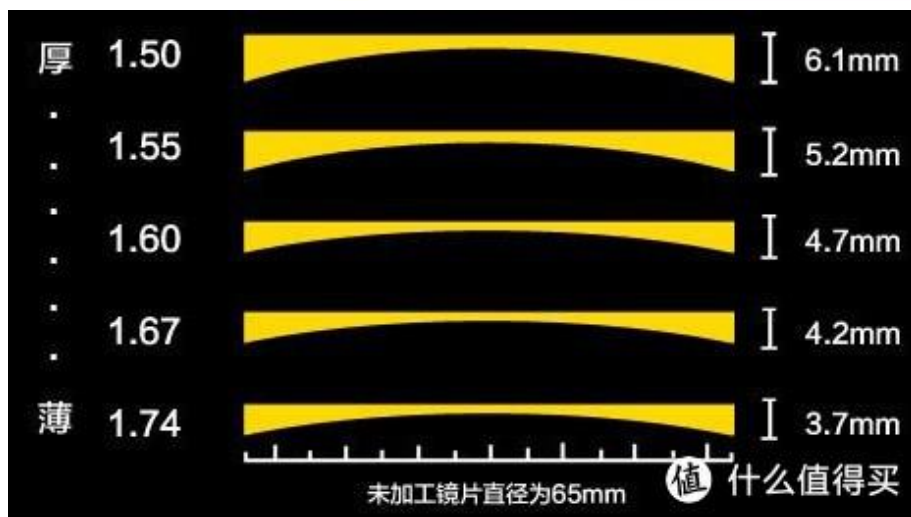
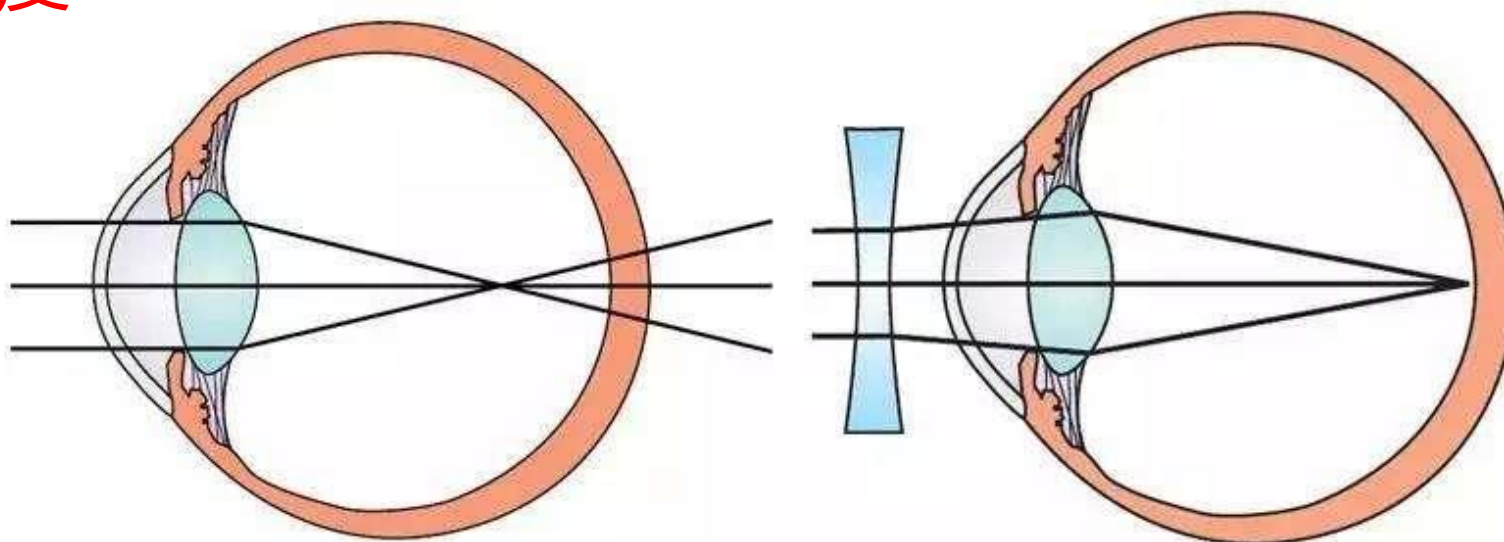
眼镜的度数 = 屈光度数 $\times 100$ 。

200度的近视镜，光焦度为 -2D ，其焦距为 $f' = -500\text{mm}$ 。



4.3 理想光学系统物像关系

七. 光焦度



200度以下的选择1.50
200~400度选择1.50或1.56
400~600度选择1.60
600~800度选择1.67
800度以上选择1.74



实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



第四章 理想光学系统

复习总结

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为**理想光学系统**。

基本概念：焦点、焦平面、**主点、主平面**、节点、节平面
焦距、**焦物距、焦像距**，物距，像距

牛顿公式：

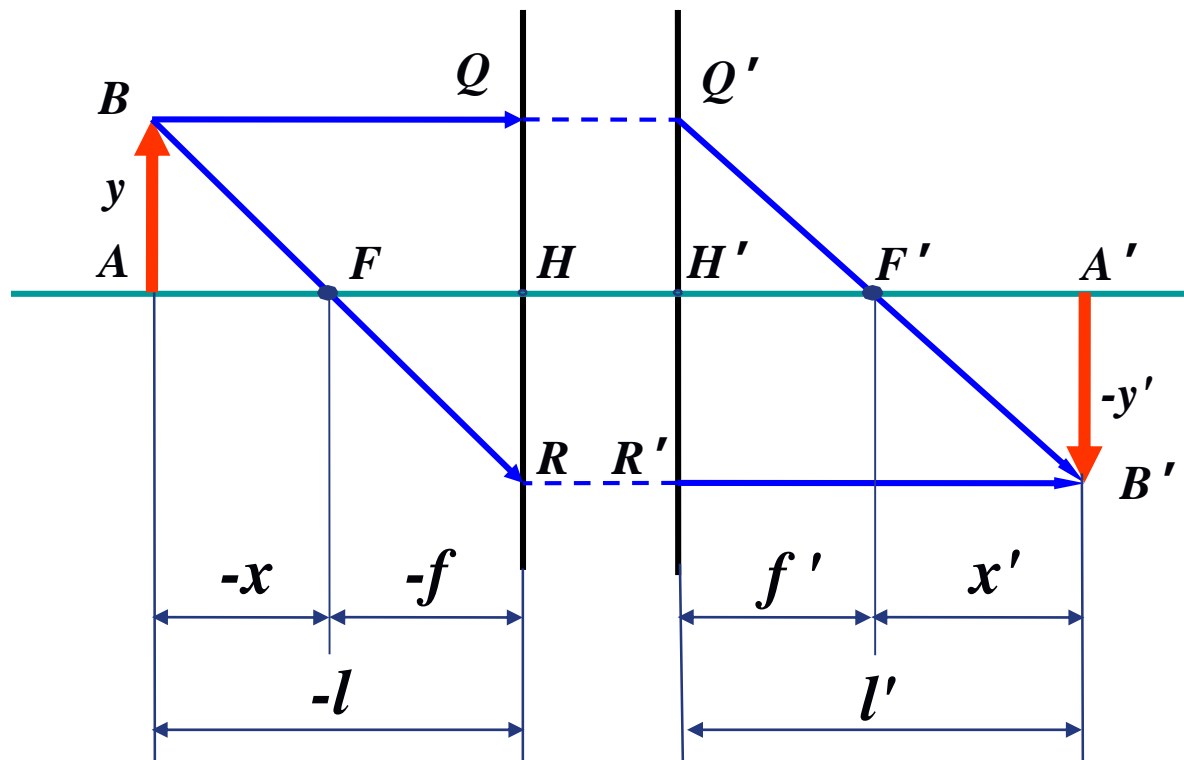
$$xx' = ff'$$

高斯公式：

$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$$

像物方焦距：

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$$





理想光学系统物像关系

复习

	理想光学系统				共轴球面系统 近轴区
	牛顿公式（焦点为原点）		高斯公式（主点为原点）		
焦距关系	$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$				$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$
	$n \neq n'$	$n = n'$	$n \neq n'$	$n = n'$	
物像关系式	$xx' = ff'$	$x \cdot x' = -f'^2$	$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$	$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$	$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$
横向放大率	$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x}$	$\beta = -\frac{x'}{f'} = \frac{f'}{x}$	$\beta = -\frac{f}{f'} \frac{l'}{l} = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l}$	$\beta = \frac{l'}{l}$	$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l}$
轴向放大率	$\alpha = \frac{dx'}{dx} = \frac{-x'}{x}$ $= -\frac{f'}{f} \beta^2 = \frac{n'}{n} \beta^2$	$\alpha = \beta^2$	$\alpha = \frac{dl'}{dl} = -\frac{f}{f'} \frac{l'^2}{l^2}$ $= \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{n'}{n} \beta^2$	$\alpha = \frac{l'^2}{l^2} = \beta^2$	$\alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{n'}{n} \beta^2$
角放大率	$\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$ $= \frac{x}{f'} = \frac{f}{x'}$	$\gamma = \frac{1}{\beta} = \frac{x}{f'} = \frac{-f'}{x'}$	$\gamma = -\frac{f}{f'} \frac{1}{\beta} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$	$\gamma = \frac{1}{\beta} = \frac{l}{l'}$	$\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{l}{l'}$
拉赫不变量	$yf \tan u = -y'f' \tan u' \qquad yn \tan u = y'n' \tan u'$				$nyu = n'y'u'$



4.4 理想光学系统的作图方法

一. 图解方法

原则
与
性质

P51

- 平行于光轴入射的光线，经系统后过像方焦点
- 过物方焦点的光线经系统后平行于光轴；
- 倾斜于光轴入射的平行光束过系统后会聚于像方焦面；
- 自物方焦面上一点发出的光束经系统后相互平行；
- 光线与物方、像方主面的交点，其高度相等；
- 过节点的光线相互平行，方向不变；
- 任意一对已知的共轭点或共轭光线都可以利用。

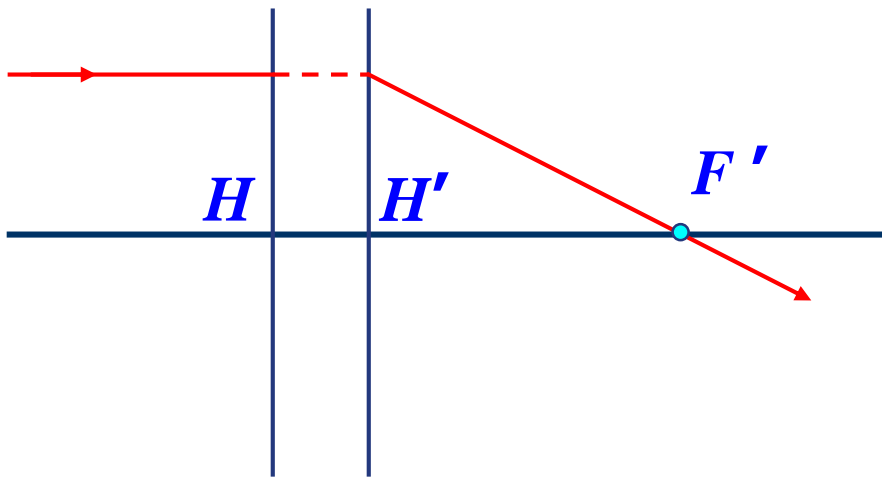
- 一对节点、一对主点和一对焦点，统称光学系统的基点，它们的位置确定光学系统的成像性质。



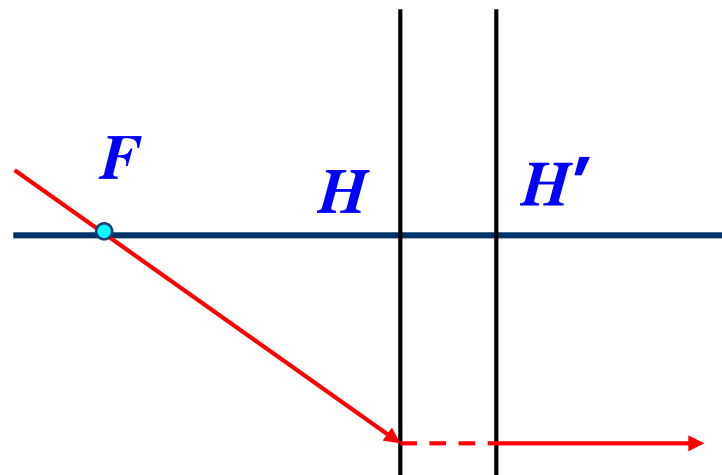
4.4 理想光学系统的作图方法

一. 图解方法

(1) 平行于光轴入射的光线，经系统后过像方焦点。



(2) 过物方焦点的光线，经系统后平行于光轴。

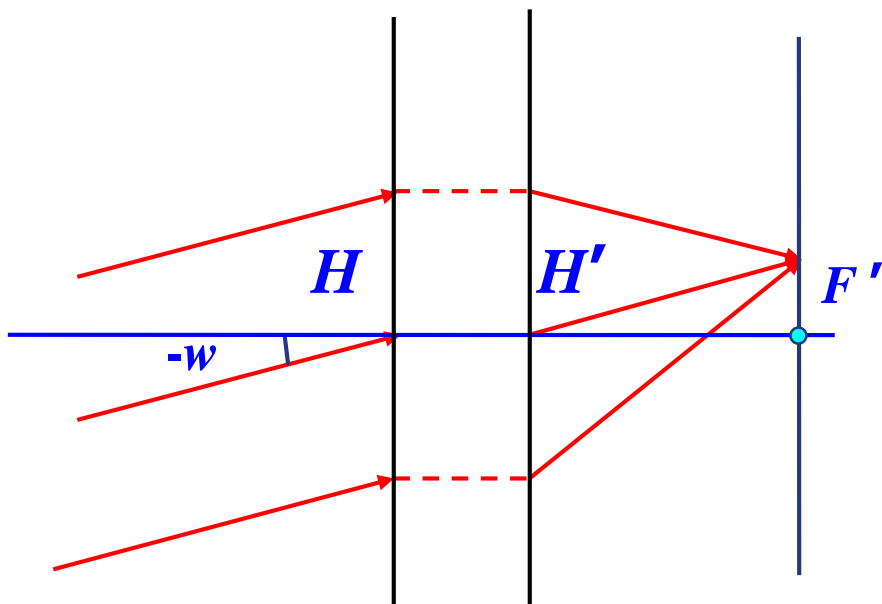




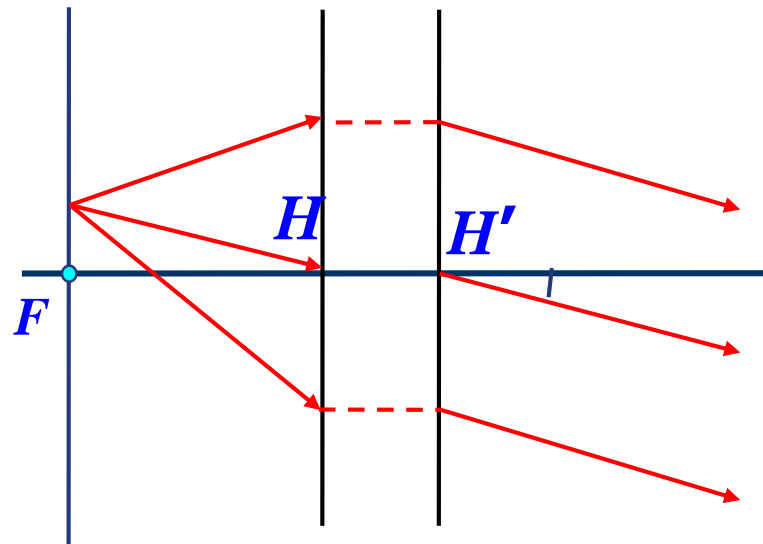
4.4 理想光学系统的作图方法

一. 图解方法

(3) 倾斜于光轴的平行光束经系统后会聚于像方焦平面上某一点。



(4) 自物方焦面上一点发出的光束经系统后相互平行。



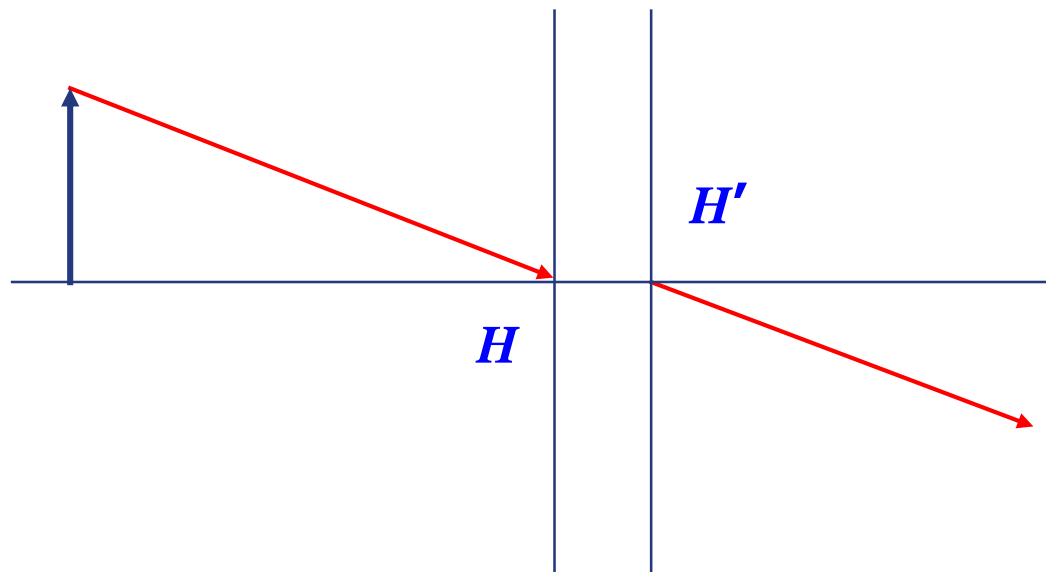
(5) 光线与物方、像方主面的交点，其高度相等；



4.4 理想光学系统的作图方法

一. 图解方法

(6) 过节点的光线相互平行，方向不变；



(7) 任意一对已知的共轭点或共轭光线都可以利用。



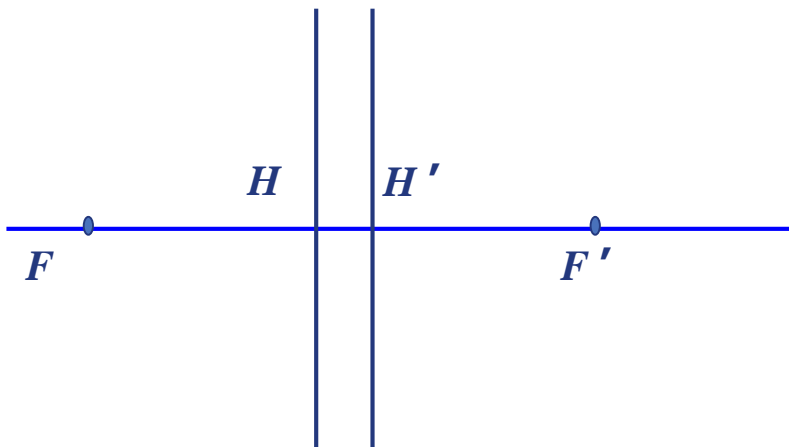
4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

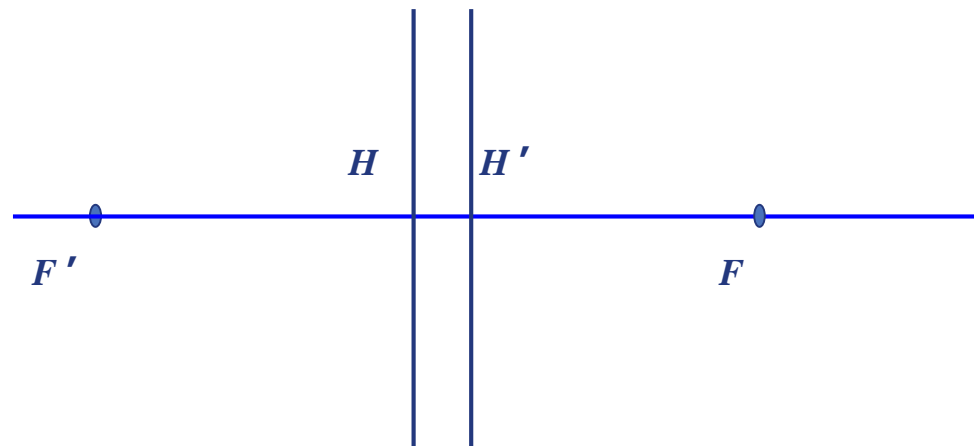
※ 若 $f' > 0$ ，为正光组（会聚光组）

若 $f' < 0$ ，为负光组（发散光组）

正
光
组



负
光
组



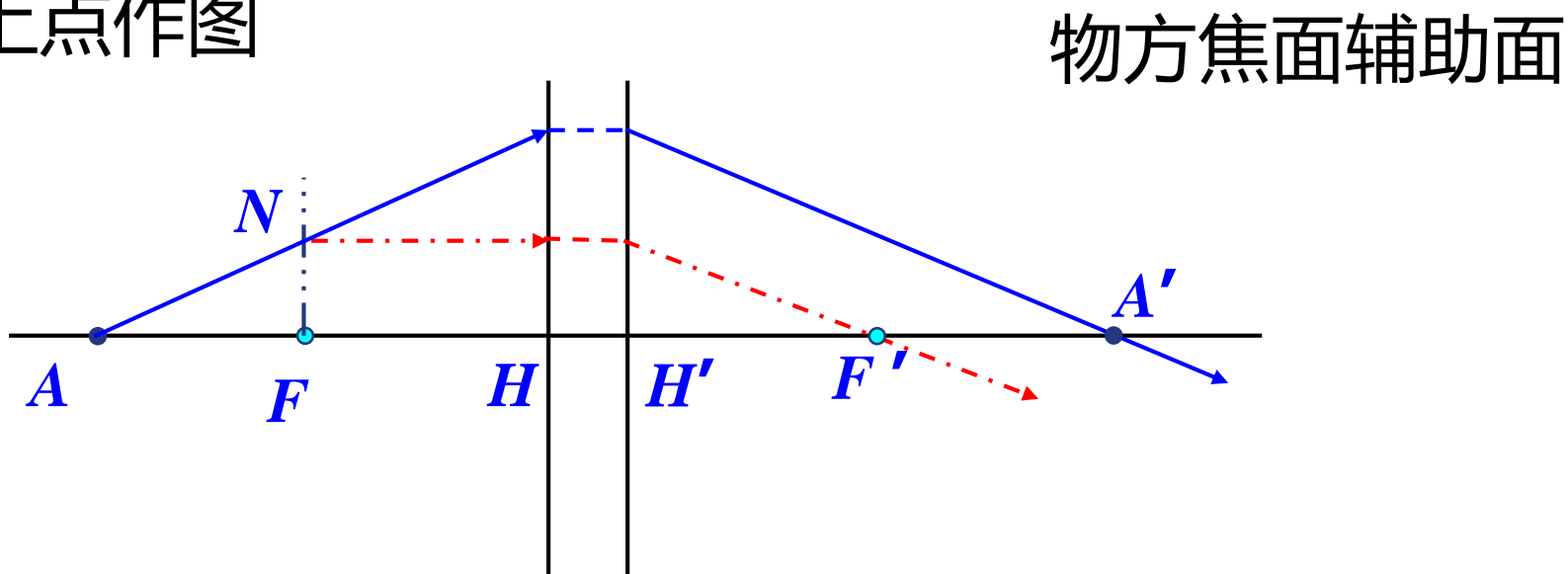
记住喽，做题时先判断光组的正负！



4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

1. 正光组轴上点作图

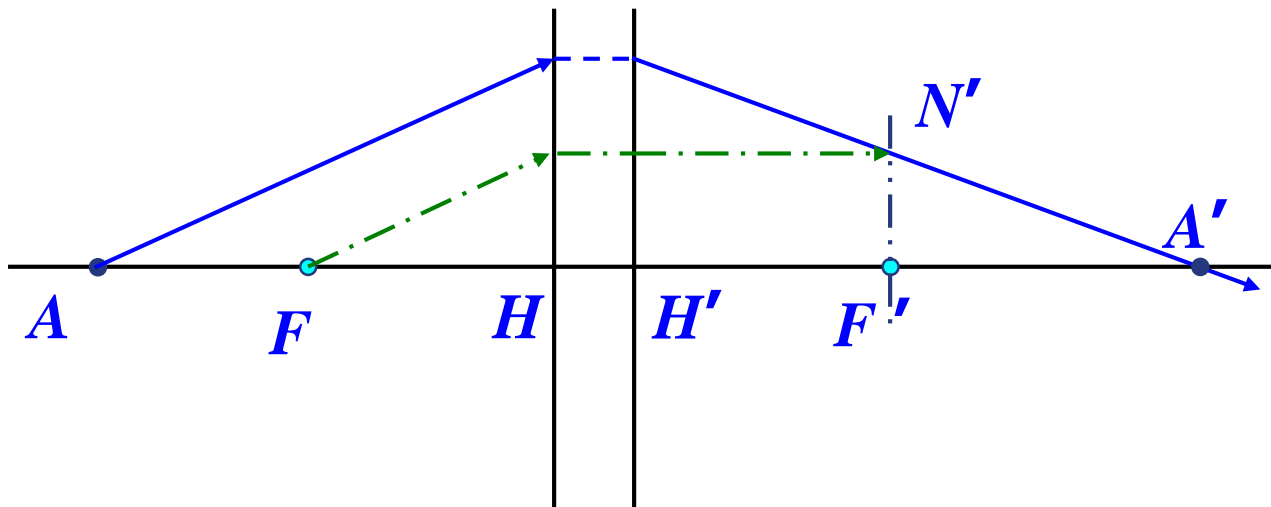


方法1: 过 F 作物方焦平面，与 A 点发出的光线交于 N ，以 N 为辅助物，从 N 点作平行与光轴的直线，经过光组后交于像方焦点 F' ，则 AN 光线过光组后与辅助光线平行，与光轴的交点既是 A' 。



1. 正光组轴上点作图

像方焦面辅助面



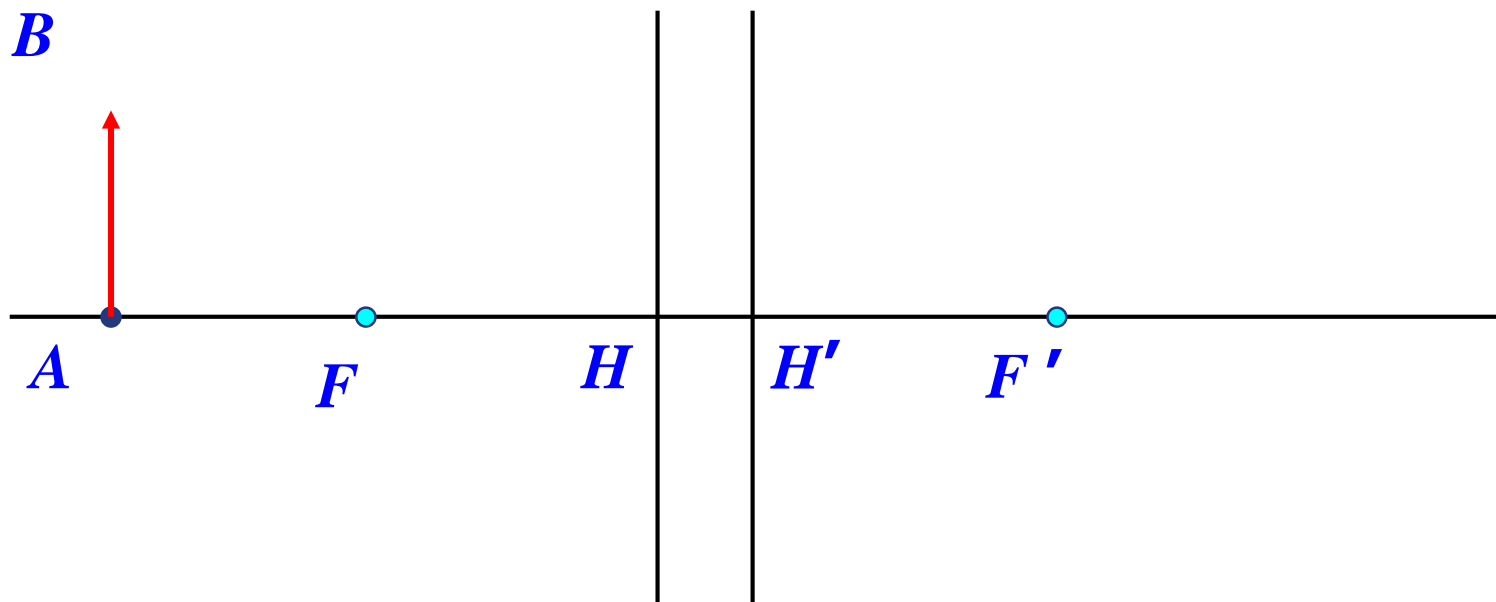
方法2: 过 F 作辅助线, 过光组后与光轴平行, 交像方焦平面于 N' , 则 A 点射出的与辅助光线平行的光线过光组后过 N' 点, 与光轴交点即是 A' 。



4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

1. 正光组轴上点作图



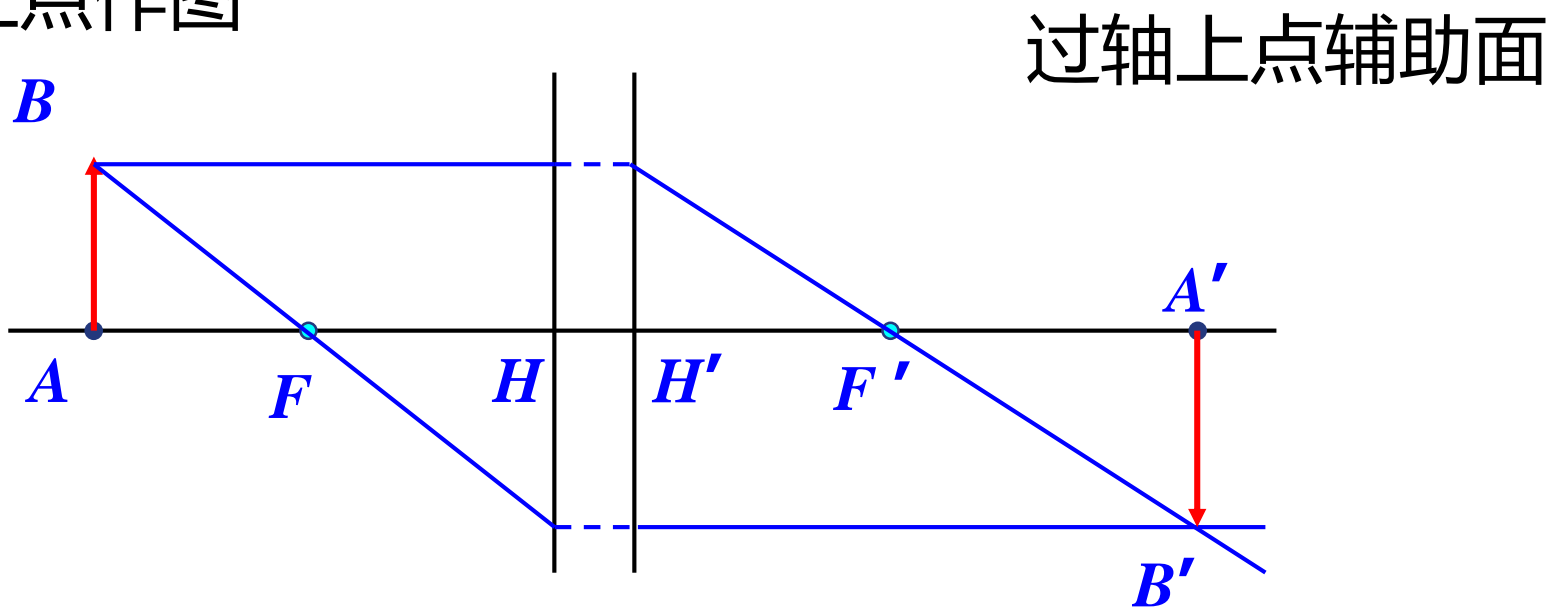
方法 3： 过A作垂直于光轴的辅助物AB按照前面的方法求出B'，由B'作光轴的垂线，则交点A'就是A的像。



4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

1. 正光组轴上点作图



方法 3： 过A作垂直于光轴的辅助物AB按照前面的方法求出B'，由B'作光轴的垂线，则交点A'就是A的像。

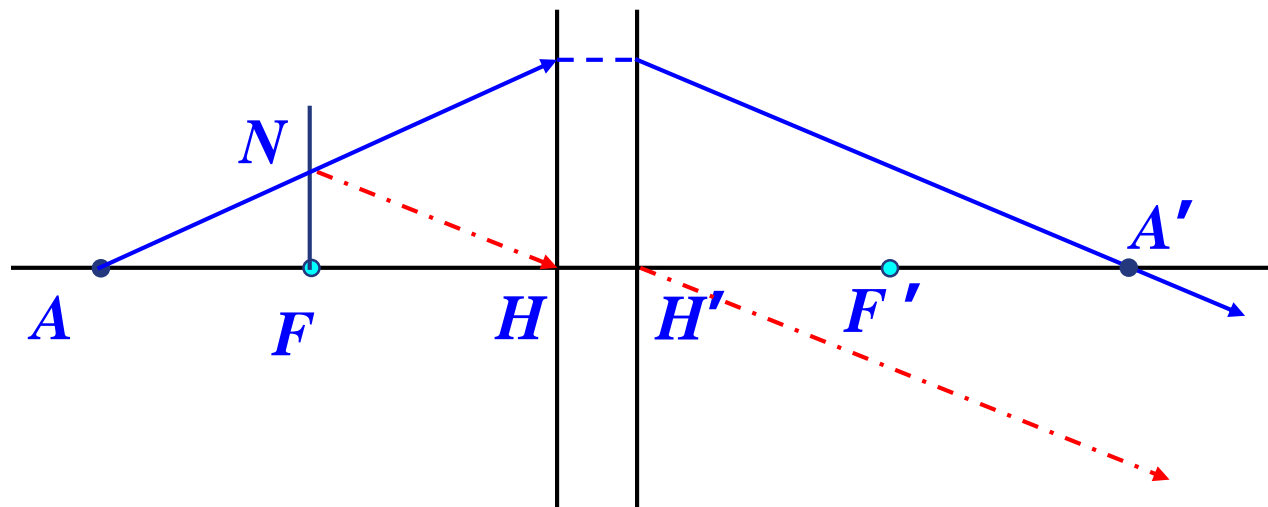


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

1. 正光组轴上点作图

节点性质



方法4： 利用过主点光线方向不变，作过主点的辅助光线。利用像方焦平面上发出的光线过光组后平行射出的性质。然后作平行辅助光线的出射光线。

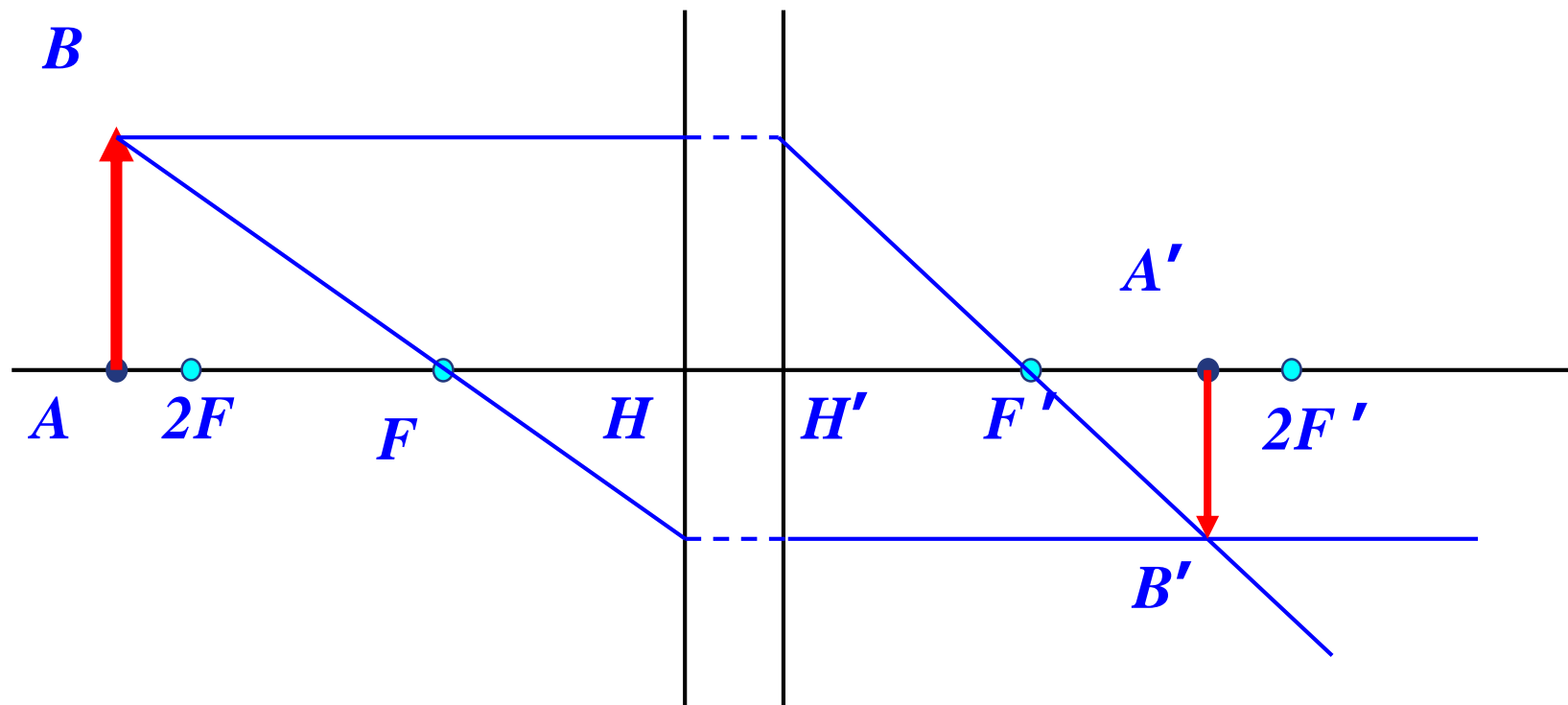


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

2. 正光组，实物成像

1) 物在二倍焦距外



倒立缩小实像；像在一倍焦距外二倍焦距内，物、像在两侧。

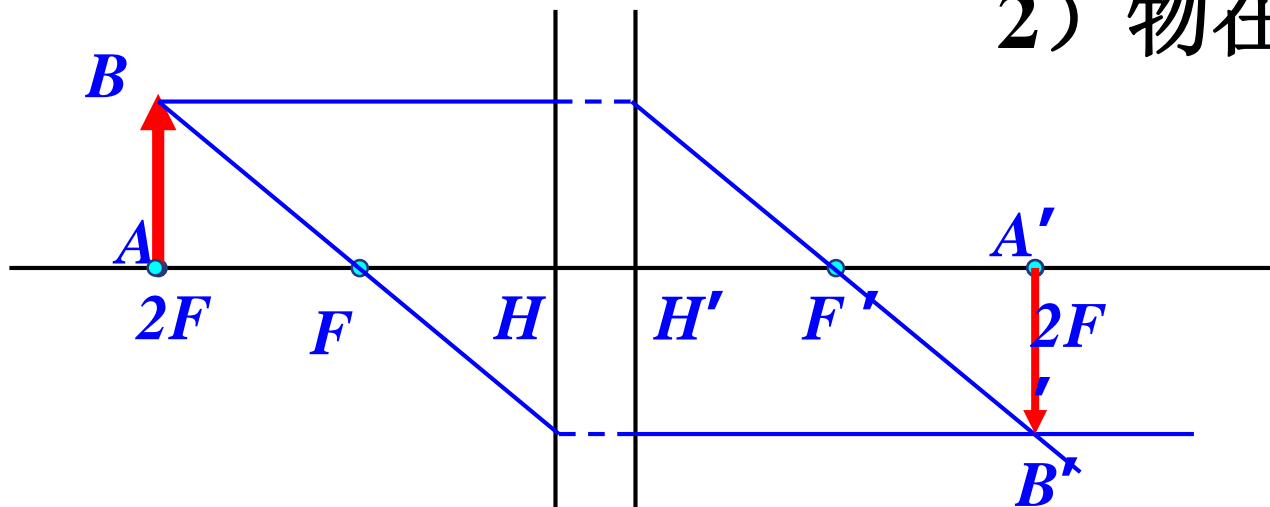


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

2. 正光组，实物成像

2) 物在二倍焦距上



实物成**等大倒立实像**，位于**二倍像方焦点**上，分立**两侧**。

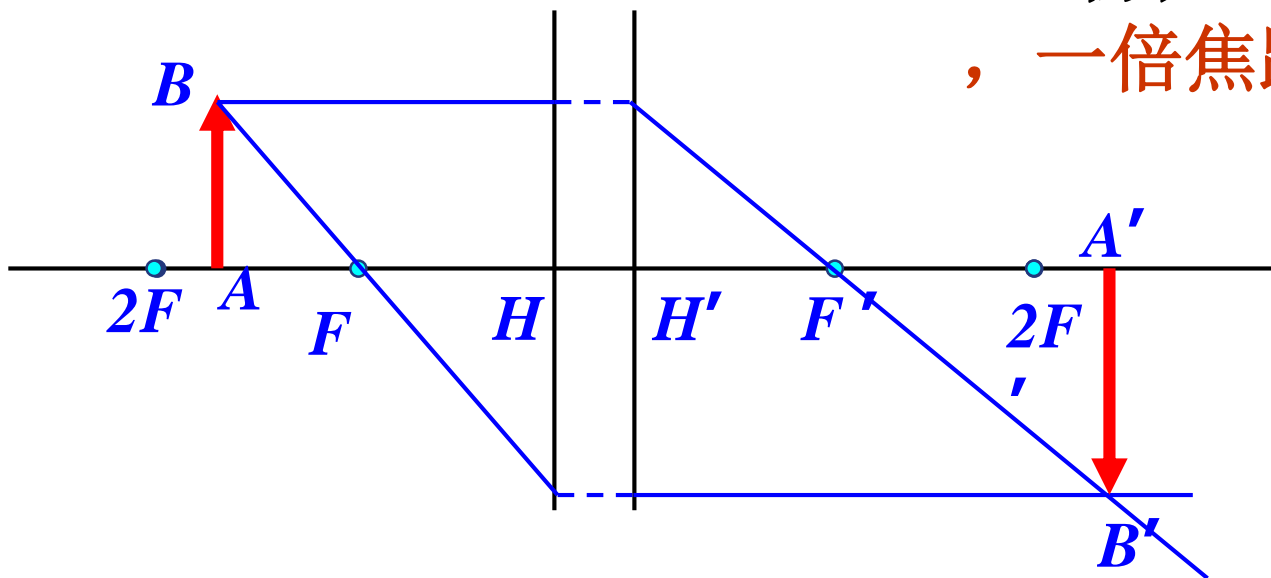


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

2. 正光组，实物成像

3) 物在二倍焦距之内，
一倍焦距之外



❖ 成放大倒立实像，像在二倍焦距外两侧

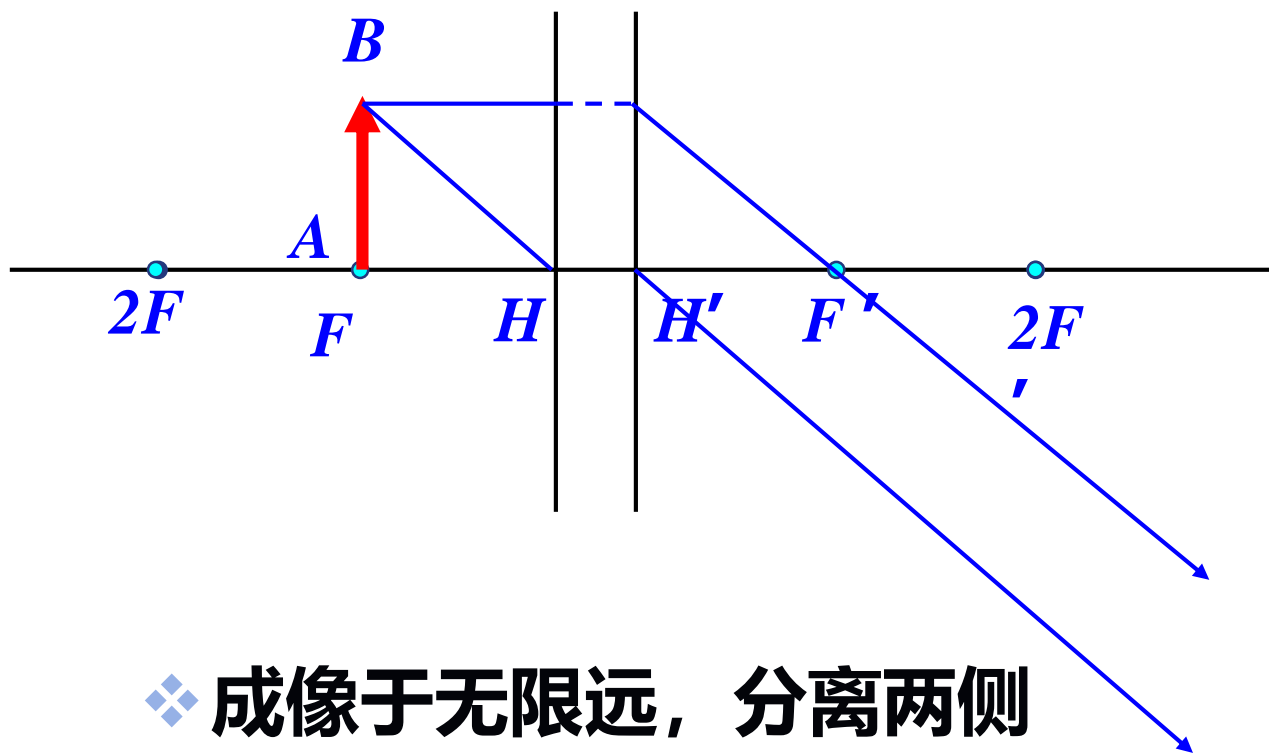


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

2. 正光组，实物成像

4) 物在焦平面上



❖ 成像于无限远，分离两侧

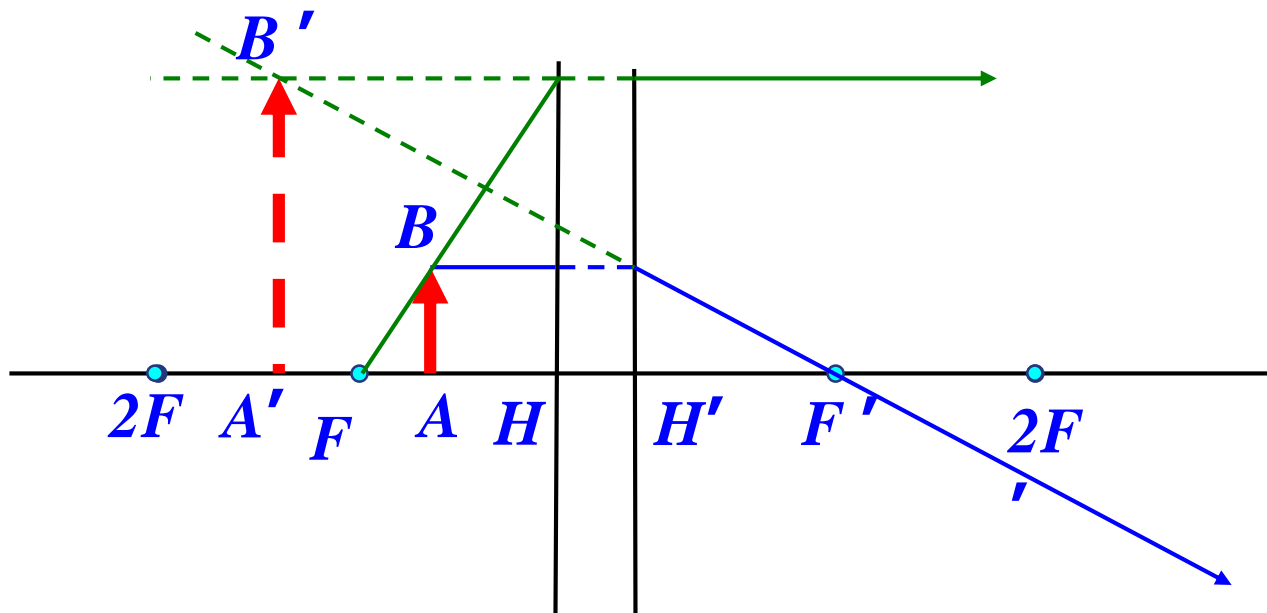


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

2. 正光组，实物成像

5) 物在一倍焦距内



实物成放大正立虚像，同侧

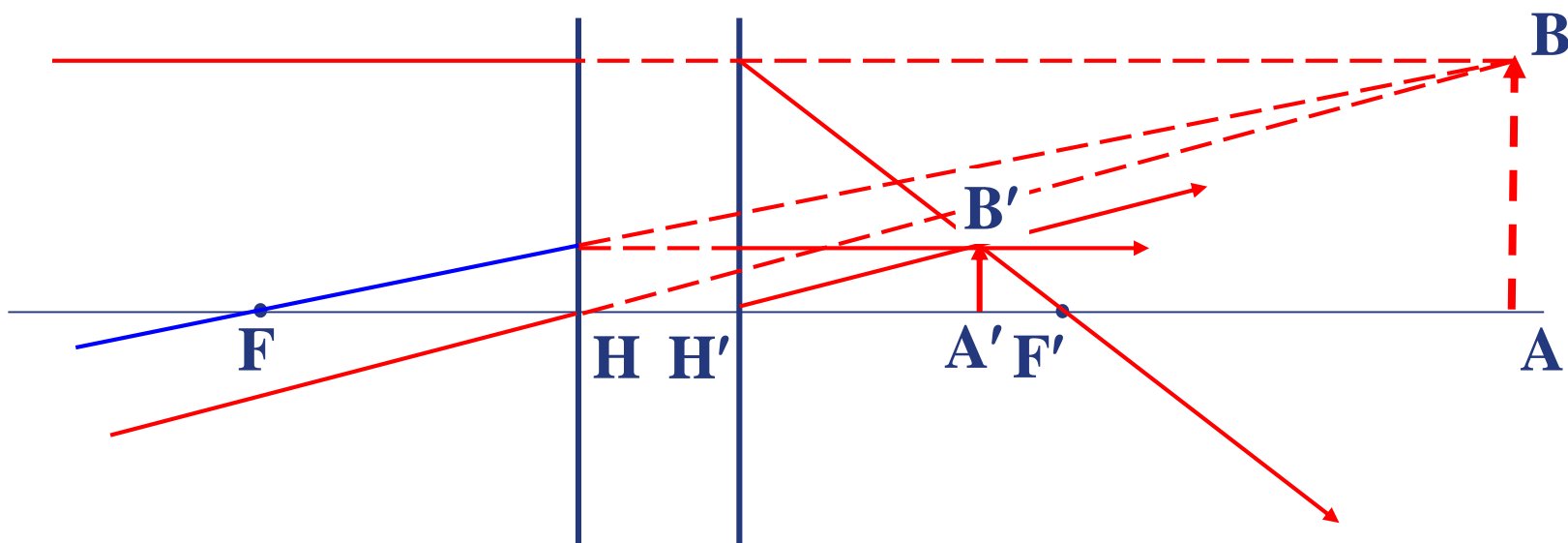


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

3. 正光组，虚物成像

- ❖ 虚物是由入射同心光束向前的延长线的交点形成，而非实际存在的物体，一般是由前一个系统的实像被当前系统所截得到。这里光线并非由虚物实际发出的！





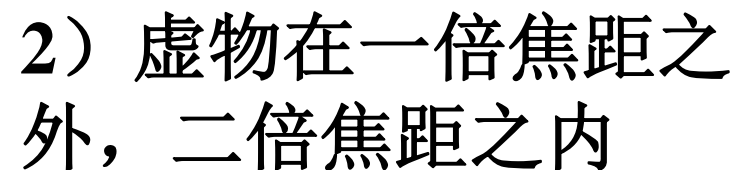
3. 正光组, 虚物成像

1) 虚物在一倍焦距内





3. 正光组，虚物成像

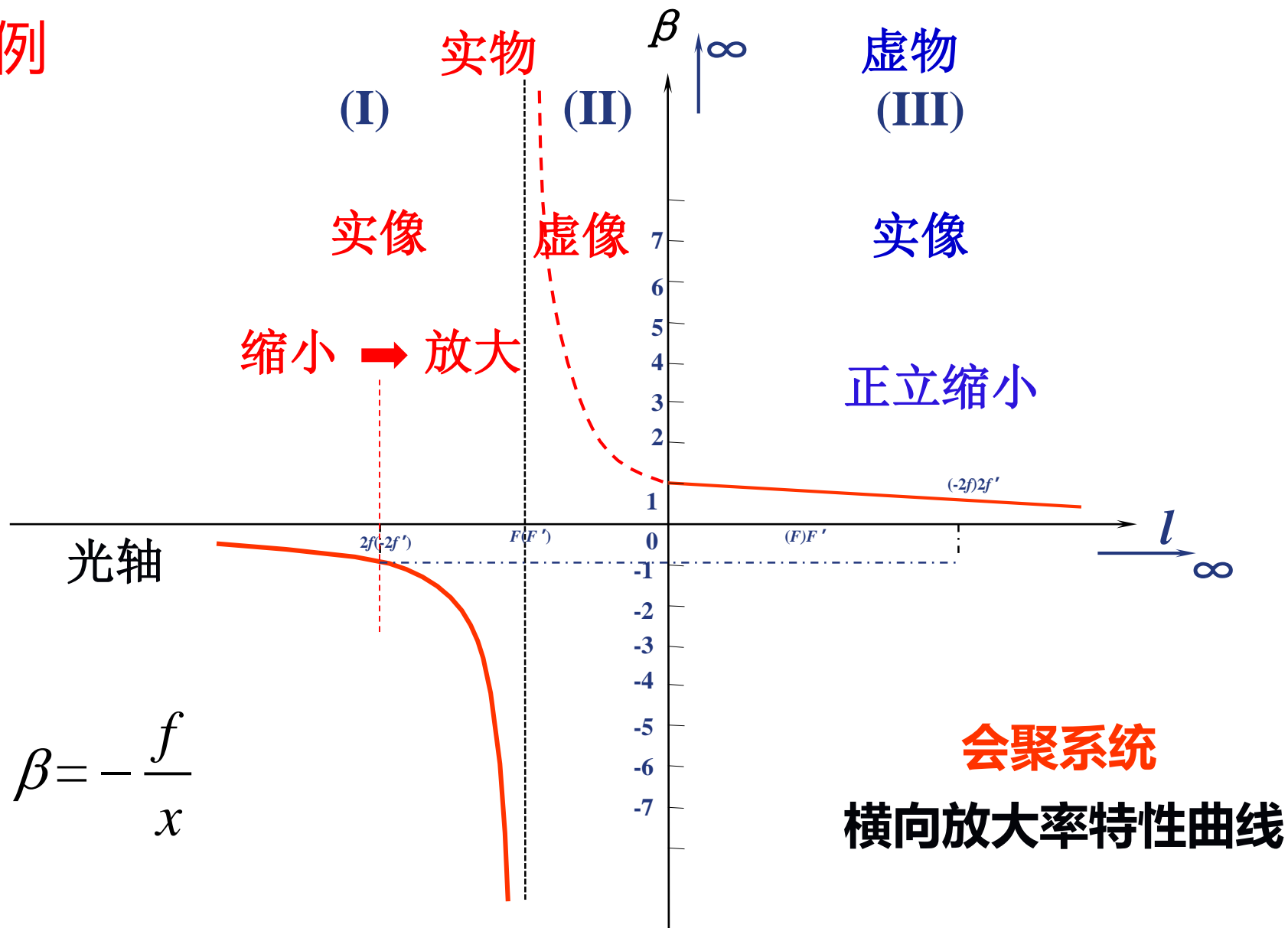


缩小正立实像（一倍焦距之内），物像同侧



4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例





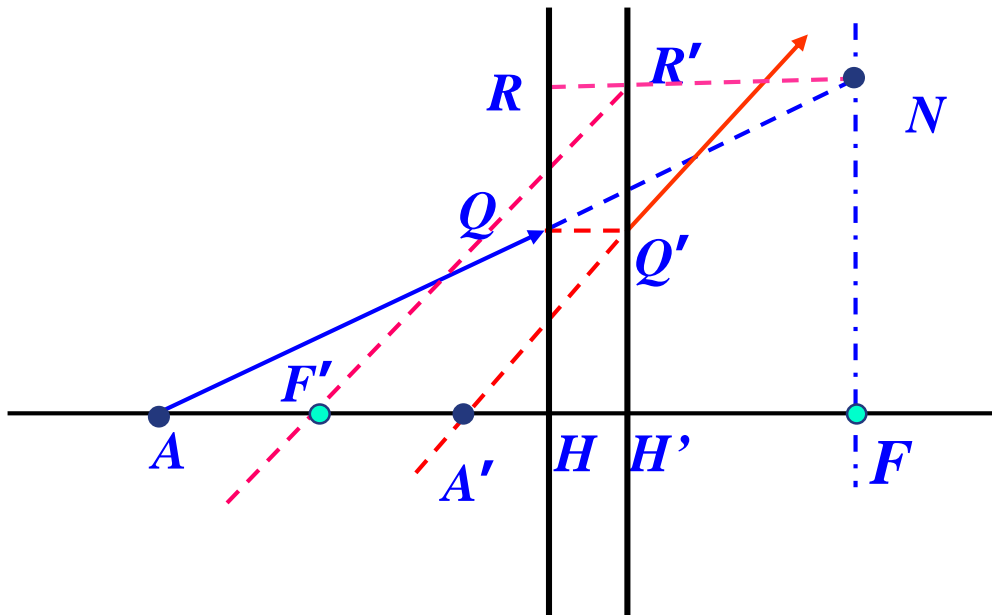
4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

4. 负光组，轴上点成像

方法1:

- 作AQ并延长与辅助面交于N;
- 作NR和RR'（主面上投射高度相等）;
- 连接R'F'，并作QQ';
- $Q'A' // R'F'$ (物方焦平面一点发出的光线过光组后平行射出)





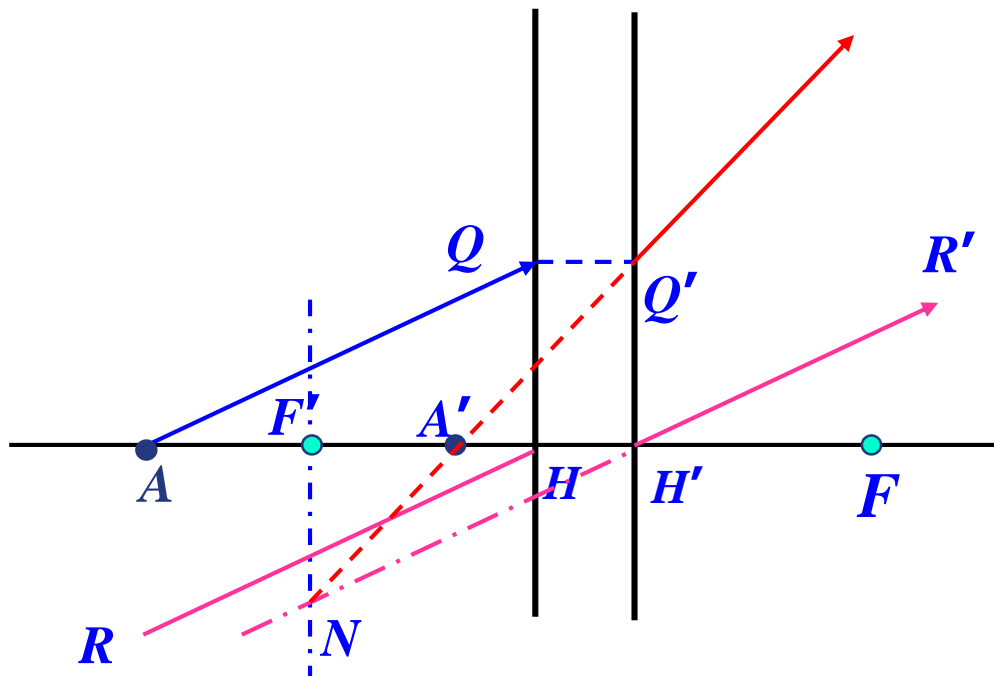
4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

4. 负光组，轴上点成像

方法2:

- 作 AQ 、 QQ' ，并作 $RH \parallel AQ$ ，以及过 F' 作像方焦平面；
- $H'R' \parallel RH$ ，反向延长 $H'R'$ 交辅助面 F' 于 N
- NQ' 于光轴交点既是 A' （物方平行光线出射后反向延长线会聚于像方焦平面上一点）





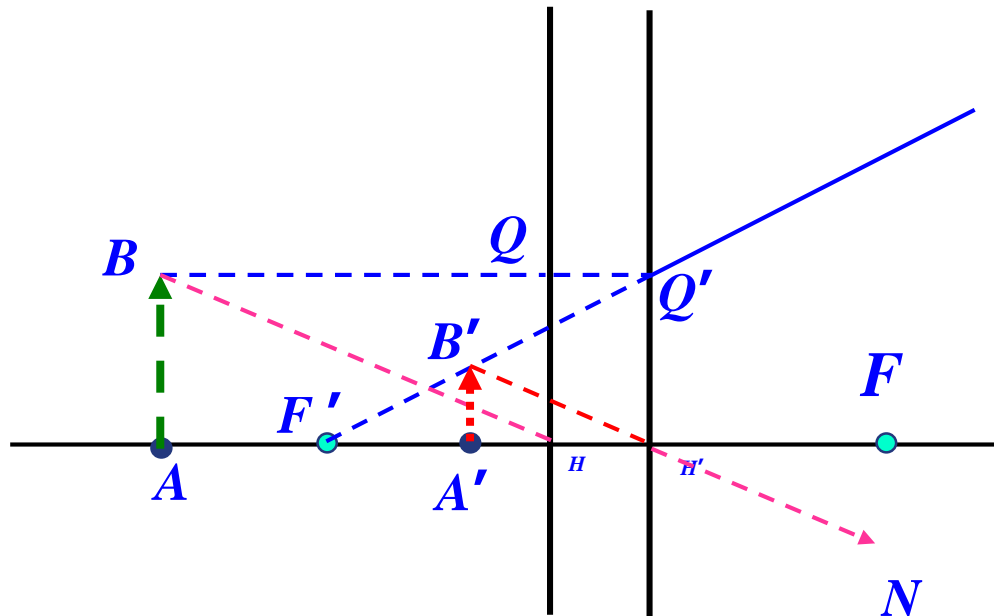
4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

4. 负光组，轴上点成像

方法3:

- 作辅助物 AB ，由 B 作 $BQ \parallel$ 光轴，并作 QQ' ；
- 由 Q' 作直线过 F' ，连接 BH ，作 $H'N \parallel BH$ ，反向延长 $H'N$ 于 $Q'F'$ 交于 B' ；
- 由 B' 作直线垂线于光轴交点即是 A' 。

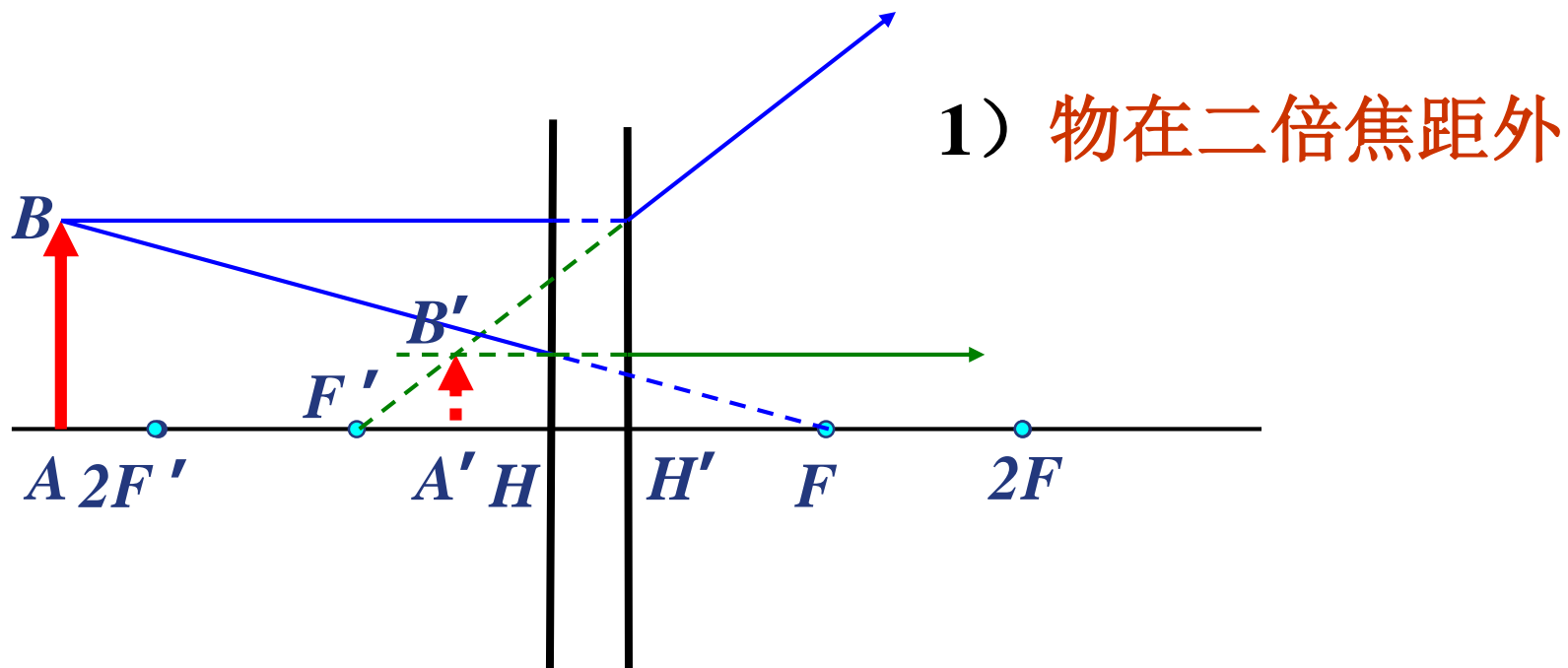




4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

5. 负光组，实物成像



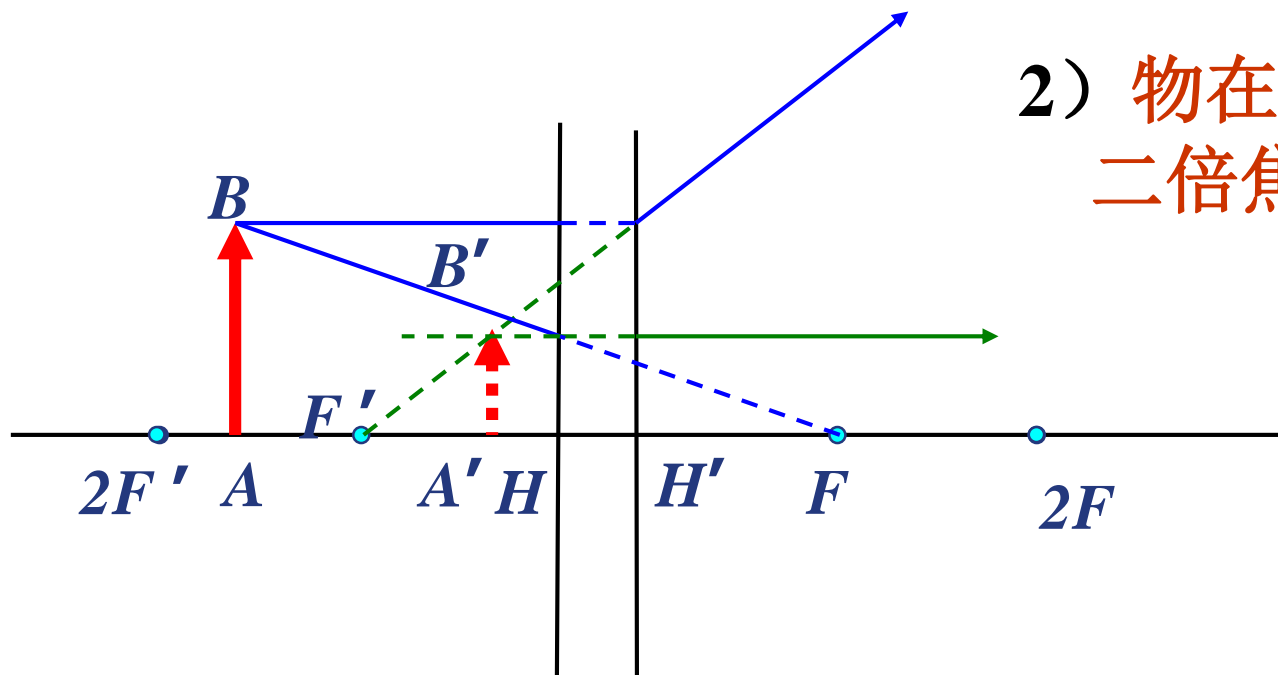
像：缩小正立虚像，同侧，一倍焦距内



4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

5. 负光组，实物成像



2) 物在一倍焦距外，
二倍焦距内

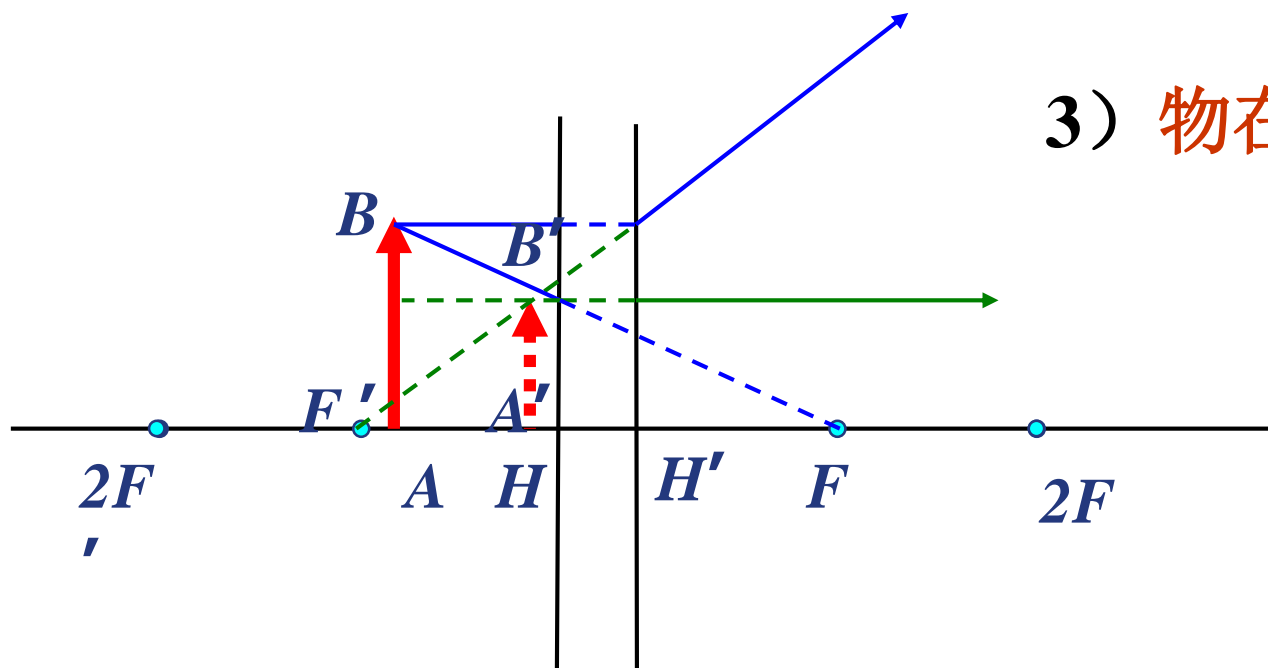
像：缩小正立虚像，同侧，一倍焦距内



4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

5. 负光组，实物成像



3) 物在一倍焦距内

像：缩小正立虚像，同侧，一倍焦距内

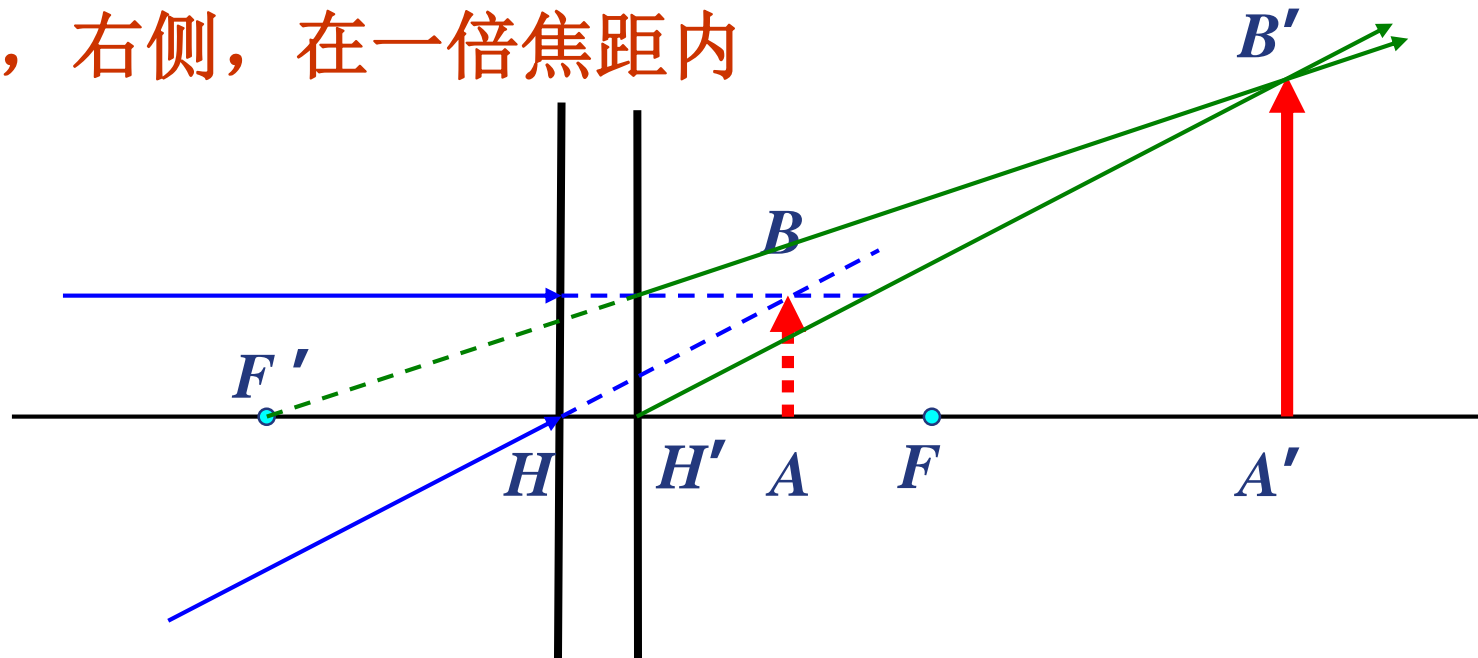


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

6. 负光组，虚物成像

1) 虚物，右侧，在一倍焦距内



像：放大正立实像，同侧

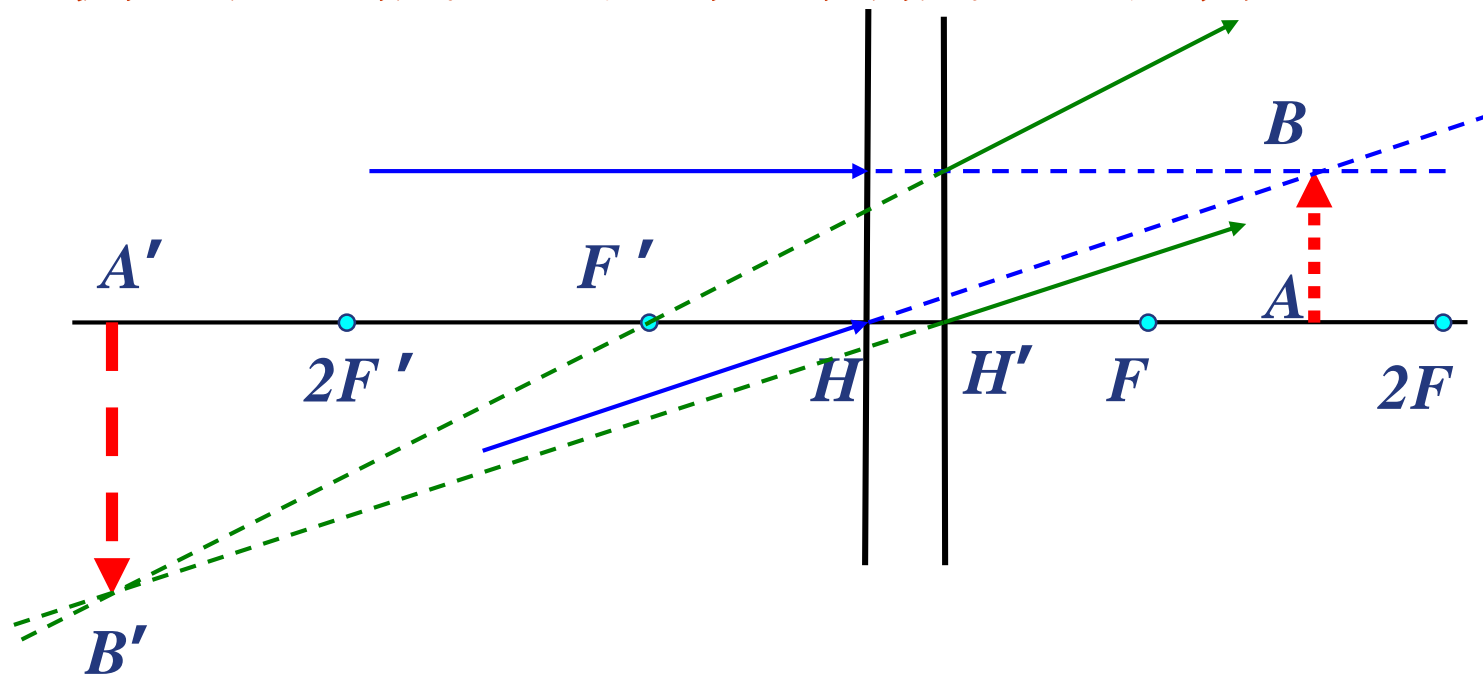


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

6. 负光组，虚物成像

2) 虚物，右侧，在一倍焦距以外，两倍焦距以内



像：放大，倒立，虚像，两侧

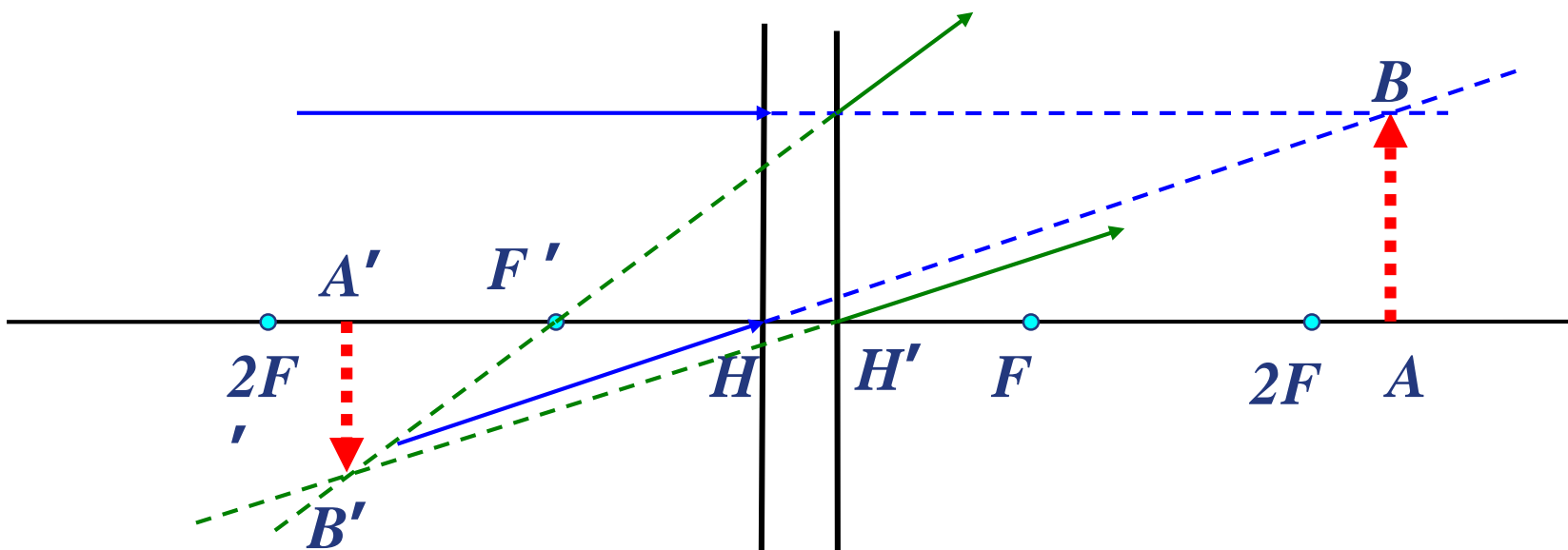


4.4 理想光学系统的作图方法

二. 图解实例

6. 负光组，虚物成像

3) 虚物，右侧，两倍焦距以外

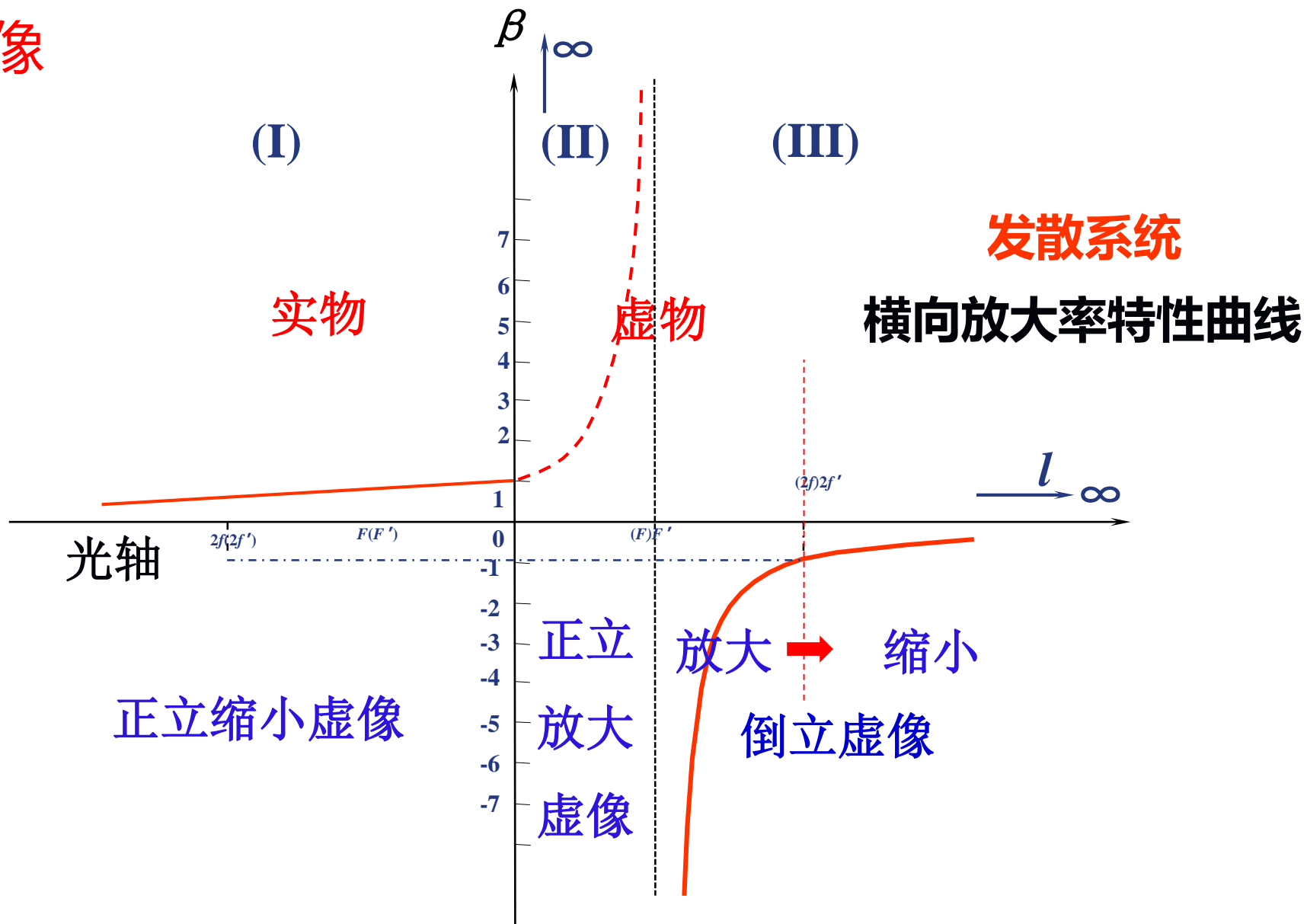


像：倒立、缩小、虚像，两侧，一倍焦距外



4.4 理想光学系统的作图方法

4.负光组成像

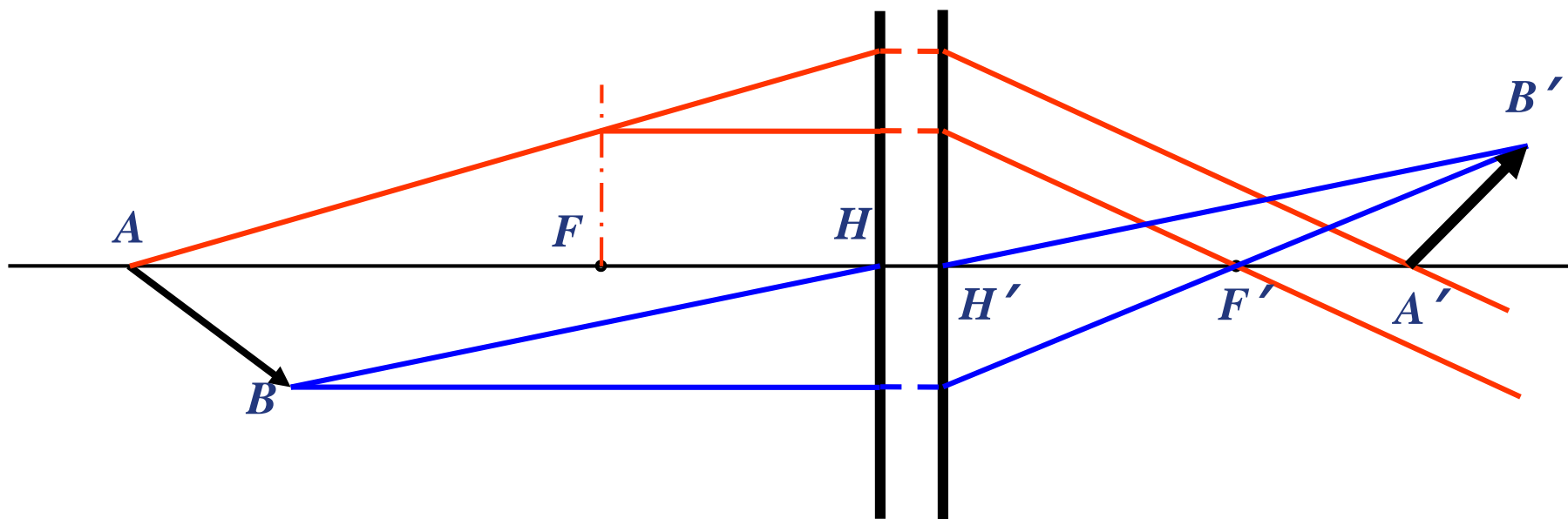




4.4 理想光学系统的作图方法

三. 图解练习

已知焦点、主点、节点，求物体的像？

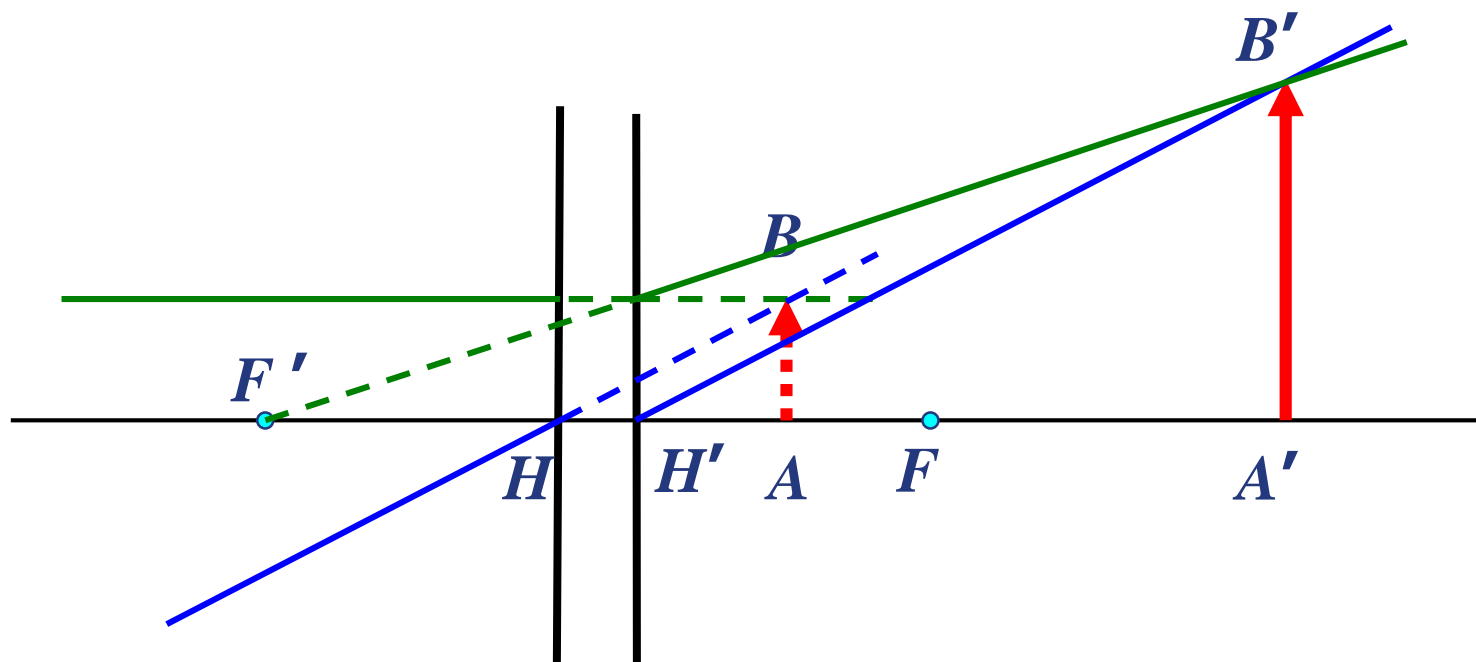




4.4 理想光学系统的作图方法

三. 图解练习

已知焦点、主点、节点及像，求物的位置？





4.4 理想光学系统的作图方法

❖ 作图法依据

总结

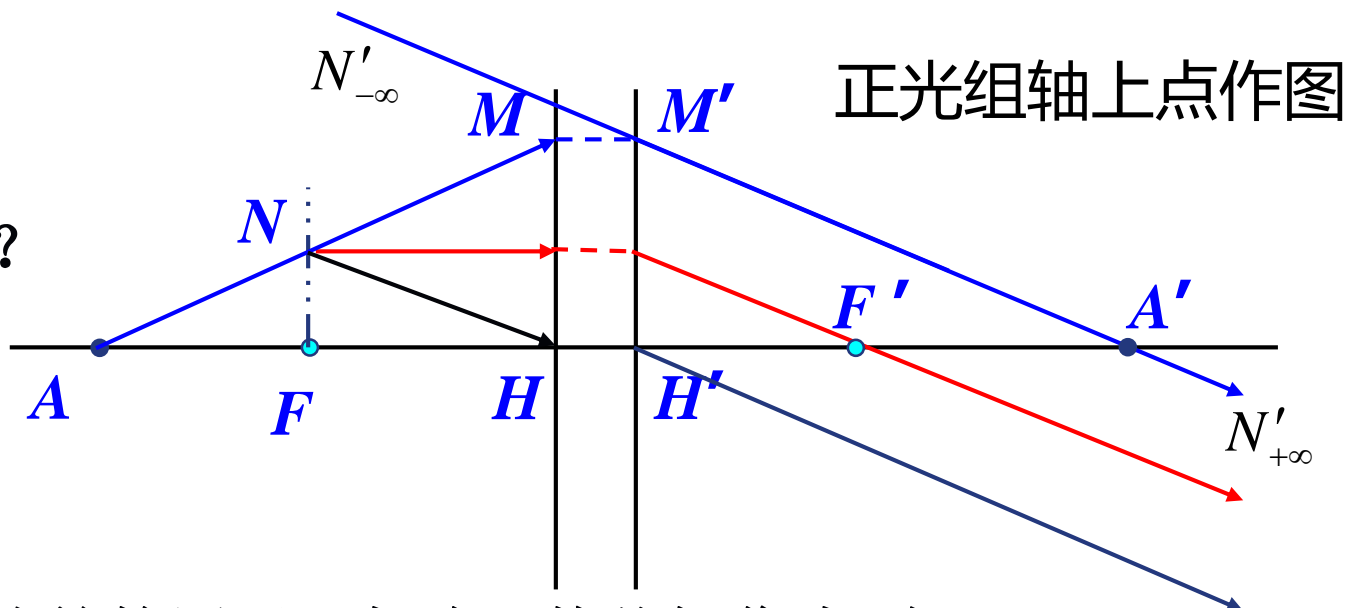
- 空间的物体是由点（发光点）组成的；
- 解决物体成像的作图求像问题，归结为解决物点的作图求像问题，分为轴上点和轴外点；
- 由物点发出的任意两条光线在像空间的共轭光线，它们的交点为物点的共轭像点；
 - 轴外点：三条特征光线任选其二即可；
 - 轴上点：唯一的特殊光线是沿光轴的光线，需要借助辅助面或者其它辅助点找到另外一条光线；



4.4 理想光学系统的作图方法

思考题

AM 和 $A'M'$ 是共轭光线吗？



正光组轴上点作图

- 当物点从 A 点沿 AM 移动并趋近于 N 点时，其共轭像点则从 A' 点移动趋向于 $N'_{+\infty}$ ；
- 当物点从 N 点沿 AM 移动并趋近于 M 点时，其共轭像点则从 $N'_{-\infty}$ 点移动趋向于 M' 点；
- AM 的像方共轭线段是由 A' 点到 $N'_{+\infty}$ 和 $N'_{-\infty}$ 到 M' 点两部分线段所组成；

思考





第四章 理想光学系统

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



4.5 理想光学系统的组合

一. 光组组合问题

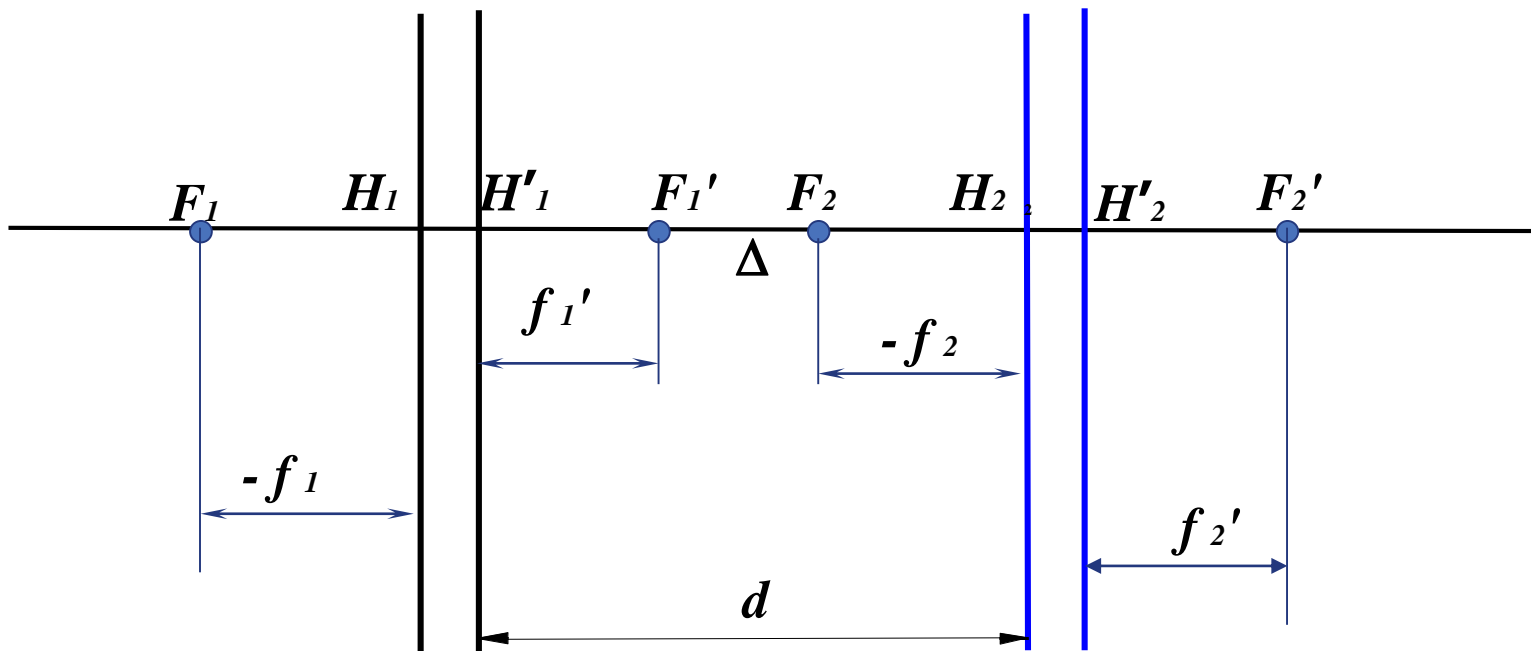
- 若干个已知参数的光组组合成新的系统的焦距、以及基点如何求得？
- 当用单光组不能实现某些特殊要求时需要用多个光组实现时，系统对其中个别光组的要求？





4.5 理想光学系统的组合

一. 光组组合问题



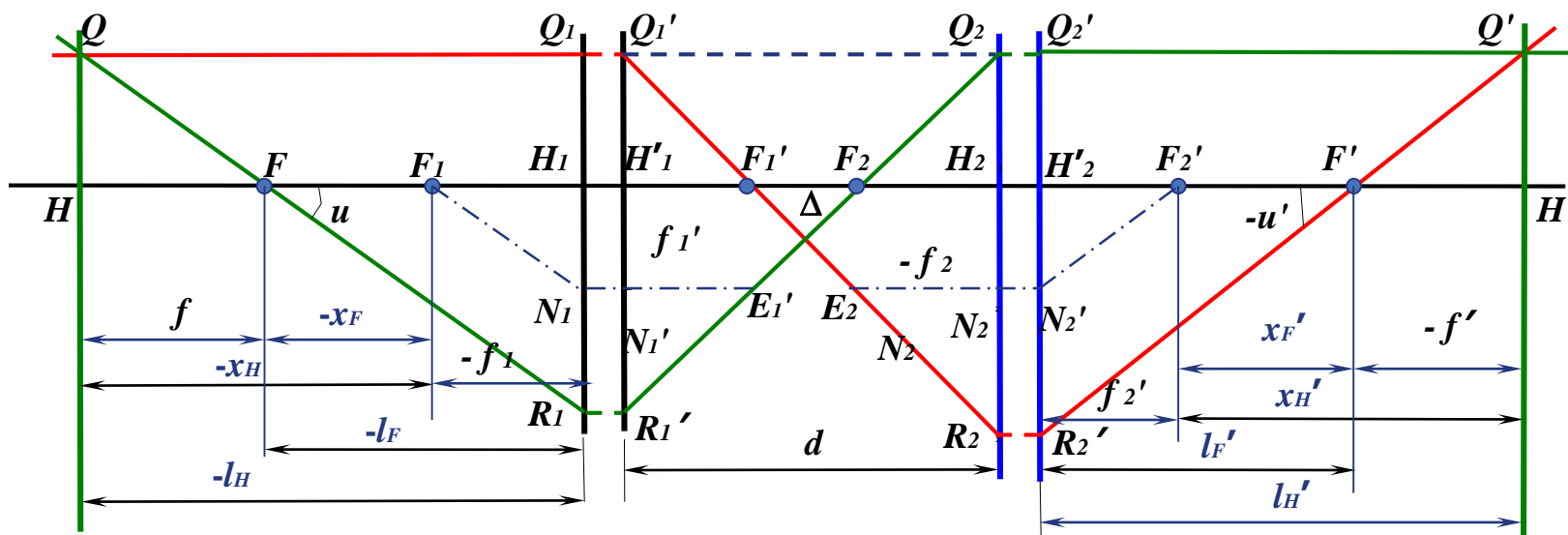
- **光学间隔 Δ** ：第一光组**像方焦点**与第二光组**物方焦点**之间的距离 $F_1'F_2$ 。符号规定： F_1' 到 F_2 , 向右为正，反之为负。
- **两光组间距离 d** ： 等于 $H_1'H_2$



4.5 理想光学系统的组合

一. 光组组合问题

用图解法求出组合光组的基点（面）：焦点、主点、焦距

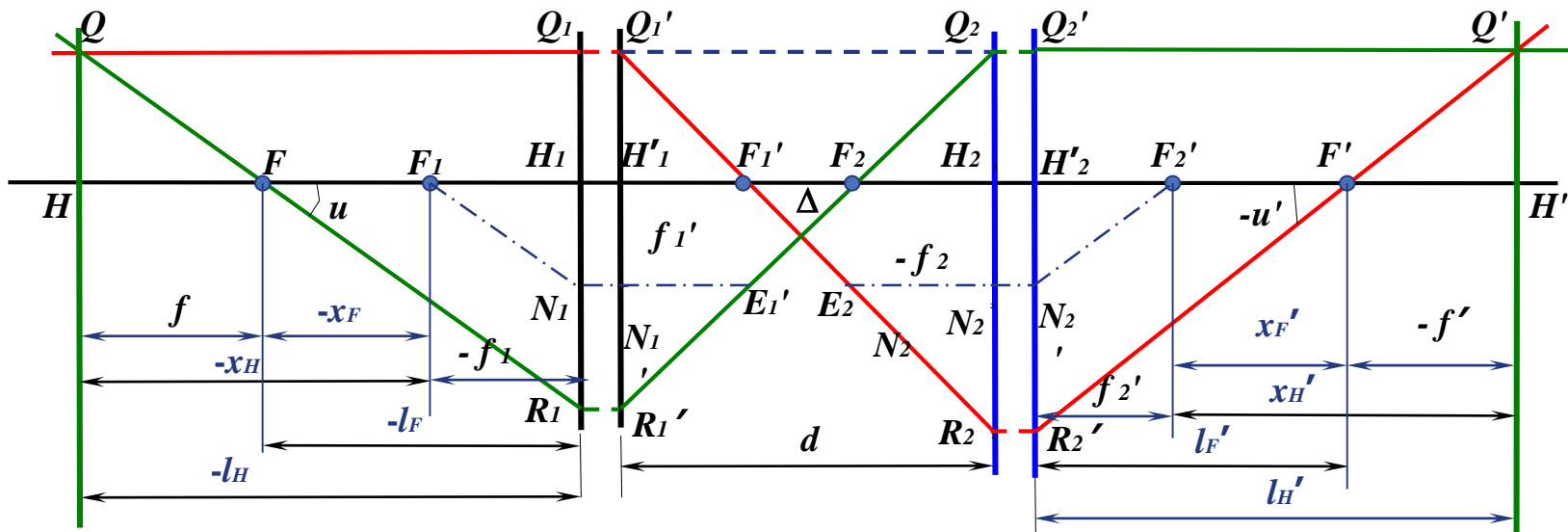


等效光组的像方焦点、主点, 以 F_2' 为原点确定, 也可用 H_2' 为原点确定。同理, 物方分别用 F_1 和 H_1 确定。



4.5 理想光学系统的组合

二. 焦点位置公式



F_1' 和 F' 相对第二光组共轭（第一光组像方焦点和组合光组像方焦点，**红色光线**）

由牛顿公式，有： $x_2 x'_2 = f_2 f'_2$ 其中 $x_2 = -\Delta$ $x'_2 = x'_F$



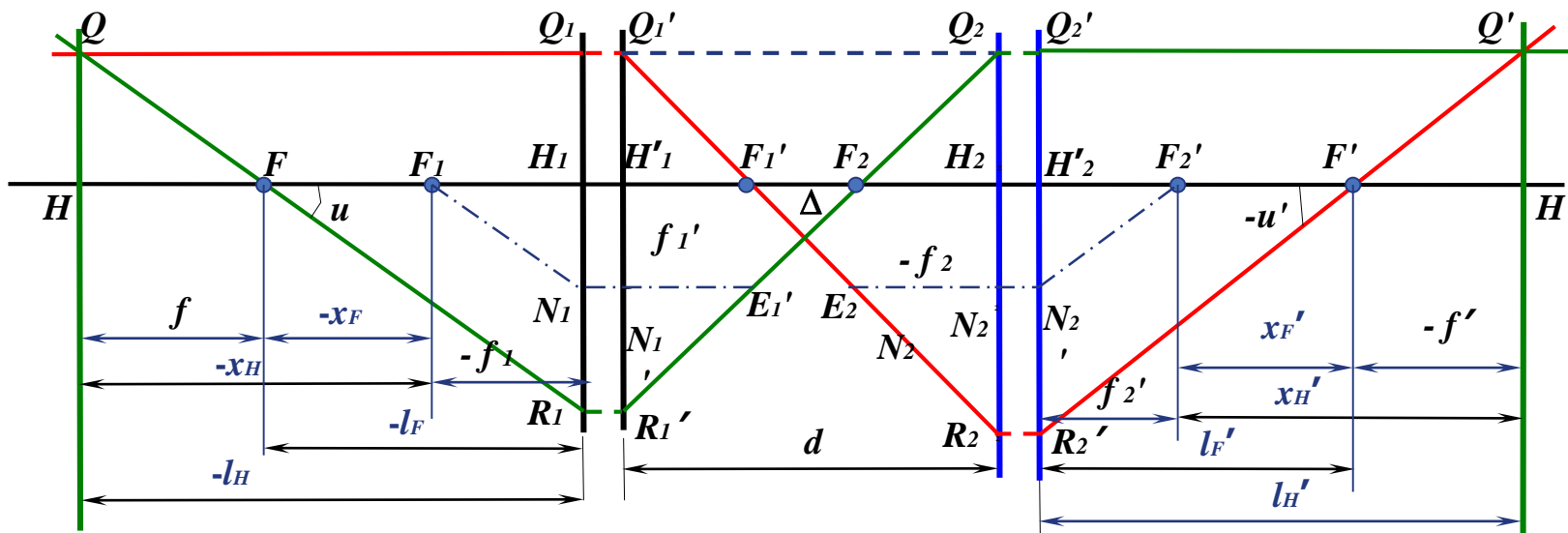
像方焦截距

$$x'_F = x'_2 = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta}$$



4.5 理想光学系统的组合

二. 焦点位置公式



同理， F, F_2 相对第一光组共轭，组合光组物方焦点和第二光组物方焦点

由牛顿公式： $x_1 x'_1 = f_1 f'_1$ 其中 $x_1 = x_F$ $x'_1 = \Delta$



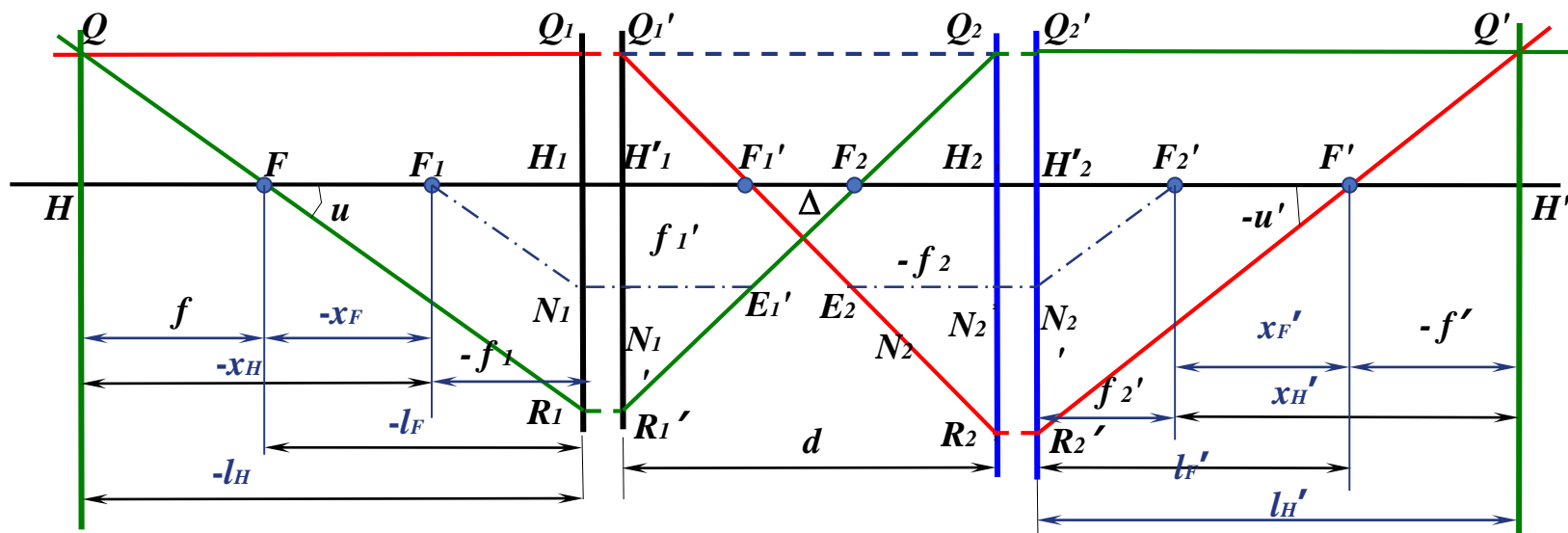
物方焦截距

$$x_F = \frac{f_1 f'_1}{\Delta}$$



4.5 理想光学系统的组合

二. 焦点位置公式



等效光组的物方焦点相对于一光组物方主点位置：

物方焦顶距：

$$l_F = x_F + f_1 = \frac{f_1 f'_1}{\Delta} + f_1 = f_1 \left(1 + \frac{f'_1}{\Delta}\right)$$

等效光组的像方焦点相对于二光组像方主点位置：

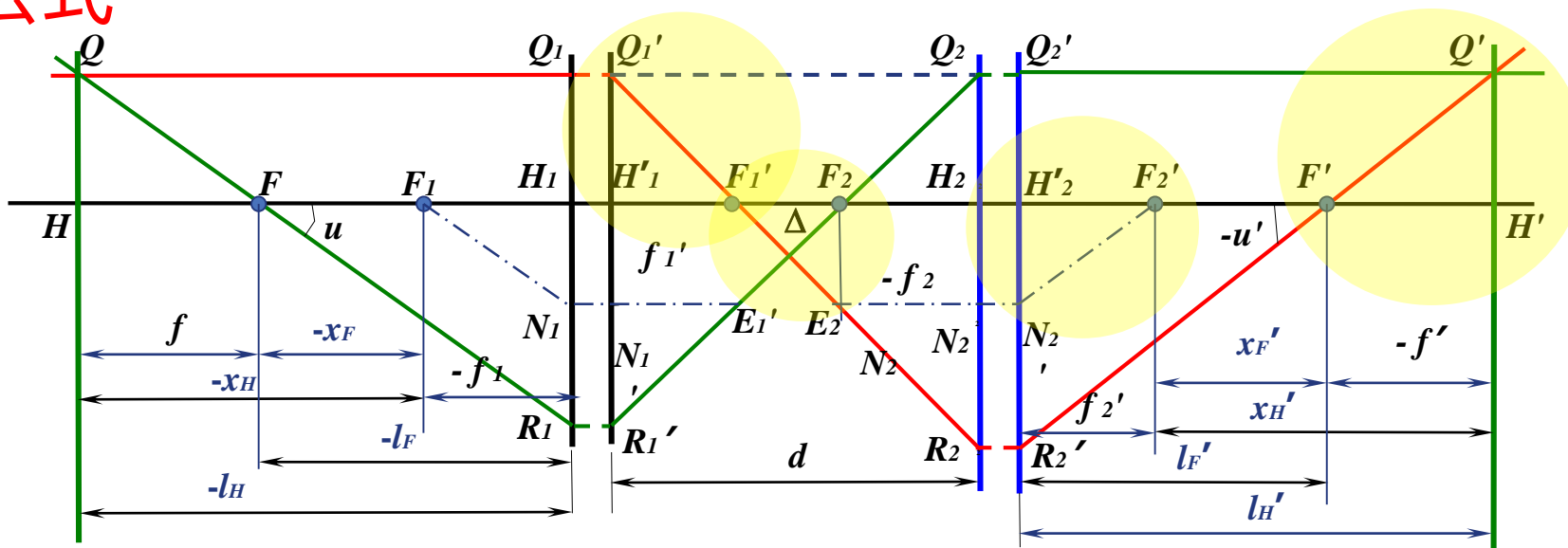
像方焦顶距：

$$l'_F = x'_F + f'_2 = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} + f'_2 = f'_2 \left(1 - \frac{f_2}{\Delta}\right)$$



4.5 理想光学系统的组合

三. 焦距公式



$$\because \triangle Q'H'F' \sim \triangle N_2'H_2'F_2' \quad \frac{-f'}{f_2'} = \frac{Q'H'}{H_2'N_2'} \quad \triangle Q_1'H_1'F_1' \sim \triangle F_1'F_2'E_2 \quad \frac{f_1'}{\Delta} = \frac{Q_1'H_1'}{F_2'E_2}$$

$$\text{由 } Q'H' = Q_1'H_1'$$

$$H_2'N_2' = F_2'E_2$$

$$\text{有: } \frac{-f'}{f_2'} = \frac{f_1'}{\Delta}$$

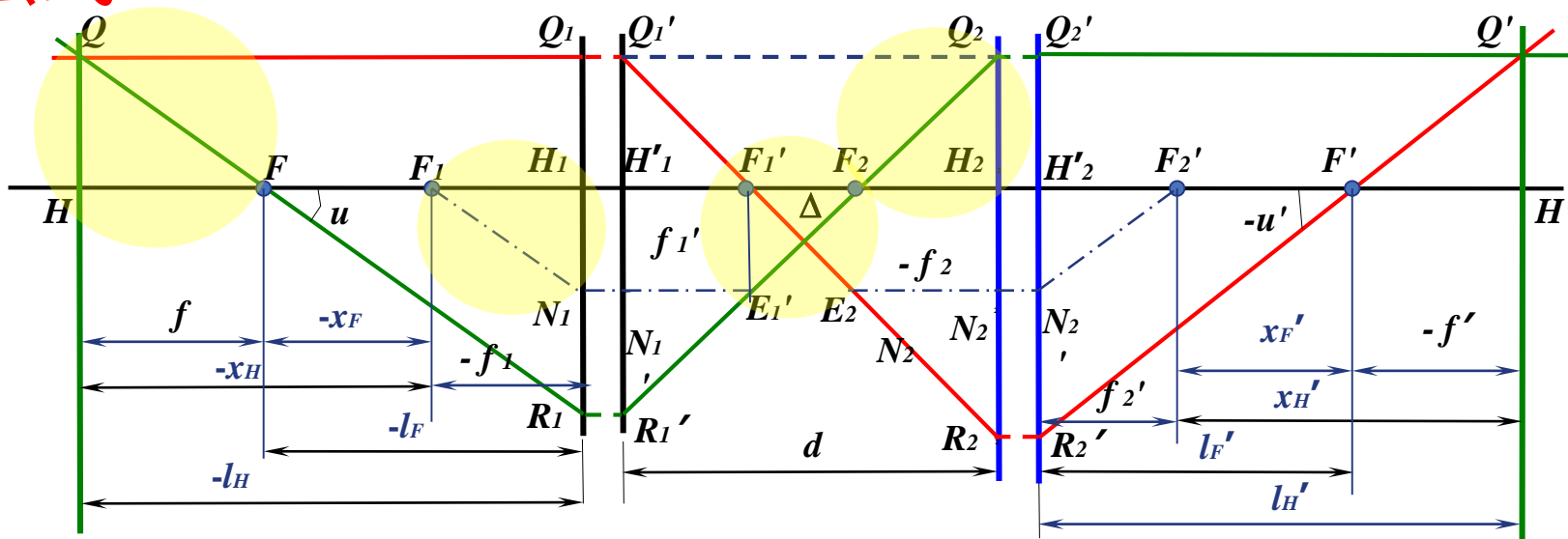


$$f' = -\frac{f_1'f_2'}{\Delta}$$



4.5 理想光学系统的组合

三. 焦距公式



同理， $\because \triangle QHF \sim \triangle F_1H_1N_1$

$\triangle Q_2H_2F_2 \sim \triangle F'_1E'_1F_2$

$$\frac{f}{-f_1} = \frac{QH}{H_1N_1}$$

$$\frac{-f_2}{\Delta} = \frac{Q_2H_2}{F'_1E'_1}$$

由 $QH = Q_2H_2$

$H_1N_1 = F'_1E'_1$

有：
$$\frac{f}{-f_1} = \frac{-f_2}{\Delta}$$

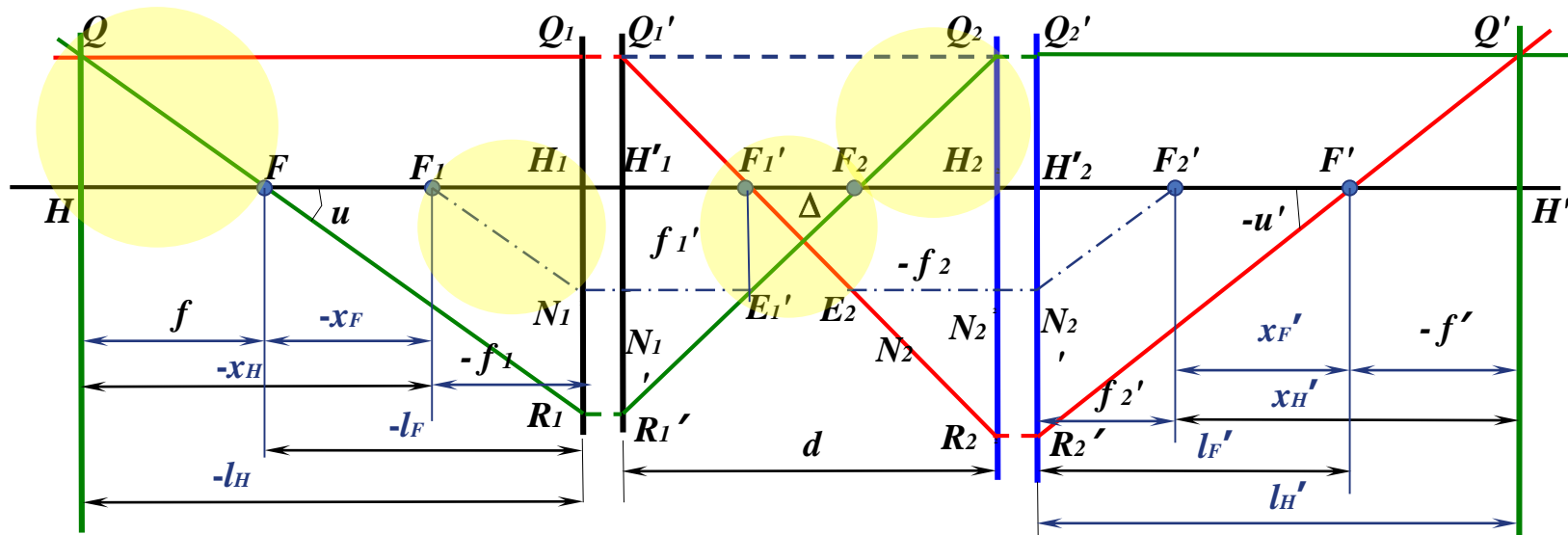


$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$$



4.5 理想光学系统的组合

三. 焦距公式



由图,主面间距为: $d = f'_1 - f_2 + \Delta \longrightarrow \Delta = d - f'_1 + f_2$

代入焦距公式, 光学间隔用主面间距 d 代替

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 - f_2 - d}$$



4.5 理想光学系统的组合

三. 焦距公式

在同一介质内:

$$f_2' = -f_2$$

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

用光焦度表示: $\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{f_1' + f_2' - d}{f_1' f_2'} = \frac{1}{f_2'} + \frac{1}{f_1'} - \frac{d}{f_1' f_2'}$

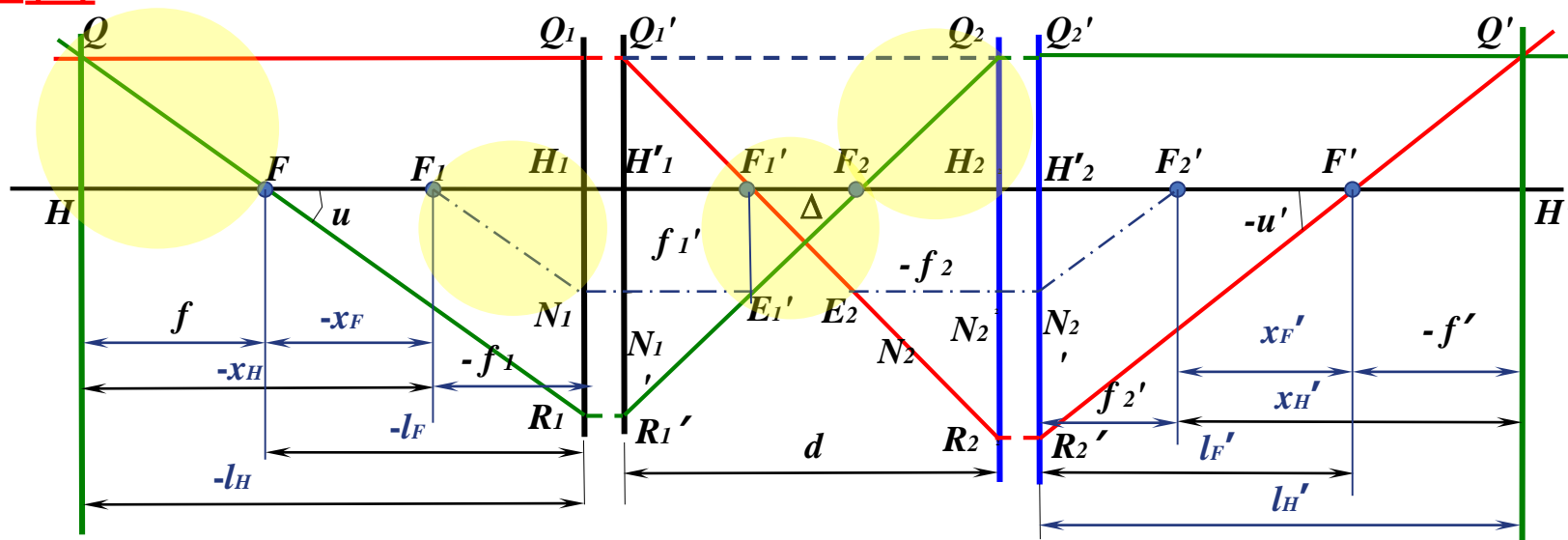
可写成:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d \cdot \Phi_1 \Phi_2$$



4.5 理想光学系统的组合

四.主点位置



等效光组的焦点位置确定后，利用焦距公式可确定相应主点位置

$$x'_H = x'_F - f' = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} - f' = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} + \frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = \frac{f'_2 (f'_1 - f_2)}{\Delta}$$

$$x_H = x_F - f = \frac{f_1 f'_1}{\Delta} - \frac{f_1 f_2}{\Delta} = \frac{f_1 (f'_1 - f_2)}{\Delta}$$



4.5 理想光学系统的组合

四.主点位置

也可以用相对主点的距离来表示:

像方主顶距 $l'_H = x'_H + f'_2 = \frac{f'_2(f'_1 - f_2)}{\Delta} + \frac{f'_2 \cdot \Delta}{\Delta} = \frac{f'_2(f'_1 - f_2 + \Delta)}{\Delta}$

$$= l'_F - f' = \frac{f'_2 \cdot d}{\Delta} = \frac{f'_1 f'_2}{\Delta} \cdot \frac{d}{f'_1} = -f' \frac{d}{f'_1}$$

像方主顶距 $l_H = x_H + f_1 = \frac{f_1(f'_1 - f_2)}{\Delta} + \frac{f_1 \cdot \Delta}{\Delta} = \frac{f_1(f'_1 - f_2 + \Delta)}{\Delta}$

$$= l_F - f = \frac{f_1 \cdot d}{\Delta} = \frac{f_1 f_2}{\Delta} \cdot \frac{d}{f_2} = f \frac{d}{f_2}$$



实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



4.4 理想光学系统的作图方法

❖ 作图法依据

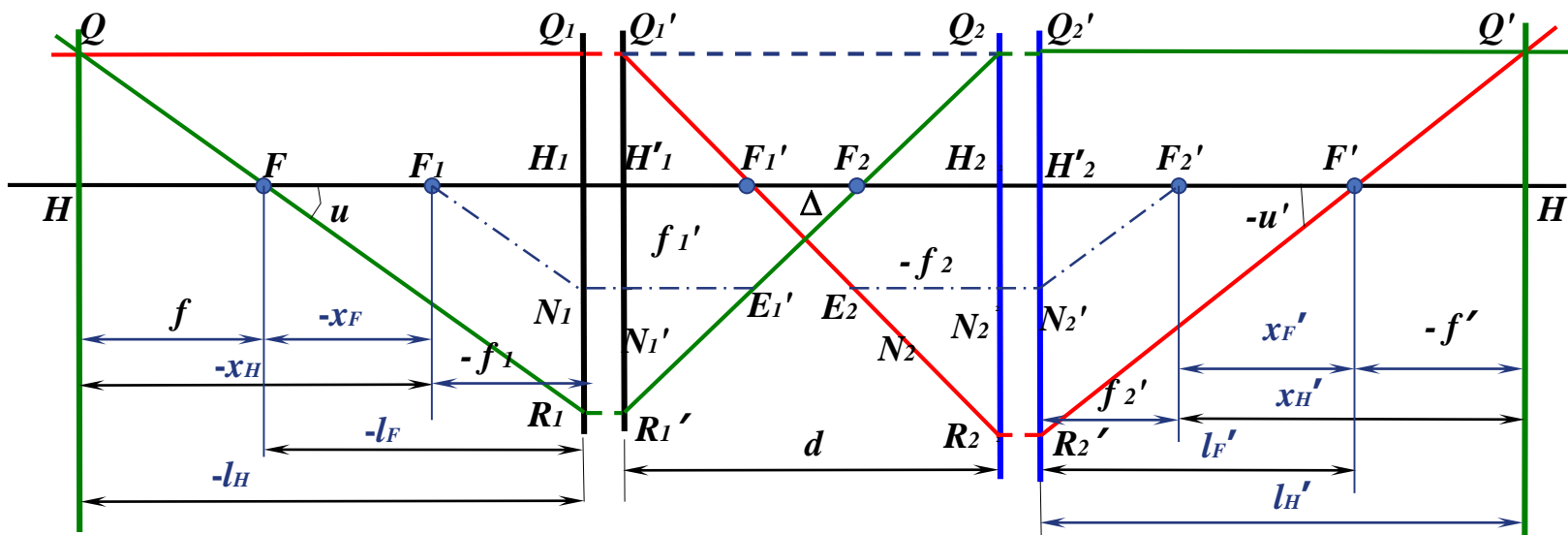
复习

- 空间的物体是由点（发光点）组成的；
- 解决物体成像的作图求像问题，归结为解决物点的作图求像问题，分为轴上点和轴外点；
- 由物点发出的任意两条光线在像空间的共轭光线，它们的交点为物点的共轭像点；
- 轴外点：三条特征光线任选其二即可；
- 轴上点：唯一的特殊光线是沿光轴的光线，需要借助辅助面或者其它辅助点找到另外一条光线；

4.5 理想光学系统的组合

复习

用图解法求出组合光组的基点（面）：焦点、主点、焦距



- 若干个已知参数的光组组合成新的系统的焦距、以及基点如何求得？
- 当用单组不能实现某些特殊要求时需要用多个光组实现时，系统对其个别光组的要求？



4.5 理想光学系统的组合

物方

像方

焦距

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta}$$

焦截距

$$x_F = \frac{f_1 f'_1}{\Delta}$$

$$x'_F = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta}$$

焦顶距

$$l_F = x_F + f_1 = \frac{f_1 f'_1}{\Delta} + f_1 = f_1 \left(1 + \frac{f'_1}{\Delta} \right)$$

$$l'_F = x'_F + f'_2 = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} + f'_2 = f'_2 \left(1 - \frac{f_2}{\Delta} \right)$$

像方主顶距

$$l_H = l_F - f = f \frac{d}{f_2}$$

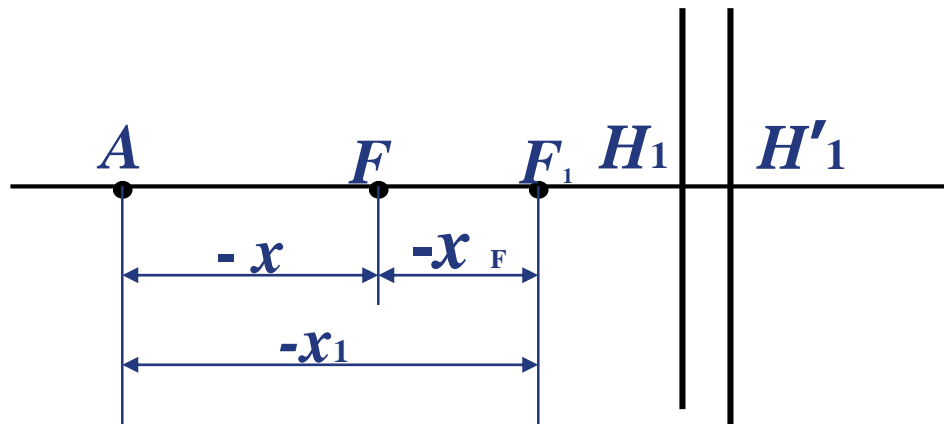
$$l'_H = l'_F - f' = -f' \frac{d}{f'_1}$$



4.5 理想光学系统的组合

五. 等效光组的横向放大率

横向放大率为: $\beta = -\frac{f}{x}$



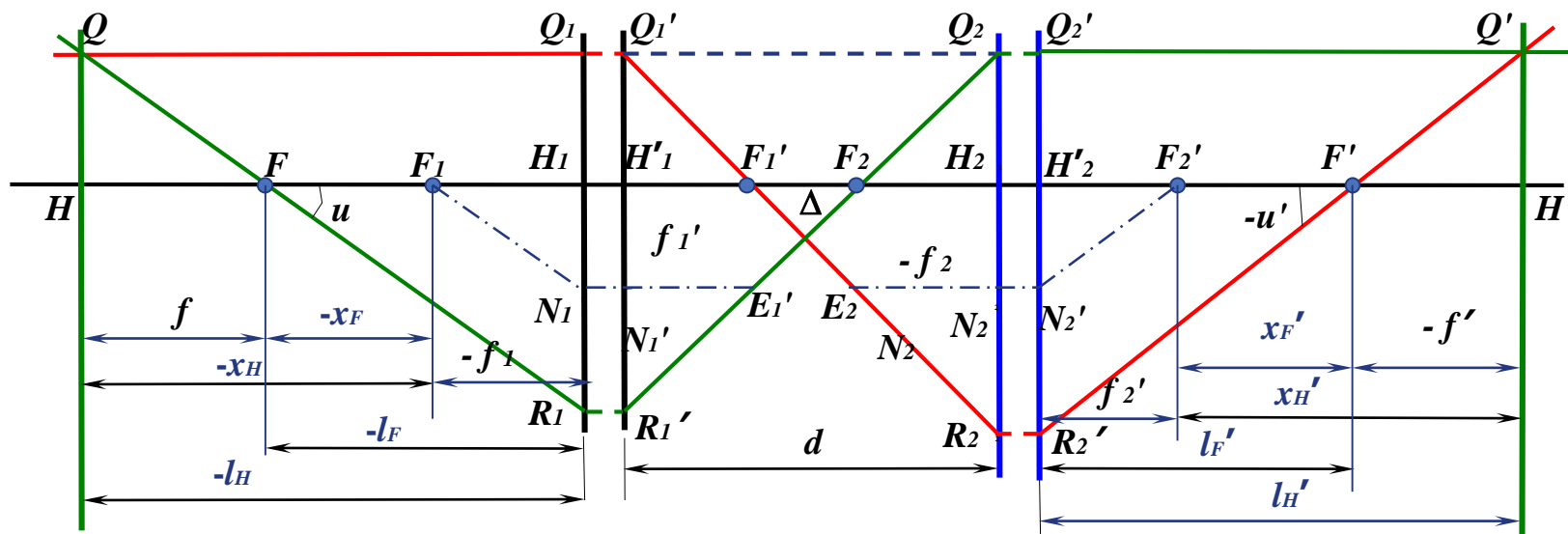
f : 等效光组物方焦距 x : 物点到等效光组物方焦点的距离

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 - x_F = x_1 - \frac{f_1 f'_1}{\Delta} \\ f &= \frac{f_1 f_2}{\Delta} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \beta = -\frac{f}{x} = -\frac{\frac{f_1 f_2}{\Delta}}{x_1 - \frac{f_1 f'_1}{\Delta}} = \frac{f_1 f_2}{f_1 f'_1 - x \Delta}$$



4.5 理想光学系统的组合

用图解法求出组合光组的基点（面）：焦点、主点、焦距



其它方法?

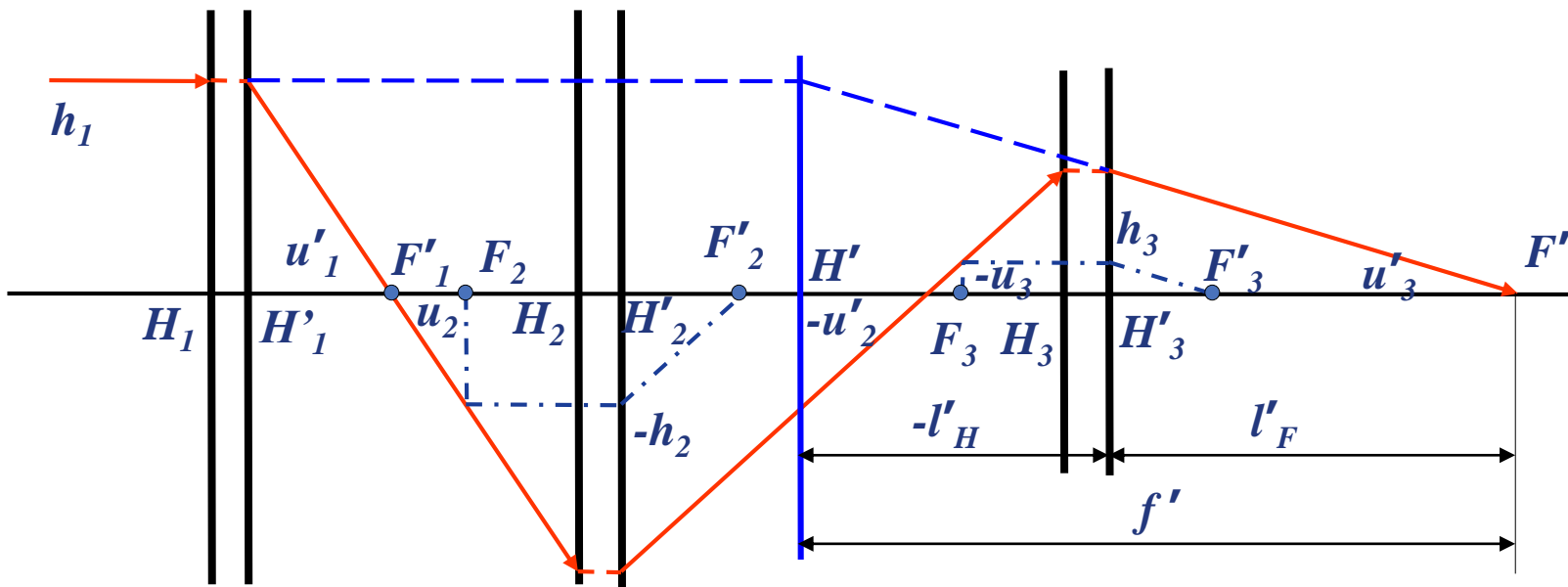


- 双光组的组合的计算如上所示，多光组组合依次类推；
- 如果对三光组的组合计算，可以求出第一和第二光组等效系统，然后再与第三个光组组合，求的总的等效系统；
- 过程比较复杂，容易出错。



4.5 理想光学系统的组合

六.光路计算公式-正切计算法



设一条投射高度为 h_1 的平行于光轴的光线，由图看出：

$$f' = \frac{h_1}{\tan U'_3}$$

$$l'_F = \frac{h_3}{\tan U'_3}$$



4.5 理想光学系统的组合

六.光路计算公式-正切算法

对于一般情况，由 k 个光组组合时，有：

$$f' = \frac{h_1}{\tan u'_k}$$

$$l'_F = \frac{h_k}{\tan u'_k}$$

h_1 已知

关键问题： 求出 $\tan u'_k$ 和 h_k

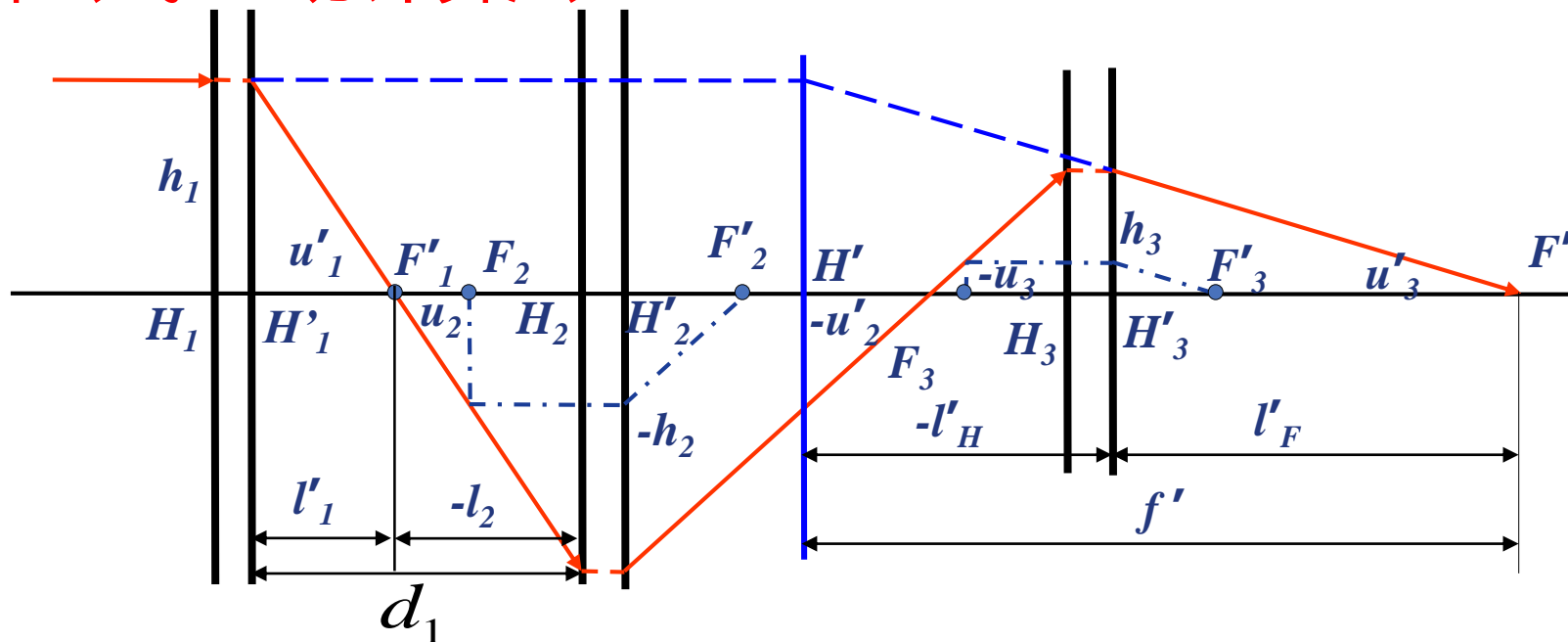
对于第一个光组，将高斯公式 $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$ 两边同乘 h_1

$$\left. \begin{array}{l} \text{有: } \frac{h_1}{l'} - \frac{h_1}{l} = \frac{h_1}{f'} \\ \text{另有: } \frac{h'_1}{l'_1} = \tan u'_1 \quad \frac{h_1}{l_1} = \tan u_1 \end{array} \right\} \Rightarrow \tan u'_1 = \tan u_1 + \frac{h_1}{f'_1}$$



4.5 理想光学系统的组合

六.光路计算公式-正切计算法



再由过渡公式 $l_2 = l_1' - d_1$ 两边同乘 $\tan u_1'$

得: $l_2 \tan u_1' = l_1' \tan u_1' - d_1 \tan u_1'$ $\tan u_1' = \tan u_2$

$$h_1 = l_1' \tan u_1'$$

$$h_2 = l_2 \tan u_2$$



$$h_2 = h_1 - d_1 \tan u_1'$$



4.5 理想光学系统的组合

六.光路计算公式-正切算法

$$\tan u'_k = \tan u_k + \frac{h_k}{f'_k}$$

$$h_{k+1} = h_k - d_k \tan u'_k$$

当求多光组组合的基点位置和焦距大小时，应取初值 $\tan u_1 = 0$

则可迭代求出 f' 和 l'_F

若要求 f 和 l_F ，可将组合光组倒转180度，再按照上述方法计算。

上述方法称为正切算法



4.5 理想光学系统的组合

六.光路计算公式-截距法

$$f' = \frac{h_1}{\tan u'_1} \cdot \frac{\tan u_2}{\tan u'_2} \cdot \frac{\tan u_3}{\tan u'_3} \cdots \frac{\tan u_{k-1}}{\tan u'_{k-1}} \cdot \frac{\tan u_k}{\tan u'_k}$$

又有: $h_1 = l'_1 \tan u'_1$

$$h_2 = l_2 \tan u_2 = l'_2 \tan u'_2$$

.....

$$h_k = l_k \tan u_k = l'_k \tan u'_k$$



$$f' = \frac{l'_1 l'_2 l'_3 \cdots l'_k}{l_2 l_3 \cdots l_k}$$



$$l_1 = -\infty$$

然后连续应用高斯公式和过渡公式，可求出个光组的物距以及像距，最终求得像方焦距。

上述方法称为截距算法



4.5 理想光学系统的组合

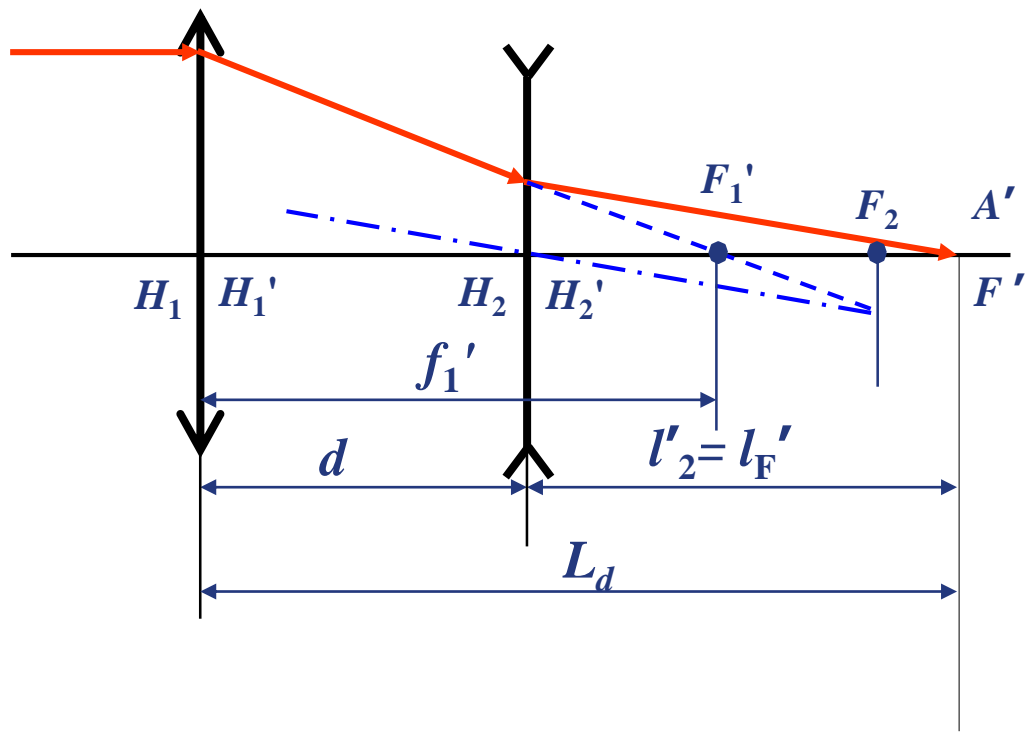
六.光路计算公式-正切计算法

例： $f_1' = 500\text{mm}$ ， $f_2' = -400\text{mm}$ ， $d = 300\text{mm}$ ，用正切法求组合光组的焦距 f' ，组合光组的像方主平面位置 H' 及像方焦点的位置 l'_F 。

解： 设 $h_1=200\text{mm}$ ，有：

$$\tan U'_1 = \frac{h_1}{f'_1} = 0.4$$

$$h_2 = h_1 - d_1 \tan U'_1 = 80\text{mm}$$





4.5 理想光学系统的组合

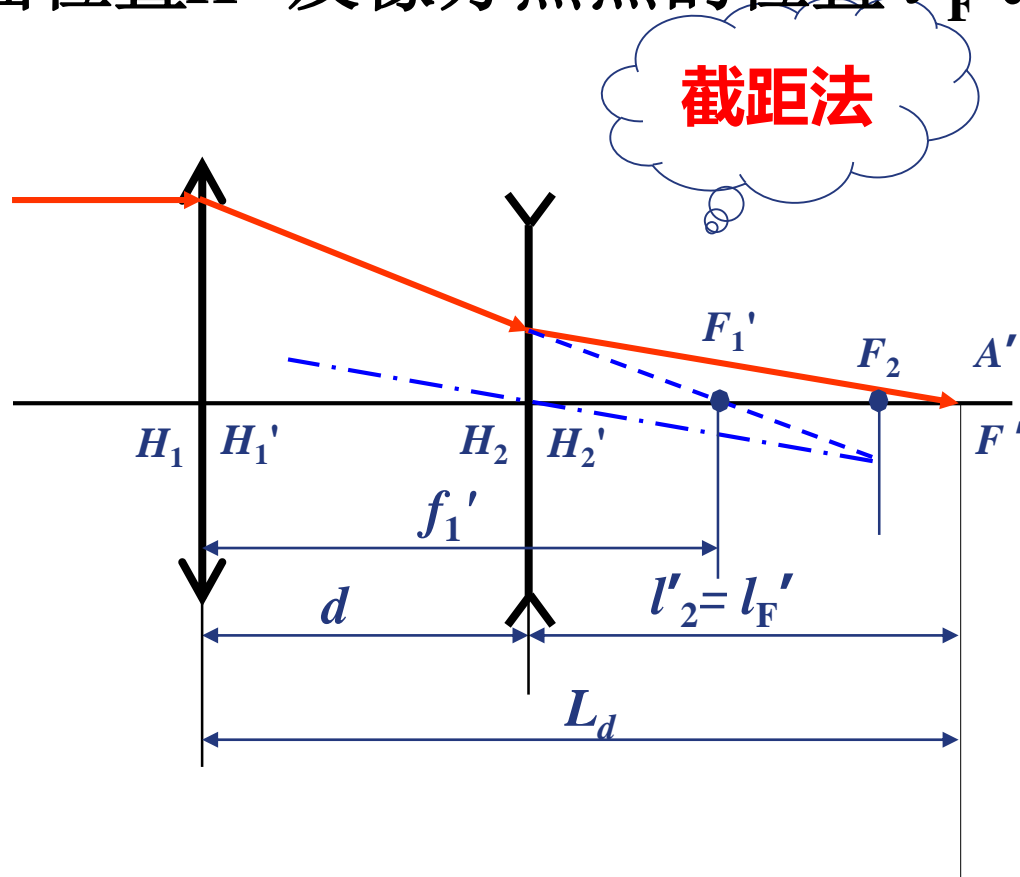
六.光路计算公式-正切计算法

例： $f_1' = 500\text{mm}$ ， $f_2' = -400\text{mm}$ ， $d = 300\text{mm}$ ，用正切法求组合光组的焦距 f' ，组合光组的像方主平面位置 H' 及像方焦点的位置 l_F' 。

$$\begin{aligned}\tan U'_2 &= \tan U_2 + \frac{h_2}{f'_2} \\ &= \tan U'_1 + \frac{h_2}{f'_2} = 0.2\end{aligned}$$

$$f' = \frac{h_1}{\tan U'_2} = 1000\text{mm}$$

$$l_F' = \frac{h_2}{\tan U'_2} = 400\text{mm}$$





第四章 理想光学系统

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

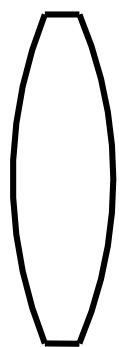
- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型



4.6 透镜的理想模型

一. 单透镜

- 透镜：有两折射面所限定的透明体；
- 透镜可分为凸透镜(convex)和凹透镜(concave)两类.



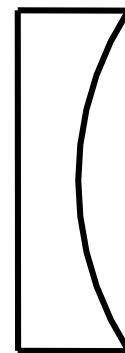
双凸



正月牙



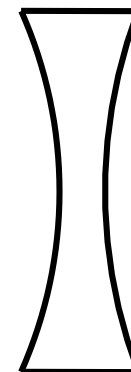
平凸



平凹



负月牙



双凹

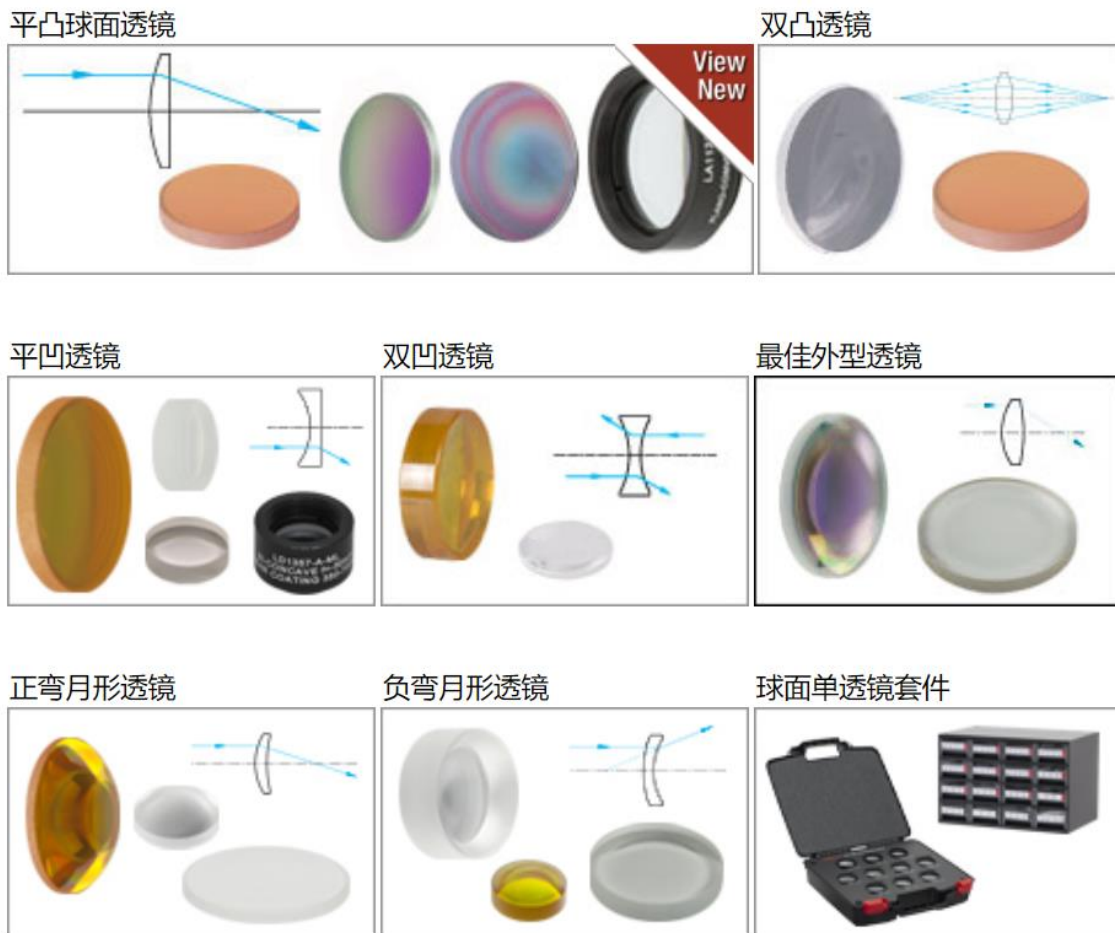
● 凸透镜(convex)

● 凹透镜(concave)



4.6 透镜的理想模型

一. 单透镜



- 光学系统的最基本的光学元件；
- 球面最易加工，便于大量生产，应用最广泛；
- 非球面透镜在改善成像质量和简化结构等方面有其优势，但是加工和检验相对困难。

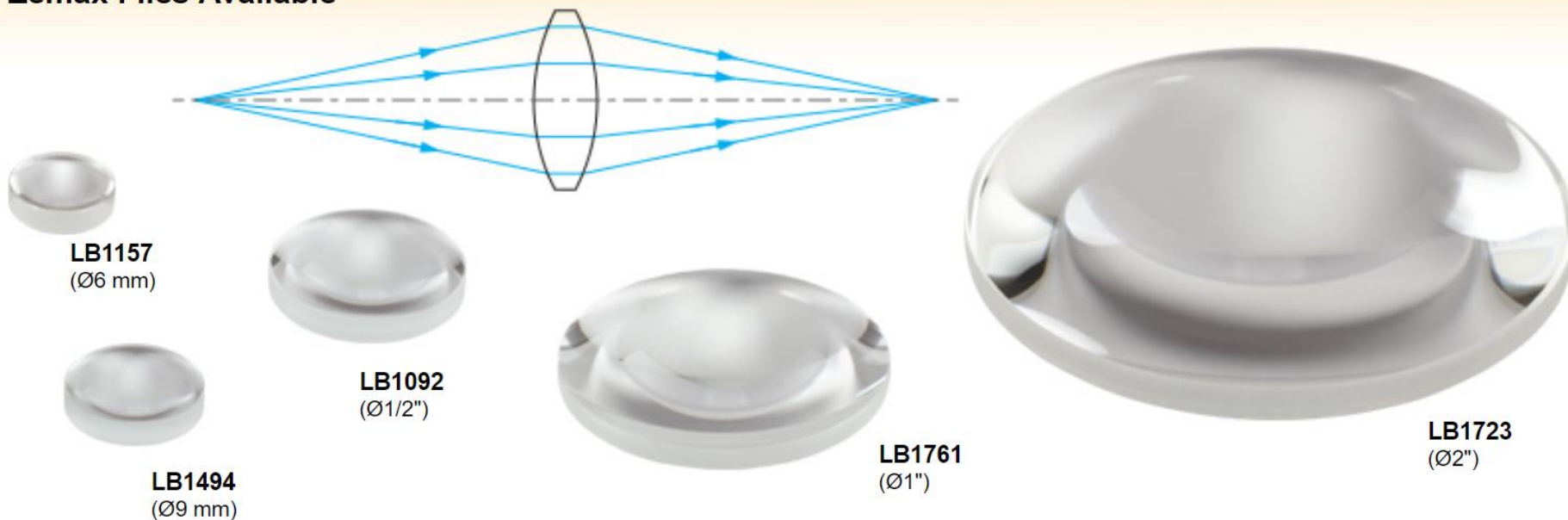


4.6 透镜的理想模型

一. 单透镜

双凸透镜, N-BK7, 未镀膜

- ▶ Positive Focal Length for Use at Finite Conjugates
- ▶ Uncoated Wavelength Range: 350 - 2000 nm
- ▶ Zemax Files Available





4.6 透镜的理想模型

一. 单透镜

双凹透镜, NBK7和N-SF11, 未镀膜

- ▶ Supported by the Zemax Optical Design Package
- ▶ Negative Focal Length



LD1464
(Ø1")



LD1357
(Ø1/2")

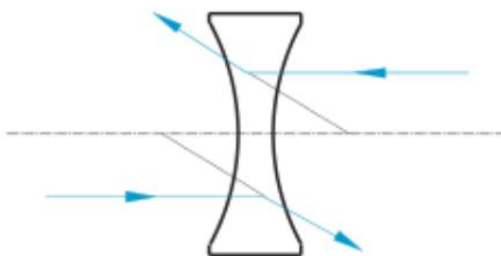


LD2568
(Ø9 mm)



LD2746
(Ø6 mm)

These Lenses are Also
Available in the LSB04 Kit



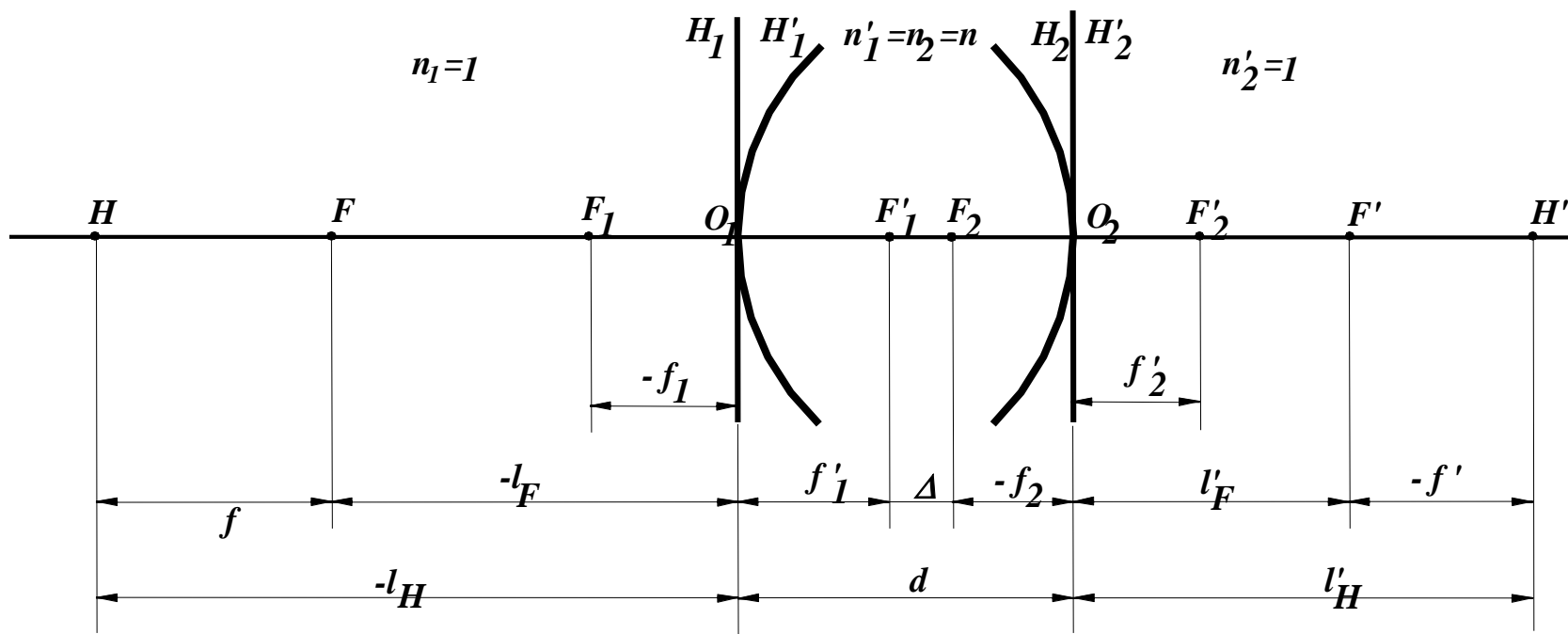
https://www.thorlabschina.cn/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=256



4.6 透镜的理想模型

二. 单透镜的基点和基面

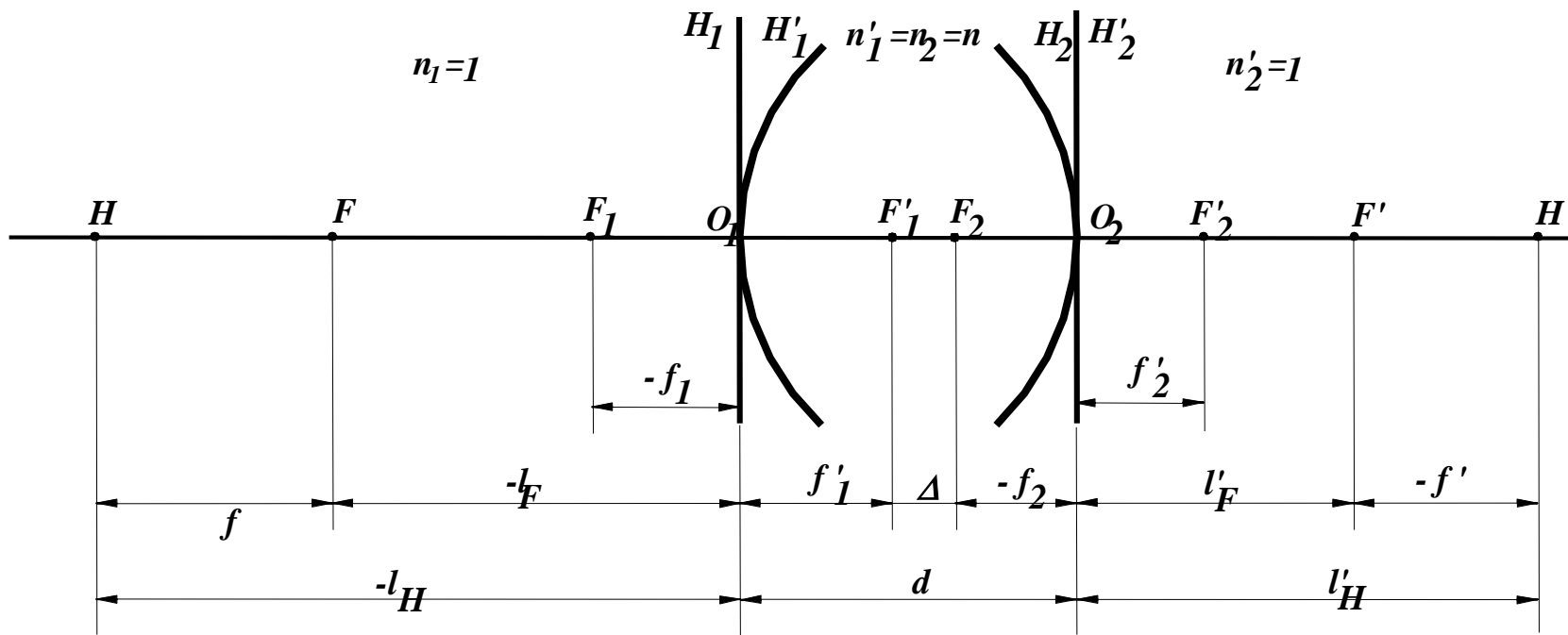
透镜由两个折射面构成，每一个折射面可以看成是一个理想光组.因此, 单个透镜就是两个光组的组合，其基点、基面可按照[双光组组合](#)求得。





4.6 透镜的理想模型

二. 透镜的基点和基面



单折射球
面焦距:

$$f = -\frac{nr}{n'-n}$$

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



$$f_1 = -\frac{r_1}{n-1}; f'_1 = \frac{nr_1}{n-1}$$

$$f_2 = \frac{nr_2}{n-1}; f'_2 = -\frac{r_2}{n-1}$$



4.6 透镜的理想模型

二. 透镜的基点和基面

光学间隔: $\Delta = d - f_1' + f_2$ 组合焦距公式: $f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta}$

$$\Delta = d - \frac{nr_1}{n-1} + \frac{nr_2}{n-1} = \frac{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}{n-1}$$



$$f' = -f = \frac{nr_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]}$$

光焦度:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)d}{nr_1 r_2} \right]$$



4.6 透镜的理想模型

二. 透镜的基点和基面

将前面得到的焦距和光学间隔公式代入主点位置公式并整理，得到透镜主点位置和焦点位置公式：

主点位置

$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_1} = -f' \frac{n-1}{nr_1} d = \frac{-r_2 d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$$

$$l_H = f \frac{d}{f_2} = f \frac{n-1}{nr_2} d = \frac{-r_1 d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$$

主点间距

$$a = d + l'_H - l_H = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$$

焦点位置：

$$l'_F = l'_H + f'$$

$$l_F = l_H + f$$

符号规则：以物方主点H为原点，向右为正，向左为负。



4.6 透镜的理想模型

二. 透镜的基点和基面

令：

$$Q = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$$

则有：

$$f' = -f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)Q}$$

$$l'_H = \frac{-r_2d}{nQ};$$

$$\Delta = \frac{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}{n-1} = \frac{Q}{n-1}$$

$$l_H = \frac{-r_1d}{Q}$$

$$a = d + l'_H - l_H = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$

透镜特性分析公式



4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

1. 双凸透镜 $r_1 > 0, r_2 < 0$ 。

- 当 r_1, r_2 固定后, Q 随着厚度 d 不同, 焦距可正可负。

当: $Q < 0$ 即: $d < \frac{n(r_1 - r_2)}{n - 1}$

→ $\left\{ \begin{array}{ll} f' > 0 & \text{会聚透镜} \\ l_H = \frac{-r_1 d}{Q} > 0 & \text{物方主点在原点右侧} \\ l'_H = \frac{-r_2 d}{nQ} < 0 & \text{像方主点在原点左侧} \end{array} \right.$

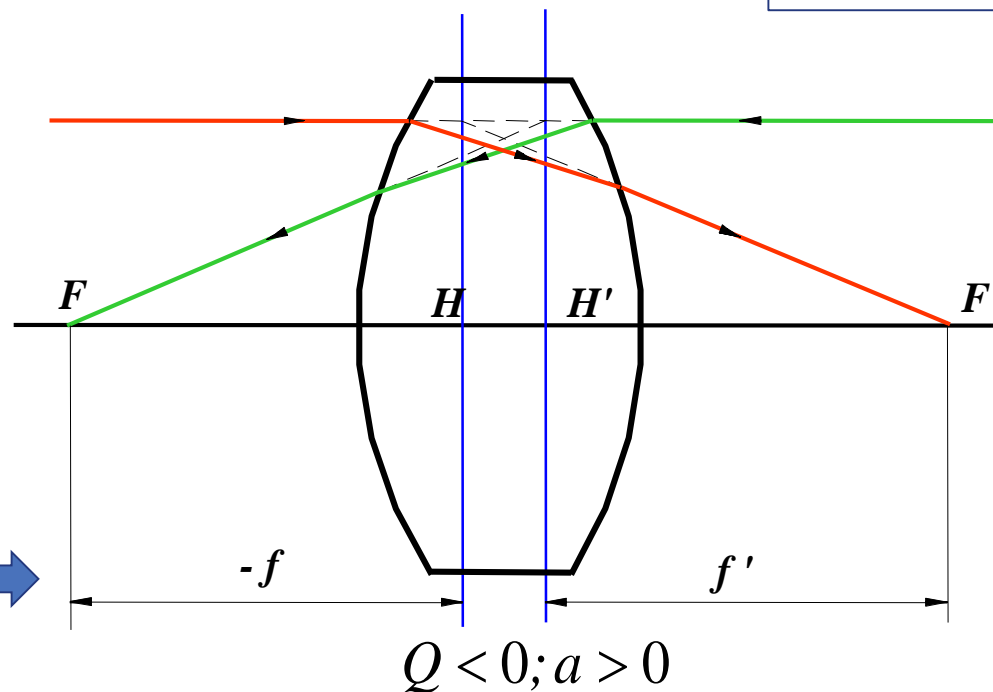
当: $d < r_1 - r_2$ → $a > 0$

$$Q = n(r_2 - r_1) + (n - 1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1 r_2}{(n - 1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1 d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2 d}{Q}$$

$$a = \frac{(n - 1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$





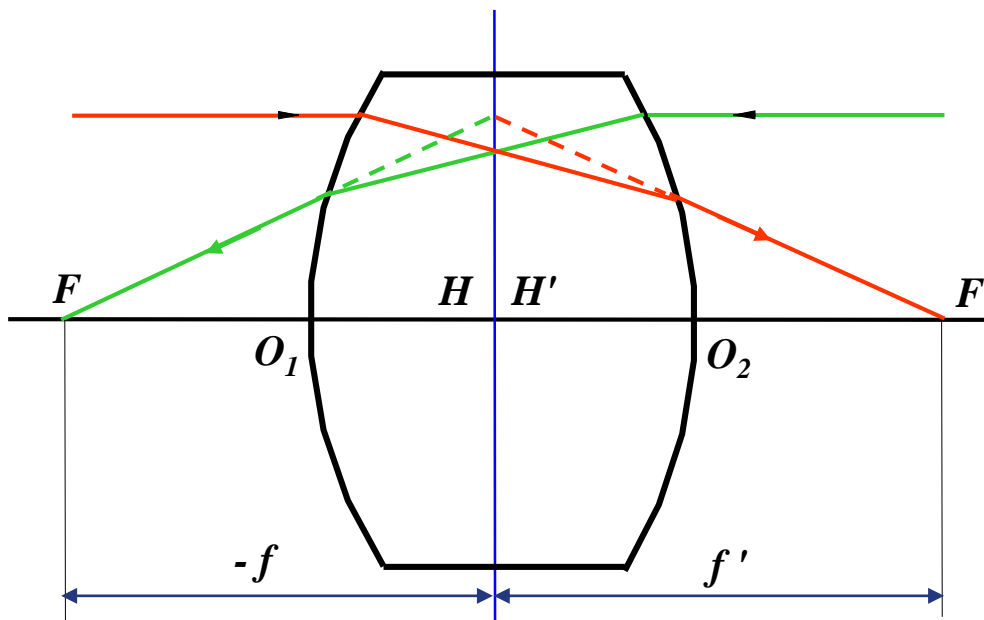
4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

1. 双凸透镜

当: $d = r_1 - r_2$ $\Rightarrow a = 0, Q = r_2 - r_1; l_H = r_1; l'_H = r_2$

物方主面与像方主面重合于透镜二折射球面的公共球心处。



$$Q < 0; a = 0$$

$$Q = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$$
$$f' = -f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)Q}$$
$$l_H = \frac{-r_1d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2d}{Q}$$
$$a = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$



4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

1. 双凸透镜

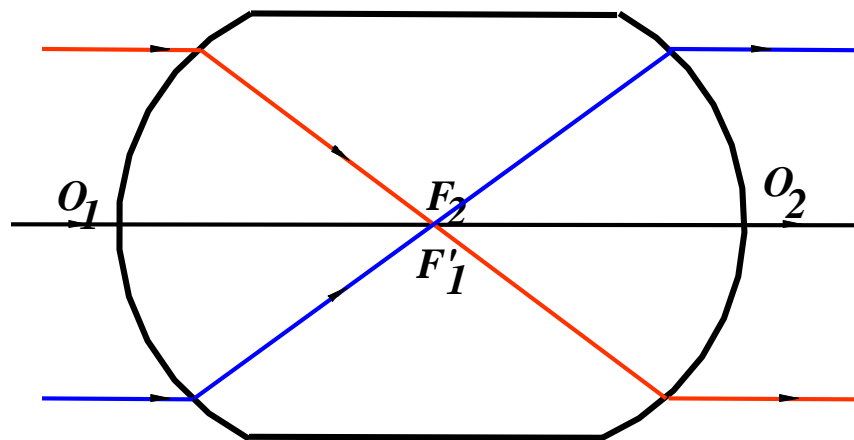
当 d 增加至使得 $Q=0$ ，即有：

$$\Delta = \frac{Q}{n-1} = d - f_1' + f_2 = 0$$

$$d = f_1' - f_2 = \frac{n(r_1 - r_2)}{n-1}$$

$$f' = \infty; l_H = \infty; l'_H = \infty, a = \infty$$

$$\begin{aligned} Q &= n(r_2 - r_1) + (n-1)d \\ f' &= -f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)Q} \\ l_H &= \frac{-r_1d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2d}{Q} \\ a &= \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q} \end{aligned}$$



$$Q = 0$$

主平面在无穷远，透镜成相当于望远系统。



4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

1. 双凸透镜

当： $Q > 0$ 即： $d > \frac{n(r_1 - r_2)}{n - 1}$

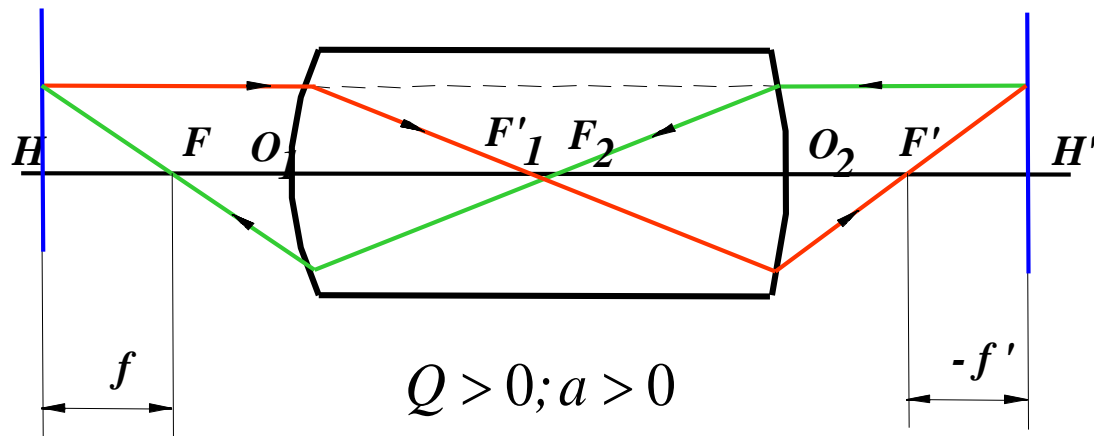
$$Q = n(r_2 - r_1) + (n - 1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1r_2}{(n - 1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2d}{Q}$$

$$a = \frac{(n - 1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$

$f' < 0$ 会聚透镜
 $l_H = \frac{-r_1d}{Q} < 0$ 物方主点在原点左侧
 $l'_H = \frac{-r_2d}{nQ} > 0$ 像方主点在原点右侧
 $a > 0$ 像方主面在物方主面的右方



主平面在透镜外，双凸透镜成一发散光组。



4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

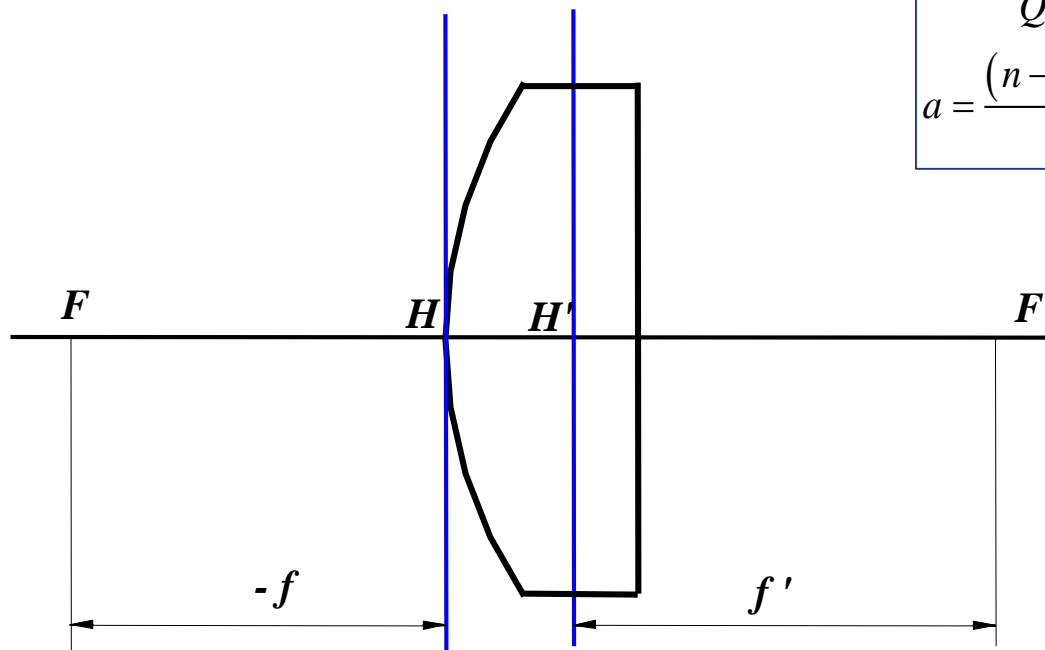
2. 平凸透镜 $r_1 > 0, r_2 = \infty$ 。

当 $r_2 = \infty$ 时: $Q / r_2 = n$;

$$f' = -f = \frac{r_1}{n-1} > 0$$

$$l_H = 0 \quad l'_H = -\frac{d}{n}$$

$$a = \frac{(n-1)d}{n} > 0$$



$$Q = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2d}{Q}$$

$$a = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$

平凸透镜恒为正透镜，其焦距与厚度无关。两个主平面一个与球面顶点相切，另一个位于透镜内部。



4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

3. 正弯月形透镜 $0 < r_1 < r_2$

$$Q > 0$$

$$f' > 0$$

会聚透镜

$$l_H = \frac{-r_1 d}{Q} < 0$$

物方主点
在左侧

$$l'_H = \frac{-r_2 d}{Q} < 0$$

像方主点
在左侧

$$a > 0$$

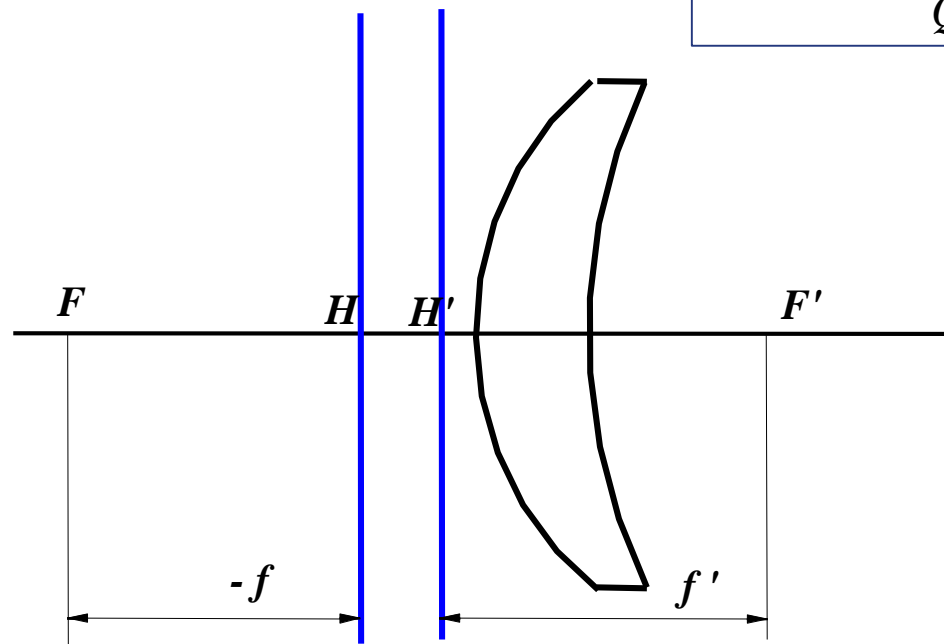
像方主面在物
方主面的右方

$$Q = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1 r_2}{(n-1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1 d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2 d}{Q}$$

$$a = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$





4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

4. 双凹透镜

$$r_1 < 0, r_2 > 0。$$

$$Q > 0$$

$$f' < 0$$

发散透镜

$$l_H = \frac{-r_1 d}{Q} > 0$$

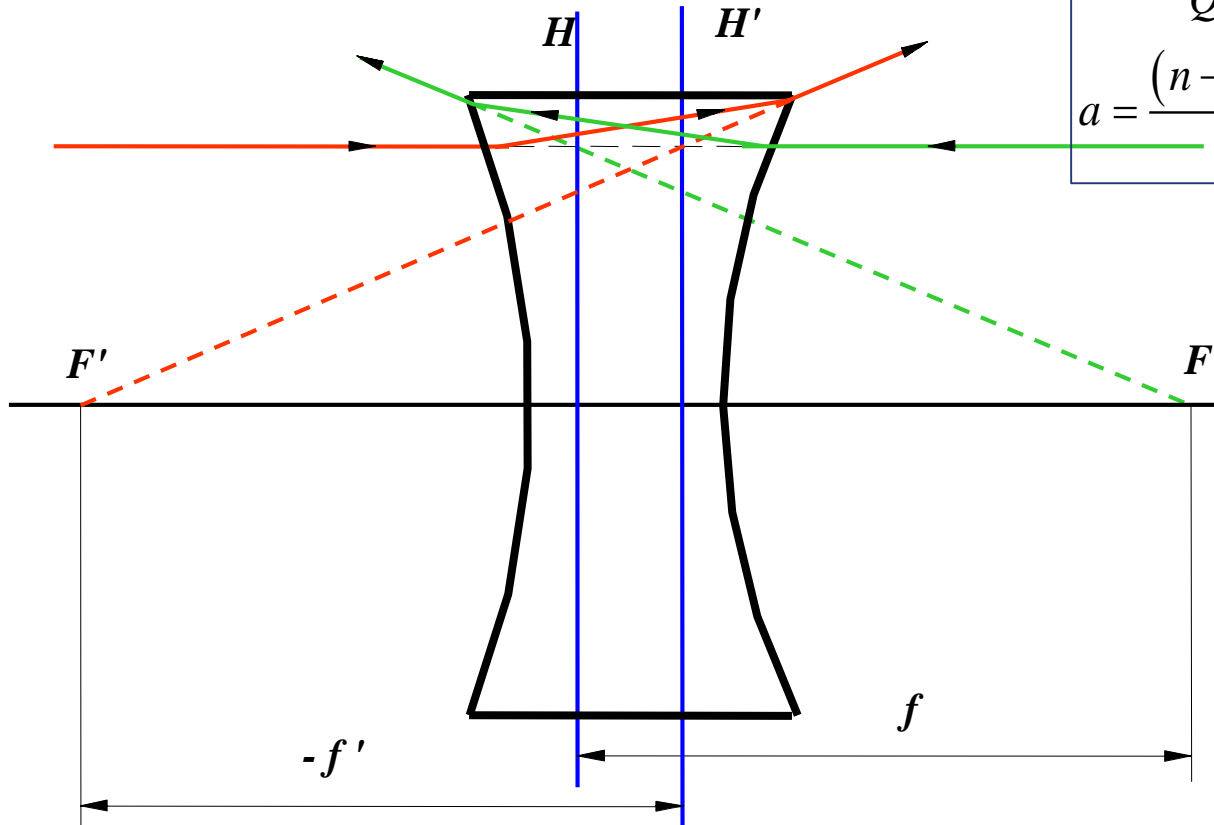
物方主点
在右侧

$$l'_H = \frac{-r_2 d}{Q} < 0$$

像方主点
在左侧

$$a > 0$$

像方主面在物
方主面的右方



$$Q = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1 r_2}{(n-1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1 d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2 d}{Q}$$

$$a = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$



4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

5. 平凹透镜 $r_1 = \infty, r_2 > 0$ 。

$$Q < 0$$

$$f' = \frac{-r_2}{n-1} < 0 \quad \text{发散透镜}$$

$$l_H = \frac{d}{n} > 0 \quad \text{物方主点在原点右侧}$$

$$l'_H = 0 \quad \text{像方主点在原点}$$

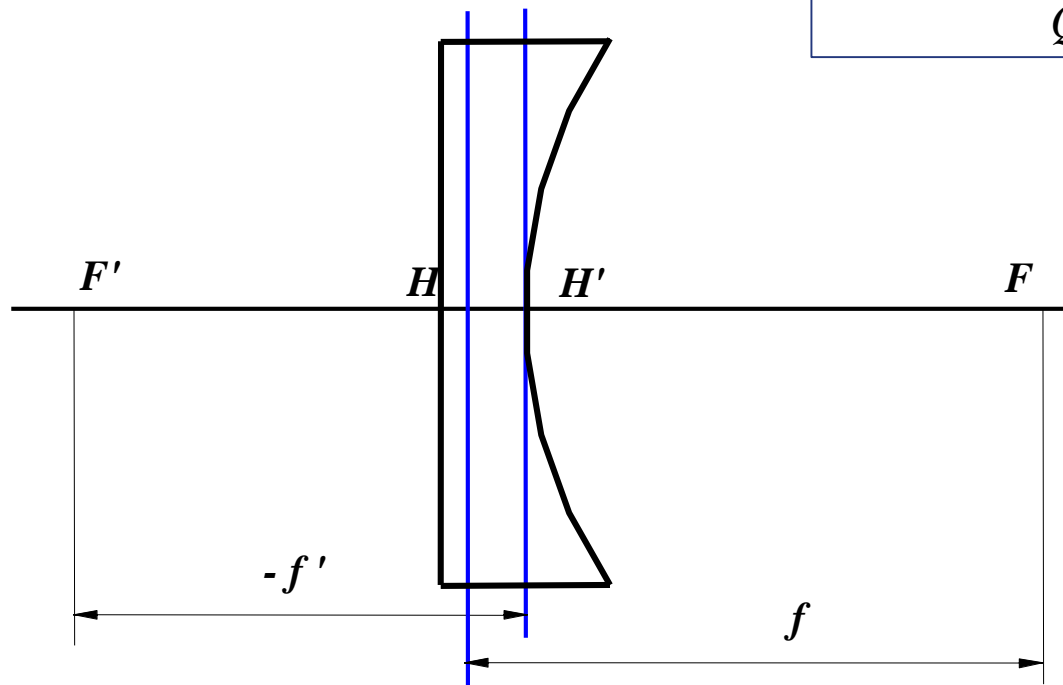
$$a = \frac{n-1}{n} d > 0 \quad \text{像方主面在物方主面的右方}$$

$$Q = n(r_2 - r_1) + (n-1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2d}{Q}$$

$$a = \frac{(n-1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$





4.6 透镜的理想模型

三. 各种透镜基点（面）位置分析

6. 负弯月形透镜 $0 < r_2 < r_1$

当: $Q < 0$ 即: $d < \frac{n(r_1 - r_2)}{n - 1}$ (实用厚度)

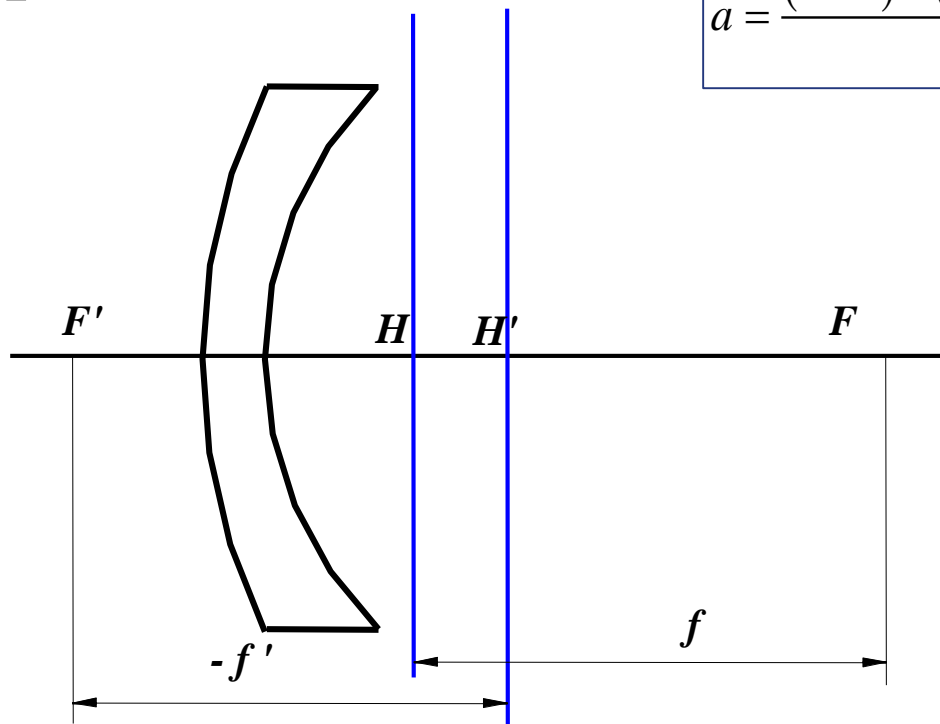
$$\left\{ \begin{array}{ll} f' < 0 & \text{发散透镜} \\ l_H = \frac{-r_1 d}{Q} > 0 & \text{物方主点在原点右侧} \\ l'_H = \frac{-r_2 d}{nQ} > 0 & \text{像方主点在原点右侧} \\ a > 0 & \text{像方主面在物方主面的右方} \end{array} \right.$$

$$Q = n(r_2 - r_1) + (n - 1)d$$

$$f' = -f = \frac{nr_1 r_2}{(n - 1)Q}$$

$$l_H = \frac{-r_1 d}{Q}; \quad l'_H = \frac{-r_2 d}{Q}$$

$$a = \frac{(n - 1)d(r_2 - r_1 + d)}{Q}$$





4.6 透镜的理想模型

四. 薄透镜

绝大部分实用的透镜，其厚度与球面半径相比很小，略去厚度不会引起成像结果的实质性变化，此时假设透镜的厚度 d 为零，称为**薄透镜**，即 $d \ll r$ 。

透镜焦距公式：

$$f' = -f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]}$$

可化为：

$$f' = \frac{1}{(n-1)\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)}{n} \frac{d}{r_1r_2}\right]} \approx \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

高斯公式：

$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$$



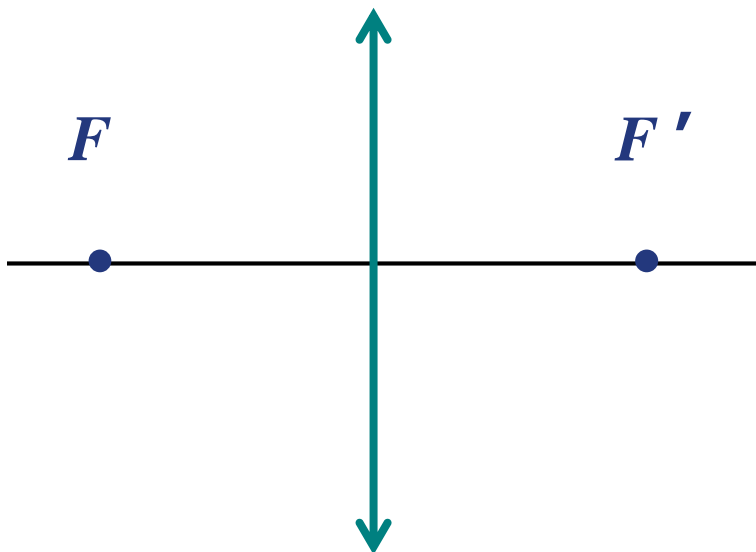
$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} = \Phi$$



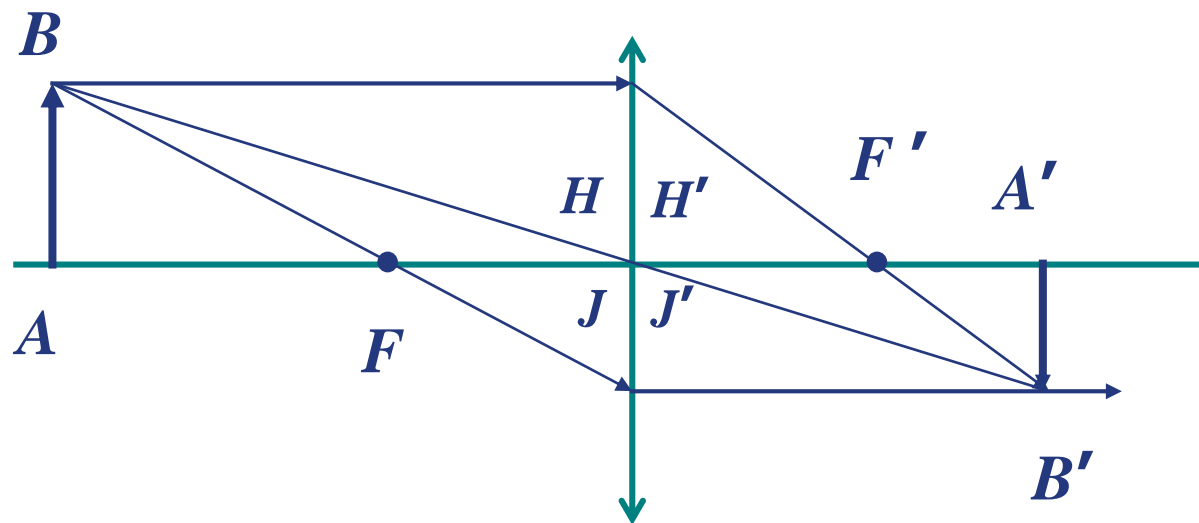
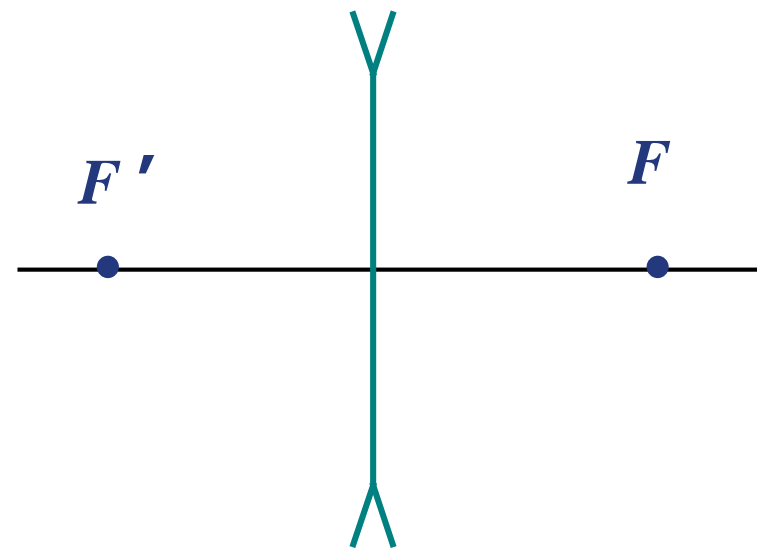
4.6 透镜的理想模型

四. 薄透镜

正薄透镜



负薄透镜





第四章 理想光学系统

实际光学系统只能在近轴区成完善像，如果某光学系统在任意大的空间总以任意宽的光束都成完善像，则称为理想光学系统。

主要内容

- 4.1 理想光学系统与共线成像理论
- 4.2 理想光学系统的基点和基面
- 4.3 理想光学系统的物像关系
- 4.4 理想光学系统的作图方法
- 4.5 理想光学系统的组合
- 4.6 透镜的理想模型

课后作业：第四章习题 5, 17, 27, 上交时间10月8日



第四章 小结

★ 理想光学系统

- 理想光学系统定义
- 成像性质

基点和基面

- 焦点与焦平面
- 主点与主平面
- 共轴系统的基点和基面

物像关系

★

- 基本概念
- 牛顿公式与高斯公式
- 焦距、放大率
- 光焦度、节点

第四章 理想光学系统

透镜模型

- 单透镜
- 单透镜的基点与基面
- 透镜基点位置分析
- ★ 薄透镜

系统组合

- 光组组合问题
- 焦点位置和焦距公式
- 主点位置与放大率
- ★ 正切算法

作图方法

★

- 图解方法
- 图解实例
- 图解练习