

1. 理想光学系统

由之前内容可知当物体通过折射球面成像时，除位于近轴区内的物体外，均不能成完善像。但近轴区的成像范围和光束宽度均很小，约束较大

如果能把近轴光学系统成完善像的范围扩大到任意空间，即空间任意大的物体以任意宽的光束通过光学系统时均能成完善像

则这样的光学系统成为理想光学系统

1. 理想光学系统

理想光学系统

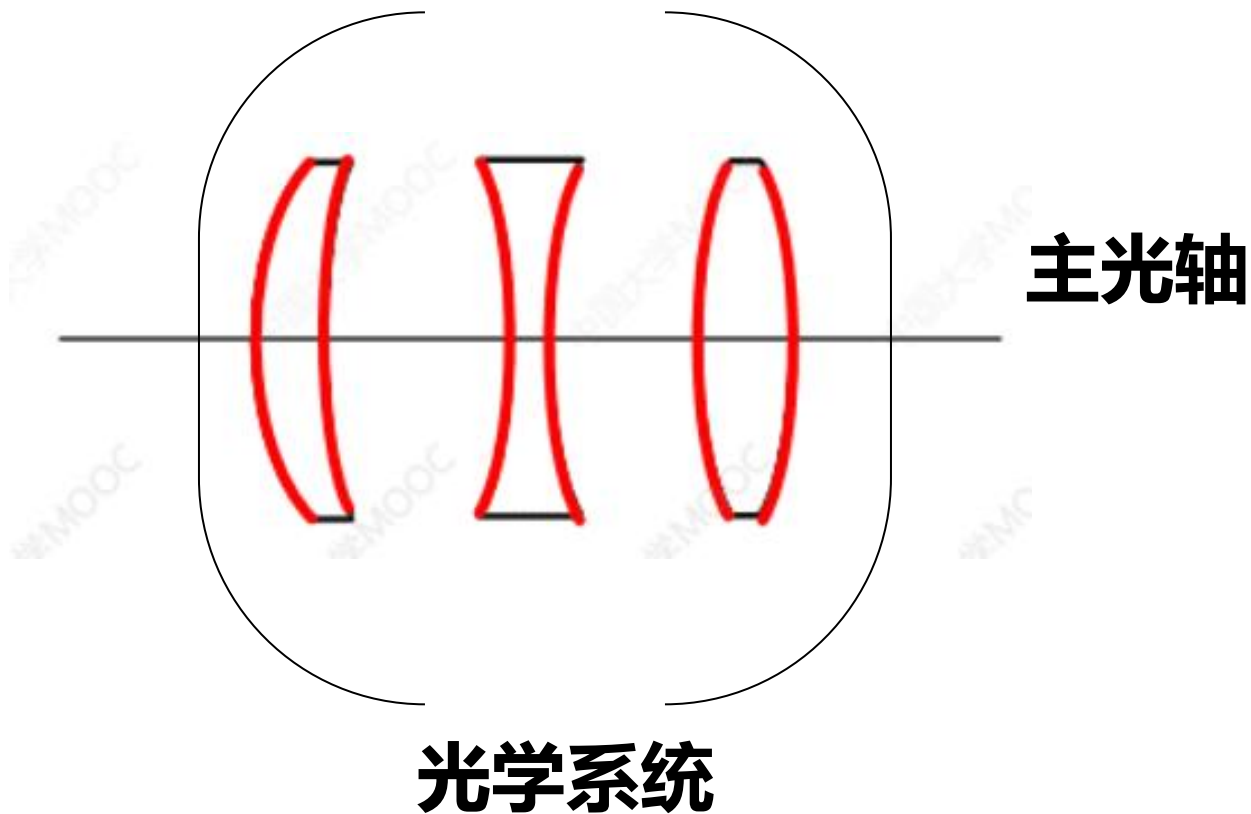
能够对**任意宽空间内的任意点**以**任意宽光束**成完善像的系统。

- ▲ 它是一个完全的理想模型。
 - ▲ 研究它的意义在于能够比较实际光学系统的像质。
 - ▲ 成像符合：**点对应点，直线对应直线，平面对应平面**成像原则的系统。
- 点对应点：**物空间的每一点，在像空间必有一个点与之对应，且只有一点与之对应，这两个对应点称为物像空间的共轭点

2. 共轴球面理想光学系统

- 分析共轴球面系统的成像问题：系统复杂时，对各个球面用逐次成像法显然是不方便的。
- 幸好我们更关注一个物体的**最终成像**。

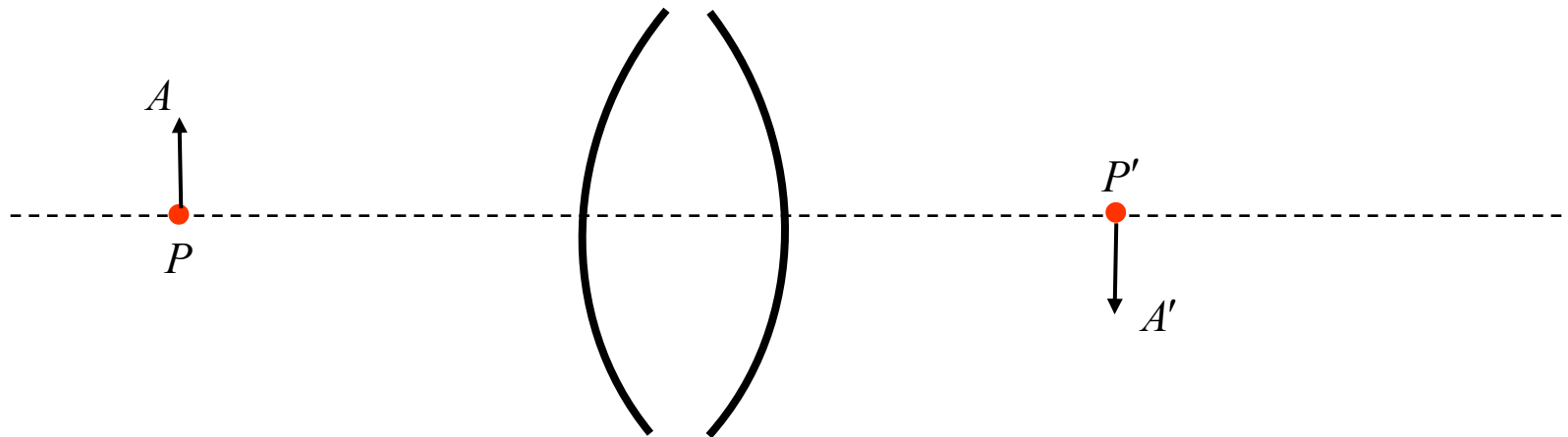
2. 共轴球面理想光学系统



2. 共轴球面理想光学系统

成像特征

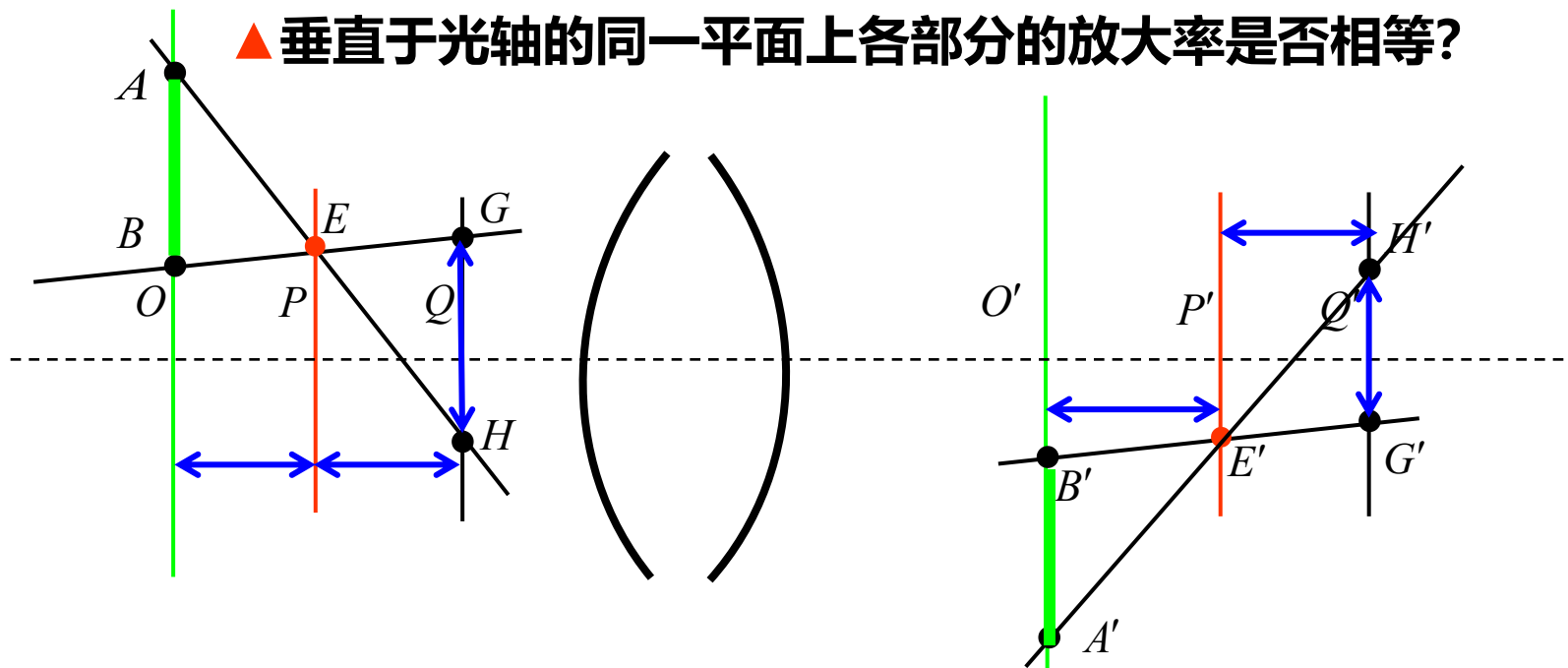
- ▲ 光轴上的物点一定成像于光轴上。
- ▲ 垂轴的物平面，像面也一定垂轴。
- ▲ 垂直于光轴的同一直一平面上各部分的放大率是否相等？



2. 共轴球面理想光学系统

成像特征

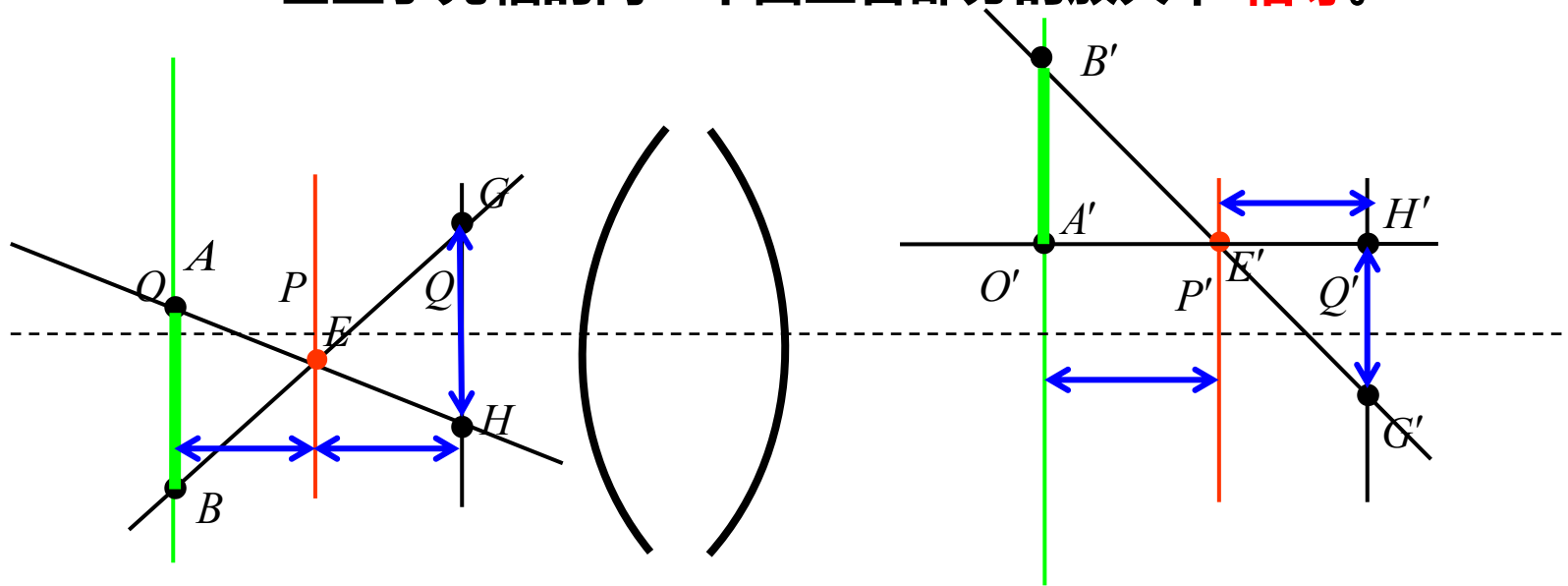
- ▲ 光轴上的物点一定成像于光轴上。
- ▲ 垂轴的物平面，像面也一定垂轴。
- ▲ 垂直于光轴的同一直平面上各部分的放大率是否相等？



2. 共轴球面理想光学系统

成像特征

- ▲ 光轴上的物点一定成像于光轴上。
- ▲ 垂轴的物平面，像面也一定垂轴。
- ▲ 垂直于光轴的同一平面上各部分的放大率 **相等**。



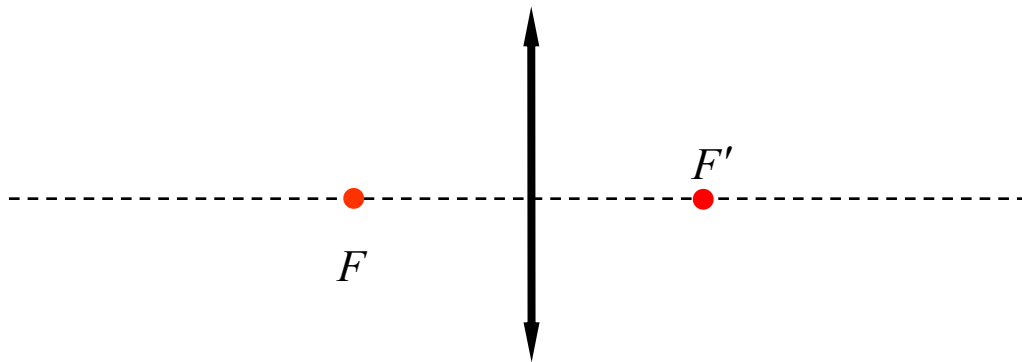
2. 共轴球面理想光学系统

▲当系统的物像空间符合理想成像关系时，一般来说物像并不相似（为什么？），这并不利于人们观察实际物体的情况。

因此，实际中我们总是取垂直于光轴的共轭面。

2. 共轴球面理想光学系统

我们是怎么画出一个光学系统的呢？



为何一个系统就简化为如图所示的透镜了呢？

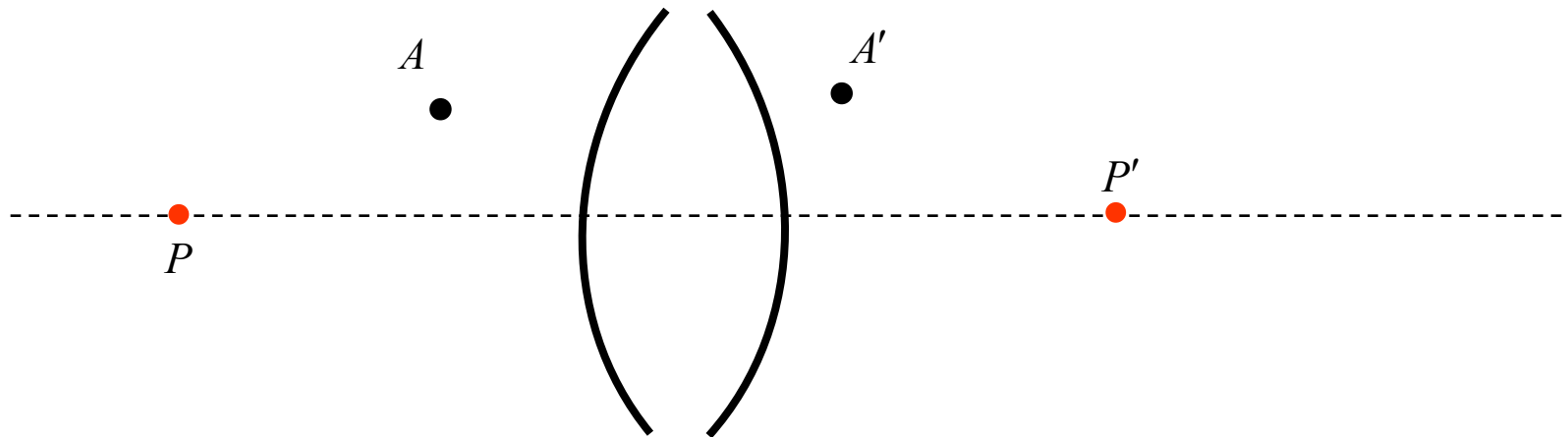
3. 基点基面

基点

任何一对共轭点。 **三个特殊共轭点：焦点、主点、节点。**

基面

任何一对共轭面。



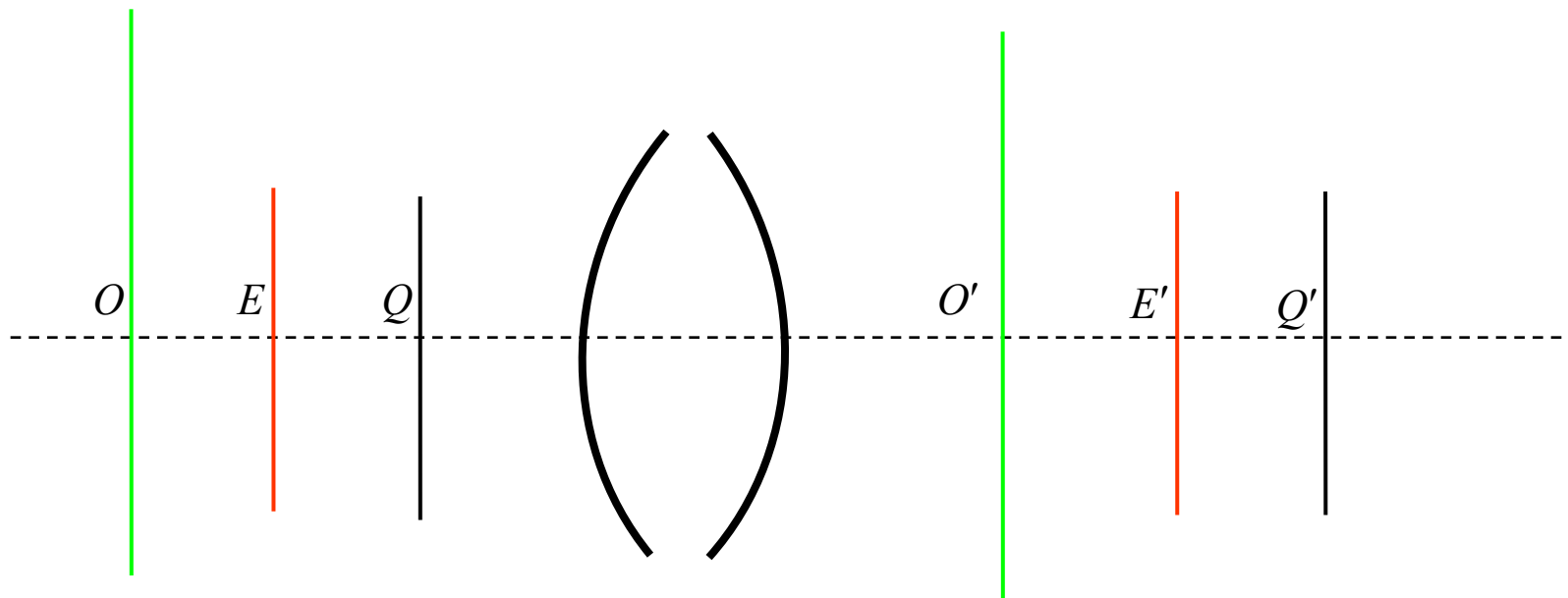
3. 基点基面

基点

任何一对共轭点。焦点、主点、节点。

基面

任何一对共轭面。焦平面、主平面、节平面。

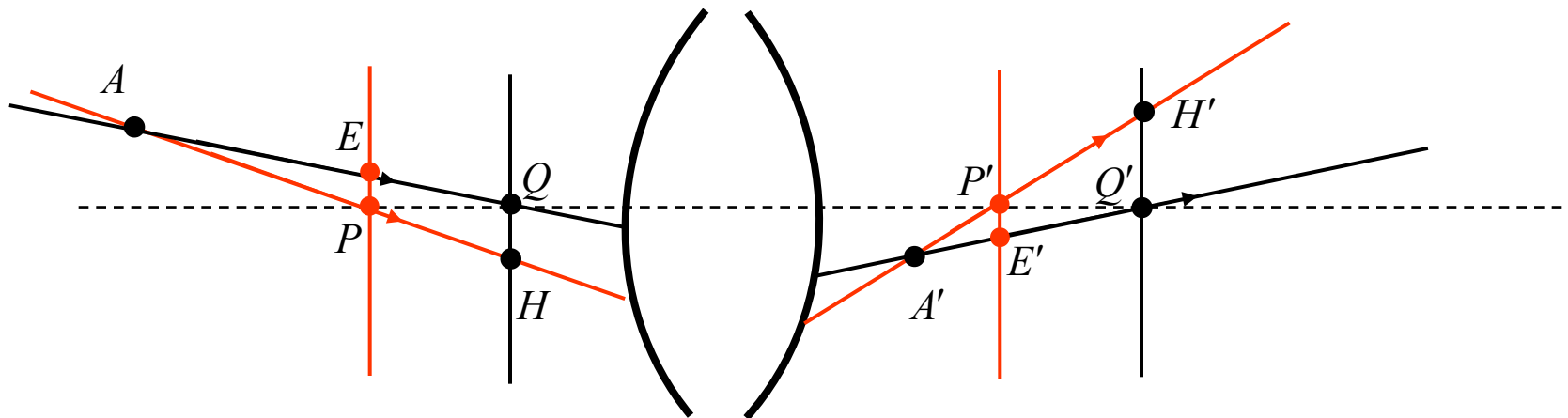


3. 基点基面

基点基面的作用

已知光学系统的基点和基面可以确定一切物点的像点

- ▲ 已知光学系统的**两对共轭面**的位置及放大倍率。
- ▲ 已知光学系统的**两对共轭点**，**一对共轭面**的位置及放大倍率。



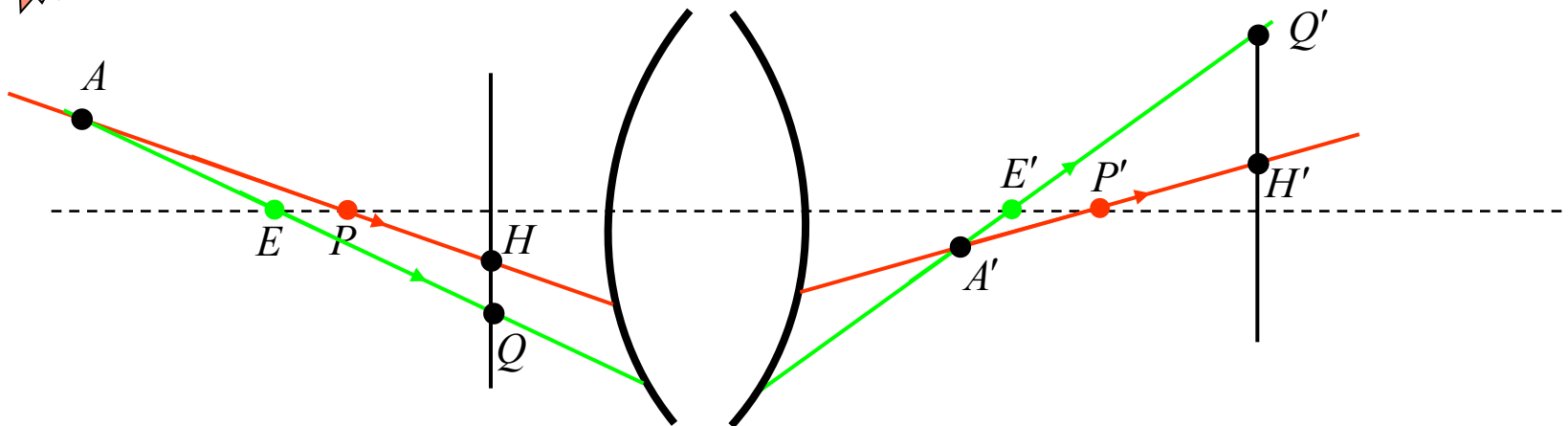
3. 基点基面

基点基面的作用

已知光学系统的基点和基面可以确定一切物点的像点

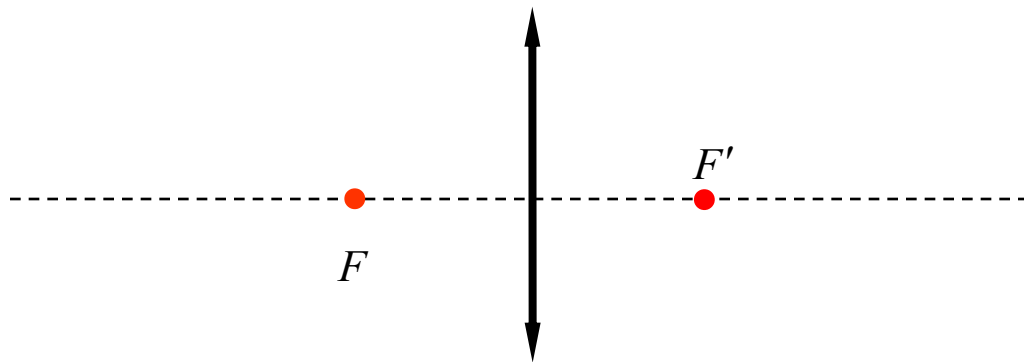
▲ 已知光学系统的**两对共轭面**的位置及放大倍率。

★ 已知光学系统的**两对共轭点**，**一对共轭面**的位置及放大倍率。



3. 基点基面

思考：两对共轭点，一对共轭面的位置及放大倍率



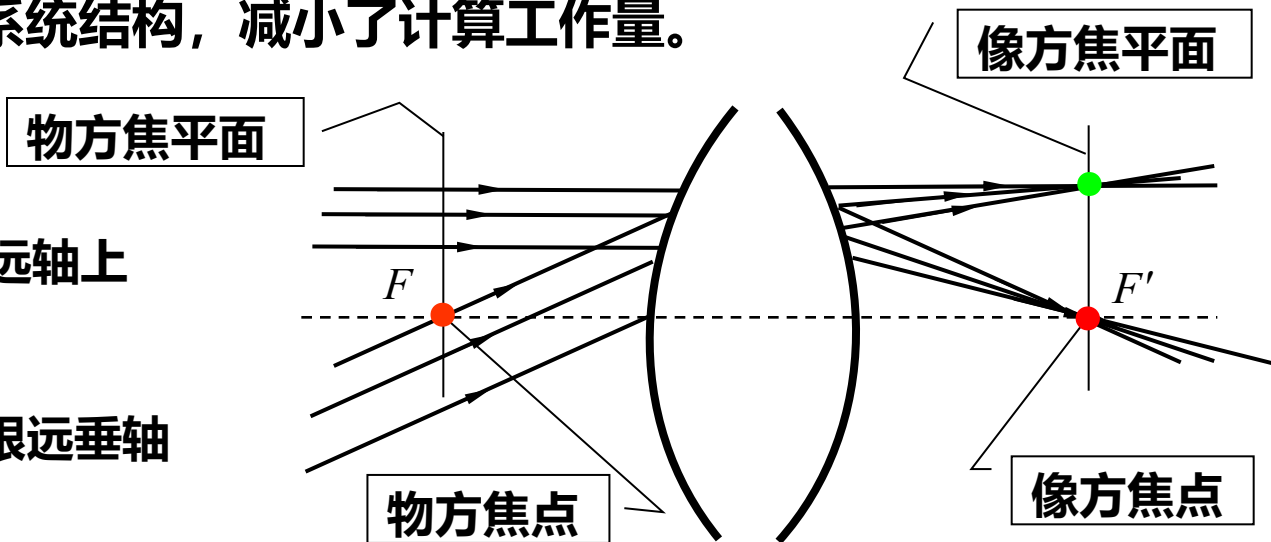
4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

问题：为何要求解基面和基点？

一对共轭面的位置及放大倍率，两对共轭点就唯一地确定了光学系统。简化了系统结构，减小了计算工作量。

焦点

- ▲ 像方焦点与物方无限远轴上点是一对共轭点。
- ▲ 像方焦平面与物方无限远垂轴平面是一对共轭面。
- ▲ 物方焦点与像方焦点不是一对共轭点。



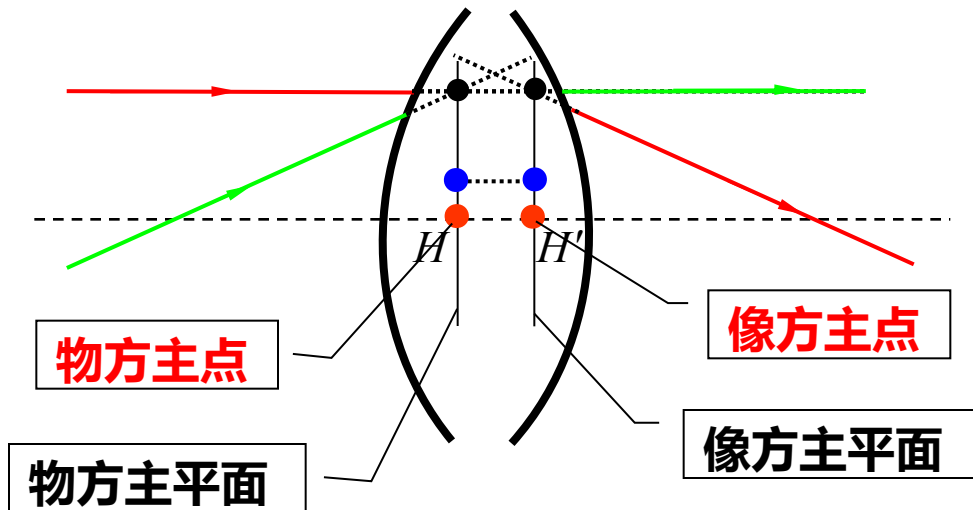
4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

问题：为何要求解基面和基点？

一对共轭面的位置及放大倍率，两对共轭点就唯一地确定了光学系统。简化了系统结构，减小了计算工作量。

主平面 $\beta = 1$ 的一对共轭面。

- ▲ 物方主平面与像方主平面是一对共轭面。
- ▲ 物方主点与像方主点是一对共轭点。
- ▲ 该共轭面的垂轴放大倍率 $\beta = 1$ 。



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

以下说法正确的是

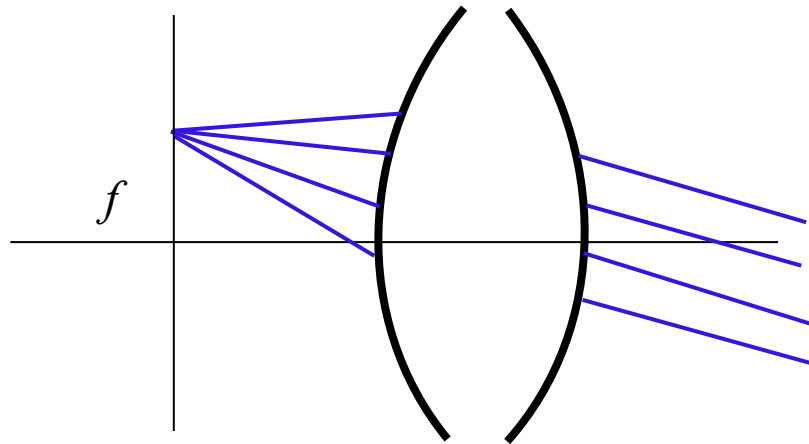
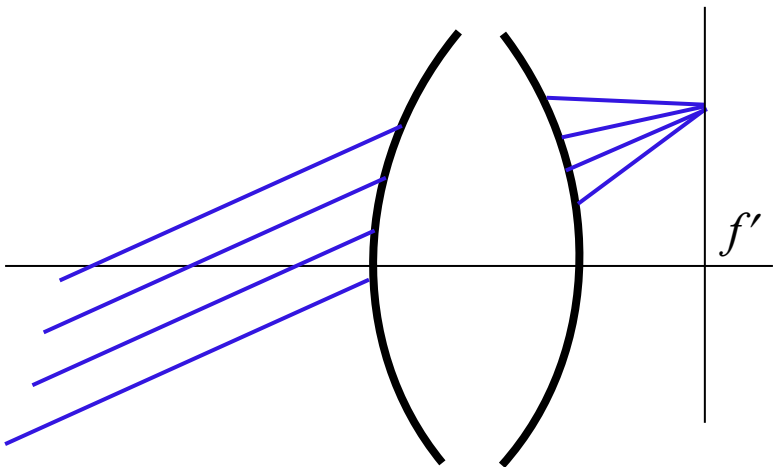
- ☐ A 像方焦点与物方无限远轴上点是一对共轭点
- ☐ B 物方焦点与像方焦点不是一对共轭点
- ☐ C 物方焦点与像方无限远轴上点是一对共轭点
- ☐ D 像方焦平面与物方无限远垂轴平面是一对共轭面

4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

焦平面

定义：过焦点垂直于光轴的平面；

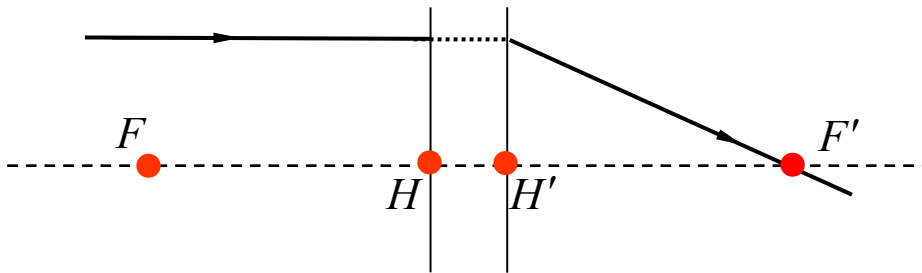
性质：无限远的轴外物点发出的平行光线经过光学系统后交于像方焦平面上的某一点；自物方焦平面上一点发出的光束经系统后成倾斜于光轴的平行光束。



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

问题：为何要求解基面和基点？

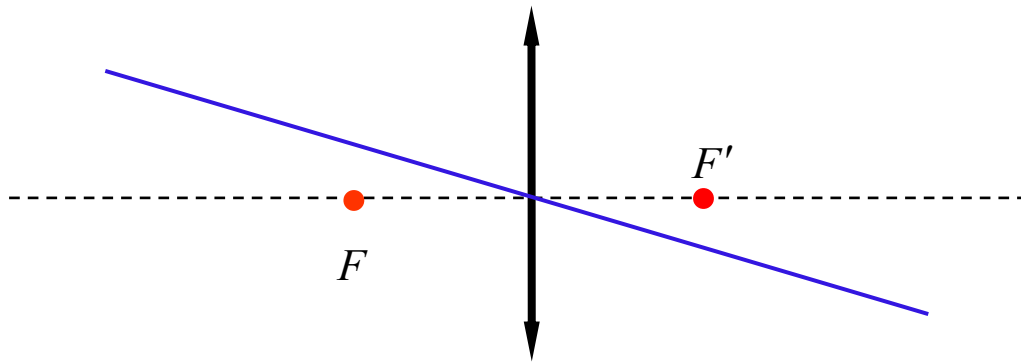
一对共轭面的位置及放大倍率，两对共轭点就唯一地确定了光学系统。简化了系统结构，减小了计算工作量。



一对主平面 两个焦点

4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

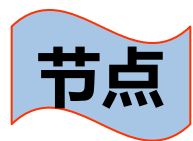
问题：为何这条光线通过透镜不偏折？



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

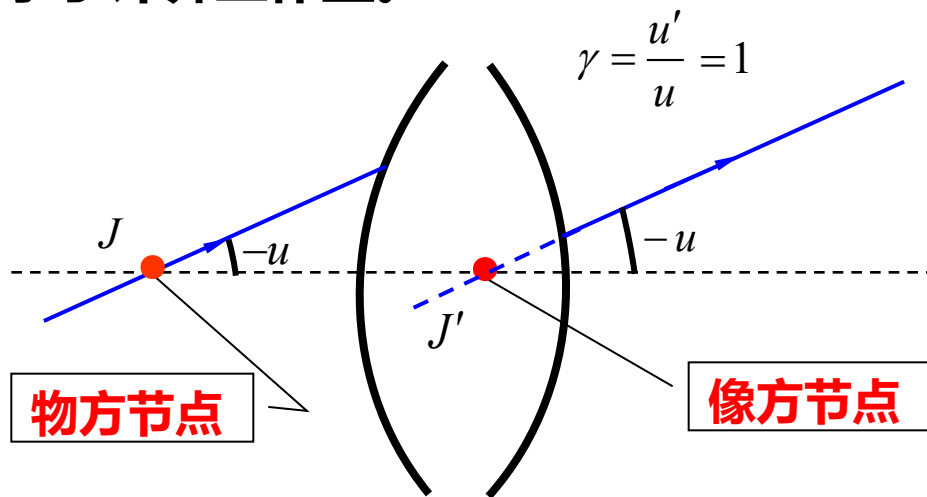
问题：为何要求解基面和基点？

一对共轭面的位置及放大倍率，两对共轭点就唯一地确定了光学系统。简化了系统结构，减小了计算工作量。



$\gamma = 1$ 的一对共轭点。

当一个成像系统的物和像空间介质不同的时候，需要额外个基点来完整描述该系统的一级性质。这一组基点叫作**节点**。



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

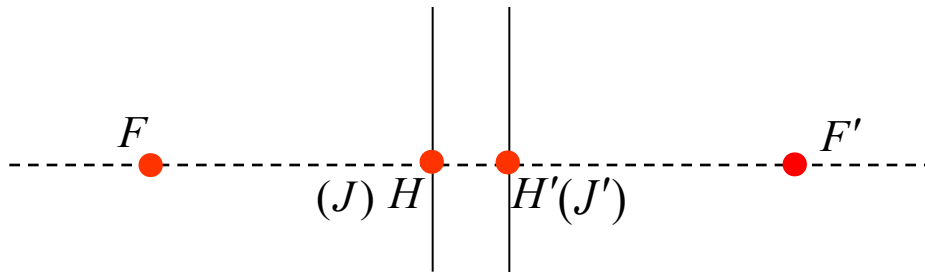
问题：为何要求解基面和基点？

一对共轭面的位置及放大倍率，两对共轭点就唯一地确定了光学系统。简化了系统结构，减小了计算工作量。

节点 $\gamma = 1$ 的一对共轭点。

▲ 过节点的光线通过系统以后传播方向不变。

▲ 系统物像空间位于同一介质中，节点与主点重合。



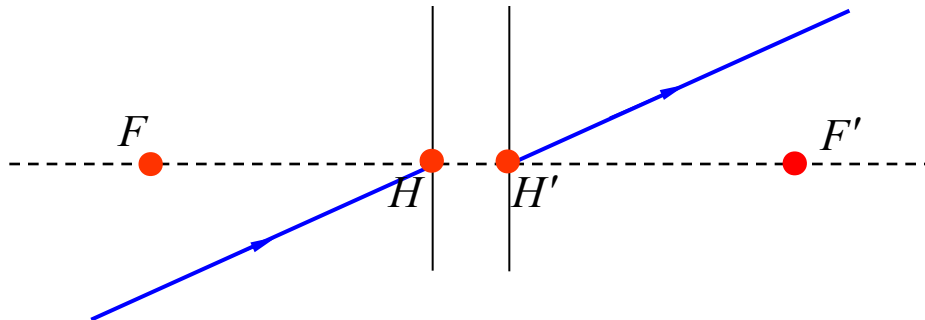
4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

问题：为何要求解基面和基点？

一对共轭面的位置及放大倍率，两对共轭点就唯一地确定了光学系统。简化了系统结构，减小了计算工作量。

节点 $\gamma = 1$ 的一对共轭点。

- ▲ 过节点的光线通过系统以后传播方向不变。
- ▲ 系统物像空间位于同一介质中，节点与主点重合。



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

主点

- 两个主点共轭 $\beta=1$
- 两主平面上的任一对等高点共轭

焦点

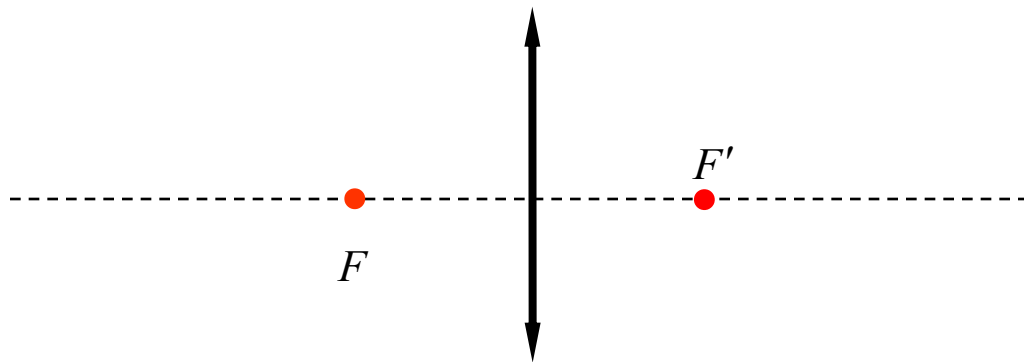
- 两焦点不共轭
- 焦点从主点量起

节点

- 两个节点共轭 $\gamma=1$
- 当成像系统的两边介质相同时，节点主点重合

4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

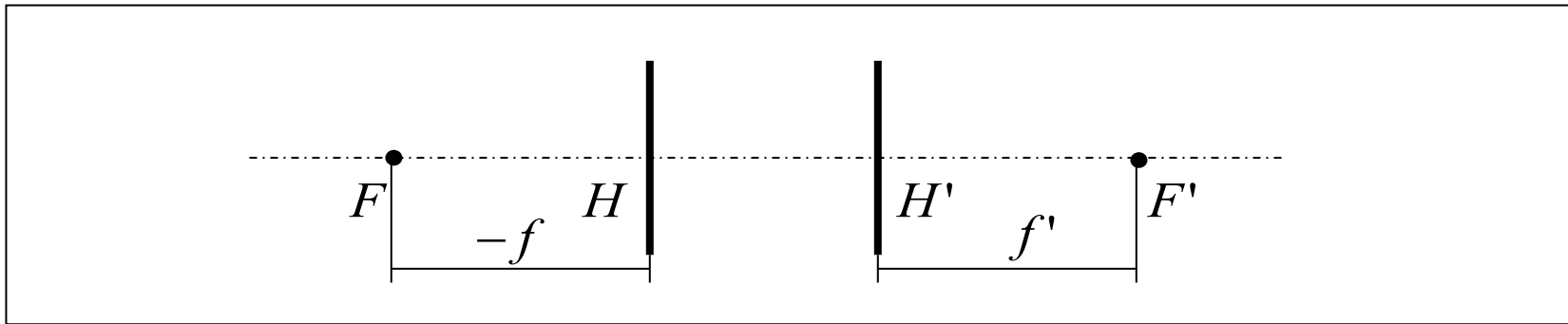
思考：这是之前学过的光学系统，现在呢？



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

由像方主点 H' 到像方焦点 F' 的距离称为像方焦距，用 f' 表示。

由物方主点 H 到物方焦点 F 的距离称为物方焦距，用 f 表示。



f 、 f' 的符号规则

f' —以 H' 为起点，计算到 F' ，由左向右为正；

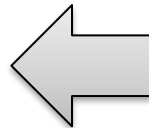
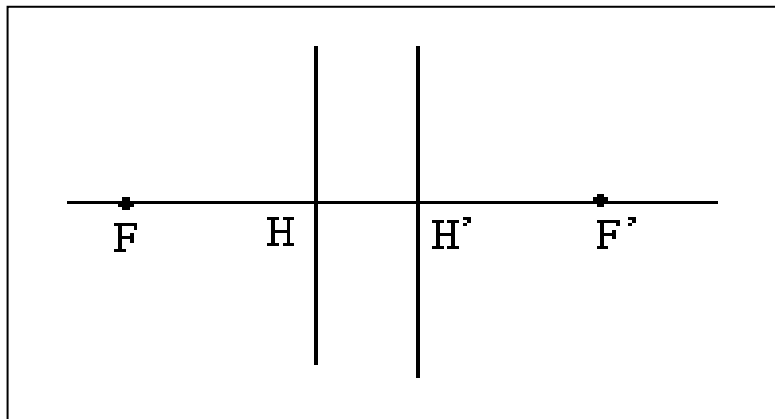
f —以 H 为起点，计算到 F ，由左向右为正。

注意：焦距的定义不是以透镜顶点或光心为起点

4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

一对主平面，加上无限远轴上物点和像方焦点 F' ，以及物方焦点 F 和无限远轴上像点这两对共轭点，就是最常用的共轴系统的基点。

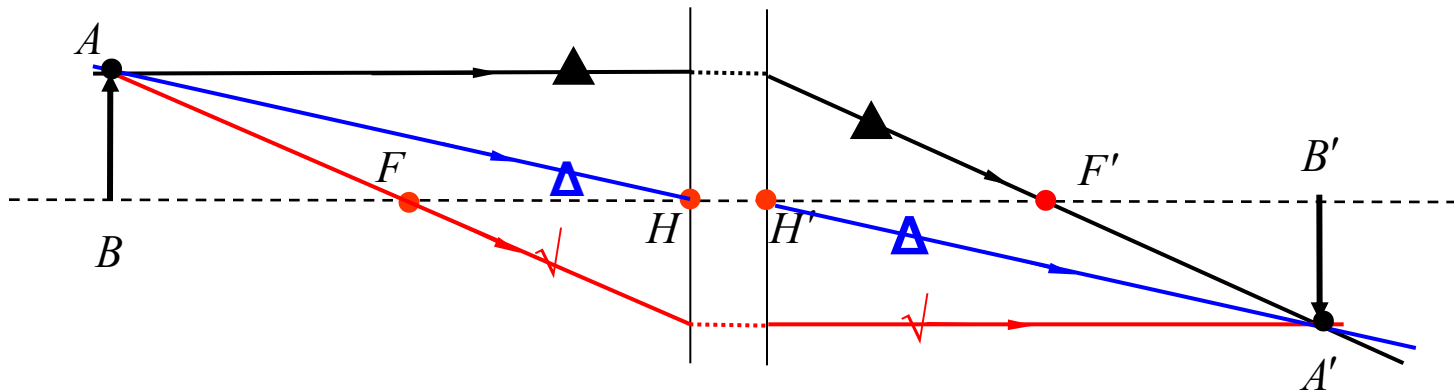
因此，如果已知一个共轴系统的一对主平面和两个焦点位置，它的成像性质就完全确定。所以，可用一对主平面和两个焦点位置来代表一个光学系统：



理想光学系统的
常用表示方式

5. 理想光学系统的物像关系

典型的光路



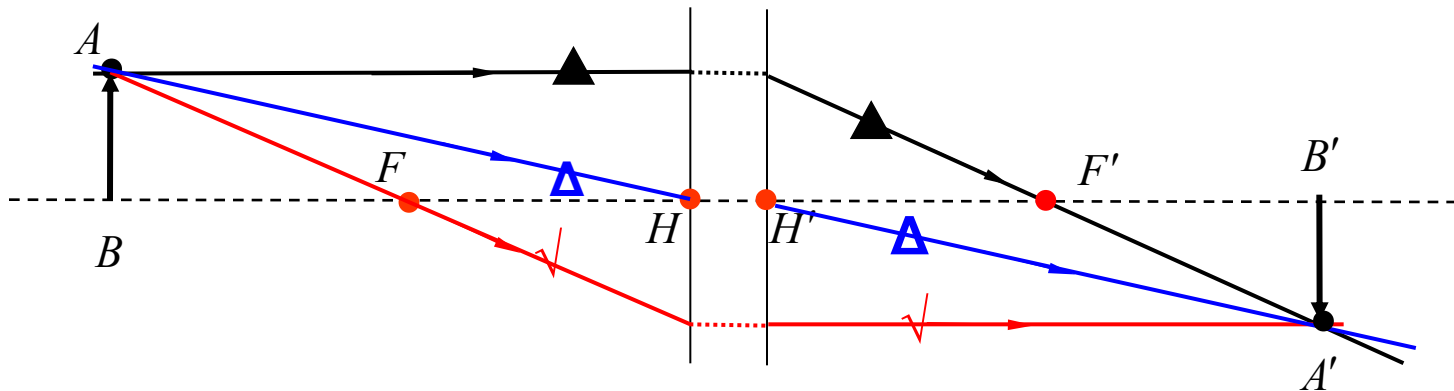
5. 理想光学系统的物像关系

▲ 总结： 物是由入射光线形成的，或发出光线的是物。

像是由出射光线形成的，或光线的会聚是像。

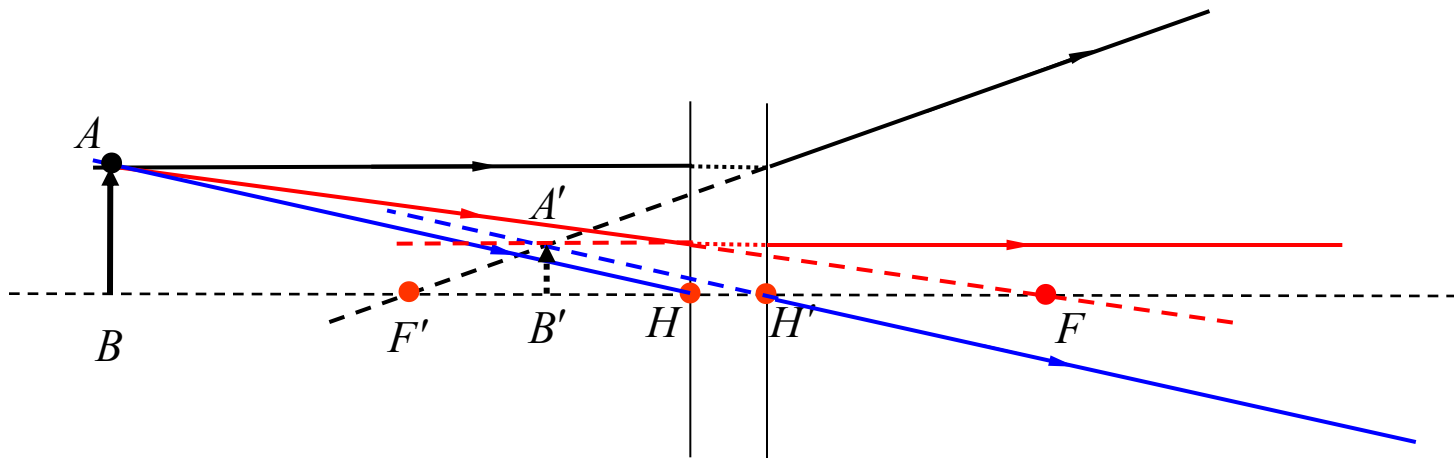
图解法

▲ 会聚光组 $f' > 0$



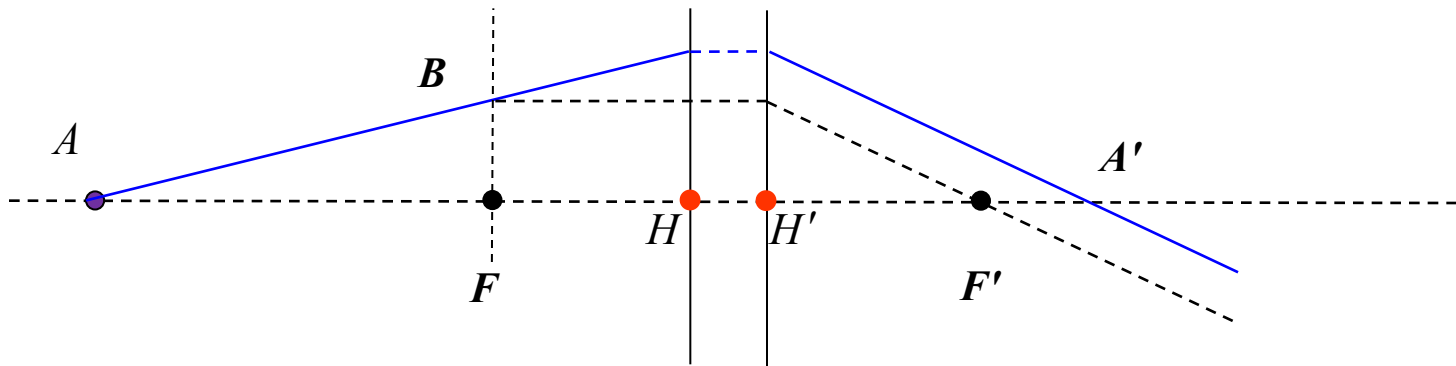
5. 理想光学系统的物像关系

▲ **发散光组** $f' < 0$



5. 理想光学系统的物像关系

例：已知系统的一对主平面，焦点，求光轴上物点的像的位置。



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

有一个无限远物点，经某一理想光学系统成像，则下面说法正确的是（）

- A、其像点必在理想光学系统的像方焦点处
- B、其像点必在理想光学系统的像方焦平面上
- C、该物点与其像点为此理想光学系统的一对共轭点
- D、该物点与像方无穷远点共轭

6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

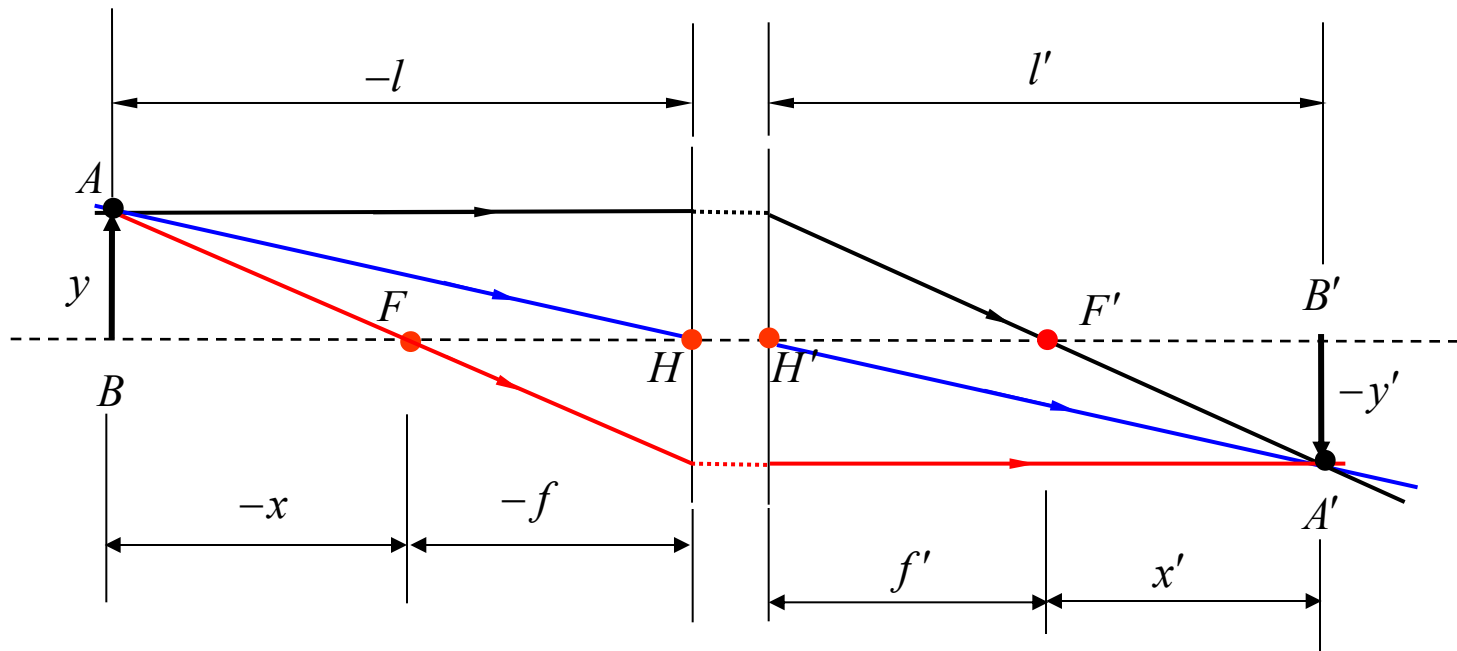
关于理想光学系统的表述，下列表述正确的是：（ ）

- A、位于光轴上的物点的共轭像点不一定在光轴上；
- B、成完善像时，物点与像点之间任意两条光路的光程相等；
- C、折射球面对轴上点以宽光束成像是完善的；
- D、已知两对共轭面的位置和放大率，则可唯一的确定物象关系；

5. 理想光学系统的物像关系

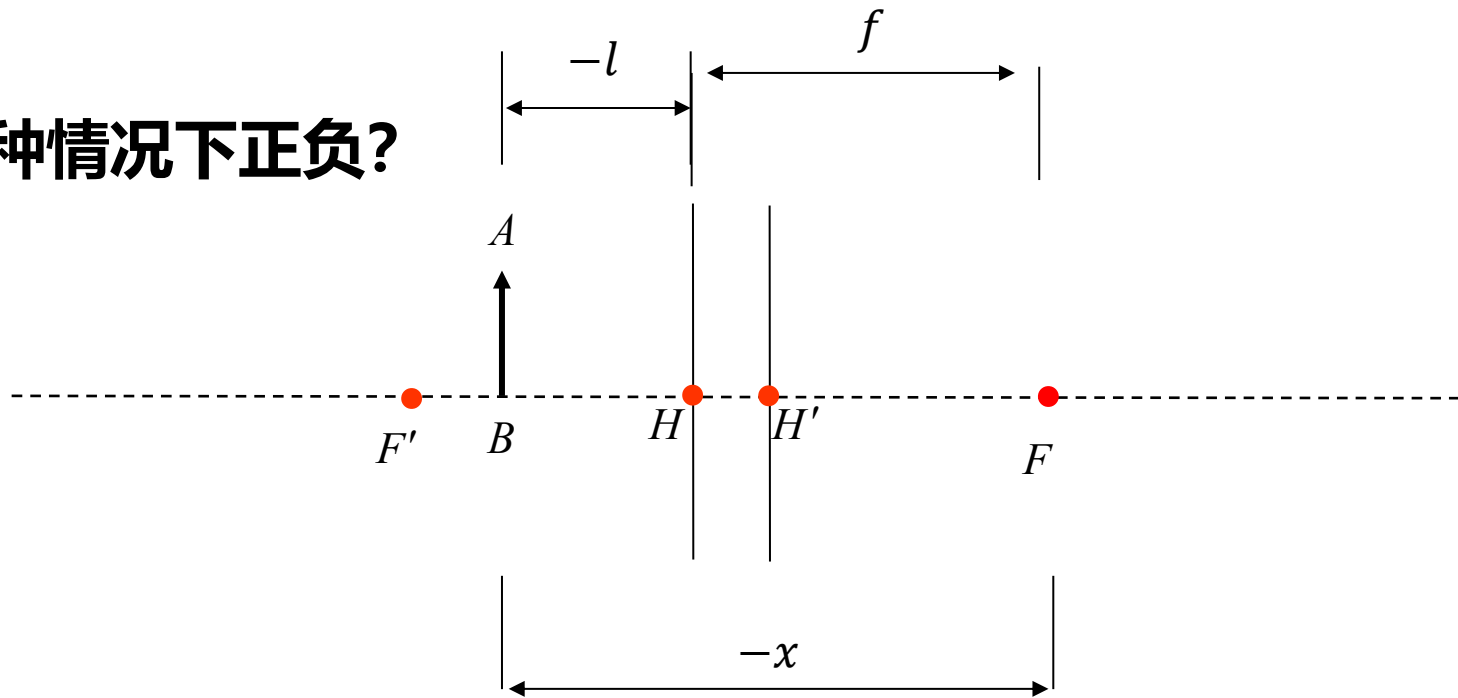
解析法

符号法则



5. 理想光学系统的物像关系

这种情况下正负?



5. 理想光学系统的物像关系

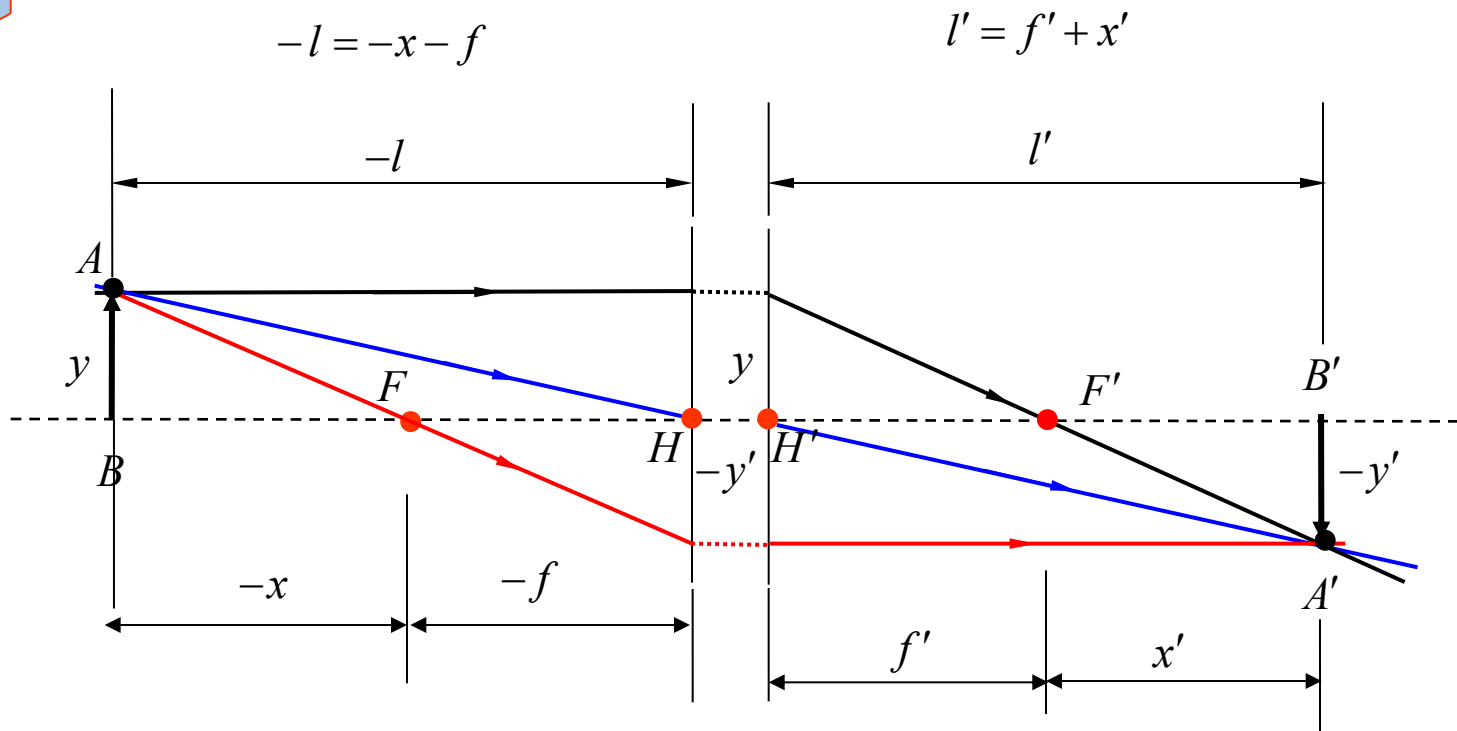
解析法

▲ 牛顿公式

$$xx' = ff'$$

▲ 高斯公式

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



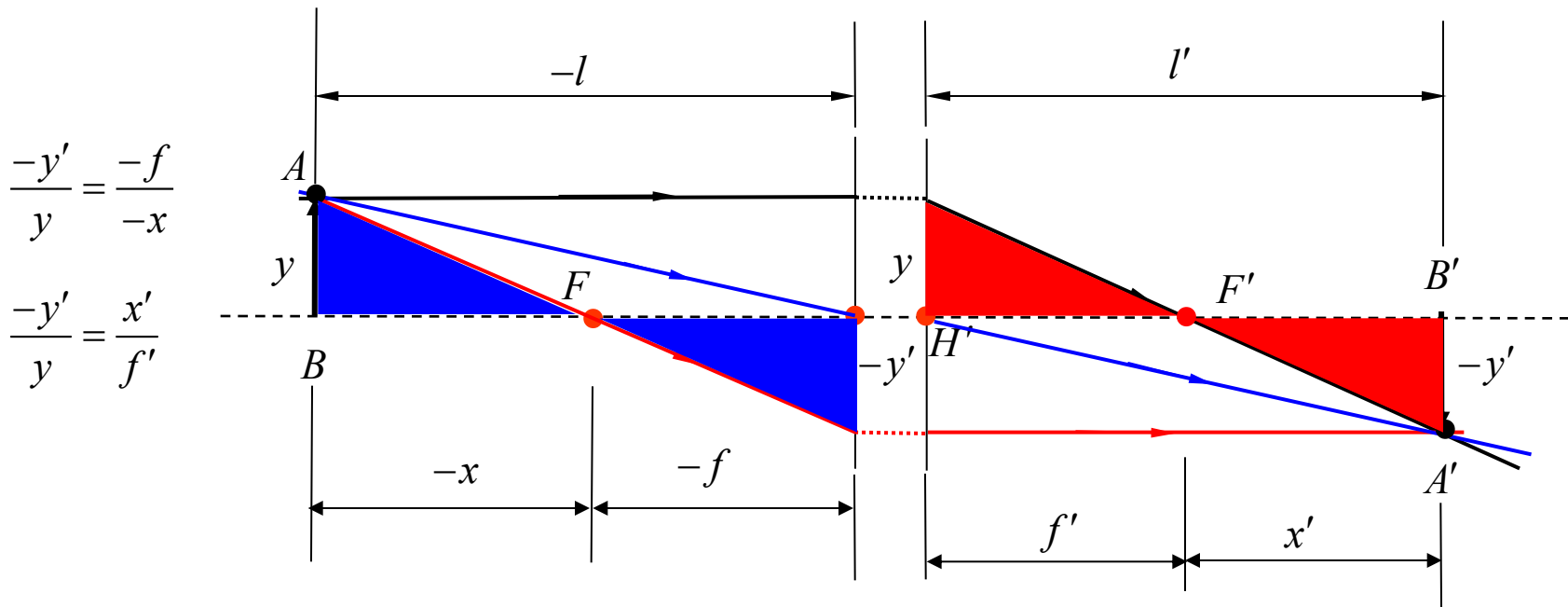
5. 理想光学系统的物像关系

▲ 牛顿公式

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

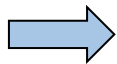


$$xx' = ff'$$

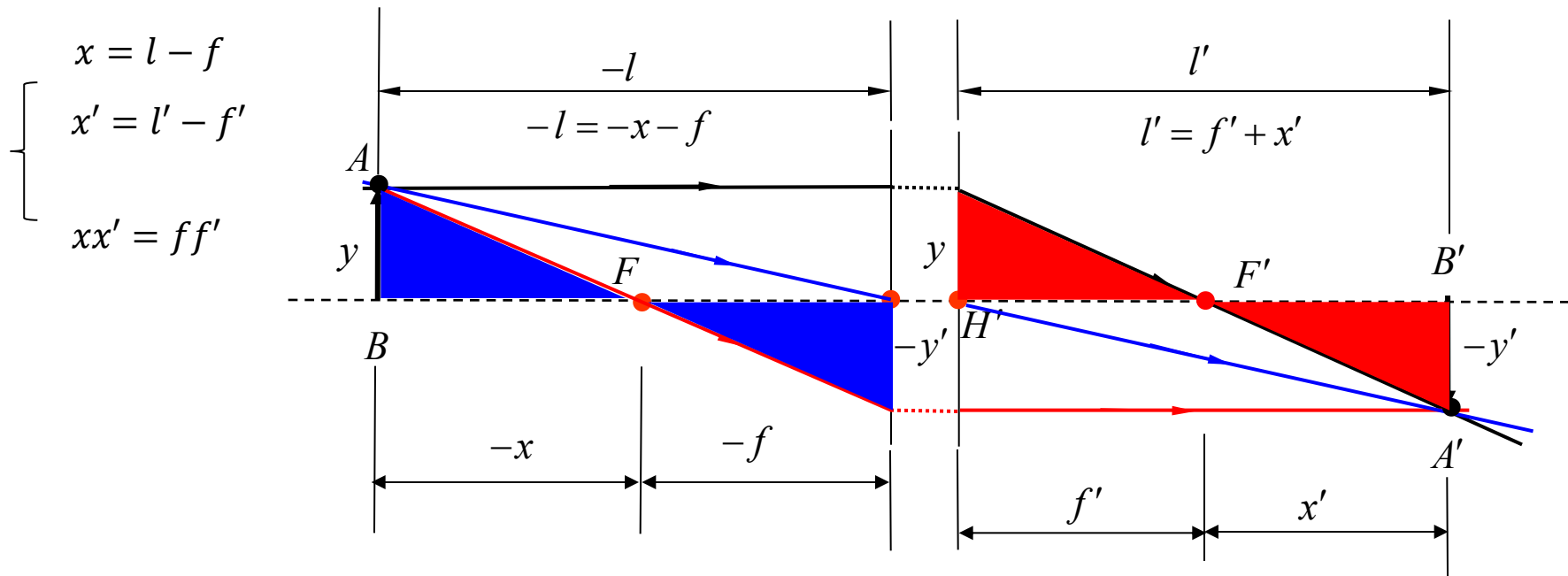


5. 理想光学系统的物像关系

▲ 高斯公式



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



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

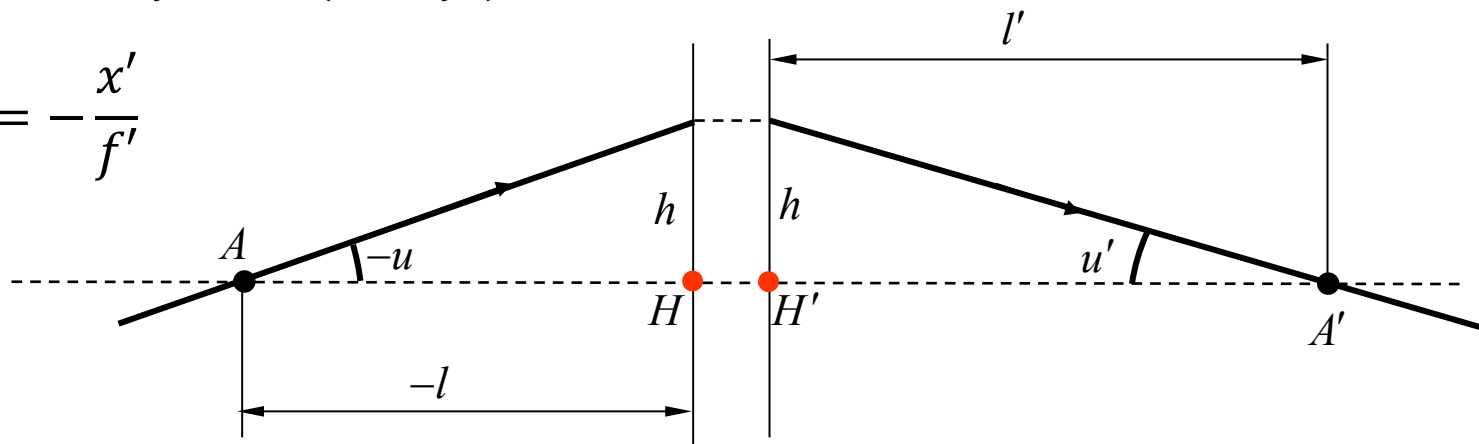
透镜的物方焦距与像方焦距相等？

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nu}{n'u'} \quad nuy = n'u'y'$$

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

$$h = lu = l'u' \quad (x + f)u = (x' + f')u' \quad yfu = -y'f'u'$$

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



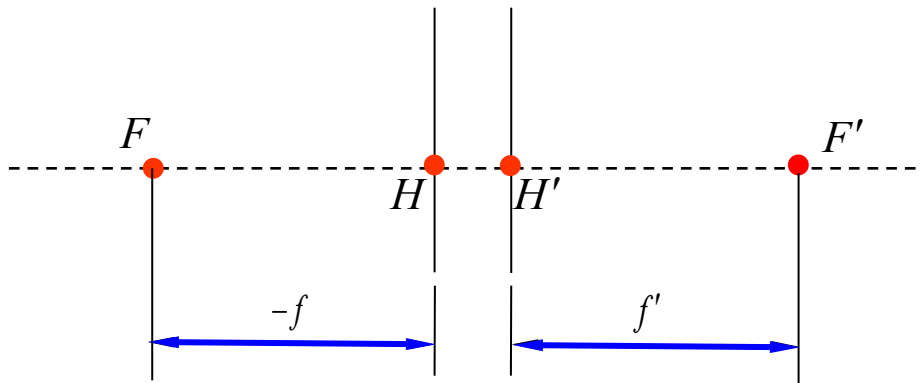
6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

透镜的物方焦距与像方焦距相等？

仅有折射面

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

$$n = n' \quad f = -f'$$



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

透镜的物方焦距与像方焦距相等？

折射面、反射面

$$\frac{f'}{f} = (-1)^{k+1} \frac{n'}{n}$$

K 为反射面的个数

1. 反射面的个数为奇数时,

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

2. 反射面的个数为偶数时,

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

6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

有一浸液物镜，物方为 $n=1.4$ 的液体，像方为空气。测得像方焦距为 100mm，则其物方焦距为：（ C ）

A. 140mm

B. 120mm

C. -140mm

D. -120mm

6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

解析法

▲ 高斯公式

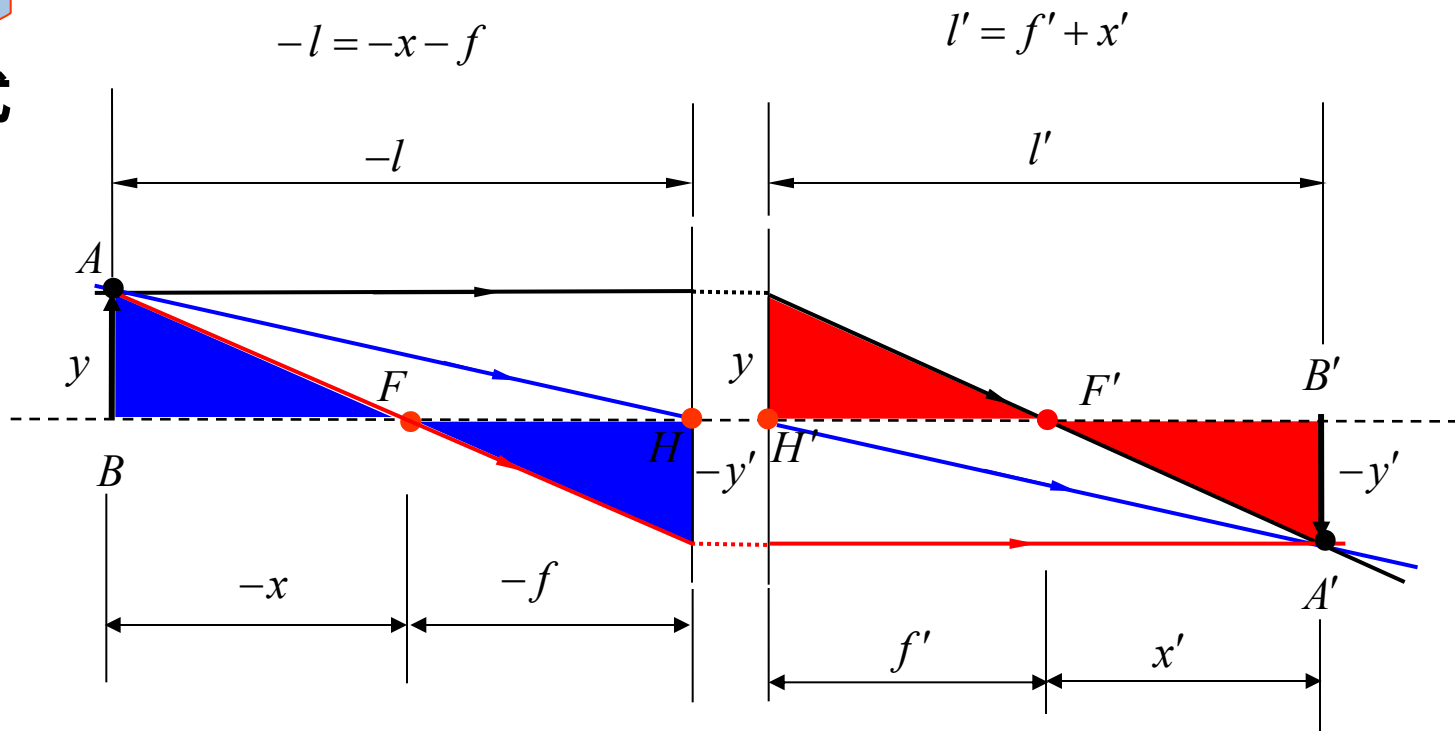
$$xx' = ff'$$

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

$$n = n'$$

$$f = -f'$$

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



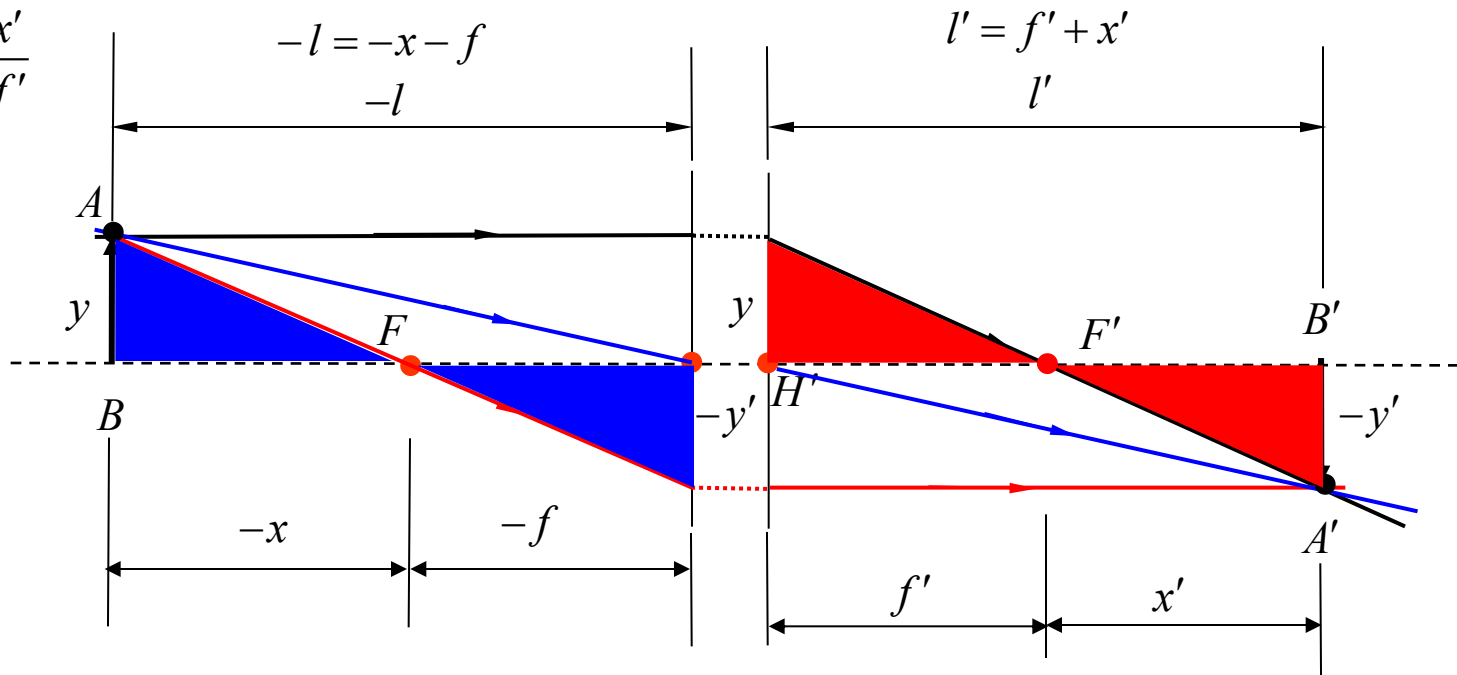
6. 理想光学系统的性质

▲ 垂轴放大倍率

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l} = -\frac{fl'}{f'l} \xrightarrow{n=n'} \boxed{\beta = \frac{l'}{l}}$$

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

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



6. 理想光学系统的性质

▲ 轴向放大倍率

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

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} = -\frac{fl'^2}{f'l^2} = -\beta^2 \cdot \frac{f'}{f}$$

$$\xrightarrow{n=n'} \alpha = \frac{l'^2}{l^2} = \beta^2$$

$$\alpha = \frac{\Delta x'}{\Delta x} = \frac{x'_2 - x'_1}{x_2 - x_1} = -\beta_1 \beta_2 \cdot \frac{f'}{f}$$

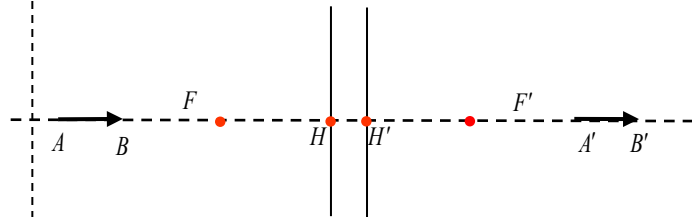
$$\alpha = \frac{\Delta l'}{\Delta l} = \frac{l'_2 - l'_1}{l_2 - l_1} = -\beta_1 \beta_2 \cdot \frac{f'}{f}$$

$$xx' = ff'$$

$$x dx' + x' dx = 0$$

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

$$\frac{f dl'}{l'^2} + \frac{f dl}{l^2} = 0$$

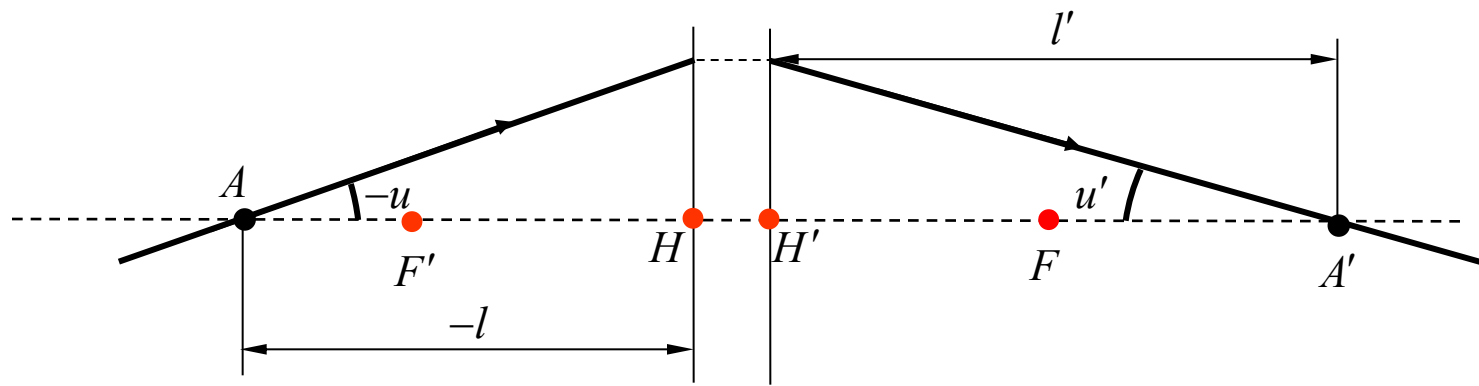


6. 理想光学系统的性质

▲ 角放大倍率 $\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{l}{l'} = -\frac{fl'}{f} \cdot \frac{f}{f'} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta}$

$$\gamma = \frac{l}{l'} = \frac{f + x}{f' + x'} = \frac{f}{x'} = \frac{x}{f'}$$

▲ 三种放大倍率的关系 $\alpha = -\beta^2 \cdot \frac{f'}{f}$ $\gamma = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta}$ $\alpha \cdot \gamma = \beta$



6. 理想光学系统的性质

$$\gamma = \frac{l}{l'} = \frac{f + x}{f' + x'} = \frac{f}{x'} = \frac{x}{f'}$$

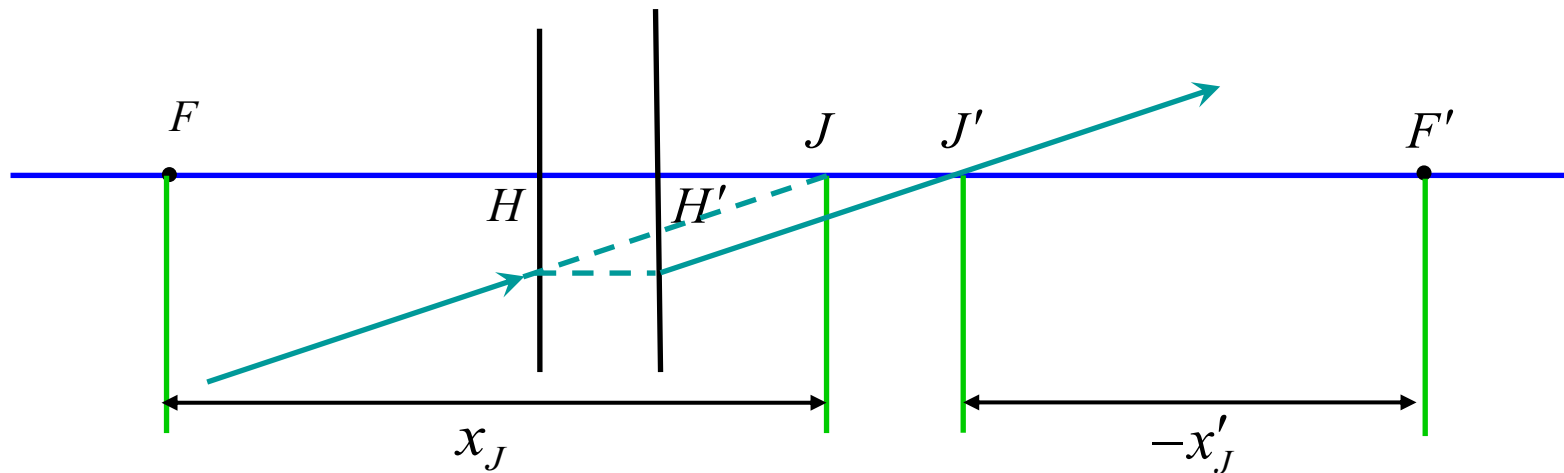
$$\gamma = 1$$

节点的定义

得

$$x_J = f'$$

$$x'_J = f$$



解析法

例：焦距20cm的薄凸透镜，一物体在其顶点左方30cm处，用两种方法求像的位置及垂轴放大率。

1) 高斯法：

$$l = -30\text{cm}$$

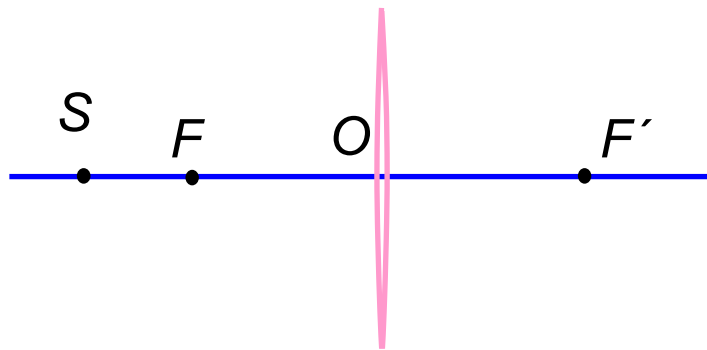
$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$$

$$\Rightarrow l' = 60\text{cm}$$

$$\beta = \frac{l'}{l}$$

$$\Rightarrow \beta = -2$$

$$-f = f' = 20\text{cm}$$



2) 牛顿法：

$$xx' = ff'$$

$$\Rightarrow x' = 40\text{cm}$$

$$x = -10\text{cm}$$

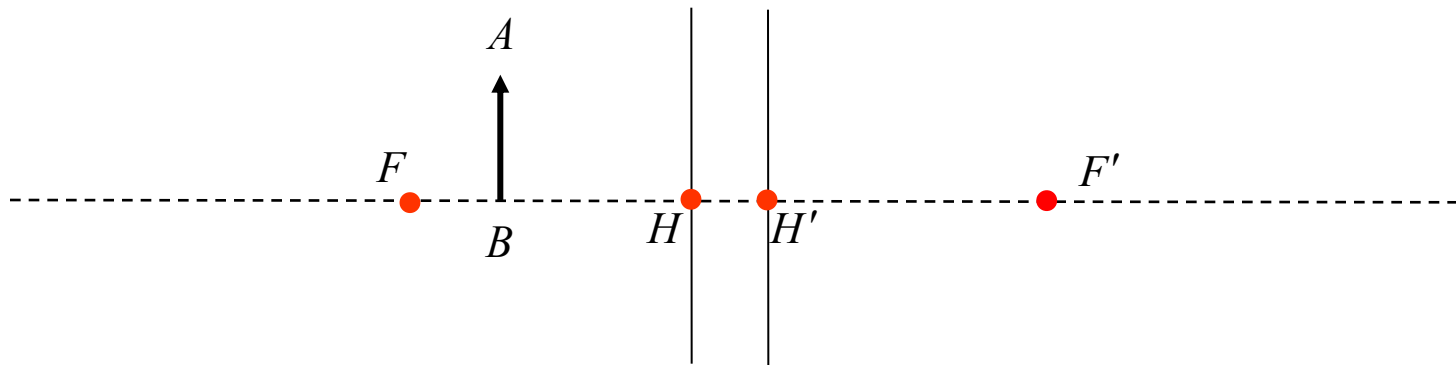
$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$$

$$\Rightarrow \beta = -2$$

作图法

▲ 会聚光组 $f' > 0$

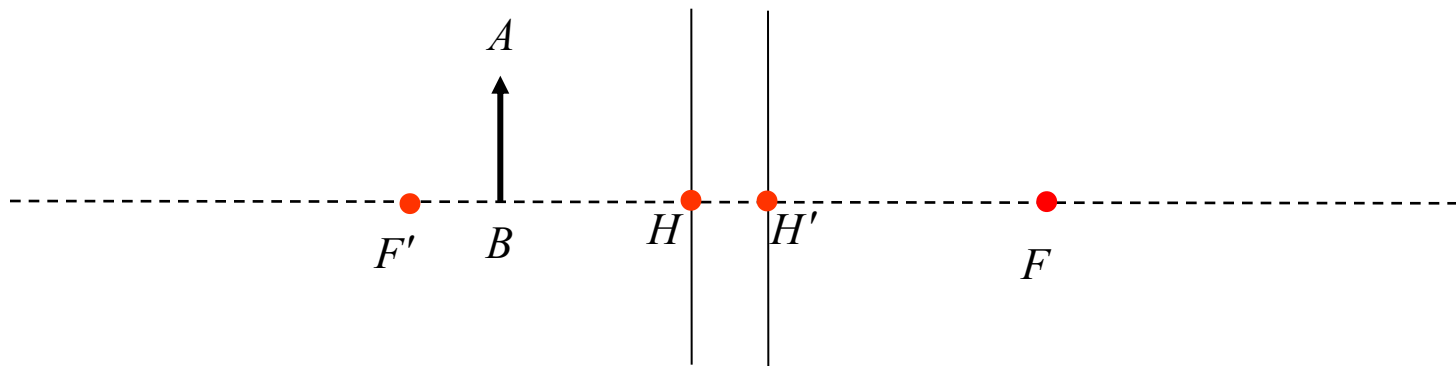
求物 AB 的像。



作图法

▲ 发散光组 $f' < 0$

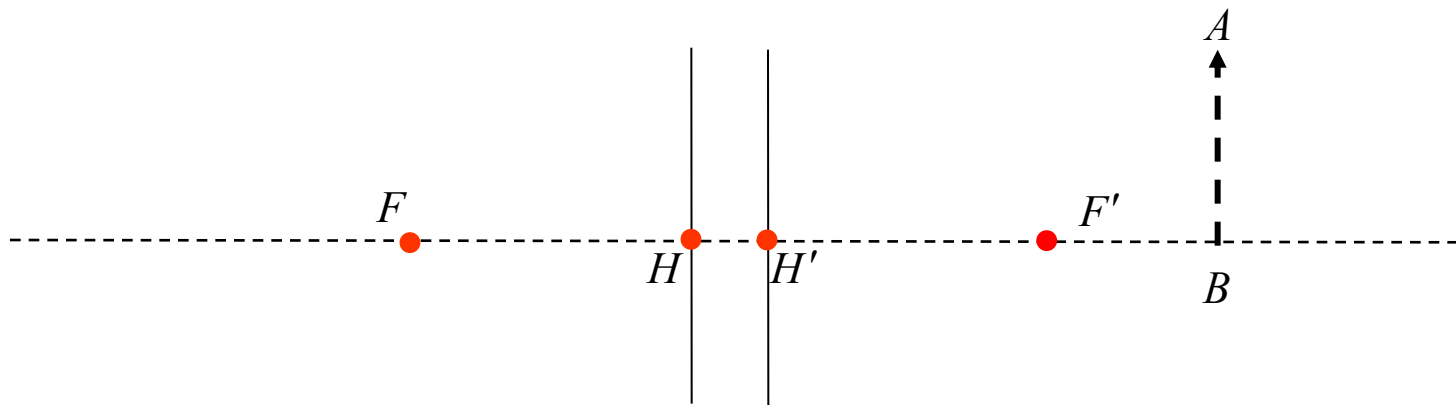
求物 AB 的像。



作图法

▲ 会聚光组 $f' > 0$

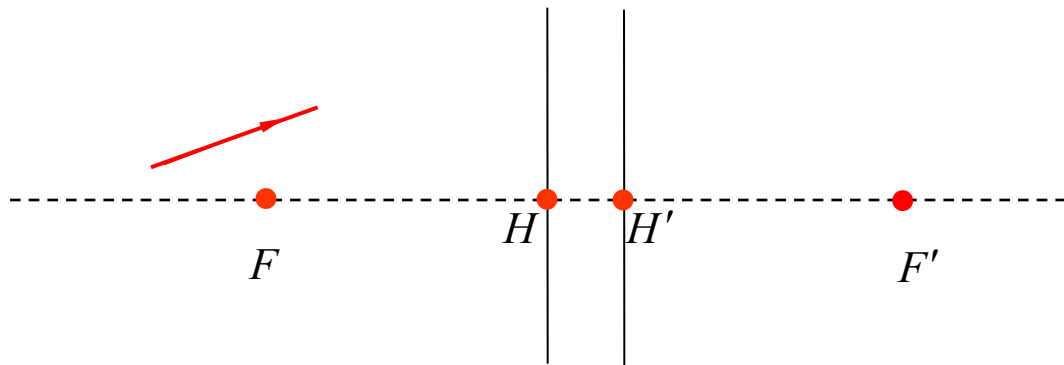
求物 AB 的像。



作图法

▲ 会聚光组 $f' > 0$

求物方光线 a 的共轭线。



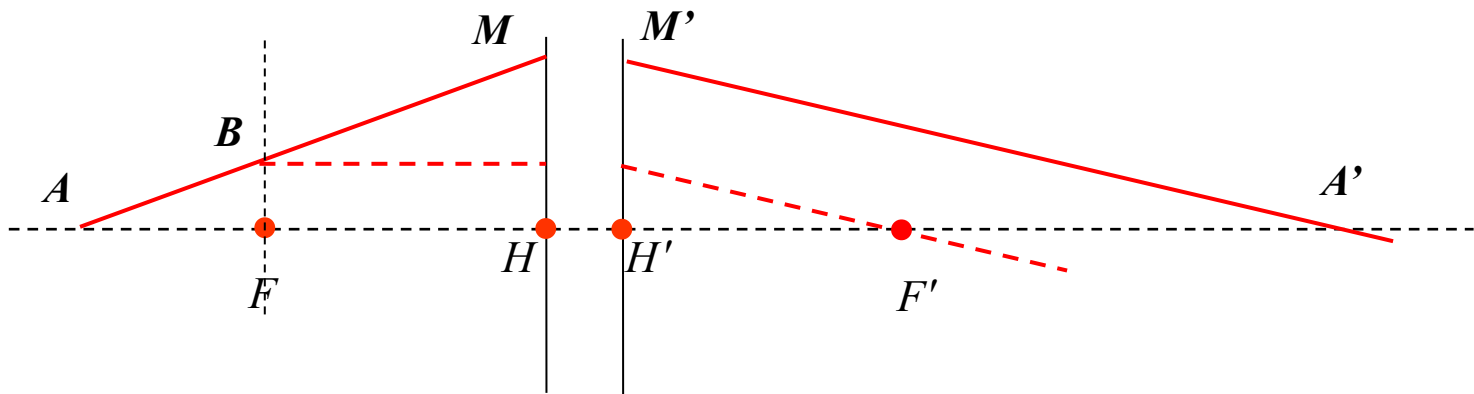
6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

▲ 会聚透镜 $f' > 0$

当物点A沿着AM趋于B时，像点由A' 趋于正无限远

当物点M沿着MA趋于B时，像点由M' 趋于负无限远

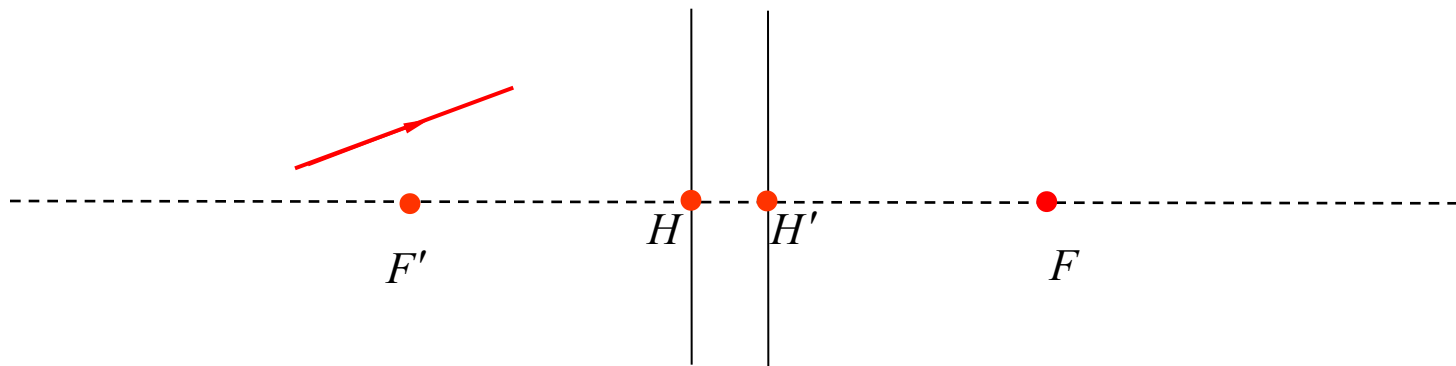
AM线段的像由A' 到正无限远和由M' 到负无限远的两条线段组成



作图法

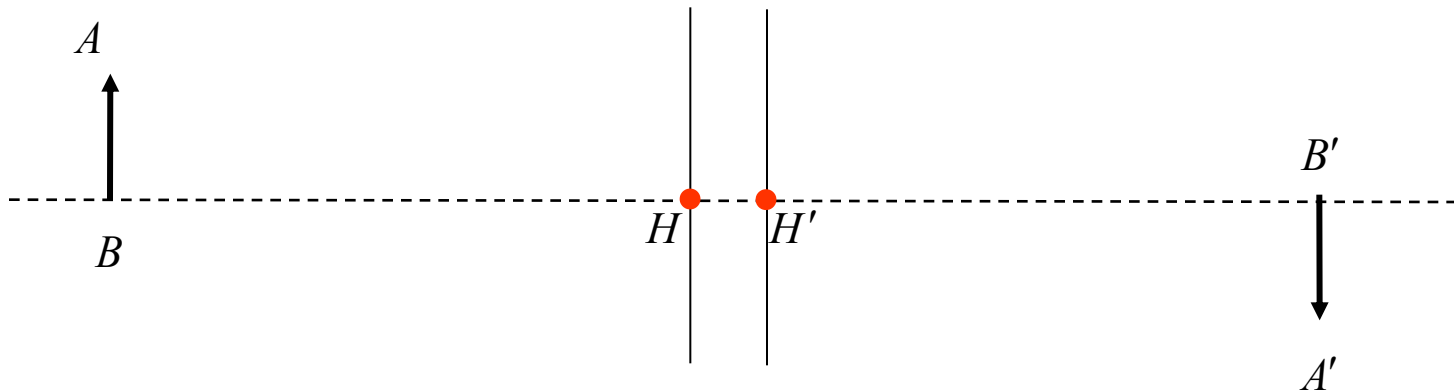
▲ 发散光组 $f' < 0$

求物方光线 a 的共轭线。



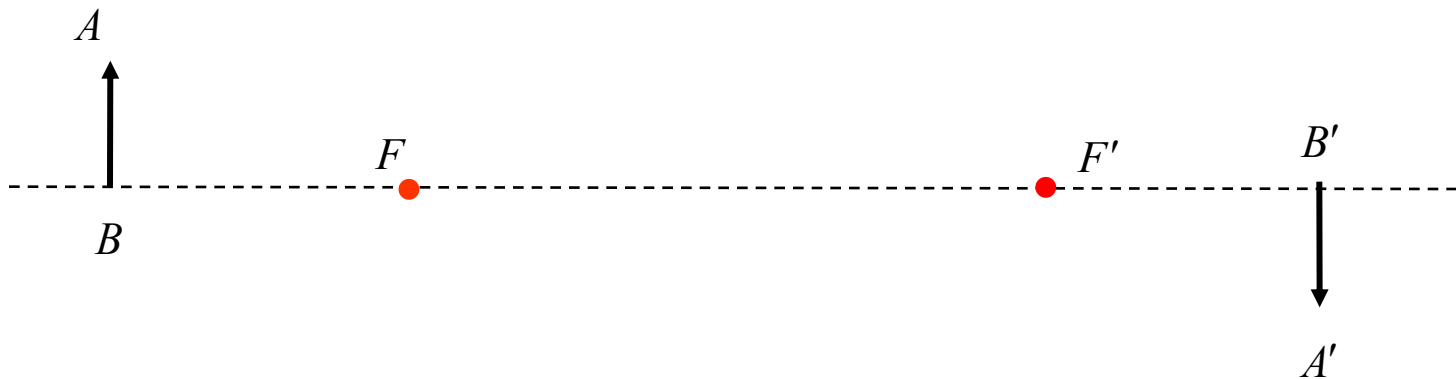
作图法

已知系统的一对主平面，及一对物、像，求系统的焦点位置。



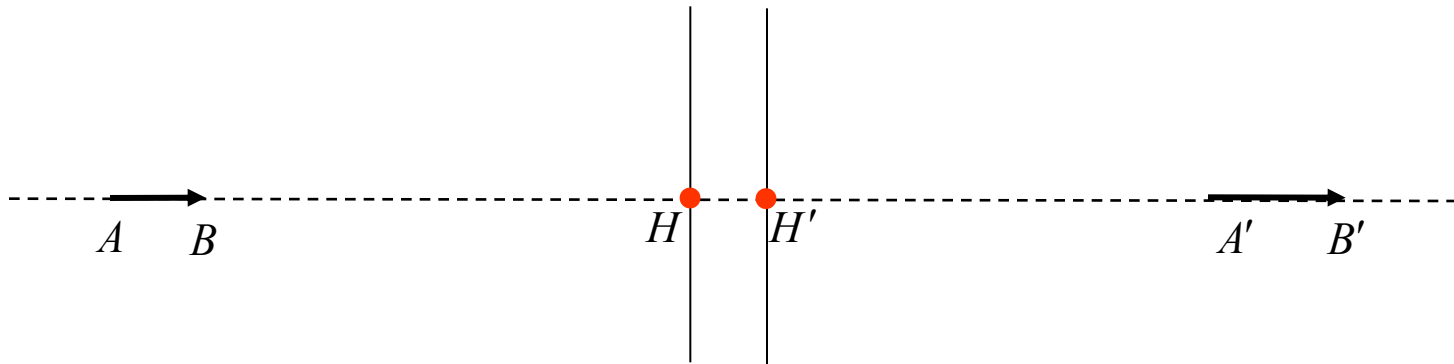
作图法

已知系统的焦点，及一对物、像，求系统的主平面及主点位置。



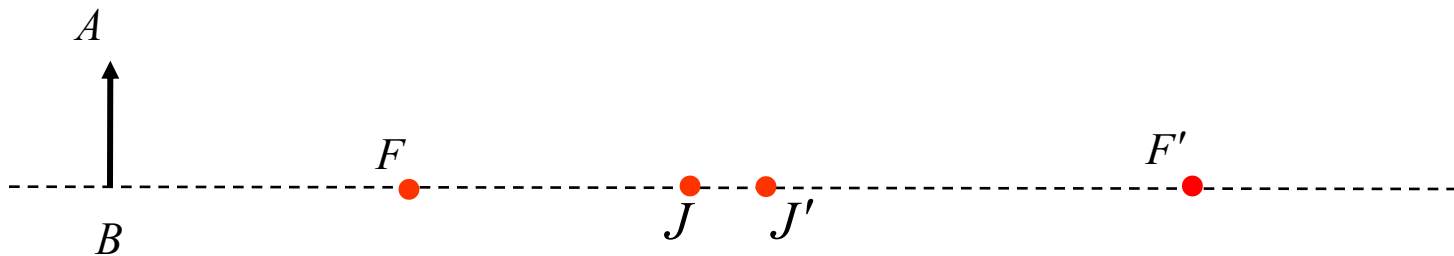
作图法

已知位于光轴上的物体 AB 及像 $A'B'$ ，求系统的焦点位置。



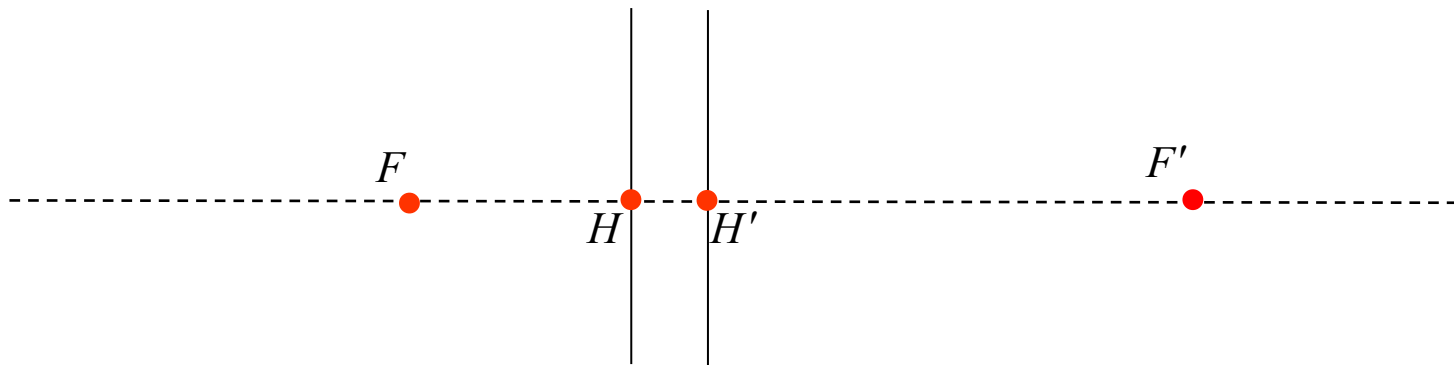
作图法

已知系统焦点、节点，**求物体 AB 的像**。注意：这样的标注节点的方式，不意味着系统的主点与节点重合。

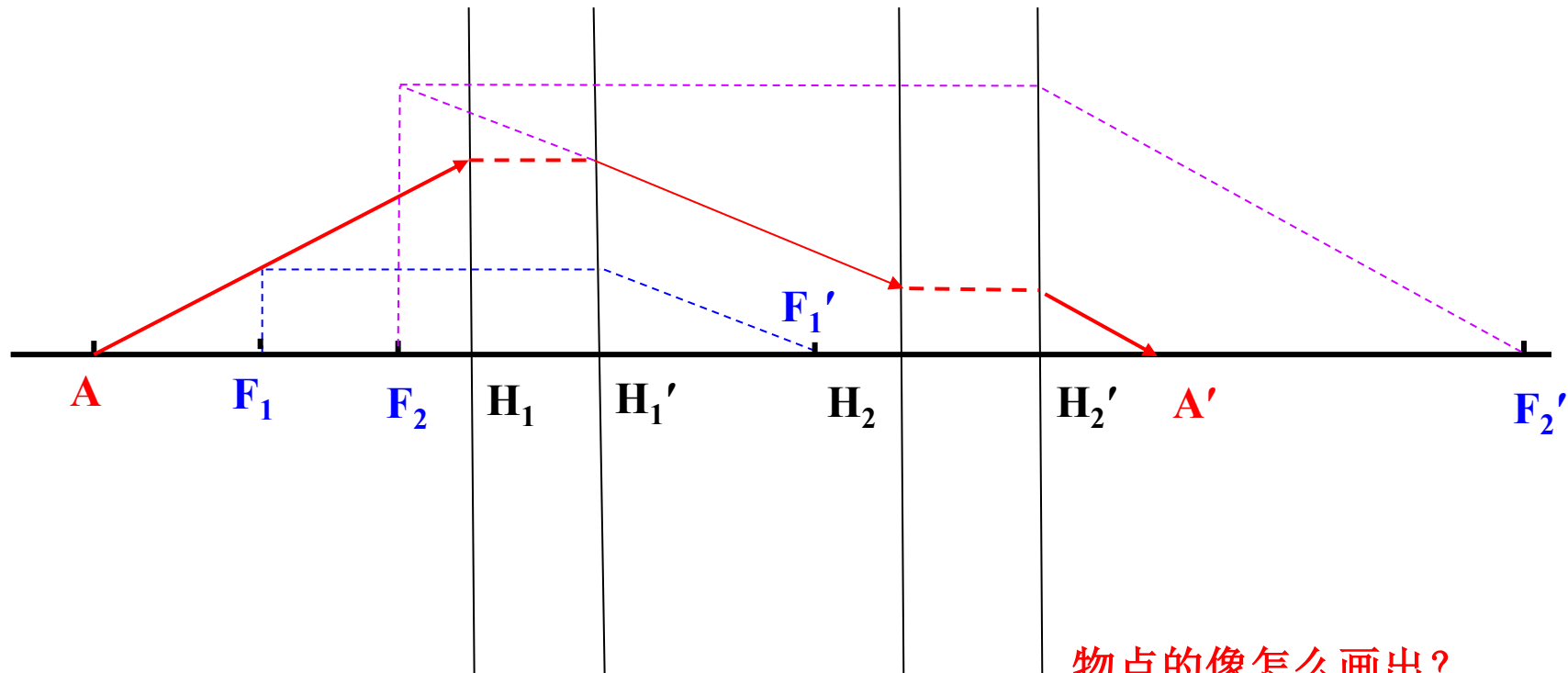


作图法

已知系统焦点、主平面，请找出其节点。



作图法

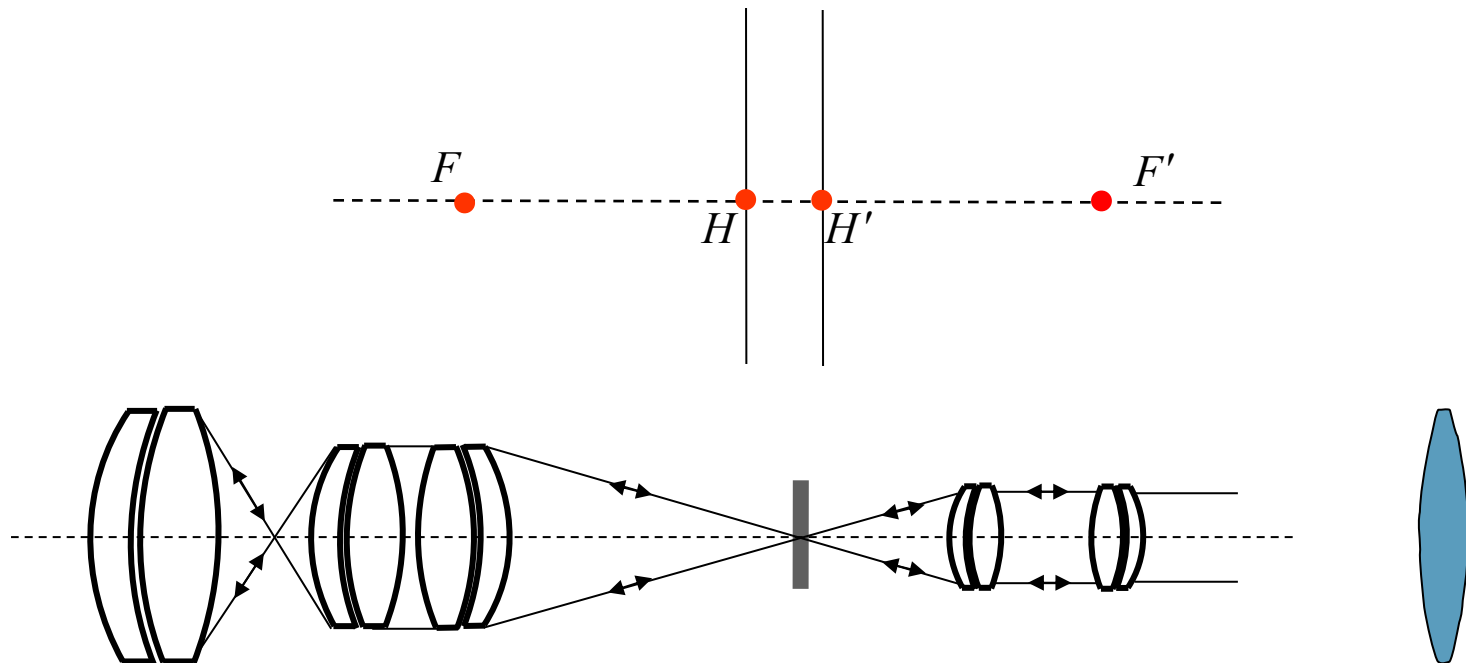


物点的像怎么画出？

7. 单个折射球面的主点和焦点

问题：

为何要研究单个折射球面的主点和焦点？

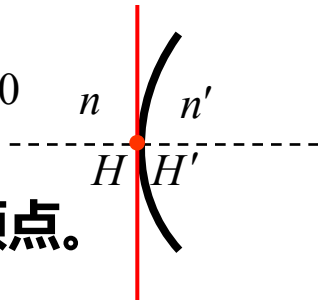


7. 单个折射球面的主点和焦点

主点

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

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \longrightarrow n'l - nl' = \frac{n' - n}{r} ll' = 0 \longrightarrow l = 0 \quad l' = 0$$



▲ 结论：单个折射面的两个主平面是重合的。并相切于折射面的顶点。

焦点

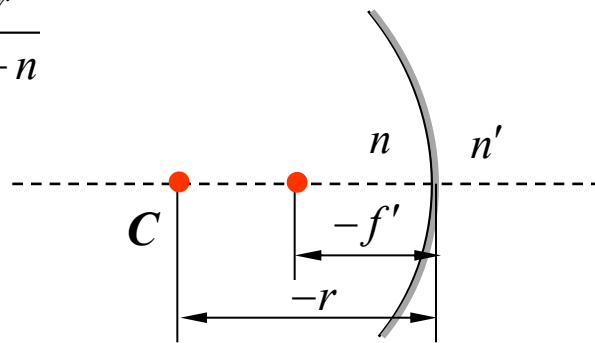
$$l = -\infty \quad l' = f'$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \longrightarrow f' = \frac{n'r}{n' - n} \quad f = -\frac{nr}{n' - n}$$

$$l' = \infty \quad l = f \quad \frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$$

反射球面

$$n' = -n \longrightarrow f' = \frac{r}{2}$$

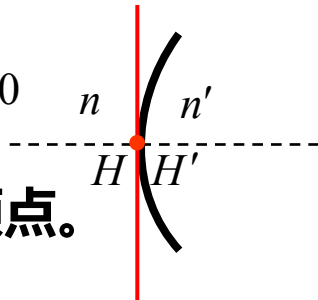


7. 单个折射球面的主点和焦点

主点

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

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \longrightarrow n'l - nl' = \frac{n' - n}{r} ll' = 0 \longrightarrow l = 0 \quad l' = 0$$



▲ 结论：单个折射面的两个主平面是重合的。并相切于折射面的顶点。

焦点

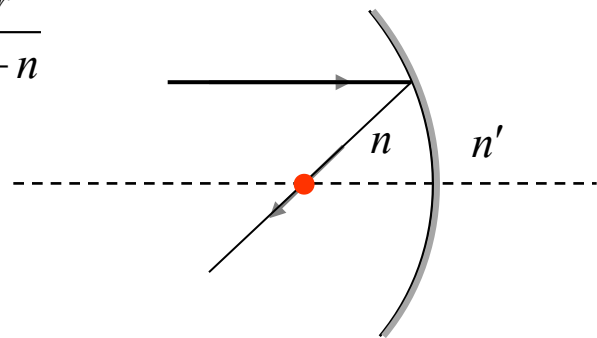
$$l = -\infty \quad l' = f'$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \longrightarrow f' = \frac{n'r}{n' - n} \quad f = -\frac{nr}{n' - n}$$

$$l' = \infty \quad l = f$$

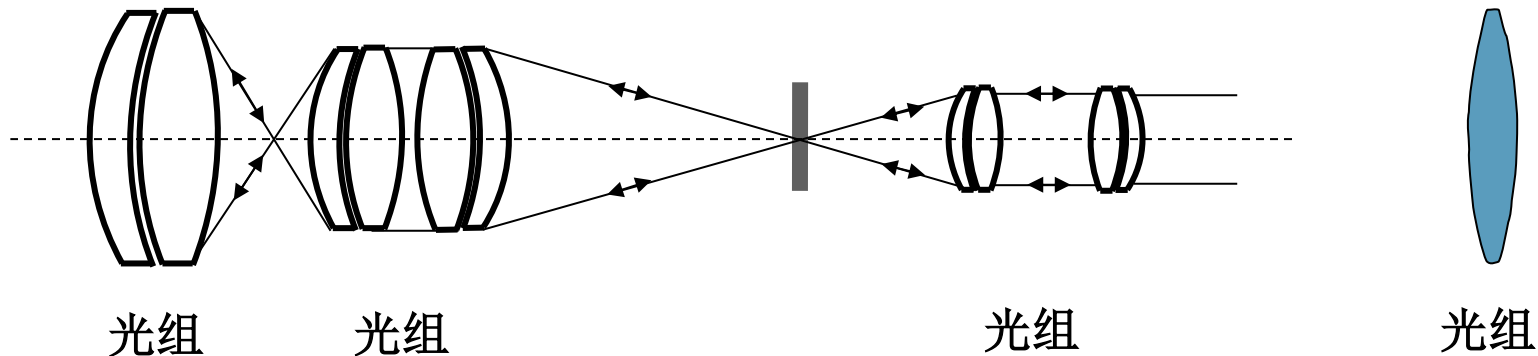
反射球面

$$n' = -n \longrightarrow f' = \frac{r}{2}$$



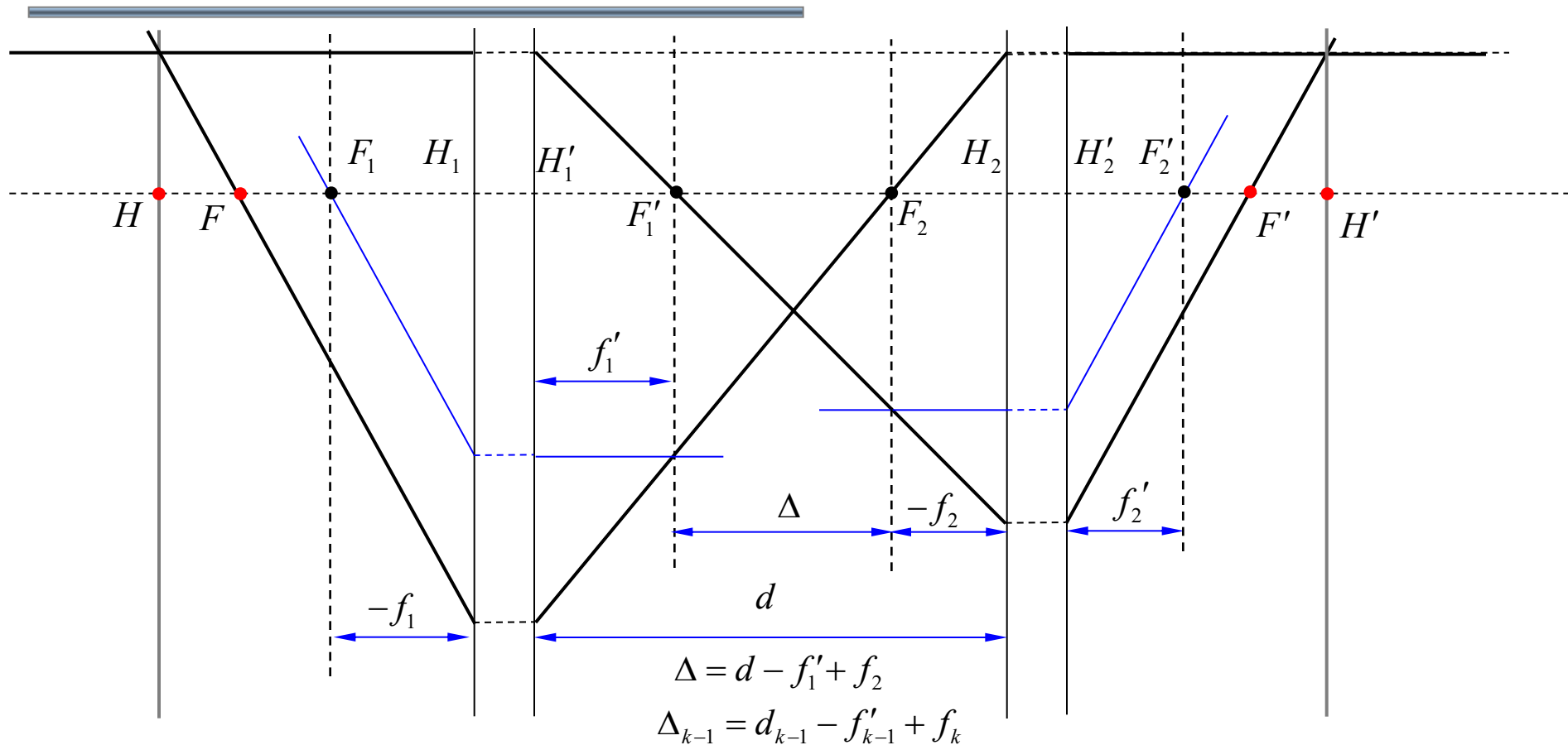
8. 理想光组的组合

▲光组：由一些透镜或一个透镜组成。



▲问题：一个光学系统可以由若干各光组组成。每一个光组都有自己的焦点，主点等。当这些光组组成一个系统以后，系统的光学参数就是这些光组参数组合的结果。

8. 理想光组的组合 能否找出焦点 主点



8. 理想光组的组合

各系统的参数

- 系统1的主点、焦点、节点及焦距
- 系统2的主点、焦点、节点及焦距
-

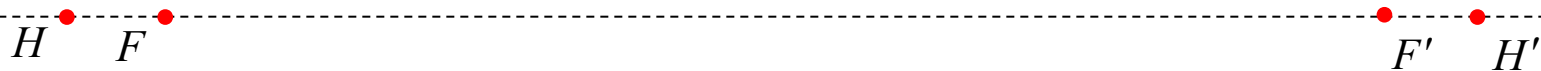
两系统间的参数

- F_2 相对于 F_1' 的坐标: Δ (光学间隔)
- H_2 相对于 H_1' 的坐标: d

$$\Delta = d - f_1' + f_2$$

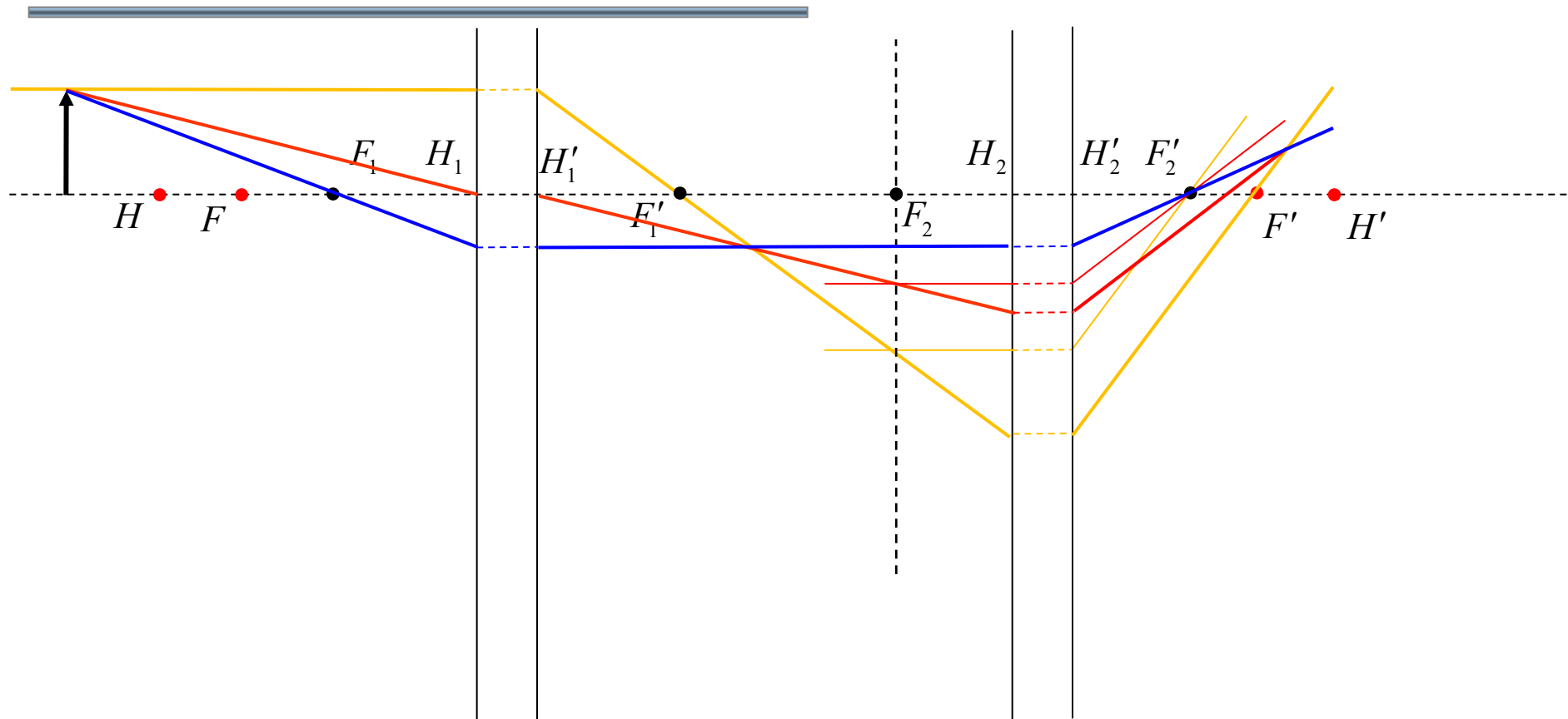
8. 理想光组的组合

▲ 组合的光学系统唯一地确定了。



▲ 作图求解肯定没有问题？

8. 理想光组的组合



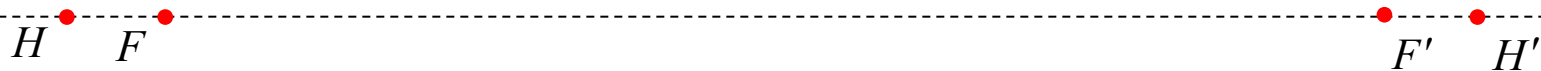
8. 理想光组的组合

▲ 组合的光学系统唯一地确定了。



8. 理想光组的组合

▲ 组合的光学系统唯一地确定了。

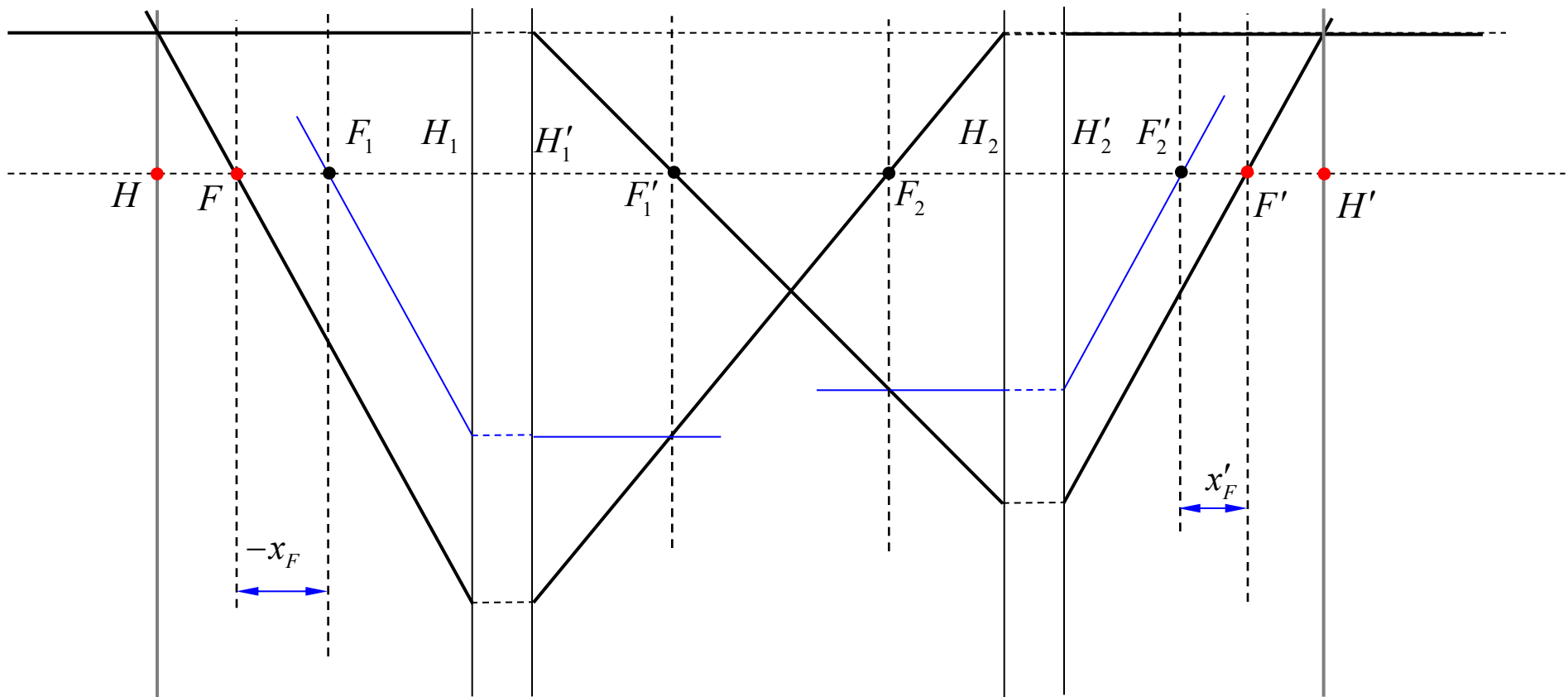


▲ 问题？ 作图求解肯定没有问题。

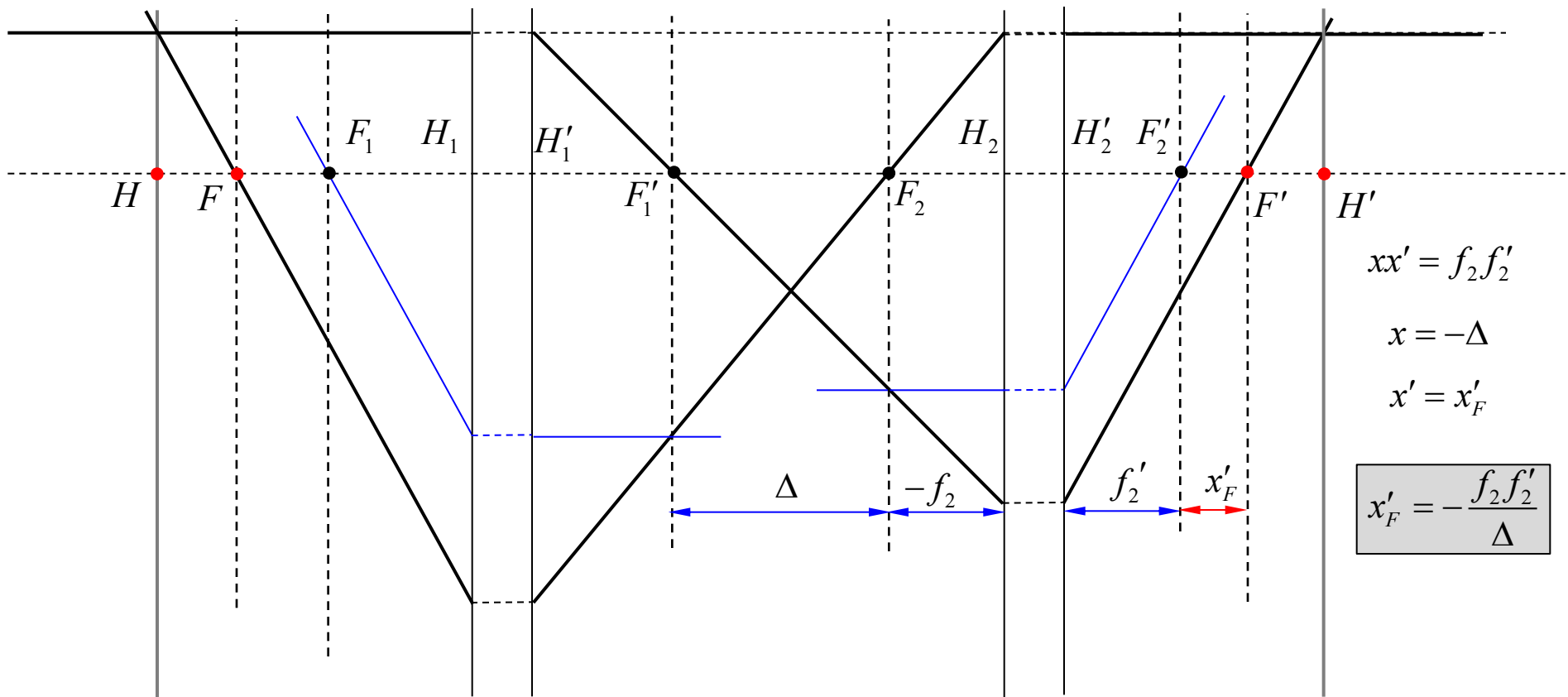
▲ 问题？ 解析求解呢？

焦点位置

▲问题: 光学参数在图中如何表示?



焦点位置



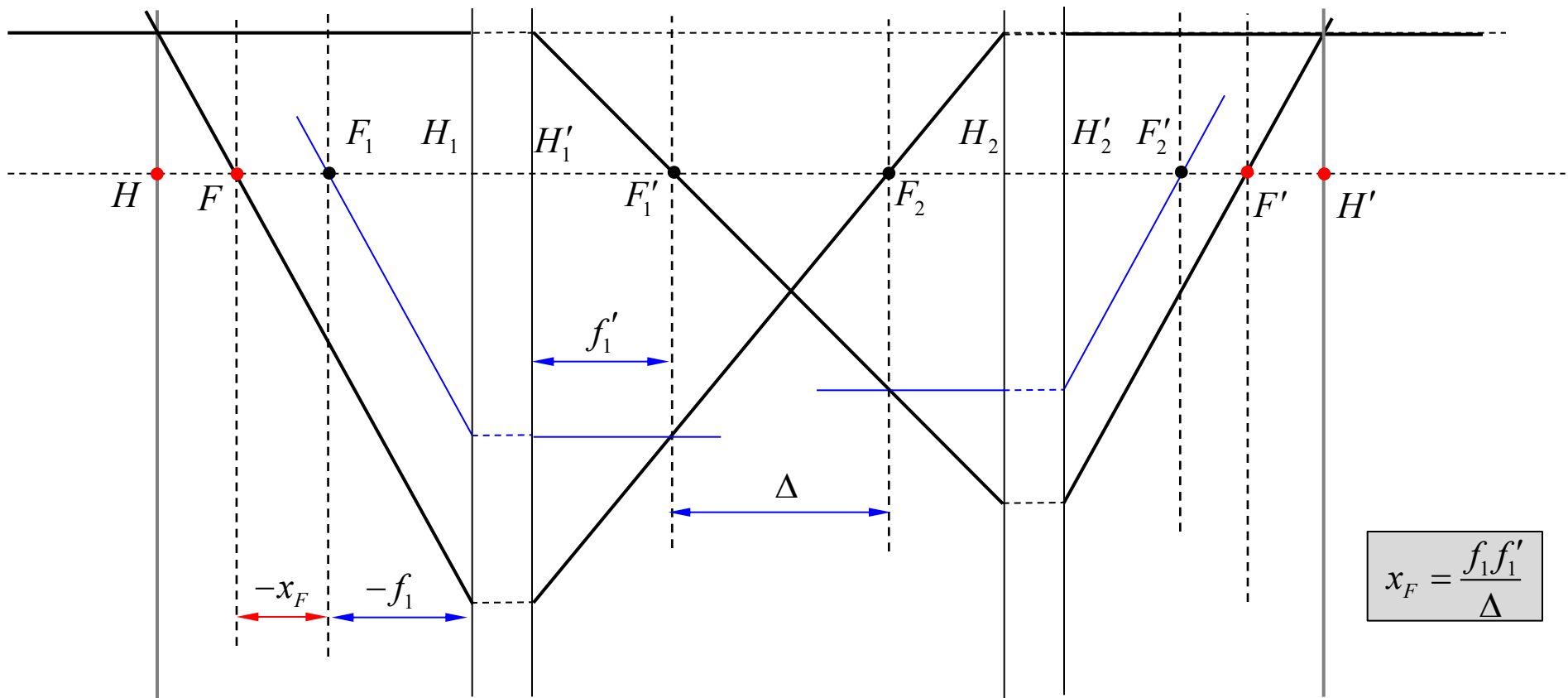
$$xx' = f_2 f'_2$$

$$x = -\Delta$$

$$x' = x'_F$$

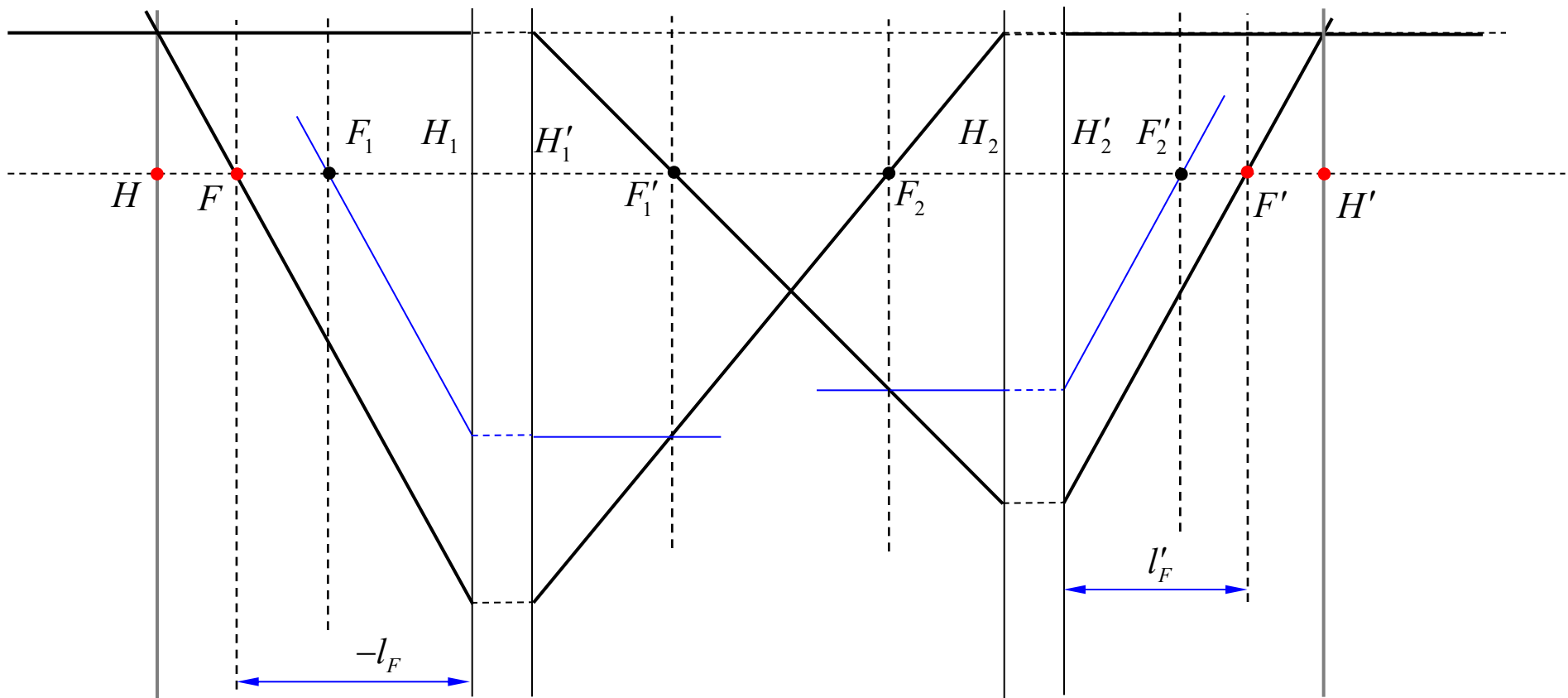
$$x'_F = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta}$$

焦点位置

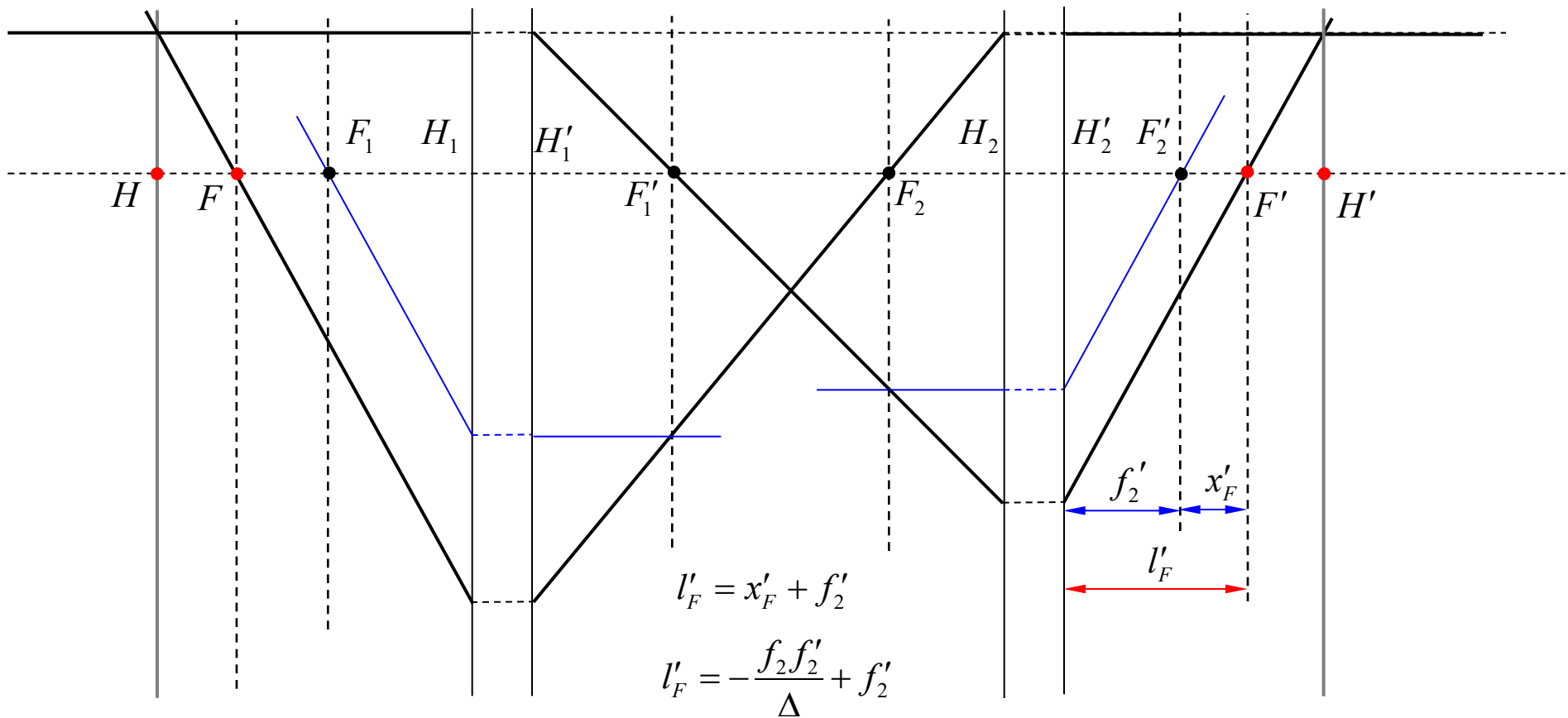


$$x_F = \frac{f_1 f'_1}{\Delta}$$

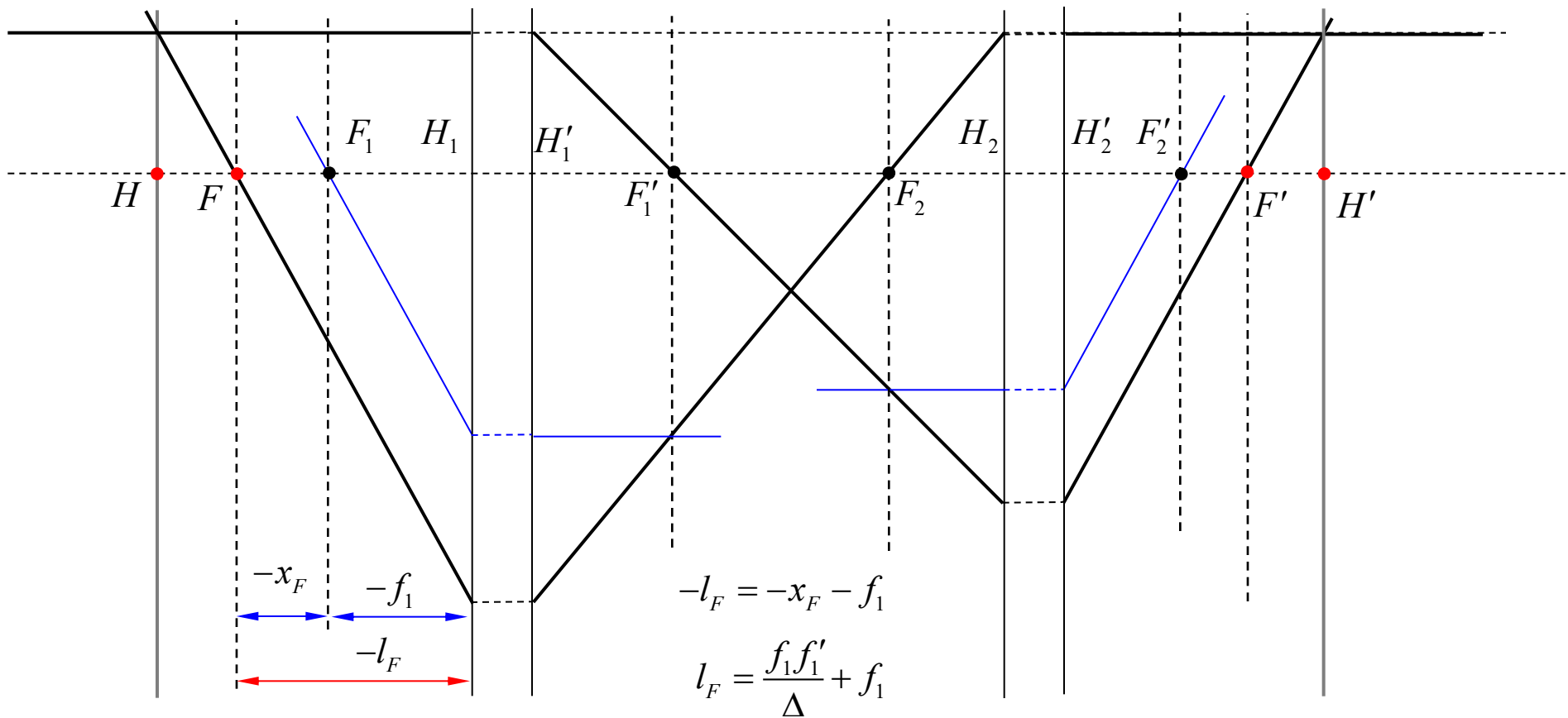
焦点位置



焦点位置

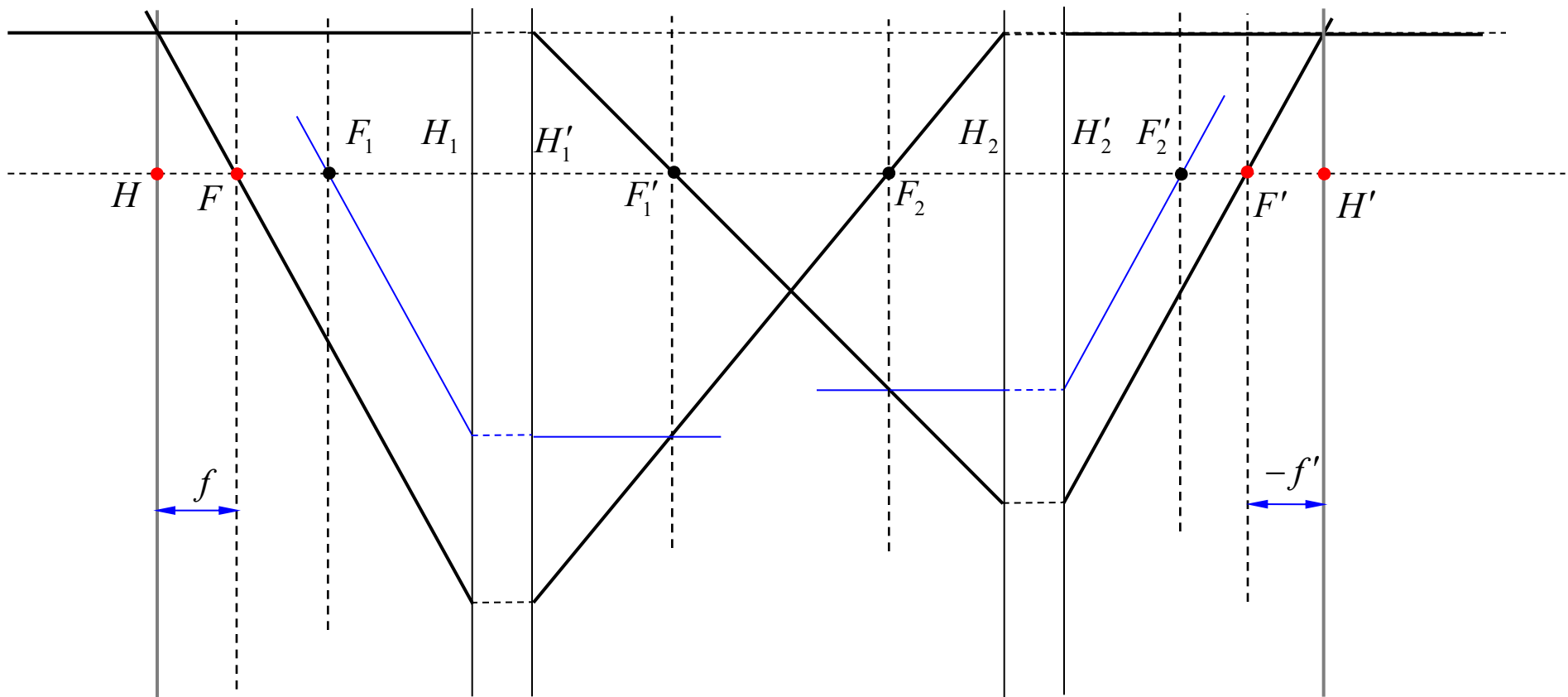


焦点位置

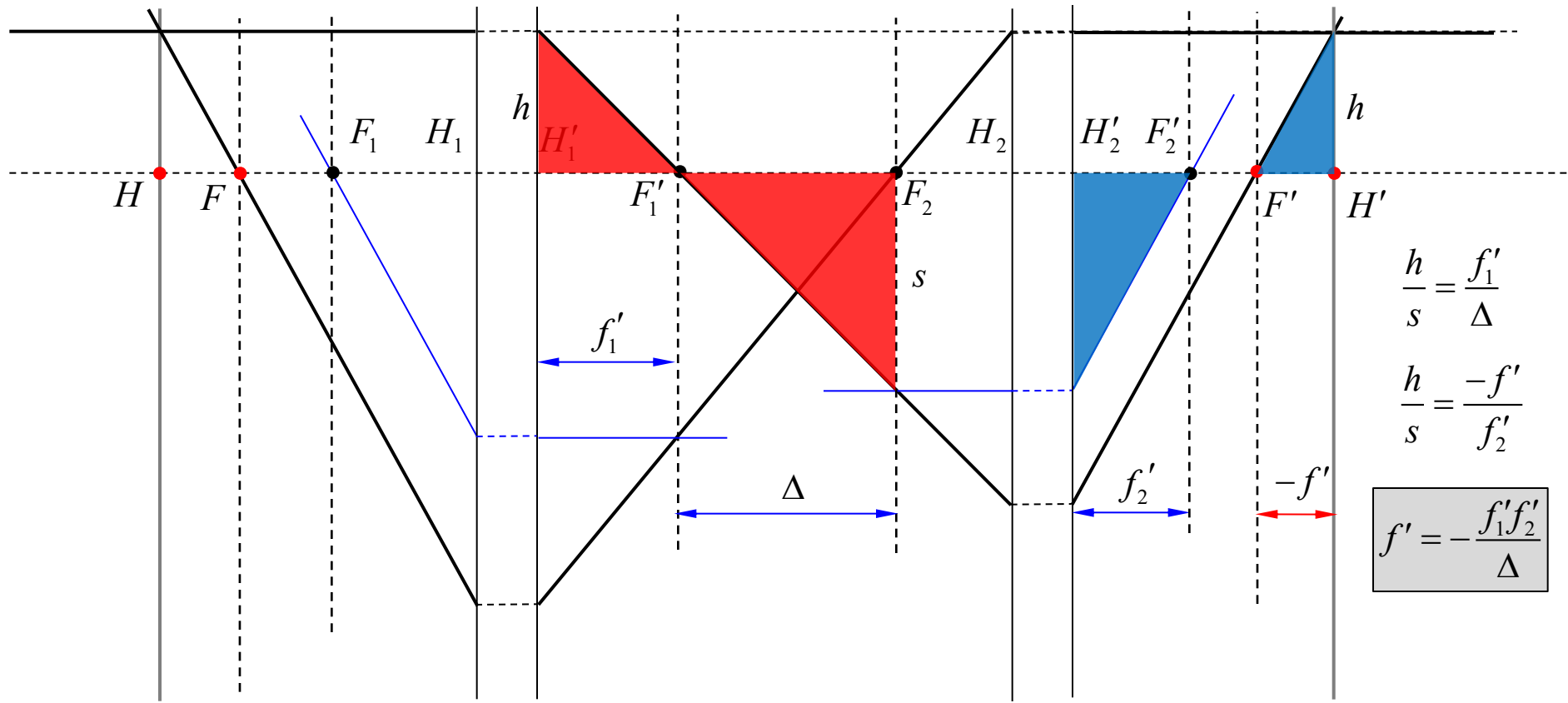


焦距

▲问题: 定义? 在图中如何表示?



焦距

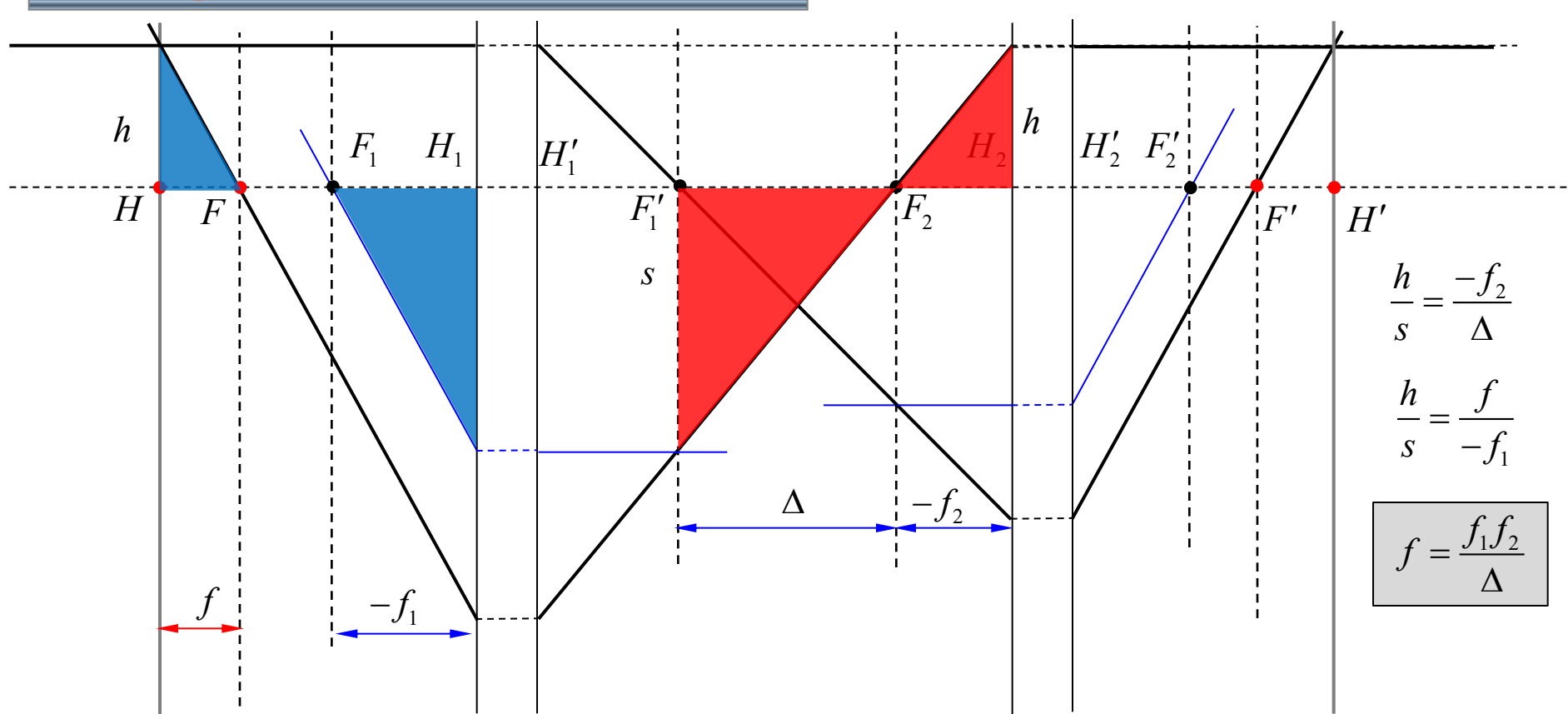


$$\frac{h}{s} = \frac{f'_1}{\Delta}$$

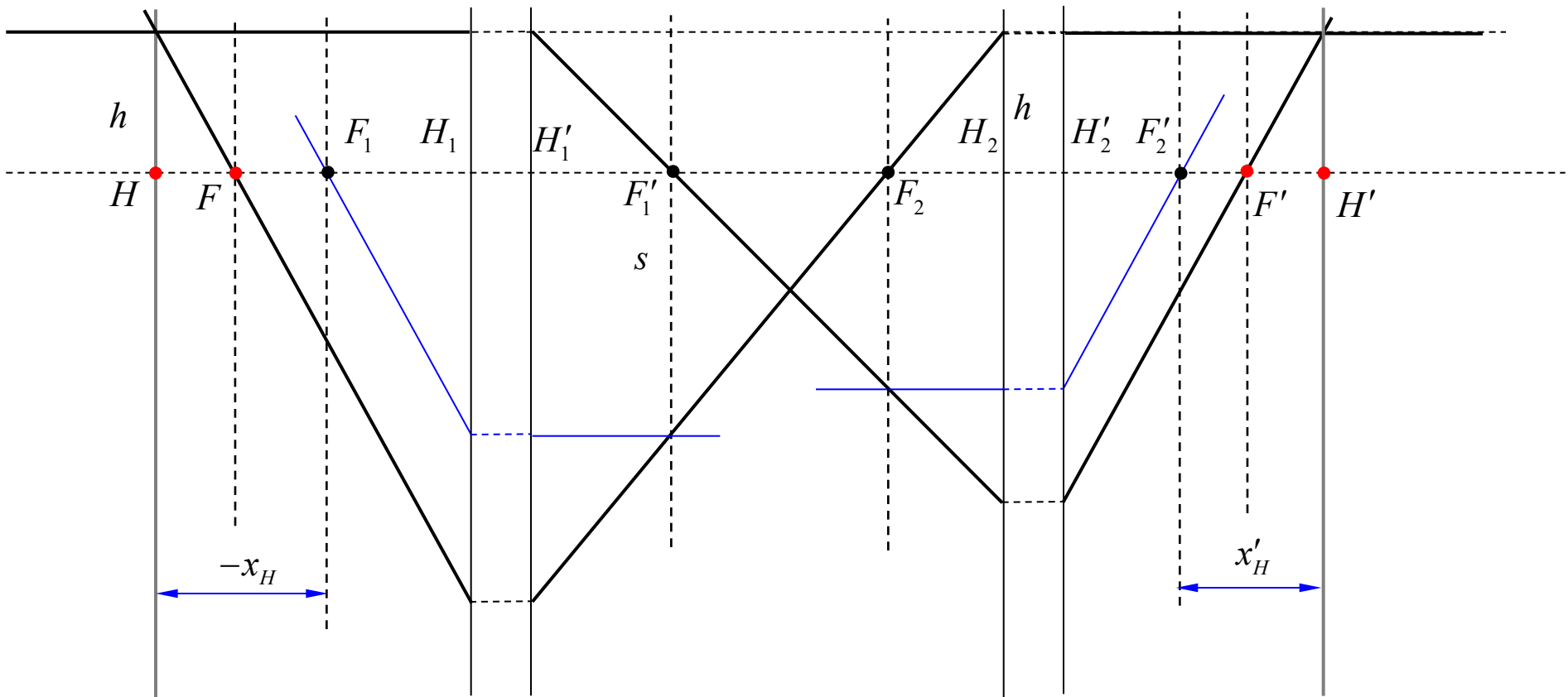
$$\frac{h}{s} = \frac{-f'}{f'_2}$$

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

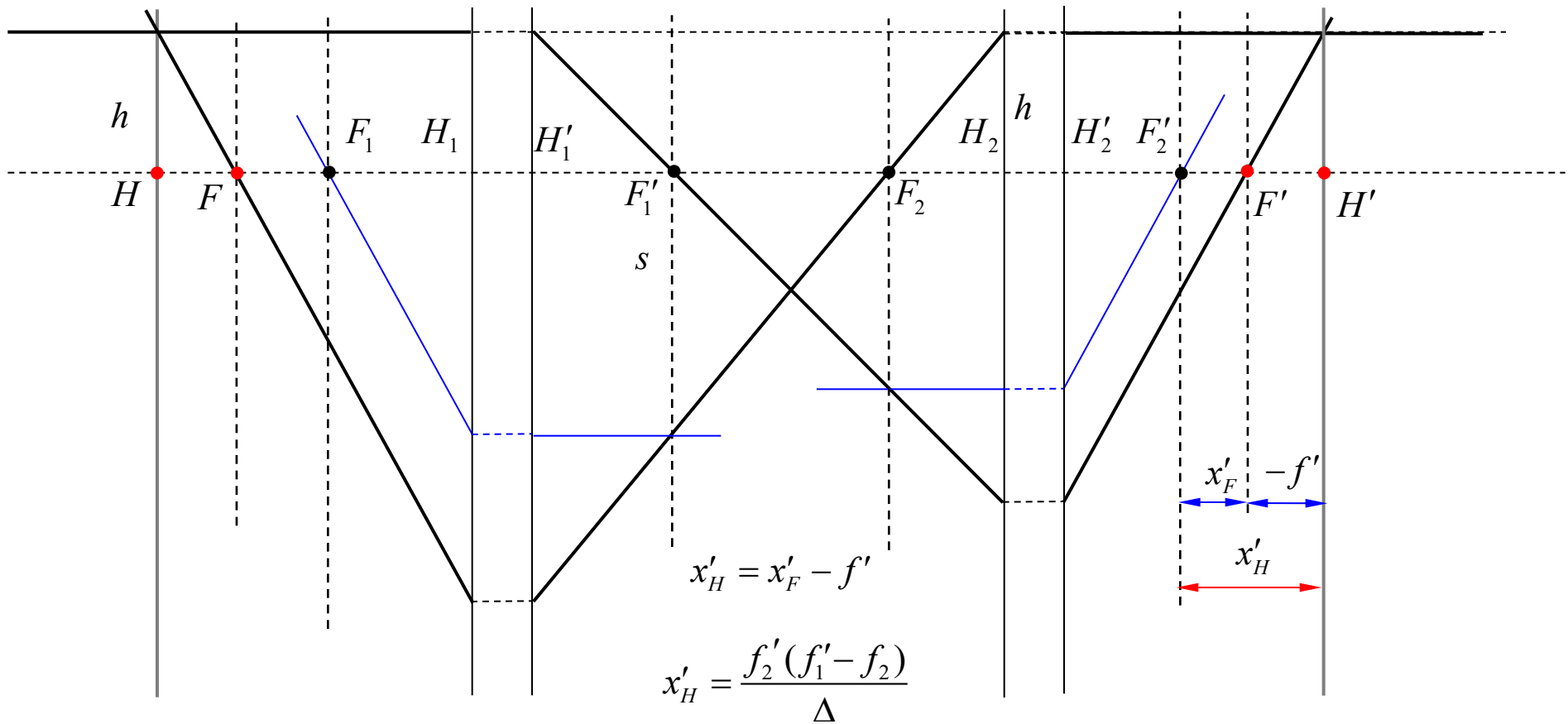
焦距



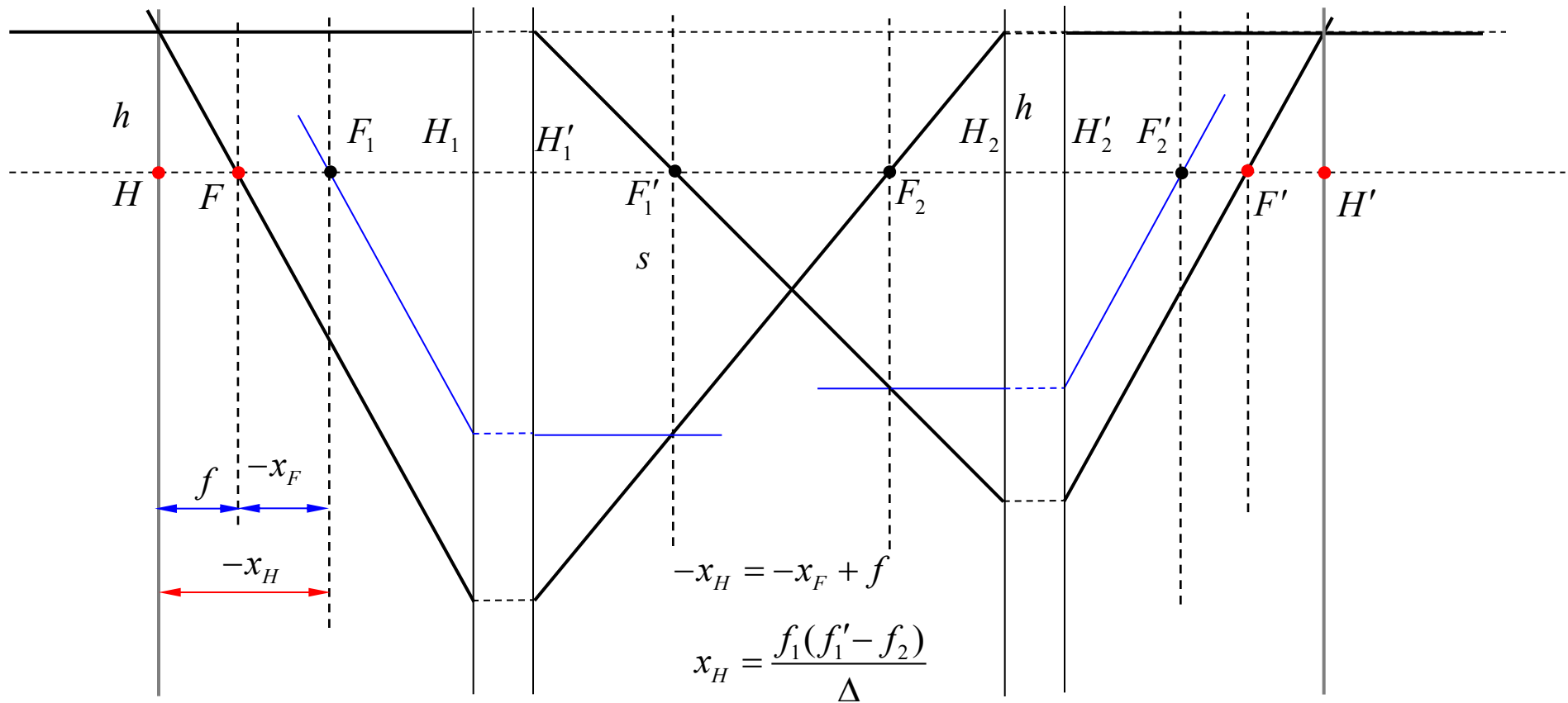
主点



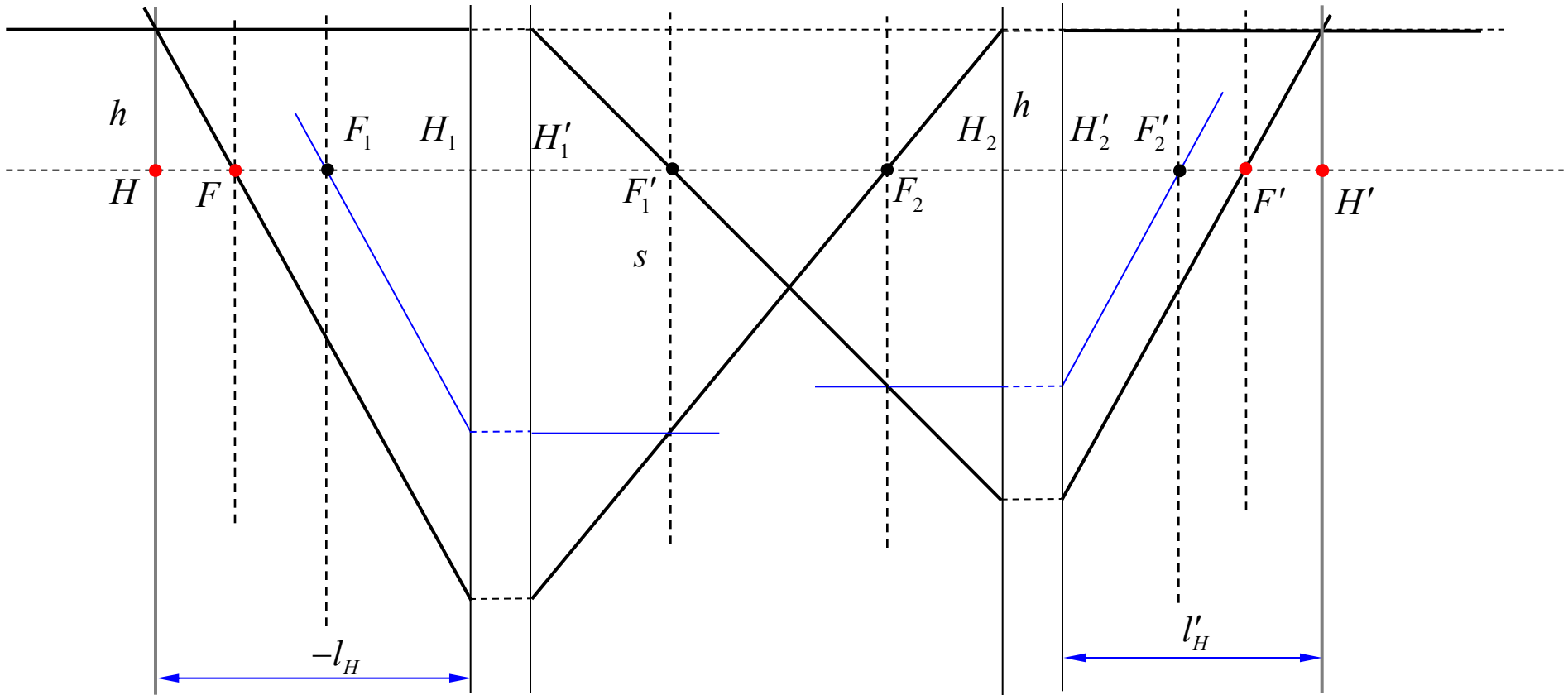
主点



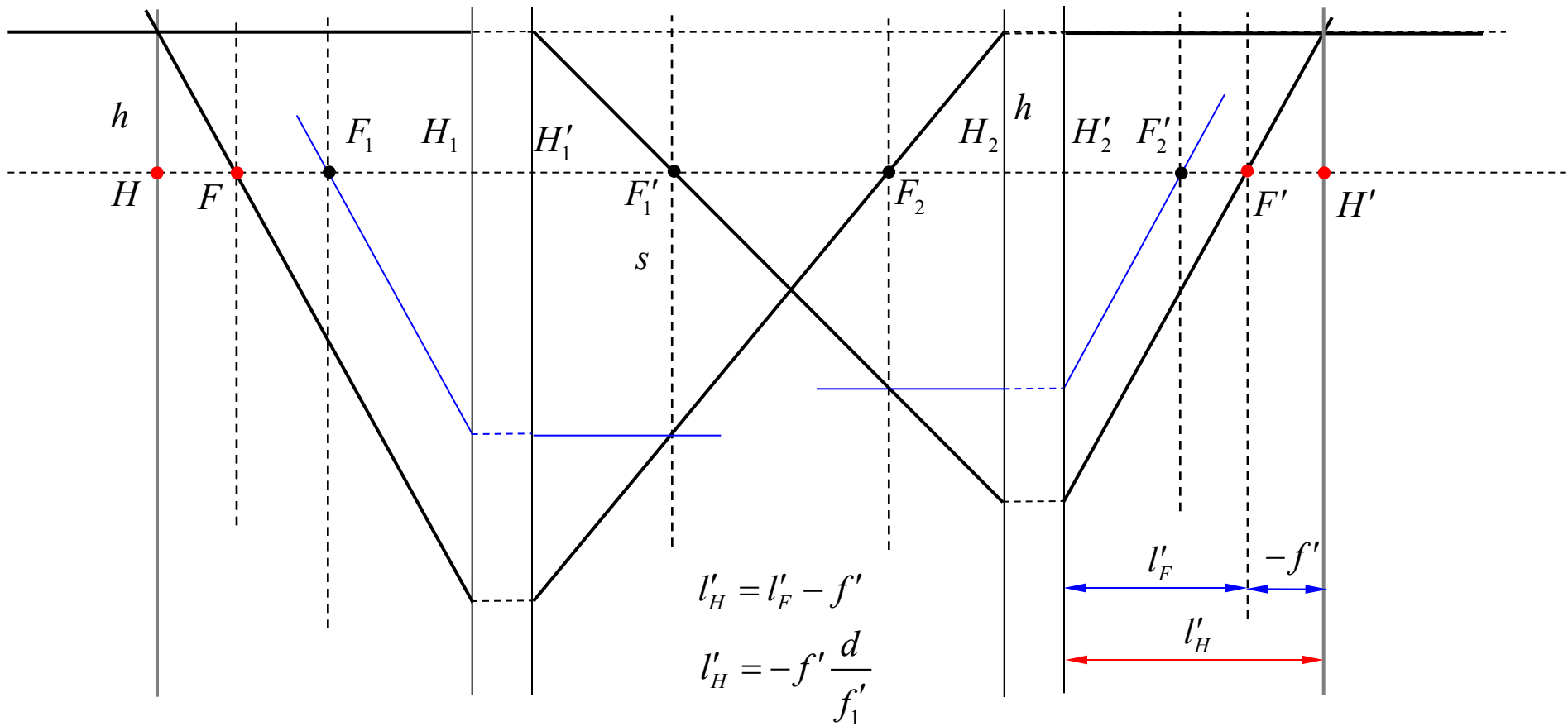
主点



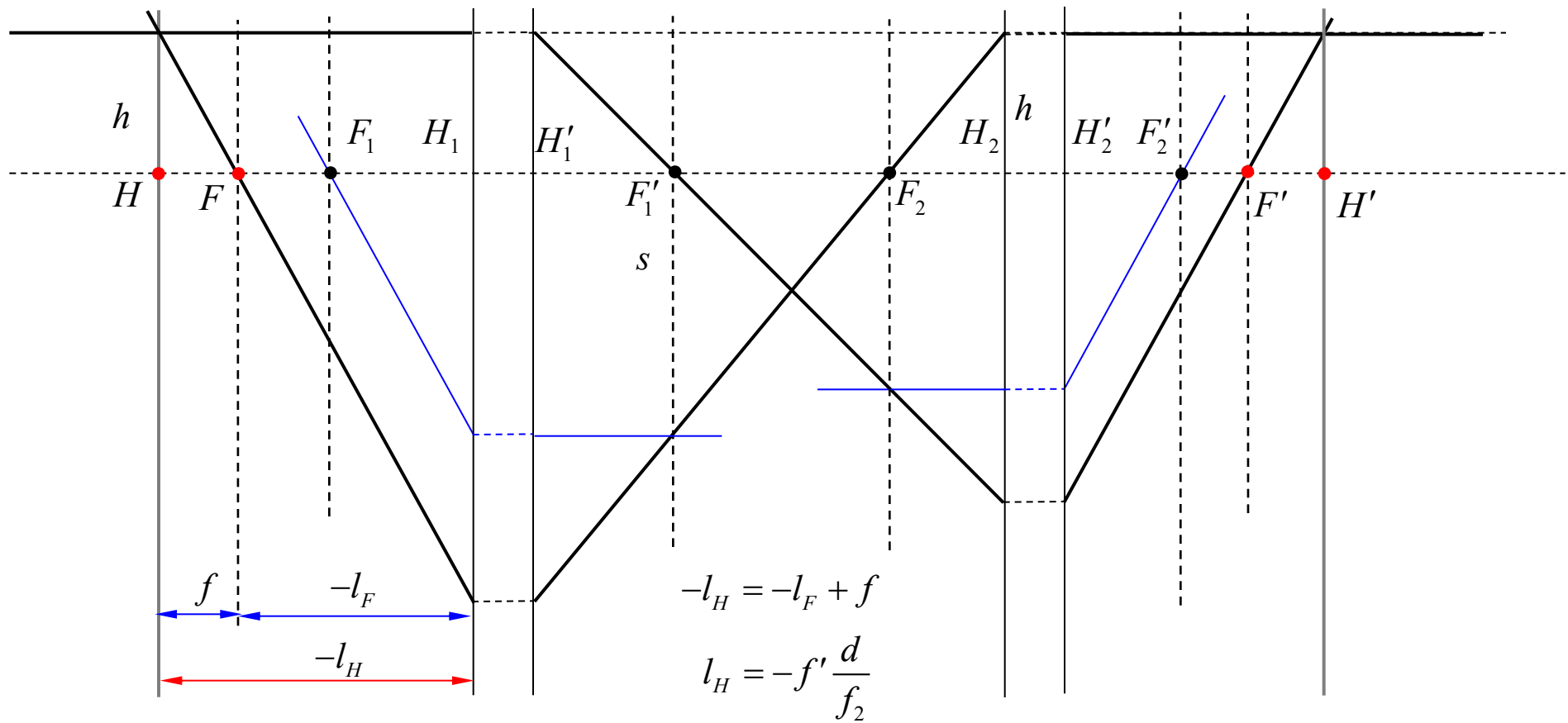
主点



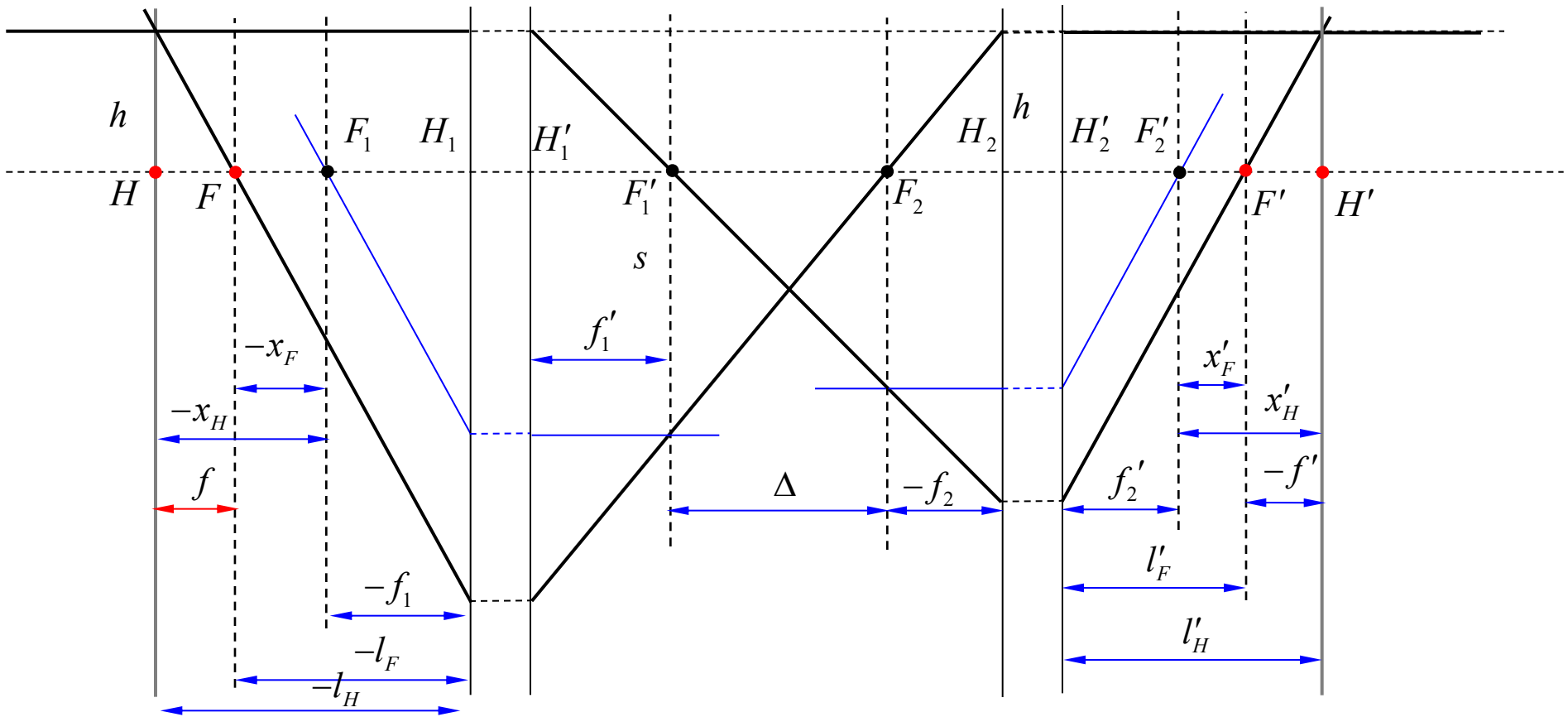
主点



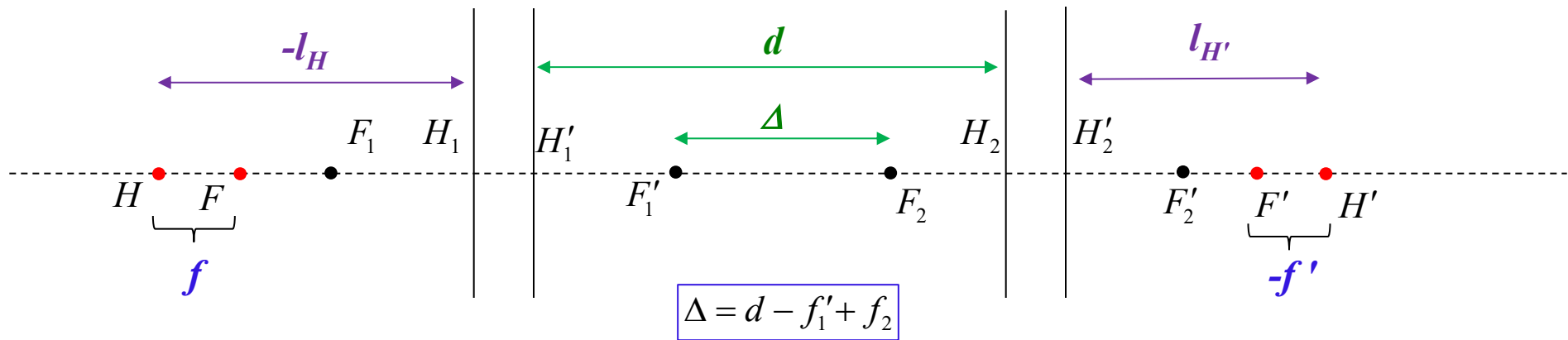
主点



汇总



汇总



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

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

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

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

练习题

例：一组合系统，薄正透镜 $f_1' = 20 \text{ mm}$ ，薄负透镜 $f_2' = -20 \text{ mm}$ ， $d = 10 \text{ mm}$ ，求组合系统像方基点位置。

若此时有一物体位于正透镜前 100 mm 处，求垂轴放大率和像的位置。

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

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

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

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

练习题

例：一组合系统，薄正透镜 $f_1' = 20 \text{ mm}$ ，薄负透镜 $f_2' = -20 \text{ mm}$ ， $d = 10 \text{ mm}$ ，求组合系统像方基点位置。

若此时有一物体位于正透镜前 100 mm 处，求垂轴放大率和像的位置。

$$1) \quad \Delta = d - f_1' + f_2' = 10 - 20 + 20 = 10 \text{ mm}$$

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} = -\frac{20 \times (-20)}{10} = 40 \text{ mm}$$

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta} = -40 \text{ mm}$$

$$2) \quad l'_H = -f' \frac{d}{f_1'} = -40 \times \left(\frac{10}{20}\right) = -20 \text{ mm}$$

$$l = l_1 - l_H = -100 + 20 = -80 \text{ mm}$$

$$l_H = -f' \frac{d}{f_2'} = -40 \times \left(\frac{10}{-20}\right) = 20 \text{ mm}$$

$$l' = \frac{f' l}{l - f} = 40 \times (-80) / (-80 + 40) = 80 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{l'}{l} = -1$$