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。

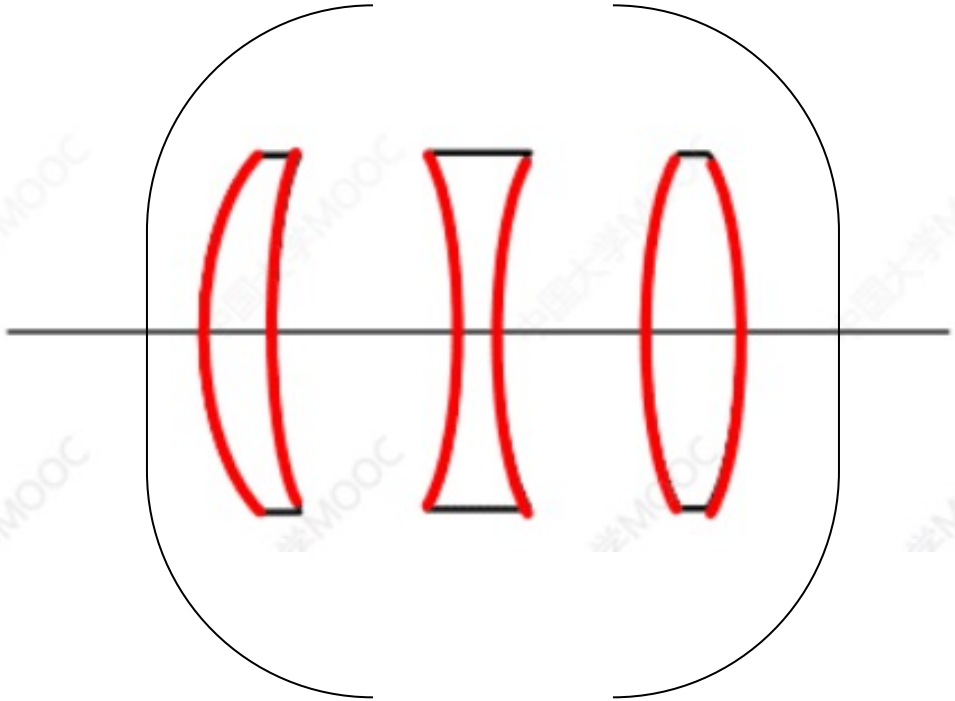
▲它是一个完全的理想模型。

▲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

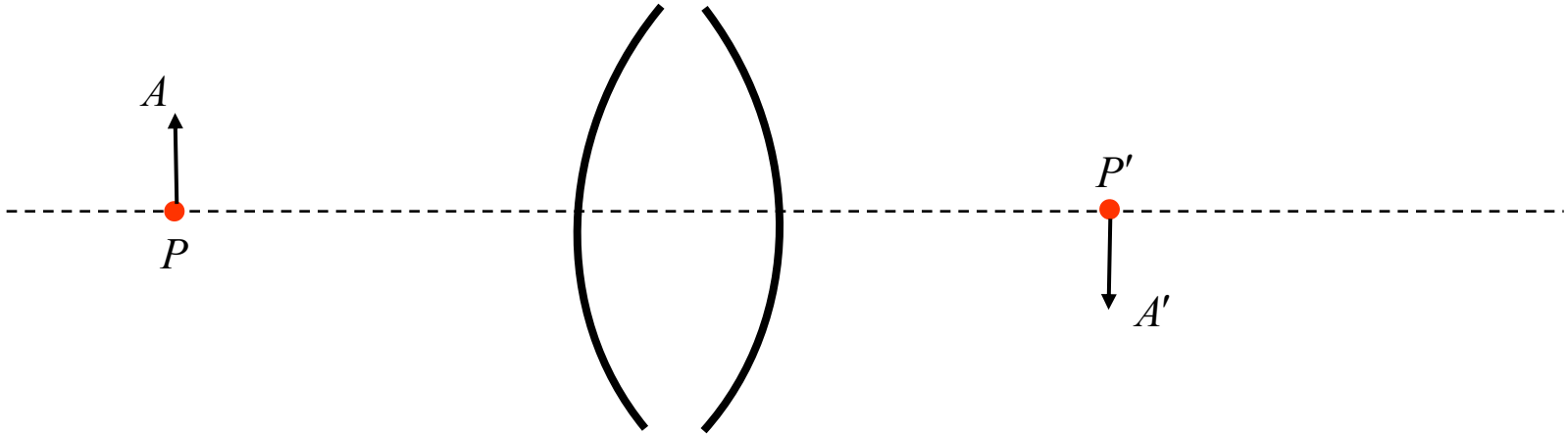


主光轴

2. 共轴球面理想光学系统

成像特征

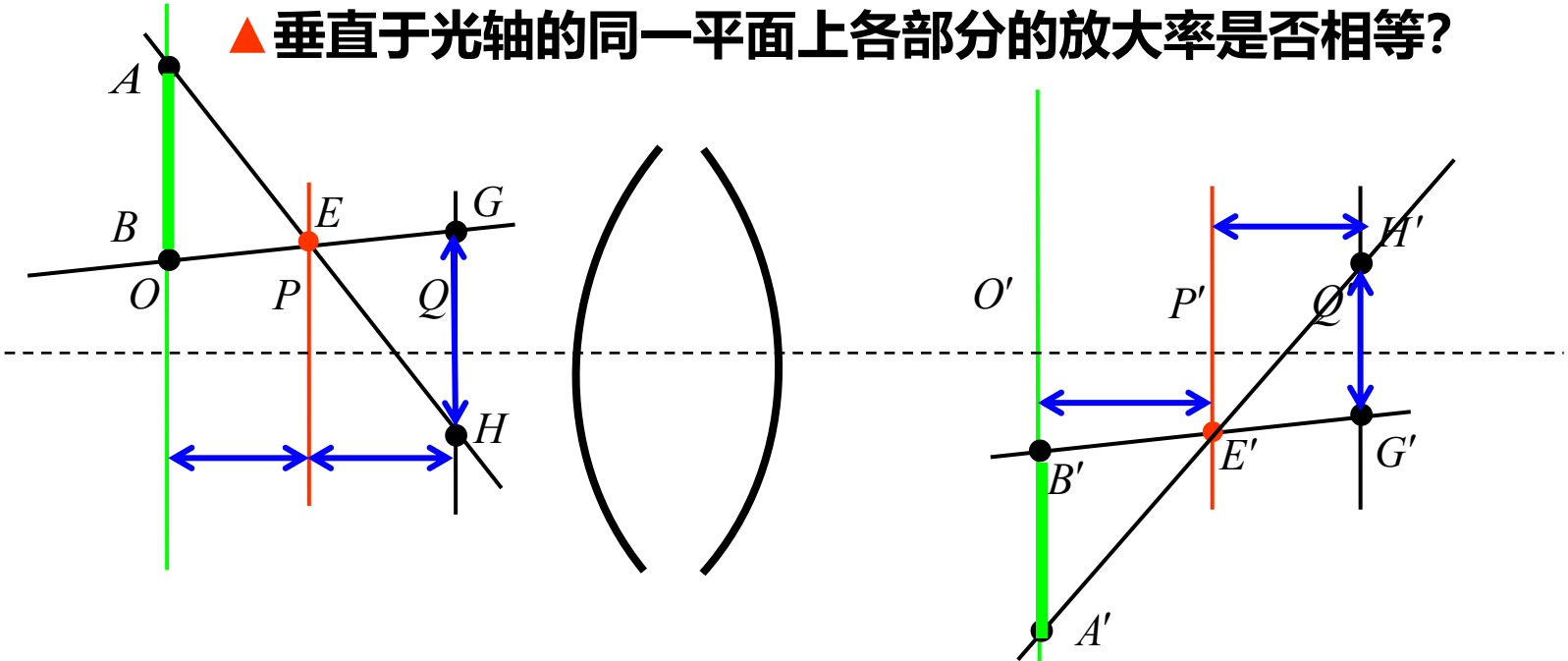
- ▲光轴上的物点一定成像于光轴上。
- ▲垂轴的物平面，像面也一定垂轴。
- ▲垂直于光轴的同一平面上各部分的放大率是否相等?



2. 共轴球面理想光学系统

成像特征

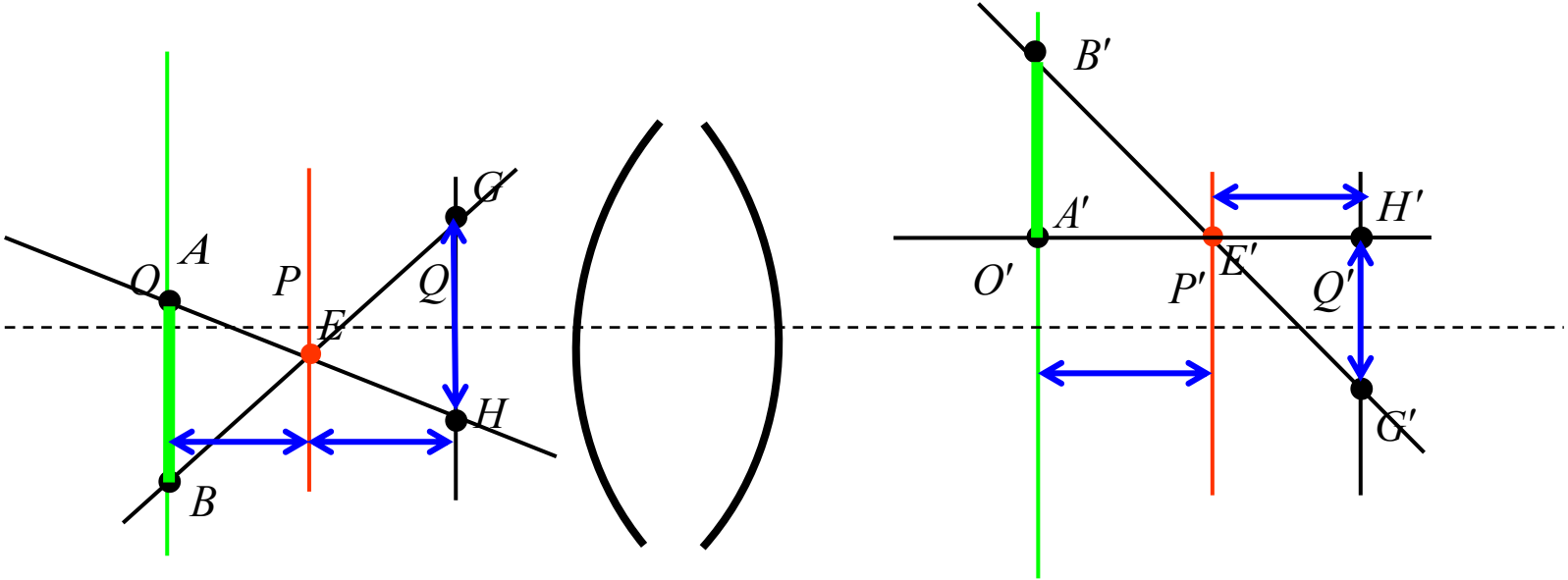
- ▲光轴上的物点一定成像于光轴上。
- ▲垂轴的物平面，像面也一定垂轴。
- ▲垂直于光轴的同一平面上各部分的放大率是否相等?



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**。

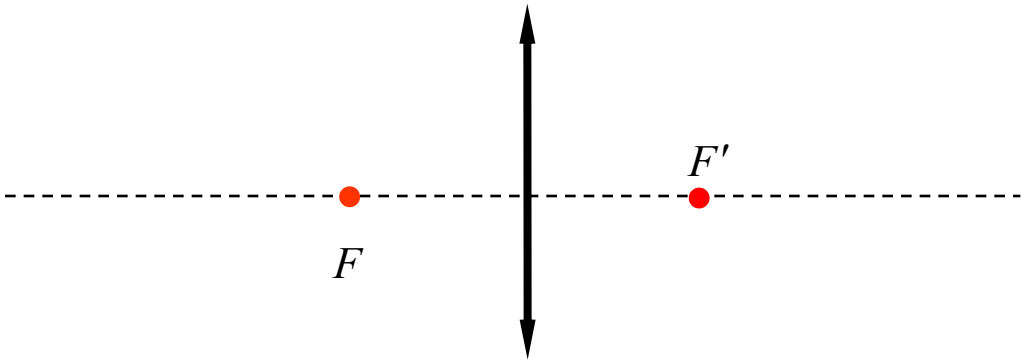


2. 共轴球面理想光学系统

▲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。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?

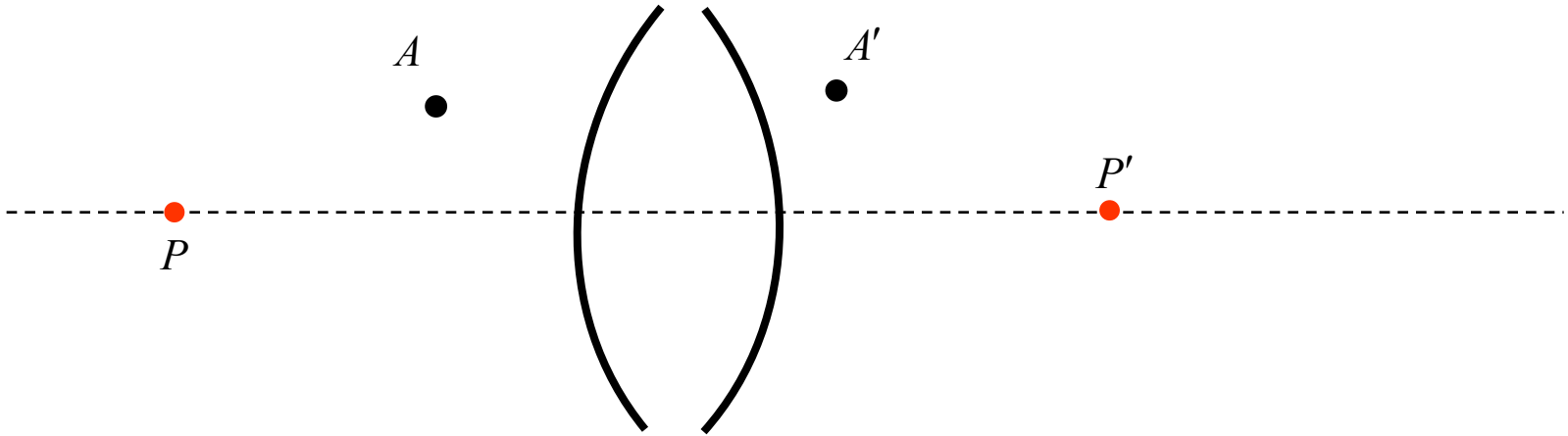


为何一个系统就简化为如图所示的透镜了呢?

3. 基点基面

基点 任何一对共轭点。 **焦点、主点、节点。**

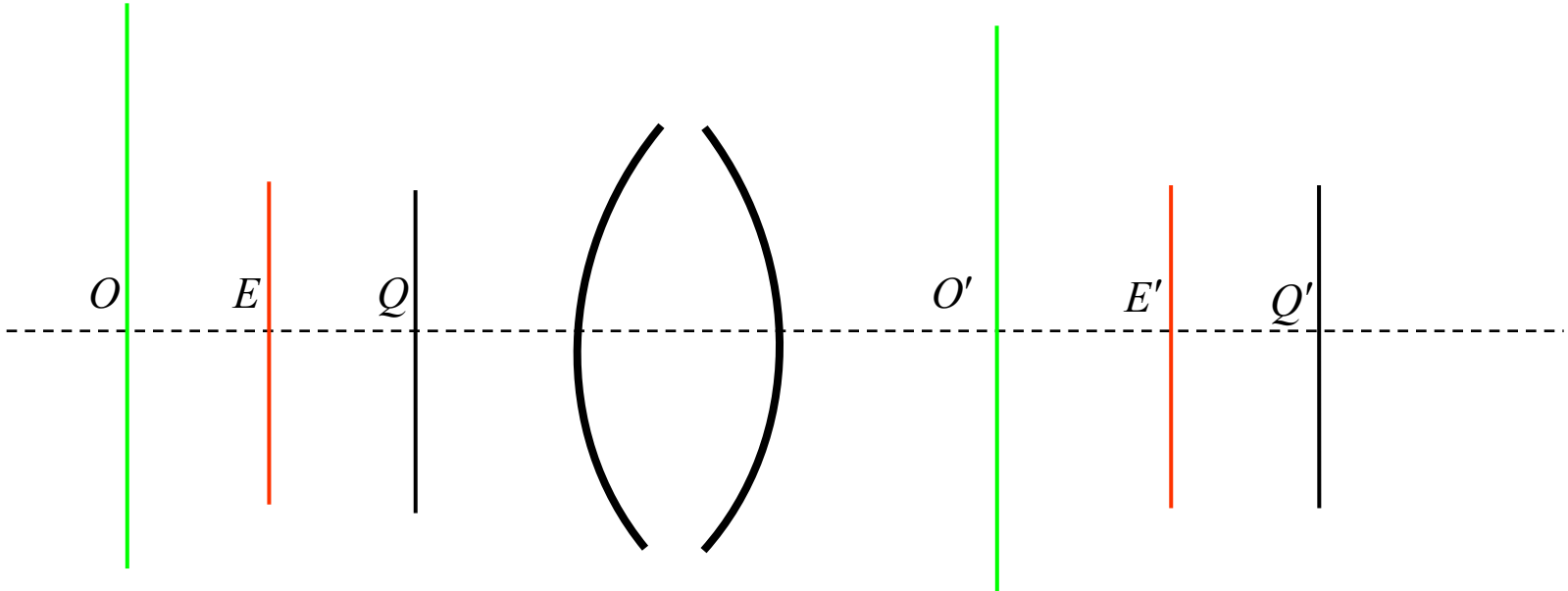
基面 任何一对共轭面。



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。**



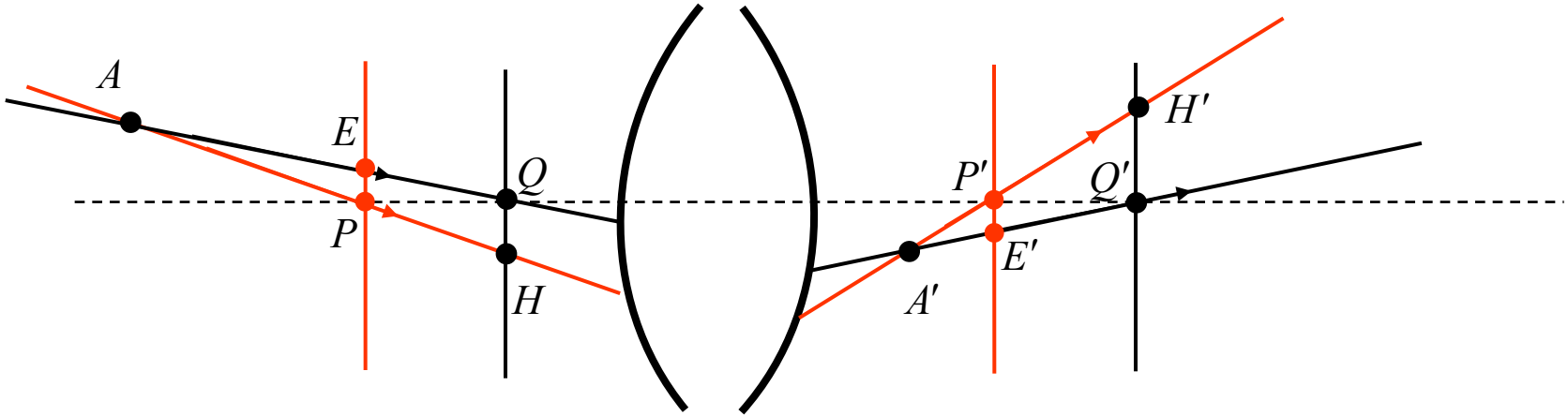
3. 基点基面

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。



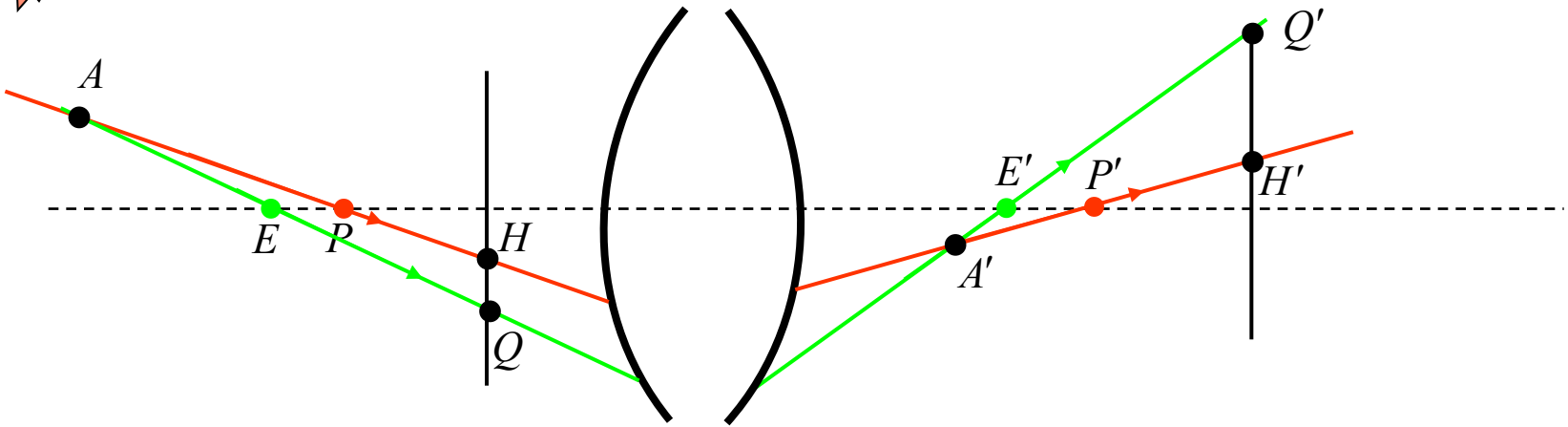
3. 基点基面

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。



多选题 1分

设置

已知基面和基点可以确定一切物点的像点。试判断以下情况下，是否可以唯一地确定像

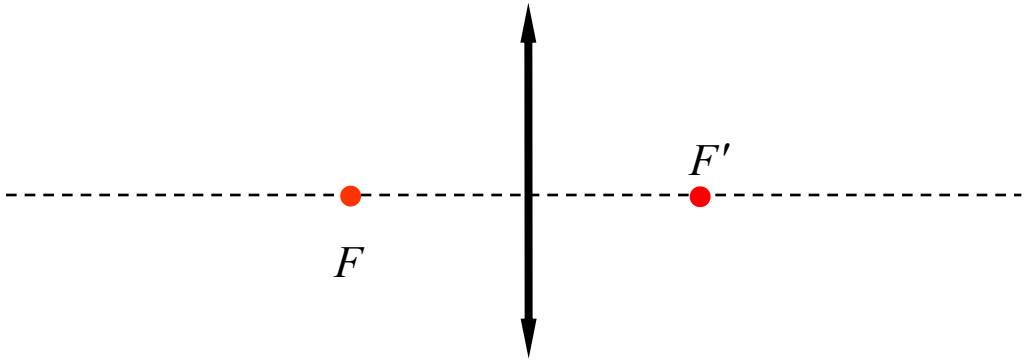
A 两对共轭面的位置和放大率

B 一对共轭面的位置和放大率，及光轴上的两对共轭点

提交

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

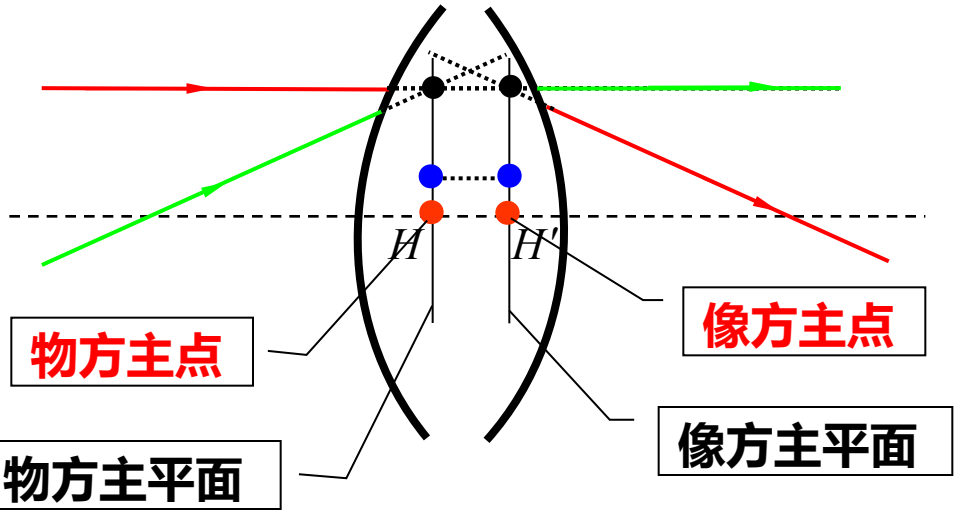


4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

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。

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。

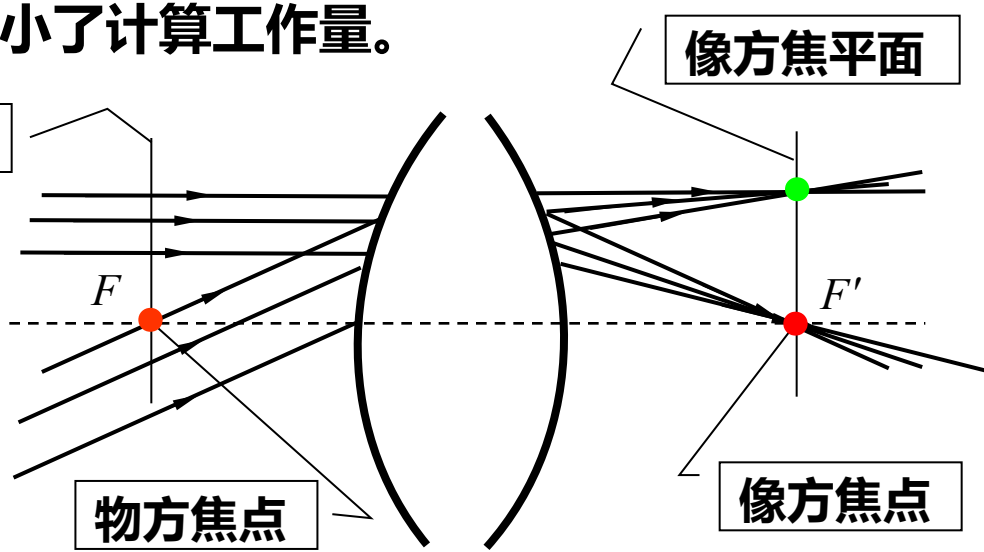
▲该共轭面的垂轴放大倍率 $\beta = 1$。

4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

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。

多选题 1分

设置

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

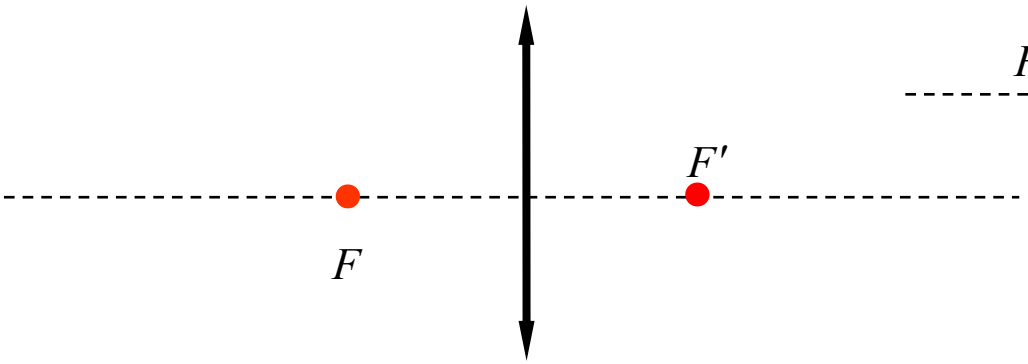
D 像方焦平面与物方无限远垂轴平面是一对共轭面

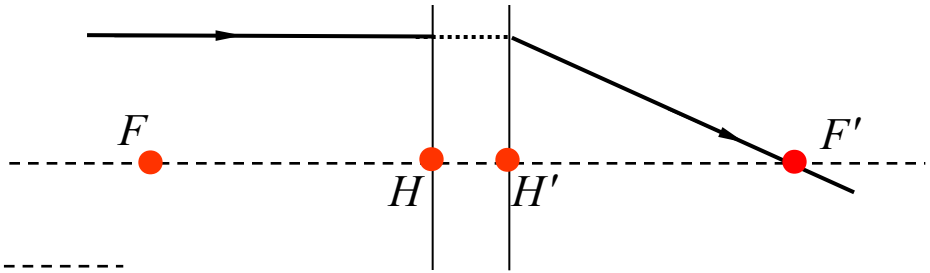
提交

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。

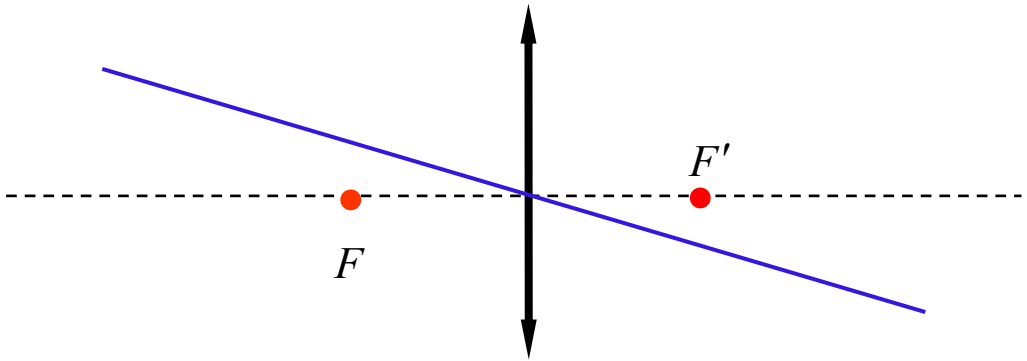




一对主平面 两个焦点

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

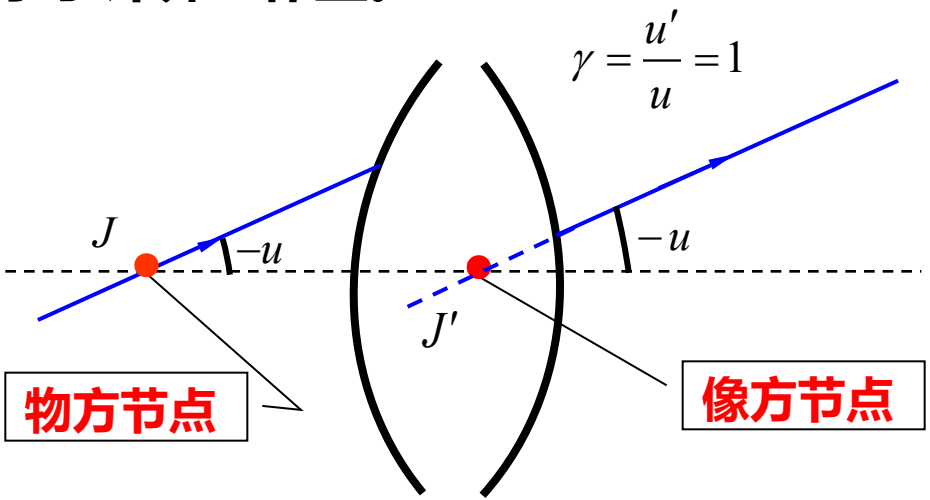
问题：为何要求解基面和基点?

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。

节点 $\gamma = 1$ **的一对共轭点。**

- **过节点的光线通过系统以后其出射光线的方向不变。**
- **系统物像空间位于同一介质中，节点与主点重合。**

当一个成像系统的物和像空间介质相同时，不需要额外个基点来完整描述该系统的一阶性质，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

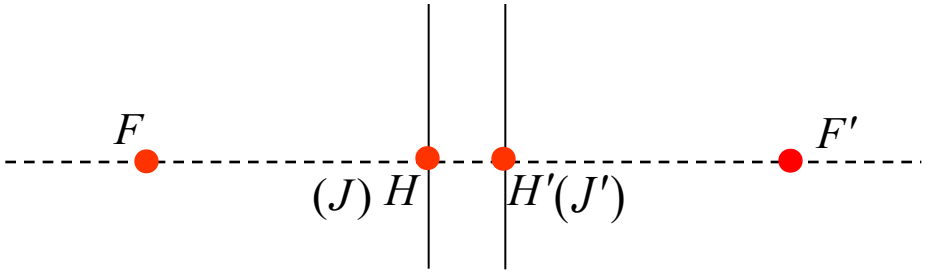
问题：为何要求解基面和基点?

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

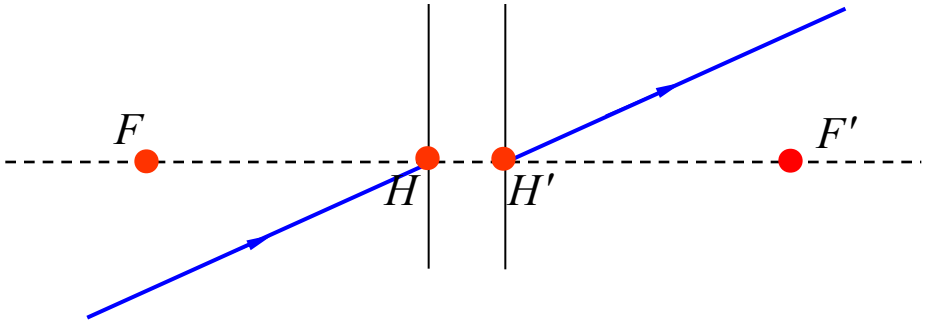
问题：为何要求解基面和基点?

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

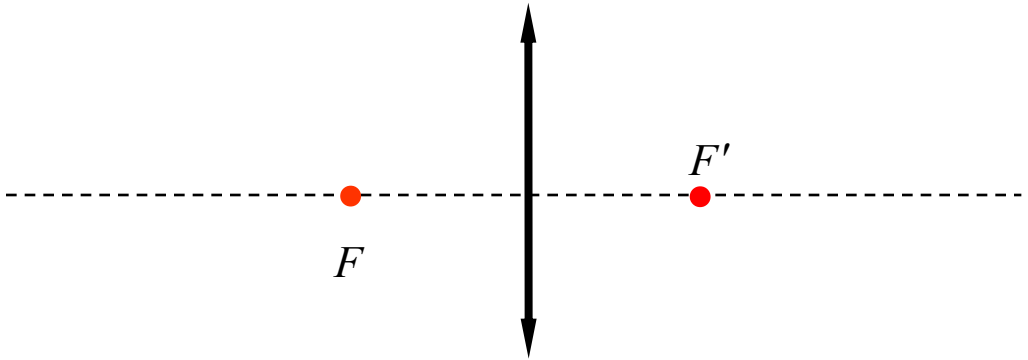
主点
- 两个主点共轭　$\beta=1$
- 两主平面上的任一对等高点共轭

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

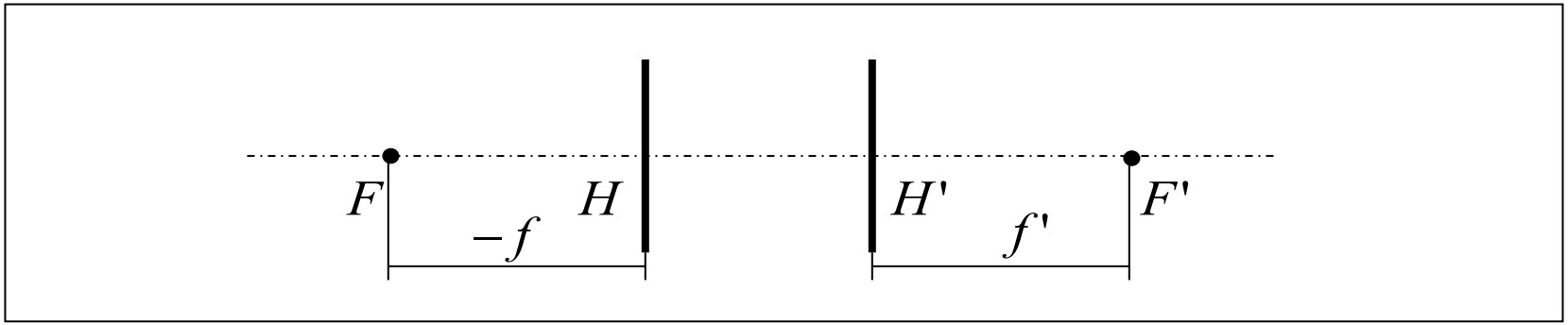
思考：两对共轭点，一对共轭面的位置及放大倍率



4. 共轴球面理想光学系统的基点基面

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；

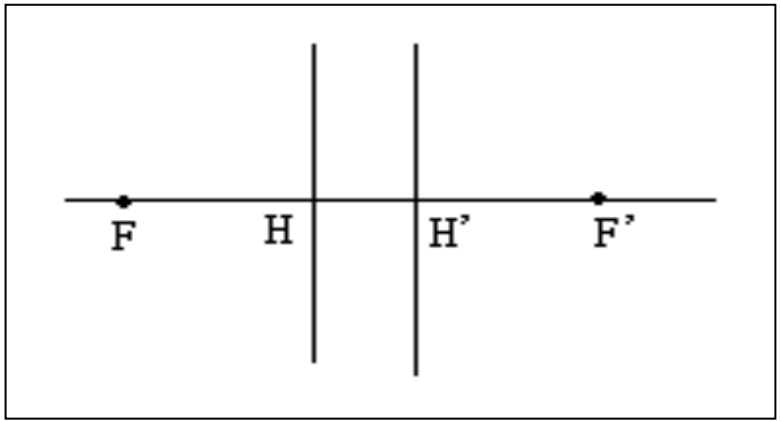
f—以H为起点，计算到F，由左向右为正。

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

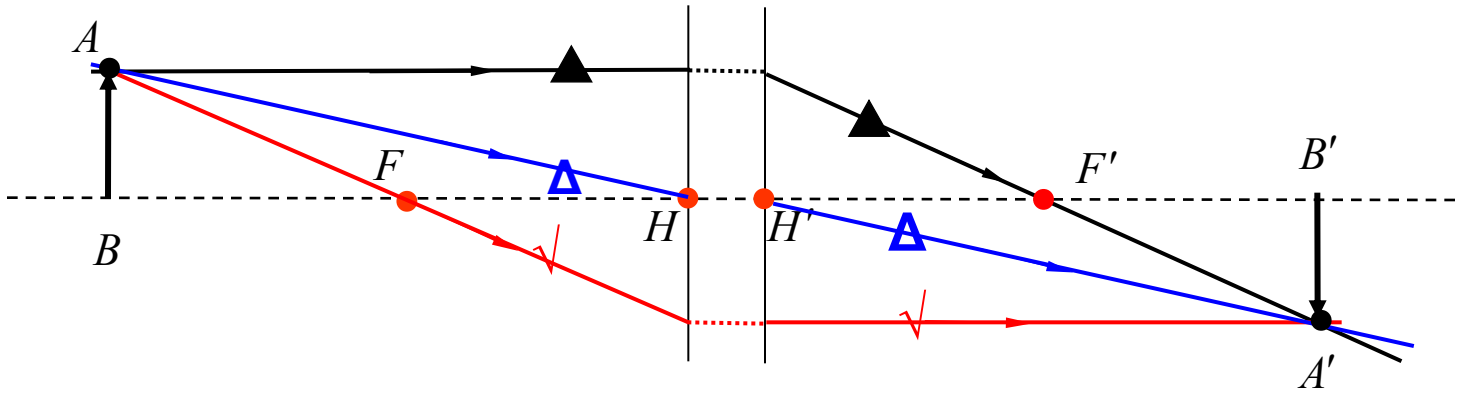
一对主平面，加上无限远轴上物点和像方焦点F’，以及物方焦点F和无限远轴上像点这两对共轭点，就是最常用的共轴系统的基点。

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：



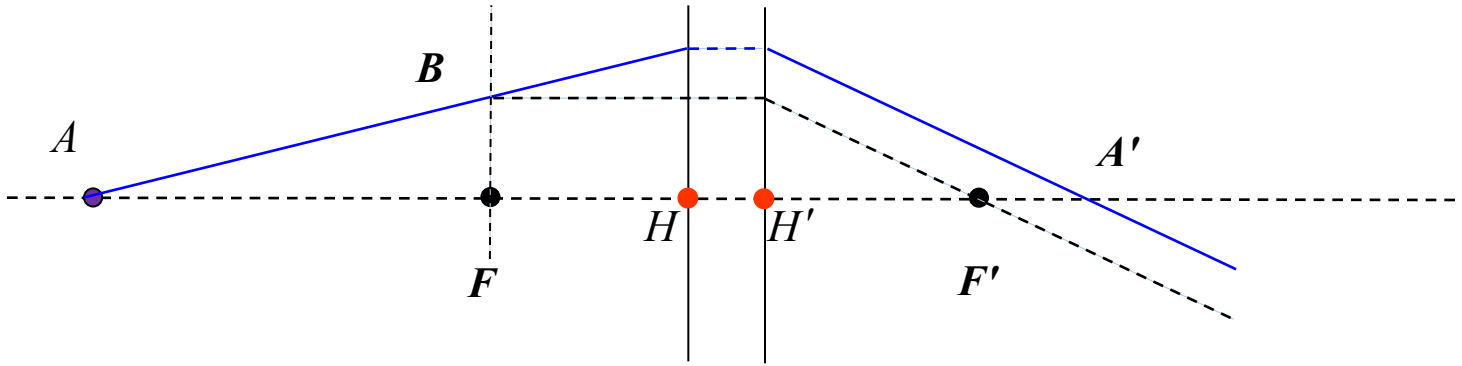
理想光学系统的常用表示方式

5. 理想光学系统的物像关系



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。



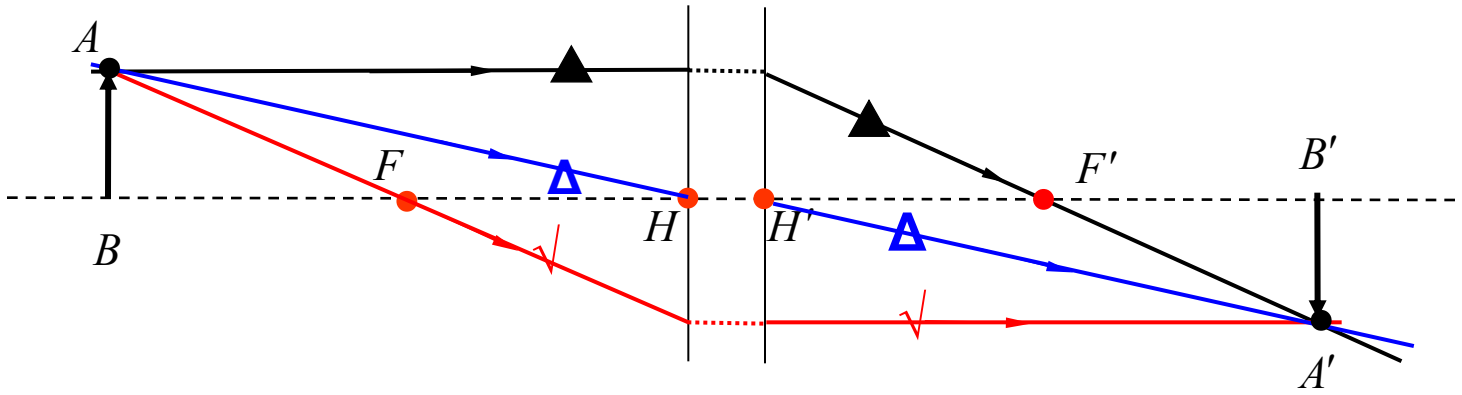
5. 理想光学系统的物像关系

▲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。

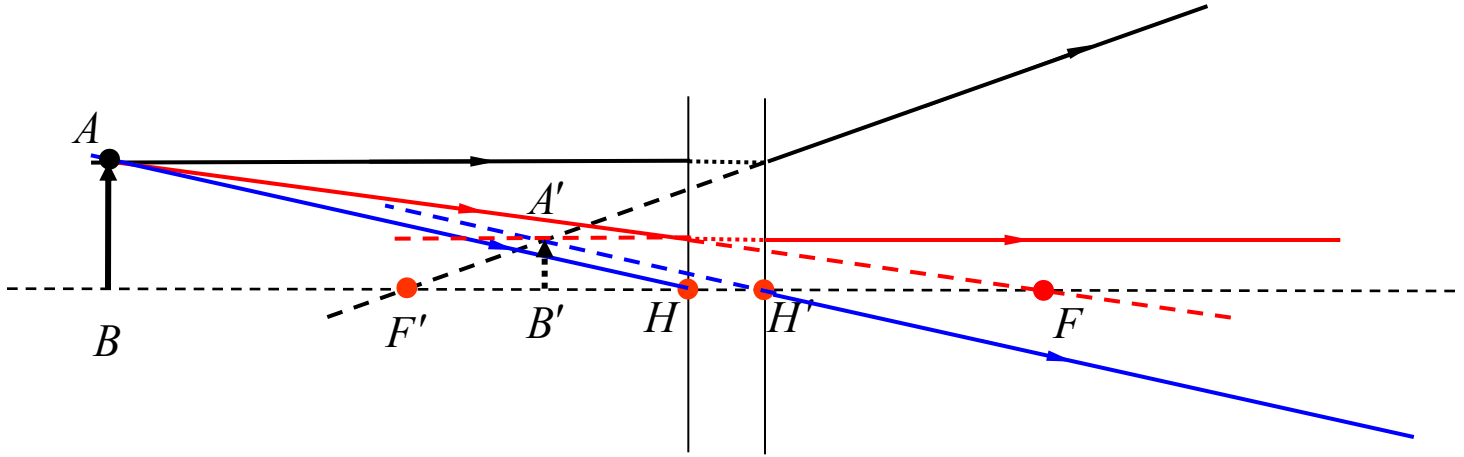
图解法

▲会聚光组　$f' > 0$



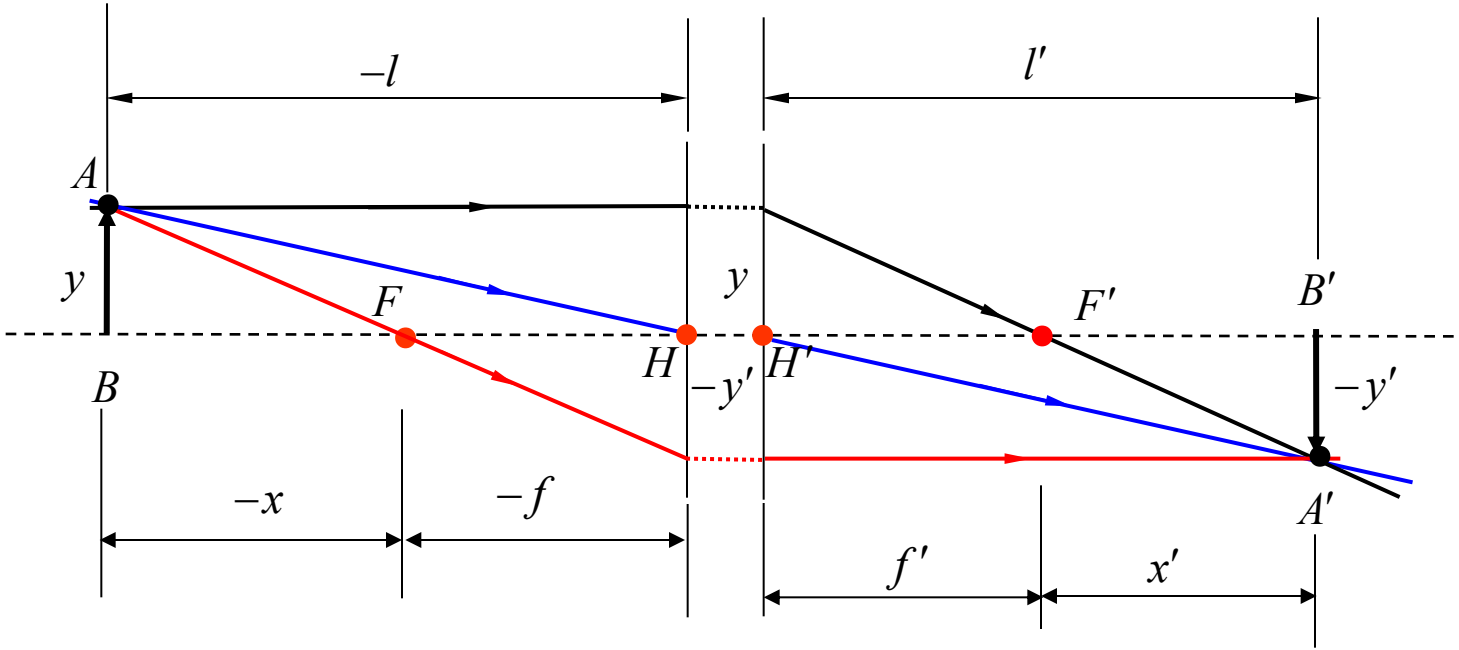
5. 理想光学系统的物像关系

▲发散光组　$f' < 0$



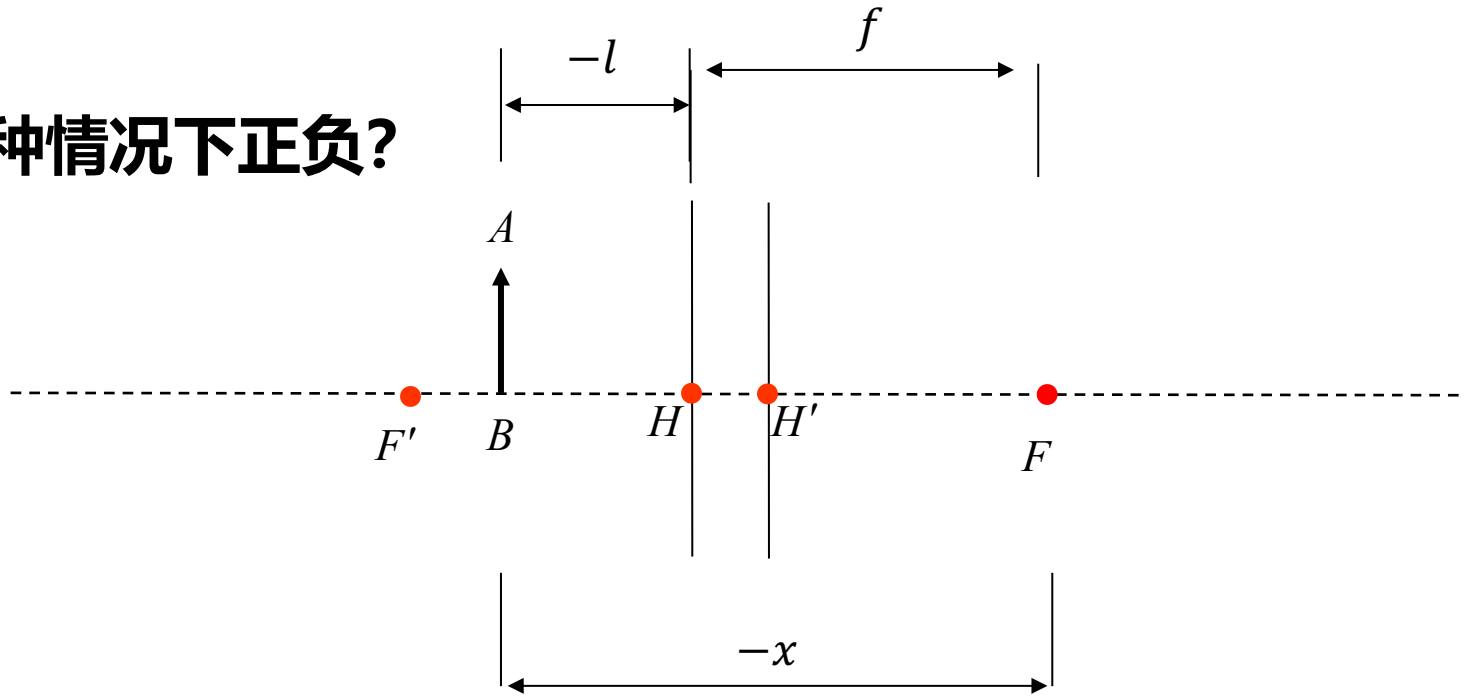
5. 理想光学系统的物像关系

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?



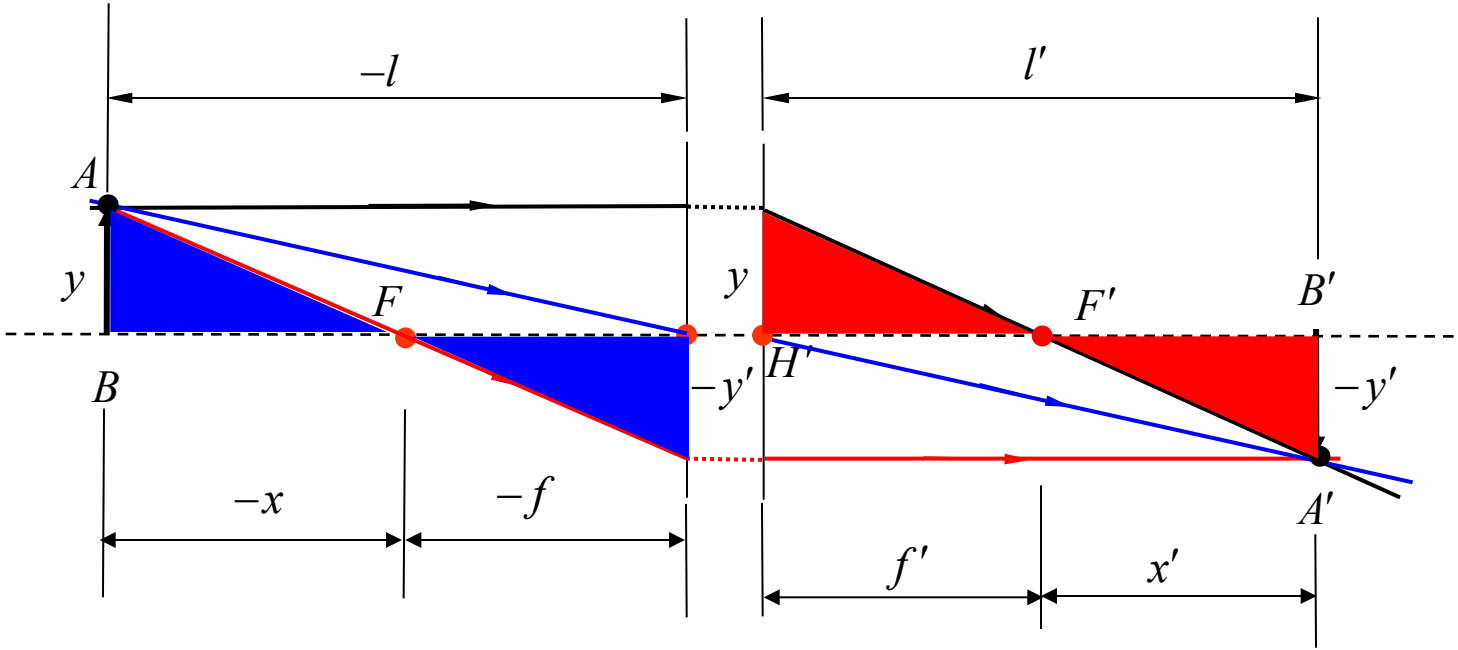
5. 理想光学系统的物像关系

▲牛顿公式

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad \Rightarrow \quad \boxed{xx' = ff'}$$

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

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



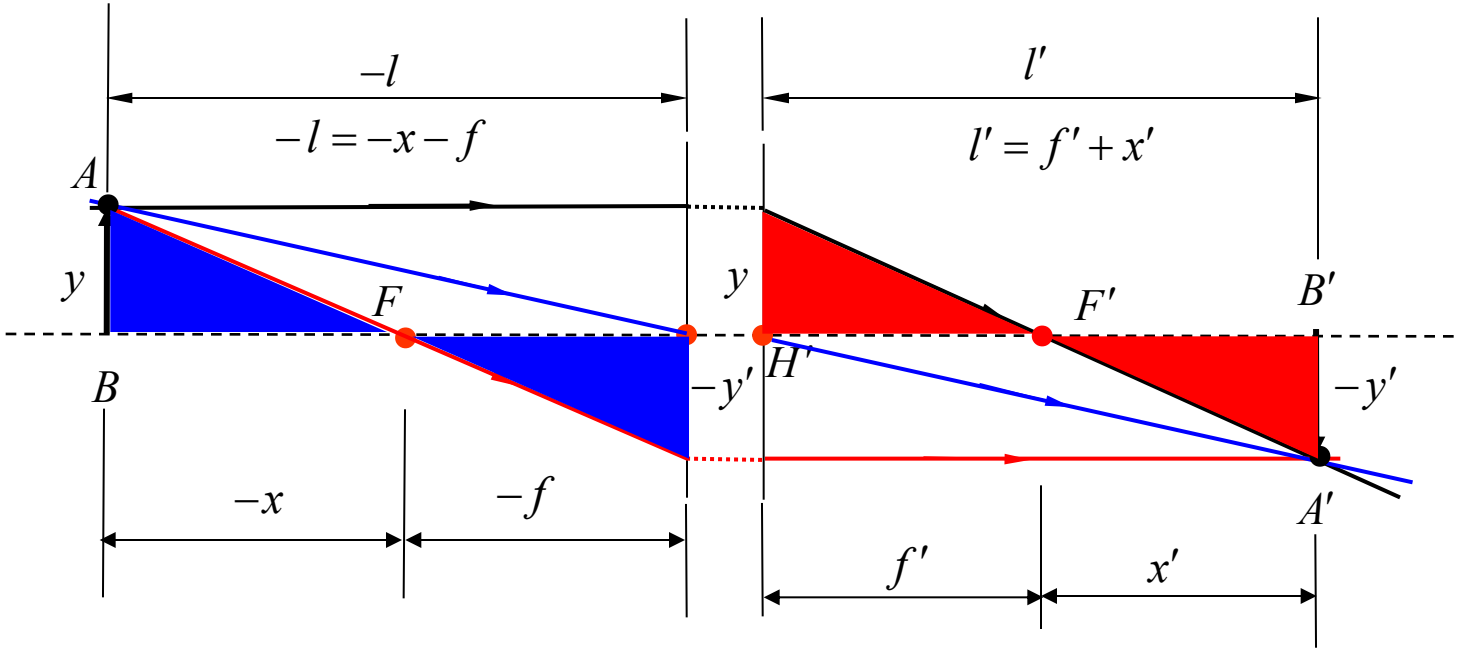
5. 理想光学系统的物像关系

▲高斯公式 ⇒ $\dfrac{f'}{l'}+\dfrac{f}{l}=1$

$x=l-f$

$x'=l'-f'$

$xx'=ff'$



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

问题：透镜的物方焦距与像方焦距相等？

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

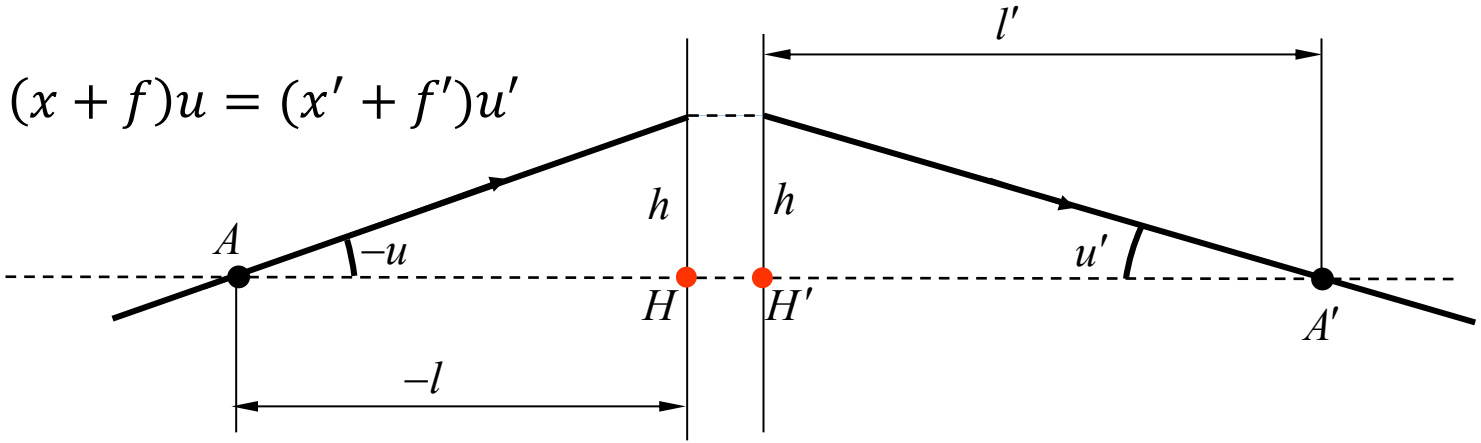
$$yfu = y'f'u'$$

$$h = lu = l'u'$$

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

$$x = -\frac{y'}{y}f \qquad (x+f)u = (x'+f')u'$$

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



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

解析法

▲高斯公式

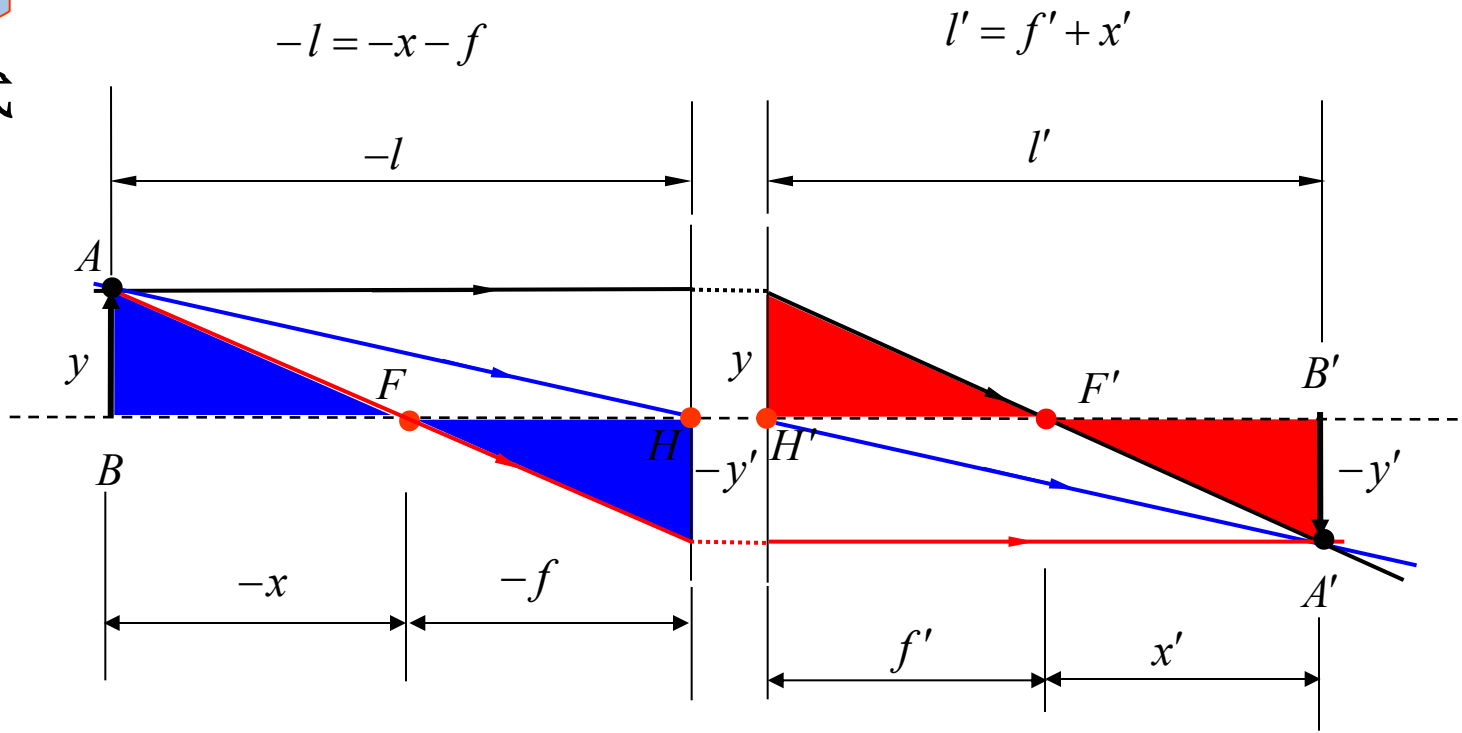
$$xx' = ff'$$

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

$$n = n'$$

$$f = -f'$$

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



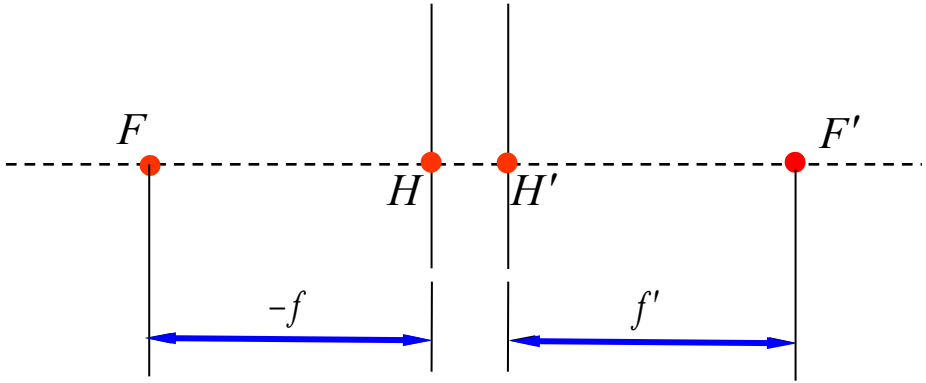
6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

问题：透镜的物方焦距与像方焦距相等？

仅有折射面

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

$$n=n' \qquad f=-f'$$



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

问题：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，$\frac{f'}{f}=\frac{n'}{n}$　　$n=n'$　　$f=f'$

2.反射面的个数为偶数时，$\frac{f'}{f}=-\frac{n'}{n}$　　$n=n'$　　$f=-f'$

6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

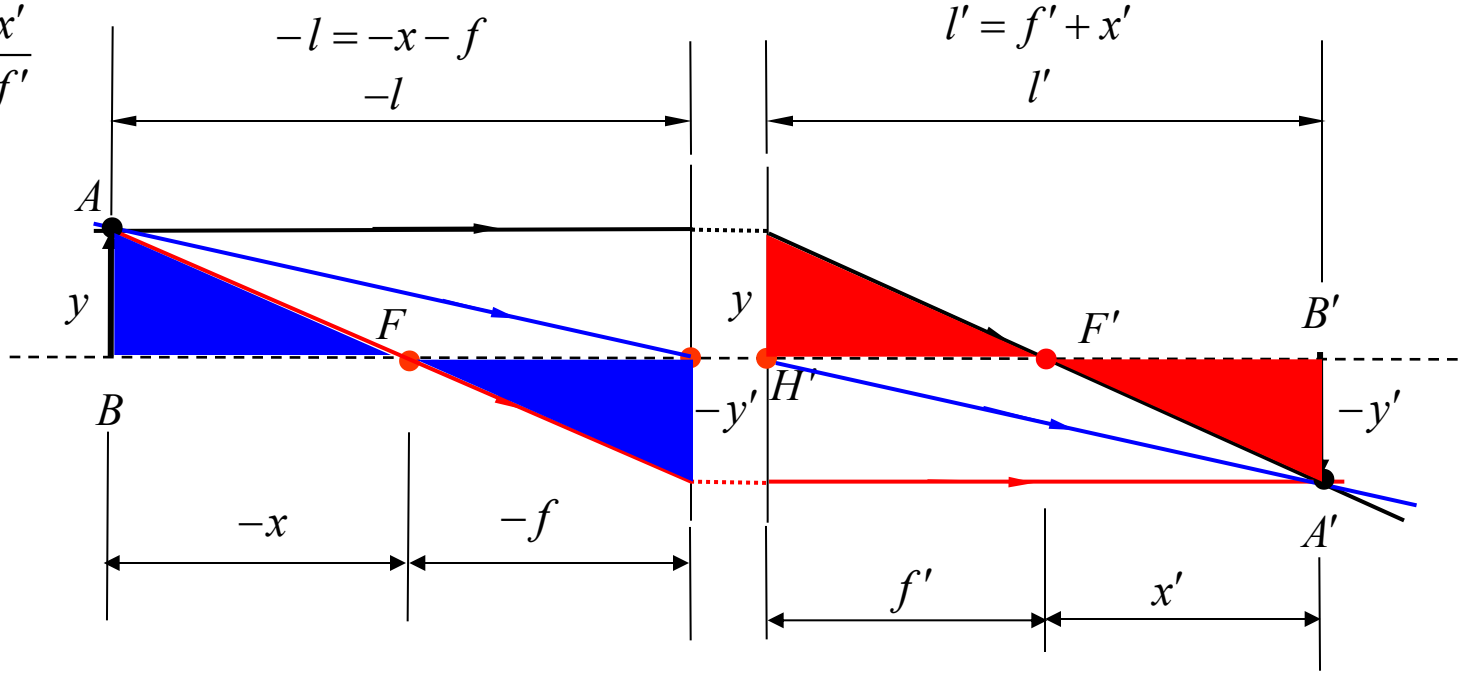
▲垂轴放大倍率

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

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

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

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



6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

▲轴向放大倍率

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

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

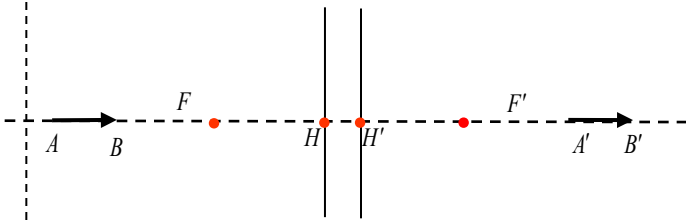
$$\xrightarrow{n=n'}\quad\alpha=\frac{l'^2}{l^2}=\beta^2$$

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

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

$$xx'=ff'\qquad x\mathrm{d}x'+x'\mathrm{d}x=0$$

$$\frac{f'}{l'}+\frac{f}{l}=1\qquad\frac{f'\mathrm{d}l'}{l'^2}+\frac{f\mathrm{d}l}{l^2}=0$$

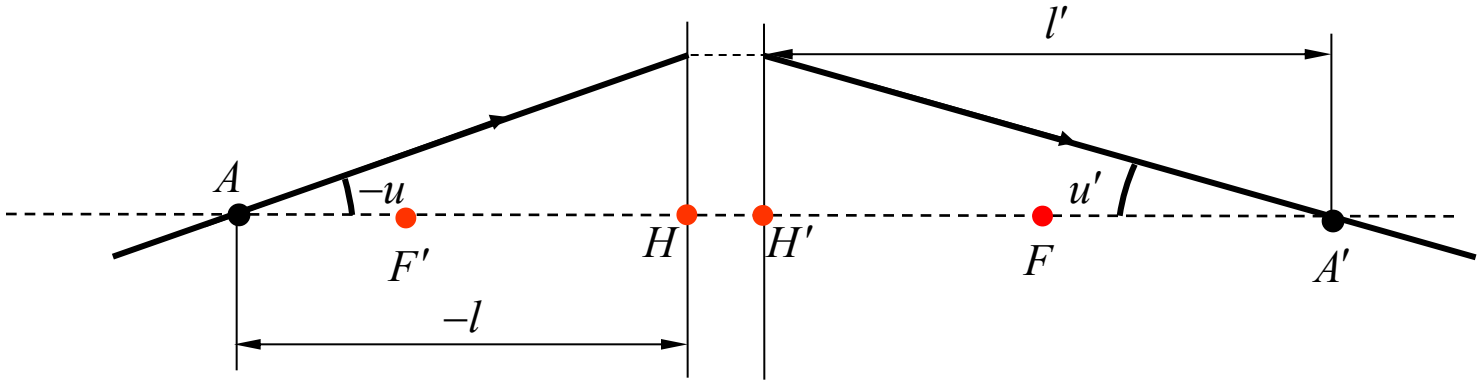


6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

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

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

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

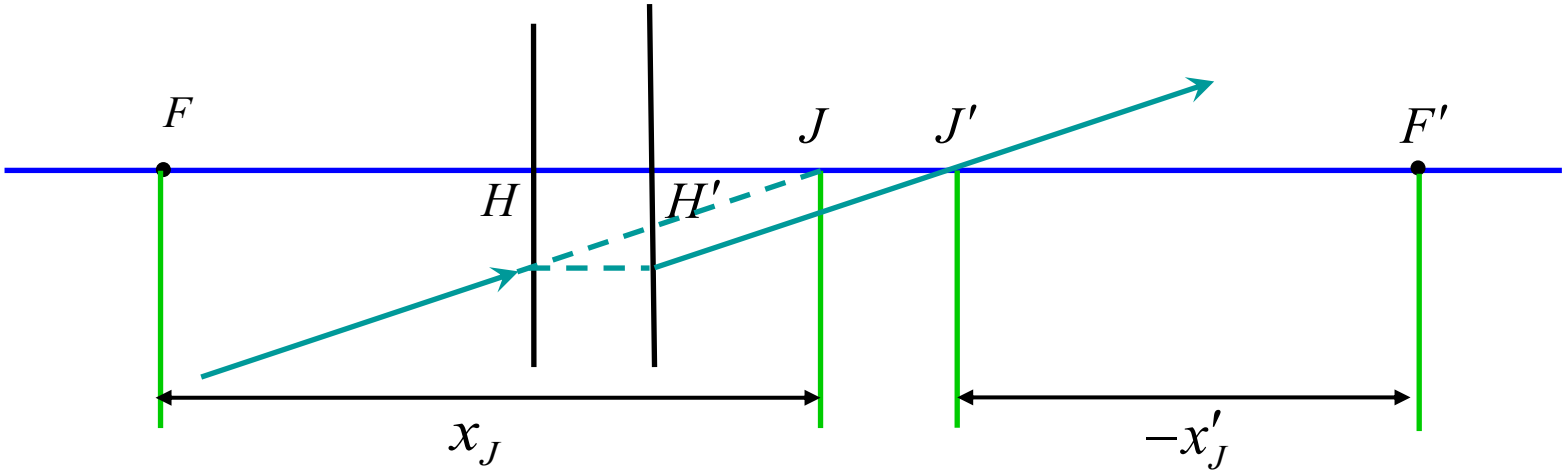


6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

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

$\gamma = 1$ **节点的定义**

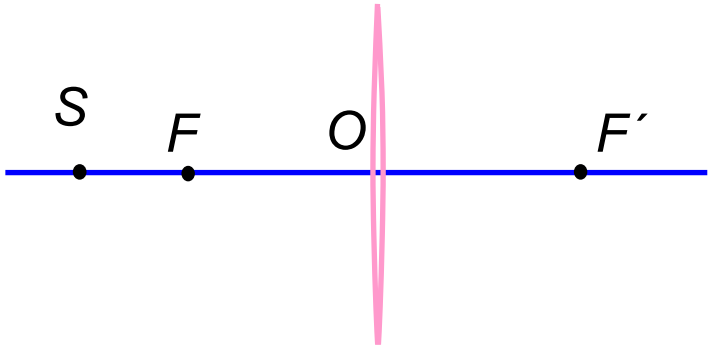
得 $x_J = f'$ $x'_J = f$



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横向放大率。

$$-f = f' = 20cm$$



1）高斯法：

$l = -30cm$

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \Rightarrow l' = 60cm$$

$$\beta = \frac{l'}{l} \Rightarrow \beta = -2$$

2）牛顿法：

$$xx' = ff' \Rightarrow x' = 40cm$$

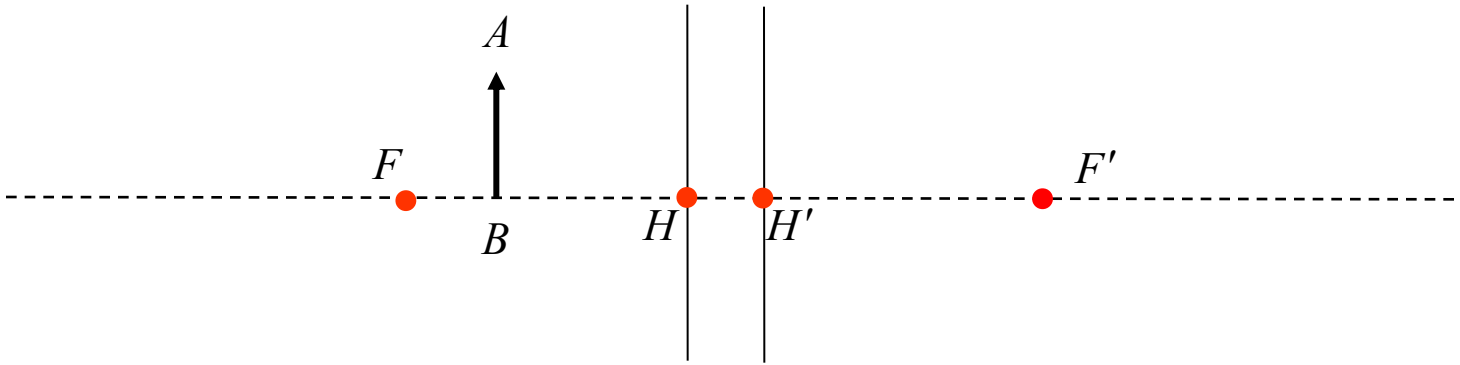
$x = -10cm$

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \Rightarrow \beta = -2$$

作图法

▲会聚光组　$f' > 0$

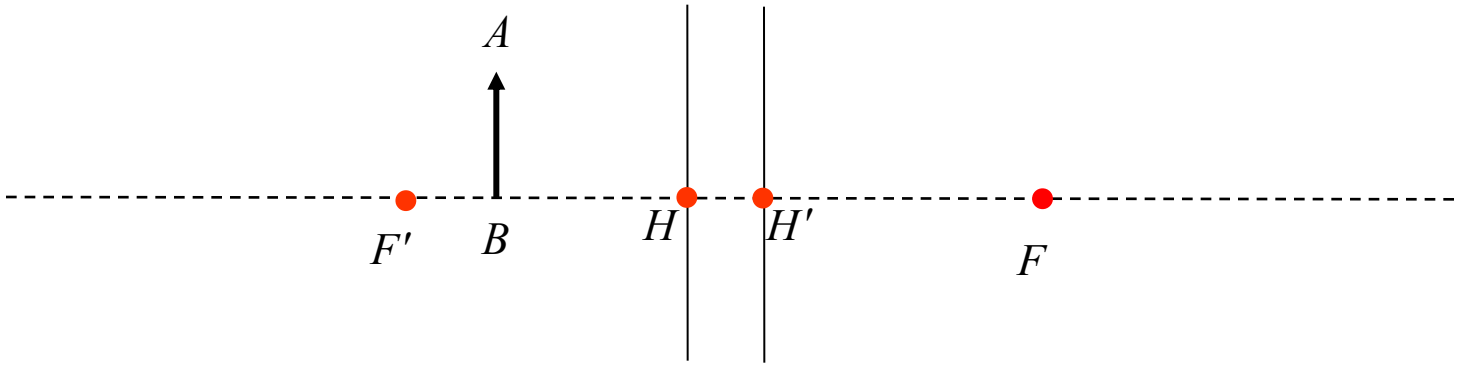
求物*AB*的像。



作图法

▲发散光组　$f' < 0$

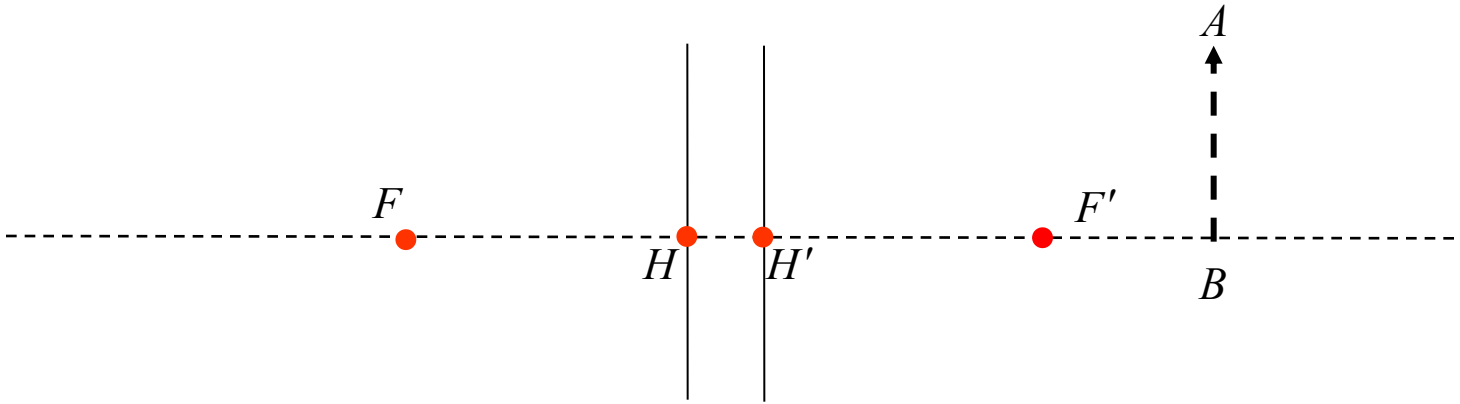
求物*AB*的像。



作图法

▲会聚光组　$f' > 0$

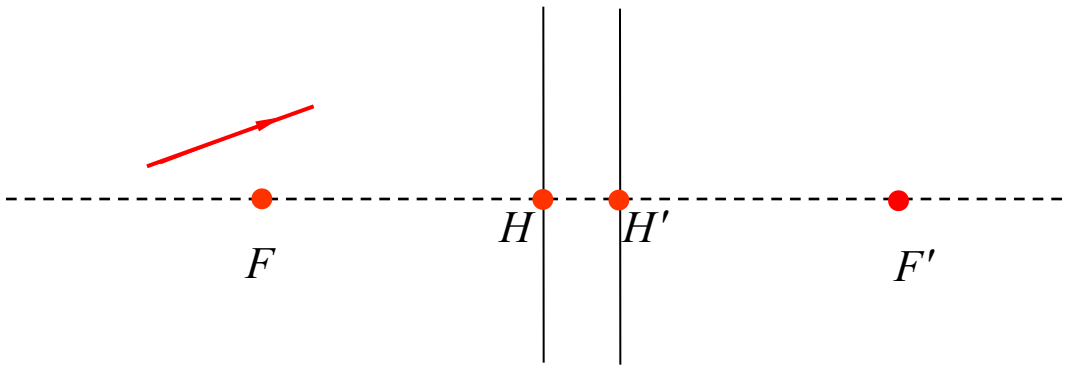
求物*AB*的像。



作图法

▲会聚光组　$f' > 0$

求物方光线***a***的共轭线。



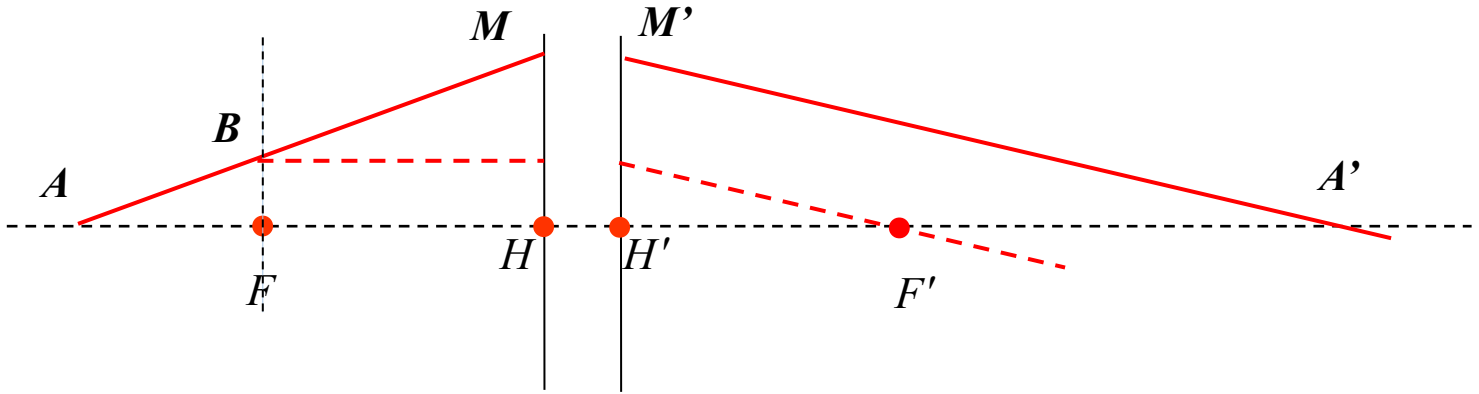
6. 系统物方焦距与像方焦距的关系

▲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

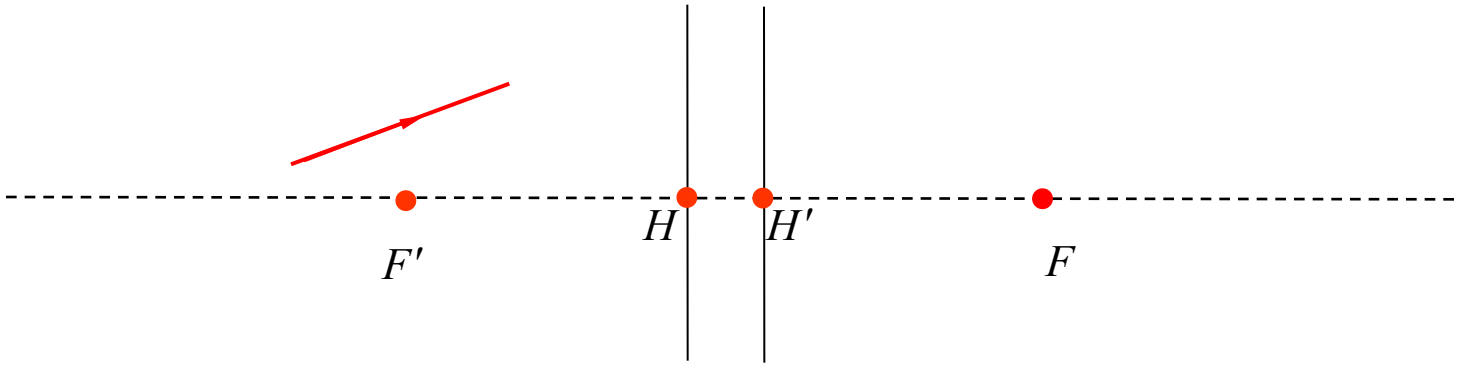
AM线段的像由A’到正无限远和由M’到负无限远的两条线段组成



作图法

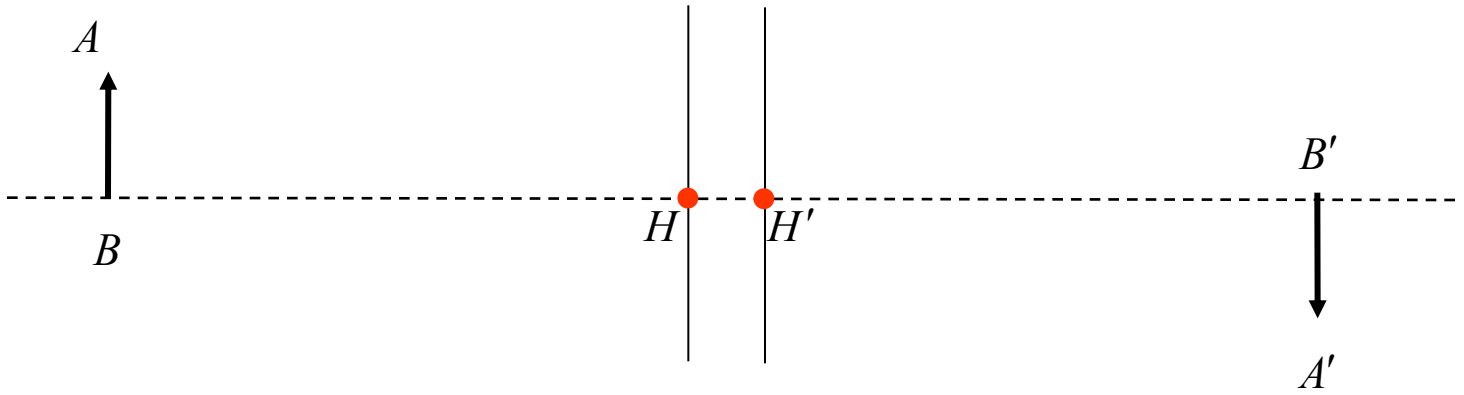
▲发散光组 $f' < 0$

求物方光线***a***的共轭线。



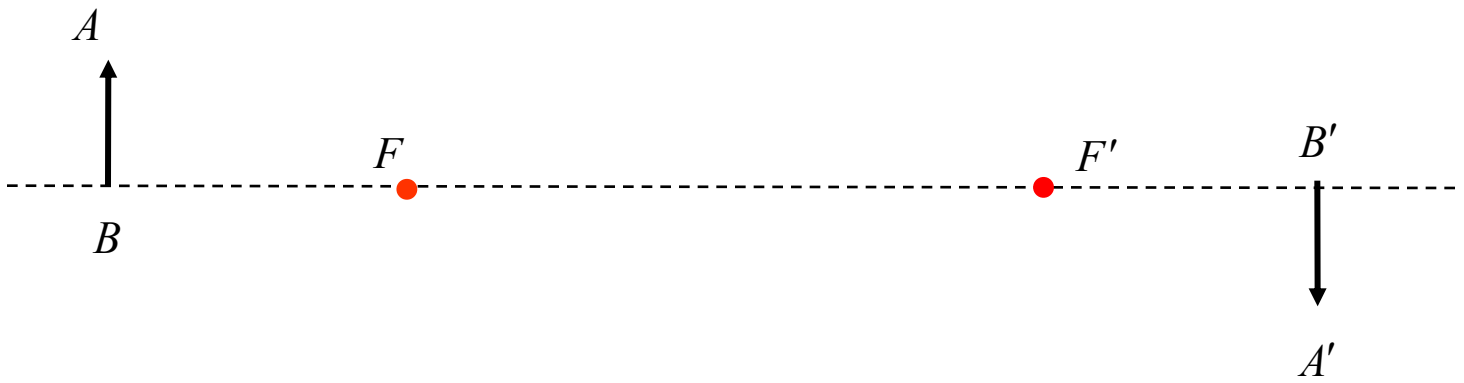
作图法

已知系统的一对主平面，及一对物、像，求系统的焦点位置。



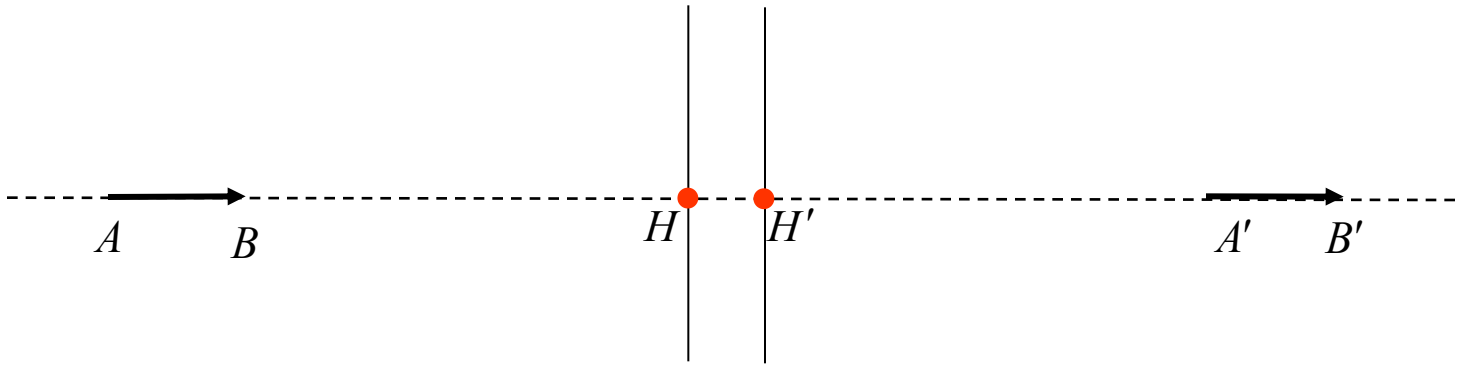
作图法

已知系统的焦点，及一对物、像，求系统的主平面及主点位置。



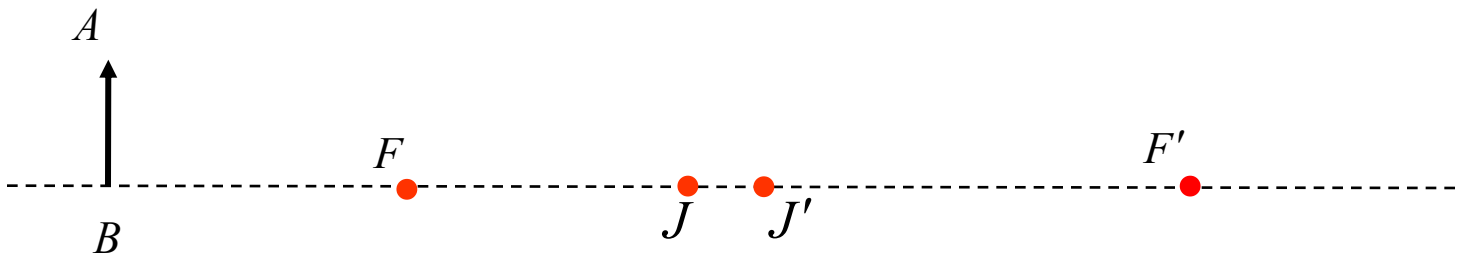
作图法

已知位于光轴上的物体AB及像$A'B'$，求系统的焦点位置。



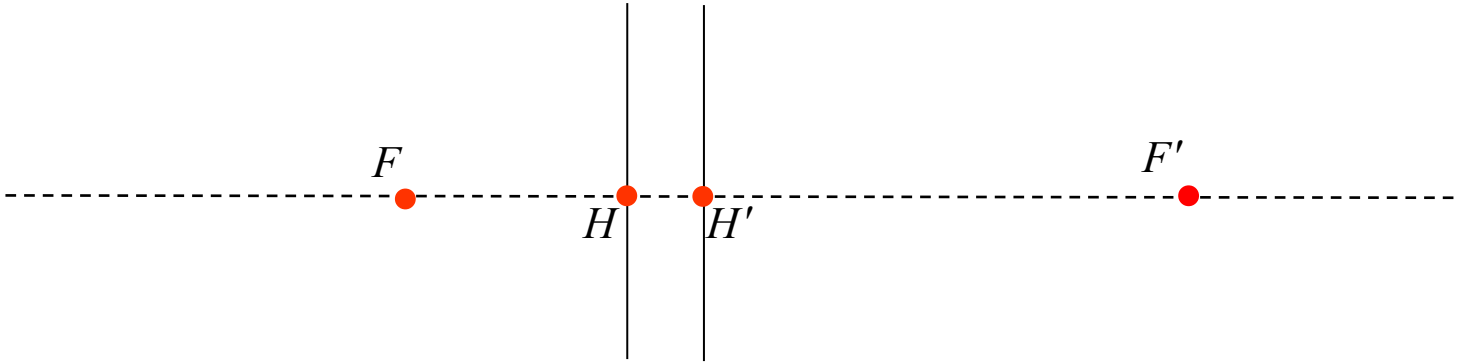
作图法

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。能否找到主点？

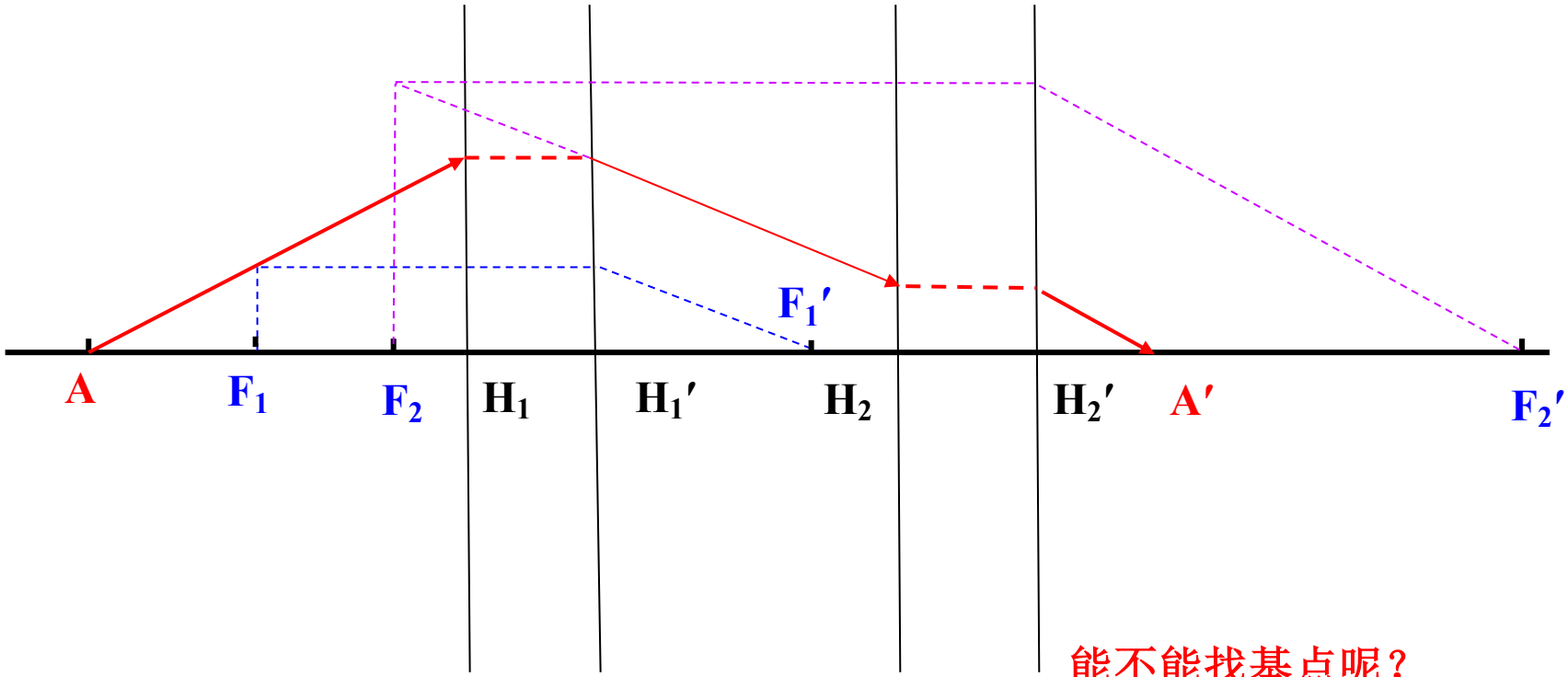


作图法

已知系统焦点、主平面，请找出其节点。



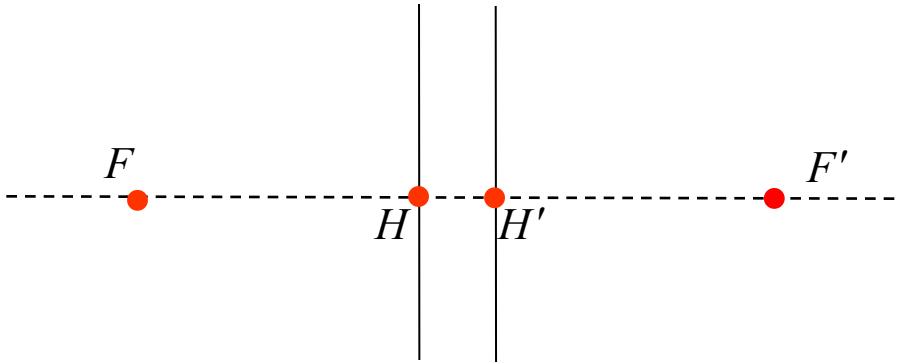
作图法

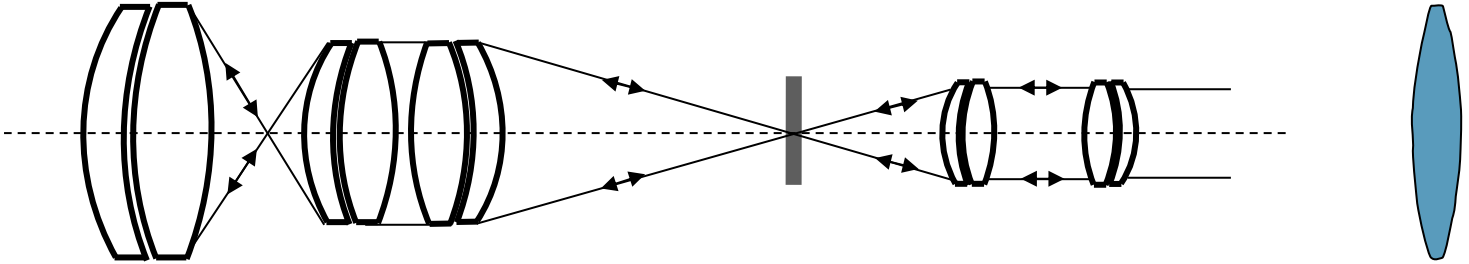


能不能找基点呢？

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？



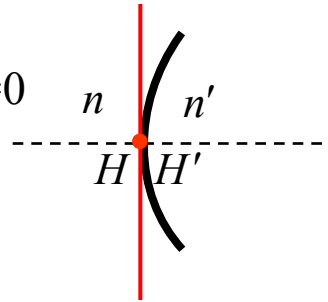


7. 单个折射球面的主点和焦点

主点

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

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

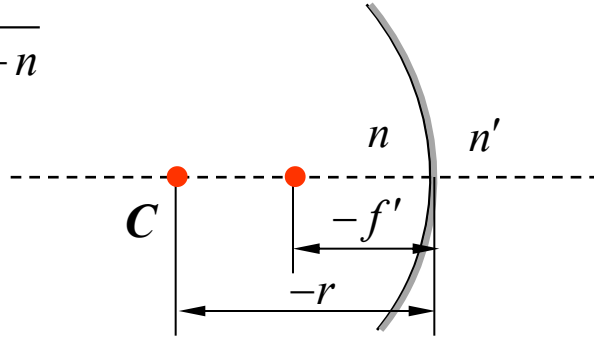


焦点

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

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

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



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

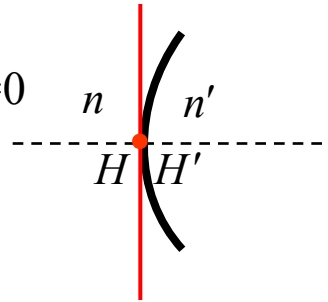
▲结论：单个折射面的两个主平面是重合的。并相切于折射面的顶点。

7. 单个折射球面的主点和焦点

主点

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

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

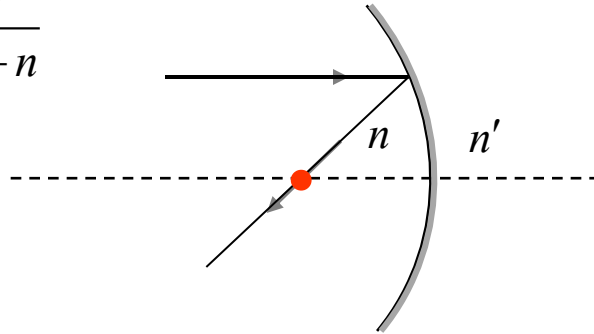


焦点

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

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

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

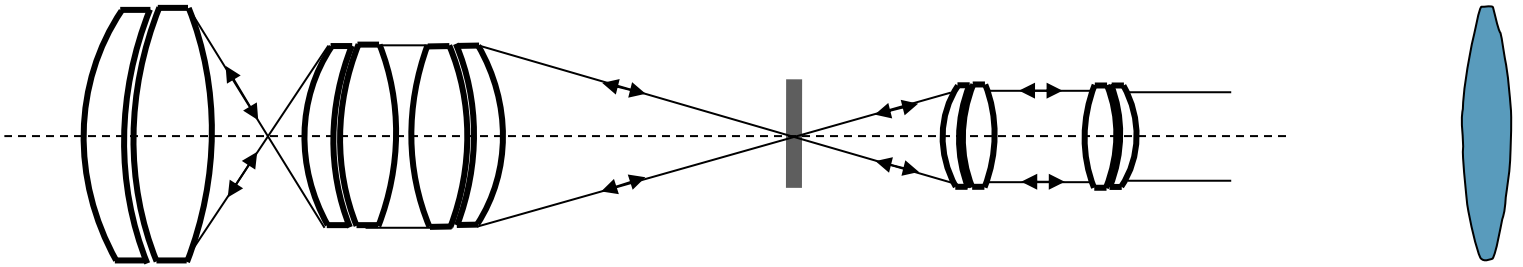


反射球面 $n'=-n \longrightarrow f'=\frac{r}{2}$

▲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。

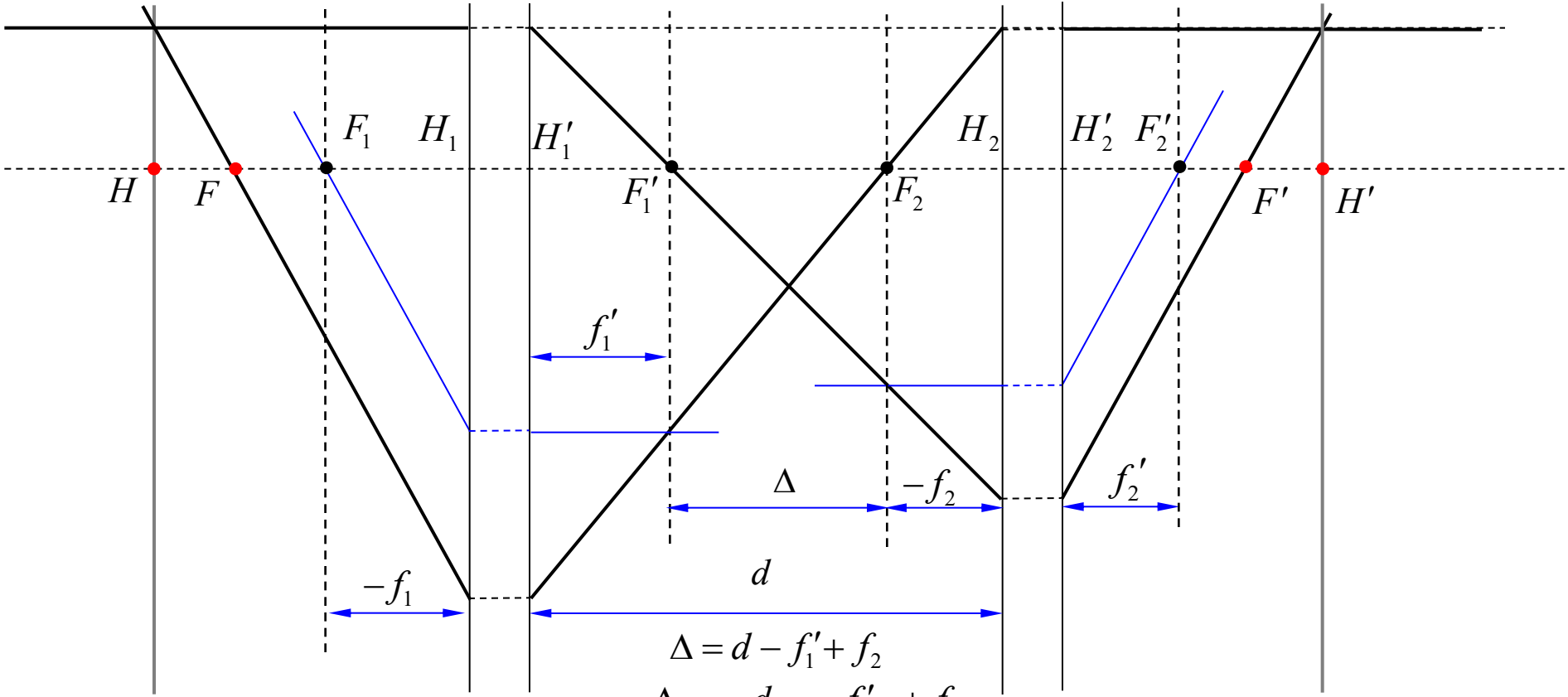
8. 理想光组的组合

▲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



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

$$\Delta_{k-1} = d_{k-1} - f_{k-1}' + f_k$$

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
- ……

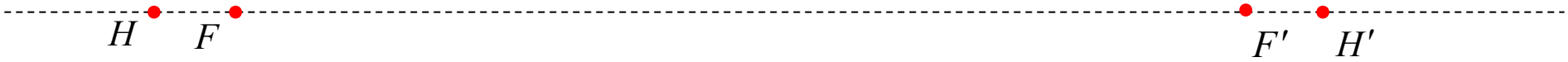
两系统间的参数

- 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。



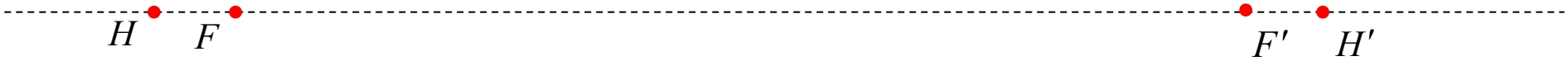
▲作图求解肯定没有问题?

8. 理想光组的组合

▲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。

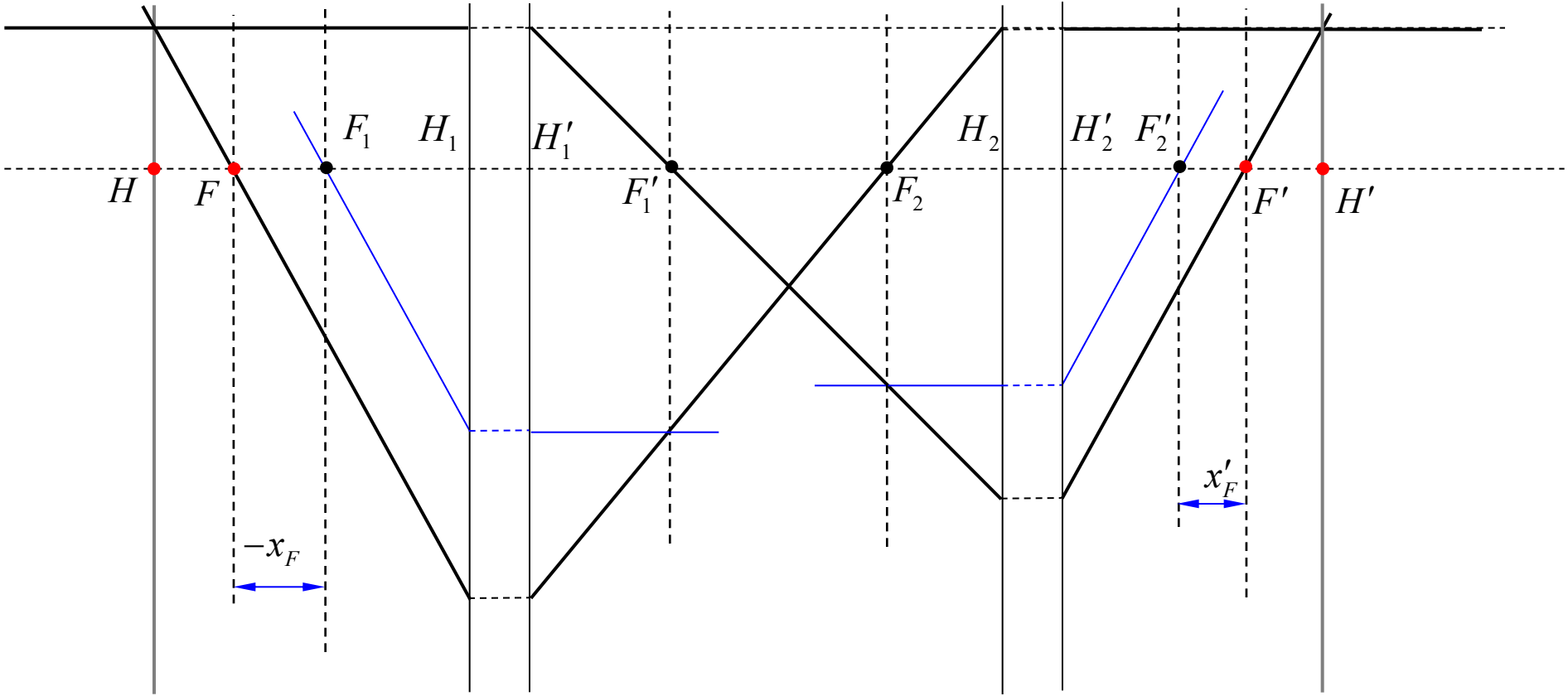


▲问题？作图求解肯定没有问题。

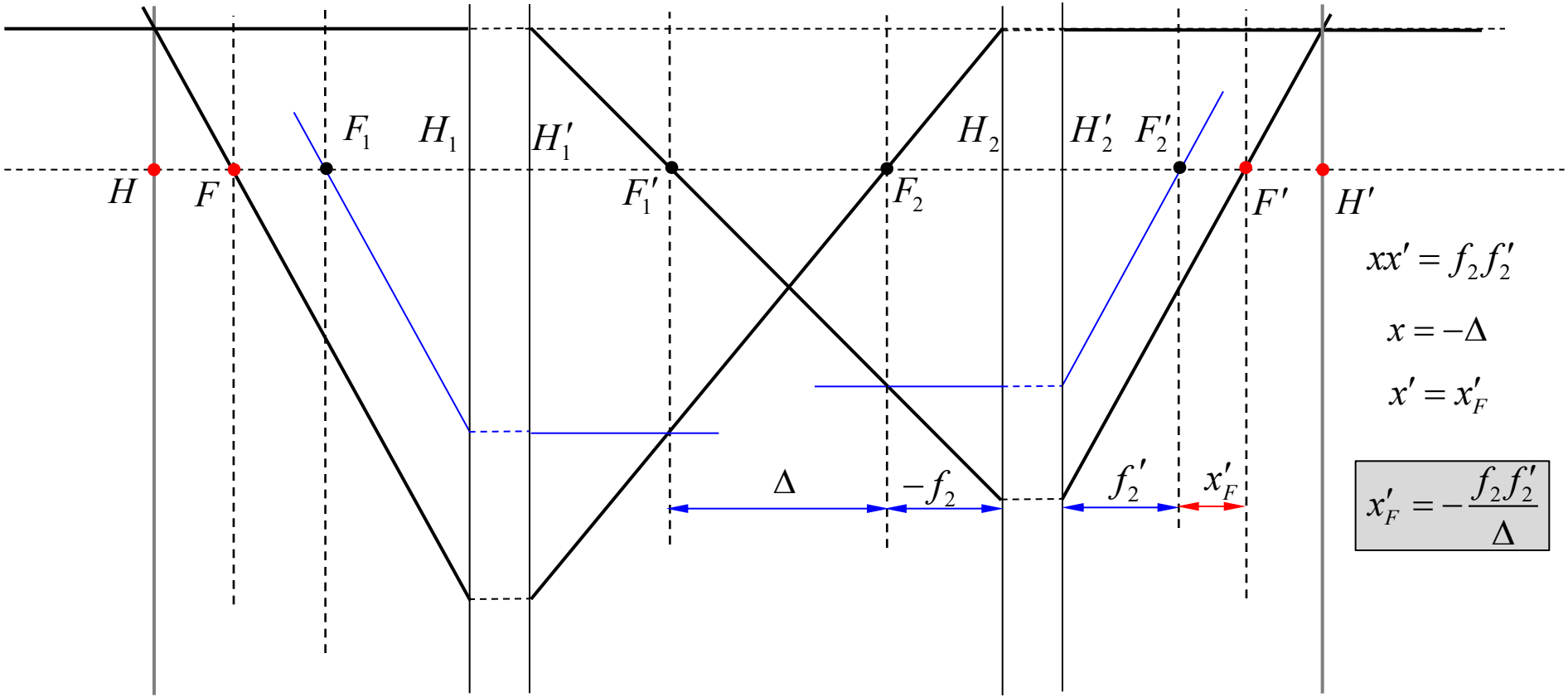
▲问题？解析求解呢？

焦点位置

▲问题:在图中如何表示?



焦点位置



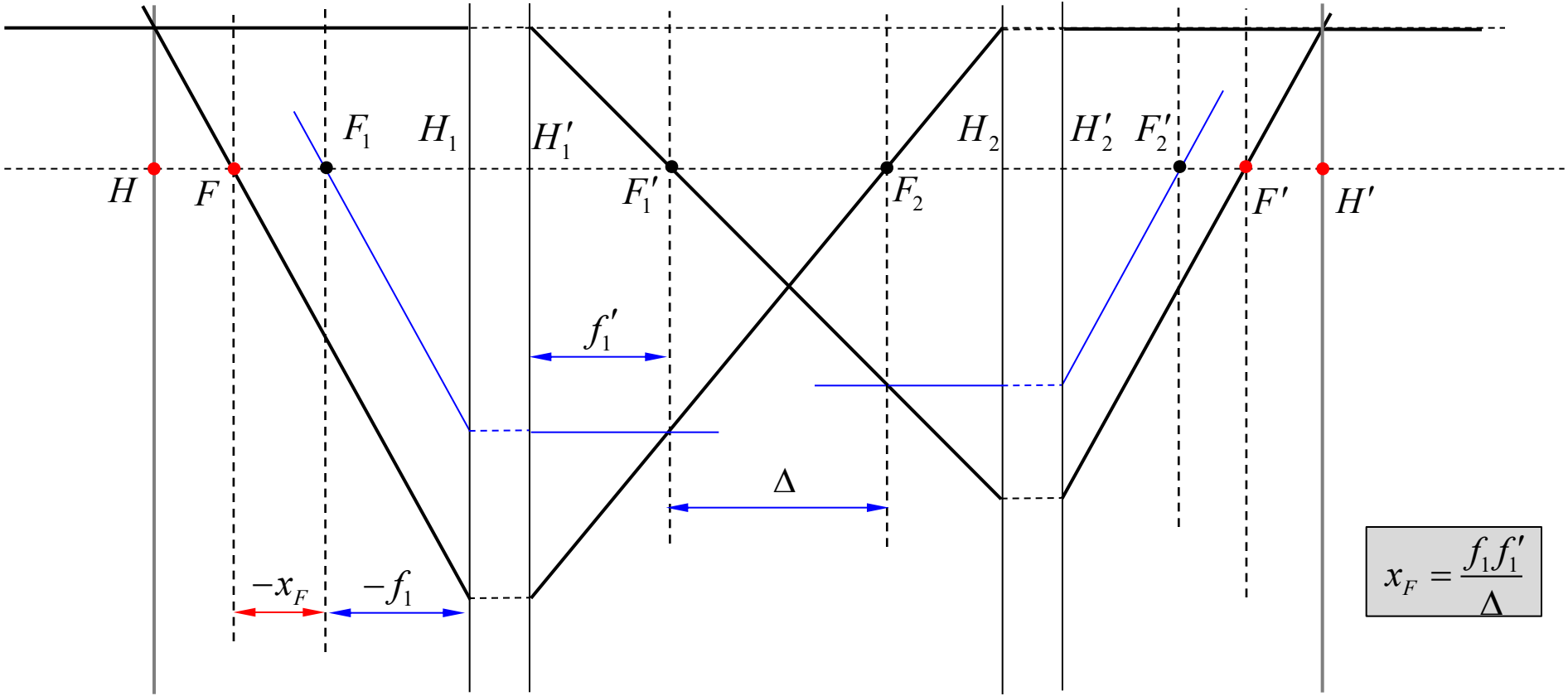
$$xx' = f_2 f_2'$$

$$x = -\Delta$$

$$x' = x_F'$$

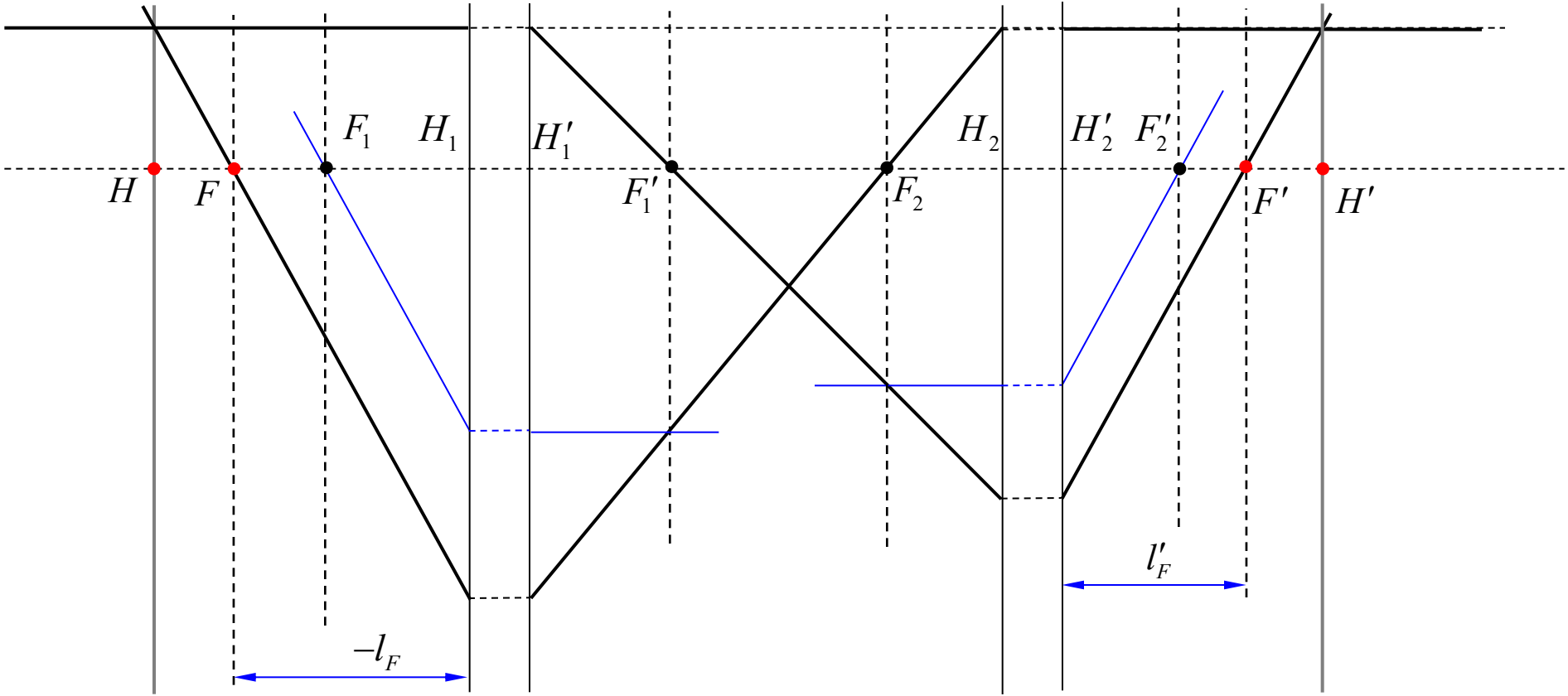
$$x_F' = -\frac{f_2 f_2'}{\Delta}$$

焦点位置

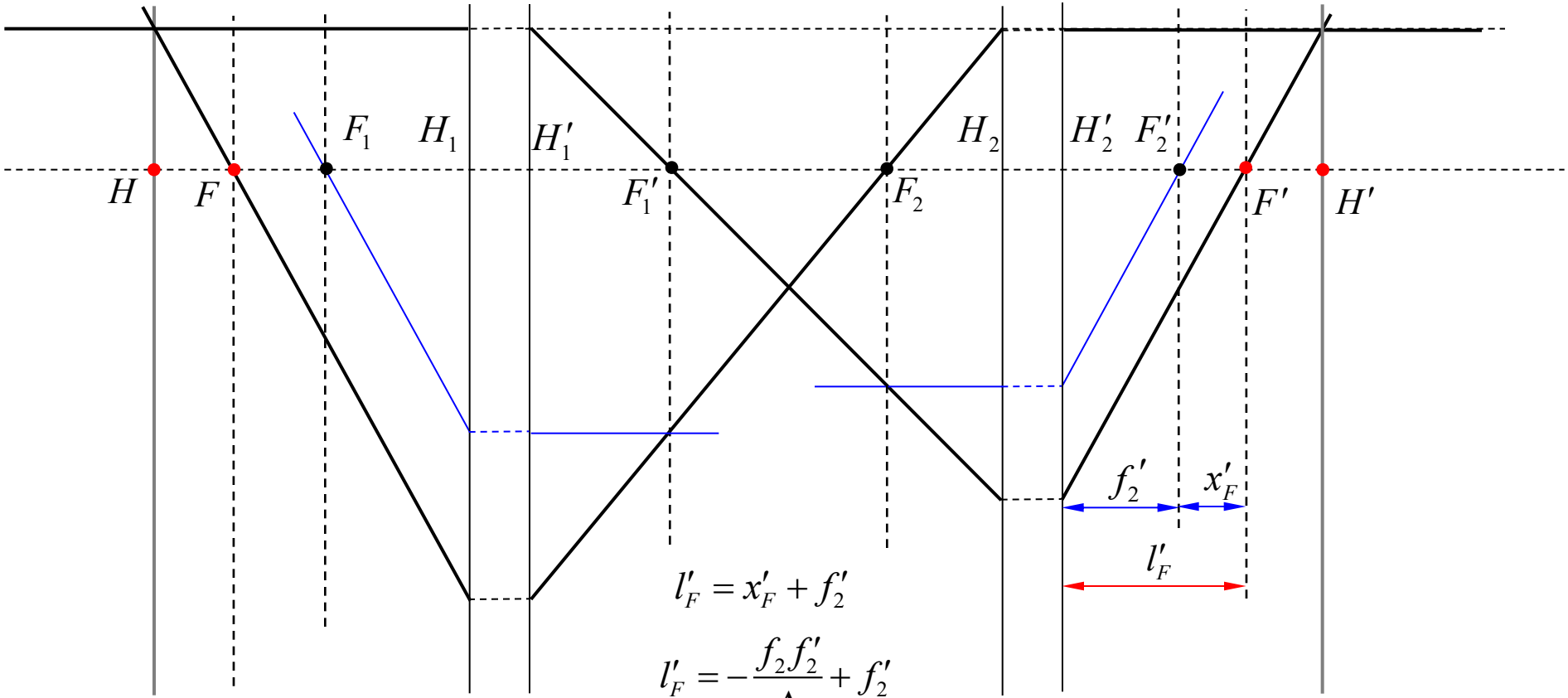


$$x_F = \frac{f_1 f_1'}{\Delta}$$

焦点位置



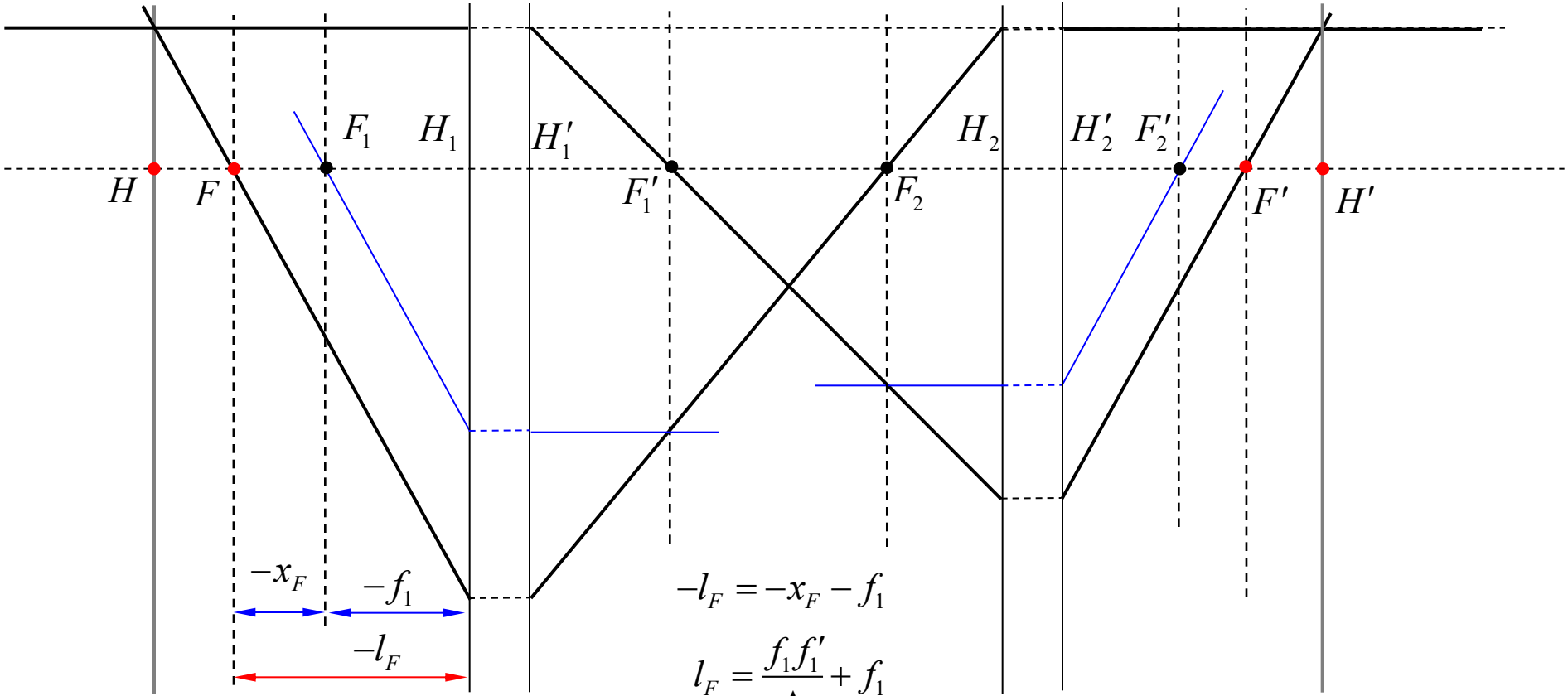
焦点位置



$$l'_F = x'_F + f'_2$$

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

焦点位置

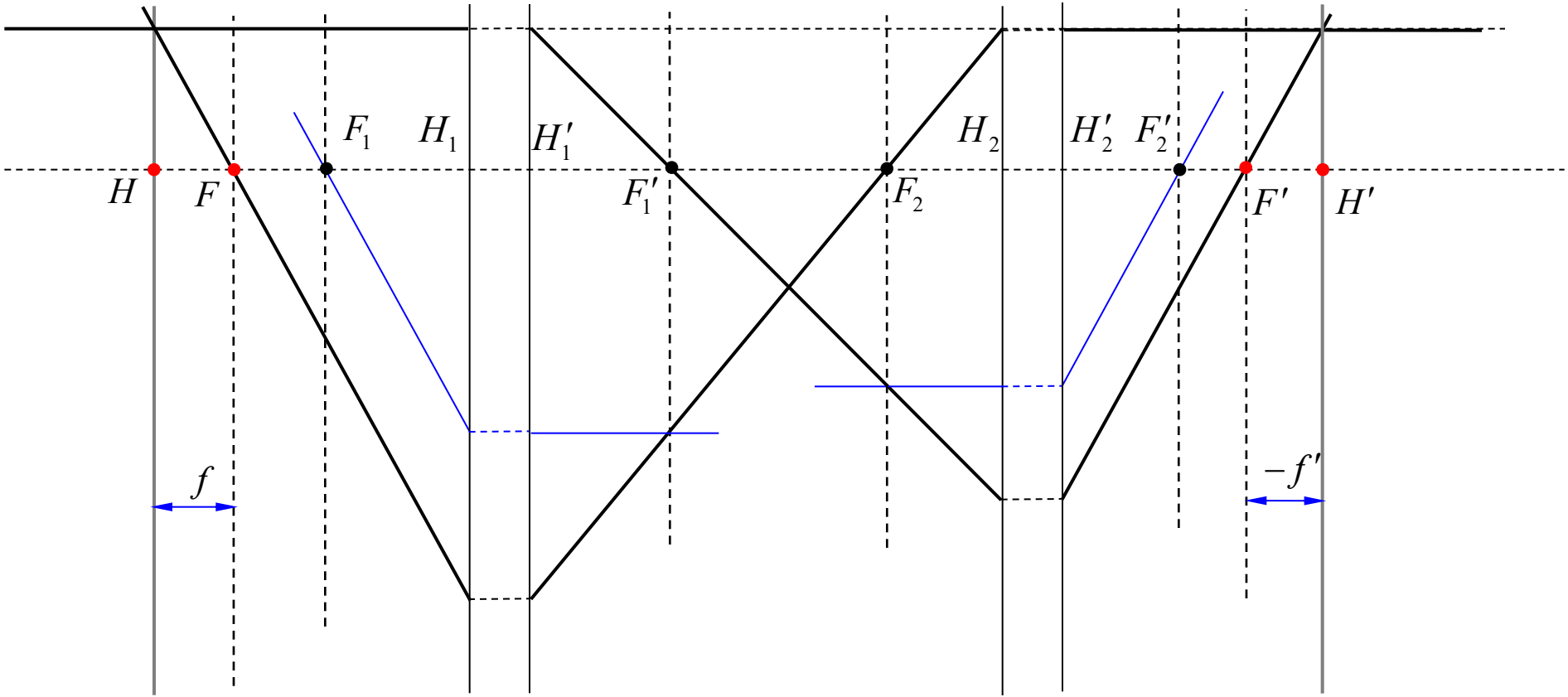


$$-l_F = -x_F - f_1$$

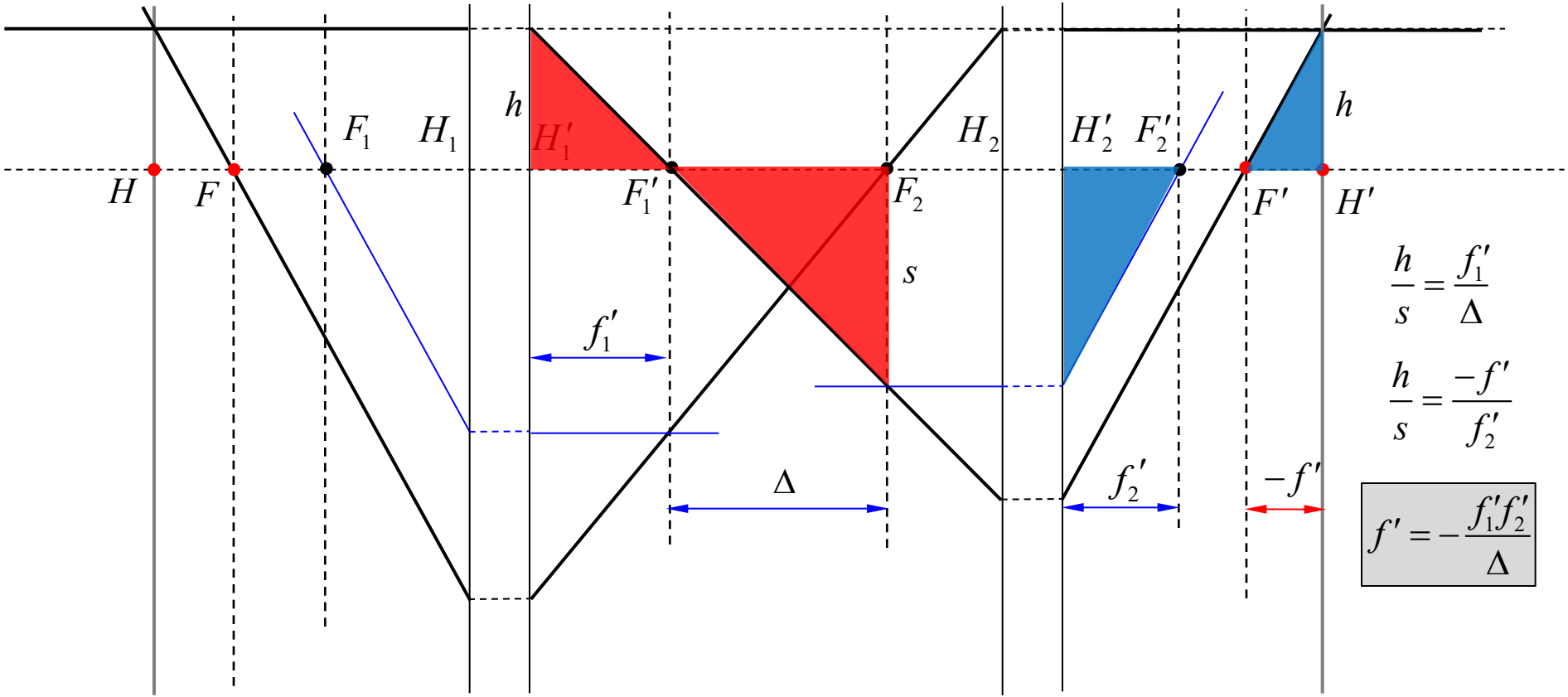
$$l_F = \frac{f_1 f_1'}{\Delta} + f_1$$

焦距

▲问题:定义？在图中如何表示？



焦距

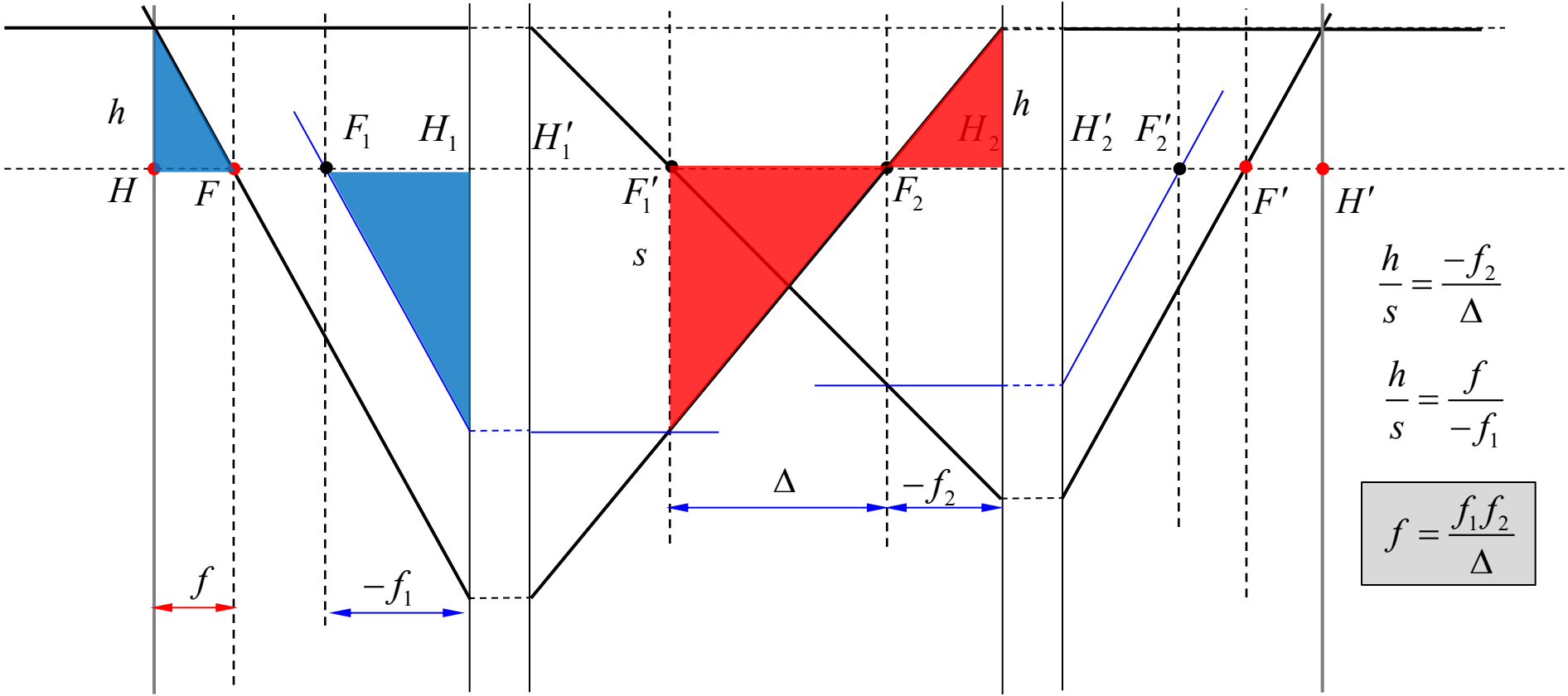


$$\frac{h}{s}=\frac{f_1'}{\Delta}$$

$$\frac{h}{s}=\frac{-f'}{f_2'}$$

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

焦距



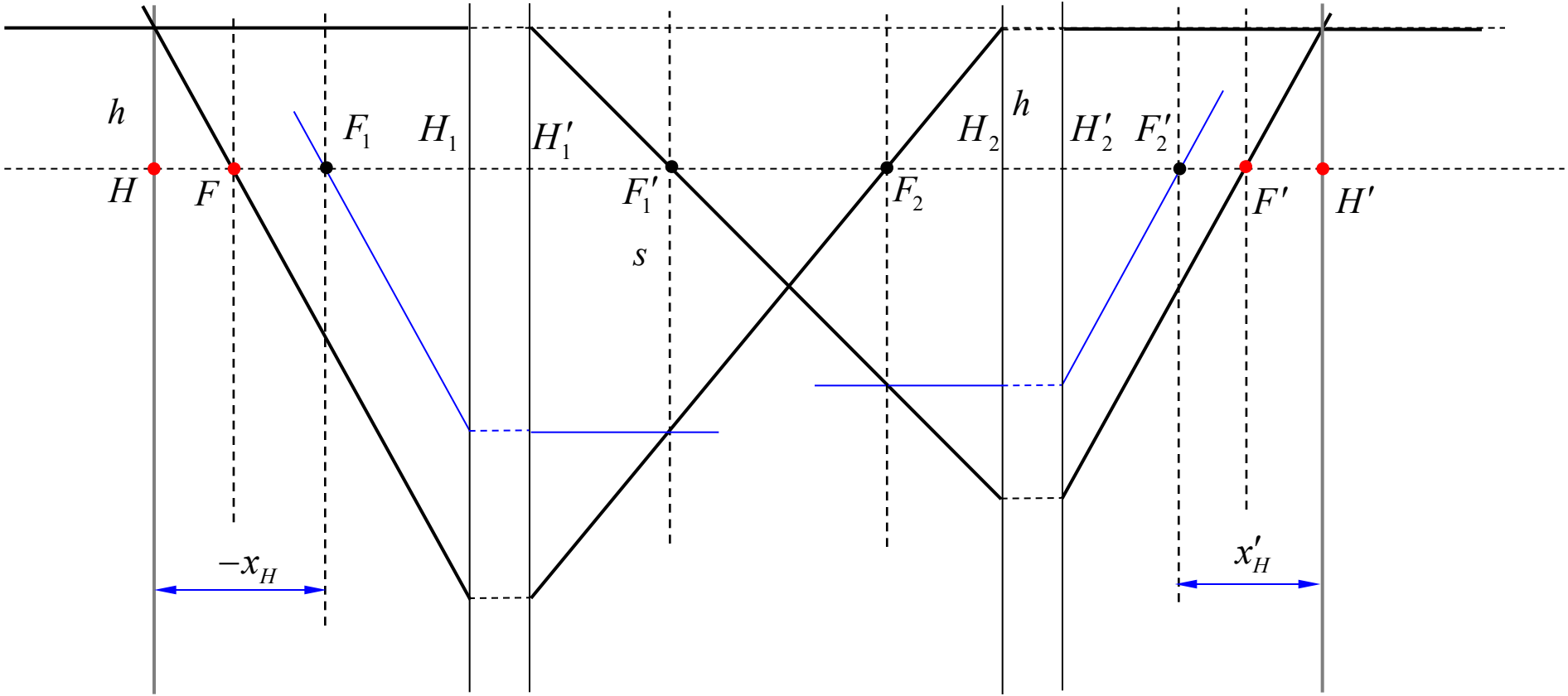
$$\frac{h}{s}=\frac{-f_2}{\Delta}$$

$$\frac{h}{s}=\frac{f}{-f_1}$$

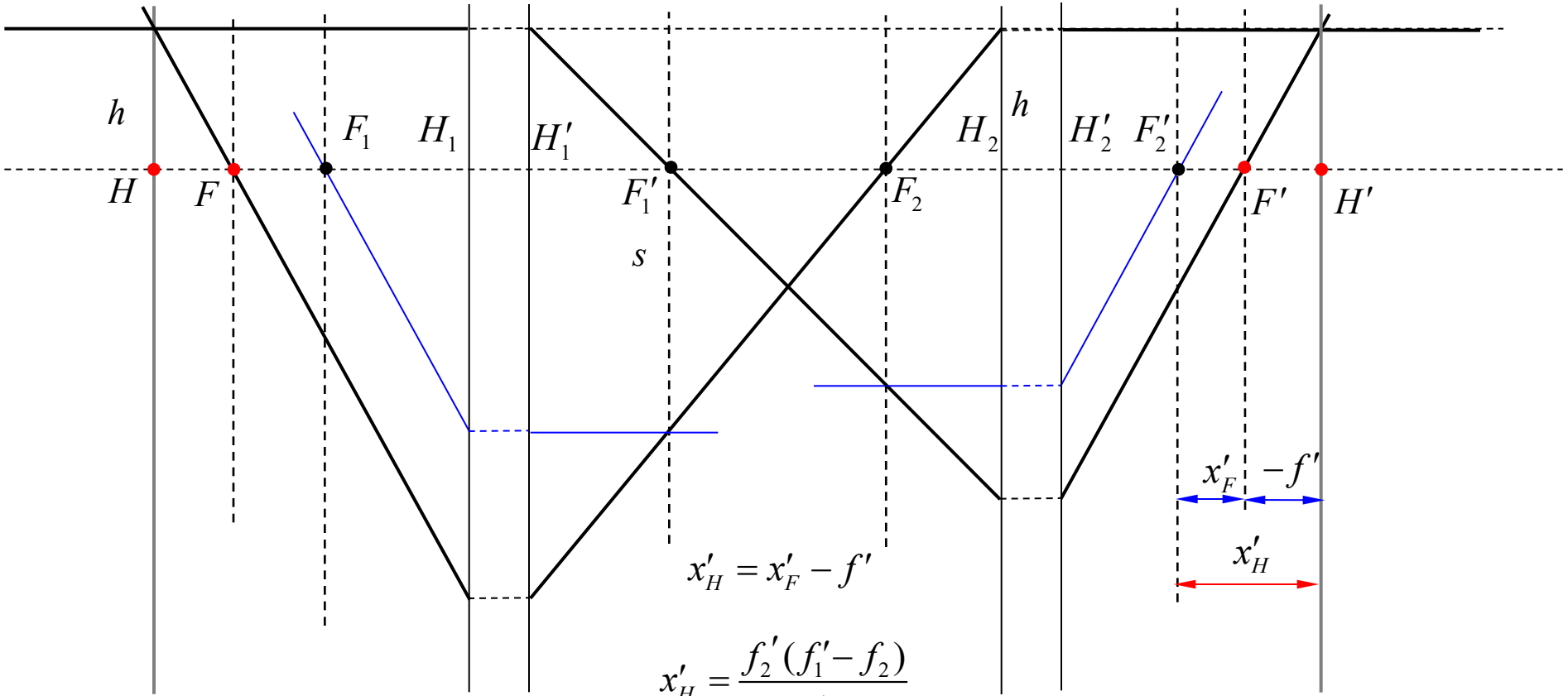
$$f=\frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

主点

▲问题:在图中如何表示?



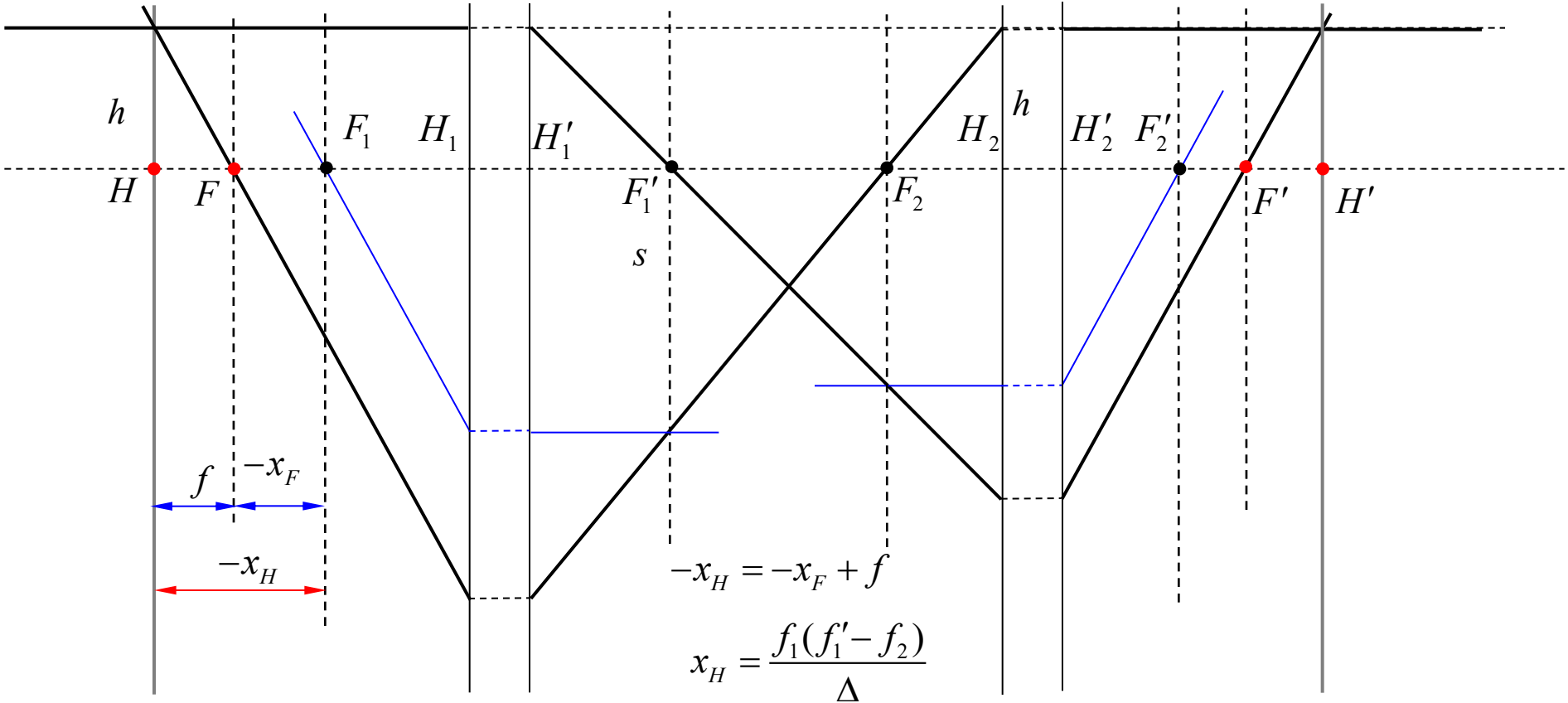
主点



$$x'_H = x'_F - f'$$

$$x'_H = \frac{f_2'(f_1' - f_2)}{\Delta}$$

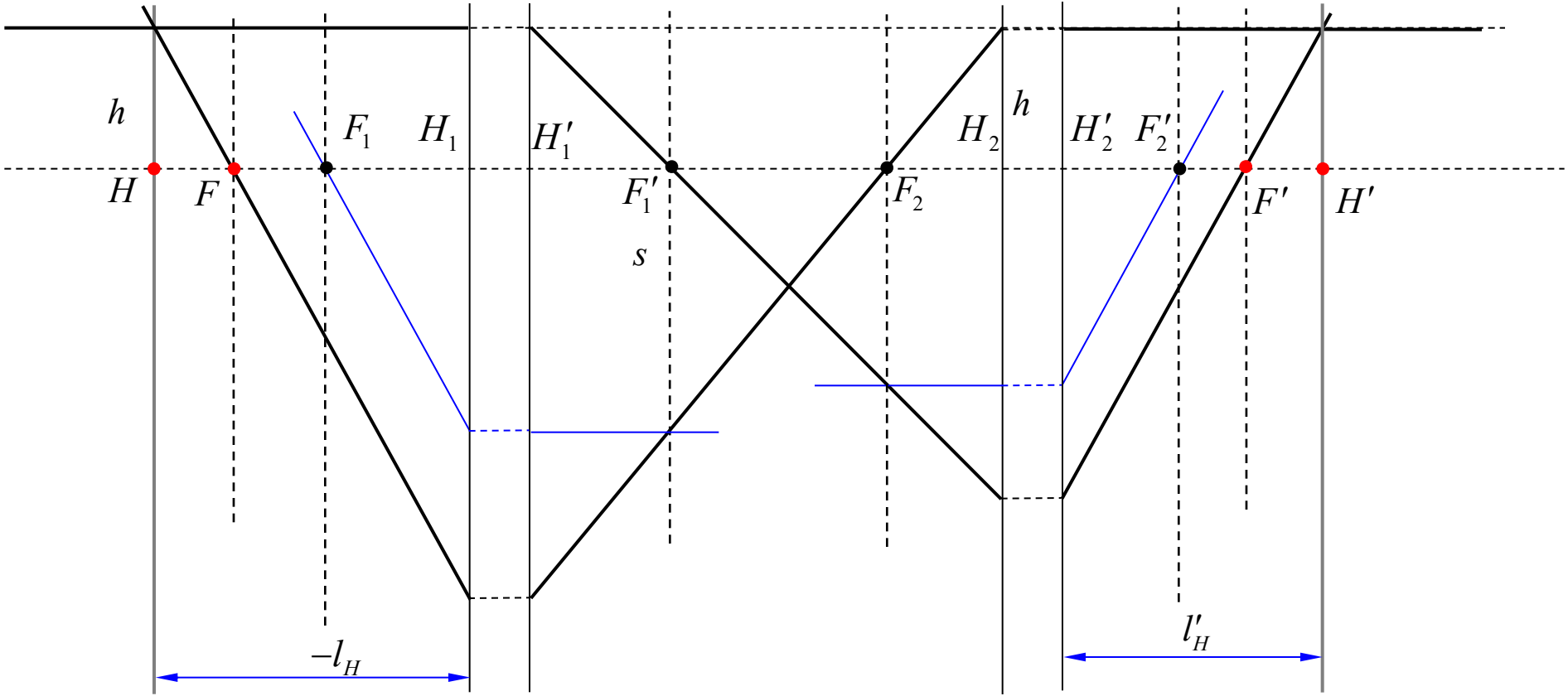
主点



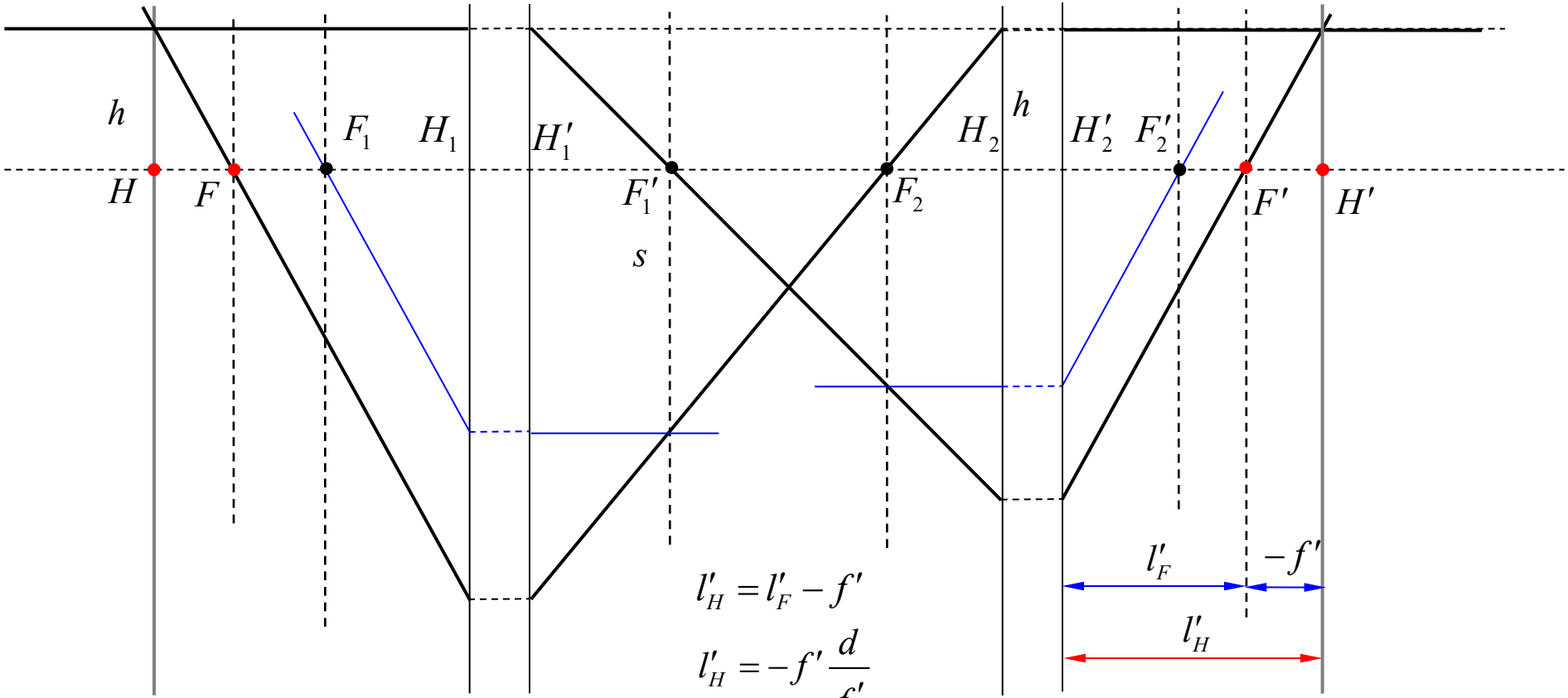
$$-x_H = -x_F + f$$

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

主点



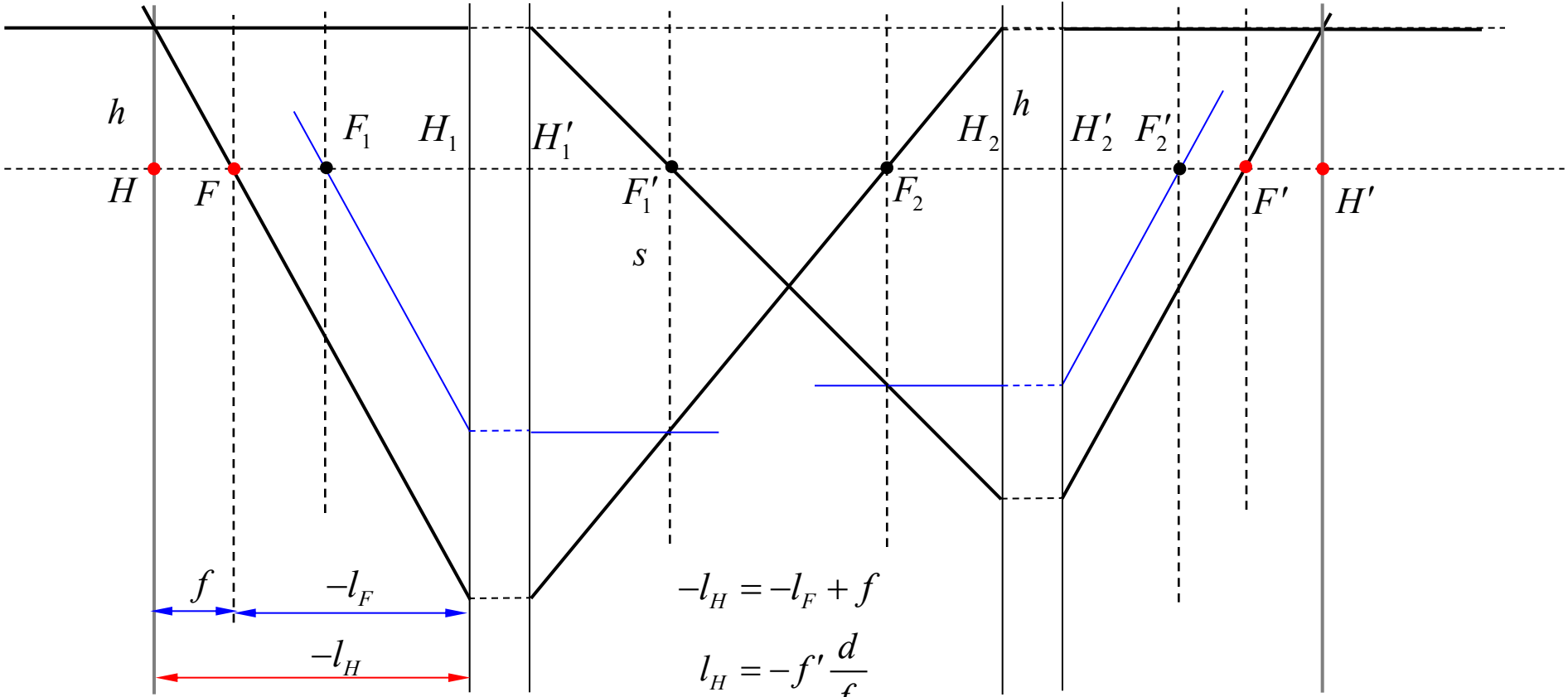
主点



$$l'_H = l'_F - f'$$

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

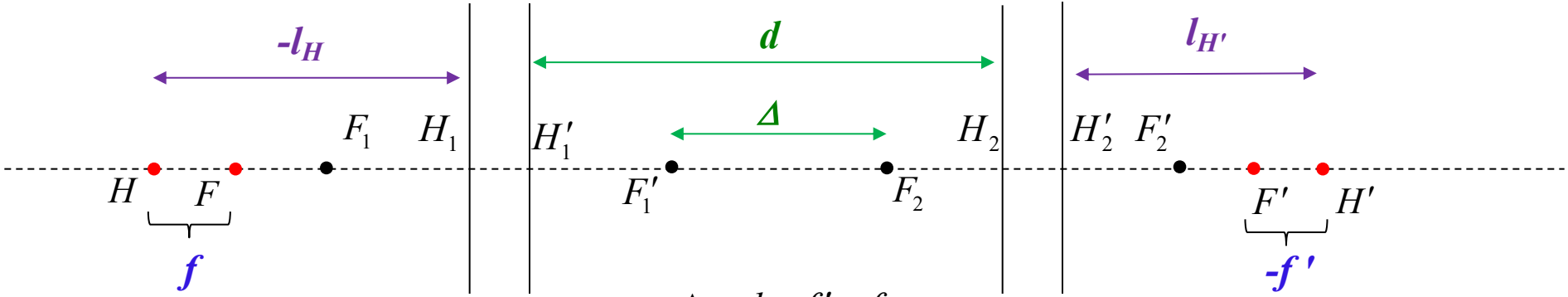
主点



$$-l_H = -l_F + f$$

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

主点



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

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

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