



第五章 光学系统中成像光束的选择

◆什么是光阑？

- 中心开孔的薄金属片薄金属片称为**光阑**。用于限制参与成像光束的宽度、位置和成像范围。
- 光学系统的边框也有光阑的作用





◆ 光阑在光学系统中有什么作用？

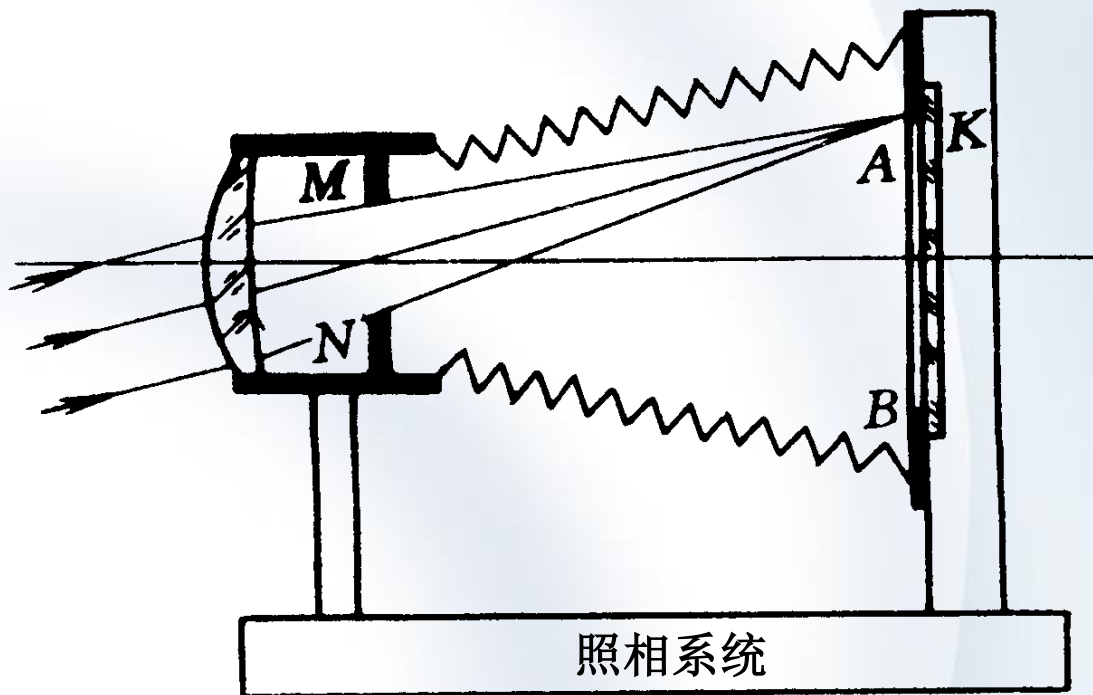
- 决定像面的照度
- 决定系统的视场
- 限制光束中偏离理想位置的一些光线，用以改善系统的成像质量
- 拦截系统中有害的杂散光

5.1 光阑及其作用



◆ 分类:

- 1) 孔径光阑
- 2) 视场光阑
- 3) 渐晕光阑
- 4) 消杂光光阑

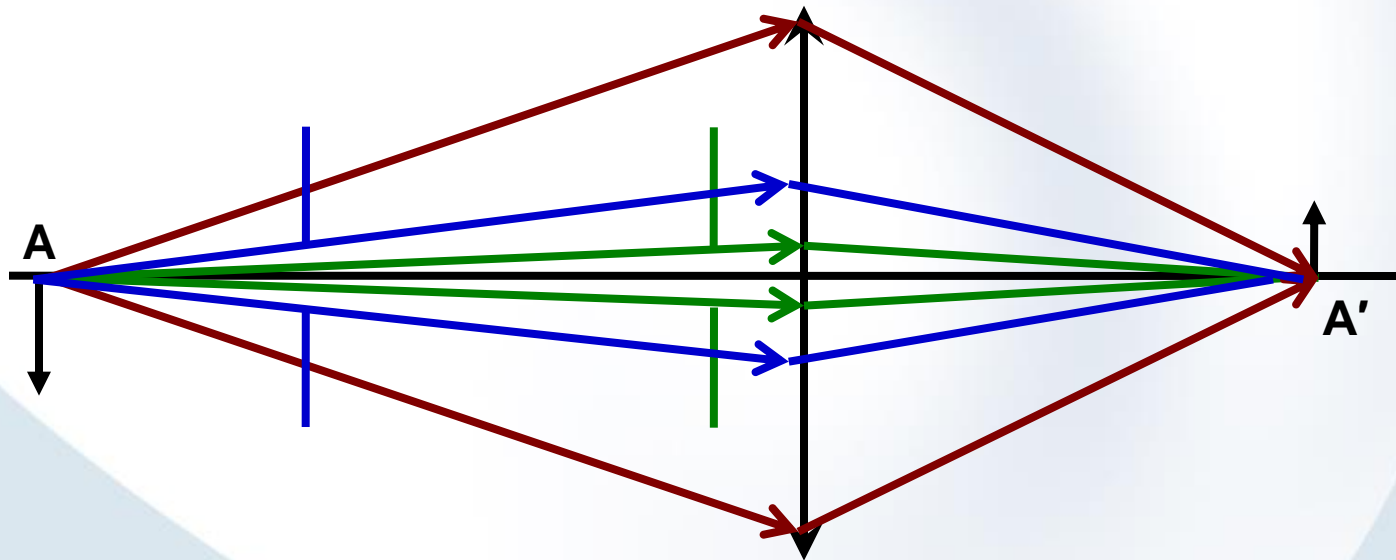


孔径光阑和视场光阑是光学系统中的主要光阑。任何光学系统都有这两种光阑！！

1) 孔径光阑

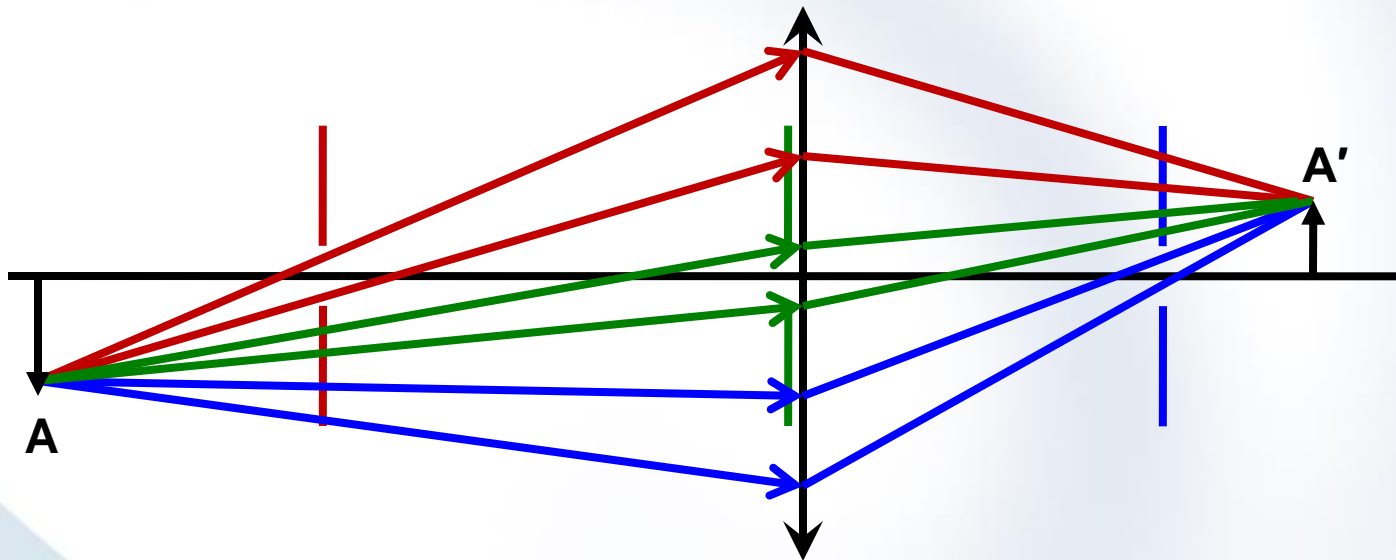
孔径光阑：限制进入光学系统成像光束口径（孔径角）大小

➤ 决定了光学系统的光能量大小，控制像的亮度，如，人眼的瞳孔、照相机的光圈



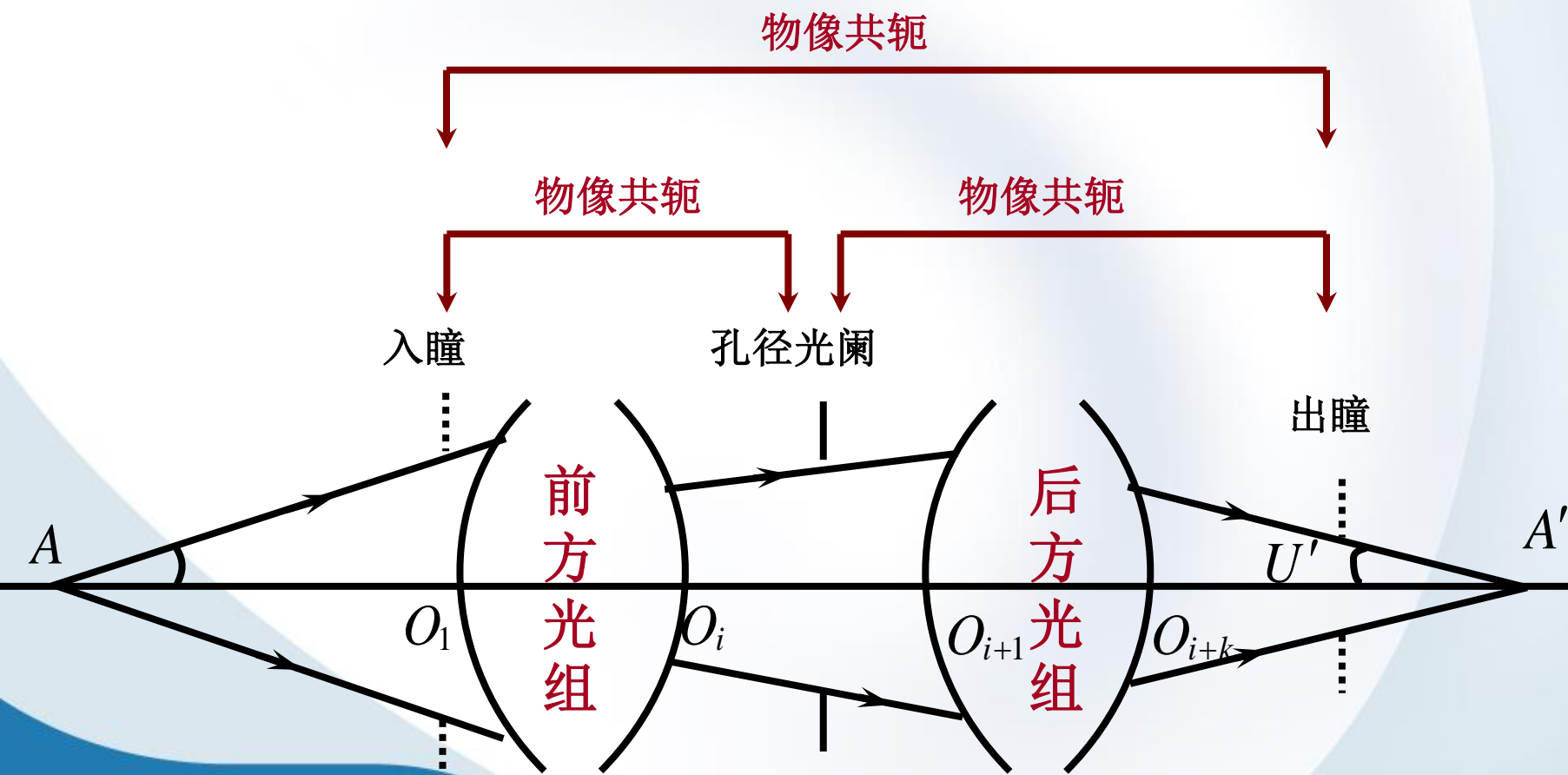
1) 孔径光阑

➤ 孔径光阑位置不同，轴外物点参与成像的光束位置不同；
轴外物点发出并参与成像的光束通过透镜的部位也不同

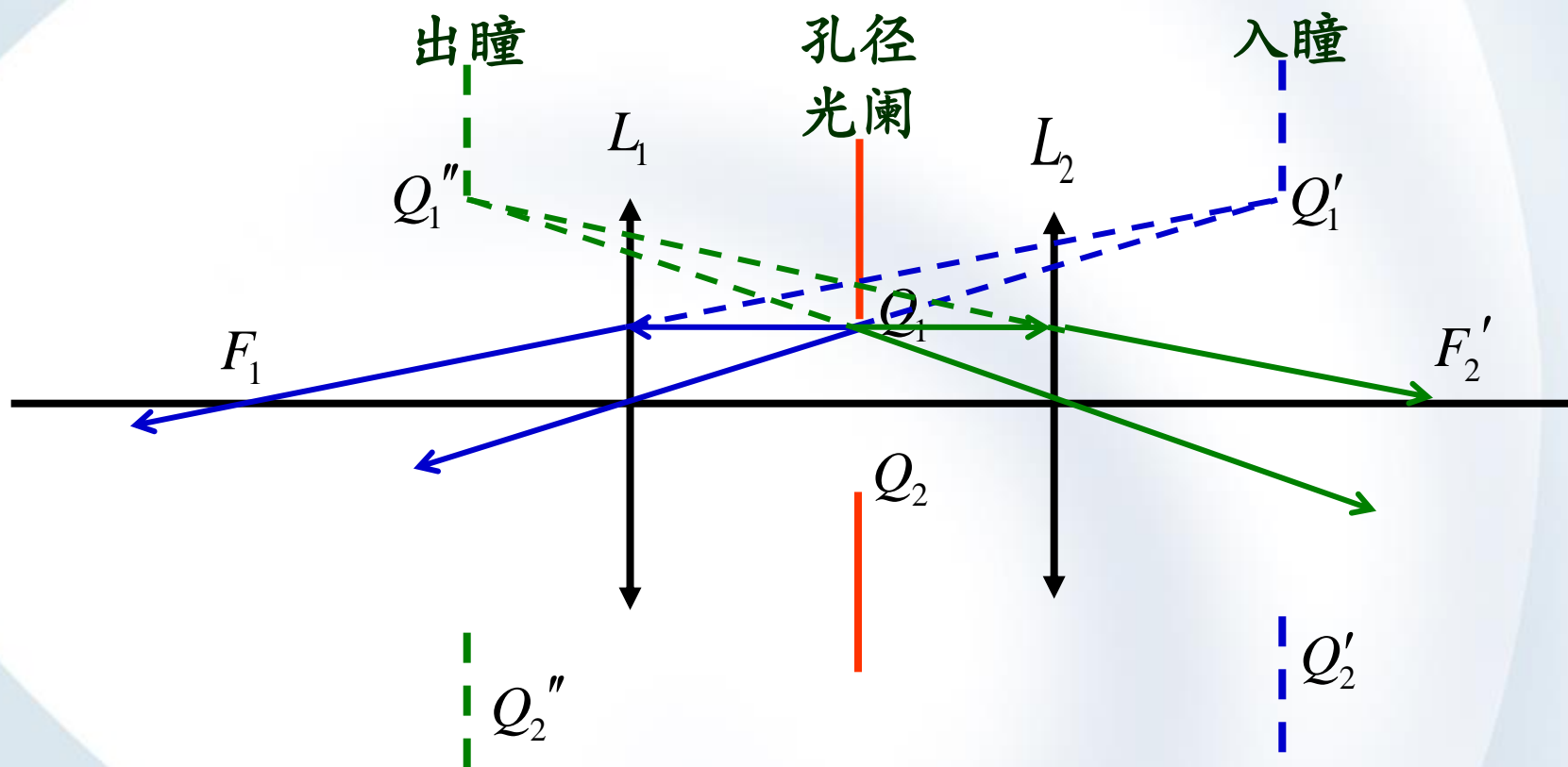


1) 孔径光阑

- ◆入瞳：孔径光阑经前面光组所成的像
- ◆出瞳：孔径光阑经后面光组所成的像



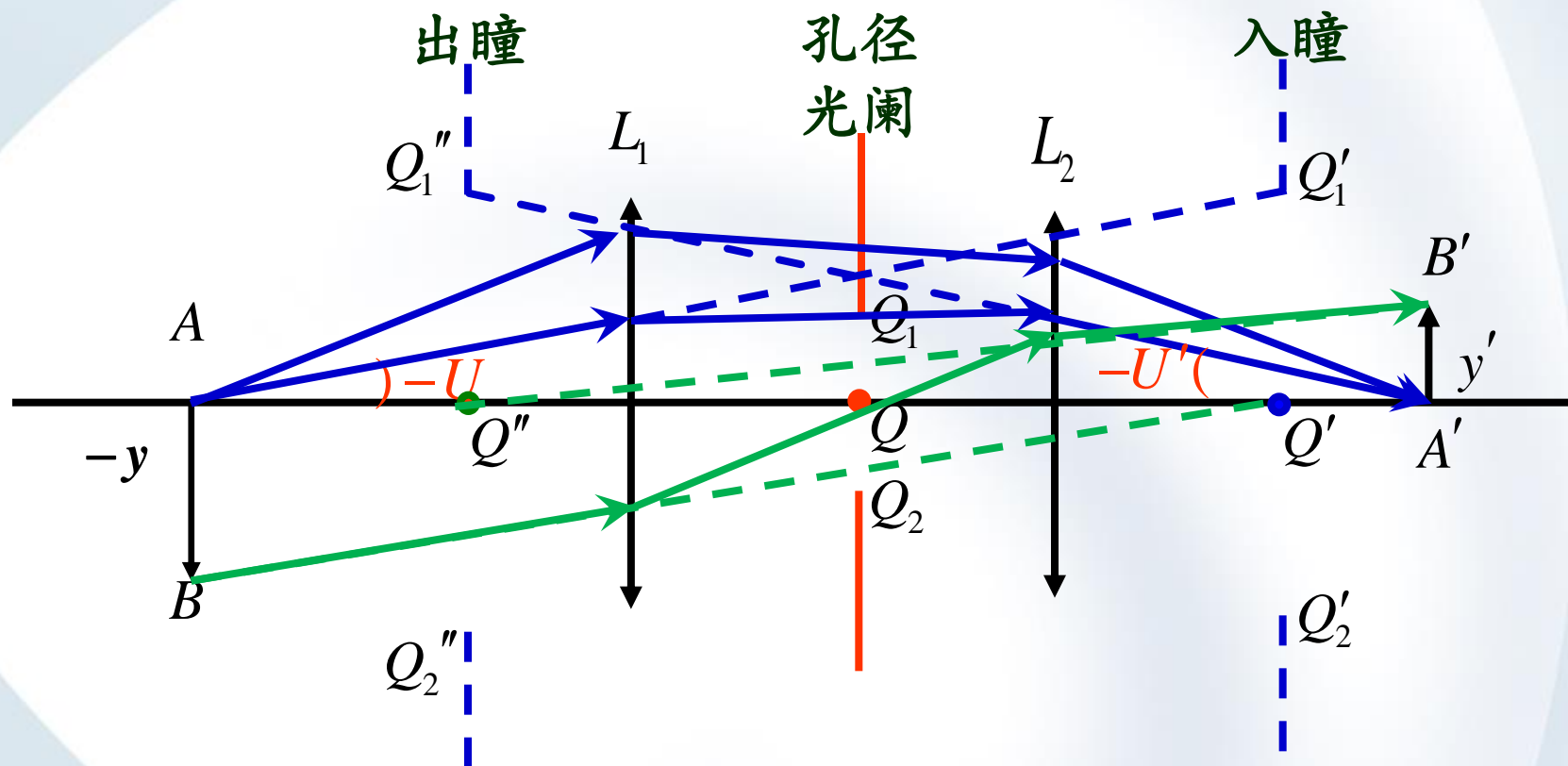
作图法求入瞳、出瞳：



孔径光阑经前面的光组成像，利用光路可逆确定入瞳

入瞳、出瞳位置由光学系统参数确定

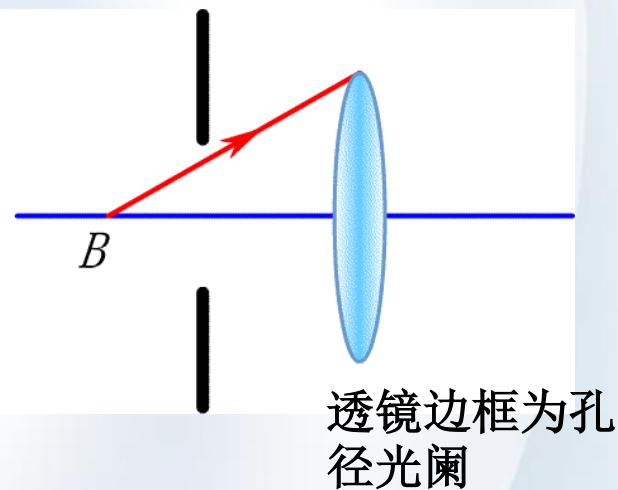
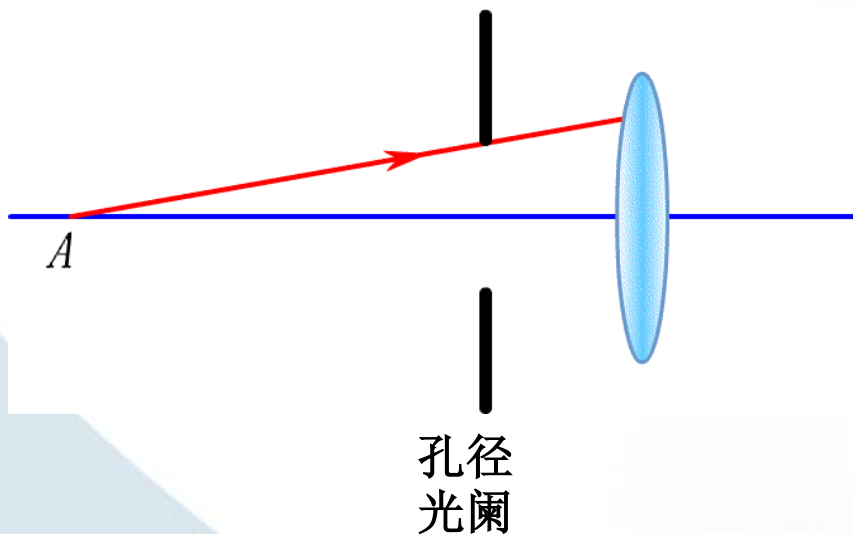
1) 孔径光阑



- ①入瞳的位置和直径限制了入射光束的孔径角、口径
- ②通过入瞳边缘的光线，必然成为出瞳的边缘光线
- ③通过入瞳中心的光线经光组后必经过孔径光阑和出瞳的中心

1) 孔径光阑

物体位置改变，孔径光阑可能改变。

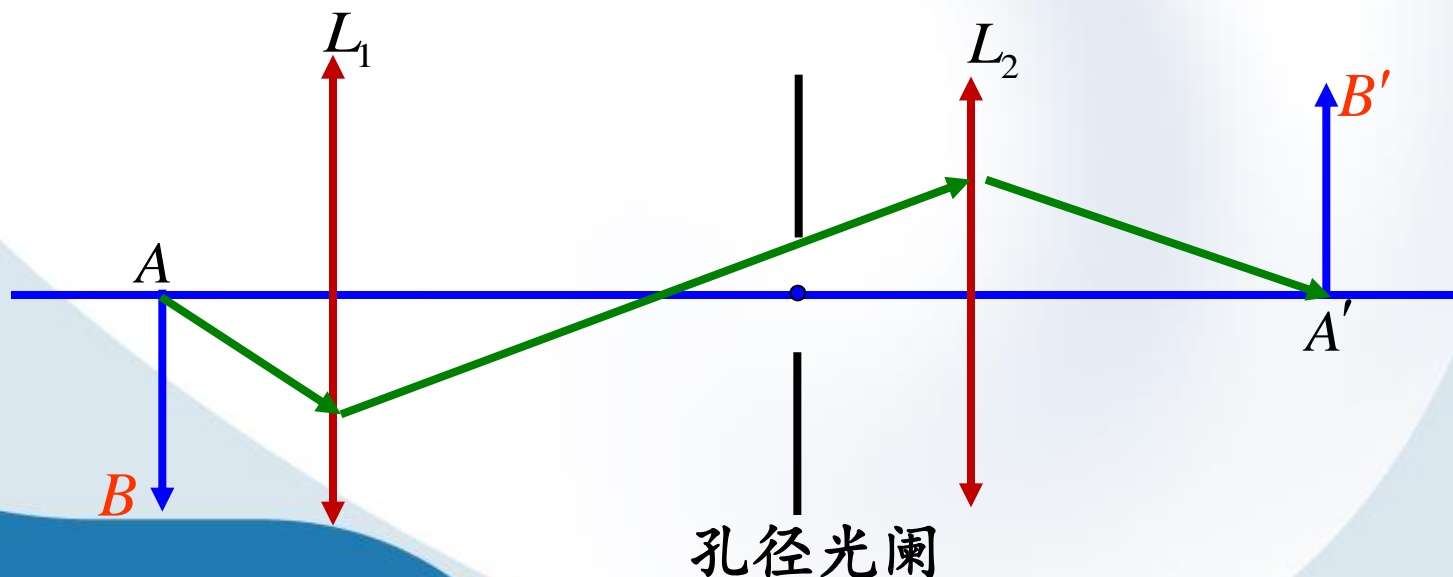


1) 孔径光阑

◆ 几个口径一定的透镜组合，怎样判断哪个透镜边框是孔径光阑？

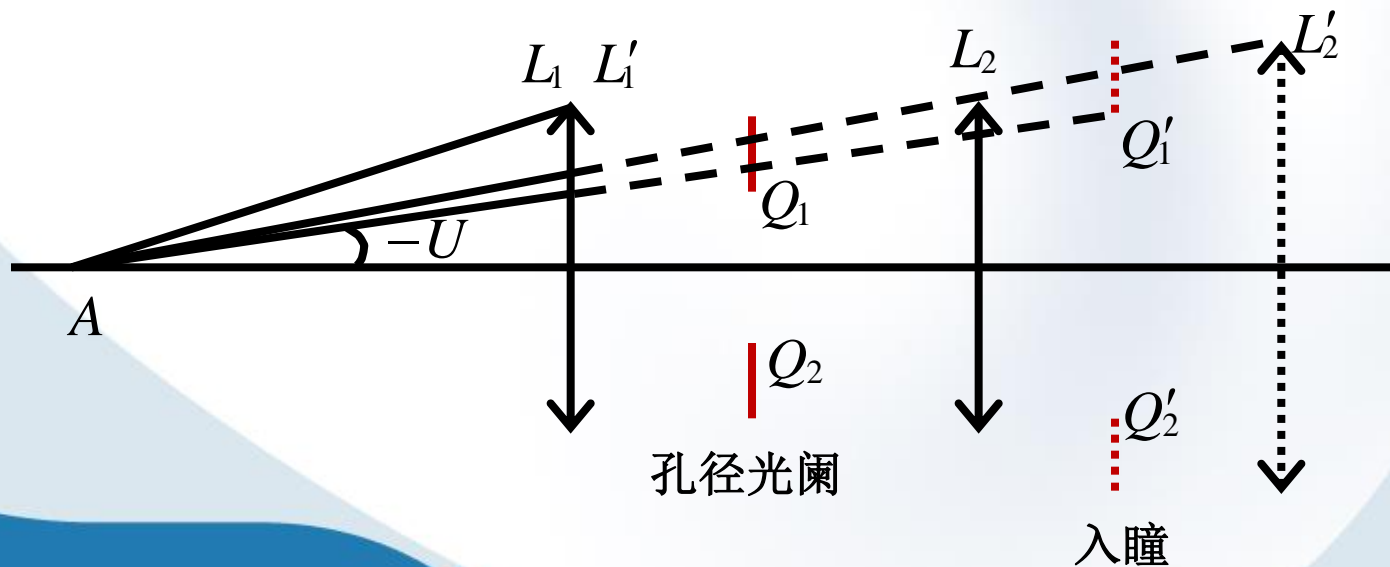
➤ 方法一：追迹光线法：

过轴上物点的任一条近轴光线，求其在每个折射面的光线投射高度与折射面实际口径的比值，**比值最大**的折射面的边框为透镜组的**孔径光阑**



方法二：成像张角比较法：

- ①将光学系统所有光学元件和开孔屏的内孔，经其**前方**的光学系统成像到整个系统物空间
- ②比较这些像的边缘对轴上物点张角的大小，其中张角最小者即为**入射光瞳**；与入射光瞳共轭的实际光阑即为**孔径光阑**。

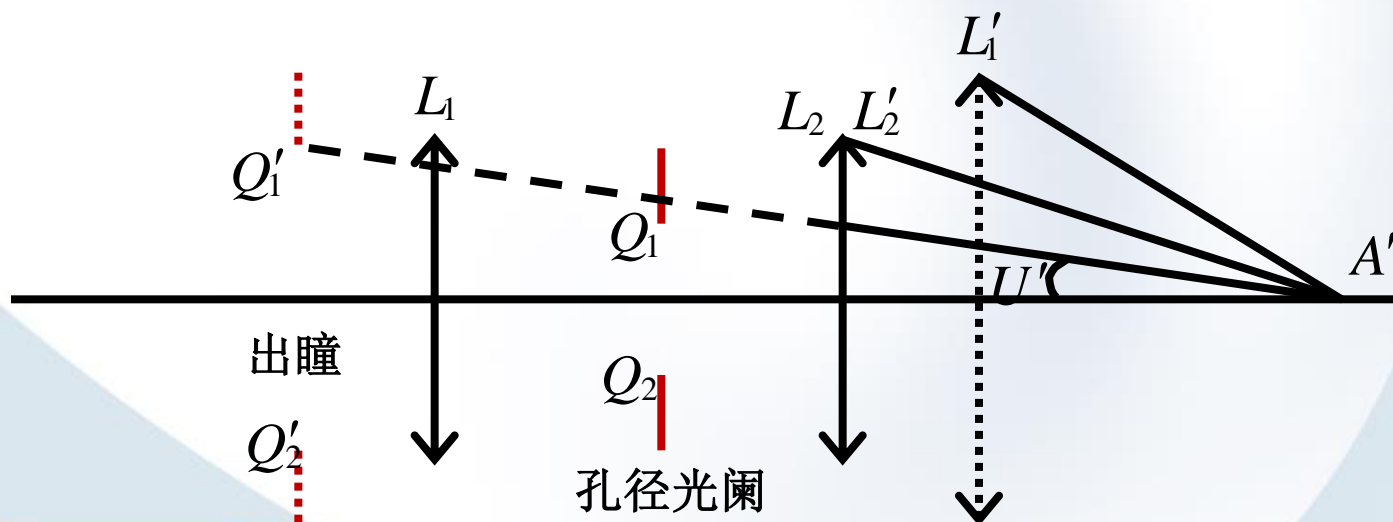


1) 孔径光阑

➤ 方法二：成像张角比较法：

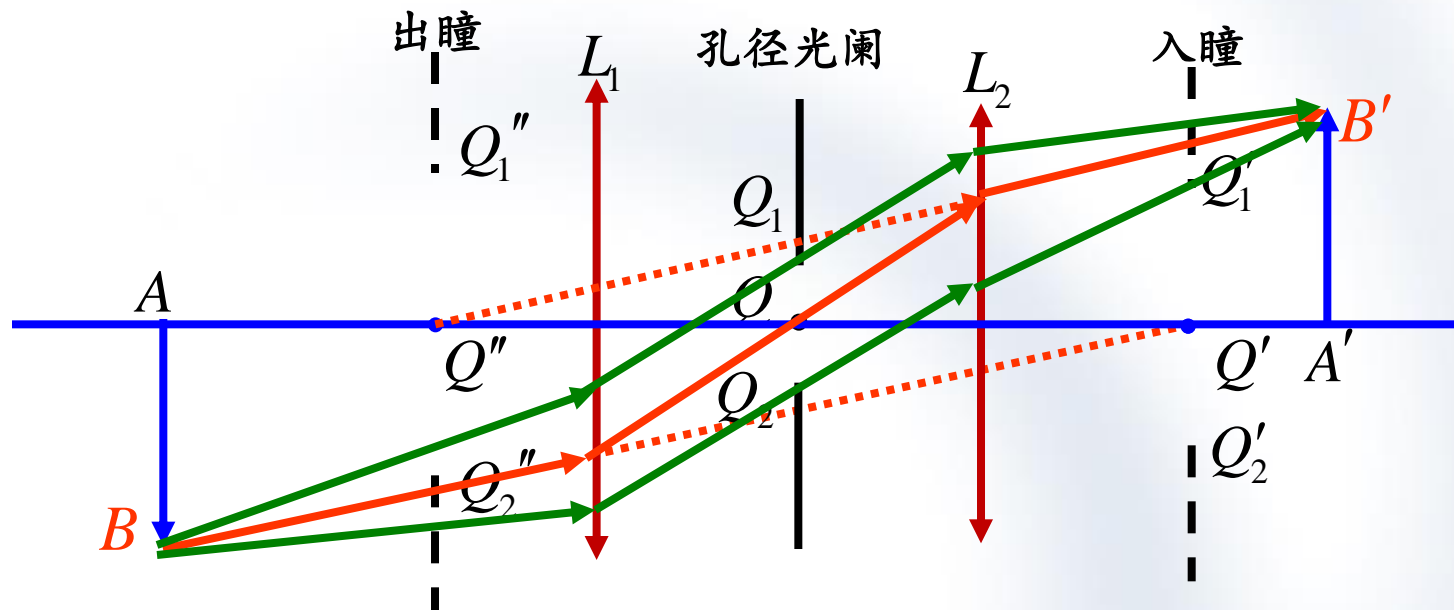
③ 将光学系统所有光学元件和开孔屏的内孔，经其**后方**的光学系统成像到整个系统像空间

④ 比较这些像的边缘对轴上像点张角的大小，其中张角最小者即为**出射光瞳**；与出射光瞳共轭的实际光阑即为**孔径光阑**。



1) 孔径光阑

◆ **主光线**：由轴外物点发出，通过孔径光阑中心的光线



- 主光线是通过孔径光阑、并参与成像的物光束的中心光线
- 理想光学系统：主光线必然通过入瞳及出瞳的中心
- 入瞳中心是物面上所有物点发出的主光线的交点

◆ 视场：能清晰成像的范围。

- 能清晰成像的物面范围称为物方视场；
- 相应的像面范围称为像方视场

◆ 度量视场的方法：

- 线视场：系统对近距离物体成像时，用长度来表示视场，物方线视场 $2y$ ，像方线视场 $2y'$
- 视场角：系统对远距离物体成像时，用角度来表示视场，物方视场角 2ω ，像方视场角 $2\omega'$

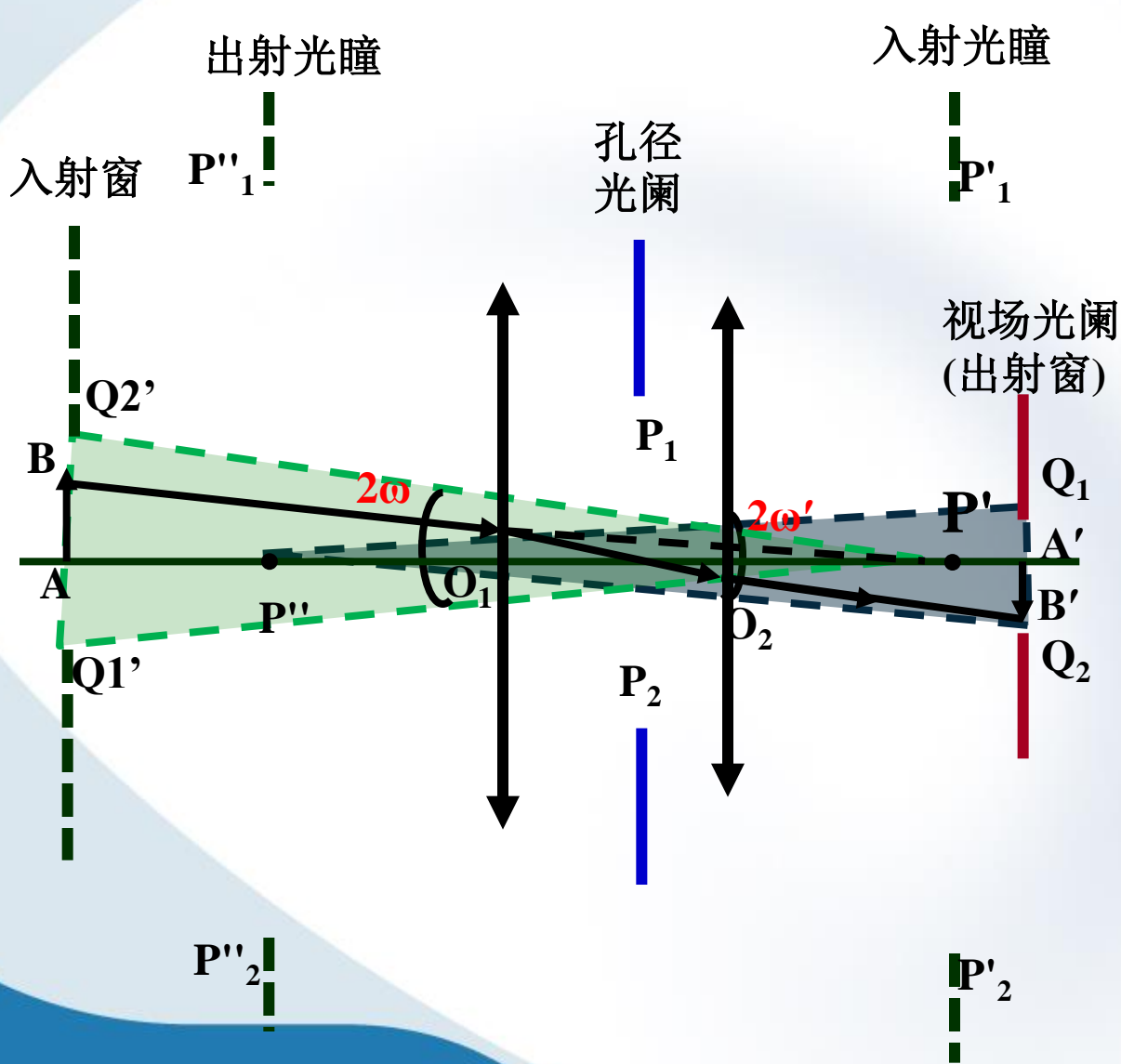
视场光阑： 限制最大成像范围的光阑

- 位置固定，总是设在系统的**实像平面或中间实像平面**上，或安放在**物平面**上，如照相机中的底片框
- 没有实像平面，就没有视场光阑

◆ **入射窗：** 视场光阑经其**前面**的光组所成的像

◆ **出射窗：** 视场光阑经其**后面**的光组所成的像

入射窗、出射窗、视阑互为共轭



- 视场光阑通常设置在系统的实像平面或物平面
- Q_1Q_2 是视场光阑
- Q_1Q_2 也为出射窗
- $Q'_1Q'_2$ 为入射窗
- 入射窗边缘对入瞳中心的张角为物方视场角 2ω ，同时也决定了视场边缘点
- 出射窗对出瞳中心的张角即为像方视场角 $2\omega'$

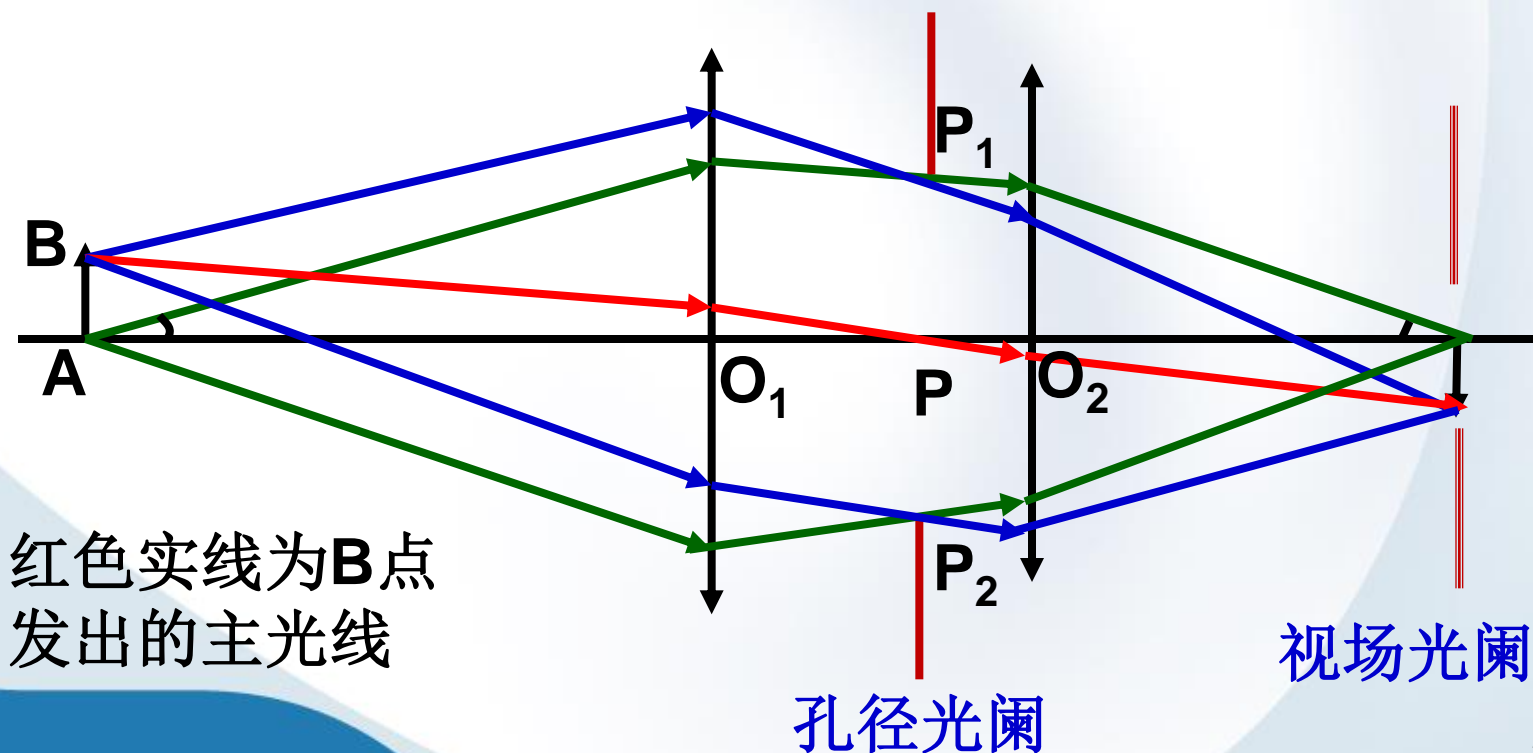
2) 视场光阑

◆ 减小孔径光阑会不会对视场产生影响？

不会影响视场，成像是完整的，只是像的亮度减弱

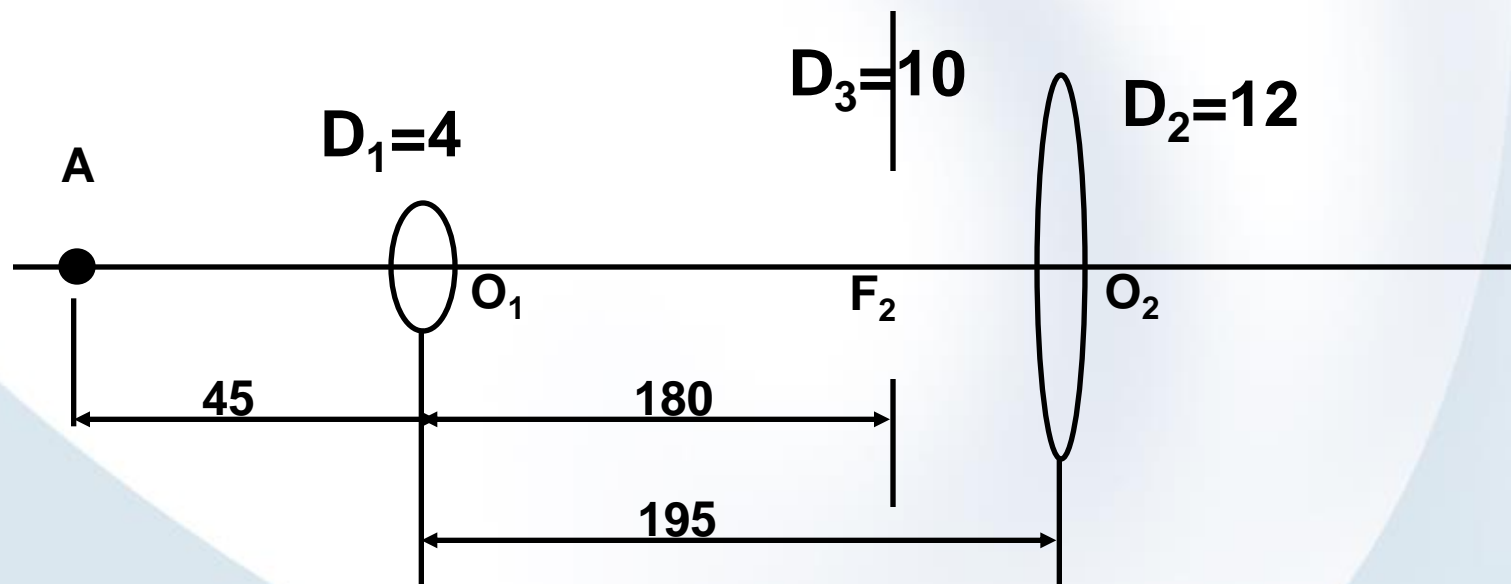
◆ 视场光阑：限制成像范围

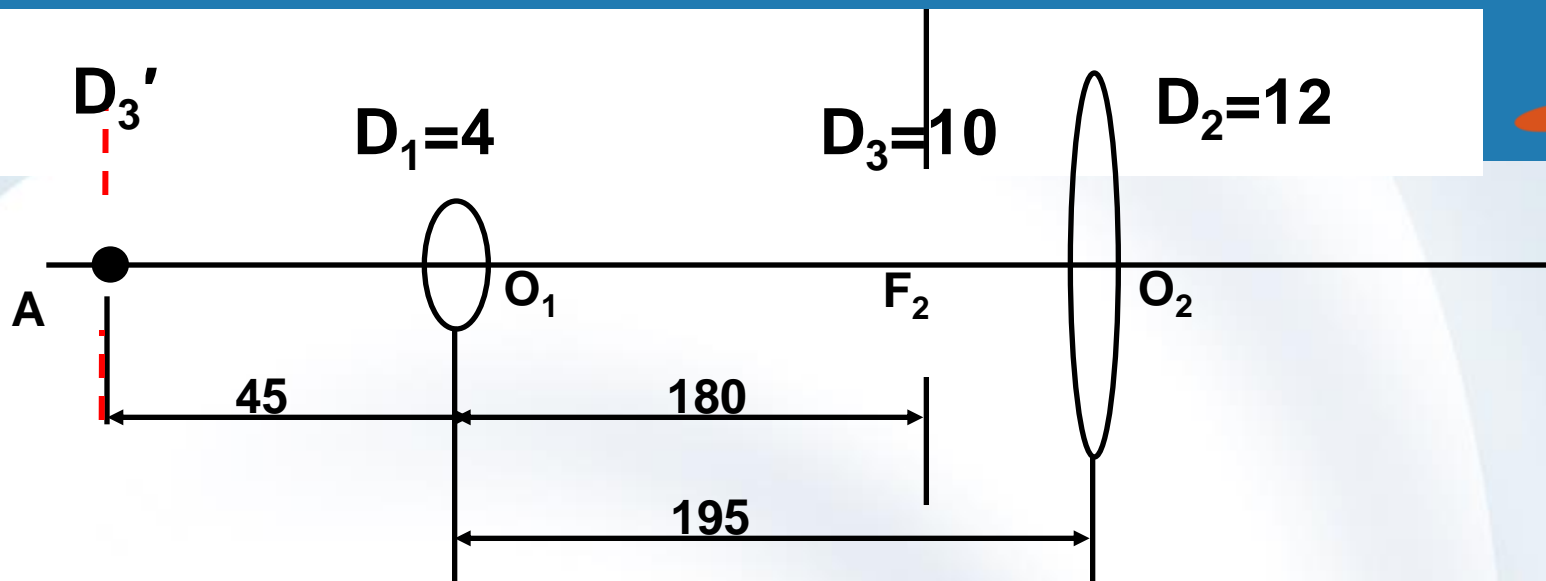
◆ 孔径光阑：影响像的亮度





例：有一个由三个光学零件组成的光组，透镜 O_1 ，其口径 $D_1=4\text{mm}$ ， $f'_1=36\text{mm}$ ，透镜 O_2 ，其口径 $D_2=12\text{mm}$ ， $f'_2=15\text{mm}$ ，二透镜间隔 195mm ，在离透镜 O_1 右 180mm 处设有一光孔 $D_3=10\text{mm}$ ，物点离透镜 O_1 为 -45mm 。1) 求孔径光阑和入瞳出瞳的大小和位置？2) 求视场光阑和入窗出窗的大小和位置？



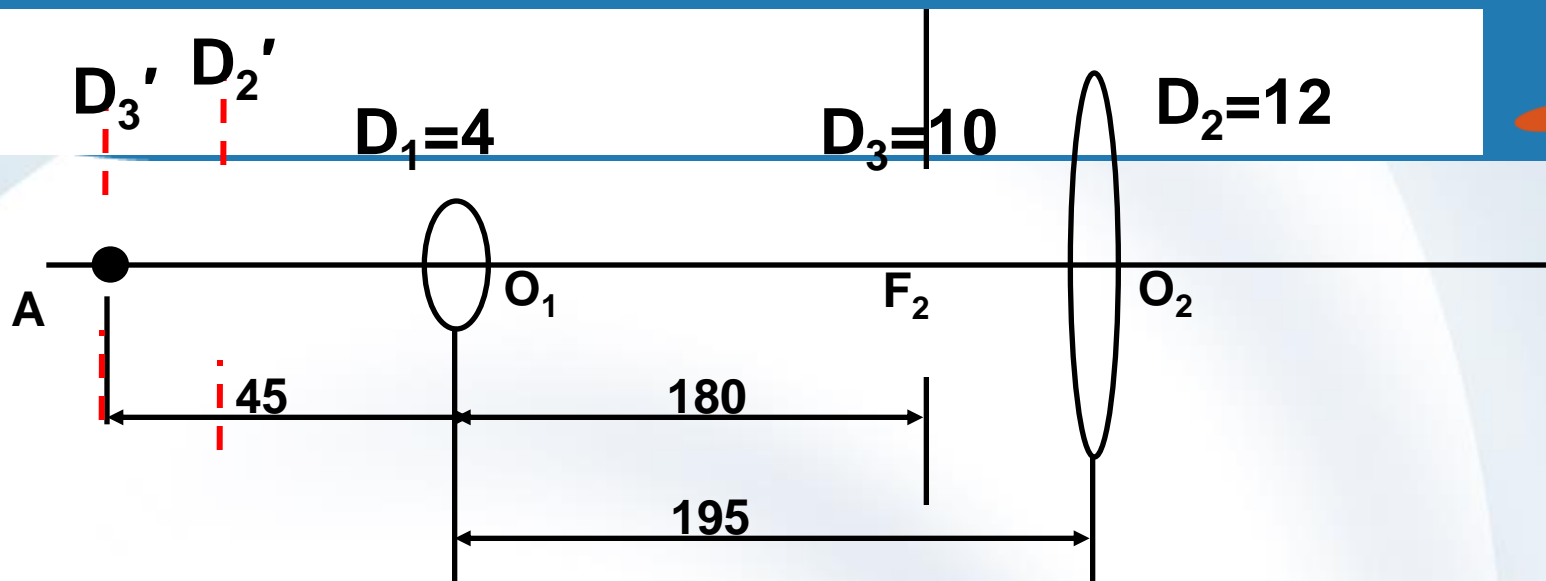


解：光孔 D_3 经 O_1 成像

$$l'_3 = \frac{l_3 f'_1}{l_3 + f'_1} = \frac{-180 \times 36}{-180 + 36} = 45mm \quad \text{将光路逆向计算}$$

在 O_1 左方与物点重合

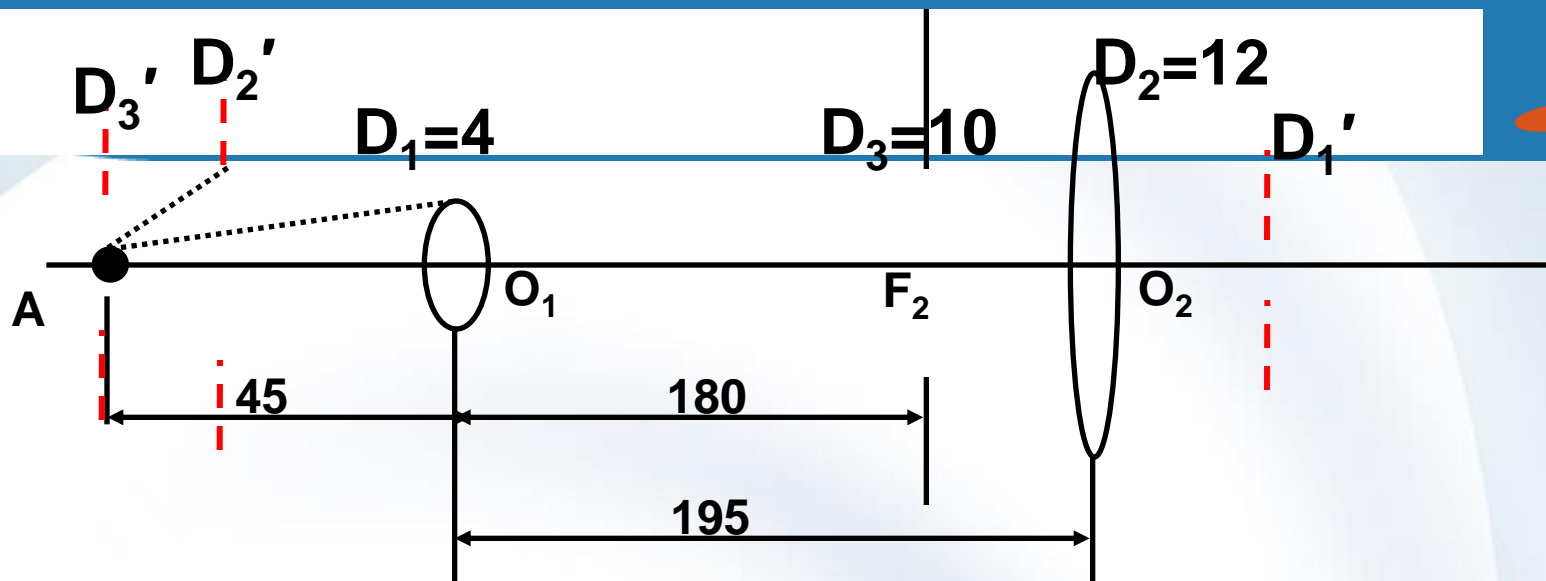
$$D'_3 = \frac{l'_3}{l_3} \bullet D_3 = \frac{45}{180} \times 10 = 2.5mm$$



透镜 O_2 经 O_1 成像

$$l'_2 = \frac{l_2 f'_1}{l_2 + f'_1} = \frac{-195 \times 36}{-195 + 36} = 44.15mm$$

$$D'_2 = \frac{l'_2}{l_2} \bullet D_2 = \frac{44.15}{195} \times 12 = 2.72mm$$



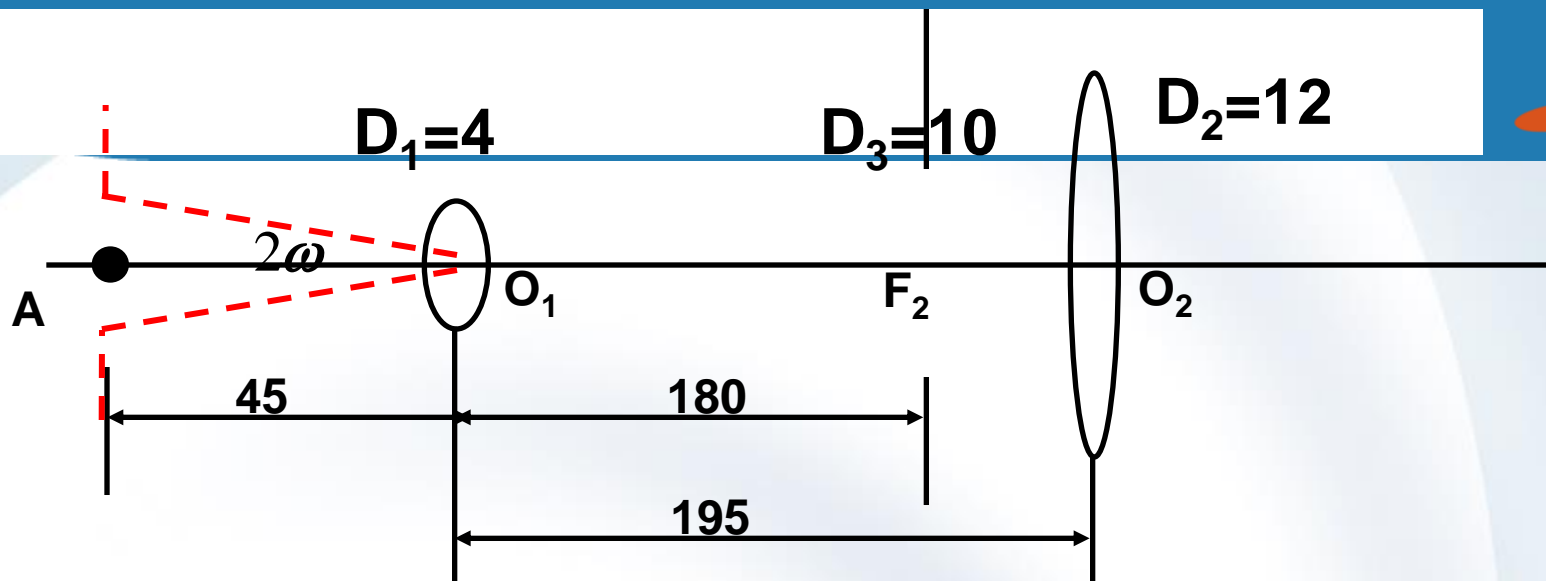
(1) 求孔径光阑、入瞳、出瞳

$$\operatorname{tg} U_1 = \frac{2}{45} = 0.044 \quad \operatorname{tg} U_2 = \frac{2.72/2}{45 - 44.15} = 1.6 \quad \operatorname{tg} U_3 = \frac{2.5/2}{0} = \infty$$

U_1 最小，故物镜框 O_1 是入瞳，也是孔径光阑。它经 O_2 的像 D_1' 为出瞳。

$$l'_1 = \frac{l_1 f'_2}{l_1 + f'_2} = \frac{-195 \times 15}{-195 + 15} = 16.25 \text{ mm}$$

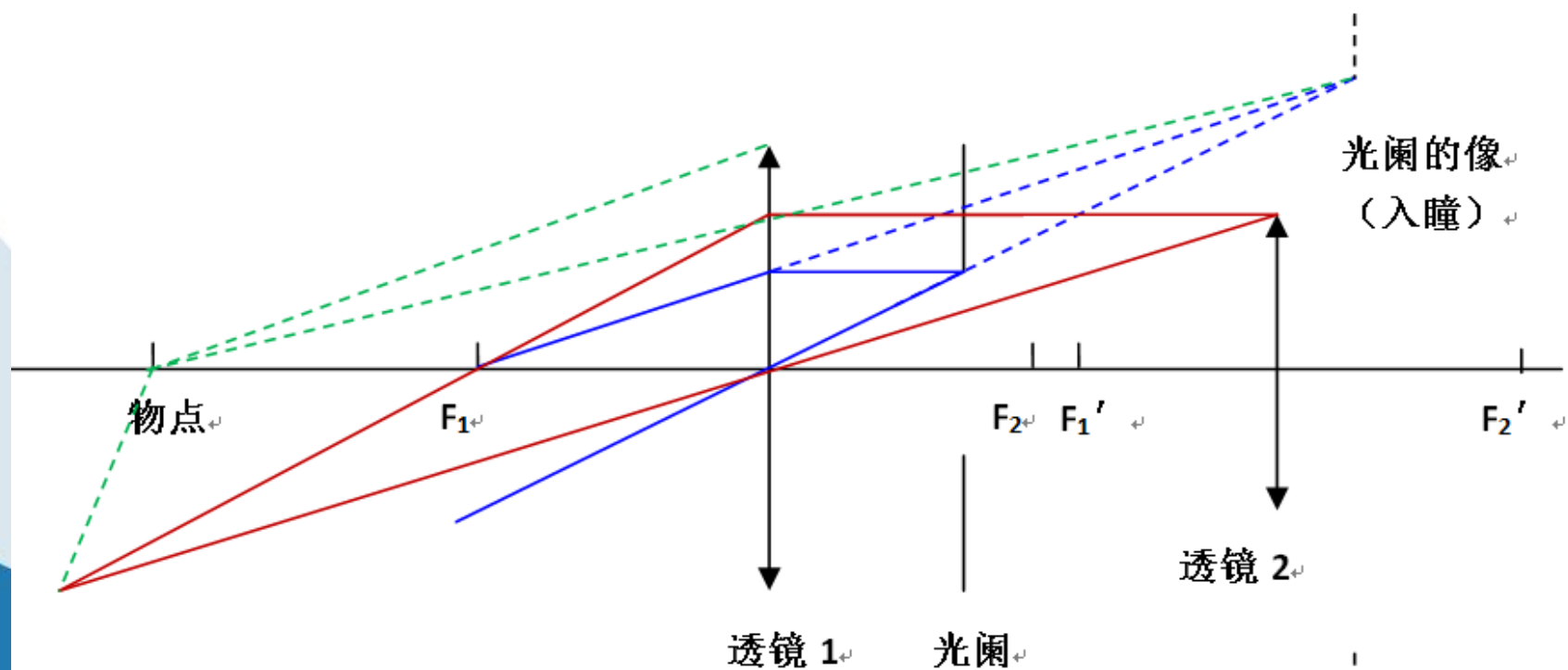
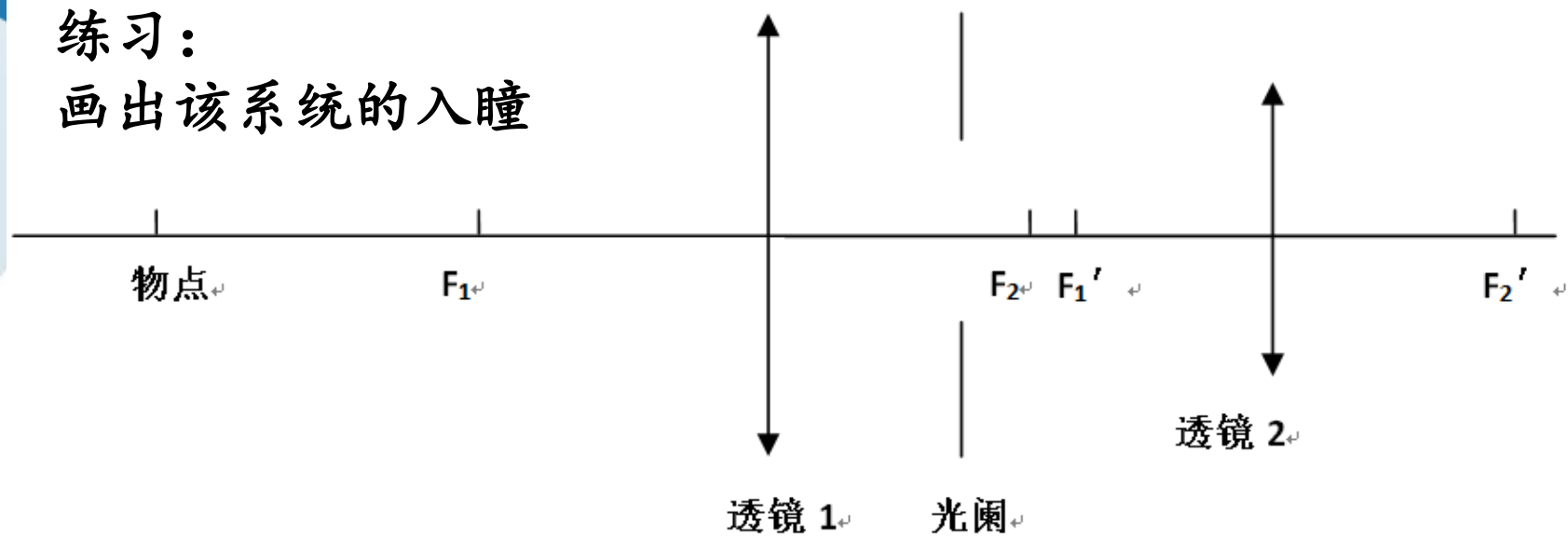
$$D'_1 = \frac{l'_1}{l_1} \cdot D_1 = \frac{16.25}{195} \times 4 = 0.33 \text{ mm}$$



(2) 求视场光阑、入窗、出窗

光孔 D_3 在实像平面上，为视场光阑，
 入窗与物平面重合，大小为2.5mm，
 出窗在无穷远，
 物方视场角 2ω

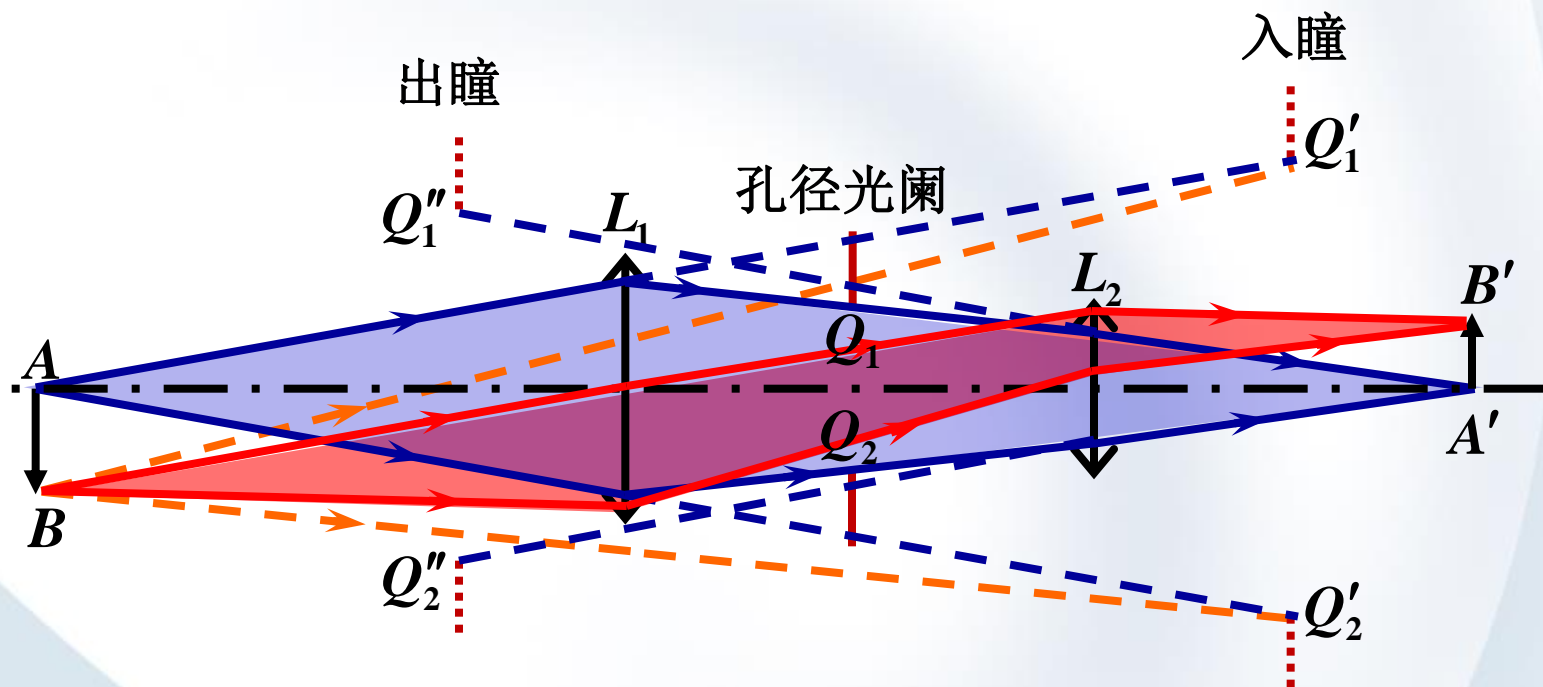
练习：
画出该系统的入瞳



3) 渐晕及渐晕光阑



◆ **渐晕**：由于轴外斜光束宽度小于轴上点光束宽度，而引起像平面边缘部分比像中心暗的现象



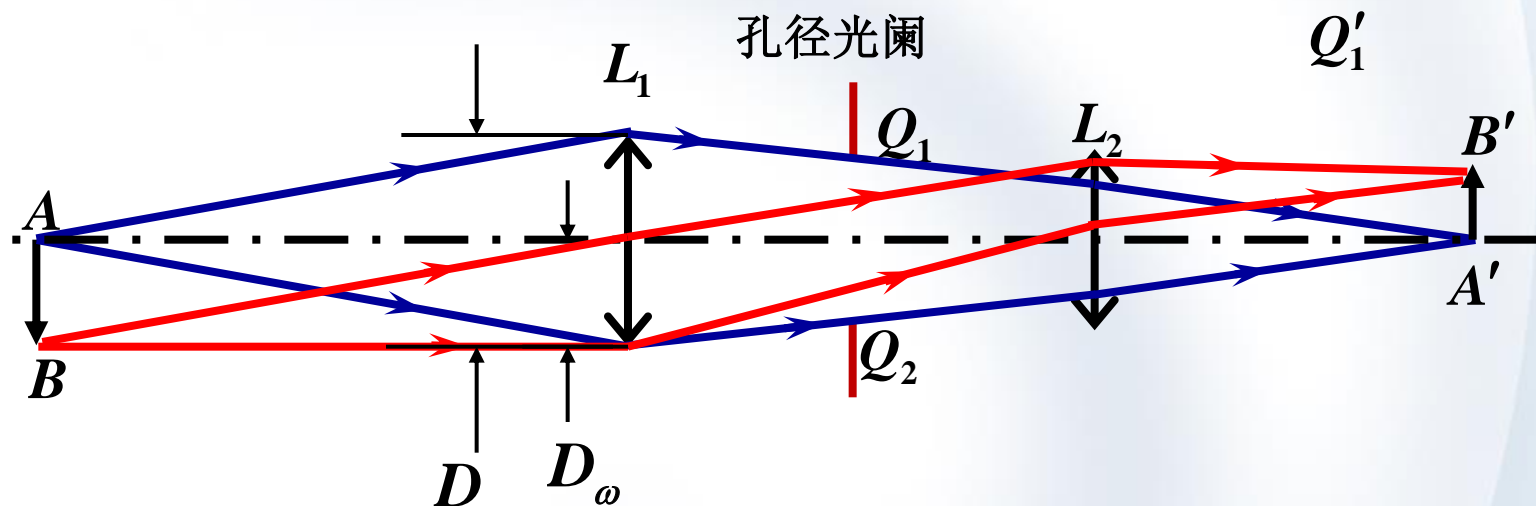
3) 漸暈及漸暈光闌



3) 渐晕及渐晕光阑



- ◆ **渐晕系数**：视场角为 ω 的轴外光束在子午面内光束宽度 D_ω 与轴向光束的口径 D 之比，表示渐晕严重的程度



B点线渐晕系数： $K_\omega = \frac{D_\omega}{D} = 50\%$



◆ 思考：① 是否所有光学系统都要无渐晕？

当孔径和视场都较大时，无渐晕既无必要也不可能，因为远离孔阑的透镜直径不能做得太大。且适当拦掉偏离理想成像状态较远的即像差较大的轴外光束有利于改善像质。

◆ 思考：② 渐晕光阑是否只有一个？

孔阑在光学系统内部时，可能有两个渐晕光阑，一个拦上光线，另一个拦下光线。

◆ 思考：③ 渐晕光阑是否影响视场？

渐晕会影响视场



◆ 关于孔径光阑的表述错误的是: (D)

A. 限制轴上物点成像光束

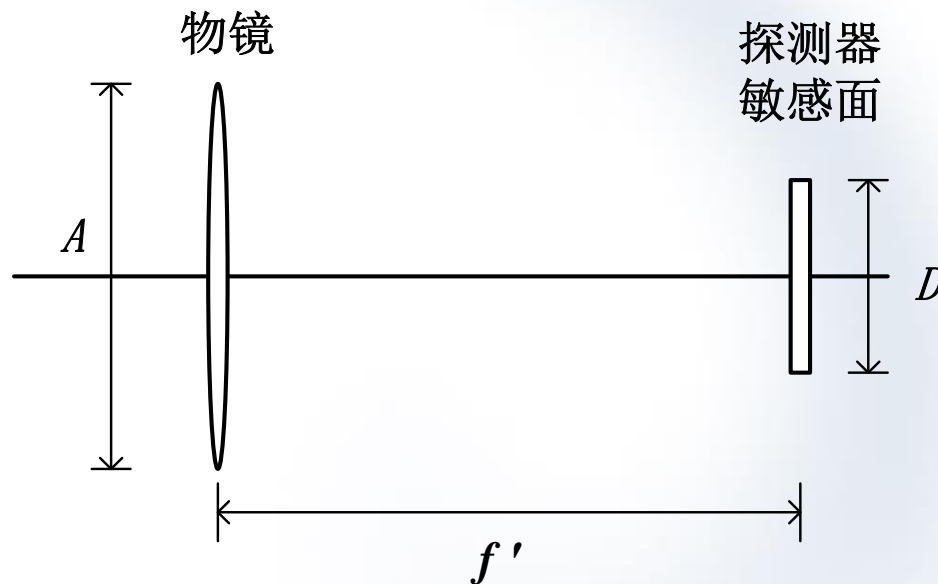
B. 轴上物点位置改变, 原孔径光阑可能失去限制作用

C. 孔径光阑位置不同, 轴外物点参与成像的光束位置不同

D. 孔径光阑位置不决定系统口径大小



- ◆ 辐射计是测量光源辐射的装置，简单形式可由一个物镜和一个探测器组成，物镜会聚来自光源的辐射并成像在探测器的敏感面上。光源相对于物镜可视为无穷远，物镜直径为 A ，探测器敏感面是圆形、直径为 D ，放置在物镜的焦平面上。如图1所示。请问该系统的像方视场角是：（ C ）



A. A/f'

B. $A/2f'$

C. D/f'

D. $D/2f'$



- ◆ 全对称光学系统是一种特殊的对称式光学系统，系统的孔径光阑居中，其前后的透镜两两相同，且朝向对称于光阑面。简述为什么全对称光学系统的入射光瞳和出射光瞳分别与物方主平面和像方主平面重合。（4分）

答：

光阑经前方光学系统所成的像为入瞳，光阑经后方光学系统所成的像为出瞳，（1分）

由于孔径光阑前后透镜两两相同并且关于透镜是对称的，因此入瞳和出瞳大小和方向均相同，（1分）

对于整个系统而言，入瞳和出瞳是物像共轭的，并且垂轴放大率 $\beta=1$ ，因此入射光瞳和出射光瞳分别与物方主平面和像方主平面重合。（2分）

5.5 空间物体成像的清晰深度——景深





$$z_1' = \beta z_1, \quad z_2' = \beta z_2, \quad \beta = -\frac{f}{x}$$

f : 光学系统的物方焦距

x : 对准平面相对于物方焦点的物距

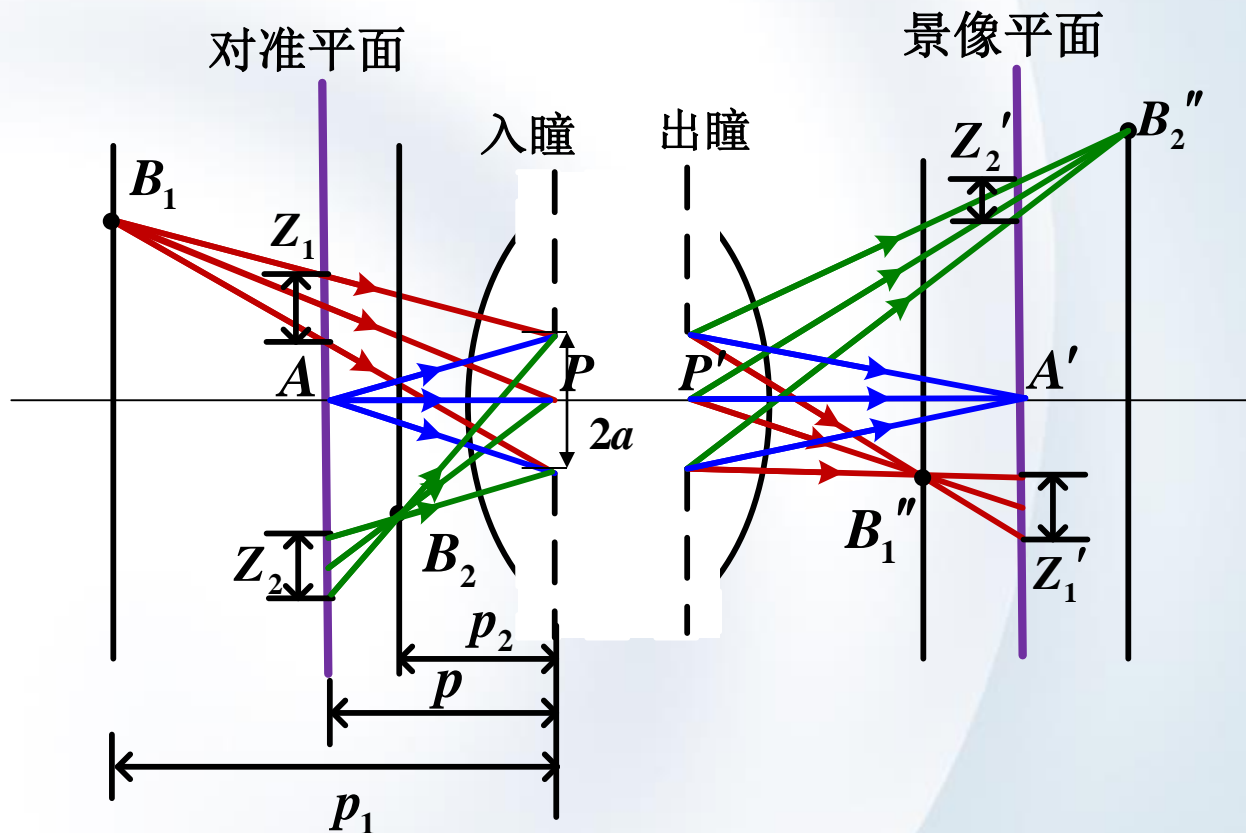
2a 入瞳直径

$$\frac{z_1}{2a} = \frac{p_1 - p}{p_1}$$

$$\frac{z_2}{2a} = \frac{p - p_2}{p_2}$$

$$z_1' = 2a \frac{p_1 - p}{p_1} \left(-\frac{f}{x}\right)$$

$$z_2' = 2a \frac{p - p_2}{p_2} \left(-\frac{f}{x}\right)$$





$$z_1' = 2a \frac{p_1 - p}{p_1} \left(-\frac{f}{x}\right)$$

$$z_2' = 2a \frac{p - p_2}{p_2} \left(-\frac{f}{x}\right)$$

- 设探测器的允许值为 z' ，像弥散斑直径 $z_1' \leq z'$ ， $z_2' \leq z'$ 时，可认为成清晰像
 - 对于用于成像的光学系统（如照相机），只要像的弥散斑小于探测元件的允许值（如数码相机的CCD或CMOS的像素单元），可认为成清晰像。
 - 光学系统的成像用于人眼观察时，只要像的弥散斑对眼睛的张角小于眼睛的最小分辨角 $1'$ ，人眼看起来该弥散斑仍为一点，可认为成清晰像。

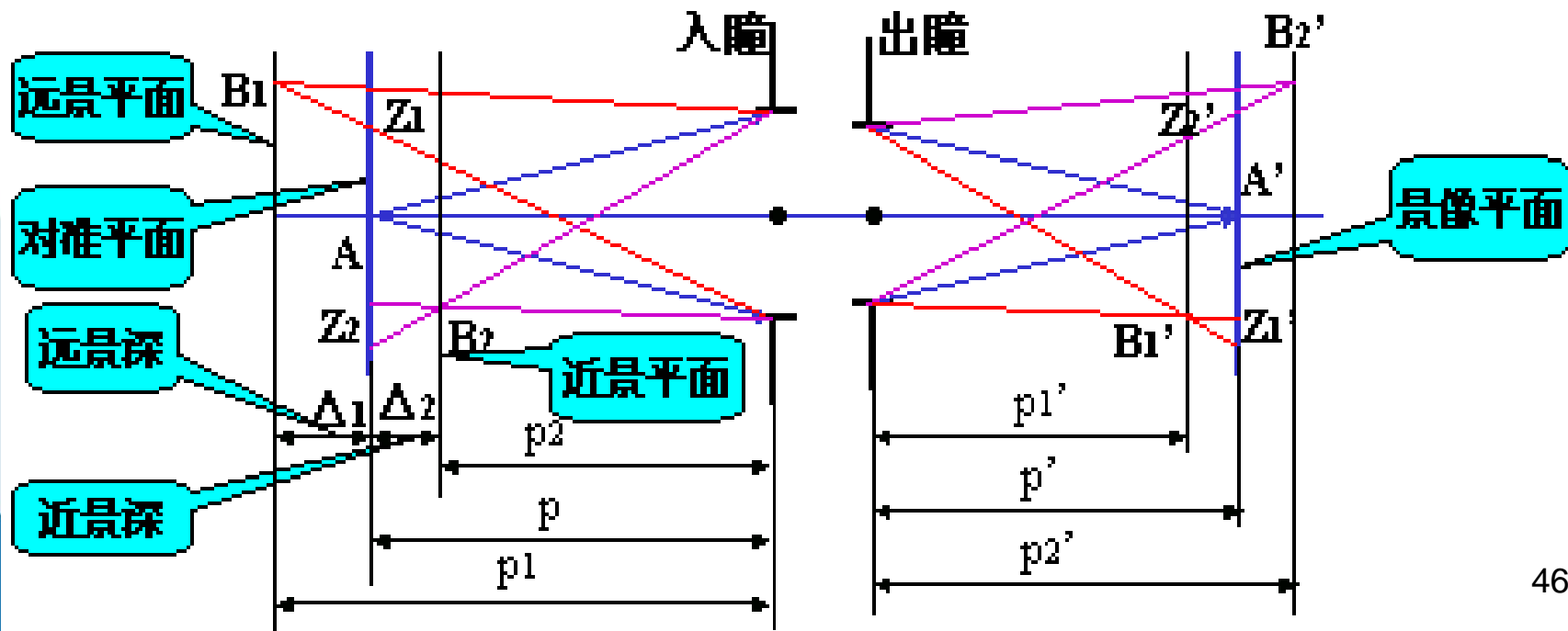


$$z_1' = 2a \frac{p_1 - p}{p_1} \left(-\frac{f}{x}\right)$$

$$z_2' = 2a \frac{p - p_2}{p_2} \left(-\frac{f}{x}\right)$$

- z_1' 、 z_2' 和 p_1 、 p_2 有关， z' 决定了对准平面前后多大距离的物平面能在景象平面上成像清晰
- 在一定深度范围内的物体在景像平面上能成清晰像。
- **景深 Δ** ：在景象平面上所获得的成清晰像的物空间深度

- ◆ **近景平面**：能成清晰像的最近的平面， $z_2' = z'$
- ◆ **远景平面**：能成清晰像的最远的平面， $z_1' = z'$
- ◆ **近景深度 Δ_2** ：近景平面和对准平面的距离
- ◆ **远景深度 Δ_1** ：远景平面和对准平面的距离
- ◆ **景深 Δ** ： $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$





设 z' 为像平面上允许的最大弥散斑直径,

$$\left. \begin{aligned} z' = z'_1 = z'_2 = |\beta|z, \quad z = z_1 = z_2 \\ \frac{z_1}{2a} = \frac{p_1 - p}{p_1} \\ \frac{z_2}{2a} = \frac{p - p_2}{p_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} p_1 &= \frac{2ap}{2a - z} = \frac{2ap|\beta|}{2a|\beta| - z'} \\ p_2 &= \frac{2ap}{2a + z} = \frac{2ap|\beta|}{2a|\beta| + z'} \end{aligned} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \Delta_1 &= p - p_1 = \frac{-pz'}{2a|\beta| - z'} \\ \Delta_2 &= p_2 - p = \frac{-pz'}{2a|\beta| + z'} \end{aligned} \right.$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = -\frac{4ap|\beta|z'}{4a^2\beta^2 - z'^2}$$

◆ 讨论:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = -\frac{4ap|\beta|z'}{4a^2\beta^2 - z'^2}$$

①像平面上允许的最大弥散斑直径 z' 越大, 景深越大

②入瞳直径 $2a$ 越小, 景深越大

③对准平面的距离 p 越大, 景深越大

④焦距与景深的关系:

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

$$2a, x, z' \text{一定时}, |f'| \downarrow \Rightarrow |\beta| \downarrow \Rightarrow \Delta \uparrow$$



◆ 讨论:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{远景深度} \Delta_1 = p - p_1 = \frac{-pz'}{2a|\beta| - z'} \\ \text{近景深度} \Delta_2 = p_2 - p = \frac{-pz'}{2a|\beta| + z'} \end{array} \right.$$

当入瞳大小 $2a$ 和对准平面的位置 p 一定时, 远景深度 $>$ 近景深度

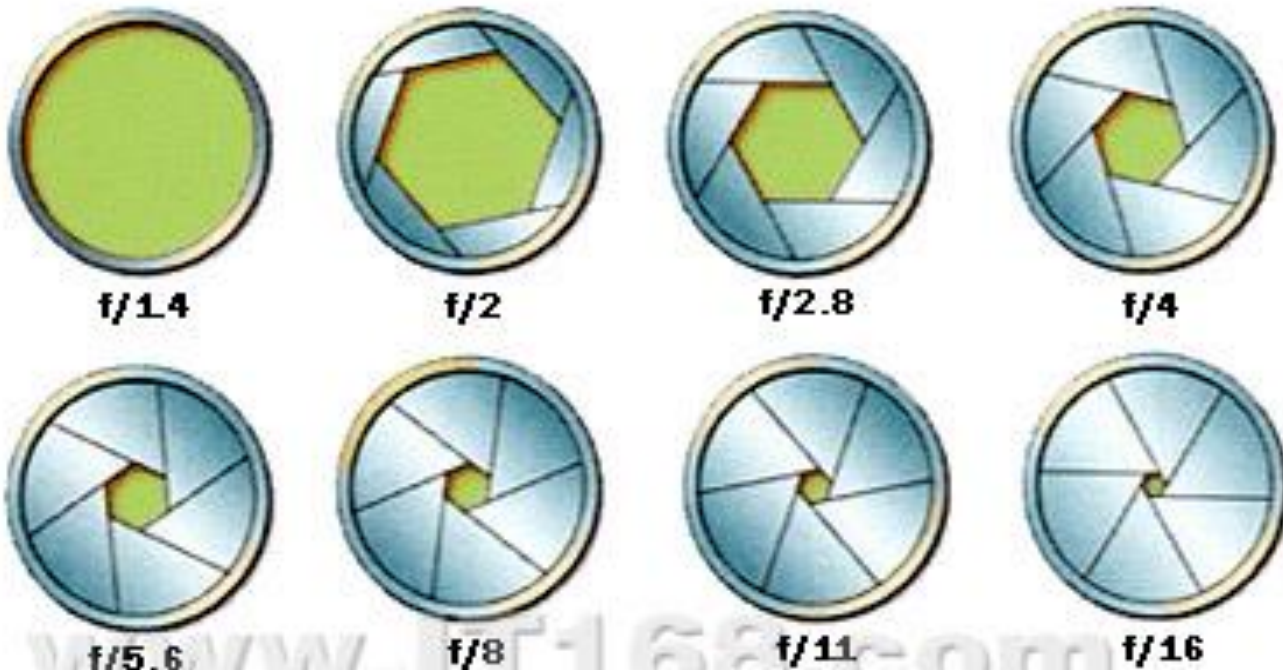
影响相机景深的因素：



相对孔径： $\frac{2a}{f'}$

镜头光圈数 $f = \frac{1}{\text{相对孔径}} = \frac{f'}{2a}$

- ◆ f/2：f数=2；如果光圈系数的标称值数字越大，也就表示其实际光圈就越小
- ◆ f1， f1.4， f2... f64， 光圈的通光量依次递减一半



相机的光圈：
口径可变的孔
径光阑

◆不同光圈的景深

焦距:50mm

光圈:f/11.0

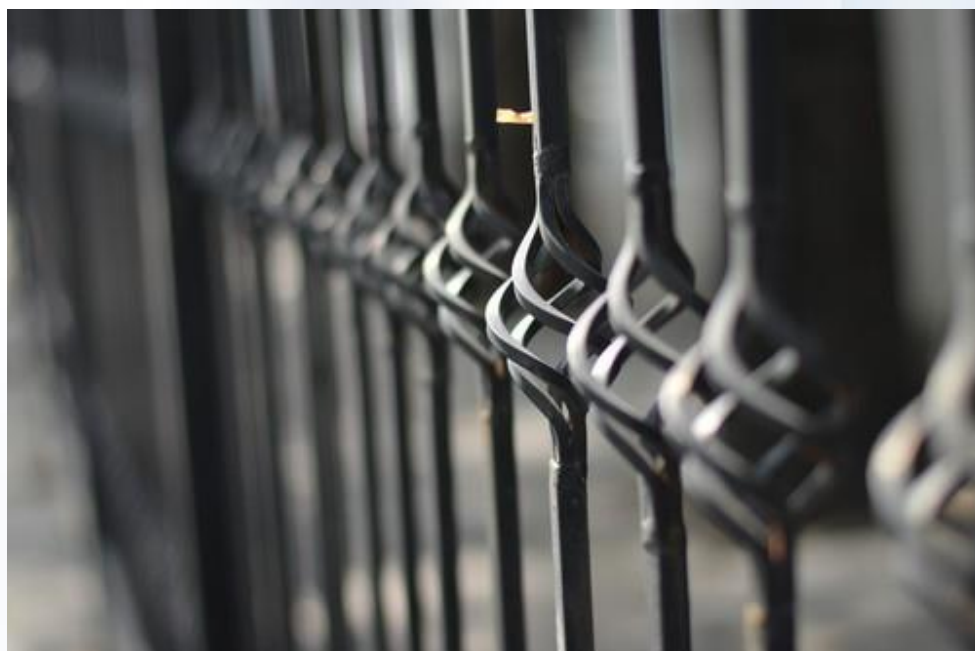
曝光时间:1/80



焦距:50mm

光圈:f/1.8

曝光时间:1/2500



焦距一定时，光圈数值越小，光圈孔径越大，景深越浅，背景虚化越明显。

◆不同焦距的景深

18mm焦距，远近都清晰，景深相对较大



200mm焦距，背景虚，景深浅



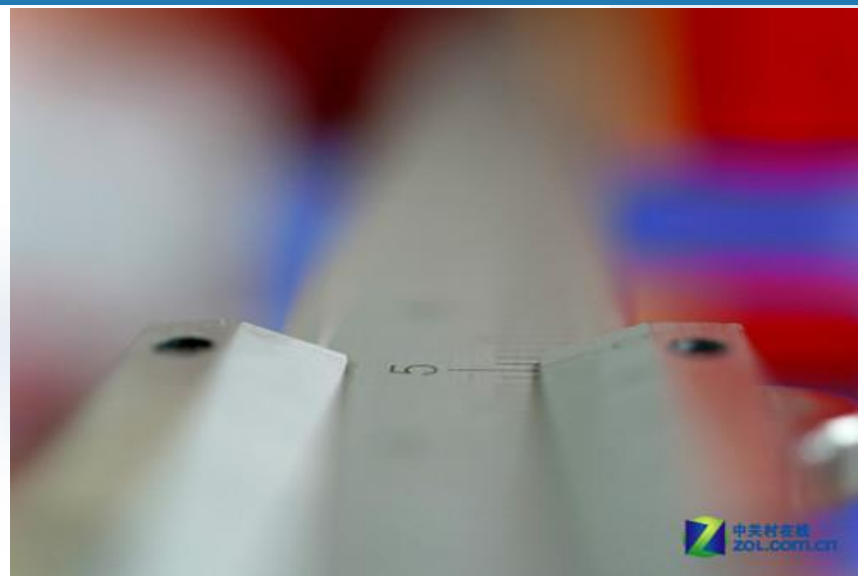
光圈孔径一定，焦距越短，景深越大；焦距越长，景深越浅

◆不同对准距离的景深

光圈f/2.5，对准距离近时，景深浅

光圈f/2.5，对准距离较远时，景深变大

对准距离越近，景深越浅；
对准距离越远，景深越大





◆ 小明想拍一组背景模糊的人像艺术照，他可以采用以下哪种方法（B）

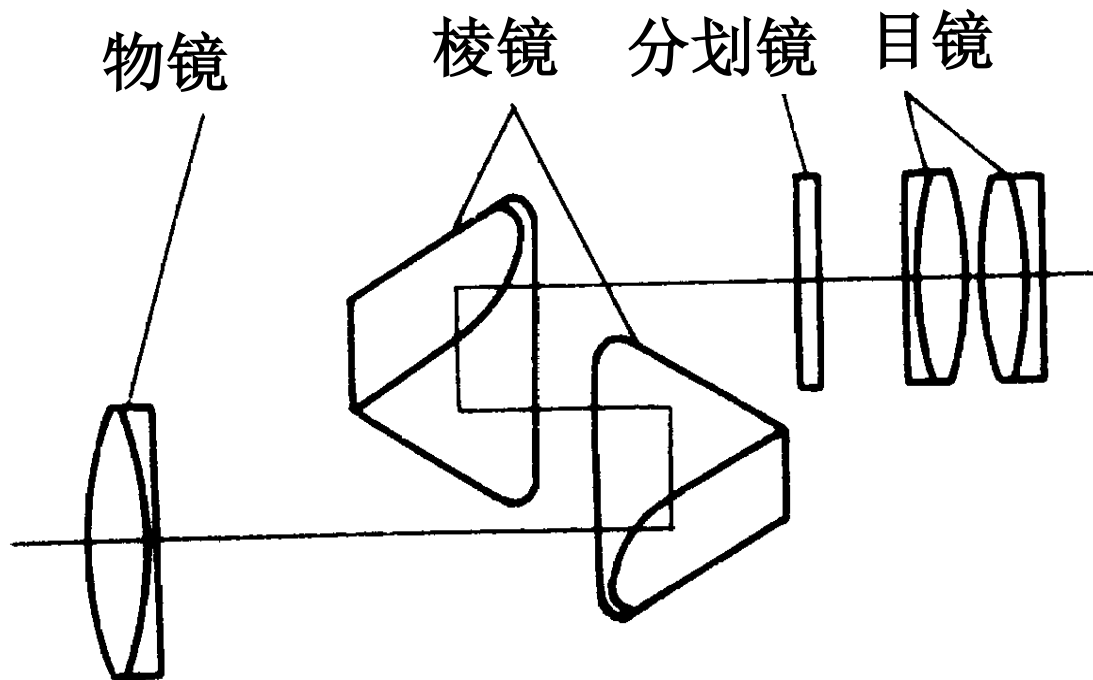
A. 减小光圈口径。

B. 增大焦距。

C. 远离拍摄对象。

D. 增加曝光时间。

5.2 望远系统中成像光束的选择

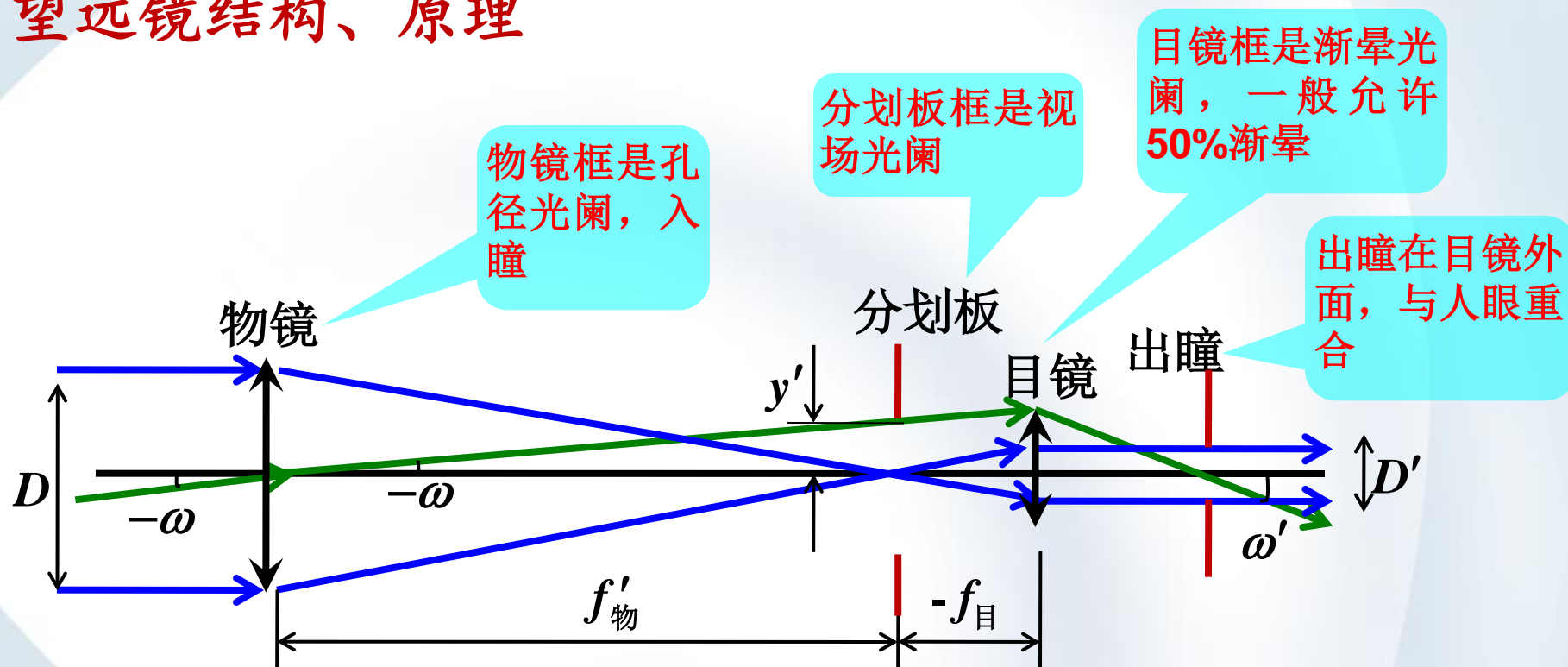


开普勒望远镜

5.2 望远系统中成像光束的选择



望远镜结构、原理

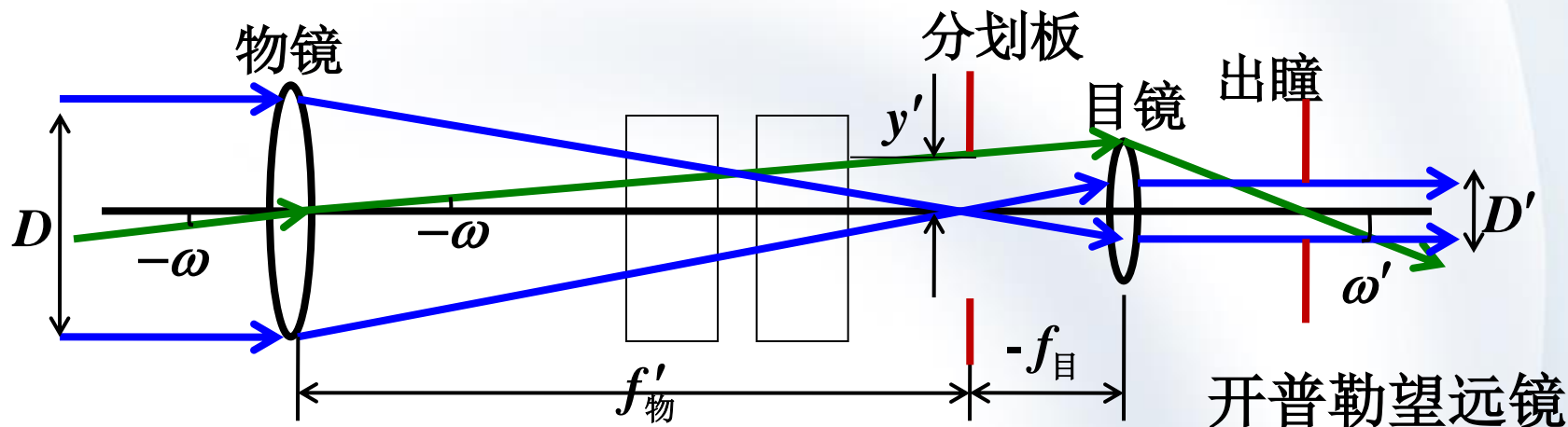


开普勒望远镜的视场 2ω 一般较小。观察时，必须使眼瞳位于系统的出瞳处，才能观察到望远镜的全视场。

5.2 望远系统中成像光束的选择



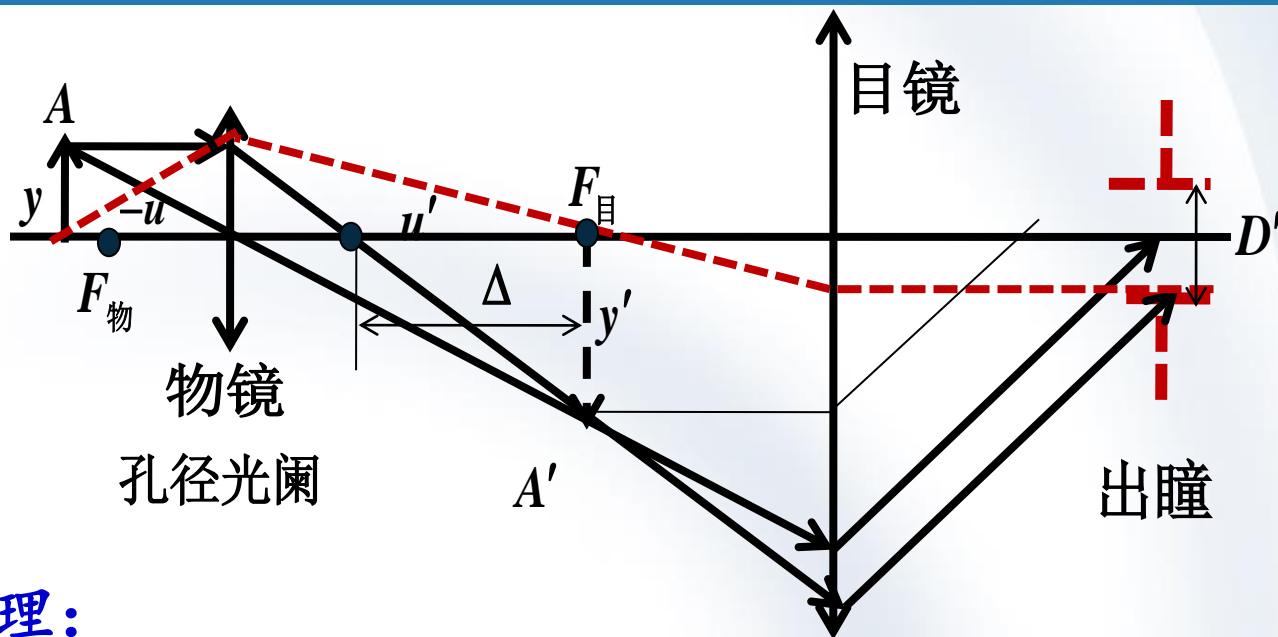
望远镜结构、原理



物方视场角 ω , $y' = -f'_{\text{物}} \cdot \tan \omega$

分划板（视场光阑直径）： $D_{\text{分}} = 2y'$

5.3 显微镜中的光束限制和远心光路



◆ 结构、原理：

◆ 普通显微镜物镜框是**孔径光阑**

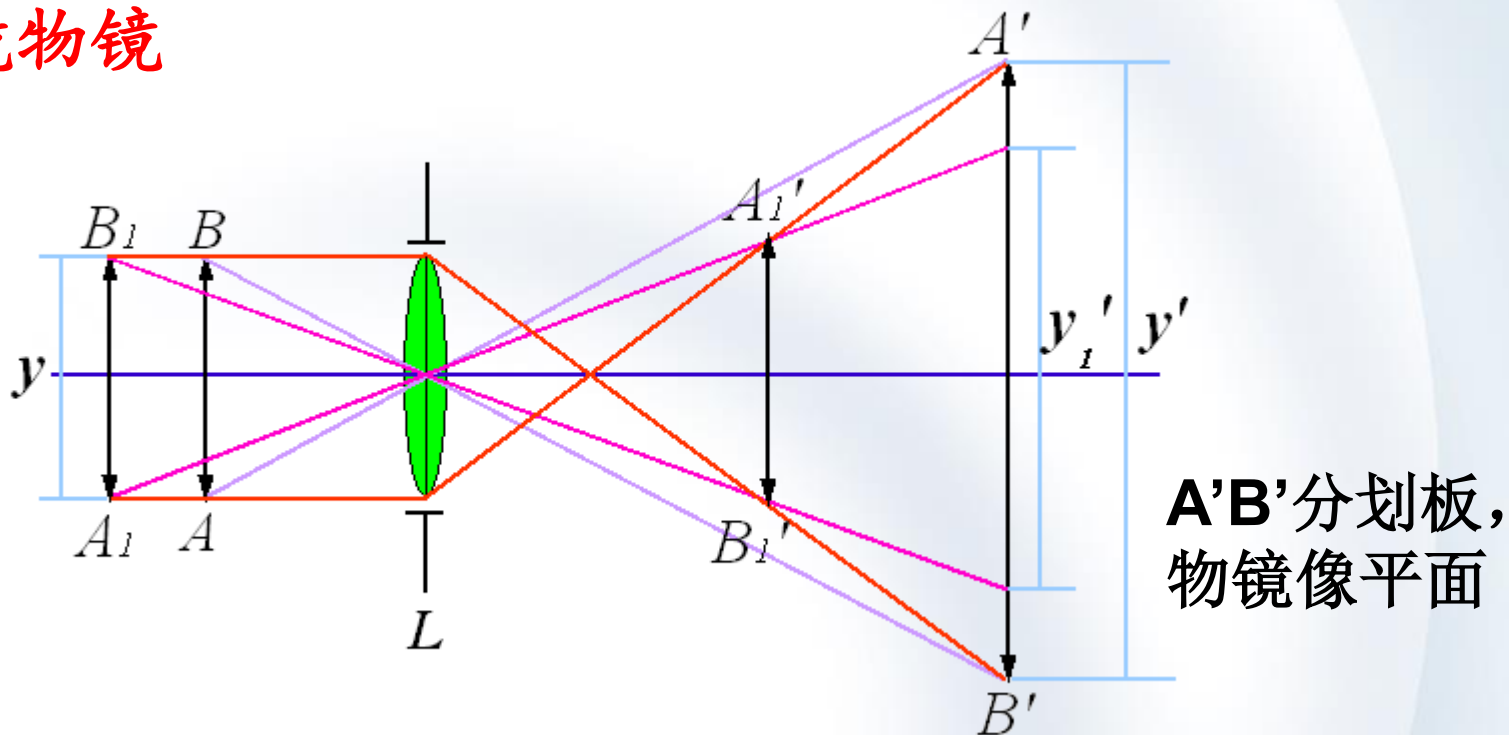
◆ 出瞳位置 在目镜像方焦点稍后处，考虑到 出瞳在总的像方焦点上，人眼瞳有可能与之重合，接收所有成像

◆ 显微镜的出瞳直径很小，一般小于眼瞳直径

5.3 显微镜中的光束限制和远心光路



显微镜物镜

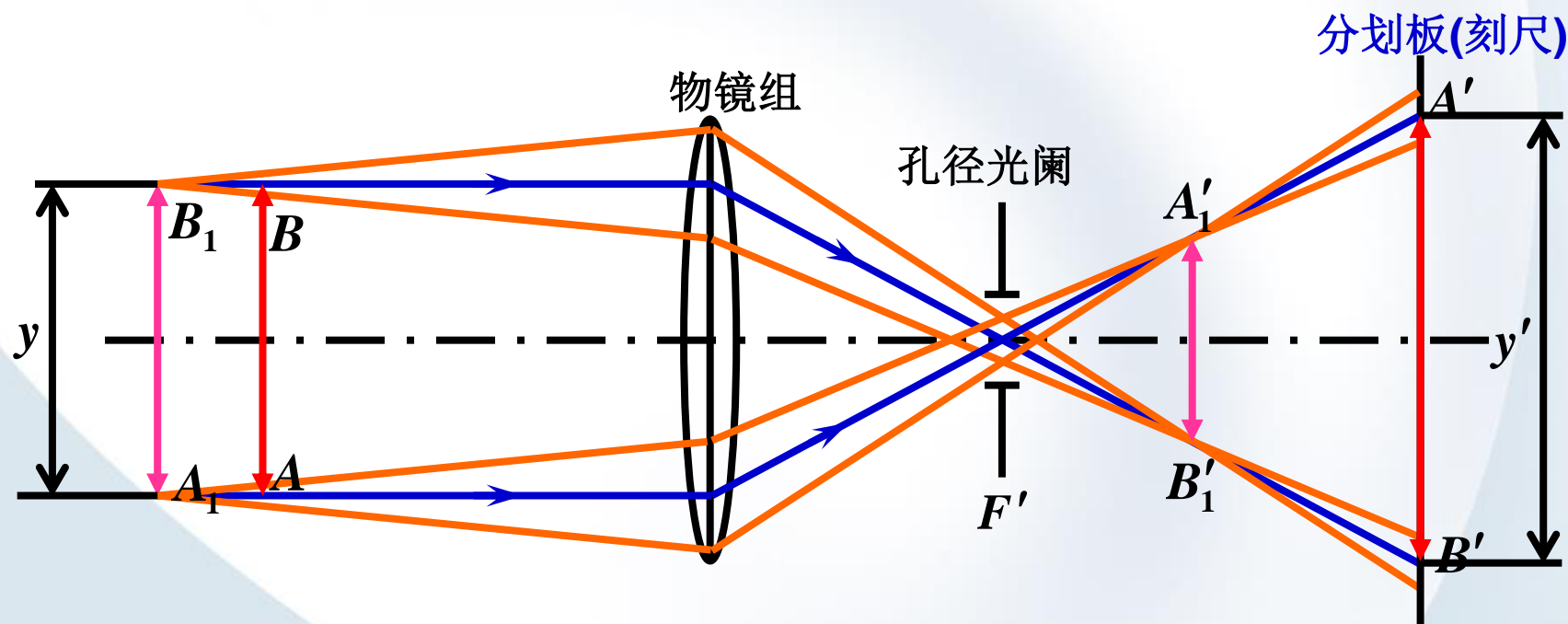


- ✓ 由于景深及调焦误差，分划板上得弥散斑。按主光线位置计算像高，量得的长度 y_1' 与 y 有误差。
- ✓ 改进方法：在物镜的像方焦平面上放置孔径光阑

5.3 显微镜中的光束限制和远心光路

- **物方远心光路：**在物镜的像方焦平面上放置孔径光阑，入瞳在物方无穷远

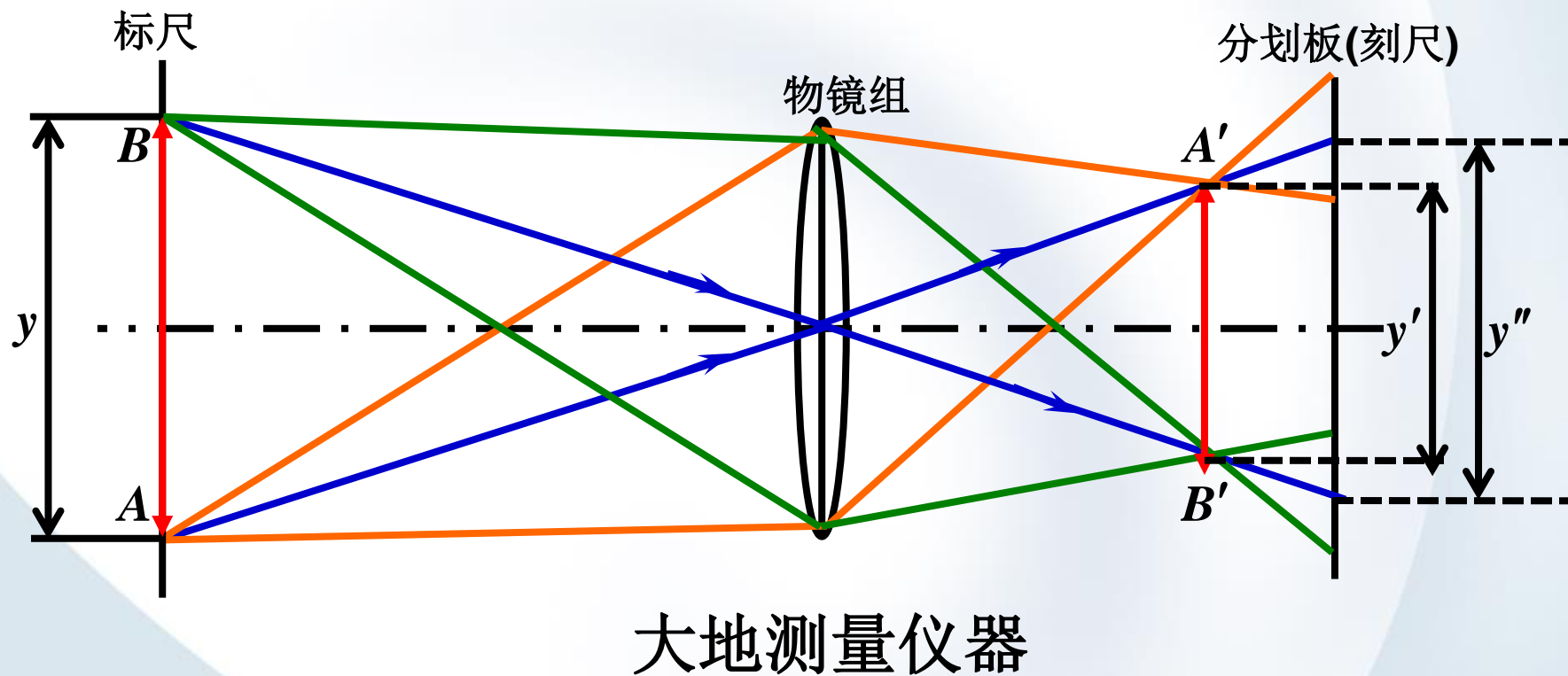
✓ 提高测量精度。



大地测量仪器中的像方远心光路



✓ 大地测量仪器

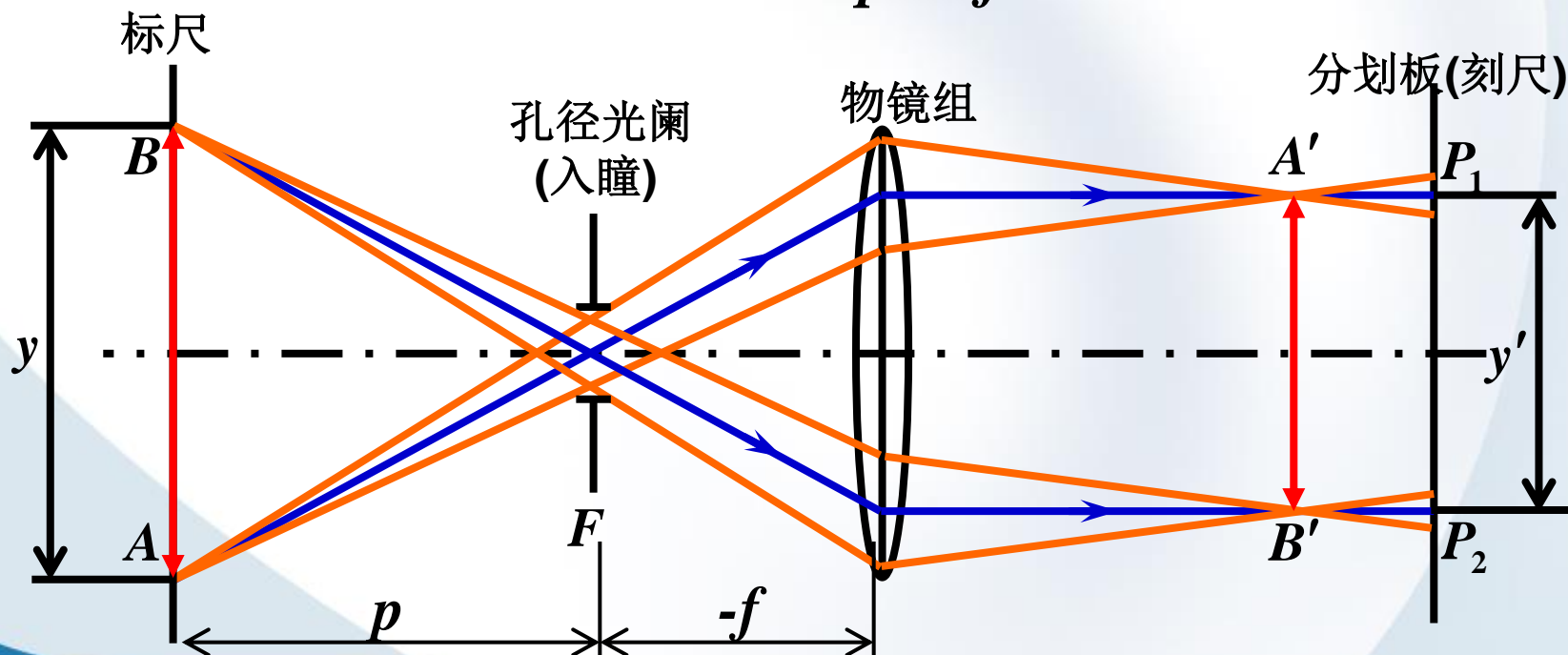


大地测量仪器中的像方远心光路

➤ **像方远心光路**：在物镜的**物方焦平面**处放置孔径光阑，出瞳位于像方无限远处

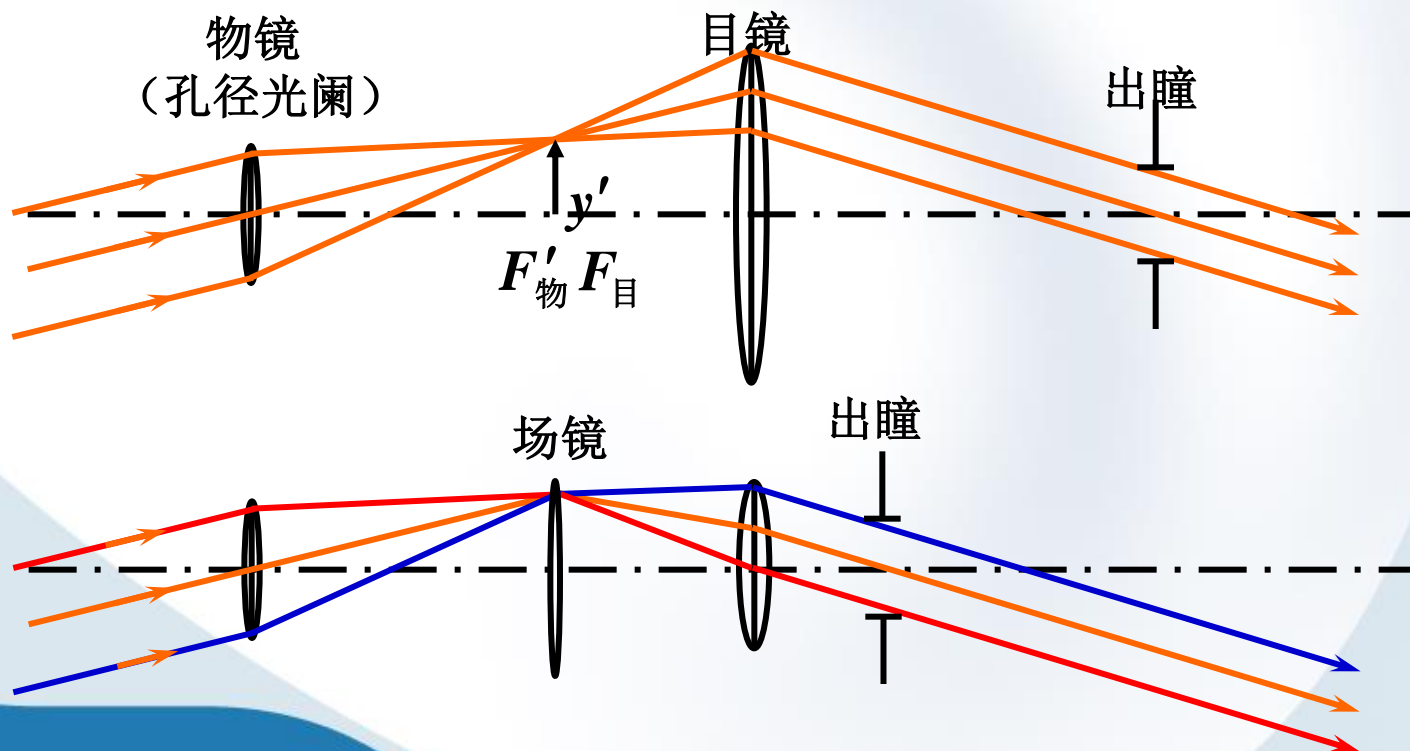
✓ 常用在**大地测量仪器**中，以提高测距精度。

✓ f' 、 y 已知，测出 y' ，利用 $\frac{y}{p} = \frac{y'}{f'}$ ，可求出 p



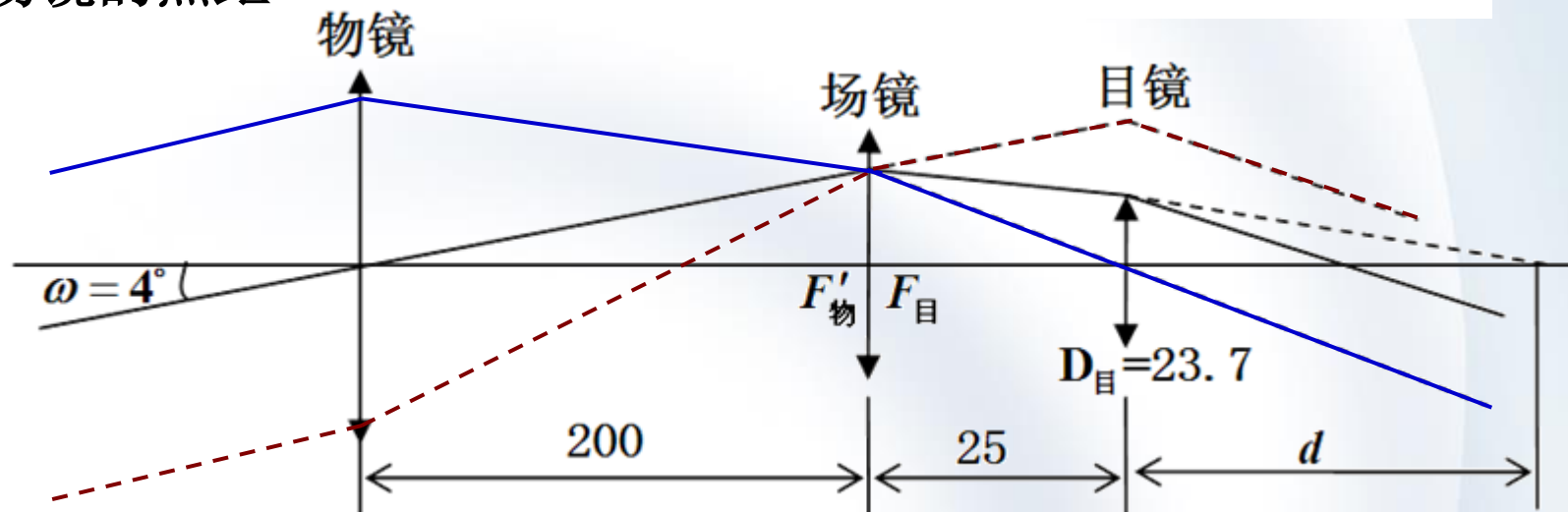
5.4 场镜的特性及其应用

- ◆ 为了减小光学元件（一般为目镜）的通光直径，同时又不改变仪器的光学特性，常常采取在物镜的像平面处放置一个正透镜的办法来解决，这个正透镜称为场镜。
- ◆ 场镜的应用：开普勒式望远系统



开普勒望远镜， $f'_{\text{物}} = 200\text{mm}$ ， $f'_{\text{目}} = 25\text{mm}$ ， $2\omega = 8^\circ$ ， $K = 50\%$ 。

为了使目镜通光孔径 $D = 23.7\text{mm}$ ，在物镜后焦平面上放一场镜，求场镜的焦距



$$\left. \begin{aligned} h_{\text{场}} &= f'_{\text{目}} \tan 4^\circ = 200 \tan 4^\circ \\ \frac{2h_{\text{场}}}{25+d} &= \frac{D_{\text{目}}}{d} = \frac{23.7}{d} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} h_{\text{场}} = 13.9854(\text{mm}) \\ d = 138.7352(\text{mm}) \end{cases}$$

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \Rightarrow \frac{1}{25+138.7352} - \frac{1}{-200} = \frac{1}{f'_{\text{场}}} \Rightarrow f'_{\text{场}} = 90.0299(\text{mm})$$



◆ 场镜在显微系统、扫描聚焦系统中经常使用。简述场镜的作用及放置位置？（4分）

答：

为了减小光学元件（一般为目镜）的通光直径，同时又不改变仪器的光学特性，常常采取在物镜的像平面处放置一个正透镜的办法来解决，这个正透镜称为场镜。

作用：降低主光线，减小后续光路口径。（2分）

放置位置：与像平面重合、或者很靠近像平面的透镜。（2分）



- ◆ 远心光路结构广泛用于比较仪、轮廓投影仪、显微光刻技术等计量学范畴的光学系统。简述显微系统中远心光路的构成及作用。（4分）

答：

远心光阑是位于光学系统焦点处的孔径光阑。（2分）

显微系统中，将孔径光阑放置在物镜像方焦平面上，这样的光路的称为物方远心光路；此时系统的入瞳位于无穷远，轴外点主光线平行于光轴，可以消除系统视差或调焦误差（2分）



- ◆ 日本基恩士公司的一键测量仪在工业尺寸检测中应用广泛。该仪器中的一个关键技术是采用了物方远心光路，请解释什么是物方远心光路？采用该光路有什么优点？

答：将孔径光阑放置在物镜像方焦平面上，这样的光路的称为物方远心光路（2分）；此时系统的入瞳位于无穷远，轴外点主光线平行于光轴，可以消除系统视差或调焦误差（2分）。



- ◆掌握孔径光阑、视场光阑及其作用
- ◆掌握光瞳及光窗的含义及作用
- ◆理解场镜的特性
- ◆了解远心光路、景深