

1-4. 为什么日出和日落时太阳看起来是扁的?

答: 这是由于太阳发出的光线穿过地球周围大气层时的折射造成的。利用思考题1-5有关蒙气差的结论, 旭日或落日的下边缘比上边缘更接近地平线, 其视高度抬高得更多, 于是太阳看起来是扁的。

1-5. 大气折射给星体位置的观察造成的偏差, 叫做蒙气差, 这是天文学必须考虑的因素。试定性地讨论蒙气差与星体到天顶距离之间的关系。

答: 大气的密度随高度的增加而减小, 折射率也随高度的增加而逐渐降低。来自星体的光线穿过大气层时从光疏介质到光密介质, 光线折射愈来愈向法线靠近, 即向地面弯曲。我们从地面上观察光线好像是从较高的位置射来的, 也就是说, 我们感到发光点的位置 i_1' 比实际位置 i_1 高了角度 $\Delta = i_1 - i_1'$ (见右图 a), 这就是蒙气差。蒙气差 Δ 是随发光点到天顶的角距离 i_1 的增大而增大的 (见右图 b), 即愈接近地平线, 星体的视高度增加得愈多。定量计算的结果可证明这一点:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_1', \quad i_1' = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i_1\right),$$

$$\frac{d\Delta}{di_1} = 1 - \frac{(n_1/n_2) \cos i_1}{\sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 i_1}}.$$

由于 $n_1/n_2 < 1$, $\sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 i_1} > \sqrt{1 - \sin^2 i_1} = \cos i_1$, 于是

$$\frac{d\Delta}{di_1} > 1 - (n_1/n_2) > 0,$$

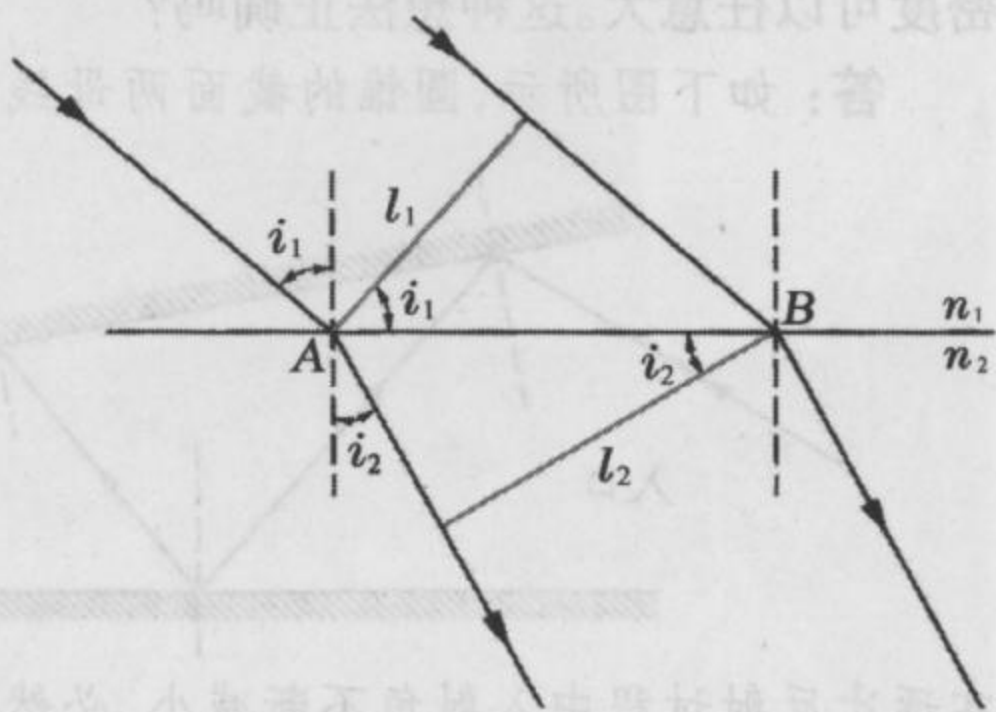
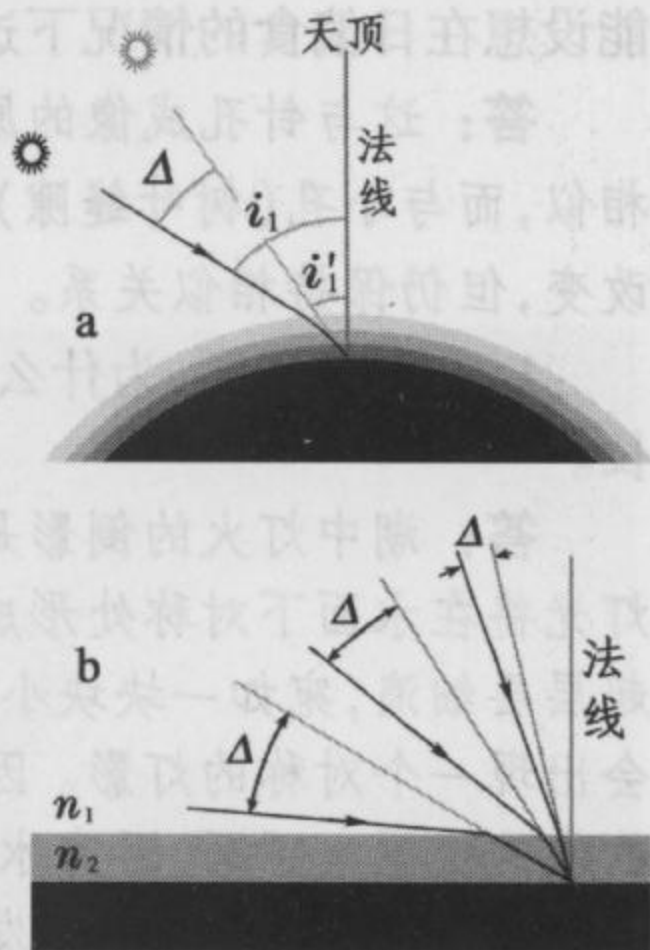
即 Δ 随 i_1 递增。

1-6. 试讨论平行光束折射后截面积的变化。

答: 如右图所示, 设平行光束的入射角为 i_1 , 折射角为 i_2 , 则折射光束和入射光束截面之比为

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{AB \cos i_2}{AB \cos i_1} = \frac{\cos i_2}{\cos i_1}$$

即平行光束在介质的界面上折射时, 折射光束和入射光束的横截面积之比等于折射角和入射角的余弦之比。这一结论正是能量守恒所要求的。



1-7. 惠更斯原理是否适用于空气中的声波？你是否期望声波也服从和光波一样的反射定律和折射定律？

答：惠更斯原理是关于波面传播的理论，对任何波动过程它都是适用的。不论是机械波或电磁波，只要知道某一时刻的波面，都可以用惠更斯作图法求出下一时刻的波面，由此可以导出波的反射定律和折射定律。这既适用于光波，也适用于声波。不过声波的波长比光波的大得多，反射面或折射面太小时，衍射现象严重。

1-8. 一儿童落水，岸上青年奔去抢救。设他在岸上奔跑的速度为 v_1 ，泅水的速度为 v_2 ， $v_1 > v_2$ ，他从 A 点出发应采取怎样的路径最快地到达孩子处 B （见本题图）？这个问题与光的折射定律有什么相似的地方？



思考题 1-8

答：如右图所示，设青年入水的地点 C ，从 A 、 B 点作湖岸的垂线 AE 和 BD ， $DE = L$ ， $DC = x$ ，则 $CE = L - x$ 。青年从 A 经 C 到 B 的时间为

$$t = \frac{AC}{v_1} + \frac{CB}{v_2} = \frac{\sqrt{y_1^2 + (L-x)^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{y_2^2 + x^2}}{v_2}.$$

取 t 对 x 的导数以求最短时间：

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{L-x}{v_1\sqrt{y_1^2 + (L-x)^2}} + \frac{x}{v_2\sqrt{y_2^2 + x^2}} = -\frac{\sin\theta_1}{v_1} + \frac{\sin\theta_2}{v_2} = 0.$$

即

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2}.$$

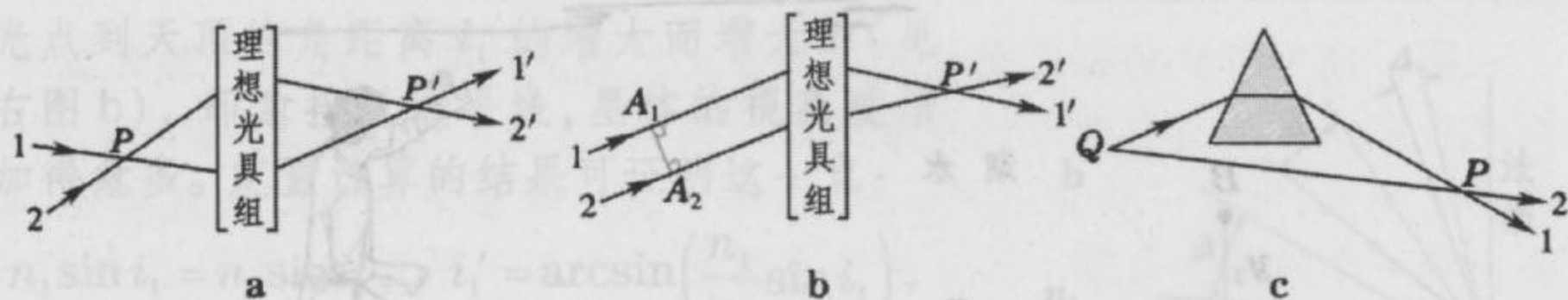
这与光线从光疏介质到光密介质折射的规律形式完全一样。光线服从费马原理，即走光程最短的路径。光程最短即时间最短，道理都是相通的。

第二章 几何光学成像

2-1. (1) 如本题图 a 所示, 若光线 1、2 相交于 P 点, 经过一理想光具组后, 它们的共轭线 $1'$ 、 $2'$ 是否一定相交? 如果有交点, 令此交点为 P' , 两光线在 P 、 P' 间的光程是否相等?

(2) 如本题图 b 所示, 若光线 1、2 平行, 经过一理想光具组后, 它们的共轭线 $1'$ 、 $2'$ 是否一定相交? 如果有交点, 令此交点为 P' , 作 A_1A_2 垂直于 1、2, 光程 (A_1P') 和 (A_2P') 是否一定相等?

(3) 如本题图 c 所示, 从点光源 Q 发出两根光线 1 和 2, 光线 1 经棱镜偏折, 光线 2 不经过棱镜, 两光线相交于 P , 在 Q 、 P 间两光线的光程是否相等?



思考题 2-1

答: (1) 理想光具组必须保证同心光束保持同心性, 即相交于一点的入射光线经理想光具组变换后, 其出射光线必然也交于唯一的一点。所以图 a 中交于 P 点的入射光线 1、2 之共轭光线 $1'$ 、 $2'$ 必定交于一点。若交点为 P' , 则 P 和 P' 点为物像共轭点, 根据物像等光程性原理, 两光线在 P 和 P' 间光程相等。

(2) 图 b 中的入射光线 1、2 平行, 相当于交点在无穷远处, 令该交点为 P ; 由 (1) 的分析可知, 其共轭光线 $1'$ 、 $2'$ 也必定交于一点。若交点为 P' , 则 P 和 P' 点为物像共轭点。根据物像等光程性原理有光程 $(PA_1P') = (PA_2P')$ 。又因线段 A_1A_2 垂直于光线 1、2, 故 A_1 、 A_2 为入射光等相面上的两点, $(PA_1) = (PA_2)$, 因此有 $(A_1P') = (PA_1P') - (PA_1) = (PA_2P') - (PA_2) = (A_2P')$ 。

(3) 在图 c 中光线 1 在 Q 、 P 两点间光程显然大于光线 2 在 Q 、 P 两点间的光程。棱镜不是成像的理想光具组, Q 、 P 不是物像共轭点, 其间不存在等光程性。

2-2. 在图 2-5a 中用通过 M 点与椭球面相切的球面反射镜代替椭球面反射镜, 在下列三种情况下光线 QMQ' 的光程是极大值、极小值, 还是恒定值?

- (1) 球面的半径大于椭球在 M 点的曲率半径,
- (2) 球面的半径等于椭球在 M 点的曲率半径,
- (3) 球面的半径小于椭球在 M 点的曲率半径.

答: (1) 如右图, M' 点在曲率半径大于椭球面的球面上, P 点在椭球面上. 根据椭球的特性知, 光程 $(QPQ') = (QM'Q')$. 由于

$$PQ' < PM' + M'Q',$$

所以光程

$$(QM'Q') = (QPQ') < (QM'Q').$$

光线 $QM'Q'$ 是违背反射定律的, 即入射光线 QM' 在 M' 点反射后不会通过 Q' 点; 而光线

$QM'Q'$ 是符合反射定律的, 因此, 在球面反射镜 MM' 上的实际光线 $QM'Q'$ 是光程为极小的情形。

同理可证, 在(2)和(3)中, 光线 $QM'Q'$ 的光程分别是恒定值和极大值。

此外, 我们还可设想有一在 M 点与椭球外切于左侧而内切于右侧的反射镜, 则光程 $(QM'Q')$ 取拐点值。由此可见, 费马原理所讲的光线的实际路径是光程为平稳的路径, 平稳光程可以有上述四种基本形态, 相应的实际例子都是可以找到的。

2-3. 为什么平面镜成像左右互易, 而上下不颠倒?

答: 若一个人面对镜子站着, 相对于空间来说, 镜中的像上下左右都没有颠倒, 而是前后易位(见右图)。不过我们是相对于上下前后来定义左和右的, 前后易位, 右手坐标系变成了左手坐标系。

2-4. 将物体放在凸透镜的焦面上, 透镜后放一块与光轴垂直的平面反射镜, 最后的像成在什么地方? 其大小和虚实如何? 上述装置中平面镜的位置对像有什么影响? 你能否据此设计出一种测凸透镜焦距的简便方法?(此法称为自聚焦法。)

答: 如右下图所示, 凸透镜 L 前焦面 \mathcal{F} 上轴外物点 P 发出的发散同心光束, 先经透镜 L 后转化为斜入射到平面镜 M 上的平行光束; 然后经 M 反射后转化为自右向左的倾斜平行光束; 再次通过透镜 L 后必聚于焦面 \mathcal{F} 上的一点 P' 。由 M 上入射平行光和反射平行光在方向上的对称性可知 P' 必与 P

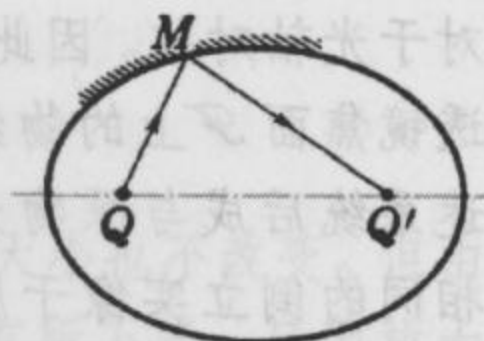
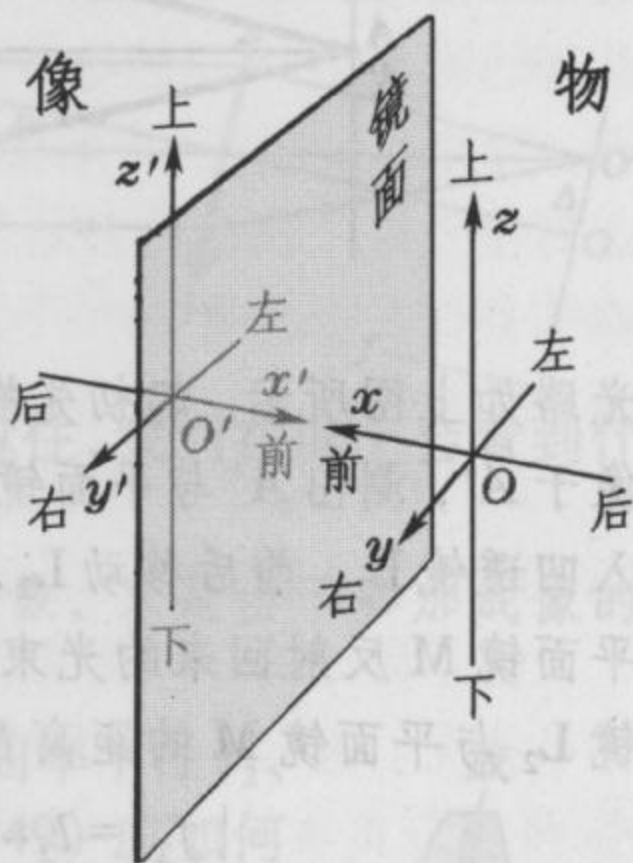
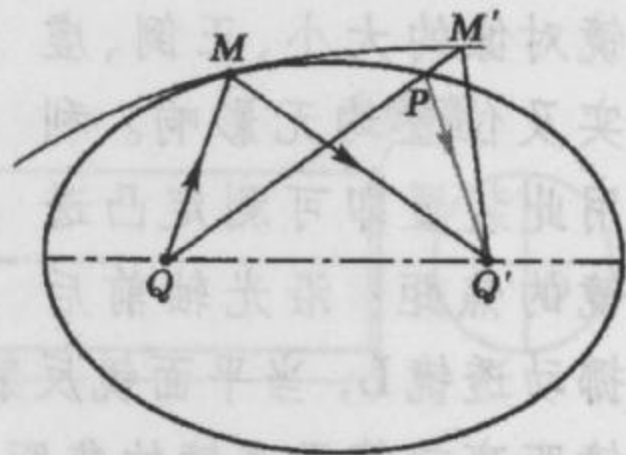
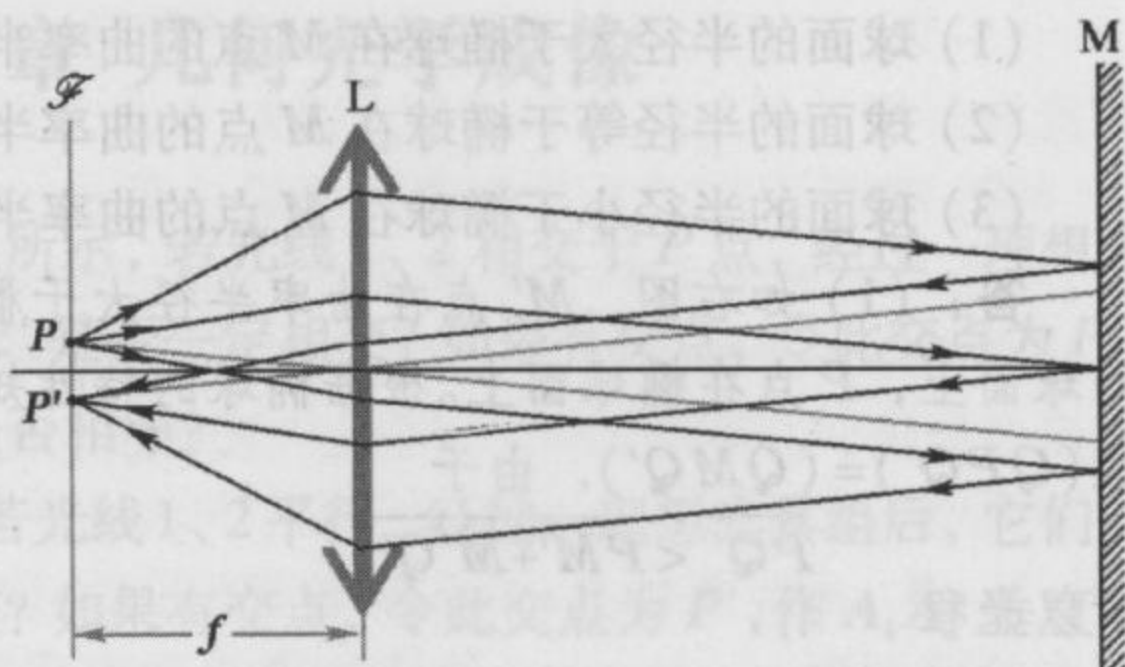


图 2-5 a 椭球面



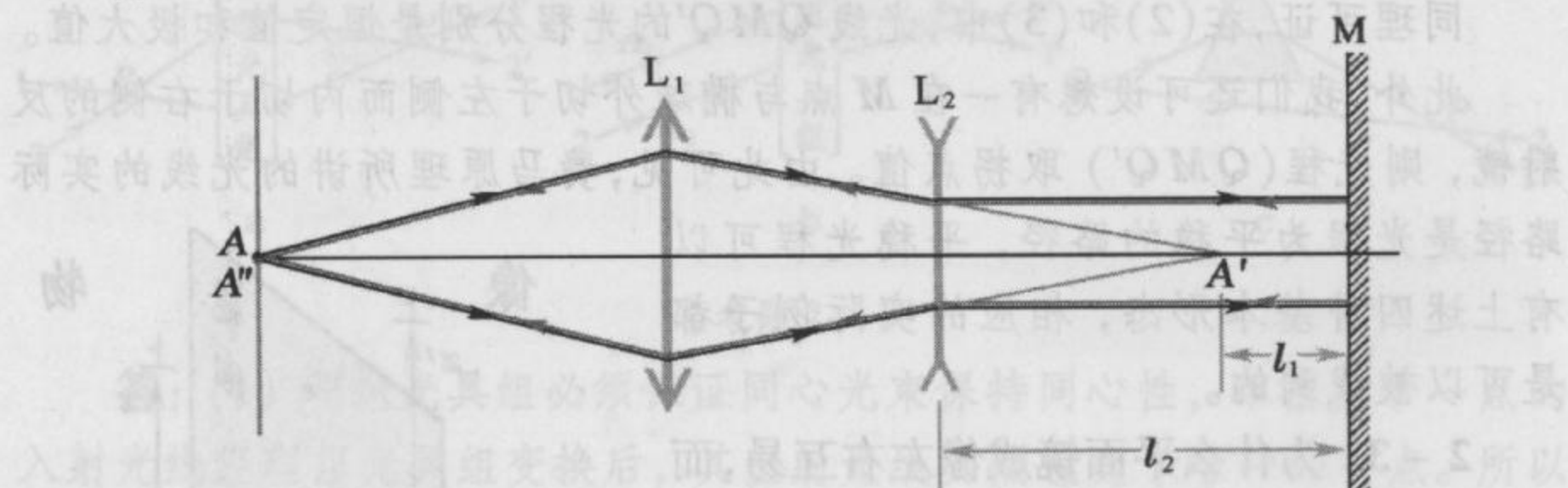
对于光轴对称。因此,凸透镜焦面 \mathcal{F} 上的物经上述系统后成与原物大小相同的倒立实像于原焦面 \mathcal{F} 上。前后移动平面镜对像的大小、正倒、虚实及位置均无影响。利用此装置即可测定凸透镜的焦距:沿光轴前后



挪动透镜 L , 当平面镜反射回来的光束在物面上成像最清晰时,这时物与透镜距离就等于透镜的焦距 f . 这就是所谓“自聚焦法”。

2-5. 上题中测焦距的方法能否用于凹透镜?

答:自聚焦法也可用于测凹透镜的焦距,不过要有一个凸透镜作为辅助。

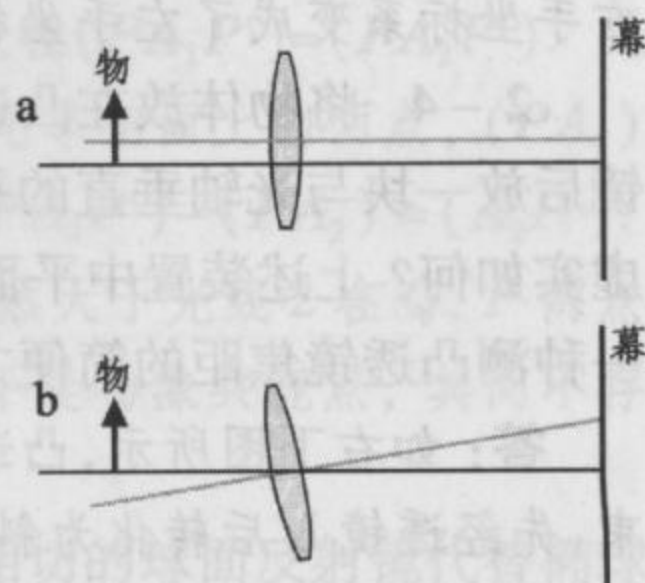


光路如上图所示。起初先撤走待测凹透镜 L_2 , 令物点 A 通过凸透镜 L_1 成实像于 A' , 测出 A' 与平面镜 M 的距离 l_1 . 然后再在像 A' 与凸透镜 L_1 之间插入凹透镜 L_2 . 前后移动 L_2 , 当它与 A' 的距离刚好等于待测透镜焦距时,经平面镜 M 反射回来的光束将在物面上成一最清晰的像 A'' . 测出这时凹透镜 L_2 与平面镜 M 的距离 l_2 , 即得凹透镜焦距的大小为

$$|f_2| = l_2 - l_1.$$

2-6. 如本题图,一凸透镜将傍轴小物成像于幕上。保持物和幕不动,(1)将透镜稍微沿横向平移(图 a), (2)将透镜的光轴稍微转动(图 b),讨论幕上像的移动。

答:(1)将凸透镜作横向微小平移,则幕上的像也向同方向平移,像的大小不变,清晰度也不变。设凸透镜横向移动距离为 Δy , 则



思考题 2-6

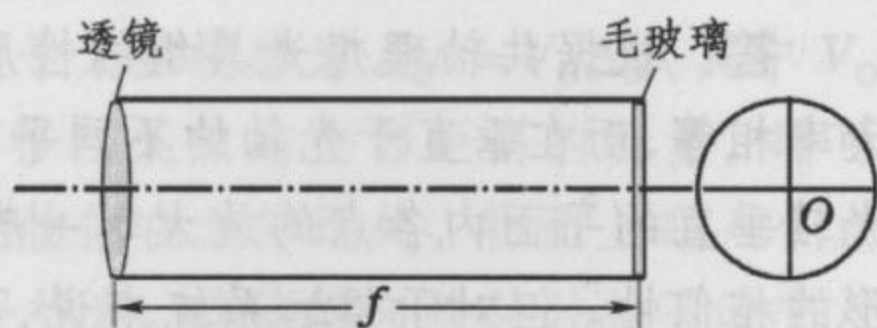
像的移动距离为

$$\Delta y' = (1 + |V|) \Delta y,$$

其中 V 为像的横向放大率。

(2) 将光轴作微小转动时, 幕上的像不产生移动, 大小也不改变。但由于此时小物和幕都不再严格与光轴垂直, 像的清晰度有所下降, 且因放大率不一致而稍有畸变。

2-7. 在镜筒前端装一凸透镜, 后端装一毛玻璃屏, 上面刻有十字线, 交点 O 在光轴上(见本题图)。筒长为透镜的焦距 f 。用此装置瞄准一个很远的发光点, 使成像于屏上 O 点。讨论在下列情况中像点在屏上的移动: (1) 镜作横向平移, (2) 镜筒轴线转过角度 θ 。

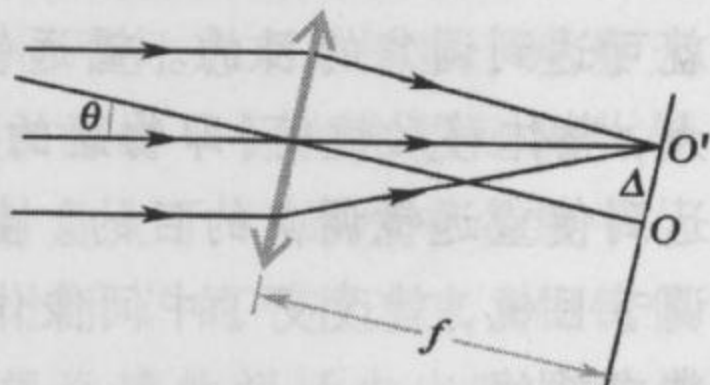


思考题 2-7

答: 发光点在很远的地方, 可视为无穷远, 入射到透镜上的光束为平行光束, 若像点在 O 点(即焦点), 则表明入射光束平行于光轴。

(1) 当透镜作横向平移时, 并未改变入射平行光的相对方向, 因此屏上的像点不动, 固定在 O 点。

(2) 当镜筒轴线转过 θ 角时(见右图), 入射平行光与光轴成 θ 角, 像点 O' 在毛玻璃屏(透镜后焦面)上平移距离 $\Delta = f\theta$ 。



2-8. 用上题的装置对准很远的景物, 使之成像于毛玻璃屏上。若这时把透镜下半部遮住, 我们在屏上会看到什么现象?

答: 将透镜遮住一半, 屏上仍能得到完整的像, 只是由于参加成像的光束截面减小, 使像变暗。

2-9. 当黏合两薄透镜时, 若相接触的表面曲率半径 r_2 、 r_3 不吻合(见本题图), 复合透镜的焦距公式(2.49)应如何修改?

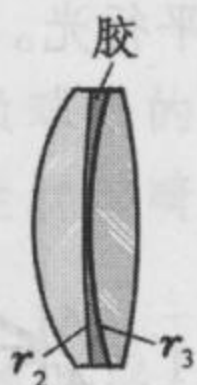
答: 这里的黏合剂也可看做一个透镜, 复合透镜相当于三个透镜的密接, 其合成焦距公式为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_0},$$

式中 f_1 和 f_2 分别为两玻璃透镜的焦距, f_0 是黏合剂透镜的焦距:

$$f_0 = \frac{1}{(n_0 - 1) \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right)},$$

式中 n_0 为黏合剂的折射率。



思考题 2-9

2-10. 非望远系统中可能有一对以上的主面吗?

答: 轴对称的理想光具组有一条性质: 只要有两对共轭面内的横向放大率相等, 则横向放大率处处相等, 亦即此系统为望远系统。所以非望远系统中没有一对以上放大率等于 1 的共轭面, 即主面。

2-11 一般说来, 理想光具组能保持不与光轴垂直的平面内几何图形的相似性吗?

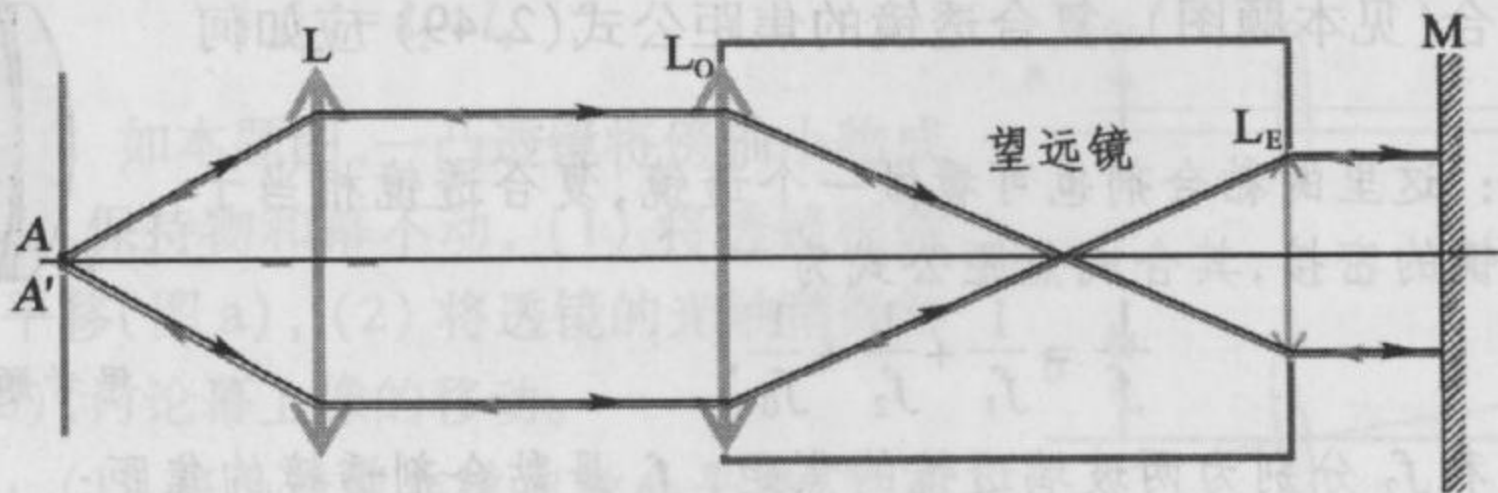
答: 根据共轴理想光具组的性质, 在垂直于光轴的同一平面内横向放大率相等, 而在垂直于光轴的不同平面内横向放大率一般不等。因此, 不与光轴垂直的平面内各点的放大率一般也是不相等的, 这就不能保持几何图形的相似性。但对于望远系统来说, 不属于同一垂直于光轴平面的横向放大率是相等的, 因而不与光轴垂直平面内的几何图形仍能保持相似性。

2-12. 为什么调节显微镜时镜筒作整体移动, 而不改变筒长, 而调节望远镜时则需要调节目镜相对于物镜的距离?

答: 显微镜的观察对象是近物, 其焦深很小, 物距的微小改变将非常敏感地影响中间像的位置。因此, 用调节目镜的方法使显微镜对不同距离的物聚焦是很困难的。而对镜筒作整体移动, 即改变物距, 只要作微小的调节就可达到调焦的目的。望远镜所观察的是远处(无穷远)的物, 其焦深很大, 整体移动镜筒(即物距的微小改变)并不改变中间像的位置, 因而不能达到使望远镜调焦的目的。由于望远镜的中间像在目镜和物镜焦点附近, 调节目镜, 就改变了中间像作为目镜的物的物距, 这对望远镜的观测是非常有效的。

2-13. 通常说将望远镜调节到对无穷远聚焦, 这是什么意思? 如何利用自聚焦法(参考思考题 2-4) 调节望远镜, 使聚焦于无穷远?

答: 望远镜对无穷远聚焦是指, 当平行光入射到望远镜时, 出射光束仍为平行光。这时的望远镜是一个无焦系统(望远系统)。欲调节望远镜对无



穷远聚焦, 可采用自聚焦法。如上图所示, 先按思考题 2-4 的方法, 调节凸透镜 L 达到自聚焦, 即使最后的像 A' 清晰地成于物面。然后在透镜 L 和