三、光　现　象

1. 光的直线传播

（1）光源与光线

光源：本身能够发光的物体叫作光源，例如，太阳、点燃的蜡烛、发光的灯泡等。按几何形状不同，光源可以分为点光源、线光源、面光源、体光源等。它们都是实际光源的抽象和近似。当光源本身的线度远小于光源到被照射物体的距离时，该光源可以看作点光源。点光源是一种理想化模型。

（2）光的传播规律

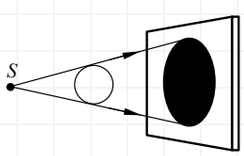
物理学中用来表示光传播方向和径迹的一条带箭头的直线叫作光线。光线是由光束抽象建立的物理模型。

光在同种均匀介质中沿直线传播。阳光下的树木、建筑物的影子、月食、日食以及小孔成像，都是由光的直线传播形成的。光在不同介质或同种不均匀介质中，不一定沿直线传播。如果已知一个发光体 S 射出的两条光线，只要把这两条光线向相反方向延长，交于一点，就能确定发光体的位置。人用两只眼睛观察物体的时候，根据两只眼睛对物体的视线间的夹角可以判断物体的位置也是应用这一规律。

光在不同介质中的传播速度不同。光可以在真空中传播，并且在真空中的传播速度最大，为 $c=3.0\times10^8$ m/s。光在空气中的传播速度十分接近光在真空中的传播速度，通常可以近似为 3.0×10^8 m/s。

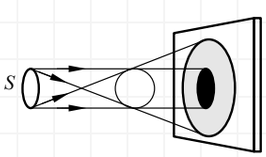
（3）影、本影与半影

点光源发出的光照射到不透明的物体上时，物体向光的表面被照亮，在背光面的后方形成一个光照不到的黑暗区域，这就是物体的影。如图甲所示为点光源的影。



甲

影区是由光源发出、与物体表面相切的光线围成的。如果用一个发光面比较大的光源来代替点光源，情形就会不同。发光面上的每个发光点都可以看作一个点光源，它们都在物体的背后形成影区，这些影区中完全不会受到光照射的部分叫作本影。本影的周围还有一个能受到光源发出的一部分光照射的区域，叫作半影。如图乙所示为面光源的本影与半影。光源的发光面越大，本影区越小。

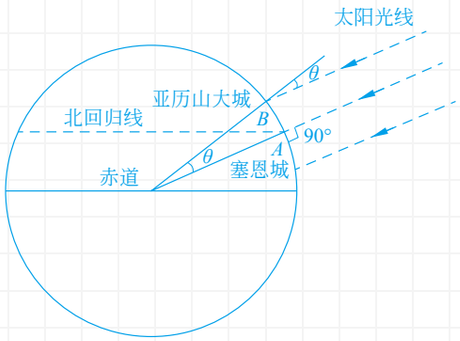


乙

【例3-1】早在公元前，著名天文学家埃拉托色尼就已经计算出了地球的周长，与现代科学公认的地球周长的真实值相差很小。他在研究中发现，每年夏至这一天，塞恩城（今埃及阿斯旺）正午的太阳光正好直射到城内一口深井的底部。而远在 s km 以外的亚历山大城，夏至这天正午的太阳光却会使物体在地面上留下一个影子，他测得太阳光方向与竖直方向之间的夹角为 θ（单位：度），由此得出地球的周长为（　　）

A. $\frac{\theta \cdot s}{360}$ km　　B. $\frac{360 \cdot s}{\theta}$ km　　C. $\frac{\theta \cdot s}{180}$ km　　D. $\frac{180 \cdot s}{\theta}$ km

【提示】如图所示，题中所述深井与地球球心的连线和亚历山大城与球心的连线的夹角为 θ，两地间的距离 s km 即为圆心角 θ 所对应的弧长。设地球周长为 C km，则 $s=\frac{\theta}{360}\cdot C$，解得 $C=\frac{360 \cdot s}{\theta}$。因此 B 正确。

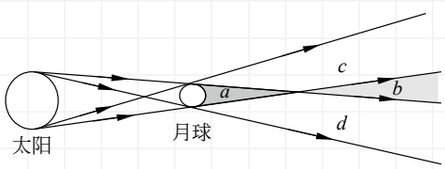


【陈老师点评】

埃拉托色尼测量地球周长的实验，是古代科学史上的“里程碑”事件。该实验基于地球球形假说，通过天文观测与几何计算，首次不依赖环球航行，仅用地面观测数据就精准推算出地球的宏观尺度，有力证实了“地球是球体”的猜想，驳斥了当时的地平说，重塑了人类对自身生存空间的认知。

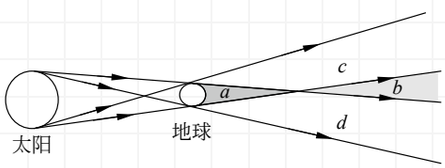
（4）日食和月食

发生日食时，太阳、月球和地球位于同一直线上，月球在中间。太阳发出的光线经月球遮挡后，形成如图甲所示的 a、b、c、d 四个影区，其中 a 为本影区，没有光线能够照射到该区域，b 为伪本影区，是只有太阳边缘光线照亮的区域，c 和 d 为半影区。地球上的观察者位于 a 区域内时，将观察到日全食，位于 b 区域内时，可以观察到日环食，位于 c 和 d 区域内时则可以观察到日偏食。



甲

发生月食时，太阳、地球和月球位于同一直线上，地球在中间，如图乙所示。当月球有一部分进入地球的本影区时，本影区没有光线，该部分不能被看到，形



乙

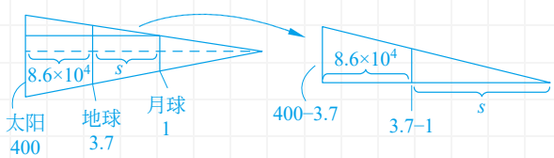
成月偏食。当月球全部进入地球的本影区 a 时，由于没有太阳的光线直射到月球表面，地球上的观察者会看到月全食。当月球全部都在 c、d 区域内时形成半影月食，注意半影月食仅为亮度变暗，“月球”看上去依然是圆的。

【例3-2】日食、月食是我们在地球上通过肉眼能直接观测到的天文现象，如果定义月球的半径为 1，则地球的半径约为 3.7，太阳的半径约为 400，地、月距离约为 220，地、日距离约为 8.6×10^4，参考上述数据可以判断，在地球上看不到的现象是（　　）

A. 月环食　　B. 月全食　　C. 半影月食　　D. 月偏食

【提示】由题意可知，太阳直径最大，地球半径次之，月球半径最小。地球距离月球较近，距离太阳较远。当地球、太阳、月亮在同一直线上，地球到了月球和太阳的中间时，太阳光无法照射到月亮上面。所以在地球上观测月球便有一块区域出现了阴影，这就是月食。

同理，三球的直径大小和距离关系如图所示，月球半径小于地球半径，且距离地球较近。设月球恰好能被地球的影子遮挡，那么和地球的距离为 s，则如图所示根据相似三角形的关系 $\frac{400-3.7}{3.7-1}=\frac{8.6\times10^4+s}{s}$ 可得 $s\approx590>220$（地、月距离），不会出现月环食。因此答案为 A。



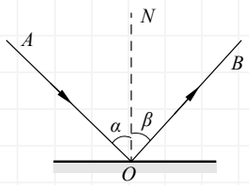
【陈老师点评】

日全食和日环食的并存，核心原因是太阳、月球的半径之比与日地、月地的距离之比差不多，这就导致地球上看到的太阳和月球好像差不多大。此外月球绕地球运行的轨道是椭圆形轨道，同时地球绕太阳运行的轨道也是椭圆形轨道，导致月球与地球的距离、太阳与地球的距离存在周期性变化，有的时候月亮看起来更大，就可能出现日全食，有的时候太阳看起来更大，就可能出现日环食。

而在月球上看，地球是远远大于太阳的，地球的实际直径约是月球的 3.7 倍，而地、月距离近似是固定的，因此地球的视直径会远大于太阳的视直径——从月球上看，地球的视直径大约是太阳的视直径的 3.7 倍。地球投射在月球轨道上的本影区尺寸远大于月球本身，无法只遮挡月球中心区域，因此不可能出现月环食。

2. 光的反射

光入射到两种介质的分界面上时，部分光线返回到原来介质中继续传播的现象叫作光的反射。反射分为镜面反射和漫反射。每一条反射光线都遵循光的反射定律。



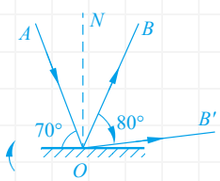
在反射现象中，反射光线和入射光线、法线在同一平面内，反射光线和入射光线分别位于法线两侧，反射角等于入射角，如图所示。

在反射现象中，光路是可逆的。

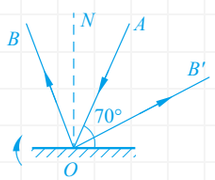
【例3-3】入射光线与平面镜的夹角为70°，若入射光线方向不变，将平面镜绕入射点沿入射光线与法线构成的平面顺时针旋转 40° 后，入射光线与反射光线的夹角为（　　）

A. 40°　　B. 80°　　C. 120°　　D. 160°

【提示】本题有两种情况，先分别画出示意图，如图甲和乙所示。在图甲中，平面镜顺时针转过 40° 后，反射光线 OB 旋转 80° 至 OB' 的位置，由几何关系知此时入射光线与反射光线的夹角为 120°；在图乙中，平面镜顺时针旋转 40° 后，反射光线 OB 旋转 80° 至 OB' 的位置，同样根据角度间关系知此时入射光线与反射光线的夹角为 40°。本题正确选项为 AC。



甲

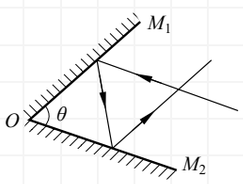


乙

【陈老师点评】

平面镜可以使光线发生镜面反射，我们可以用平面镜来控制和改变光路。当入射光线方向不变时，平面镜旋转角度 θ，反射光线将旋转角度 2θ。

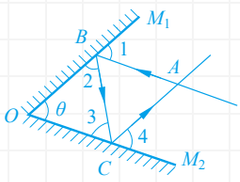
【例3-4】如图所示，两平面镜 OM_1、OM_2 之间的夹角为 θ，入射光线与平面镜 OM_2 平行，经两个镜面两次反射后，出射光线与 OM_1 平行，那么 θ 应为（　　）



A. 30°　　B. 45°

C. 60°　　D. 75°

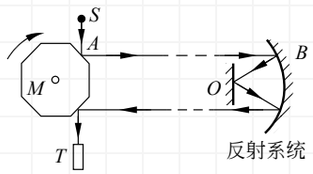
【提示】如图所示，入射光线平行于 OM_2，则 $\angle 1=\theta$，反射光线平行于 OM_1，则 $\angle 4=\theta$。根据反射定律，反射角等于入射角，则反射光线与镜面的夹角也等于入射光线与镜面的夹角，即 $\angle 1=\angle 2$，$\angle 3=\angle 4$，所以 $\triangle ABC$ 为等边三角形，$\theta=60°$。本题正确选项为 C。



【陈老师点评】

两块平面镜相交成固定夹角，构成角形反射结构，称为角镜（二维）。光线入射后，可以在两平面镜间发生两次甚至多次反射。两块互相垂直的平面镜是同学们熟知的一种角镜，当一条光线射入两个互相垂直的平面镜时，其反射光线与入射光线平行。

【例3-5】通过转动八面镜可以测光速，实验装置示意图如图所示。S 为发光点，T 为望远镜，平面镜 O 与凹面镜 B 构成了反射系统。八面镜 M 与反射系统的距离 AB 为 L（L 可长达几十千米，且远大于 OB 和 S、T 到八面镜的距离）。调整八面镜的位置直到通过望远镜能看到发光点 S，然后使八面镜转动起来，并缓慢增大其转速（1 秒内转过的圈数），当转速达到 n_0 时，恰能在望远镜中再一次看见发光点 S，求光速 c 的表达式。



【提示】光从 S 出发，经过一系列反射到达望远镜 T，总路程为 $2L$。从题图所示位置开始，到能在望远镜中再次看到发光点 S，八面镜转过了八分之一圈，用时 $t=\frac{1}{8n_0}$。因此光速 $c=\frac{2L}{t}=16Ln_0$。

【陈老师点评】

光速极快，伽利略曾尝试用“灯光信号往返”的方法测量光速，因地面距离过短、计时精度不足而失败。19 世纪中期，法国物理学家菲佐、傅科先后用旋转齿轮法、旋转平面镜法测量光速，傅科还通过实验证明了“光在水中的传播速度小于空气中的速度”，反驳了光的微粒说。但这类实验的测量距离有限（通常为几十米到几百米），误差难以进一步减小。

为突破距离限制，迈克耳孙提出延长光的传播路径的方案：将实验场地设置在相距几十千米的两座山峰之间，用八面镜替代傅科实验中的单平面镜，利用八面镜的高速转动实现对光传播时间的精准“捕捉”。八面镜的优势在于转动较小角度就能让反射光进入望远镜，大幅提升了实验的稳定性和测量精度。在 1879 年首次用该方法测得光速约为 299910 km/s，后续又多次改进实验，将误差缩小到 1 km/s 以内，接近现代光速的精确值（299792.458 km/s）。

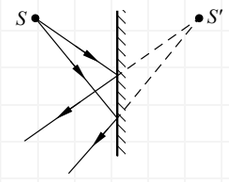
3. 平面镜成像

（1）平面镜的成像特点

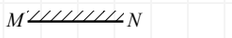
平面镜成正立的虚像，像与物大小相等，像与物到镜面的距离相等且像与物的连线与镜面

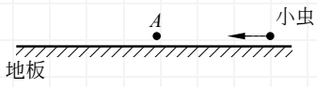
垂直，即像与物关于镜面对称。

物体发出的光线经过平面镜反射后，反射光线的反向延长线在镜后会聚为虚像，如图所示。当我们在镜前时，经过平面镜反射进入人眼的光线看起来好像是从镜后的虚像 S' 发出的。

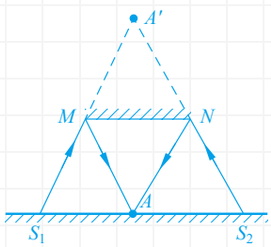


【例3-6】如图所示，某人躺在地板上，眼的位置在 A 处。一只小虫在地板上从右向左爬，从天花板上的平面镜 MN 看到小虫的像，问小虫爬到何处时，人在平面镜中就看不到小虫了。请画图说明。





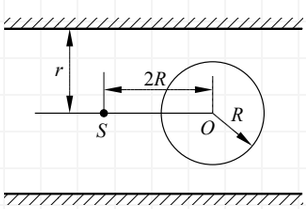
【提示】假设人眼为一光源，它的像为 A'。人眼“发出”的光照射到平面镜上后，反射的光照在地板上的区域为 S_1S_2，注意画光路图时要按光实际传播的方向在光线上加箭头。如图所示，S_1S_2 区域发出的光经平面镜反射后可到达 A 点，即 A 处的眼睛可通过平面镜看到 S_1S_2 区域中小虫的像，当小虫爬到 S_1S_2 区域以外时，就不能通过平面镜看到它的像了。



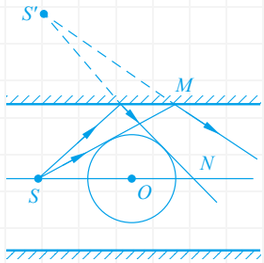
【陈老师点评】

观察者不动，要确定通过平面镜能看到的物体范围，常应用光路可逆原理分析，把眼睛看作点光源，眼睛发出的光照亮的区域即为能看到的范围。

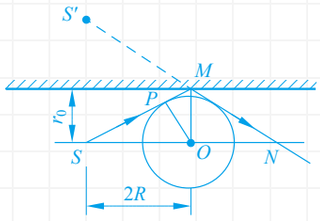
【例3-7】内表面只反射而不吸收光的圆筒内有一半径为 R 的黑球，距球心 $2R$ 处有一点光源 S，球心 O 和光源 S 皆在圆筒轴线上，如图所示。若使点光源向右半边发出的光最后全被黑球吸收，则筒的内半径 r 最大为多少。



【提示】当光源 S 发出的光线经圆筒内表面反射后，反射光线全部被黑球接收，则点光源向右半边发出的光最后全被黑球吸收。从光源 S 作球的切线 SM，并画出 S 经筒壁反射形成的虚像点 S'，从 S' 画出球面的切线 $S'N$，如图甲所示。可以看出，只要 $S'M$ 和 $S'N$ 之间有一夹角，则从筒壁上反射的光线就有一部分进入球的右方，不会完全落在球上被吸收。如果筒的半径恰好减小到能使 $S'M$ 和 $S'N$ 重合，如图乙所示，则对应的筒的半径 r_0 就是题目所要求的内半径的最大值。设光线 SM 与球相切于 P 点，则由三角形面积公式可知 $SO\cdot OM=SM\cdot OP$，即 $2R\cdot r_0=\sqrt{(2R)^2+r_0^2}\cdot R$，解得 $r_0=\dfrac{2\sqrt{3}R}{3}$。



甲



乙

【陈老师点评】

本题的突破口是反射成像等效和几何相切临界分析。

把圆筒内壁的反射光线等效为光源虚像点 S' 的直线光线，将反射问题转化为光的直线传播问题，简化分析。

确定临界条件：反射光全部被黑球吸收的最大半径对应的反射光线与黑球表面相切，此时增大半径，部分光线会越过黑球。虚像、球心、切点构成直角三角形，利用几何关系建立 R 与 d、r 的关系式，求解最大值。

（2）平面镜与物体间有相对运动

由平面镜成像特点——像与物关于镜面对称，可得以下结论：

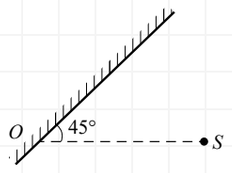
① 若平面镜不动，物体沿垂直于镜面的方向以速度 v 向镜面运动，则像以速度 v 向镜面运动（对镜的速度），像相对于物体以速度 $2v$ 运动；

② 若物体不动，镜沿垂直于镜面的方向以速度 v 向物体运动，则像相对镜以速度 v 向镜面运动，像相对物体以速度 $2v$ 运动。

【例3-8】如图所示，点光源 S 放在平面镜前，试问：

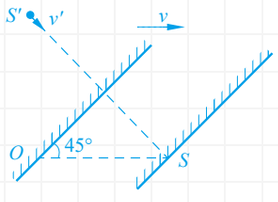
（1）若 S 不动，镜以速度 v 沿 OS 方向向右平移，S 的像将如何运动？

（2）若 S 不动，镜以 O 为圆心，沿顺时针方向转过角度 θ，且转动角小于 45°，S 的像将绕 O 点转过的角度为多少。

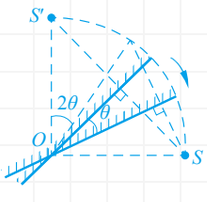


【提示】（1）如图甲所示，镜面向右平移，设在 t 时间内由 O 点移到 S 点，同时像、物重合，即 t 时间内 O 点的位移为 vt，而 S' 的位移为 $SS'=2vt\sin45°=\sqrt{2}vt$，$v'=\sqrt{2}v$，故 S' 以速度 $\sqrt{2}v$ 沿 S' 和 S 的连线向 S 运动。

（2）设镜绕 O 点顺时针转过角度 θ（$\theta<45°$），则 SO 与平面镜的夹角变为 $45°-\theta$，如图乙所示，根据像与物的对称性可知，$S'O$ 与镜面的夹角也变为 $45°-\theta$，所以



甲



乙

像 S' 绕 O 点顺时针转过角度 2θ。

【陈老师点评】

这道平面镜动态成像题的突破口在于紧扣物、像关于镜面对称的核心规律，可分两种情况分析：

镜面平移：抓住物、像间距始终为物距的 2 倍，镜面移动速度决定物距变化速度，进而推出像的运动速度是镜面速度的 2 倍，方向沿物、像连线指向物；

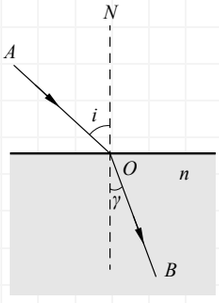
镜面转动：物、像连线与镜面垂直，镜面转过角度 θ 会使物、像连线方向改变角度 2θ，因此像的转动角度为镜面转动角度的 2 倍。

4. 光的折射 *

（1）折射定律

光由一种介质斜射入另一种介质中时，光的传播方向发生偏折的现象叫作光的折射。光的折射遵循折射定律，它由荷兰物理学家斯涅耳发现。

如图所示，在光的折射现象中，折射光线、入射光线和法线在同一平面内；折射光线和入射光线分居法线两侧；当光从真空斜射入其他介质中时，入射角 i 与折射角 γ 满足 $\frac{\sin i}{\sin \gamma}=n$，式中 n 叫作介质的折射率。一般说来，介质的折射率只与介质种类有关。如表所示是几种介质对光的折射率。



介质	折射率
真空	1.0000
空气	1.0003
水	1.3300
玻璃	1.4000～1.9000
酒精	1.3600
冰	1.3090

折射率反映了介质对光折射能力的强弱，折射率越大，介质对光的折射能力越强。同一介质对各种色光的折射率并不相同，红光的折射率最小，紫光的折射率最大，这也是白光通过三棱镜后能发生色散的原因。表格实际上给出的是各种介质对黄光的折射率。由于空气的折射率非常接近于真空，空气的折射率也往往被认为等于 1。

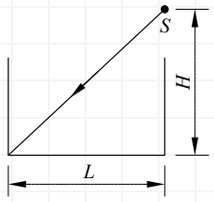
【例 3-9】如图所示，水池的宽度为 L，在水池右侧距离池底高度为 H 处有一激光束，水池内无水时恰好在水池的左下角产生一个光斑。已知 $L=H$，现向水池内注水，水面匀速上升，则光斑（　　）

A. 匀速向右移动，且移动速度小于水面上升的速度

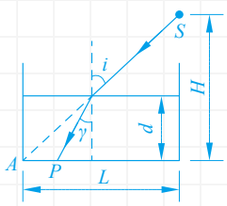
B. 匀速向右移动，且移动速度大于水面上升的速度

C. 减速向右移动，但速度始终大于水面上升的速度

D. 加速向右移动，但速度始终小于水面上升的速度



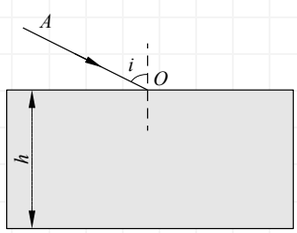
【提示】如图所示，设经过时间 t，水面匀速上升的高度为 d，则水面上升的速度为 $v_1=\dfrac{d}{t}$，此时光斑由 A 点移动到 P 点。设入射角为 i，折射角为 γ，则由几何关系可知 AP 长度为 $l=d(\tan i-\tan\gamma)$，因为图中 $L=H$，所以 $i=45°$，因此 $l=d(1-\tan\gamma)<d$，则光斑的速度 $v_2=\dfrac{l}{t}<v_1$，且 v_2 大小不变，本题正确选项为 A 项。



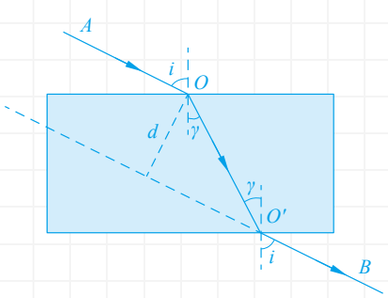
【陈老师点评】

学过锐角三角函数后就可以定量讨论光的折射问题了。解答本题如果不用三角函数知识，只通过画图观察比例，同样可以得出结论，大家可以试试看。

【例3-10】如图所示，一块上下表面平行的玻璃砖，折射率 $n=\sqrt{3}$，厚度为 h。某单色光以入射角 $i=60°$ 从上表面的 O 点射入玻璃砖，试画出光线穿过玻璃砖的光路图，并计算光线穿出玻璃砖时的偏移量。



【提示】由折射定律知，在 O 点折射时，折射角 γ 满足 $\sin\gamma=\dfrac{\sin i}{n}$，$\gamma=30°$。设光线从下表面的 O' 点穿出，则第二次折射的入射角为 30°，对应的折射角为 60°，可知光线 AO 与 $O'B$ 平行。光路图如图所示。将光线 $O'B$ 反向延长，设侧移量为 d，则由图中几何关系可知 $d=OO'\sin(i-\gamma)$，而 $OO'=\dfrac{h}{\cos\gamma}$，即 $d=\dfrac{h\sin(i-\gamma)}{\cos\gamma}$，代入数据得 $d=\dfrac{\sqrt{3}}{3}h$。



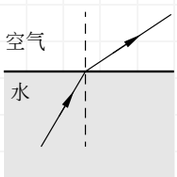
【陈老师点评】

根据对称性可知，光线通过平行玻璃砖时，出射光线与入射光线平行。其侧移量与入射角以及玻璃砖折射率有关，入射角越大，折射率越大，则侧移量越大。

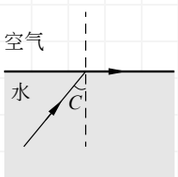
（2）光的全反射

当光由水或其他介质斜射向空气时，在分界面上，有一部分光线会发生反射而返回原介质，另一部分光线发生折射，折射角大于入射角，从而使折射光线远离法线。当入射角增大时，折射角随之增大，同时折射光强度减弱，反射光强度增强。当入射角增大到某一值 C（小于 90°）时，折射角达到 90°，折射光线与界面重合。若入射角继续增大，折射光线消失，只剩反射光线，这种现象叫作光的全反射。整个过程如图甲、乙、丙所示。我们把折射角恰好等于 90° 时对应的入射角称为临界角。当光从水、玻璃等介质射向和空气的分界面时，只要入射角大于临界角，光就会全部反射回原介质中。根据折射定律，可以求得介质的临界角 C，$\dfrac{\sin 90°}{\sin C}=n$，由 $\sin 90°=1$ 得 $\sin C=\dfrac{1}{n}$。

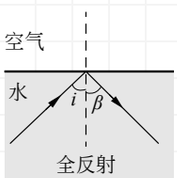
全反射现象在生活和科技中被广泛应用，图丁中的全反射棱镜被广泛应用于望远镜和潜望镜中。图戊是光导纤维中光的全反射现象。光导纤维是极细的玻璃丝，外表涂有一层特殊材料的涂层，光在分界面上发生全反射。光导纤维制成的光缆以光速传输信号，传输质量和信息量均远优于金属电缆。



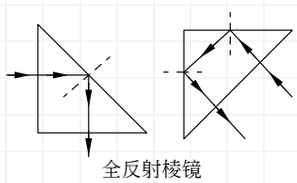
甲



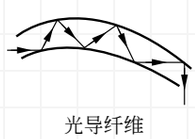
乙



丙

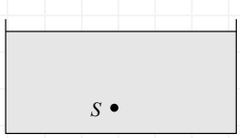


丁



戊

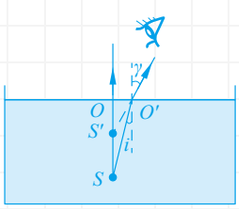
【例3-11】如图所示，水面下距水面 h 处有一盏灯 S（可视为点光源），人在岸上看水中的灯。



（1）人在光源 S 接近正上方的水面上观察光源 S，感觉到 S 深度为多少？（已知 $\theta\to 0$ 时，$\sin\theta\approx\tan\theta$）

（2）人发现该灯只能照亮水面上的一个圆形区域，已知水的折射率为 n，求水面被点光源照亮的圆形区域的面积。

【提示】（1）人的眼睛位于光源 S 上方的水面处，如图甲所示。从光源 S 发出的光线经水面折射，折射光线的反向延长线相交而成虚像。现在探究从 S 发出的两条光线，其中光线 SO 垂直于水面，O 点在水平面上，光线 SO' 的入射角 i 约等于零，对应的折射角为 γ，折射光线的反向延长线与 SO 交于像点 S'，则由几何关系知 $OO'=h\tan i$，像深度 h' 满足 $OO'=h'\tan\gamma$，由折射定律 $\dfrac{\sin\gamma}{\sin i}=n$，结合 $\theta\to 0$ 时，$\sin\theta\approx\tan\theta$，有 $h'=\dfrac{\tan i}{\tan\gamma}h=\dfrac{\sin i}{\sin\gamma}h=\dfrac{h}{n}$。可见像的位



甲