

# 电子图书



信息技术的结晶

人类文明的载体

网络的基本资源

波粒二象现光明 光学的故事

## 古代光学知识

远在三千年前的殷周时期，我国就磨制出凹面镜与平面镜。人们将凹面镜称为阳燧，用它会聚太阳光取火；用平面镜照人照物，以观其相。在《考工记》中，还曾记载当时人们通过观察火焰颜色判断铜的冶炼进程等等。

春秋战国时期，在诸子百家争鸣中，光学得到了较快的发展。墨翟及其弟子们的著作《墨经》中，记载了大量的光学知识。书中写道：“光之照人若射。下者之人也高，高者之人也下。足蔽下光，故成景于上，首蔽上光，故成景于下。”就是说，光照在人身上如同射来的箭一样，是沿直线进行的；光通过小孔将人成像，人的上部成像在下，人的下部成像在上，其结果将人成倒立实像。

《墨经》中还有关于影的记述：“景不徙，说在改为”；“光至景亡；若在，尽古息。”就是说，在某时刻，运动物体的影子是静止的，若人们观察到影子的移动，则是由于物体运动导致的；光若照到了，影子就没有了；观察到的影子的移动，是旧影不断消失，新影不断产生造成的。书中还说：“景二，说在重”；“二光，夹；一光，一。光者，景也。”就是说，一个物体有两个影子，是由于该物体受到了双重光源照射所致。当两个光源照射一个物体时，会有两个半影夹持一个本影；当一个光源照到一个物体时，该物体的影子只有一个；影子的形成是由于光被物体挡住，被挡之处即为物体的影区。

关于凹面镜成像，《墨经》中写道：“鉴洼，景，一小而易，一大而正，说在中之外内”。指明了实物在球心之外时，其像为倒立缩小（实）像，实物在球心之内时，能得正立放大（虚）像。前者是正确的。后者是不严格的，因为实物只有在焦点之内时，凹面镜才能将它成正立放大（虚）像，位置划分在焦点而不在球心。关于凸面镜，书中写道：“鉴团，景一”；“景过正，估短”。说明了凸面镜成像规律，即实物体无论在何处，像只有一个，其位置在镜面之后，且像较原物体为小。这与我们现在所说的凸面镜将实物永远成正立缩小虚像，且物像分居镜面两侧的结论完全一致。关于平面镜，书中说：“临鉴而立，景倒”；“正鉴，景寡。……鉴、景、当俱就；去亦当俱，俱用背”。具体指明了，人站在镜面上，其像为倒立；平面镜，对一个物体只能成一个像；当人靠近平面镜时，其像随之靠近；人离开平面镜时，其像也随之离开。这些结论都是正确的。

自春秋战国之后，我国的光学发展成就集大成于北宋时期，大科学家沈括的《梦溪笔谈》之中，书中进一步肯定了月光是由于太阳照射而生，坚持了“月本无光”，“日耀之乃光耳”的科学见解；沈括使“一弹丸，以粉涂其半，侧视之，则粉处如钩；对视之，则正圆。”他通过实验演示了月亮的盈亏现象。书中还写道：“古人铸鉴，鉴大则平；鉴小则凸。凡鉴洼则照人面大，凸则照人面小。小则不能全观人面，故令微凸，收入面令小，则鉴虽小而能纳人面。”这里着重指出了凸面镜有扩大视场的作用。沈括在该书中还指明：“阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。”这里的“此”，即是我们现在所说的焦点，沈括当时称之为“碍”。这段话的含义是，（实）物在焦点之内时，成正立（放大虚）像，逐渐增大物距，当（实）物恰好位于焦点时，人眼无所见；（实）物位于焦点之外时，则得倒立的实像。

沈括的《梦溪笔谈》中所记载的光学实验，面镜成像规律及光学理论都较《墨经》前进了一大步，这是中华民族在发展光学科学中的光辉篇章。沈括在光学方面的贡献，足以使他跻身于当时的世界科学家之列。

公元前 4 世纪，古希腊的科学家欧几里德著有《反射光学》一书，书中明确地提出了光的直进性，比较深入地探讨了光的反射现象，并用几何学方法表达了光的反射定律。该书还论述了凹面镜焦点的概念，欧几里德是世界上最早提出光的反射定律的人。

希腊人精心地推敲过视觉产生的理论。毕达哥拉斯、德谟克利特等人认为，视觉是由所见的物体发射出的微粒进入人眼的瞳孔所引起的。显然，这种观点是唯物主义的。然而，恩培多克勒、柏拉图主义者，以及欧几里德却主张奇怪的眼睛发射说，这个学说认为，眼睛发出某种类似触须的东西，一旦这些东西碰到物体，物体就被眼睛看见。这个观点不是把眼睛看成“照相机”，而是看成“雷达”，显然，它是错误的。

古罗马帝国早期，著名科学家克罗狄乌斯·托勒密继承并总结了古希腊的光学知识成果，经过自己的研究和实验，于公元 139 年写下了《光学》一书，书中写道：“可见光可以有两种方式改变路径：一是被反射，即被物体反弹回来，这种物体称为镜子，光线不能穿透；一是在介质中被弯曲（即折射），这时光线能穿透介质，这种介质有一个共同的名称——透明物质，由此可见光能够穿透它们。”

总之，人们在古代研究了光的直进性、光的反射与折射，制造了凹面镜、平面镜等光学元件，为光学的进一步发展奠定了初步的理论和实验基础。这是经典光学的萌芽时期。

## 形形色色的光源

清晨，一轮红日从东方升起，向大地洒下万道金光，新的一天开始了。太阳这颗巨大而灼热的火球是太阳系里热和光的最主要来源。太阳的表面温度高达 5700℃，中心温度要达到 1500 万℃。每天它以光和热的形式向外发出  $3.8 \times 10^{30}$  卡热量。除太阳之外，金属和碳在高温下也会发光。800℃ 的时候它们就会发出暗红色的光；温度再升高，光变黄色；温度超过 3000℃ 时它们就处在“白炽化”状态。我们见到的白炽灯就是利用了这个道理。白炽灯才发明了 100 多年。在此以前火是人造光源的唯一形式。人类在旧石器时代的中、晚期就知道用打击石头的方法来取火，后来又发明了摩擦、钻木等取火方法。据《周礼》记载我们的祖先外出狩猎或打仗，总要“左佩金燧……右佩木燧”，金燧是一个像酒盅模样的凹面镜，对日聚光可以点燃火绒。而木燧就是钻木取火的工具。可见古代人对保存火种是很重视的。为了能取得明亮而持久的光源，我国古代有“神农作油，轩辕作灯，唐尧作檠，成汤作蜡烛”的传说。虽然不可靠，但燃烧某些含碳氢或烃类物较多的油类或木材来作光源是有书为证，有物为据的。《周礼》一书中介绍古代火炬是“以苇为中心，以布缠之，饴蜜灌之，若今蜡烛。”《三秦记》曰：“秦始皇墓中燃烧鲸鱼膏为灯。”现已出土的秦汉时期的古灯具也大多是直接燃烧液态油类为光源。汉代巧匠丁缓发明了一种常满灯，会自己添油使灯火不熄。早年出土的西汉“长信宫灯”，它造型生动，设计精巧，不仅灯座、盘罩都能拆卸还可以通过合开灯罩来调节光的照度，油燃烧时产生的烟雾则通过宫女的空心右臂作为烟道，暂存在体腔内以保持房间里的空气清洁，是件融科学与艺术于一体的无价之宝。

世界上除热光源之外，还有一类温度不高但也能发光的物体，称作“冷光源”。萤火虫就是一种冷光源。夜间我们可以在野外看到它们，尾部一闪一闪地发光，十分有趣。雄虫 5、6 秒闪一次、雌虫 2、3 秒闪一次，这是它们在说悄悄话呢，雌虫选中了对象发出白绿色的光，两虫相遇后便熄灯安息。科学家说萤火虫的腹部长有发光器，它在呼吸的时候，发光器上的荧光酶受到催化与氧化合而闪闪发光。美丽的荧光人见人爱，墨西哥的妇女用薄纱装着萤火虫插在头发上，显得珠光宝气。西印度群岛上的小孩把装着萤火虫的透明匣子缚在脚上，走起来不愁脚下看不清路。印度有一种点灯鸟，鸟巢壁厚而粘，光线暗淡，点灯鸟便抓了许多虫来装饰内壁。据《北史》上说风流的隋炀帝对萤火虫也情有独钟，夜里游览时，将捉在袋子里的萤火虫一起放掉，鎏光溢彩、辉遍岩谷。“囊萤夜读”更是个脍炙人口的故事，说的是东晋时代有个叫车胤的少年，家里很穷没钱点灯，夜里没有办法读书，车胤使用薄布缝制了几个小口袋，扑取了许多萤火虫装进去，挂在案头，囊萤夜读。后来车胤成为一个有学问的人，他的故事也成为千古传颂的美谈。无独有偶，古代目不识丁的渔民也像车胤那样抓萤火虫来做光源，他们是把萤火虫装进洗干净的猪膀胱里，原来猪膀胱柔薄如纸，吹了气里面装了许多萤火虫再把口扎紧就像是一盏小灯笼。渔民把这样的小灯笼挂在水下的网口上，由于鱼都有趋光的习性，见到光亮便争相游来，鱼贯地钻入网中。

水中有不少生物也都有发光的本领。众所周知乌贼鱼每当遭遇敌害时会放出一团墨汁，来蒙蔽敌害的视线。殊不知它还有一手，在四周漆黑的深海里放墨汁是无济于事的。这时乌贼会从墨囊里喷出另一种液体，这种液体

喷出后会形成一团发光的“火球”，把来敌吓得一大跳，它便趁机逃之夭夭。乌贼的这种“发光弹”温度不高，也是一种冷光源。深水里还有一种会发光的生物叫光脸鲷，在它的器官中生存着 100 亿个会发光的细菌，这些细菌消耗鱼的血液和氧气，同时把化学能转变成光能，光的强度能使离它 2 米的潜水员看清楚手表上的数字。故潜水员常常抓了它放进透明的塑料袋里当做手电筒来用哩！据生物学家统计，已知的会发光的生物计有 13 门 28 纲，除了上述动物和细菌，还有种类繁多的微生物，它们既有能独立生活的，也有以寄生、共生或腐生方式生长在其他生物体上，使本来不会发光的生物也变为能发光的。科学家在实验室里将发光菌注入蛙的脊淋巴囊中，蛙体也大放光明，3~4 天后才逐渐消失。近年来美国科学家正在研究把发光基因移植到植物体内，培育发光植物，并栽在高速公路的两旁来做标记呢！

此外，有些矿石或岩石也会自行发光。古代的印度人发现山上的一些岩石在暗里发出蓝色的微光，引来了蛇寻食，就称它蛇眼石。事实上是这些岩石里含有硫化砷和碳氢化合物等物质，白天经过阳光的曝晒发生激化，夜里发出美丽的磷光。我国古代对冷光源也早有认识。汉代的人就知道柁木树的皮，浸在水里，水会发出青色的荧光。柁树皮是一种药，叫秦皮。可以治痢疾，内含秦皮甲素和秦皮乙素等荧光物质，至今人们还利用它的这种特性来鉴别秦皮的真假！在国外，则要到 1575 年才有人注意到愈疮木切片的水溶液会有蓝色的光，迟至 1852 年斯托克斯才明确提出“荧光”一词。

磷光是另一种常见的冷光源，它是在人和动物的尸体腐烂后，体内的磷化物分解还原成液体磷化氢，遇到氧气便自然发光。我国古代争战连年不断，生灵涂炭“白骨露于野，千里无鸡鸣。”所以磷光现象在古书中多有记载，说它“遥望炯炯若燃也。”“着人体便有光，拂拭便分散无数愈甚。有细咤声如炒豆，唯静住良久乃灭。”宋代《湘山野录》还记了这样的事：有人给皇上献了幅画，画面上是头牛，但白天观画和夜晚观画所见迥异：“白天啮草栏外，夜则归卧栏中”。皇上以示群臣，众臣啧啧称奇，但说不出其中的原委。此时，僧人赞宁奏曰：南方海滩上可觅拾到内藏了珍珠的大蛤，蛤壳里有“余泪数滴者，得之和色染物，则昼隐而夜显。”原来是画家用普通的颜料画了栏外的牛，再用含荧光物质的颜料画栏内的牛，所以显示出这种奇特的效果。又如南宋周辉在《清波杂志》也记载了一个类似的故事：画家元晖精于临摹。一次他从某人处借来一幅画，元晖临了一幅还给藏主，把原件留了下来。几天后，藏主来讨还真迹。说原画牛的眼睛中有一个牧童的影子，还件却没有此影，可见是件赝品。看来这牛眼中的牧童影也是利用掺有荧光物质的颜料画成的，一到暗处就会显示出来了。这种画古代称为“术画”。一般都私相传授，鲜为人知。英国人约翰·坎顿在 1768 年发明用煨牡蛎壳和琉璜粉的混合物来做作画颜料，但比我国要迟了近 1500 年！

## 光沿直线传播的证明

### 针孔成像

在沈括所著《梦溪笔谈》卷三里有这样一段话：“若鸢飞空中，其影随鸢而移，或中间为窗隙所束，则影遂与鸢相违，鸢东则影西。又如窗隙中楼塔之影，中间为窗所束，亦皆倒垂，与阳燧一也。”

意思是鸟在天空飞，它在阳光下的投影是随着它本身一起移动的。但是它通过窗隙（即针孔）在室内墙壁上映出的影（或幕上映出的像）却在作与它本身反方向的运动：鸟向东飞，它的像西移。鸟向西飞，它的像东移。再如，室外的楼房和宝塔通过窗隙在室的内墙（幕）上形成的影（像）都是倒立的。这一切都是因为光线受到针孔的障碍和约束的缘故。与凹面镜成像的原理是一样的。

在这段论述中沈括不但把运动体（鸢）通过针孔所成的像与运动方向相反与静物（楼、塔）通过针孔所成的像是倒立的联系起来，看出了这两种现象在本质上是相同的，还再次把针孔成像跟凹面镜成像联系起来，指出了这两者属于同一类的成像。沈括在同一段文章里还形象地把针孔的作用比作船上的橹的支柱——橹担。摇橹行船的时候，橹在橹担内外的部分是作反向运动的。与此相似，鸟在天空飞，从它身上各点射进窗隙的光束，在窗内外的部分移动方向也是相反的。从这段精彩的论述中可知沈括对针孔成像有深刻的理解。在光学研究史上，他的这段话犹如千古绝唱令后人赞叹不已。此外，沈括还对凹面镜的成像原理，透光镜的机理和虹的成因都有认真的研究，并取得辉煌的成果。在沈括之后 200 多年，我国又出了一位光学大师，他叫赵友钦。他对针孔成像的研究达到了当时世界的最高水平。

在浙江省衢县境内，有座鸡鸣山。山高 400 米，周长约 8 千米。群峰盘回，只有一条山径可以通入，山径的两边顶上有巨石绵亘，欲坠复倚，下有清泉浅流潺潺而出。宋末元初的时候，山里有人筑建了几间草屋，旁边又垒起一个土墩。每天夜晚可以看到住在草屋里的那位道长站在土墩上观察天象。此人面貌清瘦、神态不俗，他就是赵友钦。赵友钦名敬、又名子恭、缘督，山里人都叫他缘督子。他原来是宋朝宗室，汉王第十二世子孙，籍贯在江西鄱阳。宋朝灭亡之后，为了避祸他循入道家。现隐居在此，以研究学问、著书立说来消磨时光。赵友钦每天都起得很早，起身后他总要先跑到屋前的一座山峰上做一番吐故纳新的气功，然后再沿着小路走回来。回家的时候，太阳早已升起，阳光透过茂密的树叶在一些断垣石壁上留下一个个圆形的光斑。赵友钦奇怪：树叶的间隙，有圆形、方形、三角形、多边形，为什么石壁上留下的光斑却都是圆形的呢？有一天赵友钦在回家途中看到了一个奇迹：石壁上的光斑全部都变成了一个小小的月牙形。他马上想起今天恰好是日食，太阳被月亮遮去了一部分，呈月牙形。原来石壁上的光斑只与光源的形状有关，与透光孔的形状无关。光斑是太阳的像！经历了这次日蚀，赵友钦欣喜不已，决心要用实验把这个问题弄个水落石出。他经过深思熟虑，设计出一套实验方案来。赵友钦先让仆人找工匠在一片空旷地上造起一间木屋。这是一座二层楼的木房，在楼下相邻的两间屋子里各挖了一口圆形的旱井，井的直径都是 4 尺，深度分别是 8 尺和 4 尺，井口都放着直径 5 尺的盖板，作为针孔成像的暗室。他在左右两口井的盖板上分别挖去了边长为 1 寸

和 1.5 寸的正方形，作为小孔。再在左井里放一张 4 尺高的圆桌，使桌面与右井底相平。然后他在左井圆桌上和右井底上各放一块直径 4 尺的圆板，圆板上都插着 1000 支蜡烛，来模拟日月。当他把盖板盖上时，投在左右两室楼板上的像都是圆形的，并不是方形的，而且大小相同，只不过由于右井盖板上的孔大一些，射出来的光较多形成了较亮的像。接着他又模拟日月蚀的时候，日月在通过针孔成的像的形状会随着变化：熄灭右井圆板上东半边的 500 支蜡烛，楼板上映出的像就缺了西半边。这样就证明了，物体通过针孔成的像，它的形状与小孔的形状无关，只取决于原物的形状，并且是上下左右颠倒的。然后，他又在左右两室楼板下各悬挂一块活动的木板，重复上述实验，发现投在活动木板下的像比投在楼板下的像小而亮。撤去左井里的圆桌，把插着蜡烛的圆板直接放在井底，像也变小。这样他又得出了物体离针孔越远或屏幕离针孔越近，屏幕上的像就越小。后来，他还用实验证实了，当针孔的尺寸放大到一定的程度时，针孔成像的光学现象就会随之消失。

赵友钦在他的著作《革象新书》的“小罅光景”中得出如下的结论：“是故小景随光之形，大景随空之像，断无可疑者。”也就是说，小孔成像时生成的像与光源的形状相同，在大孔的情况下所成的像（光斑）与大孔的形状相似，这个结论无可怀疑。赵友钦的实验构思巧妙，规模宏大，在当时世界上实属首创，因此有人称赞他是 13 世纪卓越的实验物理学家。

## 影子的用途

巍峨矗立在开罗基泽的金字塔是古埃及法老的墓，也是埃及劳动人民的智慧结晶。相传在 2000 多年前，埃及中王朝时期有位国王想要知道金字塔究竟有多高？国王的旨意很快被晓喻全国。有人提议派人爬上塔顶，丈量出棱边的长度，……但是不知道棱边与地面的倾角，仍然算不出它的高度。总之，几个月过去了，谁也没有想出办法来。一天，有位名叫法列士的学者要求见国王，宣称他可以在某一天测量出金字塔的高度，国王闻言大喜。到了约定的那日，国王和祭司在大臣们的拥簇下来到金字塔前，举行了测塔高仪式。只见法列士手里拿着一根长杆，以木杆的一端为圆心，木杆长度为半径在地上画出一个大圆，然后把木竿竖立在圆心。

太阳升起后木杆在地上留下一条长影。时间渐渐地过去，太阳也越爬越高，木杆的影子也一点一点地缩短。站立在四周的众大臣被阳光晒得汗流满面，真有点不耐烦，他们望着法列士，见他仍然默不作声也猜不出他葫芦里卖的是什么药。又过了一会，当木杆的影端恰好落在圆周上时，法列士立即高举双手示意站在金字塔旁的两位助手用尺丈量金字塔尖顶的投影点到金字塔侧面底边的距离。助手用手势报告这个距离是 31.6 米。法列士便大声宣布：金字塔的高度是 146.6 米。他见国王与众大臣疑惑不解的神色便解释说：“当木杆在地面上的投影与木杆的长度恰好相等的时候，阳光正以与地面成  $45^\circ$  的角度射向地面，这时候金字塔顶点、塔底中心点和阴影的端点恰好组成一个等腰三角形。事先我已测出金字塔底部边长的一半是 115 米，再加上投影的长度就算出了金字塔的高度了。”众人听了恍然大悟，赞叹不已。这个故事的真假现在已无从查考，但古人用“立竿测影”的办法确也解决了许多问题，我国古代很早就出现特制的测量日影的仪器——圭表和日晷。

考古学家发现早在新石器时代的墓葬群里，尸体的头部都朝着一定的方

向：如陕西半坡村朝西，山东大汶口朝东，河南青莲岗各期朝东，或东偏北，东偏南。这显然与日月的升落有关，但我们尚无法知道他们是如何来确定这些方向的。根据甲骨文字分析，我国在殷商时代已经学会根据太阳的影子来判断方向和估算时间了。专家们曾对甲骨文中“立中”的卜辞做了系统的分析，认为殷人在每年4月或8月的某些特定日子里要进行“立中”的仪式来“求方位、知时节”。“中”在甲骨文里写成“𠄎”、“𠄏”。形象地表示把一根上面缚了几条带状物的竿子竖立在一块平面“ ”的中央。这种测影仪器后来称为圭表。“表”就是指这根竖立的竿，一般都用木、竹或石柱等常用材料制成，系了几条带子作为悬锤用来判断竿子是否竖直。“圭”的原意是一种玉器，这是表示一根固定在地面上、朝着正北方向来量度日影长度的标准尺子。古代所谓的“土圭之法”就是指利用圭表来观测中午时刻表竿在圭面上的投影。读者都知道对全年来说，夏天的太阳位置较高，而投影较短，最短的那天就是夏至日。过了那天投影逐日增长，投影最长的那天就是冬至日。此后投影再逐日减短。只要计算太阳下表竿的影长从最短的那一点（夏至日）开始再回到那同一点（第二年的夏至日）所用去的时间就知道一年有多少天了。春秋的中期，人们已经知道这段时间是365天还多一个零数。公元85年，东汉的编訢和李梵在制订历法的时候年复一年地仔细丈量日影。他们发现第二年夏至日影并没有与去年的一样长。第三年和第四年仍然如此，而要等到第五年，夏至日影才同第一年的日影等长。第一年日子，一年365天，但是这第5年却

多了1天，故4年共  $4 \times 365 + 1 = 1461$  日。这样他们用圭表证实了一年为  $365\frac{1}{4}$  日。正由于圭表有如此重要的功能，所以我国古代政府都很重视这项观测活动。相传周公姬旦在今河南登封告成镇树立圭表测量冬至和夏至的日影来定季节和年。《左传》上记载，公元654年冬至那天，鲁国的僖公带领群臣亲自登上观测台，去观看太阳照射在表上投下的影子。根据历史记载，汉代初年在该处的观测结果是“八尺之表”，夏至日影一尺五寸，冬至日影一丈三尺。我们根据一些基本的天文知识可以算出观象台所处的地理纬度。已知夏至日太阳在黄道上的最北点，位于天赤道之北的度数是黄道与赤道的交角，冬至日在最南点，位于天赤道之南同样一个度数，而天赤道同天顶之间的夹角正好就是地理纬度，这样就可以得到两个关系式：

$$\operatorname{tg}(\quad - \quad) = \frac{1.5}{8} \qquad \operatorname{tg}(\quad + \quad) = \frac{13}{8}$$

经过简单的计算可知，当日影为上述两数时，这地方的地理纬度应为北纬  $34^{\circ} 30'$ 。而河南登封县的纬度  $34^{\circ} 4'$ ，两者几乎相等，这也从侧面证实了古代的传说和记载是较为可信的。

此外，圭表还可以有多种用途。周秦时期，人们认为在同一日里，南北两地的日影长短倘若差一寸，它们之间的距离大约有一千里。据说周王室割地封侯的时候，用的就是这种办法。圭表还可以测定方向。在地上画许多个同心圆，将表竿竖立在圆心，当上下午表影顶点落在同一圆周上时，将这些对应点联接起来，它们的中点轨迹与圆心连线便是南北方向。在夜里，当视线通过表顶凝望北极时，这方向也即是南北方向。古人在搭建房舍、修造道路和营造宫殿的时候都要仔细地确定南北方向（即子午方向），诗经上说：“揆之以日，作于楚室。”揆，揣度的意思。全句可以解释为，通过观测日

影来决定营造楚国宫殿的方向。

“日出而作、日落而息”的古代人对太阳的运动是十分留意的。早晨太阳从东方升起，爬过屋顶，越过树梢，向大地投射万道光芒。阳光下，地面的树木、屋舍都留下了长长的阴影。太阳越升越高，中午时刻太阳的位置最高，影子最短，且指向正北方。太阳此后就偏向西南，越走越低，最后落没于西边地平线之下。这样日复一日，年复一年，启迪了古代聪明人发明了另一种投影计时仪器——日晷。几十年前，在内蒙古呼和浩特以南某地出土的石制日晷，是公元前2世纪西汉时期的遗物。方形的石板上刻了一个大圆圈，将圆圈100等分，其中刻有69个小圆孔（其余31个未刻），中心还有一个较大的圆孔。若在中心圆孔插一根木竿，随着太阳位置的变化，木竿投出的影子就在石板面上移动，移动过一个分点就是1刻。自古以来我国有将一天分成一百刻的习惯，而太阳在一天之内正好在天球上转一圈，所以石板上的圆圈被分成了100等分，利用这个仪器，白天的时刻便可以一目了然了。在故宫太和殿的前面的汉白玉座基上设立有日晷。斜立的石盘位于赤道面内称为赤道式日晷。石盘的两面都有刻度，圆盘上下面中心都竖立了铁针。这是因为从春分到秋分的半年里太阳在赤道之北，照不到下面的铁针，只能看上盘面的刻度，而另外半年太阳在赤道以南，照不到上面的铁针，只能看下盘面的刻度。

## 日月食的秘密

日食和月食本来是自然界的一种现象，但迷信的人说这是“天狗吃太阳”、“吃月亮”。那么秘密在哪里呢？

我们知道光是沿直线传播的，它遇到不透光的物体，就会在物体后面形成影子。假如光是点光源发出的，影子的边界就会很清楚。假如光源比较大，影子的边缘就会模糊，那完全黑暗的部分叫做本影，本影四周半明半暗的环叫做半影。

月亮绕地球运行，地球又绕太阳运行。太阳是个巨大的光源，月亮和地球都不发光。在阳光的照耀下，月亮和地球的后面都会有影子。当月亮运行到太阳和地球中间，并且正好和太阳、地球处在同一条直线上的时候，地球表面上就会出现月亮的本影和半影区，发生日食。在本影区里的人会看到月亮把太阳全部遮住，这是日全食；在半影区里的人会看到太阳缺了一部分，这是日偏食。

当月亮转到地球的背面，并且正好和太阳、地球处在同一条直线的时候，太阳照到月亮上的光就会被地球遮没，发生月食。地球背着太阳那半面上的人看来，如果月亮是在地球的本影区里，叫做月全食；如果月亮是在地球的半影区里，叫做月偏食。

日食、月食一点也不神秘，并不是“天狗吃太阳”、“吃月亮”，而是常见的自然现象。

## 反射定律与哈增贡献

公元 8 世纪，阿拉伯人建立了统一的横跨欧、亚、非三洲的大食帝国，他们神速地得到了印度人和希腊人的科学和哲学宝库，人们将希腊文的古典书籍翻译成阿拉伯文。光学在阿拉伯的土地上得到了精心的培育。科学家阿勒·哈增或称伊卜恩·海塔姆，在光学方面取得了新的成就，他著有《光学》一书，后被译成拉丁文，于 1572 年出版。《光学》一书对光的反射、折射现象进行了认真的研究讨论。它指出，在反射现象中，除反射角等于入射角之外，反射光线必在入射光线与界面法线所确定的平面内，从而完善了光的反射定律。阿勒·哈增重复做了托勒密的折射实验，他据自己的实验结果得出：托勒密的折射定律在入射角较大时是错误的。

阿勒·哈增对球面镜与抛物柱面镜作了研究。他提出了通过某一点的光线越多，该点就越热的看法；还造了一面由几个不同的球环组成的镜子，每一个球环都有自己的半径和曲率中心，且使所有球环反射的光线准确地会聚在同一点上。实质上，这样的镜子是现代太阳灶的雏型。他提出了著名的“阿勒·哈增问题”：给定发光点和眼睛的位置，求出球面镜、圆柱面镜或圆锥面镜上发生反射的某一点。他对这个问题进行了精心而详细的讨论。

阿勒·哈增是详细叙述和描绘人眼的第一个物理学家。他依据解剖学的知识，提出了“网膜”、“角膜”、“玻璃状体”、“前房液”等现在仍然使用的术语。在研究人的视觉形成时，他坚决反对柏拉图主义者们和欧几里德的人眼发射说，赞成德谟克利特等人的观点，即视觉是由被看见的物体发光进入人眼引起的。他还发明了凸透镜，并用凸透镜做了实验，研究与分析了其成象规律，所得结果与近代理论十分相似。

## 各式各样的镜子

### 平面镜

人类使用镜子的历史源远流长。最早的镜子就是天然的水平面。旧石器时代的人要想看自己的尊容就必须跑到池水边，对着平静似镜的池水自我欣赏一番。到了新石器时代，人类已经会制作陶盆，盆里盛了水放在家里就不用不到老是朝河边跑了。庄子说的“人莫鉴于流水，而鉴于止水”就是指这个变化。欧洲有关古镜的记录，最早是在埃及第 11 王朝的坟墓中发现了类似镜子的实物，距今有 4000 年的历史。我国考古工作者们也采集到这一时期的青铜镜（关于我国古镜的情况我们将在下一节里做专题介绍）。埃及的金属镜和我国从公元 5 世纪到 13 世纪流行的金属镜都是青铜制成的。到了 15 世纪意大利的威尼斯用镀锡法制成了玻璃镜子，即在玻璃的背面涂了一层金属膜来反射光，反射效果极佳。于是皎白似银的玻璃镜子大量倾销到各国，风靡了欧洲。后来这种制镜技术被法国窃取并得到进一步的发展。17 世纪后期玻璃镜的制法从吹球法改进为溶液法，这样就能很容易地制成平面玻璃镜。至于在玻璃背面镀银膜的方法是 19 世纪才发明的。现在广泛使用的是镀铝的玻璃镜。

与镜子成像原理密切相关的光的反射定律，大约在公元前 4 世纪已为古代希腊人所掌握。柏拉图在讲课中就讲授了光的直线传播和入射角与反射角相等的知识。欧几里得在《反射光学》一书里明确提出光的入射线与镜面所成的角 A 等于光的反射线与镜面所成的角 B。他还把这个定律用于平面镜和球面镜的成像问题上。哲学家卢克莱修则从原子论的观点出发意识到光的反射定律，他在一首诗中写道：“……因为自然强迫，一切物体均以相等的角度被送回，并从它们所冲撞的任何东西上弹开。”

更有意思的是，亚历山大里亚的力学大师希罗则从“大自然是吝啬的，从不做无用的功”的意思出发也得出了同样的光的反射定律。众所周知，光是沿直线前进的，因为直线是两点之间最短的路径；当光在反射的时候，沿着反射角与入射角相等的这条路径要比任何一条别的路径都要短。

现在反射定律表述为：反射线、入射线和法线在同一平面里；反射线和入射线分居法线的两侧；反射角等于入射角。

运用反射定律可以说明平面镜成像的原理。在平面镜前放一支点燃的蜡烛，从蜡烛火焰发出的光线经过镜面的反射光路发生了改变，入射光 SA 和 SB 的反射光线分别是 AC 和 BD。它们映入眼帘，而观察者由于习惯的原因，认为这束光是从 AC 和 BD 的反向延长线的交点 S' 处发出的。于是以为那里有蜡烛的火焰 S'，事实上火焰 S' 只是人的头脑里的反映，实际上是不存在的，因此称为虚像。由此可以看出，凡平面镜成的像，跟物体的大小相等，并且像与物对于镜面相互对称。有兴趣的读者可以做个小实验：在一块平玻璃的前后对称的位置上放两支蜡烛，点燃玻璃前的一支蜡烛隔着玻璃看，玻璃后的一支蜡烛也闪烁着明亮的火焰。这是外面那支烛光的虚像，正由于虚像在大小、远近都与物相互对称，以致看起来与真的一般，简直到了真假难辨的程度。所以人们常将“水中月”、“镜中花”来比喻那些看起来像真，实际上是假的虚幻事物。在电影的特技摄影中，常常将虚像和真景结合起来，以求取得神奇的效果。银幕上见到的水下龙宫，在水中燃烧着的火焰，这些

水大都是虚像呢。

平面镜不仅能形成虚像，而且可以改变光路。我国古代有本书叫《淮南万毕术》，书中有这样的记载：“取大镜高悬，置水盆于其下，则四邻见矣。”它的意思是说墙里的人通过大镜和水盆两个平面镜，使墙外的光线经过大镜反射到水面，又经过水面反射到人眼中，那人就看见“四邻”了。我国古代的这种巧妙地改变光路的方法是近代潜望镜的雏形。

潜望镜在战争中很有用，战壕里的战士可以通过潜望镜了解外面的情况，同样它也是潜水艇和坦克的眼睛。当然潜望镜的高度必须小于20米，否则视角太小，清晰度也太低。如果让潜望镜的管子再曲折几次，在每个拐角上又安上一个与水平面成 $45^\circ$ 角的平面镜，那么光将一次次地被反射，沿着管子拐了一次弯又拐一次弯。许多年以前，希腊有位吹玻璃的工人就发现光线可以从玻璃管的一端传向另一端，而没有光从管的四壁透射出来。他觉得挺奇怪，现在读者可以理解了，因为玻璃管的内壁表面就像是无数面小镜子，光线在里面辗转反折，向前传递，最后从玻璃管的另一端跑出来。于是，有人遐想用这样的玻璃管可以隔着不透光的物体看见他后面的东西。现在医院里广泛使用的内窥镜有一部分就是用透镜、棱镜或反光镜作光学元件，以金属管来做外壳。它的头部装有灯，让人吞到肚子里，灯光把人体内部照得通明，并且将光从导管传出来，医生们便能窥望胃里的秘密了。

如果把两块平面镜互相垂直，再用胶布粘合起来加以固定，竖直放在桌上，这种组合镜称为偶镜。偶镜有许多有趣的性质。拿一本书放在偶镜前，你会惊奇地发现镜子里的字不再是反的而是正写的。再用偶镜来照一下自己的脸，你将看到两面镜子各照出你半个面孔，偶镜的中线又恰好在整个脸庞的中间。如果你用手摸一下右耳，在镜子里却看到自己正摸左耳呢。为什么偶镜中看到的像不是反的，而是与实物一样的呢？原来你在偶镜中看到的像是经两面镜子先后反射而形成的，每面镜子都把像颠倒一次，经过两次反射，像也就反反得正，变得和原来一样了。

利用偶镜再做个小实验。把一只小泥人放在两面镜子的中间，你可以从镜子里看到很多泥人围成了一个圈，改变镜子的夹角，镜子里的泥人数目也随之改变。这是因为从泥人射出的光线在两面镜子中间发生多次反射，每反射一次就会使你看到一个虚像。镜子之间的夹角越小，光在镜子之间的反射次数越多，形成的虚像也就越多。再做一个实验。

把手电筒放在眼睛边紧贴着面颊，让光射到夹角为 $90^\circ$ 的偶镜上，可以看到偶镜也发生眩目的反光。这又是为什么呢？原来这种偶镜有个特点，经过镜面两次反射的反射光必定与入射光平行。由手电筒射出的光被镜面两次反射后就会直射到你的眼睛里，所以看起来很眩目。倘若在偶镜上再加一面镜子，使三面镜子互相垂直，就像木箱的包角。这个装置叫角反射器。它由三对偶镜组成，可以证明，无论你从什么角度将光线投射到角反射器上，经过角反射器二、三次反射后的反射光也必定与原来的入射光线平行。角反射器的这种特性使它具有广泛的用途。自行车的尾灯就是由许许多多的角反射器组成的，从表面上看好像是个蜂窝，但当后面汽车灯光射到自行车的尾灯上时，尾灯就会闪烁着耀眼的光亮，后面的驾驶员看起来十分醒目。读者也许会说，既然自行车的尾灯被汽车前灯照射，那么反射光应该回到前灯而不是照到司机的眼睛上。是的，如果尾灯里的角镜的三个面互相都严格地垂直，的确会出现这种情况，但事实上自行车尾灯里的角镜并非如此，因此有一些

反射光散开，以便让司机看见它。而构造精密的角反射镜更多用于雷达定位。由雷达发送的波经过角反射器的反射会正确反射回雷达，而不会向其他方向漫射。因此技术人员在江河海洋的浅滩上安置了角反射器，由雷达发射的波，经过角反射器反射，被接收到，使领航员可以从雷达屏幕上看清楚水浅的区域。角反射器还可以用来干扰雷达。从飞机上投下的角反射器的反射信号比飞机反射的信号强，雷达受骗后便开始跟踪这个诱惑物，而飞机便乘机逃之夭夭。

现在连月球上都安放了人造的角反射器。1960年激光诞生后，由于激光具有极强的方向性和异常的亮度，所以利用激光束来测量月地之间的距离是再理想不过的了。1962年美国科学家做了尝试，效果不算太好。因为月球离我们太远，激光到达月球表面时已经散落在一个直径为几公里的范围内，光线也因为散射变得十分微弱。再加上月球表面也凹凸不平，使激光发生了漫反射，因此回到地面接收器的光线真是微乎其微。要是能在月球上安一面镜子能把绝大部分的激光反射到地球，该多好啊。角反射器就是这种最理想的镜子。1971年苏联发送“月球车1号”携带了法国制造的角反射器，并利用它测定了地月之间的距离是383911.218公里。

## 反射镜

大约在公元前218年前后，随着马其顿王国的衰落和罗马王国的兴起，罗马人统一了意大利本土后向西扩张，遇到了另一个强国迦太基。两国之间发生了漫长的“布匿战争”。夹在这两霸之间有个城邦小国名叫叙拉古，经常受到两边的侵犯，幸得城里有大科学家阿基米德，依赖了他的聪明智慧，才使这弹丸小城能在夹缝中得以生存。那一年，罗马的舰队又在海军统帅克劳狄乌斯的率领下向叙拉古发起进攻。城里的国王只得恳请年逾70的阿基米德再次出马。阿基米德在士兵的簇拥下出了城，站在高高的礁石上，看着那蓝天碧海，心里不胜惆怅，多么美丽的地中海啊，今天要面临一场厮杀。他用双手搭起遮阳篷眺望，只见庞大的罗马船舰影影绰绰，已进入视线，怎么办呢？城里的士兵都在北门外与罗马陆军对峙，剩下的只是些妇女和儿童。阿基米德仰天长叹，忽见万里无云骄阳似火，心里顿生一计，便说道：“事情紧急，赶快叫全城的妇女带了自己的梳妆镜到南门外集合。”再说罗马人的舰队已经逼近了叙拉古，克劳狄乌斯站在旗舰的指挥塔上仔细观看城堡，见城墙上并没有弯弓持枪的士兵。城门开着，走出三五成群的妇女，她们有的爬上礁石，有的走到海边，妇女群里还有老人和孩童……，这一定是他们出城投降吧！克劳狄乌斯想到这点不由放声大笑，传令水手奋力划桨。这时分散在海边的妇女、老人在阿基米德的指挥下排列成一个弧形，每人从怀里掏出了镜子。似火的阳光照射在镜面上立即发射出一束束强烈的火光会聚到罗马舰船的帆篷上，像一条条火舌在舔。水兵才闻到有焦糊味，抬头张望，桅杆上已腾起火苗，风长火势只不过十来分钟，浓烟大火弥漫了整个船队，可怜克劳狄乌斯苦心经营了多年的舰队在个把时辰里化作焦糊木板，漂散在地中海上。

这个故事究竟是虚构，还是真实的，多年来说法不一。1973年希腊工程师萨加斯做了一次模拟实验，他令50名水手，每人拿了一面方镜把阳光都集中到一条小船上，几秒钟后小船冒烟，2分钟后小船燃起了熊熊烈火。这个

实验使一些历史学家开始相信用会聚阳光的办法使木船起火并非是无稽之谈。当然也有人认为罗马的船舰要远得多，萨加斯的实验并不能证明阳光也能点燃远处的船舰。

据另一本古书上说，阿基米德是在城墙上固定了一面巨大的，经过精细打磨的四面镜，是这面凹镜会聚的光烧毁了 42 米远的敌船。这里我们不再去考证这个事件的真伪。但有一点可以肯定，阿基米德对光的反射和各类面镜的作用有过认真的研究。相传他著述过《镜面反射》一书，可惜已经佚失。但根据古希腊阿波罗尼斯所著《论点火镜》一书可知，当时人已经掌握球面形的，旋转抛物面形的和旋转椭球面形的四面镜都能够会聚阳光，点燃物体，因此称它们为点火镜。我国古代的点火镜叫做“阳燧”，样子像一只酒盅。把阳燧向着太阳，可以将光聚为一点，点燃火绒。在先秦时代，青铜铸造的阳燧是贵族和富人常备的取火工具。只要有太阳，随时可以拿出来取火。时至今日，凹镜还有它的用武之地。太阳灶就是利用阳燧原理：一个巨大的凹镜将阳光会聚起来烧水煮饭。直径大于 10 米的凹镜会聚的太阳光能熔焊金属。法国的比利牛斯山上的太阳能高温炉，大凹面镜是由 9000 块小反射镜组成，使位于焦点的炉内温度高达 4000℃，是世界最大的太阳灶。

现在更多的凹镜被用作反射镜。原来凹镜不仅可以把平行光会聚在它的焦点上，反过来，它也可以把放在焦点上的光源的光反射成平行光，平行光射得远。所以手电筒、探照灯和车灯里都安装了凹镜作反光镜。这种反光镜已经不是青铜制造，而是在铜、铁的基底上镀了反射率很高的金属铬。

和凹镜相反的是凸镜。取一把大汤匙，用它的凸面照一下你的脸，可以发现汤匙尽管很小却能把整个脸都映现出来，说明它成的像是缩小的虚像。由于凸镜里看到的范围要比面积相仿的平面镜大得多，所以先秦时代的工匠都把小镜铸成了凸面。后来的人得到了古镜却不知其中的原委，用石块把凸起的镜面磨平，闹出了笑话。

近代光学家指出，凹镜和凸镜采取球面并不好，最好采用抛物面镜，抛物面是将抛物线绕它的轴旋转而成的。只有抛物面凹镜才能最好地会聚阳光，而球面凹镜会产生“球面像差”，使像点成为一个弥散的光斑。所以现代凹镜都是抛物面状的。

## 从光学纤维谈全反射

1870年的一天，英国皇家学会的演讲厅内座无虚席。物理学家丁达尔从容地走上讲台，他清了清嗓子说：“几个月之前有位朋友告诉我，从酒桶里流出来的酒竟会熠熠发光，真是不可思议。我听了之后也觉得奇怪，诸位对此也一定存有疑虑，所以我先来演示一番。”说着，他走到放在讲桌上的水桶旁，拔掉塞在水桶侧面孔上的木塞，并用光从水桶上面向水面照明。观众们都出乎意料地看到了这样的奇迹：发光的水从水桶的小孔里流了出来，水流弯曲，光线也跟着弯曲，光居然被弯弯曲曲的水俘获了。这究竟是因为什么？难道光线不再是直进了吗？丁达尔接着解释说：“原来这是全反射起的作用：表面上看，光好像走着弯路，实际上光是在弯曲的水流的内表面发生了多次的反射，光走过的是一条曲曲折折的折线哩！”

那么光在水中为什么会发生多次反射呢？丁达尔的观点是：当光从水中射向空气，也就是从光密媒质射向光疏媒质的时候，折射角随着入射角的增大而增大，并且折射角总要大于入射角。因此当入射角大于某一临界角时，折射角就会大于 $90^\circ$ 。也就是说，入射光将全部折回原来的媒质，不再进入到光疏媒质里去，这种现象称为全反射。很容易计算光由水射向空气时发生全反

射的临界角 $\sin = \frac{\sin 90^\circ}{n} = 48.5^\circ$ 。这是一个不大的角度，水流中的光线

射到内表面的入射角都要超过这个临界角，所以它只能一次次地被反射，曲曲折折地前进了。只要我们留意，全反射现象是经常可以见到的。在清晨，我们可以看到荷叶上的露珠闪烁着耀眼的光芒，这就是因为光在水珠内发生了全反射的缘故。美丽的宝石光彩夺目，也是全反射的作用。天然的金金刚石并不是非常美丽的，常常要经过加工才能发出光彩，工匠在钻石上磨出许多棱边，使大部分光线能在它众多的内表面发生多次全反射，最后散射开来，这样在各个方向上都有它的反射光线，所以无论从哪个角度看金金刚石总是那样晶莹透亮、光彩照人。用玻璃或其他材料磨制的仿宝石，由于折射率比金金刚石大，临界角也大，光线在这些仿制品里就没有那么容易发生全反射，所以就不如金金刚石晶亮了。

丁达尔的全反射实验引起了人们的兴趣。有人想到玻璃的折射率比水大，内壁更容易发生全反射。如果把玻璃管弯曲成文字形状，再把光射入弯曲的玻璃管的一端，那么光在玻璃管内多次反射，形成了一个熠熠闪亮的文字。不久，由这种发光字组成的广告语出现在伦敦的街头巷尾，夜里看来似火树银花一般，招徕了不少顾客。

现在，让我们取一个玻璃杯盘或玻璃烟灰缸，用手电筒的光来照射玻璃盘的上边。进入玻璃内的光线，由于在玻璃内部不断地反射而沿着弯曲的玻璃前进，最后从玻璃盘的另一边透射出来。如果你注视玻璃盘的下边就可以看到明亮的光斑。这些光斑就是手电筒的光沿着弯曲的玻璃传过来的。

在丁达尔实验的50多年后，也就是1927年，全反射现象在实际应用上又有新的突破。科学家贝德尔和汉塞尔提出了利用光纤传送图像的设想：制造出一种透明度很高，细如蛛丝的玻璃丝——玻璃纤维。这种纤维由内芯和外套两层组成，内芯是光密媒质，外层是光疏媒质。光线在这种玻璃纤维中发生全反射，就会沿着弯弯曲曲的纤维前进了。两位科学家的奇妙设想马

上引起各行专家的关注。医学家们想到它可以用来制造内窥镜。现在，光纤内窥镜发展到有 10 多个种类，成为医疗诊断的一种常用器件。这种内窥镜由许多条柔软纤细的光导纤维编织而成，每条纤维比头发还细，只有 10~15 微米粗细，整个内窥镜条也只有 9.25~12.4 毫米粗，病人可以不太痛苦地吞下它。由于镜身可以任意转弯，甚至可以弯 180 度，掉过头来看后面的情况，所以病人体内各脏器的情况，如肿瘤、息肉、炎症等均可一览无遗。

内窥镜发明后，科学家又提出了用玻璃光纤来传递图像进行远距离通信的设想。但是在激光器发明之前，这种美好的愿望只能是一种空想。因为光纤在传送光的同时还要吸收一部分光能，普通的光在玻璃纤维中越走越弱，跑上几米，充当内窥镜是可以胜任的。要它远距离送信就无能为力了。一直到了 70 年代，美国、日本等国家才研制出极低损耗宽频带的光导纤维。与内窥镜相似，通信用的光导束（称为光缆）由几万根直径约为 10 微米的光导纤维组成，因为 1 根光纤只能传送 1 个光点，几万个光点就可以传递一个完整的图像了。

用光导纤维传送信息要比金属制成的电话线优越得多。一对金属电话线至多只能同时传送 1000 多路电话，而一对细如蛛丝的玻璃纤维，根据理论计算可以同时通 100 亿路电话。还有保密性好，不受干扰等优点。制造光纤的原料是石英，在地球上它是取之不尽、用之不竭的。一千克超纯玻璃可以代替十几吨铜。可以相信，随着现代通讯技术的高速发展，光导纤维将在未来的通信事业中扮演越来越重要的角色。

由全反射引起的许多光学现象中，要算水中的鱼仰望水面时所见到的景象最为怪异，如果不分析，一般人是难以想象出它的模样来的。假设清澈的池水中有一条鱼，在它的眼里，岸上的一切事物都被挤在一个大漏斗里，而鱼就位于这个“大漏斗”的底部。这个“大漏斗”的上部边缘围着由红、黄、绿、蓝、紫等颜色组成的彩色圈。圆圈的外边，展开着一片发光的水面，它像镜子一样，会映现出水中的各种物体。

为什么鱼的眼里看到的世界会如此不寻常呢？原来这一切都与光的全反射有关。光从水射向空气时，发生全反射的临界角是  $48.5^\circ$ ，水下光源 S 发出的光，只有在  $97^\circ$  顶角的圆锥体范围内的光才能透过水面，散射向整个水面以上的空间。根据光路可逆的道理，水面上  $180^\circ$  视场角内整个空间中物体射来的光线进入水中就被挤在这个  $97^\circ$  顶角的“大漏斗”内，所以整个水面上的世界被扭曲变形；位于鱼正上方的云，它的形状倒一点也没变，因为竖直水面的光线不会被折射，但岸边的树发出的光被水折射后射入鱼眼，鱼会以为这些光来自天空中树的虚像。由于树顶与树干发出的光的入射角不相同，它们被折射的程度也不一样。如果说树顶的枝叶尚可保留它的基本形状，而下部的树干则更多地被压缩了。总之越靠近地面的树干被压缩得越厉害。这些变了形的树木的像悬挂在空中，在它们的背后是蓝天和白云。而“大漏斗”外面展开的水面似镜把水中的景象映现，所以在鱼看来，树长在空中，鱼也在空中游。

下面我们再来分析那些部分浸在水中，部分又露出水面的物体，在鱼看来又是如何的怪模样呢？

设直杆 AB 插在水池中，其中 AO 部分露出水面。位于 E 处的鱼当然可以毫不歪曲地看清楚直杆的水下部分 OB。然而，由于水面全反射的缘故，鱼还可以看到这部分直杆以水面为镜对称的像，即 OB 在水面的倒影，不过这个倒