

(沪)新登字第 305 号

责任编辑 陈英黔

插图作者 周箴纬

看不见中的看得见

——光学的故事

林凤生

上海科学普及出版社出版

(上海曹杨路 500 号 邮政编码 200063)

新华书店上海发行所发行 常熟文化印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 4.5 插页 2 字数 103000

1996 年 6 月第 1 版 1997 年 1 月第 2 次印刷

印数 23001—31000

ISBN 7-5427-1082-6/O · 26 定价:4.50 元

目

录

- 1 光的世界 (1)
- 2 影子的妙用 (7)
- 3 针孔成像的奥秘 (13)
- 4 用途广泛的平面镜 (20)
- 5 形式多样的反射镜 (27)

- 6 神奇的中国古镜 (33)
- 7 墨经中的光学知识 (39)
- 8 折射定律面面观 (45)
- 9 从透镜到望远镜、显微镜 (51)
- 10 全反射奇观 (58)

- 11 空中幻景——海市蜃楼 (65)
- 12 颜色理论初探 (71)
- 13 薄膜为什么会现出颜色 (77)
- 14 波动说的兴起 (82)
- 15 回味无穷的 31 个问题 (88)

- 16 权威也有失误之处 (93)
- 17 双折射现象给人们的启示 (98)

18	难忘的 1818 年	(104)
19	以太的故事	(109)
20	太阳光谱中的黑线	(115)
21	星球与我们靠近了	(120)
22	创见来自一位中学教师	(125)
23	测量光速的奇妙构想	(129)
24	人类对光的本性的认识	(135)

1.

光 的 世 界

太阳和蜡烛

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°C ，中心温度要达到 1500 万 $^{\circ}\text{C}$ 。每天它以光和热的形式向外发出 3.8×10^{30} 卡的热量。除太阳之外，金属和碳在高温下也会发光。 800°C 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°C 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。右图是早年出土的西汉“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。

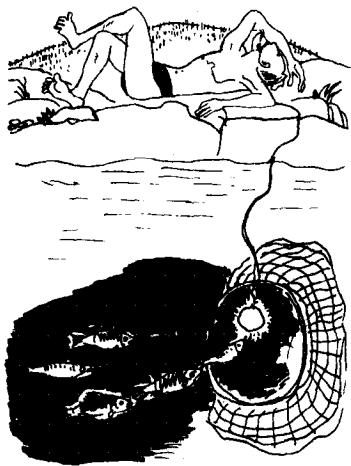


长信宫灯

萤火虫和蛇眼石

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，墨西哥的妇女用菠菜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，璿光溢彩、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，车胤便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，古时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。



荧光捕鱼

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便会放出一团墨汁，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，这些细菌以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 米远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。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，就称它为蛇眼石。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。汉代的人就知道栲木树的皮，浸在水里，水会发出青色的荧光。栲树皮是一种药，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年发明用煅牡蛎壳和琉璃粉的混合物来做作画颜料，但比我国要迟了近1500年！

什么是光？

先人对光的认识首先是把太阳和月亮看成最重要的光源。这一点我们从出土文物的图案和古甲骨文字中得到证实。右图是郑州大河村仰韶文化遗址出土彩陶，表面上绘着太阳，在圆圈的周围划了许多短线，表示从太阳光源发射出来的光芒。再来看古代的象形文字，甲骨文把光明的“明”写成了或，就是由一个太阳和一个月亮组成的。类似的甲骨文字甚多，如：

旦，甲骨文作表示太阳刚冒出地平面。

暮 甲骨文写作表示太阳已落入森林之中。

光 甲骨文写作 像一个人举着火把，也说明在商周时代火是主要的人造光源。

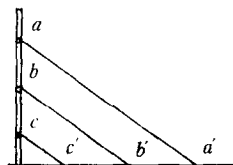
昏 甲骨文写作 像一个人手里提着太阳，表示太阳已经落下，一切呈现昏暗。

其次，先人们还热衷探讨这个命题：人为什么能看到物体？在西方主要有两种解释。古希腊的毕达哥拉斯和德谟克里德认为：光是由一些很小的微粒组成的粒子流，当这些微粒进入人眼的时候就会产生视觉。这派学者被称为原子论者，他们的观点是后来的光的微粒说的萌芽。哲学家柏拉图等认为：人眼睛里会放出神火来，只有当神火与物体发出的某种物质接触才能看到物体。柏拉图的学生亚里士多德进一步发挥了这种思想，认为视觉是眼睛与物体之间的媒质运动的结果，所以没有中间媒质就不会产生视觉。他的理论包含了光的波动说的萌芽。在我国战国时学者们也对这个命题进行过探讨。《墨经》认为：人眼见物须有光源的照明。《吕氏春秋》上说：“目之见也借于昭”，“昭”就是光亮。这个问题以东汉王符说得最为透彻：“中阱深色，幽黑不见，及设盛烛，则百物彰矣。此则火之曜也，非目之光也。而目假之则为明。”用白话文来说就是：坑道内既黑又暗，点燃了许多蜡烛，一切东西就看得清楚明白。这是火焰光芒的照耀的结果，并非眼睛发出的光，则不过眼睛依赖了火焰的光芒，看清楚了物体罢了。从这段话可以看出我国古代对人眼见物的物理过程说得比西方人更为清楚明白。

2.

影子的妙用

在太阳光的照射下，物体和它的影子是不会分离的。形影相随的现象引起了人们的注意。当人在阳光下奔跑的时候，影子总紧紧相随。这个简单的经验告诉我们，光的传播速度要比人跑快得多。不然的话，头部的影子要落后一段距离，也就落后光从头部传到地面这段时间里人走过的那段距离。影子的形状也能告诉我们关于光的一些性质。用直线把影子上的不同的点与物体上的对应点连接起来，这些直线几乎是平行的，并且都指向光源，由此想到



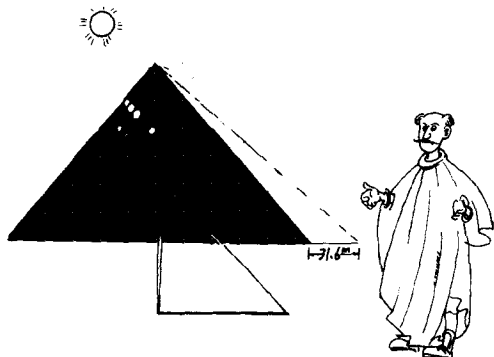
光是沿直线传播的。可见，通过物体的影子可以获取很多知识和信息。聪明的古代人做出了很好的范例。在《运动的故事》分册里，我们介绍了亚历山大城博物馆馆长埃拉托色尼利用立竿见影的办法巧妙地算出地球的周长，这是多么了不起啊！这里我们再说一个故事。

金字塔有多高？

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木杆，以木杆的一端为圆心，木杆长度



为半径在地上画一个大圆，然后把木竿竖立在圆心。法列士利用影子巧妙地测量出金字塔的高度

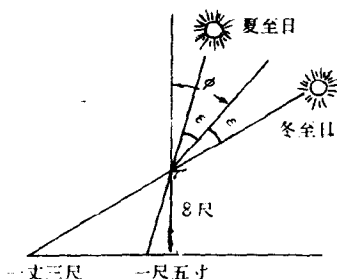
太阳升起后木杆在地上留下一条长影。时间渐渐地过去，太阳也越爬越高，木杆的影子也一点一点地缩短。站立在四周的众大臣被阳光晒得汗流满面，真有点不耐烦、他们望着法列士，见他仍然默不作声也猜不出他葫芦里卖的是什么药。又过了一会，当木杆的影端恰好落在圆周上时，法列士立即高举双手示意站在金字塔旁的两位助手用尺丈量金字塔尖顶的投影点到金字塔侧面底边的距离。助手用手势报告这个距离是 31.6 米。法列士便大声宣布：金字塔的高度是 146.6 米。他见国王与众大臣疑惑不解的神色便解释说：“当木杆在地面上的投影与木杆的长度恰好相等的时候，阳光正以与地面成 45° 的角度射向地面，这时候金字塔顶点、塔底中心点和阴影端点恰好组

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。

圭 表

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”、“𠄎”。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，这里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，这个投影较短，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，直要等到第五年，夏至日影才同第一年的日影等长。算一下日子，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 ϵ ，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 Φ （见图），从图中就可以得到两个关系式：



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

经过简单的计算可知，当两至日影为上述两数时，这地方的地理纬度应为北纬 $34^{\circ}30'$ 。而河南登封县的纬度为北纬 $34^{\circ}4'$ ，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度。周秦时期，人们认为在同一天子里，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。据说周王室裂地封侯的时候，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的确南北方向（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 晷

“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，启迪了古代的智能人发明了另一种投影计时仪器——日晷。右图是几十年前，在内蒙古呼和浩特以南某地出土的石制日晷，是公元前2世纪西汉时代的遗物。方形的石板上刻了一个大圆圈，将圆卷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



秦汉日晷

在内蒙古呼和浩特以南某地出土的石制日晷，是公元前2世纪西汉时代的遗物。方形的石板上刻了一个大圆圈，将圆卷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了一圈，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。左图是设立在故宫太和殿的前面的汉白玉座基上的日晷。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。

3.

针孔成像的奥秘

土财主的烦恼

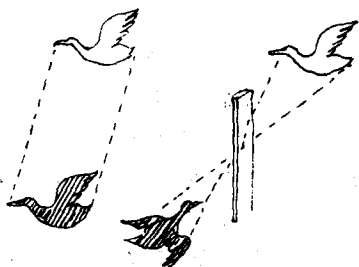
先说个故事，远在春秋时期，宋国有位财主为富不仁，收敛了许多不义之财。他怕别人知道，便命工匠在后院筑起了一间土屋，四壁全用沙浆砌满，不开窗户。只在面朝大路的方向的墙上留了个小孔，使自己可以从小孔窥测外面的动静。一天他正在暗室里翻箱倒柜，只见一束阳光从小孔射入，在墙上留下一个光斑。使他吃惊的是光斑里有几个倒立的小人在走动。土财主吓得半晌都说不出一句话来，以为有鬼魅作祟，从此食不甘味、寝不安宁。他求神拜佛，还请了巫师来作法，然而墙上的小人儿仍不时可以见到。后来这个消息一传十，十传百，连大学者墨子也知道了。一天他带了两位学生来到了财主家，揭开了墙上人影的奥秘。墨子让学生在太路上舞动双手，摆作各种姿势，财主在土屋的墙上可以看到倒立的人影做着完全相同的动作。墨子因势利导说墙上的人影是太路上的人经过小孔在墙上的投影，并不是什么鬼魅，乃是一种自然之理（参见本书第七节，墨经中的光学知识），财主闻言也放心地笑了。针孔成像的道理虽然在当时已被墨子说得清楚明白，但它与我国古代的许多光辉的研究成果一样后继无人，使积累的知识得而复失。可以说在墨子之后的一千年里竟没有第二个人

懂得它的道理。唐代的学者段成式见到室内墙上映现出塔的倒像，大为惊奇，还以为是“翻海”的缘故。在这段漫长的年月里，惟有北宋大科学家沈括以其非凡的洞察力断言“影入窗隙则倒，乃其常理。”并用通俗语言解说了它的原理。

对鸟影的精辟分析

在沈括所著的《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，鸢西则影东。又如窗隙中楼塔之影，中间为窗所束，亦皆倒垂，与阳燧一也。”

[译文] 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



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了起来，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