

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中小學生課堂故事博覽

# 波粒二象現光明

— 光學的故事



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”、“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。因为月球距离我们太远，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刚石钻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，因为竖直面上的光线不会被折射，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

影却位于 OB 的上方。至于直杆露出水面的那部分 AO，由于它发出的光经过水的折射，改变了方向。在鱼眼看来它的像移到了高得多的位置上，并与水面完全脱离了。这部分杆的长度因压缩而变了形。特别是靠近 O 点的那部分杆被压缩得很厉害。所以这样的一根直杆在鱼的眼里却是由很不协调的三部分连在一起。弄清楚了这些道理，一棵被水淹没了一半的大树，鱼可以看到的景像就不足为怪的了。鱼看到入水洗澡的人应当是如此的怪物：人被分成了两截，成了两个动物。上截没有脚，下截没有头，却有四个手、四只脚。当我们从鱼的旁边走过时，人的上半身会越缩越短，最后只剩下一个空悬的人头。如果读者想验证一下上述的说法，可以把一面镜子沉入大鱼缸底，便可在镜中目睹这光怪离陆的水下奇观。

## 蓬莱仙境与沙漠绿洲

在山东省蓬莱县城北 1 公里，濒临渤海的丹崖山顶上，有一座重檐八角，绕以回廊的殿阁，那就是有名的蓬莱阁。关于它有着许多美丽的传说，因此有蓬莱仙境之称。相传我国古代有海上三仙山，就是蓬莱、方丈和瀛州。当年方士徐福受秦始皇之命出海求仙，即由此入海。神话中的八仙过海的故事也说是在这里发生的。

蓬莱阁创建于北宋嘉祐年间，如游人登临阁上，北望长山列岛，虚无缥缈，东北海疆、澄波万顷。特别令人神往的是这里的海市蜃楼：在平静无风的日子里，凭阁眺望，可以看到有远山、船舶、市镇、街道映现在空中。宋代大科学家沈括在《梦溪笔谈》中对这种奇观作了生动的记述：“登州海中时有云气，如宫室台观，城堞人物，车马冠盖，历历可睹。”而大文学家苏东坡的《登州海市诗》（宋代的登州即今天的蓬莱县）更是脍炙人口。诗曰：“东方云海空复空，群仙出没空明中。荡摇浮世生万象，岂有贝阙藏珠宫。”那么，为什么把这种奇观叫做蜃楼呢？原来我国早在秦汉时代已注意到了这种现象，当时人认为这些映现在空中的亭台楼阁，乃是传说中的蛟龙——“蜃”吐出的气，变幻不定而形成的，所以称为“蜃楼”。后来经过人们长期的观测和研究，对这种说法表示怀疑。沈括在上面一段引文后写道：“谓之‘海市’或曰，‘蛟蜃之气所为’，疑不然也。”苏东坡的诗名“岂有贝阙藏珠宫”也提出蜃气不能够成为宫殿。

那么海市的形成原因究竟是什么？明、清学者陈霆、方以智、游艺等人在观测和研究的基础上，提出了“气映”的说法。《物理小识》中说：“海市或以为蜃气，非也。”张瑶星曰：“登州镇署后太平楼，其下即海也。楼前对数岛，海市之起，必由于此。”该书中还说：“气映而物见，雾气白涌，即水气上升也。水能照物，故气清明上升者，亦能照物。”在游艺所著的《天经或问后集》一书中，有一幅珍贵的插图，图中画出城楼所成的蜃景，旁边注说：“昔曾见海市中城楼，外植一杆，乃本府所植者。”既然海市中见到城楼上的竖杆，是作者所植的真实竖杆的幻景，那么蜃景乃是远处的城廓经过上层气体的光折射而产生的幻景也就不喻自明了。

我们再用现代科学原理来分析海市蜃楼的成因。众所周知，海水的热容量很大，即使在强烈的阳光照射下，水温也不容易升高。这样一来，使海面上的空气层出现了上暖下冷的逆温现象：接近海面的空气受海水温度的影响，气温较低，而稍高的空气层在日光的照晒下，气温反而高。这样引起了空气密度上层小，下层大的异常状况。在风力微弱的天气里这样的空气层保持着相对的稳定。那么密度小的上空气层就会像镜子一样把离蓬莱阁有数十华里之远，原来不可能被看到的海中诸岛发出的光线，反射入人们的眼帘，使观察者目睹这处在虚无缥缈之中的空中映像。

设 O 为蓬莱阁上的观察者，A 为海中一个小岛。由 A 发出的光从密度大的空气下层（光密媒质）向上射出，由于空气的密度逐渐变小，所以光会逐渐偏离法线方向（即折射角逐渐增大），沿着一条 AC 曲线前进。光线到达 C 点时，由于入射角大于临界角，发生了全反射。光从 C 点折回时则从密度小的空气上层进入密度大的空气下层，光线会逐渐靠近法线方向，沿着 CO 曲线，进入观察者的眼帘。而观察者见到的小岛映像是沿着 OC 曲线在 O 点的切线方向，显然小岛的像 A' 比小岛 A 的位置抬高了许多，所以这种蜃景也称

为上现蜃景。

除了在海边可以看到上现蜃景之外，还有一种下现蜃景，则要在沙漠中才能见到。相传 1789 年夏天，法国拿破仑一世率大军入侵埃及，部队在沙漠里前进时，常常被这种蜃景所惑。在远处的沙丘间常常看到有树林、湖泊，或军队、旌旗，时隐时现，致使军心浮动，惶惶不安。此时随军有位数学家名叫蒙日对此现象做了认真的研究，弄清楚其中的道理。用现在的话来说，蒙日认为沙漠地域十分干燥，阳光之下很容易升温。而空气却并不善于导热，这样下层的空气因靠近地面温度较高，而几米高的空气层温度则要低得多。于是空气层的密度垂直分布是上密下疏。设有观察者 O，远处有 1 株树 A 长在较为湿润的沙土中。A 树向下投射的光线，进入下层空气时，因那里的空气密度较小，故折射后的光线逐渐偏离法线方向，并在 C 处入射角超过了临界角，发生了全反射。全反射后的光线再逐渐向靠近法线方向偏折，最后进入观察者的眼中。可以看出他见到的树的像 A' 要比树的实际位置低得多，所以这种沙漠幻像也称为下现蜃景。

蒙日是最早对蜃景予以科学解释的科学家，他还设计了模拟实验来说明自己的观点。据资料介绍他的实验是：“用铁条烧红，在其上放置一物，能见真形，并见假象。热铁面上之风气如上说渐近渐疏之理相仿。”（见英国传教士艾约瑟等译《光论》）读者要问，缘何蒙日有如此学识，竟能一语道破沙漠蜃景的奥秘。事实上蒙日是这方面的行家，对大气光折射现象的研究有很深的造诣。他在科学上的成就还远远不止这些呢。

蒙日，法国科学家，拿破仑一世的挚友。他对数学和图形有很高的天赋。16 岁的时候他因为画了一幅大尺寸的家乡详图，给人留下了深刻的印象。为此被介绍给梅济耶尔军事学校的校长，并在那里接受教育。有一次他奉命通过一些数据来算出一门炮的恰当位置。这种计算十分繁杂，需要很长的时间。而蒙日却别取蹊径，巧妙地把几何学与作图法连起来使用，竟很快地得出了结果。这种新颖的方法就是现在工程上常用的画法几何学，他则是画法几何学的创造人。学校毕业后他先后担任过数学、物理学教授，科学院通讯院士。还出任海军和殖民地大臣。在 1798 ~ 1801 年他来到埃及，曾在开罗帮助创建了开罗科学院。他在大气光学领域里最为卓越的科研成果是他发现了以他名字命名的光学现象——蒙气差。

早晨，一轮红日从东方冉冉升起。蒙日发现这初升的太阳是一个椭圆形的金盘，并不呈圆形，这是为什么呢？经过认真的钻研，蒙日弄清楚了其中的道理。原来在地球的周围有一个厚厚的大气层，接近地表的气层密度比较大，愈向高空，空气愈稀薄，并逐步过渡到星际空间。这样，来自太阳、月亮和其他星体的光在通过大气层的时候，速度发生改变，轨迹变得弯曲，这种现象就叫做蒙气差现象。

具体分析时可先将大气划分为几个同心层。各层的空气密度随着接近地球表面而逐渐增大。设太阳光 S 从 A 点穿入大气的第一层，由于它相对于星际空间来说是光密媒质，因此光速要变慢，且向法线方向靠近，沿折线 AB 前进。同样，光从 B 点进入第 2 层大气时，那里的空气密度更大，光又进一步靠近法线，沿着折线 BC 前进。同样的道理，当光线到达地面上 M 点的时候，光线经过的射程不是一条直线，而是沿 ABCDM 的折线。那么站在 M 点上的观察者所见到的太阳的位置是沿着末端光线的延长线方向上，认为太阳的位置在 S' 上。两者引起的偏角 ( $\angle S'MS$ ) 就是蒙气差。显然，当太阳光垂直进

入大气层的时候，光线不发生折射，蒙气差为零，而光线平行地平线时，蒙气差最大，可达  $35' 24''$ 。明白了这个道理就知道太阳呈椭圆形的原因了。早晨，当太阳光盘的下部边缘到达地平线的时候，它的上部边缘已高出地面半度左右。由于太阳光盘的下缘因蒙气差的缘故被上升了  $35' 24''$ ，而它的上部边缘因蒙气差的作用只上升了  $29'$ ，两者蒙气差值相差  $6'$  左右，这样使太阳光盘的垂直直径因天文折射缩短了近  $1/5$  的长度，所以我们看到了一个椭圆形的光盘。同样的道理，当我们看到太阳露出地平线，射出第一束光时，太阳的实际位置还在地平线以下  $35' 24''$  呢。

## 折射定律与费马原理

托勒密的折射定律在欧洲流行了一千四百多年。开普勒在阿勒·哈增之后，进行了实验验证后进一步指出：托勒密的折射定律在入射角小于  $30^\circ$  时成立，大于  $30^\circ$  时不成立。他认为，折射角由两部分组成，其一正比于入射角，其二正比于入射角的正割。这是不正确的。开普勒提出了光的内全反射的概念，他用实验证明，光线由空气射向玻璃，折射角不能大于  $42^\circ$ ，并根据光路可逆性定理，指出光由玻璃射向空气，当入射角大于  $42^\circ$  时，空气中无相应的折射光线，即光线全部返回玻璃，发生了全反射。全反射现象是光由光密介质射向光疏介质界面时的特殊情况，它与折射现象紧密相联；全反射原理，是现代光学纤维通讯的基本依据之一。这些光学知识都记载于 1611 年他所著的《屈光学》一书中。

1615 年，斯涅耳精心地进行了折射实验，他在方形器皿中盛水，水上为空气。在水面上方沿 OD 方向观察水中发光点 F，F 点就像在 B 点一样。斯涅耳对此进行数学推演，他以 D 为圆心，以 DF 为半径作圆，并过 F 点向水面引垂线 FA，设 FA 与 OD 延长线交点为 C，则得

$$\frac{\operatorname{cosec} i}{\operatorname{cosec} r} = \frac{DF / \sin i}{DF / \sin r} = \frac{DC}{DF} = \text{常数即光线由空气射向某种介质时，入射角的}$$

余割与折射角的余割之比保持相同值。

这个实验及折射定律的表述是 1626 年从斯涅耳的遗稿中发现的。斯涅耳是最先找到光的折射定律的科学家，所以直到现在人们常称折射定律为斯涅耳定律。

1637 年，笛卡儿在《屈光学》一书中，提出了折射定律的现代形式。他以运动着的小球作比喻，使小球自一种介质通过与加一种介质的界面产生偏折后，继续前进，即发生了折射现象。他假定，在同一种介质中小球的速度与方向无关，折射时小球平行于折射平面的速度分量保持不变，垂直于折射平面的速度分量发生了变化。他在《屈光学》中写道：“光的作用同这个球的运动遵循同一法则。那就是光线由一透明物体向更容易或更困难接受光线的另外物体斜射时，更容易接受光线的物体与其它物体的界面相比，常常将光线改变为稍偏斜的方向。而且，这正好与那个物体接受光线比别的物体更容易的程度成比例。只是这里必须注意下面问题，即这个倾斜度根据 CB 或 AH，EB 或 IG 这些互相加以比较的线段的长度加以测定。”……“对线段 AH 与线段 IG，或诸如此类之间的比，对由同一物质产生的折射，始终相同，无变化。”

笛卡儿接着写道：“由于折射全部归于一个测定，不仅相当准确可靠而且实施起来也没有困难。这是因为要了解产生于同一表面的全部折射，只需要一条光线就足够的缘故。”

在比喻中，笛卡儿还说：“球碰到软的物体比碰到硬的物体更容易丧失运动，就像碰到有桌布的桌面上比直接碰到桌面本身更难以弹起来一样。这个细微物质的作用在空气中的各部分（由于空气柔软、不坚固地结合在一起，对它作用时，不显示太大的抵抗）比在水中的各部分（水比空气显示更大的抵抗），受到更大的妨碍。或在水中的各部分受到比玻璃或水晶更大的妨害。这并不足为奇。这样，透明物体的组成部分，越硬越坚固就越容易通过光线。”这段话表明，笛卡儿认为，光密介质容易传播光线，即光密介质中的光速大

于光疏介质中的光速。

基于这些假定，笛卡儿得到了关系式

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{常数}$$

这就是光的折射定律的现代形式，人们有时又把它称为光折射的正弦定则。不过笛卡儿认为：这一常数等于第二种介质中的光速与第一种介质中的光速之比  $\frac{v_r}{v_i}$ 。

折射定律是几何光学中最基本最常用的经验定律。

笛卡儿关于光在光密介质中的速度大于在光疏介质中的速度的假定，受到了费马的批评。1662年1月1日，费马在写给朋友的一封信中说：“笛卡儿对自己的原理不作任何证明，我这样说是因为，所谓比喻在证明中不起任何作用。而他又错误地运用了比喻，作出了光在较密的物体中比在较疏的物体中更容易前进的假定，这显然是错误的。”……“我在这封信中想指出如下看法：即如果在折射研究中，想运用极其一般而不可动摇的原理——自然常常通过最短的捷径进行了运动的话，就会立即发现我所寻找的计算。”

接着，费马对折射作了分析。他说：“以 ACBI 为圆，其直径 AFBD 隔开了两个性质不同的介质，而且，在这两种介质中间假设较疏的介质在 ACB 一边，较密的介质在 AIB 一边。圆的中心为 D 点。从已知点 C 向圆心 D 有光线 CD 射入。求：被折射的光线射向前进方向上的 I 点。引出与直径垂直的直线 CF、IH。因为点 C、直径 AB 和圆心 D 是已知条件，点 F 和直线 FD 也成了已知条件。

那末，两种介质即较密的介质与较疏的介质的抵抗之比，等于已知条件中的线段 DF 和已知的圆外线段 m 之比。当然，线段 m 短于线段 DF，这是因为较疏的介质的抵抗比较密的介质的抵抗小的缘故。与其说是根据其本性，不如说是决定于公理。”

费马认为，介质的抵抗与光速成反比，即光疏介质中的光速大于光密介质中的光速。

接着他又设半径 CD=DI=n，线段 DF=b，DH=a，经过较为复杂的推导得到 DH=a=m。于是，他说：“这样一来，折射点便明确地被发现出来，较密介质的抵抗与较疏介质的抵抗之比，即 b 与 m 之比成为线段 DF 与 DH 之比。引出直线 CD 和 CF，又由 H 点向直径引垂线 HI——它在点 I 与圆周相重，折射光线向那里运动。因此由较疏介质向较密介质进行的光线是近于垂直的折射。这一事实与笛卡儿发现的定理完全并普遍地一致。上述分析，是根据我的原理推导出的对这一定理的最为正确的证明。”

费马去世前没有发表著作，在他去世后九年，由他的女儿发表了以他的名字命名的费马原理。费马原理的内容如下：光线在空间两点间传播，其路径的光程必取极小、极大或常值。

据费马原理，可以简捷地说明光在均匀介质中沿直线传播，解释光路的可逆性，导出光的反射定律。用它得出的折射定律形式为

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_r}{v_i} = \text{常量}$$

这是折射定律最确切的表达式。

费马原理是几何光学各经验定律的高度综合与抽象，其思想水平高于经

验定律，它是光在介质中传播路径的普遍规律。

折射定律的确立与费马原理的提出，为解决光学系统的定量计算提供了理论依据。

1647年，卡列瓦里求得了双凸及双凹透镜的焦距公式，他的结论是：对于曲率半径指向异侧的一切凸透镜和凹透镜，二折射球面的曲率半径之和与向着平行光的那个折射球面的曲率半径之比，等于另一折射球面曲率半径的二倍与焦距之比。即

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{2R_2}{f}$$

此式对空气中的玻璃透镜（ $n=1.5$ ），显然是正确的。

1693年，哈雷参考卡列瓦里等人的研究成果，得出了透镜焦距的普遍公式，即

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

式中的  $n$  为透镜介质的折射率， $f$  为第二焦距。焦距公式的导出为解决透镜成像规律迈出了重要的一步。

## 人眼的沿伸

如果我们把两块三棱镜和一块玻璃砖组合起来，它可以把一束平行光会聚而通过用阴影所表示的那个区域。如果用五块较小一些，加工更为精细的棱镜和玻璃砖组合来代替原来的组合镜，可以看到这一次平行光会聚而通过的阴影区域比原来要小得多。可以想象，用顶角更小，数目更多加工更精细的棱镜束组合来替代原来的组合镜时，它将越来越接近一片具有光滑曲面的玻璃片。一块磨制得很好的透镜可以看成是上述组合中棱镜数目无限增多时所达到的极限情况。上述几个步骤也可以看作透镜的制作过程。按这样程序磨制出来的透镜可以把入射的平行光束会聚成一条线，这种透镜叫柱面透镜，因为它表面非常接近圆柱面。当然人们更希望透镜能把平行光聚焦成一个点。只有透镜的两个表面是球面的一部分，它的曲率在任何方向上都相同，才能够有这样的聚焦作用。这类透镜叫球面透镜。可见透镜的磨制是一件难度很高又十分枯燥的工作。究竟什么时候开始有透镜，现在已经很难查考。公元前 424 年编写的古希腊戏剧《云》中有这样一段情节：“用透明度极好的石头（玻璃）放在阳光下，就能够使光线通过一段距离去熔化那刻写在蜡板上的债契。”说明当时已经懂得了透镜聚光的道理，这样算来透镜的出现还应该更早些。历史学家告诉我们，人类发明玻璃的历史可以追溯到公元前 1500 年。现在保存在英国伦敦博物馆中的图特摩斯三世的一个蓝玻璃瓶就是那时候的物品。古埃及人在制陶的时候，发现天然碱与砂石混合经高温熔化后，能得到一些美丽而透明的石头，这就是玻璃。后来，古埃及的玻璃制造技术传到了古希腊、罗马。他们又对技术作了改进。用玻璃熔炉代替烧锅，提高了熔炼的温度，把它熔化成成为清稀的液态等等。所以把玻璃磨制加工成透镜是很自然的事。这种透镜一般用来做装饰品，聚光点只是偶尔的尝试。一直到 13 世纪，透镜没有大的用处。实用英语中的透镜“lens”出自于“小扁豆”（lentil），显然这不是学术用语。14 世纪初出现了有关眼镜的记录。在一份佛罗伦萨主教庄园的产业清单中就有“一副镀银架的眼镜”。不久在威尼斯城，眼镜的制作得到了普及，以致该城有一条法律，对用玻璃冒充水晶欺骗顾客的眼镜制造商要绳之以法。14 世纪中叶，欧洲人的肖像画上也画了眼镜，著名的天文学家开普勒本人也戴眼镜。随着眼镜的普及和透镜加工业的崛起，熟悉透镜性能的人日益增多，新的、更有价值的光学仪器便在酝酿之中。

1623 年近代科学的奠基者伽利略对望远镜的发明作过很客观的分析。他说：“我们可以肯定，望远镜的第一个发明者只是一个制造眼镜的人。他有各种各样的眼镜，偶然在不同远近的地方透过凹镜和凸镜两种镜片观看，见到并注意到了出乎意料的结果，这样就发现了这一用具。”在众多的记录中以荷兰米德尔堡眼镜商汉斯·利珀希最为出名：1600 年的一天，他的两个孩子在店里玩耍，无意中把两片透镜叠在一起，并用它观看远处教堂的风标。突然，他的儿子兴奋地喊：“爸，快来看啊！”“你看见什么？”“我看见教堂塔顶上的风标。”“胡说，教堂离我们那么远，你一定是搞错了”“不信，你自己来瞧吧。”正是这次偶然的机遇，目不识丁的汉斯一下成了位发明家。对此发明，物理学家马赫曾强调说：“仅仅有偶然机遇还不能完成一个真正的发明。这一类发明者必然突出新的特征，把它铭刻在他的记忆中，把它跟他的思想的其余部分结合并交织在一起：简单说来，他应当具有向经

验学习的能力。”是的，汉斯·利珀希在制造眼镜的过程中，为发明望远镜积累了经验。当他儿子把一个绝好的机遇送到他的面前时，他立刻意识到这是一件有用而且可以赚钱的玩意儿，于是就毫不犹豫地抓住它。1608年10月2日，荷兰议会收到了他提出的专利申请。当时荷兰正与西班牙政府支持的雇佣军开战。独立军指挥莫里斯亲王登上亲王府内苑的一座塔，用望远镜鸟瞰全城，连声说好，并称赞它说：“它可能对荷兰有用。”然而利珀希并未因此交好运。望远镜的构造比较简单，立即有人仿造，并宣称自己才是真正的发明者。在混乱的战争状态下，荷兰政府拒绝了他的专利申请。

不久，法国驻海牙大使为亨利4世购买了一架望远镜。从此，在米兰、威尼斯、帕多瓦等地都出现了叫作“荷兰柱”、“透视镜”或“圆柱”的望远镜。

1611年德国人开普勒，这位以发现行星三大运动定律而名扬天下的天文学家，为了观察天体的运行，在望远镜的研制上也下了一番功夫，他创制的望远镜称为开普勒望远镜，由两片凸透镜——物镜和目镜组成。物镜的焦距长而目镜的焦距短。开普勒望远镜的工作原理是：由于被观察的天体相当远，它发出的光线以平行光进入物镜，穿过物镜后，在物镜焦点外很近的地方形成天体倒立缩小的实像。由于物镜的焦点与目镜的交点重合，这样物镜得到天体的实像恰好落在目镜的焦距内，物镜的像就成为目镜的“物”。这个“物”在目镜的焦距内。当观察者对着目镜观察时，进入眼睛的光线就好像是直接来自放大的虚像上发出来的。虚像的视角大于直接用眼观察天体的视角，因此从望远镜中看到的天体，使人觉得天体移近了，变得清晰可见了。

在望远镜问世的同时，另一种重要的光学仪器——显微镜也诞生了。它也是偶然发明的。可以想象，有了望远镜的人很自然地会试用它来放大近旁的物体。所以，意大利文 *occhialino* 或拉丁字 *perspicillum* 是既表示望远镜也表示显微镜。伽利略本人也做过这样的尝试。他告诉一位朋友说：“我用这个管子（望远镜）看到的苍蝇有羊羔那么大。全身是毛，并且有很尖的爪子……”大约在1625年博物学家约翰·法贝尔给这种装置定名为显微镜。

在显微镜的发明史上，最著名的人物是大科学家胡克和皇家学会的看门人列文虎克。正如伽利略在《星的使者》一书中，对望远镜及其看到的天空中的宏伟景象作了精彩的描述，罗伯特·胡克编著了《微观画集》描述了显微镜底下的微观世界。他亲手画了57幅图，第一次展示了苍蝇的眼睛、蜜蜂螫刺器官、跳蚤、虱子羽毛的结构以及霉菌，他还说这些东西都是由“细胞”组成的。而安东尼·范·列文虎克，生于荷兰的德尔夫特市，曾在布店里当学徒，后来就在市政府里当看门人。他活到91岁，没有再换工作，也没有离开过德尔夫特市一步，但他的名字却远播全球，至今还常常被人称道。列文虎克刚当看门人时才20岁，他觉得整天无所事事，十分无聊。总得干点什么呢！他想。一天，他记得自己在布店学徒时，老板送了他一块放大镜，可惜表面有缺。他决定重新磨一块，从此一发便不可收。磨镜成了他的嗜好，简直到了痴迷的程度。他黎明即起，把一块玻璃放在油石上，认真地磨来磨去。只要没有人来找他，他可以从日出干到日落。这样他一直干了40年。他的房间里成为当时世界上最齐、最好的透镜库。他磨的镜片都很小，有的甚至不比针尖大多少。他通常把磨好的镜片嵌在两片带孔的铜片之间，通过铜片铆固使镜片固定。他磨制的镜片的放大倍数在50~300之间，他的显微镜实际上是一种放大镜，也称为单式显微镜。显微镜和望远镜的发明大大拓宽了人

的视野，它们的制作又促进了人们研究光学理论的兴趣。近代光学差不多从那时候（17 世纪）开始发展起来了。

## 赤橙黄绿青蓝紫

在英国林肯郡格兰沙姆镇南面约 10 公里处，有个名叫武耳索普的小镇。17 世纪的时候，这里只有一座没落贵族留下来荒废的庄园，两三户农家和几间茅屋。

1665 年夏，可怕的鼠疫又一次侵袭了英国。从 6 月到 8 月的三个月内，英国伦敦市内死尸遍街，人口减少了 1/10。剑桥大学担心病疫的波及，便让学生疏散到外地去。大学刚刚毕业的牛顿便回到了家乡武耳索普小镇，在一幢茅屋的二楼度过了 18 个月。在这段与世隔绝的时间里，他潜心钻研学问，取得了累累硕果，其中有一项成果就是发现了白光色散的原理。原来牛顿在大学里的时候听过巴罗教授的光学课，此后他便自修开普勒的《光学》，并动手磨制透镜，制作天文望远镜。他发现在透镜成的像的周围总有一圈模糊的彩色边缘，这究竟是为什么呢？这个问题常常萦绕在他的心头。

一天他与往常一样把自己锁在房里，演算那引力的公式。不觉日已当午，他饥肠辘辘，推开文稿纸，抬起头来伸个懒腰。这一抬头他见到紧闭的门缝里露出一缕细细的光束，不觉大喜。立即伸手从抽屉摸出一块近日磨制的三棱镜，迎上去截住那束光。这时他惊诧地看到墙上竟出现了一段红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的彩色光带，他将镜子转了转，光斑便上下移动。经过几次调节，一个椭圆形状的彩色光斑终于清晰地映现在墙壁上。从这天起，牛顿就把自己关在房里，还把门窗用床单遮得严严实实，只让一束白光透入房中，用三棱镜做这类游戏。几天后，牛顿渐渐领悟到一个秘密，我们平时看到的白光，其实并不是一色白，它是由许多光混合而成的。那么这红、橙、黄、绿、青、蓝、紫是不是最后的单色光呢？这需要再用 1 块三棱镜把红光、橙光逐次分解后才知道。于是他只能耐下性子来再磨制一块三棱镜。还布置起一个真正的暗室。实验是这样进行的：他先让一束光穿过一个黑色木板上的小孔，用三棱镜将它分成七条不同的彩色光。再用一块有孔的木板，上下移动挡住分解后的光，让每条单色光逐一从孔里通过，木板后再放一个三棱镜，这时新的发现出现在白墙上：一是单色光通过三棱镜之后只是进一步略微分开，但仍然是原来的颜色，并不能再分解成彩色光谱。二是，在第一块棱镜上被折射得最厉害的紫光，在第二块棱镜上也受到最大的折射，而红光在这两块棱镜上都折射得最小。于是牛顿对阳光经过三棱镜在墙上形成彩色的光带这一事实作如下的解释：“这个原因不是别的，正是由于阳光不是同类的或均匀的，而是由不同类型的光线组成的。其中的一些比另一些更能被折射。”这是牛顿对色散现象的精辟解释。他还计算出了红、黄、蓝这三色光的折射指数。

善于思索的牛顿没有到此停步，他又从逆向来考虑这个问题。既然三棱镜是把阳光分解成各种色光，那么可以再造一个合成过程：用另一块三棱镜把散成扇形的七色光又会聚起来成为了白光。这个实验当然获得了预期的成功。牛顿还设计了一种可以快速转动的木盘，上面涂了七种颜色，快速旋转时，看起来成了白色。请读者做个类似的小实验。

取一块放大镜，上面贴一张开了三个小圆孔的黑纸，分别在孔上粘上红、黄、蓝三种颜色的透明纸。把放大镜放置在阳光下，可以看到放在桌面的白纸上三个明亮的各呈红、黄、蓝色的光斑，调节放大镜的高度，使三个亮斑重叠起来成为一个亮斑，亮斑呈白色。

牛顿把“不同颜色光线具有不同的折射本领”的观点，应用于解释虹的成因，认为虹是云中或落下的微小水滴反射阳光的缘故。太阳光发出的白光射到水滴上，光线进入水滴发生折射，在水滴中再发生全反射，在射出水滴的时候又发生第二次折射。由于不同颜色的光折射程度不同，它们在离开水滴后被散开成扇形，观察者如果背向太阳，就能看到虹的出现。

## 奇异的冰洲石

什么是光的双折射呢？在托马斯·杨复兴波动学说之前 100 年左右，也就是 1669 年丹麦哥本哈根大学教授巴塞林纳斯发现，当一束光射到冰洲石上面时，它的折射光不是通常见到的一束，而是有两束。其中一束光遵循斯涅耳定律，它的行为和方向与一般的折射光相同；另一束则不处在入射光线与法线所确定的平面里，是一条特殊光束。

冰洲石是出产于冰岛的一种透明晶体，也叫方解石。化学式是  $\text{CaCO}_3$ 。

一次，巴塞林纳斯拿着它去看纸上的字迹，见每个字都成为两个部分重叠的字，于是静下心来仔仔细细地试验，发现了这束特殊光束产生的像还会因为冰洲石的移动而改变。以及两个光像与冰洲石的厚度有关等现象。光的双折射现象为科学家认识光的本性提供了新的素材。当时，牛顿感到用微粒说来解释双折射现象并不难，只要假定光是具有不同侧面（如矩形截面）的粒子流，双像表示对以不同取向进入媒质的光粒子的一种区分，就可以了。然而双折射现象对波动理论来说却是一个棘手的难题。惠更斯虽然重复了实验，还试图用球面波和椭球面波来解释它，却难以自圆其说。最后只能作罢。他在自己的论文中介绍了双折射现象，并说：“尽管迄今我还未能找出它的原因，我并不因此而打消叙述一下它的愿望，使旁人有机会加以研究，看来除了我已经做出的设想之外，还必须提出进一步的假设。”

总之双折射现象成为发展波动说的桎梏，可以这么说，在 18 世纪的整整 100 年里，波动说偃旗息鼓、毫无进展与双折射现象引起的困惑不无关系。

18 世纪下半叶，随着光的干涉和衍射现象的发现，人们很自然地把光的这些行为与水波、声波来类比，又重温起波动说的优越性来，这使持微粒说的法兰西科学院的领袖们十分恼火。他们以科学院的名义向学术界征求对光的双折射现象的数学解释，并允应以有奖竞赛的形式公诸于世。希望这样做可以把复兴波动说的星星之火扑灭。此时有位叫马吕斯的工程师见到科学院有奖征文，不免跃跃欲试。他买了几块冰洲石回家，边试验，边计算。一天他算得头晕脑胀，见窗外对面是宏伟壮丽的卢森堡宫殿，明亮的玻璃窗上正映现出落日金色的圆轮。他便取过一块冰洲石放在眼睛前，按理说隔着冰洲石应该见到两个太阳的像，但这一次他只见到一个太阳的像。这又是为什么呢？他想弄清楚其中的奥秘。太阳很快地消失在地平线上，夜幕降临了。马吕斯借助于烛光继续实验，他用冰洲石观察由水面反射的烛光，发现在冰洲石里可以看到烛光有两个像。转动石块，较亮的像会变暗，较暗的像变亮。然而，当烛光入射水面的角度大于  $36^\circ$  时，其中一个像就会消失。马吕斯想准是晶体的方向性使一部分光通过而不让另一部分的光通过所引起的现象。再念头一转，这现象岂不是光的微粒说的有力佐证吗？只要假设光是一种橄榄形的，对于一扇竖门来说当然只有竖立的粒子可以通过，横卧的粒子被拒之门外了。马吕斯想到这里，欣喜不已，立即奋笔疾书把所见所想写成论文呈送到科学院。然后静候佳音。马吕斯后来果然因此得了奖。

马吕斯的新发现给了刚刚抬头的波动说当头一棒，无论是英国的托马斯·杨还是他的法国盟友菲涅耳都不能很好地解释这些现象。值得一提的是法国著名科学家阿拉果，幸亏他的热情扶持和帮助，才使这两位复兴波动说的干将没有因此而丧失信心。阿拉果是一位带有传奇色彩的人物，年轻时他因间谍嫌疑曾被捕入狱。出狱后又当过皇家天文台台长。1830 年法国发生革

命后，他拥护共和被选为议员，后来还出任海军大臣，他性格开朗，乐于助人，在电学和光学上都做出过重要贡献。

再说法国科学家菲涅耳在阿拉果的鼓励下，安下心来认真钻研，他俩在实验上又有了新的发现：当一束光射到冰洲石上，被折射成两束光。按理说这两束来自同一光源的光应该具有相干性。然而当这两束光经平面镜反射后相遇时，光屏上却并没有见到干涉条纹，这又是什么原因呢？这时候菲涅耳的脑中闪过一个念头，光会不会是横波？原来波有两种，媒质的运动方向与波的传播方向一致的波叫纵波，声波就是纵波，以前人们认为光波也是纵波。除了纵波以外，凡媒质的运动方向与波的传播方向垂直的波叫做横波，水的表面波以及琴弦上传送的振动波都是横波。横波和纵波一样也会发生干涉和衍射现象，然而当两列横波的振动平面互相垂直时，干涉就不会发生了。因此用横波可以说明这个新发现的奇异现象。就在这个时候，托马斯·杨也从英国给阿拉果来信表达同样的思想：“在波动学说中我们也可以用横振动来解释，这种横振动也是沿着半径方向传播而且速度也一样……”阿拉果见信后立即把杨的想法告诉了菲涅耳，菲涅耳闻言大喜，可谓心有灵犀一点通，他改用横波模型来思索问题，觉得思如潮涌，多日来萦绕在心头的困惑顿时烟消云散了。

对于横波，媒质的运动总是跟波的传播方向垂直，这并不意味着媒质总是在同一方向上运动。然而，如果媒质的运动明显地是在一个方向，例如竖直方向，我们说这个波是偏振波。所以偏振波是最简单的一种横波。非偏振的横波比较复杂，因为它是多种横向运动的混合。一般的可见光都是非偏振的横波，为了研究光的偏振现象要设法把在某个振面上的光分离出来。冰洲石就起到了这样的作用。一束非偏振的可见光束，经冰洲石分离后，分成两束偏振光，各以不同的方向和不同的速率透过晶体。由于这两束偏振光的振动平面垂直，所以它们相遇时不产生干涉现象。

由于冰洲石脆而易碎，又很难得到。1928年有位叫埃德温·兰德的大学毕业生发明了一种偏振片，能够从可见光束中分离出偏振光来。他把一种长链形分子埋置在柔软的塑料片中，再把塑料片绷紧，绷紧后的长链形分子会互相平行地排列整齐，因而对射入的光线产生完全相同的作用。这就是偏振片。如果你有两片偏振片就可以做这样的实验。

取两片电气石晶体薄片，取一片用它来观察太阳，若以光线方向为轴转动薄片，透光强度不变，但是，你若把两片偏振片重叠起来观察，并以光线方向为轴转动其中一片薄片，就会发现透光强度周期性地变化：从最强变到最弱。

因为偏振片中分子整齐的排列就像一道“木栅”，用第一片偏振片观察太阳时，只有与“木栅缝”同样方向的偏振光波才能通过片子，所以可以看见太阳。当将两片偏振片重叠在一起观察时，只有两片晶体的“栅缝”重合时，才能见到明亮的日光，转动一片晶体时，两条“栅缝”交叉就会挡去一部分日光，当这两条“栅缝”相互垂直时，光就全部被挡住了。这是一个很典型的偏振实验。

有趣的是经空气中微粒散射的光线，偏振程度要超过50%。如果我们用电气石的晶体薄片去观察晴朗的蓝天，大约50秒钟后，快速地把薄片转90°角，这时，你看的图形将在2~3秒钟内消失。这种奇妙的现象是奥地利矿物学家海丁格尔所发现的，称为海丁格尔刷子。

生物学家告诉我们，蜜蜂、蚂蚁、甲虫、果蝇等昆虫对太阳光的偏振比人类敏感得多。有报道说：在蜂箱上安放一块偏振片，只要改变偏振镜片的方位角，蜜蜂也会跟着改变它的活动方向，水里的鱼类、甲壳、溇虾的行动，也都与日光的偏振方向有着密切的关系。

## 光的干涉、衍射及偏振现象

1660年，格里马耳迪发现了光的衍射现象和双光束干涉现象。他在1666年出版的《光的物理学》一书中，描述了自己所做的实验。他将光束通过小孔引入暗室，在透过孔的光束中立一根细竿，细竿的影子落在白色的墙面上。结果，他发现细竿的影子比计算得出的几何影子宽了许多，并且该影与一个、二个，有时三个彩带相邻接。当光很强时，他还观察到彩带能够进入阴影的现象。他又用不透明的小圆板代替细竿，观察圆板的影子，结果发现，白墙上的亮区比几何亮区为大。格里马耳迪将光线在传播过程中绕过障碍物边缘的现象称为“衍射。”他还用心地做了双孔实验，即把带有两个相距很近的小孔的平板置于光的照射之下，就在孔后的白板上得到了两个互相重叠的小孔像，重叠的一些部分显出了光的强度的减弱，这实际是双光束干涉中出现的相消干涉。

胡克也观察到了衍射现象。他发现并研究了薄膜干涉的彩色条纹。波意耳在1663年独立地研究了薄膜色，他细心地记载了肥皂泡和玻璃球的干涉状况，认为彩色是由于光在被照面上发生变异形成的。

牛顿早期，以修改了的形式重复了格里马耳迪的实验，他认真地研究了胡克提出的薄膜彩色条纹。牛顿环的设计与干涉花样的分析，是牛顿在光学领域的三大成就之一。

牛顿取两块玻璃体，一是14英尺望远镜用的平凸透镜，另一是50英尺左右的望远镜用的大型双凸透镜，而在双凸透镜上放上平凸透镜，使其平面一边向下，这时慢慢地把它们压紧，使得圆环的中心陆续出现各种颜色，然后再把上面的玻璃慢慢提起，使之离开下面的玻璃体，于是这些颜色又在圆环中心相继消失。在压紧玻璃体时，在别的颜色中心最后现出的颜色，初次出现时看起来像是从周边到中心几乎均匀的色环，每压紧玻璃体时，这色环会逐渐变宽，直到新的颜色在其中心显出，而它就成为包在新色环周围的色环。再进一步压紧玻璃体时，这个环的直径会不断增大，而其周边的宽度则减少，直到另一新的颜色在最后一个色环的中心显出；如此继续下去，第三、第四、第五种以及跟着的别种颜色不断在中心显出，并成为包在最内层颜色外面的一组色环，最后一种颜色是黑点。反之，若是抬起上面的玻璃使其离开下面的透镜，色环的直径就会缩小，其周边的宽度则增大，直到其颜色陆续到达其中心，后来它们的宽度变得相当大，就会比以前更容易认出和识别它们的色种了。牛顿就用这种办法观察了它们的顺序和分量。

在透镜的接触点处形成透明中心点之后，接着出现的是蓝色、白色、黄色和红色，蓝色的量很小，以致无法在透镜所形成的环中认出它，紫色在环中也不易识别，但黄色与红色都相当丰富，看起来与白色的程度差不多，比蓝色要强四五倍。紧接着包围这些色环外面的色环的颜色次序是紫、蓝、绿、黄、红，这些颜色都很清晰鲜明，只是绿色的量很少，似乎比其它颜色显得模糊暗淡得多。在其余四种当中，紫色的量最少，蓝色又小于黄色与红色。第三组环的顺序仍是紫、蓝、绿、黄、红；其中紫色似乎比前一组环中的紫色略带些红色，绿色就显著多了，别的颜色也一样鲜明而丰满，例外的是黄色，但红色开始变淡了，更接近紫色。在此之后，是由绿色和红色组成的第四组色环。其中绿色十分鲜明丰富，绿环的一边微呈蓝色，另一边微呈黄色。但在第四组色环里，没有紫色，蓝色也几乎没有，黄色与红色也很不完全，

也不鲜明，以后各组色环越来越变得模糊不清了，到第七组环时，它们终于成为一片白色了。

牛顿测量了前六个黄色色环最亮的中心线的半径，发现其平方为一个由 1, 3, 5, 7, 9, 11 构成的算术级数，另一方面暗环半径为由偶数 2, 4, 6, 8, 10, 12 构成的算术级数。

牛顿是最早认识到光具有周期性的科学家，他知道并亲自做过衍射实验，用心地研究过牛顿环干涉花样，这些本来是光的波动说的最好证明。他也清楚地看到波动说可以怎样来解释这些现象，但由于他坚持认为光是通过空间的高速前进的粒子流，所以在解释牛顿环花样时，他提出了所谓的“阵发理论”，每条光线在通过任何折射面时都要进入某种短暂的组态或状态，这种状态在光线行进过程中每隔一定时间又复原，并在每次复原时倾向于使光线容易透过下一个折射面，而在两次复原之间则容易被下一个折射面所反射。牛顿还提出了所谓的光的“阵发的长度”，其实它就是我们现在所说的光波波长。他在这里，亲临真理边沿，立刻就可获得光具有波动性的重大发现。但十分可惜，他在承认这些重要事实和现象之后，却拒绝用波动说来说明光的本性。

1669 年，丹麦人巴塞林发现，一块来自冰岛的矿石——冰洲石晶体，具有一种特殊的性质：当一束光线射向这种晶体时，晶体中的折射光线变为两束，这就是光的双折射现象。巴塞林使一束光线垂直于冰洲石晶体表面入射，发现晶体双折射中的一束光线遵守斯涅耳定律，照直射向晶体的另一平行表面后直射出去，这束折射光线被他称为寻常光线或 O 光。另一束折射光线不与晶面垂直，偏折了一个微小的角度，且它不在入射线与晶面法线所确定的平面内，不遵守斯涅耳定律，被巴塞林称为非常光线或 e 光，它经晶体第二表面出射后也平行于入射光线。若使晶体以入射光线为轴转动，则寻常光线在屏上的光点位置不变，非常光的光点绕着它旋转。

1678 年，惠更斯发现，双折射后的寻常光线与非常光线在垂直于其传播方向的某方向上与其它方向有不同的性质，即发现了双折射晶体中的光线具有偏振性。

1808 年，法国工程师、物理学家马吕斯发现了反射光的偏振及平面偏振光通过晶体后的光强变化规律。这一年夏天的一个傍晚，他通过冰洲石晶体观看被玻璃窗反射的太阳像时惊奇地发现：当晶体在某位置时，太阳的双像之一消失了。他试图用光在大气中运行时发生某种变形来解释这一现象。可是，当天晚上，他又发现蜡烛光以  $36^\circ$  角落在水面反射时，用冰洲石晶体也会看到类似的现象；在其它情况下，两个蜡烛火焰像明亮程度不同；当冰洲石晶体绕着水面的反射光方向转动时，两个火焰像呈现出交替的明暗变化。

其实，马吕斯用冰洲石晶体去观察的被玻璃或水面反射的太阳或蜡烛光，是平面偏振光。它通过冰洲石晶体后发生双折射，O 光与 e 光的振幅分别为  $A_o = A \sin \theta$ ， $A_e = A \cos \theta$ ，即振幅随着入射平面偏振光光

矢量与晶体轴的夹角呈正弦或余弦变化。通常  $\theta = K \cdot \frac{\pi}{2}$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ )，

所以可以看到 O 光和 e 光分别成的两个像，在  $\theta = (2k+1) \frac{\pi}{4}$  时，两个像明

亮程度不等。特殊情况  $\theta = K \cdot \frac{\pi}{2}$  时，即入射于晶体的平面偏振光的光矢量

与晶体光轴垂直或平行时，有  $A_o = 0$  或  $A_e = 0$ ，故可见双像之一消失了。

马吕斯对寻常光与非常光的反射作了进一步研究。他发现：如果从冰洲石晶体出来的这两束光同时以  $36^\circ$  角落在水面上，寻常光部分地被反射，非常光全然不被反射，不被反射的光折射后进入水中。他由此引出了光的“偏振”这一重要术语。他还证明了非常光与寻常光的“偏振”方位互相垂直。他指出折射光是部分偏振的，其偏振状况与反射光的偏振状况恰成相反的分

布。1811年，英国科学家布儒斯特发现，光线射向两种介质界面，当反射光线与折射光线恰好垂直时，反射光为平面偏振光。这就是反射起偏的普遍规律——布儒斯特定律。结合折射正弦定则，他得出这一定律的数学表达式。

$$\operatorname{tg} \sin B = \frac{n_2}{n_1}$$

即一条光线对介质界面的入射角的正切，恰好等于两种介质相对折射率时，反射光为平面偏振光。

同年，法国的阿拉果发现：以偏振化了的白光射向晶体，透过晶体的光在屏上呈现了彩色条纹。这就是色偏振现象。

## 光的干涉原理

1800年，托马斯·杨发表了《在声和光方面的实验与问题》的论文，认为光与声都是波，光是以太介质中传播的纵振动，不同颜色的光与不同频率的声音是相类似的。他在分析了水波的叠加现象之后说，在声波叠加的情况下，可以产生的加强和减弱，出现复合声调和拍频。尤其重要的是，他提出了“干涉”的概念。

1801年，他在英国皇家学会上宣读了关于薄膜色的论文。论文进一步扩充和发展了惠更斯的波动说，明确地提出了光具有频率和波长，完善了光波的概念。他比较圆满地解释了牛顿环的干涉现象，认为“当有不同起源的两个振动运动或者完全相同，或者在方向很接近时，那么它们的共同作用等于它们每一个振动单独所发生的作用之和。”这在实际上已经提出了光的相干条件及干涉原理。

这一年，他在发表于《哲学会报》上的论文中，全面地阐述了干涉原理：“同一束光的两不同部分以不同的路径，要么完全一样地、要么在方向上十分接近地进入眼睛，在光线的路程差是某个长度的整数倍的地方，光就被加强，而在干涉区域中间状态，光将最强；对于不同颜色的光束来说，这个长度是不同的。”

1802年，托马斯·杨在英国皇家学会讲演时，引用自己所做的双孔（双缝）干涉实验。他说：“为使这两部分光在屏幕上引起的效果叠加起来，需要使来自同一光源、经过不同路径的光到达同一区域，而不使其相离散，如有离散，也能根据回折、反射或折射把光从一方或从两方重合起来，将它们的效果叠加。但是，最简单的办法是将平行光通过两个相距很近的针孔。针孔作为新的光源，从那里发出了球面光波，照射到屏幕上，光的暗影对称地向两侧散开。然而，屏幕与小孔的距离越远，从小孔射来的光就越按相同的角度延伸与扩张。同时，小孔间的距离越近，从它们射出的光就越按比例扩张，这两部分光叠合后，在屏幕上正对两小孔连线的中心处最明亮。两侧部分，光从两个小孔到达各点有一定的路程差，若路程差是光波波长的1倍、2倍、3倍……，则屏幕上的这些地方为亮区，并且相邻的亮区间的距离相等。另

方  
面，介于亮区中间的暗区，则对应于路程差为光波波长的 $\frac{1}{2}$ 倍、 $\frac{1}{2}$ 倍、 $\frac{1}{2}$ 倍…的地方。”这就是著名的杨氏双孔（双缝）实验。

托马斯·杨用红光照射双孔，观察通过双孔后的光在屏幕上形成的光带。他遮住一个针孔时，屏上只有一个红的光强均匀的光点；当两个孔均不遮掩时，屏上两个光点重合区出现了红黑交替的光带，红带相当明亮，其宽度相等，同时，各黑带的宽度也相等，并且等于红带的宽度。

托马斯·杨用自己推导出来的相消干涉条件 $d \sin \theta = (2k-1) \frac{\lambda}{2}$ 及 $\sin \theta \approx \frac{y}{r_0}$ ，导出了光波波长 $\lambda = \frac{d}{r_0} y$ ，其中d为双孔间的距离； $r_0$ 为双孔与屏幕间的距离； $y$ 是相邻两暗（或亮）条的间距。

根据各种实验比较，组成极端红光的波长，在空气中应为 $1/36000$ 英寸，极端紫光应为 $1/60000$ 英寸，折合现在的

相应波长，即红光为  $7100\text{\AA}$ 紫光为  $4200\text{\AA}$ 。这是人类历史上第一次用实验方法准确测得的可见光的波长。在光学发展史中是具有划时代意义的。

托马斯·杨还将干涉原理应用于解释衍射现象。1803年11月24日，他在讲演中提到了光的干涉的一般法则的实验验证。对随着影子出现的有色边缘进行若干次实验，便发现关于光的两部分的一般法则，有色边缘是根据两部分光的干涉形成的。

第一个实验将木板套窗打开一个孔，在上面糊上一张厚纸，在厚纸上用针尖钻个孔，为了观察方便起见，在木板套窗外的一个适当位置放一个小镜子，从那里反射的太阳光按水平方向射到对面的墙壁上，并且将  $1/30$  英寸细长纸片插入太阳光中观察。映在墙壁上或放在各种不同距离上的其它厚纸的影子，除了阴影的两侧边缘之外，那一影子的自身也同样被平行的边缘所分割，其边缘非常细，它的数值随观察影子的距离而异，影子的中心部分总是呈白色。这些边缘是通过细纸片的每个侧面的光的两部分合成的结果，并且与其说是折射不如说是衍射。

第二个实验是有直角的交接处的物体形成影子的时候，在通常的外部边缘上，可以看到增加两三种颜色的变化。这些，从角的平分线开始向两侧排列，向着角平分线以凸状弯曲着。并且离角平分线越远越细。这些边缘也是在物体两侧对影子方向直接弯曲的光叠加的结果。

托马斯·杨的实验一是细竿衍射，实验二是角衍射。1883年当古伊与1885年维恩在光以大角度斜射时，直接观察到了边界波；托马斯·杨关于衍射中边界波的观念得到了证实。

托马斯·杨对光的本性又作了进一步的争辩，他说：“固执于牛顿的光的理论或现代光学专家的不太普遍的假说的人们，最好是对任何事物都要从他的自身的原理出发，提出实验的说明。并且，如果他的这种努力失败的话，他应该承认这些事实，至少应该停止目的在于反对这些事实及其所遵循的理论体系而发表的演讲。”

从上述实验或计算可以推论，平行光在传播方向上的一定距离处，具有相反的性质，在叠加时，互相中和或互相抵消，光也就消失了。而且，还可以推论，这些性质对通过同一介质的相干光来说，在离相干光源为某距离的连续的同心面上交替变化。由测定的一致性与同类现象的相似性，可以下结论说，这些间隔同薄膜彩色条纹的排列形式有关系。当然，光在密的介质中比在疏的介质中进行得更缓慢。而它同时也说明，这不是折射朝向密的介质的引力的结果。支持光的粒子说的人们，必须判断这一理由的关键，即哪一方面最弱这一点。但我们知道，声音在同心的球面上扩大，乐音互相中和，根据音的不同，由在不同的某一等间隔中，相继而起的相反性质所形成。所以得出声音同光的性质之间有非常相似的结论，也是完全可以的。

托马斯·杨还用光由光疏介质射向光密介质界面时，反射光产生半波损失的观点，补充了他对薄膜的彩色条纹的解释。

他在解释光的偏振时，遇到了特殊的困难。这是由于马吕斯和布儒斯特在光的偏振方面取得重大研究成果后，顽固坚持牛顿的微粒说造成的。本来，偏振现象是横波的特性，对偏振现象研究越深入就越有利于光的波动理论。这时，只要将惠更斯与托马斯·杨的“纵波”改成“横波”，那末其它问题就迎刃而解了。但是，马吕斯和布儒斯特在波动理论尚未做出这一改变之前，强烈的反对波动理论。托马斯·杨没有隐匿困难，更没有被困难所吓倒，1811

年，他在给马吕斯的信中说：“你的实验证明了我所采用的理论不足，但是这些实验并没有证明它是错的”，六年后，他觉察到，若将声波看成与水波类似的横渡，那末这个困难就可以得到较好的解决。1817年1月12日，他在写给阿拉果的信中说：“根据这个学说的原理，所有波都象声波一样是通过均匀介质以同心球面单独传播，在径向方向上只有粒子的前进或后退运动，以及伴随它们的凝聚与稀疏。显然波动说可以解释横向振动也在径向方向上以相等速度传播，但粒子的运动是在相对于径向的某个恒定方向上，而这就是偏振。”这样，托马斯·杨根据波动理论对偏振现象作了最初的解释。其后，菲涅耳与阿拉果更充分地验证并解释了它。

托马斯·杨是英国一位多才多艺的科学家。他幼年聪明好学，贪婪地阅读各种书籍，无论是古典的、天文的或科学的著作，他都不放过。19岁时开始学医，曾获医学博士学位。23岁在伦敦行医。1793年，发表了关于生理光学的论文《对视觉过程的观察》，论文讨论了人眼的调节作用，指出人眼之所以能够观察远近不同的物体，是依靠眼内水晶体曲率半径的变化。这实际上指明了人眼是可变焦距系统。他还认为，人眼视网膜有三种神经纤维分别对红、黄、蓝三种颜色敏感，并以此说明人眼的色盲和对颜色的辨别能力。1801年，他接受了英国皇家研究院的自然哲学教授职务，第二年被委任为皇家研究院的外事秘书。在科学研究中，他不迷信权威，敢于创新，他的这种精神是永远值得称颂的。

## 惠更斯—菲涅耳原理

1815年菲涅耳在不知道托马斯·杨已经做了实验并提出干涉原理的情况下，将一根细直而光滑的线放在点光源发出的光束中，在屏上看到了彩色条纹。他精心地准确地在屏上测定了从光束的轴线到所产生的条纹的距离。他注意到，当通过细线一边的光在到达屏之前被别的物体挡住时，屏上影内的光带就消失了。这个实验正在将菲涅耳引向发现干涉原理。许多科学家不承认这种现象是由干涉造成的，并按当时流行的错误的衍射理论进行说明。菲涅耳为了消除人们的反对意见，设计了双面反射镜，这种装置是由两块镜面夹角稍微小于 $180^\circ$ 的平面金属反射镜接合而成，利用双面反射镜的两部分对某小光源的反射，得到两束相干光，产生了清晰的干涉条纹。

实验中，小光源发出的光与两个小孔或不透明的障碍物的边缘无关，因而完全避开了衍射。实验的结果，充分地肯定了光的干涉现象的存在，给那些不承认和怀疑光的干涉现象的人们极为有力的回答。这是菲涅耳在光学方面的第一项重大贡献。

阿拉果仔细地研究了双面反射镜的干涉问题，并且对菲涅耳的思想观点给予积极热情的支持。他是法国学术界第一位改信光的波动理论的科学家。

起初，由于菲涅耳在处理干涉与衍射问题时，在数学方面的一些假设不够好，所以属于严密数学派的拉普拉斯与泊松等著名人物，都不屑于考虑他的波动理论。但他毫不气馁，权威们的歧视、压制激励了他，使他奋发上进，做出了艰苦而巨大的努力。他在实验与理论研究方面，大量地运用了数学分析方法，进行了严密的数学推导和论证，并取得了重大进展。

1815年10月，菲涅耳向法国科学院提交了一篇关于衍射的研究报告。报告中，他提出了研究分析衍射现象的惠更斯—菲涅耳原理。其内容如下：

波阵面 $S$ 在空间任意点 $P$ 所引起的振动，是构成 $S$ 的所有波面元 $ds$ 在 $P$ 点引起的元振动的矢量和， $ds$ 和 $P$ 点引起的元振动的振幅，正比于它的面积，反比于它到 $P$ 点的距离，且随衍射角（ $ds$ 的法线与衍射光线的夹角）的增大而缓慢减小； $ds$ 在 $P$ 点引起的元振动的位相由 $ds$ 的位相及 $ds$ 到 $P$ 点的距离决定。它的数学表达式写为

$$\Psi = \int d\Psi = c \int \frac{K(\theta)}{r} \cos\left(Wt - \frac{2\pi}{\lambda}r\right) ds$$

其中 $\Psi$ 为光波在空间任意点 $P$ 引起的合振动， $d\Psi$ 是 $P$ 点的元振动， $\theta$ 为衍射角， $K(\theta)$ 是随 $\theta$ 增大而缓慢减小的函数， $r$ 为波面元 $ds$ 到 $P$ 点的距离。

对这一原理的叙述中，我们可以清楚地看到，菲涅耳继承和发扬了惠更斯原理中关于波面与子波的思想，赋予波以频率、振幅和位相的特征，进一步完善了子波的概念，同时他扬弃了惠更斯的包络面，用子波的叠加来解决衍射中空间点处的振动问题，即用光的干涉理论补充和发展了惠更斯原理。他从根本上指明了，一切衍射条纹本质上都是由于衍射光相干形成的这样一个最基本的事实。从而菲涅耳将光的干涉与衍射理论提高到了一个新的水平。这一原理的提出，是菲涅耳在光学方面的第二项重大贡献。

这一年中，菲涅耳提出了环形半波带法，在解决光源到障碍物与障碍物到屏两个距离中至少有一个为有限远的菲涅耳型衍射方面取得了新的突破。

这种方法，是以圆孔轴线上 $P$ 点为基准点，将圆孔露出的球冠形波阵面

以P点到球冠顶点的距离 $r_0$ 及 $r_1 = r_0 + \frac{1}{2}$  ,  $r_2 = r_0 + 2 \cdot \frac{1}{2}$  ,  $r_3 = r_0 + 3 \cdot \frac{1}{2}$  ,

..... $r_R = r_0 + k \cdot \frac{1}{2}$  为半径, 划分成R个球带 (R = 1时为小球冠), 每个球

带称为半波带, 将它看成惠更斯—菲涅耳原理中波面元。

菲涅耳从波动理论出发, 在实验中解决了光的直线传播问题, 也就自然地解决了影的生成原理, 令人信服地回答了惠更斯的波动说所不能圆满解释的一个难题。与此同时, 菲涅耳还指出光的干涉与衍射现象之所以比声音的干涉与衍射现象少见, 是因为光波的波长很短导致的。菲涅耳的环形半波带法, 是他在光学方面的第三项重大贡献。

1817年, 阿拉果将托马斯·杨给自己的信中所谈到的关于光是横波的设计, 迅速地转告给菲涅耳。菲涅耳很快地以光是横波的设计为基础, 导出了光的反射、折射的振幅比公式——菲涅耳公式, 其形式与后来人们在经典电动力学中所导出的公式完全一致。用菲涅耳公式, 可以比较准确地计算光在反射与折射时的能量分配问题, 可以很好地解释光的反射与折射起偏问题, 解释光由光密介质射向光疏介质时的内全反射现象, 以及光由光疏介质射向光密介质时反射光的半波损失问题等等。

菲涅耳公式是现代薄膜光学中极为重要的基本公式之一, 它在理论上和实践方面都被广泛地应用着。这一公式的建立, 是菲涅耳在光学方面的第四项重大贡献。

1818年, 在巴黎, 法国科学院举办了一次规模盛大的科学竞赛。竞赛的题目是: (1) 利用精确的实验来确定光线的衍射效应; (2) 从这些实验中, 用数学归纳法推导出光线通过物体附近时的运动情况。菲涅耳向法国科学院呈送了一篇论文, 他从光是横波出发, 圆满地解释了光的偏振现象, 用环形半波带法定量地计算了光源S到圆孔及圆板为有限距离时的衍射花纹的位置与形状。但是, 评奖委员会成员, 大数学家泊松对他进行了责难, 泊松说按照菲涅耳的理论与计算分析方法, 圆盘衍射花样的中心应该是一个亮斑。并武断地指出, 得出这样的结论是十分荒谬的。他宣称, 他以这一点驳倒了光的波动理论。菲涅耳与阿拉果毅然地迎接了泊松的挑战, 他俩表演了精彩的圆板衍射实验, 在同心圆环状的衍射花样中心确实出现了一个亮斑。后来, 人们称菲涅耳型圆板衍射花样的中心亮斑为“泊松亮斑。”它十分令人信服地证明了, 光线完全可以绕到障碍物的几何阴影中去。光的波动理论在这场竞赛中, 赢得了新的辉煌的胜利。

在杨氏双孔(双缝)干涉、菲涅耳双面反射镜干涉与泊松亮斑的实验面前, 微粒说的统治动摇了, 许多人放弃了它并开始相信光的波动理论了。然而, 波动理论还缺少光是横波的实验证明, 因此在解释光的偏振现象方面还存在着相当大的困难。

1819年, 菲涅耳与阿拉果做了验证光是横波实验。他们将单色光射向杨氏双缝, 缝后的两条光路上各置一个起偏器 $N_1$ 、 $N_2$ , 在其后的屏上观察干涉条纹。当 $N_1$ 、 $N_2$ 的允许面一致时, 屏上出现清晰的干涉条纹; 当以光线为轴转动 $N_2$ 时, 屏上条纹逐渐模糊; 当 $N_2$ 转到其允许面与 $N_1$ 垂直时, 屏上干涉花样完全消失。这一实验有力地说明了两个振动面互相垂直的振动是不能

实现干涉的，令人信服地验证了光是横波。完成光是横波的理论实验，是菲涅耳在光学方面的第五项重大贡献。

菲涅耳是法国一位年轻有为的工程师与物理学家，出生于诺曼底，学生时代进步很慢，身体很虚弱。16岁时，上了巴黎的综合技术学校；之后，就读于道路与桥梁学校。他当了八年工程师。政治上，他是法国的保皇党员，曾参加反对拿破仑从厄尔伯岛回国的军队组织，因此他丢掉了工程师的职位。在路易十八复位时，菲涅耳又当上了工程师。1815年起，他开始研究光学。他在短暂而光辉的一生中，以惊人的毅力、勇气和效率，做了大量的光学实验，尤其在1815~1820年间，他以实验为依据，建立了波动光学的数学理论与计算体系，解决了光的波动理论所遇到的一个又一个困难，使波动光学冲破了重重阻力，向前发展。

菲涅耳在科学研究中，不怕歧视与压制，在权威的错误意见面前，毫不畏缩，他将外界对他的批评与责难变为自己奋发上进的动力。他进行科学研究完全依靠自己微薄的工资来维持，直到去世前，才还清了债务，成为科学院院士。菲涅耳是第一位在牛顿物理学中打开缺口的科学家。被人们誉为“物理光学的缔造者”。

## 光是波还是粒的争论

当太阳的光辉把大地照亮，我们才能够欣赏五彩缤纷的世界，赞美千姿百态的大自然。没有光，人们将陷入可怕的、永恒的黑暗之中。因此，什么是光，长期以来就是人们非常关心的问题。为了获得对光的本性的认识，从17世纪后半叶开始，经历了几百年的激烈争论。

科学巨匠牛顿也是光学大师，他在总结前人经验和自己实践的基础上，在17世纪末发表了科学史上第一部完整的光学著作——《光学》。他认为：光是由一颗颗像小弹丸一样的机械微粒组成的粒子流，这些光粒子进入人眼睛，冲击视网膜，就引起视觉。这就是光的微粒说。

牛顿用微粒说轻而易举地解释了光的直进、反射和折射现象。发光物体发出的光粒子都是沿直线高速运动的，所以光线必然沿直线前进。光粒子是弹性小球，遵循力学规律，碰到光滑界面会发生反弹，形成反射现象，就像力学中理想刚球被弹性表面弹回一样。

对于折射现象，牛顿认为，这是由于光粒子到达两种媒质界面的时候，受到媒质的垂直于界面方向的吸引，使得粒子垂直于界面方向的前进速度发生改变造成的。为了说明进入水中的光线折向法线，牛顿假设光在水中的速度大于在空气中的速度。牛顿的微粒说由于能够简单、通俗地解释光学现象，很快获得了人们的承认和支持。

但是，微粒说不是万能的。一些当时已知的光学现象，比如在空间交叉的几束光线能够互不干扰地独立前进；光线不是永远走直线，它可以绕过障碍物的边缘拐弯前进等，微粒说就无法解释。

为了解释这些现象，荷兰物理学家惠更斯提出和微粒说相对立的波动说。他把光和声波、水波相类比，认为光是一种机械波，由发光物体引起，依靠一种特殊的弹性媒质来传播。这一种学说，既解释了几束光线相遇不会发生干扰的现象，又解释了光的反射和折射现象。

在解释折射现象的时候，惠更斯同牛顿相反，他假设光在水中的速度小于在空气中的速度。

波动说的创立，打破了微粒说“一统天下”的局面，拉开了光究竟是粒子还是波动的激烈争论的战幕。

但是尽管波动说可以解释不少光学现象，由于它很不完善，解释不了人们最熟悉的光的直进和颜色起源等问题，所以没有得到普遍支持。再说，受当时实验条件的限制，不能测出水中的光速，无法判断牛顿和惠更斯的假设谁对谁错。牛顿在学术界享有崇高的声望，他的拥护者又利用他的权威对波动说横加指责，全盘否定，以致波动说在很长时间内几乎销声匿迹，微粒说盛极一时，在光学界统治了近一个世纪。

进入19世纪以后，在以往争论中被微粒说压得奄奄一息的波动说，又活跃了起来。崭新的实验事实，接二连三地暴露了微粒说的无能和错误，而波动说却应付自如。

干涉现象是波的一种特性。两个或者两个以上具有相同频率、相同振动方向和恒定相位差的波，在空间相遇，在交叠区域中，有的地方振动加强，有的地方振动减弱，形成特殊的干涉花样。如果光是一种波，也一定会产生干涉现象。

为了证明这一点，杨氏在暗室里做了有名的干涉实验：取甲、乙、丙三

块光屏，甲屏中央有两个离得很近的小圆孔，把它们立在桌上，让太阳光通过甲屏小孔照射到乙屏的两个小孔上，丙屏上立刻出现了亮暗交替的彩色干涉条纹。丙屏上的条纹是乙屏的两个小孔射出的两束光发生干涉的结果。甲、乙屏的设置就是为了使乙屏两个小孔射出的光频率相同，相位差恒定。至于彩色的出现，是因为太阳光由各种颜色的光组成，各种色光形成的亮暗条纹的位置不同的缘故。杨氏实验的成功，证明了光确实是一种波，它只有用波动说才能解释，微粒说就解释不了。

给微粒说沉重打击的第二个实验，是光的衍射实验。波在传播过程中可以绕过障碍物的现象叫做衍射现象，它也是波的基本特征之一。比如，把门窗打开一条小缝，屋里各处都可以听到室外传来的声音；湖面上水波遇到障碍物，能够绕过障碍物的边缘传到后面去，这是声波和水波的衍射现象。光如果是一种波，它也一定会发生衍射现象。

在不透光的屏的中央，开一个孔径可以调整的圆孔，再在孔的后面放一个光屏，让光通过比较大的圆孔，就可以看到光沿着直线传播，在光屏上就得到一个亮度均匀的光斑。逐渐缩小圆孔的孔径，光斑也就随着减小。但是当圆孔直径缩小到 10 微米左右，光斑不但不跟着缩小，反而变大，光斑的亮度也不均匀，而是变成一系列明暗相间的圆环。这种光绕过小圆孔的边缘而向外扩展的现象，叫做光的衍射。在微粒说看来，光的衍射是不可理解的。

给微粒说以致命打击的，是光速的精确测定。1850 年，傅科用高速旋转镜的方法，精确地测出了光在水中的速度只有在空气中速度的  $3/4$ ，有力地证明了微粒说的错误和波动说的正确。

19 世纪 60 年代，麦克斯韦建立了完整的电磁场理论，预言电磁波的存在。他还指出光也是一种电磁现象，光波是一种波长比较短的电磁波。这就是光的电磁说。到 80 年代，赫兹通过实验证实了电磁波的存在，并且证明电磁波确实同光一样，能够产生反射、折射、干涉、衍射和偏振等现象。人们利用光的电磁说，对于以前发现的各种光学现象，都做出了圆满的解释。光的电磁理论的建立，使波动说锦上添花。

正当波动说欢庆胜利的时候，意外的事情发生了。这就是否定了“以太”的存在和发现了光电效应。

波动说认为，光是依靠充满于整个空间的连续媒质做弹性机械振动传播的。这种媒质，当时科学家给它起了个名字，叫做“以太”。为了验证“以太”是否存在，1887 年，美国物理学家迈克尔孙和美国化学家、物理学家莫雷使用当时最精密的仪器，设计了一个精巧的实验。结果证明，地球周围根本不存在什么“以太”。没有“以太”，光波或者电磁波又怎么传播呢？

面对这一个波动说难以克服的困难，微粒说倒是毫不费力的。因为按照微粒说，光粒子流从光源发出以后，可以在空间独来独往，不用依赖任何媒质。

光电效应的发现，波动说更无法解释。光电效应是物质在光的照射下，从表面释放出电子的现象。所释放的电子叫做光电子。比如，在验电器上安装一块擦得很亮的锌板，并且使它带负电，验电器的指针张开一个角度，然后用紫外线照射锌板，验电器的指针立刻合拢，表示锌板所带的负电荷已经释放出来。如果用可见光来照射，无论光多强，照射时间多长，都不可能使锌板释放出光电子。

这个现象，还有其他的一些现象，从波动说的观点来看，都是没法理解

的。因为按照波动理论，无论什么频率的光，只要强度很大，照射到金属板上，供给电子脱离金属板的能量，都应当有光电子飞出。

爱因斯坦独具慧眼，洞察光的本性，调停了这场旷日持久的论战。他创立的光量子理论，虽然复活了微粒说，但是没有抛弃波动说，而是把两者巧妙地综合在一起。

爱因斯坦辩证地指出：光——既是波又是微粒，是连续的又是不连续的，自然界喜欢矛盾……这一思想充分体现在他的光量子理论的两个基本方程  $e=h\nu$  和  $p=h/\lambda$  中。 $h$  是普朗克常数， $e$  和  $P$  分别是表示光的粒子特征的能量和动量， $\nu$  和  $\lambda$  分别是表示光的波动特征的频率和波长，通过  $h$ ，把粒子和波动联系在一起了。

当然，这里的微粒和波动，已经不是机械的微粒和机械的波动了。正是在这个新的意义上，对于光来说，波动和微粒是平起平坐、互为补充的。各种各样的光学现象，有的可以用波动来说明，有的必须用微粒来解释。光是波动性和粒子性的对立统一，具有波粒二象性。这就是到现在为止人们对光的本性的科学认识。

## 光速是如何测量的

在 17 世纪以前，人们都以为光的传播不需要时间，因为无论距离多远，只要一发光就立刻可以看到它。但是科学实验的始祖伽利略认为，光的传播和声音一样，要花费时间。1607 年，他曾经尝试用实验来测定光速，这在科学史上是第一次。

夜间，伽利略和他的助手面对面地站在两个相距 1 公里的山头 A 和 B 上，各带一只校得同样准确的钟，伽利略的手里还提着一盏遮了罩子的提灯。

实验开始的时候，伽利略打开灯罩，记下发光的时刻；助手根据他自己的钟记下看到光的时刻。从两个时刻的差，就可以得到光通过距离  $l$  和所用的时间  $t$ 。

从理论上讲，光的速度  $C = \frac{l}{t}$ 。但是实验失败了，因为光速非常大，光从 A 传到 B 所用的时间极短，比两只钟的误差还要小得多。

伽利略对实验做了改进，他让助手拿一块大平面镜站在 B 山头上，自己提着灯，带着钟站在 A 山头上。实验开始的时候，他打开灯罩，记下发光时刻，当看到光从平面镜反射回来的时候，再看一下钟，这样就记下了光通过  $2l$  距离所用的时间  $t$ 。从理论上讲，这个实验用了同一只钟，光走过的路程也长

了一倍，应该能够比较准确地测得光速  $C = \frac{2l}{t}$ 。但是实验仍旧失败了，原因还是光速实在太快了。

伽利略虽然初试受挫，但他发明了望远镜，观察了木星和它的几颗主要卫星，还说过，利用木星的卫星时常消失可以用来做黄径的测量，这些工作使一位后来的科学家受到了启发，并用这种方法证明了光速是有限的。此人就是丹麦青年科学家罗默。罗默生于奥尔胡斯，在哥本哈根受过教育，后来移居巴黎。在罗默来巴黎的 30 年前，意大利天文学家卡西尼应路易十四聘请也来到巴黎，他对木星系进行了长期系统的观察和研究。他告诉人们，木星和地球一样也是围绕着太阳运行的行星，但它绕太阳运行的周期是 12 年。在它的周围有 12 颗卫星，其中有 4 颗卫星特别亮，地球上的人借助于望远镜就可以看清楚它们的位置。由于这些卫星绕木星运行，隔一段时间就会被木星遮食一次，其中最近木星的那颗卫星二次被木星遮食的平均时间间隔为 42 小时 28 分 16 秒。罗默在仔细观察和测量之后发现，这个时间间隔在一年之内的各个时间里并不是完全相同的，并且当木星的视角变小时，这个时间间隔要大于平均值。

1676 年 9 月，罗默向巴黎科学院宣布，原来预计 11 月 9 日上午 5 点 25 分 45 秒发生的木卫食将推迟 10 分钟。巴黎天文台的天文学家们虽然怀疑罗默的神秘预言，但还是作了观测并证实了木卫食的推迟。11 月 22 日罗默在解释这个现象时说，这是因为光穿越地球的轨道需要时间，最长时间可达 22 分钟。后来惠更斯利用罗默的数据和地球轨道直径的数据，第一次计算出光速为  $2 \times 10^8$  米/秒。

1681 年罗默被克利斯汀五世召回丹麦，担任了丹麦皇家学会天文学家，此后人们就不知道他的工作又有什么新的进展，他留下的观测资料也在 1728 年哥本哈根城的大火之中烧为灰烬。直到 18 世纪的时候，他的理论才被一位

英国格林尼治天文台的天文学家、牛津大学教授布喇德雷以意料不到的方式所证实。

1928年9月某一天，布喇德雷教授与同事乘船沿泰晤士河航行。教授站在船的甲板上，望着桅杆上不时在改变方向的风标，十分奇怪，难道风向会这样不停地改变吗？一位水手向他解释说，这是船在改变航向，风向并没有变。这个回答启发了教授，他立刻想到，既然船的航行会改变人对风向的观察，那么地球上的人，他看到的光传播方向也会因为地球的运动而有所改变。于是他把这个新的发现结合到自己的研究工作中来，使一个困惑多时的难题迎刃而解了。

原来教授在观测一颗星的视差时，惊奇地发现遥远的星体都以一年为周期在天球上画出一个椭圆。他一直无法解释这种现象，现在他明白了，这就是“光行差”现象。由遥远的恒星S传向地球的光微粒类似于垂直下落的雨滴，当我们向前奔跑时，觉得雨滴是倾斜地向我们飞来。同样的道理，地面上的望远镜被地球带着向前运动，为了使光微粒能恰好穿过镜筒被观察者看到，就必须让镜筒向前倾斜一个合适的角度，所以看起来恒星的位置在S'方向。一年内，观察者在地球轨道的不同位置上观察这颗恒星，就可以看到它的位置S'在天球上兜了一个小圈子。

显然，当观察者通过倾斜的镜筒观察到恒星的光时，说明它的倾角的正切

函数恰好等于地球的运行速度与光速之比 $\text{tg} = \frac{V}{C}$ 。这样只要已知倾角和地球

的运行速度就可以求出光速。利用这种方法求得的光速为 $3.03 \times 10^8$ 米/秒，比惠更斯算得的值又前进了一步。用天文学方法测定光速虽然取得了成功，但物理学家们并没有因此认为这个光速值已经相当精确了。因为这种方法尽管在原理上无可挑剔，但计算上还得依赖一些天文数据，而这些数据本身就谈不上有很高的精确度。所以到了19世纪，科学家们开始研讨在地面上测定光速的可能性。由于光速极大，因此测量必须用到很长的距离或者很短的时间。对地面观测来说，精确测定很短的时间间隔是问题的关键。地面上构思巧妙的光速测定实验都是围绕这个主题来设计的。在这方面作出开拓性工作的人是法国科学家菲索和傅科。说来也巧，这两位大师都在1819年出生于巴黎，年轻时又不约而同地选修了物理专业，并且还成为初期研究的合作伙伴。菲索出生于豪富的家庭，继承了大笔遗产，他本可以用这大笔钱玩乐享受，但他并没有这样做，而把自己的财产用来作为研究经费。1849年他首先在地面上成功地用“齿轮法”完成了光速测量。菲索让光源发出的光从转动齿轮的间隙中通过，再通过透镜变成平行光束，这光束聚焦于安装在一定距离的平面镜上，被平面镜反射后再沿着相反的方向返回齿轮，进入观察者的眼睛。

当齿轮以某一速度转动时，观察者将看不到返回的光，这是因为光线从齿轮到达平面镜再回到齿轮时，恰好为下一个移来的齿所遮蔽，倘若使轮的转速增加1倍，光点又重新被看到了，因为返回的光恰好穿过下一个齿缝。

设 轮 的

齿数为n，轮在每秒内的转速为N，那么光往返一次所需时间 $t = \frac{1}{2nN}$ ，如果

光速为C，齿轮与平面镜间的距离为l，那么，

$t = \frac{2l}{C}$   $C = 4\pi nNl$ 。菲索的实验是在巴黎市郊相距8633米的絮伦和蒙马特里之间进行的。齿轮的齿数是720个，计算光速为313,300公里/秒。

1850年，法国物理学家傅科设计了一面旋转的镜子，让它用一定的速度转动，使它在光线发出并且从一面静止的镜子反射回来的这段时间里，刚好旋转一圈。这样，能够准确地测得光线来回所用的时间，就可以算出光的速度。经过多次实验，傅科测得的光速平均值等于  $2.98 \times 10^8$  米/秒。值得一提的是，傅科还在整个装置充入了水，测定了光在水中的速度。他发现光在水中的速度与空气中的速度之比近似等于  $3/4$ ，正如等于水和空气的折射率之比，水中的光速慢于真空中的光速，与微粒理论的预言相悖。然而具有戏剧性的事实是，此时大多数物理学家早已接受了光的波动说，所以这个实验结果对微粒理论来说只是一个迟到的唁电。

此后不久，还有法国的科尼尔、美国的纽科姆、迈克尔逊都做过出色的测定光速实验，近年来最精确测量表明，光在真空里的速率为每秒 299 792 456.2 米，估计误差值为每秒 1 米或 0.000001%。

光速确实大得惊人，它一秒钟可以绕地球7周半。不过，相对于广袤无垠的宇宙来说，它又显得很慢了。地球和太阳之间的距离是1.5亿公里，太阳发出的光要经过8分20秒才能够照到地球上。从其他恒星发出的光照到地球上所需要的时间就更长了。所以在天文学上常用光年做计量长度的单位，量度星际间的距离。1光年就是光在一年里走过的距离，大约等于  $9.46 \times 10^{15}$  米。织女星距离地球大约  $2.6 \times 10^{17}$  米，所以你看到织女星所发出的光，实际上大约是28年半以前发出的。假如你乘上用光速飞行的飞船，去到用现代射电望远镜所能观察到的空间范围的边缘，将花费100亿年的时间。

## 有关“以太”

光的波动理论虽然在解释干涉、衍射和偏振等光学现象方面取得了一系列伟大的成功。但它的前景仍使人忧心忡忡。因为波动理论回避了一个重要的事实，波是在媒质（如、空气、绳、弦）中传播的一种扰动。那么传播光的媒质又是什么呢？是空气吗？不是，法国科学家波义耳曾做过这样的实验，他把一个玻璃容器内的空气几乎抽尽，而容器内的物体依然清晰可见。再说，太阳光是穿越了广阔无垠的，没有空气存在的宇宙才来到了地球上，所以空气并不是传播光的媒质。那么，对于一个说不出是什么被扰动了的扰动是难以想象的。于是人们只能假设存在着一种称为“以太”的物质，说这种“以太”是传播光的媒质。

事实“以太”是一个很古老的概念，原来的意思是“高空”。1644年法国著名哲学家笛尔卡提出了“以太漩涡说”，给“以太”赋予了新的内涵，这个学说认为“虚空”是不能存在的，整个宇宙充满了一种特殊而易动的物体——“以太”。由于太阳周围以太出现漩涡，才造成行星围绕太阳的运动。后来，光的波动说兴起的时候，人们普遍认为波与媒质应该像鱼和水一样，不能分开。那么这种媒质又是什么呢？于是波动说的创始人惠更斯把“以太”请进到光学理论中来。在17和18世纪，人们把以太想象成一种密度很低的看不见的流体，它贯穿一切物质并充满了整个空间，它可能与想象用来解释磁力和电力的“流素”（某种“流出”的东西）发生某种联系。托马斯·杨给以太作了四条具体说明：

1. 整个宇宙内充满稀薄的具有弹性的以太物质；
2. 发光物体在以太中激发起波动；
3. 不同颜色的感觉取决于传递给视网膜的以太振动的频率；
4. 一切物体都吸引以太，因此，在物体附近的以太密度大，而以太的弹性则保持不变。

经过托马斯·杨精心装饰，郑重推出的以太，还没有站稳脚，就又一次地被抛弃了。因为这种类似于空气的弹性流体只允许产生纵波。然而，为了能解释光的偏振行为，菲涅耳、阿拉果，也包括托马斯·杨都认为光应该是一种横波。横波只能在固体媒质中传播，无法以气体或液体作为媒质。这样一来必须设想“以太”是一种固体，光速是如此之大，就必须假设这种固体“以太”有很大的硬度。这样的结果使这群波动说的复兴者又陷入深深的困惑之中，说整个宇宙空间里充满了坚硬的固体以太，岂不要让人笑掉大牙。再说天体的运行也根本没有觉察到坚硬以太的阻力。那么神奇的“以太”究竟是否存在呢？

1884年某日，当时欧洲科学界的泰斗汤姆生应邀到美国讲学，在一次演讲中即兴回答听众问题说：“以太到底是否真有其物，现在还不能定论，我们只知道地球是以每秒30公里的速度绕日运行，那么迎面就应该有一股以太风不断吹来。如谁能用实验证明了这股风的存在也就证明了以太的存在，但这要靠实验。”俗话说言者无意，听者有心。听众里有位青年听到这句话不觉眼前一亮，一个新的研究课题便在脑子里挂上了钩。这位青年名叫迈克尔逊，原是德国人，两岁时他还在母亲的襁褓之中就背井离乡，飘洋过海来到了美国。17岁时他考进海军学校。在海军服役期间他省吃俭用积攒了钱，又回到柏林留学深造。在柏林著名的赫尔姆雷茨实验室里他见到了世界上一流

光学仪器，真是大开了眼界。不久他自己也研制成功了一台可以测量微小长度、折射率和光波波长的干涉仪。他用这台仪器测量出许多有价值的物理量，而测验以太风是他的“第一次成功的尝试”。

再说自从那天迈克尔逊听了汤姆生的话，回家后就开始研究寻找以太的办法。他想船在流水中航行时，它对岸的速度要考虑到水的流速，即顺水行舟，速度是船速加水速；逆水行舟，速度是船速减水速。以此类推，如果地球周围确实存在着一股以速度为  $v$  漂移着的以太风，那么光沿着以太漂移方向传播和垂直以太漂移方向传播，两者的合速度是肯定不相同的，如果能测出这种差别，不就证明以太确实存在了吗？

迈克尔逊的主要实验仪器就是他发明的干涉仪。不过他的干涉仪并没有放在固定的桌面或者地面上，而是放在一块浮在水银池面的大理石板上，为的是使仪器能灵活转动又不致摇晃。从光源  $S$  发出的光，经过一半镀了银层的，且与光成  $45^\circ$  的玻璃片  $M$ ，分成了互相垂直的两束光。透射光  $I_1$  经面镜  $M_1$  反射，回到  $M$  后再次反射到望远镜  $T$  中，（设以太的漂移速度  $v$  与光速  $c$  平行），反射光  $I_2$  经面镜  $M_2$  反射，回到  $M$  后再透过  $M$  到达望远镜。以太风使光束  $I_1$  在两面镜之间来回

时经历时间  $t_1 = \frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v}$  使光束  $I_2$  在两面镜之间来回经历时间  $t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}}$ 。

这两束光到达望远镜有一个恒定的时间差，于是在望远镜里可以看到一个稳定的干涉图像。然后，迈克尔逊把整台仪器转过  $90^\circ$ ，使以太风这次与光速  $I_2$  平行，与光速  $I_1$  垂直。这样两束光的时间差就会有一个较大的变化，根据迈克尔逊的预测这样一来干涉条纹将会移动 0.04 条 然而他没有看到干涉条纹的移动。读者也许会说光速如此之大，干涉仪的臂架又有多少长，即使产生了光程差也未必能测到哩！这一点读者倒不必担心，因为地球在以每秒 30 公里速度绕太阳运行，以太的漂移速度也为每秒 30 公里，这个速度为光速万分之一，影响的光程差即使再缩小 100 倍也在干涉仪的灵敏度之内。1886 年迈克尔逊和莫雷在美国克利夫兰州的阿德尔伯特学院做了整整 4 天实验，仍然看不到干涉条纹的变化。于是迈克尔逊宣布实验结论是：“实验的结果只能解释为干涉条纹没有位移。可见，静止以太的假设是不对的。”

再说迈克尔逊的实验结果一宣布立即在物理学界引起了一场轩然大波。因为以太一旦被否定，那牛顿力学的时空观将从根本上动摇，经历了两个世纪建立起来的经典物理学大厦突然出现了裂缝，于是各个国家的物理学家纷纷提出各种方案试图来挽救以太，希望迈克尔逊的实验还能有另一种方法来解释。

1892 年英国物理学家斐兹杰惹提出一种假说：一切物体在自己的运动方向上都要收缩，并计算出每秒运动 26 万公里的物体收缩可达 50%。物体运动的速度达到光速，它在运动方向上的长度就变为零，显然这是物体运动的极限速度。按照这样的说法，迈克尔逊在实验时，顺着地球运动方向的两块镜面间的距离就会变短，这正好弥补了光束逆以太传播而减少的速度，所以并不影响它和另一束横向光同时返回到观察镜里。不久，荷兰物理学家洛仑兹也提出了相似的观点，这些观点都说明了一件事，光速是宇宙中所能达到的最高速度，而且无论沿着什么方向光速都是每秒 30 万里，光速是不变的，这就是著名的光速不变原理。至于起变化的则是运动物体的质量和长度等

等。这样一来，不仅能对迈克尔逊的干涉实验作出合理的解释，而且这时候人们发现这个“以太”既没有自己的速度、质量，也看不到、摸不着，它的存在和不存在又有什么差别呢！科学家们开始觉得它碍手碍脚，就把这它踢开了。

## 光的电磁波动理论

托马斯·杨和菲涅耳重新倡导的光的机械波动理论，在 19 世纪 20 至 30 年代取得了巨大的成就，它为科学界的绝大多数人所赞成。但是，在解释光的传播过程时必须借助于“以太”，并认为“以太”是充满整个宇宙空间的极其稀薄的气状物质，它的存在对运行着的天体没有任何阻尼作用。光的偏振现象的发现与研究打破了这种假设，由于“以太”必须能传播横波，因而又必须再假设它是一种能够产生切向力的胶状体或弹性介质，其弹性模量应该比钢还大。“以太”这种非常离奇的性质，是光的机械波动理论本身根本解决不了的难题。另一方面，科学实验中发现的光与其它介质存在相互作用的现象，如法拉第效应等，光的机械波动理论也难于解释。

1864 年，英国的数学物理学家麦克斯韦发表了《电磁场的动力理论》一文，建立了电磁场方程组。文章中他预言了电磁波的存在，同时，他根据方程组中电场量采用静电单位制，磁场量采用电磁单位制，方程中出现了  $3 \times 10^{10}$  因子的情况，发现电磁波的传播速度与当时已经用精确的实验室方法测得的光速非常接近。麦克斯韦没有把这一发现当成一种巧合，他相信这其中必定有物理上的奥秘。于是，在麦克斯韦的脑海里，显现了创造性的具有极其重大意义的新见解。

“从柯尔劳斯和韦伯的电磁学实验中计算出来的假想媒质中横波的速率和从光学菲索实验中计算出来的光的速率是如此地吻合，以致使我们不能得出这样一个推论：光是存在于媒质中的横波，这种媒质是电现象和磁现象的起因。”

这就是说，因为电磁波在媒质中的传播速度与光在这种媒质中的传播速度如此地吻合，所以应该得出结论，光现象与电现象和磁现象是相联系的。进一步说，光波是媒质中传播的波长较短的电磁波。

麦克斯韦的电磁场理论将长期以来彼此独立的电学、磁学与光学结合起来，实现了物理学中一次规模空前的大统一。但是，当时人们对麦克斯韦电磁场理论的深刻含义没有给予应有的重视。

1888 年，德国年轻的物理学家赫兹用实验产生了电磁波，证明了电磁波的存在。同年，赫兹用实验测定了电磁波在空气中的传播速度，其结果与光在空气中传播速度相同。接着，赫兹又做了一系列的电磁实验。他观察、研究了电磁波在固体表面的反射，验证了电磁波在反射过程中符合光的反射定律；在电磁波通过棱镜的实验中，其偏折规律与光的偏折也相同；另外，赫兹还做了电磁波在凹球面反射镜中的聚焦，做了干涉、衍射、偏振等项实验。这一切都清楚地表明，电磁波的性质与光波的性质相同。

赫兹的实验，雄辩地证明了麦克斯韦电磁场理论的正确性，即证明了光的电磁波动理论的正确性，使人们对麦克斯韦在科学上取得的重大成就有了基本正确的估价。

麦克斯韦的电磁场理论及赫兹的实验结果，使光的波动理论上升到了一个崭新的高级阶段——光的电磁波动理论阶段，这是人类对于光的本性认识方面的一次巨大进步。

光的电磁波动理论排除了机械以太困难。但是，代替机械以太的“电磁以太”也不能解释光与其它物质作用时的一些现象。

1862 年，勒·鲁用充满碘蒸气的三棱镜，观察到紫光的折射比红光的折

射程度小，他称这种现象为反常色散。1871年，孔脱发现了反常色散与物质对光的选择吸收有密切联系，即反常色散发生在选择吸收波段。1875年，克尔发现了电光效应，即各向同性的透明介质（如硝基苯等）在强电场的直接作用下，使通过其中的光发生双折射现象，称为克尔效应。1893年，泡克尔斯发现了另一种电光效应，即各向异性的晶体，特别是压电晶体，在外加电场作用下变成光的各向同性体，称为泡克尔斯效应。

1896年，洛伦兹创立了电子论。他认为，原子和分子内含有带负电的电子，在无外力作用时电子处于平衡位置；在外力作用下，电子作阻尼振动而产生光辐射。当光通过介质时，若介质中电子的固有频率与外场频率相同，则束缚电子成为吸收体。这样，洛伦兹解释了物体的发光与吸收现象，同时解释了光在物质中传播的一些特点，较好地解释了光的正常色散，与反常色散，对当年发现的光谱线在磁场中分裂现象——塞曼效应也做了解释。尽管电子论在科学上取得了显著成就，但是它依旧没有摆脱电磁以太的困难。

19世纪以前，人们在长期的观察与实验中逐步形成了光的概念，大家都认为，光是直接射入人眼并能够引起视觉的客观实在。这种概念带有很大的主观性，它指的是可见光，其波长范围大约在 $4000\text{ \AA}$ 到 $8000\text{ \AA}$ 之间，是电磁波中频率较高但波长范围很小的一个波段。

1800年，英国天文学家威廉·赫谢耳，在考察太阳光谱时发现了光谱界限与可见光界限并不一致，相反地在可见红光端外处有一种比较不易折射的辐射，将它称为红外线。他在连续的色谱上放上温度计时，发现了太阳光谱中热的不平均分布，在红端以下即红外光处最热。托马斯·杨在1807年的《讲演》中说：“这个发现应当被认为是自牛顿时代以来所做出的最伟大的发现之一。”

1834年，意大利科学家梅隆尼证明红外辐射在反射、折射和吸收实验中的行为与可见光完全一样；1846年，克诺布劳赫用干涉、衍射、偏振实验证明了红外辐射与普通光的区别仅仅在于它的波长较长。由此，人们常常将红外辐射称为红光。

在红外光发现的第二年即1801年，李特(Ritter, Johann Wilhelm; 1776—1810)和沃拉斯顿(Wollaston, Willaston Hyde 1766—1828)发现了紫外线，它的化学效应十分明显，其波长较可见紫光为短，人们将这种紫外辐射称为紫外光。

红外光、可见光、紫外光，以及人们在19世纪末发现的伦琴射线、 $\gamma$ 射线和20世纪初发现的宇宙射线，都是频率很高的电磁波。

至此，人们形成了广义光的概念，即将波长短于远红外线( $> 1.0$ )的一切电磁波统称为光。

光的电磁波动理论，使人类对光的认识更加深化，认识范围更加扩大。光具有波动性，光是电磁波，已被人们所公认。这种理论在光学发展史上占有特殊重要的地位。

## 太阳光谱的探索

阳光经过三棱镜会展开成一条彩色的光谱，那么，除了太阳光，其他光，如蜡烛光、固体发光和气体发光，经过三棱镜又会出现什么呢？1752年苏格兰人梅耳维尔开始对这个课题进行了开拓性的研究。当时他年仅26岁，是格拉斯哥神学院的学生。他是这样介绍自己的实验的：“在我的眼和酒精火焰之间放置一块开有一个圆孔的胶纸板，以便缩小和限定我的目标。然后，我用一块棱镜来检查这些不同光的构成……。”

他发现炽热的固体和液体都会发射出所有波长的光，在光屏上得到一条虹霓色彩的连续光谱。然而，炽热的气体产生的光谱并不是一条由紫逐渐变到红的连续谱带。而是由一些分开的斑点构成，每一斑点有它所在位置的那一部分光谱的颜色，而且各斑之间有暗的间色。后来，当人们普遍地利用狭缝来让光通过时，就看到了气体的发射光谱是一组明线。事实上，这些明线是狭缝的彩色像。这样的光谱存在，表明来自气体的光只是几种确定颜色的光，或几种狭窄波长范围的光的混合。

梅耳维尔还注意到，把不同的物质放进火焰时，明斑的颜色和位置是不同的。他说：“当砷砂、明矾或钾碱放进酒精火焰中，发射出了各种光线，但不是相同的数量，黄光比同时产生的其他一切光要明亮得多……，大大地超过其他颜色的明亮的黄光必定是一种具有确定的可折射度的光，并且从它到邻近的较弱的颜色的光的过渡不是逐渐的，而是直接的。”从这些话中不难看出他已经敏锐地注意到了那条“明亮的黄光”，并把它和“确定的可折射度的光”联系在一起了。在这个基础上他只要向前跨一步，就可能摸到了光谱分析的“大门口”。然而他的研究生涯只有1年，27岁的梅耳维尔就过早地离开了人世，真是一件令人遗憾的事。

除了梅耳维尔，在那个时代里几乎无人再去注意那些隐匿在光谱中的明线，他们只是会观察火焰的颜色来判别物质的成分。当时有位德国化学家马格拉夫就很精于此道。他认为两种物质在燃烧的时候会发出同样颜色的光，是因为它们具有相同的成分。例如苏打和岩盐在燃烧时都会发出黄光，因为它们有一种相同的成分——钠；而锅灰碱和硝石在燃烧时都发出紫光，因为它们具有一种称为“钾”的相同的成分。

1802年伦敦有位医生叫沃拉斯顿，他用三棱镜观察太阳光谱的时候，发现了一个被牛顿忽略的事实：在从紫到红的太阳的连续光谱中出现了7条清晰的暗线，它们不规则地间隔分开着。他很兴奋，立即拿了棱镜去问一位好朋友，物理学家索默维尔报告自己的新发现，同时还想听听他的建议。一进门他就迫不及待地说：“这几天我认真观察了太阳的光谱，”“难道你发现太阳的脸色不正常了吗？”索默维尔一语双关地回答。“你猜对了。我的确发现太阳光谱中的7条黑线。”说着他取出随身携带的玻璃棱镜向索默维尔演示这个事实。可是索默维尔根本没仔细去看，因为他不相信一个才玩了几天棱镜的医生就会有什么新发现。他立即用物理术语提出了一连串质疑，把沃拉斯顿弄得很尴尬，最后沃拉斯顿只得自己收场说，也许是玻璃上有缺陷，所以在光谱中留下了黑线。就这样，索默维尔的自以为是，把一个送上门来的重大发现给断送了。

12年后，德国光学家夫琅和费在太阳光谱中又发现了这些黑线，并认真地研究它们。与沃尔斯顿不同，夫琅和费是光学方面的行家，他从小就和玻

璃打交道，11岁时跟了一位光学技师做学徒。他对光学仪器的制作和原理有浓厚的兴趣。有一次他所居住的房屋突然倒塌，里面的人都被压死了，只有他幸存了下来。有位先生很同情这个受了伤的孩子，送了他18元金币，好学的夫琅和费用这些钱全部买了光学仪器和书籍，所以他在磨制玻璃镜和光学理论计算两方面他都有很深的造诣。他参与生产了没有脉纹的火石玻璃和大块的冕牌玻璃，还创立了计算各种透镜曲率半径的方法。1814年，夫琅和费想寻找一种单色光源来检验放大镜的质量。可是，什么样的火焰才能提供只有一种光线的光呢？为了这个目的，夫琅和费把所有可以燃烧的东西拿来烧，却终不见有甚么单色火焰。然而失之东隅，收之桑榆。他却对观察和比较各种火焰的光谱产生了极大的兴趣。后来他创造了一种新颖的，比三棱镜的分辨力高得多的把光束色散成光谱的仪器——光栅。读者也许记得杨氏的双缝干涉实验，两条狭缝可以把不同波长的光分散到不同的角度。光栅利用同样的道理，在铜框内平行地安装了许多0.04到0.6毫米粗的银线（夫琅和费制的光栅，每厘米有136条银线），银线之间有0.0528~0.6866毫米的狭缝，一个光栅可以有上万条狭缝，所以它能够把不同波长的波分得更开。后来夫琅和费采用了划线的方法：即在平整的玻璃板上敷盖一块金箔，然后在金箔上划出等间隔的平行线，揭掉金箔，便得到了衍射光栅。由于光栅的分辨率主要取决于单位长度范围内的刻线的多少，因此不久后在许多国家里都有人精心制作高精度的光栅。美国的光学家罗兰可以在1英寸的光栅上刻出43000根线，在当时的手工条件下，堪称奇迹了。

密纹唱片每厘米上有120条凹槽，可以看成是一种光栅。站在窗前，把唱片水平举到稍低于眼睛的位置，以双手连线为轴，慢慢地转动唱片，待唱片在某一角度时，你会看到一大片彩虹，这是唱片光栅衍射太阳光，把太阳光色散成光谱。

回过头来再说夫琅和费有了自己感兴趣的研究课题，便一头钻进了实验室，把各种物质放在酒精灯的火焰上燃烧，再用窥管来观察它们经过三棱镜（后来用光栅）色散的光谱。他看到在彩色的光谱带中有两条明亮的黄线。他想这两条黄线也许与酒精有关，于是他又改用油灯、蜡烛来做试验，明亮的黄线却依旧如故。看来对任何一种火焰来说明亮的黄线是少不了喽，夫琅和费这样想，但心中也没有什么把握。

一天，他做实验觉得疲倦，便打开了百叶窗帘，顿时灿烂的阳光照得满屋生辉。夫琅和费精神为之振奋，他突发奇想，要看看太阳的光谱。他调节好仪器，让一束光进入摄谱仪。这一看，使他惊诧不已。原来的灯光中的明亮的黄线消失了，取而代之的却是两条黑线。真奇怪，难道普照万物的太阳发光还不如灯光？这是否说明它在整个发光光谱区域内留有空缺呢？且不管它什么原因，先仔细瞧个明白再说。这样仔细观察了一番，又发现了新的秘密。原来，太阳光谱中远不只有两条黑线，仔细计数的话有324条（实际上还要更多）。当然，其中最为明显的只有8条。为了研究方便，夫琅和费用A、B、C、D、E、F、G、H这八个字母表示这八大条黑线（事实上有些大黑线是二、三条黑线重叠而成的，如果用分辨力大的光栅可以把它们进一步分开。）

将太阳光谱和灯光谱对照，夫琅和费发现其中有个巧合，太阳光谱中用字母D表示的两根黑线的位置与灯光中的两条明亮的黄线重合，也就是说太阳光谱缺少的D线却在灯光中找到了，他还用光栅找出了D线的波长是从

0.0005882 到 0.0005897 毫米。这一切意味着什么？夫琅和费百思不得其解，而且老天也不允许他去仔细琢磨其中的奥秘，因为他还没有活到 40 岁，就被肺结核病夺去了生命。于是这就成了科学史上的一个谜。在夫琅和费发表这个事实之后的 40 年里，也没有人对这些线给出完满的解释。人们把这八条线组成的神秘图谱称做“夫琅和费线”。

## 光谱分析方法

1777年，瑞典化学家舍勒在介绍他所发现的氧时，提出了热辐射的概念。1791年，在瑞士的日内瓦的普雷沃，在《火的平衡》一文中指出，热物体发出的热辐射按照普通光线的规律传播。他是最早提出热辐射与光辐射相一致思想的人。19世纪初，红外线与紫外线相继被发现，梅隆尼等人用实验方法证明了热辐射与光辐射的统一性。

1827年，英国天文学家小赫谢尔考察了几种物质的明线光谱后，指出每种化学元素只要它变成炽热的气体，它就能够产生自己独特的线状光谱。他还说，利用这些光谱线可以检验确定某种元素是否存在。这是最早出现的光谱分析思想。

1849年，傅科用心地研究了吸收光谱中的暗线与发射光谱中的明线之间的关系，发现碳极间的电弧光光谱中黄橙部分的亮双线（夫琅和费线中的D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>线）的位置恰好一致。他还发现，太阳光通过电弧光时，电弧光的D线便由明线变为暗线；如果将一个碳极的光（连续光谱无暗线）通过电弧时，则D线又会变为明线。由于，他得出结论：电弧光是产生D线的，但若D线从旁的光源而来，电弧光就加以吸收。

对夫琅和费线予以正确解释的，是基尔霍夫与本生，也是他们将光谱分析思想付诸实践，从而确立了光谱分析方法的。

1859年10月，基尔霍夫在《论夫琅和费》线一文中写道：

“在同本生一道进行的、使我们有可能按照复杂的混合物焊接吹管中的火焰光谱的外形，来认识其它定性组成的研究的这段时间中，我做了一些观察，这些观察使我得出了关于夫琅和费谱线的起源的出乎意料的结论，它又提供了使我们判断太阳大气的物质组成的可能性，可能还将使我们判断最亮的天体上的物质组成。”

一种带色的火焰光谱包含了明亮的锐线，当这些谱线的色光通过火焰时，这些带颜色的光线被减弱到如此程度，以致只要在火焰后面放上足够强的灯光时，暗线代替明线而出现，要不然就是在这些灯光中不存在这些谱线。由此可以作出结论，太阳光谱中的暗线并不是由地球大气所引起的，而是起因于在火焰中于相同地方产生明线的那些物质在炽热的太阳大气中的存在。”

1859年11月25日，本生在给罗斯科（Roscoe，1833—1915）的信中，叙述了基尔霍夫和他的工作，其中写道：

“现在我俩进行着一件共同的工作，这件事已经使我们废寝忘食……。基尔霍夫出人意料的发现，他找出了太阳光谱产生暗线的原因，并且可以人工增加暗线，其位置恰在夫琅和费线上。这样，他已获得一种鉴定太阳和恒星的化学成分的方法，其准确性如我们用化学试剂测定硫酸一样。”

基尔霍夫提出：所有的物质都吸收自己能够发射的同样频率的光，这就是重要的基尔霍夫吸收光谱定律，它是天体物理及化学中最基本的定律之一。用这一定律可以容易地对夫琅和费线的起源加以解释。太阳体由高温高压的致密的气体物质组成，它发射的是连续光谱，其外层为由很稀薄炽热的气体组成的色球层，能产生线状光谱。当球体发射的连续光谱通过色球层时，对应于色球层所含化学元素的相应波长的谱线就被吸收，所以在原来无黑线的光谱中出现了夫琅和费线。

基尔霍夫与本生共同指明，光谱线可以作为有关金属存在与否的确实标记。基尔霍夫断定，太阳大气中存在着钠、镁、铜、锌、钡、镍。

同年 12 月，基尔霍夫在《论光和热的发射与吸收之间的关系》一文中，提出了热辐射的基尔霍夫定律：

“对于波长相同的射线，在同样的温度下，对于一切物体而言，发射本领与吸收本领之比都是相同的。”

这一定律，是辐射学与光谱学中最基本的定律之一。

在基尔霍夫与本生合作的论文《借助光谱观察进行化学分析》中，他们指出：

“无论含有金属的化合物的位置是何等不同，也无论在这些单独火焰中的化学过程是何等多种多样，也无论这些火焰的温度的差别是何等巨大，都不会对相应的个别金属的谱线发生任何影响。”

光谱分析的新篇章就这样地开始了。

研究地球上物质元素的光谱分析方法的建立，归功于基尔霍夫与本生；将这种方法应用于研究天体构成方面，主要归功于基尔霍夫。

光谱分析方法的建立，引起科学界的巨大兴趣。人们用这种方法先后发现了铯、铷、铟、铊等十几种元素，测定了恒星、行星的物质组成。光谱分析方法测定结果表明，组成天体的物质的元素与构成地球的物质的元素是相同的。这样，它就为辩证唯物主义世界观提供了强有力的自然科学依据。

基尔霍夫出生在德国肯尼希斯堡，1854 年任海德爾堡的常任教授。1875 年，他成为柏林的名教授。在海德爾堡的 20 年，是他科学工作的黄金时代。他在那里与著名的化学家本生在一起，共同工作。在俭朴的实验室里，他与本生一起创立了光谱分析方法。1857 年本生设计与制作的高温气体火焰灯（本生灯）为他们的研究提供了极大的方便，他们可以得到单纯的发光蒸气的光谱。基尔霍夫对夫琅和费线的解释具有划时代的意义。亥姆霍兹评论说：“事实上它有一些最突出的最非凡的影响，它对自然科学的各个分支都有最高的重要性。几乎没有其它的发现像它那样，唤起了人们的赞美和激励了人们的想象力，因为它能洞察那个对我们来说似乎永远是罩上了面纱的世界。”关于这一点，基尔霍夫经常讲到一个十分有趣的故事：夫琅和费线是否揭示了太阳中存在着金子这个问题曾被研究过。财东对这个机会作了评论：“如果我不能把太阳上的金子拿下来，我为什么要关心太阳上的金子呢？”此后不久，基尔霍夫接受了英国为他的发现而颁发的奖章，奖章是用金子制成的。当他把这个奖章拿给他的财东看时，说：“看呀！我终于已经成功地从太阳那里取下了一些金子。”

1883 年，基尔霍夫在数学波动理论中，找到了菲涅耳天才地创立的半波带作图法的基础，在惠更斯—菲涅耳原理的基础上，进一步提出了基尔霍夫衍射原理，将光的衍射的研究推向前进。

基尔霍夫在电学方面也取得了卓越的成绩。他成功地解决了复杂电路的电流与电压问题，提出了节点电流定律与回路电压定律，从而为直流电路中的计算建立了一种简便而明快的方法。另外，他还写了《力学研究》等著作，在弹性学、声学方面都做出了可观的贡献。

基尔霍夫是一位把理论和实验结合起来的典范。人们将永远铭记着他的巨大功勋。

基尔霍夫与本生创立并基本完成光谱分析这门科学以后，科学家们忙于

补充理论细节、改进实验方法，以及扩大天体与化学方面的知识。多重光谱的出现，更进一步引起了科学界的重视，争论也更加激烈。

1862年，德国波恩的普吕克尔（Plücker，1801—1868）指出，同一物质在不同温度下会发出不同的光谱线。他与希托夫（Hittorf，1824—1914）发现了氢、氮和硫的烟有两种光谱一种较弱的带状光谱与一种较强的明线光谱。1868年，亚琛工学院的维尔内（Wüllner，1835—1908）研究了氢、氧、氮的光谱，观察了它们在普吕克尔管中受到不同压力时的变化。他发现氧在不同压力下有三种光谱，即连续光谱、带状光谱与线状光谱。他认为，管中的气体压力随温度的改变而变化，光谱的变化是由压力和温度的变化引起的。可是更加广泛的研究表明，光谱的变化不仅依赖于压力与温度的改变，还依赖于分子的结构。洛克耶（Lockyer，1836—1920）等人研究了分子结构的影响，在1873年与1874年提出了新的见解：每一种复合物都有像是单一物一样确定的光谱；线光谱是游离原子形成的，带状光谱是由分子或分子团形成的。这一理论受到了一些人的推崇。但维尔内却反对它。1879年，维尔内做了氮的光谱实验，证明在温度逐渐变化时，带光谱逐渐地变化为线光谱。洛克耶观察到了线光谱（例如钙）随着温度升高的变化。由此他提出了大胆的理论：正如在带状光谱转变为线状光谱时可以以分子分解为原子来解释它一样，由于温度升高而发生的线光谱的变化，也可以以原子被分裂为更基本的物质来解释。这就指出了构成物质的化学元素本身具有复合性质。

关于增大压力是否会使谱线的宽度增大问题，人们研究的结果表明，连续光谱是在低压下同样气体的光谱线变宽而形成的。

1896年，荷兰阿姆斯特丹大学的教授塞曼（Seeman，1865—1943），观察到了在强磁场作用下的光谱线的分裂，这种现象被人们称为塞曼效应。当时，塞曼将一个电弧的光源插入一个含有钠蒸汽的加热管中，并把它放在电磁体的两极之间，在磁场作用时，就看到了稍微加宽了的光谱线。

迈克耳逊等进一步发现，在强磁场作用下光谱线的分裂更为复杂，有二重谱线，也有三重谱线。洛仑兹用电子论对塞曼效应进行了有成效的解释。

1884年，瑞士的巴尔末（Balmer，1825—1909）对氢光谱的研究获得了重大成果。这一年的6月25日，他将自己的研究论文呈交给巴塞尔科学学会。论文指出，氢的四条最重要的谱线的波长比率，能够用一个极小的数字表示出来。他发现的含有基数  $B=3645.6 \times 10^{-7}$  毫米的公式，将其基数分别乘以  $9/5$ 、 $4/3$ 、 $25/21$ 、 $9/8$ ，就可以得到氢的四条重要谱线的波长。如果将  $4/3$ 、 $9/8$  分别改写成  $16/12$ 、 $36/32$ ，那末这四个乘数的分子依次成了3、4、5、6的平方，而它们的分母各比自己的分子小4。综合起来，巴尔末写出了公式

$$= B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \text{其中 } (n = 3, 4, 5, \dots)$$

按照这个公式很容易地算出氢的14条谱线，其精确度很高，均在可见光范围，人们称这些谱线为巴尔末线系。

巴尔末公式可以改写为

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

其中  $\frac{1}{\lambda}$  为光谱线所对应的波数，R为里德堡常数， $n = 2$ ， $m = 3, 4, 5, \dots$  均为整数。这一公式是各光谱线系的模型，它为光谱线系理论打下了基础。



