

第一章 光与人的视觉

第一节 光的本性

光的本性是光学研究的中心问题之一。光究竟是什么？人们经过长期的努力探索，才认识到光具有波动性和粒子性。下面，我们通过对一些现象的介绍，使大家对光的波动性和粒子性有所了解。

一、干涉现象

1. 波的迭加 在平静的池塘里，分别在两处同时投下一块石子，就会看见两列水波在水面上展开，它们相遇后，交错在一起，形成一种复杂的波形。在这部分水面上，每个质点的振动都是由这两列波共同决定的。我们可以用图1.1来证明这一点，设 m 是两列波相交区域里的某一质点，由于波源 S_1 的振动传递， m 点得到的位移是 S_1 ；由于另一波源 S_2 振动的传递， m 点得到的位移是 S_2 ，而 m 点的实际振动的合位移是两个位移之和。按矢量合成法则，合位移

$$S = S_1 + S_2$$

如果两列波的频率与波长并不相同，那么 m 点的振幅将是变化的，其他各点情况也一样。对于任何一点来说都经历着这样的过程：即有时合位移比单独一个波产生的振幅大，有时又比单独一个波产生的振幅小，每一点的位移总是每一列波单独产生

的位移的总和，这就是波的迭加。

2. 波的干涉 在同一种媒质里传播的两列波，如果它们频率相同，即波长相同，那么在两列波相交的区域里，由于迭加的结果，每一点的合振幅都是一定的，并且出现振动最强和振动最弱互相间隔开的现象，这就是波的干涉。

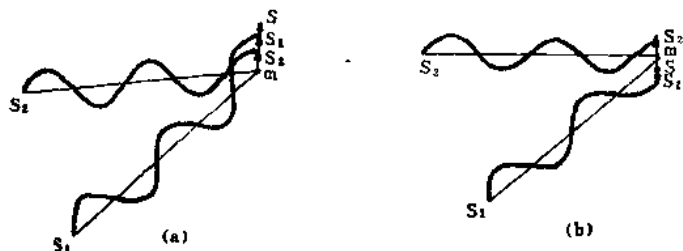


图1.1 波的迭加

设想有两列波长相同的波在同一媒质中传播，并互相迭加起来，如图1.2所示， m 是两列波相交区域里的某一点，它离开波源 S_2 和 S_1 的路程差 $\Delta r = r_2 - r_1$ 恰好等于波长 λ （或波长的整数倍 $n\lambda$ ），由于两列波在这一点互相加强，使这一点的合振幅达到最大值。图1.3是 m 点的振动图线，它表示 m 点的振幅是两个振幅之和，它的振幅最大并保持稳定不变，这点就是振动最强的地方，我们再选另一点 m' （如图1.4所示），它离开波源 S_2 和 S_1 的路程差 $\Delta r = r_2 - r_1$ 恰好等于半波长 $\lambda/2$ 〔或半波长的奇数倍 $(n + 1/2)\lambda$ 〕，迭加的结果是使这一点的振幅达到最小值，图1.5就是 m' 点的振动曲线。它表示 m' 点振动，由于两列波在该点互相削弱的结果，振幅最小并稳定不变。这点就是振动最弱的地方。所有满足路程差 $\Delta r = (n + \frac{1}{2})\lambda$ ($n = 0, 1, 2, 3$

…)的点,它的振动都是最弱的,满足路程差 $\Delta r = n\lambda$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)的点,它的振动都是最强的,离开波源由近及远的各点必然会相间地出现振幅最大和振幅最小的地方。以上就是波的干涉的成因。应当指出,两列波只有频率相同,振动方向相同,相位相同或相位差保持恒定,才能保证产生可见的干涉现象。

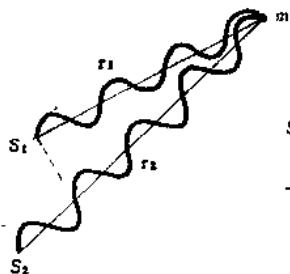


图1.2 两列波的路程差

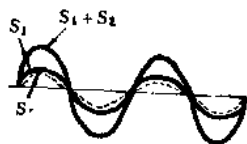


图1.3 m点的振动图线

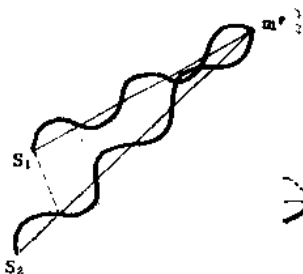


图1.4 两列波的路程差

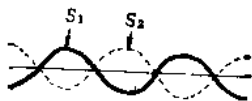


图1.5 m点的振动图线

3. 光的干涉 实验证明,光也能发生干涉现象。法国物理学家菲涅耳(1788~1827)曾经做过一个双镜实验,观察到

了光的干涉现象。如图1.6所示， S 是点光源。 P_1 、 P_2 是光屏， OM_1 、 OM_2 是双镜，镜面 OM_1 和 OM_2 的夹角略小于 180° 。从光源发出的光束 SM_1 、 SO 和 SM_2 经过镜面反射以后成为 M_1A_1 、 OA'_1 和 OA'_2 、 M_2A_2 ，它们延长线分别相交于 S_1 和 S_2 ，好象它们是从两个虚光源发出来的一样。因为它们的波长是相同的，这两束光线在 A'_1 、 A'_2 之间相互迭加，在波峰与波峰或波谷与

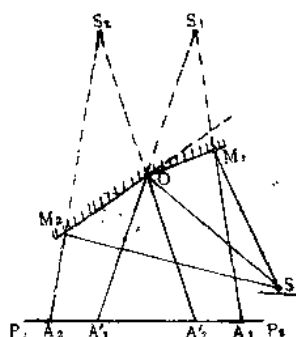


图1.6 菲涅耳双镜实验示意图

波谷相遇的地方，光就相互加强，在波峰与波谷相遇的地方，光就相互减弱。于是，在光屏 P_1P_2 上就可以清楚地看到明暗相间的干涉条纹，这就是光的干涉现象。

干涉现象是波动过程基本特征之一，光的干涉现象证实了光的波动性质。

二、衍射现象

1. 波的衍射 与干涉现象一样，衍射现象也是波动特

性的重要表征之一。什么是波的衍射呢？波在同一均匀媒质里是直线传播的，如果在它传播方向上遇到迎面挡住的孔或障碍物时，只要孔或障碍物不比它的波长大很多，这时波就会绕到障碍物后面或孔的外面去（传播路径发生了弯曲），这种现象叫做波的衍射。

声波也有衍射现象。一般人的声音波长约以米计，如果障碍物是高大的城墙，城墙的高度比声波的波长大很多时，一个人在城墙的一面喊话，在城墙另一面的人即使在夜深人静的时候，也不能听见，如果是隔着一层很厚但不太高的围墙，那么

在墙的一侧喊话，另一侧的人就能听见。这就是声波绕过不太大的障碍物的衍射现象。

2. 光的衍射 光既然具有波动性，那么在一定的条件下，是否也能发生衍射现象呢？实验结果表明是可以的。让点光源S照射在一个大小可以伸缩的圆孔上（图1.7a）。开始时，孔的直径比光的波长大得多，在孔后面的屏上得到的是一个明亮的光斑，如图（1.7b）所示，这说明光是沿直线传播的。逐渐缩小孔的直径，直到孔的直径比光的波长大得不多的时候，光就开始绕到孔的外面，在屏上形成衍射花样，整个衍射花样的面积比原来的光斑大得多，它说明这时光已经不沿直线传播了如图（1.7c）所示。

衍射现象也是波动过程基本特征之一，光的衍射现象也证实了光的波动性质。

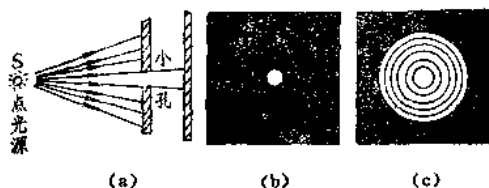


图1.7 小孔衍射

三、光的电磁性

通过对光的干涉、衍射的介绍，我们初步了解到光具有明显的波动性。然而，光波是象水波、声波那样的吗？究竟是怎样一种波呢？1864年麦克斯韦通过理论研究指出：（1）电场跟磁场的改变，不是局限在它周围的空间，而是以电磁波的形式向外辐射出去，它跟光一样，也能在真空中传播；（2）电磁波

的传播速度跟光的传播速度相同；(3)电磁波跟光一样，也能发生反射、折射、干涉和衍射等现象。因而，他提出了光的电磁学说：光现象实质上是一种电磁现象，光波就是一种频率很高的电磁波。1888年德国物理学家赫兹(1857—1894)首先用人工的方法获得了电磁波，并且通过电谐振接收到它，这就证实了电磁波的实际存在。后来又通过实验发现，电磁波在金属表面上要反射，在金属凹面镜上反射会聚焦，通过沥青棱镜的时候，要发生折射等现象。总之，赫兹的实验证明了电磁波可以产生反射、折射、干涉、衍射等现象，具有一切波动的共同特征，而且和光波的性质完全相同。1891~1893年，科学家们分别用实验的方法测出了电磁波的传播速度，它和光的传播速度近似相等，后来麦斯尔又作了较精确的测定，得出的结果是299,780公里/秒，和迈克耳逊测定的光速($c=299,796$ 公里/秒)十分相近。

四、光电效应

我们把金属物体受到射线照射时失去负电荷的现象叫做光电效应。如图1.8a所示，让一块表面光洁、绝缘的锌板带负电，并把它与静电计(或验电器)相连接，用紫外线照射锌板，这时原来静电计上指针偏转的角度，立即减少为零。这表明锌板带的负电荷，由于受到射线的照射立即消失了。如果用丝绸摩擦过的玻璃棒与锌板接触，使锌板带正电，这时尽管也用紫外线照射它，静电计指针偏转的角度仍旧保持不变，这表明：紫外线使锌板失去负电荷，并不是由于射线使周围气体电离所产生的正离子与锌板负电荷中和的结果，而是其他原因，不然的话，紫外线照射在带正电的锌板上时，为什么不能使它失去正电荷呢？

可以用斯托列托夫的实验装置(图1.8b)来进一步研究光电

效应的特性。让射线穿过金属网A射到带负电的金属板K上(它和电池的负极相连接)，这时候从电流计中可以看出，电路中有电流通过，这是由于从金属板上释放出来的负电荷——电子，跑到电势较高的金属网(它和电池的正极相连接)上去形成的。如果把金属网接在电池的负极上，金属板接在正极上，电路里就没有电流通过。

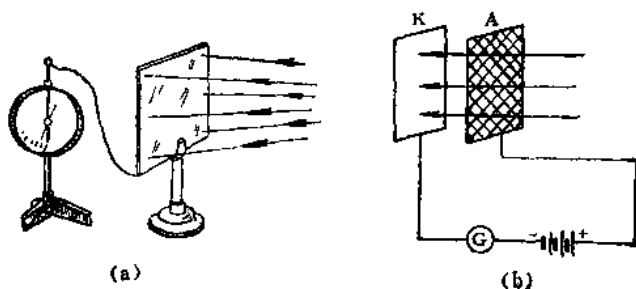


图1.8 光电效应实验装置

用不同的金属板和不同的射线，重复上面的实验，可以发现任何金属受到射线的照射都能发生光电效应。只是有的金属(象锌、铁、铜等)要用紫外线照射才行，而有的金属(象锂、钠、钾等)甚至用频率较低的可见光照射，也能够发生光电效应。对每一种金属都存在有这样一个最低的频率 ν_0 ，只要射线的频率比它低，不管射线有多强，也不能使这种金属发生光电效应。反过来，只要射线的频率高于这一金属的最低频率 ν_0 ，即使射线很微弱，也能使它发生光电效应。

用同一种金属板做上面的实验，可以发现：(1)改变入射光的强度，只能改变从金属释放出来的电子的数目，而不能改变电子的速度和动能。光越强，释放出来的电子越多；光越弱，

释放出来的电子越少。而释放出来的电子的速度和动能却总是一样的。(2)改变入射光线的频率，从金属释放出来的电子的速度，就随着发生相应的变化，射线的频率越高，释放出来的电子速度和动能越大；反之就越小。射线的频率小于这一金属的最低频率 ν_0 ，就不再有电子从金属表面释放出来。

用光的波动性能否解释光电效应的这些特性呢？按照光的波动学说，从金属表面释放出的电子速度和动能，应当跟入射光的强度（振幅）有关，入射光越强，振幅越大，光的能量也就越强，这些能量被金属表面的电子所吸收，则电子脱出金属表面以后就应该具有较大的动能才对，然而事实却与光的波动性质相抵触。显然，光电效应不能用波动性质来解释。

光电效应分为两种：一种是光射在金属导体的表面上，使金属中的自由电子激发出来，这种光电效应称为外光电效应；另一种是光射在半导体或绝缘体的表面上，使束缚电子受到激发以后，从原子的内层跳到外层来，甚至成为自由电子，以增加它的导电性，这种光电效应称为内光电效应。

五、光子说

为了解释光电效应的实验事实，1905年爱因斯坦在普朗克量子假说基础上，进一步提出了关于光的本性的光子假说。他认为：物质的原子和分子所发射和吸收的光，并不是连续的波，而是特殊物质组成的一个个的微粒，称做光子（或者称为光量子）。

这种特殊的物质微粒——光子，跟一般的物质微粒一样，也具有一定的能量，它是光的最小单元，它的能量 ϵ 跟它的频率 ν 成正比，即：
$$\epsilon = h\nu$$

式中 h 是普朗克常数，其值是： 6.62×10^{-27} 尔格·秒。

爱因斯坦用光子理论成功地解释了光电效应，电子要从金

属表面脱离出来，就必须克服引力做一定数量的功（称为脱出功 P ），对不同的金属来说，电子脱出它的表面时，所做的功也不同，具有能量 $h\nu$ 的光子，射到金属表面上时，就把它的能量传递给了金属中的电子，一部分能量用来作为脱离金属表面时所需要的脱出功，另一部分能量就转变成脱出金属表面的电子的动能，也就是：

$$h\nu = P + \frac{1}{2}mv^2$$

根据爱因斯坦的这个光电方程，可以看出：对于同一种金属， P 的数值是一定的，照射光的频率如果小于它的最低频率 ν_0 ，即 $h\nu_0 \leq P$ ，那就不会发生光电效应。照射光光子的能量 $h\nu$ 必须大于这一金属的脱出功 P ，因而频率必须大于某一数值 ν_0 才行，碱金属的脱出功 P 比其它金属的脱出功小，所以只要用频率较低的可见光照射，就能使它发生光电效应；而一般金属发生光电效应，则需要用频率较高的紫外线照射才行。

从爱因斯坦光电方程中还可以发现：照射光的频率越高，光子的能量 $h\nu$ 也越大，从金属释放出来的电子的速度和动能也就越大（根据 $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - P$ ），而跟光的强度无关。光的强度大只表示光子的数量多，所以照射的光线越强，吸收光子并从金属表面释放出来的电子也就越多，光电流也就越强。

光子理论能够解释光电效应等现象，这些现象是光的波动说所不能解释的，这很好地说明了光具有粒子的性质。

六、光的波粒二象性

光的干涉、衍射等现象，可以用光的波动学说来解释，它们说明光具有波动性；而光电效应和它的规律等，又要用光子说才能解释，这说明光又具有粒子性。事实使人们认识到，

光具有波动与粒子二象性。光的这两种性质是不是相互矛盾的呢？

光的性质是比较复杂的，有些地方很难用与我们日常生活经验相符合的图象来描述它。在不同的条件下，它显示出不同的特性，在一些情况下，它向我们显示出波动性，在另一些情况下，它又向我们显示出粒子（量子）性。好象一个物体，有时候它让这一面面向着我们，有时候又让另一面面向着我们。这原也没有什么不可理解的地方。问题在于它所表现出来的这两重性质，按习惯的看法，似乎是相互矛盾的。根据近代物理学的研究知道：凡是比分子小的物质微粒（象电子、中子等微观粒子），都具有明显的粒子性和波动性（称做波粒二象性），这种二重性质并不是光子所独有的，而是物质的共同属性。在爱因斯坦用光子来解释光电效应的时候，已经初步引用了这种统一的概念。公式 $\epsilon = h\nu$ 表明光量子的能量是光频率的函数，而“频率”是描写波动过程的概念，乍看起来，不也是矛盾的吗？但是这一理论却能很好地解释包括光电效应在内的一些光现象。

表明波动性和粒子性是物质共同属性的一个有力佐证是：一般被看成是物质微粒的电子，实验证明它也能够发生衍射现象，表现出波动性质。

第二节 可见光谱

一、可见光谱的范围和特性

在第一节里我们已经谈到光现象实质上是一种电磁现象，因此光是属于一定波长范围内的电磁辐射，光波也就是一定频率的电磁辐射而产生的电磁波。电磁辐射的波长范围很广，最

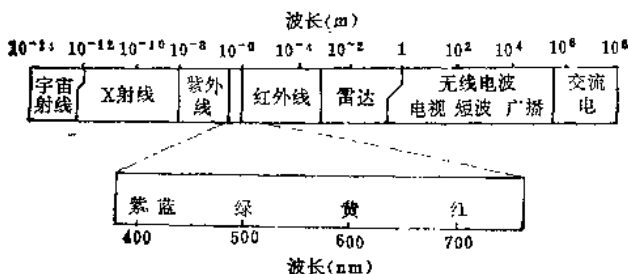


图1.9 电磁波谱

短的如宇宙射线其波长只有千兆分之几米（宇宙射线分为两类：一是原宇宙射线，是来自地球以外的高能量带电粒子，其中约91.5%是质子，7.8%是氦核，其余是碳、氮、氧及铁等重要原子核；二是次级宇宙线，由原宇宙线撞击地球上的大气时所产生的，它包括许多基本粒子）；最长的如交流电，其波长可达数千公里。在电磁辐射范围内，只有从380毫微米到780毫微米[1毫微米(nm) = 10^{-9} 米(m)，1毫微米 = 10埃(Å)]波长的电磁辐射能够引起人的视觉，这段波长叫做可见光谱(如图1.9)。电磁辐射的振动频率与波长成反比。可见光谱的红色一端的长波每秒钟振动 400×10^{12} 次，紫色一端的短波每秒振动 800×10^{12} 次。在电磁辐射范围内，还有紫外线、x射线（即伦琴射线，1895年，德国物理学家伦琴首先发现这种射线，这种射线可以穿过木板，使荧光物质发光，还能穿过包在胶卷上的黑纸筒使照相底片感光。由于当时不了解它，认为这种射线还是个“未知数”，所以就把这种射线称为“x”射线）、γ射线、红外线以及无线电波等。可见光、紫外线和红外线是原子与分子的发光辐射，称为光学辐射；x射线和γ射线等是激发原子内部

的电子所产生的辐射，称为核子辐射。电振荡产生的电磁辐射称为无线电波。这些范围广泛的电磁辐射都具有共同的电磁特性——在真空中以相同的速度传播，能呈现干涉和衍射现象。

对于人来说，能为眼睛感受并产生视觉的光学辐射称为可见辐射；不能为眼睛感受，也不产生视觉的光学辐射称为不可见辐射。因而，光学辐射可进一步分为可见辐射与不可见辐射。来自外界的可见辐射刺激人的视觉器官，在脑中产生出光、颜色、形状等视觉印象，而获得对外界的认识。不可见辐射刺激眼睛时不能产生视觉，而作用在皮肤上有时会产生其它感觉，如紫外线产生疼痛感觉，红外线产生灼热感觉。严格地说，只有那种能够使眼睛感觉到的、并产生视觉现象的辐射才是可见辐射或可见光，简称光。但是“光”这个词有时也借用来表示一部分不可见辐射，如红外光或紫外光，红外或紫外激光，x光等。这里讲的“光”已经不是光度学和色度学所研究的主要对象了。

前面讲过，可见光谱的波长范围在380~780毫微米之间，波长比380毫微米更短的一段辐射是紫外线；波长比780毫微米更长的一段辐射是红外线。在特殊情况下，人眼的感受范围可以扩大到红外线和紫外线部分。在实验室内的测量表明，用高能量辐射照射眼睛，视觉范围可以扩大到312.5毫微米的紫外线一端及1150毫微米的红外线一端。但是为了看到1000毫微米波长的光，光的强度要比看到562毫微米波长的光增加兆兆(1×10^{12})倍以上。

在可见光谱范围内，不同波长的辐射引起人的不同颜色感觉，图1.10和表1-1列出了各种颜色的光的波长范围。光的颜色决定于进入人眼的可见光谱不同波长辐射的相对功率分

布，简称相对光谱功率分布。

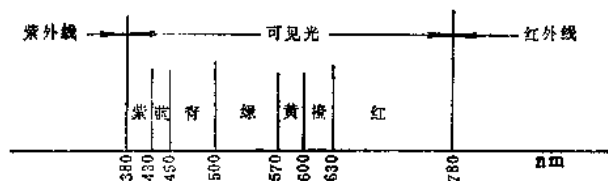


图1.10 可见光谱

表 1—1

颜 色	波长(毫微米)	颜 色	波长(毫微米)
红	780~630	青	500~450
橙	630~600	蓝	450~430
黄	600~570	紫	430~380
绿	570~500		

二、光谱的种类与应用

下面我们简单地介绍一下光谱、光谱的种类和应用。

把光源发出的光的波长作横坐标，强度作纵座标，画成图形来表示，被称为光源的光谱。光谱按产生的方法可以分为发射光谱和吸收光谱两大类。

1. 发射光谱 将欲测的试样（例如氢或某种其他元素）在高温下（如电极、电弧的高热）使原子作高速的相互碰撞而受激发光，经分光镜或其他分光仪后所呈现的光谱为发射光谱。由于产生的情况不同，它又分为连续光谱和线状光谱两种。

(1) 连续光谱 包含由红到紫各种色光在内的连续彩色光带，这种光谱叫做连续光谱。通常是由分子发光而形成的。

(2) 线状光谱 在黑暗的背景上只有一些分立的、不相连的明线，这种光谱称为线状光谱（或明线光谱）。通常是由原子发光而形成的。

2. 吸收光谱：将欲测试样置于发射连续光谱的光源前，连续光谱的光源经过试样吸收后所呈现的特性光谱即为吸收光谱。

各种不同的元素产生不同的特性谱线，经过光谱分析后，我们可以算出每条谱线所表示的强度，从而可以识别它是哪种元素发出来的，所以我们把一种元素发出的光谱线，称作这种元素的标识谱线。

既然每一种元素都有它特有的标识谱线，那么，把某种物质所生成的线状光谱同各种已知元素的标识谱线进行比较，就可以知道这种物质是由哪些元素组成的。根据物质的光谱来判定它的化学成份的方法就叫光谱分析。光谱分析中如只分析物质化学成份，称为定性分析；如在作定性分析的同时，还根据标识谱线的强度来确定元素含量的多少，这样的分析叫做定量分析。

三、分光镜与摄谱仪

利用各种不同的元素有不同的标识谱线，我们可进行物质的光谱分析。但是，怎样才能取得某一物质所发出的光的光谱呢？下面介绍用来作光谱分析的分光镜和摄谱仪。

可产生并观察光谱的仪器叫做分光镜。分光镜的型式很多，各型式间除了操作原理的差异外，还有被探测的辐射线也有所不同。辐射频率区间一般由红外光到x射线。

图1.11是分光镜的原理图。管A叫做平行光管，在靠近棱

镜P的那一端是凸透镜 L_1 ，另一端附有一个宽度可调的狭缝S，它的位置刚好落在透镜 L_1 的焦平面上。光源发出的光经过狭缝射到透镜 L_1 上，经过折射以后就成为平行光束。这束平行光经过棱镜折射以后发生色散，红光偏折最少，位于最外侧；紫光偏折最大，位于最内侧。各种色光依次排列，形成一系列平行光束。射到管B里去。管B叫做望远镜，靠近棱镜端的凸透镜 L_2 是物镜，另一端的凸透镜是目镜。双棱镜射来各种颜色的平行光束，经过物镜 L_2 折射以后，分别会聚在它的焦平面MN上形成光谱。由于光谱的位置在目镜的焦平面以内，经过目镜放大以后，光谱带拉得更宽，从目镜中看起来就格外清楚。

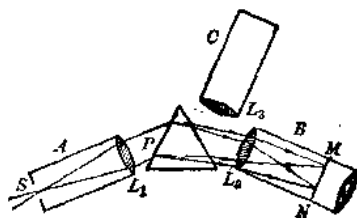


图1.11 分光镜原理图

在分光镜的另一侧，还有一个C管，叫做标度管。在它的靠近棱镜的一端有一个凸透镜 L_3 和一个玻璃刻度尺，通过设置在管的另一端的小灯泡照明这个刻度尺，于是刻度上的每一条标线经过 L_3 折射以后，成为一束平行光线，再经过棱镜的一个折射面的反射，进入望远镜管B里（如图1.12所示），通过物镜 L_2 的折射，又在焦平面MN处构成刻度尺的象。从望远镜的目镜中观看时，光谱就落在刻度尺的背景上，可以很方便地确定光谱位置。

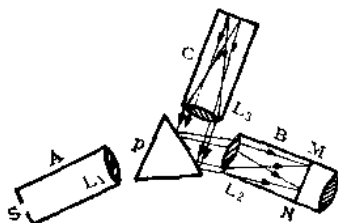


图1.12 分光镜原理图

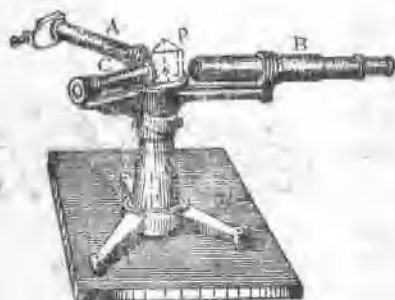


图1.13 分光镜外形图

图1.13是分光镜的外形图。

如果在分光镜望远镜筒中的MN处，置放照相感光胶片，就能把光谱的照片拍摄下来，供进一步研究用。这种能够得到光谱并且能够拍摄光谱照片的仪器就叫做摄谱仪。

第三节 物体在人眼中的成象与人的视觉功能

一、物体在人眼中的成象

人的眼睛的作用类似于照像机，外界物体发出的光线，通过眼睛的屈光介质（人眼中对光线起折射聚焦作用的物质，称屈光介质），在视网膜（感光神经）上聚焦成象，其基本原理与照像机相似。但这只能是一种比较，二者仍有较大差别。

光线射入玻璃棱镜再从棱镜进入空气会发生屈折(图1.14)。在空气中，一个凸透镜对光的作用正象棱镜对光的作用一样，因为光线与透镜表面各点相切的平面均可当作棱镜看待(图1.15)。我们在透镜轴线上的A点放一个点光源，该光源向空间的各个方向发光。从轴线方向入射到透镜中心的光线沿直线传播，不发生屈折，入射到透镜的其它部分的光线则偏离原直线方向，而且离开透镜中心愈远，屈折程度愈大。于是从光源发出的光穿过透镜后再会聚起来，并且一个理想的透镜应使这些光线聚焦于一点B(图1.16)。如果在暗室内，于透镜另一

边的适当距离放一块纸板，那么纸板上将形成明亮而清晰的点光源的象。

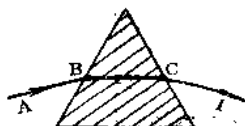


图1.14 棱镜对光的折射作用

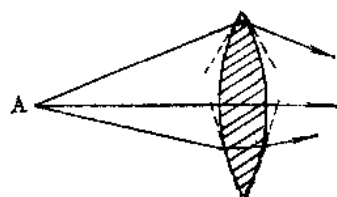


图1.15 透镜对光的会聚作用

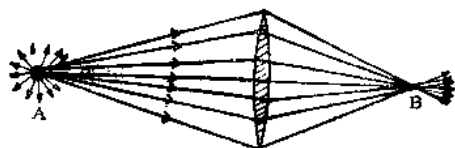


图1.16 A点的光线经过透镜后聚焦于B点

点光源按上述原理在照像机底板上成象，光线也按相似的原理在眼睛的视网膜上成象（见图1.17）。但是眼睛和照像机不同，眼睛内没有空气，而有房水和玻璃体，都是透明液体介质，比空气有更高的折射率。晶体前面的曲率半径大于后面的曲率半径，这又和简单的玻璃透镜不同。晶体在眼内的折射力较低，只起部分的折射作用。眼睛对光线的折射作用主要由角膜来实现。在暗室内，若在眼睛前方放一个点光源A，这个光源向空间各个方向发射光线（图1.17），有些光线照射在眼白上，有些光线照射在皮肤上，而某些光线通过角膜进入眼球内部。光线经过角膜和晶体的折射形成一个圆锥形的光束，会聚