

大学物理学

第四册

(美) F·W·SEARS 等著
恽 瑛 等译

人民教育出版社

PDG

第四册目录

第三十八章 光的本性

与传播	1
38-1 光的本性	1
38-2 光源	3
38-3 波、波阵面和 光线	5
38-4 光速	8
38-5 反射定律和折射 定律	11
38-6 折射率	14
38-7 吸收	16
38-8 照明	18
习题	20

第三十九章 平面上的反 射和折 射

39-1 惠更斯原理	23
39-2 从惠更斯原理推导 反射定律	25
39-3 从惠更斯原理推导 斯涅耳定律	26
39-4 全内反射	29
39-5 棱镜的折射	32
39-6 色散	34
39-7 虹霓	36
习题	38

第四十章 单反射及单折 射成象

40-1 引言	42
40-2 平面镜反射	43
40-3 球面镜反射	47
40-4 焦点和焦距	54
40-5 图解法	56
40-6 平面折射	58
40-7 球面折射	62
40-8 摘要	65
习题	66

第四十一章 透镜和光学 仪器

41-1 把象当作物	70
41-2 薄透镜	72
41-3 发散透镜	76
41-4 图解法	78
41-5 把一透镜之象当作 下一透镜之物	80
41-6 透镜方程的牛顿 形式	80
41-7 厚透镜	82
41-8 透镜的象差	84
41-9 眼	86
41-10 视力缺陷	88
41-11 放大镜	91

41-12	照相机	92
41-13	放映机	94
41-14	复显微镜	96
41-15	望远镜	97
	习题	100

第四十二章 干涉和衍射.....107

42-1	干涉和相干光源	107
42-2	杨氏实验和坡耳实验	111
42-3	干涉条纹的强度分布	115
42-4	反射时相位的改变	117
42-5	薄膜干涉 牛顿环	118
42-6	玻璃上的薄涂层	121
42-7	迈克耳孙干涉仪	122
42-8	菲涅耳衍射	127
42-9	夫琅和费单缝衍射	130
42-10	平面衍射光栅	138
42-11	晶体对X射线的衍射	142
42-12	光学仪器的分辨本领	144
42-13	全息照相术	147
	习题	151

第四十三章 偏振.....156

43-1	偏振	156
43-2	反射产生偏振	157

43-3	双折射	160
43-4	起偏振镜	162
43-5	偏振百分数 马吕斯定律	165
43-6	光的散射	168
43-7	圆偏振和椭圆偏振	170
43-8	偏振光所产生的颜色	172
43-9	光学应力分析	173
43-10	晶体的研究	175
43-11	旋光性	175
	习题	177

第四十四章 光子 电子原子.....181

44-1	光的发射与吸收	181
44-2	热电子发射	183
44-3	光电效应	186
44-4	线光谱	188
44-5	玻尔原子	191
44-6	原子光谱	197
44-7	激光	200
44-8	X射线的产生和散射	204
44-9	波动力学	209
44-10	电子显微镜	212
	习题	213

第四十五章 原子、分子和固体.....219

45-1	不相容原理	219
45-2	原子结构	223

45-3	双原子分子	227	46-7	核裂变	263
45-4	分子光谱	229	46-8	核聚变	265
45-5	固体的结构	232	46-9	基本粒子	267
45-6	固体的性质	235	46-10	高能物理学	271
45-7	半导体	237	46-11	辐射与生命科学	274
45-8	半导体器件	239	习题	276	
	习题	242			

第四十六章 原子核

	物理	244	单数习题答案	278
46-1	核型原子	244	索引	283
46-2	核的性质	247	国际单位制	
46-3	天然放射性	251	物理恒量	
46-4	核的稳定性	255	单位换算因子	
46-5	放射性转变	258	三角函数的真数	
46-6	核反应	262	常用对数	
			元素周期表	

第三十八章 光的本性与传播

38-1 光的本性

大概在十七世纪中叶以前，人们普遍认为光是由粒子流或微粒流所组成。当时设想这些微粒是从诸如太阳或烛焰那样的光源发射出来，且沿直线向外行进。这些微粒可透过透明物质，或从不透明物质的表面反射出来。当这些微粒进入眼睛，就激起视觉。

在十七世纪中叶，当大多数光学工作者接受微粒说时，光的波动理论已开始发展。1678年，惠更斯(C. Huygens)证明反射定律和折射定律可用波动学说来解释，并且证明这一学说也可简单地解释当时才发现的双折射现象。但是波动学说并没有立即为大家所接受。有人提出异议：如果光是一种波动，由于波动能绕过障碍物，那末应该能看到光的转弯。现在我们知道，光波的波长很短，虽然光波确实能转弯，可是这种转弯很小，因而通常觉察不到。事实上，格里马迪(Grimaldi)在1665年出版的一本书中已经指出光波绕过物体边缘这种现象，即众所周知的衍射，只是当时还未认识这种现象的重要性。

在十九世纪的前二十五年，杨(T. Young)和菲涅耳(A. Fresnel)作的干涉实验，以及稍后傅科(L. Foucault)作的液体中光速的测定，明确地表明有些光学现象用微粒说来解释是不恰当的。这些现象，包括干涉和衍射，可以根据波动说来理解，这将在第四十二章中进一步讨论。杨氏实验能测定光波的波长，菲涅耳所证明的光的直线传播，以及格里马迪等所观察到的衍射效应，都可以用短波长的波的行为来说明。

在光的理论中,另一个重大的进展是麦克斯韦的工作,已在前一章中述及。1873年,麦克斯韦证明:振荡电路会辐射电磁波。电磁波的传播速度可从纯电磁测量中计算出来,其数值很接近于 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在实验误差范围内,这数值等于光的传播速度的测量值。光是由波长极短的电磁波所组成,这一事实看来已经证据确凿。1887年,赫兹应用尺寸很小的振荡电路,成功地产生了短波长的波(现今我们称之为微波),这些波无可置疑是电磁波。赫兹还证明这些波具有光波的所有特性。这些波可以反射、折射、由棱镜聚焦、偏振等等,犹如光波一样。麦克斯韦光的电磁理论及赫兹对此理论的实验验证,是物理科学的巨大成就之一。十九世纪末叶,人们普遍地认为,关于光的本性的知识,即使将来还有什么要补充的,那也是很少的了。但情况并非如此!

经典电磁理论无法解释与光的发射和吸收有关的几种现象。光电发射现象就是一例。那就是光照射到导体表面,就有电子从导体发射出来。1905年,爱因斯坦发展了五年前普朗克所提出的概念,并假设光束的能量集中在微粒即光子中。爱因斯坦仍然保留波动观念,他认为一个光子具有一种频率,而一个光子的能量与其频率成正比。光电效应的机理在于光子的能量转移给电子。密立根实验证明,光电子的动能与爱因斯坦提出的公式完全符合。这些实验将在第四十四章中较详细地讨论。

光的光子本性的另一个惊人的验证是康普顿效应。1921年,康普顿(A. H. Compton)成功地测定了一个光子和单一电子在“碰撞”前后的运动,并且发现它们的行为如同具有动能和动量的物体一样,在碰撞中这两个量是守恒的。因此,光电效应和康普顿效应似乎都要求回到光的微粒说上来。

这些表面上矛盾的实验,从1930年后随着量子电动力学的发展才协调起来。量子电动力学是一种综合性理论,既考虑波动性

又考虑粒子性，光的传播现象最好用电磁波理论来描述，而在光的发射和吸收过程中，光与物质的相互作用是一种微粒现象。

38-2 光 源

由于物质分子热运动的结果，所有物体都发射电磁辐射；这种辐射是不同波长的混合，称之为热辐射。当物体温度达到 300°C 时，这些波中最强的波的波长是 $5000 \times 10^{-9} \text{ m}$ 或 5000 nm ，即在红外区。在 800°C 温度时，物体发射足够的可见辐射而成为自发光并呈“赤热”状态。不过绝大部分的发射能量仍是属于红外波的。到了 3000°C ，即近于白炽灯丝的温度，辐射能包含足够多 400 nm 到 700 nm 间的“可见光”波长，此时物体呈近于“白热”的状态。

在现代白炽灯中，灯丝是细钨丝线圈。诸如氩那样的惰性气充入灯泡中，以减少灯丝的蒸发。白炽灯的大小不等，小的可以不大于一颗麦粒，大的输入功率达到 5000 W ，供飞机场照明用。

最亮的光源之一是碳弧灯。两根碳棒，长为 10 到 20 cm ，直径约为 1 cm ，或者水平放置，如图 38-1(a) 所示，或者成一角度放置，如图 38-1(b) 所示。有时这些碳棒包上一层铜，以增进导电性。启动碳弧灯时，将两碳棒连接到 110 V 或 220 V 直流电源，使两碳棒短暂地接触，然后拉开。这时，正极碳棒上强烈的电子轰击在

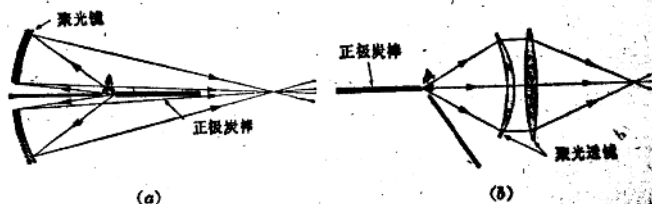


图 38-1 两种型式的碳弧灯。(a)中等电影院所用的聚光镜式碳弧灯；(b)大型电影院所用的聚光透镜式碳弧灯。

正极棒的一端形成极为炽热的陷口。这一端就是光源其温度约为 4000°C 。当碳棒逐渐烧蚀时，利用电动机或钟表结构使碳棒间保持确切的间距。在所有电影院中都应用碳弧灯，它们的工作电流为五十到几百安培。

通常的实验室光源选用汞弧灯。两根钨丝电极密封在玻璃管或石英管的两端。阴极周围是一池水银。两电极接上一电位差，再将管子倾斜，直至水银与两电极相接触。一些水银就蒸发了，当管子回复到原来的直立位置时，电子和水银正离子保持放电。当水银在低压时，水银原子发射一种特征光，只具有黄、绿、蓝和紫光。可以用铍镨滤光器来吸收黄光，而用黄玻璃滤光器来吸收蓝光和紫光，所剩的为很窄的波带所组成的强烈绿光，其平均波长为 546 nm 。低压汞弧灯只包含汞的一种同位素，其原子质量为 199 ，可以向美国国家标准局索购。汞弧灯的绿光由极窄的波带所组成，非常接近单色光。

如果把石英汞弧灯的电流增加，它的温度就大大地升高，水银蒸气压将升到 50 至 100 atm 。这种灯需要加以水冷，当它工作时是一个十分强烈的白光光源。

钠弧灯是很强的黄光源，其平均波长为 589.3 nm 。这种灯管用特种玻璃制成，不会受钠侵蚀，电极密封在管内。每一电极是一灯丝，它发射电子，以通过惰性气体来维持放电。在惰性气体中放电几分钟后，管内温度就升高到某一数值，此时钠蒸气压升高到足以使相当多的钠原子发射出钠的特征黄光。钠灯经济耐用，有时用作街灯，也因为钠光几乎是单色光，对眼睛没有色差，视敏度较大。

照明工程中，荧光灯是一个十分重要的发展。这种灯是由一根充有氩气和微量汞的玻璃管构成。灯的两电极用钨丝制成。在汞-氩混合气中发生放电时，汞原子和氩原子发射的可见光并不

多。但是有大量的紫外光(其波长小于可见紫光)。紫外光被涂在玻璃管内壁的一层物质所吸收,这种物质称为磷光剂。磷光剂具有发射荧光的性质,这意味着当磷光剂受到较短波长的光照射时,会发出可见光。采用不同性质的磷光剂,可制成能发出任何所需颜色的荧光灯。普通用的磷光剂有:发粉红光的硼酸镉,发绿光的硅酸锌,发蓝光的钨酸钙,发白光的混合物。

前面叙述的光源中最强的是碳弧灯,它可从相当小的表面发射出大量的辐射功率。不过它的辐射是以较大的立体角散开的;因而只有其中一部分可以用透镜或反射镜收集而聚焦于一设备上。在44-7节中,将描述并讨论一种可供广泛使用的光源,称为激光器。激光器产生极强的窄光束,并可用透镜全部截收并聚焦于物体上。激光束的功率可达很高的强度,以至可用来切割钢材,熔接高熔点的材料,并且引起许多其他效应,这些效应在物理学、化学、生物学和工程科学中是至关重要的。

38-3 波、波阵面和光线

用波阵面来表示任何一种波列是很方便的。波阵面定义为,一个物理量的振动相位相同的所有点的轨迹。因此,在从一个点源向所有方向发出声波的这种情况下,以波源为中心的任何同心球面都是可能的波阵面。在这些球面中,有些是压力最大的点的轨迹,有些则是压力最小的点的轨迹,还有其它等等;但是在任一个球面上,压力变化的相位是相同的。通常只画几个波阵面,一般画的都是那些通过扰动的最大值和最小值的波阵面。这种波阵面彼此间隔半个波长。

如果是光波,则与声波压力相当的物理量是电场或磁场。通常不需要在图中指明场的大小或方向,而只要简单地画出波阵面同某参考平面的交线来表示波的形状。例如,由一小光源辐射出

去的电磁波,可用以此光源为中心的一些同心球面来表示,或如图38-2(a)用这些球面与图平面的交线来表示。在距光源相当远的地方,那里的球面半径很大,这些球面就可看成平面,于是得到一系列平面波,如图38-2(b)所示。

一列光波往往可以更简单地用光线表示,而不用波阵面。在微粒说里,一条光线只是一颗光微粒所走的路径。从波动观点来看,一条光线是一条假想的、按波行进方向画出的线。因此,在图38-2(a)中光线是球形波阵面的诸半径,而在图38-2(b)中,光线是



图 38-2 波阵面与光线

与波阵面垂直的诸直线。事实上,当波在各向同性均匀媒质中行进时,在各种情况下,光线都是与波阵面垂直的直线。在两种媒质的分界面上,例如在玻璃板和空气的分界面上,光线的方向可以突变,但是光线在空气和玻璃中都还是直线。如果媒质不是均匀的,例如,考虑光通过地球大气层时,由于大气层的密度以及光速随高度而变,光线是弯曲的,但仍与诸波阵面垂直。若媒质是各向异性的,如在某些晶体中,则光线的方向就不再总是与波阵面垂直。这一问题将在第四十三章中详细讨论。

从一公共点发出的细锥光线,叫做光线锥。从一有限表面的所有点发出的全部光线锥,叫做光束。

可见电磁波(即能引起视觉的电磁波)的波长在 0.00004 cm 和 0.00007 cm 之间。由于这些波长很小,因而用小的长度单位来表示更方便。

常用的小单位有三种：微米($1\mu\text{m}$)，纳米(1nm)和埃(1\AA)。

$$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$$

$$1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10^{-7}\text{cm}$$

$$1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m} = 10^{-8}\text{cm}$$

在较老的文献中，微米(micrometer)有时叫做 micron，纳米(nanometer)有时叫做毫微米(millimicron)；这些旧名称现在不用了。在光学仪器设计、色度学和生理光学的领域中大多数工作者都用纳米(nm)表示波长。例如，从钠焰发出的黄光的波长为 589nm ，而光谱学家将这种黄光的波长定为 5889.963\AA 和 5895.930\AA 。

图 38-3 是电磁波谱图。虽然不同波长的波必须用不同的方

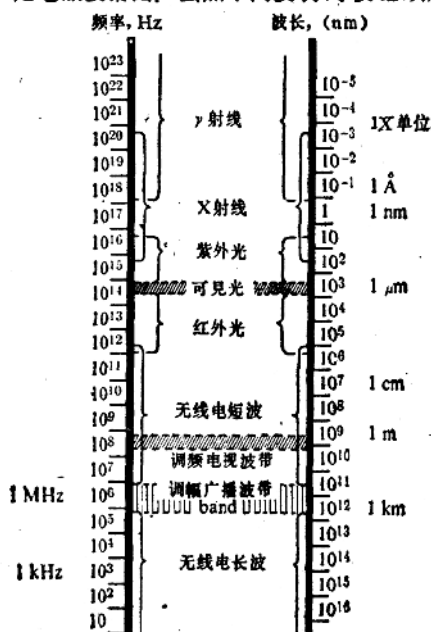


图 38-3 电磁波谱图

法产生,但是从基本性质来说,它们都是相似的。注意,图中可见光谱只占很小的一段。

可见光谱中的不同部分引起不同颜色的感觉。在可见光谱中不同颜色的波长大致如下:

从 400 到 450 nm	紫色
从 450 到 500 nm	蓝色
从 500 到 550 nm	绿色
从 550 到 600 nm	黄色
从 600 到 650 nm	橙色
从 650 到 700 nm	红色

用特殊光源或者特殊滤波器,可将波长范围限制在窄小的波段内,比如说从 1 到 10 nm。这种光也可称为单色光,意即单一颜色的光。只含单一波长的光是一种理想情形,这对理论计算是有用的,但在实验上是不可能做到的。在理论的讨论中用到“550nm 单色光”这一短语时,指的是单一的波长;但在实验的描述中,它意味着 550 nm 左右的窄波带。

38-4 光 速

真空中光的速率是自然界的基本常数之一。因为光速的值很大(约为 186,000 英里·秒⁻¹ 或 3×10^8 米·秒⁻¹),以致直到 1676 年还不能作实验的测量。那时人们还普遍地认为光以无穷大的速率传播。

首次尝试测量光速的是伽利略,他提出了一种方法。两个实验观测者各位于相距约 1 英里的两山顶上。每人备有一盏灯,实验是在夜间进行的。一个人首先打开他的灯,当第二个人看到这灯光后,立即打开他自己的灯。这样,从两灯间的已知距离,以及第一个观测者开灯时刻与他看见第二个人的灯光那时刻之间的时间

间隔,就可计算光速。从原理上讲,这实验是完全正确的,但是我们知道光速是太高了,而用这种方法来测量时间间隔,就没有任何准确度可言。

1676年,丹麦天文学家罗末(Olaf Roemer)从他对木星(行星)的一颗卫星所作的天文观测中得到第一个明确的证据,即光是以有限速率传播的。木星有十二颗小卫星或小月亮,其中四颗是足够亮的,用中等望远镜或双筒野外望远镜就可看到。这些卫星看起来是行星圆盘一侧或另一侧的一些小亮点。这些卫星绕木星而旋转,正如我们的月亮绕地球旋转一样,因为它们的轨道的平面与地球和木星绕行太阳的轨道平面近乎相同,所以每颗卫星每绕一圈,都有一段被木星所遮食。

罗末测量木星的一颗卫星发生相继两次遮食的时间间隔(约42小时),从而测定此卫星绕行一周的时间。他发现,把长时期观测的结果加以比较,当地球远离木星时测定的周期比平均值长些;而当地球靠近木星时测定的周期比平均值短些。他正确地得出如下结论:卫星绕行周期的变化是由于木星和地球间距离的变化。

图38-4说明了这一情况,但不是按比例画的。当地球和木星处在 E_1 和 J_1 位置时开始观测,因为木星在它的轨道上绕太阳一

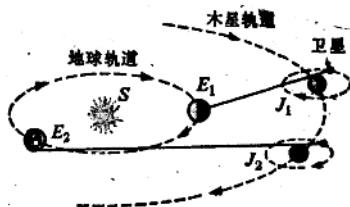


图38-4. 罗末推算光速的方法。

周约需12年,所以在地球移动到 E_2 这段时间内(约五个月之后),木星只移动到 J_2 。在这段时间内,地球和木星之间距离不断地增

大。因此每一次遮食时，从卫星发出的光所行进的距离要比前一次遮食时所行进的距离稍大，所以观测到的卫星绕行周期要比真正的周期稍长。

罗末从观测得出结论：光行进地球轨道直径这样长的距离所需的时间为22分钟。在罗末时代，地球轨道直径的最佳值约为172000000英里。虽然没有记录说明罗末是否真作过这一计算，但只要他用过上述数据，他就可得光速约为130000英里·秒⁻¹，或 2.1×10^8 米·秒⁻¹。

法国科学家斐索 (Fizeau) 在1849年首次成功地用纯地面测量测定了光速。图38-5为他所用仪器的示意图。透镜 L_1 在靠近齿轮 T 边缘的一点上形成光源 S 的象。令齿轮 T 快速旋转。 G 是斜放的一块透明玻璃板。先设齿轮没有转动，而光通过轮齿间的一个空隙。透镜 L_2 和 L_3 相距约8.6 km，在反射镜 M 处形成光源的第二个象。光线从 M 反射回来，重复它原来的路径，从玻璃板 G 部分地反射，通过透镜 L_4 而进入观测者 E 的眼睛。

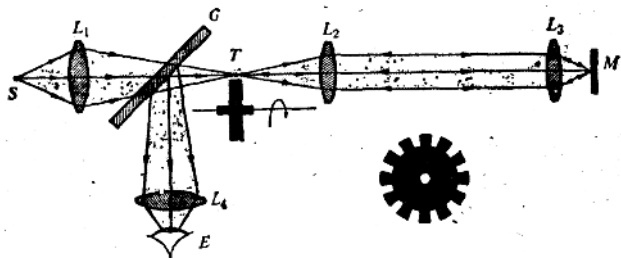


图38-5 斐索测量光速的齿轮法。 S 为光源， L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 为透镜。 T 为齿轮， M 为反射镜， G 为玻璃板。

如果令齿轮 T 旋转，从 S 发来的光就被“斩”成一系列有限长度的波列。如果轮的转速是这样，当使一个波列的波阵面曾行进至镜面而后返回的这段时间，齿轮的不透明轮齿移动至空隙原先

所占据的位置，那末就没有反射光到达观察者 E 。如果齿轮的角速度加倍，通过任一个空隙的光线反射回来时能通过下一个空隙， S 的象就能再次看到。已知角速度、轮的半径、空隙间距（齿距）和齿轮到反射镜的距离，就可算出光速。斐索测量的准确度不高，他所得的值为：

$$3.15 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

斐索的仪器后经傅科改进，他用旋转平面镜替代齿轮。此外，傅科还在轮和镜之间放一根装满水的管子，他证明水中的光速比空气中的小。（旧的微粒说要求水中的光速比空气中的大，这些测量在那时被当作为微粒说站不住脚的的决定性证明。）

应用傅科方法所做的最精密的测量是由美国物理学家迈克尔孙 (Albert A. Michelson, 1852—1931) 完成的。他的首批实验是在 1878 年完成的，当时他是安纳波利斯 (Annapolis) 海军学校的教员。他临死时所做最后一次实验，是在 1935 年由佩斯 (Pease) 和佩尔孙 (Pearson) 继续完成的。

分析 1969 年为止的所有测量结果，得到光速的最可几值为

$$c = 2.9979250 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

这一值的误差范围在 $\pm 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之内。

因为现今我们确信真空中任何电磁波的速率为

$$c = \sqrt{1/(\epsilon_0 \mu_0)} = \sqrt{k/k'}$$

又因在 mks 制中选 k' 值正好为 $10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ ，上式提供求电常数 k 值的最精密的方法：

$$k = k' c^2$$

因为测量光速比测量两带电体间的作用力精确得多。

38-5 反射定律和折射定律

大多数物体之所以为我们看见，是因为它们把光线反射到我们的眼睛。

们的眼内。最常见的一类反射，叫做漫反射，即光线向各个方向反射。房间里一张桌子上放一本书，只要有一个点光源亮着，就可以从这房间的任何方位看到此书。只要反射物体的粗糙程度在“线度上”比反射光波的波长为大，就会发生这种漫反射。另一类反射，叫做单向反射或镜面反射，一细光束或一锥光线只沿一个方向反射。这种反射发生在光滑表面上，表面的粗糙度比反射光的波长要小。例如，吸墨纸的反射是漫反射，而镜子的反射是单向反射。抛光的汽车车身的反射，既有漫反射，也有镜面反射。我们主要关心镜面反射，在以下的讨论中，“反射”一词意即“镜面反射”。

图 38-6(a) 表示一细窄的平面光波列从左上方入射到平坦表面上，这表面将 a 、 b 两种透明物质分开，例如空气和玻璃。在分界面上，一部分入射光被反射，而另一部分通过分界面进入下面的媒质，即被折射。

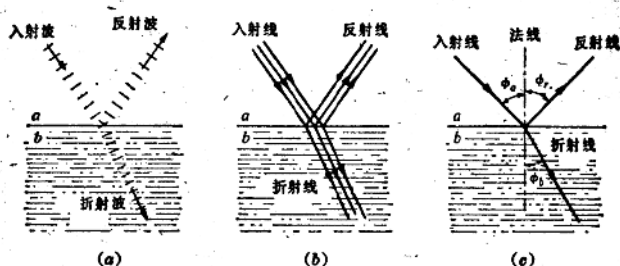


图 38-6 (a) 一平面波列，在两种媒质的界面处，一部分被反射，一部分被折射。

(b) 图(a)中的光波以光线表示。

(c) 为简单起见，只画出一条入射线、一条反射线和一条折射线。

入射、反射和折射光束的方向，是用它们跟入射点的界面法线之间的夹角来规定的。为此目的，如图 38-6(c)所示，用一条射线来表示就足够了，虽然一条射线只是几何的抽象。对于入射、反射

和折射光束方向的仔细实验研究, 导致下列结论:

1. 入射、反射和折射的射线与界面的法线都位于同一平面。因此, 如果入射线在图平面内, 而这分界面与图平面垂直, 那么反射线和折射线也都在这图平面内。

2. 对于任何颜色的光和任何两种物质, 反射角 ϕ_r 等于入射角 ϕ_a 。于是,

$$\phi_r = \phi_a \quad (38-1)$$

这个实验结果, 即 $\phi_r = \phi_a$, 以及入射线、反射线和法线都位于同一平面这一事实, 合称为反射定律。

3. 对于单色光来说, 当分界面两侧的 a, b 两种物质给定时, 入射角 ϕ_a (物质 a 中的光线和法线之间的夹角) 的正弦与折射角 ϕ_b (物质 b 中的光线和法线间的夹角) 的正弦之比是一常数。于是,

$$\frac{\sin \phi_a}{\sin \phi_b} = \text{常数} \quad (38-2)$$

这一实验结果, 连同入射线、折射线和界面的法线都位于同一平面这一事实, 合称为折射定律。虽然这个定律是否由斯涅耳(W. Snell, 1591—1626)独创尚可怀疑, 但通常仍归功于他, 这个定律也就叫做斯涅耳定律。

反射定律和折射定律只涉及相应诸光线的方向, 却丝毫未论及反射光线和折射光线的强度这样同等重要的问题。这些强度决定于入射角的大小; 暂且我们只简单地说一下: 正入射时, 反射部分最小, 即只有百分之几; 随着入射角的增大, 反射部分的百分比也增加; 掠射时, 即 $\phi_a = 90^\circ$, 反射部分几乎达到 100%。

其次, 假设图 38-6 中光线是从分界面的底下入射的。我们发现依然有反射光线和折射光线, 并且这些光线连同入射光线和法线都位于同一平面。这时的反射定律与原来光线在空气中入射时