

光学

周敦忠 编著

兰州大学出版社



光 学

周敦忠 编 著

兰州大学出版社

1988年·兰州

内 容 提 要

本书是作者在兰州大学物理系讲授光学课的讲义经修改写成的。内容包括几何光学、光的辐射、光的干涉、光的衍射和信息光学、光在各向同性和各向异性媒质中的传播、光的速度、光量子、激光等,并附有习题。

本书可作为高校物理专业以及与物理有关的专业的光学教学参考书或教材,也可供有关科技人员参考。

光 学

周敦忠 编 著

兰州大学出版社出版

(兰州大学校内)

兰州大学印刷厂印刷 甘肃省新华书店发行

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 21.25

1988年1月第1版 1988年1月第1次印刷

字数: 490千字 印数: 1—2200册

ISBN 7-311-00081-5/0·19 定价: 5.75元

目 录

绪 论	(1)
习 题	(5)
第一章 光学成象的几何理论	(7)
§ 1 点光源, 物与象	(7)
1.1.1 点光源光线的概念	(7)
1.1.2 同心光束与球面波	(8)
1.1.3 物与象	(8)
§ 2 光在单球面上的折射成象	(9)
1.2.1 符号规则	(9)
1.2.2 近轴光线的概念	(10)
1.2.3 成象的基本公式	(11)
1.2.4 焦点、焦距、焦面、光焦度	(11)
1.2.5 小物体的象及放大率	(13)
1.2.6 正弦条件和拉格郎日不变式	(13)
§ 3 共轴球面系统成象的逐次计算, 薄透镜	(14)
1.3.1 共轴球面系统成象的逐次计算	(14)
1.3.2 薄透镜	(15)
§ 4 共轴球面系统的基点, 厚透镜, 透镜的组合	(20)
1.4.1 共轴球面系统的基点	(20)
1.4.2 透镜的组合	(23)
1.4.3 厚透镜	(25)
§ 5 反射镜	(28)
1.5.1 球面反射镜	(28)
1.5.2 平面反射镜	(30)
1.5.3 非球面反射镜	(31)
§ 6 全反射, 纤维光学	(31)
1.6.1 (内) 全反射	(31)
1.6.2 全反射棱镜	(32)
1.6.3 纤维光学	(32)
§ 7 光栏	(34)
1.7.1 光栏的概念	(34)
1.7.2 有效光栏, 入射光瞳, 出射光瞳	(35)
1.7.3 视场光栏, 入射窗, 出射窗	(36)

§ 8	透镜和反射镜的象差	(36)
1.8.1	单色象差	(36)
1.8.2	色差	(40)
§ 9	辐射度量学和光度学的基本概念	(42)
1.9.1	辐射度量学的基本概念	(42)
1.9.2	光度学的基本概念	(43)
§ 10	通过光学系统的光通量, 象的亮度和照度	(45)
1.10.1	通过光学系统的光通量	(45)
1.10.2	象的亮度	(46)
1.10.3	象的照度	(46)
	习 题	(47)
第二章	典型光学仪器的原理	(51)
§ 1	眼的构造的作用	(51)
§ 2	照相记录	(53)
2.2.1	照相机、照相物镜、变焦距照相物镜	(53)
2.2.2	照相乳剂	(55)
§ 3	放大镜, 显微镜, 望远镜及目镜	(56)
2.3.1	放大镜	(56)
2.3.2	显微镜	(57)
2.3.3	望远镜	(58)
2.3.4	目镜	(60)
§ 4	成象仪器的分辨率	(61)
§ 5	棱镜光谱仪	(63)
2.5.1	棱镜光谱仪的结构和作用原理	(64)
2.5.2	棱镜的最小偏向角	(65)
2.5.3	棱镜光谱仪的工作光谱区和色散率	(66)
	习 题	(69)
第三章	光辐射的经典模型, 光的频率、强度和偏振状态	(71)
§ 1	光辐射的经典模型	(72)
3.1.1	孤立静止原子的辐射, 球面波与平面波	(72)
3.1.2	波的参量	(74)
3.1.3	辐射场的能量密度和能流密度	(75)
3.1.4	波的复数表示法	(76)
§ 2	辐射的阻尼, 准单色光波	(77)
3.2.1	辐射的阻尼	(77)
3.2.2	付里叶变换	(79)
3.2.3	谱线的自然宽度, 准单色光波	(82)
§ 3	谱线的加宽, 振子的连续频率辐射	(83)

3.3.1	碰撞变宽 (压力变宽)	(83)
3.3.2	多普勒变宽	(85)
3.3.3	振子的连续频率辐射	(87)
§ 4	光的强度 (辐照度), 光程	(88)
3.4.1	光的强度	(88)
3.4.2	光程	(89)
§ 5	光的偏振状态	(89)
3.5.1	直线 (平面) 偏振光,	(90)
3.5.2	椭圆偏振光和圆偏振光	(91)
3.5.3	自然光和部分偏振光	(91)
习 题		(92)
附录3.1	波的复数表示	(94)
附录3.2	阻尼振子的运动方程	(95)
附录3.3	付里叶级数系数的推导	(96)
附录3.4	付里叶级数的复数表示法	(97)
附录3.5	非周期函数的付里叶积分	(98)
第四章	光的干涉	(100)
§ 1	相干性的基本概念	(100)
4.1.1	波的迭加	(100)
4.1.2	相干迭加与非相干迭加	(101)
4.1.3	点光源是相干光源	(103)
4.1.4	光学中相干波的产生	(103)
4.1.5	光程差与位相差	(104)
§ 2	单色点光源的双光束干涉图样, 干涉场的能量守恒	(105)
4.2.1	单色点光源的双光束干涉图样	(105)
4.2.2	干涉场的强度分布与能量守恒	(107)
4.3.3	位相跃变的实验	(108)
§ 3	准单色扩展光源的干涉, 部分相干光, 时间相干性与空间相干性	(108)
4.3.1	准单色点光源的干涉, 时间相干性	(110)
4.3.2	扩展光源的干涉, 空间相干性	(112)
§ 4	光驻波, 维纳实验	(115)
4.4.1	光驻波	(115)
4.4.2	维纳实验	(116)
§ 5	薄膜与厚板 (等厚和等倾) 的干涉	(117)
4.5.1	单色点光源的干涉	(117)
4.5.2	准单色扩展光源的干涉, 干涉条纹的定域	(118)
4.5.3	等倾干涉	(120)
4.5.4	等厚干涉	(122)

4.5.5	透射光的干涉	(123)
§ 6	迈克耳孙干涉仪, 长度基准, 激光比长仪	(123)
4.6.1	迈克耳孙干涉仪	(123)
4.6.2	长度基准	(125)
4.6.3	激光比长仪	(126)
§ 7	多光束的干涉, 法布里——珀罗干涉仪	(126)
4.7.1	多光束的干涉	(126)
4.7.2	法布里——珀罗干涉仪	(129)
4.7.3	法布里——珀罗干涉仪的特征参量	(130)
	习 题	(133)
第五章	光的衍射	(142)
§ 1	惠根斯——菲涅耳原理	(143)
5.1.1	惠根斯——菲涅耳原理	(143)
5.1.2	半波带法	(145)
§ 2	菲涅耳衍射	(147)
5.2.1	园孔的菲涅耳衍射	(147)
5.2.2	园屏的菲涅耳衍射	(148)
5.2.3	互补光栏, 巴俾涅原理	(149)
5.2.4	波带片	(149)
5.2.5	光的直进性和衍射现象产生的条件	(150)
5.2.6	基尔霍夫衍射积分	(151)
§ 3	夫琅和费衍射	(151)
5.3.1	单缝的夫琅和费衍射	(153)
5.3.2	夫琅和费衍射场与光瞳函数的付里叶变换	(155)
5.3.3	园孔的夫琅和费衍射	(157)
5.3.4	行波束的角宽度	(158)
§ 4	衍射光栅	(159)
5.4.1	平面透射光栅	(159)
5.4.2	光栅的自由光谱范围、色散率、分辨率、棱镜光谱仪的 分辨率	(163)
5.4.3	闪耀光栅, 光栅光谱仪	(166)
5.4.4	二维光栅和三维光栅的衍射	(169)
§ 5	全息术	(169)
§ 6	空间滤波和光学信息处理	(174)
5.6.1	光学成象的付里叶变换与空间频率	(174)
5.6.2	相干光学计算机和空间滤波	(175)
5.6.3	相衬法和暗场法	(178)
5.6.4	软边法 (切趾术)	(180)

习 题	(182)
第六章 光在各向同性媒质中的传播	(187)
§ 1 平面光波在两种透明电介质交界面上的反射和折射	(190)
6.1.1 反射与折射时光学现象的分子光学解释	(192)
6.1.2 反射与折射的宏观电磁理论	(193)
§ 2 光的散射	(199)
6.2.1 纯净媒质的分子散射	(199)
6.2.2 浑浊媒质的散射	(202)
6.2.3 拉曼散射 (联合散射)	(203)
§ 3 光的吸收	(204)
§ 4 光的色散	(207)
6.4.1 色散现象	(207)
6.4.2 色散的经典理论解释	(208)
§ 5 金属的光学性质	(211)
§ 6 薄膜光学	(213)
6.6.1 单层介质膜的光学性质	(213)
6.6.2 多层介质高反膜	(215)
6.6.3 干涉滤光片	(216)
习 题	(218)
附录6.1 反射定律、折射定律、菲涅耳公式的推导	(221)
附录6.2 相干散射的光强度	(224)
第七章 光在各向异性媒质中的传播	(226)
§ 1 双折射	(227)
7.1.1 双折射现象	(227)
7.1.2 双折射的物理解释	(228)
§ 2 线偏振器, 二向色性	(233)
7.2.1 双折射线偏振器	(234)
7.2.2 二向色性与人造偏振片	(235)
§ 3 光振动矢量互相垂直的两直线偏振光的干涉, 推迟器	(235)
7.3.1 自然光中光振动矢量互相垂直的两直线偏振光的相 互作用	(235)
7.3.2 由同一偏振光分解的光振动矢量互相垂直的两直线偏 振光的干涉, 推迟器	(236)
§ 4 圆偏振器, 偏振光的检验, 补偿器	(238)

7.4.1	圆偏振器	(238)
7.4.2	偏振光的检验	(239)
7.4.3	补偿器	(240)
§ 5	光振动矢量互相平行的两直线偏振光的干涉, 显色偏振	(240)
7.5.1	正交(相互垂直)线偏振器产生的干涉	(241)
7.5.2	平行线偏振器产生的干涉	(242)
§ 6	外场力作用下形成的各向异性	(243)
7.6.1	弹光效应	(243)
7.6.2	电光效应	(244)
7.6.3	磁场中的双折射	(247)
§ 7	旋光, 法拉弟效应	(247)
7.7.1	晶体与液体中的旋光现象	(278)
7.7.2	旋光的菲涅耳解释	(248)
7.7.3	法拉弟效应	(259)
§ 8	非线性光学	(250)
	习 题	(253)
第八章	光的速度	(257)
§ 1	光速的测定方法	(257)
8.1.1	由木星卫星的蚀测定光速	(257)
8.1.2	恒星的光行差	(258)
8.1.3	齿轮法	(260)
8.1.4	旋转镜法	(260)
8.1.5	克尔盒法	(261)
8.1.6	光速的精确值及其意义	(262)
8.1.7	运动媒质中光的速度, 菲涅耳的以太漂移学说	(262)
§ 2	相速度和群速度	(264)
§ 3	在相对运动的惯性系中的光速	(266)
§ 4	狭义相对论原理	(273)
§ 5	狭义相对论对相互运动的惯性系中光学现象的解释	(277)
8.5.1	光行差的解释	(277)
8.5.2	菲索实验, 菲涅耳以太漂移学说的解释	(277)
8.5.3	纵向多普勒效应的解释	(278)

§ 6 相对论力学简介	(379)
习 题	(281)
附录 8.1 洛伦兹变换公式的推导	(284)
第九章 黑体辐射和光量子理论	(285)
§ 1 黑体辐射	(285)
9.1.1 热辐射, 单色辐出射度和单色吸收率, 基尔霍夫定律	(285)
9.1.2 黑体的辐射定律	(286)
9.1.3 黑体辐射定律的经典理论解释	(287)
9.1.4 黑体辐射的量子理论	(289)
§ 2 光电效应	(291)
9.2.1 光电效应的实验定律	(291)
9.2.2 光电效应的实验定律与光的波动理论的矛盾	(293)
9.2.3 光的量子理论, 爱因斯坦光电效应方程式	(294)
9.2.4 光子的能量, 质量, 动量和角动量	(295)
§ 3 康普顿效应	(295)
§ 4 光压	(299)
§ 5 粒子和波	(300)
习 题	(303)
附录 9.1 黑体腔中辐射场模数的计算	(305)
附录 9.2 $M_\lambda = \frac{c}{4} w_\lambda$ 的证明	(306)
第十章 激 光	(308)
§ 1 原子分子的光谱与原子分子的能级	(308)
§ 2 光的自发辐射, 受激吸收和受激辐射	(313)
§ 3 粒子数的反转分布与激活媒质	(317)
§ 4 谐振腔	(320)
§ 5 激光的纵模和横模	(323)
习 题	(327)

绪 论

光学是研究光的辐射、光的传播、光和物质的相互作用，以及光的性质和光的应用等问题的科学。

人们对光现象的研究，在公元前五、六世纪到一世纪，首先集中在人为什么能看见周围物体这样一个有趣的问题上。古希腊的一些哲学家认为：人们之所以能够识别物体，是由于人眼能向着被看的物体发射一种“视线”，如同人手触摸物体一样。由于实践，觉察到这种看法不妥当：如果视觉的产生是由眼睛能够发射出“视线”的话，那为什么人在黑暗中却看不见物体呢？后来有人提出，由物体发出“光线”，射入人眼，引起视觉。这就是由“视线”到“光线”的认识转变过程。

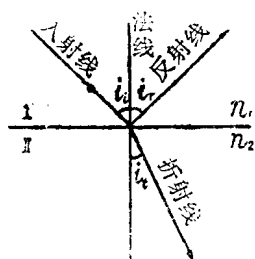
公元前四世纪，我国先秦时代的《墨经》中就已经有了关于光学现象的科学记载。其中总结了光的直进性原理，阴影的形成，以及平面镜、凸面镜和凹面镜成象的实验规律等。这比外国相传最早的希腊欧几里德的光的反射定律约早一百多年。周朝的时候，就能用铜锡合金制成凹面镜聚日取火，而到公元十三世纪西方才有人（英国的培根）开始利用凹面镜取火。

公元九世纪，我国宋代的沈括在《梦溪笔谈》一书中，对凹面镜和凸面镜的成象，以及凹面镜焦点的位置与曲率半径的关系，作了更详细的记载。这说明我国当时的光学工艺技术已有相当的水平。

1621年，荷兰人斯奈耳从实验上发现：光线入射角的正弦与折射角的正弦之比是一个常数。他死后，1673年由笛卡尔总结成现在的折射定律。

到了17世纪初，关于光学中的几个基本定律，从实践中就已经全部建立起来了。现纳如下：

1. 光的直线传播定律：光在均匀媒质中沿着直线传播。
2. 光的独立性传播定律：光线与光线之间，彼此没有影响，即来自不同方向的光线相交后，对每一光线的继续传播不发生影响。
3. 光的反射定律和折射定律：当光线射在两种媒质的交界面上时，一部分折射入第二媒质，叫折射光，一部分被反射回第一媒质，叫反射光，如图1所示。光的反射定律是：（1）反射线在入射面（入射线法线决定的平面）内；（2）入射角 i_i 等于反射角 i_r 。



(图 1)

光的折射定律是：（1）折射线在入射面内；（2）入射角 i_i 和折射角 i_t 的正弦函数之比等于两媒质绝对折射率之比，即

$$\frac{\sin i_i}{\sin i_t} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{或} \quad n_1 \sin i_i = n_2 \sin i_t,$$

n_1 和 n_2 分别是第一媒质和第二媒质的绝对折射率（以后简称折射率）。某种媒质的绝对折射率 n 等于光在真空中的传播

速度 c 和光在该媒质中的传播速度 v 之比，即 $n = \frac{c}{v}$ 。

4. 光线的可逆性定律：由反射定律或折射定律可知，当光线沿反射光线或折射光线的相反方向射入界面时，将由入射光线的相反方向射出。

上述基本定律，由费马于1657年概括为最小时间原理。他说“自然界的行永远以路程为最短为准则”。按照这个原理，光永远是选择这样一条路走，以使它在最短时间内到达目的地。

费马原理可用如下的数学方法表示。设 $n_1, n_2, n_3 \cdots n_m$ 为不同媒质组成媒质层的折射率，如图2所示。光由S点传播到P点时，在各媒质中所走过的几何路程为 $l_1, l_2, l_3 \cdots l_m$ ，速度为 $v_1, v_2, v_3, \cdots v_m$ ，所需时间

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + \frac{l_3}{v_3} + \cdots + \frac{l_m}{v_m} = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{v_i},$$

已知 $n = \frac{c}{v}$ ，因此上式可改写成

$$t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^m n_i l_i.$$

$n \cdot l$ 叫光程，它是光在媒质中所走过的几何路程和媒质折射率的乘积。为了使时间成为极小， δt 必须为零。由于光在真空中的传播速度 c 为一常量，因此

$$\delta \left[\sum_{i=1}^m n_i l_i \right] = 0.$$

如果媒质折射率的改变是连续的，则

$$\delta \int_S^P n dl = 0.$$

费马原理现在的表述是：光从空间一点S传播到另一点P时，沿光程为极值的路径传播。

光学的基本定律虽然从实践中已经建立起来了，但是，关于光的本性的研究，直到17世纪后半期才开始。1672年，牛顿根据光的直线传播定律，发表了关于光的本性的基本假说，他在英国皇家学会发表的演讲中说：“…有充分的根据认为光是实体…”。他认为光是从光源发出的一群完全弹性的球形微粒子流，这些光微粒在均匀媒质中作等速直线运动。最大的光微粒在到达人眼时引起红光的感觉，最小的引起紫光的感觉，白光是所有各种颜色的光微粒的混合体。

牛顿把他在力学中所获得的巨大成就，不加分析的直接应用到光学领域中，按他的理解，光的反射是光弹性小球在遵守 $i_i = i_r$ 的条件下碰撞一个界面时的反跳。而折射定律则是由于光微粒从一种媒质进入另一种媒质中时，在交界面附近范围内，光微粒和媒质质点间的相互作用力有一跃变，从而改变了光微粒的法向速度，切向速度未受到影响而不改变，从而当光微粒飞过这一范围之后，将以新的速度在第二媒质中作直线传播。即

$$v_1 \sin i_i = v_2 \sin i_t \text{ 或 } \frac{\sin i_i}{\sin i_t} = \frac{v_2}{v_1},$$

给上式右端分子分母同除以光在真空中的传播速度 c ，可得折射定律

$$\sin i_i / \sin i_t = n_2 / n_1$$

其中

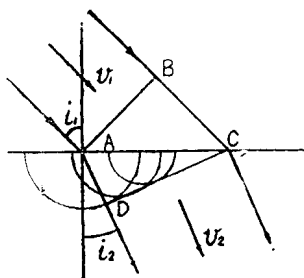
$$n = \frac{v}{c}。$$

可见牛顿的理论，给折射率一定的物理意义，媒质的折射率 n 是光微粒在媒质中的传播速度与真空中的传播速度的比值。并且媒质的密度越大，光在其中传播的速度也越快。

和牛顿同时代的惠更斯，根据光的独立性原理认为，光不可能是微粒子流，如果光是微粒子流的话，那么，从不同的方向射向同一点的光线就不可能互相独立的穿过。于是1678年他在《论光》中写道：“光最不可思议的性质是，从不同的甚至相反的方向射来的诸光线互相穿过，一点也不妨碍彼此的行动”。他注意到光的这一性质与声学现象是相似的，从而提出了关于光的本性的波动学说。他从机械波的观点出发，假定宇宙间（包括物体内部）充满了一种弹性物质——以太。光源在以太中产生一个扰动之后，以太的振动传播过程就形成了光波。

关于光的传播问题，惠更斯提出了一个一般原理：波前上的每一点都可以看作是一个新的次波的波源，在均匀的各向同性媒质中次波源发出球面次波，原波前上不同点所引起次波的包迹就是下一时刻的波前。

应用惠更斯原理可以导出光的折射、反射定律。作为一个例子，我们研究平面波（波前呈平面状，光线是一组平行的直线）在两种媒质交界面上的折射。用 v_2 和 v_1 表示光在第二和第一媒质中的速度。在时刻 $t = 0$ 时，波前在第一媒质中的 AB 面上（图3），按照惠更斯原理，波前上每一点都可看作是新的次波源，过了一段时间 t 后， B 点的振动传到了 C 点，而 A 点的振动已经在第二媒质中形成以 $v_2 t$ 为半径的球形次波，第二媒质中各次波的公切面 CD 为光在第二媒质中的新波前。从图3有：



(图 3)

$$\frac{\sin i_i}{\sin i_t} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{1/v_2}{1/v_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

可见由惠更斯理论得出的折射定律，其中折射率

$$n = \frac{c}{v}$$

是光在真空中的传播速度与光在媒质中的传播速度之比。媒质越密，光的传播速度越小。

对于不同媒质中光的速度，波动说与微粒说得到完全相反的结论。由于当时人们还不能用实验的方法准确的测定光速，因而无法判断这两种学说的正确性。一百五十多年以后，傅科（1860）用高速旋转镜法测定了光在媒质中的速度，证实了惠更斯的理论是正确的。在整个18世纪中，由于牛顿的权威，使光微粒理论在科学中占统治地位达一个世纪之久。但微粒论和波动论的争论却没有停止过。

十九世纪初，一些决定性的发现，导致人们普遍接受了波动理论。这其中最主要的是1801年杨氏（*T. Young*）发现了干涉现象，并用波动学说作了成功的解释，还用干涉的方法首次测定了可见光的波长。1808年马吕斯（*T. L. Malus*）发现了光在反射时的偏

振现象，第二年马吕斯与毕奥又在同一天发现了光在双折射时的偏振现象。同年，阿喇果还发现了偏振面的旋转现象。菲涅耳根据这些现象提出了光是横波的假定。1816年菲涅耳又根据杨氏的干涉原理补充了惠更斯原理，建立了惠更斯——菲涅耳原理，圆满的解释了光的传播和衍射现象，构成了波动光学的基础。

1846年法拉第发现了光振动面在磁场中的旋转，这说明光现象与磁现象存在着某种内在的联系。1856年，韦伯发现光在真空中的速度等于电流强度的电磁单位与静电单位的比值（ 3×10^8 米/秒），这又进一步揭示了光现象与电现象的联系。1865年麦克斯韦总结了前人的研究成果，创立了电磁波理论，预言了电磁波的存在。赫芝从实验上证实了电磁波的存在，并测得电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，从而得出光是电磁波的结论。按照麦克斯韦的理论，电磁波在相对介电常数为 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 的媒质中传播时，其速度为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}.$$

而媒质的折射率

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r},$$

这个关系式把物质的光学常数和电学磁学常数联系了起来。

19世纪末、20世纪初，光的电磁理论在整个物理学的发展中起了很重要的作用，直到现在，还正确的反映着光的波动特性，它是我们掌握现代科学技术不可缺少的基础。同时也说明自然现象都互相密切的联系着这一辩证唯物论的基本原理。

1896年洛伦兹创立了物质结构的电子论，他认为原子和分子中含有带负电的电子，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的辐射。并根据光的电磁理论，解释了媒质对光传播的影响，即光通过媒质时，媒质中的电子在入射光波电磁场的作用下作受迫振动，从而产生光的散射、吸收和色散现象。

尽管光的电磁理论对许多光学现象作了成功的解释，并且预言了某些新现象的存在，但是对于19世纪末发现的黑体辐射，光电效应等实验规律的解释却遇到了严重困难。

1900年普朗克为了解释黑体辐射的实验定律，提出物质辐射电磁波时能量不连续的量子概念。他认为振子辐射或吸收电磁波时，能量的变化是不连续的，是以最小的能量 $h\nu$ （ ν 是电磁波的频率， h 是普朗克常数）的整数倍而变化的， $h\nu$ 叫作能量量子。引入量子这一概念被看作为近代物理学的新起点。

1905年，爱因斯坦为了解释光电效应，提出光不仅在发射和吸收时具有量子性，而且在空间传播时也具有量子性，即光是一粒一粒以速度 c 运动的粒子流，这些光粒子称为光子，简称为光子。每个光子的能量 $\epsilon = h\nu$ 。

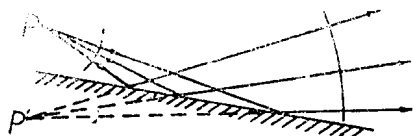
这样，经过250年后，关于光的本性的理论又回到了粒子论，但与牛顿的粒子有本质的区别。光既可以表现为波动，又可以表现为粒子，因此我们说光具有波粒二象性。这再度体现了“实践和认识之每一循环的内容，都比较的进到了高一级的程度”。

1913年玻尔把量子概念应用到原子结构，成功的解释了气体线光谱的简单规律。1924年德布罗意在光的二象性的启发下，提出物质波的假设。1925年薛丁格等人在德布罗意假定的基础上，建立了量子力学。1928年狄拉克把量子力学的方法加以扩大，建立了场的量子化理论。

60年代发展起来的激光技术，正进一步深入揭示光的本性问题。直到现在，人们对于光的本性的认识仍在不断的发展和深化过程中。

习 题

1. 根据光的反射定律证明,在镜面反射时,如图4所示,从光源 P 发出的光线,经镜面反射之后的延长线全交于 P' ,且 P' 位于 P 至镜面的垂直线之延长线上, $PS = SP'$,从此说明 P' 为 P 的虚象。



(图 4)

2. 证明:当平面镜旋转一角度 α 时,反射光线将旋转过 2α 角。

3. 证明:在图5所示的五角棱镜中(光学直角头),光线在棱镜中作两次反射后,其偏转角与入射角无关,永远等于 2α ,当棱镜中的 α 角等于 45° 时,出射光与入射光互相垂直。

4. 应用费马原理导出光的折射定律和反射定律。

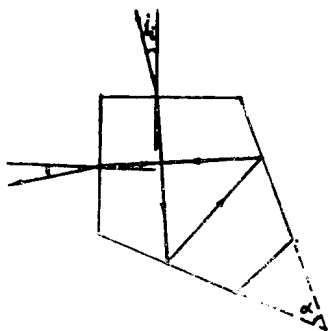
5. 根据光的折射定律证明,当光在折射率连续变化的各向同性媒质中传播时,其曲率半径 R 为:

$$\frac{1}{R} = -\frac{\sin i}{n} \frac{dn}{dz},$$

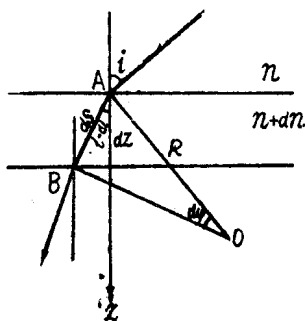
$\frac{dn}{dz}$ 为法线方向折射率梯度。

提示:如图6所示,折射率在 Az 方向连续增加。将媒质分成薄层,厚度改变 dz 时,折射率改变 dn 。曲率半径 R 为

$$R = \frac{ds}{d\varphi}$$



(图 5)



(图 6)

将 $d\varphi = di$, $dz = dscos(i - di)$, $nsini = (n + dn) sin(i - di)$ 代入上式,并略去二级无穷小就可得最后结果。

当光垂直 Az 入射时, R 最小; 当光沿 Az 入射时, 作直线传播。

6. 大气的密度随高度而减小, 因此大气的折射率也随高度而减小。在地球表面附近大气的折射率 $n = 1.000293$, 的射率梯度约为 3×10^{-10} 厘米 $^{-1}$ 。若光线在大气中开始沿水平方向传播, 求光线的曲率半径。若光线从水平方向射出, 而欲使绕地球沿一周传播, 则折射率的梯度应如何?

7. 当光入射在两种媒质的交界面上时, 一部分被反射, 一部分被折射。入射角多大时, 反射光垂直于折射光。

第一章 光学成象的几何理论

光学成象的几何理论（即几何光学），是研究光学仪器的成象原理、成象的计算方法、以及象的照度和亮度的科学。光学仪器一方面用作观测工具，以辅助人眼视觉感官的不足，如放大、望远、照相等；另一方面用作对物质的结构和运动规律的分析研究，如用光谱仪器和干涉仪器来研究宇宙天体、原子分子的结构和运动规律。因此光学仪器在基础理论研究和科学技术中应用非常广泛。

几何光学的成象理论和计算方法，是根据人们在实践中总结出的光的直线传播定律、光的反射和折射定律、光的独立性定律等建立起来的。由于几何光学不考虑光的波动性质，如光的衍射，因此几何光学的成象理论具有一级近似的意义。

实际上，在光频范围内的电磁波，频率 ν 很高（ 10^{14} 秒 $^{-1}$ ），波长 λ 很短（数量级为 10^{-5} 厘米）。在忽略波长有限大小的极限情况下（ $\lambda \rightarrow 0$ ），几何光学所依据的基本定律具有良好的一级近似。因此，几何光学是波动光学在波长趋于零时的极限。在波长不能忽略的情况下，几何光学可看作是波动光学的一级近似，然后根据波动理论对象进行修正。

对于实际的光学系统，这样的处理是完全合适的，因为：第一，偏离这个近似理论的现象（即衍射现象），只有通过细心安排的实验才能观察到；第二，用严格的波动光学方法求解成象问题时，在数学上是极其复杂的，有时还得不到结果，而应用几何光学的方法，直观简单，容易求得满意的近似结果，且其结果与实际观察到的现象也很符合。因此几何光学的方法在处理光学成象问题时，是很有用的。

§1 点光源、物与象

1.1.1 点光源光线的概念

在光学中，把一个发光或散射光的点叫作一个点光源。所谓点光源是指一个体积为无穷小的光能发射源。实际上，任何物体都具有有限的大小和体积，它所显示出的大小随其与观测者的距离而变化，由经验得知，物体对人眼所张的视角小于1分时，观测者所看到的此物体就好象一个点了。可见光学中的点光源是从实践中抽象出的一个数学概念。

光学中把一个物体看作是无穷多点光源的集合。

在光学中除发光点而外，还要用到光线的概念。借助于有孔的光栏可以研究光线的概念。假定在光通过的路径上放有一带孔的光栏，我们就可以从实际的光束中分出一个狭窄的平行光束。当孔径越小时，所分出的光束就越窄，当孔的直径在于趋于零的极限情况下，我们就有希望得到一条几何线状的光束（光线）。

但是，由于衍射效应，要分出任意窄的光线是不可能的。当孔的直径 D 越小时，光束不但不变窄，反而要扩大。扩大的数量级，由衍射角 $\theta \approx \lambda/D$ 来决定。只有在 $\lambda \rightarrow 0$ 的