

高等师范院校普通物理教学参考书

光 学

(上 册)

董继昌 编

广西师范学院物理系

高等师范院校普通物理教学参考书

光 学

(上册)

董继昌 编

广西师范学院物理系

本书共分十二章，包括几何光学，光度学简介，波动光学和量子光学基础。如用作教材时根据教学时数不同，目录中附有“*”号的章节，可作选择取舍。

由于个人水平有限书中难免存在不少缺点和错误，希望教师和读者同志们提出批评指正。

编者

1980.8.

普通物理 光 学 （上册）

广西师范学院物理系

董继昌编

1980年8月

普通物理 光学

引 言	(1)
第一章 几何光学的基本原理	(5)
1—1 几何光学基本定律	(5)
1—2 费马原理	(10)
1—3 光之全反射	(18)
习 题	(25)
第二章 光之反射成像规律	(26)
2—1 平面反射成像的规律	(26)
2—2 曲面镜的反射规律	(28)
2—3 球面镜的成像规律	(30)
2—4 球面镜成像作图法 球面镜成像放大率	(33)
习 题	(37)
第三章 光之折射成像规律	(39)
3—1 光之平面折射成像的规律	(39)
3—2 光之球面折射成像的规律	(41)
3—3 单球面折射成像的放大率	(46)
3—4 薄透镜成像规律	(50)
3—5 共轴球面折射系统的成像规律	(55)
3—6 共轴球面折射系统的组合	(65)
3—7 厚透镜的成像规律	(68)

3—8	透镜的组合	(74)
	习 题	(79)
第四章 像 差 (84)		
4—1	光 栏	(85)
4—2	球面像差	(90)
4—3	彗形像差	(94)
4—4	像散和像场曲	(98)
4—5	畸 变	(101)
4—6	色差及其校正	(103)
	习 题	(111)
第五章 光度学简介 (113)		
*5—1	光度学中的几个基本概念及其相互关系	(113)
*5—2	光度学的计量单位	(128)
*5—3	光度计	(132)
*5—4	光学系统成像的光亮度和光照度	(135)
	习 题	(140)
第六章 光学仪器基本原理 (141)		
6—1	人的眼球	(141)
6—2	放大镜 目镜和显微镜	(147)
6—3	望远镜	(155)
6—4	照相机 幻灯机和电影原理	(161)
*6—5	变焦距物镜	(166)
*6—6	棱镜光谱仪	(168)
	习 题	(171)

普通物理光学

【引言】

光现象是和人们日常生活关系最为密切的物理现象之一。远在上古时代人们就认识到光现象的一些基本规律。公元前四百多年我国名著《墨经》中，对于光的直射成影，针孔成像，平面镜和曲面镜成像，以及光之反射折射等现象，都有所纪述，实为世界上最早的光学著作。但是，有关光现象的系统理论研究，却在十七世纪，牛顿（Newton）、惠更斯（Huggens）时代，才初步建立起来。

根据光的直线传播这一基本特性，产生了对于光的初期理论，认为光是一种微粒子流。主张这项理论的代表者是牛顿。这一原始的光微粒说是建立在力学理论上，认为光是一种物质微粒，它遵从力学规律，由光源发出，沿直线飞行。因此，对于光的反射，视为由于光微粒（如弹性小球）对物体表面发生弹性碰撞，服从入射角等于反射角的规律而反跳的一种表现。对光的折射视为由于光微粒通过不同介质，受介质的引力不等，因而使光微粒的飞行速度发生变化所致。

同一时代，惠更斯对光的理论提出另一学说。他根据光现象在许多情况下与声学现象相类似，因而认为光是一种波动的传播。又因为光波可以在宇宙中和在物质内部传播，因而认为光波是一种特殊性媒质——以太的弹性振动波。所谓

以太是一种充满宇宙全部空间（包括真空和物体内部）的一种特殊弹性物质。为了说明光的传播以及反射、折射等规律，他又提出关于波之传播普遍原理——惠更斯原理。

到了十七世纪后期，格列马尔第(F·Grimaldi)(1665)和虎克(R·Hooke)(1672—1675)相继发现光之衍射现象，同时牛顿本人也发现了光的干涉现象（牛顿环）。这样一来，光微粒说对此无能为力；同时，以太波动说对于光的波动性质也没有更完整的论述。因此，在十八世纪中，光微粒说和以太波动说的争论，一直没有解决。

十九世纪初，逐步发展起来的波动光学体系初步形成。其中杨格(Young)圆满地解释了薄膜干涉等现象；菲涅尔(Frenel)补充了惠更斯原理成为今天大家所熟悉的惠更斯——菲涅尔原理；以比较圆满地解释了光的直线传播和衍射现象，成为波动光学中的重要理论基础。其后，相继发现光的偏振现象，于是杨格提出光的横波说。1850年测定了光在水中的传播速度小于在空气中的传播速度，恰与牛顿的光微粒说情况相反。因此，到了十九世纪后期，牛顿时代的光微粒说完全被否定。认为“光”是以太弹性波。

但是，因为已经测得光在真空（以太）中的传播速度 $C = 3 \times 10^8$ [米/秒]，而弹性波的传播速度的关系是 $C = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$ ，其中 N 为弹性介质的切变模量， ρ 为介质密度；由此看来，以太的密度必须是非常小，而切变模量必然是非常大，这是不可理解的。再从天体运动来看，以太对天体的运动毫无阻力，这一事实与以太具有一定密度的假设有所矛盾。此外，为了解释光在不同介质中的传播速度不等，则在不同介质中的以太势必有不同的特性；尤其在各向异性

介质中，情况更为复杂。还有，一般弹性介质的振动，可以产生横波，也可以产生纵波；而以太振动只有横波，没有纵波，则以太必须具有更为特殊的性质。这样一种密度极小，切变模量极大，并且还有许多附加特性的弹性介质——以太，是难以想像的。可见，光的弹性波理论——以太说，是有许多不可克服的困难。

到了1846年法拉第 (Faraday) 发现磁场对光的振动面产生偏转的影响，表明光现象与电磁现象有着内在的联系。1860年麦克斯威 (C·Maxwell) 总结了前人大量实验结果，断定光波与电磁波具有完全相同的性质。这个结论在1887年被赫兹 (Hertz) 的实验所证实。按照麦克斯威的理论，设光在真空中的传播速度为 C ，在介电常数为 ϵ 、磁导率为 μ 的介质中的传播速度为 v ，则有

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon \mu}}; \dots\dots\dots (0-1)$$

因为 $\frac{C}{v} = n$ (介质的折射率)，所以有

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \dots\dots\dots (0-2)$$

这就表明了物质的光学常数 n 与电磁学常数 ϵ 和 μ 之间的联系，此外还有其它理论根据，因而确定光波就是波长很短的电磁波。藉以传播光波的媒质实际上就是电磁场。从而，根本上否定了“以太”这个概念。这样，光的电磁理论较之过去弹性机械波理论向前迈进了一大步。

1888年发现了光电效应，这现象用光之波动说无法解释。直到1905年爱因斯坦 (A·Einstein) 推广量子论，提出光量子说。说明光的本质具有量子微粒性。从而导出光电方程，为光电效应找到了理论根据。及至1921年康普顿 (A·C Compton) 直接观测到光量子与电子碰击所产生的散射现象

象。由此，证实光的本质既有波性，同时也有量子微粒性。但是，当时还受到机械唯物论观点的限制；因此，光的波性与微粒性难以统一。然而，这时候所说的电磁波不是牛顿时代的弹性机械波，这时候所说的光量子微粒，不是牛顿时代的弹性物质微粒。光的量子论和光的电磁波理论都是比较进入了高级阶段，比较接近于客观实际了。

从机械唯物论的观点来看，波性与微粒是有着不可克服的矛盾。连续性的波动与不连续性的微粒运动，在机械论中是互相排斥的；而在客观实际的自然现象中，电磁波与量子微粒应该是统一的。实验证明，不仅是光量子具有波性，其它运动微粒也有波性。例如，电子束通过金属薄膜产生衍射现象，直接证明电子射线束也有波性，因此，从辩证观点看来，电磁波本身也是物质存在的另一种形式。电磁波实质上是电磁场的一种运动形式。在德布洛依和薛定格创立的量子力学原理中，微观物质的波性和量子微粒性得到了统一。光的波动性和量子微粒性都是电磁场的固有特性，它的运动是遵从量子力学运动规律，而不服从经典力学运动规律，光量子的运动，在某一时刻，该出现在空间某一位置，只能由统计几率值来确定；因此它的波性是属于几率波，而不是介质微粒的机械波。所以光之量子微粒性与电磁波动性是统一的、共存的。这是现代光学的理论基础。

在现代光学理论指导下，光学在生活、生产、科学和军事等技术上，都有突飞猛进的新发展。例如，高质量光学系统，光学纤维，红外技术，特别是激光技术，等等，不论在发展的速度上和发展的规模上，都是史无前例的，出现了新的飞跃；是现代化科学技术中不可缺少的一个组成部分。因此，光学的研究对现代化科学技术有重大的实际意义。

第一章 几何光学的基本原理

由于光具有波性，所以光的直线传播只是一种近似现象。光通过小孔（直径小于 $1/10$ 毫米）或薄片边缘时，光就不再是直线传播，而要发生衍射现象，只有当光通过较大的孔洞，或遇到较大的障碍物（远大于光波的波长）时，衍射现象非常微弱的情况下，才能近似地视为沿直线方向传播。所谓光线就是表示光波前进的几何方位线，因此光线必与光波的波阵面成垂直。

几何光学就是根据光的直进原理，利用几何学定理近似地阐明光的直线传播基本规律。具体说来，几何光学是讨论、研究光的反射、折射以及与这些现象相关的光学系统的成像规律的科学。因此，几何光学具有重要的实际应用意义。各种光学仪器都是根据几何光学的规律设计制造的。但是，由于几何光学不考虑光的干涉、衍射等波动现象，因此，许多与光之成像有关的具体问题，如光学仪器的鉴别本领等，不能单纯用几何光学原理来解决，而必须根据波动光学原理，才能阐述清楚。

【1—1】 几何光学基本定律

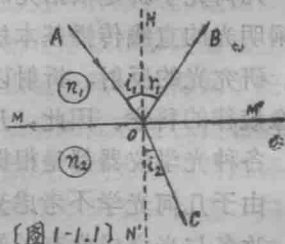
在大量的生活实践和科学实验中，得到几项有关光的直线传播的基本规律，是为几何光学的理论基础。

(1) 光之直线传播定律——在均匀介质中，传播范围或

障碍物远大于光波的波长时，光沿直线方向传播，光线为一直线。

(2) 光之独立传播定律——由不同物体发出，或沿不同方向传播的一般光线，在某处相交时，对于每一光线的原有传播规律互不影响。

(3) 光之反射定律——当光波由一介质投入另一介质时，在两介质的界面上，分解为两部分，一部分由界面反射回原介质中，是为反射光线；另一部分进入另一介质中，是为透射光线。如图 1—1.1 所示，设 MOM' 为两介质的界面，上方为介质 1，下方为介质 2。 AO 为入射光线， O 为入射点， OB 为反射光线， NON' 为过入射点 O 的法线。实验证明，反射定律：入射线、反射线和法线同在一平面内；入射线、反射线各居法线之一侧；入射角 i_1 （入射线与法线的夹角）等于反射角 r_1 （反射线与法线的夹角）。



(4) 光之折射定律——仍如上述图 1—1.1 所示，进入另一介质 2 的透射部分光线，由于介质 2 与介质 1 的光学密度不等，而产生折射现象。折射光线 OC 与法线 ON 的夹角 i_2 称为折射角。实验证明折射定律：入射线、折射线和法线同在一平面内；入射线、折射线各居法线之一侧，并且有

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots \dots \dots (1-1.1)$$

式中常数 n_1 和 n_2 分别为介质 1 和介质 2 的绝对折射率（或

简称折射率),〔注1〕其量值大小决定于介质的光学性质和入射光的波长,一般定义为:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \dots\dots\dots (1-1.2)$$

其中 c 为光在真空中的传播速度 (恒量 3×10^8 米/秒), v_1 和 v_2 分别为该光波在介质 1 和介质 2 中的传播速度。

由此(1-1.2)式可知: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{c}{v_2} / \frac{c}{v_1} = \frac{v_1}{v_2}$,

因此,可以定义: $\frac{v_1}{v_2} = n_{21} \dots\dots\dots (1-1.3)$

式中 n_{21} 称为介质 2 对介质 1 的相对折射率。〔注2〕由此可知: 介质 1 对介质 2 的相对折射率:

$$n_{12} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_{21}} \dots\dots\dots (1-1.4)$$

可见介质 2 对介质 1 的相对折射率与介质 1 对介质 2 的相对折射率互为倒数。

〔注1〕设光由真空(第1介质)入射于某介质(第2介质)在界面上发生折射,入射角为 i_1 , 折射角为 i_2 , 因为真空的折射率等于 1, 则有: $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_2$,

所有 n_2 就是该介质对真空的折射率, 称为该介质的绝对折射率。

〔注2〕如果光由介质 1 (不是真空)进入介质 2, 如图

1-1.1 所示, 则有 $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$

故 n_{21} 为介质 2 对介质 1 的相对折射率。

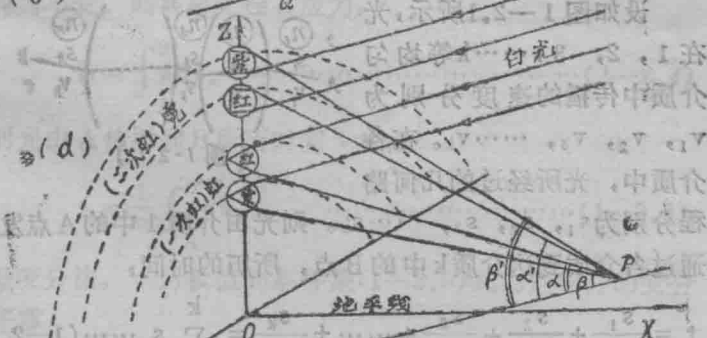
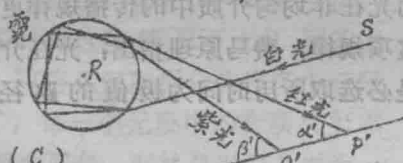
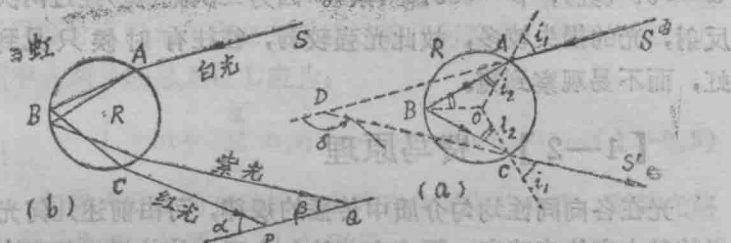
同时，上述折射定律的关系式(1—1.1)也可以写为

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} \dots\dots\dots(1-1.5)$$

或 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \dots\dots\dots(1-1.6)$

〔例〕虹、霓成因——虹和霓就是由于太阳光线被大气中的水滴反射和折射而形成的一种常见的自然现象。如下图1—1.2(a)所示，设太阳光线投于球形水滴R上的A点，入射角为*i*₁，折射角为*i*₂(其中有小部分光被反射，不考虑)。折射线AB投于B点发生反射，(其中有部分光折射出水滴外，不考虑)，其入射角与反射角均应等于*i*₂。反射光线再经C点折射到空气中(其中也有少部分光被反射，不考虑)。由于介质折射率因色光(波长)不同而不等。波长越短，折射率越大。因此，白光入射于水滴，经过一次反射和两次折射，被分散为各种色光，如图1—1.2(b)所示。如此，将形成一次虹(即所谓虹)。同理，当白光入射于水滴，由于入射方位不同，经过两次反射和两次折射，被分散为各种色光，如图1—1.2(c)所示。如此，将形成二次虹(即所谓霓)。因为大气空中雨后水滴距离地面很远，白光经水滴分散为各色光以后，在地面远处某点位置上，对某水滴只能看到它分散出来的某一种色光，例如在地面附近，作一直线*l*平行于太阳光线，因而与水滴的反射光线交于P、Q两点，如图1—1.2(b)所示。在P点位置的α方位上，只能看到水滴反射的红色光；在Q点位置的β方位上，只能看到水滴反射的紫色光；而对于产生二次虹(霓)的水滴，如图1—1.2(c)所示，在P'位置的α'方位上，只看到红光，在Q'位置的β'方位上，只能看到紫光。因为空中水滴很多，在

地面附近过P点作一平行于太阳光入射线的直线*l*，并以地平面为XY面，作竖直线Z，如图1—1.2(d)所示，则在P点看到YZ竖直面内依次排列出虹，霓彩色圆弧。虹（一次虹）在下，霓（二次虹）在上。以*l*线为中心轴，凡在与*l*成 α 夹角方位上的水滴都现红色，凡在与*l*成 β 夹角的方位



一次虹: $\alpha \approx 42^\circ$ (红)
 $\beta \approx 40.5^\circ$ (紫)
 二次虹: $\alpha' \approx 50^\circ$ (红)
 $\beta' \approx 53.5^\circ$ (紫)

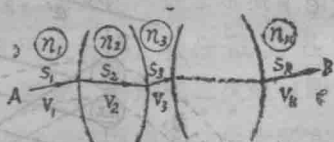
【图1-1.2】

上的水滴都现紫色，其他色光（橙、黄、绿、蓝、靛）依次排列，红色在上，紫色在下，是为虹。同理，凡在 α' 和 β' 方位之间也将形成依反方向次序排列的彩色弧带，红色在下，紫色在上，是为霓。根据理论推导结果，〔见附录一〕观察到虹的方位是 $\alpha \approx 42^\circ$ （红）， $\beta \approx 40.5^\circ$ （紫）；霓的方位是 $\alpha' \approx 50^\circ$ （红）， $\beta' \approx 53.5^\circ$ （紫）。因为二次虹（霓）经过两次反射，光的损失较多，故此光强较弱，往往有时候只见到虹，而不易观察到霓。

【1—2】 费马原理

光在各向同性均匀介质中传播的规律，可由前述几何光学的基本定律来确定。而光在非均匀介质中的传播规律更有普遍的实际意义。关于这项规律，费马原理指出：光在介质中传播于某两点之间，是必选取所历时间为极值的路径通过。

设如图1—2.1所示，光在1, 2, 3, ……k等均匀介质中传播的速度分别为 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_k$ 。在各介质中，光所经过的几何路程分别为 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_k$ 。则光由介质1中的A点发出



〔图1—2.1〕

通过各介质到达介质k中的B点，所历的时间：

$$t = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} + \frac{s_3}{v_3} + \dots + \frac{s_k}{v_k} = \sum_{i=1}^k s_i \dots \dots (1-2.1)$$

根据(1—1.2)式，任一种介质的绝对折射率 $n_i = \frac{c}{v_i}$ ，则

上式变为:

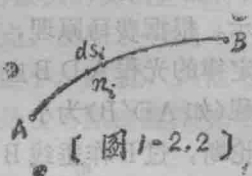
$$t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^k n_i s_i \dots\dots\dots (1-2.2)$$

式中某介质的绝对折射率与光在该介质中通过的几何路程的乘积 $n_i s_i$, 称为该光线通过该介质的光程。因为 $n_i s_i = \frac{c}{v_i} \cdot s_i = c t_i$, 可知光在某介质中所经过的光程, 在量值上, 相当于同等时间内光在真空中所经过的几何路程。然则光通过上图中 A 到 B 的总光程 L 应为:

$$L = c t = \sum_{i=1}^k n_i s_i \dots\dots\dots (1-2.3)$$

如果 AB 之间充满折射率为连续变化的介质, 则其光路应为一曲线, 如图 1-2.2 所示。

为了计算这种情况下 AB 间的光程, 可将几何路程分为许多小元段 ds_i , 每一小元段中的介质折射率可视为不变。则其总光程 L 应为:



$$L = \int_A^B n ds \dots\dots\dots (1-2.4)$$

然则光由 A 传播到 B 所历时间 t 为:

$$t = \frac{1}{c} \int_A^B n ds \dots\dots\dots (1-2.5)$$

根据变分法, t 为极值的条件是(1-2.5)式的定积分的变分等于零。

$$\delta t = \delta \left[\frac{1}{c} \int_A^B n ds \right] = 0 \dots\dots\dots (1-2.6)$$

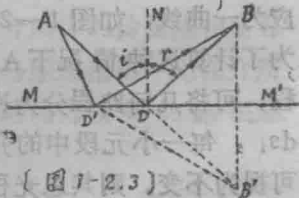
因为光在真空中的传播速度 c 为一恒量，故上式可写为：

$$\delta L = \delta \int_A^B n ds = 0 \quad \dots\dots\dots(1-2.7)$$

(1-2.6)和(1-2.7)式都是费马原理的数学表式。因此，费马原理也可以表述为：光在介质中传播于某两点之间，是必选取光程为极值的路径通过。（所谓极值就是指最大值、最小值或恒量）

从下面几个实例，可以表明费马原理是正确的；同时，也可以说光之反射、折射定律是费马原理的必然结果。

(1)由A点发出的光，射到反射平面MM'上的入射点D，然后反射过B点，如图1-2.3



所示。根据费马原理，其中遵从反射定律的光程 \overline{ADB} 应较其他任一光程(如 $\overline{AD'B}$)为小。为了证明这一论断，过B作垂线BE，延长至B'，使 $\overline{B'E} = \overline{BE}$ 。这时，根据反射定律显然有 $\overline{BD} = \overline{B'D}$ 和 $\overline{BD'} = \overline{B'D'}$ ；A、D和B'在一直线上。然则直线 $\overline{ADB'}$ 的长度必小于折线 $\overline{AD'B'}$ 的长度，即

$$\overline{AD} + \overline{DB'} < \overline{AD'} + \overline{D'B'}, \text{ 故有}$$

$$\overline{AD} + \overline{DB} < \overline{AD'} + \overline{D'B}.$$

可见，光之反射定律与费马原理完全一致。

(2)由椭圆球面凹面镜的一个焦点发出的光线，经椭圆球面反射后必过另一焦点B，如图1-2.4(a)所示。根据椭圆的特征，由椭圆两焦点引至椭圆上任一点的两个向径之和为一常数。可知光程 \overline{ADB} 等于任何另一光程 $\overline{AD'B}$ 。这