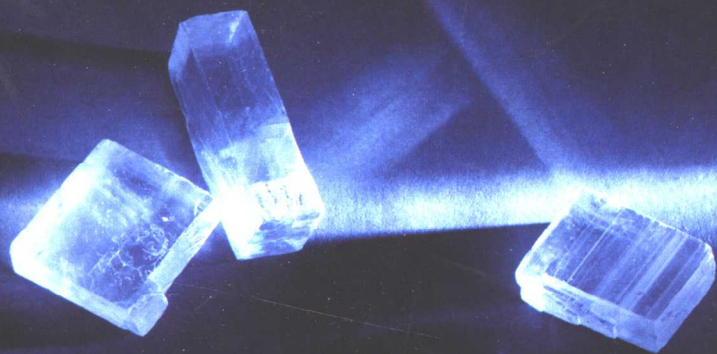




21世纪高等院校教材
普通物理教程之四

光 学

◎ 吴 强/编 著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书以“光是什么”为主线,以“ $h\nu$ ”判据对光学现象进行分类,分别介绍了光的波动性、电磁性、量子性和非线性.全书注重物理思想的阐述,注重基本概念、基本原理和基本方法的介绍;叙述力求逻辑严谨、深入浅出.

为了加强普通物理学与近代科学的有机联系,本书还在基础理论层次上略作延伸:在光的干涉部分介绍了光学薄膜,在光的衍射部分介绍了傅里叶光学、全息术及其应用,在光的电磁性部分介绍了扫描隧道光学显微镜,在光的量子性部分介绍了激光知识、多普勒冷却与原子陷阱技术,这些介绍为本书增添了现代气息.

本书适用于大专院校非物理类专业,也可作为理工科院校、师范院校光学专业的教材或参考书,对课时少的专业,带*的章节可以略去不讲,并不会影响光学知识的完整性.

图书在版编目(CIP)数据

光学/吴强编著. —北京:科学出版社,2006

21 世纪高等院校教材·普通物理教程之四

ISBN 7-03-015691-9

I. 光… II. 吴… III. 光学-高等学校-教材 IV. O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 062615 号

责任编辑:昌 盛 王日臣 / 责任校对:张怡君

责任印制:安春生 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006 年 1 月第一次印刷 印张:18

印数:1—4 000 字数:339 000

定价:23.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

序

今年是世界物理年. 中国科学技术大学的几位教授编写的这套普通物理教材即将与读者见面, 是对物理年的一份厚礼.

物理学是整个近代科学技术的基础, 它是培养和提高学生科学素质、创新思维方法和科学研究能力的重要基础课. 中国科学技术大学创办几十年来, 培养出了大批的优秀人才, 他们基础厚实、思维活跃、具有开拓精神、后劲足, 受到了国内外用人单位的称赞. 科大办学的成功经验之一就是科大自创办以来一直十分重视数学、物理等基础课教学. 几十年来科大积累了丰富的基础课教学经验, 编写这一套普通物理教材的几位教授他们都在科大执教几十年, 他们一边从事教学, 一边从事科研, 这一套教材是他们几十年教学成果的结晶. 在这套书中作者较好地处理了下面几个关系:

一、较好地处理了经典物理和近代物理的关系. 在书中他们强调经典物理的基本理论和基本规律的系统性和完整性, 但尽量砍去枝蔓、压缩篇幅, 同时对内容结合紧密又较易延伸的有关近代物理内容增加了有关章节和段落.

二、较好地处理了理论联系实际的关系. 在保持物理学基本规律和基本理论的系统性的同时, 在选择例题和习题时, 作为基本原理和基本规律的应用, 尽可能联系实际, 特别是增加与近代高技术相联系的内容.

三、较好地处理物理和数学的关系. 作为普通物理, 他们既重视了物理图像、物理概念的阐述, 同时也具有一定的数学深度, 以提高学生解决实际问题的能力.

四、较好地处理传播知识和培养学生素质之间的关系. 在书中他们注重了培养学生的科学素质和创新力思维方法的培养, 使学生逐步领悟和掌握物理学中每解决一个关键问题时, 如何提出问题、建立模型、发现规律、创立理论等一整套思维方法和实验分析手段, 使学生既要看到物理学发展史中科学家的作用, 又要懂得科学的发展是一个继承和积累的过程. 在书中介绍了一些重要科学家在为科学做出重大贡献时所表现出来的特殊品格和献身精神, 使学生得到启迪.

今天, 这套书与读者见面了, 我对科大几十年来物理教学的这一成果感到由衷的高兴, 盼望今后更多的好教材层出不穷.

杨国桢

2005 年 11 月

前 言

本书由中国科学技术大学编写的《基础物理教程之四：光学》改编而成。编者采用本校郭光灿院士的提议，全书以“光是什么”为主线，以“ $h\lambda$ ”判据对光学现象进行分类，分别介绍了光的波动性、电磁性、量子性和非线性。全书注重物理思想的阐述，注重基本概念、基本原理和基本方法的介绍；叙述力求逻辑严谨，深入浅出。为了理论上更严谨，在讲述双折射时增加了双折射的电磁理论解释；为了强调光的波粒二象性，全书增加了量子光学部分的分量。同时编者也十分注意在基础理论层次上略作延伸，为现代科技提供窗口和接口，以加强普通物理学与近代科学的有机联系。因此本书在光的干涉部分介绍了光学薄膜，在衍射部分介绍了傅里叶光学、全息术及其应用，在光的电磁性部分介绍了扫描隧道光学显微镜，在量子光学部分介绍了激光知识、多普勒冷却与原子陷阱技术以及非线性光学。这些介绍为本书增添了现代气息。

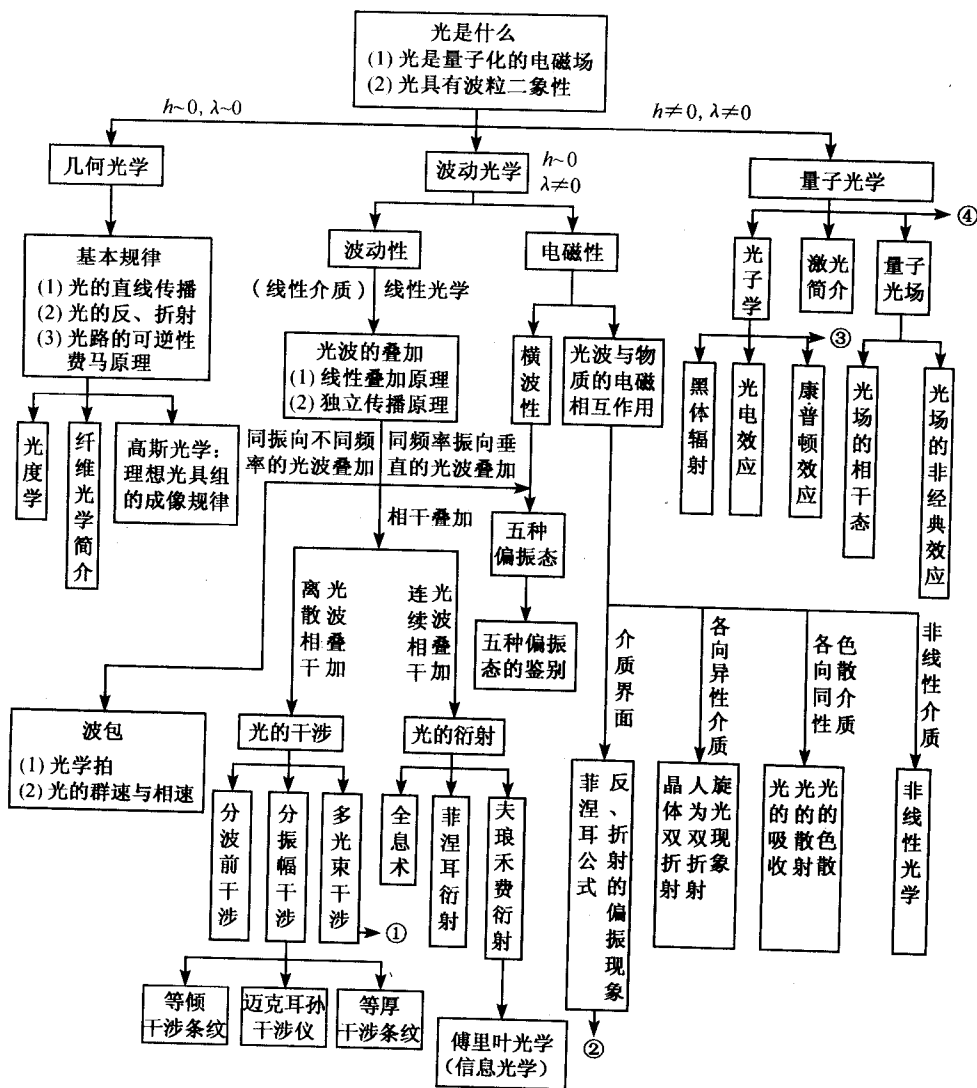
本书对几何光学的内容不作详述，只对几何光学的基本定律及费马原理作一个简单的概括和论述，而着重讨论物理光学的内容。第二至第五章主要讲波动光学，第六章开始主要介绍光的量子性。光的波动性主要表现在光的干涉和光的衍射两方面，本书中分两章讲述。

考虑到非物理类专业多没有相关的后继课程，本书内容在深度和广度上具有丰富的层次，这样即可以因材施教，扩充学生的知识面，又层次分明不失重点。对于课时少的专业可以将带“*”号的章节略去不讲，也不会影响光学知识的完整性。

本书适用于大专院校非物理类专业，也可作为理工科院校、师范院校光学专业的教材或参考书。

吴 强

光学知识框图



注:①光学薄膜

②扫描隧道光学显微镜

③电子对的产生与湮灭

④光的多普勒效应

目 录

序

前言

光学知识框图

第一章 光是什么	1
1-1 光是什么	1
1-2 光学现象的分类与应用	7
1-3 几何光学的基本定律	9
1-4 费马原理	12
习题	17
第二章 光的干涉	20
2-1 光波的基本性质	20
2-2 单色光波及其描述	22
2-3 波的叠加	28
2-4 光的干涉和相干条件	31
2-5 分波前干涉	36
* 2-6 光源宽度对干涉条纹的影响及光场的空间相干性	43
2-7 薄膜干涉的一般概念	48
2-8 等倾干涉和等厚干涉	52
2-9 迈克耳孙干涉仪	61
* 2-10 光波的时间相干性与光源的非单色性对干涉条纹的影响	64
2-11 多光束干涉,法布里-珀罗干涉仪及光学薄膜	67
* 2-12 不同频率的单色光波叠加	78
附录 斯托克斯倒逆关系	83
思考题	84
习题	84
第三章 光的衍射	89
3-1 光的衍射现象	89
3-2 惠更斯-菲涅耳原理	90
3-3 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	95
3-4 夫琅禾费单缝衍射	105
3-5 光学仪器的像分辨本领	111
3-6 衍射光栅	115
3-7 X射线在晶体上的衍射	123
思考题	126
习题	127

* 第四章 傅里叶光学简介	131
4-1 空间频率与频谱	131
4-2 对夫琅禾费衍射的再认识	136
4-3 阿贝成像原理及阿贝-波特空间滤波实验	139
4-4 相干光学处理系统	144
4-5 全息技术原理	151
思考题	158
习题	158
第五章 光的电磁性	161
5-1 光的横波性	161
5-2 偏振光的产生	163
* 5-3 菲涅耳公式	167
5-4 扫描隧道光学显微镜	175
5-5 光的双折射	176
5-6 晶体光学器件	183
5-7 椭圆偏振光的获得和检验	188
5-8 平行偏振光的干涉	196
5-9 人为双折射	200
5-10 旋光现象	203
* 5-11 双折射的电磁理论简介	208
5-12 光的吸收、色散和散射	212
思考题	224
习题	226
第六章 光的量子性	230
6-1 热辐射与普朗克的量子假设	230
6-2 光电效应	238
6-3 康普顿效应	242
6-4 电子对的产生和湮灭	246
6-5 光的波-粒二象性	247
* 6-6 光的多普勒效应	250
思考题	253
习题	254
第七章 激光	257
7-1 光与物质的相互作用	257
7-2 激光的产生条件	260
7-3 激光的单色性	263
7-4 激光器简介	266
7-5 激光的特性与应用	269
7-6 非线性光学效应	271
思考题	277
习题	277

第一章 光 是 什 么

本章首先通过光学发展简史的介绍,对光的本性是什么和光有哪些特性作一简要的阐述,让读者对光的本质有个正确的理解和整体的概念;然后,从光在不同层次上表现出来的不同特性出发,对光学现象进行分类.在以后的各章中我们正是以“光是什么”为主线,对光的本性分不同的层次,逐步深入地加以介绍.读者在阅读过程中应牢记这一主线.

1-1 光 是 什 么

自从有了人类以来,人们的社会生产和社会生活活动就离不开光.灿烂的阳光照亮了地球,给地球带来了生命和活力.人们所以能看到五彩缤纷、瞬息万变的世界,是因为眼睛接收到物体发射、反射或散射的光.据统计,人类感官收到外部世界的总信息中,至少有 90% 以上通过眼睛.正因为如此,人们对光学现象和光的本质引起了极大的兴趣,那么光到底是什么呢?

一、光是粒子还是波

光究竟是什么,即光的本性是什么,一直是学者们注意和探讨的中心.到了 17 世纪,由于光学特别是几何光学得到了一定的发展,因而关于光的本性问题引起人们越来越大的兴趣.在探索中逐渐形成了两种相互对立的理论,即光的微粒说和光的波动说.

首先提出光的微粒模型的是笛卡儿,后来牛顿成为这种观点的代表人物.促使早期学者们相信光的微粒说的主要原因可能有两个:一是在均匀介质中,光似乎是沿直线路径传播的,这就是所谓直线传播定律;二是那时人们认为光能够在真空中传播,而任何波的传播都必须有传播介质,因此,光应当是微粒,而不是波.

牛顿试图用经典力学理论来解释光微粒的运动规律.他用光微粒的惯性运动很容易地解释了直线传播定律.他把光在界面上的反射看成是与弹性小球在光滑桌面上反射一样属于同样的力学过程,来解释光反射现象.在解释光的折射时,他是这样分析的:假设一个光微粒在 xy 平面(入射面)内入射,在两种介质的界面($y=0$ 平面)上发生折射,如图 1-1 所示.由于所受到的力垂直于界面,所以光微粒在平行界面方向

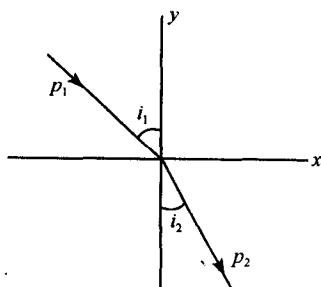


图 1-1

的动量分量(x 分量)守恒. 设光线入射角为 i_1 , 折射角为 i_2 , 动量 x 分量守恒将给出如下方程:

$$p_1 \sin i_1 = p_2 \sin i_2 \quad (1-1-1)$$

牛顿认为光微粒在介质两边的质量不变, 所以光在折射时应满足下列规律:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = p_2 / p_1 = mv_2 / mv_1 = v_2 / v_1 \quad (1-1-2)$$

将上式与荷兰科学家斯涅耳(W. Snell)在 1618 年发现的折射定律

$$\sin i_1 / \sin i_2 = n_2 / n_1 \quad (1-1-3)$$

相对照可见, 根据牛顿的结果, 光在较密介质(n 较大)中有较大的速度, 但这被后来发现的事实证明是错误的.

牛顿在用微粒说解释“牛顿环”时, 是很牵强和难以令人信服的. 他不得不假定, 光线在牛顿环实验中能“发生容易的反射和容易的透射”. 虽然以牛顿为代表的光微粒说解释了当时发现的一些光学现象, 但对实验中相继发现的干涉、衍射和偏振等现象, 都无法给出令人信服的解释.

与光的微粒说同时, 光的波动说也在渐渐地发展, 格里马迪(F. M. Grimaldi, 1618~1663)首先观察到光的衍射现象. 他在一个小光源照明的小棍阴影中观察到光带. 后来胡克(Hooke, 1635~1703)和玻意耳(R. Boyle, 1627~1691)各自独立发现了第一个干涉现象, 即薄膜产生的彩色. 胡克首先提出了光是由快振动组成, 并以非常大速度传播的观点. 惠更斯(C. Huygens)后来发展了这种观点. 他根据光的独立传播原理认为, 光不可能是微粒子流, 如果光是微粒子流, 那么从不同的方向射向同一点的光线就不可能相互独立地穿过. 1678 年他在《论光》中写道: “光最不可思议的性质是, 从不同甚至相反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相似, 从而提出了光本性的波动学说. 他从机械波的观点出发, 接受了笛卡儿的“以太”思想, 认为宇宙间(包括物体内部)充满了一种弹性介质——以太. 光源在以太中产生一个扰动后, 以太的振动传播过程就形成了光波.

为了解释光的传播问题, 1690 年惠更斯提出一个假设: 在波的传播过程中, 波阵面上的每一个点都可以看作是发射次波的次波源, 在其后的任一时刻, 这些次波的包络面就是新的波阵面. 这个假设后来被称为惠更斯原理. 他用这个假设不但成功地解释了光的反射和折射现象, 还解释了晶体的双折射现象.

下面我们看看他是如何解释光的折射现象的: 如图 1-2 所示, 设想一束平面波以入射角 i_1 射到介质 1, 2 的分界面上, 过 A_1 作波阵面与入射光线垂直, A_1 点最先与界面相遇, 随后是波阵面上其余各点(图中只画出 A_2, A_3, A_4 三点)陆续传播到界面, 当通过 A_4 的波线经过一段时间 $\Delta t = A_4 B_4 / v_1$ 后到达 B_4 的同时, 由 A_1 点发出的透射次波已形成半径为 $v_2 \Delta t$ 的半球面. 这里 v_1, v_2 分别为介质 1, 2 中的波速. 与此同时 B_2, B_3 各点先后发出的透射次波也形成不同大小的半球面. 根据惠

惠更斯原理,这时刻折射波的波阵面是所有这些次波面的包络面.不难证明,折射波的波阵面是通过 B_4 而且与 A_1 发出的球面次波相切的直线,设切点为 C ,则连接 A_1C 即得到折射光线.由图 1-2 不难看出, $\angle A_4A_1B_4 = i_1$, $\angle A_1B_4C = i_2$,因此,有

$$\sin i_1 = A_4B_4/A_1B_4, \quad \sin i_2 = A_1C/A_1B_4$$

于是,有

$$\sin i_1 / \sin i_2 = A_4B_4/A_1C = v_1 \Delta t / v_2 \Delta t = v_1 / v_2$$

同样对照斯涅耳定律($\sin i_1 / \sin i_2 = n_2 / n_1$)可知,光在不同介质中的传播速度与介质折射率成反比,即光密介质中光速较小,这与粒子说的错误结论正好相反,这也为后来光的波动说战胜光的机械微粒说设下伏笔.

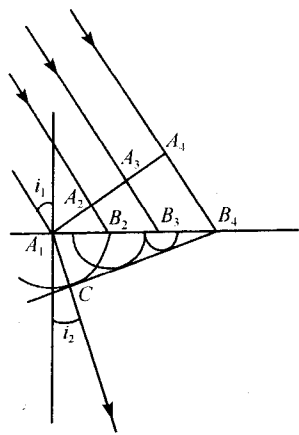


图 1-2 光的折射的惠更斯解释

由于这一时期光的波动说还很不完善,另一方面,由于牛顿在力学上的杰出贡献,使他在科学界有巨大的权威.而这种权威像一件验衣罩在波动说上,使它的拥护者透不过气来,使波动说几乎停滞了一个世纪之久.但即使在这个时候仍有许多物理学家坚持光的波动说,其中较著名的科学家有罗蒙诺索夫和欧拉.

第二个时期,可以说是光的波动说初步确立的时期.1801年杨氏(T. Young)最先用干涉原理令人满意地解释了白光照射下薄膜颜色的由来和用双缝显示了光的干涉现象,并第一次成功地测定了光的波长.1808年马吕斯(E. L. Malus)偶然发现玻璃窗反射阳光的偏振现象.随后菲涅耳(A. J. Fresnel)和阿喇果(D. Arago)对光的偏振现象和偏振光的干涉进行了研究.1816年他俩一起完成了线偏振光的叠加实验.为了解释这些现象,杨氏在1817年提出了光波和弦中传播的波相仿的假设,认为光是一种横波.菲涅耳进一步完善了这一观点并导出了菲涅耳公式.

光学史上富有戏剧性的一幕是光微粒说的拥护者拉普拉斯(P. S. Laplace)和毕奥(J. Biot)提出将光的衍射问题作为1818年巴黎科学院悬奖征文的题目,期望对这个题目的论述最终使微粒说取得胜利.但结果事与愿违,奖金授给了以波动理论为其论述基础的菲涅耳.自此之后的一系列研究很快地就使光的微粒理论声誉丧失殆尽.菲涅耳将惠更斯原理与干涉原理结合起来,成功地解释了光的直进和光的衍射现象,并计算了直边、小孔、小屏产生的衍射.特别令人印象深刻的是,泊松(S. D. Poisson)从菲涅耳理论推出一个结论,即在小圆盘阴影中心应该出现一个亮斑点,而阿喇果由实验证明了这一论断的正确性.这一事实给光微粒说一沉重打击.

1850年傅科(L. Foucault)、斐佐(H. L. Fizeau)和布雷格特(L. Breguet)进行了一项由阿喇果首先建议的仲裁实验.微粒说用“光粒子在界面上受到向光密介质这边的吸引”来解释折射,这就要求光在光密介质中的光速比较大;相反,波动说根

据惠更斯作图,要求光在光密介质中光速较小.傅科等直接测量了空气和水中的光速,结果判定了波动理论的胜利.

二、为什么说光是电磁波

虽然波动说在解释光的干涉、衍射、偏振现象时获得了巨大成功,从而确立了波动理论的牢固地位.但这时的波动论者仍认为,一切波动必须在某种介质中才能得到传播.如果光是一种波动,而且能在真空中传播,那么光波赖以传播的介质是什么呢?他们不得不假定存在一种特殊的介质——“以太”.为了与光传播的实验事实相符,必须赋予“以太”种种异乎寻常的甚至互相抵触的特性.例如,光既然能在真空中和透明介质中传播,那么“以太”应该充斥整个空间,渗入到一切透光物质中;光速是如此之大,“以太”就必须具有极大的弹性,但它又必须非常稀薄,因为天体的运动显然并未受到阻碍.为了解释光在各种不同介质中有不同速度,又必须认为“以太”的特性在不同的物质中是不同的;在各向异性介质中还需要有更复杂的假设.此外,还必须给“以太”更特殊的性质,才能解释光波中没有纵波的现象.这种密度无限小、弹性非常大,并且还有许多附加性质的“以太”是令人难以想像的.于是就暴露了光弹性理论严重的内在困难.此外,这个理论既没有指出光学现象和其他物理现象间的任何联系,也没有能把表征介质特性的各种光学常数和介质的其他参数联系起来.19世纪初,电磁学得到了发展.1846年法拉第(Faraday)发现了光的振动面在磁场中发生旋转,这表明光学现象与磁学现象间存在内在联系.这一发现使人们获得新的启发,即必须把光学现象和其他物理现象联系起来考虑,而不能孤立地研究光的本性.

到19世纪中叶,麦克斯韦(J. C. Maxwell)成功地把电磁学领域内所有前人发现的规律总结为一个完备方程组.从这一电磁方程组出发,导出了电磁场所遵从的波动方程,从理论上预言了电磁波的存在,并证明了电磁波的横波性.麦克斯韦在研究电磁波动方程时发现,电磁波在真空中的传播速度等于静电单位电量(或电流)与电磁单位电量(或电流)的比值.只要在实验上用这两种不同的单位制测量同一电量值,就能计算出电磁波在真空中的传播速度.1856年科耳劳希(Kohlrausch)和韦伯(Weber)完成了这些测量,麦克斯韦根据他们的数据计算出电磁波在空气中的传播速度为 $3.1074 \times 10^8 \text{ m/s}$,并发现这个数值非常接近于斐索在1849年测得的光速值 $3.1485 \times 10^8 \text{ m/s}$.以此为主要依据,麦克斯韦认为光波是一种电磁波.这就是著名的光的电磁波理论.1888年,赫兹(H. R. Hertz)用实验直接产生和探测了电磁波,测出电磁波的波长和频率,并由此计算了电磁波的传播速度与光速相同;并证明电磁波和光一样,能产生反射、折射、干涉、衍射、偏振等现象.后来的实验又证明,红外线、紫外线和X射线也都是电磁波,它们彼此的区别只是波长不同而已.现代实验还告诉我们,对于波长为毫米的电磁波,既可以用光学方

法产生(称红外线),也可用电磁学方法产生(称微波),这就更进一步证明了光波和无线电波在电磁本质上完全一致.光的电磁理论以大量无可辩驳的事实赢得了普遍的公认.

光波是电磁波的一种,它与其他电磁波并无本质的不同,只是所处的波长范围不同而已.光波的波长通常用纳米(nm)或埃(Å)来表示, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$, $1\text{Å}=0.1\text{nm}=10^{-10}\text{m}$.图 1-3 是电磁波谱图,从图中可以看到各种不同电磁波的频率分布情况.

3×10^{20}	3×10^{18}	3×10^{16}	3×10^{14}	3×10^{12}	3×10^{10}	3×10^8	3×10^4 (Hz)
γ 射线	X 射线	紫外线	可见光	红外线	无线电波		
10^{-3}	10^{-1}	10	10^3	10^4	10^7	10^9	10^{11} (nm)

图 1-3 电磁波谱图

但光电理论的建立并没有动摇存在“以太”的信念,它只是以电磁“以太”代替了弹性“以太”.

1896 年洛伦兹(H. A. Lorentz)创立了电子论,他把物质的宏观电磁性质归结于物质中的电子效应.他不仅解释了发光和物质吸收光的现象,也解释了光在物质中传播的各种特点,特别是对色散现象作了较合理的解释.同时,在他的理论中,洛伦兹认为,电磁“以太”是一种广袤无限的不动的介质,其唯一的特征是,在这种介质中光振动具有一定的传播速度.

根据洛伦兹的理论,人们意识到,如果洛伦兹关于“以太”的概念是正确的话,即存在着静止不动的宇宙“以太”的海洋,那么将“以太”选作参考系,就能使人们测量出一切物体相对于“以太”的运动——物体的绝对运动.

在这种观点指导下,出现了测量“以太风”的热潮.其中著名的实验有 1851 年的斐索实验,1881 年的迈克耳孙-莫雷实验(Michelson-Morley),还有英国布拉德利(J. Bradley)在 18 世纪 20 年代所发现的“光行差”现象.在用“以太”理论分析这些实验和现象时,得到了截然相反的结论,使“以太”理论陷入了绝境.1905 年爱因斯坦在他的“关于运动介质的电动力学”这篇论文中,提出了著名的狭义相对论的基本原理.从根本上抛弃了“以太”的概念,圆满地解释了运动物体的光学现象.正是否定了“以太”的存在,才促使人们最终认识到电磁波的传播并不需要任何介质,电磁波本身就是一种特殊的物质,它携带着能量并以波的形式传播着,所以电磁波是一种物质波.

三、光的波粒二象性

至此,经典光学的发展已达到十分完善的程度,它几乎可以解释所有当时人们

已经知道的有关光传播的现象(干涉、衍射、偏振、双折射等)的规律性,但也存在着用麦克斯韦电磁理论无法解释的一些“例外”现象,其中最著名的是关于光的黑体辐射、光电效应、原子的线状光谱等.这些现象当时虽然看来是个别的,但实际上,正是对这种关系重大现象做深入研究与大胆探索,才导致了一场意义深远的光学革命的发生.

1900年德国物理学家普朗克首次提出了关于物质体系与电磁场交换能量过程中的量子化假定,并且成功地导出了与实验相符合的、以他的名字命名的黑体辐射定律.这一突破,意味着经典光学的发展至此已告一段落,而新的现代光学开始诞生.这也是现代光学初期取得的第一项重大成就.这个时期取得的第二项重大成就,是1905年前后爱因斯坦(A. Einstein)提出的光在本质上是由光量子(光子)组成的假设以及狭义相对论的假设.用光量子假设,可以成功地解释光电效应和黑体辐射;而基于狭义相对论假设,则可成功地解释迈克耳孙-莫雷实验和其他有关光在运动坐标系中传播的现象.这以后不久,在普朗克假设和爱因斯坦光子假设的基础上,并受到他人研究成果的启发,丹麦物理学家玻尔首次提出关于原子中电子运动轨道量子化的假设,从而成功地定性解释了原子的线性光谱.到此为止,人们不得不承认这样一种事实:一方面,在与光的传播特性有关的一系列现象中(干涉、衍射、偏振等),光表现出波动的本性并可由麦克斯韦电磁场理论完美地描述;另一方面,在光与物质作用并产生能量和动量交换的过程中,光又充分表现出分立的量子化(粒子性)特征,并可由爱因斯坦的光子理论加以成功地描述.受到光的这种波动-粒子双重性的启发,德布罗意(de Broglie)于1924年前后首次提出关于一些基本粒子(如电子)也同样具有波动-粒子双重性的大胆假设,从而导致量子力学(波动力学)的诞生.相对论和量子力学的相继创立,宣告了整个经典物理学的终结和现代物理学的开始,并且成为构成现代物理学的两大根本支柱.

四、现代光学

现代光学最重要的标志是20世纪20年代末和30年代初,由狄拉克和费米等人在量子力学基础上创立的量子电动力学理论.在这种理论体系中,将光场(电磁场)与物质体系(原子或分子等)作为一个统一的整体而加以量子力学式的处理,从而导致量子化电磁场量子化物质体系的同时存在.量子电动力学理论能够对所有光学现象给出严格的、合理的说明.

现代光学的理论基础是量子电动力学.然而在20世纪60年代之前,光学领域并不采用量子理论来描述光学现象,因为光的电磁理论就足以解释光学的大部分实验结果,只有少数现象,如黑体辐射、光电效应、康普顿散射、原子自发辐射、原子能级的拉姆位移等,需要计及到光场的量子效应,无法用经典理论来解释.结果出现这样的局面:量子理论诞生于光学,而且对其他学科产生不可估量的影响,但对

光学学科本身的影响却甚微. 光学仍然在经典理论支配下发展, 光学领域的物理现象并未出现重大的突破. 这种局面一直持续到激光诞生才宣告结束. 激光是光的量子理论的产物. 早在 20 世纪初, 爱因斯坦就指出, 光与原子相互作用有三种基本过程, 即自发辐射、受激辐射和受激吸收. 后来量子电动力学严格地证明了这三种过程. 激光是基于受激辐射过程而产生的相干光. 尽管早在 20 世纪 30 年代人们已在实验上观察到了光的受激辐射, 具备激光产生的理论背景和实验条件, 但激光延迟到 60 年代才诞生, 其原因在于当时社会发展更感兴趣的是无线电波段的相干辐射. 在第二次世界大战之后, 随着通信事业的迅速发展, 人们将相干电磁辐射向着更短的波长推进, 一旦迈进光波领域, 传统产生相干电磁辐射的电子器件就不再适用, 必须深入地研究原子(分子)体系的辐射过程, 于是量子理论又重新被用来研究光学问题. 人们在量子理论框架内研究光与物质的相互作用, 探讨如何设计合适的光发射装置, 使受激辐射能占主导地位, 相干光能由真空态逐渐建立起来. 激光就是这种研究的结晶. 激光是人类获得的新型光场, 它使光学领域发生翻天覆地的变化, 许多新的物理现象、物理效应不断涌现, 尤其是 80 年代以来人们发现光场的许多新的量子效应, 使人们对光场的量子特性有了更深刻的认识, 量子光学因而获得异常迅速的发展. 与此同时, 诸如激光生物、激光化学、激光医学等交叉学科也应运而生. 光学学科进入到一个新的、更加繁荣的历史发展阶段.

1-2 光学现象的分类与应用

光学是研究光的本性、光的产生、光的传播、光与物质的相互作用, 以及光在科学研究和技术中各种应用的科学. 由于光学现象非常丰富, 光学教程的内容往往显得繁杂, 学生学完之后常常感到抓不住要领, 理不出纲要, 颇有杂乱无章之感. 主要的原因在于, 光学不像普通物理的其他教程那样, 能用若干基本的物理定律将有关的现象给予统一的阐述. 我们知道, 支配着力学现象的是牛顿定律, 支配着电磁现象的是麦克斯韦方程组, 支配着热学现象的是热力学三定律. 那么, 什么定律能统一地支配着所有光学现象呢? 在现有的光学教科书中光学本身不存在统一的基本定律, 正是因为缺乏这样一根能阐明所有光学现象的中心主线, 导致光学教程不如力学、热学、电磁学教程那样系统和完善. 事实上, 不同类型的光学现象遵从不同的自然规律: 在几何光学中, 光学现象本质上服从经典力学的规律; 在波动光学中, 光学现象由电磁场理论所支配; 在统计光学中则是统计力学的规律起支配作用; 光的量子现象则遵从量子理论的规律. 光学现象本身似乎不存在独立的运动规律, 而是受制于其他学科的基本规律, 因此, 以往的光学教材多数侧重于分门别类地阐述各种不同范畴的现象, 然后对现象进行相应的解释. 于是, 光学现象越丰富, 就越令人感到杂乱.

现代自然科学业已证明,自然界本质上是量子的,光场也不例外,因此在某种意义上讲,支配着所有光学现象的基本规律是量子理论,换句话说,采用量子理论原则上可以统一地解释一切光学现象.当然在普通物理教程中,我们不可能这样做,因为在学习光学课程之前学生尚未学过量子力学.实际上也不必这样做,因为许多光学现象不用量子理论也能得到满意的解释.事实上,采用两个物理量:普朗克常量 h 和光场的波长 λ 就可以将所有的光学现象进行分类.普朗克常量 h 是表征体系量子特性的物理量,当 h 与光学体系的相应特征量相比可以略去不计时,光学现象的量子特性很不显著,以致经典理论就足以描述该体系的光学现象.因此, h 是否可以近似地看成为无穷小量是区别光学的量子现象和经典现象的判据.另一方面,光场的波长 λ 是描述光场波动性的特征量,当波长 λ 与光学体系的特征尺寸相比可以忽略不计时,光场的波动性就不显著,几何光学便足以解释体系的光学现象.因此, λ 是否可近似地看成为无穷小量是区别波动光学(有时又称物理光学)与几何光线(或称射线光学)的判据.

可见,借助于 h 和 λ 可以对光学现象进行分类,然后采用相应的理论来处理相应的光学现象.应用这种 h - λ 的分类法既合理又清晰,其物理本质是采用不同的理论观点来处理光学问题.不同范畴的光学现象之间的区别就在于对“光究竟是什么”这个根本性问题所做的不同回答.这就给我们一个重要的启迪,既然普通物理光学内容无法用一些基本规律统一来阐述,那么我们就以“光究竟是什么”这个根本性问题的论述作为主线,将光学的现象分层次加以讲解.

在 $h=0$ 和 $\lambda=0$ 近似成立的场合,光的量子性和波动性均可忽略,此时光学现象遵从几何光学的规律,其理论基础是费马原理.我们可以将光看作为牛顿的光微粒,它遵从经典力学的基本定律.

在 $h=0$ 近似成立,但 $\lambda \neq 0$ 的场合,光必须看成是一种波动,只要不计及光的电磁性质,光作为波动应遵从经典力学的规律,它将呈现出所有波动(包括机械波)现象具有的共同特征,如干涉和衍射.所不同的只是光波的波长很短,只有当系统的特征尺寸(如光孔、光阑等)与波长同量级时,光的波动现象才能被观察到.

在 $h=0$ 近似成立,但 $\lambda \neq 0$,且必须考虑到光的电磁性的场合,光必须看成为电磁波,它遵从麦克斯韦方程组.电磁波也是一种波动,因此光的电磁场理论原则上包括诸如干涉、衍射等波动的共同特性.光的电磁性(光的偏振特性等)是光波区别于诸如机械波等其他波的重要特征.光与无线电波、微波等不同波段的电磁波具有相同的电磁特性.光场的特殊性在于其波长很短,因而光场的产生机制与长波电磁场有着根本性的差异.光场必须借助于原子(分子)体系作为振荡器,其工作原理完全不同于真空管、微波管等电子器件.

在 $h \neq 0$ 的场合,光的量子特性显著,光是量子化的电磁场,必须采用量子理论来描述,这是描述光学现象最正确的理论.前述各种理论都可看作是光的量子理论

在某种条件下的近似. 采用量子理论来阐述光学现象, 着重在于揭示光场的量子效应. 这已经成为现代光学的重要发展方向.

光学的应用十分广泛. 几何光学本来就是为设计各种光学仪器而发展起来的专门学科. 随着科学技术的进步, 物理光学也越来越显示出它的威力, 例如, 光的干涉目前仍是精密测量中无可替代的手段, 衍射光栅则是重要的分光仪器. 光谱在人类认识物质的微观结构(如原子结构、分子结构等)方面曾起了关键性的作用, 现在它不仅是化学分析中的先进方法, 还为天文学家提供了关于星体的化学成分、温度、磁场、速度等大量信息. 近 30 年来, 人们把数学、信息论与光的衍射结合起来, 发展起一门新的学科——傅里叶光学, 把它应用到信息处理、像质评价、光学计算等技术中去. 激光的发明, 可以说是光学发展史上一个革命性的里程碑. 由于激光具有强度大、单色性好、方向性强等一系列独特的性能, 自从它问世以来, 很快就被运用到材料加工、精密测量、通信、测距、全息检测、医疗、农业等极为广泛的技术领域, 取得了优异的成绩. 此外, 激光还为同位素分离、催化、信息处理、受控核聚变, 以及军事上的应用展现了光辉的前景.

1-3 几何光学的基本定律

一、几何光学的三个基本定律

几何光学的三个基本定律是人们从观察和实验中总结出来的, 它们是几何光学的理论基础, 是各种光学仪器设计的依据.

几何光学又称光线光学或射线光学, 因为在几何光学中可用一条表示光的传播方向的几何线来代表光, 并称这条线为光线. 借助于光线这个概念, 可将几何光学的三个基本原理表述如下:

(1) 光的直线传播定律 在真空或均匀介质中, 光沿直线传播, 即光线为一直线.

(2) 光的独立传播定律 自不同方向或由不同物体发出的光线相交, 对每一光线的独立传播不发生影响.

(3) 光的反射和折射定律 如图 1-4 所示, 当光线由一种各向同性、均匀介质进入另一种各向同性、均匀介质时, 光线在两种介质的分界面上被分为反射光线和折射光线. 对于这两条光线的行进方向, 可分别由反射定律和折射定律来表述.

反射定律 入射光线 AB 、过 B 点所引的分界面法线 NB 和反射光线 BC , 三者在同一平面内(入射

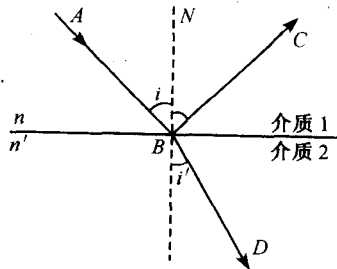


图 1-4 光的反射和折射

面),并且反射光线与法线间的夹角 r (反射角)等于入射光线与法线间的夹角 i (入射角)。

折射定律 入射光线 AB 、过 B 点的分界面法线 NB 和折射光线 BD ,三者在同一平面内,并且入射角 i 的正弦与折射角 i' (折射光线与法线的夹角)的正弦之比等于第二介质的绝对折射率 n' 和第一个介质的绝对折射率(以后简称折射率) n 之比,即

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n'}{n} \quad (1-3-1)$$

n, n' 的定义是

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{c}{v} \\ n' &= \frac{c}{v'} \end{aligned} \right\} \quad (1-3-2)$$

其中 c 为光在真空中的速度, v 和 v' 分别为光在第一介质和第二介质中的相速度。折射定律是荷兰数学家斯涅耳(Snell)于 1621 年发现,故又称为斯涅耳定律。

表 1-1 几种物质的折射率

介 质	折射率(D线)
空气	1.00028
水	1.333
各种玻璃	1.5~2.0
水晶	1.54
金刚石	2.417

表 1-1 列出了几种常见的透明介质对钠黄光(D线 $5893\text{\AA}$)的折射率。由表可见,空气的折射率很接近 1(常温常压下一般气体的折射率也都与 1 相差不多),而一般液体和固体介质的折射率都明显大于 1。折射率大的介质通常称为光密介质,折射率较小的介质被称为光疏介质。

三个实验定律可以根据光的波动性导出,但必须强调,它们是近似的规律,有一定的适用范围。只有当光波波长远小于空间障碍物或反射、折射界面的尺寸时,才能由上述定律得出符合实际情况的结果,所以几何光学可看作是波长 λ 趋于零这一极限情况下的理论。虽然几何光学只是一种近似理论,但在许多实际问题中已足够精确,故几何光学仍有很大的适用意义。

二、光路可逆性原理

依据光的反射和折射定律,如果光线逆着原来反射线的方向入射到界面上,则反射光线将逆着原来入射线的方向射出去;如果光线逆着原来折射线的方向入射到界面上,则折射光线也将逆着原来入射线的方向传播。更普遍情况是,当光线逆向传播时,它将沿正向传播时的同一路径反向传播,这个结论称为光路可逆原理。

三、全反射、光学纤维

当光线由光密介质射到光疏介质的界面上时,根据折射定律,折射角一定大于