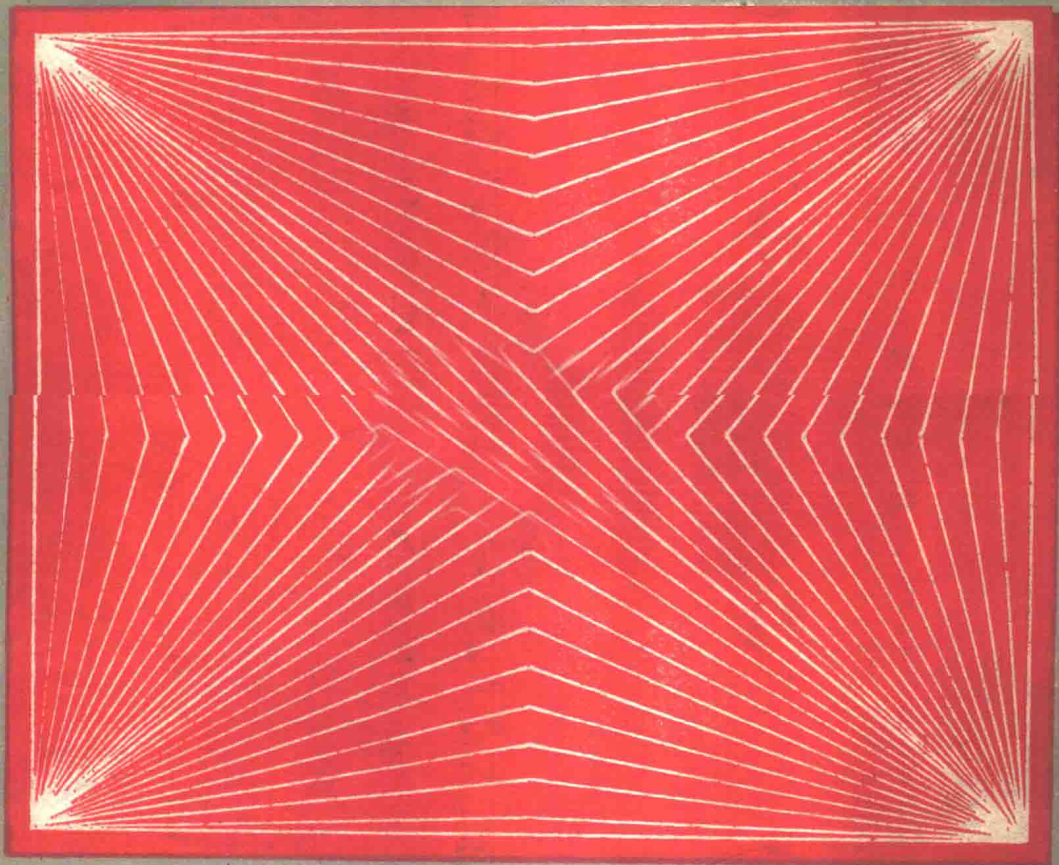


光学教程

● 郭永康 / 鲍培谛 编



四川大学出版社

内 容 简 介

本书是作者在四川大学多年来讲授该课程所使用的讲义的基础上,汲取近年来国内外光学教学研究成果补充修改而成。书中内容丰富,概念清晰,力求将现代光学的新成就编入基本概念和基本理论的讲述中。在内容的编排上将最基本的内容和较深入讨论的内容分开,以适应不同类型的读者选用。

全书共十章,包括几何光学的基本原理及傍轴成像理论,光阑、象差及光学仪器,光度学及辐射度学,光波及其在各向同性介质界面的反射和折射,干涉,衍射,傅里叶光学基本概念,光在晶体中的传播,光的吸收、色散和散射,光的量子性和激光。书中章末有颇具启发性的思考题和习题,书末附有习题答案。

本书是高等院校物理类专业光学课程的一本较好的教材或参考书。也可供其他相近专业师生选用或参考。

光 学 教 程

郭永康 鲍培璋 编

责任编辑 杨守智

四川大学出版社出版发行

(四川大学校内)

四川省新华书店发行 四川教育学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张 24.25 字数 570 千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷

印数0001—3000册

ISBN7—5614—0215—5/O·27 定价: 4.53元

前 言

本书是根据作者在四川大学物理系讲授光学课所使用的讲义的基础上，汲取近年来国内外教学研究的成果修改补充而成。

从本世纪四十年代末开始，特别是1960年激光问世以来，光学这门历史悠久的学科成为了物理学中发展迅速的十分活跃的领域。全息术的提出，作为象质评估的光学传递函数概念的建立，通信理论中的概念、方法、数学工具移植到光学中产生了傅里叶光学，形形色色的激光器的诞生及其应用，各种非线性光学效应的相继发现，低损耗光纤的问世及光通讯的迅速发展，激光和电子计算机的综合应用……等等，这些新成就引起了光学技术的巨大变化，对光学理论产生了深刻的影响。面对这种令人眼花缭乱的局面，在光学教材中反映现代光学的新发展就成为一个十分迫切的问题。本书在精选传统内容的基础上，编写了矩阵方法、相干性、傅里叶光学基础、激光等新内容。此外还力求将现代光学的成就融于基本概念和基本理论的阐述中。例如，在几何光学中加强了费马原理及其应用；在波动光学的开头就引入了空间频率的概念；第五章中对光场的相干性作了详细讨论，章末两节还讨论了两独立光源的干涉；在晶体光学中加强了现代激光技术中常用的偏振和调制元件的介绍；在第七章中着重讨论傅里叶光学的基本概念和方法，避免使用复杂的数学知识等。

近年来国外出版的某些光学教材中，几何光学内容删减很多。为了和目前中学物理教学内容衔接以及实际应用的需用，本书仍然用了相当篇幅阐述几何光学的基本原理。对于这部分内容，可以采用各种灵活的教学方式。鉴于初学者容易误认为在作图成象时只有三条特殊光线可供选择，书中讨论了利用负主点、负节点和主光线、边缘光线等共轭点对或共轭光线对求象的方法。

本书在体系的安排上注意到了将最基本的和较为深入讨论的内容分开，便于课时不同的情况下选用。某些在一般教材中容易找到的数学证明未予编入，但列出了参考文献，便于读者查阅。书中精选了相当数量例题、思考题、习题，其中有的选自国内外研究生入学试题及CUSPEA考试题。这些题目与内容密切配合，颇具启发性。

本书出版以前作为讲义使用过的老师和许多同学提出了十分宝贵的意见，在出版过程中戴朝明、蔡海涛二同志给予很多帮助，池含芬同志绘制了部分插图，我们谨对他们一并致谢！

由于编者水平所限，疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者 1989年2月

绪 论

一、光学研究的内容

从波动观点看，光是一种电磁波。在真空中，可见光的波长范围在 4000\AA — 7600\AA 之间。各色光的波长和频率范围见下表：

| 色光 | 频率 ($\times 10^{14} \text{ Hz}$) | 真空中波长 (\AA) |
|----|------------------------------------|------------------------|
| 红 | 3.9—4.8 | 7600—6300 |
| 橙 | 4.8—5.0 | 6300—6000 |
| 黄 | 5.0—5.3 | 6000—5700 |
| 绿 | 5.3—6.0 | 5700—5000 |
| 青 | 6.0—6.7 | 5000—4500 |
| 蓝 | 6.7—7.0 | 4500—4300 |
| 紫 | 7.0—7.5 | 4300—4000 |

从量子观点看，光场是由一个个光子组成。光子是光的最小单位。每个光子的能量 ϵ 和它的频率 ν 之间的关系为

$$\epsilon = h\nu$$

式中 h 是普朗克常数，其数值为

$$h = 6.620 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}.$$

光子也具有动量 \mathbf{P} 。 \mathbf{P} 的方向为光子运动的方向（即光传播方向），其值为

$$|\mathbf{P}| = \frac{\epsilon}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

式中 c 为真空中的光速，1983年第十七届国际计量大会通过其值为

$$c = 299792458 \text{ m/s}.$$

光学是物理学的组成部分。它研究的对象是光；研究的内容包括光的本性，光的发射、传播、接收，以及光和物质的相互作用等。

在基础光学中，通常对不同的现象采用不同的观点去研究。根据所采用观点的不同，光学一般分为几何光学与物理光学两部分，后者又分为波动光学和量子光学。几何光学以光的直线传播性质为基础，研究光线在透明媒质中的传播问题。波动光学以光的波动性为基础，研究光的传播、光和物质相互作用的规律。但是，光的发射以及光和物质相互作用的某些问题，必须用光的量子性才能圆满解释，研究它们属于量子光学的范围。

作为一门基础课的教材，本书主要讨论光学的基本原理及典型应用。全书共十章。第一

章至第三章为几何光学，第四章至第九章为波动光学，第十章为光的量子性和激光。

二、对光的本性认识的简史

概略地了解人们认识光的本性的历史，对学习光学是有所裨益的。光是自然界的一种基本现象，它和人们的生活、生产活动息息相关，因此光学和力学一样是物理学中发展最早的一部分。关于光的几何性质的最早记载，见于公元前四百多年的《墨经》^①中。由于光的物理本性不象力的本性那样比较容易认识，古代对光的研究基本上停留在现象的描述与简单规律的总结。人们对光的本性的认识经历了漫长过程，十七世纪中叶才开始了对它的认真探讨，当时存在着以牛顿为代表的微粒说和以惠更斯为代表的波动说的争论。

牛顿(1642—1727)不仅对力学、数学、天文学的发展作出了巨大贡献，在光学领域也取得了重要成就。他作了许多实验(如著名的三棱镜色散实验，1666年)，仔细研究了后来称为牛顿环的薄膜干涉、衍射(当时称为拐折)、偏振现象，研讨了当时已有的各种假说。他的这些工作总结在《光学》(1704年)^②一书中。牛顿的研究工作既涉及到光的微粒性又涉及到波动性。他在光的本性问题上犹豫了很久。微粒说可以解释光的直线传播、反射和折射定律，而波动说当时还不能解释光的直线传播及光的偏振现象，所以牛顿最后倾向于微粒说。

大约与牛顿倡导微粒说的同时，惠更斯(1629—1695)等人则主张波动说。惠更斯认为光是“以太”中传播的波。利用惠更斯原理可以解释光的反射和折射定律、双折射现象。然而惠更斯的波动说很不完善，他错误地把光看作象声波一样的纵波，又由于牛顿在力学上的伟大成就的影响，所以当时虽然存在着两种学说的争论，在相当长的一段时间内微粒说占着统治地位，这使得整个十八世纪人们对光的本性的认识几乎未取得进展。

十九世纪是波动说的全盛时期。1801年杨氏演示了著名的双孔干涉实验，并用波动理论作了很好的解释，初步测定了光波波长，使光的波动说重新兴起。菲涅耳等人的实验和理论工作圆满地解释了光的干涉、衍射、偏振现象，为波动光学奠定了基础。根据波动说，光在疏媒质中的速度应大于密媒质中的速度，而根据微粒说则得出相反的结果^③。1850年傅科测得光在水中的速度比空气中小，证明了波动说所得出的结论的正确性。遗憾的是，这只是一个迟到的判决。

1845年法拉第发现了光波振动面的磁致旋转，建立了光同电磁现象之间的联系。1865年麦克斯韦在总结安培、韦伯、法拉第等人对电磁现象研究成果的基础上，建立了电磁理论。根据麦克斯韦的理论，电磁波在真空中的传播速度为 $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ ，式中 ϵ_0 、 μ_0 为真空中的介电常数和磁导率。为了得出 c 的值，麦克斯韦利用韦伯和柯耳劳斯等在1856年通过实验所测得的结果 $\epsilon_0\mu_0\approx 11.12\times 10^{-18}\text{s}^2/\text{m}^2$ ，得出 $c\approx 3\times 10^8\text{m/s}$ 。这个值与菲索1849年用旋转齿轮法测得的光速值 $c=3.133\times 10^8\text{m/s}$ 相当符合，由此麦克斯韦指出光就是一种电磁波。1888年赫芝用一系列实验证实了麦克斯韦的假设，于是产生了光的电磁理论。光的电磁理论

①参阅钱临照：《论墨经中关于形学、力学和光学的知识》，物理通报，1951年第3期。

②参阅中译本，周岳明等译，中国科学技术出版社，1987年。

③参阅李良德：《基础光学》，第3页，中山大学出版社，1987年。

的建立，推动了光学及整个物理学的发展。尽管近年来光学发展十分迅速，电磁理论仍然是处理经典光学及近代光学中大量问题的理论基础。

光波既然是横波，似乎必须承认一种传播横波的媒质——“以太”存在。为了解释光波的传播速度很大，还必须赋予以太一些不可思议的矛盾的属性：密度极小而弹性模量极大。光的电磁理论的建立，用“电磁以太”代替了“机械以太”。1887年迈克耳孙和莫雷利用迈克耳孙干涉仪试图探测地球在“以太”中的绝对运动，然而他们却得到了零结果，从而动摇了作为光波载体的“以太”假说，以静止以太为背景的绝对时空观遇到了根本困难。1905年爱因斯坦建立了狭义相对论，在这个理论中，他也独立地否定了以太的假说。这些结果表明电磁波能够通过自由空间传播，电磁场本身就是一种物理实在。

十九世纪至二十世纪初，光学已深入到研究光的发射、光和物质相互作用的微观机构。为了解释光和物质相互作用的某些现象，光的电磁理论遇到了困难。为了解释黑体辐射能量按波长的分布规律，1900年普朗克提出了量子论。1905年爱因斯坦发展普朗克的量子论，提出了光量子的假说，对光电效应的规律作了解释和预言。1927年康普顿散射实验进一步证明了爱因斯坦理论的正确性，由此对光的微粒性的认识进入一个新阶段。

光的干涉、衍射、偏振表明光的波动性，光电效应等表明光的粒子性，即光具有波粒二象性。1924年德布罗意指出波粒二象性是微观粒子的普遍属性。在量子力学及量子电动力学中光的波粒二象性可以很好地统一起来。

目 录

| | |
|-----------------------------|---------------|
| 绪论 | (1) |
| 第一章 几何光学的基本原理及傍轴成像理论 | (1) |
| § 1.1 光源、光线和光波波面 | (1) |
| § 1.2 几何光学的基本定律 | (2) |
| § 1.3 费马原理 | (8) |
| § 1.4 成象的基本概念 | (13) |
| § 1.5 光在平面上的反射和折射 | (15) |
| § 1.6 棱镜 | (21) |
| § 1.7 光在单球面上的折射和反射 | (24) |
| § 1.8 薄透镜 | (32) |
| § 1.6 共轴球面系统 | (37) |
| § 1.10 共轴球面系统的组合 | (43) |
| § 1.11 共轴球面系统傍轴成象的矩阵方法 | (49) |
| 第二章 光阑、象差和光学仪器原理 | (65) |
| § 2.1 光阑 | (65) |
| § 2.2 单色象差 | (69) |
| § 2.3 色差 | (72) |
| § 2.4 人眼 | (73) |
| § 2.5 放大镜和目镜 | (57) |
| § 2.6 显微镜 | (77) |
| § 2.7 望远镜 | (79) |
| 第三章 光度学和辐射度学 | (85) |
| § 3.1 辐射能通量、视见函数和光通量 | (85) |
| § 3.2 发光强度 | (88) |
| § 3.3 光出射度和光亮度 | (89) |
| § 3.4 光照度 | (92) |
| § 3.5 象的光亮度和光照度 | (94) |
| § 3.6 辐射度学 | (97) |

| | |
|---|-------|
| 第四章 光波及其在各向同性介质界面的反射和折射 | (100) |
| § 4.1 光波..... | (100) |
| § 4.2 光波场的数学描述..... | (102) |
| § 4.3 波函数的复数表示 复振幅..... | (109) |
| § 4.4 光波的偏振态..... | (111) |
| § 4.5 光在各向同性介质界面的反射和折射..... | (115) |
| 第五章 光的干涉 | (128) |
| § 5.1 波的叠加和干涉..... | (128) |
| § 5.2 相干光波的条件和产生方法..... | (130) |
| § 5.3 杨氏实验..... | (131) |
| § 5.4 其它几种两光束分波前干涉装置..... | (136) |
| § 5.5 两束平行光的干涉..... | (139) |
| § 5.6 光的非单色性对干涉条纹可见度的影响 光场的时间相干性..... | (141) |
| § 5.7 光源宽度对干涉条纹可见度的影响 光场的空间相干性 部分相干性..... | (145) |
| § 5.8 薄膜干涉(一): 等倾干涉..... | (151) |
| § 5.9 薄膜干涉(二): 等厚干涉..... | (157) |
| § 5.10 薄膜干涉(三): 应用举例..... | (163) |
| § 5.11 迈克耳孙干涉仪..... | (165) |
| § 5.12 付里叶变换光谱仪..... | (168) |
| § 5.13 多光束干涉..... | (170) |
| § 5.14 法布里-珀罗干涉仪..... | (175) |
| § 5.15 干涉滤光器..... | (179) |
| § 5.16 光拍..... | (180) |
| § 5.17 强度相关实验..... | (182) |
| 第六章 光的衍射 | (189) |
| § 6.1 光的衍射现象..... | (189) |
| § 6.2 惠更斯-菲涅耳原理..... | (192) |
| § 6.3 夫琅和费单狭缝和矩孔衍射..... | (195) |
| § 6.4 夫琅和费圆孔、圆环和多边形孔衍射..... | (200) |
| § 6.5 互补屏 巴俾涅原理..... | (203) |
| § 6.6 成象仪器的象分辨本领..... | (203) |
| § 6.7 振幅型平面透射光栅..... | (208) |
| § 6.8 光栅和棱镜光谱仪的特性..... | (213) |
| § 6.9 闪耀光栅和正弦光栅..... | (216) |
| § 6.10 菲涅耳衍射..... | (220) |

| | |
|-----------------------|-------|
| § 6.11 波带片 | (226) |
| 第七章 傅里叶光学的基本概念 | (237) |
| § 7.1 傅里叶变换 | (237) |
| § 7.2 衍射理论中的傅里叶方法 | (243) |
| § 7.3 理想薄透镜的傅里叶变换作用 | (250) |
| § 7.4 阿贝成象原理 | (254) |
| § 7.5 空间频率滤波 | (256) |
| § 7.6 全息照相 | (260) |
| 第八章 光在晶体中的传播 | (265) |
| § 8.1 双折射和双反射 | (265) |
| § 8.2 产生线偏振光的元件 | (274) |
| § 8.3 椭圆偏振光与圆偏振光 | (278) |
| § 8.4 偏振光的检验 | (285) |
| § 8.5 偏振光的干涉 | (290) |
| § 8.6 旋光性及圆二色性 | (299) |
| § 8.7 外力作用下的旋光性及双折射 | (303) |
| § 8.8 偏振态及其转换的矩阵描述 | (307) |
| 第九章 光的吸收、色散和散射 | (319) |
| § 9.1 光的吸收 | (319) |
| § 9.2 光的色散 | (323) |
| § 9.3 光的相速和群速 | (328) |
| § 9.4 光的散射 | (330) |
| 第十章 光的量子性和激光 | (337) |
| § 10.1 热辐射和基尔霍夫定律 | (337) |
| § 10.2 黑体的经典辐射定律 | (340) |
| § 10.3 普朗克辐射公式 能量子 | (343) |
| § 10.4 光测高温法 | (346) |
| § 10.5 光电效应 | (347) |
| § 10.6 康普顿效应 | (351) |
| § 10.7 波粒二象性 | (353) |
| § 10.8 光子与原子系统的相互作用 | (356) |
| § 10.9 激光的形成 | (359) |
| § 10.10 几种典型的激光器 | (364) |
| § 10.11 激光的特性和重要应用 | (366) |
| 常用物理常数表 | (370) |
| 习题参考答案 | (371) |

第一章 几何光学的基本原理及傍轴成象理论

几何光学是光学中发展最早的一部分。它所研究的主要问题是物体经光学系统的成象问题。在几何光学中，撇开光的本性，不考虑光和物质的相互作用，只是以光线的概念为基础，根据实验观测总结所得到的几个基本定律，通过三角计算或矩阵运算或几何作图法来讨论物体经光学系统的成象规律。

本章中，将首先介绍几何光学的基本定律和有关成象的基本概念，然后讨论平面、球面、薄透镜及共轴球面系统的旁轴成象理论。

§ 1.1 光源、光线和光波波面

一、光源

从物理学的观点看，任何发光的物体都可以叫作光源，太阳、烛焰、钨丝白炽灯、日光灯、高压水银荧光灯、碘钨灯是我们日常生活中熟悉的照明光源。光源不仅用来照明，为了科学研究的需要，人们常使用各种类型的特殊光源，例如各种电弧和放电管。1960年问世的激光器，则是一种与过去所有的光源性质不同的新型光源。

在几何光学中，我们把凡是发出光线的物体，不论它本身是发光体或是因为被照明而漫反射光的物体，都称为光源。如果某光源可看成几何学上的点，它只占有空间位置而无体积和线度，则称之为点光源。与力学中的质点一样，自然界中并不存在真正的点源，它只是为了讨论问题方便而引入的一个抽象概念。但是，只要一个光源的线度与它所发射光能的作用距离相比可以忽略时，就可把它看作是点光源。例如体积超过太阳系的恒星，由于它到地球的距离比它自身的线度大得多，故地球上的观察者就可把恒星看作是点光源。

二、光线和光束

光线是表示光能传播方向的几何线。有一定关系的一些光线的集合称为光束。若在光束传播的路径中放入一个孔径可变的圆孔光阑，就可从光束中分离出狭窄的光束。但是由于衍射的存在（见§6.1），当进一步缩小孔径时，光束不仅不会缩小，反而会扩大。不过，当假定光波长趋于零时，这些衍射效应也趋于零。所以光线和点光源一样，也是一个抽象的概念，它只不过是实际光束在光波长 $\lambda \rightarrow 0$ 的极限情况下能量的传播方向。然而，引入点光源和光线的概念以后，却可以用几何方法来讨论系统的成象规律，这就可使问题大为简化。而且一般光学仪器的通光孔径都比光波长大得多，衍射效应通常并不明显，由几何光学所得的结果与实际情况相当好地符合。所以几何光学有着重要的实际意义，它是光学仪器设计理论的基础。当然，以后将见到，对于象的一些精细问题（例如光学仪器的分辨本领）的研究，须用波动理论才能解决。

三、光波波面

光实际上是一种电磁波，因此我们需要知道上面引入的光线和波面间的关系。通常我们认为光振动可用电磁波中电场强度的变化来表示（见§4.1）。在某一时刻，振动位相值相同的各点所构成的曲面称为**波面**。波面可以是平面、球面或任意曲面。

在各向同性媒质中，光沿着波面法线方向传播，所以可以认为光波波面的法线就是几何

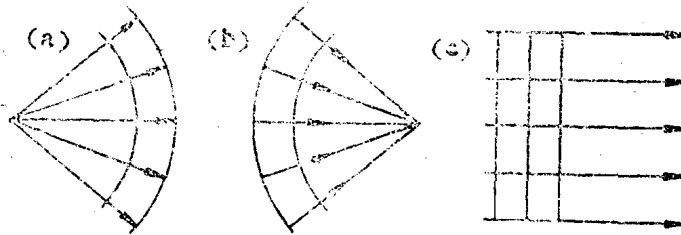


图1.1-1 (a)发散球面波；(b)会聚球面波；(c)平面波

光学中的光线。与波面对应的法线束就是光束。球面波对应于会聚或发散光束，平面波对应于平行光束，如图1.1—1所示。

§ 1.2 几何光学的基本定律

一、几何光学的基本定律

大量事实总结出来的几何光学四个基本定律，指出了在不考虑衍射情况下光传播所遵循的规律，它们是光学系统成象理论的基础，以下分述之。

1. 光的直线传播定律：光在均匀媒质中沿直线传播。

用点光源照明不透明物体时生成阴影（图1.2—1）是光在均匀媒质中沿直线传播的极好例证。根据光的直线传播定律，容易解释日蚀、月蚀等现象。但是必须注意，光只有在均匀媒质中才沿直线传播。在非均匀媒质中，光线将发生弯曲。例如，来自太阳的光线穿过地球大气层时，由于大气层密度不均匀，光线发生了弯曲，所以当太阳实际已落到地平线之下，我们仍然能看见它（图1.2—2）。

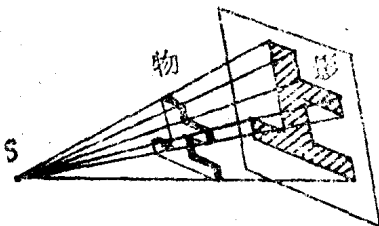


图1.2-1 影的形成

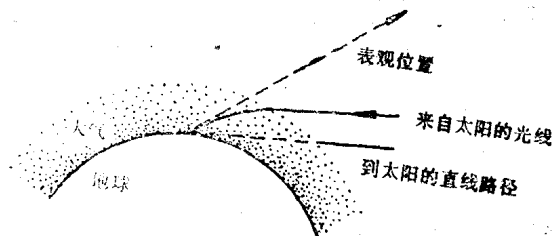


图1.2-2 太阳光通过大气层时发生弯曲

2. 光的独立传播定律：来自不同方向的光线同时通过空间某点时，各光线的传播不受其它光线的影响。

例如有二人同时通过某一屏上的开孔分别观察不同的物体时，虽然这些物体发出的光线

在小孔处相交，但此二人所观察到的某物的情况与其它物体并不存在时所见相同。这就充分说明了来自不同方向的光线相遇时，彼此不发生影响。

3. 光的反射定律：如图1.2—3所示，当一束光射到两种透明媒质的光滑界面上时，一部分光从界面上反射形成反射线。入射线与其入射点处界面的法线所构成的平面称为入射面。法线与入射线和反射线所构成的夹角 i_1 和 i_1' 分别称为入射角和反射角。实验表明，反射线的方向遵守反射定律：

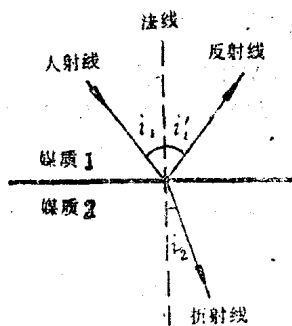


图1.2—3 光的反射与折射

(1) 反射线在入射面内，并和入射面分别在法线的两侧，

(2) 反射角等于入射角，即

$$i_1' = i_1. \quad (1.2-1)$$

若反射界面凹凸不平的线度大于入射光波长时，则不会产生单向反射而会形成漫反射。例如，在暗室里，让一束平行光线投射在一张白纸上。这时，从各个方向都能看见这张被照亮的白纸，说明投射到纸上的光线是朝着各个方向反射出去的。而且反射界面的线度必须远大于入射光波长，否则入射光束将在界面上产生明显的衍射或散射效应。

4. 光的折射定律：在图1.2—3中，入射光线除了一部分反射外，其余部分将进入第2媒质形成折射线，在界面光滑且界面线度大于光波长情况下，它的方向遵守折射定律：

(1) 折射线在入射面内，并且和入射线分别在法线的两侧，

(2) 对于单色光而言，入射角 i_1 的正弦与折射角 i_2 的正弦之比是一个常数，即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}. \quad (1.2-2)$$

比例常数 n_{21} 决定于入射光的波长和界面两侧媒质的性质，与入射角无关，称为第2媒质对第1媒质的相对折射率。若第1媒质为真空，上式可写为

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_2, \quad (1.2-3)$$

式中 n_2 为第2媒质对真空的相对折射率，称为媒质的绝对折射率，简称折射率。通常媒质对于空气的相对折射率与其绝对折射率相差甚小，故实际上常常不加区分。

应当指出，上述四个基本定律是在入射光不太强的情况下总结出来的。近年来由于激光技术的发展，我们可以获得极强的激光束（光功率密度可高达 10^{13} 瓦/厘米²）。在强激光照射下，媒质的折射率将随入射光强而变化。光束之间要产生相互作用不再保持彼此独立，从而会出现一系列新的光学现象。研究它们属于“非线性光学”范畴。

二、折射率

折射率是表征媒质光学性质的重要参量，它决定于光波在媒质中的传播速度。如图1.2—4所示，设入射光是一束平行光，经界面折射后，平行光束的方向产生了偏折。按照振动

与波中讲过的惠更斯原理，入射波面 OQ 上各点都可以看作是新的次波源。当 Q 点发出的次波在第 1 媒质中经时刻 t 传到 Q' 点时， O 点发出的次波在相同时刻 t 内在第 2 媒质中传到了 O' 点。 $O'Q'$ 即为折射波面。若用 v_1 、 v_2 分别表示光波在第 1、2 媒质中的传播速度，则

$$QQ' = v_1 t, \quad OO' = v_2 t$$

由 $\triangle OQQ'$ 和 $\triangle OO'Q'$ 可知，

$$\sin i_1 = \frac{QQ'}{OQ'}$$

$$\sin i_2 = \frac{OO'}{OQ'}$$

两式相除得

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{QQ'}{OO'} = \frac{v_1}{v_2}$$

由 (1.2-2) 式得

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.2-4)$$

即是说，第 2 媒质对第一媒质的相对折射率，等于光波在第 1 媒质与第 2 媒质中传播的相速度之比。

如果光线是从真空射到某种媒质里，它在真空中的传播速度为 c (其值约为 3×10^{10} 米/秒)，在媒质中的传播速度为 v ，则该种媒质的绝对折射率

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

因此，媒质的折射率是光通过媒质时在该媒质中速度减小程度的量度。图 1.2-4 第 1 和第 2 媒质的绝对折射率分别为：

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

于是可得

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2-5)$$

即第 2 媒质对第 1 媒质的相对折射率等于第 2 媒质的绝对折射率与第 1 媒质的绝对折射率之比。若将 1、2 两种媒质互换，由上式不难看出第 1 媒质对第 2 媒质的相对折射率与第 2 媒质对第 1 媒质的相对折射率互为倒数，即 $n_{21} = \frac{1}{n_{12}}$ 。

两种媒质相比较，折射率较大者，光波在其中传播速度较慢，称之为**光密媒质**；反之则称为**光疏媒质**。

我们已知，在同一媒质中，不同波长的光传播速度不同，即媒质折射率的大小是与入射

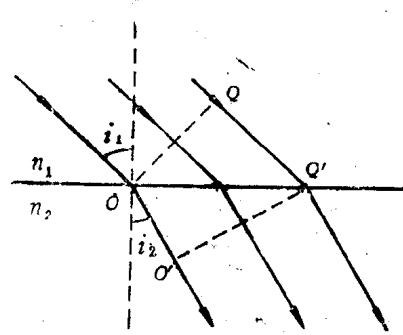


图 1.2-4 平行光的折射

光波长有关的。当不同波长的光线以相同方向入射时，它们将有不同的折射方向。若入射光为一束白光，折射光线将分散开而形成一连续光谱（图1.2—5）。这种复色光分解成单色光的现象称为色散。除了折射而外，干涉和衍射也可引起色散，我们将分别在第五和第六章讨论。

折射率与波长的关系可用科西公式^①表示为

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}, \quad (1.2-6)$$

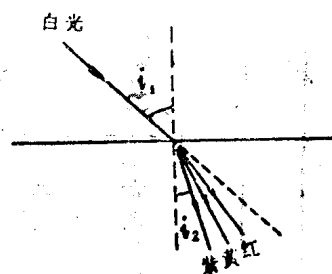


图1.2—5 白光的色散

式中 λ 为入射光在真空中的波长， A 、 B 为与媒质有关的常数，可由实验测得。由上式可知，在正常情况下，媒质的折射率随光波长的增加而减小。

习惯上常用某几条夫琅和费线^②所对应的波长来标明材料的折射率，表1.2—A列出了某些典型玻璃的折射率。在光学仪器的设计中，光学材料的折射率通常都是对钠灯的黄光即夫琅和费D线（ $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ ）而言的。本书中所说的折射率，如不特别指明，就是对这个波长而言的。表1.2—B列出了一些气体和液体对于 $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ 的折射率。

三、光的可逆性

利用相对折射率与绝对折射率的关系，可将折射定律写为对称形式，从而可方便地得出折射时光路的可逆性。将（1.2—5）式代入（1.2—2）式得

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (1.2-6)$$

上式表明，若光线在第2媒质中沿原折射线相反的方向入射，则经界面折射后，它必将在第1媒质中逆原入射线方向折射（图1.2—6a）。同理，由反射定律不难看出，如果光线沿原反射线相反方向入射，则经界面反射后，它必逆原入射线方向反射。

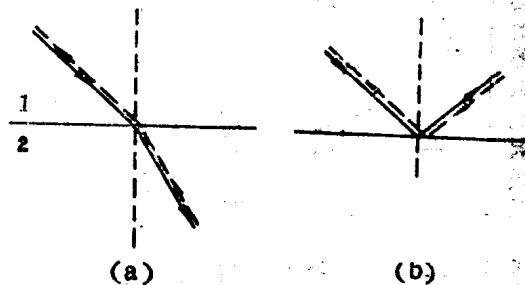


图1.2—6 光的可逆性

总之，当光线沿着和原来相反的方向传播时，其路径不变这就是光的可逆性。这个性质不仅对于单个面的反射或折射，而且对于复杂的系统也是成立的。在某些成象问题中，应用它会给我们带来方便。例如在一个系统中，物和象是可以互换的。光的可逆性还表明，在不考虑媒质吸收所引起的损耗时，波动现象是一个可逆过程。

例1.2—1 一媒质的折射率沿媒质表面的法线方向连续变化，光线斜入射，求在媒质中光线路径的方程。

解 如图1.2—7，设媒质的折射率沿 x 方向连续变化，可以认为它是由许多折射率递增的薄层所组成。当薄层的厚度趋于零，层数趋于无限多时就过渡到连续变化。在每个交界面上，光线满足折射定律

① 详见 §9.2

② 夫琅和费 (Fraunhofer) 仔细观测了太阳光谱中的暗线，精确测定了一些最强谱线的波长，并用字母 Δ 到K来标记其中最主要的几条线，称为夫琅和费线。光谱学中常用夫琅和费线作波长的基准标志。

表1.2-1-A 常用无色光学玻璃的折射率

| 谱线代号 | — | h | g | F | e | D | C | A' | — | — |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 光 色 | (紫外) | 蓝 | 青 | 青绿 | 绿 | 黄 | 橙红 | 红 | (红外) | (红外) |
| 波长 (Å) | 3650 | 4047 | 4358 | 4861 | 5461 | 5893 | 6563 | 7665 | 8630 | 9508 |
| 冕玻璃 (k ₀) | 1.53582 | 1.52982 | 1.52626 | 1.52195 | 1.51829 | 1.51630 | 1.51389 | 1.51104 | 1.50918 | 1.50778 |
| 钡冕玻璃 (BaK ₇) | 1.59417 | 1.58620 | 1.58154 | 1.57597 | 1.57130 | 1.56880 | 1.56582 | 1.56238 | 1.56023 | 1.55866 |
| 重冕玻璃 (ZK ₆) | 1.63862 | 1.63049 | 1.62573 | 1.61999 | 1.61519 | 1.61260 | 1.60949 | 1.60592 | 1.60268 | 1.60206 |
| 轻火石玻璃 (QF ₃) | 1.61197 | 1.59968 | 1.59280 | 1.58431 | 1.57832 | 1.57490 | 1.57089 | 1.56638 | 1.56366 | 1.56172 |
| 钡火石玻璃 (BaF ₁) | 1.57371 | 1.56553 | 1.56080 | 1.55518 | 1.55050 | 1.54800 | 1.54502 | 1.54160 | 1.53946 | 1.53791 |
| 重火石玻璃 (ZF ₁) | 1.70022 | 1.68229 | 1.67245 | 1.66119 | 1.65218 | 1.64750 | 1.64207 | 1.63609 | 1.63254 | 1.63007 |

表 1.2—B 一些气体和液体的折射率 (对 $\lambda = 5893\text{\AA}$)

| 气 体 (正常温度和气压下) | 折 射 率 | 液 体 | 温 度 (0°C) | 折 射 率 |
|-------------------|-----------|------|--------------------------------|--------|
| 空 气 | 1.0002926 | 水 | 20 | 1.3330 |
| 氢 气 | 1.000132 | 丙 酮 | 20 | 1.359 |
| 氮 气 | 1.000296 | 酒 精 | 20 | 1.3605 |
| 氧 气 | 1.000271 | 乙 醚 | 20 | 1.351 |
| 二氧化碳 | 1.000448 | 二硫化碳 | 20 | 1.6255 |
| 甲 烷 | 1.000444 | 三氯甲烷 | 20 | 1.446 |
| | | 甘 油 | 20 | 1.474 |
| | | 甲 醇 | 20 | 1.329 |

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 = \dots$$

在折射率连续变化的极限情形下, 上式可写为

$$n(x) \sin \theta(x) = n_1 \sin \theta_1 \quad (1.2-7)$$

式中 θ_1 为光线在折射率为 n_1 点的入射角。由于折射率连续变化, 图 1.2-7(a) 所示折线变成了一条连续的曲线。若 dl 表示曲线上一段无限小的弧长, 由图 1.2-7(b) 可见

$$(dl)^2 = (dx)^2 + (dz)^2$$

$$\frac{dz}{dl} = \sin \theta,$$

由上二式得,

$$\left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + 1 = \left(\frac{dl}{dz}\right)^2 = \frac{1}{\sin^2 \theta}.$$

则由 (1.2-7) 式及上式得

$$\left(\frac{dx}{dz}\right)^2 = \frac{n^2(x)}{n_1^2 \sin^2 \theta_1} - 1 \quad (1.2-8)$$

当 $n(x)$ 已知时, 上述方程的解给出 x 随 z 的变化, 即在折射率按 $n(x)$ 形式变化媒质中光线的路径。将上式对 z 求微商得

$$2 \frac{dx}{dz} \frac{d^2x}{dz^2} = \frac{1}{n_1^2 \sin^2 \theta_1} \frac{dn^2(x)}{dx} \frac{dx}{dz}$$

即

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{1}{2n_1^2 \sin^2 \theta_1} \frac{dn^2(x)}{dx} \quad (1.2-9)$$

上式即为媒质中光线路径的方程。由上式不难看出, 在均匀媒质中光沿直线传播。

例 1.2-2 一自聚焦光纤的折射率分布函数为

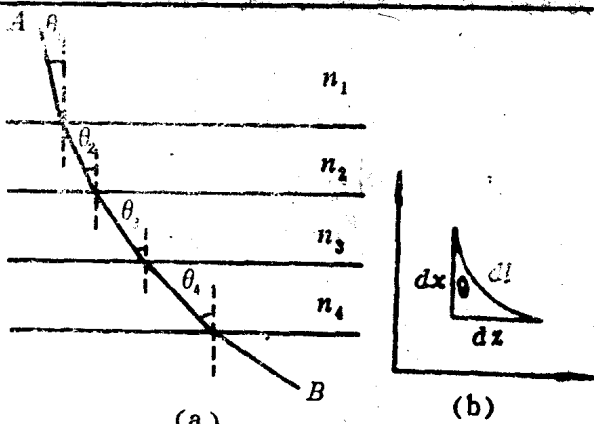


图 1.2-7 折射率分层连续媒质中的光线

$$n^2(x) = n_0^2 - n_2 x^2 \quad (1.2-10)$$

式中 n_0 表示 $x=0$ 处的折射率， n_2 为一常数，求光线的路径。

解 将(1.2-10)式代入(1.2-9)式得光线方程

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = -\frac{n_2}{n_0^2 \sin^2 \theta_1} x(z)$$

式中 θ_1 为 $x=0$ 处光线与 x 轴夹角。上述方程的解是

$$x(z) = A \sin \left[\frac{\sqrt{n_2}}{n_0 \sin \theta_1} z + \varphi_0 \right] \quad (1.2-11)$$

常数 A 和 φ_0 由光线初始方向和初始入射点的坐标确定。上式表明光线的路径为正弦曲线，周期与投射角 $\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ 有关，图1.2-8示出 α 取不同值的三条曲线。当 α 很小时， $\sin \theta_1 \approx 1$ 为常数，所有这些傍轴光线有相同的周期，光纤有聚焦作用。

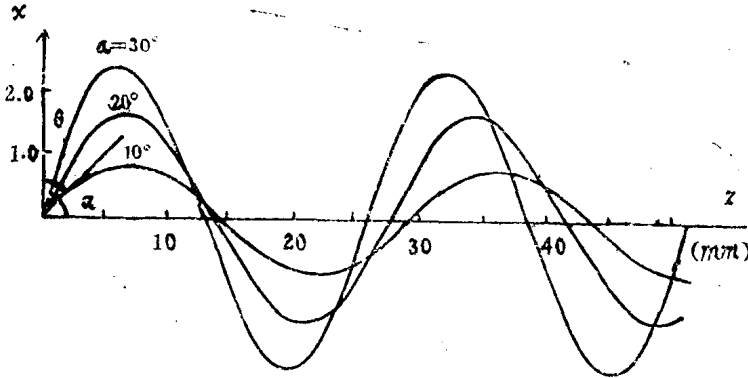


图1.2-8 在平方律媒质中光线的路径

§ 1.3 费马原理

1657年，费马提出的原理概括了光线传播所遵循的规律。在讨论费马原理之前，我们首先考虑下列问题：在图1.3-1中， x 轴以上表示河滩， x 轴以下表示河床。设想有一个小孩掉入水中，他正在水中的 B 点向人们呼救，而且假定他在水中的位置是不动的。我们在河滩上的 A 点看到了这件事，如果我们既能跑步又能游泳，那么我们应该选择一条什么样的路径，才能从 A 点尽快赶到 B 点呢？沿 AB 笔直过去吗？不行。因为我们游泳的速度比跑步的速度慢，由图1.3-1可见，水中路程 BD 比岸上的路程 AD 长，选择这条路径显然不是最省时的。沿 ACB 吗？虽然沿此路径时在水中路程是最短，但岸上的路程却太长了。怎样来选择所需时间为最短的路径呢？让我们在讨论费马原理之后，再回答此问题。为此，尚须先引入一个重要概念——光程。

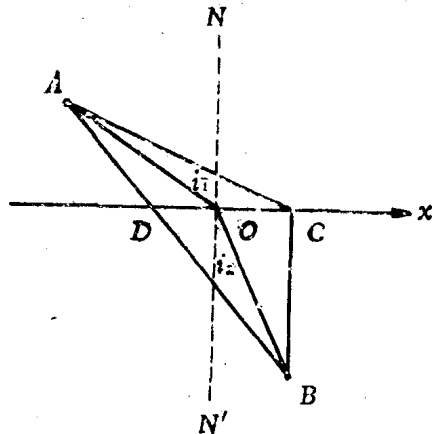


图1.3-1 从A点到B点几种路径