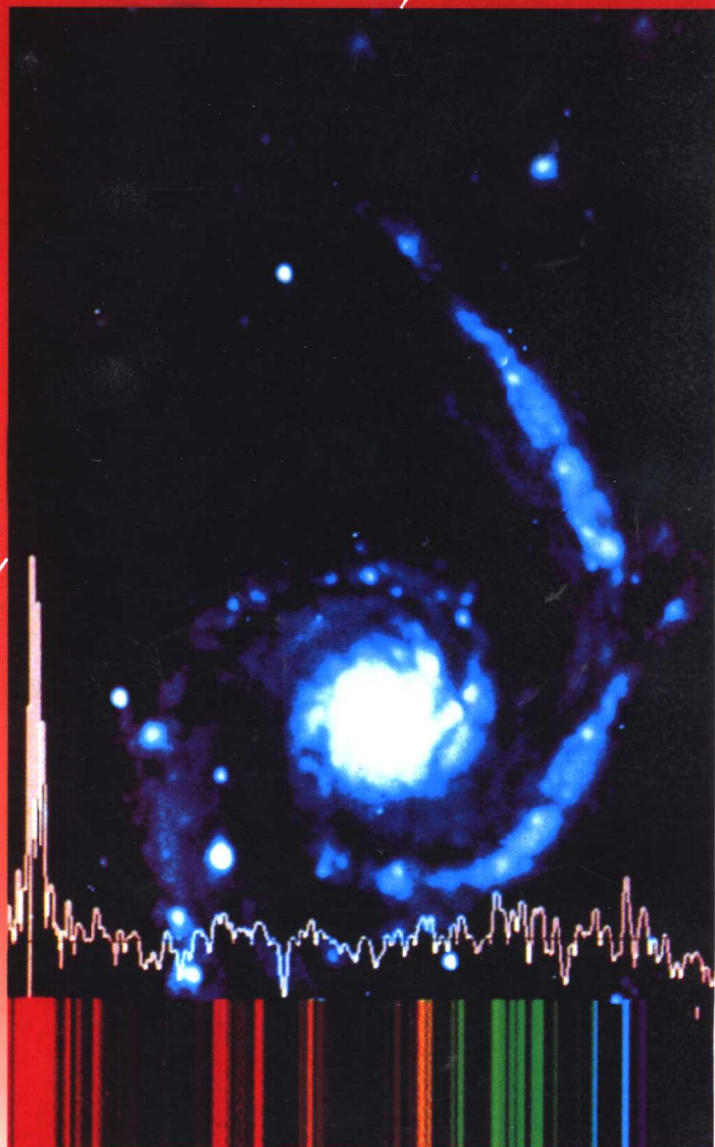


大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

光学·近代物理

陈熙谋
编著



北京大学出版社

大学物理通用教程

光学·近代物理

陈熙谋 编著

北京大学出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理通用教程. 光学·近代物理/钟锡华,陈熙谋主编. —北京:北京大学出版社,2002.3

ISBN 7-301-04598-0

I. 物… II. ①钟… ②陈… III. ①物理学-高等学校-教材 ②光学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76628 号

书 名: 大学物理通用教程——光学·近代物理

著作责任者: 陈熙谋 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-04598-0/O·0478

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村 北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 出版部 62752015 发行部 62757298 邮购部 62752019

印刷者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

890 毫米×1240 毫米 A5 开本 10.5 印张 300 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 0001—4000

定 价: 18.00 元

作者前言

本书是《大学物理通用教程》的第4分册,内容包括光学和近代物理两大部分.

光学部分包括光学导言和波动光学内容,共4章.光学导言主要讲述光学发展简史,介绍后面波动光学所必需的光学知识,介绍光程概念和费马原理.波动光学讲述传统的基本内容:光的干涉、光的衍射和光的偏振.这些内容对于认识光的波动性、认识物理现象中的波动图象是重要的.波动光学是19世纪发展起来的,随着现代物理的发展,从新的视角审视,开发出崭新的物理内涵和别开生面的重要应用,如相衬原理、全息照相和傅里叶光学等典型的例子.因此这部分采用简明的方法讲述传统的内容之后,以新的视角介绍处理干涉衍射问题的新思路,以及由此带来的新应用的各个方面,会给学生带来面目一新的感觉.作者认为,不断开发物理内容的新视野是拓宽物理应用、推动科学技术发展的重要源泉,也是物理教学的重要内容.让学生掌握物理学的基本内容,并获得认识物理问题的新视角,是活跃思想,培养创新思维的新起点.学生多接触新思维的熏陶是大有好处的.

近代物理部分包括相对论、量子物理基础以及原子和分子、原子核、粒子和宇宙等五章.近代物理是20世纪发展起来的物理学庞大领域,它的理论基础是相对论和量子力学,而原子和分子、原子核、粒子和宇宙是近代物理发展中的几个方面.设立这几章,讲述其中少数几个问题,不过是点出现代物理蓬勃发展的掠影,让学生领略现代物理发展的博大精深以及它对科学技术发展,对人类文化发展的深远影响,从中汲取物理思维的活力.

狭义相对论是物体运动速度趋近光速 c 的物理理论,它指明物理定律必须在洛伦兹变换下保持不变.它的新颖的时空观以及质速关系、质能关系都是崭新的物理概念.为了使学生对相对论崭新的物

理概念有深入的认识,从实际问题中提出传统经典物理遇到不可克服的矛盾,引导到相对论的必然,在此基础上再展开相对论基本原理、时空变换、时空观以及思考问题方法的阐述是必要的.我们所以把相对论放到电磁学和光学之后再讲述,就是出于学生有了更深入的电磁学和光学的背景知识,能对相对论是如何提出来的问题有更深入的体会,进而对相对论的学习产生更高的热情.

量子物理涉及微观研究领域,这是一个全新的研究领域,微观粒子表现出同我们熟悉的宏观物体行为非常不同的性质,如能量量子化、波粒二象性、不确定关系、隧道效应,等等.这些同人们所熟悉的宏观物体的行为非常不同的性质是前所未闻的,有的甚至似乎是极端矛盾的.正是由于此,对于微观粒子的运动,从基本概念、基本规律形式到思考问题的方法都表现出同传统的经典物理非常不同的品性.因此展现微观粒子运动表现的各个方面,剖析其区别于经典物理的根源,是认识微观粒子运动的较好途径.在这方面,它比相对论的阐述更需要深入分析.本书作为大学普通物理教材,其目的与任务主要在于认识微观粒子运动的特征和了解运用量子力学解决具体问题的主要思路,其他更高的要求是不适宜的.

习题练习是物理教学不可缺少的组成部分.原编书的习题大都比较基本,是历届教学中经常选用的,本书编著中对此未作大量更改,只是对原有习题略加精选,作少量补充而已.

本教程主编钟锡华教授审阅了全书,俞允强教授、张承福教授审阅了部分章节,他们都提出了许多宝贵修改意见,作者在此一并致谢.书中错误和不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正.

陈熙谋

2002年1月于北京大学物理系

目 录

光 学

第 1 章 光学导言	(3)
1.1 光学发展简史	(3)
1.2 波动的数学描述	(8)
1.3 费马原理	(12)
习题	(16)
第 2 章 光的干涉	(18)
2.1 概述	(18)
2.2 光波的叠加和干涉	(19)
2.3 分波前干涉——杨氏干涉实验	(24)
2.4 其他分波前干涉装置	(30)
2.5 分振幅干涉——薄膜干涉的一般问题	(32)
2.6 等倾干涉	(35)
2.7 等厚干涉	(38)
2.8 薄膜干涉应用举例	(41)
2.9 迈克耳孙干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪	(43)
2.10 光场的空间相干性和时间相干性	(45)
习题	(49)
第 3 章 光的衍射	(53)
3.1 衍射现象	(53)
3.2 惠更斯-菲涅耳原理	(55)
3.3 夫琅禾费单缝衍射	(56)
3.4 夫琅禾费圆孔衍射和光学仪器的分辨本领	(62)
3.5 衍射光栅	(65)
3.6 X 射线衍射	(75)
3.7 全息术原理	(77)
3.8 相衬显微镜	(81)

3.9 纹影法	(83)
3.10 傅里叶光学大意	(84)
习题	(98)
第4章 光的偏振	(102)
4.1 自然光和偏振光	(102)
4.2 起偏振器与检偏振器 马吕斯定律	(107)
4.3 反射和折射时的偏振	(109)
4.4 散射光的偏振	(111)
4.5 双折射现象	(113)
4.6 惠更斯作图法	(115)
4.7 偏振棱镜	(119)
4.8 波片和补偿器	(121)
4.9 偏振光的干涉	(125)
4.10 人为双折射	(130)
4.11 旋光性	(132)
习题	(136)

近代物理

引言	(143)
第5章 相对论	(145)
5.1 狭义相对论以前的力学和时空观	(145)
5.2 电磁场理论建立后呈现的新局面	(149)
5.3 爱因斯坦的假设与洛伦兹变换	(153)
5.4 相对论的时空观	(157)
5.5 相对论多普勒效应	(165)
5.6 相对论速度变换公式	(168)
5.7 狭义相对论中的质量、能量和动量	(169)
5.8 广义相对论简介	(175)
习题	(182)
第6章 量子物理基础	(186)
6.1 黑体辐射和普朗克的量子假设	(186)
6.2 光电效应和爱因斯坦的光子理论	(194)

6.3	康普顿效应	(197)
6.4	玻尔的氢原子理论	(202)
6.5	微观粒子的波动性	(210)
6.6	波粒二象性分析	(214)
6.7	不确定关系	(220)
6.8	波函数和概率幅	(226)
6.9	薛定谔方程	(229)
6.10	薛定谔方程应用举例	(233)
	习题	(245)
第7章	原子和分子	(248)
7.1	概述	(248)
7.2	氢原子的能级和波函数	(249)
7.3	电子自旋	(256)
7.4	泡利原理和原子的电子壳层结构	(258)
7.5	激光原理	(265)
7.6	分子的能级和分子光谱	(272)
7.7	分子键联	(274)
第8章	原子核	(279)
8.1	概述	(279)
8.2	原子核的组成和基本性质	(280)
8.3	核力	(283)
8.4	核结构模型	(286)
8.5	核的放射性衰变	(288)
8.6	核反应	(295)
8.7	核裂变和核聚变	(296)
第9章	粒子和宇宙	(301)
9.1	概述	(301)
9.2	相互作用与粒子分类	(303)
9.3	粒子的基本性质	(305)
9.4	夸克模型	(308)
9.5	宇宙膨胀与大爆炸	(312)
9.6	宇宙结局与暗物质	(315)
附录		
	附录 A 基本物理常量	(318)

附录B 元素周期表	(319)
习题答案	(320)

光 学



光 学 导 言

1.1 光学发展简史

1.2 波动的数学描述

1.3 费马原理

1.1 光学发展简史

- 光学的早期发展
- 微粒说
- 波动说 惠更斯原理
- 波动说的决定性胜利
- 光学的现代发展

• 光学的早期发展

光学是物理学的重要分支. 人们很早就开始研究那些能够引起视觉反应的现象, 这种能引起视觉反应的事物就称为光. 如今的光学研究对象和范围有了很大的扩充, 它不是仅限于研究人眼可感知的可见光, 而是研究包括微波、红外线、可见光、紫外线直到 X 射线的整个电磁波谱范围, 研究它们的传播以及与物质的相互作用, 其中涉及到的一个基本问题是, “光是什么?” “光的本性是什么?”

光学的研究可追溯到 2000 年前. 约在公元前 400 多年, 中国的《墨经》记载了世界上最早的光学实验以及所获得的关于影、针孔成像和镜面成像的知识. 差不多相同的时期, 西方也有一些光学研究, 公元前 300 年, 希腊欧几里得的《反射光学》已有光的直线传播性和反射定律的叙述.

到 17 世纪, 光学才有了真正的发展. 1621 年斯涅耳发现光的折射定律, 与早先已经发现的光的直线传播定律和反射定律一起构成几何光学的基础, 使得稍早发明的望远镜、显微镜等光学仪器有了长

足的发展,并开拓了日益广泛的应用.此时,关于光的本性形成了两种激烈争论的对立的学说,一种是以牛顿为代表的微粒说,另一种是以惠更斯为代表的波动说.

● 微粒说

以牛顿为代表的微粒说认为光是由微粒组成的,这些光微粒与普通的实物小球一样遵从相同的力学规律.微粒说可以很好地说明光的直线传播和反射定律.光线在平面镜上的反射同小球与硬壁的碰撞相同,光微粒速度沿界面的分量在反射前后保持不变,而沿垂直

界面的分量在反射前后保持大小不变,方向逆反.这样很容易得出光反射时反射角等于入射角.

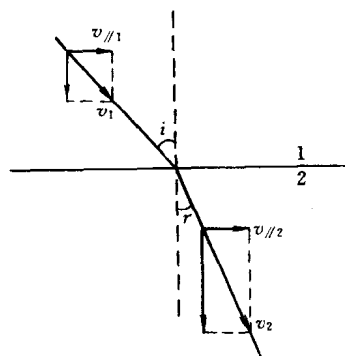


图 1-1 微粒说对折射定律的说明

微粒说对于折射定律的说明采用了相同的条件,认为微粒速度沿界面的分量在折射前后保持不变,而微粒通过界面时由于受到阻滞或相反的效应,速度由 v_1 变为 v_2 ,如图 1-1 所示.由于

$$v_{//1} = v_{//2},$$

于是

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_{//1}/v_1}{v_{//2}/v_2} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (1.1)$$

这表明入射角 i 的正弦与折射角 r 的正弦之比与入射角无关,仅仅取决于光微粒在两种介质中的速度之比,这正是折射定律.

根据(1.1)式,光在光疏介质中的速度小于光密介质中的速度,例如,光从空气射向水是从光疏介质射向光密介质,入射角 i 大于折射角 r ,则光在空气中的速度小于光在水中的速度.

● 波动说 惠更斯原理

以惠更斯(C. Huygens)为代表的波动说认为光和声一样是一种波动.1690年惠更斯提出了一个波传播的一般原理,现在称为惠更

斯原理：波到达的任意点都可以看作新的振动中心，它们发出球面次波，这些次波的包络面就是新的波面。运用惠更斯原理，通过几何作图，容易说明光在各向同性的均匀介质中直线传播，如图 1-2 所示。

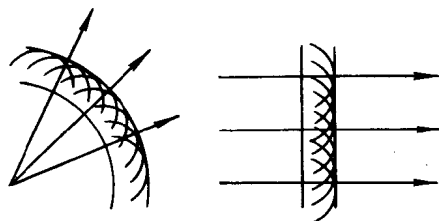


图 1-2 球面波和平面波的传播

波动说关于光在两种介质界面上的反射简要说明如下。如图 1-3 所示，在各向同性均匀介质中，斜入射向界面的波到达界面 AC 是不同时的，一边的波到达 A 点，另一边的波才到达 B 点，随着时间的推移，在界面上从左到右，波依次先后到达。依照惠更斯原理，

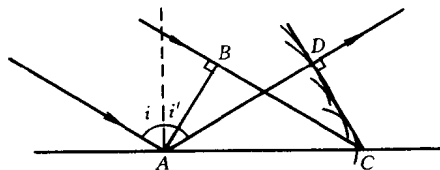


图 1-3 波动说对反射定律的说明

界面上各点振动中心发出的次波的半径是不同的，波先到达的点发出的次波较大，后到达的点发出的次波较小。由于在同一种介质中波传播的速度相同，因此当波从 B 点传播到 C 点时， A 点反射发出的次波的半径已为 AD ，而且 $AD=BC$ 。这些大小不一的次波的包络面是 CD ，反射光线则为 AD 。从图中容易看出

$$\triangle ABC \cong \triangle ADC,$$

所以

$$\angle BAC = \angle DCA,$$

而

$$i = \angle BAC, \quad i' = \angle DCA,$$

因此,反射角等于入射角

$$i' = i.$$

波动说关于光在两种介质界面上的折射亦可简要说明如下.如图 1-4 所示,设波在两种介质中的波速分别为 v_1 和 v_2 ,与上面同样的考虑,斜射向界面的波到达界面的时间先后不一,它们发出的次波大小不同,它们的包络面是 CD ,折射光线则是 AD ,于是

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \angle BAC}{\sin \angle ACD} = \frac{BC/AC}{AD/AC} = \frac{BC}{AD} = \frac{v_1^{①}}{v_2}. \quad (1.2)$$

同样得出,入射角的正弦与折射角的正弦之比仅仅取决于波在两种介质中的速度之比,与入射角无关.但是波动说得出的速度比与微粒说得出的速度比是相反的.根据(1.2)式,光在光疏介质中的速度大于光密介质中的速度,例如光在空气中的速度大于光在水中的速度.当时两种学说争论得颇为激烈,在那个年代还不可能作出实验判决谁是谁非.由于牛顿的权威,光的微粒说颇占优势,占据着统治地位.

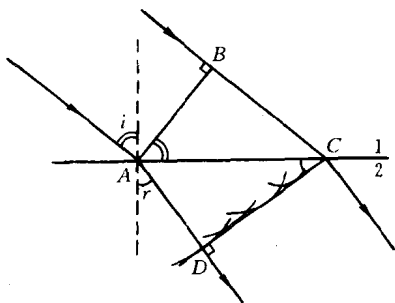


图 1-4 波动说对折射定律的说明

● 波动说的决定性胜利

1801 年医生出身的英国物理学家杨氏(T. Young)发展了惠更

① 考虑光由真空射向某种介质,光在真空中的传播速度 $v_1 = c$,光在介质中的传播速度 $v_2 = v$,由此, $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v}$,而折射的实验定律 $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, n 为介质的折射率,因此 $\frac{c}{v} = n$ 或 $v = \frac{c}{n}$. 这是介质中光速与真空中光速的基本关系.

斯的波动学说,他做了一个著名的光的双缝实验,并且用他提出的干涉原理很好地说明了双缝干涉实验中观察到的强度周期性分布,为光的波动说的发展奠定了基础. 1818 年法国的菲涅耳(A. J. Fresnel)将杨氏的干涉原理和惠更斯原理结合起来,提出惠更斯-菲涅耳原理,完满地解释了早在 1665 年发现而微粒说一直无法说明的光的衍射现象,光的波动说从此蓬勃地发展起来. 1850 年法国物理学家傅科(J. B. L. Foucault)实验测得光在水中的传播速度为光在空气中速度的 $3/4$,无可怀疑地支持了光的波动说,这对于微粒说不多的支持者是一个致命的打击.

1865 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立电磁场理论,并得出光是电磁横波,为光的波动说建立起更为坚实的理论基础.

● 光学的现代发展

19 世纪末发现了一些光的波动说不能说明的现象,如黑体辐射现象和光电效应等,人们在解释这些光和物质相互作用的现象时,认识到必须认为光具有粒子性,1900 年普朗克提出辐射的量子论,1905 年爱因斯坦则进一步提出光是由光子组成的. 因此,光是既具有波动性又具有粒子性的客体,即光具有波粒二象性. 光的粒子性决不是牛顿时代的微粒,而是遵从崭新量子规律的粒子,这一崭新的量子规律正是在对于光和原子现象的研究中逐渐认识到的. 另一方面,利用光现象探测地球绝对运动的失败引导狭义相对论的诞生,从而现代物理学中两个最重要的基础理论——量子力学和狭义相对论,都是在人类关于光的研究中诞生和发展的. 现代物理的发展反过来又推动光学的进展,1960 年发明的激光器就是量子理论下的产物. 激光具有极好的单色性、相干性、高亮度和良好的方向性,广开现代光学许多崭新研究领域,如傅里叶光学、全息术、非线性光学、光纤光学、集成光学等,推动现代科学技术迅猛发展.

本教程的光学部分主要介绍波动光学方面的内容,有关光的粒子性方面的内容则放在近代物理的量子物理部分,结合量子概念的诞生予以介绍.

为了适应讨论波动光学和近代物理的需要,下面对以前学过关于光和波动的知识作简要的回顾.

1.2 波动的数学描述

- 光波的波长和光强
- 波动的复数表示
- 简谐波的数学表达式
- 光波的波长和光强

麦克斯韦电磁理论的重要成果是存在电磁波,而且光是电磁波.光与无线电波、微波、X射线、 γ 射线等其他电磁波无本质的不同,只是它们的波长范围不同.通常的可见光是指能引起人眼视觉反应的那部分电磁波,它在整个电磁波频谱范围中只占极窄的部分.在此间隔内不同波长(频率)的光波引起人眼的不同色觉.下表列出各种色光的大致波长范围和频率范围.

表 1.1 各种色光的波长范围和频率范围

色 光	波长范围/nm	频率范围/ $\times 10^{14}$ Hz
红色光	640~750	4.69~4.00
橙色光	600~640	5.00~4.69
黄色光	550~600	5.45~5.00
绿色光	500~550	6.00~5.45
青色光	480~500	6.25~6.00
蓝色光	450~480	6.67~6.25
紫色光	400~450	7.50~6.67

电磁波在介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r}},$$

式中 ϵ_0 是真空介电常数, μ_0 是真空磁导率, ϵ_r 是介质的相对介电常数, μ_r 是介质的相对磁导率. 对于真空, $\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, 光在真空中的速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s},$$