



面向21世纪课程教材

基 / 础 / 物 / 理 / 教 / 程

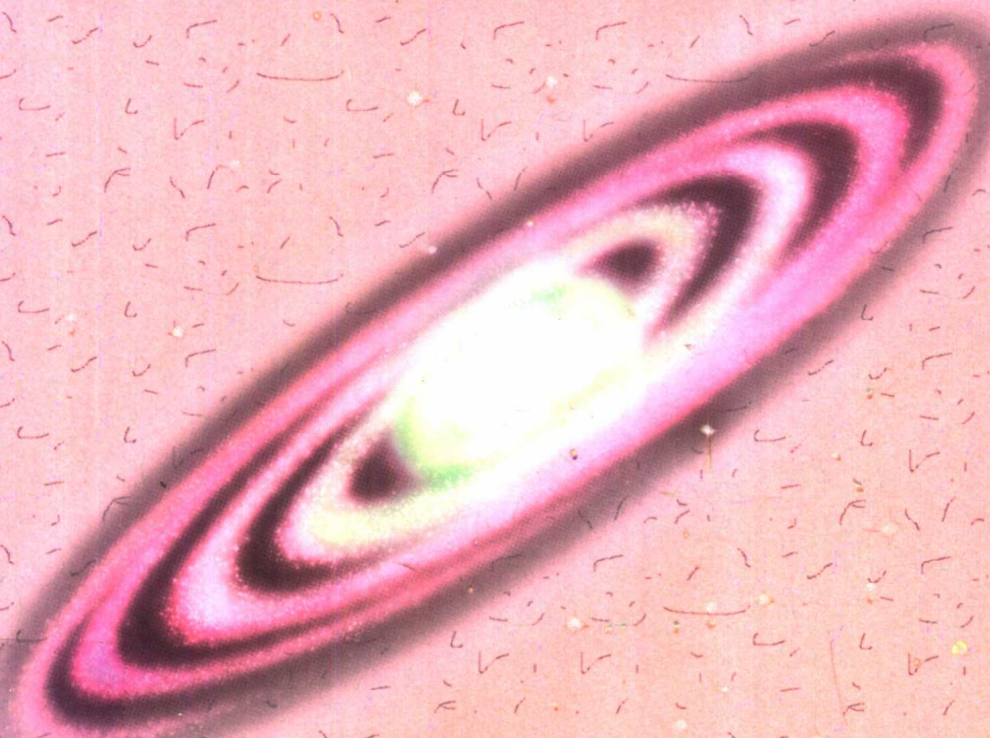
GUANG

XUE

光

学

王 楚 汤俊雄 编



北京大学出版社

PEKING
UNIVERSITY
PRESS

图书在版编目(CIP)数据

光学/王楚,汤俊雄编著. —北京:北京大学出版社,2001.7
基础物理教程. 面向 21 世纪课程教材
ISBN 7-301-04592-1/O · 476

I. 光… II. ①王…②汤… III. 光学-高等学校-教材
IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 036041 号

书 名: 光学

著作责任者: 王 楚 汤俊雄

责任编辑: 李采华

标准书号: ISBN 7-301-04592-1/O · 476

出 版 者: 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/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑部 62752021

电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 北京因温特有限公司

印 刷 者: 北京大学印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787×1092 18 开本 20.125 印张 346 千字

2001 年 7 月第一版 2001 年 7 月第一次印刷

定 价: 28.2 元

内 容 提 要

本书是依据北京大学电子学系多年教学改革的积累编写的.从现代科技观点来看,光波已成为电子学的一个实用波段,放大、振荡、混频、调制与解调等光电子技术已日趋成熟.在此意义上,光学应体现基础课中的宏观波动学.《光学》应是《电磁学》的延续,也是“波动学”的基础.但光波与声波及人工装置辐射的电磁波比较,在偏振态及相干性等方面,有自己显著的特点.基于上述认识,本书以电磁波(矢量波)为起点,讨论干涉和衍射现象,说明了波源的近场和远场的关系,并在例题和习题中,涉及基本的波导元件和几种类型的天线、天线阵,其目的在于引导读者进一步理解各种波段波动的共性.

为适应“应用光学”的发展,本书对光电子学作入门性介绍.为此定性地介绍了光学非线性效应,用宏观的反馈原理解释激光之产生,由薄膜内的多光束干涉说明光纤中光波的模式.为了使几何光学与当前应用技术贴近,本书以费马原理为起点,介绍二次曲面反射镜和透镜.光学图像信息处理技术是当前的一个热点,本书编写一章供学生阅读.

本书可作为综合大学理工科的基础物理教材,也可作为其他高等院校和中学物理教师的教学或自学参考读物.

《基础物理教程》总序

物理学是其他各自然学科和技术学科的基础,在过去几十年中物理学日益成为新技术的一个重要的支柱,因而《基础物理》已成为大学理、工、农、医各专业重要的基础课,而且各国的高等学校都为改进物理教学作了长期的探索.新技术的飞速发展,要求学生较全面地掌握物理学的基本知识,并在思维方法方面得到锻炼,从而能适应他们一生在事业中将遇到的不断变化和发展的情况.然而,要把近代物理学的成就和应用,组织成基础课的教学体系,并不单纯是材料的取舍和拼接,而是一个知识再加工的研究课题,需要经过长期持之以恒的研究和实践,才可能逐步有所改进.课程改革是一个永无止境的难题.

在写这套书时,我们着重考虑了以下三个问题:

1. 按基本原理组织内容,适当调整某些素材的区划范围

对于教学改革的一个共识是如何精选内容,使教材不至过分庞杂.经过考虑,我们认为宜以物理学的基本概念与基本规律为主题,并应联系现代的应用实例.由于物理学的基本规律具有普遍性,所以在论述上和素材的选取上与传统的区划范围可以有所不同.例如,在力学中可以涉及洛伦兹力;在分子运动论中可以讨论带电粒子的随机运动.这样做有助于阐明基本规律的意义,并使线索更加明晰.

2. 注重论述的科学性并加强思维能力训练

对于物理课程改革的另一个共识,就是应提高学生的理解能力和理论联系实际的能力.这是又一个难题.我们认为在过去的教材中,某些命题的论述欠深入;对实际应用的介绍未能着重于体现基本原理,而是较多地描述具体的技术过程;习题偏重于“代公式型”或“技巧型”.这些急于求成的做法,往往使学生不自觉地养成注重记忆结论、但是忽视理解和思考的习惯.在这套书中,我们力图使论述比较深入,体现物理学的思辨,用基本原理来概括各种可能的应用.我们认为习题是课程教学的一个重要环节,习题能引导学生运用基本原理分析和解决实际问题.这套书中除习题外,每一章还编入能引导学生深入思考的思考题.

习题和思考题数量较多,不可能要求学生全做.有些习题涉及较深入的课题,可作为课堂讨论或课外研究的命题.学生即使不做,只要看一遍

并略加思索,作为自我检查的“镜子”也是有益的。

3. 《基础物理》是供学生反复阅读的书

物理课的教学环节,包括讲授、实验、自习、习题、复习考试等。许多教学组织者,常希望教师能把学生“讲明白”,但往往是事与愿违。困难在于任何课程和教材,都只能按“直线式”的顺序来安排内容。但在一门课中介绍的概念或规律,又必须综合其他课程的内容才能理解。真正的理解和消化有赖于学生的反复钻研。我们不希望这套书,是一套学生在考试后可永不再翻阅的书。因此,书中的材料可能比授课时的教学要求高一些,有些论点也比教学基本要求深入一些。总之,对大学的主要课程,学生不能只学教师的讲稿内容,也不宜只看一本教材。学生应通过对几本教材的比较,通过自己的研究,才能做到逐步消化和理解。

本书是参照理工科大学的教学基本要求编写的,但又不局限于此。希望对学生的钻研和进取,有一定的引导作用。为了便于使用,本书将有关内容分为若干层次。打“*”号的章节可有选择地讲授或不讲;有些为扩展知识面的或常识性的材料则写在附录中。

《基础物理教程》包括《力学》、《电磁学》、《光学》、《热学》、《原子物理》五本书。本书所需的数学知识是矢量代数、空间解析几何及简单的微积分运算,这些都是中学毕业生可以掌握的知识。鉴于当前一些中学的教学受“应试教育”的影响,不少中学生未能系统地掌握应具备的知识,尤其缺乏思辨能力和通过自学进取的意识。为弥补中学生数学知识的不足,作者还编写了《基础物理中的数学方法》,这本书可作为大学一年级学生的参考书。

《基础物理教程》是作者长期从事教学研究和实践的总结,也是一次教学改革试验。作者欢迎广大教师和读者提出自己的见解、指出本书的缺点和错误,以期进一步改进。

王 楚

序

本书是按理工科大学生,《基础物理》教学要求编写的教学用书. 学生在阅读这本书时,应已学过《力学》、《电磁学》和《微积分》,对波动及波动传播的实验定律有所了解. 本书是《电磁学》的继续,其特点是把光学的规律与电磁波的辐射与传播联系起来,为进一步学习后续课提供基础与命题. 从某种意义上说,本书是以光波为主题的波动学.

通常《光学》包括几何光学和波动光学两大部分,有的也介绍发光的物理机制与光谱学. 我们把发光的物理机制与光谱学划到《原子物理》中. 光学是现代最活跃的科学技术领域之一,并正在向新的应用方向发展. 为使掌握光学的基本理论的内涵,了解其应用的潜力,本书侧重于波动光学,并注意与现代的应用技术结合. 为了不使篇幅过大,本书不求面面俱到,但书中也有一些供学生阅读的材料. 下面扼要地介绍本书的结构.

为使学生对光学的梗概有所了解,并做好课前的准备,我们写了“绪论”这一章. 学生应在课前阅读它,并对先导课中的有关知识作一次整理和回顾. 绪论中还介绍了与人的视觉特性有关的光度学的单位,但只作为给学生阅读的材料,与本书的正文无关.

第一章以麦克斯韦的电磁理论为基础,讨论光波(电磁波)的传播规律,是《电磁学》的续篇. 对于学过麦克斯韦理论的学生,前半章只是复习. 这一章的核心在于提出了三个基本概念:

(1) 光波(电磁波)具有时空对称性,例如有时间周期必对应空间周期(波长);有时域角频率必对应空间角频率等;

(2) 光波(电磁波)是有偏振态的横波,是矢量波. 因此,它有与由早期的波动理论提出的模型不完全相符的特点;

(3) 表面波(隐失波)的概念.

这三个基本概念将贯穿全书,并将在后几章中作进一步的论述.

波动的干涉是光学的一个主题,也是许多应用技术的出发点. 第二章由电磁波的基本干涉现象出发,介绍干涉的基本概念与分析方法. 在§ 2.1和§ 2.2中,着重说明干涉的效果是形成场能的群聚及驻波与行波的差异;§ 2.3讨论由随机跃迁的原子系辐射的光波产生的干涉现象,提出“光的相关性”这一基本概念;§ 2.4和§ 2.5介绍两种基本的干涉测量

技术,说明可以通过干涉把调相信号变为调幅信号.在这一章的思考题中,已开始把光波技术与无线电波控制技术联系起来.这是学生在学习《光学》时应注意的问题.

第三章研究连续分布的波源的干涉——衍射,是第二章的续篇.在§ 3.1至§ 3.3,介绍以惠更斯-菲涅耳原理为依据的分析方法,希望学生对衍射现象有直观的了解. § 3.4则按现代的概念,把夫琅禾费衍射用光的空间频谱来说明.这是又一个贯穿全书的基本概念,其意义将通过光波元(器)件和光信息处理显示出来.在学这一节时,学生最好学过“傅氏变换理论”(数学),并能与电信号的频谱分析对比.也可以先粗读一遍,以后再作回顾.把相关的知识联系起来消化,这是大学生应掌握的学习方法. § 3.5和§ 3.6介绍典型的应用技术——光栅与晶体的衍射.希望学生能把光栅与天线阵联系起来,并关注利用衍射的晶体存贮器研究课题的进展.

第四章介绍常用的光波谐振器与光波导(光传输线),它们都是利用多波束干涉效应制成的元件和传输线.希望学生与谐振电路和传输线比较,注意到光波元件除了对时域频率谐振外,还有对二维空间频率的谐振效应,这也是各种波动元件的共性.

前四章介绍光波在各向同性无耗介质中传播的基本规律,侧重于讨论光波与光波的相互作用(干涉).第五章定性地介绍光波与介质相互作用产生的宏观现象.在§ 5.1中由实验现象出发,提出光与介质相互作用的经典模型,说明光在介质中传播伴随着能量形态转换与干涉. § 5.2简单地介绍强光与介质相互作用产生的非线性效应,初步介绍相干光在非线性质介质中的相互作用. § 5.3和§ 5.4是以§ 5.2为基础,介绍散射与激光器之组成.学生应与电子线路对比,初步建立广义的非线性效应的概念,还可以联系§ 3.3,进一步理解介质的衍射.

第六章介绍以晶体为代表的各向异性介质与光波的相互作用以及晶体光学元件.

作者认为几何光学应另设课程,在基础物理中可以不占较大的篇幅.如果学生已具备关于薄透镜的理论与成像公式,就已达到某些专业的基本要求.为适应有较高要求的读者的需要,我们写了以费马原理和空间频谱为起点的第七章——几何光学基础.这一章不一定要讲授,但若学生能认真地阅读,对从事有关的实验技术工作是有益的.

图像信号处理是正在发展中的研究课题,为开阔眼界,我们编写了供学生阅读的第八章——空间频谱处理技术.

如上所述,作者力图按照现代技术科学的发展,重新审视光的内涵及有关的基本理论、基本概念的意义,使《基础物理》中的光学教学符合时代的要求.这本书只是一次尝试,一些论点还值得推敲.

王朝英教授和郑乐民教授细致地审阅了全书,指出了本书的缺点与不足,作者特在此致谢.作者欢迎读者指出本书的不足与错误,以图不断改进.

王 楚 汤俊雄

目 录

绪论	(1)
一、光学简史	(1)
二、准备知识	(4)
2.1 几何光学的基本定律	(4)
2.2 早期的波动说	(6)
2.3 波动方程与波动的能流	(8)
2.4 描述简谐波的参量与平面波	(9)
2.5 波源的近场与远场	(10)
三、光功率与光度学的单位	(11)
3.1 光功率	(11)
3.2 视见函数	(12)
3.3 光度学的单位	(12)
思考题	(14)
习题	(15)
第一章 各向同性线性无耗介质中的光波	(16)
§ 1.1 光波的表示式	(16)
1.1.1 光的波动方程	(16)
1.1.2 平面波与介质的特性阻抗	(17)
1.1.3 球面波	(19)
* 1.1.4 柱面波	(22)
§ 1.2 光波的偏振态	(23)
1.2.1 偏振态的描述	(23)
1.2.2 偏振光的能流	(25)
1.2.3 偏振片	(25)
1.2.4 自然光的偏振态	(26)
* 1.2.5 光子的角动量	(27)
§ 1.3 光在电介质界面上的反射和透射	(28)
1.3.1 电磁场的边界条件	(28)
1.3.2 菲涅耳公式	(30)

1.3.3 斯托克斯关系式	(34)
§ 1.4 电介质界面两侧的能流	(37)
1.4.1 全反射	(37)
1.4.2 隐失波	(39)
* 1.4.3 全反射的振幅反射系数	(42)
* 1.4.4 能流反射率与能流透射率	(43)
§ 1.5 费马原理	(45)
1.5.1 费马原理的表述	(45)
1.5.2 费马原理的波动光学意义	(47)
* 1.5.3 光导纤维简介	(48)
思考题	(50)
习题	(52)
第二章 干涉	(55)
§ 2.1 基本的干涉现象	(55)
2.1.1 波的叠加原理	(55)
2.1.2 行波与驻波	(56)
2.1.3 波矢量相交的平面波的干涉	(57)
2.1.4 不同频率的平面波的干涉——群速度	(60)
§ 2.2 两个点源的干涉	(62)
2.2.1 杨氏实验	(62)
2.2.2 两个点源的光场	(63)
2.2.3 远场的分析方法	(66)
* 2.2.4 波束的空间扫描	(68)
§ 2.3 光的相干性	(68)
2.3.1 相干光的概念	(68)
2.3.2 原子(分子)的辐射	(69)
2.3.3 对杨氏实验的初步分析	(71)
2.3.4 面光源的相干性——空间相干性	(74)
2.3.5 准单色光的相干性——时间相干性	(76)
§ 2.4 薄膜干涉	(79)
2.4.1 引言	(79)
2.4.2 均匀薄膜的等倾条纹	(81)
2.4.3 楔形膜的等厚条纹	(85)
§ 2.5 双光束干涉仪	(87)
2.5.1 迈克耳孙干涉仪	(87)

* 2.5.2 激光干涉仪	(90)
* 2.5.3 激光波长计	(91)
* § 2.6 光拍频	(92)
2.6.1 干涉强度公式推导	(92)
2.6.2 两种干涉现象的差异与联系	(93)
2.6.3 在科学实际问题全面理解和掌握两种干涉	(94)
2.6.4 光拍频原理在现代科技中的应用举例	(95)
思考题	(96)
习题	(98)
第三章 衍射	(102)
§ 3.1 衍射现象与惠更斯-菲涅耳原理	(102)
3.1.1 惠更斯-菲涅耳原理	(102)
3.1.2 半波带法	(103)
* 3.1.3 菲涅耳波带片	(106)
* 3.1.4 巴比涅原理	(107)
§ 3.2 夫琅禾费衍射	(108)
3.2.1 夫琅禾费衍射公式	(108)
3.2.2 相角因子的计算方法	(110)
3.2.3 微缝的衍射	(112)
* 3.2.4 对称振子天线	(114)
§ 3.3 典型的夫琅禾费衍射	(116)
3.3.1 矩形孔的衍射	(116)
3.3.2 单缝的衍射	(117)
3.3.3 圆孔的衍射	(120)
* 3.3.4 圆柱形介质的衍射	(123)
§ 3.4 光源与光波的空间频谱	(124)
3.4.1 对反射定律和折射定律的再认识	(124)
3.4.2 空间频谱的概念	(125)
3.4.3 二维的空间角频率	(128)
§ 3.5 光栅	(130)
3.5.1 透射光栅	(130)
* 3.5.2 光栅的技术指标	(134)
3.5.3 闪耀光栅——反射光栅	(136)
* § 3.6 晶体的衍射	(138)
3.6.1 单晶体的衍射	(138)

3.6.2 德布罗意波的衍射	(140)
· § 3.7 多量子阱光折变器件的衍射	(141)
附录 A 光栅分波器与合波器	(142)
思考题	(142)
习题	(145)
第四章 多波束干涉与谐振腔	(149)
§ 4.1 均匀介质层的多波束干涉	(149)
4.1.1 均匀介质层的反射	(149)
4.1.2 均匀介质层的透射	(151)
* 4.1.3 增透膜与增反膜	(153)
§ 4.2 平面法布里-珀罗干涉仪	(154)
4.2.1 法布里-珀罗谐振腔	(154)
4.2.2 谐振腔的 Q 值	(156)
* 4.2.3 法布里-珀罗标准具	(158)
§ 4.3 球面 F-P 腔——扫描干涉仪	(160)
4.3.1 球面谐振腔的概念	(160)
4.3.2 球面谐振腔中的波束——高斯光束	(161)
4.3.3 扫描干涉仪	(162)
* 4.3.4 球面谐振腔的振动模式	(164)
* 4.3.5 环形谐振腔与 Sagnac 干涉仪	(166)
· § 4.4 光波导的概念	(167)
4.4.1 光波在均匀介质膜中传输	(167)
4.4.2 光波导中的模式与色散	(169)
4.4.3 用于远传的光纤	(171)
附录 B Sagnac 干涉仪	(173)
思考题	(174)
习题	(175)
第五章 光与物质的相互作用	(178)
§ 5.1 介质的吸收与色散	(178)
5.1.1 介质的线性吸收	(178)
5.1.2 色散	(179)
5.1.3 共振吸收	(181)
* 5.1.4 介质中的波速	(184)
§ 5.2 光学非线性效应	(186)

5.2.1	什么是非线性效应	(186)
5.2.2	基本的光学非线性效应	(187)
5.2.3	非线性介质的折射率	(190)
5.2.4	非线性介质的色散	(191)
§ 5.3	光的散射	(193)
5.3.1	散射现象	(193)
5.3.2	瑞利散射与米氏散射	(193)
5.3.3	康普顿散射	(194)
5.3.4	喇曼散射和布里渊散射	(196)
§ 5.4	光放大器与振荡器	(197)
5.4.1	光放大的基本原理	(197)
5.4.2	光振荡器(激光器)之组成	(198)
5.4.3	激光器的振荡条件	(200)
思考题		(201)
习题		(203)
第六章	各向异性介质中的光波	(205)
§ 6.1	双折射	(205)
6.1.1	光学各向异性介质	(205)
6.1.2	晶体的光轴	(206)
6.1.3	光速椭球与主折射率	(207)
6.1.4	双折射的电磁理论	(210)
§ 6.2	两个振动方向垂直的光波的叠加	(212)
§ 6.3	晶体光学元件	(216)
6.3.1	双折射起偏棱镜	(216)
6.3.2	波晶片	(217)
6.3.3	补偿器	(220)
6.3.4	两个垂直振动光波叠加的特点	(220)
§ 6.4	偏振光干涉	(222)
6.4.1	装置与原理	(222)
6.4.2	干涉强度公式	(223)
6.4.3	偏振光干涉仪	(224)
§ 6.5	旋光效应	(225)
6.5.1	晶体的旋光效应	(225)
6.5.2	生物物质的旋光性	(227)
6.5.3	磁致旋光效应——法拉第旋光效应	(228)

* 6.5.4 法拉第原子滤光器简介	(230)
6.5.5 用圆偏振光叠加来剖析旋光	(231)
§ 6.6 场致双折射效应	(231)
6.6.1 电光效应	(231)
* 6.6.2 电光调制器	(233)
* 6.6.3 磁光效应	(235)
附录 C 双光轴晶体	(236)
思考题	(238)
习题	(240)
第七章 几何光学基础——选读之一	(242)
§ 7.1 基本概念	(242)
7.1.1 引言	(242)
7.1.2 描述物像共轭的费马原理	(243)
7.1.3 描述共轭点的坐标轴	(245)
§ 7.2 反射镜	(246)
7.2.1 有一对理想共轭点的反射镜	(246)
7.2.2 傍轴反射镜	(249)
7.2.3 傍轴物点	(250)
§ 7.3 透镜	(252)
7.3.1 透镜的特点与球面透镜	(252)
7.3.2 双曲面和椭球面透镜	(255)
7.3.3 透镜的组合	(257)
* 7.3.4 关于薄透镜	(260)
§ 7.4 助视仪器	(262)
7.4.1 眼睛	(262)
7.4.2 透镜(反射镜)的孔径和数值孔径	(264)
7.4.3 天文望远镜	(266)
7.4.4 显微镜	(268)
* 7.4.5 助视仪器的分辨能力	(270)
§ 7.5 高斯光束的变换	(271)
7.5.1 高斯光束的参量与激光谐振腔	(271)
7.5.2 高斯光束的聚焦与扩束	(273)
7.5.3 高斯光束的准直	(275)
附录 D 像差	(276)
思考题	(282)

习题	(283)
第八章 图像的空间频谱处理技术——选读之二	(286)
§ 8.1 图像的空间滤波	(286)
8.1.1 阿贝成像原理	(286)
8.1.2 空间滤波	(288)
8.1.3 图像处理系统	(290)
§ 8.2 相图像的检测	(291)
8.2.1 何谓相图像	(291)
8.2.2 相衬显微镜	(292)
§ 8.3 全息术	(294)
8.3.1 引言	(294)
8.3.2 全息术的基本原理	(295)
8.3.3 全息术的进展与展望	(298)
思考题	(300)
习题	(300)
结语	(302)

绪 论

一、光学简史

自远古时期起,人们就掌握了某些光学技术.按《周礼·考工记》的记载,周朝时已会用铜锡合金制造取火用的凹镜.宋朝的沈括在《梦溪笔谈》中,详细记载了凹面镜和凸面镜的成像.古埃及也掌握了用铜锡合金制镜的技术.欧几里德(公元前300年)在他的《反射光学》中,已说明了反射定律.到17世纪上半叶,通过大量的实验观测,认识到光是按直线传播的,并建立了反射定律和折射定律,发展了透镜和反射镜的成像理论与设计技术.这个时期的光学叫做“几何光学”.

到17世纪末,已开始研究光的本性.由于光按直线传播,且光的反射和粒子与平面的完全弹性碰撞相似,因而认为光是微粒组成的粒子流.后来观察到光的绕射现象,使粒子说面临困境.1690年,惠更斯提出了光的波动说.这时,牛顿力学才开始建立(1684年),不具备说明波动现象的物理和数学基础,也不能进行精确的实验,光的波动说还不能确立.到19世纪初,托马斯·杨和菲涅耳先后用干涉和衍射实验,证明了光是波动,光的波动说才逐渐确立.当时,猜想光是在一种特殊介质中传播的弹性波,这种介质叫做“以太”.

在19世纪,电磁学正在发展.1845年法拉第发现,在介质上加磁场后,可以改变其中的光的偏振方向.这一发现,启发人们研究光与电磁场的关系.1864年麦克斯韦提出完整的电磁场理论,导出了电磁场的波动方程,说明电磁波的波速与测得的光速相等.人们有理由猜想,光是电磁波.1868年,麦克斯韦发表了《关于光的电磁理论》,论述了光是电磁波.麦克斯韦的理论已被大量实验所证明.

经过精密的测量,现已确认光在真空中的波速为 c :

$$c = 2.997\,458 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1)$$

在建立了光的电磁理论以后,广义的光波就是电磁波.频率为 ν 的简谐电磁波,在真空中的波长为 λ_c :

$$\lambda_c = c/\nu \quad (2)$$

不同频率(波长)的电磁波虽有共同的运动规律,但又有各自的特殊属

性. 通常所说的光波, 是指能被人的视觉感受的电磁波, 其 λ_c 约在 $0.75 \mu\text{m} \sim 0.40 \mu\text{m}$, 又叫做可见光^①.

在 19 世纪, 物理学家系统地观测了光被气体吸收以及气体发光现象. 逐渐发现, 一种气体通过燃烧或放电, 总发射一组有特定波长的光波, 在光谱仪的底片上呈现为离散的线, 叫做光谱线. 通过对光谱的研究, 发现了波长比可见光长的红外线, 和波长比可见光短的紫外线. 到 19 世纪末已认识到, 这些光谱是由原子或分子辐射出来的光波. 物质辐射的谱线与原子和分子的结构有关.

在 19 世纪末, 已系统地观测了固体的辐射. 按照当时的认识, 电磁波是由电磁振子(例如谐振电路)辐射出来的. 可以设想固体是具有一系列不同谐振频率的振子系(谐振腔), 这些振子的热运动产生固体的辐射. 用宏观的振子模型分析固体的热辐射, 可以得到与观测结果相近的结论, 但也有明显的差异. 1900 年, 普朗克(M. Planck)用拟合的方法, 得到与观测结果一致的公式. 为说明这个公式, 普朗克提出: 简谐振子的能量不能连续地变化, 只能是最小能量 $h\nu$ 的整数倍. h 是一个常数, 叫做普朗克常数:

$$h = (6.626\,176 \pm 0.000\,036) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (3)$$

普朗克首次提出了光波能量量子化的概念, 同时也蕴含了一个合理的推论, 即: 光波中的能量是以 $h\nu$ 为单元呈现的, 光与其他物质的相互作用, 犹如粒子碰撞一样. 这一推论实际上是: 认为光不仅呈现波动性, 而且也呈现粒子性, 叫做二象性. 显然, 这种猜想与经典的概念相悖, 必须得到科学实验的验证.

在这期间, 光的电磁说的实验研究, 也得到突破性的进展. 若认为光波是以太中的电磁波, 则光速应与参照系有关. 1888 年迈克耳孙和莫雷, 以地面为参照系用干涉仪测量光速的变化, 没有观测到光速与参照系有关. 以后, 斐索等用其他方法做了实验, 也得到相同的结果. 电磁学内在的矛盾和对光的本性研究, 向经典的概念提出尖锐的挑战, 吸引了大批物理学家去研究. 1905 年, 爱因斯坦提出了光速不变原理和狭义相对论, 否定了以太说, 阐明电磁场是物质, 光波是以光速运动的物质.

爱因斯坦敏锐地认识到, 普朗克的理论是需要用实验验证的重要问

^① 以前只能直接测量光的波长, 因而常以 λ_c 作为描述光的参量. 光的波长曾以 $\text{\AA}$ (埃) 为单位 ($1 \text{\AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$), 现常用 nm 或 μm 作为波长单位. 目前已掌握测量光频的技术, 有时也用频率作为描述光波的参量.