



物 理 专 业 经 典 教 材

# 光 学

(第二版)

母国光 战元龄 编



高等教育出版社  
Higher Education Press



物 理 专 业 经 典 教 材

# 光 学

(第二版)

母国光 战元龄 编



高等教育出版社  
Higher Education Press

## 内容简介

本书是在第一版的基础上修订的。这次修订主要是更新了一些图表和照片,力求反映光学的一些新进展;另外,根据国家最新标准和相关规定,规范了全书的量和单位及名词术语等。本书用三分之一左右的篇幅讲述了关于几何光学的基本原理、光学系统的近轴成像、实际光学系统、有效拦光和像差、光度学基础以及光学仪器的基本原理等。另三分之一多的篇幅讲述了波动光学:包括光的干涉,光的衍射和光的偏振的现象、原理及其在生产、生活及科技中的重要应用,同时侧重介绍了光学系统传递函数的概念、光学系统的分辨率理论、光学信息处理理论、薄膜光学基础、干涉计量学以及相关的仪器原理等。最后一部分系统地讲述了光的速度、光的吸收、色散和散射,光的发射、光谱以及激光原理等光的量子行为和物理现象,并介绍了它们在现代光学及科学技术中的基础性和方兴未艾的发展势头。

本书可以作为高等学校物理类专业以及光电工程专业的光学教材,也可供其他有关人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

光学/母国光. 战元龄编. —2 版. —北京:高等教育出版社,2009.7

ISBN 978-7-04-026648-1

I. 光… II. ①母…②战… III. 光学 IV. O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 085516 号

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
总 机 010-58581000  
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京机工印刷厂

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landrace.com>  
<http://www.landrace.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16  
印 张 30.75  
字 数 570 000

版 次 1978 年 9 月第 1 版  
2009 年 7 月第 2 版  
印 次 2009 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 35.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26648-00 育 登 善 高

Higher Education Press



# 第一版前言

---

这本《光学》是在已出版的《普通物理学(光学部分)》一书的基础上,根据1977年全国理科教材会议精神和苏州物理教材会拟定的教材编写大纲,参考国内外有关资料及我们的实践,重新编写而成的。拟为综合大学、科技大学及师范院校的物理类专业以及工科院校的有关专业,进行基础光学教学提供一本教材或教学参考书,兼充一般科技人员初学光学用的参考书,现在作为引玉之砖与读者见面。

新编的这本《光学》,包括了经典光学和近代光学的主要原理和重要应用,全书共十八章,分三大部分:第二章到第六章是第一部分,主要讲几何光学;第七章到第十四章是第二部分,主要讲波动光学;第十五章到第十八章是第三部分,主要讲量子光学。此外,在第一章介绍了光学的发展简史和我国光学的今昔概况,以使读者对光学有一概括性的了解,自觉地运用辩证唯物主义观点来认识事物和增加攀登科学高峰的勇气和信心。

本书注重基本原理和对物理现象、实验的阐述,同时也企图使其具有如下特点:

1. 为适应基础课教学的特点,我们努力从物理实验和现象出发来逐步地引入物理概念和原理,并将难点分散开,而不过分追求纯理论体系的完美;对纯属抽象的重要原理也不回避解析上的处理。我们希望这样会有利于读者循着由浅入深、由感性到理性的路前进。

2. 近十几年来,光学有很大的发展。激光科学已经成为现代科学技术的最活跃的领域,为光学开拓了一个新纪元;一系列新兴的学科分支如信息光学、薄膜光学、纤维光学、干涉计量学、矩阵光学以及量子电子学等大大地丰富了光学的内容。我们在精选经典光学的系统理论的同时,尽最大努力反映这些现代光学的主要原理、概念和应用,并力求将经典与现代衔接起来。

3. 由于光学是研究光的基本性质和规律的基础科学,同时又是与现代科学技术以及现代工程有紧密联系的一门学科,所以光学教材更有条件把理论和实际很好地结合起来,在本书的大部分重要章节里,我们都介绍了实际的应用,个别内容还是相当具体的。

4. 为了弥补目前一般学校尚不能做很多的演示实验,书中除绘制了许多图

表外,还选用了比较多的科学照片,有些照片还反映了我国的光学成果。这样可以帮助自学,加深印象以及对基本原理有进一步的了解。

5. 书中选编了许多习题并附答案,在几何光学部分还于正文中列了一些经过筛选的例题。这对教学是会有益处的。

此外,我们在编写本书时,虽然主要考虑的是如何符合课程的要求,但是也想给一般物理专业的学生提供一本能有助于日后工作的参考书,使他们日后遇到一般光学问题时,能从该书了解到有些什么解决方法。

根据以上诸点,本书在内容上比一般规定学时(例如70学时)所要求的多些。不过,由于本书在章节的安排上考虑到了少讲或不讲某些内容而不影响课程的系统性问题,所以多些也可能无碍于使用。根据本书审稿会上各校代表的意见,我们将内容分为必讲部分和参考部分,凡参考内容在目录上均标以\*号。这样安排仅供任课教师参考。我们深信在各校稍有不同的教学计划下,每位教师根据自己的经验和所在学校的特点必能比我们考虑得更周到。

本书是在很短的时间内匆促完成的,并且由于我们的学识浅薄和缺少经验,所以书中一定有很多缺点、遗漏甚至错误。总之,这是一块引玉之砖,我们诚恳地希望读者不吝指出,以便有机会改正。

倘若这本书能对读者有所帮助的话,则应归功于教育、培养和领导我们的党。如果不是在党的领导下进行多年的教学 and 实际工作,从而得到锻炼,则完成这样的编写任务是不可能的。

本书的编写工作是这样完成的:母国光重编第一、二、三、四、五、六、九、十、十四和第十八章,增写了第十一章;战元龄修改并补充了第七、八、十二和第十三章;沈寿春教授重编第十五、十六章,增写了第十七章并校阅全书。

书中新增的科学照片是李玺英同志精心复制的;中国科学院上海光机所、西安光机所、紫金山天文台和上海光学仪器厂等单位为本书提供了宝贵的照片;周维新同志绘制了本书新增部分的大部分图表。编者谨向这些单位和个人致敬并表示衷心地感谢。

中国科学院严济慈副院长,西安光机所龚祖同所长,北京大学物理系沈克琦教授、赵凯华教授均百忙中拨冗亲自参加并主持本书的审稿会,为提高本书的思想性和科学性作出了宝贵的贡献;参加审稿会的北京大学(主审)、南京大学、中国科技大学、四川大学、浙江大学、复旦大学、吉林大学、西北大学、中山大学、厦门大学、郑州大学、北京师范大学、江苏师范学院和北京师范学院等校的老师,对本书提出了许多很好的意见。编者在此一并致敬和感谢。

编者 母国光 战元龄

1978年8月2日于南开

# 目 录

---

* 第一章 绪论 .....	1
* § 1-1 光学的发展简史 .....	1
* § 1-2 我国的光学简况 .....	8
第二章 几何光学的基本原理 .....	10
§ 2-1 几何光学的基本定律 .....	10
* § 2-2 费马原理 .....	11
§ 2-3 发光点 光束 实像 虚像 .....	14
习题 .....	16
第三章 光学系统的近轴成像 .....	18
§ 3-1 光在平面上的反射和折射 .....	18
* § 3-2 光在棱镜主截面内的折射 色散棱镜 .....	27
§ 3-3 光在单球面上的折射和反射 .....	29
§ 3-4 元光束经单球面折射后的空间成像 .....	36
§ 3-5 共轴球面系统及其基点 .....	40
§ 3-6 共轴球面系统的组合 .....	46
§ 3-7 厚透镜 .....	47
§ 3-8 薄透镜及薄透镜组 .....	50
* § 3-9 近轴光学中的矩阵方法 .....	55
习题 .....	61
第四章 实际光学系统的拦光和像差 .....	65
§ 4-1 光阑 .....	65
§ 4-2 像差概述 .....	70
* § 4-3 球差 .....	71
* § 4-4 彗差 .....	75

* § 4-5	像散和像场弯曲 .....	77
* § 4-6	畸变 .....	79
* § 4-7	色差及其校正方法 .....	81
* § 4-8	校正像差与光学玻璃 .....	85
	习题 .....	87
<b>第五章</b>	<b>光度学基础 .....</b>	<b>88</b>
§ 5-1	光度学的定义和基本概念 .....	88
§ 5-2	发光强度 光出射度和光照度 .....	92
§ 5-3	光亮度 .....	96
* § 5-4	光度学的计量单位 .....	98
* § 5-5	通过光学系统的光通量 像的光亮度和光照度 .....	103
* § 5-6	主观亮度 .....	106
	习题 .....	107
<b>第六章</b>	<b>光学仪器原理 .....</b>	<b>109</b>
* § 6-1	概述 .....	109
§ 6-2	眼睛 .....	110
§ 6-3	放大镜 目镜 显微镜 .....	116
§ 6-4	望远镜 .....	123
§ 6-5	照相机和幻灯机 .....	128
* § 6-6	变焦距物镜 .....	131
* § 6-7	棱镜光谱仪 .....	134
	习题 .....	136
<b>第七章</b>	<b>光的干涉 .....</b>	<b>138</b>
§ 7-1	波动光学和光波 .....	138
§ 7-2	光波的叠加 .....	142
§ 7-3	光的干涉现象及相干条件 .....	145
§ 7-4	由分波阵面法产生的光的干涉 .....	147
§ 7-5	由分振幅法产生的光的干涉 .....	154
§ 7-6	多光束干涉 .....	161
	习题 .....	164
<b>第八章</b>	<b>干涉现象的应用及干涉仪 .....</b>	<b>166</b>
§ 8-1	等厚干涉的应用 .....	166

* § 8-2	牛顿环 .....	169
§ 8-3	迈克耳孙干涉仪 .....	172
* § 8-4	泰曼干涉仪 .....	176
§ 8-5	傅里叶干涉分光计 .....	177
* § 8-6	马赫-曾特尔干涉仪 .....	180
§ 8-7	法布里-珀罗干涉仪 .....	182
* § 8-8	激光干涉仪 .....	187
* § 8-9	波面剪切干涉术 .....	190
	习题 .....	192
<b>第九章 光的衍射 .....</b>		<b>194</b>
§ 9-1	概述 惠更斯-菲涅耳原理 .....	194
§ 9-2	菲涅耳圆孔衍射 .....	196
* § 9-3	菲涅耳圆盘衍射 .....	203
* § 9-4	菲涅耳直边衍射 .....	206
* § 9-5	菲涅耳单狭缝衍射 .....	212
§ 9-6	夫琅禾费单狭缝衍射 .....	214
§ 9-7	夫琅禾费圆孔衍射 .....	218
	习题 .....	222
<b>第十章 光学系统的分辨本领和衍射光栅 .....</b>		<b>224</b>
§ 10-1	光学系统的分辨本领 瑞利判据 .....	224
§ 10-2	眼睛、望远镜和照相物镜的分辨本领 .....	226
§ 10-3	显微镜的分辨本领 电子显微镜 .....	229
* § 10-4	棱镜光谱仪的分辨本领 .....	231
§ 10-5	夫琅禾费双狭缝衍射 .....	233
* § 10-6	衍射光栅 .....	237
§ 10-7	晶体的 X 射线衍射 .....	254
§ 10-8	莫阿条纹 .....	257
	习题 .....	258
<b>第十一章 信息光学概要 .....</b>		<b>260</b>
* § 11-1	光学传递函数 .....	261
§ 11-2	阿贝成像理论及其实验 .....	271
* § 11-3	相干光学处理系统 .....	276



* § 11 - 4 光学信息处理举例 .....	277
§ 11 - 5 全息照相 .....	288
习题 .....	297
<b>第十二章 光在介质及其薄膜中的传播 .....</b>	<b>299</b>
* § 12 - 1 光的电磁理论 .....	299
§ 12 - 2 偏振光与自然光 .....	302
§ 12 - 3 光在两种透明介质分界面上的折射和反射 .....	304
§ 12 - 4 单层薄膜的光学特性 .....	312
* § 12 - 5 双层增透膜 .....	317
* § 12 - 6 多层高反射膜 .....	320
* § 12 - 7 干涉滤光片 .....	322
习题 .....	324
<b>第十三章 光在各向异性介质中的传播 .....</b>	<b>326</b>
§ 13 - 1 双折射 .....	326
§ 13 - 2 单轴晶体内的波面 平面波在单轴晶体内的传播 .....	329
* § 13 - 3 双轴晶体内的波面 .....	333
§ 13 - 4 折射率椭球 .....	336
§ 13 - 5 由双折射产生偏振光的仪器 .....	337
§ 13 - 6 椭圆偏振光和圆偏振光 波片 .....	340
§ 13 - 7 偏振光的干涉 .....	344
§ 13 - 8 偏振光振动面的旋转 旋光性 .....	347
* § 13 - 9 外力作用下产生的各向异性 .....	351
习题 .....	356
<b>第十四章 光的速度 .....</b>	<b>358</b>
§ 14 - 1 概述 .....	358
§ 14 - 2 测定光速的天文学方法 .....	359
§ 14 - 3 测定光速的实验室方法 .....	362
§ 14 - 4 光在介质中的速度 相速和群速 .....	367
* § 14 - 5 运动介质中的光速 .....	370
* § 14 - 6 狭义相对论的概念 .....	374
* § 14 - 7 由狭义相对论得出的一些推论 .....	377
* § 14 - 8 运动坐标系统中的光学与狭义相对论 .....	379

---

习题 .....	384
<b>第十五章 光的吸收、色散和散射 .....</b>	<b>385</b>
§ 15-1 光的吸收 .....	385
* § 15-2 吸收光谱 .....	386
§ 15-3 光的色散 .....	389
§ 15-4 反常色散 .....	391
* § 15-5 吸收和色散的经典理论 .....	393
§ 15-6 光的散射 .....	396
* § 15-7 散射光的偏振 .....	398
§ 15-8 拉曼散射 .....	401
习题 .....	403
<b>第十六章 光的发射 .....</b>	<b>405</b>
§ 16-1 两种不同形式的光的发射 .....	405
§ 16-2 热辐射和基尔霍夫定律 .....	406
§ 16-3 黑体 .....	407
§ 16-4 黑体辐射定律和普朗克公式 .....	409
* § 16-5 光测高温学 .....	413
§ 16-6 线光谱 氢原子光谱 .....	418
* § 16-7 带光谱 .....	423
* § 16-8 光源 .....	424
习题 .....	431
<b>第十七章 激光 .....</b>	<b>433</b>
§ 17-1 激光原理 .....	433
* § 17-2 红宝石激光器 .....	435
§ 17-3 氦氖激光器 .....	436
§ 17-4 纵模 横模 .....	438
* § 17-5 氮分子激光器 .....	439
* § 17-6 可调谐染料激光器 .....	442
* § 17-7 其他激光器 .....	443
§ 17-8 激光的重要应用 .....	444
习题 .....	447

第十八章 光子 光的二象性 .....	449
§ 18-1 光电效应 .....	449
§ 18-2 爱因斯坦公式和密立根实验 .....	451
§ 18-3 康普顿效应 .....	453
* § 18-4 光压 .....	456
* § 18-5 微弱光流的量子起伏——瓦维洛夫实验 .....	457
§ 18-6 光的二象性 粒子的二象性 .....	459
习题 .....	465
附录 .....	467
一、基本物理常量表 .....	467
二、角度换算表 .....	467
三、一些常用波长 .....	468
四、各种物质的折射率 .....	469
五、光度学单位换算表 .....	472
部分习题答案 .....	474

## \* 第一章

---

# 绪 论

### \* § 1-1 光学的发展简史

如同几何学、天文学和力学一样,光学是一门有悠久历史的学科,它包含着人类自古以来对光的研究的丰硕果实,它的发展史典型而又鲜明地反映着人类认识客观世界逐渐接近真理的过程.

人类对光的研究,最初主要是试图回答像“人为什么能看见周围物体”的这一类问题.现在一般书上,多以古希腊欧几里得(Euclid,公元前323—前285)对这一问题的回答作为世界光学知识的最早记录.在欧几里得的书中写道:“我们假想光是以直线传播的,在线与线间还留出一些空隙来,光线自物体到人眼成为一锥体,锥顶在人眼,锥底在物体,只有被光线碰上的东西,才被我们看见,没有碰上的东西就看不见了”.这种描述,一方面反映了当时人们对光的直线传播性的正确认识,但也同时反映了对光的错误认识——从人眼向被看见的物体伸展着某种触须似的东西.显然,把这样的陈述作为光学的最早记录是欠妥当的.事实上,在比欧几里得的书早约百年的我国《墨经》(先秦时代,约在公元前468—前382年)上,对光的几何性质已有了较完全的记载.

《墨经》中有八条是关于光学方面的<sup>①</sup>,第一条是叙述影的定义与生成;第二条说明光与影的关系;第三条则畅言光进行的直线性,并且用针孔成像的实验来说明它;第四条说明光有反射的性能;第五条论光和光源的关系而定影的大小;第六、七和八条分别叙述了在平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和像的关系.文虽前后八条,寥寥数百字,但却毫无臆测之语,以严谨的文字表述了几何光学的基础.所以无论就时间的先后还是就科学性来说,《墨经》都称得上是世界光学知识的最早记录.只要比较一下《墨经》和欧几里得书对光的直线传播的记载,即可相信这一点.

---

<sup>①</sup> 钱临照.物理通报.1951,1(3).

《墨经》的梁本第二十条,《经》云:“景倒,在午有端。”《经说》云:“景,光之人,煦若射;下者之人也高,高者之人也下。足蔽下光,故成景于上,首蔽上光,故成景于下。”这段文字是以描写一个针孔成像实验来说明光的直线进行。它的意思是:“光向人照去,好像射箭一样,从下面照去的到高处去了,从高处照去的到下面去了。足遮住了下面的光线所以成影在上面,头遮住了上面的光所以成影在下面。”午,是一纵一横相交之点,可作小孔照相匣上的小孔讲;端,就是光线经小孔所成的光束。所以“景倒,在午有端”,就是自人发出的光线交于针孔而成光束,足蔽下光成景于上,首蔽上光成景于下,故得头在下,足在上的倒像。这里毫无主观臆测,完全是由观察得到的结果,所以可以肯定,关于光的直线传播的伟大发现,《墨经》上所说的要比欧几里得的既早又好。

自墨子开始,在有关光的科学存在的两千多年的历史中,经过了公元1100年阿拉伯人阿尔-海兹恩(Al-hazen)发明第一个透镜,公元1590年琼森(Jonsen)和李普塞(Lippershey)发明第一架望远镜和17世纪初冯特纳(Fontana)发明第一架显微镜,一直到17世纪上半叶才由斯涅耳(Snell)和笛卡儿(Descarte)将对于光的反射和折射的观察结果,归结为今天所用的反射定律和折射定律。约在他们的同时,费马(Fermat)又得到了确定光在介质中传播所走路径的光程极值的原理,这原理可以包括反射定律和折射定律。

换言之,经过漫长的时期,到17世纪上半叶,才弄清楚光的几何性质,而其余的一切,甚至关于视觉中的两个基本特征——亮度和颜色的观念还很模糊。

到了17世纪后半叶,牛顿(Isaac Newton)和惠更斯(Christian Huggens)等对光的研究才真正地把光学引上了发展的道路。

1665年牛顿进行太阳光的实验。在这实验中,太阳光通过窗板上的小圆孔照射在玻璃三棱镜上,光束在棱镜中折射后,投射在光屏上形成一个颜色按一定顺序排列的长条像,牛顿称它为光谱。这个现象在牛顿之前已有人知道,并且有这样的解释:玻璃会影响太阳光使它形成彩色。但牛顿从他自己的实验确定了这一解释是不正确的。他认为白光(太阳光)是复杂的,是无数种不同的光线的混合,各种光线在玻璃中受到不同程度的折射。棱镜没有改变白光而只是把它分解成简单的组成部分,把这许多组成部分混合起来能重新恢复最初的白色。在实验中还看到,把从第一棱镜中分出的某种颜色(例如黄色)的光从光谱中分离出来,令它再通过第二棱镜,结果没有新的成分。因此,在第一次棱镜分解中,事实上是分出了某种不变的东西。但彩色本身并没有说明光的性质,它是一个靠视觉得到的印象。例如,倘若我们把单纯的红色和绿色混合起来,也能得到太阳光中的黄色。而单纯颜色光在空间上的分离却是与光的本性联系着的,它使人们第一次接触到光的客观和定量的特征,因为这种特征可根据棱镜折射率和棱镜形状算出。换言之,牛顿的太阳光实验,使颜色学说脱离了主观印象而走上与客观量

相联系的科学的发展道路。

牛顿还发现了另一惊人的现象：把曲率半径很大（几米）的凸透镜放在平玻璃板上，当用白光照射它时，则见在透镜与玻璃板接触点处出现一组彩色的同心环，当用单纯的某一种色光（如红色）照射时，则见在接触点处出现一组明暗（如红与黑）相间的同心环，均匀的照射却得到了不均匀的光强分布！这种环称为牛顿环。在这实验中，每一单纯的光与牛顿环的第一黑环所在处的透镜与玻璃板之间的空气厚度联系着，不同的单色光所对应的这种空气厚度不同。所以单色光可以定量地用第一空气隙的厚度来表征。

牛顿在发现这些重要现象的同时，根据光的直线传播性，认为光是一种微粒流，微粒从光源飞出来，在均匀物质内以力学定律作等速直线运动，并且以这种观点对折射和反射定律作了解释。微粒流学说很自然地解释了光的直线传播性，然而在解释牛顿环现象时，却遇到了困难，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”。

惠更斯是光的微粒说的反对者，他创立波动说，在 1690 年于《论光》一书中写道：“光同声一样，是以球形波面传播的，这种波同把石子投在平静的水面上时所看到的波相似。”他从声现象和光现象的许多类似出发，认为必须把光振动看做是在一种特殊的介质——“以太”中传播的弹性脉动，而这种特殊的介质充满宇宙的全部空间。然而惠更斯的关于光波的概念是很不完全的，例如，他始终没有提到光波在空间上的周期性，在《论光》中他甚至写道：“……不需要认为光波是以相同的间隔一个跟着一个。”惠更斯也没有注意到当时已由格利马尔第（F. Grimaldi）和胡克（R. Hooke）指出的光的衍射现象，却认为光通过无论是多小的孔都能是直线传播的，他写道：“这孔永远是足够大，以至于能包含为数很多的小到不可思议的以太微粒”。特别是惠更斯更没有提到牛顿环，而牛顿本人却把这一现象看做是光的周期性的表现。

惠更斯的波动说只是相当粗略地指出光的波动性，这学说最有意义的乃是作为寻求光振动的传播方向的惠更斯原理：光振动所达到的每一点都可视为次波的振动中心，次波的包络面为传播着的波的波阵面（波前）。而牛顿关于光的本性的概念，有许多特点可以在今天的概念中碰到，虽然今天是以完全不同的新观点和新实验为基础的。总之，在光学萌芽的 17 世纪，在微粒说占优势的同时，波动说也是被粗略地提了出来，两种截然不同的学说自产生之日起一方面沿着各自的道路发展，另一方面却互有斗争。

在整个 18 世纪中，光的微粒流理论在光学中仍占优势，但光的波动理论却从没有停止对微粒流理论的斗争。例如欧拉（Leonhard Euler，公元 1746 年）就是捍卫以太的波动理论的，而为微粒说的反对者。

19 世纪初，逐步发展起来的波动光学体系已初步形成，其中以杨氏（Young）

和非涅耳(Fresnel)的著作为代表. 杨氏圆满地解释了“薄膜的颜色”的现象和用双狭缝实验显示了光的干涉现象;菲涅耳认为光振动是一种连续介质——以太的机械弹性振动,他于1835年以杨氏干涉原理补充了惠更斯原理,由此产生了今天为人们所熟知的惠更斯-菲涅耳原理. 用这个原理既能圆满地解释光的直线传播,又能讨论衍射现象,成为波动光学中的重要原理.

通过进一步的研究,观察到了光的偏振和偏振光的干涉,为了解释这些现象,菲涅耳假定光是横波. 看来好像是相当圆满了,因为光的弹性波动理论既能说明光的直线传播,又能解释衍射,而加上横波的限制后又可解释光的偏振现象. 但是,机械的弹性横波只能产生在固体之中,所以不得不把弹性固体的特性强加于以太. 弹性横波在无限大的固体中的传播速度  $v$  同固体的切变模量  $N$  和密度  $\rho$  有下列关系:

$$v = \sqrt{\frac{N}{\rho}}. \quad (1-1)$$

因为以太不妨碍各种物体的运动,所以以太的  $\rho$  必定是非常小的,同时为说明光的巨大的传播速度,又必须给  $N$  以相当大的数值. 为了解释光在各种不同介质中的不同速度,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,还必须给以太以更特殊的性质,才能解释光波中没有纵振动的现象. 这种密度无限小,切变模量远大于钢,并且还有许多附加性质的以太是令人难以想象的. 于是就暴露了光的弹性理论的许多重大困难. 此外,机械的弹性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性质的光学常数和介质的其他参数联系起来. 显然,光的弹性波动理论是人类逐渐认识客观真理过程中具有相对进步的一种理论.

1846年,法拉第(Faraday)发现了光的振动面在磁场中发生旋转,这表示光学现象与磁学现象间存在内在的联系;1856年,韦伯(Weber)发现光在真空中的速度等于电流强度的电磁单位与静电单位的比值,即  $3 \times 10^{10}$  cm/s,这表示光学现象与电学现象有一定的关系. 从这些发现中,人们获得了新的启发,即必须把光学现象和其他物理现象联系起来考虑,而不能孤立地来研究光的本性.

1860年,麦克斯韦(C. Maxwell)的理论研究指出,电场和磁场的改变,不能局限在空间的某一部分,而是以等于电流的电磁单位与静电单位的比值的速度传播着;光的传播就是这样的一种电磁现象. 这个结论在1892年被赫兹(Hertz)的实验证实. 按着麦克斯韦的理论,若以  $c$  代表光在真空中的速度, $v$  代表光在介电常量为  $\epsilon$  和磁导率为  $\mu$  的介质中的速度,则有

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (1-2)$$

因为  $\frac{c}{v} = n$ ——介质的折射率,所以

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (1-3)$$

这个式子给出了物质的光学常量  $n$  与电学常量  $\epsilon$ 、磁学常量  $\mu$  间的关系. 在认识光的本性方面, 麦克斯韦电磁理论较之弹性固体理论向前迈进了一大步.

然而麦克斯韦理论像弹性固体理论一样, 还需要有以太, 只不过是以太的以太代替了机械的以太, 在电磁以太中有位移电流和磁场. 然而, 这样的理论并没有进一步说明以太的性质.

麦克斯韦的理论和赫兹的实验证明了光是电磁波, 于是就有必要研究产生频率高达光的频率的电振子的性质. 另一方面, 从已得到的式(1-3)看不出折射率  $n$  随着光的频率而变, 而实验上已确证,  $n$  随光的频率而变. 这样, 当时就有必要根据物质结构的概念, 研究物质是怎样发光的和物质与光相互作用的各种过程. 到了1896年洛伦兹(H. A. Lorentz)创立了电子论, 他认为原子和分子内含有带负电的电子, 在无外力时电子处于平衡位置; 在外力作用下, 电子作阻尼振动而产生光的辐射. 当光通过介质时, 介质中电子的自然频率与外场的频率相同时, 则受缚电子成为吸收体. 这样, 利用洛伦兹电子论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, 对折射率  $n$  和随光波频率而变的色散现象也得到了较合理的解释. 因为从电子论观点来看, 介电常量  $\epsilon$  是与电场改变的频率有关的物理量. 在洛伦兹的理论中, 以太乃是广袤无限的不动的介质, 其唯一特点是, 在这种介质中光振动具有一定的传播速度.

然而, 对于像炽热的黑体的辐射中能量按波长分布这样重要的问题, 洛伦兹理论还不能给出令人满意的解释. 并且, 如果洛伦兹关于以太的概念是正确的话, 则可将不动的以太选作为参考系, 以使人们能区别出绝对运动. 而事实上, 于1887年迈克耳孙用干涉仪测“以太风”却得了否定结果, 即洛伦兹所设想的以太的存在与迈克耳孙实验结果不符. 这表明即使到了洛伦兹电子论时期, 人们对光的本性的认识也仍然是片面的. 但是与18世纪相比, 却是在新的认识高度上更接近于客观事实了.

1900年, 普朗克(Max Planck)从物质的分子结构理论中借用了不连续性的概念, 提出了辐射的量子论. 他认为各种频率的电磁波, 包括光, 只能以完全一定分量的能量自振子射出, 这种能量微粒称为量子, 光的量子称为光子. 用量子论不但很自然地解释了灼热体辐射能量按波长分布的规律性问题, 并且以全新的方式提出了光与物质相互作用的整个问题, 而如果没有量子论, 要理解这些问题是不可能的. 量子论不但给光学, 而且也给整个物理学提供了新的概念, 故通常把它的诞生视为近代物理学的起点. 1905年, 爱因斯坦将这个在物理学中具有革命意义的量子论用于光电效应之中, 他给光子作了十分明确的表示, 特别是他指出了在光作用于物质时, 光也是以光子为最小单位进行的. 此外, 在19世纪末



和 20 世纪初的许多实验中都确凿地证明了光的量子性. 这样一来, 光的微粒性(量子性)又提到了首位.

1905 年 9 月, 德国《物理学年鉴》(Annalen der Physik)发表了爱因斯坦的一篇文章《关于运动介质的电动力学》, 其中第一次提出了狭义相对论的基本原理. 论文中指出, 从伽利略和牛顿时代以来占统治地位的古典物理学, 其应用范围只限于速度远远比光速小的情况, 而他的新理论可解释与很大运动速度有关的过程的特征, 根本抛弃了以太的概念, 圆满地解释了运动物体的光学现象.

这样, 在 20 世纪初, 一方面从光的干涉、衍射、偏振以及运动物体的光学现象确证了光是电磁波, 而另一方面又从热辐射、光电效应、光压现象以及光的化学作用等无可怀疑地证明了光的量子性——微粒性. 并且, 光的波动理论和光的量子理论各自统治着自己的领域, 波动理论不能解释光的量子行为, 而光的量子理论亦不能说明光的波动现象, 似乎没有方法使两者统一起来. 这种情况与 17 世纪末叶牛顿的光的微粒说同惠更斯的光波动说的对峙相似. 不过, 就对光的本性的认识阶段而言, 光的量子论和光的电磁波理论都是比较地进入了高级阶段, 这种认识虽然仍只具有相对性, 但是它更接近于客观真实了.

将有关光的本性的两个完全不同的概念统一起来, 看来好像是不可能了, 然而解决这一困难的希望却来自意想不到的方面. 原来人们对光的两种概念都是根据对宏观的客观现象的观察得到的, 而当人们想统一这两种概念时也仅限于人们所能“想象”到的和所能“了解”到的. 但是, 为了如实地认识客观世界, 应当用广泛的、活的、正如客观实在那样的、辩证的物质概念来代替形而上学的、机械的物质学说. 从这一观点来看, 光学发展的结果所揭露的, 在光学现象中波动性与量子性之间的“不可克服的”矛盾就是自然辩证法的一种表现, 真实的矛盾统一. 对于宏观世界中连续的波动和不连续的量子, 在经典物理学的简化了的机械概念中, 是互相排斥的, 而在客观实际的自然现象中, 它们是统一的、共处的. 人们所不习惯的这种矛盾的统一, 只不过证明宏观的经典的机械图像有片面性和缺欠. 客观世界的物质比起形而上学的形象来要复杂得没有止境, 形而上学的形象是由于习惯和长时间的经验产生的.

科学的历程证实了这一论断的正确. 七十多年前, 德布罗意 (de Broglie) 大胆地创立了物质波动学说. 他设想每一物质的粒子的运动都和一定的波动相联系. 这一假设被后来许多实验所证明. 例如, 电子束在通过金属薄膜时产生衍射现象, 从而能确定电子束的波长, 令人信服地证明了电子的波动性. 实际上, 具有波动性的不仅仅有电子、质子、原子和分子, 其他物质颗粒也都有与它自己的质量和速度相联系的波动性的特征. 这实际上表示了不仅光有波动性和微粒性, 一切习惯概念上的实物也同样有这两种性质, 它们是客观物质所共有的属性. 在由德布罗意和后来薛定谔 (Schrödinger) 创立的量子力学原理中, 波动性和微粒性