

新概念物理教程

光学

赵凯华



面向21世纪课程教材

新概念物理教程



高等教育出版社

面向 21 世纪课程教材

新概念物理教程

光 学

赵凯华



高等教育出版社

内容简介

《新概念物理教程》是教育部“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材。作为《新概念物理教程》光学卷,与已出版的力学、热学、电磁学、量子物理各卷配套,组成一个完整的基础物理课程教材体系。本卷共分光和光的传播,几何光学成像,干涉,衍射,变换光学与全息照相,偏振,光与物质的相互作用、光的量子性等七章和两个附录。

本书可作为高等学校物理类专业的教材或参考书,特别适合物理学基础人材培养基地选用。对于其他理工科专业,本书也是教师备课时很好的参考书和优秀学生的辅助读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

新概念物理教程. 光学/赵凯华. —北京: 高等教育出版社, 2004. 11
ISBN 7-04-015562-1

I. 新… II. 赵… III. ①物理学-高等学校-教材②力学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 106964 号

策划编辑 庞永江 责任编辑 庞永江
封面设计 张楠 责任印制 杨明

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn

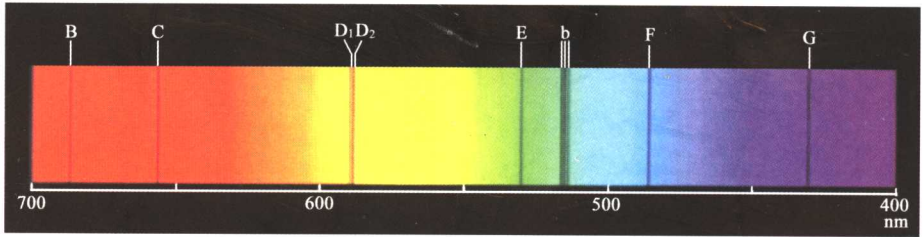
经 销 新华书店北京发行所
印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

开 本	787×960 1/16	版 次	2004 年 11 月第 1 版
印 张	26.5	印 次	2004 年 11 月第 1 次印刷
字 数	460 000	定 价	28.50 元
插 页	1		

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:15562-00



彩图 1 太阳光谱与夫琅禾费线



彩图 2 白光杨氏双缝干涉图样



彩图 3 肥皂膜白光下的等厚干涉图样



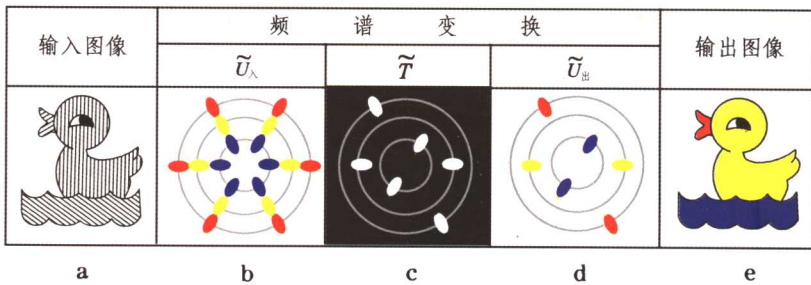
彩图 4 孔雀羽毛的颜色

羽毛在不同方向上显示不同的颜色，因为它的多层结构类似体全息图，可以产生干涉效果。

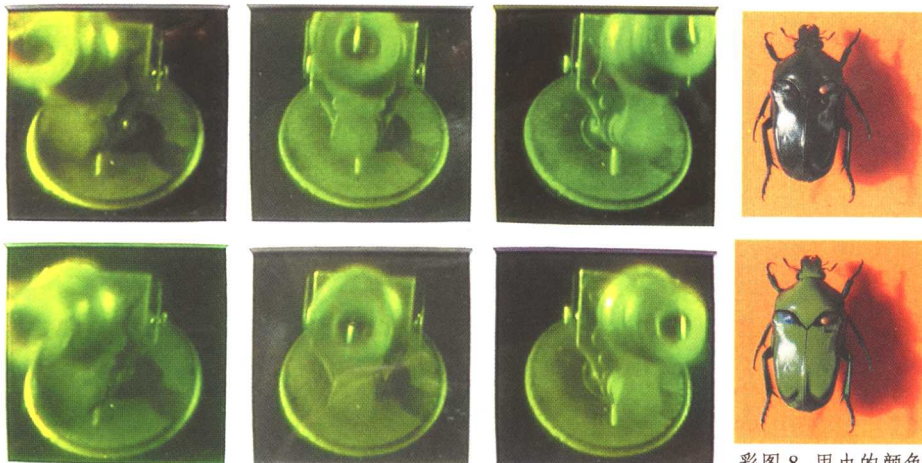


彩图 5 飞机上看到的“佛光”

阳光在大气水滴上的夫琅禾费衍射产生彩色晕光，峨嵋山的“佛光”也是这样产生的。



彩图 6 θ 调制

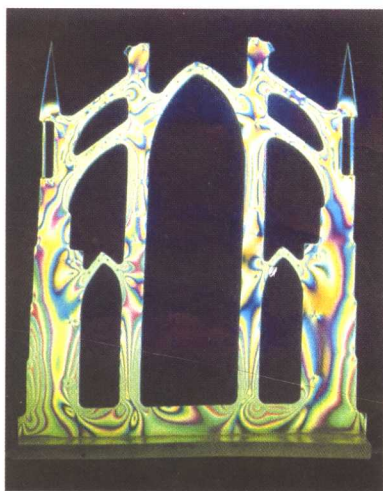


彩图 7 从各个角度看一张全息图

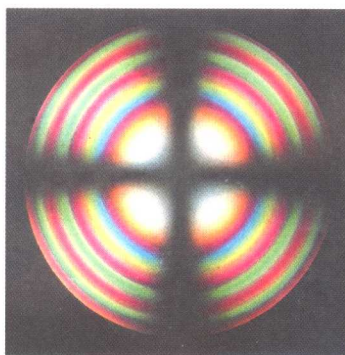
匈牙利友人G.马克思教授赠送全息图，本书作者拍照。

彩图 8 甲虫的颜色

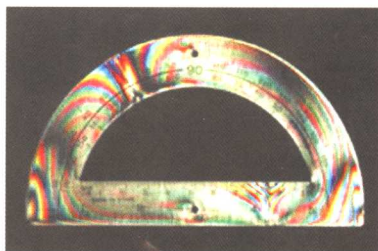
甲虫翅膀反射的光是圆偏振的，在手性相反的圆偏振光照射下是黑的(上图)。



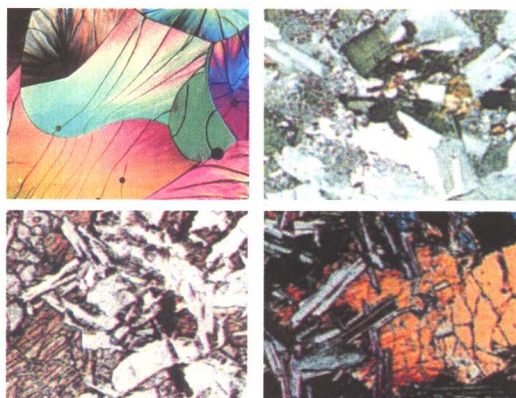
彩图 9 教堂建筑结构的光测弹性模型



彩图 10 单轴晶体在会聚白光下的干涉图样



彩图 11 在正交偏振片间塑料量角器显示出凝固在其中的残余应力



彩图 12 在偏光显微镜下的各种矿物样本

序

从教学顺序上看,本书是《新概念物理教程》中的第四卷,从写作顺序上看却是最后一本。我和钟锡华在20年前编写过一套《光学》教材,^①在全国一定范围内沿用至今。该书在当时参考了国外经典性光学教材^②的相应部分,并从北京大学前辈和同事们那里吸取了营养(如沈克琦先生的讲稿,虞福春先生关于半波损问题的论述,陈熙谋先生关于干涉条纹定域问题的讨论)。教材^①成书时新兴的现代变换光学已有了很大发展,该书及时地把一些基本思想和内容补充进去。这一点主要归功于钟锡华先生。钟锡华先生最近出版了一本新教材,^③总结了他20余年的教学实践和科学研究的学识和经验,在波动光学方面满怀激情地写出了自己清新流畅的风格。

本书作者审视了近年来光学的最新进展,如信息光学、统计光学、非线性光学等,它们或用的数学比较多,或技术性比较强,或需要一些排在“光学”课之后的量子物理知识,不大适合在本课中太多地介绍。“光学”作为一门基础课,主要把传统的光学原理讲好,还是最根本的。本书以教材^①为本,但在波动光学的章节处理上恢复了更加传统的干涉、衍射、偏振三大块的编排。在变换光学、信息光学方面侧重于基本原理、基本概念的介绍,删去了一些较深的和较技术性的内容。

赵凯华
2004年8月

-
- ① 赵凯华、钟锡华,《光学》上、下册,北京:北京大学出版社,1984年。
 - ② F. A. Jenkins, H. E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill Inc., 1952.
M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1964.
Г. С. Ландсберг, *Оптика*, Госиздат., 1957.
 - ③ 钟锡华,《现代光学基础》,北京:北京大学出版社,2003年。

目 录

第一章 光和光的传播	1
§ 1. 光和光学	1
1.1 光的本性	1
1.2 光源与光谱	3
1.3 光学的研究对象、分支与应用	6
§ 2. 光的几何光学传播规律	6
2.1 几何光学三定律	6
2.2 全反射	9
2.3 棱镜与色散	11
2.4 光路的可逆性原理	14
§ 3. 惠更斯原理	15
3.1 波的几何描述	15
3.2 惠更斯原理的表述	15
3.3 对反射定律和折射定律的解释	16
3.4 直线传播问题	18
§ 4. 费马原理	19
4.1 光程	19
4.2 费马原理的表述	20
4.3 由费马原理推导几何光学三定律	21
§ 5. 光度学基本概念	22
5.1 辐射能通量和光通量	22
5.2 发光强度和亮度	25
5.3 余弦发光体和定向发光体	26
5.4 照度	27
5.5 光度学单位的定义	28
本章提要	30
思考题	31
习题	32
第二章 几何光学成像	36
§ 1. 成 像	36
1.1 实像与虚像 实物与虚物	36
1.2 物方和像方 物与像的共轭性	38
1.3 物像之间的等光程性	38
1.4 等光程面	39
§ 2. 共轴球面组傍轴成像	40

2.1 光在单个球面上的折射	40
2.2 轴上物点成像焦距、物像距公式	42
2.3 傍轴物点成像与横向放大率	44
2.4 逐次成像	45
2.5 拉格朗日-亥姆霍兹定理	46
§3. 薄透镜	46
3.1 焦距公式	46
3.2 成像公式	48
3.3 密接透镜组	50
3.4 焦 面	50
3.5 作图法	51
3.6 透镜组成像	52
§4. 理想光具组理论	54
4.1 理想成像与共线变换	54
4.2 共轴理想光具组的基点和基面	55
4.3 物像关系	57
4.4 理想光具组的联合	59
§5. 光学仪器	62
5.1 投影仪器	62
5.2 照相机	63
5.3 眼 睛	63
5.4 放大镜和目镜	66
5.5 显微镜	67
5.6 望远镜	69
5.7 棱镜光谱仪	70
§6. 光 阑	71
6.1 孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳	71
6.2 视场光阑 入射窗和出射窗	74
§7. 像 差	76
7.1 像差概述	76
7.2 球面像差	77
7.3 彗形像差	78
7.4 正弦条件和齐明点	78
7.5 像散和像场弯曲	80
7.6 畸 变	81
7.7 色像差	81
7.8 小 结	84

§ 8. 像的亮度、照度和主观亮度	85
8.1 像的亮度	85
8.2 像的照度	86
8.3 主观亮度	87
本章提要	88
思考题	92
习题	94
第三章 干涉	101
§ 1. 波的叠加与干涉	101
1.1 波的描述	101
1.2 波的叠加原理	101
1.3 两个点波源的干涉	103
§ 2. 杨氏实验 光场的空间相干性	105
2.1 杨氏双缝干涉实验	105
2.2 一些其它干涉装置	107
2.3 干涉条纹的移动	109
2.4 普通光源发光微观机制的特点	110
2.5 光源宽度对干涉条纹衬比度的影响	111
2.6 光场的空间相干性	113
§ 3. 薄膜干涉(一)——等厚条纹	115
3.1 薄膜干涉概述	115
3.2 薄膜表面的等厚条纹	117
3.3 劈形薄膜的等厚条纹	118
3.4 牛顿环	120
3.5 等厚干涉条纹的观测方法及倾角的影响	122
3.6 薄膜的颜色 增透膜和高反射膜	124
§ 4. 薄膜干涉(二)——等倾条纹	125
4.1 无穷远的等倾条纹	125
4.2 观察等倾条纹时扩展光源的作用	127
4.3 薄膜干涉的定域问题	128
§ 5. 迈克耳孙干涉仪 光场的时间相干性	130
5.1 迈克耳孙干涉仪的结构	130
5.2 干涉条纹	131
5.3 光源的非单色性对干涉条纹的影响	134
5.4 傅里叶变换光谱仪	137
5.5 精密测长与长度的自然基准	137

5.6 光场的时间相干性	140
5.7 光场的相干性小结	142
§ 6. 多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪	143
6.1 多光束干涉的强度分布公式	143
6.2 法布里-珀罗干涉仪的装置和条纹的半峰宽度	147
6.3 法布里-珀罗干涉仪在光谱学中的应用	150
本章提要	152
思考题	155
习题	157
第四章 衍射	163
§ 1. 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	163
1.1 光的衍射现象	163
1.2 惠更斯-菲涅耳原理	165
1.3 巴比涅原理	169
1.4 衍射的分类	169
§ 2. 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	170
2.1 实验现象	170
2.2 半波带法	171
2.3 矢量图解法	173
2.4 菲涅耳波带片	175
§ 3. 夫琅禾费单缝衍射和矩孔衍射	179
3.1 实验装置和实验现象	179
3.2 单缝衍射的强度公式	180
3.3 矩孔衍射的强度公式	183
3.4 单缝衍射因子的特点	184
3.5 几何光学的限度	188
§ 4. 光学仪器的像分辨本领	189
4.1 夫琅禾费圆孔衍射	189
4.2 望远镜的分辨本领	190
4.3 球面波照明条件下像面接收的夫琅禾费衍射	192
4.4 显微镜的分辨本领	193
§ 5. 多缝夫琅禾费衍射和光栅	195
5.1 实验装置和衍射图样	195
5.2 N 缝衍射的振幅分布和强度分布	197
5.3 缝间干涉因子的特点	199
5.4 单缝衍射因子的作用	201

5.5 黑白光栅和正弦光栅	202
§ 6. 光栅光谱仪	205
6.1 光栅的分光原理	205
6.2 光栅的色散本领和色分辨本领	205
6.3 量程和自由光谱范围	208
6.4 闪耀光栅	208
6.5 棱镜光谱仪的色散本领和色分辨本领	211
§ 7. 三维光栅——X 射线在晶体上的衍射	212
7.1 晶体点阵 X 射线	212
7.2 X 射线在晶体上的衍射——布拉格条件	213
7.3 劳埃相和德拜相	217
本章提要	217
思考题	220
习题	224
第五章 变换光学与全息照相	229
§ 1. 衍射系统产生的波前变换	229
1.1 从惠更斯-菲涅耳原理看衍射现象	229
1.2 衍射系统的屏函数 振幅变换函数与相位变换函数	229
1.3 平面波与球面波的波前函数	231
1.4 傍轴条件和远场条件	233
1.5 透镜的相位变换函数	234
1.6 棱镜的相位变换函数	237
§ 2. 阿贝成像原理与相衬显微镜	238
2.1 阿贝成像原理	238
2.2 空间频谱	240
2.3 空间滤波与阿贝-波特实验	242
2.4 相衬显微镜	245
§ 3. 傅里叶变换光学与光信息处理	247
3.1 夫琅禾费衍射装置和衍射积分的标准形式	247
3.2 傅里叶变换及其逆变换	249
3.3 夫琅禾费衍射与傅里叶变换的关系	250
3.4 相干光图像处理的 $4F$ 系统	251
3.5 空间滤波实验举例	252
§ 4. 全息照相	255
4.1 全息照相步骤	255
4.2 全息照相的特点	257

4.3 全息照相的基本原理——无源空间边值定解	257
4.4 波前的全息记录	258
4.5 物光波前的重建	259
4.6 体全息	261
4.7 全息术的应用	262
本章提要	264
思考题	266
习 题	267
第六章 偏振	270
§ 1. 光的横波性与五种偏振态	270
1.1 偏振现象与光的横波性	270
1.2 偏振片	271
1.3 自然光	272
1.4 线偏振光	272
1.5 部分偏振光	273
1.6 圆偏振光	274
1.7 椭圆偏振光	275
§ 2. 光在电介质表面的反射和折射 菲涅耳公式	276
2.1 菲涅耳反射折射公式	277
2.2 反射率和透射率	278
2.3 斯托克斯的倒逆关系	281
2.4 相位关系与半波损失问题	282
2.5 反射、折射时的偏振现象	285
2.6 从电磁理论推导光的反射、折射定律和菲涅耳公式	286
2.7 全反射与隐失波	288
§ 3. 双折射	289
3.1 双折射现象和基本规律	289
3.2 单轴晶体中的波面	291
3.3 晶体的惠更斯作图法	292
3.4 法向速度与射线速度 法向面与射线面	294
3.5 折射率椭球	297
3.6 双轴晶体	298
§ 4. 晶体光学器件 圆偏振光和椭圆偏振光的获得与检验	300
4.1 晶体偏振器	300
4.2 波晶片——相位延迟片	301
4.3 垂直振动的合成	303

4.4 圆偏振光和椭圆偏振光的获得	305
4.5 圆偏振光和椭圆偏振光通过检偏器后强度的变化	307
4.6 通过波晶片后光束偏振状态的变化	307
4.7 圆偏振光和椭圆偏振光的检验	309
§ 5. 偏振光的干涉及其应用	310
5.1 偏振器间的波晶片	310
5.2 色偏振	313
5.3 偏振光的干涉条纹	314
5.4 光测弹性术	314
5.5 克尔效应与泡克耳斯效应	316
5.6 会聚偏振光的干涉	317
§ 6. 旋 光	318
6.1 石英的旋光现象	318
6.2 菲涅耳对旋光性的解释	320
6.3 旋光晶体内的波面	322
6.4 量糖术	323
6.5 磁致旋光——法拉第旋转	325
本章提要	327
思考题	329
习 题	333
第七章 光与物质的相互作用 光的量子性	339
§ 1. 光的吸收	339
1.1 光的线性吸收规律	339
1.2 复数折射率的意义	340
1.3 光的吸收与波长的关系	340
1.4 吸收光谱	341
§ 2. 光的色散	343
2.1 正常色散	343
2.2 反常色散	344
2.3 一种物质的全部色散曲线	345
2.4 相速与群速	345
§ 3. 光辐射的理论	348
3.1 光的发射、吸收与色散的经典理论	348
3.2 辐射阻尼	351
3.3 辐射的量子图像	352
3.4 谱线的自然宽度及谱线增宽	356

§ 4. 光的散射	357
4.1 散射与介质不均匀尺度的关系	357
4.2 瑞利散射和米氏散射	358
4.3 散射光强的角分布与偏振状态	360
4.4 拉曼散射和布里渊散射	361
§ 5. 激 光	363
5.1 激光概述	363
5.2 粒子数布居反转与光放大	364
5.3 激活介质中布居反转的实现	365
5.4 增益系数	365
5.5 激光器中共振腔的作用	366
5.6 增益的阈值条件	367
5.7 激光器对频率的选择	368
5.8 激光光束的特性	370
§ 6. 光的波粒二象性	371
6.1 单光子实验	371
6.2 探测光子时概率波的坍缩	374
本章提要	376
思考题	377
习 题	377
附录 A 傅里叶变换 波包的速度	379
1. 周期函数的傅里叶级数展开	379
2. 傅里叶积分变换	380
3. 空间频谱	383
4. 波包的群速	384
5. 波包的能量速度	385
附录 B 物理常量	390
习题答案	391
索 引	398

第一章 光和光的传播

§ 1. 光和光学

1.1 光的本性

光是一种重要的自然现象。我们所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象,是因为眼睛接收物体发射、反射或散射的光。据统计,人类感官收到外部世界的总信息量中,至少有 90% 以上是通过眼睛的。由于光与人类生活和社会实践的密切联系,光学也和天文学、几何学、力学一样,是一门最早发展起来的学科。然而,在很长一个历史时期里,人类的光学知识仅限于一些现象和简单规律的描述。对光的本性的认真探讨,应该说是从 17 世纪开始的,当时有两个学说并立。一方面,以牛顿为代表的一些人提出了微粒理论,认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流。这个学说直接说明了光的直线传播定律,并能对光的反射和折射作一定的解释(见 4.3 节)。但是,用微粒说研究光的折射定律时,得出了光在水中的速度比空气中大的错误结论。不过这一点在当时的科学技术条件下还不能通过实验测定来鉴别。光的微粒理论差不多统治了 17、18 两个世纪。另一方面,和牛顿同时代的惠更斯(C. Huygens)提出了光的波动理论,认为光是在一种特殊弹性介质中传播的机械波。这理论也解释了光的反射和折射等现象(见 3.3 节)。然而惠更斯认为光是纵波,他的理论是很不完善的。19 世纪初,托马斯·杨(Thomas Young)和非涅耳(A. J. Fresnel)等人的实验和理论工作把光的波动理论大大推向前进,解释了光的干涉、衍射现象,初步测定了光的波长,并根据光的偏振现象确认光是横波(有关光的波动理论,参见第三、四、五各章)。用光的波动理论研究光的折射,得出的结论是光在水中的速度应小于它在空气中的速度,这一点在 1862 年为傅科(J. B. L. Foucault)的实验所证实。因此,19 世纪中叶,光的波动说战胜了微粒说,在比较坚实的基础上确立起来。

惠更斯-菲涅耳旧波动理论的弱点,和微粒理论一样,在于它们都带有机械论的色彩,把光现象看成某种机械运动过程。认为光是一种弹性波,就必须臆想一种特殊的弹性介质[历史上叫做“以太(aether)"]充满空间。为了不与观测事实抵触,还必须赋予以太极其矛盾的属性:密度极小和弹性模量极大。这不仅在实验上无法得到证实,理论上也显得荒唐。重要的突破发生在 19 世纪 60 年代。麦克斯韦(J. C. Maxwell)在前人的基础上,建

立起他著名的电磁理论。这个理论预言了电磁波的存在,并指出电磁波的速度与光速相同。因此麦克斯韦确信光是一种电磁现象,即波长较短的电磁波。1888年赫兹(H. R. Hertz)实验发现了波长较长的电磁波——无线电波,它有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的性质。后来的科学实验又证明,红外线、紫外线和X射线等也都是电磁波,它们彼此的区别只是波长不同而已。光的电磁理论以大量无可辩驳的事实赢得了普通的公认。

以上是经典物理学中光的微粒说与波动说之争的简短回顾,其中讨论的主要是光的传播,很少涉及光的发射和吸收。那时期光和物质的相互作用问题还没有怎么研究过,许多现象尚未发现。

19世纪末、20世纪初是物理学发生伟大革命的时代。从牛顿力学到麦克斯韦的电磁理论,经典物理学形成一套严整的理论体系。当时绝大部分物理学家深信,物理学中各种基本问题在原则上都已得到完美的解决,它的理论体系囊括了一切物理现象的基本规律,剩下的似乎只是解微分方程和具体应用的问题了。然而,正当人们欢庆这宏伟的经典物理学大厦落成的时候,一个个使经典物理学理论陷入窘境的惊人发现接踵而来。1887年迈克尔孙(A. A. Michelson)和莫雷(E. W. Morley)利用光的干涉效应,试图探测地球在“以太”中的绝对运动。他们得到否定的结果,从而动摇了作为光波(电磁波)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性的困难。随后瑞利(J. W. S. Rayleigh)和金斯(J. H. Jeans)根据经典统计力学和电磁波理论,导出黑体辐射公式,该公式要求辐射能量随频率的增长而趋于无穷大。当时物理学界的权威开耳文爵士(Lord Kelvin)把光以太和能均分定理的困难比喻作笼罩在物理学晴朗天空中的两朵乌云。从后来物理学的发展看来,这两朵“乌云”正预示着近代物理学两个革命性的重大理论——相对论和量子论的诞生。有趣的是,这两个问题恰好都与光学有关。

现在让我们回到光的本性问题上。为了解决黑体辐射理论中的矛盾,1900年普朗克(M. Planck)提出了量子假说,认为各种频率的电磁波(包括光),只能像微粒似地以一定最小份额的能量(称为量子)发生。这是一个光的发射问题。另一个显示光的微粒性的重要发现是光电效应,即光照射在金属表面上可使电子逸出,逸出电子的能量与光的强度无关,但与光的频率有关,这是一个光的吸收问题。1905年爱因斯坦发展了光的量子理论,成功地解释了这个效应。光究竟是微粒还是波动?这个古老的争论重新摆在了我们的面前。

其实,“粒子”和“波动”都是经典物理的概念。近代科学实践证明,光

是个十分复杂的客体。对于它的本性问题,只能用它所表现的性质和规律来回答:光的某些方面的行为像经典的“波动”,另一些方面的行为却像经典的“粒子”。这就是所谓“光的波粒二象性”。任何经典的概念都不能完全概括光的本性。

1.2 光源与光谱

任何发光的物体都可叫做光源。太阳、蜡烛的火焰、钨丝白炽灯、日光灯、水银灯,都是我们日常生活中熟悉的光源。光源不仅用来照明,在实验室中为了各种科学研究课题的需要,人们常使用形式多样的特殊光源,如各种电弧和气体辉光放电管等。1960年发明的激光器,则是一种与所有过去的光源性质不同的崭新光源。光既然是一种电磁辐射,就要有某种能量的补给来维持其发射,按能量补给的方式不同,光的发射大致可分为以下两大类。

(1) 热辐射

不断给物体加热来维持一定的温度,物体就会持续地发射光,包括红外线、紫外线等不可见的光。在一定温度下处于热平衡状态下物体的辐射,叫做热辐射或温度辐射。太阳、白炽灯中光的发射属于此类。

(2) 光的非热发射

各种气体放电管(如日光灯、水银灯)管内的发光过程是靠电场来补给能量的,这过程叫做电致发光。某些物质在放射线、X射线、紫外线、可见光或电子束的照射或轰击下,可以发出可见光来。这一种过程叫做荧光。日光灯管壁上的荧光物质、示波管或电视显像管中的荧光屏的发光属于此类。有的物质在上述各种射线的辐照之后,可以在一段时间内持续发光,这种过程叫做磷光,夜光表上的磷光物质的发光属于此类。由于化学反应而发光的过程,叫做化学发光,腐物中的磷在空气中缓慢氧化发出的光(如有时在坟地上出现的“鬼火”)属于这一类。生物体(如萤火虫)的发光叫做生物发光,它是特殊类型的化学发光过程。应当指出,能量形式可以相互转化,上述光的各种发射过程不能截然分开,同一光源中光的发射过程也往往不是单一的。在各种波长 λ 的电磁波中,能为人类的眼睛所感受的,只是 $\lambda = (400 \sim 760) \text{ nm}$ 的狭小范围。这波段内的电磁波叫做可见光。在可见光范围内不同波长的光引起不同的颜色感觉。大致说来,波长与颜色的对应关系见下表:

760	630	600	570	500	450	430	400 nm
红	橙	黄	绿	青	蓝	紫	

由于颜色是随波长连续变化的,上述各种颜色的分界线带有为约定的性质。

在电磁波谱中与可见光波段衔接的,短波一侧是紫外线[(400 ~ 5) nm