

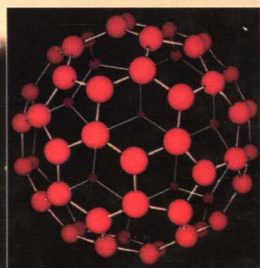


自然科学基础系列教材

大学物理学

下 册

杨学栋 主编



哈尔滨工业大学出版社

自然科学基础系列教材

大学物理学

(下 册)

杨学栋 李 焱 周忠祥 编
孙秀冬 姜铃珍

哈尔滨工业大学出版社

哈 尔 滨

内 容 简 介

本书是根据原国家教委审定的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》和对重点理工科院校教学改革的要求,在总结多年教学实践及教学改革经验的基础上,吸取了国内外近年来同类改革教材的优点而编写的面向 21 世纪的教材。

全书分上下两册。上册包括力学和电磁学两篇;下册包括光学、量子力学和统计物理与热力学基础三篇。

本书可作为工科大学物理课教材,也可供其他理工科院校选为教材和参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学. 下/杨学栋主编. —哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 8

ISBN 7-5603-1535-6

I. 大... II. 杨... III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 30590 号

大 学 物 理 学

Daxue Wulixue

(下册)

杨学栋 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

黑龙江省教委印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.625 字数 415 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

印数 1~7 000

ISBN 7-5603-1535-6/O·109 定价 21.00 元

前 言

本书是根据原国家教委审定的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》和对重点理工科院校教学改革的要求精神,在总结多年来教学实践及教学改革经验的基础上,吸取了国内外近年来同类改革教材的优点编写而成。全书分上、下两册。上册包括力学和电磁学两篇;下册包括光学、量子力学和统计物理与热力学基础三篇。

编写本书的指导思想是面向 21 世纪科技发展对人才培养的总体需求,强调理工结合,内容现代化和加强科学素质培养的原则。

本书的主要特点是:

1. 加强近代物理学基础理论的教学内容。

本书在大力精简经典物理内容和保持物理学原有理论体系的基础上,加强了近代物理学两大理论支柱——相对论和量子力学的内容编写,相对论中增加了广义相对论简介,在电磁学中尽量使用狭义相对论的知识,从而更深刻地阐明电场和磁场的相互联系。在量子力学中除重点阐述其基本概念外,针对某些偏理科专业的需要,介绍了量子力学的一些基本方法,力图使读者对量子力学有更全面的了解。在热学中增加了量子统计的内容。此外,本书还对一些宏观量子效应及其应用也作了简单介绍。

2. 以渗透方式介绍了非线性物理学的知识。

在力学中介绍了非线性振动和非线性波动。在光学中介绍了非线性光学。在热学中介绍非平衡态热力学。书中还对“分形”、“混沌”、“耗散结构”等作了简单介绍。

3. 改变了经典力学的理论体系。

本书按照物质运动的时空性质和三条守恒定律为核心构成经典力学的理论体系,加强了质量、动量、角动量和能量等重要概念

的阐述,避免了与中学物理的重复,使读者有新鲜感,质点力学和刚体力学结合在一起,从而精简了经典力学内容。

4. 以培养理工科学生的科学素质和创造性思维为宗旨。

本书在绪论中介绍了宇宙和粒子物理标准模型,培养学生科学的自然观,在教材中尽量提出现代科技和物理学的前沿课题,以培养学生的探索和创新意识。书中强调物理思想和科学的方法论的教育,重在培养学生辩证唯物主义的世界观和分析、解决实际问题的能力。

5. 起点较高,避免与“中学物理”重复。

本书起点较高,凡“中学物理”所涉及的知识点均认为学生已基本掌握,一般不再简单重复。经典力学采用新体系,与中学完全不同,全书加强了矢量代数、微积分和复变函数等数学方法的应用,意在加强学生的数理基础,以适应 21 世纪高新技术对科技人才的需要。

本书承蒙哈尔滨工业大学物理系皮名嘉教授和孙万钧教授审阅,他们提出了许多宝贵意见。在编审过程中,得到哈尔滨工业大学各级领导的大力支持,编者一并深表谢意。在编写过程中重点参考了近年来国内一些优秀改革教材,编者对这些教材的编著人员深表敬意。

参加本书编写工作的有:李焱、周忠祥、孙秀冬、姜铃珍、李斌、赵树民、叶庆民、冯玉文、杨学栋等。

本书在哈尔滨工业大学经一年小面积试用和一年大面积试用,具有较高的实用性。

由于编者水平所限,疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999 年 9 月

目 录

第三篇 光 学

第十二章 波动光学	1
§ 12-1 光的吸收和色散	1
§ 12-2 光的干涉	9
§ 12-3 光的衍射	37
§ 12-4 光的偏振	64
§ 12-5 光的散射	85
习 题	90
第十三章 现代光学	98
§ 13-1 全息照相	98
§ 13-2 傅里叶光学 光学信息处理	104
§ 13-3 非线性光学	112
习 题	117

第四篇 量子力学

第十四章 早期量子论	118
§ 14-1 早期量子论	120
§ 14-2 量子力学的建立和发展	149
习 题	154
第十五章 波函数与薛定谔方程	159
§ 15-1 波函数的统计诠释	159

§ 15-2 不确定性原理	162
§ 15-3 态叠加原理	167
§ 15-4 薛定谔方程	175
§ 15-5 一维定态问题	187
习 题	199
第十六章 力学量与本征态	205
§ 16-1 力学量用算符表达	205
§ 16-2 力学量算符的对易关系	216
§ 16-3 共同本征函数	224
§ 16-4 力学量随时间的变化 守恒量与对称性	230
§ 16-5 量子力学的基本假设	238
习 题	239
第十七章 有心力场中的粒子	241
§ 17-1 粒子在有心力场中的运动	241
§ 17-2 量子力学中的氢原子	244
§ 17-3 粒子在电磁场中运动	257
习 题	262
第十八章 电子自旋和原子的电子壳层结构	264
§ 18-1 电子自旋	264
§ 18-2 原子的电子壳层结构	266
 第五篇 统计物理与热力学基础	
第十九章 统计物理学基础	275
§ 19-1 统计方法的一般概念	276
§ 19-2 三种统计规律	282
§ 19-3 麦-玻统计在理想气体中的应用	293
§ 19-4 能量按自由度均分定律 理想气体的内能	300
§ 19-5 分子碰撞的统计规律	303
习 题	307

第二十章 热力学基础	310
§ 20-1 热力学基本概念	310
§ 20-2 热力学第一定律及应用	317
§ 20-3 热机效率 卡诺定理	327
§ 20-4 热力学第二定律	329
§ 20-5 自由能与吉布斯函数	337
§ 20-6 热力学第三定律	341
§ 20-7 相 变	345
§ 20-8 非平衡过程	352
习 题	365
附录 阅读材料	373
A. 激光	373
B. 固体结构的量子理论	384
C. 超导和超流	397
D. 核的自旋与核磁共振	420
E. 正电子湮没技术	424
F. 液晶	435
G. 量子化学和量子生物学简介	440
H. 熵概念的扩展	443
习题答案	449

第三篇 光 学

光学是物理学中发展较早的一个分支,是物理学的重要组成部分。以光的直线传播性质为基础,研究光在透明介质中传播问题的光学,称为几何光学。几何光学的主要内容有:光的直线传播定律;光的独立传播定律;光的反射和折射定律。以光的电磁波动性质为基础,研究光的传播及其规律的光学称为波动光学。波动光学的主要内容包括光的干涉、衍射和偏振。以光和物质相互作用时显示的量子性为基础来研究光学,称为量子光学。常把波动光学和量子光学统称为物理光学。激光科学和技术的迅速发展,形成了研究非线性光学、激光光谱学、信息光学、全息术、光纤通信、集成光学和统计光学等方面问题的现代光学,对当代生产和科学技术的发展正起着越来越大的作用。本篇主要讨论波动光学,并对现代光学加以简单介绍。关于光的量子性,将在近代物理部分加以介绍。

第十二章 波动光学

§ 12-1 光的吸收和色散

一、光的电磁理论

光是一定波段的电磁波,可见光的波长范围约为 $390 \sim 760$ nm,相应的频率范围约为 $7.6 \times 10^{14} \sim 3.9 \times 10^{14}$ Hz。电磁波是横波,由两个相互垂直的振动矢量即电场强度 E 和磁场强度 H 在空间的传播来表征,而 E 和 H 都与电磁波的传播方向垂直。研究表

明,在光波中引起光效应的,即对人的眼睛或照相底片等感光器件起作用的,主要是电场强度 E 。因此,一般情况下我们把光波看成是电场强度 E 的振动在空间的传播,并把 E 矢量称为光矢量,把 E 的振动称为光振动。

电磁波的传播总是伴随着电磁能量的传递,这个过程一般用平均能流密度 $\bar{S}$ 来定量地描述。光学中,通常把平均能流密度 $\bar{S}$ 称为光强,用 I 表示。因此,光强表示单位时间内通过与传播方向垂直的单位面积的光的能量在一个周期内的平均值,即单位面积上的平均光功率。无论是人的眼睛还是照相底片,所观测到的都是光强 I ,而不是光振动 E 。对于平面简谐电磁波

$$I = \bar{S} \propto E_0^2$$

E_0 是光振动的振幅,在光学中常用 A 来表示。

在波动光学中,主要讨论的是光波所到之处的相对光强,因此在同一介质中往往就直接把光强定义为

$$I = E_0^2 = A^2 \quad (12-1)$$

只包含单一波长的光,称为单色光。然而,一般光源所发出的光都包含着各种不同波长成分。如果光中只包含波长范围很窄的成分,则这种光称为准单色光,也就是通常所说的单色光。在此波长范围内,各种频率或波长对应的强度是不同的,以波长或频率为横坐标,强度为纵坐标,可以直观地表示

示出这种强度与波长之间的关系,称为

光谱曲线(或称谱线),如图 12-1 所示,谱线所对应的波长范围越窄,表明光的单色性越好。设谱线中心处的波长为

λ ,强度为 I_0 ,通常用强度下降到 $\frac{I_0}{2}$ 的

两点之间的波长范围 $\Delta\lambda$ 作为谱线宽度,它是标志谱线单色性好坏的物理量。例如用滤光片从白光中得到的色光

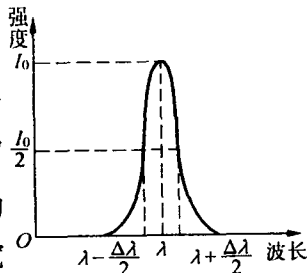


图 12-1 谱线及其宽度

的 $\Delta\lambda$ 约为 10 nm, 而钠光灯和汞灯辐射的单色光的 $\Delta\lambda$ 约为 $0.1 \sim 10^{-3}$ nm, 单色性很好的激光的谱线宽度只有 10^{-9} nm, 甚至更小。

二、光的吸收

光通过物质时, 光波中振动着的电矢量, 将使物质中的带电粒子作受迫振动, 光的一部分能量将用来提供这种受迫振动所需要的能量, 从而被组成物质的微观粒子吸取后转化为热能。这种使光的强度随着穿进物质的深度而减小的现象, 称为光的吸收。

1. 吸收定律

如图 12-2 所示, 光强为 I_0 的单色平行光束沿 x 轴方向通过某均匀物质, 在经过一段距离 x 后光强已减弱到 I , 再通过一无限薄层 dx 后变为 $I + dI$ ($dI < 0$)。实验表明, 在相当宽的光强范围内, $-dI$ 相当精确地正比于 I 和 dx , 即

$$-dI = \alpha I dx$$

式中 α 是与光强无关的比例系数, 称为该物质的吸收系数。

对上式进行积分, 可以得到光强为 I_0 的平行光通过厚度为 l 的物质后的光强 I 为

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (12-2)$$

式 (12-2) 称为布格定律或朗伯定律, 描述的是光吸收的线性规律, 在光强变化相当大的范围内都是正确的。但是, 强激光和物质相互作用时, 吸收系数 α 将和光强有关, 这时布格定律不再成立。

实验表明, 当光被透明溶剂中溶解的物质所吸收时, 吸收系数 α 与溶液的浓度 C 成正比, 即 $\alpha = AC$, 其中 A 是一个与浓度无关的常量。这时, 我们得到

$$I = I_0 e^{-ACl} \quad (12-3)$$

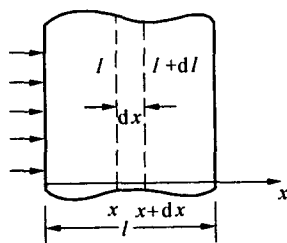


图 12-2 光的吸收规律

称为比尔定律。根据比尔定律,可以测定溶液的浓度,这就是吸收光谱分析的原理。比尔定律表明,被吸收物质的光能是与光路中吸收光的分子数成正比的,只有每个分子的吸收本领不受周围分子影响时才成立。当溶液浓度大到足以使分子间的相互作用影响到它的吸收本领时,比尔定律不再严格成立。

2. 一般吸收和选择吸收

物质对光的吸收程度与波长之间有一定的关系,它们对某些波长范围的光可以是透明的,而对另外一些波长范围内的光却可以是不透明的。若物质对某些波长的光的吸收特别强烈,就称为**选择吸收**。例如,光学材料石英对可见光几乎是透明的,在紫外波段也有很好的透光性能,但对 $3.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 的红外光却有强烈的选择吸收,在此波段石英是不透明的。而普通玻璃对可见光是透明的,但对红外线和紫外线有强烈的吸收,是不透明的。即使是地球表面上的大气,尽管它对可见光和波长在 300 nm 以上的紫外线是透明的,但对红外线只在某些狭窄的波段内是透明的,它们称为大气窗口,在 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间有 7 个大气窗口。此外,大气中的臭氧会强烈地吸收波长短于 300 nm 的紫外线。

虽然选择吸收是光和物质相互作用的普遍规律,但若物质对给定范围内,各种波长 λ 的光的吸收程度几乎相等,则称为**一般吸收**。在可见光范围内,一般吸收意味着光束通过物质后只改变强度,而不改变颜色。例如空气、纯水和无色玻璃等物质在可见光范围内可以看成是一般吸收。

3. 吸收光谱

如果让具有连续谱的光(如白光)通过被研究的某种具有选择吸收的物质,然后利用摄谱仪或分光光度计进行观测,可以发现连续光谱的背景上呈现出一条条暗线或暗带,这表明某些波长或波段的光被吸收了,因而形成了**吸收光谱**。

物质的吸收光谱与它的发射光谱之间有相当严格的对应关系,实验发现,物质自身发射哪些波长的光,它就强烈地选择吸收

哪些波长的光。大致说来,原子气体的发射谱和吸收谱是线状谱,而分子、液体和固体的光谱是带状谱。

按照经典的电磁理论,原子可以看成是一系列弹性偶极振子的组合,其中每个振子有一定的固有频率,于是原子就有了一系列的固有频率。这种偶极振子一旦被外部能源激发,每个振子都会以其固有频率作简谐振动,并向周围空间发出同一频率的单色电磁波,从而在发射光谱上形成一条条的光谱线,形成了原子气体的线状发射谱。当包含有各种频率的白光照射在原子气体上时,只有那些频率与原子的固有频率一致的电磁波,才会引起共振而被原子强烈地吸收,于是原子气体在吸收光谱中形成了一条条与原子固有频率对应的暗谱线。

由于原子吸收光谱的灵敏度很高,混合物或化合物中原子含量极小的变化,都会在光谱中反映出吸收系数很大的改变。历史上,曾靠这种方法发现了铯、铷、铊、铟和镓等多种元素。现在,原子吸收光谱在化学的定量分析中有广泛的应用。

分子气体、液体和固体一般在红外波段有选择吸收,吸收谱线密集地组成带状,形成带状吸收光谱。不同的分子有其显著不同的红外吸收光谱,即使是分子量相同且其它物理化学性质也基本相同的同质异构体,它们的红外吸收光谱也明显的不同。所以,红外吸收光谱已广泛用来定性鉴定或定量测定有机化合物。对分子红外吸收光谱的研究,可以得出分子的振动频率,从而有助于对分子力和分子结构的研究。

三、光的色散

1. 光速和折射率

麦克斯韦所建立的光的电磁理论认为,光是一定波段的电磁波,电磁波在真空中的传播速度就是光在真空中的传播速度,即

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

其中 ϵ_0 是真空电容率, μ_0 是真空磁导率。在介质中, 光的传播速度为

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (12-4)$$

其中 ϵ_r 是介质的相对电容率, μ_r 是相对磁导率。通常 ϵ_r 和 μ_r 都是大于 1 的常量, 因此一般 u 是小于 c 的。一般用折射率 n 来表征透明介质的光学性质, 它定义为

$$n = \frac{c}{u} \quad (12-5)$$

利用式 (12-4) 和式 (12-5), 并考虑在光频段所有的磁化机制都不起作用, 介质的相对磁导率 $\mu_r \approx 1$, 于是有

$$n = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r} \quad (12-6)$$

这个公式把光学和电磁学的物理量联系了起来。当光波穿过不同的介质时, 其频率 ν 或角频率 ω 保持不变, 但光的传播速度 u 和波长 λ 都将随着介质的不同而改变。

2. 正常色散

在真空中, 光以恒定的速度传播, 与光的频率无关。然而, 在通过任何物质时, 不仅传播速度要发生变化, 而且不同频率的光在同一物质中的传播速度也不同。这一事实在折射现象中有最明显反映, 即物质的折射率与光的频率有关。这种光在介质中的传播速度 (或介质的折射率) 随其频率 (或波长) 而变化的现象, 称为光的色散现象。

1672 年牛顿首先利用棱镜的色散效应, 把日光分解成了彩色光带。棱镜的分光作用, 是由于不同波长的光的偏向角 δ 不同所造成的。棱镜的角色散本领 $D = \frac{d\delta}{d\lambda}$ 与其色散率 $\frac{dn}{d\lambda}$ 成正比, 色散率的大小表征了棱镜材料的色散性质。

测量不同波长的光通过棱镜的偏转角, 就可算出棱镜材料的折射率 n 与波长 λ 之间的依赖关系曲线, 即色散曲线。实验表明:

凡在可见光范围内无色透明的物质,它们的色散曲线形式上很相似,如图 12-3 所示,其间有许多共同特点,如 n 随 λ 的增加而单调下降,且下降率在短波一端更大,等等。这种色散称为正常色散。

1836 年,科希给出了一个正常色散的经验公式

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (12-7)$$

式中 A 、 B 和 C 是与物质有

关的常量,其数值由实验数据来确定。当 λ 变化范围不大时,科希公式可以只取前两项,于是有

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (12-8)$$

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3} \quad (12-9)$$

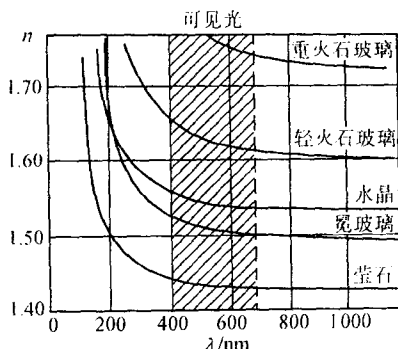


图 12-3 正常色散曲线

棱镜摄谱仪是一种分色仪器,它是利用棱镜的色散作用将非单色光按波长分开的装置,其结构的主要部分如图 12-4 所示。

3. 反常色散

实验表明,在强烈吸收的波段,色散曲线的形状与正常色散曲线大不相同,折射率 n 随着波长 λ 的增加而增大,即 $\frac{dn}{d\lambda} > 0$ 。尽管通常把这种色散称为反常色散,但实际上反映了物质在吸收区域

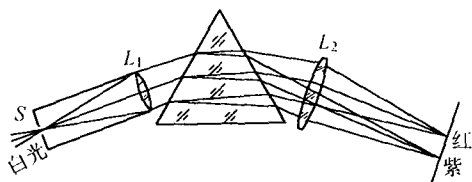


图 12-4 棱镜摄谱仪

内所普遍遵从的色散规律。图 12-5 所示为石英在可见光和红外区域的色散曲线。

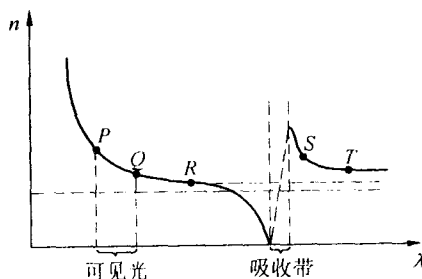


图 12-5 石英的色散曲线

在可见光区域内色散是正常的,曲线 PQ 段满足科希公式。若向红外区域延伸,并接近吸收带时,色散曲线开始与科希公式偏离(图中 R 点)。在吸收带内折射率 n 随着波长的增加而增大,即 $dn/d\lambda > 0$ 。过了吸收带,色散曲线又恢复了正常,但此时科希公式中的 A 、 B 、 C 的值与 PQ 段的值是不同的。

一种理想介质的全波段色散曲线如图 12-6 所示。在 $\lambda \rightarrow 0$ 时,任何物质的折射率 n 都等于 1;对于波长极短的情况,例如对于 γ 射线和硬 X 射线, n 略小于 1。这表明,从真空射向介质外表面的电磁波,在这种情况下可以发生全反射。

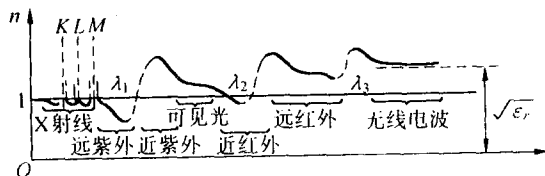


图 12-6 一种理想介质的全波段色散曲线

§ 12-2 光的干涉

一、光的相干性

在通常情况下,光波和其它波动一样,在空间传播时遵从波的独立传播原理。当两列光波在空间交叠时,它们的传播是互不干扰的,亦即每列波的传播,就像另一列波完全不存在一样,各自独立地进行着。当两列波或多列光波同时存在时,在它们的交叠区域内每点的光振动是各列光波单独在该点产生的光振动的合成,这就是光的叠加原理。它是讨论光的干涉和衍射等问题的理论基础。

光的独立传播原理和叠加原理的成立是有条件的,通常把违反它们的效应称为非线性效应。如果光强很强,例如电场强度高达 10^{12}V/m 的激光,或者光强并不很强但通过了变色玻璃这样的介质时,都会出现非线性效应。本章中我们仅讨论线性介质,光波在这种介质中传播时服从叠加原理。

由于光在空间传播时服从叠加原理,因此当满足相干条件的两束光在空间相遇时,会出现光的强度或明暗在空间非均匀的稳定分布,这种现象称为光的干涉。这两束相干光必须满足相干条件,即它们的频率相同,振动方向相同而且相位差保持恒定。但是,要实现这些条件并不像在机械波或无线电波情况下那样容易,这是由普通光源的发光机制所决定的。

光源的发光是其中大量的分子或原子进行的一种微观过程。现代物理学理论已完全肯定分子或原子的能量只能具有离散的值,这些值分别称做能级。例如氢原子的能级如图 12-7 所示。能量最低的状态叫基态。其它能量较高

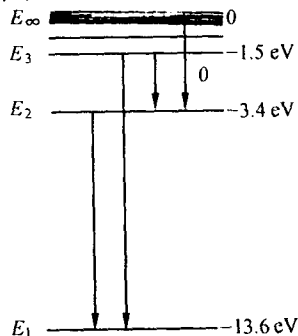


图 12-7 氢原子的能级及发光跃迁