



高等教育自学辅导丛书

# 物理学

第三册

北京大学 古 玥 李衡芝 编

化学工业出版社

53  
160  
=3

高等教育自学辅导丛书

# 物 理 学

## 第 三 册

(光学 近代物理基础)

北京大学 古玥 李衡芝 编



化学工业出版社

## 内 容 提 要

本书是参照1980年修订的全国理科非物理类专业和工科院校普通物理教学大纲编写的。全书共分三册。本册包括经典光学和近代物理两篇。前者包括几何光学和波动光学；后者包括量子光学、狭义相对论、原子结构、粒子和波、激光原理、半导体和原子核物理。书中基本内容的阐述详尽易懂，基本概念和基本原理的表述清楚简洁；书中有较多的例题，可帮助读者加深对基本概念和基本原理的理解，并掌握解题的方法。每章有小结，并附有一定数量的思考题和习题，书末给出习题答案和部分题解。本册共有三次阶段测验，以供读者自我检查学习情况之用。全书由北京大学章立源副教授审定。

本书可作为高等教育普通物理学课程的自学教材，也可供理工科大学、师范院校、电视大学和业余大学师生选用，亦可作为中学物理教师进修用的参考书。

高等教育自学辅导丛书

物 理 学

第 三 册

(光学 近代物理基础)

北京大学 古珣 李衡芝 编

责任编辑：张文虎

封面设计：季玉芳

\*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

开本850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张14<sup>3</sup>/<sub>8</sub> 字数394千字 印数1—25,170

1985年6月北京第1版 1985年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3723 定价2.85元

## 出版说明

建国以来，在党的领导下，我国业余教育事业取得了很大成绩。为了进一步促进业余教育事业的发展，加速培养和选拔四化建设所需要的合格人才，教育部作出了关于建立高等教育自学考试制度的决定，凡属中华人民共和国公民经考试达到高等学校毕业生同等水平的，均承认其学历。为配合这一工作的开展，为自学人员提供学习辅导材料，我社组织编写出版一套《高等教育自学辅导丛书》。这套丛书包括《语文》、《哲学》、《政治经济学》、《高等数学》、《物理学》、《化学》、《生物学》等册。

本《丛书》是根据北京市高等教育自学考试委员会公布的考试科目、教科书和考试要求以及教育部推荐的教学大纲编写的。书中力求从自学特点出发，对指定教材的内容作进一步阐述，重点突出，文字通俗，便于自学。

《丛书》除供自学人员学习外，也可供理工科大学、电视大学、业余大学师生选用。

化学工业出版社

## 前 言

为了实现“四化”，我国广大青年正在如饥似渴地以现代科学技术知识武装自己。通过各种形式的自学完成大学课程的学习是国家培养人才的有效途径之一。当前的一个迫切问题是要有适合于自学的教材，本书就是为此目的而编写的一套大学普通物理学自学用书。

本书是参照1980年修定的全国理科非物理类专业普通物理教学大纲，以及工科院校普通物理教学大纲编写的。根据大纲精神，在编写过程中力图贯彻以下几点。

充分注意作为一门基础课的普通物理学自身的系统性，并把重点放在基本概念、基本原理和基本方法的阐述上，以使读者在从事实际工作和进一步深造时能具有比较牢固的物理学基础。注意理论与实际相结合，尽可能广泛地介绍实践领域中的各种应用，以丰富读者的基础物理知识。

物理学的发展历史以及处理问题的方法是进行辩证唯物主义教育的生动教材。我们力图用辩证唯物主义的观点和方法来阐明物理学发展的几个重大转折，并充分注意关于物理学中科学思维方法的训练，而这种科学思维方法的训练是学习自然科学所必不可少的。

考虑到本书是自学用书，对基本内容的阐述尽可能详尽易懂，并突出对物理概念和物理图象的解释，以利于读者对基本内容的掌握。本书主要各章附有大量例题，以帮助读者巩固对学过的基本规律和基本概念的理解，并提高读者的解题能力。

按照大纲要求，全书有三册，共分六篇：第一册包括第一篇，力学；第二篇，机械振动和机械波；第三篇，热学；第二册包括第四篇，电磁学；第三册包括第五篇，光学；第六篇，近代物理基础。某些非基本要求的内容以小字排印；只作为读者参考阅读的内容用星号（\*）注明。为适应自学者的需要，每章后都有本章小结，每章（或每节）后附有份量适中的思考题和习题。书末给出习题答案，

38713

对较难和综合性的习题还给出题解。书中附有阶段测验题，以便于读者进行自我检查。

全书由北京大学章立源副教授审定。

参加本书编写的有古玥、张为合、严隽珏、冯庆荣、李衡芝；参加本书初稿整理、誊写和底图绘制的还有吕小光、韩福坤等同志。

由于时间仓促，编者学识有限，缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 第五篇 光 学

第一章 光学总论	1
第一节 关于光的本性	2
第二节 光与电磁波	5
第三节 波动的数学描述	9
小结	14
思考题	15
习题	16
第二章 几何光学	17
第一节 几何光学的基本定律	17
第二节 球面傍轴成像	25
第三节 薄透镜成像	38
第四节 光学仪器	50
第五节 照明系统	59
小结	63
思考题	65
习题	66
附录一 棱镜达到最小偏向角的条件	69
附录二 物象之间等光程原理的证明	70
第三章 光的干涉	74
第一节 光波的叠加	74
第二节 两相干点光源的干涉	78
第三节 分波前干涉	81
第四节 薄膜干涉	88
第五节 光波的单色性和时间相干性	107
第六节 干涉仪	109
小结	114
思考题	116
习题	117

阶段测验一 .....	119
第四章 光的衍射 .....	121
第一节 夫琅和费单缝衍射 .....	123
第二节 夫琅和费圆孔衍射和光学仪器的分辨本领 .....	133
第三节 衍射光栅 .....	136
第四节 晶体对伦琴射线的衍射 .....	148
小结 .....	151
思考题 .....	154
习题 .....	155
第五章 光的偏振 .....	156
第一节 自然光和线偏振光 起偏器和检偏器 .....	156
第二节 反射和折射时的偏振现象 .....	162
第三节 光在各向异性晶体中的双折射现象 .....	165
第四节 惠更斯对双折射现象的解释 .....	167
第五节 偏振棱镜 .....	175
第六节 椭圆偏振光和圆偏振光 .....	179
第七节 波片和补偿器 .....	183
第八节 偏振光的干涉 .....	190
第九节 旋光现象 .....	197
小结 .....	200
思考题 .....	202
习题 .....	203
第六章 光的色散、吸收和散射 .....	205
第一节 光的色散 .....	205
第二节 光的吸收 .....	213
第三节 光的散射 .....	219
小结 .....	226
思考题 .....	228
习题 .....	228
阶段测验二 .....	229

## 第六篇 近代物理基础

第七章 光的量子性 .....	232
第一节 热辐射 .....	232
第二节 光电效应 .....	244
第三节 康普顿效应 .....	255



小结 .....	262
思考题 .....	264
习题 .....	264
附录一 普朗克黑体辐射公式的推导 .....	265
附录二 由普朗克公式推导斯忒藩-玻耳兹曼定律和维恩位移定律 .....	266
<b>第八章 狭义相对论简介 .....</b>	<b>269</b>
第一节 产生狭义相对论的背景 .....	269
第二节 洛伦兹变换 .....	276
第三节 长度的相对性 .....	279
第四节 时间间隔的相对性 .....	283
第五节 速度的洛伦兹变换 (相对论中的速度合成法则) .....	287
第六节 相对论中的质量、能量和动量 .....	290
第七节 光的量子性 .....	299
小结 .....	300
思考题 .....	302
习题 .....	303
<b>第九章 原子光谱和原子结构 .....</b>	<b>305</b>
第一节 氢原子光谱的实验规律 .....	305
第二节 原子结构的卢瑟福模型和玻尔假设 .....	309
第三节 氢原子的玻尔理论 .....	312
第四节 椭圆轨道 空间量子化 .....	319
第五节 玻尔理论的局限性 .....	326
第六节 电子自旋 量子数和能级符号 .....	328
第七节 电子壳层结构和元素周期表 .....	331
小结 .....	339
思考题 .....	341
习题 .....	341
<b>第十章 微粒的波动性 .....</b>	<b>343</b>
第一节 微观粒子的波动性 .....	343
第二节 测不准关系 .....	348
*第三节 薛定谔方程 .....	353
小结 .....	357
思考题 .....	358
习题 .....	358
<b>第十一章 激光原理 .....</b>	<b>359</b>

第一节	激光器的分类和激光的特点	359
第二节	吸收和辐射	361
第三节	产生激光的条件	363
第四节	红宝石激光器	366
第五节	氦氖激光器	368
小结		371
思考题		372
习题		372
<b>第十二章</b>	<b>半导体</b>	<b>373</b>
第一节	固体的能带和导电机构	373
第二节	杂质对半导体的影响	378
第三节	$p-n$ 结	380
小结		384
思考题		385
习题		385
<b>第十三章</b>	<b>原子核 基本粒子</b>	<b>386</b>
第一节	原子核的特征及其组成	386
第二节	天然放射性	391
第三节	放射线的探测	401
第四节	核的人工转变和人工放射性	406
第五节	放射性同位素的应用	412
第六节	裂变和聚变	415
第七节	基本粒子	422
第八节	宇宙射线	430
小结		432
思考题		433
习题		434
阶段测验三		435
附表一	常用谱线的波长	437
附表二	一些物质的折射率	437
附表三	基本物理常数表	437
习题答案		439

## 第五篇 光 学

光学是一门既古老而又年轻的学科，是物理学的重要组成部分。光学的发展不仅为人们提供了进行观察和许多精密测量的重要手段，而且为人们的认识深入到微观世界和高速运动领域打开了大门。近年来，光学研究方面的一系列引人注目的成就以及展现在人们眼前的发展前景，使古老的光学进入到科学和技术的最新前列。

通过对光学现象的观察，人们很早就知道了光在均匀媒质中作直线传播的规律，并引进光线的概念来描述光的传播。人们以光的直线传播性作为前提，在反射定律和折射定律的基础上用几何学的方法广泛地研究了光学成象问题，从而形成了经典光学的一个重要分支——几何光学。几何光学的理论迄今仍然是设计和制造光学成象仪器的主要依据。

对光学现象更全面的观察表明，光是一种波动。诸如光的干涉、衍射、偏振等许多光学现象只有应用波动理论才能得到圆满的解释，这就形成了经典光学的另一分支——波动光学。在波动光学理论里，光是以波的形式传播的，光的直线传播是在特殊情形下才表现出来的一种性质。

本篇将主要介绍几何光学和波动光学的基本内容。

### 第一章 光 学 总 论

光究竟是什么，在历史上曾是学者们注意和探讨的中心。事实上，在光学的整个发展过程中一直贯穿着对光的本性的研究。人们对光的本性的认识有一个发展过程，本章将对此作一简

要的介绍。在这章中还要介绍一些学习波动光学所必需的基本知识。

## 第一节 关于光的本性

### 一、十七世纪关于光的本性的两派观点

关于光的本性，十七世纪有两派观点，一派认为光是由微粒组成，另一派则认为光是一种波动。以牛顿为代表的一派认为所有的发光物都发射光的微粒，这些微粒可在真空中或透明介质中以巨大的速度沿直线运动。在牛顿心目中的这种光微粒具有与普通实物小球同样的力学性质，并按力学规律与其它实物微粒相互作用。牛顿企图把粒子和力的经典概念引入光学领域并用纯粹的力学规律来解释光学现象。这种光的微粒说与最简单的光学论据之一——光的直线传播规律是吻合的；它也可用来解释光的反射现象，只要把光在界面上的反射看成是与弹性小球在光滑桌面上的反射一样属于同样的力学过程。在解释光在玻璃中的折射现象时，认为光微粒到达玻璃界面时受到玻璃粒子的作用，使光微粒进入玻璃时速度发生改变而造成折射。按此理论，玻璃中的光速应比空气中的光速大，但事实却相反。用微粒说解释牛顿环（一种干涉现象，详见第三章）时就更牵强且难以令人信服了。当牛顿本人发现太阳的白光实际上由许多色光组成时，他又不得不假定存在与各种不同色光相对应的多种光微粒。

首先由胡克提出，并为惠更斯所发展的另一个完全不同的观点认为光是一种波动。用惠更斯首先提出的惠更斯原理同样可解释微粒说曾解释过的反射和折射现象，而且解释得更好更自然，甚至还能解释方解石中的双折射现象（详见第五章）。波动说在解释光的颜色时，认为不同的色光有各自的波长，白光实际上是由许多不同波长的光组成的。当时人们所接触到的只是弹性波，弹性波必须在弹性介质中才得以传播。既然光是一种波动，而且能在真空中传播，那么光波赖以传播的介质又是什么呢？当时的波动论者不得不假定存在一种特殊的介质——以太。为与事实相符，必须赋予以太种

种异乎寻常的特性。例如，光既然能在真空中和透明介质中传播，以太也必须存在于真空中和介质中，事实上必须假定以太是一种充斥整个宇宙的透明介质；光速是如此之大，以太就必须具有巨大的弹性，等等。

上述两种完全不同的观点——微粒说和波动说，究竟哪个是正确的，无疑应由实验事实作出评定。然而，由于牛顿在力学领域的杰出贡献，使他的微粒说在当时以及随后的百余年间得到了大多数物理学家的支持。

## 二、十九世纪波动说的复兴

直到十九世纪上半叶，经过杨氏和菲涅耳等人的努力，才使光的波动说重新恢复了活力。杨氏和菲涅耳根据波动理论分别正确地解释了光的干涉和衍射现象，菲涅耳和阿喇戈通过实验证实了光的横波性。至此，所发现的所有光学现象都有利于波动说，用波动理论解释光的干涉、衍射和偏振现象都获得了巨大成功。在这些事实面前，牛顿微粒说的支持者变得寥寥无几了。

在用波动理论解释光学现象方面取得节节胜利之际，存在以太仍然是必要的假设，因为当时人们无法理解没有介质的波动过程。十九世纪中叶麦克斯韦总结了电磁场规律，从理论上预言了电磁波的存在，证明了电磁波的横波性，它在介质中的传播速率为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (1-1)$$

式中 $\epsilon_0$ 和 $\mu_0$ 是真空的介电常数和磁导率， $\epsilon_r$ 和 $\mu_r$ 是介质的相对介电常数和相对磁导率。在真空中， $\epsilon_r = 1$ ， $\mu_r = 1$ ，所以电磁波在真空中的传播速率为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-2)$$

把已知的实验数据代入后，发现电磁波的速率就等于光速！这一绝非巧合的事实暗示着光的现象与电磁现象间有很密切的关系。光波就是电磁波的一种，只是其波长比普通无线电波短得多而已。

对光的波动论者来说，接受光是电磁波这一结论是毫不困难的，

因为这丝毫不会损害波动理论在解释光学现象方面已取得的成就，反而为光的波动理论奠定了坚实的基础，于是光的电磁理论就应运而生了。电磁理论的产生并未动摇存在以太的信念。电磁理论的奠基者之一法拉第认为电磁力与任何力一样不可能是超距作用，这无疑是正确的，但他假定这种力的作用必须借助于某种介质——电磁以太。电磁作用就是在电磁以太中传播的，电磁波是电磁场在电磁以太中的传播过程。既然光波就是电磁波，那么惠更斯时代的光以太及法拉第和麦克斯韦的电磁以太就应该是同一种东西了。在十九世纪末人们的讨论中心已不是以太是否存在，而是如何通过实验来寻求以太的属性问题了。不管人们对以太的属性提出了多么不同的论点，一个共同的特点是都企图从以太的纯力学性质来解释电磁过程。麦克斯韦及后来的赫兹都曾企图把电磁运动归结为以太运动，但均未获成功。

十九世纪90年代洛伦兹创立了电子论，他把物质的电磁性质归之于物质中的电子效应，在存在以太这一前提下推出了运动介质中的光速公式，并解释了折射率随频率而变的规律。电子论取得了很大成功，这使这一时期成为以太论的极盛时期。但在洛伦兹的理论中，以太只作为电磁波的荷载体和绝对参照系这种抽象的标志，它已失去了所有具体的物理性质，这为它的最终衰落创立了条件。

场论的发展在物理学史上无疑具有极重要的意义，它为物理学最终从机械论观点的束缚下解放出来扫清了道路，它导致了爱因斯坦彻底抛弃以太观点并建立了相对论。

### 三、二十世纪新的微粒说

到二十世纪初，在解释黑体热辐射、光电效应以及康普顿散射等另一类光学现象时，似乎是无往而不胜的波动理论却遇到了不可克服的困难。1900年普朗克在解释黑体热辐射规律时抛弃了经典的波动理论，引进了能量子的概念，认为辐射体辐射能量不是连续地而是以某最小能量单元——能量子为单位一份一份地辐射的。在此基础上爱因斯坦于1905年重新提出了光的微粒概念，认为光是由能量小球——光子组成，从而正确地解释了光电效应。作为光微粒的

光子自然不同于牛顿所假定的那种机械微粒,而具有了全新的含义。对现代物理学来说,想对光的波动性和微粒性作出最终的判决仍然是困难的,也是不必要的,因为光具有波动性和微粒性这种双重性质是无法否认的客观事实。波动性和微粒性是同一客观物质——光在不同场合反映出来的两种属性,我们不可能用其中任一属性来概括光的全部性质。

## 第二节 光与电磁波

### 一、可见光 单色光和白光

光波是电磁波的一种,它与普通无线电波、微波、X射线和 $\gamma$ 射线等其它电磁波的区别只是波长不同而已。可见光波是指人眼能看得见的那部分电磁波,可见光的波长通常用纳米(nm)或埃( $\text{\AA}$ )表示:

$$1 \text{ 纳米} = 10^{-9} \text{ 米}$$

$$1 \text{ 埃} = 10^{-10} \text{ 米}$$

可见光范围内不同波长的光波引起人眼的不同色觉。人眼对不同色光的视觉灵敏度是不同的,图1-1画出了人眼对不同色光的相对灵敏度曲线。由曲线可知,人眼对波长约为5500埃的黄绿光最灵敏,对紫光和红光则灵敏度较低。可见光波长范围的两边并无严格的界线,若把人眼灵敏度降到最大值的10%处的波长作为可见光的波长极限,则可见光的波长范围大约在4300埃到6900埃之间。这一范围并不十分严格,不同的人可略有差别,即使同一人也随光强而变。波长大于可见光区域长波极限的光称为红外光;波长小于短波极限的光称为紫外光。红外光和紫外光都是人眼看不见的光波。

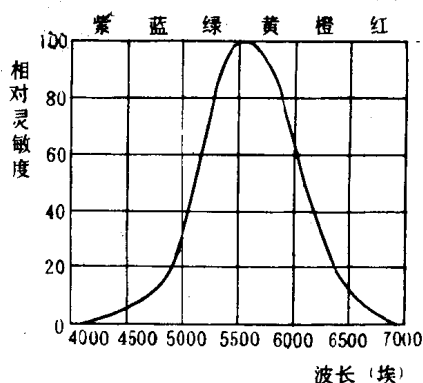


图 1-1 视觉相对灵敏度与波长的关系

只包含一种波长的光称为单色光，严格的单色光在自然界是不存在的，任何光源所发出的光实际上包含了许多不同的波长成分。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，波长范围愈窄，其单色性愈好。实践中只能得到准单色光，例如，用普通红色玻璃从白光中获得的红光，其波长范围可大到数百埃；气体原子发出的每一光波成分（光谱）的波长范围一般在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 埃之间，即使是单色性最好的激光，仍然具有 $10^{-8}$ 埃这一数量级的波长范围。利用分光仪器（如棱镜光谱仪或光栅光谱仪）可把光源中波长不同的光彼此分开，从而使我们能了解光源所发出的光中究竟包含了哪些波长成分。所有波长成分组成了光的谱，称为光谱。每种光源都有自己特定的光谱结构，它反映了组成光源的物质的性质，利用这一特点可对物质中的元素进行定性或定量分析。

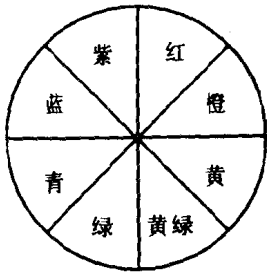


图 1-2 互补色

光中的波长组成以及它们的相对强度决定了光的色调。白光是各种色光的混合体，如果某两种色光混合后能组合成白光，则该两种色光叫做互补色光。图1-2中相对的两种色光构成互补色，如红与绿、蓝与黄、橙与青等。若设法滤去白光中的某种色光，则剩下的是该种色光的互补色，如在白光中滤去红光就得绿光，滤去紫光就得黄绿光，反之亦然。必须注意，属于互

补色的两种色光并不是单色光。

## 二、介质中的光速和波长

按麦克斯韦电磁理论，不同波长的电磁波或光波在真空中均有相同的速率，它由(1-2)式决定，实验上测得的数值为

$$c = 299792458 \text{ (米/秒)}$$

根据(1-1)式，光波在介质中的速率为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

式中 $\epsilon_r > 1, \mu_r \approx 1$ ，数值由介质性质决定。可见，光在不同介质中



有不同的速率，而且总比真空中的光速要小（在介质对光透明的区域）。光波在真空中的速率与在某介质中的速率之比定义为该介质相对于真空的折射率，或简称折射率，用  $n$  表示，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

因为光波的频率由波源频率决定，所以同一光波在不同介质中均有相同的频率。根据波速、波长和频率三者间的关系，光波在介质中之波长  $\lambda'$  为

$$\lambda' = \frac{v}{\nu}$$

既然同一光波在不同介质中有不同的速率  $v$ ，同一光波在不同介质中就有不同的波长。把 (1-3) 式代入上式，得

$$\lambda' = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda}{n} \quad (1-4)$$

式中  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  是真空中的波长。上式表明同一光波在介质中的波长要比真空中的波长小（因一般情况下折射率  $n$  大于 1）。

**例 1-1** 某光波在水中的波长为 440 纳米，问在空气中的波长是多少？已知水的折射率  $n = 1.33$ 。

**解** 空气的折射率接近于 1，光在空气中的波长与真空中的波长近似相等。由 (1-4) 式，空气中的波长为

$$\lambda = n\lambda' = 1.33 \times 440 = 585 (\text{纳米})$$

由图 1-1 可知，该光波呈黄色。

**例 1-2** 频率为  $5.60 \times 10^{14}$  赫兹的光波在空气 ( $n = 1$ ) 中和玻璃 ( $n = 1.52$ ) 中的波长各是多少？

**解** 真空中的波长为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{5.60 \times 10^{14}} = 5.36 \times 10^{-7} (\text{米}) = 536 (\text{纳米})$$

空气折射率为 1，所以在空气中的波长与真空中的波长相同。在玻璃中的波长为