

北 京 大 学 教 材

普 通 物 理 学

(光学和近代物理)

胡望雨 李衡芝 编

北 京 大 学 出 版 社

北京大学教材

普通物理学

(光学和近代物理)

胡望雨 李衡芝 编

北京大学出版社

北京大学教材
普 通 物 理 学
(光学和近代物理)
胡望雨 李衡芝 编
责任编辑: 吴 鹏

*

北京大学出版社出版
(北京大学校内)
北京大学印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 18.75印张 480千字
1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷
印数: 0001—5,000册
ISBN 7-301-01124-5/O·197
定价: 8.85元

前 言

本书是为大学理科非物理类各系、各专业普通物理课程编写的通用教材，是编者在北京大学多年从事教学的基础上编写而成的。

在编写过程中，编者充分注意到物理学自身的系统性，着重基本概念、基本原理和基本方法的阐述；考虑到非物理类各系多数没有物理方面的后继课，在内容的深度和广度上尽可能做到有较丰富的层次，以扩大学生的知识面并有利于因材施教；为适应不同专业的教学要求，在章节的具体安排上充分考虑了相对独立性，以便于教师根据实际需要内容进行选择。

本书第二、六、七章由李衡芝同志编写，其余各章均由胡望雨同志编写；由唐子健同志审定。在编写过程中，得到了北大普通物理教研室各任课老师的热忱帮助；何雪华、陈熙谋、励子伟和舒幼生等同志阅读了初稿的部分章节，提出了宝贵的意见，在此编者对这些同志谨表谢意。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请广大师生和读者批评指正。

编 者

1987年12月

目 录

光 学

第一章 光学总论	(3)
§ 1-1 简短的历史叙述	(3)
§ 1-2 光波的波长·光强	(7)
§ 1-3 波动的数学描述	(12)
思考题	(17)
习题	(18)
第二章 几何光学	(19)
§ 2-1 几何光学的基本定律	(19)
§ 2-2 用惠更斯原理解释反射定律和折射定律	(30)
§ 2-3 费马原理	(33)
§ 2-4 有关成像的基本概念	(37)
§ 2-5 球面傍轴成像	(43)
§ 2-6 薄透镜	(55)
§ 2-7 几何光学仪器	(65)
§ 2-8 照明系统	(76)
§ 2-9 像差	(80)
思考题	(86)
习题	(88)
第三章 光的干涉	(93)
§ 3-1 光波的叠加	(94)
§ 3-2 两相干点光源的干涉	(99)
§ 3-3 分波前干涉	(102)

§ 3-4	光源宽度对干涉条纹的影响及光波的空间相干性	(113)
§ 3-5	薄膜干涉的一般概念	(121)
§ 3-6	等倾条纹和等厚条纹	(128)
§ 3-7	光波的时间相干性和单色性	(146)
§ 3-8	迈克耳孙干涉仪	(149)
思考题		(156)
习 题		(158)
第四章 光的衍射		(163)
§ 4-1	惠更斯-菲涅耳原理	(164)
§ 4-2	夫琅和费单缝衍射	(167)
§ 4-3	夫琅和费圆孔衍射和光学仪器的分辨本领	(179)
§ 4-4	衍射光栅	(184)
§ 4-5	伦琴射线的衍射	(199)
§ 4-6	全息技术原理	(203)
§ 4-7	相衬法和纹影法	(215)
思考题		(220)
习 题		(222)
第五章 光的偏振		(226)
§ 5-1	自然光和偏振光	(226)
§ 5-2	起偏器与检偏器 马吕定律	(232)
§ 5-3	反射和折射时的偏振现象	(237)
§ 5-4	光在晶体中的双折射	(241)
§ 5-5	惠更斯对双折射现象的解释	(245)
§ 5-6	偏振棱镜	(253)
§ 5-7	波片和补偿器	(257)
§ 5-8	偏振光的干涉	(264)
§ 5-9	人为双折射	(273)
§ 5-10	旋光现象	(277)
思考题		(281)

习 题	(283)
-----------	-------

第六章 光的吸收、色散和散射 (287)

§ 6-1 光的吸收	(287)
------------------	-------

§ 6-2 光的色散	(295)
------------------	-------

§ 6-3 光的散射	(305)
------------------	-------

思考题	(314)
-----------	-------

习 题	(315)
-----------	-------

近代物理

第七章 光的量子性 (318)

§ 7-1 热辐射 普朗克的量子假设	(318)
--------------------------	-------

§ 7-2 光电效应 爱因斯坦的光子理论	(332)
----------------------------	-------

§ 7-3 康普顿效应	(342)
-------------------	-------

思考题	(349)
-----------	-------

习 题	(350)
-----------	-------

第八章 狭义相对论简介 (353)

§ 8-1 产生狭义相对论的历史背景	(353)
--------------------------	-------

§ 8-2 洛伦兹变换	(361)
-------------------	-------

§ 8-3 长度的相对性	(365)
--------------------	-------

§ 8-4 时间间隔的相对性	(374)
----------------------	-------

§ 8-5 多普勒效应	(384)
-------------------	-------

§ 8-6 速度的洛伦兹变换	(390)
----------------------	-------

§ 8-7 相对论中的质量、能量和动量	(396)
---------------------------	-------

§ 8-8 光的量子性	(405)
-------------------	-------

思考题	(407)
-----------	-------

习 题	(409)
-----------	-------

第九章 原子光谱和原子结构 (413)

§ 9-1 氢原子光谱的实验规律 (413)

§ 9-2 玻尔假设 (417)

§ 9-3 氢原子的玻尔理论 (421)

§ 9-4 索末非的椭圆轨道理论 (428)

§ 9-5 空间量子化·电子轨道运动的磁矩 (438)

§ 9-6 玻尔理论的贡献和局限性 (443)

§ 9-7 电子自旋量子数和能级符号 (445)

§ 9-8 电子壳层结构和元素周期表 (448)

思考题 (457)

习 题 (458)

第十章 量子力学基础 (460)

§ 10-1 微观粒子的波动性 (460)

§ 10-2 测不准关系 (467)

§ 10-3 薛定谔方程 (473)

§ 10-4 势垒和隧道效应 (477)

§ 10-5 一维线性谐振子 (480)

§ 10-6 氢原子 (486)

思考题 (496)

习 题 (497)

第十一章 激光原理 (498)

§ 11-1 激光概述 (498)

§ 11-2 吸收和辐射 (501)

§ 11-3 产生激光的条件 (506)

§ 11-4 红宝石激光器 (510)

§ 11-5 氦氖激光器 (513)

§ 11-6 激光的单色性 (516)

思考题 (519)

习 题	(520)
第十二章 原子核的放射性	(521)
§ 12-1 原子核的特征及其组成	(521)
§ 12-2 天然放射性	(527)
§ 12-3 放射线的探测	(536)
§ 12-4 核的人工转变和人工放射性	(540)
§ 12-5 放射性同位素的应用	(546)
思考题	(549)
习 题	(550)
附 录	(552)
1 棱镜产生最小偏向角的条件	(552)
2 反射和折射定律的推导	(553)
3 相干长度与谱线宽度	(555)
4 菲涅耳公式的推导	(559)
5 反射前后的相位改变	(564)
6 普朗克黑体辐射公式的推导	(570)
7 由普朗克公式推导斯忒藩-玻耳兹曼定律和 维恩位移定律	(571)
8 电子的椭圆轨道	(573)
9 方程 (10-43) 的解	(577)
10 氢原子的能级公式	(579)
基本物理常数表	(582)
习题答案	(583)

光 学

人类对自然界的考察在很大程度上是靠眼睛对光的视觉效应而实现的，因而对光的研究和应用就成为科学史中最早发展起来的课题之一。但在很长一段历史时期内，人们对光的描述和应用一直停留在相当粗糙和原始的阶段。到15世纪末，虽然透镜、棱镜和凹凸反射镜已相当普及，但在光学理论方面却几乎无所建树，直到17世纪光学才得到真正的发展。斯涅耳 (W. Snell) 于1621年、笛卡儿 (R. Descartes) 于1630年各自独立地提出了折射定律的精确公式；费马 (Fermat) 于1657年首先提出光在介质中所走的路程取极值的原理，并根据这一原理推出了反射定律和折射定律。以后人们就以光的直线传播原理、反射定律和折射定律为基础，用几何学的方法研究光在透明介质中的传播问题，并逐渐形成几何光学 (射线光学) 这门学科。从这一时期开始，人们对光的本性进行了认真的探索。光的干涉、衍射和偏振现象的相继发现，使光的波动理论获得了牢固的实验基础，并形成了波动光学这一重要的光学分支。19世纪中叶，由麦克斯韦 (C. J. Maxwell) 总结的电磁理论，以及由实验所表明的光与电磁现象的一致性，使光的波动理论成为电磁理论中的一个重要组成部分。19世纪末，由洛伦兹 (H. A. Lorentz) 创立的电子论不仅解释了与光在介质中传播有关的一些现象，还在一定程度上解释了光的发射、吸收、散射和色散等光学现象。光的电磁理论在整个物理学发展史中无疑地占有重要的地位。从19世纪末到20世纪初，发现了涉及光与物质相互作用的一系列现象，光的电磁理论在解释这些现象方面遇到了困难，这就导致了光的量子性概念的提出，并为近代物理的发展打开了大门。

我们将以一章的篇幅介绍有关几何光学的基本概念和方法，其它各章介绍经典的波动光学内容。至于光的量子性将在近代物理部分介绍。

第一章 光学总论

§ 1-1 简短的历史回顾

如果把人们对光学现象的最朴素的描述和最简单的应用作为光学发展的最初阶段的话，这就要追溯到很古的时代。早在公元前2000年的古埃及，人们就已知道利用光的反射原理制作铜镜。在我国周代，人们已会用凹面镜取火。公元前400年左右先秦著作《墨经》中就有了关于影、针孔成像、平面镜和球面镜等最早的光学实验记录。但光学在理论上和应用上的真正发展直到17世纪才开始。

光究竟是什么，即光的本性是什么，一直是学者们注意和探讨的中心。在17世纪有两种观点——微粒说和波动说。微粒说认为所有发光物体都发射光的微粒，这些微粒可在真空或透明介质中以巨大速度沿直线运动。首先提出光的微粒模型的是笛卡儿，后来牛顿成为这种观点的代表人物。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。牛顿企图把经典力学中关于粒子和力的概念引入光学领域，并用纯力学规律来解释光的反射现象。这种光的微粒说与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反射一样属于同样的力学过程。为了解释光的折射现象，微粒说认为光微粒通过界面进入另一介质时，其动量将发生变化，从而造成折射。牛顿按此理论导出了光的折射所遵从的规律，根据牛顿的结果，光在较密媒质中有较大的速度，但这与后来发现的事实恰好相反。牛顿用微粒说解释“牛顿环”^[1]时，就更加牵强和

[1] “牛顿环”是首先由玻意耳 (Boyle) 和胡克 (Hooke) 观察到的干涉现象，详见第三章，因牛顿曾用微粒模型解释过成因，故以“牛顿环”命名。

难以令人信服了。当牛顿发现太阳光事实上由许多色光组成后，他又不得不假定存在与各色光相应的多种光微粒。

虽然光的微粒说解释了光的直线传播规律、反射定律和折射定律，但对实验中相继发现的大量干涉、衍射和偏振等现象，微粒理论都无法解释。首先由胡克 (Hooke) 提出，并为惠更斯 (C. Huygens) 所发展的另一种完全不同的观点认为光是一种波动，光的传播不是物质微粒的迁移过程，而是运动能量按波动方式迁移的过程，犹如水面波不是水微粒随波扩散而是水微粒上下振动沿水面的传播。利用首先由惠更斯提出，并以他的名字命名的原理同样可解释微粒说曾解释过的反射和折射现象，而且解释得更简单更自然。

顺便指出，在牛顿对光的本性的认识中，曾认为：与各种色光相联系的光微粒会激发以太进入各种特征振动，并认为红色的感觉对应于以太的最长振动，而紫色则对应最短的振动。这实际上同时包含了微粒和波动两种概念，但后来牛顿更相信微粒说，并拒绝认可当时的波动说。

关于光的本性的上述两种完全不同的理论——微粒说和波动说，究竟谁是谁非，无疑应由实验事实作出评定，由于牛顿在力学上的杰出贡献，使他的微粒说在牛顿时代以及随后的百余年间得到了多数物理学家的支持，而惠更斯的波动理论却几乎无人真正相信。直到19世纪初，经过杨氏 (T. Young) 和菲涅耳 (A. J. Fresnel) 等人的不懈努力，波动说才重新为人们所重视。杨氏做了著名的杨氏干涉实验，这一实验只有用光的波动理论才能得到圆满的解释。1802年杨氏又用波动理论令人满意地解释了牛顿环的成因。约在1816年，菲涅耳用波动理论令人信服地解释了衍射现象，并且计算了各种类型的孔和直边的衍射图样。1808年马吕 (Malus) 观察到光的偏振现象，1816年菲涅耳和阿喇戈 (D. Arago) 一起完成了线偏振光的叠加实验，后来杨氏借助于光是横波的假设成功地解释了这个实验。到此，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、衍射和偏振现象时都获得了巨大成功，从而确立了波动理论的牢固地位。

当时的波动论者认为，一切波动必须在某种介质中才得以传播，如果光是一种波动，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？他们不得不假定存在一种特殊的介质——光“以太”。为与光传播的实验事实相符，必须赋予“以太”种种异乎寻常的甚至互相抵触的特性。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”就必须具有极大的弹性。浸没在“以太”之中的星体并无迹象表明受到了“以太”的阻力，所以“以太”和物质粒子之间没有相互作用力。但光在进入玻璃和水这些透明物质后速度改变了，这只能认为“以太”与物质之间一定发生了某种相互作用，从而改变了“以太”的特性。“以太”的这些不可捉摸的性质曾使许多物理学家大为困惑。

19世纪初，电磁学得到了发展。到19世纪中叶，麦克斯韦总结了电磁场规律，用完整的方程组来描述电磁场。从这一电磁方程组出发，导出了电磁场运动所遵从的波动方程，从理论上预言了电磁波的存在，并证明了电磁波的横波性。麦克斯韦根据电磁波动方程曾指出，电磁波在真空中的传播速度就等于静电单位电量（或电流）与电磁单位电量（或电流）的比值。只要在实验上用静电单位和电磁单位两种不同的单位测量同一电量（或电流）值，就能计算出电磁波在真空中的传播速度。1856年科耳劳希（Kohlrausch）和韦伯（Weber）完成了这些测量，麦克斯韦根据他们的数据计算出电磁波在空气中的传播速度为 $3.1074 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。斐索（Fizeau）在1849年测得的光速值为 $3.1485 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，两者在数值上非常接近这一事实说明电磁波是以光速传播的，光的现象与电磁现象间有着密切的联系。我们知道，光波事实上就是一种电磁波，只是其波长比普通无线电波要短得多。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电磁理论基础。于是光的电磁理论就应运而生了。

电磁理论的产生并没有动摇存在“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，但他同时假定这种力的作用必须借助于某种媒质——电磁“以太”，电磁作用就是在电磁“以太”这种媒质中传播的，电磁波是电磁场扰动在电磁“以太”中的传播过程。既然光波是电磁波，那么惠更斯时代的光“以太”与法拉第和麦克斯韦的电磁“以太”就应是同一种东西了。在19世纪末，人们讨论的中心已不是“以太”是否存在，而是企图从假想的“以太”力学性质来解释电磁过程。麦克斯韦以及后来的赫兹（Hertz）都曾参与过这方面的努力，但均未获得成功。19世纪90年代洛伦兹创立了电子论，他把物质的宏观电磁性质归之于物质中的电子效应，认为物质中的“以太”与真空中的“以太”并无区别，并假定物质运动并不带动“以太”运动。洛伦兹根据他的理论推出了运动介质中的光速公式，并解释了折射率如何随频率而变化。电子论取得了很大的成功，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“以太”论的最终衰落创立了条件。随着电磁理论发展起来的场论在物理学史上无疑具有极重要的意义，它为物理学最终摆脱机械论观点的束缚扫清了道路，这导致了爱因斯坦（A. Einstein）彻底抛弃以太观点并创立了相对论。

光的电磁理论在解决一系列光的传播问题上取得了极大成功，这使19世纪末的物理学家们普遍认为，人们已最终地认识了光的本性。然而，在解释黑体辐射、光电效应及康普顿散射等另一类光学现象时，光的波动理论却遇到了无法克服的困难。为了

解释黑体辐射中能量按波长分布的实验规律，普朗克 (Planck) 于1900年提出了量子的假说，认为辐射体不是连续地而是以量子为单位一份一份地辐射能量的。在此基础上爱因斯坦于1905年重新提出了光的微粒性概念，认为光是由能量粒子——光子组成，从而圆满地解释了光电效应的实验规律。爱因斯坦不仅指出光子具有能量，而且与一般粒子一样具有动量，这在康普顿 (Compton) 的散射实验中得到了证实。作为光微粒的光子自然不同于牛顿所假设的那种机械微粒，而是有了新的和更深刻的意义。

整个光学发展史贯穿着人们对光的本性的探索。光的波动性和微粒性一开始是作为互相排斥的两种不同观点看待的，并经历了此长彼消的历史过程。科学的进步使我们认识到光具有波动性和粒子性的双重性质，这两种性质不是互相排斥，而是相互补充，是同一客观物质——光在不同场合表现出来的两种属性，我们不可能用其中任一属性概括光的全部性质。

正当人们对光的本性和“以太”问题进行不断探索时，几何光学仪器以及基于干涉、衍射和偏振原理的干涉计量仪器、光谱仪器和偏振仪器等应用光学领域一直在不断发展。光学测量成为精密测量和检验的重要手段。本世纪60年代新型光源激光器的发明，为全息术的实际应用开辟了道路，并为光学通讯这一新技术的发展提供了必要的条件。从50年代开始，人们把电讯理论中的基本观点和数学方法系统地移植到光学领域，形成了傅里叶光学这一新学科，它不仅对广泛的光学现象作了新的更深刻的解释，而且为光学信息处理这一新技术提供了理论基础。目前光学与电子学和计算技术的结合，必将在光学领域里产生更为生机勃勃、别开生面的局面。

§ 1-2 光波的波长·光强

光波是电磁波的一种，它与无线电波、微波、X射线和 γ 射线

等其它电磁波并无本质的不同，只是所处的波长（或频率）范围不同而已。光波的波长通常用纳米（nm）或埃（Å）来表示，

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

可见光是指能使人眼起视觉作用的那部分电磁波，它在整个电磁波频谱中只占极窄的频率（或波长）范围。在此间隔内不同频率（或波长）的光波引起人眼的不同色觉。下表列出了各种色光的波长及大致的波长范围：

颜 色	波长/nm	范围/nm
红	700	640—750
橙	620	600—640
黄	580	550—600
绿	510	480—550
蓝	470	450—480
紫	420	400—450

人眼对不同色光的视觉灵敏度是不同的，即人眼在单位时间内接收到相同的光波能量时，对不同色光的强度有不同的主观感觉。或者说，为使人眼对不同色光有相同的强度感受，就要求不同色光以不同的能流进入人眼，所需的能流愈大，相应的视觉灵敏度就愈差。图1-1画出了人眼对不同色光的相对灵敏度曲线。虽然视觉灵敏度带有主观因素，不同的人可得到不同的灵敏度曲线，但对正常眼来说差别不大，根据多次测定，可得到正常眼的平均灵敏度曲线。从图1-1的曲线可知，人眼对波长约为5550 Å的黄绿光最灵敏，可见光波长范围的两边并无严格的界线，如果把人眼的灵敏度降低到最大值的1%处的波长作为可见光的极限波长，则可见光的波长范围就大约在4300—6900 Å之间。这一范围并不很严格，不同的人可略有差别，即使同一人也会因光强和