



曼彻斯特物理学丛书

# 电磁辐射

[英] F.H.Read 著 宓子宏 译 许国保 校

高等教育出版社

# 电 磁 辐 射

[英] F. H. Read 著

宓子宏 译

许国保 校

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书根据曼彻斯特物理学丛书之一“*Electromagnetic Radiation*”(1980年版)译出。全书共分九章,内容有麦克斯韦方程组和电磁波,电磁波的产生和相互作用的经典处理,量子概念的入门,相干性,激光及其性质与应用,电磁辐射的散射、吸收及探测等。每章均附有练习题,并在书末附有部分习题的答案或提示,便于自学和检测。

本书适于大学物理系三年级本科学生以及一年级研究生作为教材使用,也适于从事有关方面研究的科技人员参考。

责任编辑 尹洪

## 电 磁 辐 射

[英] F. H. Read 著

宓子宏 译

许国保 校

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11 字数 260 000

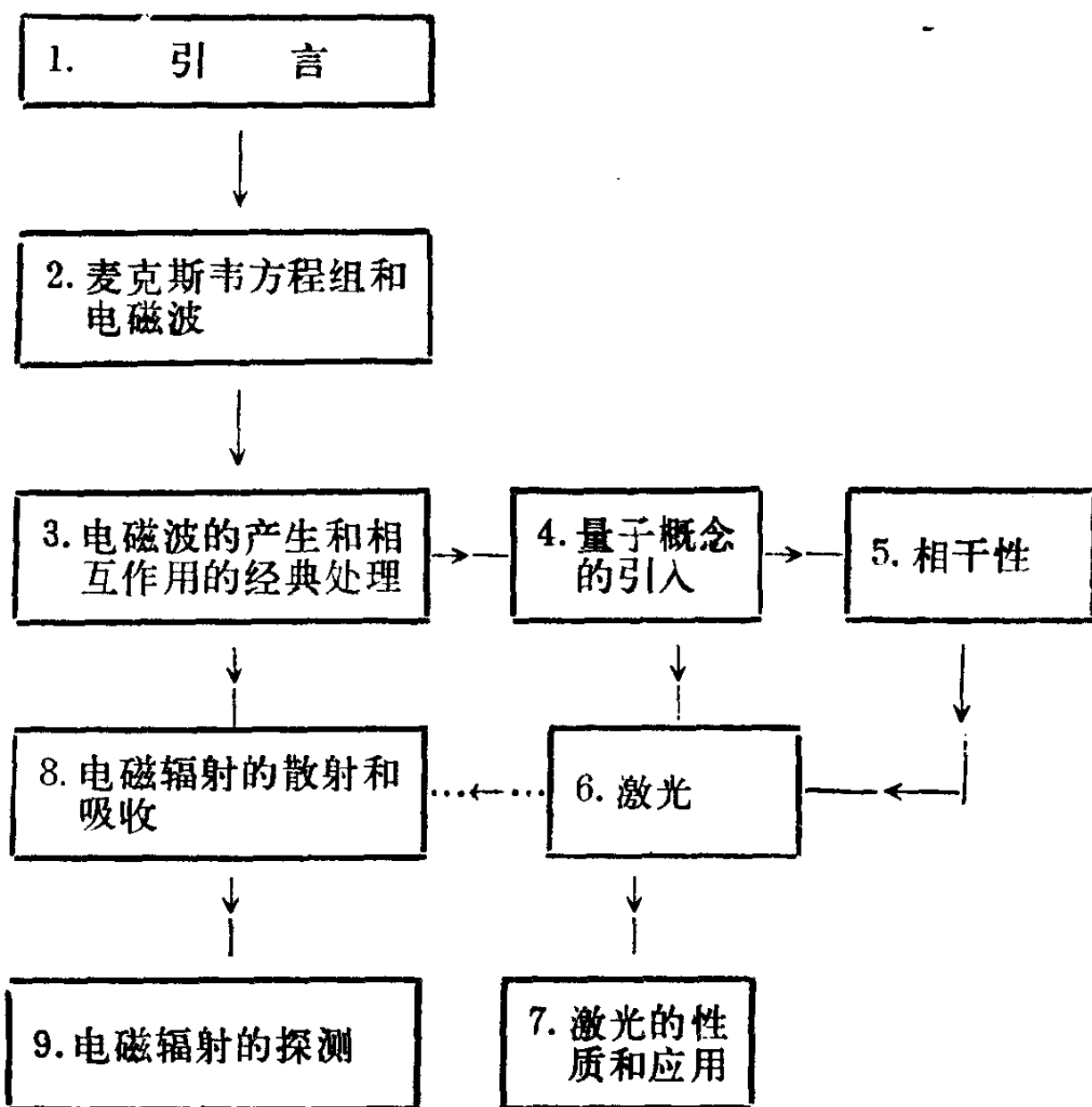
1988年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数 00 001—1 380

ISBN 7-04-000088-1/O·38

定价 3.45元

## 教学流程图



由此流程图可以看出本书各章之间的逻辑关系，虚线表示两章之间的联系但不是必需的。

包含较少内容体系的几个例子：

- (a) 侧重于辐射的经典和量子方面的体系可以取第 1-5 章。
- (b) 强调激光方面的体系可取第 1-4 章以及第 6、7 章。
- (c) 强调散射、吸收和探测过程方面的体系可取第 1-3 章以及第 8、9 章。

## 曼彻斯特物理学丛书主编序言

在制订大学物理学各门课程的大纲时，曼彻斯特大学物理系同人深感难以找到合适的教科书推荐给学生。其它大学的许多教师显然也有同感。大部分教科书的内容过多，学生没有时间加以消化；而且，按照这些书的编排方式，也极少有可能从中选取一些章节，藉以定出一个自成体系、比重恰当的大纲。正是在这种情况下，产生了编写这套曼彻斯特物理学丛书的想法。

曼彻斯特物理学丛书各卷的材料比我们讲课时的内容大约增添了50%。为此，我们对丛书所应包含的课题作了精选。重点放在基础物理学方面，也包含一些深有启发、饶有兴味和富有价值的应用。考虑到各大学对具体课题的处理相差甚远，我们在组织材料时力求便于教师根据不同的份量、难度和不同的应用重点加以选择。为了这一目的，我们鼓励丛书各卷的作者使用教学流程图来表明各章之间的逻辑关系，并把某些节和小节的课题标上星号。这些部分涉及较高深的内容，可供选读而不影响对各卷后继部分的理解。

因为计划把曼彻斯特物理学丛书作为一套体系完整的教材，所以丛书对所阐述的物理学各部分作了通盘安排。各卷深浅程度有所不同：《物性学》适用于第一学年，《固体物理学》适用于第三学年。其余各卷介乎其间，使用时可以有相当大的灵活性。《电磁学》、《光学》、《电子学》和《原子物理学》都是从一年级水平开始，逐步进展为适合二、三年级的课程。《统计物理学》则适用于第二、三学年。丛书各卷的编撰自成体系，可以单独使用。

这套丛书虽然是为英国大学生编写的，但同样适合美国大学一年级以上的课程。在每卷的作者序中，对于所要求的预备知识，

都作了详细说明。

编纂这样一套丛书，必须对采用的单位制作出原则规定。经过尽可能广泛的协商，我们与作者及出版者共同决定，采用国际理论物理和应用物理协会多次建议和详尽解释过的国际单位制 (SI)。电学和磁学量都用国际单位制表示出 (其它单位制在电磁学卷中都有说明)。但是，我们并不认为诸如电子伏特这样的物理单位是不合法的。我们也不拘泥于某些细节，如 10 的因子 (用 0.012 千克是否比 12 克更好?)、缩写符号 (尽管秒的缩写 s 和 sec 对于电子计算机来说并不等同，对于科学家来说却毫无区别) 以及诸如此类的琐碎事项等等。

这套丛书的预印本曾在曼彻斯特大学试用过，并在其它大学的教师中广为流传，因而已经得到许多反应。我们非常感谢曼彻斯特和其它大学的广大师生，他们的批评、建议和有益的讨论有助于这套丛书的最后定稿，使它的撰述增色不少。我们要特别感谢各卷的作者，感谢他们的辛勤工作，感谢他们贡献了许多新概念，感谢他们耐心的讨论和经常接受我们的许多建议和要求。我们也向出版者 John Wiley and Sons 公司表示感谢，他们在各方面给予我们很大帮助，包括对预印本提供的资助。

**F. Mandl**

**R. J. Ellison**

**D. J. Sandford**

于曼彻斯特大学理学院物理系

## 作者前言

本书是作者在曼彻斯特大学讲授电磁辐射课程的基础上编写的。该课程主要是为物理系三年级学生以及少数一年级研究生开设的。对于后者，本课程已成为他们攻读理科硕士学位或取得毕业文凭的课程之一。为了使本书更为统一与完整，还增加了某些二年级课程的入门内容。

电磁辐射这一课题的意图是想把我们所关心的方面单独地综合起来进行讨论。其中首要的是电磁波谱极宽的频率范围，从可应用于水下通讯的频率小于10千赫的无线电波直到作为宇宙射线成分而被观察到的频率大于 $10^{24}$ 赫兹的 $\gamma$ 射线，总跨度大于20个数量级。与这种宽度范围相应的是存在着不胜枚举的电磁辐射的产生和检测技术。在谱的一端，这些技术是完全建立在波动性基础上的，而在谱的另一端，所关心的则仅仅是辐射的光子特性。在谱的广阔中间部分，光的波动性和粒子性都要起作用。对于这种二重性的认识无疑是物理学发展中的一个重要关键。事实上，本课题的一个最有价值的方面也正是这种认识，在这种认识下，我们既可从波动性又可从粒子性相当满意地来解释如此众多的现象。除了所有这些我们所关心的方面外，还有激光，这是一种独特的光源，由于它的理论及其多方面的实际应用，强烈地引起人们的注意。

本书中这些内容是被熔合在一起的，对包括电磁辐射的产生、传播和检测等所有重要方面作了统一而全面的处理。这种程度的教材无论对于英国的还是对于北美的大学物理系三年级学生说来，都是适宜的。

本书先简要地论述较重要的历史里程碑。这样的论述不仅是

因为对于历史探索本身的兴趣,也是因为我们相信,对于该学科直到现时的历史的简要了解将会使学生对以后的学习获得有用的和有意义的看法。在第二章中,我们先简要回顾了麦克斯韦方程组,然后讨论了它的一些推论,经典电磁波的存在以及它们在自由空间和物质中的传播方式。第三章进一步继续讨论经典方法,以证明电磁辐射如何由各种形式电荷的加速运动而产生,其中我们讨论了诸如赫兹偶极子、同步辐射、韧致辐射以及切伦科夫辐射等多种多样的问题,并通过经典观念将它们联系在一起。该章的第二部分讨论了折射过程,从无线电波被电离层的折射直到可见光被晶体的折射,又一次表明有关理论在整个频率范围内的相互一致性。第四章中我们从普朗克的重要贡献出发,讨论了光的量子性。然后引进爱因斯坦关于受激发射的工作,并与量子力学联系起来,我们始终强调这种经典结果与量子结果之间的联系。

第五章中我们则从另一角度出发,先从经典观念后从量子观点考察了光的相干性。接着讨论了汉伯里-布朗和特怀斯的重要实验以及相干测量的实际应用。第六章和第七章讨论了激光,我们先介绍激光的理论,并以最早的激光器——梅曼的红宝石激光器作为例子,然后再介绍某些更重要类型激光器,如染料激光和固体激光器。在该部分的最后;我们从全息照相直到切割和焊接等方面介绍了激光的特性与应用。光的散射和吸收的物理机制是第八章的主要内容,在这一章中我们讨论了诸如太阳日冕对光的散射直到太阳能电池的原理等各种问题,再次作了统一处理。最后在第九章中,我们讨论了检测电磁辐射的各种方法,从应用于红外光的辐射热测量器到应用于 $\gamma$ 射线的核探测器等。

全书内容适用于两学期约40讲课程,但也可选择部分内容,自成体系,以适应较短的一学期的课程。教学流程图显示出各章之间的相互关系,该图下方还列举了适当包含较少内容体系的几



个例子。

广泛挑选的习题列于各章之末，其中不少习题是为了进一步发挥某些内容而设计的。许多习题的答案或列于书末，或包含(或提示)在习题之中。全书采用国际单位(SI)制。

我要感谢我的许多学生，他们对初稿的提问和评论逐步地而肯定地改进了本书的编写。我要衷心感谢物理系的同事们，特别是 T. A. 金, H. 贝克和 R. 布恩博士，他们在某些章节的编写中给了我帮助。我尤其要衷心感谢我的三位同事 R. J. 埃利森, J. S. 格兰特和 F. 曼特尔在本书布局和内容方面的帮助和建议。此外，科学技术史系(UMIST)的 J. 马歇博士在历史细节方面给了我帮助，莱斯莉·伯恩斯小姐极其准确而迅速地打印了最后两稿的手稿，约翰·罗克洛夫特先生绘制了许多原图，在此一并予以感谢。最后我还要感谢我妻子在本书撰写过程中的耐心和理解。

1979年于曼彻斯特      F. H. Read

# 目 录

教学流程图	1
曼彻斯特物理学丛书主编序言	i
作者前言	1
第一章 引言	1
§ 1.1 电磁波谱	1
§ 1.2 光波和光子的历史	2
第二章 麦克斯韦方程组和电磁波	9
§ 2.1 麦克斯韦方程组	10
§ 2.2 电磁波的存在	13
§ 2.3 真空中平面电磁波的能流	22
§ 2.4 平面电磁波在电介质和导体媒质中的传播	24
§ 2.5 电磁波在界面上的反射	27
§ 2.6 辐射压强	35
习题	38
第三章 电磁波的产生和相互作用的经典处理	40
§ 3.1 电磁波的产生	40
3.1.1 电势 $\phi$ 和矢势 $\mathbf{A}$	42
3.1.2 振荡电偶极子的辐射	46
3.1.3 磁偶极辐射和电四极辐射	50
3.1.4 加速电荷的辐射	52
3.1.5 同步加速器辐射	54
3.1.6 韧致辐射	59
3.1.7 “经典”原子的辐射	60
3.1.8 切伦科夫辐射	64
§ 3.2 折射	66
3.2.1 自由电子气体	67
3.2.2 “经典”原子气体	71

3.2.3	在液体和固体中的折射	75
3.2.4	在各向异性介质中的传播	77
3.2.5	非线性效应	81
	习题	84
<b>第四章</b>	<b>量子概念的引入</b>	<b>86</b>
§ 4.1	处于热平衡的辐射	86
§ 4.2	爱因斯坦 $A$ 和 $B$ 系数	95
§ 4.3	跃迁几率的计算	102
§ 4.4	选择定则	107
4.4.1	原子态的角动量和宇称	108
4.4.2	在电偶极跃迁中, 与光子有关的角动量和宇称	110
4.4.3	电偶极子跃迁的选择定则	114
§ 4.5	光学禁止跃迁	116
	习题	123
<b>第五章</b>	<b>相干性</b>	<b>125</b>
§ 5.1	什么是相干性	125
§ 5.2	时间相干性和空间相干性	130
§ 5.3	相干性的测量	134
§ 5.4	来自实际光源的光的相干性	139
5.4.1	来自小的或远的光源的光的空间相干性	139
5.4.2	时间相干性	144
5.4.3	相干性体积	144
§ 5.5	强度相互关系	147
5.5.1	混沌的光	148
5.5.2	光子相互关系	151
	习题	155
<b>第六章</b>	<b>激光</b>	<b>156</b>
§ 6.1	简单的两能级系统	158
§ 6.2	多能级系统	169
6.2.1	红宝石激光器	170

§ 6.3	能级宽度和模式选择	173
§ 6.4	特殊的微波激射器和激光器	183
6.4.1	氨微波激射器	185
6.4.2	气体放电激光器	187
6.4.3	染料激光器	191
6.4.4	半导体激光器	196
	习题	199
<b>第七章</b>	<b>激光的性质和应用</b>	<b>201</b>
§ 7.1	激光的性质	201
7.1.1	谱线的宽度	201
7.1.2	方向性	205
7.1.3	相干性	207
7.1.4	短脉冲的产生	208
§ 7.2	激光技术和应用	211
7.2.1	倍频	212
7.2.2	无多普勒效应光谱学	213
7.2.3	全息照相	218
7.2.4	通讯	223
7.2.5	距离和速度的测量	225
	习题	227
<b>第八章</b>	<b>电磁辐射的散射和吸收</b>	<b>228</b>
§ 8.1	自由电子对电磁辐射的散射	229
8.1.1	汤姆孙散射	230
8.1.2	康普顿散射	233
§ 8.2	由原子和分子所引起的辐射的散射和吸收	238
8.2.1	瑞利散射	238
8.2.2	非弹性散射和吸收	241
8.2.3	喇曼散射	243
8.2.4	光电效应	246
8.2.5	粒子对产生	250
§ 8.3	辐射被固体与液体吸收和散射	254

8.3.1	布里渊散射	254
8.3.2	光电导和光发射	257
	习题	264
<b>第九章</b>	<b>电磁辐射的探测</b>	<b>265</b>
§ 9.1	红外辐射的探测	266
9.1.1	测辐射热器和温差电偶	266
9.1.2	光导探测器	269
§ 9.2	可见辐射的探测	271
9.2.1	光电发射探测器	271
9.2.2	照相术和静电复印	274
§ 9.3	紫外线、X射线和 $\gamma$ 射线的探测	276
9.3.1	气体电离计数器	276
9.3.2	闪烁探测器	284
9.3.3	半导体探测器	297
9.3.4	切伦科夫簇射探测器	301
	习题	301
<b>附录 A</b>	<b>矢量计算中的部分常用公式</b>	<b>303</b>
<b>附录 B</b>	<b>光子的诞生</b>	<b>306</b>
<b>附录 C</b>	<b>辐射场的量子力学处理</b>	<b>311</b>
<b>附录 D</b>	<b>参考读物</b>	<b>324</b>
<b>附录 E</b>	<b>部分习题的答案</b>	<b>327</b>
<b>附录 F</b>	<b>基本物理常数和转换因子</b>	<b>335</b>

# 第一章 引言

## §1.1 电磁波谱

牛顿第一个证明了不同颜色的光束在某些方面本质上是有所区别的。他的好奇心引起建立“著名颜色现象”的演示。他利用玻璃棱镜使通过窗门小孔的一束阳光折射，在对面墙上所看到的不是预期的彩色圆环而是长条形光谱，红色在下，紫色在上。进一步实验还证明各种颜色是不能改变位置的。引用牛顿的原话说“当一种射线从其它类型射线分离出来以后，它就顽固地保持它的颜色，尽管我用了最大努力去改变它”。当然，现在我们知道不同颜色由不同频率表征，它们之间互换显然是不可能的。

牛顿在当时不可能料想到象现在我们所知道的光的“颜色”有很大范围。这个范围是从频率低于 10 千赫的无线电波（用于潜水艇通讯）到频率高于  $10^{24}$  赫的  $\gamma$  射线（作为宇宙线的一部分被观察到的），总的跨度大于  $10^{20}$ ！牛顿所观察到的光谱实际上只是光谱的很小一部分，其频率跨度不到 2 倍。

通过本书的学习，读者将熟悉此光谱的大部分，我们先了解该光谱的整个概貌（如图 1.1 所示）还是很有趣的。图中每一类型的辐射的频率边缘不是严格分开的，有时邻近辐射类型相互之间有重叠，如图所示。图中给出了“颜色”的三种不同而又等价的特征，即频率、能量和波长。它们之间的关系和我们所需的其它数据一起在书末附录 F 给出。当然，我们对光谱最熟悉的部分是能看到的部分，即从波长为 720 纳米的深红到波长为 400 纳米的紫光。

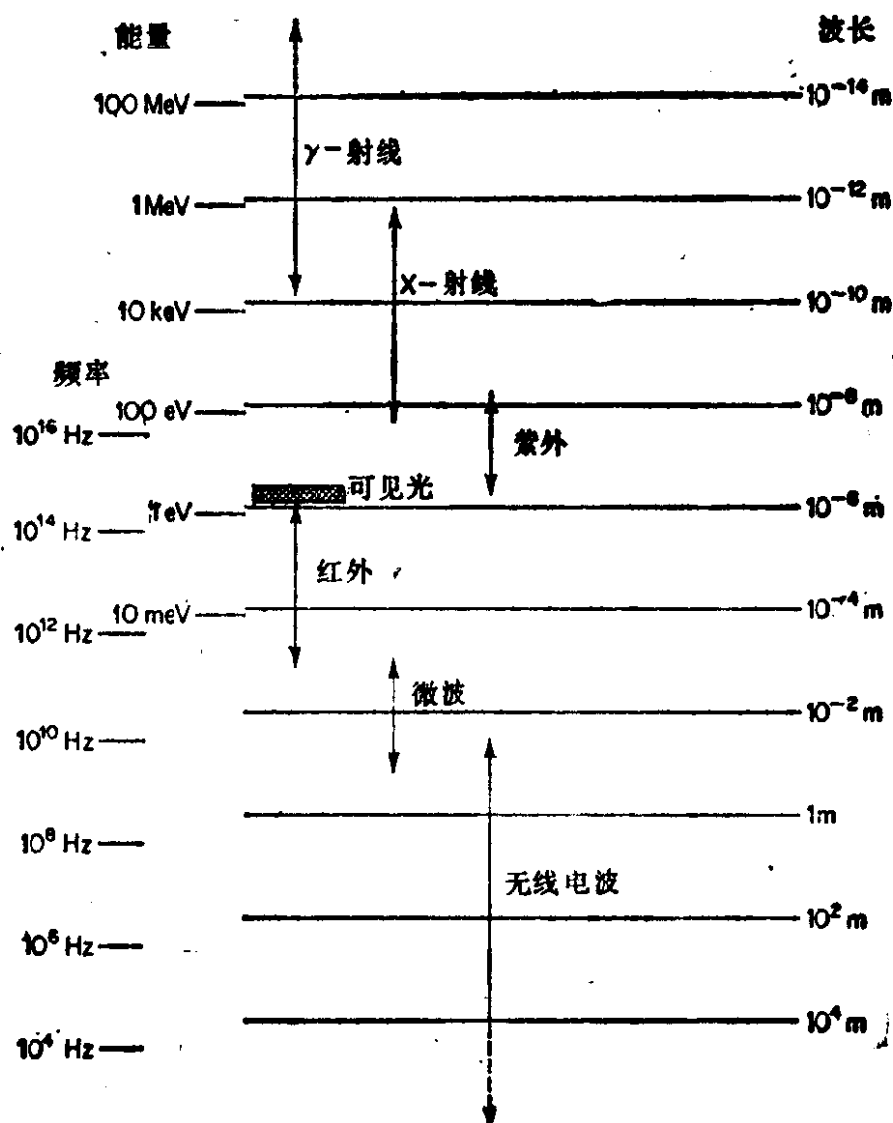


图 1.1 电磁波谱。

## § 1.2 光波和光子的历史

光有两个方面比其光谱的范围更引人注目，这就是光的基本性质这一困难问题，以及由此引起的许多争论。“光是什么？”和“光是由波还是由光子组成？”在过去三个世纪里，这两个问题的确比起物理学中其它学科来，花去了更多伟大科学家的更多的智力和引起更多的回答。虽然我们将涉及这一方面，并企图回答光的本性问题，但是限于篇幅，对历史探索的细节难以多述。为了弥补这点，

我们现在给出比较重要的年代、人名和发现,并对其重要性略加评述而作一个概括。评述必然是简短而且其中有不少是以假定知道些以后章节内容为基础的,不过在现阶段希望读者能够获得他或她将开始学习的这门学科的魅力和深度的一些印象。为了方便,将年代分成7个“时期”,每个时期表示学科中向前发展的一个重要阶段。

**第一时期 考虑粒子模型和波动模型,最后接受波动模型**

- 1621 斯涅耳实验上发现光通过两种介质的分界面时的折射定律。
- 1637 笛卡儿用光的微粒说解释了折射定律并且必须假定粒子在媒质中传播的速度大于在空气中的速度。
- 1657 费马用“自然界总是以最短路径作用”的形式,发表最小时间原理,并且利用此原理导出光的反射定律和折射定律。如果光在媒质中传播的速度小于空气中的速度,就可以解释实验结果。
- 1665 胡克发表他观察到的当白光照射薄膜时产生颜色(事实上,这个现象在胡克以前由玻意耳研究过)的现象,胡克还观察到光并不沿直线传播而通过小角度弯曲到物体的几何阴影内(这个现象也早先由格里马尔迪研究过,并称此现象为衍射)。他提出光是由以太的振动组成的假设,并着手用波阵面偏转来解释折射现象。波阵面在密介质中行进比在空气中慢些。他没有把不同颜色与振动的频率不同或光的其它固有性质相联系。
- 1669 巴塞林斯描述冰洲石使一物体产生两个象的性质(双折射)。
- 1671 牛顿研究了光被棱镜折射而使颜色分离后,不同颜色的光束,本质上在某一方面是不同的。他拒绝接受胡克的假



设，其理由之一，是这个假设似乎不能解释光的直线传播。牛顿提出许多模型，自己没表态（让每个人发挥想象力），但后来的作者采用了微粒模型。

- 1675 牛顿提出，光粒子在一定情况下在以太中产生波动的“假设”。他利用这一假设解释了“牛顿环”，薄膜颜色和直边衍射等。
- 1675 罗默尔观察到木星的卫星的遮蔽时间与木星和地球的相对位置有关，从而发现光速是有限的。
- 1678 惠更斯发展了波动理论，他将波阵面的每一点看作次波的波源。这种理论解释了反射和折射定律，提供了计算双折射中象的相对位置的方法，而且和直线传播相一致。但是这种理论没有尝试去解释干涉和衍射。
- 1704 牛顿发表了他的《光学》（第一版）。在这部著作中1675年“假设”中的光粒子及与其相联系的以太波由受到周期性“痉挛”的粒子来代替。在后来的版本中光粒子还被认为是有“边缘”的，这样至少部分地说明了双折射。
- 1728 布喇德雷报告了恒星的表现方位依赖于地球运动速度垂直于视线的分量的方向。这点可用光粒子的有限速度加以解释。
- 1800 赫谢耳发现红外辐射并且指出辐射热与可见光具有相同的性质。
- 1801 杨氏用不同波列之间的干涉解释了牛顿环。这是光的波动理论开始普遍被接受的标志。
- 1808 马吕斯发现了反射光的偏振。
- 1816 菲涅耳用波动理论计算衍射花样与实验观察相一致。
- 1817 杨氏提出某些偏振现象可以假定光的振动垂直于传播方向来解释。