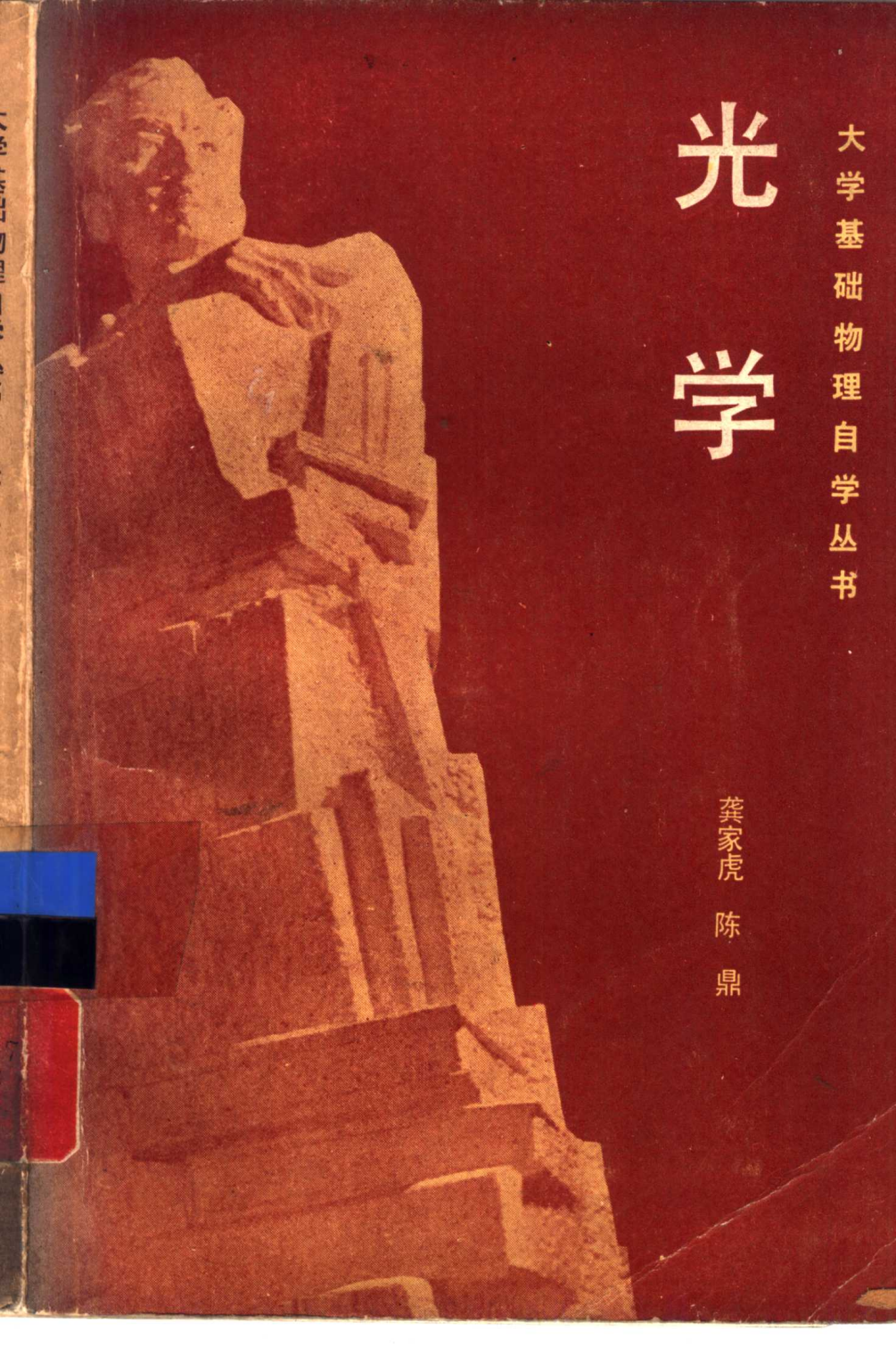


大学基础物理自学丛书

光学

龚家虎 陈鼎



大学基础物理自学丛书

光 学

龚家虎 陈 鼎 编

上海科学技术出版社

大学基础物理自学丛书

光 学

龚家虎 陈 鼎 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

总发行所 上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 12.75 字数 280,000

1984 年 10 月第 1 版 1984 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—17,500

统一书号: 13119·1178 定价: 1.20 元

序 言

为了适应千百万未能进入高等院校的青年自学的需要,上海科学技术出版社在出版中学《数理化自学丛书》的基础上,又组织部分高等院校教师编写《大学基础数学自学丛书》、《大学基础物理自学丛书》和《大学基础化学自学丛书》。这是一件很有意义的工作。支持和鼓励广大在职青年坚持业余学习,让他们能够自学成才,是全社会的责任,也是我们高等学校教育工作者的义务,而在职青年提供合适的自学读物,则是办好业余高等教育事业的一个组成部分。

《大学基础物理自学丛书》是由南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系的有关教师执笔编写的,其中力学(上、下册)由南师负责编写,热学由扬师负责编写,光学由皖师负责编写,电学(上、下册)和原子物理学由江师负责编写。全书共七册,可供具有高中文化程度、立志于自学大学物理的广大读者使用。本书亦可作为全日制高等院校、各类职工大学以及电视大学学生学习普通物理学的参考读物。

“自学丛书”与普通的教材相比,应该具有便于自学,无师自通的特点。本书在编写过程中,尽可能注意到这一特点。在内容的安排上抓住物理学中主要的必不可少的部分讲细讲透,不追求形式上的深而全;文字的叙述力求做到口语化、通俗化;新概念的引入尽量让读者在已有中学物理知识的基础上,通过具体的物理现象和有关实验逐步深化;对于物理公式的推导,在数学的严密性上不作过高的要求。只要读者在自

学本书的同时能自学《大学基础数学自学丛书》，在数学工具上不会发生大的困难。本书每章之首有提要，每章之末有小结，例题和习题按章节编排，每章末附复习题。本书例题较多，这是考虑到读者在自学本书的同时，不必再去翻阅其他参考书的例题。习题多是为了能让读者有选择的余地，并不要求读者对每道题都详细解答。本书附有习题和复习题答案，供读者解题时参考。

本书学习顺序原则上按照力、热、电、光、原子物理的顺序进行，但每种书又各自成系统，读者可按需要独立地选读其中任何一种，也不会有大的困难。

业精于勤，只要读者下定决心，持之以恒地刻苦攻读，相信大家是一定可以自学好大学物理的。

本书编审过程中得到南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系领导的支持以及这些学校许多教师的协助，在此一并致谢。

由于本书编写者水平所限以及出版时间的仓促，书中缺点和错误在所难免，希望读者多加指正。

朱正元

1981年4月于江苏师范学院

目 录

序言

绪论	1
----------	---

第一章 光的基本性质和传播	6
---------------------	---

§ 1.1 光学研究的对象和方法	6
------------------------	---

§ 1.2 光的基本性质	7
--------------------	---

§ 1.3 光的速度	11
------------------	----

§ 1.4 折射率	21
-----------------	----

第二章 光在平面系统的反射和折射	25
------------------------	----

§ 2.1 几何光学和波动光学	25
-----------------------	----

§ 2.2 马吕斯原理和惠更斯原理	26
-------------------------	----

§ 2.3 平面波在平面上的反射和折射	29
---------------------------	----

§ 2.4 惠更斯原理与反射定律、折射定律	35
-----------------------------	----

§ 2.5 全反射 光导纤维	37
----------------------	----

§ 2.6 费马原理	43
------------------	----

§ 2.7 球面波在平面上的反射和折射(近轴光学)	46
---------------------------------	----

第三章 光在球面系统的反射和折射——近轴光学	59
------------------------------	----

§ 3.1 光在单球面上的反射和折射	59
--------------------------	----

§ 3.2 薄透镜和薄透镜系统	78
-----------------------	----

§ 3.3 共轴球面系统成像和理想光学系统成像	88
-------------------------------	----

§ 3.4 共轴球面系统的组合	98
-----------------------	----

§ 3.5 厚透镜 薄透镜系统当作厚透镜	101
----------------------------	-----

§ 3.6 共轴球面系统基点的测定——测节器	107
------------------------------	-----

§ 3.7 实际光学系统的像差	108
-----------------------	-----

第四章 光学仪器原理	132
§ 4.1 光度学的基本概念	132
§ 4.2 光阑	140
§ 4.3 光学仪器成像的亮度和照度	146
§ 4.4 眼睛的结构和调节	148
§ 4.5 放大镜	150
§ 4.6 望远镜	152
§ 4.7 显微镜	155
§ 4.8 复目镜和复物镜	157
§ 4.9 照相机	161
§ 4.10 幻灯机和电影放映机	163
第五章 光的干涉	169
§ 5.1 光波和波动光学	169
§ 5.2 光波的叠加	172
§ 5.3 光的干涉现象和相干条件	176
§ 5.4 由分波面法产生的光的干涉	179
§ 5.5 由分振幅法产生的光的干涉	185
§ 5.6 干涉现象的应用	195
§ 5.7 迈克耳逊干涉仪	200
§ 5.8 法布里-珀罗干涉仪	204
第六章 光的衍射	212
§ 6.1 惠更斯-菲涅尔原理	212
§ 6.2 菲涅尔半周期带	214
§ 6.3 振动螺旋线	217
§ 6.4 菲涅尔圆孔衍射和圆盘衍射	219
§ 6.5 夫朗和斐单狭缝衍射和圆孔衍射	223
§ 6.6 透射光栅	233
§ 6.7 光学仪器的分辨本领	240
§ 6.8 晶体的 X 射线衍射	247

第七章 光的偏振	260
§ 7.1 自然光和偏振光	260
§ 7.2 由反射获得偏振光(罗伦泼耳偏振镜)	262
§ 7.3 布儒斯特定律和马吕斯定律	263
§ 7.4 由折射获得偏振光	265
§ 7.5 菲涅尔公式	266
§ 7.6 双折射	272
§ 7.7 单轴晶体内的波面	275
§ 7.8 由双折射获得偏振光的仪器	280
§ 7.9 由晶体选择性吸获得偏振光	283
§ 7.10 椭圆偏振光和圆偏振光	285
§ 7.11 偏振光的分析	291
§ 7.12 偏振光的干涉	292
§ 7.13 偏振光振动面的旋转	296
第八章 光的吸收、色散和散射	303
§ 8.1 光的吸收	303
§ 8.2 光的色散	305
§ 8.3 吸收和色散的经典理论	313
§ 8.4 棱镜光谱仪	316
§ 8.5 光谱分析	319
§ 8.6 发射光谱分析的应用	323
§ 8.7 大气中的折射、全反射和色散现象	325
§ 8.8 光的散射	329
§ 8.9 散射光的偏振和光强度分布	331
第九章 光的产生及激光	336
§ 9.1 光的产生	336
§ 9.2 空腔热辐射体	337
§ 9.3 光源	342
§ 9.4 激光的基本性质	350

§ 9.5 产生激光的基本原理	355
§ 9.6 纵模与横模	362
§ 9.7 激光器的基本结构	365
§ 9.8 激光的应用	368
第十章 光子	377
§ 10.1 光电效应	377
§ 10.2 爱因斯坦光子理论和密立根实验	380
§ 10.3 光电效应的应用	383
§ 10.4 康普顿效应	386
§ 10.5 光压	390
§ 10.6 光的波粒二象性	391
附录 复习题答案	395

绪 论

人们对光学现象的直观认识很早，我国人民是最早研究光现象的。早在周代，已广泛地用铜锡合金制造平面镜、凸面镜和凹面镜，用以照面和会聚日光取火。在公元前 400 年，我国以墨翟为代表的墨家著作《墨经》中就记载着影的定义和形成，光与影的关系，光的直进性，以及针孔成像的现象和实验。宋代沈括所著的《梦溪笔谈》记载着关于平面、凸面和凹面镜的成像规律以及对虹和海市蜃楼的理解。我国人民在光学上的贡献，有着极其光辉的历史。

在公元 1100 年阿拉伯人阿尔海真 (Alhazen) 发明透镜。到了十三世纪眼镜开始流行。1608 年李普塞 (Hans Lippershey, 1587~1619) 发明望远镜。约在相近期间姜森 (Zacharias Janssen, 1588~1632) 发明显微镜。一直到十七世纪上半叶才由斯涅尔 (Willebrord Snell, 1591~1626) 和笛卡儿 (Rene Descartes, 1596~1650) 将光的折射现象总结为现在所用的折射定律的形式。约与此同时，费马 (Pierre de Fermat, 1608~1665) 确定光在均匀或不均匀媒质中传播所走的路径应符合光程的极值原理。这原理包括了反射定律和折射定律。从上古到十七世纪上半叶，经过漫长的时期才弄清了光的几何性质。

十七世纪下半叶，牛顿 (Isaac Newton, 1642~1727) 和惠更斯 (Christian Huygens, 1629~1695) 等人把光学的研究引上了发展的道路。1665 年牛顿进行太阳光的实验，用太

阳光照射在三棱镜上,光束经折射后,射在光屏上形成按一定顺序排列的彩色长条像,牛顿称它为光谱。牛顿还发现用曲率半径很大的平凸透镜放在平玻璃板上,当用白光照射它时,则见在透镜与玻璃板接触点周围处出现一组彩色的同心环,当用单色红光照射时,则出现一组红暗相间的同心环,这种环称为牛顿环。通常认为牛顿是光的微粒说的创始人,但他在1704年出版的著名的《光学》书中,不仅引用了微粒的观念,还引用了波动的观念。牛顿认为光的直线传播,反射定律和折射定律是有利于微粒说的主要论据。同时他也发现在企图解释阴影边界处有明暗交替的条纹形成时,微粒说就遇到了困难。于是他不得不假说光线可能是时而容易反射,时而容易透射的冲动状态。惠更斯是光的微粒说的反对者,他于1690年在《论光》一书中写道:“光同声一样,是以球形波面来传播的,我把这些球面称为波,因为它们和把石子投在水面上所观察的波相似。”惠更斯粗略地提出了光的波动性,但他始终未提到光的时空周期性。而牛顿却已从牛顿环中看到了光的周期性的表现。他的学说有意义的部分乃是惠更斯原理。这两派学者各持己见,相互争论不已,在整个十八世纪中光的微粒说仍占优势。在这期间格利马尔第(Francesco Maria Grimaldi, 1618~1663)和胡克(Robert Hooke, 1635~1703)已指出光的衍射现象了。

十九世纪初逐步发展波动光学体系,其中尤以杨氏(Thomas Young, 1773~1829)和菲涅尔(Augustin Jean Fresnel, 1788~1827)的著作为代表。菲涅尔并以杨氏干涉原理补充了惠更斯原理而成为惠更斯-菲涅尔原理,不但能解释光的直线传播,而且也能解释光的衍射,成为波动光学的重要原理。进一步观察研究于光的偏振和偏振光的干涉,这也

是波动说的有力论据。两种学说对于折射现象的解释完全对立。依照微粒说的观点，推导出 $n_2/n_1 = v_2/v_1$ ，即两种物质折射率与光在它们里面的传播速度成正比，也就是说，光在光密媒质中比在光疏媒质中传播得快。而依照波动说的观点推导出 $n_2/n_1 = v_1/v_2$ ，即两种物质折射率与光在它们里面的传播速度成反比，也即光在光密媒质中比它在光疏媒质中传播得慢。到了1850年傅科 (Jean Bernard Leon Foucault, 1819~1868)测得了光在水中的速度比在空气中速度小。在这些实践中，微粒说派的学者才肯承认波动说的正确性。

波动说理论有前后两个不同的阶段。最初人们观察机械的弹性横波产生于固体之中，按弹性波在无限大的固体中传播时其传播速度与固体的切变模量 N 和密度 ρ 之间关系有 $v = \sqrt{N/\rho}$ 。人们假定在地球周围空间存在着“以太”，光在“以太”中以弹性横波的形式向前传播。由于天体在这“以太”中运动速度并不减小，所以必须把“以太”看做具有密度极微的物质。同时为了说明光的巨大的传播速度，又必须把“以太”看做具有巨大的弹性模量的物质。对于这样的物质来说，要它有巨大的弹性模量而又密度极微，这是难以想象的，这是波动说的一个内在的矛盾。

1845年法拉第 (Michael Faraday, 1791~1867)发现，当偏振光通过强磁场作用下的媒质时，其偏振面将偏转，这表明光与电磁的相互关系。1864年麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831~1879)建立的光的电磁理论指出，电场和磁场的改变不能局限于空间的某一部分，而是以等于电流的电磁单位与静电单位的比值的速度传播着。光的传播就是这样一种电磁现象。这个理论在1888年为赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857~1894)实验所证实。在麦克斯韦理论中导出光

在真空中速度 c 和光在介质常数为 ϵ_r 导磁系数为 μ_r 的媒质中的速度 v 有下列关系

$$c/v = \sqrt{\epsilon_r \mu_r},$$

而 $c/v = n$ 为媒质的折射率, 所以得出 $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$. 这就给出了物质的光学常数 n 和电磁学常数 ϵ_r 和 μ_r 的关系. 但在光的电磁理论中“以太”的假定依然保持着, 只不过是用电磁“以太”代替了机械“以太”. 1887 年迈克尔逊-莫雷 (Albert Abraham Michelson, 1852~1931; Edward Williams Morley, 1858~1923) 实验想直接从物理上核实“以太”的存在, 然而却得出了否定的结果. 在此基础上, 1905 年爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879~1955) 提出了狭义相对论, 从根本上抛弃了“以太”的概念, 并确立了把电磁场本身看作独立的物理实在的概念.

本世纪初 1900 年普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858~1947) 从空腔热辐射实验规律中提出能量量子化理论. 他认为谐振子的各种频率的能量只能是以一份份的、不连续方式射出, 这种能量基元称为能量子或量子. 在此基础上, 爱因斯坦提出了辐射场的量子化概念, 为量子论的建立奠定了基础. 量子理论是近代物理学发展中的一个重要的基本观点, 它揭示了微观世界的量子规律. 1905 年爱因斯坦用量子论的观点来说明光电效应实验, 提出了光作用于物质时, 光是以最小单位光量子 (或称为光子) 进行的. 1923 年康普顿 (Arthur Holly Compton, 1892~1962) 发现当 X 射线被物质散射时, 其中有些散射光的波长比入射光的波长长. 他应用光量子理论给予圆满地解释并提出了完整的散射理论.

光的波-粒二象性, 并不是光在某一些现象中完全表现为

波动性,在另一些现象中完全表现为粒子性,而是两种性质不能分割,永远共同存在着。光学发展的结果揭露了光具有波粒二象性。

1960年世界上诞生了第一台激光器,光学展现出崭新的局面,现已发展成为众多新的学科和新的技术了。激光与工农业生产、国防建设、医疗卫生以及各种科学技术都发生日益密切的关系。

我国虽然研究光学最早,但长期处于封建统治之下,轻视科学,生产落后。在鸦片战争后又沦为世界各帝国主义所分割的半殖民地的地位。我国人民长期深受三座大山的压迫,就谈不上发展什么科学了。

解放后,我国光学事业突飞猛进,成绩卓著。我国现代光学工业已有很大的发展,有了自己的光学技术队伍,能自制高质量的光学玻璃和人工晶体。掌握整套的光学工艺,不但能生产各种望远镜、显微镜、照相机、电影机和大地测量方面的光学仪器;而且能生产高级精密的光学元件和仪器,如光栅、大型金相显微镜、大型光谱仪、高级经纬仪以及自动记录式的红外分光光度计等,制成了多种新型电光源和大力开展关于激光的研究和应用。以上这些成就在国防建设、工农业生产、交通运输、医疗卫生和科学研究方面的发展都起着重要作用。

尽管如此,目前我国的光学现状与世界先进水平相比还有较大的差距。为此要大力加强科学技术队伍的建设,努力向科学技术现代化进军。

第一章

光的基本性质和传播

§ 1.1 光学研究的对象和方法

光学是研究光的发射、传播和接收以及光与物质相互作用的规律和在各方面的应用的学科。由于光学现象是自然界的基本现象之一,自然界各种各样的物理的、化学的、天文的、气象的……等现象,经常都以光现象反映着它们的内部和外部的运动规律。光学理论在各部门科学中都被广泛地应用着,所以光学是一门基础科学。光学随着人们认识的发展,就其研究方法的差异,可以分为几何光学、波动光学和量子光学等分支。

几何光学:以光在均匀媒质中作直线传播,光射在两种不同媒质交界面上遵循反射定律和折射定律为基础,运用几何运算的数学方法来研究光学元件乃至光学系统对光路的控制作用以及所造成的物像关系,并从而建立和发展光学仪器成像理论和计算方法。几何光学所研究的只是关于光的抽象的客观表现,并未涉及光的内在本质,故其所得的结果对于光的客观规律来说,只具有近似的意义。

波动光学:根据光的波动性,运用波动理论来研究光的传播规律和光的性质。如研究光的干涉、衍射和偏振等现象。

量子光学:根据光的量子性,运用量子理论来研究光与物质之间的相互作用。如研究空腔热辐射、光电效应、康普顿效应等现象。

§ 1.2 光的基本性质

人们对于光的本性的认识, 从十七世纪牛顿的微粒说到惠更斯的波动说, 发展到十九世纪麦克斯韦的电磁说, 再发展到本世纪初普朗克和爱因斯坦的量子说。认识到光是具有电磁本质的物质, 有波粒二象性。在光的传播过程中, 如光的干涉现象等, 矛盾的主要方面是波动性; 而在光与物质相互作用过程中, 如光电效应等, 矛盾的主要方面是粒子性。

1864 年麦克斯韦在前人科学实验的基础上, 发展了电磁现象的理论, 发表了“电磁场的动力论”的论文, 指出电场和磁场的改变不能局限在空间的一部分, 而是以等于电流的电磁单位和静电单位的比值的速度传播着。光振动也是电磁振动, 光波也属于电磁波, 这理论称之为光的电磁理论。

电磁波是用电场矢量 E 和磁场矢量 B 的振动来表征的, 这两个矢量以相同的位相在两个相互垂直的平面内振动。光的传播速度 c 与矢量 E 和 B 的方向相垂直。

1888 年赫兹研究了电磁波的发射和接收, 实验证实了麦克斯韦理论上所预示的电磁波的存在。

光的干涉和衍射现象表明光是一种波动, 光的偏振现象,

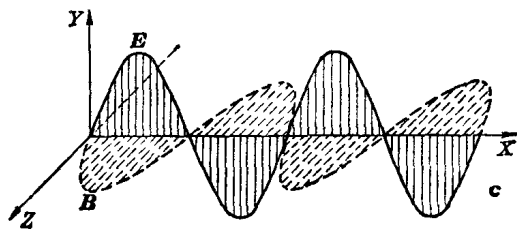


图 1-1 电磁波

进而表明光是横波。而电磁波也有干涉、衍射和偏振等现象，所以电磁波也是横波，在所有这些方面是完全相似的。

再次，根据电磁理论导出电磁波在真空中传播时要传递能量，我们常用坡印亭矢量 $\mathbf{S}$ 来描述，即

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}, \quad (1-1)$$

式中 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 表示电场矢量和磁场矢量的瞬时值。同时，电磁波也必然要输送动量

$$p = W/c, \quad (1-2)$$

此处 W 表示电磁波的能量(焦耳)， c 为光速(米/秒)，则动量 p 的单位为(千克·米/秒)。光流也具有能量和动量，那么当光照射在物体上，必然要施加压力，称为辐射压力(光压)。这样的力同我们日常生活中所经验的力比较起来很小。约在麦克斯韦预言这种效应的 37 年后，即 1901 年列别捷夫测定了光压。

现在讨论光照射在三种不同物体的情况，即光被物体全部吸收或全部反射或一部分吸收一部分反射的情况。

设有一束平行光照射在物体上，经历 t 秒后，如果入射光全部被物体吸收，在这期间物体所吸收的能量为 W ，那么入射光给予物体的动量

$$p = W/c \quad (\text{全部吸收}). \quad (1-2a)$$

如果光能量 W 在物体上全部被反射，则给予物体的动量 p 为 (1-2a) 式的二倍，即

$$p = 2W/c \quad (\text{全部反射}). \quad (1-2b)$$

如果光能量 W 在物体上吸收一部分，同时又被反射一部分，则给予该物体的动量将介乎 W/c 与 $2W/c$ 之间。设物体表面反射系数为 $\rho < 1$ ，则有 $(1-\rho)W/c$ 被吸收，而有 $\rho W/c$ 被