

菲涅耳与波动光学

王长荣

一、科学渊源与历史背景

光是什么？是波，还是粒子？这个问题的争论由来已久，并一直萦绕在许多科学家的脑海里。

虽然光学的起源可以追溯到远古时代，但是光学形成一门独立的学科体系，还是在16、17世纪实验科学发展的推动下促成的。15世纪末~16世纪初，欧洲的玻璃制造业已相当发达，到16世纪末，眼镜的使用已很普遍，眼镜制造业已成为一个十分健全的工业。而望远镜和显微镜的发明，则是17世纪初光学仪器发展的最大成就。与之相适应，在这一时期，也就出现了以胡克(R. Hooke, 1635~1703)描述显微观察的专著《显微学》为代表的光学著作。

作为早期光学研究的先驱之一，牛顿(Newton Isaac, 1642~1727)还在剑桥大学读书时，就开始了光学问题的研究，1666年，他做了著名的棱镜色散实验，继而成功地研制了反射望远镜。1671年得出了“光和色的新理论”，这是牛顿提交给皇家学会的第一篇论文，也正是以这篇论文为起点，引发了牛顿的微粒说与惠更斯(Huogens Christian, 1629~1695)、胡克的波动说之间的长达300年的论战。牛顿的光学研究具有独特的风格，1704年，在他出版的《光学》一书中明确地指出：“不是用假设来解释光的性质，而是用推理和实验来提出并证明这些性质”，他提出了19个命题，33个实验，并以大量篇幅详细描述了实验装置、实验方法和观测结果。从实验和观察出发，进行归纳综合，总结出一套完整的理论。由于光的微粒说能很容易地解释光的直线传播及部分日常现象，因此，牛顿对光的本性的看法，更多地倾向于微粒说。而与牛顿同时代的科学家惠更斯、胡克则坚定地认为光是一种波，极力主张波动说，在胡克的《显微术》一书中，他即明确提出“光是一种波”，在对薄膜颜色作出解释的时候，也已初步触及了光的位相差这一波动的重要概念。

惠更斯则可以认为是波的波动说的奠基者或代言人，惠更斯肯定地认为：光是一种波动，而且是以以太介质传播出来的纵波，在波动说的粗糙轮廓上初步建立了光的波动观点。1678年他向法国科学院报告了自己的论点，继而在1690年出版的《论光》

一书中，全面阐述了自己对光的波动说的论述，提出了著名的惠更斯原理，形成了以惠更斯为代表的波动说理论。

但是，惠更斯等人的波动理论，由于缺乏数学基础，也不能解释当时实验上已经观察到的光的干涉、衍射、偏振现象等实际问题，因而显得并不完善。相比之下，18世纪法国牛顿学派全面发展了牛顿力学，把牛顿力学建造成为了一个非常壮丽而完善的体系，光的微粒说正好包括在这个完美体系之中。比起牛顿的微粒说来，早期波动说更缺乏数学的完美性，加之由于人们对权威的崇拜，也由于当时波动说还不完善，因而到了18世纪后期，大部分人都接受了光的微粒说，而基本放弃了光的波动观点。

二、菲涅耳生平简介

法国物理学家、土木建筑工程师奥古斯丁·琼·菲涅耳(Augustin Jean Fresnel, 1788~1827) 1788年5月10日出生于法国诺曼底布罗意城的一个建筑师家庭。自幼身体多病，8岁时才上学读书，但成绩优秀，尤以数学见长。1806年毕业于巴黎工艺学校后，就读于巴黎路校学院。1809年毕业并取得土木工程师文凭。大学毕业后，当了8年工程师后，作为法国保皇党员，因参加反对拿破仑从厄尔伯岛回国的军队组织而丢掉了职位，直到路易十八复位，他才又当上工程师。1814年起，他开始研究光学，1815年开始发表相关论文。1823年成为法国科学院院士，1826年成为英国皇家学会会员，并获伦敦皇家学院伦福德勋章。菲涅耳具有高超的实验技巧和才干，他长年不懈地勤奋工作，获得了许多内容深刻和数量正确的结果。他的科学研究都是在业余时间和艰苦的条件下进行的，仅靠微薄的收入来维持自己的研究工作。这花费了他有限的收入并损害了他的健康。因而正当他科学事业上硕果累累的时候，健康状况却进一步恶化，1824年，因严重的咯血而不得不终止了科学活动。1827年7月14日终因肺病医治无效而在阿夫赖城逝世，年仅39岁。

三、菲涅耳与波动光学

从1815年菲涅耳发表第一篇光学论文起，到1824年他因健康原因而不得不终止科学研究的10

年时间里,菲涅耳在波动光学的研究和发展上取得了一系列重大的研究成果。

初试锋芒的 1815 年 1814 年起,年轻的菲涅耳开始研究光学的衍射现象,在不知道托马斯·杨(Thomas Young,1773~1829)已经做了双缝干涉实验并提出干涉原理的情况下,将一根细直而光滑的线放在点光源发出的光束中,在屏上看到了彩色条纹,他精心而准确地在屏上测定了从光束的轴线到所产生的条纹的距离。他注意到,当通过细线一边的光到达屏之前被物体挡住时,屏上影内的光带就消失了,这个实验初步将菲涅耳引向发现干涉原理。但当时有不少科学家不承认这种现象是由于干涉造成的,而按当时流行的衍射理论进行分析。为了消除人们的反对意见,菲涅耳设计了双面反射镜,利用双面镜的反射得到相干光,产生了明晰的干涉条纹,避开了衍射的一切因素,实验的结果,充分肯定了光的干涉现象的存在。

1815 年 10 月,菲涅耳向法国科学院提交了一篇关于衍射的研究报告。在报告中,菲涅耳根据波的迭加和干涉原理,提出了“子波相干迭加”的概念,对惠更斯原理作了物理上的补充。他认为:从同一波面上各点发出的子波是相干波,在传播到空间某一点时,各子波进行相干迭加的结果,决定了该点的波振幅。为了进行定量的计算,他具体提出了 4 点假设。由此得出在空间某点 P 的光矢量 \vec{E} 的大小应由积分公式

$$E = C \frac{k(\lambda)}{r} \cos[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda})] ds$$

来决定。这个由相干迭加发展的惠更斯原理现在被人们称为惠更斯-菲涅耳原理。是以标量场描述光波的定性和半定量理论。菲涅耳依据他补充了的惠更斯原理而得出的关于衍射光矢量的积分公式,60 年后被基尔霍夫(Kirchhoff Gustav Robert,1824~1887)用数学方法严格证明。惠更斯-菲涅耳原理从根本上指明了一切衍射条纹本质上都是由于衍射光相干形成的这样一个最基本的事实。用次波相干迭加的思想将所有衍射情况引到统一的原理中来,将光的干涉和衍射理论提高到一个新的水平。1837 年,巴比涅(A. Babinet,1794~1872)用互补屏原理进一步阐释了这一原理所蕴含的物理思想。

菲涅耳半波带法是菲涅耳在 1815 年取得的另一项重要成果。它是利用惠更斯-菲涅耳原理来计

算从点光源发出的光在传播到任一观察点 P 时的振幅,只要把球面波面相对于 P 点分成半波带,而将第一个带和最末一个(第 K 个)带所发的次波相加或相减即可。用公式表示即为: $A_k = a_1/2 \pm a_k/2$, 式中的正、负号按 K 为奇数或偶数而定。K 为奇时取正, K 为偶时取负。K 值越小,衍射现象越明显。从波动理论出发,解决了影的生成原理,回答了惠更斯原理所不能圆满解释的一个难题。菲涅耳半波带法构思之精妙,还在于无需什么数学推导,便能得知衍射条纹形成的概貌。

菲涅耳公式的形成 光波通过不同介质的分界面时会发生反射和折射,入射光分为反射光和折射光两部分。此两光束的进行方向之间的关系虽可由反射和折射定律决定,但二光束的振幅和振动取向却不能决定。菲涅耳以光是横波的设想为基础,把入射光分为振动平面平行于入射面的线偏振光和振动面垂直于入射面的线偏振光,导出了光的折射比、反射比关系的菲涅耳公式。由菲涅耳公式可以求出一定入射角下反射和透射的相对振幅,也可从振幅的平方求出强度。可以很好地解释光的反射与折射的起偏问题、内全反射现象及半波损失。菲涅耳公式作为光学和电磁理论的一个重要基本公式,在现代薄膜光学及电磁现象中均有极为广泛的应用。

挑战权威 1818 年,为了进一步鼓励用理论解释光的衍射现象,当时的法国科学院进行了一次悬赏征文竞赛,两个竞赛题目是: 利用精确的实验确定光学的衍射效应, 根据实验,用数学归纳法求出光线通过物体附近的运动情况。竞赛委员会的本意是希望通过这次征文,鼓励用微粒说解释衍射现象,以期取得光的微粒说的决定性的胜利。主持这项活动的著名科学家毕奥(J. B. Biot,1774~1862)、拉普拉斯(P. S. M de Laplace,1749~1827)、泊松(S. D. Poisson,1781~1840)都是坚定的微粒说者,盖·吕萨克(Gay-Lussac,1778~1850)持中立态度。但菲涅耳不畏权威,坚持以波动的观点解释上述物理命题,在竞赛委员会另一著名科学家阿拉果(D. F. J. Arago,1786~1853)的支持下,年轻的菲涅耳向科学院提交了应征论文,他以严密的数学推理,从横波观点出发,圆满地解释了光的偏振,用半波带法定量计算了圆孔、圆板等形状的障碍物所产生的衍射花纹,推出的结果与实验符合得很好。但菲涅耳的波动理论遭到了光的粒子说者的反对,泊松运用菲涅

耳的方程推导出一个关于盘衍射的奇怪结论:如果这些方程是正确的,那么当把一个小圆盘放在光束中时,就会在小圆盘后面一定距离处的屏幕上出现一个亮斑,泊松认为这是不可能的,所以他宣称驳倒了波动理论。面对这一诘难,菲涅耳没有退缩,而是勇敢地接受了这一挑战,在阿拉果的帮助下用实验检验了这个理论预言:影子中心的确出现了一个亮斑(我们现在称之为“泊松亮斑”),非常精彩地证实了这个理论的结论,使评奖委员会大为叹服。正如毕奥所说:“从这样的观点出发,菲涅耳能特别严格地把所有衍射现象归于统一的观点,并用公式予以概括,从而永恒地确定了它们之间的相互关系。”毫无疑问,巴黎科学院把最佳论文奖授予了年仅30岁的业余研究者菲涅耳。这也成就了科学史上的一段佳话,波动理论在这场竞赛中赢得了新的辉煌的胜利。在理论与事实面前,微粒说的观点开始动摇了,许多人放弃了它而开始相信光的波动理论。

1818年,菲涅耳在理论上的另一重要贡献是导出了光在以太参照系中运动物体内的速度公式,也就是菲涅耳的运动物体中的光速公式。他指出:透明物体中以太的密度与该物质的折射率 n 的平方成正比。由此他假定:当一个物体相对于以太参照系运动时,其内部的以太只是超过真空中以太的密度那部分才被物体所带动。即“部分曳引假说”。菲涅耳由此得出光在以太参照系中运动物体内的光速

$$c = \frac{c}{n} \pm (1 - \frac{1}{n^2}) v \cos \alpha,$$

式中 c 为真空中的光速, v 为物体的运动速度、 $(1 - 1/n^2)$ 为拖曳系数, α 为 v 与 c 之间的夹角。这个结论于1851年被菲索(A. H. L. Fizeau, 1819 ~ 1896)水文实验所验证,后来也为洛伦兹的电子论推导所证实。

光的横波性的确定 完成光的横波性的理论与实验,是菲涅耳对波动光学的又一重要贡献。马吕斯(E. L. Malus, 1775 ~ 1812)是与菲涅耳同时代的科学家。1808年,他在研究光的偏振现象时得出了偏振与光的入射角有关的论断。1811年,这个论断被布儒斯特(Sir. David Brewster, 1781 ~ 1868)通过实验所证实。对这一现代物理学的新分支,当时人们虽然弄清了偏振光的一系列特性,但许多人仍然试图用微粒说来解释,就连马吕斯本人也认为偏振是对波动说的否定,偏振现象的发现,使光的波动说

面临着严峻考验。

菲涅耳再次接受了这一挑战,受托马斯·杨(以下简称T. 杨)的启发,在1816年至1818年间,菲涅耳与阿拉果合作,做了一系列实验,得出了一个重要的结论:同一方向上偏振的一对光束和普通光完全一样地相互干涉;但相反方向上偏振的一对光束不显示出相互作用。1819年,菲涅耳和阿拉果联名发表了《关于偏振光线的相互作用》,对偏振现象的物理机制和实验情况做出了相应解释,但是当菲涅耳指出,只有横向振动才有可能把这个事实纳入波动理论时,阿拉果表示自己没有勇气发表这类观点,于是论文的第二部分乃是以菲涅耳一个人的名义发表的。当时弹性力学尚未形成一般的系统理论,上述结论的后期工作都需要菲涅耳自己去完成。经过3年的深思熟虑,菲涅耳终于在1821年满怀信心地将光的横波理论公诸于世。菲涅耳以光的横波性理论圆满地解释了偏振现象,而且还得出了一系列其它重要结论,其中包括振动面转动理论、反射和折射理论、双折射理论。光振动是横向的这个假设是非常大胆的。因为根据弹性理论,在稀薄的以太里是不可能产生横向振动的。光的横波性的理论的建立,是波动光学又一里程碑式的成功。

四、菲涅耳与阿拉果和T. 杨

菲涅耳能在波动光学上取得一系列辉煌成就与阿拉果和T. 杨的合作和支持是分不开的。T. 杨是一位多才多艺的人,曾获得医学博士学位,他是一位医生、哲学家、数学家、物理学家,在考古学、音乐和绘画上也都有较高的造诣。他是英国皇家学会会员,并兼任学会的对外书记。1793年,发表了关于生理光学的论文《对视觉过程的观察》,1800年,形成了他对光的本质的看法,提出了“干涉”的概念,1801年做了著名的杨氏双缝干涉实验。在1800年出版的《自然哲学讲义》一书中,全面论述了他对光学的实验和理论。1817年,在解释光的偏振现象时,杨觉察出如果光的振动不是象声波那样沿运动方向作纵向振动而是像水波或拉紧的琴弦那样垂直于运动方向作横向振动,问题或许可以得到解决。他把这一想法告诉了阿拉果,阿拉果立刻将这一启示告诉了菲涅耳,从而大大加强了菲涅耳对所采用的理论的信心。

但杨的观点却受到了当时一些顽固守旧的微粒说的信奉者的猛烈攻击,遭到了许多非难。布鲁厄

姆(Henry Brougham)等人在《爱丁堡评论》等著名杂志上连续撰文攻击他的理论“没有任何价值”“没有值得称之为是实验或发现的东西”,甚至“阻碍科学的进展”,嘲笑他是一个“口出狂言的梦呓者”。T. 杨对此感到十分厌恶,以致被迫放弃研究光学达 10 年之久。后来由于菲涅耳用严密的数学理论将杨的干涉原理和惠更斯原理结合起来,T. 杨的理论的重要性才为人们所理解。因此有评价说:“T. 杨和菲涅耳是复活和完善波动说的两员大将。”

阿拉果是带有传奇色彩的人物,他从 1806 年(当时仅 20 岁)起参加测量纬度委员会,同毕奥一起进行测量工作,其间曾因间谍嫌疑几次被捕过,后来成为皇家天文台台长。1848 年任临时政府的海军大臣,因此法国在 1986 年发行的纪念阿拉果的邮票上说他是物理学家和政治家。1852 年法国恢复帝制时阿拉果拒绝宣誓,次年 10 月在巴黎去世。

阿拉果性格开朗,坦率热情。在光学和磁学的研究上都有重要贡献。他和菲涅耳合作光学多年,取得了一系列成果,可以说是菲涅耳的波动观点影响了阿拉果,也可以认为是阿拉果发现并培育了菲涅耳。在早期的波动光学研究中,只有阿拉果支持菲涅耳的观点。当时他和潘索受法国科学院征文竞赛委员会之命报告菲涅耳的第一篇论文,在仔细地研究了这个问题之后,他成为法国第一个改信波动说的人,在菲涅耳的征文遇到泊松的诘难时,又是阿拉果挺身而出,向菲涅耳伸出了友谊之手,他对泊松提出的问题进行了检验,用实验事实支持了菲涅耳的波动说。在进行光的横波性的论证中,是阿拉果及时地把 T. 杨的光的振动类比于绳索振动的设想告诉了菲涅耳,虽然菲涅耳当时已经独立地领悟了这个思想,但杨的想法还是极大地鼓舞了他的信心。他立即以这一假设解释了偏振光的干涉现象,奠定了光是横波的理论基础。阿拉果做了很多实验,在波动光学方面做出了许多贡献。甚至为此还与毕奥进行了激烈的争论,以致一度曾经亲密合作的两个人变得疏远了。阿拉果坚信波动说,但在确定光的偏振性的关键问题上,阿拉果却表示自己没有胆量发表这样的观点,在关键问题上令人遗憾地采取了暧昧态度。

菲涅耳、T. 杨和阿拉果是波动光学发展中的中流砥柱,三位科学家为了共同的科学追求目标,亲密合作,坦诚相助,他们之间不存在任何优先权益之

争,这在科学史上并不多见,他们之间的互相谦让和鼓励也令人感动。但是就波动光学本身的发展来看,应该说,菲涅耳的贡献和功绩远在杨、阿之上,他在波动光学上的双面镜干涉实验、惠更斯-菲涅耳原理的提出、半波带法、菲涅耳公式及光的横波性的理论和实验等五项重大研究成果,决定了他在波动光学建立过程中第一人的地位。也正是因为年青的菲涅耳在巴黎科学院举行的以解释衍射现象为内容的有关竞赛征文中获得了优胜之后,才开始了光的波动说的兴旺时期。菲涅耳是真正的第一位在牛顿物理学中打开缺口的科学家。他在波动光学上的贡献是他所在时代无人能比的。有关部分纪念 T. 杨的文章在为 T. 杨因受到不公正待遇而鸣不平时说:“T. 杨是一位辛勤的播种者,而菲涅耳则是一位坐享其成的收获者”;这种评价应该是不确切的,事实上,T. 杨的理论一直被压制了近 20 年,直到菲涅耳提出他的波动理论之后,T. 杨的理论的重要性才被认识,才获得了应有的荣誉;因此,“他首先要感谢著名的法国人菲涅耳和阿拉果,感谢他们恢复了他的权利。”

菲涅耳在他短暂的一生中,为波动光的建立付出了艰苦的劳动,取得了巨大的成功,是 19 世纪波动光的集大成者。他在家境贫寒、健康不佳的情况下,以惊人的毅力、勇气和高效率,在科学研究的道路上奋力攀登。他不畏权威,坚持实事求是的科学精神,充分发挥自己的想象力和创造力,以实验为依据,以严密的数学推理论证和极富创造性的观点,解决了光的波动理论所遇到的一个又一个困难。菲涅耳的研究成果,开创了光学研究的新阶段,标志着光学进入了一个新时期。菲涅耳及其同伴们在波动光学方面的开拓性贡献将永放光辉。

(浙江科技学院物理系 310023)

