

国家哲学社会科学创新基地专项资助
上海“十一五”重点图书

科学大师启蒙文库

薛定谔

丛书主编：徐 飞
本卷编译：赵晓春 徐 楠



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



Erwin Schrödinger
1887~1961

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t)$$

- 国家哲学社会科学创新基地专项资助
- 上海“十一五”重点图书

科学大师启蒙文库

薛定谔

丛书主编 徐 飞

本卷编译 赵晓春 徐 楠

上海交通大学出版社

内 容 提 要

埃尔温·薛定谔是奥地利理论物理学家,1933年和英国物理学家狄拉克共同荣获诺贝尔物理学奖,被称为量子物理学之父。薛定谔曾以热力学、量子力学和化学理论解释生命现象,引导人们用物理学、化学方法去研究生命的本质,因此,他也是当今蓬勃发展的分子生物学的先驱。

薛定谔一生著作丰硕,本书选其经典部分汇集成书,主要侧重于大师对科学与社会的思考,尤其是其科学思想、科学方法和科学认识论方面的论述。本书不但可以为科技工作者的科研创新提供思想方法的启迪,也为我们认识大师的精神世界打开一扇窗口。

图书在版编目(CIP)数据

薛定谔/赵晓春,徐楠编译. —上海:上海交通大学出版社,2009

(科学大师启蒙文库/徐飞主编)

上海“十一五”重点图书

ISBN978-7-313-05588-0

I. 薛... II. ①赵... ②徐... III. 薛定谔,
E. (1887~1961)—思想评论 IV. K835.216.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 008411 号

科学大师启蒙文库

薛定谔

赵晓春 徐楠 编译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:15.75 字数:254 千字

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

印数:1~3 030

ISBN978-7-313-05588-0/K 定价:29.00 元

版权所有 侵权必究

身 读

埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger, 1887 ~1961)是奥地利理论物理学家,波动力学的创始人,量子力学的奠基人之一,1933年和英国物理学家狄拉克(Paul Adrie Maurice Dirac, 1902~1984)共同获得诺贝尔物理学奖,被称为量子物理学之父。

薛定谔 1887 年 8 月 12 日出生于奥地利首都维也纳。父亲鲁道夫·薛定谔(Rudolf Schrödinger, 1857~1919)继承了家族的油布工厂,使薛定谔从小生活在比较优裕的家庭环境中。父亲对薛定谔的早期教育具有决定性的影响。薛定谔在回忆父亲时说:“对于他的成长中的儿子来说,他是一个朋友,一位老师,也是一名不知疲倦的谈话讨论的伙伴;他是一个陈列着所有吸引我、令我着迷的事物的殿堂。”

1898 年,11 岁的薛定谔进入维也纳高等专科学校预科学习,他的天赋和学习能力很快在学校中表现出来。他曾这样总结自己的中学生活:“我是一个好学生,我并不注重主课,却喜欢数学和物理,但也同样喜欢古老语法严谨的逻辑。我讨厌的只是死记硬背那些偶然的歷史事件和人物传记中的年代等各种数据。”他说:“我喜欢德意志帝国的诗人和作家,尤其是剧作家,但是厌恶对他们的作品做学究式的繁琐分解和考证。”薛定谔在中学时期兴趣广泛,尤其对古希腊哲学兴趣浓厚。1948 年 5 月在伦敦国王学院作系列演讲时,在开场白中,他解释自己回到古希腊思想的动机时说:“对古希腊思想家的叙述和对他们观点的评论,并非出于自己近年来的嗜好,从理论物理学专业的角度看也不是茶余饭后闲暇中的消磨时光,而是希冀这有助于理解现代科学,特别是量子物理学。”他的这些演讲,经过修改补充后以《自然与希腊》为书名出版。

1906 年,薛定谔以首屈一指的成绩通过毕业考试,进入维也纳大学,主修他喜爱的物理学和数学。奥地利杰出的理论物理学家玻耳兹曼^①

^① 德裔奥地利物理学家,统计力学的奠基人,原子论的捍卫者,一直活跃在物理学与哲学的论坛上,创立的玻耳兹曼常数在物理学界具有相当重要的地位。

(Ludwig Boltzmann, 1844~1906)奠定的科学传统和哲学倾向,极大地影响了薛定谔的工作和思想。薛定谔曾深情地说:“玻耳兹曼的思想路线可以称为我在科学上的第一次热恋,没有别的东西曾如此使我狂喜,也不会再有什么能使我这样。”薛定谔把主要精力用于选修哈泽内尔^①(Friedrich Hasenoehrl, 1874~1915)的几乎所有理论物理学课程。正是从哈泽内尔的讲授中,他掌握了以后工作和研究的大部分基础知识。后来,薛定谔在1929年曾说,他作为一名科学家个性的形成,要归功于哈泽内尔;1933年获得诺贝尔物理学奖,发表获奖演说时,他甚至坦率地表白道:“假如哈泽内尔没有去世的话,那么现在他当然会站在我的位置上。”

薛定谔于1910年从维也纳大学毕业,获得博士学位,其理论才华已经显示得相当充分。同年秋季按规定服兵役一年,次年秋天回到维也纳大学,开始了他的研究生涯。此后的十年时间,他潜心研究,从1910年到1914年不到四年的时间里,薛定谔作为埃克斯纳(Franz Serafin Exner, 1849~1926)的助手,先后发表10篇论文和1篇为物理学手册撰写的关于电介质的评论。1914年1月,他获得了大学教师资格认可,这也是他在科学生涯中的第一次晋升。而在生活上,经朋友科尔劳施(K. W. F. Kohlrausch)介绍,认识了后来成为薛定谔夫人的安妮玛丽·贝特尔(Annemarie Bertel, 1896~1965)小姐,开始了甜蜜的恋爱。

第一次世界大战开始后,薛定谔应征入伍,成为奥匈帝国的一名炮兵军官。他后来把这段历史用寥寥数语作了概括:“接着战争开始了,那时我作为一名炮兵军官驻扎在东南前线,没有受伤,没有生病,也没有获得什么荣誉。”战争后半期薛定谔的军旅生活是在后方度过的,这使得他有时关注广义相对论、量子统计与涨落理论以及原子物理学等领域的最新进展,为战后迅速恢复研究工作作好了充分的准备。

战后,薛定谔重返第二物理研究所,全力以赴从事理论物理学研究。由于战争后期的大量信息和思考的储备,他一连发表了好几篇论文。其中关于广义相对论的两篇题为“引力场的能量分量”和“广义协变引力场方程的解系统”都引起了爱因斯坦(Albert Einstein, 1879~1955)的极大关注,并分别撰文讨论和回答。

^① 奥地利物理学家,在1907年接替了玻耳兹曼的教席,险些比爱因斯坦早一年得到著名的质能方程 $E=mc^2$ 。哈泽内尔不幸在第一次世界大战中阵亡,可是他的学生薛定谔把世界带进了量子力学的大门。

1920年4月6日,薛定谔与贝特小姐结婚。此后,他离开了母校和故乡,几经周折,1921年10月,薛定谔接受了苏黎世大学数学物理学教授的职务聘书。苏黎世时期是薛定谔的又一个创造性高峰。仅在1922年到1926年早期,他就在教学之余发表了20篇论文,范围非常广泛。这些论文大体上可分为三类,即原子结构理论、量子统计理论、颜色和视觉理论。第一类是当时理论物理学界关注的中心;第二类则是用量子方法处理和修改气体运动论和固体比热容理论,这既是薛定谔的多年爱好,也是当时的热门研究领域;而第三类文章则反映了他在工作中善于将不同理论和不同学科结合起来研究的科学综合倾向。薛定谔把它戏称为“为逃避原子结构理论的绝望困境而通入光学领域的一次小小的旅行”,跨学科研究成了一种松弛心情的休息。他真正热衷的仍然是量子统计和原子结构这两大领域,也正是这两方面工作的结合,开辟了通往波动力学的道路。

从1926年1月27日到6月23日,正当人们瞩目于矩阵力学的成就时,薛定谔在短短不到5个月的时间里,接连发表了6篇关于量子理论的论文,其内容囊括了量子理论、原子模型、物理光学、哈密顿光学、力学相似、光谱学、微扰理论等众多物理学领域,并熔爱因斯坦波粒二象性思想和德布罗意物质波理论等量子理论为一炉,一举构造起集前人研究成果之大成,在理论上严谨、自洽,实际应用更为广泛、有效的完整量子力学形式体系。薛定谔成功地证明了矩阵力学和波动力学在数学上是等价的。为此,普朗克(Max Planck, 1858~1947)曾致信薛定谔:“我正像一个好奇的儿童听解他久久苦思的谜语那样,聚精会神地详读您的论文,并为在我眼前展现的美而感到高兴。”爱因斯坦也去信大加赞赏:“您的文章的思想表现出真正的天才。”玻恩(Max Born, 1882~1970)赞扬薛定谔的工作说:“在理论物理学中,还有什么比他在波动力学方面的几篇论文更出色的呢?”

薛定谔因建立波动力学而深受普朗克的赏识,普朗克在退休之际表示,如果薛定谔能成为他的继任者,他将会感到很高兴。这既是莫大的荣耀,更是一种召唤。1927年,薛定谔举家迁居柏林,就任柏林大学理论物理教授,并于次年在普朗克的推荐下成为普鲁士科学院院士。在柏林大学,薛定谔的住处很快成为科学家们聚会和交往的中心。薛定谔把在柏林大学的时期看作是他一生中最幸福的时光,在那里,他以极大的热忱投入到教学和科研之中,和同事们一起使柏林大学物理系的教学水平达到了前所未有的高度。在教学之余,他致力于完善和推广波动力学的研究成果,并努力试图把相对

论和量子力学这 20 世纪物理学的两大支柱理论统一起来。这一时期，他研究的另一中心就是量子力学的诠释问题，提出了著名的“薛定谔猫悖论”，引起了关于量子力学诠释问题的论战。

1933 年希特勒(Adolf Hitler, 1889~1945)上台后，薛定谔在柏林的美好时光也随之结束。1933 年 11 月，他借口休假离开了德国，来到牛津大学。在牛津，他收到了一个令人振奋的好消息，“因为发现原子结构的新的富有成效的形式，他与另一名科学家狄拉克一道被授予 1933 年诺贝尔物理学奖”。在斯德哥尔摩(Stockholm)的领奖仪式上，薛定谔发表了题为“波动力学的基本思想”的获奖演讲，他从光学思想史入手，分析和论证了其理论的实质。这一演讲再次显示出他对思想史的熟识喜爱和他的通俗生动的文学风格，使听众大为折服。

1936 年，薛定谔收到奥地利格拉茨大学邀请，思乡之情使他忘记了应有的谨慎而回到祖国。两年后，德意志帝国吞并奥地利，薛定谔被纳粹以“政治上不可靠”为由从格拉茨的教职上解雇。他在学术界的朋友们十分关心他的处境，纷纷向他伸出援助之手。1939 年 10 月 5 日，薛定谔到达爱尔兰首府都柏林，开始了在那儿长达 17 年的侨居生活，并开始了他生命旅途中最后一段富有创造性的征程。

1941 年，都柏林高等研究院正式开学，薛定谔担任理论物理部主任。这一时期，他致力于将爱因斯坦的引力理论推广为统一场论，同时还致力于时空结构和宇宙学的研究。他力图把波动力学应用于宇宙学，这些方面的研究思想，集中反映在《时空结构》和《膨胀着的宇宙》两本书中。这一时期他继续保持对量子力学和统计力学的兴趣，并于 1946 年完成了《统计热力学》一书。1943 年 2 月，薛定谔在爱尔兰都柏林三一学院作了一系列讲演，并于 1944 年整理出版了一本著作——《生命是什么》。在这本书中，他提出了三个著名的观点：(1)生命是非平衡系统并以负熵为生；(2)遗传物质是一种有机分子，遗传是以密码的形式通过染色体来传递的，而这种密码是由复杂的化学物质的空间排列体现的；(3)生命体系中存在量子跃迁现象，生命及遗传的稳定性与辐射下的变异说明了生命遵循量子规律。这本书试图用热力学、量子力学和化学理论来解释生命的本性，使许多青年物理学家开始注意生命科学中提出的问题，引导人们用物理学、化学的方法去研究生命的本质。薛定谔成为了蓬勃发展的分子生物学的先驱。

1956 年，薛定谔决定返回他朝思暮想的故乡，重回维也纳大学受聘担任

理论物理学名誉教授的特别职位。尽管已年届 70,到了通常的退休年龄,他仍然坚持又授课一年。薛定谔在晚年登上了荣誉的巅峰,他的祖国授予他大量的荣誉。薛定谔曾写道:“奥地利在各方面都给我以慷慨的款待,这样,我的学术生涯将荣幸地终止在它由之开始的同一个物理学院。”1961 年 1 月 4 日晚,薛定谔因肺结核病在妻子身边闭上了他一生探索世界、寻找科学真理的眼睛。

薛定谔一生著作丰硕,他先后发表了 5 本专著和不下 150 篇论文,其范围几乎覆盖了所有理论物理学前沿问题;而在专业领域之外,他还发表了一系列哲学论著,先后写作了《自然与希腊》、《科学与人文主义——当代的物理学》、《心与物》、《我的世界观》和死后才出版的《自然规律是什么》等哲学论著和文集,甚至一度设想在教书之余,以哲学为主要兴趣,被著名物理学家西蒙尼^①(Abner Shimony, 1928~)认为“是我们当代的物理学家中最为引人注目的哲学家”。

本书是从薛定谔的著作中精选翻译汇集而成,从中可以看到大师对科学、社会的精辟论述,尤其是大师在科学思想、科学方法及科学认识方面的论述,不但可以为我们在科研创新中提供思维模式的借鉴与参考,也可以让我们深入认识科学大师的精神世界。

^① 美国当代量子理论物理学家,师从诺贝尔物理学奖获得者尤金·威格纳(Eugene Wigner)。

目 录

▶▶论波动力学思想◀◀

波动力学的基本思想	3
-----------------	---

▶▶科学与人文◀◀

自然科学之于生活的深意	15
湮没于物质化的自然科学	18
物质涵义的激烈转变	19
物质基本概念的重塑	21
粒子的“形态”	22
连续性和因果律	24
连续概念的复杂性	26
波动理论的缓兵之计	31
主客体之间的隔阂并未消失	34
破解魔咒的原子和量子	36
物理学的不确定性是自由意志的偶然吗?	38
尼尔斯·玻尔预言受到的阻碍	40

▶▶自然与希腊◀◀

回归古代思想的动机	45
感性与理性之争	52
毕达哥拉斯学派	57
爱奥尼亚的启蒙	65
色诺芬尼的信仰及以弗所的赫拉克利特	72
原子论者	75
科学世界观的特征	81

►►意识和物质◀◀

意识的物质基础	89
了解未来	96
客观性原则	105
算术悖论:意识的单一性	113
科学与宗教	121
感知的奥秘	130
生命的“记忆”	137
途径的探索	145
决定论与自由意志	150

►►生命是什么◀◀

古典物理学家对这个主题的探讨	157
遗传机制	168
突变	177
量子力学的证据	187
对德尔勃留克模型的讨论和检验	194
有序,无序和熵	202
生命是以物理学定律为基础的吗?	208

►►薛定谔自传◀◀

自传	219
----------	-----

►►附录◀◀

薛定谔生平和著作年表	235
后记	240

论波动力学思想

波动力学的基本思想

——1933 年薛定谔诺贝尔物理学奖获奖演讲

当光线通过光学仪器时,例如通过望远镜或照相机的透镜时,在折射面或反射面上光线会改变方向。如果我们知道了方向变化的两条简单规律,就可以画出射线的路径。这两条规律就是斯涅耳(Snell)在数百年前发现的折射定律和阿基米德(Achimedes)在 2000 多年前就已提出的反射定律。举一个简单的例子,图 1-1 画了一条光线 AB,它在两个透镜的四个界面上都按照斯涅耳定律折射。

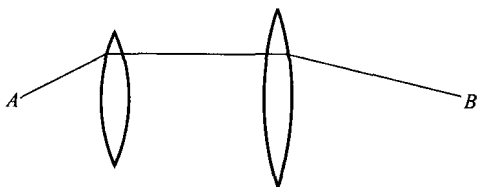


图 1-1

费马(Fermat)从一个非常普遍的观点出发,确定了光线的整个路程。光在不同媒质中以不同的速度传播。光线的路径看起来是使光尽可能快地到达终点(顺便说一下,这里可以把沿光线的任意两点看作是始点和终点)。光的路径如果有很小的偏差,都将意味着延迟。这就是著名的费马最小光程原理,这个原理用一种奇特的方法简单地规定了光的总路程,而且也表明了在一一般情况下,当媒质的性质不是在单个界面上突变而是逐点变化时的情形。地球的大气就是一个例子。光线从外界越进入底层,空气就越密,光线前进得就越慢。虽然在传播速度上差别很小,但是根据费马原理,光线应向地面弯曲(见图 1-2)。因为光线在较高的大气层中走得快,虽然路径长些,但仍比短的直线路径(图中的虚线,先不管方框 WWW'W')更快一点到达终点。我想大家一定看见过太阳落到地平线时不是圆的而是扁的,它的竖直方向的直径好像缩短了,这正是光线弯曲的结果。

根据光的波动理论,严格地说,光线只有虚构的意义。光线不是某些光粒子的物理路径,而是一种数学图形,即所谓波面的正交轨迹,也可说是一

些想象的有指向的线。这些线垂直于波面，并指向波的前进方向（见图1-3，此图表示的是最简单的情形：波面是同心球面，光线是直线；图1-4是光线弯曲的情形）。

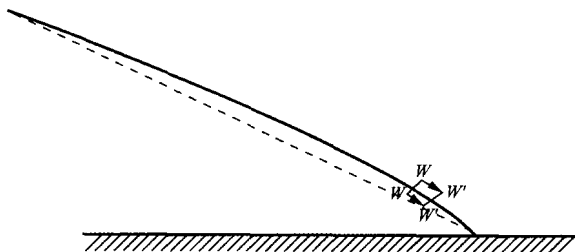


图 1-2

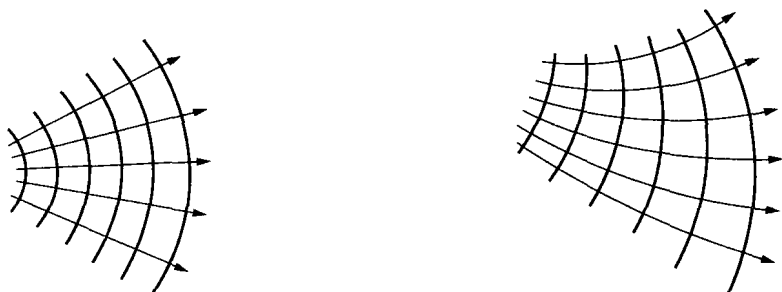


图 1-3

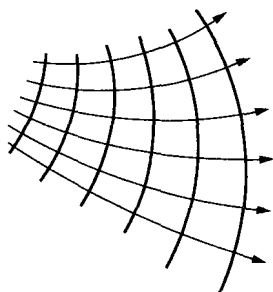


图 1-4

奇怪的是，费马的这一重要普遍原理不直接和波面发生关系，而是直接与数学线相联系，因此人们可能认为它仅仅是一种数学奇迹。其实不然，只有从波动理论的观点出发，才能正确理解它，才不会感到它神秘莫测。所谓的光线弯曲，从波动的观点看，理解成波面的偏斜更容易些，因为当波面的相邻部分以不同的速度前进时，显然就会出现这种情况。这就像一队正在前进的士兵，如果各人的步子不一样，右边的人步子小，左边的人步子大，那么队形将会出现“右倾”。光线在大气中折射时（见图1-2），波面的一部分 WW 应当偏斜到 $W'W'$ ，因为它的左半部处在较高层，这里空气稀薄些，因此前进得比较低的右半部要快一点。（我顺便讲一下斯涅耳观点不能解释的一个问题：水平射出的光线应当保持水平，因为水平方向上折射率不变。其实，水平光线比任何其他光线弯曲得更厉害，这是波面偏斜理论的明确结论。）仔细研究就会发现，费马原理和上面所说的波阵面偏斜（光速的局部分

布为确定的)这种通俗而明确的表述完全等价。我不能在这里证明这一点,但想对它作一个说明。我再一次请大家想象一队正在前进的士兵。为了使他们总是成一条直线前进,让每个人都握住一根细长的杆,将每个人连在一起。关于方向不下命令,只有一条命令:每个人都尽快地跑或走。如果地形是随地点而缓慢变化的,那么有时右边前进得快,有时左边快,前进方向自然会发生变化。过一段时间以后将会看到,走过的整个路径不是直线,而是某种曲线。因为每个人都尽了最大的努力,所以至少可以说,这条弯曲的路径是这样的:任何时候所到达的地点都是按地形的特点最快地到达了。还可以看到,偏斜总是发生在地形较差的方向上,结果看起来像是人们有意地“绕走”慢的地方。

可见,费马原理是波动理论的“精华”。因此,哈密顿(Hamilton)发现的质点在力场中的真实运动(例如行星绕太阳的轨道运动或抛出的石块在地球的引力场中的运动)也受类似规律的支配,这真是令人难忘的。从那时起,这个原理便以发现者的姓名命名。无可否认,哈密顿原理没有明确说质点选择了最快的路径,但它确实与最小光程原理非常相似,以至于使人迷惑不解。看来大自然是把同一个定律用完全不同的方式表现了两次:一次是用十分明显的光线来表现,另一次是用质点来表现。除非设想质点也有波动性,否则就不好理解。但似乎很难这样设想,因为当时在实验上证明力学定律所依据的质点有时是很大的、看得见的物体,如行星,对于这些物体来说,“波动性”这样的问题显然不可能考虑。

我们今天确切地称之为“质点”的物质最小基本组成部分,在当时纯粹是假设的,只是在发现放射性以后,由于测量方法的不断改进,才仔细地研究这些粒子的性质。现在已可以用查尔斯·威尔逊(Charles Thomson Rees Wilson)的方法拍摄粒子的径迹,并作极精确的测量(立体摄影测量)。广泛的测量证明,对于这些微粒来说,力学定律也像对于大的物体(如行星等)那样是有效的,但是无论是分子还是单个原子,都不能看作是“最终的成分”,就连原子也是一个结构非常复杂的系统。在我们的头脑里已经形成了一个由粒子构成的原子结构图像,这个图像似乎与行星系有一定的相似性。很自然,开始时人们认为在宏观范围内令人满意的力学规律应该同样有效,换句话说,哈密顿力学(如上所述,它总结成了哈密顿原理)也被运用到原子的“内部活动”。哈密顿原理和费马原理之间的密切相似性几乎被忘记了,如果说还记得的话,也只是记住了数学理论的奇妙性。

现在,如果不进一步作详细讨论,就很难对原子的这些经典的力学图像是成功的还是不成功的得出一个恰当的认识。一方面,哈密顿原理被证明是最正确可靠的准则,它是绝对不可缺少的;另一方面,人们为了妥善处理某些事实,必须接受完全新的和令人费解的所谓量子条件或量子假设的严重干扰,经典力学的交响乐中出现的不和谐好像是同一个乐器演奏出来的。我们可以用数学语言来表述这一点:哈密顿原理只是假设了某个积分必须是最小的,但没有规定这个最小数值,而现在却要求这个最小值必须是一个普适的自然常数,即普朗克作用量的整数倍。问题相当严重。假如以前的力学完全失效了,那倒也不坏,因为在发展新的力学体系时就不会有障碍了。但事实上人们面临着一个困难的任务:既要拯救在微观世界中权威性已明显发生动摇的旧体系的“灵魂”,同时又要在接受量子条件时不感到严重的干扰,即要从旧体系的自身深处得出量子条件。

前面已指出,有可能找到出路,出路在于哈密顿原理,也在于运用波动力学,即把质点的力学过程建立在波动力学的基础上,就像人们已习惯于光的现象和支配这些现象的费马原理那样。无可否认,质点的单个轨迹失去了它原来的物理意义,就像单条分开的光线一样变成虚构的。然而这个最小值原理的本质不仅仍然完全保存下来,而且如前所述,只有在波动的形态下才显示出它的真实的和简单的意义。严格地说,新的理论事实上并不是新的,它完全是旧理论的有机发展,人们也许喜欢说它是旧理论的更精确的解释。

这个更“精确”的解释究竟有有一些什么值得注意的不同结果呢?当把它应用于原子时,是什么东西使它克服了旧理论所不能解决的困难,使干扰变成了可以接受的,甚至变成了它自己的东西呢?

这些问题可以再一次用与光学的相似性来作最好的说明。的确,我在前面称费马原理是波动理论的精华是恰当的。尽管如此,仍然要对波动过程本身作更精确的研究,只有详细地研究波动过程,才能理解光的所谓折射和干涉现象。因为问题不只是关于波的最后终点,而且还要解决在某一瞬间到达的是波峰还是波谷。在以前的不精密的实验装置中,这些现象只是作为一些细节而存在,因而不易发现。一旦观察到它们并对它们作了正确的解释,就不难设计出一些实验,以便不仅在微观上充分表现出光的波动性,而且能在宏观上发现这个现象的全部特征。

举两个例子。第一个例子是光学仪器,例如望远镜和显微镜等,目的是

获得清晰的图像,即从一点发出的全部光线重新会聚成一点,即所谓焦点,见图 1-5(a)。开始时人们认为,妨碍清晰成像的困难仅仅是几何光学的问题,而几何光学上的困难也确实是很大的。后来发现,即使仪器有最好的设计,光线的聚焦也远不像所期望的那样,每条光线都严格遵循费马原理而与邻近光线无关。从一点发出进入仪器的光,在仪器的后面不再会聚于一点,而是分布在一个小圆面上,即成为所谓的衍射光斑。在多数情况下衍射光斑只是圆的,因为光孔和透镜一般都是圆的。出现我们称之为“衍射”现象的原因是,从一个物点发出的球面波不能全部进入仪器,透镜的边界和任何一个光孔只能截取波面的一部分,见图 1-5(b)。如果允许我说得简练一点,那就是不完整妨碍光严格会聚于一点,并产生出有些模糊的图像。模糊的程度与光的波长有密切关系,而且是完全不可避免的。因为它存在着深刻的理论关系。开始时几乎没有注意到,是波长限制着先进的显微镜的性能,决定着成像的其他所有误差。对于与波长差不多大小或甚至更精细的结构来说,获得的像远不是或完全不是原来的样子。

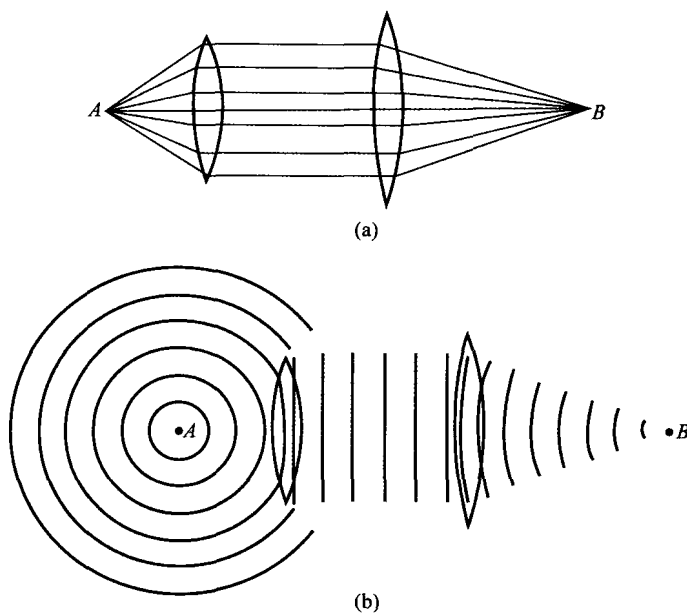


图 1-5

第二个例子更简单,即不透明的物体被一小点光源投射在屏上的影子。为了构成影子的轮廓,必须画出每条光线,看看它是否被不透明物体挡住而