第 1 章　万物

诗人的眼睛那神奇狂放的一转，
从天上看到地下，从地下转回天上；
幻想生成的
　　未知的事物，在诗人的笔底
显出了模样，空空如也的它们
也获得了名字和地方。

——莎士比亚：仲夏夜之梦①

从简单说起

物理学讲的是宇宙间的简单事物。它把复杂的生命和活体留给生物学，也求之不得地将原子间数不清的相互作用方式留给化学去探索。活细胞当然复杂得不能再复杂了，而一样复杂的还有曲面——随便哪种曲面。生物物理或化学物理偶尔会遇到这些问题，但总的说来，它们是很难对付的。细胞和曲面都不是什么简

①第五幕第一场雅典公爵忒修斯的话。他说，“疯子、情人和诗人都是幻想的产儿……诗人的眼睛……”译文参考了朱生豪先生的译本（人民文学出版社，1978）。

单的东西。

可以说，简单的东西根本就不存在。皇后敢向阿丽丝吹嘘，她在早餐前能想出 6 样不可能的东西，但是她却很难想象 6 样简单的东西。[1] 让我们来看一个普通的例子，如一块石头，一块能拿得起也放得下的石头，还有什么能比它更简单的东西吗？我们看得见、摸得着、拿得起的东西，都是我们身边的一些实实在在的东西。重要的是要认识它们是怎么运动的——而石头是最简单的子弹。石器时代的军队大概会积极开展某些关于石头弹道曲线的研究，但是物理学家们几乎不会去碰它，除非重金悬赏。石头太复杂了，表面一点儿也不规则。想想看，空气从它粗糙的表面流过，该有多复杂，多混乱。所以，也不可能从石头的特殊现象中找出所有子弹普遍存在的东西。

于是，有人把石头切割成整齐规则的形状——像那 5 个规则的物体（图 1.1）。像四面体或立方体形状的物体，似乎更容易把握，因为它们是高度对称的。我们只需要考虑 5 种规则形状，这该是多简单呀！[2]想当然地看，这些形状的物体在专门研究简单事物的科学里一定占据着特别重要的地位，但事实并非如此。只有在极少的情况下，规则体的概念才可爱，才有用。开普勒（Kepler）曾以此为基础艰难地构造太阳系的理论。[3] 在结晶学中，立方体的对称性起着特别重要的作用。然而，不论哪种规则形状的物体，在物理学中都没有意义。原因是，规则的固体也有棱角，它们的规则性是

① 请看第 2 章标题下引的那段话。

②有兴趣的读者可以试着证明，在三维空间里的确只能存在那 5 种规则的多面体。（证明只需要用点（v）线（e）面（f）关系的欧拉（Euler）定理：$v + f - e = 2$，当然还得靠一点数学机智。）

③ 开普勒在 1596 年出版的第一本书《宇宙的秘密》（*Mysterium Cosmograhicum*）中说，宇宙是以柏拉图的这 5 个规则固体的模式构成的。在他看来，数学的协调是宇宙的基础。

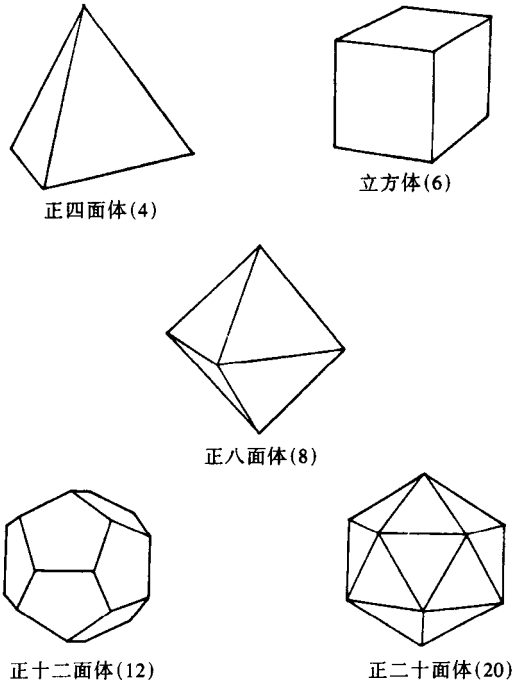


图 1.1　5 种规则的固体。每一固体的面数都写在括号里。

相对的。从不同角度看，它们并不相同，有的方向比别的方向"更特殊"。

把那些棱角磨掉，我们就得到一个台球。物理学家那么喜欢台球，天知道！在物理学中，台球是许多事物的原型，从这一点说，我们常说的没有重量的弦也不如它重要。台球从各方面看都是一样的！我们可以将它握在手中，也可以抛向天空，还可以让它摆，让它滚，一切力学定律都可以拿它来考察。石器时代的自然哲学家们一定乐意拿钱来买我们关于球状石头的研究成果。台球虽然诱人，却也不够简单。它的缺陷是那张包在外头的曲面。我们在开头讲过，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

曲面不是简单的东西。然而，一个物体要与周围区别开来，总会裹张皮的。既然这样，我们来想象一样无限坚硬、完全光滑、绝对没有结构的东西，让曲面理想地消失。然后，我们用一种无比坚硬的理想弹性材料来做一个绝对均匀的台球。我们将那材料叫“乌托子”(utopium)。[①] 现在，我们有了第一样简单的物理学事物——用乌托子造的台球。

理想化

然而，像这样的东西并不存在。乌托子球完全是理想化的东西，一个头脑冷静的人，是不会相信理想的产儿的。从一开始，我们就知道那是假的。严格说来，它本就不可能是真的。所以，让我们快来看看，在特殊情形下，它是怎么错的。概念上的简单有无限的好处。从大处说，乌托子球可以充当某个星系里的一颗在星团周围游荡的恒星，或者一颗绕着太阳旋转的行星；从小处说，它可以是一个原子——一个在晶体晶格里的原子，或者在液体或气体中游荡的原子。给它一个正电荷，它就成了一个质子 给它一个负电荷，它就是电子 如果没有电荷，它就是中子。玻尔讲的原子模型，基本上就是带电的乌托子构成的。它们可以令人满意地解释固体、液体、气体和等离子体的许多性质。一句话，乌托子台球是经典力学的理想的基本粒子。尽管在量子领域，这个概念失败了——电子、质子和中子的行为不像台球——在别的地方，它却是许多物理学的原型。

然而，说到底，它还是一个概念——一个虚构的东西。在真实的世界里，没有这样一个东西在呼唤人们的注意，那不过是个

① 这个名字当然是从 utopiu 乌托邦)衍生来的；-ium 是代表元素的词尾。

理想。也许，在未来的某一天，会出现一门“乌有乡”物理学（Evewhon Physics，借萨穆尔·巴特勒的名词）[1]，专门研究可能却非真实的宇宙。这门学问正在出现，因为真实宇宙的物理学已经产生了，而人们还在继续追求着。这样一门学问，完全由幻想的事物和一些相容的规则组成，真该算作一个数学的分支。“真”物理学研究那些存在于真实世界里的与幻想无关的事物，但是也会用一些像乌托子球那样的概念，仿佛也成了什么“乌有乡”的（而不是真实世界的）物理学。原因是，那样的东西并不是纯概念的——它们是理想的，因为简单，我们用它来作为认识和摹写真实事物的行为和特征的出发点。根本说来，物理学是制造模型的活动。

既然身在一门关于虚构事物的学问里，我们现在来试着区分什么是物理学的虚构，什么是数学的虚构。乌托子台球是物理学概念，它来自真实的台球，不过将一些真实的性质外推到了理想的尽头，理想与现实的表现只是程度不同，没有类的差别。拿它来同理论家喜欢的另一个物理学原型点粒子相比较，点粒子就是数学概念，因为它与真实粒子不是同一类型的——它没有大小。所以，它比我们的台球更不真实，我们要小心别把它推得太远。基本粒子理论滥用了这个点粒子概念，结果生出许多恼人的无限大的东西。不过，只要粒子的大小或者内部结构无关紧要，点粒子概念还是一个大有作为的工具。

有那么多实实在在的事物等着我们去认识它们，理解它们的

① 巴特勒（Samuel Butler，1835～1902年）最有名的作品当然是半自传体的《众生之路》（*The Way of All Flesh*，1903年），这里说的是他的讽刺小说 *Erewhon*（1872年）和《重游 *Erewhon*》（1901 年）。书名是从 Nowhere（即有名的“乌有乡”）变来的。小说讽刺了达尔文的进化论和传统的宗教道德观，实际上宣告维多利亚时代永恒进步的幻想破灭了。

性质，而我们却为什么去关心虚构的东西呢？很遗憾，这是没有办法的事情。世界上的事物那么多，五花八门，各走东西，我们不可能一个个去认识，只好依靠高度的抽象。我们能做的，是把它们分成类，然后研究类的行为；我们相信，同一个类里的事物会表现出共同的行为。这就是从特殊抽象出一般。一切科学都是这样运行的，而抽象是否成功，则要看研究的是什么。方兴未艾的社会学与每一个个人的活动打交道，生物学家也总是小心翼翼地关注着生物个体的行为，尽管还没发现有强烈个性的阿米巴。只有在研究非生命事物时，我们才可能从特殊性中获得成功。不过，这时候需要发明一些概念，如上面讨论的那些；当然，我们相信一时还不会出现真正的电子心理学的研究。

原　　子

即使如此，非生命事物也各具形态，奇异多变，该如何来处理这样纷纭复杂的状况呢？

一个办法是将我们能切身感受的事物看成我们那个巨大的物体——地球。这样，地球成了物理学的第一样真实的事物。这个庞然大物的结构和组成都惊人地复杂，但它的行为却非常简单，几乎像一个巨大的乌托子球。月亮、太阳和每一颗行星也跟地球一样，是普遍中的一个特例，尽管各自也有独特的地方，占据着不同的研究领域。随着太阳系概念的产生，地球成为众多行星的一颗，而太阳也不过是小地方的一颗恒星，在我们的银河系里，这样的恒星有 10^{11} 颗，而银河系也只是宇宙间许许多多星系团的一分子。

现在，我们来看物理学中真实的庞然大物——宇宙，它包容一切，是物理学要研究的惟一独特的真实事物；恒星，星系的“原子”；行星，绕着恒星旋转的东西。宇宙、星系、恒星和行

星都可以用“齐”性介质来模拟（下面会解释什么东西是“齐”的），也可以当做那无处不在的乌托子球，甚至有时它们还甘愿做一个点粒子。它们是大尺度事物的代表，而尺度太大时，人们往往会忽略细节；但并不总是这样。实际上，恒星的研究正需要对物质结构的详尽认识。所以，我们现在回头来看非生命事物都具有哪些形式。

在这个问题上，化学中原子的发现帮了我们的大忙。原子是简单的东西，不过 100多种。展现在人们面前的纷纭复杂的事物，都是原子组成的，或者是同一种原子，或者是几种原子，靠着化学的力量结合在一起。原子太小，不能直接看到（除非你把电子显微镜里显出的图像当成真的），但近百年来物理学和化学的无数的证据已经证明原子是确实存在的。

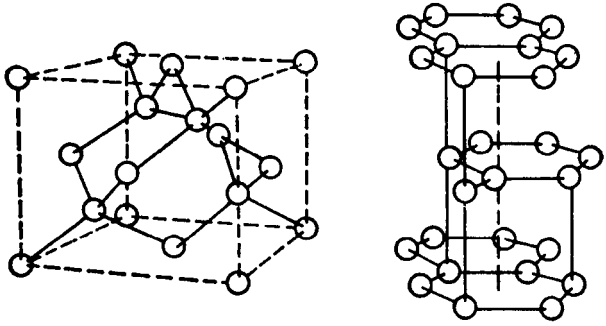
我们周围事物的许多性质，特别是力学性质和热性质，都可以通过原子似的小小台球来理解。气体可以看成一群稀疏分散着的台球，而液体或像玻璃那样的非结晶固体，则像一群紧密堆积着的台球，在小距离上还保留着某种次序。如果让它们在长距离上有序，我们便得到晶体，如液晶或固体晶体。让它们像项链那样串起来，就生成聚合物。它们可以单独活动，像元素；也可以聚在一起，像分子。

大自然为我们带来原子，也带来了无限的简化。不过对物理学来说，那还不够。物理学追求简单，像探求每个原子（从最简单的氢原子到最复杂的原子）的具体性质那么艰巨的任务，留给化学家们好了。当然，物理学不可能完全超脱，它也不愿那样。它也会对某些特殊的原子特性感兴趣，但特殊性还是越少越好。这样，物理学家高兴地看到，所有的气体，不论由什么原子或分子组成，都表现出大致相同的行为，于是，理想气体的模型出现了；他们发现流体所倾向的流动方式与本来的化学（原子）性质无关；理想晶体的概念也因此产生了，这样的晶体是一列列规规矩

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

矩排列的原子，它的性质既依赖于原子的化学性质，也同样依赖于原子排列的对称形式。虽然原子不过 100 多种，物理学家还嫌太多，而宁愿喜欢一个——乌托子，一个就足够为三种状态（气、液、固）的原子物质带来理想的形态。

更准确地说，理想化的原子只是我们尝试去认识物质行为的开头。尽管谁都喜欢用乌托子台球那样的简单概念来描绘普遍的图景，但最终还得面对真实系统中个别原子的特殊表现。要不，谁知道为什么氧在 -219℃液化，而冰却在 0℃呢？尽管从碳原子的例子我们可以欣喜地看到，对晶体性质来说，原子的排列比它的化学性质重要得多——在金刚石晶格下，物质最硬，而在石墨晶格下，物质最软（图 1.2)——但是，单个原子的性质显然也起着根本的作用，不论什么模型最终都离不了它。某个晶体的理论可以从点阵开始，探寻特殊对称性的作用，然后将点扩展为乌托子球，以了解它的力学和热性质。但为了更深入的认识，还得让乌托子台球回到真实的原子，而每个原子的个性也将走进我们的思想。



金刚石晶格　　石墨晶格

图 1.2　金刚石和石墨晶体的碳原子。

波

可能是这样，但物理学家在追求简单性的过程中，还在用比乌托子球和点粒子更不真实的概念，甚至还很成功。他们把固体和液体看成一种连续的占据整个空间的物质，而全然不顾原子的存在，还有比这更令人惊愕的吗？尽管这模型显得太粗野，但在比原子大得多的尺度上，它却非常有用。

连续统的概念，在一定意义上补充了点的概念。它同样是非自然的东西，不过在自己的领域内也同样重要。在物理学的虚构事物中，均匀而各向同性的连续体是经常出现的一个。均匀物质的各个部分，不论什么位置，都有相同的性质；各向同性的物质更简单，它的性质完全与方向无关——没有丝毫的凹凸不平。这种介质在物理学中太普遍了，真应该有一个名字——我们叫它“齐”性物质，[1] 而且用希腊字母 χ 来表示。齐性处处可以看到——如宇宙的模型，如我们讲的构成原型台球的乌托子。另外，在理想气体和流体中，在有一定弹性的简单固体中，我们都能看到齐性的精彩表现。而且，齐性的东西在数学上也有许多好处，我们可以用微积分来描写它们的行为。

连续概念比原子图像更大的优点却在于它强调所考察事物的整体。它特别关心的是大量的、总体的而不是原子的、微观的性质。为了清晰突出整体的表现，它故意模糊了细节的东西。在物理学中，最有意义的一种整体表现就是波。

波是实实在在的东西。我们最早认识的是水面上起伏涨落的

① chi，是作者用 continuum（连续）、homogeneous（均匀）、isotropic（各向同性）的头一个字母造的词，译者将它音译为“齐”（不过在英文里，它却是希腊字母 χ 的读音）。不论在语义上，还是在数学意义上，“齐”与那三个性质都是很近的。

运动，它能发生反射、折射、衍射和干涉。从连续的观点看，波是从无限小基元的弹性相互作用中产生出来的。在原子模型中，波是从原子间的相互作用中产生的。也就是说，波是物质中所有原子的一种集体运动形式。波的重要意义在于，它像原子一样，也是物质所拥有的，尽管它不过是原子的运动而已。这些波叫弹性波或者机械波，它们可以是面波，也可能是体波。不论哪种波，基本特征都是物质的往返位移。我们来看三个例子。一个是纵波，如我们熟悉的声波，位移方向沿着传播方向（图 1.3(a)）；另两个是横波，位移方向垂直于传播方向，要么是上下，要么是前后(图 1.3(b))。纵波(或者叫疏密波)可以穿过真空外的任何事物，而横波（或剪切波）只能在固体中传播。

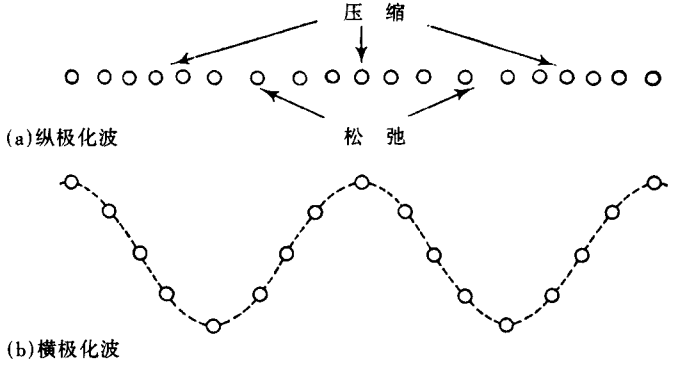


图 1.3　虚线为正弦曲线。

在地震研究中，机械波表现了特别的意义。地震在周围岩石中产生振动，振动向周围传播，穿过地球。遍布世界的实验室都能探测到这种所谓的地震波。从地震波的研究中，我们得到了大量关于地球内部结构的东西。实际上，地球液核最显著的证据就是在那里没能探测到剪切波，而只有压缩波。

如果说“连续”弥补了“点”的不足，那么波则是对粒子的补

充；如果说乌托子球是理想化的粒子，那么理想化的波就是正弦波，它跟那乌托子的台球一样，能够成为物理学的原型。但是，以数学函数描写的理想波，似乎没能令人满意地与粒子作对比。波与原子好像不是同一种东西。原子可以仅仅看做一个粒子，能离开任何运动而存在；而波的最大特征却在于它总是与运动相伴的。不过我们还是应该小心，更精密的原子模型表明原子内部也充满着运动。还有一点应该看到，波的频率和波长决定于波在时间和空间里的波动范围；范围越大，波越容易确定。于是，一个“好波”应该在我们的空间扩展，而粒子却局限在一定的地方。

实际上，波与粒子的这种差别只是程度上的不同。沟通两样东西的是波包，一种在空间有一定延展的运动着的扰动（图1.4）。其实，我们从来没有研究过乌有乡物理学里的无限延展的波，我们实际上关心的总是波包。我们会发现，粒子的集体运动也能像一个粒子。这种情况，当运动纯粹是平动时，我们很熟悉了；如果运动是振动，就有些奇怪。网球飞过网，是原子集体平动的例子，我们很容易将网球看成一个粒子。为了理解球内产生的弹性波在某种程度上也是一个粒子，还需要一点儿经验。

在认识物质的结构中，波包的概念与粒子一样重要。虽然波包都带着能量和动量，占据着一定的空间，但它的行为还是与经

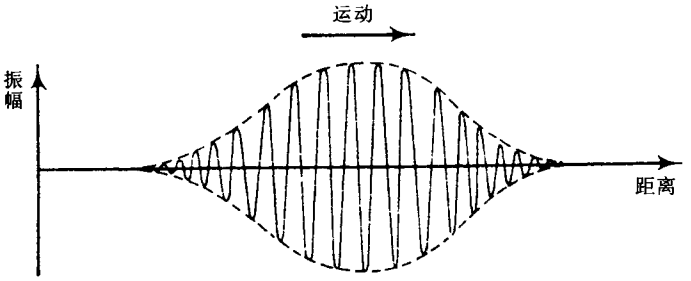


图 1.4　波包。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

典粒子不大相同。两个粒子走到一起时，会碰撞而分离；两个波包相遇时，会融合在一起，振荡的幅度会在某些地方增强，在另一些地方减弱，就是说，两个波发生了干涉。让一个粒子穿过一丝缝，它要么穿过，要么穿不过。如果是波，则总会有一部分穿过缝隙，当然，由于衍射，它以后的运动方向会不那么确定。但是，真还有比波包更像粒子的波，那就是孤立波，现在人们干脆称它孤立子。如果介质有特别的非线性特征，就可能存在孤立子。孤立子是运动的“小山峰”，在碰撞时，能保持各自的形态，像粒子那样完好地分离。然而它们终究还是波，一种很独特的波，怎么也不会把它同台球混淆起来。波会发生干涉和衍射，而粒子不会。粒子在本质上是不可分的——要么一个，要么没有。波像果冻，像塑料，振幅可以连续地减小，小到难以觉察的一列振荡。

连续的机械波，不可分割的粒子，是经典物理学中宏观物质的两样绝妙表现，那么简单、那么诱人，却又那么不同。

第 2 章 奇事

“那我可不信！”阿丽思说。

“不信吗？”皇后有点儿可怜她，说，“再试试看：深呼吸，然后闭上眼睛。”

阿丽思笑了。“那也没用呀，”她说，“人不能相信不可能的事情。”

“我敢说你练得不够多。”皇后说，“我在你那么大的时候，每天都会练半个钟头。有时候，在早餐前我能相信六样不可能的东西呢。”

——L·卡洛尔：镜里世界①

电 磁 波

除去力学或机械的东西，物质还有别的性质。所有物质都能

① Lewis Carroll(1832～1898 年)原名 Charles Lutwidge Dodgson ,本来是数学家,但人们记得的是笔名，他不朽的著作是这本《镜里世界》（*Through the Looking Glass and What Alice Found There*）和姐妹篇的《阿丽思漫游奇境记》（*Alice's Adventures in Wonderland*）。这是两部没有一点儿说教味的儿童读物，在好多大人的科学著作里，也能看到它们的影子（这儿引的一段在原书第 5 章）。

带电，有的还能被磁化。我们将物质分为固体、液体和气体，也可以根据电流在物质中通过的难易程度，将它们划分为导体、半导体和绝缘体。而就磁性行为来说，还可以根据物质在两个磁极间的表现，将它们分为铁磁的、顺磁的和逆磁的。另外，如果我们关心的是电极化，可以说物质是绝缘的或是导电的。电磁行为千变万化，根据电磁性质来对事物进行分类的办法还多着呢。

幸运的是，磁与电之间存在着密切的联系。哪里有运动的电，哪里就有磁的作用。磁不过是电流的表现。因此，为了认识电磁行为，我们只考虑电和电的运动就够了。

匀速运动的电荷实在没有多少趣味。在稳恒的直流电附近，罗盘的指针会偏离磁北极，就这么简单。非匀速运动的情形就不同了。物理学中最活跃的一种现象，即电磁波，正是从交变的电流中产生出来的。电荷加速时，就产生电磁波（图 2.1）。金属天线的电流以很低的频率振荡（如每秒几千周），发射出无线电波。如果频率高百万倍，则发射出微波，成为雷达系统的一部分。两种波的惟一区别在频率，其他方面的性质是完全相同的。可见光是另一种电磁波，频率是雷达波的 100 万倍。在可见光与雷达波之间是不可见的红外线，任何温度在绝对零度以上的物质都会产生这种辐射。频率更高的是看不见的紫外线、 X 射线和 γ 射线。

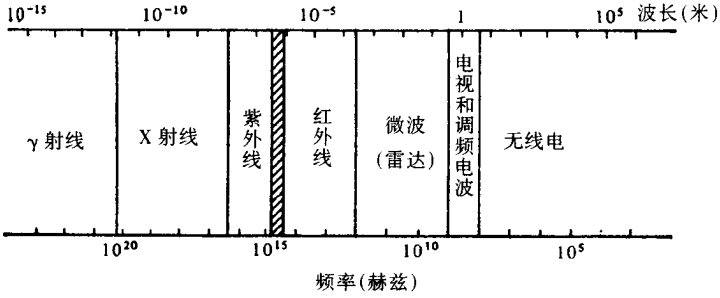


图 2.1　电磁波谱。阴影区是可见光范围。

这些辐射的基本特征都是一处的电流振荡能激起另一处的振荡

所有电磁波在真空里都以相同的速度（2.99792458×10^8米／秒）传播，大约比空气中的声速快 100 万倍。从某种意义说，它们都是电荷非匀速运动的结果，也能激发电荷的非匀速运动电磁波那样起源，又那么快，而且还能在空无一物的虚空里传播，于是自然成为通讯的主角。这不仅仅说的是传播电视节目或者同宇航员对话；而是说，我们正是主要依赖电磁波来认识宇宙的事物。这是一个显然的事实，相对论曾经探索过它的结果，而更多的结果还在不断地增加

电磁波在许多方面都表现出很平常的特征，像机械波一样，真的。例如电磁波激发的电流总是垂直于传播方向，因此它们更像横的弹性波，而不像纵的声波。另外，原子所具有的波动效应（这是波区别于粒子流的独特性质），也都在电磁波中表现出来了。于是，通过窄缝的电磁波会扩散开来，表现出水波和声波的一切衍射特征（图 2.2)。把两列电磁波叠加起来，我们也会看到有名的干涉现象——两个波峰相遇的地方，波动加强，波峰与波谷相遇的地方，波动衰减经典的简单的粒子流不会表现出这种性质，只有波才可能。所以，电磁辐射像机械波。

可怕的问题来了。机械波不能在没有物质的空间传播，它们是原子或分子的协同运动，速度决定于传播物质的性质电磁波却可以在真空里穿行，那么空虚的空间里有什么物质在振动呢？真空有结构吗？也许，我们不该提这样的问题?显然，这儿有新的秘密。

电子和原子

以后我们再回来谈电磁辐射（很遗憾，我们还不能揭开那个秘密，搞不好可能出现更多的麻烦——电磁辐射就是一个大大的

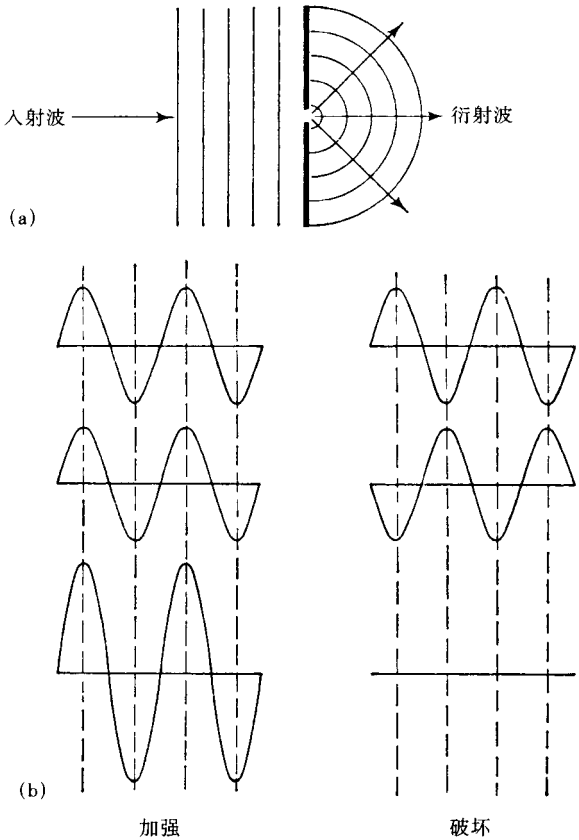


图 2.2　(a)衍射。(b)干涉。

秘密）。现在，我们来看看电的本质。

大量实验表明，电流是粒子流构成的。本质上讲，粒子只有两类，带负电的电子和比电子重很多的带电原子，我们称它为离子。离子通常带正电，不过也可以带负电（图 2.3）。在所有元素里，氢是最轻的，带正电的氢离子是已知的最轻的离子，那就是质子。世界上的一切电磁现象都可以追溯到电子和离子的行

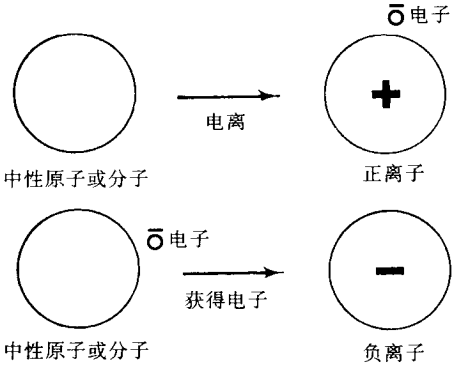


图 2.3　电子和离子

为，而离子不过是得到或者失去一个或几个电子的原子。假如物质的电磁性质几乎能够完全决定其力学性质，我们会发现把它们归结到电子和离子是多么简单。

流入我们电视天线的电流是一股电子流。金属原子的台球图像由两部分构成：静止的带正电的大质量金属离子和一个或几个容易失去的电子。半导体的电子不那么容易失去，绝缘体的电子则几乎不可能从原子中脱离出来。在完全电离的气体中，电子和离子是两个基本成分，这样构成的物质被称为物质的第四态，即等离子体。我们想象将固体加热，熔化为液体，液体蒸发成为气体。再加热，气体的原子彼此产生碰撞，剧烈的碰撞使电子脱离出来，产生带正电的离子。电子同离子构成等离子体。我们平常最熟悉的等离子体是太阳，它主要由氢组成；更准确地说，它由两种基本的带电粒子，质子和电子，沸腾地混合在一起。

磁能告诉我们更多的事情。原子像小磁体，就是说，在原子中存在着某种形式的环行电流。因为原子里有电子，而电子带着电荷，电荷的运动产生了原子的磁性。但是，仅靠原子内电子的运动还不够。为了说明所有的铁磁现象（毕竟这是我们最熟悉的

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com