魔鬼物理学

（套装3册）



中信出版集团

魔鬼物理学

（套装3册）

[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯 著
鲁冬旭 等 译

中信出版集团

目录

魔鬼物理学.1：隐藏在日常生活背后的物理学知识

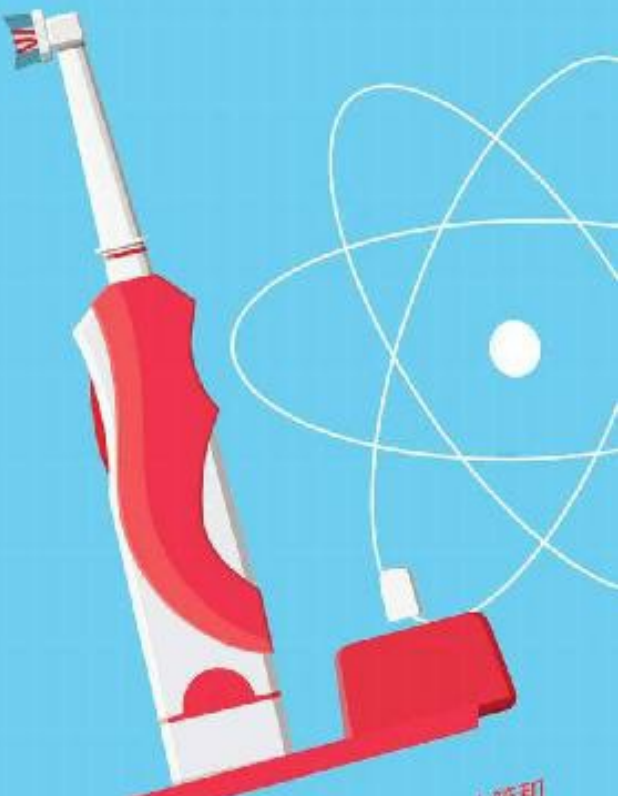
魔鬼物理学.2：迷人又有趣的量子力学

魔鬼物理学.3，超级英雄故事里的物理学

魔鬼物理学 1

隐藏在日常生活背后的物理学知识

[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯◎著
（James Kakalios）
黎冬旭◎译



THE PHYSICS OF EVERYDAY THINGS

The Extraordinary Science Behind an Ordinary Day

在电动牙刷、导航仪、冰箱和飞机里找到隐藏的物理学奥秘

中信出版集团

魔鬼物理学.1

——隐藏在日常生活背后的物理学知识

[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯 著
鲁冬旭 译

中信出版社

目录

第1章 起床啦！

第2章 开车进城去！

第3章 看医生

第4章 去机场

第5章 坐飞机

第6章 做商业报告

第7章 留宿酒店

致谢

注释

图片说明

献给杰夫·纳什和卡米尔·纳什，以及奥古斯塔·彼得森；
感谢你们让我看到，平凡的每一天也可以过得不平凡。



第1章
起床啦！

清晨，你在床上睡觉。你的呼吸均匀有规律，你的脉搏平稳，这两种节奏标志着时间正悄然流逝。很快，你就要起床开始新的一天了。今天将是忙碌的一天，你先要去医生那里就诊，然后还要乘飞机去另一个城市做商业报告。你的墙上挂着一个旧时钟，那是祖母送给你的礼物。钟摆有节律地来回摆动，同时发出令人安心的嘀嗒声。虽然墙上的这面时钟已经有很好的计时功能了，但你还是需要智能手机上的闹钟来叫你起床。然而，在这新的一天中，你的第一种感觉并不是来自听觉，而是来自嗅觉。昨天晚上，你提前把咖啡机的数字计时器设定好，因此，在智能手机的闹钟铃响之前10分钟，这台咖啡机已经自动开始为你制作咖啡了。你的房间里充满了新鲜咖啡的香味，你慢慢醒来，准备起床。

不管是墙上的时钟，还是咖啡机中的数字计时器，都依赖于一种十分优雅的机械运动——摆锤振荡。在你准备开始新的一天的过程中，你会用到许多电器和设备，而如果没有摆锤振荡，这些电器和设备都将无法工作。

摆锤是一种非常简单的机械装置[1]，它的主要部件是一根弹簧，弹簧的一端是固定的，另一端则悬着一个重物，我们称这个重物为“摆球”。当摆球振荡的时候，我们就能够直观地看到物理学中最重要的原理之一——能量守恒定律。随着摆球的振荡，动能（物体做机械运动产生的能量）会被转化为势能（取决于作用于物体上的力，以及这个力能够使物体移动的距离），然后势能又被转化为动能，如此不断循环。要想让摆球振荡起来，你首先要将摆球拉高，以此来增加摆球的势能，在这个过程中，你克服重力做功，然后重力会将摆球拉回较低的位置。随着摆球因重力下落，摆球将沿着半圆弧的轨迹运动，摆球的势能被转化为动能。而当摆球到达最高点时，这种动能又再次被转化为势能。如果你释放摆球且不再推动它，那么摆球将永远也回不到起始点的高度。

摆球可以被用来计时。在摆球振荡的过程中，它完成一个完整周期所用的时间与摆球的质量无关，也与摆球开始下落那一点的高度无关。摆球开始下落的点越高，它运动时划过的圆弧轨迹就会越长，它在最低点处所具有的动能越大，速度也会越快。摆球运动距离的增加和速度的增加正好相互抵消，因此不管你把摆球拉到多高，它完成一个振荡周期所用的时间都是不变的。影响摆球运动周期的唯一因素是弹簧的长度。

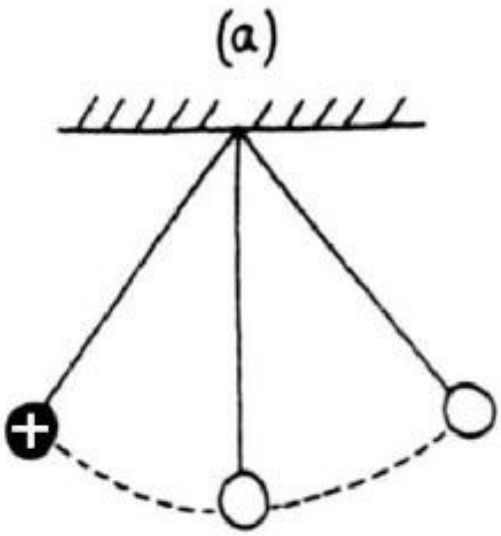
如果一个摆锤的弹簧长度恰好比10英寸[1]短一点儿，那么这个摆锤完成一个完整的运动周期所需要的时间就约为1秒钟。随着摆球发生振荡，摆球上的部分动能转移到了周围的空气中，因为在振荡的过程中，摆球必须推开“挡路”的空气分子。如果进行仔细分析，我们就会发现，空气获得的动能正好等于摆球损失的能量。因为这种空气阻力的存在，所以所有的机械钟（不管是老式机械钟还是其他机械钟）都必须定期上发条才能继续运转。

咖啡机中的数字计时器与机械摆锤一样，要想度量时间的流逝，不仅要有能量来源（因为做任何事情都需要能量，包括读秒这样简单的活动也不例外），还需要把能量转化成周期性变化的方式。要想让咖啡机中的计时器工作，你必须先把咖啡机的插头插入电源插座，这样咖啡机就与一个外部电网连接在一起了。发电厂发出的电可以自动为摆锤振荡提供电流，因此我们才可以十分方便地使用咖啡机中的数字计时器。

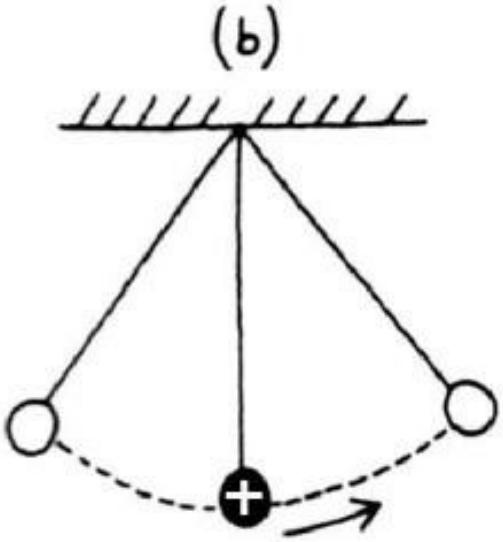
电力公司让线圈在巨大的磁极之间转动，就产生了交流电。抛开复杂的发电过程不谈，我们还是回到简单的机械摆锤上来。现在，我们让弹簧一端的摆球带上一点儿电荷，比如，我们让这个摆球带几个电子。在这种情况下，即使这个摆锤的支点没有任何摩擦，且它在真空环境中振荡（也就是说没有任何空气阻力），它的振荡速度仍然会逐渐变慢，并且最终会完全停止运动。那么，摆球的能量去哪里了呢？答案是：摆球的能量变成了电磁波。这种现象说明，电场和磁场之间具有一种十分广泛的对称性，在你每天的生活中，你会不停地用到这种对称性。

电荷的运动形成电流。随着带电摆球左右摇摆，电流也在不断地变化。当摆球运动至圆弧轨道的最低点时，摆球的速度最快，电流也最强；而当摆球运动至圆弧轨道的最高点时，摆球的速度为零，电流也为零（见图1）。电荷的运动不但会产生电流，还会产生磁场（安培定律）。电荷的运动速度越快，所产生的磁场强度也越大。于是，摆球在左右摇摆的过程中创造出不断变化的电流，也产生了一个随电流一起变化的磁场（法拉第定律），这个变化的磁场又产生了一个变化的电场。电场和磁场的有规律振荡被称为电磁波，其频率和摆球的振荡频率相同。电磁波携带着能量，所以产生电磁波需要消耗能量。因此，上文谈到的带电摆球最后会逐渐停止运动，因为摆球的动能转化成了电磁波的能量。如果这个摆球左右摇摆的速度足够快（比如频率达到每秒10^{15}次），我们就可以用肉眼观察到它发出的电磁波。在这种情况下，电磁波会以可见光的形式出现。

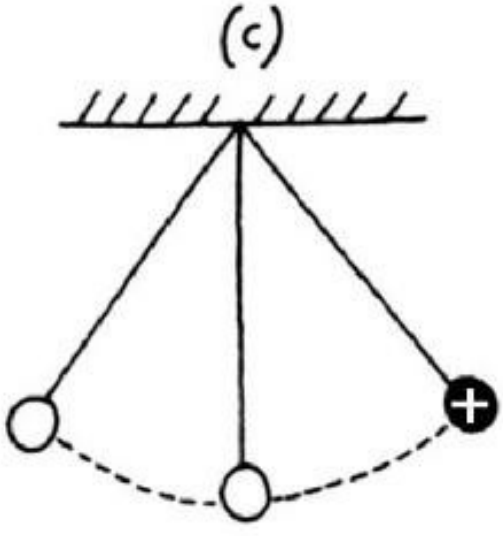
事实上，电力公司在发电的时候就用到了这种通过周期性振荡来产生电磁波的物理学原理。电力公司把线圈放入磁极之间并使之转动[2]，从而产生交流电，再把电输送到千家万户墙上的电源插座之中。电力公司输送到千家万户的电具有这样的属性：电压随着时间平滑地变化，从正电压变成负电压，再从负电压变回正电压，如此不断循环。从数学上看，这种波的形式与摆球振荡所形成的波是一样的。（因此，我们使用的电被称为交流电。）电力公司输出的交流电之所以具有这样的特征，是由发电过程决定的。发电厂运用的物理定律被称为法拉第定律，法拉第定律描述了变化的磁场如何产生电流。随着线圈的旋转，线圈内的圆形磁场也在不断发生变化，于是就产生了电流[2]。把线圈想象成直径较大的一轴线，当线圈面向磁极时，大部分磁感线穿过线圈，而当线圈旋转90度后，则几乎没有任何磁感线能够穿过线圈。因此，当线圈匀速旋转的时候，就会产生一个随时间均匀变化的电流，这个电流与摆球左右振荡所产生的电流是一样的。在美国，发电厂的线圈每秒旋转60次，因此，我们所使用的交流电的频率也是每秒60次。



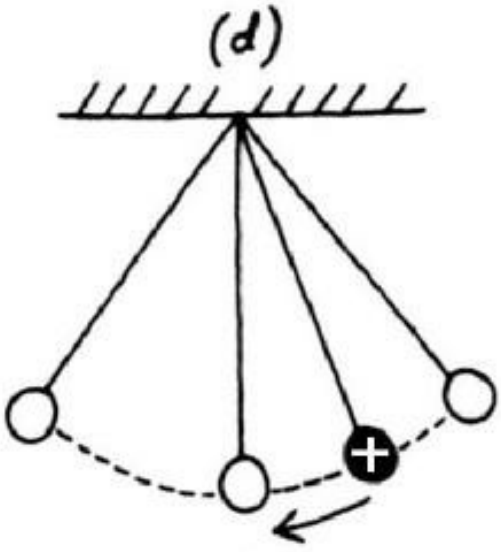
无动能
势能最大
无电流



动能最大
无势能
电流最大



无动能
势能最大
无电流



有一定动能
有一定势能
电流变化

图**1**

来自墙上的电源插座中的电压每秒变化60次，也就是说，完成一个完整的周期只需要0.016 7秒。然而，咖啡机中的数字计时器却不需要这么高频的电压变化。为了让电压变化的频率慢下来，计时器会使用一种专门设计的芯片，这种芯片的功能相当于收音机中的调频器[3]。[3]第一块芯片将输入信号的频率变成原来的1/10，当电压通过这块芯片时，频率就从原来的每秒60次降至每秒6次。然后，第二块芯片又将电压的振荡频率变成原来的1/6，于是刚才产生的每秒振荡6次的频率又被进一步降低，变为每秒振荡1次。接着，信号被送到第三块芯片处，这块芯片的功能是计算达到最大正电压值的次数（这相当于计算摆球再次回到起始点的次数）。事实上，这第三块芯片起到了读秒的作用。然后，再通过一些简单的电路系统，我们就可以把这个信息显示在一个数字时钟上。当你设置咖啡机中的数字计时器时，事实上你是在命令一块芯片开始读秒，当芯片记录的秒数达到一个事先设定好的数值时，计时器就会向咖啡机电路的其他部分发出一个电压信号。这个电压信号与你将咖啡机的开关拨到“开”时产生的电压信号完全一样。因此，收到这个电压信号的咖啡机就会开始工作，为你煮制咖啡。

我们将咖啡机连接上电源，并设定好时间，上述计时系统就开始工作。如果咖啡机没有与电源连接，这些设置信息就会丢失。那么，如果数字计时器未与墙上的交流电电源相连，它又是怎样工作的呢？

当咖啡的气味飘入你的卧室时，你虽然尚未完全苏醒，却也感知到了这种怡人的香味。在前一天晚上，你不仅设定了咖啡机的计时器，还设定了智能手机上的闹钟功能，以确保自己可以按时起床。到了你设定的起床时间，你的智能手机便会播放一段旋律，这段音乐存储于手机的记忆芯片上。听到闹铃声以后，你一边拿起手机看时间，一边发出抱怨的声音，因为今天你起床的时间比平时要早。你很想点击手机屏幕上的“贪睡”键再睡一会儿，但是，今天不行了。你一边闻着咖啡的香气，一边看着卧室角落里的行李箱，这是你昨晚收拾好的。你告诉自己今天将会是漫长的一天，并不情愿地离开了舒适的床铺。你把双脚放到地上，然后站了起来，当你的体重压在左脚上时，你因为疼痛而微微地缩了一下脚。你想，今天该去医生那里检查一下左脚了。

怎样才能让一个未连接电源的设备保持计时功能呢[4]？这是一个古老的问题。事实上，早在人类发明电这种能源之前[5]，这个问题就已经存在了。老式闹钟使用弹簧来解决这个问题，当钟面上的指针运动到一个特定的位置时，一根杠杆就会被弹起，释放此前处于压缩状态的弹簧，一根敲击棒会在两个金属壳之间来回振动，发出刺耳的声响。和老式闹钟相比，你的智能手机中的闹钟体积更小，铃声也不那么刺耳，但从工作原理上来说，智能手机的闹钟和老式闹钟是一样的。

智能手机用压电晶体[6]取代了老式闹钟中的机械弹簧。但是，我们是先有了简单的弹簧系统，然后才发明了压电晶体的技术。

弹簧是一种非常好的计时工具。如果你把弹簧的一端固定在天花板上，然后在弹簧的另一端挂上一个重物，重物就会将这个弹簧向下拉伸。而被拉伸的弹簧又会产生一个向上的回弹力，阻止弹簧被进一步拉长，并且平衡了重物的重力对弹簧的下拉力。假如你用手将重物稍稍向下拉，再松开手，那么在你放手的一瞬间，向上的回弹力就会大于向下的重力（因为弹簧被拉伸的幅度越大，所产生的回弹力就越大），重物就会向上运动，并且弹到比初始点更高的位置。当重物的位置高于初始点时，弹簧被压缩，并产生一个向下的推力，这种推力阻止弹簧被进一步压缩，并将重物推回初始的位置。就这样，连接在弹簧上的重物上下振荡，做周期运动。这种运动与摆球的左右振荡或者交流电的周期性变化是一样的。弹簧振荡的自然周期取决于弹簧的弹性系数以及重物的质量。我们这里所说的弹簧不一定要像玩具弹簧那样美观，只要把金属紧紧地缠成一卷，就可以制成一个弹簧。这种弹簧同样可以周期性地伸缩，比如腕表中的弹簧就属于这种类型。

老式闹钟中的弹簧在被拉伸或压缩的时候会产生一种力来对抗它所受到的拉伸力或者压缩力，这种力的来源和智能手机中压电晶体产生的力的来源是一样的，都来自于电。在所有固体物质中，物质的原子都是靠电力才聚拢在一起的。也正是因为这些电力的存在，才能保证每个原子都待在属于它的特定位置上。如果固体中的两个相邻原子靠得过近，这两个原子的电子之间就会产生排斥力，从而拉开这两个原子之间的距离。我们可以把晶体中的每个原子想象成一个简单的球体，而让这些原子保持在特定位置上的化学键则相当于一根两端各连接着一个原子的弹簧。如果我们把晶体中的一个原子推离它的位置，该原子周围的电子就会与某一侧的“邻居”过于靠近，而与另一侧的“邻居”过于疏远。这样的位置变化会破坏力的平衡，而这种不平衡最终又会将原子推回平衡的位

置。随着晶体中的原子回到自然的平衡位置，也会达到力的平衡。然而，由于动能的存在，在回归原位的过程中，这个原子会“跑过头”，变得过于靠近另一侧的相邻原子。因此，这个原子会在平衡位置附近发生振动。振动的幅度取决于晶体的温度，振动的频率则取决于原子的质量和化学键的弹性。在所有的固体中，都会发生上述原子振动的过程，这些固体包括我写的这本书、你现在坐的椅子，甚至包括你自己。

数字计时器（比如电子腕表或者智能手机）是靠一种特殊的振子——石英晶体来完成计时功能的，它比弹簧振子的精度高得多。石英是一种由二氧化硅分子构成的固体物质，我们常见的沙子的化学成分就是石英。如果这些二氧化硅分子随机排列，所形成的固体就是玻璃；如果这些二氧化硅分子周期性地有序排列，所形成的固体就是石英。石英晶体具有一种特殊的性质：朝同一个方向挤压石英时，它内部的所有电荷就会排成一行，沿着固体的长边形成一个净电场。具有这种性质的材料被称为压电体（piezoelectric），其中“piezo”在希腊语中意为“挤压”。所谓压电体，是指在被挤压时会产生电势的固体材料。要想让压电体产生电势，原子离开平衡位置的距离必须大于原子自然振动的幅度。对于某些种类的材料和晶体结构而言，当固体的两侧被挤压到一起时，所有原子会正好处于合适的位置，从而产生一个很大的净电场。

然而，要想用压电体达到计时的目的，我们必须反向操作上述过程。也就是说，我们对固体施加一个电压，使得晶体的两侧就像受到外力的作用一样被挤压到一起。一旦停止施加这个电压，晶体就会反弹舒张，并开始以自然频率振荡。振荡频率取决于晶体的形状和大小，其范围很广，可能低至每秒钟几千次，也可能高达每秒钟数亿次。石英晶体的振荡会产生相应的电压，电压的频率与石英晶体的自然振荡频率一致。我们可以反过来用这种电压让石英晶体保持振荡状态。降频芯片可以把石英晶体的高频振荡变成每秒一次的周期性振荡，和上文中提到的咖啡机中的计时器一样。一旦达到设定的时间，系统就会向另一个芯片发送一个电压信号。在咖啡机中，只要第二块芯片收到这个信号，咖啡机就会开始工作；在智能手机中，只要第二块芯片收到这个信号，手机就会开始播放闹铃音乐。

对于一部智能手机而言，计时功能非常重要，这种功能不仅体现在闹钟这项应用上。对于计算机而言（在我们的讨论中，我们可以把智能手机看成一台小型计算机），它执行任何一个程序都要求在特定的时间内完成。计算机程序就像音乐，有开始时间和结束时间。和演奏音乐一

样，计算机程序要想达到理想的效果，就必须以恰当的顺序演奏各个“音符”。也就是说，每个“音符”都必须在正确的时间点上出现。一个交响乐团要想演出成功，就必须有一位好的指挥家来控制节奏。比如，这位指挥家必须保证管乐器不会在弦乐器还在准备之时就开始演奏第四乐章。在一台计算机中，有数百万个晶体管、逻辑元件以及存储元件，这些部件都必须按正确的顺序运行。在计算机中，扮演乐队指挥角色的是一块名为“中央处理器”（CPU）的芯片[7]。在晶体振子的帮助下，CPU负责控制整个“乐队”的节奏，但这个乐队的节奏非常快，因为CPU要负责协调大量开关时间不足一纳秒的元件[8]。

洗漱更衣后，你从床头柜上拿起自己的智能手机，走进厨房。你从冰箱中取出面包圈和黄油，把它们放在台面上解冻。此时，你习惯收听播客节目，于是你开始播放手机中早已下载好的节目。今天你收听的节目内容是关于一些著名的小提琴制造匠人，他们是和斯特拉迪瓦里同时代的人。这个节目不仅介绍了这些匠人的生平，还播放了一些用他们制造的名琴演奏的古典音乐片段。为了更好地欣赏这些音乐片段，你把智能手机与厨房台面上的两个扬声器相连。这两个扬声器虽然体积不大，却是质量上乘的高级货。

要想播放播客节目或者存储于手机中的任何音乐文件，你的智能手机必须完成一项基本任务，那就是把数字代码转化为声波，声波实际表现为空气密度的变化（空气密度的变化会造成压力的变化）。早在电子时代来临之前，人类就已经知道如何存储音乐了：靠发条驱动的音乐盒可以播放一首乐曲的一小段，自动钢琴则能演奏整首曲目。虽然音乐盒、自动钢琴以及智能手机三者存储信息的方式存在很大差别，但这三种装置却有一个共同的特点：为了让人们听到音乐，它们必须让空气发生振动。

在一台自动钢琴中，有一套内部装置可以自动决定哪些琴键何时应该被按下。这套装置的核心是一卷纸，在这卷纸上有许多孔，孔的位置分布是经过精心设计的。而在一台MP3播放器中，则由一组数字指令来执行自动钢琴中打孔纸卷的功能[4]。在自动钢琴中，纸卷上有孔的地方以及孔之间的距离组成了一段程序，钢琴中的装置能够解读并且运行这个程序，从而演奏出特定的乐曲。在智能手机中，手机存储的数字信息实质上也是一段程序。当智能手机以特定的方式阅读并执行这段程序时，就能够产生一组特定的电压信号。这种电压的变化由智能手机发送

给扬声器，扬声器会把它转化成声波，这样你就能通过扬声器听到一段特定的旋律了。在扬声器内部有一层振动膜（一个很薄的塑料片），这层膜会以不同的频率和强度发生振动，从而在空气中产生压力波，这种压力波就是你听到的声音。

那么，电压的变化是如何被转化为振动膜的机械振动[9]，从而产生我们能听见的声音的呢？这一过程是通过磁体来完成的。扬声器的振动膜与一个线圈相连，电压能在线圈中产生电流，电压的变化会引起电流的变化。在前文中我们提到，电场和磁场之间存在一种对称关系，通过这种对称关系，线圈中电流的变化就会被转化为振动膜的机械振动。变化的电流产生了变化的磁场，与振动膜相连的线圈正下方有一块永磁体，这块永磁体紧贴在振动膜的底部。当电流顺时针通过线圈的时候，所产生的磁场N极向外，也就是和永磁体的N极相对。因为磁体具有同极相斥的特点，此时便会产生排斥力将磁体推开，振动膜就会向外弯曲。而当线圈中的电流变成逆时针流动时，电流产生的磁场S极向外，也就是说磁场的S极和永磁体的N极相对。因为磁体具有异极相吸的特点，此时产生的力会将线圈拉向永磁体的方向，振动膜就会向内膨胀。随着电压频率和强度的变化，振动膜以不同的频率和强度发生振动，就会产生声波。

当你把耳机塞进耳朵里时，你的耳鼓附近就有了一个振动膜。在一个传统的音响系统中，扬声器的振动膜处于一个向外开口的大圆锥的中心，这个装置能把振动膜的振动放大并且传播出去。智能手机的扬声器内嵌于外壳，因此智能手机播放的音乐，其音量和音质都不够理想。（如果你想用一种简单快速的方法来放大智能手机扬声器的音量，可以把手机扬声器放在一个大碗的底部。这个碗最好是木质的，这会使手机扬声器发出的声音更浑厚、更深邃，因为木材能够提高声波的音质[10]，这也是弦乐器通常采用木质外壳的原因。）

播客节目里播放了一段轻快的音乐。你边听边想象着乐手有节奏地用琴弓在琴弦上拉动，但这让你突然意识到自己还没刷牙。你赶紧把手机的音量调大，然后冲进浴室，从塑料充电基座上拿起你的电动牙刷。

你的电动牙刷里装有一个小型的电动机，可以使刷头来回振动。这个小电动机和一个可以反复充电的电池相连。在你刷牙的时候，电池中

存储的电势能被转化为旋转动能，这一过程实际上反映了一种我们在日常生活中经常用到的技术。电动机中的线圈位于一个小磁体的S极和N极之间，电流通过其中，形成一个磁场，这个磁场排斥磁体的一极，而与磁体的另一极相互吸引，导致线圈被扭曲。沿着线圈直径的方向有一根杆，线圈和这根杆相连，当线圈被扭曲的时候，这根杆会随之发生转动。通过一个巧妙的开关装置，电池产生的直流电可以每半个周期变化一次方向，于是线圈不断和固定磁体的一极相排斥，并与另一极相吸引。通过一根偏心杆，电动机的旋转动能被转化成前后运动的动能，这样电动牙刷的刷头就能在你的上下牙齿间不断振动了。

有些电动牙刷的电动机每秒钟可以旋转几百周，因此你在刷牙的时候会听到电动机发出的嗡嗡声。有些电动牙刷的振动频率高达每秒1 600 000次（但是振动的强度很小），这是通过“倍频器”（前文已经提到，在数字计时器中会用到调频器元件，“倍频器”就是调频器的一种）和压电晶体（智能手机的计时器里也用到了压电晶体）来实现的。

电动牙刷的能量来源是电池，电池通过化学反应把正电荷堆积到一根金属条上，把负电荷堆积到另一根金属条上（这种金属条叫作“电极”）。这种电势差使电动机内的线圈产生电流（或者使压电晶体发生振荡）。最终，化学反应会达到上限，电极上无法再积累更多的电荷。对于充电电池而言，此时我们可以在两个电极之间施加一个电压，使化学反应逆向进行。一旦电池完成充电，电池可以再次发挥电源的作用，之前的化学反应会再次发生，电极上又会堆积电荷。

然而，从设计上看，电动牙刷常常会接触水，甚至会被浸泡在水里。在这种情况下，我们如何给电池充电呢？许多电动牙刷都有一个塑料刷柄，我们可以把这个刷柄放在一个和电源相连的圆柱形充电器上，这个圆柱形充电器的外壳也完全由塑料制成。塑料是一种绝缘材料，在绝缘材料中，每个原子中的电子都只专注于一个目的——把原子聚拢在一起。因此，在对绝缘材料施加外部电压时，材料中的电子并不流动，也就不会有电流产生。既然充电器的外壳和刷柄的外壳都是塑料的，那么当刷柄和充电器相连的时候，刷柄内的充电电池是如何获得电能的呢？这里用到的还是前文多次提到的那个原理：变化的磁场能产生电流。

在电动牙刷充电器的基座中有一个线圈，当充电器和墙上的电源相连时，线圈中就会产生变化的电流。电流的方向不断变化，一会儿顺时针流动，一会儿逆时针流动，如此循环往复，就像左右振荡的摆球一

样。相应地，电流产生的磁场也会不断改变方向。对于充电器的基座来说，在上半个周期中这个磁场的N极向外，在下半个周期中这个磁场的S极向外。电动牙刷刷柄中还有一个线圈，这个线圈处于特定的位置，因此上述磁场正好能穿过这个线圈。穿过第二个线圈的磁场具有这样的特点：磁场的强度和方向都在不断变化，因此线圈中就会产生电流，这和发电厂发电的物理学原理是一样的。由于电磁感应现象，电动牙刷刷柄中的线圈产生了电流，但它是交流电。接下来我们必须把这种交流电转化为直流电，才能给牙刷的电池充电。上述装置的特点是：两个线圈不直接相连，而是一个线圈中的电流通过“感应”使另一个线圈中产生电流。这种装置叫作“变压器”[11]。变压器有很多用途，给电动牙刷的电池充电只是用途之一。

如果牙刷刷柄中的线圈（类似于在一个卷轴上绕线）的圈数和直径都与充电器基座中的线圈一样，第二个线圈（牙刷刷柄中的线圈）中通过感应产生的电流就会和第一个线圈（充电器中的线圈）中的电流完全一样（假设充电器中的线圈产生的磁场完全穿过牙刷刷柄中的线圈）。但是，如果第二个线圈的圈数多于或者少于第一个线圈，第二个线圈中通过感应产生的电流就会小于或者大于第一个线圈中的电流[5]。这样的规律对我们有利，因为墙上的电源插座提供的交流电电压峰值是110伏特，而110伏特的电压对于电动牙刷的充电电池而言太高了。变压器的一个重要作用就是改变电压，这种应用在我们的日常生活中很常见。我们用变压器提高电压，以增加线路中电能传输的效率；而当电能到达千家万户的时候，我们又可以用变压器把电压降至120伏[6]，因为这样的电压更安全，也更适合家庭厨房里的各种电器。

> 你从浴室回到厨房，把面包圈切成两半后放入烤面包机中，然后按下烤面包机的压杆。烤面包机的弹簧会把烤好的面包片向上推，而现在这个弹簧被压缩了，使得面包片没入烤面包机中。烤面包机的发热丝开始变热，最终变成了耀眼的红色。桌上的黄油还有点儿硬，你把它放入黄油碟中，再把黄油碟放在烤面包机的开口上。烤面包机产生的热量会让黄油变得更软、更易涂抹。

烤面包机在美国并不是一项新近的发明，曾祖辈们可能对烤面包机也不陌生。当你把一片面包放入烤面包机并按下压杆时，你不仅让面包没入烤面包机中，还闭合了一个电路。这个电路一闭合，面包片附近的电热丝中便会有电流通过。大概半分钟以后，电热丝变热并且发出红

光。这是为什么呢？要想理解烤面包机如何把电能转化为热和光，我们必须先了解热力学、电磁学以及量子力学的有关知识。对，为了一片烤面包，我们竟然要学习这么多知识！

烤面包机用到了热力学第一定律。这条定律告诉我们，在一个闭合的系统中，热和功的总量始终保持不变。当你按下烤面包机的压杆时，电路闭合，线圈中产生电流，由于线圈有电阻，电流的电能被转化成热能。

让我们先来看看金属线圈。一种材料要成为电的良导体，就必须具有大量能够自由移动的电荷。金属中含有高密度的自由电荷，因此金属具有良好的导电性。而塑料和玻璃等材料中的电荷会被原子间的化学键所束缚，所以这些材料都是绝缘体。在一种固体中，原子的排列方式和原子间的化学作用决定了这种材料是绝缘体还是导电体，原子的排列方式和原子间的化学作用又都受到量子力学方面的限制。

烤面包机的电热丝一般由镍和铬的合金（叫作镍铬合金）制成[12]。镍和铬这两种金属都能导电。一台烤面包机想要快速地把面包片烤热，它所使用的电热丝就必须是电的良导体，但是电热丝的导电性能也不能太好。在镍铬合金制成的电热丝中混合了两种不同的金属，再加上其他一些不完美的地方，这样的设计反而能帮我们取得理想的加热面包片的效果。

我们可以把烤面包机的电热丝想象成一个大楼梯，一群人要同时通过这个楼梯下楼。从最下面一个台阶走出来的人越多，这群人的移动速度就越快，电流也越大。事实上，让这些人下楼的动力是电压。在这个比喻中，我们也可以把电压看成是楼梯的倾斜度，很陡的楼梯对应较高的电压。当楼梯很陡时，每个人下楼的速度就会很快。楼梯的每个台阶对应金属中的原子，要想更快地让一群人通过楼梯下楼（尤其是在人数很多时），最好的办法就是让大家沿着楼梯排好队（按照台阶的宽度排成一个个横排），然后所有人步调一致地一级一级走下楼。当某一横排的人走下最后一个台阶时，另一横排的人走下第一个台阶，这样一来，这个楼梯就能以最高的效率运转了。

然而，楼梯上的人们并非整齐划一地行动，他们的行动具有一定的随机性，就像导线中的电子一样。而且，一个真实楼梯的台阶也不是完全平均分布的（真实的导线也不是）。如果楼梯上缺了一个台阶（这种情况对应于在导线中，某个原子不在它该在的位置上），而且在走到这

个台阶之前没有人发现这一点，就会让人摔个大跟头。这种情况会导致效率下降，下楼的过程就会耗费更长的时间（烤面包机的电热丝中的电流也会更小）。

在金属中，上述情况会导致“电阻”的产生。电流通过一条长而细的导线比通过一条短而粗的导线更加困难。在某些设备中，电阻是一种需要克服的障碍。但是，当我们用烤面包机做早餐的时候，电阻却在帮我们的忙。

由于导线有电阻，电流的动能就被传递给导线中的原子。随着能量提高，原子会振动得更加剧烈，这个过程叫作“焦耳加热”[7]。正因如此，烤面包机要用镍铬合金制作电热丝——这种合金既有一定的导电性，又有很大的电阻，从而保证导线通电时产生最多的焦耳热。如果足够多的动能被传递给原子，原子就会剧烈振动；如果原子振动得足够剧烈，电热丝就会发出红光。

当原子振动的时候，电子会像弹簧另一头悬挂着的重物一样左右摇摆，原子内部就会形成变化的电流。这种原子内部电流的大小和方向都在不断变化，形成一个不断变化的磁场，这个不断变化的磁场又会产生一个电场。让我们回忆一下前文提过的带电的摆球。周期性变化的电场和磁场共同形成了一种振荡的电磁波，这种电磁波就是我们所说的“光”。

为了烤出一片可口的面包，必须把电热丝的热量（电热丝的温度可能超过538摄氏度或1 000华氏度）传递到面包上。在电吹风和电暖器工作时，空气分子经过电热丝，获得了电热丝上过量的动能。而在烤面包机中，加热的过程主要通过红外线完成。当面包的表面温度达到149摄氏度或300华氏度时，面包中的糖和淀粉就会发生化学反应13，面包的味道和质地也开始发生改变。烤面包机有一个用于调节不同加热挡位的旋钮，这个旋钮实际上控制着一个可调节电阻，它可以通过改变电阻来改变电热丝中的电流大小。此外，烤面包机中还装有计时器或者温度传感器，在达到一定的时间或者温度以后，这些部件会将闭合的电路断开——此举能够防止面包被烤煳。

你把黄油碟从烤面包机上移走，此时黄油正要开始融化。不一会儿，面包圈切片从烤面包机中弹出，烤得恰到好处，堪称完美。虽然你很想慢悠悠地喝杯咖啡放松一下，但你知道今天要去看医

生。于是，你给自己倒了一杯橙汁，然后一边听播客节目，一边迅速吃早餐。智能手机的日程提醒功能发出蜂鸣声，告诉你距离和医生约好的时间还有一小时。你清理餐盘、冲洗装橙汁的玻璃杯和装咖啡的马克杯，再把这些餐具全部放入洗碗机中。之后，你把装橙汁的瓶子和剩下的黄油放回冰箱。

烤面包机运用了热力学第一定律，因为电流通过导线时做的功被转化成热。而热力学第二定律则告诉我们当上述过程反向发生时，将会面对怎样的限制条件。这个反向过程就是用热来做功，冰箱正是靠这样的原理来工作的。

一般来说，在出现基础科学研究的结果后，人们才会把这些研究结果应用到实践中。但是，热力学的发展却颠覆了这一规律[14]：我们先有了蒸汽机（却并不理解蒸汽机背后的科学原理），并产生了提高蒸汽机效率的愿望，然后科学家们才发现了蒸汽机背后的基本物理学原理。发动机能把随机的热转化成有用的功，比如内燃机可以燃烧汽油来做功；而电冰箱可以被看作一个反向运转的发动机[15]，它的工作原理是通过做功来减少系统中的热量。

如果你想让一杯热咖啡快点儿冷却，那么你也许会对着咖啡吹气。其实电冰箱在降低其内部温度的时候，用到的是和吹凉咖啡同样的物理学原理：蒸发散热。让我们假设，清早你想喝杯咖啡，可是咖啡太烫，入不了口。温度这一指标度量的是咖啡分子的平均动能。也就是说，在一杯咖啡里，有些分子的动能小于平均动能，也有些分子的动能大于平均动能。某些分子的动能甚至大到足以产生“态”的变化，即从液态变成气态，形成热咖啡散发的蒸汽。当你对着一杯咖啡吹气的时候，你可以把这些动能较大的气态分子从杯口赶走，让它们无法再变回液态，也无法把状态变化产生的能量传回液体中。因此，这个系统中所有分子的平均动能下降，咖啡的温度也就降低了。

电冰箱基本上依靠同样的原理工作，只不过电冰箱使用的液体并不是咖啡。过去，电冰箱使用氟利昂来制冷[16]，但现在氟利昂已被一种新型制冷剂——四氟乙烷所代替[8]。冰箱中有一个电动机，它通过驱动机械泵运转使液态制冷剂流过一根很细的金属管。我们知道，金属是热的良导体（金属中大量的自由电子不仅能够传输电流，也能够传递能量），金属管能够保证液体制冷剂和冰箱壁之间充分发生热交换。在机

械泵的驱动下，液体制冷剂经过一个膨胀阀，从一个细管进入一个较大的空间，在那里发生从液态到气态的转化。要想让某种物质从液态变为气态，就必须为这种物质提供能量（比如把水烧开）[9]。为了完成蒸发的过程，咖啡的蒸汽会从剩下的液体咖啡中吸取能量，四氟乙烷则从冰箱内壁吸收热量。在冰箱中，液态制冷剂会经过一系列S形的管道。管道之所以设计成这种形状，是为了让管道与冰箱内壁接触的表面积最大化。和冷藏室相比，冷冻室的S形管道更密集，可以从冰箱中吸收更多的热量，从而保证冷冻室的温度比冷藏室更低。

制冷剂从冰箱中吸收的热量就储存于气态制冷剂中，我们该如何处理这些能量呢？为了重复上述制冷过程，并让冰箱内始终保持冰冷，机械泵再次将气态制冷剂压缩为液态。制冷剂从液态变成气态时，会从冰箱内壁吸收热量；而制冷剂从气态变回液态时，又会释放出热量。因为驱动机械泵需要消耗能量，所以维持冰箱运转也有能量损耗。这个封闭系统的管道位于冰箱的后部，一般靠近墙壁放置，因此热量不会回到冰箱内部。当冰箱的温度传感器判断冰箱内部已经达到设定温度时，机械泵将停止工作。不管是冷冻室还是冷藏室，冰箱门封条都会向其泄漏热量，但是人们已经用更好的材料和更先进的工程技术提高了冰箱门封条的质量。如果你长时间打开冰箱门检视冰箱内部的物品（或者思考宇宙的某个复杂原理），冰箱内部就会开始升温，此时你会听到冰箱压缩机再次启动的声音。

[1] 1英寸 ≈ 2.54厘米。——编者注

[2] 发电厂利用高压蒸汽来转动线圈。为了产生这种高压蒸汽，必须把水加热到沸腾状态，这个过程可以通过燃烧煤炭或天然气、利用生物能源或核反应能源来完成。但是，不管发电厂使用什么燃料，发电的基本原理都是一样的。

[3] 具体来说，这类芯片的工作原理是在原有的信号上加上另一种频率的信号（这种方法叫作“外差法”）。这样就产生了两种振荡波，其中一种振荡波的频率较高，为两种信号的频率加总，而另一种振荡波频率较低，为两种信号频率的差值。然后，通过一个滤波器，就可以过滤出频率较低的那组振荡波。

[4] 注意这里只是简单地描述其中的原理。在MP3播放器中，软件会对音乐进行压缩，以减少发送给扬声器的数据数量。

[5] 从数学上看，电能等于电压和电流的乘积，因此第二个线圈中的电流越大，电压就越小。（我们必须遵守能量守恒定律，一个系统不可能产生比输入的初始能量更大的能量。）

[6] 美国的额定电压是120伏，但传送到终端时电压一般会降为110伏左右。——编者注

[7] 电吹风和电暖器同样运用了“焦耳加热”的原理。

[8] 2016年，170个国家同意减少电冰箱、空调等设备中氢氟碳化物（比如四氟乙烷）的使用量。（Coral Davenport,“Nations, Fighting Powerful Refrigerant That Warms Planet,Reach Landmark Deal,”*New York Times*, October 15, 2016.）用其他制冷剂代替氢氟碳化物后，冰箱制冷的基本物理学原理并不会发生改变。

[9] 事实上，当我们通过排汗来降低体温时，也用到了同样的原理。排汗本身并不能帮助我们降低体温，只有汗液蒸发才能做到。汗液在蒸发的过程中，消耗了皮肤的能量。如果我们周围的环境中充满了饱和水蒸气（比如非常潮湿的天气），这个蒸发过程就会受到抑制，我们也就无法有效地通过排汗来降低体温了。有时候我们会说：“今天不是太热了，而是太潮了，让人觉得闷热。”从物理学的角度来说，这种说法是很有道理的！





扫此二维码，加我微信好友

扫此二维码，添加微信公众号

还有什么想要读的书？

加小编私人微信wordgai或搜索订阅号微信“互联网分享社区”

按照订阅号书单提示下载



第 2 章
开车进城去！

你乘坐电梯来到公寓大楼的地下车库，走向自己的汽车——一辆油电混合动力汽车。你的钥匙扣上挂着一个无钥匙遥控器，只要按下按钮就可以打开锁住的车门。进入汽车以后，你在方向盘前坐好，发动汽车向车库出口开去。在车库出口处，你减慢车速，一个传感器识别出你车中的电子钥匙，自动为你打开了车库门。

从本质上来看，汽车是一种把势能转化为动能的机器。在内燃发动机中，势能表现为化学能，这种能量储存在汽油分子中。在电动汽车中，势能来自电化学电池。而油电混合动力汽车既装有内燃发动机，又配有电动机[1]，这种汽车的设计目标是将两种能源的优势最大化，同时让其劣势最小化。燃油汽车加满一箱油后可以跑很远的距离，但这种汽车的每公里油耗指标不理想，还会产生有害气体。电动汽车则更加环保、高效，但是每次充满电后的行驶距离有限，因为其电池的能量密度较低。如果只考虑正常情况下的驾驶需求，汽车只要装一个小型发动机就可以了（这样的发动机在油耗方面效率更高）。但是，如果车辆需要在高速路上加速或者爬陡坡，小型发动机将无法为车辆提供足够的动力。上述情况虽然不常有，但却是驾驶者可能遇到并且必须应对的重要情况，因此，为了让这种更小、更高效的发动机在特殊情况下仍能产生足够的动力，油电混合动力汽车把以电池供能的电动机作为次要能量来源。这样一来，油电混合动力汽车不仅靠更高效的发动机降低了每公里油耗，而且还不用以牺牲加速性能为代价——因为在车辆加速的时候，电动机可以起到辅助作用。

然而，站在一名物理学家的角度看，每辆汽车都是靠电能驱动的。不管让车轮转动的能量来自哪里，从本质上来看，电动汽车、燃油汽车，甚至是靠蒸汽机驱动的古董车，它们的能量归根结底都来源于电。

在正常情况下，原子是电中性的（既不带正电荷，也不带负电荷）。然而，电中性的原子之间是不能形成化学键的。如果我们让两个原子靠得非常近，它们的电子旋转轨道就会发生重叠。带负电的电子会互相排斥，使得两个原子彼此远离并且各自独立。要想让两个原子结合在一起形成一个分子，就必须克服这种排斥力，因此必须找到一种额外的吸引力来抵消电子之间的排斥力。原子间的所有键都依赖于电所产生的吸引力，这种吸引力能让两个原子保持“在一起”的状态。在一个汽油分子中，原子之间的键叫作“共价键”，共价键通常来说非常牢固，想让

共价键断裂，就必须施加相当大的能量。当汽车发动机中发生燃烧反应时，汽油分子的碎片会重新组合起来，由于共价键的强度很大，所以这个过程会释放出相当大的能量。

还有一种化学键叫作“离子键”，电池中储蓄的能量就来自离子键。如果原子所带的电子数目比正常数目少或者多，原子就变成了“离子”。在一个“阳离子”中，绕原子核运动的带负电的电子数目少于原子核中带正电的质子数目。如果电子的数目大于质子的数目，我们就会得到一个“阴离子”。电池是一种靠离子来产生电压的设备。一个典型的电池可以让离子在两个金属棒之间移动[2]（这两个金属棒被称为“电极”或者“终端”）。电池的两个电极通常都浸泡在某种液体中，这种液体可以是酸性的（比如硫酸），也可以是碱性的（通常是氢氧化钾）[1]，它使电池一极上的原子带上电荷，从而形成离子。如果我们选择适当的金属作为电极，再选择合适的化学液体，就可以让带负电的离子堆积在一个电极处，而让带正电的离子堆积在另一个电极处。我们在液体中放置一个起分隔作用的挡板，让离子待在相应的电极处，并防止阳离子与阴离子在液体中互相结合放电。当我们用一根导线把电池的两极连在一起时，导线两端的电势差使得导线中的电子远离电池的阴离子极，而流向阳离子极。于是，这根导线中就产生了电流。我们可以利用这种电流来做机械功，比如驱动一个电动机。

当我们利用电池在电路中产生电流时，电极中存储的离子就会发生移动，而电池液中的化学反应可以继续为电池的两极提供正负电荷。但最终，电池液中的反应物会耗尽，到那时，电池将无法继续保持额定电压，这个电池也就“没电”了。幸运的是，今天的电动汽车配备的都是可充电电池。

用电池来存储电能的另一个局限性在于，电池的金属电极能够容纳的带电离子数量是有限的，这是把电池作为汽车的唯一能量来源的一个很大的劣势。和电池的能量密度相比，存储在汽油分子化学键中的能量密度要大得多。我们要做的就是用某种方式获取这些能量，并用这些能量来驱动汽车。

一个典型的汽车发动机通常有4~8个气缸，每个气缸的顶部都有一个洞，与一根管子相连，通过这根管子可以向气缸注入各种不同的化学蒸气。气缸的侧壁非常坚固，顶部是固定的，底部是一个可以上下滑动的金属板（这个金属板被称为“活塞”）[2]。一个燃烧周期共有4个步骤

[3]，前两个步骤是向气缸中注入汽油蒸气和氧气，并向上推动活塞，压缩气缸中的汽油蒸气和氧气的混合物。被压缩的汽油分子和氧分子温度升高，具有更大的动能。当温度足够高的时候，汽油分子就会与氧分子发生化学反应，表现为燃烧现象，此时混合蒸气的温度恰好比这个临界温度低一点儿。当燃烧周期的第三个步骤开始时，发动机会为上述系统提供一个触发能量，这种触发能量的具体形式是：火花塞产生电弧，点燃高温的汽油蒸气。随着燃烧反应的发生，汽油分子中的化学键断裂，形成新的化学键。这一系列过程的结果是：反应后的化学物质的动能比燃烧之前要高得多。这些速度更快的分子冲击气缸内壁，施加给活塞一个强大的压力，推动活塞向下运动。在燃烧周期的第四个步骤，混合蒸气（包括被点燃的汽油与氧气的混合物，以及气缸中未反应的汽油蒸气）被推出气缸，通过另一根管子以尾气的方式被排放掉，此时气缸回到初始状态。

当我们驾驶汽车的时候，汽车的发动机不断重复上述4个步骤，活塞上下滑动的动能通过一种设计巧妙的机械联轴器转化为汽车行进的动能。在汽车中，有一根杆一头连接活塞顶部，另一头与一个圆盘的边缘相连。活塞推动这根杆上下运动，杆驱动圆盘旋转，圆盘又使车轮滚动起来。

为什么汽油的燃烧会产生能量？一个汽油分子中包含一条碳原子链[4]，这些碳原子通过共价键连接在一起，就像一根手链上的珠子一样，而氢原子则通过化学键与碳原子相连。如果一个分子中所有成键原子的总能量低于这些原子本身的能量之和，这个分子就是稳定的。这种较低的结合能来自于各原子内电子的量子力学作用，在结合能的作用下，共价键分子中的原子就能连接在一起而不分离。如果向分子提供一个比上述结合能更大的能量，分子就可能被“打散”为许多分子碎片。这些分子碎片会与其他原子结合，产生新的分子。新分子的能量低于各个原子分开时的能量之和，随着新分子的形成，这些原子进入了一个势能更低的新状态，这个过程所释放出的能量会加快化学物质的反应速度（使这些物质的动能增加），增加的这些动能就叫作“热”。发生燃烧反应时，不同的分子会释放出不同数量的动能。20世纪初，四冲程燃油汽车之所以能够最终取代蒸汽机汽车以及电动汽车，原因之一就在于，在质量相同的前提下，汽油是能量密度最高的燃料之一。

在某些混合动力汽车中[5]，电动机和汽油发动机同时工作，一起为汽车的运动提供动能。还有一些混合动力汽车则采用另一种设计：在同

一时间内，要么电动机工作而汽油发动机不工作，要么汽油发动机工作而电动机不工作。当汽车发动的时候，电动机负责供能；随着汽车达到巡航速度，汽油发动机取代电动机为汽车供能。有的混合动力汽车靠汽油发动机驱动发电机，再让发电机给电池充电；有的混合动力汽车是在每次刹车时对电池进行充电。在后一种情况下，车轮的转动动能被转移到发电机上，发电机再给电池充电。不管采用上述哪一种设计，这些混合动力汽车的电池都不需要连接外部电源就能够充电。

你沿着熟悉的街道驾车前行，很快就要驶入你每天上班都要经过的高速公路了。此时，你早餐时喝下的咖啡终于发挥了作用，你记起今天并不是要去上班。但是，你正在驾车朝远离医生诊所的方向开去。为了不迟到，你决定打开汽车仪表盘上自带的全球定位系统（GPS）。你快速输入医生办公室的地址，GPS为你提供了前往目的地的详细路线图。你不禁想，再也不用向加油站的工作人员问路了，这真是太好了。

GPS通过和卫星交互来判断你的准确位置[6]。这类定位卫星处于中地球轨道上，距离地球表面约有12　600英里[3]远，绕地球一周大约需要12个小时。目前，有32颗这样的卫星正在围绕地球运行[4]。不管你身在什么地方，你都会至少处于4颗卫星的无线电联络范围内。这些卫星周期性地发射无线电波，任何接收器都可以通过接收这些无线电波来获知卫星发送信号的时间和地点。你的GPS就是一台这样的接收器。你的GPS能够侦测到这些卫星信号，并根据卫星发射这些信号的时间来计算信号每次到达所用的时间。一旦知道了信号的传输时间和传输速度（无线电波是光的另一种形式，因此信号的传输速度等于光速），你的GPS就能够计算出它与该卫星的相对位置。然后，你的GPS又可以根据同样的原理计算出它与另外两颗卫星的相对位置。通过比较三颗不同卫星所发射信号的传输时间，以及你的GPS与这三颗卫星的相对位置，GPS就能够准确地判断出你的位置[5]。一旦确定了你的位置，GPS中存储的地图程序就能够指导你如何到达目的地。

对这些卫星信号的计时越准确，你对所在位置的判断也就越精确。由于光速非常快，在计时方面的微小误差可能会导致定位上的巨大误差。时钟在一个远离巨大引力体（比如地球）的物体上（比如通信卫星）的运行速度会比在巨大引力体表面上的运行速度快一点儿。要想理解为什么引力会影响通信卫星上时钟的运行速度，我们必须先学习爱因

斯坦的广义相对论[7]。爱因斯坦的广义相对论是一种关于引力的理论。不管你使用的是汽车仪表盘上的导航系统，还是智能手机中的定位装置，它们都属于GPS。GPS之所以能够准确地完成定位任务，应该归功于爱因斯坦在理论方面做出的天才贡献。

对于引力效应，你应该再熟悉不过了。当你站在浴室的体重秤上时，你便会感受到引力的作用。体重秤之所以能够准确地测量出你的体重，是因为地心引力会向下拉你的身体，而体重秤需要对你的身体产生一个向上的推力来平衡这种引力。如果你身处外太空的一个封闭房间中，体重秤的读数将会是零。但是，如果我们借助外力让这个封闭房间加速运动（比如在房间的天花板上连接一根缆绳），你便不会继续失重地飘浮了，因为房间的地板会对你产生推力。所以，一旦这个房间天花板上的缆绳开始拉动房间做加速运动，房间里的体重秤便会显示出一个读数。爱因斯坦认识到，由于没有任何方法可以帮助我们判断体重秤上的读数究竟是来自引力，还是来自这根缆绳所提供的加速度，所以这两种作用力从本质上看必须是等效的。

引力来自有质量物体之间的相互作用，而加速度描述的是我们如何在时间和空间中移动。质量会使空间弯曲，也会使时间弯曲，从而改变我们的运行轨道。

地球的质量非常大，这种巨大的质量会使地球周围的时间和空间发生弯曲。想象有一张很薄的蹦床，四周被固定并绷紧，然后我们在这张蹦床上放置一个保龄球。随着保龄球的下沉，蹦床会发生弯曲。如果一个质量很小的物体（比如围绕地球运转的GPS卫星）在这个保龄球附近运动，弯曲的蹦床将会改变这个物体的运动轨迹，因为这个物体必须在弯曲的蹦床表面运动。如果我们能够正确地设定这个较轻物体的速度，那么这个物体将会沿圆周轨道围绕保龄球运动。我们既可以认为该物体做圆周运动是因为它在一个曲面上运动，又可以认为这种圆周运动是引力作用的结果。根据爱因斯坦的广义相对论，这两种解释是等效的。理论物理学家约翰·阿奇博尔德·惠勒对这种情况做了如下注解[8]：在广义相对论中，时空告诉物质如何运动，而物质告诉时空如何弯曲。

相对论会产生两种效应[9]，这两种效应都会让GPS卫星上高度精确的原子钟失准。这些GPS卫星沿着地球运动，每12小时运动的距离多达104　000英里，相对于你所处的地球表面，这些通信卫星的运动速度非常快。因此，根据爱因斯坦狭义相对论中的时间延缓效应，我们可以预

测GPS卫星上的时钟会比地球表面上的时钟的运行速度更慢。

时钟越接近有引力质量的地球，时间就会越慢。要理解这种现象背后的原因，我们需要思考空间如何在地球周围发生弯曲。当光接近地球表面时，在一定时间内光的运动距离会变长。因此，要想让光以同样的速度经过这段更长的距离（相对论的一个核心原则是：光在真空中的传播速度在任何地方都是恒定不变的），时间就必须在接近地球表面的地方慢下来才行。也就是说，作用在时钟上的引力越大，时钟的运转速度就越慢。如果我们知道地心引力的强度，我们就可以计算出GPS卫星上的时钟的运转速度比地球上的时钟的运转速度快多少。因此，在时钟的运转问题上，我们一共看到两种效应：根据狭义相对论，GPS卫星上的时钟比地球上的时钟运转速度慢；但根据广义相对论，GPS卫星上的时钟又比地球上的时钟运行速度快。这两种效应的大小并不相等，因此两种效应无法完全抵消。这两种效应所产生的结果是：由于引力作用，GPS卫星上的时钟比地球上的时钟运转速度快。这种时间上的偏差虽小，却是不能忽略的。如果我们不对这种时间的偏差进行修正，GPS系统的价值就值得我们怀疑了。

> 你开车驶入高速公路，这次你终于走对方向了。仪表盘上的GPS告诉你，你必须在这条路上继续行驶4英里，这意味着你需要缴纳高速公路过路费。当你慢慢驶近收费站时，你看到收费站前排起了长队。看到这样的情景，你不禁心头一沉。好在你立刻意识到，发生拥堵的只是最右侧的两条车道。这两条车道是现金支付通道。于是，你放心了。你抬头看看车前挡风玻璃上的那个小白盒子，不禁对这个能够自动缴纳过路费的快易通系统（E-Zpass）产生了感激之情。你轻松地驶过一个自动缴费通道，避开了排队等候的麻烦。而那些使用现金支付的司机们可就不如你幸运了。

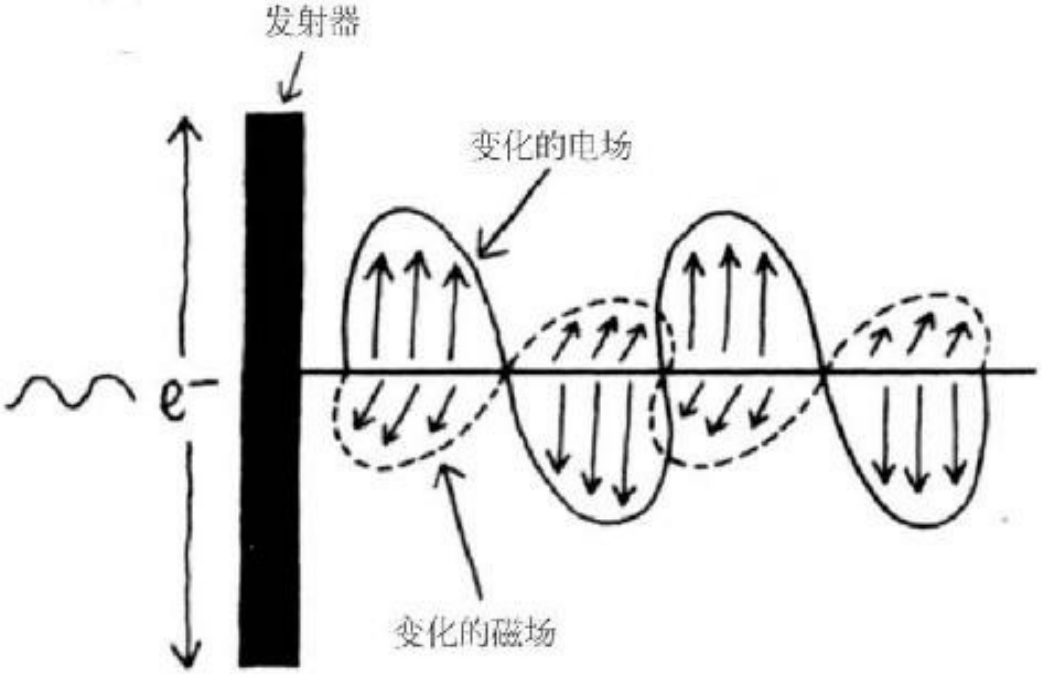
快易通系统[10]主要依赖于专用的无线电技术。事实上，车库门自动开关系统，无钥匙遥控进入系统，警察、军队以及某些紧急救灾人员使用的便携式对讲机也都是依靠专用的无线电技术工作的。你车上的快易通系统是一个靠电池驱动的小型接收器，而收费站中的装置则类似无线电天线。和便携式对讲机一样，不管是你车上的接收器，还是收费站中的天线，都能够发射以及接收无线电波。某些快易通系统的工作原理如下：收费站处会发射一道光束，当车辆驶过这道光束时，接收器和天线之间的“对话”便启动了。当行车道空着时，光束正好射到某个光电探测

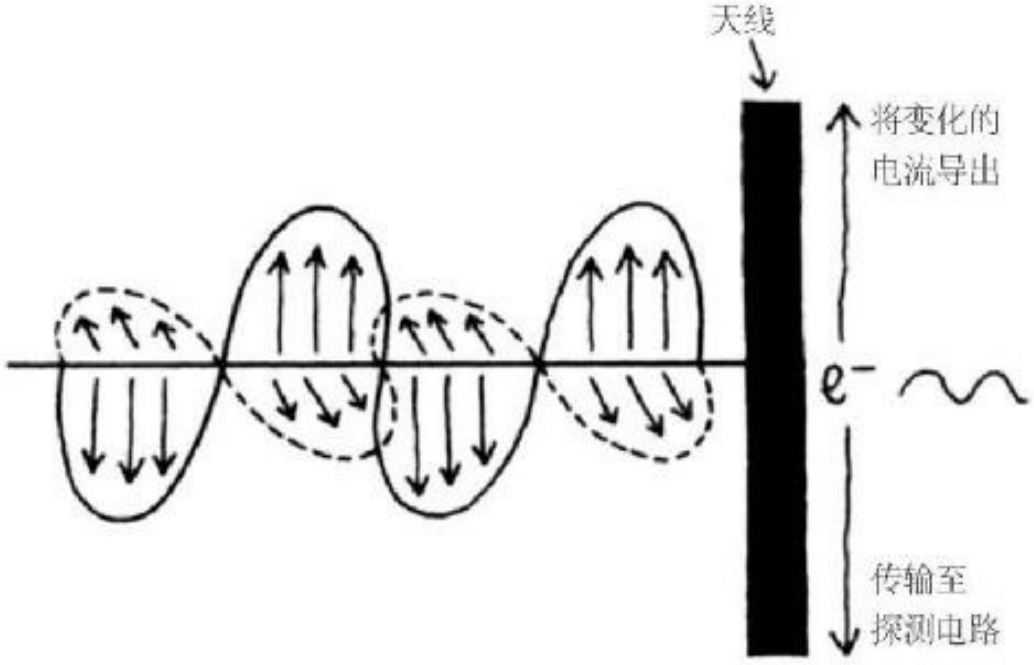
器上；而当车辆驶过收费站时，这条光束会被遮住，光电探测器接收不到信号，某个电路便被断开。这个电路的断开使得另一个电路被闭合，收费站的天线便向车辆中的快易通系统发出一系列信号，这样，收费站与车辆之间就建立起了无线电传输。

既然我们知道快易通系统、车库门自动开关系统以及便携式对讲机都主要使用专用的无线电技术，那么你很可能会提出这样一个问题：无线电的工作原理究竟是什么呢[11]？无线电波的产生和烤面包机的电热丝发红的物理学原理其实是一样的。在烤面包机中，由于电热丝的温度上升，电热丝中的原子就会发生剧烈振动，从而发射出电磁波（因为变化的电流会产生变化的磁场，变化的磁场又会产生电流）。烤面包机的电热丝同时发射出红光和红外线，而如果电子振动的频率较低，就会产生无线电波。

物理学家用“光”这个词来描述任何形式的电磁波。无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线以及伽马射线都属于光，它们之间的区别仅在于电场和磁场的振荡频率不同。快易通系统的无线电波频率为900兆赫兹（即每秒钟振荡900 000 000次）[6]。

当收费站内的天线发射的无线电波与车内快易通系统导线里的电荷相遇时，变化的电场便会使电子发生振动（见图2）。对快易通系统而言，收费站内的天线和车内的装置都会发出信号，也都会接收信号。因此，收费站和车内的装置都可以被称为“接收器”，也都可以被称为“天线”。





当天线接收到电磁波时，电子发生振动，从而产生变化的电流

图**2**

我们可以通过很多方法利用这些无线电波对信息进行编码，但是有两种方法最常见：一种是改变无线电波的峰值，这种方法被称为“调幅”（AM）；另一种是改变振荡的频率，这种方式被称为“调频”（FM）。我们知道，在弹簧的一端挂上一个带电荷的重物，并让这个重物来回振荡，就会产生电磁波。而调幅和调频这两种方式都要求我们对电流进行更复杂的微调。在收音机中，电磁波被转化为电压，电压使接收器的扬声器发生振动，从而产生与原始信息类似的声波。快易通系统中虽然没有扬声器，但其基本工作原理与收音机是一样的。我们通过无线电波的变化将信息编码，收费站内的装置和车内的装置会来回进行无线电的传输交流。

当快易通系统中的接收器接收到无线电波时，这个装置便会发出一个与原始信号不同的无线电波信号，其中包含了车辆的账户信息。然后，这个电子信息会被输入一台小型计算机中。这台小型计算机会验证车辆的账户信息，并检查账户中是否有足够多的资金来支付高速公路过路费。接着，这台计算机向显示屏发出另一个信号，显示屏上会显示车辆账户的扣款信息。无线电波的传播速度等于光速，也就是每秒186 000英里[7]。因此，当车辆经过收费站的时候，车辆行驶的距离还不到1英寸，无线电波就已经完成了上述所有的信号发送和接收工作。当光电探测器感应到有车辆经过时，收费站中的天线就会发出搜索快易通系统的信号。如果天线没有收到快易通系统发出的反馈信号，电子摄像头就会收到另一个信号，并将该车辆的车牌号码拍摄下来，等待司机的就是罚单了（罚单有时是通过邮局寄送的，这个速度可比光速慢多了）。

交通情况似乎不错，你开始考虑：我会不会在约定时间之前到达医生办公室呢？你发现在车流中有几处空当，于是你变了两次道，希望能通过超车节省一点儿时间。有那么几秒钟的时间，你没有看着前方的路面，而是打开了车中的收音机，以便收听天气预报和交通状况播报。今天的天气晴朗，你的航班正常起飞应该没有问题。交通状况同样令人高兴，在早高峰时段，既没有大型的修路工程，也没有发生车祸。突然，你看到前方出现了一片红色的刹车灯。你也快速踩下刹车，以避免和前车追尾。想不到，竟然毫无原因地堵车了。你焦躁地拍着方向盘，心想要是可以飞过去该有多好！

随着高速公路上每英里行驶车辆密度的增加[12]，“车流”——每小时通过指定地点的车辆数目——也会增加。但如果车辆密度变得太大，最终车流将会减小，行车时间也会变长。物理学知识告诉我们，如果车辆不由驾驶员来驾驶，交通将永远保持通畅。

如果高速公路上车辆的密度较小，每辆车的运动就可以被看成是独立的——每辆车的速度由路况决定，而不受其他车辆的影响。这种情况类似于一团非常稀薄的原子云，在这样的原子云中，两颗原子碰到一起的概率很低。而随着车辆密度的增加，路况便发生了改变。在车辆密度较大的情况下，车辆的运动方式更像液体中的原子，每个原子都会与其相邻原子相互作用，其运动也受到相邻原子的影响。在高峰时段，高速公路上的车辆密度达到最大值。此时，你可能被堵在车队中动弹不得，却不知道堵车的原因。有时候，这种交通堵塞的情况并不是由修路或者事故引发的，而是由交通的内在不稳定性造成的[13]。

当车辆密度较大的时候，交通流可以被看成是一种集体现象[14]。在物理学领域，也会出现这样的集体现象，比如水分子会与附近的其他分子相互作用，形成大幅度的扰动，比如产生波。在高速公路的交通问题中也存在这样的现象：当驾驶员看到前方的车流中出现空当时，他们通常并不会减速来保持与前车的距离，而会加速来缩短他们与前车的距离。每辆车的司机都有意地缩短与前车的距离，这就造成了一个聚集的车群。当后面速度较快的车辆接近这个车群的尾部时，它将不得不减速。只有在车辆穿过这个高密度的车群后，它才可能再次加速行驶。

在交通能否通畅方面，有两个因素起到了关键性作用[15]：一是你认识到前方聚集了一个车群，二是你对车辆密度变化的反应时间。如果这个反应时间比较长，也就是说当前方的车辆密度发生变化时，司机需要较长的时间才能反应过来，那么，交通就会变得不顺畅，拥堵的车群也会越变越大。

与上述情况类似的一个例子是沙堆[16]。沙堆的形成过程是这样的：我们把干燥的沙粒不断堆叠到其他沙粒的上方，直到形成一个不稳定的锥形沙堆。如果再给这个沙堆添加一粒沙，就可能造成沙堆侧面发生崩塌。同样，在交通高峰时段，车辆自动聚集成规模不断变大的车群。只需要一个非常简单的触发条件，便会导致交通拥堵。这个触发条件可能是，在车群的前部有个人踩了一下刹车[17]或者是松开了油门踏板，让他驾驶的车辆略微减速。这样一个小小的举动便会引发一场向车群后部蔓

延的“崩塌”，交通堵塞由此发生。只有车群前部的车辆才有机会趁车辆密度较小的时候加速离开这个堵塞的车群，而在车群后部的车辆必须等到车群前部的车辆开起来，才可能继续余下的旅程。即使前方的那辆车已经开动了，接下来的一辆车也不可能与前车同时开始加速，因为后一辆车的司机的反应是有时滞的。因此，车群后部又会有新的车辆被迫减速和停车，使得车群的后部规模不断加大。

如果你能够驾车匀速前进[18]，让行车速度与交通流的平均速度保持一致，那么你不仅可以减少在这类交通堵塞情况中浪费的时间，还能够给后面的司机一个通畅的路况。通过匀速行驶并且有意识地不去缩短和前车的距离，你可以避免自己陷入拥堵的车群。如果交通堵塞的状况已经出现，你这么做将有助于让交通堵塞的问题在你的车辆到达车群尾部之前消失。事实上，在这种情况下，你应该选择不加入车群的尾部。如果所有车辆都能按照高速公路的最高限速行驶，或者按照某个平均速度行驶，这条高速公路可以负载的车辆数目在理论上将达到最大值。在这种情况下，你和这条高速公路上的其他所有司机都能够更快地到达目的地。

> 你的汽车在高速公路上缓慢前行。不管从哪个方向看，路都被堵得死死的。你猜测前方出了事故，而且是一场严重的事故，否则交通情况不会变得这么糟糕。你分别朝路的左方和右方看去，却看不到路肩上有任何紧急救援车辆的影子。你前方的车辆终于开始加速，你发现这场交通堵塞结束了，终于又能以高速公路上应有的速度前行了。你向前行进两英里后找到正确的出口驶离高速公路，并继续按照GPS的指示驶向医生办公室。到达医生办公室所在的那栋大楼后，你发现前面有许多车正排队等待进入街对面的收费停车场，而你实在不想排队。令你感到惊喜的是，一辆车正好在此时离开了路边的停车位。虽然这个停车位很小，但你的车有自动停车系统，在它的帮助下你顺利地把车停在了停车位。

自动停车系统的工作目标是，避免平行停车过程中人类可能犯的各种计算上的错误。为了做到这一点，自动停车系统必须精确地知道你的车辆和其他车辆以及障碍物的相对位置[8]。这种定位任务和GPS需要完成的定位任务有所不同，它必须对周围的环境有更加细致的认知，才能够避免撞上其他车辆或障碍物。车载计算机系统与动力转向系统交互，让车轮转出合适的角度，还要考虑倒车的速度（在许多装有这种系统的

车辆中，倒车速度仍然是由司机本人手动控制的）。虽然自动停车功能近几年才出现在各种汽车中，但让有自动停车系统的车辆不会撞上其他车辆或障碍物的物理机制，早在第二次世界大战后就已经存在了，它主要依赖于雷达技术和近炸引信技术。

雷达（radar）一词是“无线电侦测和测距”的英文首字母缩写[19]。雷达的工作原理是在无线电频段上发射一个电磁波脉冲，然后通过天线接收物体对该信号的反射，并利用回声技术来测量车辆与物体之间的距离。在有自动停车功能的汽车中，保险杠上装有一个天线接收器，这个天线接收器可以发出脉冲信号。当脉冲信号碰到其他物体时就会被反射回来，并再次被接收器接收到。由于我们已知信号传播的速度，所以只要测定发射脉冲信号和收到反射脉冲信号的时间间隔，就可以很容易地计算出车辆和该物体之间的距离。通过在汽车的前后保险杠上装置多个接收器，我们就可以准确地判断出汽车与其他车辆的相对位置。然而，由于无线电波的波长较长，而小物体反射无线电波的能力可能没有大物体那么强，所以无线电波在侦测时可能会漏掉一些较小的物体。为了解决这一问题，某些自动停车系统采用了激光雷达（激光雷达的工作原理和雷达类似，但是激光雷达不采用无线电波，而是用波长较短的可见光激光束）或者超声波（波长较短的声波）作为辅助侦测手段，来侦测行人及其他体积小于车辆的障碍物。

自动停车系统与自动驾驶系统的基础原理都是近炸引信技术[20]。在第二次世界大战中，雷达技术的一项重要应用是设法让高射炮的炮弹在攻击目标附近爆炸。一旦炮弹与攻击目标之间的距离达到一个预设值，炮弹就会自动爆炸。炮弹中装有一个玻璃容器，玻璃容器中装着一种电解质溶液（能够导电的液体）。在发射炮弹时，玻璃容器会因为剧烈的振动而破碎，从而使一个电路闭合，然后发射一个雷达信号。在炮弹中还有另一个电路，这个电路能够侦测反射回来的信号波。一般来说，当炮弹和攻击目标的距离缩短到75英尺[9]时，反射回来的信号波强度就足以产生一个感应电压了，这个电压会引发电起爆元件起火，从而将炮弹引爆。有了这样的雷达技术，我们不需要再依赖神射手就能击中目标了。在攻击快速移动的目标时，这项技术显得尤为重要。有了靠雷达触发的近炸引信技术，武器便能自动判断炮弹何时与攻击目标的距离足够近。同样的物理学原理还能够告诉你，在你平行停车的时候，你的汽车何时距离前方和后方车辆过近。

在自动停车系统的帮助下，你顺利地将车停入狭小的停车位。虽然你很想快速走到医生办公室，但左脚踝的疼痛却让你没法走得太快。在缴费亭处，你输入了停车位的号码，并将一张信用卡插入读卡器，这样便能自动完成停车费的缴纳手续了。在看到屏幕上显示的停车费金额以后，你点击了确认键，然后机器吐出一张纸质收据，上面用粗体字标示出你应该来取车的最迟时间。交完停车费后，你回到车里，拿起你的平板电脑，下车并用无钥匙遥控器锁上车门。

汽车遥控进入系统[21]的工作原理相当于单向的快易通系统。当你按压遥控器上的锁定键或者开锁键时，你的无钥匙遥控器便向车内的接收器发出了一个无线电信号，这个接收器会根据信号来操作车门上的电动锁（这个接收器甚至可以自动发动汽车）。车内的接收器接收来自无钥匙遥控器的无线电信号，其背后的物理学原理和无线电调配器是一样的，都是“共振”。

我们生活在一个电磁波的海洋中，电磁波的来源远到太阳（太阳会向我们发射各种频率的光，其中强度最大的是一个较窄频段上的光线，我们称之为“可见光”），近到我们的身体（我们的身体会发出红外线）。通常来说，我们根本不会去想自己身边的各种电磁波，只在我们的手机信号弱以致打不了电话时，我们才会关注电磁波。一个无线电调配器（或者你车内的接收器）必须忽略所有无关频段的电磁波，而只关注你选择的电台所对应的特定频段。为了做到这一点，无线电调配器会用“音叉”作为接收器。

音叉包含一个被弯成U形的金属条。当我们击打音叉时，这个U形金属条的两个长边会以某种特定的频率振动，并在空气中产生压力波。也就是说，音叉能把快速、单次的机械扰动转化成特定频率的声音。我们可以通过改变音叉的长度、质量或者金属条的形状，来改变音叉发出声音的频率。除了击打音叉以外，我们还可以通过另一种方式让音叉的金属条振动，那就是让音叉接触与其自然频率相同的声波，而其他任何频率的声波都无法让音叉疯狂地振动起来。当一个振子达到其自然频率时，振幅就会急剧增大，这种现象叫作“共振”。

无线电调配器与车内的遥控进入系统的信号接收器都用到了共振原理[22]（此外，车库门的自动开关系统与快易通系统也用到了共振原理）。通过共振原理，这些装置只需关注它们应该关注的某种频率，而

无须理会背景中其他频率的电磁波。虽然这些电路比一个简单的摆锤或者音叉更复杂（事实上，在电子学的领域中，无线电调配电路属于一种非常简单的电路），但它们的工作原理从本质上来看都是一样的。当接收器接收到的电磁波频率和电路的自然共振频率一致时，就会产生一个较大的感应电压，这个电压比其他频率的电磁波所能产生的电压大得多。这个较大的电压被输送到系统的其他部分，以便处理这些电磁波中的编码信息。要改变一个摆锤的共振频率，你可以改变摆线的长度；想改变压电石英晶体的自然共振频率，你可以改变晶体的形状或者大小。当你收听广播的时候，如果你从一个频道换到另一个频道，接收器的电路就会发生改变，无线电调配器的共振频率也会发生相应的变化。

在美国，所有车辆的遥控进入系统都使用同样的无线电频率——315兆赫兹。因此，为了保证系统的安全，在发送程序命令的同时，还会随机发射一个12位数字的密码。只有在接收器检测到正确的12位密码后，它才会执行信号指令（比如打开汽车的后备厢或者锁上车门等）。

但是，如果某人有一个接收器[23]，他不就能接收到你的无钥匙遥控器发送的信号，从而截获这个12位密码了吗（就像两台收音机能收听同一个广播频道一样）？事实上，他确实可以这样做，但下一次当你使用你的无钥匙遥控器的时候，你的系统又会随机选择一个不同的12位密码来作为新密码。因此，即使别人输入上次产生的12位密码，也不可能打开你的车门。那么，为什么你的接收器会接收这个新的12位密码呢？这是因为你的无钥匙遥控器使用某种算法来产生密码，你的接收器也使用同样的算法来产生密码。所以，接收器只接收某个特殊的12位密码。当你下一次按下遥控器上的按钮时，遥控器又会产生一个新的12位密码。在这样的设定下，即使有人截获了某一次的信号，他也不可能利用这个信号打开你的车门。

如果你不小心在距离车辆很远的地方按下了遥控器上的按钮，而车内的接收器并不知道这个12位密码已经被重设了，该怎么办呢？设计者已经考虑到了这样的情况，因此，接收器会一次性扫描算法接下来产生的256个12位密码，并在其中寻找正确的密码。

[1] 元素周期表中第一列的元素，比如锂、钠、钾，被称为“碱金属”。碱性电池就是靠这些元素来辅助离子的转化过程。

[2] 在有些汽车中，气缸的底部是固定的，顶部则是可以上下滑动的活塞。但是，这种设计上的不同并没有改变四冲程循环的物理学原理。

[3] 1英里 ≈ 1.61千米。——编者注

[4] 这里所说的是美国的系统，美国的系统是与其他国家共享的。然而，为了摆脱对美国的依赖，最近中国部署了自己的定位卫星网络。

[5] 从本质上来看，每一颗卫星都会产生一个圆，你的接收装置位于圆周上的任意一点。三个不同的卫星便产生了三个这样的圆，这三个圆互相重叠和交叉，而这三个圆的交点就是你所处的位置（这三个圆周的交点只有一个）。

[6] 许多无线座机也使用这样的频率。但是，快易通系统并不会干扰你家里的电话，因为快易通系统的能量很低，作用范围很小。

[7] 这里给出的是光在真空中的传播速度。在其他介质（比如水或玻璃）中传播时，光的速度会变慢。

[8] 虽然很多人拒绝将驾驶车辆的任务完全交给某种车载计算机导航系统，但对于我这样的人来说，还是更愿意把平行停车的任务交给我们的机器人朋友。

[9] 1英尺 ≈ 0.30米。——编者注



第3章
看医生

你走进医生办公室所在的高层建筑，并快速走向电梯间。医生办公室位于这栋建筑的高楼层，你很担心等电梯的时间过长会让你严重迟到。但是，电梯很快就到了，比你预想的快得多。当高速运行的电梯开始向你的目标楼层爬升时，一瞬间你感受到了一种沉重感。

从本质上看，电梯其实是一个滑轮装置[1]。钢索绕过一个圆柱形卷筒，它的一端固定在电梯轿厢的上方，另一端连接着一个平衡砝码。选择平衡砝码的重量时，要考虑电梯轿厢的重量以及电梯的平均载重量。一般来说，电梯轿厢的平均载重量是其最大载重量的40%。平衡砝码的重量越接近电梯轿厢的重量，拉动电梯轿厢升降所需要的能量就越少。

让我们想象一下跷跷板是怎样工作的。如果坐在跷跷板两端的儿童体重相等，跷跷板的升降就会变得非常容易。如果跷跷板的一端坐着一位体重较大的成年人，而另一端坐着一个小朋友，想让成年人的这一端升起，就必须给跷跷板施加额外的力。对电梯来说，载有乘客的电梯轿厢就相当于跷跷板的一端，而钢索另一头的平衡砝码就相当于跷跷板的另一端。如果电梯轿厢的质量和平衡砝码的质量相等，那么一侧下降所产生的力（这一侧势能将下降）就恰好能够平衡另一侧上升所需要的力（这一侧势能的增加量恰好等于另一侧势能的减少量）。如果在电梯升降的过程中，电梯轿厢和平衡砝码所组成的系统的总势能保持不变，驱动电梯运行的电动机所需要做的功就会减少。如果电梯轿厢是空的或者达到其最大载重量，在电梯升降的过程中，电梯轿厢和平衡砝码所组成的系统就会产生一个净势能变化。系统总能量的变化意味着电动机必须对这个系统额外做功。

连接电梯轿厢和平衡砝码的钢索长度必须略大于大楼的高度。当电梯轿厢停在底楼时，平衡砝码处于大楼的顶部。而当电梯轿厢位于最高楼层时，平衡砝码则处于底楼。

但是，钢索不能只是松弛地垂挂在滑轮上。钢索必须紧紧地抓住滑轮，当电动机转动滑轮的时候，钢索必须随着滑轮的转动而运动，这样才能够带动电梯轿厢的升降。滑轮事实上是一个圆柱体，钢索是通过摩擦力抓住这个圆柱体的。钢索与滑轮接触的表面积越大，摩擦系数越高，所产生的摩擦力也就越大。因此，钢索不是简单地垂挂在这个卷筒

上，而是要沿着这个卷筒绕上好几圈。卷筒上刻有一些沟槽（从技术上来说，刻有沟槽的卷筒叫作“槽轮”），钢索嵌入这些沟槽，是为了进一步增加摩擦力。圆柱体的中心与一个电动机的轴相连，这个电动机的轴既可以顺时针转动，也可以逆时针转动，并且可以以不同的速度转动。这样一来，与电梯轿厢相连的钢索就可以在电动机的驱动下上下运动了。

以上就是电梯运行的基本物理学原理。但是，如何才能让电梯高速安全地升降呢？电梯轿厢的升降速度主要取决于转动滑轮的电动机[2]。在电动机中，线圈中变化的电流产生磁场，与此同时，电动机中还有一个永磁体或者电磁铁，上述变化的磁场不断与这个永磁体或者电磁铁相斥或者相吸。磁体的磁力越强，所产生的扭矩就越大（即电动机能够产生的扭转力），电动机能够驱动槽轮达到的旋转速度就越快，电梯轿厢的升降速度也越快。

要保证电梯运行的安全性，我们还需要做一些额外的工作。电梯安全的主要原则是[3]，一定要多配备一套“冗余系统”[1]。虽然一根粗钢索就足以承受满载的电梯轿厢的重量，但大部分电梯都会采用4~8根粗钢索。这样，即使有1根甚至两根钢索发生断裂，电梯轿厢也不至于掉落到电梯井的底部。

事实上，即使这8根钢索同时断裂，电梯轿厢也不会跌落井底。在整个电梯井的内部两侧装有一些垂直的导轨，电梯轿厢被这些轨道所包围。电梯轿厢上的导靴能够抓住导轨，以保证电梯轿厢随时处于完全竖直的状态（即使轿厢内的所有乘客都站在轿厢的一侧，电梯轿厢也不会发生倾斜）。电梯轿厢外的导靴上装有限速器，它们能够侦测到电梯轿厢是否在晃动。如果电梯轿厢确实在晃动，导靴就会对轿厢施力来消除晃动（类似于汽车的防抱死制动系统能够根据汽车的加速度自动调节制动力，这一系统的反应速度和灵敏度都大大超过司机手动控制汽车所能达到的程度）。此外，在导轨上还配置了额外的电梯制动装置。在正常情况下，这些制动装置会沿着导轨滑动。但如果限速器探测到轿厢的加速度过大，这些制动装置就会紧紧地抓住导轨。这些制动装置利用电磁铁让安全钳保持张开的状态，一旦电力丧失，安全钳就会自动闭合，紧紧地抓住导轨不放。这些制动装置的工作原理类似于一种“失能开关”，在电梯导轨上安装这种制动装置已经有很多年的历史了。然而，对于高速运行的电梯而言，要让一部快速升降的电梯轿厢突然停下来会产生很大的摩擦热。这种巨大的摩擦热会导致制动装置中的金属熔化。如今，

安全钳表面会镀有一层极其坚硬的陶瓷材料，其所能承受的温度比金属高得多（出于同样的原因，某些高性能跑车的刹车片上也镀有这种陶瓷材料）。在滑轮中有一个“调速器”装置[4]，如果滑轮转动的速度过快，调速器就会用钩子拉住棘轮，使滑轮完全停止转动。这种安全措施的设计十分巧妙，其原理是当滑轮转动时，滑轮上的钩子会飞到离滑轮中心较远的地方；当滑轮的转速达到某一特定值的时候，钩子就会拉住棘轮，从而使滑轮完全停止转动。

在电梯井的内部，电梯轿厢的运行速度可以达到每小时40英里。在这样高速运行的情况下，电梯轿厢需要消耗相当大的能量才能推开运行路线上的空气。因此，在电梯轿厢的顶部和底部包裹着一层经过特殊处理的轻质金属曲面，它有助于提高电梯运行的空气动力学性能，减少推开空气所需的能量损耗。此外，在设计电梯的时候，电梯轿厢内部的空气压力也是一个需要考虑的因素。在你乘坐电梯从一座摩天大楼的顶层下降到底层的过程中，你的耳鼓会感受到一种令人不适的压力，这和飞机降落过程中你的耳朵会觉得不舒服一样。电梯轿厢内的一些小风扇可以调整那里的空气压力，当你到达大楼的底层时，空气压力的变化已经完全被消除，所以在电梯门打开的那一瞬间，你并不会感受到明显的空气压力差。

此外，高速电梯还存在另一个和飞机有关的物理现象。为了减少电梯升降所需的时间，与槽轮相连的电动机必须让滑轮快速转动起来。也就是说，这个过程中的旋转加速度只有足够快，才会使电梯轿厢产生一个很大的线性加速度。当电梯轿厢开始加速时，你会产生一种短暂的沉重感或者轻盈感。这种现象很好地诠释了广义相对论中的“等效原理”：在一个封闭的房间中（比如在一个封闭的电梯轿厢内），不可能区分开加速效应和引力效应。当电梯轿厢开始上升时，会有一个很快的向上的加速度，因此轿厢地板会对你施加一个额外的向上推力（当电梯静止时，轿厢地板也会对你施加一个向上的推力来平衡你的正常体重；但当电梯向上加速时，地板对你施加的向上推力会增大），让你感觉自己的体重似乎增加了。如果电梯在上升的过程中不停靠任何楼层，而是直接向着大楼的顶层爬升，那么在大部分情况下，电梯会匀速上升，你感受到的是你自己的正常体重。但是，当电梯接近顶层时，电梯轿厢必须减速，轿厢地板施加的向上的推力就会减小，这时你会感觉自己的体重变轻了。当某些飞机沿着抛物线轨迹飞行时，在抛物线的顶端，乘客会暂时感到完全失重。事实上，当电梯接近顶层而开始减速的时候，也会发生类似的情况。

你终于到达了医生办公室，并在前台登记签到。前台的接待员发给你一个板夹，里面夹着你需要填写的一系列表格，这些信息是你每次看医生都必须提供的。虽然你的医疗保险信息与上次就诊时相比没有发生任何变化，但接待员仍然要求你出示保险卡，并将正反面复印存档。之后，接待员让你坐下等待。你在候诊区坐了下来，打开你的智能平板电脑，并输入密码。平板电脑的屏幕亮起，上面显示的信息包括时间、温度以及一系列应用程序的图标。你向前台接待员询问候诊室中是否有无线网络，接待员把无线网络的密码告诉了你。网络连接成功后，你的平板电脑屏幕的一角显示出几条同心弧。你用手指在平板电脑上轻轻一划，屏幕上又出现了一幅满是应用程序图标的画面。你点击了一下航空公司的官方应用程序的图标，昨晚你已经提前在网上办好值机手续了，但此刻你想确认今天你将要乘坐的航班是否会准时起飞。平板电脑的屏幕上出现航空公司的主页，你点击了一下“航班状态”后，网站要求你输入你的航班号或者航班的始发地和目的地。你不需要查看机票就能记起航班号，因为它恰好与你的出生年份数字一样。你输入航班号，网页跳转了一会儿，之后屏幕上的信息告诉你，你要搭乘的航班将会准时起飞，并向你提供了登机口的信息。你对当地的机场相当熟悉，你立刻就意识到该航班的登机口和安检处之间颇有一段距离。你心想，希望你不用跑步赶往登机口（你的左脚踝目前实在不适合奔跑）。就在你想向前台接待员询问什么时候才能轮到你时，护士出现了，并喊出你的名字。

只要在平板电脑屏幕上点击相应的图标，就能轻松地访问航空公司的网站。然而，这个看似简单的过程却包含了一系列复杂的物理现象。每当你的平板电脑访问一个网站时，从本质上看就相当于它在打一通电话。当然，在这种情况下，你不需要等待听筒中的拨号音以确认电话线是否畅通，你需要做的只是观察平板电脑（或者智能手机、笔记本电脑）上是否出现同心弧的图标，因为它的出现意味着这台设备已经探测到了附近某台无线路由器发射出的某个特定频率的无线电信号（不管你是使用无线网络，还是使用你的数据流量，二者背后的物理学原理都是一样的。因此，在这里我们仅讨论无线网络的情况）。你在浏览器地址栏中输入的网址事实上是一个昵称[5]，它代表一个数字形式的地址，大致相当于一个电话号码。在打电话的时候，交换机将选择最优路径将你的电话发出的信号传递到你所拨打的电话中。你想访问的网站是靠一些计算机主机和服务器支撑的，它们存储了网站的所有信息（包括格式和

内容）。你在访问这些网站时，便可以获取主机和服务器上存储的信息。

当你访问一个网站时，你的智能平板电脑通过无线电波（无线网络）[2]与另一台电脑发生交互，那台电脑会向你发送你所请求的一系列电压脉冲，这些电压脉冲包含了你想要访问的网站信息。以前固网电话的信息传输采用的是一种模拟格式，如今大部分电话和智能平板电脑都需要处理大量的数字信息流，也就是一连串的0和1。这种变化是一件好事，因为虽然你的平板电脑或者智能手机的半导体处理器的运算速度很快，但它们并不是非常“智能”。

模拟信号和数字信号之间的区别是[6]，模拟信号是连续变化的，而数字信号是离散变化的。比如，外放扬声器产生的声波就是一种模拟波，因为声波的强度和频率都可以连续变化。决定扬声器的振动膜如何振动的电压信号过去是一种模拟信号，而现在往往是数字信号。数字电压通过把许多很低的电压加总在一起而产生，每一个离散的电压值之间的差距越小，最后的数字电压信号就会越接近于平滑变化的真实信号。这种数字信号也可以被转化为一个模拟信号，然后被传输至扬声器。

虽然电子信号只是近似等于真实电压的模拟信号，但在像智能平板电脑这样的设备中，电子信号较之模拟信号具有一些明显的优势。在数字电话出现之前，长途电话通信一直是一个难题，而且信号的接收也很差。这是因为，在金属线路中传输的电压模拟信号很容易受到噪声的影响（比如，以下几种情况可能会产生噪声：线路中电子的随机运动会产生感应电压，这种电压会对我们要传输的电压信号产生干扰）。要想以更加可靠的方式传输信息，一个方法就是使用电子码[7]，比如摩尔斯电报系统中所使用的表示数字和字母的点和划。在这种方式下，即使某些电子信号流失了，一般来说接收者也仍然能够理解信息的内容。此外，电子信号还有另一个优势：如果你不希望其他人截获和知道你传输的信息，你可以比较容易地对信息进行加密处理。对一连串的0和1进行加密处理，比对一整段模拟信号进行加密处理要容易得多。对于电子商务而言，这是一个相当重要的优势。

智能平板电脑的屏幕是由一系列密集排列的点构成的[8]，这些点叫作“像素点”。平板电脑接收的数字信号会指示每一个像素点是否应该发光，以及它们应该激活哪种色彩过滤器。平板电脑屏幕上的每个像素点大约只比人体中的一个细胞大10倍。因此，我们在平板电脑屏幕上看到

的图像并不会有颗粒感，所有这些像素点的明暗搭配最终组成了一幅高清图像。大部分智能平板电脑的长边约有1　　500个像素点，短边约有800~1　　000个像素点。也就是说，一台智能平板电脑的屏幕共有超过1 000 000个像素点，这就是我们所说的“兆像素”或者“百万像素”。

智能平板电脑会随时监控每一个像素点的状态。当你点击平板电脑屏幕上的某一个点，比如“航班状态”这个图标时，你就向平板电脑的处理器发送了一个信号。这个信号会触发平板电脑与网站主机电脑的交流，后者会把网站的数字信息流发送到你的平板电脑上。当网站的主机电脑接收到你的平板电脑发送的信号时，它就会做出相应的反应——向你的平板电脑发送一套新的指令。于是，你的平板电脑屏幕便会根据这套新的指令，显示出要求你输入航班号码的页面。在你输入航班号码的信息后，主机电脑又向你的平板电脑发送了另一组数据流，你的平板电脑屏幕就会告诉你该航班预计能准点起飞。

护士带你走入一个房间，测量你的身高和体重，然后你们进入就诊室。你在一把椅子上坐下，护士拿出一张标准问题表，问了一系列关于你的医疗历史问题，并把你的回答输入一台小型笔记本电脑中。然后，他测量了你的血压，测量血压的设备几十年来都没有发生实质性的变化。护士没有用听诊器来监控你的脉搏，而是把一个小夹子夹在你的手指上，它看起来就像一个体积不大的晾衣夹。在记录了你的血压和脉搏以后，护士又测量了你的体温，这次他使用的是电子温度计。以前测体温的时候，必须把一根细的玻璃温度计放在舌头下面好几分钟，给人感觉很不舒服。有了电子温度计之后，你只需要把温度计放在口中几秒钟即可。护士记录下你的体温后告诉你，过会儿会有专业人员带你去做X射线检查。说完后，护士便离开了就诊室。

老式的玻璃温度计包含一个很细的空心圆管[9]。圆管的两头密封，内部填充了一种液体（要么是水银，要么是红色的酒精）。在测量体温的时候，温度计的一头会与你的身体接触（比如你舌头下的某个部位）。如果人体的温度高于室温，圆管内的液体就会膨胀，温度计的读数就会上升。

那么，我们如何知道玻璃温度计圆管内液体的高度究竟对应怎样的温度呢？你可以先把玻璃温度计的一头放入冰水（冰水的温度是0摄氏

度或者32华氏度），然后记下此时温度计内液体的高度。你再把温度计的一头放入沸腾的热水（沸水的温度是100摄氏度或者212华氏度）中，你会发现温度计内的液体高度上升了。随着温度上升，温度计内的液体高度会均匀、平缓地上升。最适合作为温度计内测温液体的是水银，因为水银的冰点是–39摄氏度或–38华氏度，只在温度高于356.7摄氏度或674华氏度时才会沸腾变为气体。酒精的沸点是78摄氏度或173华氏度，如果我们想测量一个人的体温，酒精同样可以完成这个任务。

然而，不管温度计中的液体是水银还是酒精，问题在于，为什么这些液体的高度会随着温度的变化而变化呢？虽然我们知道随着温度上升，物体会膨胀，但是，难道由玻璃制成的圆管不会同时膨胀吗？如果玻璃制成的圆管和圆管内的液体遇热后同时膨胀，这两种变化的效果难道不是玻璃管内液体的高度不变吗？我们知道，不管是在固体、液体还是气体中，温度代表的是整个系统中每个原子的平均动能。对于大部分材料而言，原子之间的作用力有一个很小的附加项（叫作“非谐项”），这个附加项的存在使得朝一个方向的拉力略大于朝另一个方向的拉力。由于这个非谐项的存在，当温度上升时，原子会发生一个净位移。这个位移虽然很小，却是真实存在的。某种材料受热时体积增加的幅度取决于原子排列的细节，以及把材料中的原子聚拢在一起的作用力。玻璃的非谐项比水银或者酒精的非谐项小得多，因此当你加热温度计及其内部的液体时，液体的膨胀速度远高于玻璃容器的膨胀速度[3]。玻璃的导热性能不佳（玻璃是一种很好的绝热材料），因此在测量体温的时候，必须把装有液体的玻璃管放在舌头下保持一段时间，才能保证玻璃管中的水银或酒精的温度与人体的温度一致。

事实上，任何系统都可以被当作温度计[10]，前提是这个系统中有某种容易测量的物理性质会随着温度的变化而发生均匀的变化。此处所说的物理性质不仅包括固体的结构性质，还包括电学性质。在高温条件下，金属并不是电的良导体，因为在高温条件下，金属中的原子振动会加剧。原子的剧烈振动会妨碍电流的通过，就像烤面包机中电热丝的缺陷会增加它的电阻一样。半导体也不是电的良导体，因为半导体中的所有电子都被锁定在原子间的化学键中。当温度升高的时候，半导体中的某些电子能暂时摆脱化学键的束缚，这种现象能够显著降低半导体的电阻。所以，只要校准这些材料的导电性随温度变化的情况，我们就可以通过测量金属或者半导体的电阻来测量温度。

以电学方式测量温度的另一种常见方法是，使用一种叫作“热电

偶”的装置。当把两种不同的金属连接在一起时[11]，其连接处对温度敏感，而且会产生一个电压。两种不同的金属，其单位体积内的自由电子数量不同，因此，一种金属会比另一种金属拥有更多的自由电子。当这两种金属被连接在一起时，一种金属中的部分电子就会移动到另一种金属中，就像气体原子会从高压区域向低压区域移动一样。在把两种金属连接在一起之前，每一种金属中带负电荷的电子数目和带正电荷的离子数目都是相等的。然而，把两种金属连接在一起之后，这两种金属的连接处就会产生一个净电势差，从而形成一个电压，这个电压虽然很小，却可以被测量到。当金属连接处的温度发生变化时，部分电子就会从连接处的一侧向另一侧移动。所以，连接处的电压会随着温度的变化而变化。同时，金属的导热性能很好，所以，这种以热电偶为基础的温度计不仅能够提供精确的温度读数，还能非常快速地测定温度。电子温度计中有一个感应芯片，它能够侦测到热电偶连接处的电压，或者是金属或半导体因温度变化而产生的电阻变化。感应芯片与液晶显示屏相连，因此能够向显示屏发送信号，显示出测量到的温度。

不一会儿，一位专业人员将你带入另一个房间。这个房间中的检查台比别处稍宽，上面也铺着标准的白色垫纸。他要求你脱下左脚的鞋子和袜子，然后将一块长方形的黑色板子放在检查台上，并要求你把脚踝置于这块板上。为了做到这一点，你不得不摆出一个可笑的姿势。X射线仪从天花板上降下来，他首先确认你的脚朝向准确的位置，然后将X射线防护铅衣盖到你的身体上。接着，他退到一面保护墙后面，并打开了X射线仪，你听到一阵轻微的嗡嗡声。X射线扫描很快就结束了，但是他发现在扫描的过程中你的脚发生了移动。因此，他再次走到你身边调整你的脚的位置。在第二次扫描的过程中，你努力保持正确的姿势不变，这一次扫描终于成功了。你向他询问什么时候才能看到扫描的图像，他立刻向你展示了计算机屏幕上你的脚踝的X射线高清扫描图像。他告诉你，X射线扫描图像已经以电子数据的方式传送给了医生。在你穿好鞋袜以后，他带你回到就诊室，并且告诉你医生很快就会来给你看病。

X射线是一种电磁波辐射，跟无线电波、微波、可见光和紫外线一样。产生X射线的最常见方法用到了我们前文中多次提到的物理学原理——变化的电流能够产生变化的磁场。在一个X射线管中[12]，导线的一端发射出电子，另一端则是一个带正电荷的屏幕网。这个带正电荷的屏

幕网能够吸引导线发射出的电子，并让电子加速，使电子具有很高的动能。整套系统处于一个玻璃罐中，这个玻璃罐中的空气被抽走（这样做是为了将空气分子对电子的干扰最小化），这也是真空管的前身。大部分电子并不会打到带正电荷的屏幕网的导线上，而是会穿过屏幕的空隙，击中另一块板。这块板带有负电荷，它能使电子迅速减速。电子运动状态的变化会产生电磁波（就像烤面包机的电热丝会发出红光一样）。正常情况下，电子迅速减速时会产生一种射线，其波长很短，相当于单个原子的大小，这种射线就是“X射线”[4]。

当用X射线照射一种固体（比如你的脚踝）时13，射线便会与这种固体材料原子内的电子发生相互作用。固体材料中的电子就像一些方向随机的小镜子，能反射X射线。因此，只有一部分X射线会继续沿直线打到探测板上，而大部分X射线都会被反射到其他方向上去。一个原子中的电子越多，反射X射线的效果就越强。碳原子只有6个电子，因此碳原子能被大量X射线穿透。铅原子有82个电子，因此铅原子对X射线的反射性较强。正因为如此，X射线无法穿透铅板。金原子含有79个电子，对于X射线而言，金就和铅一样，都是不透明的。（出于显而易见的原因，在医生的诊所中，用来屏蔽X射线的防护衣并不是用金子做成的。[5]）

一个水分子只包含10个电子（其中8个来自一个氧原子，另外两个来自两个氢原子）。因此，水分子无法有效地反射X射线。我们的身体主要是由水构成的，所以人体也不能有效地反射X射线，X射线可以轻松地穿透我们的身体。一个钙原子包含20个电子，因此钙原子反射X射线的能力要比水分子强得多。在X射线扫描仪产生的图像中，我们的骨骼显示为白影，这是因为骨骼中的原子能够反射X射线，只有较少的X射线到达了探测板。而没有原子的部分（比如牙齿中的虫洞或者骨头断裂的部分）则不会反射X射线，这部分的X射线通量很高，在探测板上就表现为黑影。我们的软组织的原子密度很高，所以软组织中能够反射X射线的电子也比周围的其他组织更多，因此X射线扫描能够检测出软组织的情况（见图3）。为了提高各部分组织之间的成像对比度，某些X射线检查会先给病人注射一种液体，这类液体中含有碘（碘有53个电子）或者钡（钡本身就有56个电子，扫描消化系统时采用的增强剂硫酸钡共有104个电子）的化合物。在人体的组织中添加这些电子后，这些组织反射X射线的能力就会提高，这样一来，医生就可以通过X射线扫描获得更精确的图像，而不需要将X射线的强度增加到危及病人身体健康的水平。

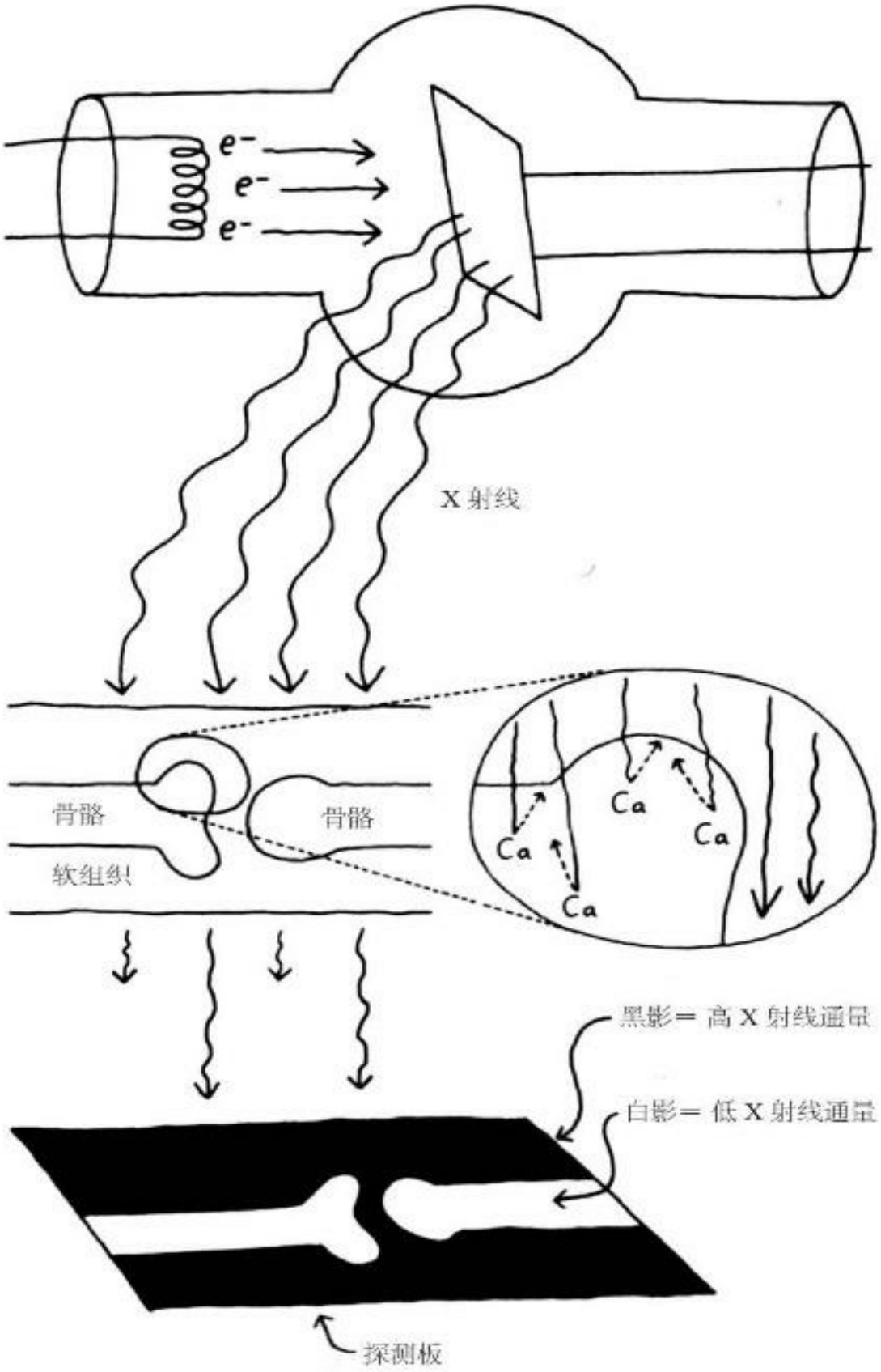

e⁻
e⁻
e⁻
X 射线
骨骼
骨骼
软组织
Ca
Ca
Ca
Ca
黑影＝ 高 X 射线通量
白影＝ 低 X 射线通量
探测板

图**3**

虽然对于医生和其他诊断者而言，能够看到人体表面以下的结构已经是一个巨大的进步了，但是单张二维快照所能提供的信息量是有限的。如果能够对人体做更全面的三维图像扫描，就可以更好地辅助诊断和治疗。在你的身体内部，某个能够反射X射线的组织可能在二维图像上看起来很大，但在三维图像上的体积却很小。比如，这块组织可能是一张饼的形状。如果这张“饼”所处的方向使得X射线扫描恰好显示出它的边缘，医生就会看到一条窄而长的楔形物。这么小的东西似乎根本不值得注意，然而，全面的三维图像能够更精确地显示出扫描物质的真正体积和范围。当然，我们不能仅仅依赖互成直角的两个方向的图像（就像警察局拍摄的罪犯入狱快照一样），因为反射物体不一定只存在于一个面上。要想用X射线构建一个全面的三维图像，我们必须拍摄多幅图像，并让每一次扫描的位置有所不同。将一系列X射线图像组合起来，就能得到三维图像，这个过程叫作“断层扫描”。计算机可以帮助我们用这些图像构建出一个完整的三维图像。这种X射线成像技术被称为“CAT扫描”（全称为“电子计算机断层扫描”[14]）或者“CT扫描”。

断层扫描（tomography，希腊语意为“分段地写”）是指用一个能穿透物体表面的探测器（比如X射线或者声波）获取一系列连续图像的过程。如果这些截面能够系统地覆盖整个物体，我们就可以通过它们构造出一个完整的三维图像。不妨假设我们现在要对桌面上的一个橘子进行三维成像处理，我们打算利用一系列与桌子表面平行的截面来完成这项任务。第一个截面位于橘子的最顶端，其获得的图像是一个点。随着截面不断接近桌面，我们得到的图像是一系列越来越大的圆。而当截面超过了橘子的中心点以后，所得到的圆又会变得越来越小。在橘子的底部我们将再次获得一个点的图像，这是最后一个截面。在我们对这些截面进行比较，并把它们结合在一起后，我们得到了很多个直径不同的圆。根据这些信息，我们可以判断，这个橘子的形状是球体。如果我们对一罐汤罐头重复上述图像扫描工作，我们也会得到一系列连续的图像，但这些图像都是大小相等的圆。这些信息说明，汤是被装在一个圆柱形的罐头盒中的。以上两个例子比较简单，我们可以轻松地分析出物体的形状。但如果我们对人体进行断层扫描，由于人体结构比较复杂，就需要用一台计算机来把这些截面图像重构成一个完整的三维图像。截面的数量越多，最后得到的影像结果也越准确。但是，和单次二维扫描相比，多次断层扫描会使病人更长时间地暴露在X射线中。

医生迟到了一会儿，她进入诊室后就向你问好，并询问你的身体情况。你回答说：“我还好，只是我的左脚有些疼，这就是我今天来看病的原因。”医生从她的笔记本电脑中调出了你的档案，并打开X射线扫描图像。她向你展示了你的片子，并指出你的踝关节有点儿发炎。你立刻反驳道：“以我的年龄来说，得关节炎未免太早了吧？”医生认为，你的关节炎是由以前的一次运动损伤造成的。也许在许多年前，你还在学校上学的时候，发生过一次轻微的骨折，可你当时以为那只是脚踝肿胀而已。医生乐观地表示，只要注射一针可的松就能缓解你的疼痛。可的松必须被精确地注射在目前发生肿胀的部位，因此必须用超声波成像技术来确定扎针的位置。整个注射过程大约需要耗费1小时，但是超声波扫描仪今天所有的时间都被约满了，你只能继续忍受一段时间的疼痛了。医生告诉你，你可以让前台的接待人员帮你预约注射可的松的时间，她还给你开了一些强效止痛药来帮你缓解注射前的疼痛。

声音是一种波，但你也许想不到，声音也可以被当作一种视觉工具。在医学领域，医生可以利用声波来透视病人体内的情况。虽然电磁波可以在真空中传播，但声波却无法在缺乏介质的情况下传播。声波传播的介质可以是气体，也可以是液体或者固体。在超声波成像（又称超声波扫描）中[15]，声波传播的介质就是你的身体。超声波成像的理论基础是：在不同密度的介质中，声波会以不同的速度传播。

声波表现为介质密度的周期性变化。如果你拨动一根吉他弦，它就会以某一个特定的频率振动，该频率取决于这根弦的性质，如张力、质量以及长度。让我们想象一下这根吉他弦振动的情况。当弦振动的时候，弦的中心点以某个特定的频率上下运动。当弦向上运动时，它与空气分子碰撞，并向上推动空气分子。被弦推动的空气分子聚集在一起，其后方就成了一个空气分子密度较低的区域。当弦向下运动时，它又向下推动空气分子。因此，振动的弦实际上使这根弦上下的空气密度发生了周期性变化，这种变化会从弦的位置向外传播。

除了在空气中传播以外，声波还能以相同的物理模式在液体中传播，比如水。声波的传播速度取决于介质的性质，在其他因素相同的情况下，介质的密度越大（也就是说介质中的原子彼此靠得越近），原子之间的联系就越弱，声波在该介质中的传播速度也越慢。如果声波在两种介质中的传播速度不同，当声波到达这两种介质的分界线时，部分声波就会在分界线处被反射。通过改变声波来源的位置，并测量反射情况

的变化，超声波设备可以检测出人体内部密度的变化情况。

一般来说，医疗成像设备的超声波发生器的频率是每秒2 000 000到3 000 000个周期。这样的频率远远超出听力很好的人（甚至是狗）的听力范围。这种高频声波的波长较短，对于成像来说，波长短是一个有利的条件。声波的波长越短，能反射声波的对象体积就可以越小（就像汽车的自动停车系统所用的激光雷达一样）。如果两个相邻的波峰之间的距离是3英尺，那么当这样的波打到一个长度为1/8英尺的物体上时，它就不会发生显著的变化[6]。为了检测到人体内部较小的组织，超声波成像设备所使用的声波波长与可见光的波长接近。但和可见光不同的是，这些声波能够穿透人体表面，并被人体内的器官反射。

在一个超声波成像系统中，先由一种压电材料产生声波。通过一个在正极和负极之间均匀振荡的交流电压，我们可以让压电材料发生周期性的压缩和膨胀，从而产生声波。压电材料可以通过振动产生声波，这和振动的吉他弦产生声波的原理是一样的。压电材料能以极高的频率振动，因此能够在任何与晶体发生接触的介质（比如你身体中的液体）中产生压力波。在做超声波扫描前，护士会在你的皮肤上涂上凝胶，目的是让压电发生器产生的声波能够更好地传播到你的身体中（这种做法被称为“阻抗匹配”）。超声波进入你的体内后，若你体内的组织器官密度发生变化，超声波的传播速度就会发生变化，因此在两种不同密度的介质的分界线上被反射，并被压电材料检测到。振动的压力波会使压电材料收缩或者膨胀，这一变化会产生电压信号，电压信号可被转化为图像。人体内部不同密度介质的分界线是比较模糊的，这会降低超声波扫描图像的对比度。我们可以改变超声波源的位置，让超声波从一系列不同的角度发生反射，这就是一个简单的断层扫描的过程。要获得断层扫描图像，其中涉及的工程和数据处理细节非常复杂，但是这类设备的核心物理学原理都是一样的。当你在夜晚透过一扇窗户向外看时，你会看到玻璃的反射，上述设备事实上也运用了这种简单的物理学原理。

看完医生后，你来到前台预约做超声波扫描和注射可的松的时间。然而，当接待员在她的计算机屏幕上查看医嘱时，她一不小心看错了，以为你需要预约的是核磁共振成像。于是她问你，你想在哪家医院做核磁共振成像，并询问你身上有没有文身。此时你意识到她搞错了。几分钟以后，误会解除了，接待员意识到你并不需要做核磁共振成像。你查看自己智能手机上的日程安排后，预约下周一注射可的松。

“核磁共振成像”又称“磁共振成像”，这项技术的原理是：原子的各个组成部分——电子、质子和中子——都有一个小磁场[16]，它们就像有S极和N极的小磁体一样[7]。不同元素的原子核中有不同数量的质子和中子，也就有不同的磁场。如何测量你身体中每个原子的磁场强度呢？我们先让所有的小磁体都朝同一个方向，再让它们全部旋转180度，并计算这个旋转的过程消耗了多少能量。当你躺在一个巨大的电磁铁内部时，有一个巨大的磁场穿过你的身体。假设这个磁场的N极指向天花板的方向，此时，你身体中所有原子核中的“小磁体”都想与这个外部磁场保持一致的方向，就像你把一块磁体靠近指南针时，指南针会被这块磁体的磁极吸引一样[8]。

更准确地说，当原子核内的小磁场和外部磁场的方向保持一致时，它们的能量最低；而当核内的小磁场和外部磁场的方向相反时，它们的能量最高。正是出于这样的原因，你不能把任何金属或者信用卡带入做核磁共振成像检查的房间，因为核磁共振成像仪器中的巨大电磁铁会对这些物体施加一个很大的力。同样，核磁共振成像过程中产生的变化的磁场会使你体内的所有金属发热，如果你的皮肤上有文身，并且文身图案用了金属墨水，你的皮肤也会因为磁场的作用而发热。

现在，我们还需要了解另一个事实，那就是：你身体内部的原子核中的磁场是非常弱的，即使你将它们放在一个巨大的外部磁场中，要让它们旋转到和外部磁场相反的方向上也耗费不了多少能量。这个消息对我们是有利的，因为这意味着旋转它们所需要的射线恰好位于电磁波谱能量较低的一端。只要利用能够轻易穿透你的皮肤进入你体内的无线电波，就能够完成上述旋转任务。

从量子力学的角度看，一束光中含有许多离散的能量包，这些能量包被称为“光子”。任何形式的光携带的能量都取决于它的频率（这一现象于1905年被爱因斯坦首次发现[17]。那一年，爱因斯坦发表了狭义相对论）。量子力学提出的重要理论之一是：只在光子的能量正好等于原子核或原子两个能级之间的差值时，原子核或原子才能吸收光子。如果光子的能量过高或者过低，原子核或原子就不能吸收光子。不同元素的原子核有不同的磁场强度，因此，对于不同的元素而言，要想在一个外部磁场中旋转核磁体，所用到的无线电波的光子能量就必须有所不同。通过观察何种频率（也就是何种能量）的电磁波被吸收了，我们就可以知道吸收电磁波的原子究竟属于何种元素。

我们可以非常精确地调整电磁波的频率。任何听过广播的人都知道，如果你想要收听的节目在100兆赫频段上播放，而你却调到了100.3兆赫的频段，节目就会听不清楚。核磁共振成像的最主要信号来自充斥着我们身体的每一个细胞的水分子[18]。两个质子（或者两个中子）配对，其中一个粒子的N极对着另一个粒子的S极，它们组合起来的净磁场为零。水中的氧原子含有偶数个质子和中子，因此，氧原子的原子核是没有磁性的。而水中的氢原子是孤立的质子，氢原子内部的核磁场会与核磁共振成像设备的磁场相互作用。因此，这些氢原子就是核磁共振成像设备探测到的信号的主要来源[9]。

为了在核磁共振成像中取得较大的对比度，我们故意让核磁共振成像设备的磁场具有这样的性质：在你身体一侧（比如左侧）的磁场非常弱，然后磁场沿着你的躯干逐渐增强，在你身体右侧达到最强。因此，在你身体左侧，只需要很少的能量就能够旋转你体内的核磁体，而在你身体右侧，则需要较大的能量才能旋转你体内的核磁体。通过向你的身体发射不同频率（也就是不同能量）的无线电波，并观察各个频率的无线电波被吸收的情况，就可以知道你的体内有哪些种类的原子，以及每种原子的数量。将这些信息汇总到一起（当然这个过程需要计算机的有力辅助），就可以绘制出你体内各组织的图像。

在上文中我们提到了两种状态：第一种状态是你体内的核磁体与外部磁场的方向一致，第二种状态是你体内的核磁体与外部磁场的方向相反。事实上，这两种状态之间的能量差是非常微小的。核磁共振成像技术并不试图区分这个微小的信号，而是利用这种信号来提高图像的对比度。首先，设备向人体发射出一个无线电波能量级的光子脉冲，直到人体内部和外部磁场方向一致的核磁体数目等于和外部磁场方向相反的核磁体数目为止。此时，设备将关闭无线电波能量级的光子脉冲，与外部磁场方向相反的核磁体就会重新调整它们的位置，以达到更低的能量状态（即调整方向直到与外部磁场的方向一致）。在这个过程中，会释放出无线电波光子。

核磁体要想回到初始位置（与外部磁场方向一致的核磁体数目稍多于与外部磁场方向相反的核磁体数目），需要花费一定的时间。核磁体附近的其他原子在这段时间内会变得非常敏感，通过测量核磁体回到初始位置所消耗的时间，我们就能够知道附近有哪些种类的原子。根据这些信息，我们可以构建出一幅人体内有机物质的高对比度的图像。

通过核磁共振成像检查，我们可以获知人体内组织的生物状态的详

细信息。比如，我们可以知道某个组织究竟是良性的还是恶性的。一项近期的研究[19]利用了以下事实：由于恶性肿瘤的生长速度比良性组织快得多，因此恶性肿瘤的新陈代谢速度比良性组织更快。医生可以给病人注射某种形式的葡萄糖溶液，其中含有大量具有磁活性的原子核。由于病人的恶性肿瘤会比周围的良性组织更快地吸收这种葡萄糖，因此在核磁共振成像的结果中，医生就会看到这些恶性肿瘤比其他组织的亮度更高。核物理技术不仅能帮我们得到人体内部的图像，还能帮我们得出许多能够挽救病人生命的重要诊断结果。

[1] 哈哈，我是在开玩笑！

[2] 虽然Wi-Fi（无线网络）一词听起来像hi-fi（高保真音响系统），但Wi-Fi并不是任何短语的首字母缩写。

[3] 在设计产品或者设备的时候，工程师必须特别关注材料的热膨胀性。这是因为工程师必须保证在一个设备中，各部件（比如嵌在一起的齿轮）不能因为温度的变化而改变相对位置。但是有时候，热膨胀性也会给我们带来一些好处。比如，我们可以制作一种长金属条：金属条的一头是用一种金属制成的，另一头则是用另一种金属制成的。当我们把这个金属条卷成线圈时，由于这两种金属在受热时的膨胀速率不同，这个金属条就会随温度的变化而自动卷紧或者松开。老式的温控器就是利用这种金属卷的自动变化来控制机械开关的。通过这种装置，我们可以增加或者减少输送给熔炉的热量，或者在达到预设温度的时候让烤面包机自动断电。

[4] 医生把这种射线称为“Bremsstrahlung”，这个德语单词的意思是“骨折射线”。

[5] 金子做成的防护衣会非常昂贵，而且穿上这种防护衣的医生可能会遭到抢劫！

[6] 出于同样的原因，我们无法用光学显微镜观察到单个原子或者较小的分子。因为可见光的波长比原子的直径大1 000倍左右，要想看到单个原子，我们必须借助量子力学的方法。比如，在电子显微镜中就用到了量子力学技术。

[7] 事实上，磁共振成像（MRI）的原名是核磁共振成像（NMRI）。出于市场推广的考虑，名称中的“核”（N）字被去掉了。（消费者一听到“核”这个字就感到很恐慌，担心这种检查有放射性、不安全。）

[8] 爱咬文嚼字的人会注意到，从技术上讲，原子核中小磁体的方向并非与外部磁场完全一致，而是围绕着外部磁场转动。就像吉恩·凯利在《雨中曲》中绕着灯柱转圈一样，这些小磁体以一个角度围绕外部磁场转圈。更爱咬文嚼字的人还会注意到，从技术上讲，这是一个量子力学的作用过程。原子核内的小磁体的能量对外部磁场的敏感度被称为“塞曼效应”，但是，要是这些内容你都了解的话，你还有什么必要阅读这本书呢？

[9] 除了氢原子以外，人体中还有其他一些原子也有净核磁场，比如钙原子、钠原子、磷原子、氮原子以及碳和氧的同位素（在碳和氧的同位素中，中子数目大于质子数目。在接下来的内容中我们还会进一步谈到这个问题）。



第 4 章
去机场

你快速开车赶往机场。在快到机场的时候，车辆排起了队。你的车速降至每小时30英里的水平，这让你的心情平静下来。你换道准备进入“长期停车场”，你将车停在一个电子停车票读取器前面，此时一个电子声音响起，询问你是否愿意每小时少交两美元的停车费，其目的是鼓励你用信用卡付款。明天，当你驾车离开停车场的时候，出口处的收费亭也是全自动的。到那时，你需要再次插入你的信用卡，支付停车费。你拿出旅行时常用的那张信用卡，将卡片插入电子停车票读取器。当你抽出信用卡时，漆着橙白相间条纹的木制路障缓缓抬起，现在你可以进入停车场了。

你的账户信息以不同的方式存储在你的信用卡中：你的账号印在信用卡的正面，沿着信用卡的长边有一条宽度约为1/4英寸的磁条，在某些信用卡中还嵌有一块记忆芯片。这几种不同的信息存储方式运用了不同的物理学原理。

信用卡正面凸起的数字是一种最简单的信息存储方式，但它也许并不像它看起来那么简单。虽然一些较新版本的信用卡现在已经不这么做了，但是一开始这些数字是凹印在信用卡的背面的，而从信用卡的正面看它们是凸起的。在进行刷卡交易的时候，买方和卖方都希望保存这项交易的永久纸质副本，此时，信用卡表面凸起的账号就显得很有用了。这个过程使用了一些相当复杂的材料技术，源自“碳纸”这项古老的技术[1]。[1]今天的复写纸已经不再使用碳粒子，而改用一些极小的中空球形粒子，里面装有墨水。这些球形粒子的外壳强度不大，当我们用力挤压纸张的时候，外壳就会破裂。在我们用印卡机复制信用卡的时候，会把复写纸放在信用卡的上方，再用一个圆柱形滚筒滚过复写纸及其下面的信用卡。这个圆柱形滚筒的高度经过特别设计，在它滚过信用卡表面凸起的数字时，会对纸张产生适当的压力，使纸张内部含有墨水的粒子外壳破裂。当你在某家商店里使用信用卡的时候，商店的店主就能够通过这种方法永久性地记录下你的交易信息。

除了被印在信用卡的表面以外，你的账号以及其他一些额外的信息都被储存在信用卡的磁条之中[2]。信用卡的磁条包含一系列磁性区域，这些磁性区域的N极可以指向某一方向，也可以指向这一方向的反方向。如果我们只需要追踪记录两个数字，那么磁体无疑是一种记录信息的理想媒介。这种仅用两种信号（比如磁体的N极朝上或朝下，或者晶

体管中的电流大小）表示数字的方法使用了“二进制”的概念。既然二进制是所有现代数字化操作的基础[3]，那么下面就让我来花点儿时间解释一下二进制的工作原理吧。

我们使用的计数系统是以数字10为基础的，也就是十进制。十进制是一种相对简单、直接也非常合理的计数系统。但是，在世界上还存在许多其他表示数字的方式。如果我们需要处理电流，比如操控一台计算机中的电流，最简单的方法就是使用开关。开关要么处于断开状态（此时电路是断开的），要么处于闭合状态（此时电路闭合，电流可以通过）。与开关相似的是，信用卡磁条中的小团磁性原子或者磁性硬盘也拥有两种不同的状态，一种状态是N极朝向某一方向，另一种状态是N极朝向反方向。这两种状态可以很方便地用点和线、“闭”和“开”或者0和1来表示。这种表示数字的方式就是“二进制”，二进制是计算机逻辑的核心。

现在假设你需要找零，但只有几种不同面额的纸币。比如，假设我们只有1元纸币、10元纸币、100元纸币、1　000元纸币。也就是说，我们所拥有的最小面额的纸币是1元纸币，其余几种纸币的面额都依次是前一种纸币面额的10倍（这就是所谓的“十进制”）。在这种假设条件下，为了找零42元钱，我们就必须拿出4张10元纸币和两张1元纸币。再举一个例子，如果我有两张100元纸币、0张10元纸币、4张1元纸币，那么我一共有204元钱。在日常生活中，我们经常进行这样的活动，但我们并不会特别留意自己正在使用十进制的计数系统。事实上，当我们写下204这个数字的时候，我们便用到了十进制的概念：百位上的2代表我们有两个100元，十位上的0代表我们有0个10元，个位上的4代表我们有4个1元。但是，这种十进制计数系统的问题在于，如果每种面值的纸币只有一张，这个系统就没法运作了。当我们用磁体来表示数字的时候，就恰恰遇到了这样的情况，因为磁体只有两种方向（要么是N极朝上，要么是N极朝下）。如果我只有1张1元纸币、1张10元纸币、1张100元纸币，那么我虽然可以把它们组合成101元，却没有办法把它们组合成204元或者42元。

现在，让我们想象另一种形式的货币体系。在这种货币体系中，纸币的面额为1、2、4、8、16等。和十进制的情况一样，在这个系统中面额最小的是1元纸币。但与十进制计数系统不同的是，在这个系统中，每种纸币的面额是前一种纸币面额的2倍。这个系统就叫作“二进制系统”。在这样的系统中，我可以组合出任意数量的钱，比如，21＝16＋4

＋1。与十进制系统一样，在二进制系统中，我把最右侧的数位称作“个位”，越往左数位越大。因此，在二进制系统中，数字21记作10 101。在10　101这个数字中，从右到左的数位分别表示：1个1，0个2，1个4，0个8，1个16。虽然二进制数字比十进制数字更长，写起来也不太方便，但它却有一个极大的优势：即使每种面额的纸币只有一张，我们也仍然可以用这些纸币表示任意金额[2]。通过类似的方法，我们可以用二进制数字表示字母表中的字母以及其他抽象符号。

你可以通过法拉第定律来读取信用卡磁条中的信息。法拉第定律指出，变化的磁场会产生电流。在使用大部分信用卡读卡器[4]的时候，你用机械的方式让信用卡刷过一个扫描器。在这个过程中，信用卡的磁性区域通过了一个线圈（或者其他某种磁条传感器）[3]。如果一个磁性区域的一边是N极，另一边是S极，那么当这个磁性区域穿过线圈的时候，就会先产生某个方向的电流，然后又产生一个反方向的电流，这时的读数就是一个“1”。因为穿过线圈的磁场发生了变化，所以会产生一个感应电流。如果这个磁性区域只有S极或者N极朝向线圈方向，线圈中的电流就会只朝一个方向流动，这时的读数就是一个“0”。虽然信用卡读卡器的实际设计比一个简单的线圈复杂一些，并且，信用卡上的黑色磁条实际上有三个不同的“带”，每个“带”又包含了一组不同的信息，但是信用卡读卡器背后的物理学原理和我们的上述描述是一样的[4]。

信用卡存储信息的第三种方式是记忆芯片。有的信用卡上装有一个很小的芯片，这种芯片可以通过无线电波的方式与信用卡读卡器中的接收器交互。这种芯片通常被叫作RFID [5]（RadioFrequency Identification，射频识别芯片），因为它使用射频波（无线电波）对信息进行识别。信用卡的记忆芯片与读卡器中的接收器交互的方式与车中的快易通系统一样，但是信用卡使用的安全协议比车库门自动开关系统或者无钥匙遥控进入系统的安全协议更高级。大部分信用卡的记忆芯片使用一种名为“近距离无线电通信”的系统。这种系统离开信用卡的距离一旦超过4英寸，无线电波信号就会衰减到不可识别的程度。这样一来，其他人就很难窃取你的信用卡信息了。因此，在使用信用卡的时候，你必须将信用卡插入读卡器，或者让信用卡充分接近读卡器。一旦停车场入口处的读卡器读取了信用卡中的信息，它便会将这些数据存储下来（这样你就必须支付停车费了），你就可以驶入停车场了。

停好车以后，你从后备厢中取出行李，走向机场的主航站楼。

此时，你突然懊恼地意识到，今天你忘记随身携带现金了。你觉得，为了应付可能出现的紧急情况，还是应该带一些现金。因此，你在航站楼中四处寻找，终于在报摊的一侧找到一台自动取款机。幸运的是，这台自动取款机正好是你的发卡银行的取款机，也就是说，使用这台自动取款机取款不需要缴纳手续费。你把你的借记卡插到取款机中（在这个过程中，你特意让借记卡的磁条朝向正确的方向），取款机的屏幕从标准的欢迎页面跳转到要求你输入密码的页面。你准确地输入了银行卡的密码，虽然你已经很久没有用过这张银行卡了。输入密码以后，自动取款机的触摸屏再次发生了变化，出现了一系列选项。其中一个选项按钮上写着“从支票账户中提取现金”，你点击了这个按钮，屏幕上又出现了另外几个选项按钮，分别显示你可以提取的不同金额。你点击了100美元的按钮后，自动取款机询问你是要纸质收据，还是希望取款收据以电子邮件的形式发送到你的邮箱，你选择了后一种方式。几秒钟后，取款机吐出你的借记卡，还有5张20美元面值的纸币。你将现金放入口袋，走向安检处。

当你点击自动取款机的触摸屏时，你的手指变成了电路的一部分。对某些类型的触摸屏来说，手指对触摸屏产生的压力能够改变电流强度；而对另一些类型的触摸屏来说，它们能够探测到你的导电性。第一种类型的触摸屏使用的是感应阻抗技术[6]，当你的手指对触摸屏施加压力的时候，这种触摸屏会产生反作用力对抗你施加的压力。触摸屏被分成许多有规则的网格，就像一个跳棋盘上有许多小方格一样。触摸屏的最外层——你直接接触的部分——是一个透明的导电塑料板。在这个导电塑料板下面是一层较薄的绝缘板，再下面一层是一种玻璃材料。这种经过化学处理的特殊玻璃材料也是电的良导体。在没有压力的情况下，表层的导电塑料板与最下层的导电玻璃是分离的。当你按压触摸屏的时候，表层的导电塑料板就会与导电玻璃发生接触，此时电路闭合，电流就可以通过上下两层。一个电子半导体芯片记录下触摸屏上电流经过的位置（即这个跳棋盘上的哪个方格有电流经过），并对这一信息进行处理。这种感应阻抗式触摸屏的优点是，你戴着手套或者使用触控笔也可以使用。当你使用信用卡的时候，你通常都需要在触摸屏上签字以授权这笔交易，这种触摸屏通常就是感应阻抗式触摸屏。感应阻抗式触摸屏的缺点是，其分辨率通常不是很高。当你在这种屏幕上签字时，你的签名看起来就像傻瓜的涂鸦。此外，当你对这种类型的触摸屏进行物理按压的时候，触摸传感器很可能会被划伤或者遭到其他形式的损坏。

另一种类型的触摸屏则依赖于人体的导电性，因此使用这种触摸屏时不需要用力地按压它。在这种触摸屏之下，是一种被称为“电容器”的装置[7]。电容器可用来储存电荷，一个电容器通常包含两块叠在一起的金属板，就像三明治的两片面包一样。其中一块金属板上覆盖有电子，另一块金属板上则带有等量的正电荷。两块金属板中间是一层绝缘板，就像三明治中间的肉片一样。这种设计和前文中描述的感应阻抗式触摸屏的设计类似：在感应阻抗式触摸屏中，两块导电板中间是一块薄薄的绝缘板；但在电容式触摸屏中，我们无须对这个电子“三明治”进行物理按压，触摸屏就能记录下我们触摸的位置。

与感应阻抗式触摸屏一样，电容式触摸屏的表面也被分成许多小方块。屏幕上的每个小方块都是一个电容器，每个电容器都与屏幕之下、设备内的其他电路相连接。当某个小方块中存储的电荷发生改变时[8]，设备内部的电路就会记录下这种变化，然后这一信号被输送到一块一直在等待信号输入的计算机芯片中。事实上，人体有很好的携带电荷的能力。当摩擦一个不导电的表面，比如一块地毯时，你就会带上额外的电荷。当你用手指触碰触摸屏上的某个特定位置时，你体内的电容就成为触摸屏的电路中的一部分（见图4）。设备中的某个元件会探测到这种电容的变化，并向处理器发送一个信号，告知处理器哪个位置的电容发生了改变。某些版本的电容式触摸屏没有顶部的导电板，而是用你的指尖代替顶部导电板来组成完整的电容器（你的指尖改变了电路的组成，因此设备可以探测到你的指尖选中的是哪些小方块）[5]。水（包括汗水）[6]也具有导电性，如果电容式触摸屏的表面沾上了水，这些沾水的小方块就会向传感器发送错误的信号，导致传感器搞不清楚你究竟选择了哪些区域。

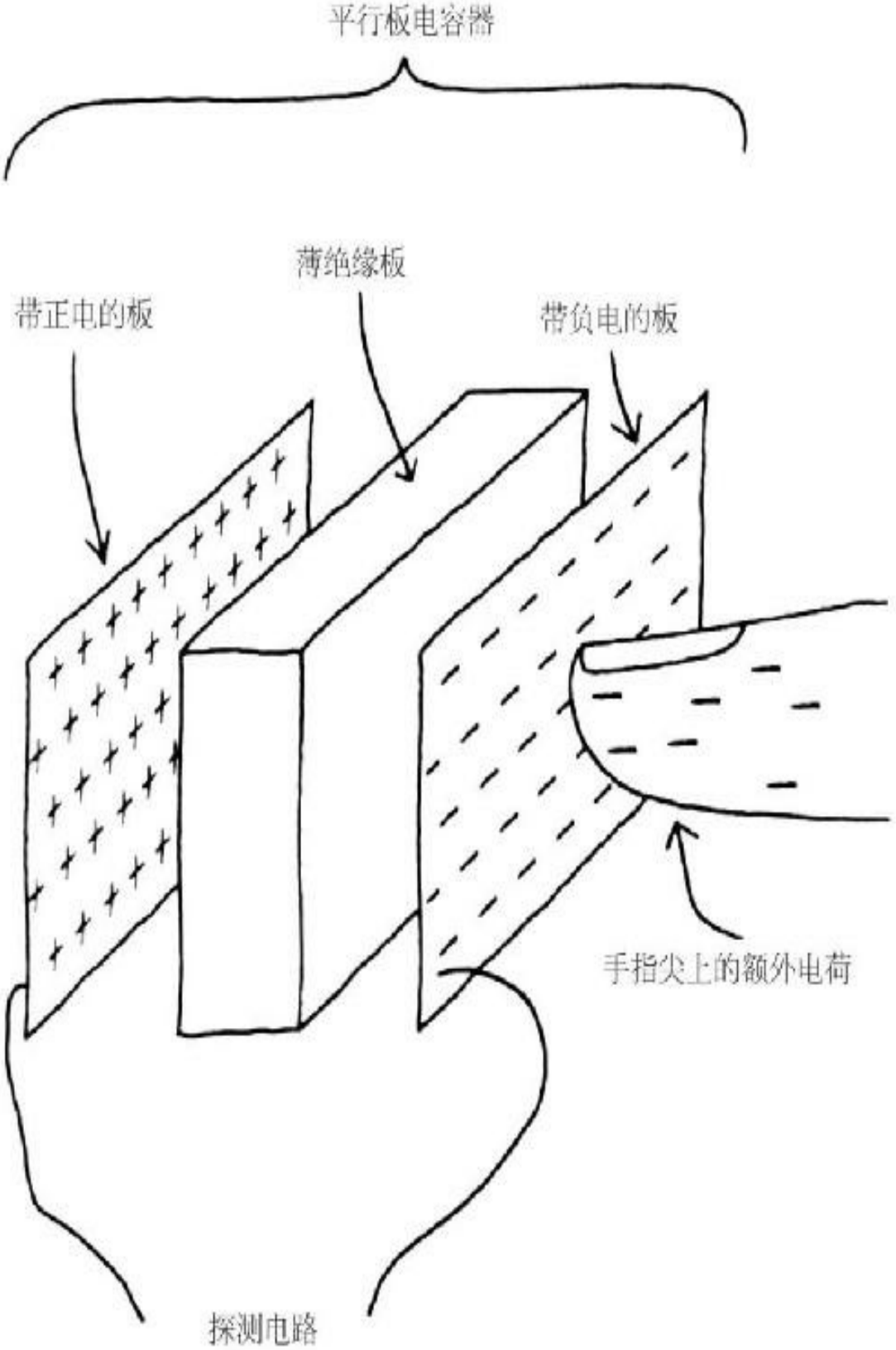

平行板电容器
薄绝缘板
带正电的板
带负电的板
手指尖上的额外电荷
探测电路

图**4**

一个基本的电容器包括两块金属板，但如果触摸屏中使用这种基本的电容器，那么你永远无法搞清楚究竟应该触摸屏幕的什么位置。你之所以能在自动取款机的屏幕上看到图像，是因为在这个表层电容器之下有一个屏幕，图像就是从这个屏幕投射到表层上来的。因此，组成触摸屏电路的电容器必须能被光线穿透。这些电容器使用了一种特殊的合金——氧化铟锡[9]，氧化铟锡既是电的良导体，又和窗户玻璃一样透明。在感应阻抗式触摸屏中，也用到了这类透明的导电材料。这类材料结合了两种相互矛盾的特性：既有高密度的电荷能在被施加电压的条件下自由移动（这使这种材料成为电的良导体），又在能级之间存在很大的差距（这样一来，可见光才能穿透这种材料，因为可见光没有足够的能量让电荷从低能级跃迁至高能级）。

某些触摸屏依靠光来判断你触摸的区域[10]。当光在水或者玻璃等介质中传播时，它的运动速度比在真空或者空气中的运动速度慢。在密度较高的介质中，振荡的电磁波产生的电场会与原子的电子产生的电场发生相互干扰。这会“阻碍”光的传播，使光的传播速度变慢。如果光在一种介质中的传播速度比在另一种介质中的传播速度更快，那么当光到达这两种介质的分界线时，会发生什么情况呢？相信许多读者都知道，在一个装有水的玻璃杯中放入一根吸管，吸管看起来就好像在水和空气的分界线处被折弯了。这种现象表明了光通过两种介质所产生的不同的结果。在两种介质的分界线处，光线的传播路径之所以会变弯，是因为光在两点间传播的时候总是选择最快的路径，这种现象被称为“折射”。不管介质是气体、液体还是固体，这些介质的性质决定了光能在其中以多快的速度传播。因此，两种介质的性质决定了光在它们的分界线处会发生多大幅度的弯折，这个物理量被称为“折射指数”。

假设第一种介质的折射系数较大（光在这种介质中的传播速度较慢），而第二种介质的折射系数较小（光在这种介质中的传播速度较快）。当光从第一种介质射向第二种介质时，如果光线弯折的角度足够大，光线可能根本无法逃离第一种介质（折射系数较大的介质）。光线弯折角度的具体数值取决于两种介质折射系数的差别。如果这个角度足够大，当光线到达这两种介质的分界线时，就会被反射，这就像光线射到一面镜子上会被反射一样。这种物理现象被称为“全内反射”[11]（“全内反射”又称“全反射”），光纤电缆就是以“全内反射”现象为基础工作的[12]，超声波成像技术也利用了“全内反射”的物理现象。

某些新型的触摸屏也用到了全内反射的物理现象。在平行板的外侧装有一些二极管，这些二极管能够发出红外线。在上层的面板处，这些红外线将发生全内反射。而在平行板的内侧则装有一些光敏传感器，这些光敏传感器能够探测到红外线。当我们用手指触碰上层的面板时，红外线的反射受到干扰，面板上的光敏传感器就会探测到光路的变化。在合适的软件的辅助下，这个系统就能够判断出屏幕上的哪个或者哪些位置导致光路发生了变化。和电容式触摸屏不同，这种技术对任何会改变光线反射情况的变化都很敏感，因此我们不仅可以用手操作这种触摸屏，还可以戴上不导电的手套或者用不导电的触控笔操作。

你在智能手机上打开航空公司的应用程序，找到你的电子登机牌。它显示为一个电子的快速响应图码（QR码），也就是我们常说的“二维码”。真幸运，今天美国运输安全局（TSA）选中你进行快速安检。TSA的工作站中有一个激光扫描器，这个扫描器读取你的智能手机上的QR码并发出“哔”的一声。工作人员核对你的长相和驾驶执照上的照片一致后，放你进入安检流程。你将行李箱和公文包放在传送带上，传送带会把你的行李运送到一台X射线扫描仪处。然后，你和许多人一起排队通过一个金属探测门。

如果你想自制一个金属探测仪，我建议你可以对你的电动牙刷以及电动牙刷的充电器进行改装。当你给电动牙刷的电池充电时，你会把牙刷的刷柄插在一个塑料的充电基座上，这个塑料的充电基座与墙上的交流电源相连。在这个充电基座中有一个线圈，来自墙上电源的交流电流过线圈，产生了一个变化的磁场。这个变化的磁场穿过电动牙刷刷柄中的另一个线圈，由于线圈中的磁场在不断变化，所以这个线圈中产生了一个感应电流。如果这两个线圈之间有任何金属，就会改变穿过第二个线圈的磁场。

有些人会用手持金属探测器[13]在沙滩上寻找他人丢失的硬币或者深埋的宝藏。这种手持金属探测器也是靠两个线圈来探测金属的位置的。除线圈以外，它还包含一根棍子，在棍子的一端还装有一个大圆盘。当你用这种探测器来寻找金属物体的时候，需要让这个圆盘贴近表面移动。这个圆盘中有两个同心线圈。外侧线圈在圆盘的边缘处，给它通上交流电，就会产生一个变化的电磁场（这个电磁场相当于频率非常低的无线电波）。而在靠近圆盘中心的地方，还有一个线圈，它可以侦测到任何反射回来的电磁波。如果外侧线圈发射的电磁波碰到一个金属物

体，就会在这个金属物体中产生一个变化的感应电流，进而产生一个变化的磁场，这个磁场的方向和原始信号的方向相反。内侧线圈能够监测到这个反射回来的电磁波，并发出某种警报（比如闪光或者声响）。当金属探测器发出警报时，就说明圆盘检测到了一个电的良导体。

市政建筑和机场使用的金属探测门[14]则对上述过程做了一个小改动。在这类金属探测门中，首先我们给门一侧的线圈通上电流，然后突然切断这个电流。线圈中的电流会产生磁场，当电流突然消失时，穿过线圈的磁场也会消失。但是，穿过线圈的变化的磁场也会产生一个电流，这个电流会在短暂的时间内试图保持磁场不变。也就是说，当磁场突然减弱时，主线圈中会产生一个感应电流。在老式的白炽灯泡中，你可以看到这种电流。当你按动墙上的开关关掉灯泡的时候，如果你仔细观察，就会发现白炽灯泡先是变暗，然后突然短暂地变得更亮，最后才完全熄灭。白炽灯泡之所以会在被关掉的过程中突然变得更亮，就是因为产生了短暂的感应电流。当灯泡中的电流消失的时候，电路会试图使电流产生的磁场保持不变。

机场使用的金属探测门会不断切断线圈中的电流，并随时监控这个动作所产生的感应电流的强度。当一个金属物件穿过金属探测门的时候，就会暂时起到一个天线的作用。当磁场消失的时候，这个金属物件就会短暂地产生一个电流，以应对磁场的变化。因此，当金属物件经过金属探测门的时候，线圈中侦测到的感应电流会稍微增强；而当金属物件离开金属探测门的时候，这个感应电流又会稍微减弱。一般来说，线圈中的电流每秒会被切断100次，系统会将产生的所有感应电流加总起来，来判断是否有金属物件通过。

如果你通过金属探测门的时候忘记掏出随身的金属物品，安检人员就会用一个手持金属探测器再次对你进行检查。手持金属探测器的原理和人们在沙滩上寻宝用的金属探测器的原理差不多：一个线圈产生一个频率非常低、能量也非常低的电磁波，另一个线圈会通过探测这个信号的变化来判断有没有金属物品。

排在你前面的那位乘客严重耽误了安检的进度。在正常情况下，快速安检所用的金属探测器不应该被他手上佩戴的腕表触发并发出警报声。可见，这台金属探测器的敏感度参数设置有问题，工作人员决定对它进行重新设置，以防止它再次误发警报。于是，安检人员要求你进入旁边的全身扫描安检仪。你掏出了口袋中的所有

物品，包括你之前从自动取款机中取出的纸币。你将这些东西放在一个塑料盘中，并把这个塑料盘放在X射线扫描仪的传送带上。接着，你走入全身扫描安检仪。你双手举过头顶，手肘弯曲，一种莫名的虚荣心让你下意识地吸气收腹。当扫描杆在你身上经过时，你纹丝不动。“我投降了”，你对自己说，“只要别误机就行。”

大部分机场的扫描安检仪都使用“毫米波”[15]来检查乘客的衣服下面是否藏有非法物品，这里用到了“反向散射”的原理。在传输模式下，探测器测量的是穿透一个物体的光线；而在反向散射模式下，探测器测量的是光线在两种密度不同的介质的分界线上是如何发生散射的。当牙医为你的牙齿拍摄X射线片子时，他使用的就是前一种模式，即传输模式。探测器的摄影胶片被放置在你的牙齿后方，而X射线源则被放置在你的牙齿前方。因此，胶片记录的是穿过牙齿的X射线。你牙齿中的任何密度变化（比如龋齿的虫洞或者补牙材料）都会改变探测器接收的X射线的数量，胶片接收的信号强度也会随之发生改变。

另一种成像方法是，每当波碰到另一种介质时，就测量被反射或者散射的波的数量，物理学家将这种反射波称为“反向散射波”。机场使用的全身扫描安检仪包括两个垂直的杆，每个杆都装有一个能够发射毫米波的波源，以及一个能探测毫米波的探测器。当其中一根杆在你身体前方扫过时，另一根杆就会在你身体后方扫过，从而完成一个全面的扫描。

毫米波是一种波长约为1毫米（比人类的一根头发的直径的10倍多一点儿）的电磁波[16]。毫米波又称“微波”[7]，你的手机在通信时使用的就是这个波段的电磁波。波长大于及等于1米的电磁波可用于无线电广播和电视，而波长为1纳米（1纳米相当于1米的十亿分之一）的电磁波就是我们所说的X射线。可见光的波长在400~700纳米的范围内，不同波长的可见光会呈现出不同的颜色。

机场的全身扫描安检仪之所以要使用波长为1毫米的微波，是因为它既能够轻易地穿过你的衣服，又能够被你的皮肤反射。你衣服中的纤维不会干扰这种毫米波，因为和这种微波的波长相比，衣服中的纤维很小，就像一个巨大的海浪不会被一个救生圈或者一个游泳者影响。然而，你的皮肤对微波而言却是一个巨大的屏障，当微波触及你的皮肤时，就会被反射回去。任何藏在你衣服下面的物品反射微波的方式都与你的皮肤反射微波的方式不同，这种区别能被全身扫描安检仪探测出

来。就像在你经过金属探测门之前必须掏出身上的所有金属物品一样，在你使用全身扫描安检仪之前，也应该掏空口袋中的所有物品，并且解下腰带。

然而，不管你选择在全身扫描安检仪中站多久，你都不会像微波炉里的土豆那样被烤熟。全身扫描安检仪所用的微波比微波炉中的微波弱得多，甚至比你的移动电话发短信时所用的微波也弱得多。

虽然这种毫米波扫描安检仪能够探测出你的衣服下面是否藏有其他物品，但这种仪器只能提供这些非法物品的低分辨率图像。大部分机场使用的都是基于毫米波的扫描安检仪，但也有一些机场会使用基于X射线的反向散射系统，这种系统能够更清晰地显示出乘客的衣服下面藏有何种非法物品。

说到X射线，在你接受安检的时候，你的手提行李也在接受安全检查。机场检查你的手提行李时用到了一种固态成像技术，这种技术并不需要用到摄影胶片。

当你在全身扫描安检仪中接受安检的时候，你的手提行李以及你口袋中的物品通过传送带被送入X射线扫描仪。此刻你正站在全身扫描安检仪中，在那里你恰好可以看到另一台X射线扫描仪的监视器。当一件行李经过这台扫描仪时，监视器上就会显示出这件行李的轮廓，以及行李内各种物品的剪影。你知道，X射线扫描成像不会显示出人眼能够看到的各种颜色。但是，你行李中的各种物品的颜色在监视器上看起来却稍有不同。虽然金属探测器和全身扫描安检仪已经花去了你不少的时间，但你的行李此刻还没有到达安检传送带的另一端。一位安检人员无法判断你行李中的某件物品究竟是什么，因此他让传送带停了下来，并把你的行李再次放入X射线扫描仪。

机场安检处使用的X射线扫描仪是以“传输模式”成像的。这个系统会将X射线打在你行李的顶部，然后测量有多少X射线穿过了你的行李。你的行李经过一块固体检测板，这个固体检测板被分割成很多个半导体像素点。我们可以把非导体（比如绝缘体或者半导体）想象成一种老式电影院[17]。在这类电影院中，共有两种不同的座位：一种是低能级的前排座位，另一种是高能级的楼上座位。所有低能级的前排座位都被

电子占满，而所有高能级的楼上座位都是空的。只在电子受到光或者热的激发而进入楼上座位之后，它们才能够在座位之间移动，从而产生电流。（电子不喜欢和其他电子处在同样的位置上，所以只有当另一个座位空着时，电子才会移动到这个座位上。）[8]

此时，电影院前排这些空着的座位（我们将这些空座位称为“空穴”）也会因为电场的作用而移动。当邻近的电子移动时，这些空座位相当于固体中的正电荷。在绝缘材料中，被电子占据的最高能级与空位的最低能级之间的能量差正好属于电磁波谱的紫外线波段，因此，许多绝缘体（比如窗户的玻璃）在可见光的照射下是透明的。在玻璃中，可见光的能量不足以让电子从前排座位移动到楼上座位，因此可见光不会被玻璃吸收，而是穿透玻璃。而在半导体材料中，被电子占据的最高能级与空位的最低能级之间的能量差属于电磁波谱的红外线或者可见光波段，因此，与绝缘材料相比，半导体材料中的电子更容易被激发而跃迁至能量较高的楼上座位。

在某些X射线探测器中，X射线直接被半导体材料吸收[18]。而在另一些X射线探测器中，X射线首先会打在一种被称为“闪烁体”的材料上，闪烁体接触到高能射线后就会发光。不管半导体探测器是吸收了X射线，还是吸收了可见光的光子[19]，它都会产生能自由移动的电子，以及与电子数目相等的带正电的空穴。一个内置的小电场会把这些电荷拉到设备的顶部或者底部，电荷就在这里堆积。半导体探测器吸收的X射线或者可见光越多，设备顶部和底部堆积的电荷也越多。通过测量这些电荷，就能够记录打在某一个特定像素点上的X射线或者可见光的数量。

在X射线到达探测器之前，其必须先与扫描仪中行李内的物品发生相互作用。当我们试图对一件行李内部的物品进行扫描成像的时候，对比度是一个非常重要的问题。对于一个原子而言，原子携带的电子越多，就越有可能使X射线发生散射，从而让X射线偏离原来的运动轨迹。行李扫描仪使用一系列不同能量（也就是不同波长）的X射线来提高散射的灵敏度。爆炸性材料一般都含有碳原子长链（我们知道，每个碳原子只有6个电子），因此爆炸性材料的原子与低能X射线相互作用的能力较强。而刀和手枪用的钢主要是由铁元素构成的，铁元素散射高能X射线的能力比较强。在接受安检的时候，你的行李既会被高能X射线照射，也会被低能X射线照射。被一个薄金属片隔开的两个探测器，将会记录下穿透你的行李的X射线的数量。上方的探测器记录的是穿透你的行李的X射线总量，薄金属片下面的另一个探测器记录的是穿透你

的行李的高能X射线的数量。这些穿过行李的X射线显示出不同的颜色，代表着不同的能量级。通过比较上方探测器记录下的高能X射线和低能X射线的总量，以及下方探测器记录的高能X射线的数量，我们就可以计算出你的行李散射了多少低能X射线，从而提高任何有机材料的成像质量。

在过安检的时候，笔记本电脑必须要单独扫描，但这并不是因为电脑的金属外壳会阻止X射线到达它下面的部分。大部分笔记本电脑的外壳或者是用塑料制成的（塑料是一种有机材料），或者是用铝制成的（铝是少数电子数量较少的金属之一，每个铝原子只含有13个电子）。之所以要在安检时对笔记本电脑进行单独扫描，是因为笔记本电脑的内部密度很大，而且结构复杂。由于一台笔记本电脑或者平板电脑内部含有大量体积很小的元件，所以有必要对它们进行特别仔细的专门检查，以确认这些设备中是否藏匿了非法物品。

你今天的运气似乎不太好。一位安检人员不知为什么盯上了你的行李。当你把之前从口袋里掏出来的东西一一放回口袋中时，你听到了你在机场安检处最不希望听到的一句话：“这是你的包吗？”你不情愿地点头承认，于是这位安检人员告诉你，他希望对你的包做进一步检查。他把你的包放到安检处后面一张不锈钢的桌子上，然后用一张小小的白色纸片擦拭行李的外部。然后，安检人员把这个小纸片放入一个很大的盒子形状的仪器中，你注意到这台仪器上写着“痕量爆炸物检测仪”。不到一分钟，这台仪器就给出了“一切正常”的信号。这位安检人员感谢你的配合，并允许你通过安检处。你终于可以继续前进了，安检还真是花费了你不少时间呢。要想准时赶到登机口，你可得加快脚步了。

当工作人员用一个小纸片擦拭你的行李时，任何与爆炸有关的化学物质的痕迹都会被这个小纸片捕获。如果你最近接触过爆炸粉末，你的指纹的油脂中就会含有微量的爆炸粉末。当你用手接触你的行李时，大约会有1毫克的爆炸粉末被转移到行李上。痕量爆炸物检测仪的工作目标，就是在这个小纸片上寻找某些特定的危险化学物质。

要想完成这项检测任务，必须找到区分不同类型分子的方法。一个三硝基甲苯（TNT）分子[20]含有7个碳原子、6个氧原子、5个氢原子和3个氮原子，这些原子以一种特殊的方式排列。虽然肯定存在比三硝基甲

苯更大的分子，但与构成空气的氧分子和氮分子相比，三硝基甲苯分子肯定更大。在理想的情况下，我们进行的测试应既对分子的形状敏感，又对分子的质量敏感，这样才能帮助我们把三硝基甲苯分子从其他有机分子中甄别出来，以免误报。将三硝基甲苯分子从其他分子中甄别出来的方法之一是“离子迁移率光谱测定法”[9]。[21] 这种方法相当于让白色小纸片上的所有分子都参加一场“赛车”比赛。

假设我在两辆不同的车上装上相同的发动机，比如其中一辆是大货车，另一辆是小型跑车。然后，我让这两辆车从同一地点出发，并沿直线进行比赛。那么，哪一辆车会获得胜利呢？由于这两辆车装有相同的发动机，因此行驶时间的不同（主要）取决于汽车的质量和空气阻力。汽车越重，发动机所能提供的加速度越小。此外，由于大货车的表面积和正面、侧面都比跑车大得多，所以大货车遭受的空气阻力也比跑车大得多。在赛车的过程中，由于发动机产生的部分能量被用来推开汽车行进路线上的空气，这部分能量就不能被用于汽车的加速。所以，我们可以通过观察哪辆车先到达终点，来判断哪辆车是小型跑车。当然，做出这种判断的前提条件是：两辆车必须有相同的发动机，因为只有在这样的条件下，车的行驶时间才只取决于汽车的质量和空气阻力这两个因素。当然，在赛车的例子中，我们事实上可以通过观察汽车的外表来判断哪辆车是大货车、哪辆车是小型跑车。但是，如果我们需要区分的是分子，就没有办法通过肉眼观察来实现了，而上述“赛车”的方法在这种情况下就可以发挥作用。

在检测爆炸物痕迹的时候，工作人员将这片擦拭过行李外表面的白色纸片放在一个圆柱体的一端（此处就是赛车轨道的出发线），然后对这个纸片加热，使纸片上的分子蒸发。然后，工作人员试图把这些离开纸片的分子拉到圆柱体的另一端（也就是赛车轨道的终点线），并且希望作用于所有分子的拉力都完全相等，不管这些分子的化学结构是什么。达到上述目的的方法之一，就是先从每个分子中移除一个电子，使得所有分子都带一个正电荷，再在赛车轨道的终点线（圆柱体的另一端）放上一个负电荷。这样一来，所有分子就会受到同样大小的拉力，因为影响这些分子对负电荷的反应的唯一因素，就是它们携带的一个正电荷。

让所有分子都携带一个正电荷就相当于在赛车比赛中给所有车辆装上同样的发动机。这个圆柱体中装有特定压力的空气，当分子在圆柱体中移动的时候，空气阻力的影响就受到了控制。现在，由于所有分子都

受到圆柱体另一端的负电荷的拉力作用，我们只需要记录下各个分子到达终点线的时间就可以了。我们通过检测离子的不同迁移率得到一个关于分子质量和体积的“谱线”，所以这种检查爆炸物痕迹的装置就被称为“离子迁移率光谱仪”。在之前的校准实验中，我们已经知道一个质量和结构都与三硝基甲苯分子相同的分子到达终点线需要消耗多长时间。因此，如果安检人员在检查行李的时候发现任何分子通过终点的时间与这个预先设定的时间恰好一致，他就有充分的理由怀疑这件被检测的行李接触过三硝基甲苯分子。此时，他将对这件行李以及携带行李的乘客做进一步的安全检查。

[1] 原始的碳纸是一张蜡纸，表面覆盖有碳的黑色粒子，使用时要在蜡纸上下分别衬上一张普通的纸。

[2] 在二进制中，十进制中的2写作10，其中0处于“个位”上，而1处于“二位”上。如果你理解了这一点，就能够听懂下面这个“书呆子笑话”：世界上共有10种人，一种是懂得二进制的人，另一种是不懂得二进制的人。

[3] 许多读卡器是通过一个“读取磁头”4来侦测磁条上的磁性区域的。这个读取磁头和电脑中的磁性硬盘非常相似，经过探测器的电流对周围的磁场十分敏感。在这里我举了线圈这个简单的例子。

[4] 事实上，在磁带（比如音乐卡带或者盘式磁带录音机中的磁带）上记录信息的机制也是一样的。磁带上记录的信息能够被转化成电压，而经过放大和处理后的电压能够使扬声器振动。录像带（VCR）储存信息的方式会更加复杂一些，但是它们的基本物理学原理都是一样的。

[5] 我们也可以在电容式触摸屏上使用触控笔，但这种触控笔的笔尖必须自带电容器。

[6] 事实上，纯净的蒸馏水是一种很好的绝缘体。但是，自来水、雨水以及汗水中都含有离子，这大大增强了水的导电性。

[7] 从技术角度说，波长为1毫米的电磁波在波谱上介于微波和红外线之间，但是相对来说更接近微波的波段。

[8] 这种物理现象的专业名称是“泡利不相容原理”。

[9] 从技术角度说，离子迁移率光谱测定法测定的是法律要求所有爆炸物必须添加的“标记分子”的痕迹。在这里，为了简化讨论，我们假设这种方法检测的是三硝基甲苯分子的痕迹。



第5章
坐飞机

经过一番努力，你以倒数第二的“成绩”赶到了登机口。你大声呼喊，请求登机口的工作人员先不要关闭舱门。你上气不接下气地跑上前去，好在登机口的工作人员还在等你！你一边向工作人员道歉，一边快速地从你的智能手机里再次调出登机牌二维码。激光扫描仪发出“哔”的一声，这是欢迎你登机的信号。然而，由于你来得太迟，客舱上方的所有行李架都装满了，你的手提行李不得不办理托运手续。虽然情况不是特别理想，但总比误机好得多。登机口的工作人员询问你的手提行李（严格来说现在它已经不是“手提”行李了）中是否装有电子设备或者锂电池，你回复工作人员，你的行李里没有这些东西。于是，工作人员把一个红色的标签贴到你的行李上，并要求你提着这件行李穿过登机通道，一直走到机舱门口。在机舱门口，地勤工作人员正在收集最后几件需要被放进货舱的行李，你满怀感激之情地将手中的行李递给他们。

飞机的工作人员之所以询问你要托运的行李中是否含有锂电池，是出于以下两个原因：第一，电池一旦损坏，就可能以某种不受控制的方式释放出电池内储存的能量；第二，锂电池的能量密度特别高，其危险程度也就特别高。

锂和同属碱金属的钠、钾一样，是一种化学性质特别活跃的金属[1]，纯净的锂会与水发生剧烈的化学反应。如果传统的碱性电池发生老化[2]，电池内部就会堆积一些氢气，导致电池内部的压力越来越大，最后电池的封条会破裂。电池破裂后，碱金属会与空气中的二氧化碳发生反应，在电极上形成一层毛茸茸的物质。传统的碱性电池发生破损的情况已经非常可怕了，而锂电池破损的后果则更加严重，比如起火或者爆炸。由于和传统的碱性电池相比，锂电池的能量密度更大，所以如果对电极起分隔作用的挡板发生短路，锂电池释放的能量也会比传统的碱性电池大得多。基于以上原因，我们丢弃任何种类的电池都应该特别小心，尤其是锂电池。任何刺穿或者挤压电池外壳的行为都可能导致非常危险的情况。

由于和其他电池相比，锂电池提供的能量更多，因此许多个人电子设备都配有锂电池。电池中储存的电能来自化学反应释放的能量，这些化学反应能让带电离子在电极处堆积。想让电极携带更多的电荷，方法之一就是让离子的电荷数更大，也就是说这些离子缺少的电子不止一

个，或者携带的额外电子数不止一个。然而，一旦我们通过转移电子的方式将原子变成离子，原子核所带的正电荷就无法与电子的负电荷完全平衡，原子核就会对剩下的电子产生更强的吸引力。在这种情况下，要想从这个离子中再移除一个电子，难度就会大大增加。同样，要想在一个阴离子中再增加一个电子，也会比增加第一个电子的难度更大。如果我们没有办法轻松地改变离子所带的电荷，增加电池中储存的电荷数量的另一种方法就是使用质量更轻的离子，从而减轻电池的重量。在室温下不以气体状态存在的最轻的离子就是锂离子，这使得锂电池在便携式电子设备的发展过程中扮演了很重要的角色。

多年前，汽车蓄电池里含有铅和酸的混合物[3]。铅是一种很大、很重的原子，一个铅原子的质量是一个氢原子质量的200倍以上。氢是宇宙中最轻的元素，一个氢原子的原子核中只有一个质子，原子核外也只有一个电子绕这个质子运动。而一个铅原子的原子核中含有82个质子和125个中子，原子核外有82个电子围绕原子核运动。质子和中子的质量大约是电子质量的2　000倍，因此要寻找质量较轻的原子的话，我们就应该考虑原子核较轻的元素。氦元素的原子核中只有两个质子和两个中子，它是仅次于氢元素的第二轻的元素。然而在室温和常压下，氦元素是以气体形态存在的，而且氦气是一种惰性气体，所以氦元素并不适合用来做电池。第三轻的元素便是碱金属中的锂元素，一个锂原子的原子核中只有3个质子和3个中子。因此，基于锂离子的电池能帮助我们大幅减轻电池的重量。

不管电池使用什么样的电极，也不管电池中的液体包括哪些化学成分，所有电池都要依靠化学反应来产生离子，从而提供电能。这些化学反应都需要消耗能量，有了能量，才能让离子移动到电极处。在锂电池中，电极是由石墨、氧化钴等分层材料制成的，这些材料包含一层一层的原子，就像停车场分为许多楼层一样，锂离子就“停泊”在这些“停车场”中，从而使电极可以储存更多离子。一个电池所能携带的最大电量取决于化学反应能够产生多少能量。随着电极处聚集越来越多的离子，要把一个额外的离子移向电极处将越来越困难，因为正极处的阳离子受到负极处的负电荷的吸引。因此，所有电池都必须拥有某种隔离装置，这种隔离装置可以把两个分别带正、负电荷的电极分开，防止阳离子和阴离子重新结合在一起。这种隔离装置必须具有渗透作用，这样反应物才能穿过隔离装置向相应的电极处移动；但这种隔离装置又不能完全开放，因为必须保证正电荷和负电荷不会离开电极重新在电池内部发生结合。如果电池中的这个隔离装置破损，电池就会发生短路。由于上述化

学反应的逆反应，产生的能量通常会以热和气体的形式释放出来。

你登上飞机，沿着过道前行，很快就找到了你的座位。要找到你的座位并不难，因为这是整架飞机上唯一空着的座位。它在飞机尾部，是一个靠窗的位置。你将随身携带的小包放到前排乘客的座位下面，并系上安全带。乘务长宣布，机舱门已经关闭，所有个人电子设备都必须关闭或者调至飞行模式（你将自己的智能手机调至飞行模式，并将你的平板电脑关机）。几分钟以后，飞机开始沿着跑道滑行。机长用公共广播系统欢迎大家登机，并且告诉大家本架飞机排在等待起飞的队伍中的第二位。接着，乘务员开始做安全演示，几乎就在乘务员说完最后一个字的同时，机长通知机组准备起飞。飞机在跑道的起点处等待了一会儿，然后开始加速。随着速度增加，飞机的机身开始升上天空。一开始，飞机的抬升速度非常缓慢。但没过多久，你已经身处高空了。

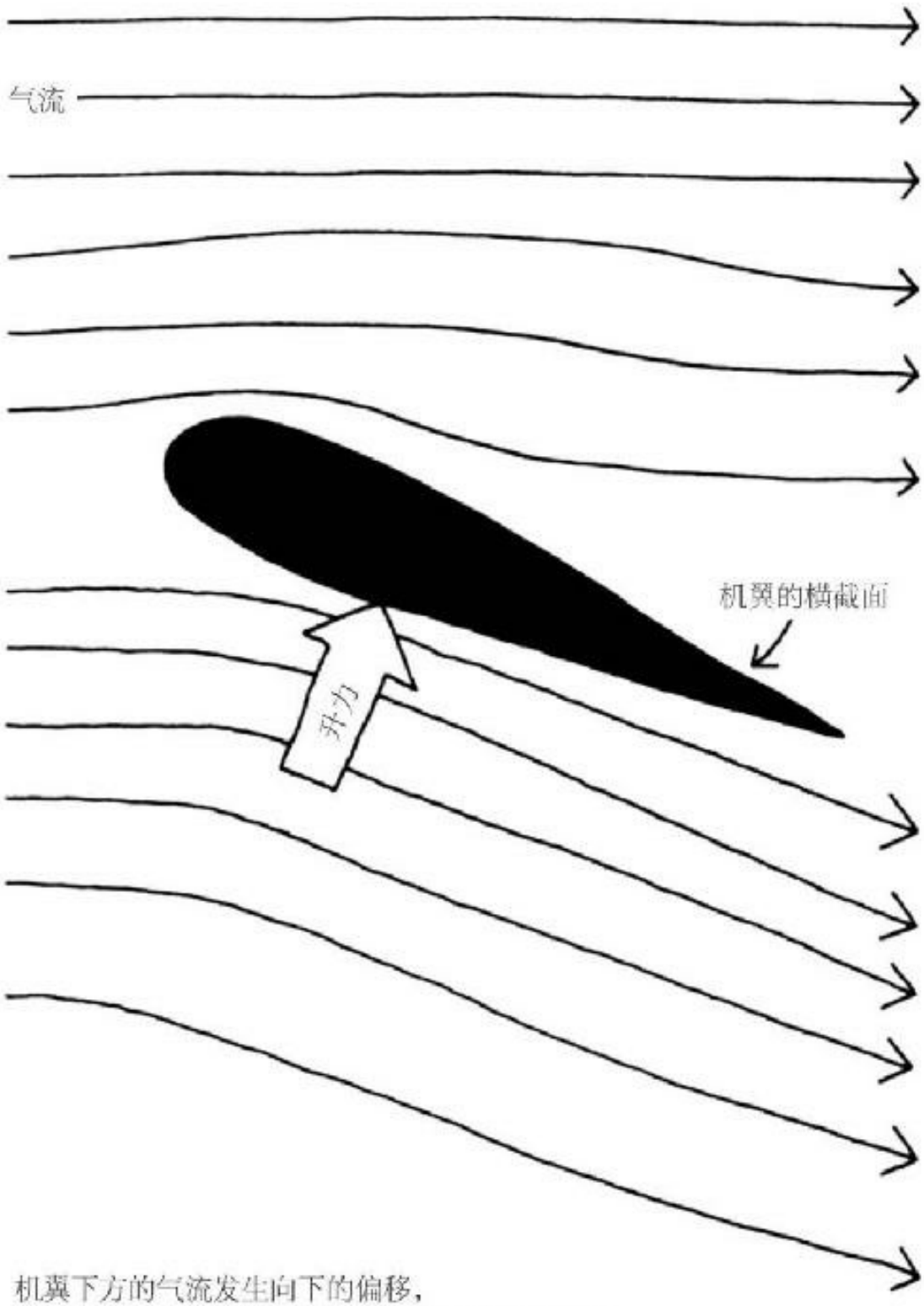
不管你是乘坐热气球，还是乘坐超声速飞机，如果你想离开地面，就必须保证作用于飞行器底部的空气分子数量超过作用于飞行器顶部的空气分子数量，这样才能产生一个向上的净推力。如果这个向上的净推力超过你的体重，你就会被抬升起来，并且飞得越来越高。

当你在饮料中放入冰块时，冰块不会沉入杯底，而是会浮起来。这是因为饮料和冰块密度的不同对冰块产生了一个向上的净推力，我们称之为“浮力”。热气球或者飞艇之所以能升到空中，也是基于同样的原因[4]。浮力的大小取决于物体的体积，也就是说，浮力的大小取决于物体的体积挤占了多少液体或者气体的空间。如果一个物体的质量比它所挤占的介质的质量大，这个物体就会下沉。而如果一个物体的质量比它所挤占的介质的质量小，这个物体就会浮起来[1]。要想让一个气球浮起来，我们就必须在气球中充入某种比周围空气密度小的气体（通常是热空气或者氦气）。要想让一个比空气密度大的物体浮在空中，我们就必须改变空气分子的分布，来为这个物体提供一个向上的净推力。

飞机的机翼有特殊的形状和曲线[5]，机翼上表面凸起，使得机翼上方气流的运动速度比机翼下方气流的速度更快，从而对机翼产生一个向上的反作用力。这里我们用到了牛顿第三定律：对于所有的作用力而言，都会有一个大小相等、方向相反的反作用力。也就是说，所有的力都是成对出现的。如果你用力推一个东西，这个东西也会反过来以同样

大的力推你。当气流经过机翼时，气流运动的方向发生偏移，这会在机翼下方产生一个较大的压力（单位面积上的作用力）。在机翼的上方，空气会相对稀薄，这使得压力下降。飞机飞行的速度越快，每秒钟发生偏移的气流就会越多，机翼顶部和底部的压力差也越大。这种压力差来自让机翼周围的空气发生偏移的力，它会形成一个向上的净推力。如果飞机的飞行速度足够快，这种向上的净推力就会超过飞机本身的重量。

怎样才能让飞机达到足够快的飞行速度，从而使向上的净推力超过飞机自身的重量呢？这里我们用到的物理学原理仍然是牛顿第三定律，也就是作用力和反作用力定律。在飞机诞生初期（甚至在今天的一些小型飞机上仍然如此），飞机是通过螺旋桨的旋转所产生的向前推力来获得飞行速度的。螺旋桨的叶片被设计成特殊的形状，并且以特殊的角度安装，螺旋桨的作用从本质上看相当于旋转的机翼。当螺旋桨旋转的时候，叶片后方的一部分空气被“卷”起来发生了偏移。于是，沿着螺旋桨叶片的短边就产生了一个压力差，从而使螺旋桨受到向前的推力。螺旋桨的叶片旋转得越快，螺旋桨后方发生偏移的空气就越多，飞机也能获得更快的飞行速度。



机翼下方的气流发生向下的偏移，
于是气流对机翼的下方产生一个向上的反作用力，
这种反作用力被称为“升力”。

图**5**

飞机的体积越大，自身重量就越大。如果保持机翼大小不变，那么飞机越大，飞机的飞行速度也必须越快，这样才有可能在机翼底部产生足够大的升力让飞机离开地面。使螺旋桨旋转的能量来自石油的燃烧，这和汽车获得动能的物理学原理从本质上看是一样的。当然，为了获得足够大的升力，飞机的运动速度必须比汽车快，要获得更快的速度，就必须依赖飞机的发动机。

虽然飞机的发动机看起来和汽车发动机不一样[6]，但事实上，飞机的发动机和用汽油驱动的汽车发动机一样，都是一个圆柱形的内燃机气缸，只不过飞机的发动机是在飞机的两侧运转的。飞机发动机从前端吸入冷空气，通过涡轮机叶片的旋转，冷空气被压缩，并且温度大大提高。然后，火花塞点燃热空气和飞机燃料的混合物，产生燃烧反应。燃烧后产生的温度极高的气体从发动机后部排出，并通过一个狭窄的管道，这进一步提高了气体的流动速度。当高温气体从飞机后方排出时，就会在牛顿第三定律的作用下产生一个向前的推力。和汽车中的内燃机气缸不同，飞机发动机气缸的4个冲程是连续不断地进行的。因此，飞机可以获得很快的飞行速度，足以产生超过飞机重力的向上推力，从而使飞机离开地面。

对于飞机而言，随着飞行速度的提高，螺旋桨的旋转速度也必须提高（即飞机发动机提供的向前推力必须提高），这样才能够抵消空气阻力的影响。当飞机的飞行高度较高时，空气密度就会下降，飞机所遇到的空气阻力也会减小。但是，在更稀薄的空气中，能够为飞机机翼底部提供向上推力的空气也相应变少。因此，即使是在高空中飞行，也必须保持一个非常快的飞行速度才能让飞机一直浮在空中。

你乘坐的飞机很快就穿过云层，爬升至巡航的高度。这个过程只用了很短的时间，真是令人印象深刻。你望着窗外的风景，度过了安静又放松的几分钟，也释放了整个上午的压力。无边无际的蓝色天空在你面前展开，这样的景色令你心情平静。你对自己说，生活在这个时代真是幸运呀。几百年前，这样的景色绝大多数人都看不到。你注意到，一团绵延几英里的云形成了某种令人惊叹的形状。你掏出你的智能手机，为它拍摄了一张数字照片。

要使用你的智能手机拍下云朵的照片，以下两个重要的步骤必不可少：第一，通过计算每一个位置（像素点）上的电荷数量来记录该位置上有多少光子被吸收，并且确保各个像素点上的电荷没有损失；第二，拍摄完照片以后，对这幅图像中的每一个位置上的电荷数量进行精确度量。其中第一步是通过一个吸收光线的二极管来完成的，这种二极管也被称作“光电二极管”或者太阳能电池；第二步则需要用一系列电容器来储存这些电荷。

在每一个像素点上都有一个光电二极管，通过吸收光线，这些光电二极管可以产生电荷。这种装置包含一个硅芯片“三明治”[7]，其中纯净的硅相当于三明治中的肉片，夹住肉片的两片“面包”则是一些添加了杂质的硅。上面一片“面包”中的硅掺杂了磷，这样一来，通常空着的高能级（之前我把它比作电影院中的楼上座位）中就会有更多的电子。而下面一片“面包”中的硅则掺杂了硼，这样一来，电子就从低能级中被拉走了（而一般来说，这种电影院的前排座位是满的）。也就是说，此举有效地增加了空穴的数量。通过在纯净硅的上下层分别放置加入了杂质的硅，就能在中间的纯硅层中产生一个电场。

这个电场是非常重要的，因为它能够把电荷移动到必要的位置上去。在电影院的模型中，如果光子以足够高的能量击打某个“座位”，电子就会跃迁至更高的能级，从而在较低的能级上留下一个空穴。而穿过半导体的电场会将电荷推向相反的方向。于是，电子会堆积在“三明治”的一侧，而空穴会在“三明治”的另一侧不断累积。被吸收的光子越多，移动到设备另一侧的电荷数量也越多。在发明电子摄影技术之前，人们使用胶片摄影。在用胶片摄影的过程中，胶片上的卤化银小颗粒会吸收光线，发生某种化学反应，从而给胶片带来永久性改变。对于数字摄影来说，光电二极管产生的电荷会被存储在一个可重复使用的电容器中。在每一个像素点上都有一个光电二极管，这个像素点上的电容器能够存储光电二极管发射的电子。在接下来的步骤中，这些电荷会被读取。

要想读取排列好的1 000 000个电容器（共有1 000行，每行有1 000个电容器）中储存的电荷，就必须保证时间的精确和合作的精密。在不到一秒钟的时间内，你必须保证第347行、第589列的电容器中存储的电荷确实被分配到唯一正确的位置上去。完成这种精准又快速的读取任务的秘诀，就是“水桶长蛇阵原理”[8]。所谓“水桶长蛇阵”，是指在救火的时候许多人排成一个长队，一个人接一个人地传递水桶，以保证不断有水

泼向着火地点。

在每一行中，都有长长的一串电容器，每个电容器中都储存了一定数量的电荷。要读取第一个电容器中的电荷是很容易的，我们只需要施加一个电压，将这个电容器中的电荷拉入一个参考电容器即可，这个参考电容器位于该行电容器的最左侧。当电荷穿过这个参考电容器时，就会产生一个可探测的电压，这个电压也可以通过一个晶体管被放大。放大后的电压通过二进制数学原理被转化成一个数字信号，并被存储在计算机的内存中。现在，该行电容器最左侧的参考电容器是空的，应该读取下一个电容器中的电荷了。

利用“水桶长蛇阵”的方法，我们首先要把队伍一端的第一个桶清空，将其中的水倒入一个具有测量功能的“量桶”中。然后，把第二个桶中的水倒入第一个桶。接着，把第三个桶中的水倒入刚刚清空的第二个桶。再接下来，把第四个桶中的水倒入第三个桶，以此类推。在我们所讨论的这个装置中，电容器的“桶”中装的并不是水，而是一定数量的电荷，但其背后的原理与“水桶长蛇阵”是完全一样的。一个正电荷将该行的第一个电容器清空，然后，第二个电容器中的电子又会受到这个正电荷的吸引，先被转移到第一个电容器中，然后又被转移到参考电容器中（参考电容器相当于前面例子中那个具有测量功能的“量桶”）。现在，第二个电容器为空，而在该行电容器最左侧的参考电容器中储存着本来储存在第二个电容器中的电荷。这些电荷在放大器中被度量并转化成一个电压。与此同时，我们对此时为空的第二个电容器的金属板施加正电荷，于是，第三个电容器中的电子就被吸引到第二个电容器中。我们对该行的所有1　000个电容器重复上述过程，结束对这行的操作以后，再对所有1 000行电容器重复上述操作。最终，原本储存在这1 000 000个电容器中的电荷被分别转化成1 000 000个电压。通过这种方式读取的电容器方阵在技术上被称为“电荷耦合器件”（charge–coupled device，CCD）。

上述系统正常工作的关键在于合作。要想把这些电容器中储存的电荷的编码信息重建成图像，就必须在记忆芯片上以正确的顺序存储所有电压。为了达到这一目的，方阵中的所有电容器都必须在合适的时间点将其储存的电荷传递给队列中的下一个电容器，这就需要靠一个精确的电脑时钟来准确地控制时间。

上述过程会把一幅彩色图像转化成一幅黑白图像，而且屏幕上的每一个像素点都可以显示出精确的灰度。电容器中存储的电荷数量取决于

击中这个像素点的光敏传感器的光子数目，电容器中的电荷又会被转化成一个电压并被记录下来。这个电压可以取任何数值，因此我们可以通过这套机制表现不同的灰度。在电子摄影技术中，为了产生一幅彩色图片，方法之一就是把每一个光敏传感器都分成4个大小相同的方块。每个方块上都有一个过滤器，光敏传感器的4个过滤器分别是红色、绿色、蓝色以及透明的（所有光线都可以通过透明的过滤器到达探测器）。这样一来，每一列顶端的放大器就会接收到多个不同的电荷，这些电荷能够告诉放大器何种颜色的电容器正在被记录。通过对这些电压进行各种处理和调整，我们就可以协调图像的色彩构成。事实上，这种方法不局限于可见光的光谱。由于在半导体中被填满的低能级和空的高能级之间的能量差距较小，半导体传感器还可以侦测到红外线。和胶片摄影一样，一旦光子被吸收并转化成电子信号，剩下的处理过程就与被探测到的光的波长无关了。

这种以“电荷耦合器件”为基础的数码照相机的发明，在摄影行业引起了革命性变化。在美国南北战争时期，马修·布雷迪是这样完成他的肖像摄影作品的：他把照相机的光圈打开，然后等待来自摄影对象的足够多的光子击打到照相机的探测器上。现在，我们可以用同样的基本原理来精确地记录来自遥远星系的光线，或者记录在一架以每小时500英里的速度飞行的飞机上所能看到的景色。为了防止照片模糊不清，马修·布雷迪的摄影对象必须在长达半分钟的时间内保持完全静止，然而现代照相机却能在不到一秒的时间内拍摄一张人物照片。

像素点的面积越小，要覆盖某一指定区域所需要的像素数量就越多，照片的分辨率也越高。这条原则适用于所有照相机和显示器。在上面的例子中，我们讨论的数码照相机的传感器共有1　000行，每一行又有1 000个传感器，但这种百万像素（又称“兆像素”）的设备在今天看来已经是分辨率比较低的设备了。今天，分辨率最高的数码照相机已经能够达到约20　000　000像素。我们都知道，在技术领域，最高的标准总在不断提高。

一旦击中像素点的光子所携带的信息被转化成电压，这些电压又可以被进一步转化成一连串的0和1。这些0和1可以编码成一系列的指令，根据这些指令，显示器便知道哪些位置上的像素应该在何时被激活。如果计算机拥有足够大的内存，你就可以拍摄多张照片形成一个视频，比如每40或50毫秒拍摄一张照片。视频同样可以被转化成指令，当然这些指令中包含更多的0和1。你可以把这些0和1上传到一个远程的数据存储

中心，也就是说你可以把你拍摄的关于云朵的照片存储到“数据云”中。

你的智能手机会自动将你拍摄的所有数字照片存储到你的云数据存储账户中。然而，由于你的手机目前处于飞行模式，所以你无法与你的数据提供商建立联系。因此当飞机着陆的时候，你需要再次确认这些照片已经和你的其他照片、视频保存在一起了。现在，飞机已经远在云层之上，你想到：由于飞机周围的空气稀薄，你在飞机上受到的辐射要超过今天上午在医生诊所进行X射线检查时受到的辐射。于是，你决定再看看做商业报告时要用到的笔记。

大多数人都希望把手机中的许多东西长期保存下来，然而这些东西的数量最终会超过智能手机的内存。因此，最好把它们存储在一个“保险箱”中，而且这个保险箱的容量越大越好。电子保险箱就像银行的保险库，它确实具备上述优点。有时候，我们会把这种电子保险箱称为“数据云”。

如果你身处飞行的飞机中，距离地面5英里，那么你与数据云之间的距离大约也是5英里。你存储在数据云中的信息都在地面上，并且常常是在北半球的地面上。与你存储在当地银行的存款不同，这些数据并没有一个明确的中心位置。你的信息被保存在许多台计算机的内存之中[9]，这些计算机被称为“服务器”。

当你打开智能手机或者平板电脑时，这些设备会运行一系列的指令，它们能够告诉显示屏哪些像素点应该被点亮。同样，当你输入网址的时候（网站的信息包括文字、链接以及图像），你的设备也会收到一系列不同的指令，它们同样能够告诉显示屏哪些像素点应该被点亮，从而显现出你在显示屏上看到的图像。网站会向你的设备发送一长串由0和1组成的信息，这些信息被储存在服务器上。所有这些储存信息的服务器形成了一个分散和广阔的网络，这个网络被称为云数据存储系统。但是，我们必须注意不能让这些海量数据把服务器“烤熟”了。

每当晶体管从低电流的“关闭”状态转换至高电流的“打开”状态时，都会产生一定的能量。这个能量虽然很小，但确实存在。如果不能快速地移除这些能量，晶体管的温度就会上升。温度反映的是一个物体中每个原子的平均能量。在固体中，原子处于固定的位置，物体中原子的平均能量越高，就会有越多的原子在平衡位置附近振动。这种振动可能导

致电流偏离原来的运动轨迹，并且会限制给定电压所产生的电流大小。温度的上升不仅会影响晶体管的性能，还会损坏芯片本身。在很小的体积中，会有数百万个晶体管每秒开关数百万次，如果不能将这些热量移除[10]，能量的不断堆积最终会导致温度超过硅的熔点。

在设计计算机系统的时候，热量管理是一个非常重要的问题[11]。如果我们希望实现系统运行速度的最大化，热量管理就显得更加重要了。晶体管开关的速度越快，电流变化的时间间隔就越短，我们也必须在更短的时间内散发这些操作产生的热量。

许多公司都提供云数据存储服务，这需要用到大量的计算机服务器。所有的计算机服务器都需要靠电力来提供能量，谷歌公司运营的数据中心的耗电量超过200兆瓦[12]，这相当于一个小型发电站生产的电量。用这个耗电量乘以世界各地数据中心的数量，我们就可以清楚地知道，云数据存储（以及整个互联网）是碳足迹的一个重要来源。为了降低空调的费用（如果这些服务器温度过高，那么你存储在这些服务器中的可爱猫咪的视频也就不在了），许多公司会把数据中心建立在气候较冷的地方，比如瑞典、芬兰以及美国明尼苏达州的北部。

> 你的商业报告已经准备得很充分了，对此你感到十分满意。你从包里拿出平板电脑和一副耳机，打算观看你事先下载好的一段视频来度过剩下的飞行时间。迷你耳机竟然有这么好的音质，这实在令你印象深刻。这时你看了看坐在你旁边的乘客，他也在用平板电脑观看视频，但他用的不是迷你耳机，而是一副有噪声消除功能的耳机。这种耳机又大又笨，你不禁开始思考：这种耳机真的能够消除噪声吗？它会不会仅仅是通过捂住耳朵来阻隔噪声的呢？

有噪声消除功能的耳机听筒之所以体积较大，不仅是为了屏蔽背景声音，还为了让每一个听筒都有话筒和扬声器的功能。它们既能像话筒一样探测到外界的声波，并将这些声波转化成电压，也能像扬声器一样把电压重新转化成声波。为了消除背景噪声，听筒产生的新声波必须与外界的声音产生完全相消干涉。

声音表现为介质密度的变化[13]，这种介质通常是空气。这种密度的变化有时具有平滑的周期性且频率可以衡量（比如拨动一根吉他弦发出的声音），有时却是随机和混乱的（比如飞机发动机发出的轰鸣声）。

下面我们来讨论拨动一根吉他弦发出的声音。我们在前文中已经提到，当吉他弦向接近我们的方向运动时，会与空气分子发生碰撞，这些空气分子会被推向它们前方的空气分子，使得这个区域的空气密度高于平均值。而当吉他弦向远离我们的方向运动时，弦的后方就会形成一个空气密度低于平均值的区域。不管空气密度是高于还是低于平均值，这种密度的变化都是从弦的位置开始向外传播的。当吉他弦再次朝我们运动时，就会再次形成一个空气密度较高的区域，之后又形成一个空气密度较低的区域。随着吉他弦不断前后运动，空气密度会发生高低的交替变化。两个空气密度较高的相邻区域之间的距离叫作“波长”。假设这根吉他弦演奏的是G调，那么这个G调的密度波会冲击我们的耳鼓，引起耳膜振动。最终，这种机械振动会被转化为电子信号，我们的神经元会对这些电子信号进行传输和处理，最终将这些信号“翻译”为G调。

现在，假设一个声波在到达我们的耳鼓之前先与另一个声波发生碰撞，后一个声波与第一个声波的音调完全一样。也就是说，第二个声波中的所有元素几乎与第一个声波完全一样，除了一个重要的区别：第二个声波与第一个声波的相位完全相反。也就是说，当第一个声波形成一个高密度的空气区域时，第二个声波恰好形成一个低密度的空气区域，反之亦然。要产生第二个声波，你需要另一根吉他弦，你拨动这根吉他弦的方式和你拨动第一根吉他弦的方式完全一样，但你必须保证当第一根吉他弦向下运动的时候，第二根吉他弦正好向上运动。当这样的两个声波相遇时，第一个声波的高密度区域恰好与第二个声波的低密度区域相遇，这就使得空气密度回归至平均密度。所以，第二个声波的作用其实是让第一个声波完全消失，也就是说，吉他发出的G调音乐完全消失了。第一根吉他弦产生了一个声波，第二根吉他弦产生了一个反声波，这个反声波把第一根吉他弦产生的声波完全抵消了。

既然我们可以对一个音调做这样的处理，我们也可以对许多不同的音调做同样的处理。飞机发动机的振动通过机翼传递至机身，又从机身传递至机舱中加压的空气。与音乐或者说话声不同，飞机的背景噪声包括一系列不同频率的声波。当这些声波冲击我们的耳鼓时，所有频率都会同时吸引我们的注意力。想象你身处一个巨大的空房间中，试图偷听房间另一头的人在说什么。如果你非常努力地偷听，你就可以听清楚远处的谈话。然而，如果这个房间里正在举行一场大型聚会，很多人同时在进行两两对话，想要听清楚某两个人的交谈内容就变得非常困难了。普通耳机能够屏蔽部分背景噪声，并把你希望听到的声音送入你的耳朵。但是，仍然会有一些噪声钻入你的耳朵，这些噪声可能会导致你无

法集中注意力收听你希望听到的声音。

一副有噪声消除功能的耳机会记录下这场聚会中所有人的说话声[14]，同时发出反声波来消除这些人说话的声波。耳机中内置的话筒能够探测到外界的声音，并将这些密度波转化成相应的电压变化。然后，耳机会对这些输入信号进行快速分析。一旦完成对这些噪声的分析，就可以用十分简单的数学方法来对这些声波进行处理，从而产生一个能完全消除这些噪声的电压。这个电压被传送至耳机的扬声器处，扬声器会再产生一个机械声波来消除外界的噪声声波。由于耳机中内置的电子处理器的运行速度比声音的传播速度快许多倍，因此，这种耳机可以根据外界噪声的变化迅速做出反应，以保证耳机随时都能传播近乎完美的声效。

还没等你看完平板电脑中的视频，机长的声音再次响起。机长通过广播告诉大家，飞机已经开始下降。你被要求收起所有在飞行过程中取出的个人物品，并关闭所有个人电子设备，直到飞机安全着陆。于是，你收起你的平板电脑和耳机。很快，飞机就着陆了。走下飞机以后，你取回在登机口托运的行李，并随着人流一起走向机场的出口。出租车的排队队伍非常长，因此你决定乘坐轻轨前往位于市中心的目的地。考虑到轻轨的快速性和高效性，你不禁想到，如果除了飞机以外还有高铁可供选择，你肯定会选择乘坐高铁。

从物理学的角度看，轻轨列车面对的问题基本上和所有纯电动汽车面对的问题一样。然而，固定轨道为高速运转的列车提供了另一种获得推进力的方式——“磁”。

首先，我们讨论这样一个问题：为什么某些材料有磁性呢？原子的各个组成部分[15]——质子、中子以及电子——都有一个很小的内置磁场。这些内置磁场就像指南针的指针一样，可以用量子力学知识解释。原子核内的固有磁场使我们能够用核磁共振扫描仪对人体内的组织成像。传统磁体（比如条状磁体或者马蹄形磁体）的磁性来自铁原子中电子产生的磁场。在大部分原子中，电子都是成对存在的，一个电子的S极对着另一个电子的N极，这样一对电子的净磁场为零。然而在一些特殊情况下（比如铁和钴），原子中会出现一些不成对的电子（虽然并非所有电子都是不成对的），这些电子的S极和N极朝向同一个方向，原

子的净磁场不为零。铁原子的天然属性可以让所有电子的磁场都朝向同一方向，因此一块实心的铁可以被磁化，磁化后的铁能在周围的空间中形成一个较大的磁场。如果我们把两块磁体放在一起，并让两块磁体的N极相对，我们就会感受到一个很强的排斥力试图把这两块磁体分开。在这种相斥的设定下，如果我们把一块磁体装在列车轨道上，而把另一块磁体装在列车上，那么这种斥力可能会超过列车本身的重力（前提条件是我们所使用的磁体足够强）。此时，列车就会脱离轨道悬浮起来。

相同磁极之间的排斥作用就是磁悬浮列车（简称“磁浮列车”）悬浮于轨道之上的基本原理[16]。但是，磁悬浮列车使用的并不是用铁制成的条状磁体，而是磁力很大的电磁铁。在前文中我们多次提到，电和磁之间有着非常紧密的联系。你的电动牙刷中的电动机与充电器中的变压器就利用了电和磁之间的这种联系。变化的电流会产生磁场，变化的磁场又可以产生感应电流。为了产生足以使列车悬浮于轨道之上的巨大磁场，我们首先需要产生一个巨大的电流。

磁悬浮列车的轨道上有许多电磁铁，这种轨道既要让列车悬浮起来，又要推动列车前进。在列车的底部有一个能产生磁场的线圈，如果这个线圈中的电流按顺时针方向流动，磁场的N极就指向线圈的某一侧；如果线圈中的电流按逆时针方向流动，磁场的方向就相反。列车前端的线圈中的电流经过特殊设定，当线圈中产生一个N极向前的磁场时，就会被轨道上的S极区域所吸引，从而产生拉动火车前进的动力；而一旦列车线圈中的磁场S极向前，列车就会向轨道上的N极区域行进。我们通过计算机来控制列车线圈中的电流方向的变化，线圈中变化的电流可以不断地推动列车在轨道上越开越快。还有一组线圈则让列车离开轨道悬浮起来，这样一来，就不存在旋转的车轮与轨道之间的摩擦力了。磁悬浮列车的时速最高可超过每小时200英里。

在轻轨列车上，你拿出智能手机并连接上Wi-Fi。你先确认之前在飞机上拍摄的云朵照片已经储存到了你的“数据云”账户中，接着你打开网页浏览器，调出轻轨列车的行车路线图。你发现你的目的地——一栋市中心的办公楼距离当前车站还有6站。所以，你有足够多的时间再回顾一下你的商业报告的内容。

[1] 在木头中有许多内含空气的小囊，这些气囊降低了木头的整体密度。但如果木头吸饱了

水，它就会沉入水底。



第 6 章
做商业报告

你下了车，这里距离举行会议的那栋大楼还有两个街区的距离。和大部分的美国城市一样，这个城市的中心区域的街区布局也是方方正正的，因此只要找到正确的方向，就很容易找到目的地。进入大楼以后，你检查公司名录，并坐上一部电梯来到23层。你向前台的接待员做了自我介绍，接待员给你的邀请者打电话确认你的身份。几分钟后，你在接待员的带领下沿着一条走廊来到你即将要做商业报告的会议室。这间会议室的面积不小，邀请者告诉你，至少有55个人将会参加这次会议。按照会议日程安排，你的商业报告在20分钟以后开始。你一边喝着咖啡，一边把你的平板电脑和LCD（液晶显示）投影仪连接起来。一开始，你遇到了一些麻烦，导致连接失败。好在你事先把商业报告的副本存在了一个USB闪存盘中，于是你把USB闪存盘里的报告传输到了会议室的计算机里。你确认文件可以打开，格式也能正确显示。现在已经万事俱备，汇报随时可以开始。

计算机中的指令以一系列0和1表示，半导体晶体管有高电流和低电流两种不同的状态，正好可以分别用0和1这两个数值表示。半导体的优势在于，我们可以通过两种方式来大幅改变这些材料的电阻：第一种方式是在材料中加入极少量的其他化学元素（这就是太阳能电池和发光二极管的工作原理）；第二种方式是在半导体中产生一个电场（这就是晶体管的工作原理）。

如果我们想制作一个晶体管[1]，我们可以用一个电容器进行改装。电容器包含两块金属板和金属板之间的一层很薄的绝缘材料（比如玻璃）。我们只要把其中的一块金属板替换成半导体（比如硅），就可以得到一个晶体管。在一个普通的电容器中，我们给其中一块金属板施加一个正电压，这块金属板就携带上了正电荷。这块金属板上的正电荷将电子吸引到另一块金属板上，从而使其带上负电荷。若第二块板是由半导体而不是金属制成的，也会发生同样的事情。硅中的电子会被吸引到硅板面对另一块金属板的一侧。在这个过程发生之前，在半导体与绝缘体玻璃的交界处，半导体中只有少数几个自由电子能够通过绝缘体玻璃。在这个过程发生之后，半导体表面上的电荷密度大大提高了，通过这个区域的电流也增强了[1]。通过对金属板施加一个电压，我们可以大幅提高通过半导体的电流强度。当一个较大的电流通过半导体的时候，就会向计算机内存输入“1”这个信号。而当我们不对金属板施加电压的

时候，硅中的电流强度很小，就会向计算机内存输入“0”这个信号。通过改变底部金属板上的电荷，可以产生一个电场来改变半导体的电阻，这种现象被称为“场效应”。整个元件被称为“场效应晶体管”（field effect transistor，FET）。

然而，上述这种晶体管结构的问题是，只在我们向金属板施加一个电压时，这个元件中才能产生较强的电流，从而向计算机内存输入“1”的信号。在你的计算机中，这个电压的能量来自电池或者发电厂（如果你的计算机电源插头连在墙上的电源座上）。一旦我们移除这个电压，金属板上的额外电荷就会流走，晶体管也会回到低电流状态，所有存储在这个“0”和“1”的序列中的信息都会就此丢失，因为晶体管回到了“0”的默认状态。要解决这个问题，我们必须把这些数字信息转移到一种可以长久保存的存储媒介中去，比如一个磁性硬盘。

USB[2]的记忆棒即使不与电源连接，也能保留高电流状态的晶体管中存储的信息。为了让这些晶体管保持高电流状态，我们必须在前面提到的元件中加入第三块金属板。这块金属板位于绝缘玻璃层中2，绝缘玻璃层则位于第一块金属板和半导体板之间。第三块金属板的作用是储存电荷，从而让硅（半导体板）保持“打开”状态。

在晶体管中，起绝缘作用的玻璃层通常非常薄，厚度只有100纳米左右（1纳米相当于1米的十亿分之一，也就是3个原子首尾相连的长度）。USB闪存盘的玻璃层中加入了另一块金属板，这块金属板和元件底部金属板的电极结构完全一样，唯一的区别就在于这块金属板被夹在绝缘层之中，它离硅层的距离只有10纳米左右。这块金属板不与任何外界的导线相连，因此在正常情况下，这块金属板并不参与晶体管的工作过程。然而，如果半导体的导线发生短路，底部金属板的电极被施加一个较大的电压（这个电极有时被称为“栅极”，因为当我们对这个电极施加电压的时候，一个较大的电流会通过半导体的顶部，好像打开了一个栅栏），部分电荷就能够进入绝缘层中的这块金属板。[3]由于绝缘层中的这块金属板不与任何物体相连接，所以这些电荷会一直停留在这块金属板上，直到再施加一个电压将这些电荷消除。在此之前，绝缘玻璃层内金属板上的这些电荷会在半导体中产生一个带相反电荷的感应电流。因此，在这种“浮栅场效应晶体管”中，即使晶体管不与外界电源相连，晶体管仍然可以保持导电性较高的“打开”状态。

USB记忆闪存盘（又称“手指盘”或者“垃圾盘”）就是利用上述这种晶体管来实现长期储存数据的目的的。同样，平板电脑或者超轻超薄的

笔记本电脑也用这种晶体管来长期储存数据。随着计算机设备制造技术的提高，不仅一块芯片中晶体管的数量大幅提高了，计算机的内存处理能力也在这种浮栅场效应晶体管的帮助下迅速提高。计算机硬盘曾用[4]有磁性区域的磁盘来表示数字指令中的0和1。[4]这些磁盘以非常高的速度旋转，一个起读取作用的磁头能够把这些变化的磁场转化为电流，这个磁头的作用就相当于线圈。浮栅场效应晶体管硬盘的工作原理与磁盘不同，浮栅场效应晶体管硬盘中没有任何运动的部件，因此，它对内存的能量消耗要比磁盘低得多。

正当你把商业报告从USB闪存盘传输到计算机中时，你的邀请者再次走入会议室。邀请者询问你能不能提供一份纸质版商业报告，因为有了纸质版以后，听众就能更容易地听懂你的报告，也方便他们记笔记。这份商业报告的幻灯片文件你事先只打印了一份纸质版，因为你不希望自己的行李变得太沉重。邀请者表示，这个问题你不必担心，因为旁边就有一台复印机。邀请者拿起你仅有的一份纸质版，用复印机为每位听众复印了一份纸质材料。

在静电复印技术发明之前，如果你想复印一份文件，就必须在制作原文件的时候用碳纸复写一份。有了复印机之后，你可以将一张纸上的内容复印到另一张纸上，这个过程运用了复杂的光学和电学原理。

复印机的核心元件是一个圆柱形的“鼓”[5]，“鼓”的外部镀有一层半导体材料。一个电压非常高的导线能把电荷（在这个例子中，为了方便说明，我们假设这种电荷是正电荷）喷射到半导体材料的表面。需要复印的文件被放在半导体鼓上方的一块玻璃上，一盏灯在文件下方移动，明亮的光线扫过整页文件。当文件上出现白色空格时，光线会被反射到带有电荷的半导体表面；当文件上出现黑色的印刷字时，则没有光线被反射到半导体表面[5]。带电荷的半导体表面一旦被反射光线照射到，这个区域内的电荷就会被抵消，而原文件上的黑色字则被精确地复制到半导体鼓上（半导体表面带有正电的区域就是原文件上有黑色字的区域）。然后，我们再通过另一条导线中的另一个电压使绝缘空心塑料粒子内部的颜料（被称为“墨粉”）[6]带上负电荷。接着，我们把墨粉喷到半导体鼓的表面上。带负电的墨粉粒子（主要是团状的碳原子以及一些其他化学物质）就会被吸附到半导体表面带正电的区域，这些带正电的区域正好对应原文件上的黑色印刷字部分。接着，我们用之前给半导体鼓充电

的导线使一张白纸带上正电荷，并把这张白纸放到半导体鼓上，此时吸附在半导体鼓表面的墨粉就位于半导体表面和纸张之间。带负电的墨粉粒子会被吸到带正电的白纸上，因此当我们把这张白纸从半导体鼓上揭下来时，墨粉也跟着这张白纸被揭了下来。然后，我们加热这张白纸，让墨粉渗入纸张，电荷也被抵消了。这张白纸就成了原文件的一个复制品。

在复印机的出纸口输出这份复制品后，一个刮板会扫过半导体鼓的表面，清理掉所有的残余墨粉。与此同时，任何残留在半导体表面上的电荷也被抵消掉，也就是说半导体鼓已经准备好复印下一份文件了。总之，以上所有过程都能在不到一秒钟的时间内完成[6]。

复印机的关键工作原理是，当光线照射到带正电的半导体鼓表面时，半导体的导电性发生变化，被光线照射到的部分的正电荷流失，未经过光线照射的半导体表面仍带有正电荷，带正电的这部分半导体表面可以吸引带负电的墨粉粒子。光线之所以可以改变半导体表面的电荷分布情况，是因为半导体材料的导电性处于中游水平。半导体材料既不像金属的导电性那么强，也不像绝缘材料的导电性那么差。在半导体中，所有低能级的前排座位全部被电子填满[7]，因为两个电子不能位于同一个座位上，所以在没有空座位的时候就没有电流通过半导体材料。当波长合适的光照射在半导体材料上时，半导体的电阻会显著降低。于是，半导体材料中的某些电子被“踢进”了高能级的楼上座位中，前排的低能级座位中就出现了空位，电子就可以在电压的作用下从一个座位移动到另一个座位，从而产生电流。当可见光照射在带正电的半导体材料上时，被光线照亮区域的导电性将提升，电荷迅速移动到另一侧的电极上。而未被光线照亮区域中的电荷则无法移动（因为电阻太高），只能停留在原来的位置上，并准备完成吸引带负电的墨粉粒子的任务。

扫描仪和打印机也运用了与复印机类似的原理。一旦原文件上或明或暗的区域被投射到半导体鼓的表面上，半导体鼓表面不同区域的电荷就可以被存储在不同区域的电容器中。然后，我们可以用“电荷耦合器件”（就像数字照相机中的“电荷耦合器件”）读取这些电容器中的电荷，形成一系列电压信号，再把这些电压信号储存在任何计算机的内存中。接着，我们让计算机中存储的这一系列电压信号指示喷墨打印机工作，这样就可以得到原文件的一份复制品。在喷墨打印机中，纸张会被牵拉着通过一根杆，皮带和滑轮则会操纵着墨盒前后运动。有一种喷墨打印机[9]的墨盒与圆筒相连，圆筒上装有一个喷嘴，能把墨粉喷到纸张

上。当向圆筒的顶部施加压力的时候，墨粉就会被喷射出来。圆筒顶部有一块压电晶体，当通过压电晶体的电压发生变化时，晶体会发生膨胀（将墨粉压出喷嘴）或者收缩（从墨盒中吸收更多的墨粉到圆筒中）。只要能把原文件转化成一系列的电压信号，就可以把这些电压信号转化成原文件的一份复制品。因此，一台设备既可以做扫描仪用，又可以做传真机、打印机以及复印机用，因为在这些设备背后的物理学原理都是一样的！

虽然复印机是一种很常见的设备，但实际上我们并不是非常了解在复印机中起关键作用的“无序半导体材料”的性质。物理学家对晶体性质的了解比他们对无序固体性质的了解深刻得多。一立方英寸大小的任何固体中都包含约10^{24}个原子。在研究晶体材料的性质时，物理学家利用晶体结构的对称性来解释材料的性质，但当原子随机排列的时候，这条捷径就走不通了。

到目前为止，我们讨论的所有半导体材料都是“晶体半导体”材料。让我们想象一种完全由碳原子构成的固体，该固体中的每一个原子都位于一个非常精确的位置上：每个原子都位于一个金字塔[7]的中心，其他碳原子则位于这个金字塔的各个顶点上。这样一种排列被称为“金刚石型晶格”。事实上，金刚石或者钻石中的碳原子正是以这种方式排列的。然而，除了“金刚石型晶格”，还存在其他的晶体结构[8]，比如食用盐的结构是一个一个的立方体，钠原子和氯原子处于这个立方体的对角上。但是，除了上述两种晶体结构以外，原子还会以许多种不同的方式随机排列，比如无序结构或者无定形结构。复印机的关键部件——半导体鼓——事实上是由一种无定形半导体材料制成的[10]（无定形半导体材料与晶体半导体材料不同）。

为了节约成本，复印机中的鼓和皮带都是用一种无定形半导体材料制成的。要想得到体积较大的单晶硅，我们先要从一大桶熔化的硅开始。我们先把一个晶种浸入高温的液体硅中[11]，再把这个晶种慢慢地拿出来，被这个晶种带出来的硅会在离开熔化的硅池的过程中复制晶种的晶体结构。经过一个漫长而精细的过程，我们会得到一个由硅晶体构成的大圆柱体，这个圆柱体的直径有10~20英寸。然后，我们像切香肠一样把这个圆柱体切成薄片（如果用整个圆柱体来制造一台打印机的硅鼓，这台打印机的造价将极为高昂，谁也买不起，只能继续使用碳纸来复写文件了）。接着，我们通过一系列的化学和热处理步骤，在硅片的表面制成一系列微芯片，再把它们切割下来，这样就可以应用于手机、

笔记本电脑以及其他许多电子设备中了。但是，要想制作大小为8.5英寸×11英寸的复印件，我们并不需要这种硅片。当第一台复印机被发明出来的时候，当时最大的单晶硅圆柱体的直径只能达到2~3英寸，根本不能满足复印机的需求。如果我们把多个硅片黏在一起，硅片的接缝处就会在复印件上留下非常清晰的竖直条纹。然而，如果我们能让原子随机地覆盖在一个表面上，我们就可以用无定形半导体材料覆盖标准打印纸宽度的区域。

我们一直用无定形半导体材料制造复印机半导体鼓，从第一台施乐牌复印机开始就是这样。虽然无定形半导体材料被广泛运用于各种技术和设备，比如太阳能电池、平板显示器、扫描仪、复印机以及X射线扫描仪等（基本上，任何需要用半导体材料覆盖较大平面区域的设备，都会用到无定形半导体材料），但科学家们却从未完全了解无定形半导体材料的性质。这方面的研究仍在继续，希望对无定形半导体材料的深入了解能够帮助我们制造出性能更好的设备。

很快，邀请者就带着复印好的材料回到会议室。你用一根电缆将你正在浏览的计算机和会议室中的LCD投影仪连接在一起。计算机和投影仪能不能成功地连接呢？抱着这样的疑问，你一时感到焦虑不安。然而，投影屏幕上很快就出现了计算机的桌面图案，你终于放下心来。

一台简单的幻灯片投影仪能发出明亮的光束，并让这些光束穿过印在透明塑料卡片上的图像。而一台LCD投影仪则能够把计算机中的数字文件转化成可以投射在屏幕上的视觉图片。

液晶是一种真正的液体[12]，因此液晶具有液体的所有性质：如果把液晶放入一个容器，液晶就会填满容器；如果这个容器发生倾斜，液晶分子就会像其他任何一种具有黏性的液体一样流动或者流出容器。但是，就像在其他晶体中一样，在液晶中我们也会发现液晶分子单元的排列方式具有一种内在的规律性。在大部分固态晶体材料中，晶体的基本元素是单个原子或者小分子，这些基本元素会在整个材料中周期性地不断重复；而在液晶中，这种基本元素的角色由体积更大、基于碳的分子扮演。这些分子的性质因分子的化学元素构成和化学键排列方式的不同而有很大的变化。当分子的精细化学构成以及分子之间的相互作用满足某些条件时，液晶中的分子就可以像正常液体中的分子一样随机排列。

但当温度下降的时候，这些分子就可能会采取一种不太随机的排列方式。

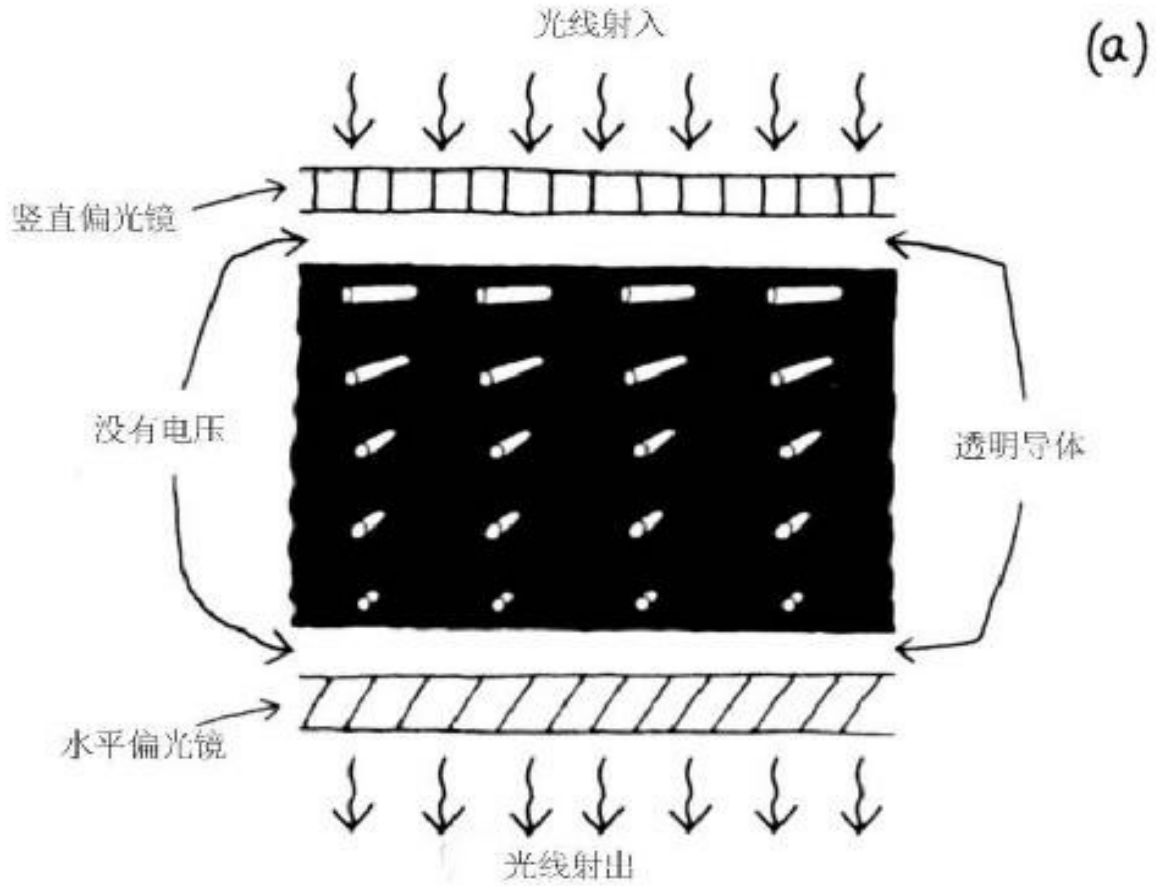
与冰的融化或者水的沸腾不同，当液晶经历上述状态变化时，分子的排列并不会发生非常剧烈的变化。比如，对于某些长链分子而言，由于分子与相邻分子之间的静电作用，这些长链分子的排列方式可能是：所有分子排成一队，并都朝向同样的方向，就像在一个窄长的盒子中放入大量牙签一样（这种状态叫作“丝状相”）。如果我们降低温度，分子的热能（动能）就会相应降低，更容易受到另一种弱静电作用的影响，从而以另一种方式排列。液晶这种材料的美丽和强大之处就在于，对于某些特定类型的分子而言，我们只需要对这些液晶施加一个外部电压，就能够改变这些分子的排列方式。

LCD投影仪正是利用了液晶材料的这种特点。此外，计算机和电视机的平板显示器[13]也利用了液晶材料的这种性质。液晶屏幕可以看成由像素点构成的二维网格（就像自动取款机的触摸屏一样），每个像素点上都包含这样一个小元件——两片玻璃板，它们中间填充着液晶材料。玻璃板的前方和后方分别装有一个偏光镜，偏光镜只能让电场朝某一特定方向的光线通过。普通的白光包含很多种电磁波，这些电磁波的电场会在所有可能的方向上振荡。这个偏光镜就像监狱窗户上的金属栏杆一样，一旦光线穿过这个偏光镜，所有光线的电场方向就必须和这些不导电的栏杆的方向相同。其中一端装有一个竖直的偏光镜，因此穿过这个偏光镜的光线的电场都必须在竖直方向上振荡。另一个偏光镜则呈水平方向，由于到达这个偏光镜的光线的电场都不在水平方向上振荡，所以能通过第一个偏光镜的所有光线都不可能穿过第二个偏光镜，除非这两个偏光镜之间的液晶材料能够改变光线的电场方向。

液晶显示屏的像素点选用了一种特殊的液晶分子（见图6–1）。在第一片玻璃板附近，这种液晶分子的长轴沿着竖直偏光镜的方向排列。在另一片玻璃板处，这种液晶分子的长轴沿着水平偏光镜的方向排列。在这两片玻璃板之间，液晶分子的排列逐渐从竖直方向变为水平方向。液晶分子能够引导光线中的电场，从直观的角度看，就好像光线的电场必须沿着液晶分子的排列方向运动一样。随着液晶分子排列方向的偏转，穿过竖直偏光镜的光线的电场方向也会发生偏转，当光线到达第二个水平偏光镜的时候，光线电场的方向已经偏转至水平方向。因此，光线可以穿过第二个偏光镜，此时这个像素点是亮的。

假设我们在两片玻璃板之间施加一个电压（通过氧化铟锡等透明导

体来施加这个电压，就像触摸屏一样），液晶分子的排列方式就会发生改变。这个电压不需要太高，5伏特的电压就足够了。施加了这个电压以后，光线的电场就无法从竖直方向偏转至水平方向，也就没有光线可以穿过第二个偏光镜，此时这个像素点为暗[9]。通过改变施加在屏幕上的各个像素点的电压强度，并且使用适当的滤镜，就可以生成一幅彩色图像。


光线射入
(a)
竖直偏光镜
没有电压
透明导体
水平偏光镜
光线射出

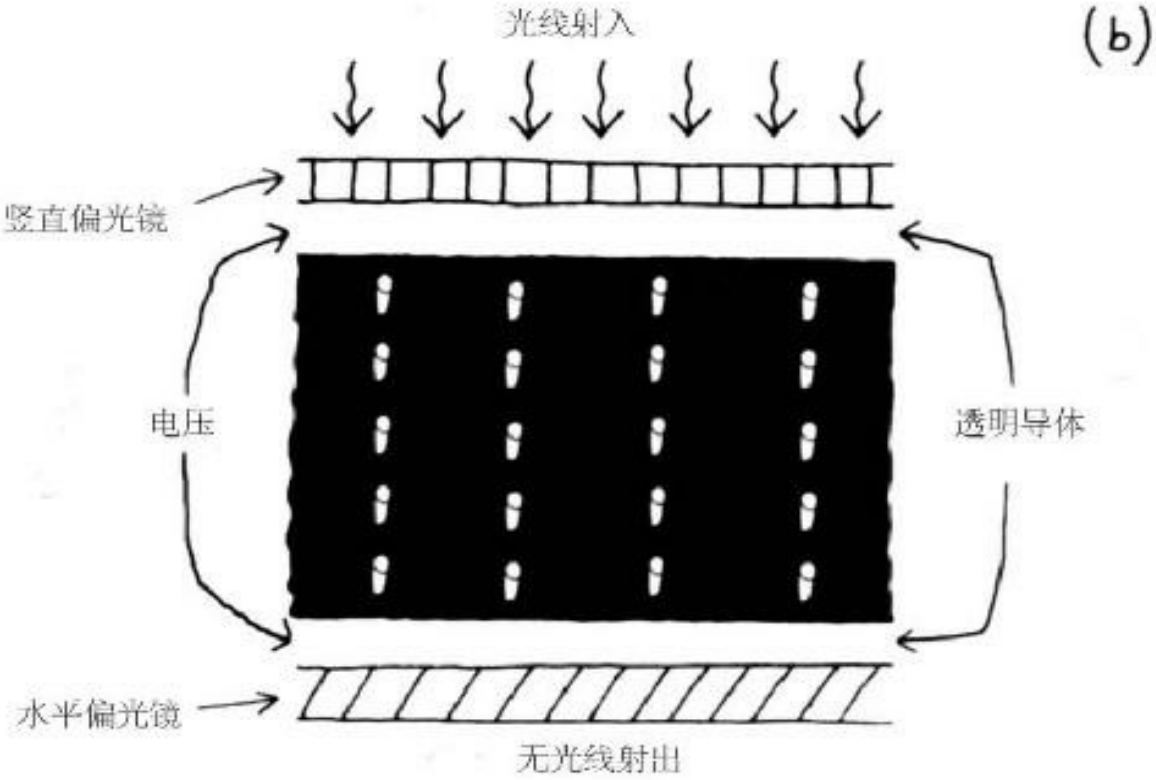

光线射入
(b)
竖直偏光镜
电压
透明导体
水平偏光镜
无光线射出

图**6–1**

你的第一张商业报告幻灯片清晰地出现在投影屏幕上，你拿出一个小型手持激光指示器，你打算用它来指出幻灯片上的内容以及要点。就算坐在会议室最后排的人，也能清楚地看到激光指示器发出的明亮的绿色光点。

不管是激光指示器、条形码读取器、DVD（高密度数字视频光盘）播放器，还是蓝光播放器，都用到了一种叫作“激光二极管”的元件。“激光二极管”是一种升级版的发光二极管。

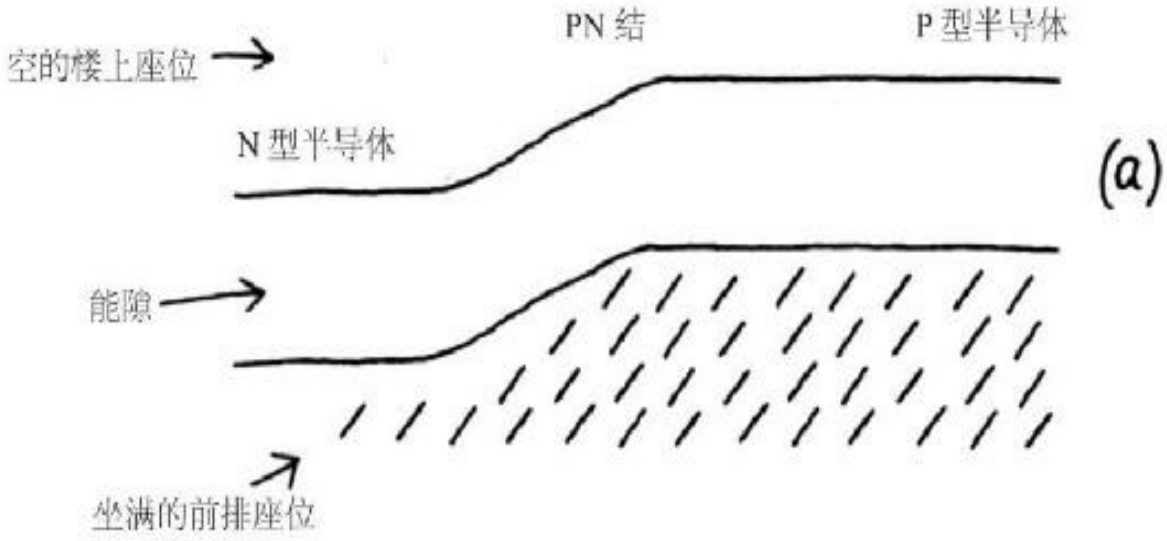
一个二极管中包含两个被放置在一起的半导体[14]，这个元件能够保证电流先通过其中一个半导体，再通过另一个半导体。在前文中，我们将半导体材料比作一个电影院，所有低能级的前排座位都被电子占满，而所有高能级的楼上座位都是空的。只在电子从一个座位移动到相邻的空座位上时，才能产生电流。因此，“坐”满电子的前排座位无法让电流通过，因为没有空座位供电子移动位置。同样，在楼上座位中也没有电流，因为这里虽然有大量的空座位，却没有电子。现在，假设我们在一种半导体材料中加入少量的其他化学物质，这种半导体材料就变得不纯净了。在加入这些化学物质以后，它们中的电子便会进入能级较高的楼上座位，但低能级的前排座位中的电子并不会离开。此时，这种不纯净的半导体材料的导电性就大大增加了。

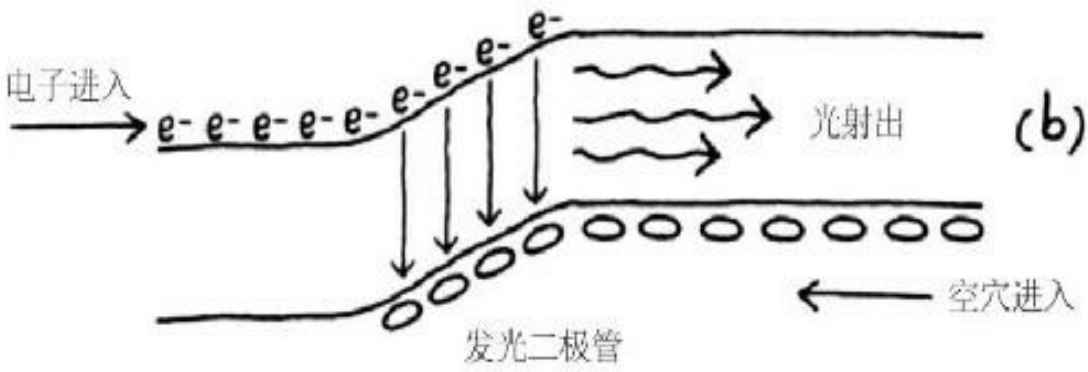
此外，还存在其他一些不纯净的化学物质，它们能够“抓走”低能级的前排座位上的电子，使得那里出现空位。但是，这些化学物质却无法增加楼上座位的电子。当前排座位中的一个电子移至旁边的空位时，就会留下一个新的空位，这个空位（又称空穴）可以在前排区域移动，从而产生电流。第一种类型的不纯净半导体材料被称为“N型半导体材料”，因为这种材料中的自由电荷是带负电的电子［N是“负”（negative）的英文首字母］。而第二种类型的不纯净半导体材料被称为“P型半导体材料”，因为在这种材料中，前排座位中的空位相当于带正电的粒子［P是“正”（positive）的英文首字母］。如果把一个N型半导体和一个P型半导体放在一起，并用一个金属导线把N型半导体的侧边和P型半导体的侧边连接起来，就会得到一个二极管。

现在，我们把两个半导体放在一起。第一个半导体中有许多电子，

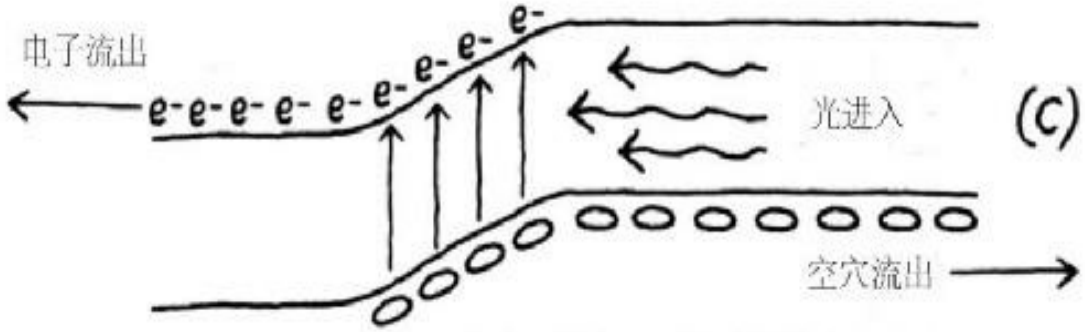
但没有前排的空位（N型半导体）；第二个半导体中有许多前排的空位，但楼上座位中却没有电子（P型半导体）。那么，其中一个半导体内楼上座位中多余的电子就会跑到另一个半导体的楼上座位去（这就相当于我们把许多人塞进一个拥挤的房间，只要房间门没锁，人们就会试图走出这个拥挤的房间，进入相邻的空房间）。在N型半导体材料中的多余电子进入P型半导体材料中的楼上区域的空位的过程中，这些电子会以光或者热的形式释放出能量。这种重新组合的过程大部分发生在P型半导体和N型半导体的交界处（被称为“PN结”）。但是，多余电子的转移和空穴被填补的过程会留下其他电荷。在这两种半导体材料中加入的杂质原子本身就具有一定的电荷（N型半导体中含有带正电的离子，P型半导体中含有带负电的离子），如果没有电子和空穴来平衡这些电荷，它们就会产生一个内部电场。由于这个内部电场的存在，使得二极管是一种非常灵活的元件——电流很难沿着内部电场逆向流动（即使楼上区域有足够多的空位），但一旦导线的两极互换，电流就能非常轻松地沿着电场的方向通过（见图6–2）。

我们可以用光线来照射半导体材料[15]。如果光线的能量被吸收了（也就是说，光线的能量至少超过了前排座位的最高一排和楼上座位的最低一排的能量差），半导体材料中就会产生自由电子和空穴。此时，这些电荷受到内部电场的作用，电子和空穴分别向两个不同的方向移动，电子移动到N型半导体材料的一侧，空穴则移动到P型半导体材料的另一侧。随着越来越多的光线被半导体材料吸收，会有越来越多的电荷分别向相反的两个方向移动，从而在PN结产生电流。也就是说，仅用光线照射半导体材料，就可以在PN结产生电流。这种装置叫作太阳能电池，这是一种把光线中的能量直接转化成电流的过程，无须在磁场中转动线圈。这种元件也可以被称为光电二极管，数码相机就是通过光电二极管把像素点吸收的光子转化成电荷的。





发光二极管



光电二极管，又称太阳能电池

图**6–2**

如果我们把N型半导体材料一侧的电子和P型半导体材料一侧的空穴强行放到一起，电子和空穴就会在PN结相遇。当它们相遇的时候，电子会再次进入前排座位中的空穴，并以光的形式释放出能量。这种元件就是一个发光二极管（LED）[16]，从本质上看，发光二极管与太阳能电池反向。也就是说，在太阳能电池中，电池吸收光线而产生电流；而在发光二极管中，我们输入电流来产生光。因此，发光二极管和太阳能电池事实上是同样的元件，只不过它们的工作原理恰好相反。

在白炽灯泡中，电流通过一小段导线，使灯泡发光。在这个过程中，电流的动能转移到导线上，使导线呈现白热状态。就像烤面包机中的电热丝一样，电流中的很大一部分能量转化成导线中的热，而只有较小一部分能量转化成光。LED灯在发光的过程中只会产生很少的热量，电流中的能量直接转化成光线，因此LED灯在能量的使用效率方面要比白炽灯泡高[10]。

要想把发光二极管变成半导体激光装置[17]，就必须延迟电子和空穴在PN结重新结合的过程。然后，我们让一个能量合适的光子触发电子和空穴的重新结合过程，就会产生第二个光子。这两个光子的相位是完全一样的，也就是说，它们的电场和磁场的振荡完全同步。于是，第二个光子会触发下一个进入PN结的电子和下一个进入PN结的空穴结合，再次产生光子。有些光线沿着与PN结平行的方向运动，这些光线既不会穿过N型半导体材料层，也不会穿过P型半导体材料层。在这个区域中，光线的自主射出是缓慢的。为了加速光线的射出，PN结的边缘被打磨得如同镜子一般，这样一来，光线就可以来回反射，不断触发进入PN结的电子和空穴的结合，并发射出与反射光线相位相同的光子。在PN结被打磨过的一条侧边上有一个小孔，小孔中装有一个聚焦透镜，光线可以通过这个透镜从PN结射出，它们都有相同的波长和相位。并且，这些光线全部沿着相同的方向传播[11]，因此这束光线被称为“激光”。激光的英文“laser”正是light amplification by stimulated emission of radiation（受激发而辐射出的放大的光）的首字母缩写。

激光指示器中装有一个小型电池，它能提供一个电压，迫使电子和空穴沿着与PN结内部电场相反的方向运动，从而产生激光。人类发明的第一个半导体激光二极管[18]发射的光线位于光谱的红外线波段，这种光线对于做商业报告没有什么用，但是对CD（光盘）播放器却很有用。之后，材料研究和制造方面的发展让我们进一步发明了能发射可见

红光的半导体激光元件，这种元件被用于DVD播放器中。此后，我们又发明了能发出绿光的半导体激光设备。最终，我们发明了能发出蓝紫光的半导体激光设备，这种元件被用于蓝光播放器。这些半导体激光元件既可靠又便宜，最重要的是便宜。用于读取条形码的激光扫描仪会向条形码的黑白条纹发出一个激光束，并测量白色区域反射回来的光线。这就产生了一个由不同强度的光线（高和低）组成的序列，我们可以用这个序列来对信息编码，就像你的信用卡磁条能够通过磁场区域的排列来对信息编码一样。智能手机上的二维码运用的也是同样的原理，但二维码包含的信息量是条形码的100倍以上。这是因为二维码中包含的是二维的黑白区域，而条形码中只有一维的黑白区域。

> 你的商业报告开始了。你首先感谢所有听众花时间来听你的报告，但你的邀请者提醒你坐在后排的观众很难听清你的声音，很快就有人递给你一个可以别在衣服上的小型话筒，同时扬声器系统也被打开了。你将这个小型话筒别在自己的衬衣上，并确认音量适中。然后，你继续做你的商业报告。

话筒可以把声波转化为电压，在这个过程中，声波的音量变化和波长变化被编码成信息，并保存在电压的变化中。然后，我们可以对这些电压进行放大，再传送至扬声器。最终，原始声音的音量就被大大提高了。这种把空气压力的变化转化成电压变化的技术，不仅带来了电话、广播、录音等领域的技术革新，还改变了流行音乐的风格。

固网电话使用的早期话筒设备运用了煤烟的电学性质[19]。这种早期的话筒设备包含一个圆柱形的筒，圆筒中装有随机排列的无定形碳的小颗粒，圆筒的顶盖与一层织物制成的膜相连。当你对着电话的接收器说话时，你的声音会使空气压力发生变化，从而使膜发生振动。如果你的声调较高，这层膜就会以较快的速度振动；如果你的声调较低，这层膜就会以较慢的速度振动。膜向下振动的时候会挤压圆筒中的碳颗粒，而膜向上振动的时候，碳颗粒受到的压力就会被释放。碳颗粒之间的相互作用力会视圆筒所受压力的不同而变化。这些碳颗粒是电的良导体，虽然碳颗粒的导电性能不如金属，但比绝缘体强很多。而且，当我们对一个装满碳颗粒的圆筒施加电压的时候，这个圆筒的导电性对碳颗粒的平均间距将表现得非常敏感。如果两个碳颗粒不发生接触，电流就不能通过这两个碳颗粒。而且，被紧紧压在一起的碳颗粒的电阻会比刚挨到一起的碳颗粒的电阻低很多。当你对着话筒说话的时候，你的声音会使空

气压力发生变化，圆筒中所有碳颗粒的总电阻也会非常精确地根据空气压力的变化而变化。因此，通过这个装满碳颗粒的圆筒的电流，也会随着你的声音变化而不断地变化。这个信号可以被转化成一个电压，从而精确地表现你发出的声波。

然而，虽然这种设备对于传递语音来说是可以的，但是这种碳颗粒话筒对声音频率的保真度并不高。碳颗粒的任何移动和沉淀都会导致电流发生随机变化，因此当你使用这种类型的话筒时，会听到“沙沙沙”的杂音。于是，在20世纪二三十年代，人们发明了另一种以电容器为基础的话筒。这种新型话筒的出现，成就了流行音乐歌手的一种新的演唱风格。对于老一代音乐人而言，演唱成功的关键在于听众能否听清歌手的演唱（在以碳颗粒为基础的话筒出现之前，歌手会使用扬声器来确保礼堂的后排观众能够听到演唱）。有了以电容器为基础的话筒以后，歌手可以和话筒离得更近，并通过轻声吟唱的方式产生一种更亲和的歌声。

当声波传入电容式话筒[20]时，膜会发生振动，这层膜也是电容器中的一层板。这种设备储存电荷的能力对两层平行板之间的距离高度敏感。当这层膜由于空气压力的变化而振动时，两层平行板之间的距离就会增加或者减少。若电容器中储存的电荷数量不变，两层平行板之间距离的变化会使电容器的电压产生变化，这种变化虽然很小，却是可以度量的。电容器可以快速地充电和放电，因此一个设计巧妙的电路可以快速、精确地追踪电容器中两层平行板之间的距离变化，并且可以覆盖非常宽的频率。这种电容式话筒的敏感度很高，能够精确地探测到振幅很小的声波，因为哪怕空气压力发生很小的变化，也能够使电容器中的电压产生较大的变化。有了电容式话筒，歌手们无须再为了让观众听见自己的声音而大喊。平·克劳斯贝和弗兰克·辛纳屈等流行音乐巨匠，都应该感谢应用物理学领域的进步成就了他们的事业。

早期的无线电台会使用一种名为“铝带式话筒”的设备[21]。这种“铝带式话筒”中有一个薄金属条，这个薄金属条在一个永磁体所产生的磁场中运动。“铝带式话筒”背后的物理学原理和传统扬声器十分相似，只不过它涉及的物理过程与传统扬声器的方向恰恰相反，并且它使用一个薄金属条来代替线圈。当穿过薄金属条的磁通量发生变化的时候，金属条的边缘就会产生感应电流（在这个设备中，金属条的作用相当于一个线圈。根据电磁感应原理，当穿过线圈的磁通量发生变化的时候，线圈中就会产生一个感应电流）。当声波发生变化的时候，穿过金属条的磁通量也会在时间和大小上发生变化，声波的变化会被转化成金属条中变化

的电流。由于这种铝带式话筒所能覆盖的频率很广，人类声音的任何变化都能被精确地探测到。

如果想把话筒别在西服领子上，或者内置于移动电话等以电池为电源的电子设备中，我们就必须设计出一种耗能较少的话筒。“驻极体话筒”[22]（electret microphone，其中electret是由“电”“磁”的英文单词组成的混合词）从本质上看就是一个电容式话筒，只不过电容器的其中一层板是“驻极体”。“驻极体”又叫“永电体”，它相当于永磁体的电学版本，驻极体携带永恒的电荷。像铁这样的永磁体是由许多铁原子组成的，每个铁原子都相当于一个小磁体。在永磁体中，每一个铁原子都有S极和N极两个磁极。当大部分原子的磁场都指向相同的方向时，这块实心的铁就会产生一个较大的净磁场。驻极体（永电体）的原理和永磁体相似，只不过驻极体中是电偶极子（距离较近的一对正电荷和负电荷），而不是磁偶极子。石英（二氧化硅的晶体形式）就是一种驻极体，许多长链的碳聚合物分子都是驻极体。

在一台电容式话筒中加入驻极体材料，有以下三个主要优势：第一，驻极体材料非常便宜；第二，驻极体材料能永远保持极化状态，因此，如果电容器中的一层板是由驻极体材料制成的，就不需要靠外部电源来保持电容器的电压；第三，驻极体材料真的非常便宜！当我们用驻极体材料来制造电容器的一层板时，这层板就有了电荷，我们也无须再给这层板充电。以上三个优势中的第一个和最后一个显然非常重要，因为我们要得到的是一种大规模生产的消费型电子产品。虽然这种驻极体话筒的频率保真度远不如体积更大的电容式话筒或铝带式话筒，但它体积小、质量轻，价格也非常低廉。因为驻极体话筒具有上述优势，所以你拥有的几乎所有便携式电子设备，比如智能手机或者有噪声消除功能的耳机，都配有一个驻极体话筒。

你开始做你的商业报告：“感谢大家来听我的报告。我们都知道，每个人都喜欢手持式个人电子设备，但有些人却非常担心这些设备是否安全。比如，每个人都希望自己的移动电话信号更好，但大家又对接近移动电话基站感到分外紧张（担心辐射问题）。今天我做报告的主要目的是给大家介绍关于辐射的知识。了解了这些知识以后，我们就能帮助客户更加理性地做出与辐射有关的决策。

事实上，对于物理学家来说，任何形式的能量发射都叫“辐射”，不

管是声波、电磁波，还是从原子核中发射而出的高速亚原子颗粒（比如电子、质子、中子或者这些粒子的结合）。今天早晨，你之所以可以一边准备早餐一边听音乐，就是因为扬声器发出的音乐声波“辐射”到你家的各个角落，不管你身处你家的什么地方，都可以听到这些声波。当你通过智能平板电脑查询航班信息的时候，查询结果是通过无线网路由器获得的，无线网路由器“辐射”出位于光谱的无线电波频段的电磁波。当你的脚踝接受X射线检查的时候，你的脚踝就受到了X射线的辐射。你在机场过安检时，你的行李接受了爆炸物痕量检测仪的特别检查。在这个过程中，爆炸物痕量检测仪通过核辐射来让分子带上电荷，再让离子迁移率光谱仪来检测离子的速度。辐射可能是有害的，也可能是有益的，也可能既无害也无益。这里的关键问题并不在于辐射本身，而在于辐射究竟对分子产生了什么样的影响。如果辐射移除了分子中的一个或多个电子，让分子变成带正电的离子，这种辐射就被称为“电离辐射”。一般来说，任何能量等于或小于可见光能量的辐射都不能产生电离辐射效果，这是一条普遍适用的规律。

在任何分子中，原子都是靠化学键结合在一起的。让一个化学键断裂所需的能量大约是若干电子伏特[12]。[23]当然，有些化学键的强度较小，只需要很少的能量就能让这样的化学键断裂；而有些化学键的强度很大，必须要许多电子伏特的能量才能使它断开。但是，如果你说“让一个化学键断裂需要消耗若干电子伏特的能量”，这样的说法通常不会和事实相差太远。化学键涉及相邻两个原子中的电子之间的相互作用，如果某种辐射的能量足够强，强到能够移除一个电子，化学键就会断裂。一个无线电波光子的能量大约是一个电子伏特的十亿分之一，微波的能量大约是一个电子伏特的百万分之一，红外线光子的能量则是一个电子伏特的百分之一到十分之一。因此，任何处在电磁波谱的以上频段的电磁波辐射都不会产生电离辐射的效果。可见光光子的能量大约为2~4个电子伏特，具体的能量范围视可见光颜色的不同而不同。一个紫外线光子的能量大约为10~100个电子伏特，X射线的能量大约为1 000个电子伏特。在电磁波谱中，能量最高的是“伽马射线”，它的能量大约是1 000 000个电子伏特。由此我们知道，X射线、伽马射线以及某些紫外线的辐射处于电离辐射的范围内。比伽马射线能量更高的是从原子核中发射出的高速粒子，这些粒子的能量通常为5 000 000~10 000 000个电子伏特，几乎肯定处于电离辐射的范围内。

突然，会议室中有一位听众打断了你的话，他说：“请等一

下，微波炉只是用微波来快速加热食品，但为什么有人说在使用微波炉的时候，我们正在对食物进行‘核处理’呢？微波炉不是和核辐射没有任何关系吗？”你一边点头认可这是一个很棒的问题，一边回答道：“微波炉是由科学家和工程师发明创造出来的。对于科学家和工程师而言，‘辐射’一词可以形容任何类型的能量，从原子核中射出的高速粒子，以及一根蜡烛或一个白炽灯泡发出的可见光，都可以被称为‘辐射’。微波炉中使用的电磁波[24]是由一个和无线电发射器非常相似的设备发出的。微波炉中的微波能让极性分子（比如食物中的水分子）高速振动，这是因为它们和微波中的电场发生了相互作用，就像指南针的指针能够在外部磁场的作用下指向任何方向一样。微波中电场的振荡频率是每秒钟数十亿次，水分子就以这样的频率振动，并将动能传递给食物中的其他分子。微波和无线电波能够轻松地穿过实心物体（即使我们身处建筑物中，也能够接收到无线广播电台的信号，或者移动电话的信号），因此微波能够穿透食物，使食物的所有部分同时被加热。如果我们用传统的炉子加热食物，加热的过程就只能从食物的外部开始，然后慢慢地到达食物内部。所以，微波炉加热食物所用的时间比传统炉子短得多。‘对食物进行核处理’这样的说法虽然很流行，但微波炉和核物理没有任何关系。”

要理解原子核为什么有辐射性，我们必须先了解为什么原子核中的各种粒子能够紧挨在一起而不分开。在所有原子的中心都有一个被称为原子核的结构，原子核中有一定数量的质子和中子，质子和中子被压缩在一个非常小的空间内。所有的质子都带一个单位的正电荷，中子则不带任何电荷。带正电的质子互相排斥，质子本应该在这种排斥力的作用下离开原子核。但幸运的是，原子核中还存在一种比质子之间的排斥力更强的作用力，这种作用力使得原子核中的各种粒子能够紧挨在一起而不分开。这种作用力被称为“强相互作用力”[25]，虽然这种强相互作用力比质子之间的排斥力强100倍左右，但它只能在极短的距离（大约是中子的直径这么长的距离）内起作用。强相互作用力的作用距离很短，这对我们来说是一件幸运的事情。原因在于，如果强相互作用力能够长距离起作用，它就会把所有原子的原子核都聚拢到一起，形成一个由质子和中子组成的巨大球体。也就是说，如果强相互作用力太弱，所有原子核都会因为质子之间的排斥力而灰飞烟灭；反之，如果强相互作用力太强，所有原子核就会被聚拢到一起，变成一个巨大的球体。

原子核越大（原子核中含有的质子和中子的数量越多），就越难把原子核中的这些粒子聚拢在一起。把质子和中子聚拢在一起要靠强相互作用力，但很难做到让质子之间的排斥力和只能短距离作用的强相互作用力相平衡。事实上，许多原子核确实会部分或完全地分崩离析，或者形成一种更加稳定的构型[13]。在这个过程中就会产生辐射。因此，我们说这种原子核“具有辐射性”。

一旦原子核形成一种能量更低的稳定构型，原子核通常就不再具有放射性。然而，一立方英寸的铀元素中含有约10^{24}个原子，在任何时刻，总会有一部分原子在产生辐射。那么，不稳定的同位素究竟会在何时发出辐射呢？同位素产生辐射的时间点是随机的，同位素既可能立即产生辐射，也可能要等很久才会产生辐射。这个过程有点儿像我们掷色子。我们有可能第一次就掷出六点，也有可能掷许多次才能得到六点。平均来说，我们需要等待一段时间，材料中才能有一半的原子核产生辐射，这段时间就叫作这种材料的“半衰期”。一般来说，原子核衰变得越快，这种材料的半衰期就越短，这种材料耗尽所有放射性同位素、失去产生辐射的能力所需要的时间也就越短。

要让原子核中的质子待在原子核中并挨在一起需要很高的能量。因此，当一个不稳定的原子核衰变至能量较低的状态时，这一过程以辐射形式释放的能量也是非常巨大的。其中，主要的辐射形式[26]有以下几种：两个质子和两个中子紧紧地挨在一起（被称为阿尔法粒子）；高速的电子（被称为贝塔粒子）；伽马射线和X射线等电磁波。20世纪初，科学家发现了上述几种射线，并为这几种射线分别起了名字。但当时，科学家们还未能很好地理解原子的结构和性质。

不管是带正电的阿尔法粒子射线、带负电的贝塔粒子射线，还是伽马射线，当这些射线打到其他物质上时，都很容易失去部分动能，并将目标原子中的部分电子激发出来。然后，这些射线会继续高速前进，随时准备使它们击中的原子发生电离反应。有些机场安检处使用的爆炸物痕量检测仪用镍来产生贝塔粒子；另一些则使用一种更重的元素——镅来产生阿尔法粒子，阿尔法粒子能使待检测的分子发生电离反应，以便进行后续的离子迁移率光谱测定。

虽然人体细胞中天然存在一定数量的离子，但如果离子浓度过高就会导致基因受损。因此，过高剂量的电离辐射可能导致人体患上严重疾病甚至死亡。但是，如果受电离辐射的细胞本身已经死亡，那么接受电

离辐射并不会产生进一步的损伤。我们在市场上买到的肉和蔬菜中的细胞已经死亡，电离辐射对它们而言不但没有害处，还能杀死残存的细菌。要想杀灭沙门氏菌以及其他致病细菌，方法之一就是让食物接受电离辐射[27]（比如伽马射线、X射线或者贝塔粒子射线）。这种方法可以杀灭食物中的致病细菌，但和用辐射烹调食物不同的是，在杀灭细菌的过程中电离辐射并不会提高食物的温度。接受过电离辐射处理的食物被称为“辐照食物”。虽然电离辐射会对细胞造成一定的损伤，但这一过程并不会产生新的、不稳定的放射性原子核，因此经过辐射杀菌的食物并不具有放射性[28]。然而，不幸的是，普通民众常常将“具有放射性”和“接受过辐射”混为一谈，导致“放射”“辐射”等词语带上了强烈的负面感情色彩。这方面的误解导致许多人会极力躲避一切与原子核衰变有关的过程，即使这些过程可以预防疾病和减少死亡。

[1] 当然，在使硅的一侧变成电的良导体的同时，硅的另一侧的导电性也变差了。但是，当我们试图让电流通过某种材料的时候，电流会选择最容易通过的路径（即电阻最小的路径）。因此，当我们对底部的金属板施加电压的时候，我们会看到通过硅的电流增强了。

[2] USB是“通用串行总线”（universal serial bus）的缩写，所谓“通用串行总线”，是指插入你的笔记本电脑或者平板电脑的那个薄薄的长方形部分。USB接口是计算机行业中一种通用的标准接口设计，这种通用标准使得不同的设备都可以与同一种类型的电缆连接。

[3] 这些电荷通过量子力学中的“隧穿”过程进入绝缘层中的金属板。（Robert Eisberg and Robert Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*, 2nded. (John Wiley & Sons, 1985), 205–209.）

[4] 很多计算机硬盘仍在使用这一方法。

[5] 为了简化这个例子，我们在此只讨论黑白复印的情况。

[6] 引用戴维·欧文在1986年的一篇文章中的描述（DavidOwen, “Copies in Seconds,”*The Atlantic Monthly*, February1986.），复印机是“极为复杂精致的工程技术造就的一个奇迹。复印机就像邮局，它的工作效果比任何人想象的还要高”。

[7] 用准确的术语来说，这里的“金字塔”指的是“四面体”。

[8] 真正具有“独特”结构的晶体种类却非常少。

[9] 由于液晶显示屏发出的光是偏振光，如果你戴上一副偏振光太阳镜来看液晶显示屏，你就会看到屏幕上出现干涉条纹。

[10] 一个发光二极管发射出的所有光线都具有相同的能量（也就是说波长相同），这个能量是由楼上座位的最低一排和前排座位的最高一排的能量差决定的。因此，要想让LED灯发出白色的光，就需要用到多种不同的发光二极管。每种发光二极管会发出不同颜色的光线，当这些光线聚合在一起时，我们就会看到LED灯发出白光。

[11] 激光从光源处发射出来以后的散射幅度非常小，因此，光束到达屏幕之前，几乎是不可见的。当光束射到屏幕上时，因为屏幕表面有些凹凸不平，因此光束会向各个方向发生散射，所以我们才能够看到激光。要想看到从激光指示器到屏幕之间的光束，必须有一些小粒子来散射光束，让它进入你的视野。比如在教室中，我们可以把两块黑板擦互相拍打，制造出一团粉笔灰，或者使用一根点燃的香烟所产生的烟雾来散射光束。可是，在今天的美国，不管是用于擦除粉笔痕迹的黑板擦，还是香烟，都已经被禁止出现在教室或者会议室中了。

[12] 电子伏特是物理学家使用的一种能量单位。当一个电子被一伏特的电压差加速的时候，电子所获得的动能就等于一个“电子伏特”。

[13] 在物理学中，如果我们说质子和中子在原子核中的某种构型是“稳定”的，我们的意思就是这种构型比原始构型的能量更低。只要受力平衡，一块巨石也可以永远地待在山顶上。但很显然，和巨石在山顶上的状态相比，巨石在山脚下的状态更加“稳定”。如果原子核从一种能量较高的构型转化为一种能量较低、更稳定的构型，它就必须以某种形式释放出这两种状态之间的能量差。通常，这种能量差会以辐射的形式释放出来。



第7章
留宿酒店

做完商业报告后，你在办公室里见了几个人，回答了一些细节问题。然后，他们带你去一家不错的本地餐馆吃晚饭，喝的葡萄酒口味尤其醇香。吃完甜点，这几个人步行送你到酒店。酒店的位置非常方便，离餐馆只有几个街区的距离。在你做商业报告的时候，由于精神集中，你暂时忘记了脚踝的疼痛，但现在一阵阵的痛感再次向你袭来。此刻你只想赶紧回到酒店房间，躺在床上，结束这忙碌的一天。你向酒店前台的服务人员出示了自己的信用卡和驾驶执照，对方拿出一份登记表要求你签名。你看了一眼手腕上的健康监控手环，手环屏幕显示，虽然你今天大部分时间都在飞机、火车、汽车上，但你仍然完成了今天的目标步数。在登记表上签完名后，服务员把房间钥匙交给你：一张白色的卡片，卡片的大小和信用卡差不多。这张卡片被装在一个卡套里，上面写着你的房间号码。你走进电梯，不一会儿电梯就将你带到了你的房间所在的楼层。

每走一步，你就在一维或者二维空间中发生了移动（当你沿直线行走时，就是在一维空间中移动；当你在拐角处转弯的时候，就是在二维空间中移动），也可能是在三维空间中移动（当你在螺旋楼梯上行走时，你就是在三维空间中移动）。你走的每一步都包含动作的开始和停止，速度的任何变化都可以用“加速度”这个物理量来度量（“加速度”被定义为单位时间内速度的变化，这种变化既指速度的增加，也指速度的下降）。健康监控手环的工作原理是随时监控你在三维空间中加速度的变化，如果它超过某些预设的数值，健康监控手环就认为你又走了一步，并在计步器记录的数字上加上1。

即使你是以平稳、均匀的速度行走，你也每时每刻都在加速。当你的脚踏上地面的时候，就会对地面施加一个力，地面也会对你的脚施加一个反作用力，从而推动你前进。你的脚从静止状态开始，首先抬起离开地面，然后向前迈步。当你迈出一步之后，你的脚再次回到地面，你的速度降为零，与此同时你也做好了迈出下一步的准备。从数学上看，牛顿第二定律可以表示为：力等于物体的质量乘以加速度。因此，任何运动或者加速度（不管是速度的增加，还是速度的减少，或者仅仅是方向的改变）都需要力的作用。健康监控手环通过一个加速度计来测量你行走时所涉及的那些力，这中间运用了简谐振子的性质[1]。

在这本书描写我的一天如何开始的时候，我们讨论过闹钟和数字计

时器的原理。当时我提到了挂在弹簧一端的重物的振荡问题，以及摆锤来回振荡的问题。这些振子都有一个固有的天然频率，这个天然频率是由系统中各部分的性质决定的（比如重物的质量、弹簧的弹性系数、弹簧的长度等）。但是，如果我们对振子突然施加一个短暂的力，就会改变其振荡频率，任何在操场上推过别人荡秋千的人都见证过这种情况。健康监控手环用一个迷你的悬臂代替振荡的摆球或者挂在弹簧一端的重物。这个悬臂的形状就像一个小型跳水跳板，悬臂大概是500微米长、50微米厚（人的一根头发的平均直径大约是100微米）。如果佩戴者的运动状态突然改变，悬臂就会发生振动。

在悬臂的上下各装配一层电容极板，当悬臂在外力的作用下上下振动时，这种机械振动会被电容器探测到，并被转化成一个电子信号。这个“迷你跳水板”的上下两侧各有一层金属板，在这个“迷你跳水板”的上方和下方又各有一层无弹性的金属板，因此，这个“迷你跳水板”分别属于两个电容器的一部分。当跳水板向下运动的时候，跳水板与下方金属板之间的距离会减小，而与上方金属板之间的距离会加大。电容器上的电压对金属板之间的距离非常敏感，即使跳水板的位置变化只相当于单个血液细胞的大小，电容器也能够探测到这种位置变化。在“迷你跳水板”的上下各有一个绝缘的保险层，这可以确保它在剧烈运动时不会撞到上方或下方的金属板。

在你佩戴的健康监控手环中，一共有三个这样的加速度计，这样的系统可以监测你在三维空间中的运动情况。精细的工艺和半导体方面的技术进步，使得我们可以把这三个加速度计都安装在一个硅芯片上，这个硅芯片连接着微电路[1]。除了使用上面的测量方法，我们还可以让“迷你跳水板”的一端直接与探测器连接（在较大型的设备中，我们可以让挂在弹簧一端的重物直接和探测器连接）。在这种设计中，弹力金属板所受的力越大，对探测器产生的压力也就越大。探测器可以用一种压电材料或者压阻晶体（一种受到压力时电阻会发生改变的材料）制成。

因此，这个加速度计输出的是一种随时间和探测器的运动状况而改变的电压信号。接着，健康监测手环必须通过某种计算机算法来处理这些信号，并把这种信号转化成你行走的步数。其中，计算机算法属于生产销售这类健康监控手环的各家公司的专利。在这些计算机算法的帮助下，你的健康监控手环可以记录并算出你行走的步数、消耗的卡路里数量以及心率。不过，要得到心率数据，还要使用发光二极管。

为了记录你的心率[2]，健康监控手环中的一个发光二极管向你的手

腕发射光线，再用一个光电探测器（一种半导体，其电阻对光照强度非常敏感）来测量有多少光线被反射回来。在这个过程中，该设备会用到不同波长的可见光，它们可以不同程度地穿透皮肤。因此，光电探测器接收到的反射光会因为你皮下组织的变化而变化，皮下组织的变化能反映出你血管中血流的周期性变化。通过将光电探测器输出的电压和加速度计输出的电压相关联，我们可以筛出测量信号中的某些（但并不是全部）噪声。血管以外的组织（比如骨骼、筋腱以及手腕上的文身）也会反射光线，并对我们想要收集的信息造成干扰。事实上，手腕并不是佩戴心率监测仪的最佳部位，理想的部位是指尖或耳垂，因为在这些地方不仅皮肤较薄，而且起阻碍作用的组织也较少。正因为如此，当你到医生处就诊时，医生会把心率监测仪夹在你的指尖，但这种夹在指尖上的心率监测仪和佩戴在手腕上的健康监控手环背后的物理学原理完全一样。为了把机械运动转化成数字信号，需要用到多种技术。因此，虽然这些设备只在监测你的身体健康状况方面迈出了一小步，但它们的发明却是科技方面迈出的一大步。

电梯到了你的房间所在的楼层，因为电梯轿厢突然减速，所以你的身体轻微地振动了一下。走出电梯后，你查看墙上的指示，然后沿着长长的走廊走向你的房间。一开始，走廊是黑暗的，走廊顶部的灯都关着，以至于很难看清门牌号码。向前走了几步以后，运动传感器探测到你的到来，于是自动打开了走廊的灯。

大部分运动传感器实际上都是一种红外线夜视仪，通过探测你身体发出的红外线[3]，它们能把这些电磁波辐射转化成电信号。你的身体发出红外线的原理，与你今天早上烤面包圈时用到的烤面包机的电热丝发出红光的原理一样，即变化的电流会产生变化的磁场，变化的磁场又会产生感应电流。运动传感器通过其内部的一个探测器发现你发出的红外线，这与我们做超声波检查时用到的成像棒的工作原理类似。

我们先来考虑红外线的光源，也就是你。你的身体是由大量不断运动的原子构成的。在这里，我所说的运动不是指血液的流动或者其他大幅度的运动，而是指你的细胞分子中的原子在它们所在的位置附近发生的振动。

假设有一个有机分子，它包括一些碳原子环，还包括氢原子、氮原子和氧原子。如果将这样一个有机分子与宇宙的其他部分隔离开，任其

在外太空飘浮，那么这个分子最终会形式一种能量最低的构型。除了因量子力学效应而产生的轻微振动以外[2]，这个分子几乎是静止的。而如果我们把同一个有机分子放在一壶热水中，具有较高动能的水分子就会不断地撞击这个有机分子，并将一部分动能传递给它。最终，这个有机分子会和周围的水分子具有相同的能量，不会再发生进一步的能量转移了。但是，由于这个有机分子处于一种能量较高的状态，所以这些能量会传递到构成这个分子的所有原子中去。分子中的每一个原子都具有一定的动能，但这些原子又受到化学键的束缚而无法离开这个有机分子。于是，这种动能就表现为原子在它们所处的位置周围振动。当原子振动时，原子中的电子也在振动。

在上面的比喻中，有机分子代表的是你身体中的所有分子，热水代表的则是你的身体。你所摄入的食品中包含多种多样的分子，这些分子中储存着一些化学势能。通过一系列的化学反应，这些化学势能会被转化成其他分子的动能，这些能量又被用于激活你体内的各种化学过程和生物过程。在你每日摄入的能量中，约有一半能量被用于大幅度的运动[4]（比如行走、跑步、做早餐、过安检等），另一半能量则被用于维持你的生命（即使你一动不动地躺在床上，你也需要用这部分能量来保持心脏跳动、肺呼吸以及正常体温）。温度反映的是一个物体中每个原子的平均能量，当你阅读我写下的这句话时，你身体中的所有原子都具有一定的平均动能。这种平均动能可以用温度来描述，也就是你的体温——37摄氏度。与此同时，那些在原子中振动的电子会发出光线，这些光线位于电磁波谱的红外线频段。我们身体所具有的体温使我们每个人都成为一盏不断发出红外线的100瓦灯泡。

酒店走廊中的运动传感器通过一个名为“热电探测器”的半导体设备[5]来探测你身体发出的红外线。热电探测器的功能是把热转化成电压。这类热电设备和前文提过的压电设备具有一定的相似之处。压电设备在计算机的计时功能中发挥了重要作用，在超声波扫描仪中也发挥了重要作用。在压电设备中，当晶体所受的压力发生改变时，晶格结构就会发生电极化，从而产生一个穿过压电材料的静电场（相当于一个电压）。而在热电设备中，当材料吸收热量以后，传感器晶体结构中的原子就会以更快的速度振动。由于化学键的非谐效应以及固体中原子的独特排列方式，晶格就会扭曲，进而发生净电极化，产生一个电压。

要想让热电晶体材料受热而发生上述过程，我们并不一定要让热电晶体材料靠近明火。当某个附近的热源（比如你的身体）发出的红外线

射到热电晶体材料上时，热电晶体材料也会产生一个电压。在酒店中，大部分走廊和房间的温度大约是21摄氏度，而你皮肤表面的温度大约比周围环境的温度高出11摄氏度。因此，你发出的红外线的能量高于周围环境的能量[3]。但是，如果夏天酒店的空调发生故障而停止工作，走廊中的温度上升，这些运动传感器还能正常工作吗？大部分运动传感器中都有两个探测器，这两个探测器的方向正好相反。第一个探测器吸收热以后会产生一个正电压差，从而产生沿某一方向的电流；第二个探测器则会产生一个负电压差，从而产生沿相反方向的电流。这两个探测器被连接在一起，即使走廊中的温度上升，只要额外的热是均匀分布的，传感器也不会发出信号。而一个人是一种局部化的热源，对大部分运动传感器而言，只有当热源的轮廓发生改变时，电路才会探测到这种变化，并产生电压，从而自动打开走廊的灯。当你沿着走廊往前走时，就会发生上述变化。

以上这种运动传感器被称为“被动”的运动传感器，因为这类设备仅探测外界热源（比如你的身体）所发出的红外线。所以，这种类型的运动传感器所需要的能量较少。除了被动的运动传感器以外，还有一种“主动”的运动传感器6。这类设备会发射出微波，并探测反射回来的微波信号是否发生改变。民用安全系统有时会用到一种更高级的运动传感系统，这种运动传感系统中既有被动的红外线探测器，也有主动的微波发射器。这种运动传感系统使用一些简单的计算机芯片，只在移动的物体体积超过特定数值的时候才会发出警报，这种设计可以防止宠物移动所引起的误报情况。

> 你在自己的房间门口停下脚步，但却找不到插房卡的地方。这是因为前台服务员给你的房卡是一张“近傍型卡”。在门把手的下方有一个圆垫，你拿门卡轻触这块圆垫，LED灯发出红光，这表示你不能进入这个房间。你又试了一次，仍然得到红光信号。难道你只能回到大堂，让前台的服务人员对你的门卡进行重置吗？你不禁感到崩溃。好在你再次确认了一下房间号码，发现原来自己不小心走错门了。你应该沿着走廊再往前走过两间房，才能到达你的房间。走到正确的房间门口后，你重复了上述过程，并看到LED灯发出绿光。你听到门锁打开的声音，现在你终于可以进房间休息了。

被用作酒店房间钥匙的“近傍型卡”和公共交通系统发行的可反复充值的交通卡，从本质上看都相当于你的车辆所使用的快易通系统，只不

过这些设备被缩小成一张信用卡的大小。在这漫长的一天中，我们多次接触过被动门禁系统的基本原理[7]。事实上，这个系统的原理和电动牙刷的充电原理一样：一个线圈中先产生一个变化的电流，这个变化的电流产生一个振荡的感应磁场，磁场穿过第二个线圈又产生一个变化的感应电流。酒店使用的近傍型卡就是这样工作的：酒店房门门把下方的读卡器中有一个线圈，这个线圈与电源相连。你是否注意到，在酒店房门或者火车站入口的闸门处，读卡器一般都是凸起的圆形或者方形？原因在于，这样的设计能够较好地在其内部放置一个起无线电天线作用的大线圈。第二个线圈位于门卡之中，沿着门卡的四边放置。在门卡中不仅有线圈，还有电容器，其功能相当于无线电接收天线，但该天线只接收一个“频道”的信号，是由门上的读卡器发出的。门上的读卡器会发射出一个低频的无线电波信号，这个信号能在门卡的线圈里产生感应电流。在门卡中还装有一个微电脑芯片，门卡线圈中产生的电流能够为这个微电脑芯片供电。这个芯片会向门卡中的线圈输送一个电子密码，接着门卡线圈会给读卡器线圈发送一条信息。从这个角度看，门卡和读卡器的工作方式与车辆使用的快易通系统确实非常相似[4]，只不过在门卡系统中，接收器和探测器之间的距离必须保持在几厘米之内；而当车辆经过收费站时，接收器和探测器之间的距离却可以有数米。在收到这个电子密码以后，读卡器的芯片会向“螺线管”（所谓“螺线管”，基本上就是一个电磁铁）发送一个电子信号。这个电磁铁会产生一个力去打开门锁，你就可以进入房间了。

和门卡不同的是，酒店房门上的读卡器可以识别多种密码。这个特点对于负责打扫房间的酒店工作人员而言十分方便，因为他们需要打开酒店的每个房间，但却不想随身携带数百张不同房间的门卡。每张门卡的数字密码都有一个有效期。在你退房以后，读卡器的密码就会改变，你的门卡就无法再打开房间的门了。

在使用这种被动式近傍型卡时，必须让门卡充分接近读卡器，读卡器发出的无线电波信号才能传递到门卡的线圈天线上。而主动式近傍型卡[8]则能够长距离地发射序列号和数字密码，这种类型的门卡常用于在停车场中自动扣费和打开安全门。由于主动式近傍型卡需要消耗更多的能量，这些卡中通常装有一个锂电池，因此这种门卡会比名片厚一些。

你打开旅行包取出各种物品，这没有花费你太多时间。接着，你快速地洗了个澡。酒店提供的浴袍松软舒适，你对此心生感激之

情。之后你拿出自己的平板电脑，连接上酒店的无线网络。你查看完电子邮箱，就拿起床头柜上的电视遥控器，打开了挂在墙上的电视。

要想制造出一台遥控器[9]，我们需要在遥控器中安装一个能发出红外线光束的发光二极管，并保证电视机中装有一个红外线探测器。与能发出可见光的发光二极管相比，能发出红外线的发光二极管制造起来更容易，造价也更低廉。此外，常用的半导体材料具有很强的吸收红外线的性能，这也为我们提供了很大的便利。遥控器中的发光二极管只能发出特定波长的红外线，电视机中装有一个过滤器，只有这种特定波长的红外线才能够通过过滤器到达探测器。这样一来，你就不用担心你的身体发射的红外线会切换电视频道了。

当你按下遥控器的某个按钮时，你实际上按动了这个按钮下面的一个开关，电路板上的某个印刷电路由此闭合。在一块印刷电路板上，薄薄的绝缘板的一面布有各种金属导线。遥控器的每个橡胶按钮底部都有一个金属盘，当你按下某个按钮的时候，按钮底部的金属盘就与印刷电路板发生接触，使得某个电路闭合，然后就会有一个电流被输送至红外线发光二极管处。之后遥控器会发射出一系列表示开或关状态的红外线闪烁信号，其中包含了某些信息。

在电视机中装有一种半导体材料，这种材料在黑暗环境中的电阻非常高，但吸收光线时电阻就会变得非常低。电视机中的这种半导体材料能够接收遥控器发出的红外线信号。在黑暗环境中，由于这种半导体材料的电阻非常高，没有任何电流会通过这种材料。当遥控器发出的红外线发射到电视机中的半导体材料上时，电子便从低能级跃迁至高能级。此时电流通过半导体材料，电路处于闭合状态。遥控器所发射的这些表示开或关状态的红外线信号事实上在不断打开或关闭电视机中的电路，所生成的电流给电视机中的计算机芯片传递出表示开或关状态的信息。电视机中的计算机芯片能够解读电流信号中的编码信息，并做出相应的反应，即把必要的信号传输到电视机的其他电路中去，从而完成频道转换或者音量调节的功能。

量子力学理论带给我们的惊人结论之一，就是关于固体能带结构的预测[10]。在前文中我们曾用坐满的低能级前排座位和空的高能级楼上座位来比喻固体的能带结构。根据量子力学理论，一个原子中电子的能量只能是某些特定的数值，有电子的最高能级状态和没有电子的最低能级

状态之间存在一个能量差。许多原子挨在一起时，这些能量状态会被拉宽变成“能带”。在半导体和绝缘体中，低能带会被电子填满，而第一个（所有高能带中能量最低的那个）高能带则是空的。在金属中，低能带仅被电子部分填充（即使电子不移动至楼上座位区域，这些电子也仍然可以产生电流）。如果某种光线的能量没有达到前排座位和楼上座位之间的能量差，那么不管这种光线有多明亮，都不会被该材料吸收。这种能量不足的光线会完全穿过材料，就好像从未在材料中出现一样，这是物质的量子性质的一种直接体现。

红外线与热有关，因为大部分分子都能够轻松地吸收红外线，并将红外线中的能量转化成动能。事实上，我们对分子的大多数了解都来源于分子吸收红外线的量子力学特性[11]。根据量子力学理论，我们知道物质只有几种可能的能量状态，据此我们可以在固体中划分出有电子和没有电子的能带，这种划分方法对于分子也成立。让我们考虑一个非常简单的分子，比如由两个氢原子组成的氢分子（H_2）。这个氢分子可以从一个地方移动到另一个地方，量子力学并不会对这个氢分子的能量设置任何限制条件，因为这个氢分子存在于自由空间。但是，这个氢分子还可以通过另一种方式运动。氢分子可以在连接两个氢原子的线上来回振动，这种振动的能量只能是某些特定的数值。此外，如果我们想象有一根轴穿过两个氢原子的中心点，那么氢分子也可以围绕这根轴旋转，这种旋转的能量也只能是某些特定的数值。这些旋转和振动的能量差通常处于光谱的红外线波段（或者能量更低的部分）。如果某种红外线的能量恰好能让分子从一种能量状态跃迁至另一种状态，分子就会吸收这种红外线，而其他能量水平的红外线则不会被这个分子吸收。不同的分子具有不同的旋转—振动能量差，事实上，每种分子都具有一种独特的“红外线光谱指纹”。对于化学家和法医而言，鉴别某种未知物质的化学组成的最有效的方法之一，就是测量这种未知物质的红外线光谱指纹，并和已知分子的红外线光谱指纹做对比。

窗玻璃中的二氧化硅分子[12]也可以围绕自身的位置振动，这种振动会促使二氧化硅分子吸收红外线。紫外线的能量高于可见光中的紫光，所以紫外线足以让二氧化硅分子从前排座位跳到楼上座位，因此，窗玻璃也能够吸收紫外线。我们之所以能够透过窗户看到外面的风景，是因为可见光可以穿透玻璃。事实上，可见光是唯一可以穿过玻璃的光线[5]。

你用遥控器打开电视机，并转换频道，寻找本地新闻。与此同时，你不禁感叹电视机屏幕上出现的图像竟然如此明亮，还具有如此高的对比度。尤其当你凑近看平板电视的显示屏时，你认为这种电视真是薄到了不可思议的程度。你家里的电视是LCD屏，它的厚度大概是几英寸，而酒店里的平板电视的厚度却不超过一英寸。你注意到，电视机的外壳上贴有一个标签，注明这是一台OLED（有机发光二极管）电视机。

电视机之所以能从笨重的阴极射线管电视升级至轻薄的平板电视，部分原因在于我们用固态晶体管代替了真空管。更新型的平板电视采用了一种与上述创新技术相似的颠覆性技术：由有机分子构成的超薄发光二极管[13]取代了晶体管、光源以及液晶显示屏。这种有机发光二极管可以通过“丝网印刷”技术被印刷到物体的表面上去，和传统的LCD电视机相比，有机发光二极管电视机不仅更加省电，显示器的反应时间也更短。

在前文中，我们解释过LCD投影仪的工作原理，LCD电视机的工作原理与LCD投影仪类似。要想制造一台LCD电视机，我们需要一个光源（这个光源可以是冷阴极荧光灯管，也可以是基于半导体材料的发光二极管）和一个很大的液晶像素点矩阵。此外，我们还需要在每一个像素点下方装一个薄膜晶体管，这些薄膜晶体管可以处理来自电缆或者天线的信号，还可以决定是否需要施加一个穿过玻璃板的电场。在一台有机发光二极管显示屏中，上述所有功能都可以由一个发光二极管来完成，而且这个发光二极管只是LCD系统中的发光二极管厚度的1/10。

前文解释过，我们会在传统的发光二极管的半导体材料中加入一些不纯净的化学物质。这样做或者可以向半导体材料的楼上座位提供额外的电子，或者可以移除前排座位中的电子（在半导体材料的低能带中制造更多的空穴）。然后，我们把这两种半导体材料一上一下地放到一起，并接通电路。在这个过程中，一侧材料中的电子和另一侧材料中的空穴会在两种半导体材料的交界处相遇，然后楼上座位中的电子会进入前排座位中的空穴，同时释放出光子。有机发光二极管的工作原理与上述原理完全一样，只不过我们使用的不是两种半导体材料，而是两种不同的有机分子。一侧的有机分子负责提供电子，另一侧的有机分子负责提供空穴。这两种不同的有机分子被另一层材料分隔开来，这层材料是由第三种有机分子构成的，在这里，电子和空穴重新结合并发射出光子。通过改变第三种分子的化学构成，我们可以改变这个过程发射出的

光子的能量。因此，有机发光二极管可以发出红光、绿光以及蓝光。如果我们把这些颜色的光线结合在一起，就可以让有机发光二极管也发出白光。

在一台LCD电视显示屏中，光源永远处于发光状态。有时有电场穿过玻璃板，有时则没有。因此，液晶有时会遮挡光源发出的光线，有时又会让光源发出的光线通过。然后，我们通过色彩过滤器将光源发出的光线变成红光、绿光和蓝光。当这些不同颜色的光线结合在一起时，我们就可以得到一幅彩色的图像。在一台基于有机发光二极管的电视机中，以上这些元件（除了无定形硅薄膜晶体管）[6]都被有机分子发光二极管代替了。在有机发光二极管显示屏中，我们不再需要使用半导体晶体LED作为光源，因为有机发光二极管本身就能发出光线。我们无须使用色彩过滤器，因为通过选用不同类型的有机发光二极管就可以产生三种颜色的光线[7]。我们也不再需要用笨重的玻璃板和液晶来遮挡光源发出的光线，因为当屏幕上的像素点需要进入黑暗状态的时候，可以直接通过有机发光二极管关闭电流。因此，有机发光二极管显示屏上的黑色像素点呈现的是真正的黑色，这使得这种屏幕上的图像有更强的对比度。

通过有机发光二极管的电流越大，有机发光二极管发射的光子数量就越多，我们得到的图像也就越明亮。和由发光二极管和液晶显示屏组成的系统相比，有机发光二极管需要消耗的能量更少，因此这种类型的显示屏非常适用于智能手机、平板电脑，以及靠电池供电的健康监控手环。在液晶显示屏中，我们需要不断地扭动液晶像素，而开关有机发光二极管的速度比扭动液晶像素要快数百倍。因此，LCD显示屏有时会发生显示模糊的问题，而OLED显示屏则不会有这种问题。一个有机发光二极管像素的厚度比单个红细胞的直径还要小，而要实现相同的功能，LCD显示屏像素的厚度必须达到若干毫米。

既然OLED显示屏有这么多优点，为何平板电视不全使用OLED显示屏呢？这是因为，OLED显示屏的制造成本比LCD显示屏高很多。而且，蓝光有机发光二极管中的有机分子会随着时间流逝而发生降解[14]，在我们找到更好用的有机分子之前，这个问题会给我们带来许多麻烦。此外，有机发光二极管中的有机分子比较怕水，虽然对于安装在墙上的电视机而言，这可能不算一个大问题，但对于智能手机而言，这显然是一个不容忽视的问题。但是，使用有机分子来代替半导体材料具有一个很大的优势，那就是你可以通过喷墨打印技术或者丝网印刷技术让这些

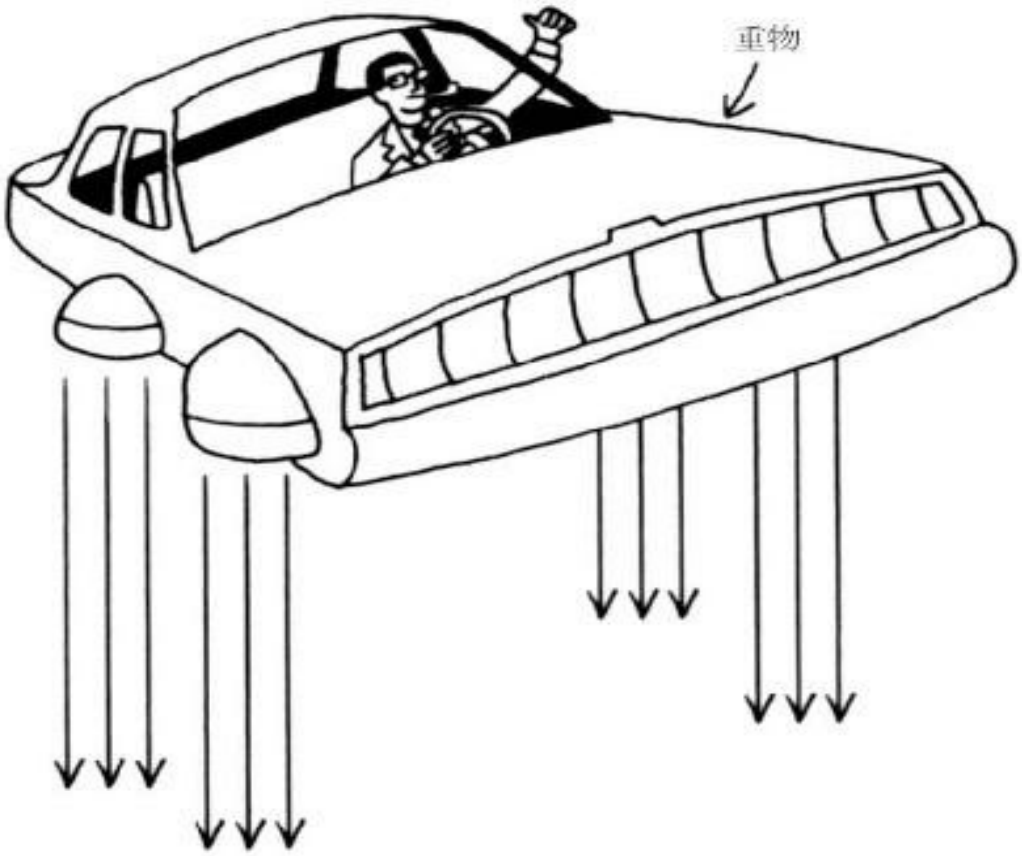
分子覆盖很大的区域，就像在T恤衫上印刷图案一样。由于在有机发光二极管显示屏中不需要使用笨重又不可弯折的玻璃板来隔绝液晶层，因此我们可以把有机发光二极管印在塑料薄片上，这种塑料薄片可以被轻松地卷起来放进你裤子后面的口袋中。我们还可以直接将有机发光二极管印刷到布料或者其他非传统材料的表面。随着这一领域和其他领域中相关研究不断取得进展，以前我们认为只能在科幻小说中发生的事情也许很快就会变成我们日常生活的一部分。

看了一会儿新闻以后，你躺在床上用遥控器转换电视频道，找到一部温馨的老电影看了起来。这部电影是你最喜欢的电影之一——1985年上映的《回到未来》。你恰好赶上了这部电影的结尾部分：马丁和他的女友珍妮弗惊奇地看到具有时光穿梭功能的迪罗里安车伴随着一道闪光出现在他们面前。布朗博士穿着“未来的衣服”从这辆车中走出来，他告诉马丁和珍妮弗，他们必须和他一起去2015年。然后，布朗博士把有机物质和非有机物质（也就是垃圾）放入汽车前盖的“聚变先生”反应器中，通过这种方法给这辆车加油。接着，马丁和珍妮弗坐进车里，布朗博士负责开车。马丁指出，他们必须先倒车，因为前方道路的长度不足以让这辆车加速到每小时88英里（只有达到这个速度，这辆车的时光穿梭功能才能被激活）。此时，布朗博士一边戴上“未来的太阳镜”（事实上，在2015年根本没有人戴这种太阳镜），一边回答道：“道路？我们要去的地方根本就不需要什么道路。”布朗博士的话音未落，迪罗里安车就变形成为一辆会飞的汽车。

现在，我们已经进入21世纪，可为什么我们还没有会飞的汽车呢？阻碍我们造出会飞的汽车的原因只有两个，一个是物理原因，另一个是化学原因[8]。

物理方面的限制主要来自能量守恒定律。一辆汽车是一件重物，要想把汽车抬离地面，并且举到离地若干英尺的地方，就需要把汽车的势能提高15　000焦耳。相较而言，一个速度为每小时100英里的快速球的动能只有140焦耳。要把一辆汽车抬升到空中，使得汽车完全不再依赖现有的道路和高速公路，很可能需要消耗上述能量的100倍以上。即使这么多的能量，也只能把汽车举起来停在一个悬崖上而已，要让汽车前进，所需消耗的能量将更多。

为了让汽车在前进的过程中始终悬浮在空中，它必须不间断地施加一个向下的力（见图7）。根据牛顿第三定律（作用力和反作用力总是成对存在），施加了这个向下的力以后，汽车就会受到向上的反作用力，这个反作用力能够平衡向下的重力。对于一台迪罗里安车而言，要做到这一点，它就必须施加一个相当于2　800磅力的向下的力，并且在任何时刻都不得撤走这个力。一旦你撤走这个力，重力就会让你的汽车加速掉落地面。在前文中，我们讨论过如何能够产生如此大的力，比如使用喷气发动机。单个喷气发动机就能够轻松地使汽车悬浮在空中，我们想象出来的大部分会飞的汽车都装有4个这样的发动机，发动机就位于普通汽车轮胎所在的位置。当然，在这种悬浮飞车中，每个喷气发动机都比现代飞行器中真正用到的飞机发动机小很多。我们不妨假设，虽然每个发动机所能提供的推力比飞机发动机小，但由于我们有4个发动机，这4个发动机产生的总推力也许足够让汽车悬浮起来。每当这种类型的飞车出现在好莱坞电影中时，编剧总会让这些汽车比传统的内燃发动机汽车噪声更小。然而在现实生活中，如果你在汽车的4个角上装上4台喷气发动机，这4台发动机产生的巨大噪声足以让你在飞行过程中无法集中精神，就算世界上最好的噪声消除耳机也很难帮你解决这个问题。此外，任何站在这个喷气发动机的排气口下方的行人，恐怕都会遭受一些极其令人不快的冲击。


重物

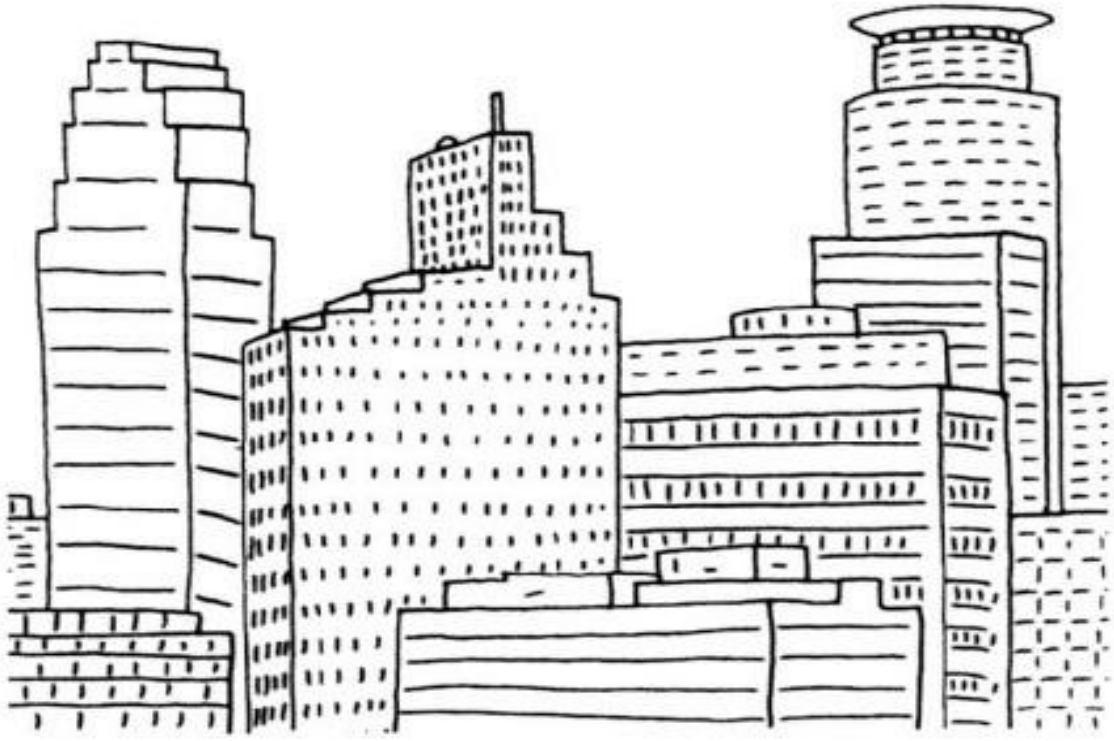


图7

然而，除了上述物理方面的限制以外，还存在化学方面的限制，这种化学限制也会导致会飞的汽车无法成为一种可行的交通工具。在前文中我们已经提到，要让汽车保持悬浮状态需要消耗相当大的能量，所以汽车必须随身携带一个能提供这些能量的能量源[9]。在这方面，对于传统的汽车而言，最重要的问题是能量密度[15]，也就是说汽车所携带的每磅燃料中能够储存多少化学势能[16]。

在《回到未来》这部电影中，飞车可以将有机废物转化成汽车运行所需的动能，这个过程是通过一台名为“聚变先生”的设备完成的。像香蕉皮和啤酒这样的有机物质主要是由水构成的。在水分子中，有些氢原子的原子核中包含一个额外的中子，这个中子由于强相互作用力的作用而待在原子核中，这种特殊的氢原子叫作“氘”。如果水分子中的氢原子被“氘”所取代，这种水分子就被称为“重水”。如果两个氘原子核聚合在一起[17]变成一个具有两个质子和两个中子的较大原子核，就会得到一个氦原子核。一个氦原子核的质量比两个氘原子核稍轻，在核聚变的过程中，这些质量被转化成巨大的能量（能量和质量之间的转化关系可以用方程$E=mc^2$来描述）。事实上，在太阳的内部，就发生着这种核聚变反应，太阳的所有能量都来自于此（在地球上，我们以氢弹的形式重现了这种核聚变反应）。如果你能在一台可以放在厨房台面上的设备中完成上述核聚变反应，你便真正生活在未来世界了。有了这样的设备后，造出一台会飞的汽车就根本不成问题了。当然，我们的生活还会发生许多更加重大的变化。

要制造出一辆会飞的汽车，我们不仅需要考虑这台飞车能够携带的燃料中包含多少能量，还需要考虑我们能以多快的速度将这些能量转化成动力。动力和能量是两个不同的概念，动力度量的是能量转化（或者能量使用）的速度（或者速率）。

要想制造出一辆会飞的车，我们必须快速地为这辆车提供能量。当一架飞机飞翔在海拔超过30 000英尺的高空中时，那里的稀薄空气对飞机造成的阻力已经远远小于地面上的空气阻力。但是，一辆会飞的汽车却必须消耗大量的能量来推开前进道路上的空气分子。此外，汽车还要消耗大量的能量来产生一个向下的推力，从而平衡重力作用。在完成上述两项艰巨的任务之后，我们还需要让汽车保留一部分能量，以便飞到目的地。为会飞的汽车供能的理想能量来源既要有很高的能量密度（每磅燃料中包含的能量），又必须像锂电池那样容易储能。在即将结束的

这一天（以及在这本书）中，我们多次遇到这种设备。关于这种设备的最新研究成果，也许能够在能量的储存和动力的提供方面，为我们带来革命性的变化。这个设备的构造很简单，它是你在日常生活中接触到的许多科技产品的基础，它就是电容器。

锂电池通过化学反应来产生提供电能的离子，这些化学反应涉及原子的运动。虽然一个锂离子的体积非常小，但它的质量却是一个电子的12 000倍。在锂电池中，电荷就是储存在这些离子中的。如果我们能够去除原子核，而只用较轻的电子来储存电能，电池的效率就会大大提高。电容器恰好可以完成这样的任务。电容器还有一个额外的好处，那就是当你把电容器中储存的电荷转化成电流时，电子信号的传播速度将接近光速，远快于给锂电池充电时发生的化学反应的速度。因此，电容器所能提供的动力是非常大的。然而，电容器的劣势是它储存的能量有限。从前，电容器所能达到的最大能量密度[18]只是最好的锂离子电池的能量密度的千分之一。换句话说，就算电容器的充电和放电速度比普通电池快很多，电容器也根本不可能为飞车提供足够大的能量（传统车辆也不行）。这种情况直到最近才发生改变。

处于研发阶段的新型电容器也许可以颠覆上述所有情况，这种电容器储存的电能可能比传统电容器更多。这种新型电容器的金属板上镀有一层很薄的碳（厚度大约是1/10毫米）。借助一些化学方法，这层碳的表面不再是光滑均一的，而是像英式松饼的内部一样凹凸不平，包含许多裂缝和边角。这种碳叫作活性炭[19]，任何在这种电容器的表面进行的活动（比如电荷的储存），效率都会大幅提高，因为现在可供反应发生的表面积扩大了许多。镀有这种碳的电容器的表面积是光滑金属板表面积的10 000~100 000倍，因此这种电容器所能储存的电荷密度也会相应提高。此外，在镀有这种碳的两层金属板之间填充了一种液体，这种液体被称为“电解质”，电解质中同时包含带正电和带负电的离子。通过在靠近金属板的地方堆积电荷，电解质能把两块带电金属板之间的有效距离减小到大约一个原子的直径长度，这就会使得离子层和电子层之间的电场大大加强。从理论上说，这种新型电容器能够储存的电能是一个体积相同的普通电容器的10 000 000倍以上。因此，这种新型电容器被称为“终极电容器”或者“超级电容器”[20]。

虽然这种超级电容器背后的物理学原理早在20世纪六七十年代就已经被发现了，但是直到20世纪90年代材料科学方面有了突破以后，这种电容器的能量密度才达到驱动汽车（指在地面上行驶的普通汽车）所需

要的水平。目前的超级电容器的能量密度大约相当于锂电池能量密度的5%。但是，超级电容器能在不到一秒钟的时间内提供能量，因此这种超级电容器的动力（单位质量所能提供的能量的速率）已经达到锂电池的10倍左右。传统的锂电池完成充电需要1个小时，而一个超级电容器却能在几秒钟内完成充电（超级电容器的充电时间受到超短距离上的离子扩散现象的限制）。由于在电容器中不会发生任何化学反应，因此不存在电极老化的问题，所以这种电荷存储设备的寿命能够超过它所驱动的汽车或卡车的寿命。虽然目前这种超级电容器还无法成为交通工具的主要能量来源，但它已经应用于一些特殊场合了。有时候，我们需要为交通工具突然提供一个很大的推力，比如公共汽车和卡车可能需要在爬坡的时候突然加速，或者喷气式飞机可能需要快速打开紧急出口，这些任务都可以靠超级电容器来完成。也许某一天，这些超级电容器中真的可以储存足够大的能量，那时，我们将真正摆脱道路的束缚，开着会飞的汽车出行。当然，我不得不说，从目前的情况来看，这件事成真的概率不是很大。

在即将结束的这一天中，你无时无刻不在用到物理学。这其中既有非常经典的物理学，也有非常前沿的物理学。能量守恒定律限制着我们生活的方方面面；电磁感应定律几乎和能量守恒定律同样重要；根据电磁感应定律，电流可以产生磁场，变化的磁场又可以产生感应电流。科学家通过研究原子级别上的物质和光的性质创立了量子力学理论，量子力学理论又在化学和凝聚态物理领域中成就了许多影响深远的应用。以上的这些物理学原理反复出现在我们每天的生活中，正是这些物理学原理让平凡的一天变得不平凡。

> 你按下遥控器的开关按钮，关闭了墙上的平板电视。然后，你轻触智能手机LCD触摸屏，确认闹钟已经设定好。明天早晨，闹钟会准时叫你起床，你会有充足的时间去机场搭乘飞机回家。你选择了存储在智能手机内存中的一段乐曲作为闹铃声，这是你从数据云中下载的一首歌曲的片段。你一边回想着《回到未来》的结局，一边进入了梦乡。在半睡半醒之间，你感谢科技创造的奇迹，并幻想着未来某一天，你也能驾驶一辆会飞的汽车出行。

[1] 这样的装置叫作“微电子机械系统”（micro-electrical mechanical systems）。

[2] 即使在零度时，原子也会发生一定程度的振动，这种振动被称为“零点运动”。之所以会

存在这样的现象，是因为“海森堡不确定性原理”。虽然这是一种非常有趣的物理现象，但它与我们正在讨论的运动传感器的工作原理无关，所以请大家忘掉我说的这段话吧。

[3] 夜视镜也是依据相同的原理工作的：和周围环境相比，你是一个非常明亮的红外线光源。尤其是夜晚，周围环境的平均温度会因为缺乏日光照射而下降，此时你在周围环境中会显得尤其明亮。夜视镜中的光敏半导体材料会把这些红外线转化成电压。

[4] 某些门卡系统还与车辆所使用的遥控进入系统拥有另外一个共同点，那就是门卡所发送的电子密码是通过一个特殊的算法生成的。每次使用门卡的时候，这个算法都会自动更新密码。有了这种设计，在前一位房客退房以后，他的门卡就不能继续打开这间客房的门了。

[5] 注意，在元素周期表中，碳元素位于硅元素的上方，因此二氧化碳的化学性质与二氧化硅的化学性质相似。二氧化碳分子也能让可见光穿过，却能吸收红外线。正因为如此，二氧化碳被称为“温室气体”12。白天，可见光到达地球表面，让地球表面升温。夜晚，地球通过发射红外线让自己的温度降下来。如果红外线被大气层中的二氧化碳（以及其他气体分子）吸收，部分能量就会被重新辐射回地球表面。因为这些温室气体的存在，即使夜晚没有太阳的照射，地球表面仍然会保持较高的温度。

[6] 因为我们必须用一个晶体管矩阵来覆盖大屏幕平板电视的整个显示屏（也就是说，需要覆盖的面积很大），所以我们选用无定形半导体材料来完成这项工作。

[7] 出于技术和经济上的原因，某些有机发光二极管显示屏先将有机发光二极管发出的红光、绿光和蓝光结合起来形成白光，再让白光穿过过滤器重新得到红色、绿色、蓝色和白色的像素点。这种设计在制造过程中具备一些好处，但我们也可以直接使用红色、绿色、蓝色的有机发光二极管。

[8] 这里我所说的会飞的汽车是指具有竖直升空和降落功能的汽车，而不是指具有可以收缩的翅膀的汽车。因为后一种会飞的汽车事实上相当于小型飞机，这种汽车确实存在，但这种汽车并不是科幻小说和漫画书中经常提到的那种会飞的汽车。

[9] 事实上，在《回到未来》这部电影中，编剧充分认识到了这种能量上的限制。这部电影的许多情节都是围绕如何获得能量（以放射性元素钚或闪电的形式）让时光机运转而展开的。

致谢

通过一本书来解释我们每天用到的各种技术背后的物理学原理，这个想法最初来自我在美国皇冠出版社的第一个编辑罗杰·肖勒。在我写出了不尽如人意的初稿以后，编辑经验丰富的多梅尼卡·阿利奥托审读了我的稿件，并正确地提出了必须“大改”的意见。多梅尼卡建议我重新搭建整本书的结构，以虚构的一个人一天的生活作为本书的主线。多梅尼卡发明了“叙述物理学”一词，来描述这本书的结构。在多梅尼卡无法继续编辑这本书的情况下，克莱尔·波特以无缝对接的方式承担了本书之后的编辑工作，直到本书付梓。我对以上三位编辑表示深深的感谢。同时，我也必须感谢文字编辑劳伦斯·克劳泽给我提出的认真而体贴的建议。我的书稿居然需要经过这么多认真、富有专业精神的工作人员的打磨才能成书，我必须承认，这让我担心起自己的写作能力。此外，我还必须感谢我的经纪人杰伊·曼德尔，是他启动了整个项目，并且在本书漫长的出版过程中一直大力支持我。

在本书的写作过程中，对我来说最大的乐趣之一就是扮演书中的主人公“你”。我假想自己完成“你”的种种任务，在这个过程中，我真正观察到很多虽然每天在我眼前出现我却从未注意的科技现象。然后，我就着手探索这些设备的工作原理，以加深我对这些技术的理解。在很多情况下，我研究这些设备的工作原理的第一步是从书架上取下路易斯·布卢姆菲尔德教授的《万物工作原理》（*How Everything Works*，John Wiley & Son，2008），这是一本非常棒的书。第二步，我会立刻访问www.howstuffworks.com和www.explainthatstuff.com这两个网站。此外，我也从和同事的讨论中获益匪浅，特别是与约翰·布罗德赫斯特、保罗·克罗韦尔、米歇尔·詹森以及克里斯·金的交谈。布赖恩·斯基纳和C.C.黄对书中若干设备的说明文字提供了指导，E.丹·达尔伯格、艾伦·怀恩维恩、道格·科尔斯和卡罗琳·科尔斯在本书出版的不同阶段耐心地帮我审读书稿，他们的帮助使得本书终稿的质量大大提升。如果读者在书中发现任何错误或者意思不清楚的地方，那完全是我个人的责任。

我对我的妻子和家庭有所亏欠，而且这笔“债务”是我永远无法还清的。我的妻子泰蕾兹一直支持和鼓励我，对我也非常耐心。如果没有她，我绝对不可能完成这本书的写作。在我写作本书的过程中，泰蕾兹

给了我许多启发和反馈，对本书的成功写作来说至关重要。我也万分感激她给予我的爱，亲爱的泰蕾兹，让我们一起去散步吧。



扫此二维码，加我微信好友



扫此二维码，添加微信公众号

还有什么想要读的书？

加小编私人微信wordgai或搜索订阅号微信“互联网分享社区”

按照订阅号书单提示下载

注释

第1章 起床啦！

1. 摆锤是一种非常简单的机械装置：Paul A.Tipler and Gene Mosca, *Physics for Scientistsand Engineers,* 6th ed. (W. H. Freeman, 2007),465–74.

2. 电力公司把线圈放入磁极之间并使之转动：Roger A. Hinrichs and Merlin Kleinbach, *EnergyIts Use and the Environment,* 3rd ed. (Brooks/Cole, 2002), 358–67.

3. 这种芯片的功能相当于收音机中的调频器：Paul Horowitz and Winfield Hill, *The Art of Electronics,* 2nd ed. (Cambridge UniversityPress, 1989), 885–86.

4. 怎样才能让一个未连接电源的设备保持计时功能呢：Dominique Flechon, *The Mastery of Time: A History ofTimekeeping, from the Sundial to the Wristwatch: Discoveries,Inventions, and Advances in Master Watchmaking* (Flammarion,2012).

5. 早在人类发明电这种能源之前：路灯的电气化发生于1882年，而塞思托马斯库克公司在1876年就为一种小型机械闹钟申请了专利。Maggie Koerth-Baker, *Before the Lights Go Out: Conquering the Energy Crisis Before It Conquers Us* (JohnWiley & Sons, 2012), 10.

6. 压电晶体：Bernard Jaffe, *Piezoelectric Ceramics* (AcademicPress, 1971); Louis Bloomfield, *How Everything Works,* 5th ed.(John Wiley & Sons, 2008), 300.

7. 名为“中央处理器”（CPU）的芯片：Alvis J. Evans, *BasicDigital Electronics* (Master Publishing, 1996), 24–26.

8. CPU要负责协调大量开关时间不足一纳秒的元件：你的笔记本电脑和台式电脑所用的CPU元件的开关速度更快，但是这也意味着笔记本电脑和台式电脑需要的能量更多。在智能手机的工程设计方面有一个很重要的原则：智能手机必须尽量省电，以延长电池的使用时间。

9. 电压的变化是如何被转化为振动膜的机械振动：Bloomfield,*How Everything Works*, 426.

10. 木材能够提高声波的音质：Bruno L. Giordano and Stephen McAdams, “Sound Source Mechanics and Musical Timbre Perception: Evidence from Previous Studies,”*Journal of the Acoustical Society of America* 121, 2384 (2007); D. MurrayCampbell, “Evaluating Musical Instruments,”*Physics Today* 67 (April 2014): 35–40.

11. 上述装置的特点是：两个线圈不直接相连，而是一个线圈中的电流通过“感应”使另一个线圈中产生电流。这种装置叫作“变压器”：Tipler and Mosca, *Physics for Scientists and Engineers*, 1004–1006.

12. 烤面包机的电热丝一般由镍和铬的合金（叫作镍铬合金）制成：Bloomfield, *How Everything Works*, 225.

13. 面包中的糖和淀粉就会发生化学反应：Joseph J. Provost,Keri L. Colabroy, Brenda S. Kelley, and Mark A. Wallert,*The Science of Cooking: Understanding the Biology and Chemistry Behind Food and Cooking* (John Wiley & Sons,2016), 198–217.

14. 热力学的发展却颠覆了这一规律：Donald S. L. Cardwell,*From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age* (Cornell University Press, 1971).

15. 电冰箱可以被看作一个反向运转的发动机：Mark W.Zemansky, *Heat and Thermodynamics*, 5th ed. (McGraw-Hill,1968), 179–85. 关于蒸发制冷的描述可以参见以下文献：James Kakalios, *The Physics of Superheroes: Spectacular Second Edition* (Gotham Books, 2009), 170–71.

16. 过去，电冰箱使用氟利昂来制冷：Bloomfield, *How Everything Works*, 261.

第2章 开车进城去！

1. 油电混合动力汽车既装有内燃发动机，又配有电动机：Chuck Edmondson, *Fast Car Physics* (Johns Hopkins University Press, 2011), 194–200.

2. 一个典型的电池可以让离子在两个金属棒之间移动：出处同上，187–91.

3. 一个燃烧周期共有4个步骤：Louis Bloomfield, *HowEverything Works*, 5th ed. (John Wiley & Sons, 2008), 260–64.

4. 一个汽油分子中包含一条碳原子链：Gordon J. Aubrect, *Energy:Physical, Environmental and Social Impact*, 3rd ed. (PearsonPrentice Hall, 2006), 217–18.

5. 在某些混合动力汽车中：Edmondson, *Fast Car Physics*, 196–98.

6. GPS通过和卫星交互来判断你的准确位置：PatrapMisra and Per Enge, *Global Positioning System: Signals,Measurements and Performance*, rev. 2nd ed. (Ganga-Jumana,2010).

7. 爱因斯坦的广义相对论：介绍广义相对论的优秀通俗读物有很多，比如：Kip S. Thorne, *Black Holes and Time Warps:Einstein's Outrageous Legacy* (W. H. Norton & Co., 1995); Pedro G. Ferreira,*The Perfect Theory: A Century of Geniusesand the Battle Over General Relativity* (Houghton MifflinHarcourt, 2014).

8. 理论物理学家约翰·阿奇博尔德惠勒对这种情况做了如下注解：理论物理学家约翰·阿奇博尔德·惠勒曾与爱因斯坦共同进行研究，他创造了“黑洞”“虫洞”等词语。在惠勒与肯尼思·威廉·福特（Kenneth William Ford）合著的书籍（*Geons, Black Holes and Quantum Foam*, W.W. Norton & Co,2000）的第235页中，惠勒写道：“时空告诉物质如何运动，而物质告诉时空如何弯曲。”

9. 相对论会产生两种效应：Chad Orzel, *How to Teach Relativity* to Your Dog(Basic Books, 2012), 220–21.

10. 快易通系统：参见“HowStuff Works”网站上的以下文献：“How E-ZPass Works”, 网址：http://auto.howstuffworks.com/e-zpass.htm.

11. 无线电的工作原理究竟是什么呢：Bloomfield, *How Everything Works*, 428–35.

12. 随着高速公路上每英里行驶车辆密度的增加：解释交通流模型的通俗读物包括：Mitchel Resnick, *Turtles, Termites and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Micro worlds* (MIT Press, 1994); Tom Vanderbilt, *Traffic: Why We Drive the Way We Do (and What It Says About Us)* (Knopf,2008). 而如果读者希望阅读关于交通流模型的数学类书籍，不妨从这本开始：Dirk Helbing, “Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems,”*Reviews of Modern Physics* 73, 1067 (2001).这本书中列出的参考书目也值得一读。

13. 这种交通堵塞的情况……是由交通的内在不稳定性造成的：这种内在不稳定性造成的交通堵塞会给我们造成实实在在的经济损失。在2011年的《城市行动报告》中，得克萨斯州的交通研究所估计，每年交通堵塞对美国经济造成的经济损失大约是1　000亿美元。也就是说，对每一位开车上下班的人来说，每年因交通堵塞而遭受的经济损失大约是750美元。

14. 当车辆密度较大的时候，交通流可以被看成是一种集体现象：B. S. Kerner and P. Konhauser, “Cluster Effect in Initially Homogeneous Traffic Flow,”*Physical Review E* 48, 2335(1993); Kai Nagel and Maya Paczuski, “Emergent Traffic Jams,”*Physical Review E* 51, 2909 (1995); H. Y. Lee, H.W. Lee, and D. Kim, “Origin of Synchronized Traffic Flow on Highways and Its Dynamic Phase Transition,”*Physical Review Letters* 81, 1130 (1998); B. S. Kerner, “Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow,”*Physical Review Letters* 81, 3797 (1998).

15. 在交通能否通畅方面，有两个因素起到了关键性作用：Robert E. Chandler, Robert Herman, and Elliott W. Montroll,“Traffic Dynamics: Studies in Car Following,”*Operations Research* 6, 163 (1958).

16. 与上述情况类似的一个例子是沙堆：虽然颗粒媒介的动力学和交通流的动力学有许多重叠之处（例如可参见“国际交通与颗粒流讨论会”的会议论文集。在过去20年中，这一会议每两年召开一次），但是

描述沙堆不稳定性的方程和描述司机的自发行动如何造成交通堵塞的方程却是不同的。

17. 在车群的前部有个人踩了一下刹车：Takashi Nagatani,“Traffic Jams Induced by Fluctuation of a Leading Car,”*Physical Review E* 61, 3534 (2000).

18. 如果你能够驾车匀速前进：Junfang Tian, Rui Jiang, Geng Li, Martin Treiber, Bin Jia, and Chenqiang Zhu, “Improved 2D Intelligent Driver Model in the Framework of Three-Phase Traffic Theory Simulating Synchronized and Concave Growth Patterns of Traffic Oscillations,”*Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*41, 55 (2016).

19. 雷达（radar）一词是“无线电侦测和测距”的英文首字母缩写：J. C. Toomay and Paul J. Hannen, *Radar Principles for the Non-Specialist,* 3rd ed. (SciTech Publishing, 2004).

20. 自动停车系统与自动驾驶系统的基础原理都是近炸引信技术：Barry Parker, *The Physics of War: From Arrows to Atoms*(Prometheus Books, 2014), 241–42.

21. 汽车遥控进入系统：Mark Fischetti, “Open Sesame,”*Scientific American*, January 2005.

22. 无线电调配器与车内的遥控进入系统的信号接收器都用到了共振原理：Bloomfield, *How Everything Works,* 430.

23. 如果某人有一个接收器：Matt Lake, “How It Works;Remote Keyless Entry: Staying a Step Ahead of Car Thieves,”*New York Times,* June 7, 2001.

第3章 看医生

1. 从本质上看，电梯其实是一个滑轮装置：David Macaulay,*The*

Way Things Work (Houghton Mifflin Company, 1988), 65.

2. 电梯轿厢的升降速度主要取决于转动滑轮的电动机：LaurenAnderson, “How It Works: World’s Fastest Elevator,”*PopularScience*, April 2012.

3. 电梯安全的主要原则是：Lauren Anderson, “How It Works:World’s Fastest Elevator,”Popular Science, April 2012.

4. 在滑轮中有一个“调速器”装置：Louis Bloomfield, *HowEverything Works*, 5th ed. (John Wiley & Sons, 2008), 123.

5. 你在浏览器地址栏中输入的网址事实上是一个昵称：Andrew Blum, *Tubes: A Journey to the Center of the Internet*(HarperCollins, 2012), 29–30, 49–55.

6. 模拟信号和数字信号之间的区别是：Barry M. Lunt, *Marvelsof Modern Electronics: A Survey* (Dover, 2013), 173–75.

7. 要想以更加可靠的方式传输信息一，个方法就是使用电子码：John R. Pierce, *An Introduction to Information Theory:Symbols, Signals and Noise*, 2nd rev. ed. (Dover, 1980).

8. 智能平板电脑的屏幕是由一系列密集排列的点构成的：Jiun-Haw Lee, David N. Liu, and Shin-Tson Wu, *Introductionto Flat Panel Displays* (John Wiley & Sons, 2009).

9. 老式的玻璃温度计包含一个很细的空心圆管：Mark W.Zemansky, *Heat and Thermodynamics*, 5th ed. (McGraw-Hill,1968), 9–14.

10. 事实上，任何系统都可以被当作温度计：Guy K. White,*Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, 3rd ed.(Oxford Science Publications, 1979), 83–122.

11. 当把两种不同的金属连接在一起时：D. K. C. MacDonald,*Thermoelecticity: An Introduction to the Principles* (DoverBooks, 2006), 12–15; White, *Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, 117–22. 关于热电偶的讨论可以参见以下文献：

James Kakalios, *The Amazing Story of Quantum Mechanics* (Gotham, 2010), 256。

12. 在一个X射线管中：Robert Eisberg and Robert Resnick,*Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles,* 2nd ed. (John Wiley & Sons, 1985), 40–43.

13. 当用X射线照射一种固体（比如你的脚踝）时：WilliamH. Zachariasen, *Theory of X-Ray Diffraction in Crystals*(Dover, 1967).

14. 全称为“电子计算机断层扫描”：Jerrold T. Bushberg, J.Anthony Seibert, Edwin M. Leidholdt Jr., and John M. Boone,*The Essential Physics of Medical Imaging,* 3rd ed. (LLW,2011), 312–75.

15. 在超声波成像中：Marveen Craig, *Essentials of Sonography and Patient Care*, 3rd ed. (Saunders, 2012); James A.Zagzebski, *Essentials of Ultrasound Physics* (Mosby, 1996).

16. 电子、质子和中子——都有一个小磁场：Eisberg andResnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids,Nuclei and Particles,* 434–37.

17. 这一现象于1905年被爱因斯坦首次发现：Barry Parker,*Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*(Prometheus Books, 2002), 46–50.

18. 核磁共振成像的最主要信号来自充斥着我们身体的每一个细胞的水分子：Dominik Weishaupt, Victor D. Koechli,and Borut Marincek, *How Does MRI Work? An Introduction to the Physics and Function of Magnetic Resonance Imaging*(Springer, 2008). 关于磁共振成像技术背后的物理学原理可以参见以下文献：Kakalios, *The Amazing Story of Quantum Mechanics*, 227–33.

19. 一项近期的研究：Simon Walker-Samuel et al., “*In Vivo* Imaging of Glucose Uptake and Metabolism in Tumors,”*Nature Medicine* 19, 1067 (2013).

第4章 去机场

1. “碳纸”这项古老的技术：参见“*How Products Are Made*”网站的“Carbon Paper”词条，网址：http:// www.madehow.com/Volume-1/CarbonPaper.html #ixzz4IkE9h9fE; 以及KevinL aurence,“Th e*Exciti ng*History of Carbon Paper!,”http://www.kevinlaurence .net/essays/cc.php.

2. 你的账号以及其他一些额外的信息都被储存在信用卡的磁条之中：Robert C. O’Handley, *Modern Magnetic Materials:Principles and Applications* (John Wiley & Sons, 2000), 674–77; Barry M. Lunt,*Marvels of Modern Electronics: A Survey*(Dover, 2013), 150–52; Thomas Norman,*Electronic AccessControl* (Butterworth-Heinemann, 2011), 53–54.

3. 既然二进制是所有现代数字化操作的基础：T. R. Reid,*The Chip: How Two Americans Invented the Microchip andLaunched a Revolution* (Simon & Schuster, 1985), 121–27. 如果读者有兴趣了解如何借助一只手的5个手指用二进制数到31，可以参见以下文献：*The Unbeatable Squirrel Girl*,no. 11, written by Ryan North and drawn by Jacob Chabot andErica Henderson (Marvel Comics, October 2016).

4. 许多读卡器是通过一个“读取磁头”：Jagadeesh S. Moodera,Guo-Xing Miao, and Tiffany S. Santos, “Frontiers in Spin-Polarized Tunneling,”*Physics Today*, April 2010.

5. 这种芯片通常被叫作RFID： Roy Want, “RFID—A Key to Automating Everything,”*Scientific American*,August 2008.

6. 第一种类型的触摸屏使用的是感应阻抗技术：Geoff Walker,“A Review of Technologies for Sensing Location on the Surface of a Display,”*Journal of the Society for InformationDisplay* 20, 413 (2012).

7. 在这种触摸屏之下，是一种被称为“电容器”的装置：Paul A. Tipler and Gene Mosca, *Physics for Scientists andEngineers*, 6th ed. (W. H. Freeman, 2007), 802–806.

8. 当某个小方块中存储的电荷发生改变时：“Walker, A Reviewof Technologies.”

9. 这些电容器使用了一种特殊的合金——氧化铟锡：H. J. J.van Boort and R. Groth, “Low Pressure Sodium Lamps withIndium Oxide Filter,”*Phillips Technical Review* 29, 17 (1968);Mamoru Mizuhashi, “Electrical Properties of Vacuum-DepositedIndium Oxide and Indium Tin Oxide Films,”*Thin Solid Films*70, 91 (1980).

10. 某些触摸屏依靠光来判断你触摸的区域：Stuart F. Brown,“Hands-On Computing,”*Scientific American*,July 2008.

11. 这种物理现象被称为“全内反射”：Lunt, *Marvels ofModern Electronics: A Survey*, 202–207.

12. 光纤电缆就是以“全内反射”现象为基础工作的：在光纤电缆中，光线在一根圆柱形的缆芯中传播，而缆芯外面包有一层外壳（叫作光纤的“包层”）。包层的材料和缆芯的材料不同，包层的折射系数低于缆芯的折射系数。只要合理地选择这两种材料的折射系数，就可以保证不管光线以什么角度射向缆芯和包层的分界线，在分界线处光线都会发生全内反射。因此，不管光纤电缆发生多少次转弯或者弯折，光线都能从包层中反射回来，沿直线继续在缆芯中传播。参见以下文献：Ben G. Streetman and Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed. (PrenticeHall, 2000), 392–94.

13. 有些人会用手持金属探测器：Marshall Brain, *MORE How Stuff Works* (John Wiley & Sons, 2002), 291–93.

14. 市政建筑和机场使用的金属探测门：David Macaulay, *The Way Things Work* (Houghton Mifflin Company, 1988), 323.

15. 大部分机场的扫描安检仪都使用“毫米波”：R. Appleby,“Passive Millimetre-Wave Imaging and How It Differs from Terahertz Imaging,”*Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 362, 379 (2004).

16. 毫米波是一种波长约为1毫米的电磁波：Paul A. Tipler and Gene Mosca, *Physics for Scientists and Engineers* vol. 1, 6thed. (W. H. Freeman, 2007), 1041.

17. 我们可以把非导体（比如绝缘体或者半导体）想象成一种老式

电影院：James Kakalios, *The Amazing Story of Quantum Mechanics* (Gotham, 2010), 175–78.

18. 在某些X射线探测器中，X射线直接被半导体材料吸收：John Rowlands and Safa Kasap, “Amorphous Semiconductors Usher in Digital X-Ray Imaging,”*Physics Today*, November 1997; Yoshihiro Izumi and Yasukuni Yamane, “Solid-State X-Ray Imagers,”*MRS Bulletin*, November 2002; Martin Niki,“Scintillation Detectors for X-rays,”*Measurement Science and Technology* 17, R37 (2006).

19. 不管半导体探测器是吸收了X射线，还是吸收了可见光的光子：Rowlands and Kasap, “Amorphous Semiconductors Usher in Digital X-Ray Imaging.”

20. 一个三硝基甲苯（TNT）分子：可以参见以下文献：G.A. Eiceman, Z. Karpas, and Herbert H. Hill Jr., *Ion Mobility Spectrometry*, 3rd ed. (CRC Press, 2016).

21. “离子迁移率光谱测定法”：Abu B. Kanu, Prabha Dwivedi,Maggie Tam, Laura Matz, and Herbert H. Hill Jr., “Ion Mobility-Mass Spectrometry,”*Journal of Mass Spectrometry* 43, 1 (2008).

第5章 坐飞机

1. 锂和同属碱金属的钠、钾一样，是一种化学性质特别活跃的金属：Louis Bloomfield, *How Everything Works*, 5th ed.(John Wiley & Sons, 2008), 632–45; 此外还可以参见：SethFletcher, *Bottled Lightning: Superbatteries, Electric Cars andthe New Lithium Economy* (Hill and Wang, 2011).

2. 如果传统的碱性电池发生老化：Isidor Buchmann, *Batteriesin a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteriesfor Non-Engineers*, 4th ed. (Cadex Electronics, 2016); ThomasReddy, *Linden’s Handbook of Batteries*, 4th ed. (McGraw-HillEducation, 2010).

3. 多年前，汽车蓄电池里含有铅和酸的混合物：HenrySchlesinger, *The Battery: How Portable Power Sparked aTechnological Revolution* (Smithsonian Books, 2010), 173–75;Fletcher, *Bottled Lightning*, 13–17.

4. 热气球或者飞艇之所以能升到空中，也是基于同样的原因：David Macaulay, *The Way Things Work* (Houghton Mifflin Company, 1988), 103, 112–13.

5. 飞机的机翼有特殊的形状和曲线：Bloomfield, *HowEverything Works*, 168–71.

6. 虽然飞机的发动机看起来和汽车发动机不一样：出处同上，175–76.

7. 这种装置包含一个硅芯片“三明治”：Mark Johnson,*Photodetection and Measurement: Maximizing Performance inOptical Systems* (McGraw-Hill Education, 2003), 1–11; Ben G.Streetman and Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*,5th ed. (Prentice Hall, 2000), 379–86.

8. 完成这种精准又快速的读取过程的秘诀，就是“水桶长蛇阵原理”：例如可参见以下文献：James R. Janesick,*Scientific Charge-Coupled Devices*(SPIE Press, 2001).

9. 你的信息被保存在许多台计算机的内存之中：AndrewBlum, *Tubes: A Journey to the Center of the Internet* (Harper-Collins, 2012), 259; Prashant Gupta, A. Seetharaman, and JohnRudolph Raj, “The Usage and Adoption of Cloud Computingby Small and Medium Businesses,”*International Journal ofInformation Management* 33, 861 (2013).

10. 如果不能将这些热量移除：Vaclav Smil, *Energies: AnIllustrated Guide to the Biosphere and Civilization* (MITPress, 1999), 200.

11. 热量管理是一个非常重要的问题：Matt McKinney, “Selling the Cold, Minnesota’s Tech Community Welcomes Data Centers,”*Minneapolis Star Tribune*, December 13, 2014.

12. 谷歌公司运营的数据中心的耗电量超过200兆瓦：JamesGlanz,

“Google Details, and Defends, Its Use of Electricity,”*New York Times*, September 8, 2011; 但是根据谷歌公司的计划，谷歌的碳足迹将会发生变化，参见以下来源：QuentinHardy, “Google Says Its Data Centers Will Run Entirely on Renewable Energy by 2017,”*New York Times*, December 7,2016.

13. 声音表现为介质密度的变化：Paul A. Tipler and Gene Mosca, *Physics for Scientists and Engineers*, vol. 1, 6th ed. (W.H. Freeman, 2007), 502–503.

14. 一副有噪声消除功能的耳机会记录下这场聚会中所有人的说话声：S. J. Elliott and P. A. Nelson, “Active Noise Control,”*IEEE Signal Processing Magazine*, October 1993;Scott D. Snyder, *Active Noise Control Primer (Modern Acoustics and Signal Processing)* (Springer, 2000), 3–5.

15. 原子的各个组成部分：Robert Eisberg and Robert Resnick,*Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, 1985), 272–78, 434–37.

16. 相同磁极之间的排斥作用就是磁悬浮列车悬浮于轨道之上的基本原理：David Scott, “At Last, Maglev Goes Public:Britain’s Flying Train,”*Popular Science*, October 1984;Scott R. Gourley, “Track to the Future,”*Popular Mechanics*,May 1998; 此外还可以参见以下文献：Hyung-Suk Han andDong-Sung Kim, *Magnetic Levitation: Maglev Technologyand Applications* (Springer Tracts on Transportation andTraffic, 2016).

第6章 做商业报告

1. 如果我们想制作一个晶体管：Barry M. Lunt, *Marvels ofModern Electronics: A Survey* (Dover, 2013), 23–32.

2. 这块金属板位于绝缘玻璃层中：D. Kahng and S. M. Sze,“A Floating-Gate and Its Application to Memory Devices,”*The Bell System Technical Journal* 46, 1288 (1967); R. Bez,E. Camerlenghi, A. Modelli, and A. Viti scon,“Introduction toFlash Memory,”*Proceedings of the IEEE* 91,

489 (2003). 关于有浮栅和没有浮栅的晶体管背后的物理学原理，可以参见以下文献：James Kakalios, *The Amazing Story of Quantum Mechanics* (Gotham, 2010), 216–18.

4. 计算机硬盘曾用有磁性区域的磁盘来表示数字指令中的0和1：Robert C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials:Principles and Applications* (John Wiley & Sons, 2000), 674–721; Lunt, *Marvels of Modern Electronics: A Survey*, 153–56.

5. 复印机的核心元件是一个圆柱形的"鼓"：H. Richard Crane,*How Things Work* (American Association of Physics Teachers,1996), 18–19.

6. 粒子内部的颜料（被称为"墨粉"）：Dan A. Hays, "HowDoes a Photocopier Work?"*Scientific American*,March 2003.

7. 所有低能级的前排座位全部被电子填满：Kakalios, *TheAmazing Story of Quantum Mechanics*, 198–201.

9. 有一种喷墨打印机：Marshall Brain, *MORE How Stuff Works*(John Wiley & Sons, 2002), 232–33.

10. 半导体鼓——事实上是由一种无定形半导体材料制成的：例如可以参见以下文献：S. R. Elliott, *Physics of Amorphous Materials* (Longman Scientific & Technical, 1983).

11. 我们先把一个晶种浸入高温的液体硅中：Ben G. Streetmanand Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed.(Prentice Hall, 2000), 12–16.

12. 液晶是一种真正的液体：例如可以参见以下文献：Peter J.Collings, *Liquid Crystals: Nature's Delicate Phase of Matter*(Princeton University Press, 1990).

13. 此外，计算机和电视机的平板显示器：例如可以参见以下文献：Jiun-Haw Lee, David N. Liu, and Shin-Tson Wu,*Introduction to Flat Panel Displays* (John Wiley & Sons,2009); Robert H. Chen, *Liquid Crystal Displays: Fundamental Physics and Technology* (John Wiley & Sons, 2011).

14. 一个二极管中包含两个被放置在一起的半导体：John P.McKelvey, *Solid State and Semiconductor Physics* (Harper &Row, 1966), 390–98, 408–16.

15. 我们可以用光线来照射半导体材料：Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 7th ed. (John Wiley & Sons,1996), 570–74.

16. 这样的元件就是一个发光二极管：Nick Holonyak, "From Transistors to Lasers to Light-Emitting Diodes,"*MRS Bulletin* 30, 509 (2005); Chris Woodford, *Atoms Under the Floorboard*(Bloomsbury Sigma, 2015), 159–61. 关于发光二极管和激光二极管的物理原理，可以参见以下文献：Kakalios, *The Amazing Story of Quantum Mechanics*, 184–87, 207–209.

17. 要想把发光二极管变成半导体激光装置：Winston Kock,*Lasers and Holography: An Introduction to Coherent Optics*,2nd ed. (Dover, 1981).

18. 人类发明的第一个半导体激光二极管：Louis Bloomfield,*How Everything Works*, 5th ed. (John Wiley & Sons, 2008),26–32, 475.

19. 固网电话使用的早期话筒设备运用了煤烟的电学性质：例如可以参见以下文献：Glen Ballou, ed., *Electroacoustic Devices: Microphones and Loudspeakers* (Focal Press, 2009);M. D. Fagen, ed., *A History of Engineering and Science in the Bell System: The Early Years (1875– 1925)* (Bell TelephoneLaboratories, 1975).

20. 电容式话筒：Alexander Case, "The Vocal Micro-phone:Technology and Practice,"*Physics Today*, March 2016.

21. 早期的无线电台会使用一种名为"铝带式话筒"的设备：出处同上。

22. "驻极体话筒"：Leo L. Beranek and Tim Mellow, *Acoustics:Sound Fields and Transducers* (Academic Press, 2012), 397–400.

23. 让一个化学键断裂所需的能量大约是若干电子伏特：例如可以参见以下文献：Roy McWeeny, *Coulson's Valence*(Oxford University Press, 1979).

24. 微波炉中使用的电磁波：Michael Vollmer, “Physics of the Microwave Oven,”*Physics Education* 39, 74 (2004).

25. 这种作用力被称为“强相互作用力”：A. Das and T. Ferbel,*Introduction to Nuclear and Particle Physics*, 2nd ed. (WorldScientific, 2003), 45–50.

26. 主要的辐射形式：George Gamow, *The Atom and Its Nucleus*(Prentice Hall, 1961), 78–81.

27. 要想杀灭沙门氏菌以及其他致病细菌，方法之一就是让食物接受电离辐射：Jozsef Farkas and Csilla Mohacsi-Farkas,“History and Future of Food Irradiation,”*Trends in Food Science & Technology* 22, 121 (2011).

28. 因此经过辐射杀菌的食物并不具有放射性：当然，稳定的原子核也可以被转化成不稳定的、具有放射性的原子核，这种现象叫作“感生放射性”现象。然而，只有在原子核接触到外部中子源的时候，才可能出现这种“感生放射性”现象。而用于给食物杀菌的伽马射线、X射线和贝塔粒子射线是不会产生“感生放射性”现象的。

第7章 留宿酒店

1. 运用了简谐振子的性质：Jon S. Wilson, *Sensor TechnologyHandbook*, vol. 1 (Elsevier, 2005), 137–53; S. Beeby, G.Ensell, M. Kraft, and N. White, *MEMS Mechanical Sensors*(Artech House Inc., 2004), 175–95; O. Sidek, M. N. Mat Nawi,and M. A, Miskam, “Analysis of Low-g Capacitive Cantilever-Mass Micro-Machined Accelerometers,”*International Jouralof Engineering & Technology* 10, 133 (2010).

2. 为了记录你的心率：例如可以参见以下文献：John G.Webster, ed., *Design of Pulse Oximeters* (CRC Press, 1997).

3. 通过探测你身体发出的红外线：Jacob Fraden, *Handbook ofModern Sensors: Physics, Designs and Applications*, 4th ed.(Springer, 2010), 95–100,

487–91.

4. 在你每日摄入的能量中，约有一半能量被用于大幅度的运动：Vaclav Smil, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems* (MIT Press, 2008), 124–27.

5. 一个名为“热电探测器”的半导体设备：例如可以参见以下文献：A. K. Batra and M. D. Aggarwal, *Pyroelectric Materials:Infrared Detectors, Particle Accelerators and Energy Harvesters*(SPIE Press, 2013).

6. 还有一种“主动”的运动传感器：Fraden, *Handbook ofModern Sensors*, 249–54.

7. 我们多次接触过被动门禁系统的基本原理：例如可以参见以下文献：Robert N. Reid, *Facility Manager’s Guide to Security: Protecting Your Assets* (Fairmont Press, 2005);Thomas Norman, *Electronic Access Control* (Butterworth-Heinemann, 2011).

8. 而主动式近傍型卡：出处同上。

9. 要想制造出一台遥控器：例如可以参见以下文献：JuliaLayton, “How Remote Controls Work,”November 10, 2005,http://electronics.howstuffworks.com/remote-control.htm.

10. 关于固体能带结构的预测：Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 7th ed. (John Wiley & Sons, 1996), 173–94.

11. 我们对分子的大多数了解都来源于分子吸收红外线的量子力学特性：Robert Eisberg and Robert Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*, 2nded. (John Wiley & Sons, 1985), 422–32.

12. 二氧化碳被称为“温室气体”：Vaclav Smil, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*(MIT Press, 2008), 33–34.

13. 由有机分子构成的超薄发光二极管：Eliav I. Haskal,Michael Buchel, Paul C. Duineveld, Aad Sempel, and Peter van de Weijer, “Passive-Matrix Polymer Light-Emitting Displays,”*MRS Bulletin*, November 2002;

Jiun-Haw Lee,David N. Liu, and Shin-Tson Wu, *Introduction to Flat Panel Displays* (John Wiley & Sons, 2009).

14. 蓝光有机发光二极管中的有机分子会随着时间流逝而发生降解：Hungshin Fu, Yi-Ming Cheng, Pi-Tai Chou, and Yun Chi, “Feeling Blue? Blue Phosphors for OLEDs,”*Materials Today* 14, 472 (2011); Jeong-A Seo, Sang Kyu Jeon, Myoung Seon Gong, Jun Yeob Lee, Chang Ho Noh, and Sung HanKim, “Long Lifetime Blue Phosphorescent Organic LightEmitting Diodes with an Exciton Blocking Layer,”*Journal of Materials Chemistry C* 3, 4640 (2015).

15. 对于传统的汽车而言，最重要的问题是能量密度：VaclavSmil, *Energy: A Beginner’s Guide* (Oneworld Publications,2006), 15–16. 用传统燃料来支持飞车的运转是不现实的，关于这一点可以参见：James Kakalios, *The Physics of Superheroes: Spectacular Second Edition* (Gotham Books,2009), 151–52.

16. 汽车所携带的每磅燃料中能够储存多少化学势能：一磅木头大概含有6 800 000焦耳的能量（请读者回忆一下，焦耳是一个能量单位，一个轻快地散着步的人的平均动能大概是50焦耳左右）。虽然6 800 000焦耳的能量听起来似乎是一个很大的数目，但是每磅天然气或者煤炭中的能量是每磅木头中能量的2倍以上，而每磅汽油中所含的能量更是高达20 500 000焦耳。世界上还存在比汽油能量密度更高的燃料，比如氢气（一个氢气分子中包含两个氢原子）。每磅氢气中含有52 000 000焦耳的能量，也就是说氢气的能量密度比汽油还要高，这是因为氢气分子的化学键中储存着大量势能，并且氢气分子自身的质量很小。然而，和氢气相比，汽油更容易储存和运输（也就是说储存和运输的成本更低）。此外，由于在大约100年前我们决定用某一种特殊的燃料（汽油）作为早期内燃发动机的燃料，想要改变这种对燃料的选择就变得非常困难。因此，即使同样价格的氢气能够提供比汽油两倍还多的能量，我们也很难从汽油改用氢气。（另外，完全靠氢气供能的汽车还存在另外一个问题——安全问题，因为氢气很容易发生爆炸。但是，汽油起火也不一定就比氢气起火更安全。）参见以下文献：Smil, *Energy: A Beginner’s Guide*, 16.

17. 如果两个氘原子核聚合在一起： Charles Seife, *Sun in a Bottle* (Viking, 2008), 139–41.

18. 电容器所能达到的最大能量密度：例如可以参见以下文献：B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors:Scientific Fundamentals and Technological Applications*(Springer, 1999); Hector D. Abruna, Yasuyuki Kiya, and Jay C. Henderson, “Batteries and Electrochemical Capacitors,”*Physics Today* 61, 43 (2008).

19. 这种碳叫作活性炭：Elzbieta Frackowiak and Francois Beguin, “Carbon Materials for the Electrochemical Storage of Energy in Capacitors,”*Carbon* 39, 937 (2001).

20. 这种新型电容器被称为“终极电容器”或者“超级电容器”：Joel Schindall, “The Charge of the Ultra-Capacitors,”*IEEE Spectrum* 44, 42 (2007); Phillip Ball, “A Capacity for Change,”*MRS Bulletin* 37, 1000 (2012).

图片说明

图1

图1描绘的是一个带正电的摆球左右振荡的过程。

（a）当摆球处于左侧最高点的时候，摆球的动能为零，势能达到最大值，电流为零（因为电荷的运动速度为零）。

（b）当摆球运动到最低点时，摆球的动能最大，势能为零，电流达到最大值，电流方向朝右。

（c）当摆球处于右侧最高点时，摆球的动能为零，势能再次达到最大值，电流为零。

（d）当摆球向左运动至右侧半弧的中间位置时，摆球具有一定的动能，也具有一定的势能，电流方向向左。此时的电流强度是变化的，因为电荷的运动速度正在加大，电流的运动方向也在变化。

图2

图2描绘的是无线电发射器和接收器。在发射器（上图）中，电流上下振动，产生电磁波。电磁波的频率和电流的振动频率一致。当电磁波接触到金属天线（下图）时，通过感应使得金属中的电子发生振动，电子的振动频率和电磁波的频率一样。在快易通系统、车库门自动开关系统以及无钥匙遥控器中，都用到了同样的物理学原理。

图3

图3描绘的是X射线扫描仪的工作原理。图的最上方是一个X射线管，电子流从左侧的导线流向右侧的屏幕板。电子流的突然减速会产生一个高频电磁波，叫作X射线。当这些X射线射向你的脚踝时，它们就会与你身体中的原子发生相互作用。一个原子中包含的电子数目越多，这个原子反射X射线、使X射线偏离原来轨道的能力就越强。X射线会被我们的骨骼反射，但却可以穿过我们的软组织，因此探测板会记录下除骨骼以外区域的高X射线通量。

图4

图4描绘了一个触摸屏中所使用的平行板电容器。两层透明的导电材料板被一层薄薄的绝缘体隔开，当你用手指触摸屏幕的时候，你的指尖携带的额外电荷会改变电路板上的电荷密度。

图5

图5描绘的是一架飞机机翼的横截面，从中我们可以看出机翼上下的气流运动状况。飞机的机翼和地面成特定角度，当气流碰到机翼底部时，就会发生向下的偏转。由于牛顿第三定律（所有的作用力和反作用力都是成对出现的），偏转的气流就会对机翼底部产生一个大小相等、方向相反的反作用力（这个反作用力被称为“升力”）。

图6-1

该图描绘的是一个液晶显示屏的像素。在上方的图（a）中，未经偏振处理的白光打在一个竖直方向的偏光镜上，其中只有电场在竖直方

向上振动的光才能穿过这个竖直偏光镜。在穿过液晶分子的过程中，光的方向会发生偏转，因此光线才能够通过第二个偏光镜，这个偏光镜呈水平方向。在下方的图（b）中，我们通过一个用透明导体作导电板的电容器对上述像素元件施加一个电压。此时，液晶材料会发生相的改变，液晶分子不再在第二块玻璃板处偏转至水平方向。此时，偏振光无法穿过水平偏光镜，所以这个像素处于黑暗状态。

图6-2

图6–2描绘的是半导体材料的PN结，也就是二极管的工作原理。在图6–2的上图中，左侧是N型半导体材料，这种材料中有多余的电子；右侧是P型半导体材料，这种材料中有多余的空穴，一个内部电场穿过这两种半导体材料的交界处。如果一个电流沿着这个内部电场的反方向强行通过两种材料的PN结，那么在这个交界处，电子会进入空穴并降低自身的能量，这个过程会释放出光子，从而形成一个发光二极管元件。图6–2的下图展示的是上述过程的反过程。我们用光线照射这个元件，电子就会从被填满的低能带跃迁至空的高能带中，低能带因此出现了空穴。二极管中的内部电场会将电子推向左侧，将空穴推向右侧。也就是说，在光线的照射下，二极管元件中产生了电流。这个装置就叫作光电二极管或者太阳能电池。

图7

图7描绘的是一辆会飞的汽车。在4个车轮的位置上装有4个小型喷气发动机。要制造出一辆这样的车，首先应该解决的问题是如何让车辆携带足够的燃料。这种燃料必须具有很高的能量密度，否则这辆车的行进时间将只有几分钟。

图书在版编目（CIP）数据

魔鬼物理学. 1，隐藏在日常生活背后的物理学知识 /（美）詹姆斯·卡卡里奥斯著；鲁冬旭译. --
北京：中信出版社，2018.2
书名原文：The Physics of Everyday Things: The Extraordinary Science Behind an Ordinary Day
ISBN 978-7-5086-8413-0
I. ①魔… II. ①詹… ②鲁… III. ①物理学－普及读物 IV. ① O4-49
中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第292248号

魔鬼物理学1：隐藏在日常生活背后的物理学知识
著者：［美］詹姆斯·卡卡里奥斯
译者：鲁冬旭
出版发行：中信出版集团股份有限公司
（北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编100029）
电子书排版：萌芽图文

中信出版社官网：http://www.citicpub.com/
官方微博：http://weibo.com/citicpub
更多好书，尽在中信书院
中信书院：App下载地址https://book.yunpub.cn/（中信官方数字阅读平台）
微信号：中信书院



魔鬼物理学 2

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi+U\psi=E\psi$$

迷人又有趣的量子力学

[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯◎著
(James Kakalios)
孔垂鹏　张竦竦◎译



爱看科幻小说？
知道其中隐藏的量子力学知识吗？
这本书不仅让你读懂科幻小说，
更会让你爱上物理。

THE AMAZING STORY OF QUANTUM MECHANICS

A Math-Free Exploration of the Science That Made Our World

中信出版集团

魔鬼物理学.2

——迷人又有趣的量子力学

[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯 著
孔垂鹏 张彧彧 译

中信出版社

目录

前言

第一部分 脑洞大开的故事

- 第1章 量子力学三部曲
- 第2章 得诺奖的光电效应
- 第3章 神奇的物质波
- 第4章 超能力般的粒子自旋

第二部分 探索未知的谜题

- 第5章 波函数的发现与认知
- 第6章 打开未来之门的薛定谔方程
- 第7章 著名的海森堡不确定性原理
- 第8章 平行宇宙中的曼哈顿博士

第三部分 原子的传奇世界

- 第9章 原子是我们的好朋友
- 第10章 或快或慢的原子核衰变
- 第11章 太阳中心的核聚变反应

第四部分 量子力学的神奇力量

- 第12章 水火不相容的费米子
- 第13章 如蜜蜂般团结的玻色子

第五部分 伟大的技术与发明

- 第14章 荧光材料和隐形墨水

第15章 “死光”：天使还是魔鬼？
第16章 半导体和二极管
第17章 晶体管和闪存设备
第18章 自旋电力学和硬盘驱动器
第19章 X射线视力和核磁共振成像
第六部分 开启未来世界
第20章 量子计算机和量子通信
第21章 太阳能电池和纳米技术
后记
致谢
注释
图片说明

献给托马斯，劳拉，戴维

——未来真正的创造者

前言

量子物理学？你正置身其中！

进入21世纪，我们仍然在期待能飞的汽车、喷气飞行背包、圆顶水下城市和机器人私人助理。对此，你可能和我一样沮丧。自20世纪30年代起，那些通俗科幻杂志和漫画书就向我们许诺：至2000年，人类将摆脱日常琐事和地球引力的束缚，迎来一个“乌托邦”式的闪亮新世界。跟今日的现实相比，我们发现，50年前的那些预言真是把我们骗得不轻。

不过……也不尽然。2010年，我们可以和地球另一端的人即时无线通信；笔记本电脑的计算能力远超科幻小说中房屋大小的计算机；我们可以利用核磁共振成像做出医学诊断，而不是靠开刀一窥究竟；从自动提款机到苹果手机，触摸屏随处可见。每天，我们接触到的自动化设备数量惊人，尽管它们当中没有哪个跟机器人罗比相似[1]。

这些美好的预测错在哪里呢？简单来说，他们预测了一场能源革命，而我们的革命却发生在信息领域。科幻小说中的喷气飞行背包和死光（death rays），需要以可储存巨大能量的轻型设备为前提。而作为常用储电设备的电池，其性能则受限于电池内部原子的化学和电学性质。尽管科学家和工程师们在研发新型储能系统方面足智多谋，却终究无法改变原子的属性。相对而言，信息只需要一个存储媒介和相应的智能解析。

此外，信息可以保存数千年。苏美尔人成功地实现了数据的长效存储，他们刻于泥板之上的楔形文字使我们得以了解6　000年前的会计制度和《吉尔伽美什史诗》。这些非常笨重的泥板现存于伊拉克，为了传递信息，古苏美尔人不得不将它们来回运送。今天，你无须再亲赴伊拉克阅读泥板上的文字，登录互联网，或者通过其他人发送到你的手机照片，便可浏览。

这些内容存储与传输方面的进步，得益于半导体装置（如晶体管和

二极管）的发展。而在通俗科幻杂志初现的年代，数据则存储于笨重的电子管中。首批计算机采用了数千个这样的电子管，以及由装满水银的玻璃管组成的继电器。当这些设备被半导体取代后，电脑的运算能力便呈指数式增长，电脑的尺寸也相应缩小。1965年，戈登·摩尔注意到，大约每隔一年，集成电路上的晶体管数目就会加倍。这一趋势持续了40年，并且为构成现代生活的技术创新奠定了基础。从20世纪30年代书本大小的收音机，到2005年口香糖大小的MP3播放器；从20世纪70年代砖头大小的移动电话，到现在体积小于一副扑克牌的手机，这些技术进步都依赖于信息存储和处理技术方面的持续发展。（如果能量存储技术的发展也遵循摩尔定律，即每两年存储能力增加一倍，那么1970年只能供电1个小时的电池，在2010年则至少可以供电100年。）

如果没有晶体管，计算机可能仍然在使用笨重的电子管，当电流通过时，每根电子管都会产生巨大的热量。如今，一个中等配置的笔记本电脑使用大约一亿根晶体管来存储和处理数据。如果将这些晶体管全部替换成电子管，每根电子管大约几厘米长，至少2.54厘米宽，再将它们分开放置以防过热，我们将会得到一台体积大过白宫的电子管计算机。显而易见，除了联邦政府和屈指可数的几家大型企业之外，恐怕没有几个机构能够负担得起如此壮观的计算设备。这样一来，我们将生活在一个几乎没有计算机的世界里，为数不多的计算机设备没有互联的必要，发展互联网也显得多此一举，商业、新闻业、娱乐业和政治活动也将受到与20世纪30年代一样的限制。假如我们经历了科幻杂志所预言的那种能源而非信息领域的革命，我们或许可以驾驶着喷气飞行背包帅气地上班，却不得不降落在没有手机、DVD（数字化视频光盘）、个人录像机、激光打印机以及个人电脑的办公场所。

另外，量子力学知识在固体物理学领域的应用，使这些电子设备的发展成为可能。当科幻小说家还在想象未来世界的图景时，工业实验室和研究型大学中的科学家们则正在利用他们对量子世界的新理解去发明晶体管和激光。这些最基本的设备构成了现代生活模式的基础，对电子消费品，乃至化学、生物学和医学领域都产生了深远影响。如果没有20世纪前25年少数杰出物理学家对原子和光之间相互作用的不断探索，我们今天的生活将迥然不同。这些量子力学的先驱者们认识到他们将改变物理学的面貌，却几乎没有预见到他们的工作也将改变未来。

***

在本书中，我将解释构成量子力学基础的关键概念，并说明这些概

念在研究金属、绝缘体和半导体的性质方面的应用——这些研究构成了固体物理学。我还将讲述，人们如何利用原子核及原子的磁学性质（量子力学的本质现象之一），通过核磁共振成像技术窥探人体的内部结构，并实现了计算机硬盘上海量信息的存储。量子力学带来的奇妙事物不胜枚举：像激光、发光二极管、U盘（一种移动存储设备）这样的设备；诸如材料的超导和玻色—爱因斯坦凝聚态这样的怪现象；再比如“更亮的光”和“更纯的白色”[2]。我们将看到，那些在过去50年中带来技术变革的量子力学现象，将对未来50年纳米技术领域的发展产生怎样的影响。

作为物理学的一个分支，量子力学已经给我们的生活带来了广泛影响，但遗憾的是，量子力学却背负着“古怪”和“不可理解”的名声。好吧，量子力学可能有点儿“古怪”，却并非不可理解。尽管量子物理学中所需的数学运算十分复杂，但对其核心原理的理解和描述却无须借助微分方程和矩阵运算。

我很想承诺，这将是一场“与数学无关”的讨论，但我必须坦承，这本书中会涉及少量的数学知识。（但愿你此刻正在家里阅读这本书，而不是还在犹豫是否购买。）与奠定量子力学基础的严格数学推导相比，这本书中使用的简单公式几乎可以说“与数学无关”。我使用的代数公式，在难易程度上与用速度和时间计算距离相仿。比方说，假如我告诉你我以每小时80千米的速度行驶了两个小时，你会知道我行驶了160千米，是经验驱使你使用“距离=速度×时间”这个简单公式得出此结论。这本书中涉及的数学知识，难度不过如此。

量子力学并非不可理解，却是名副其实地令人困惑。这并不是说应用量子理论描述事物本质属性时所使用的数学知识是多么的晦涩或复杂——如果不知道如何使用，一切数学运算都有难度，正如任何一门未被掌握的语言都令人费解。所谓“令人困惑”，也不是指那些探索现代技术背后机制的普遍经验有多么神秘莫测。相反，我指的是那些基本问题，例如在对一个量子体系的性质进行测定时究竟发生了什么，距离这个问题的首次提出已经过去了80年，而物理学家们对此仍然存在争议。量子力学的一个奇妙之处就在于，即使感到困惑，也不妨碍你合理有效地使用它。

在这本书中，我援引了一种“实用”的量子理论观，这种观点的优点在于暂且搁置疑虑，这与科幻小说或超级英雄漫画中经常出现的“脱离自然法则的奇迹”现象没有什么不同。我恳请各位物理学同行注意，为

了便于理解，我将舍弃一些详细周密的专业性表述，因为这本书的目标读者是那些非专业人士，他们对量子力学在构成现代生活方式的各种装置中所发挥的作用兴味盎然。诚然，对量子理论的诠释能力和“测量问题”的反思令人沉醉，但像晶体管这样的科学发明不能仅靠哲学讨论来实现。

尽管力求简化，在讨论量子力学时，那些与物质的本质属性相关的问题仍然难以回避。这本书中讨论了一些奇异的现象，比如当两个电子或原子距离太近时，它们会彼此“纠缠”，无法分辨。在此，我鼓励读者克服恐惧迎难而上，我将竭尽所能给出易于理解的推理和例证。

有关量子力学发展史的杰出著作已经有很多了，我在这本书中列出了一些。鉴于我并非科学史研究者，我将不会追溯物理学先驱们引领量子力学革命的过程，而是着重阐述他们发现的物理学原理，以及这些原理在固体物理学方面的应用。

[1] 机器人罗比是美国著名科幻小说家、科普作家、文学评论家艾萨克·阿西莫夫机器人系列作品中的一个角色。———译者注

[2] 这是真的！见本书第21章。



第一部分

脑洞大开的故事

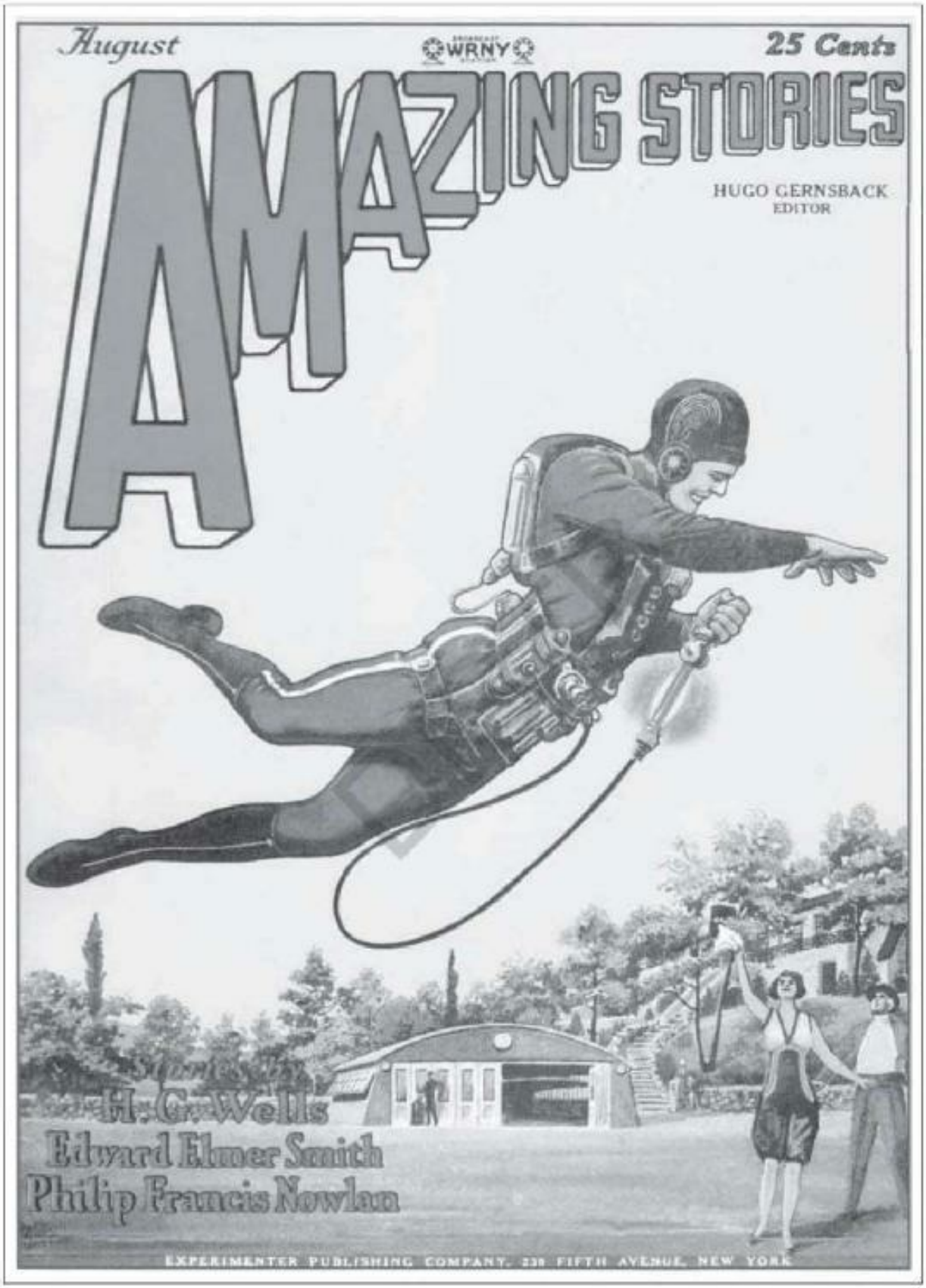

August
WRNY
25 Cents
AMAZING STORIES
HUGO GERNSBACK
EDITOR
H. G. Wells
Edward Elmer Smith
Philip Francis Nowlan
EXPERIMENTER PUBLISHING COMPANY, 230 FIFTH AVENUE, NEW YORK

图1–1 巴克·罗杰斯在1928年8月发行的通俗科幻杂志《惊奇故事》的封面上炫酷登场

第1章
量子力学三部曲

“未来”曾两度开启：1900年12月14日和1928年8月26日。1900年12月14日，马克斯·普朗克在德国物理学会的例会上做了有关“紫外灾难”问题解决方案的报告。他指出，原子只有在不连续跃迁的过程中才会触发能量损失。这一新的理论观点推倒了多米诺骨牌中的第一块，最终在20世纪20年代中期将物理学引向量子力学这一新的发展领域。1928年8月26日，在夏季之末，巴克·罗杰斯在通俗科幻杂志《惊奇故事》（*Amazing Stories*）上完成了他的处女秀。

创刊于1926年的《惊奇故事》，是第一本专门刊载科幻故事的杂志，出版人雨果·根斯巴克将此类故事命名为“科幻小说”（scientifiction）。该刊的座右铭是：“今日奇谈怪论……明日冷酷现实”。普朗克的突破性研究标志着一个新兴科学领域的诞生，它是一个属于“书呆子”的研究领域。而巴克·罗杰斯的登场则开启了极客们想象中的未来世界。（我在此声明，作为一位痴迷于科幻小说和漫画书的物理学教授，我既是书呆子，又是极客。）[1]

20世纪初，科学技术取得了迅猛发展，电报、电话和汽车的发明颠覆了我们的时空观，技术使世界不断浓缩。因此，《惊奇故事》的读者在1928年会对个人飞行座驾和分解射线的成功发明抱有期待，也许不足为奇。

菲利普·弗朗西斯·诺兰在他的中篇小说《大决战——公元2419年》（*Armageddon 2419 A. D.*）中描写了巴克·罗杰斯的第一次冒险，这篇小说发表在《惊奇故事》杂志的1928年8月刊上。次年，安东尼·罗杰斯这位20世纪兼25世纪的公民形象，以连环漫画的形式被刊登在多家报纸上，因此获得了“巴克·罗杰斯”的绰号。在探索斯克兰顿附近的一处废弃矿洞时，前空军军官巴克·罗杰斯因吸入了某种泄漏气体而进入假死状态，直到25世纪才苏醒，并且很快就适应了新时代的生活。诺兰笔下这位去到未来的英雄，就像马克·吐温笔下穿越回到亚瑟王朝的康州美国佬一样足智多谋。

在故事中，凭借未来世界的武器和在第一次世界大战中培养的军事才能，罗杰斯与一众士兵共同抵抗来自亚洲的邪恶“匈奴”侵略者，这些侵略者在22世纪早期征服了美国。事实上，20世纪三四十年代刊登在通俗科幻杂志上的很多故事中都存在两种截然不同的态度：它们对未来科学技术的持续发展保持乐观，对国际（或星系）关系的发展却保持悲观。

历史验证了科学的进步，也见证了持续不断的国际冲突。在第一次世界大战和第二次世界大战之间，欧洲各国战事稍歇，一场物理学革命于此时掀起，为《惊悚故事》（*Startling Stories*）中那些看起来不可思议的创新技术奠定了理论基础。“咆哮的二十年代”（RoaringTwenties）前半期，量子力学领域取得了新的进展，在普朗克、尼尔斯·玻尔以及阿尔伯特·爱因斯坦等人的初步猜测与尝试性探索的启发下，埃尔温·薛定谔和沃纳·海森堡分别独立建构了关于原子性质，以及光与原子之间相互作用的正式而严谨的理论。就在他们的科学论文发表的同一年，雨果·根斯巴克开始出版《惊奇故事》。量子力学绝非我们对自然的最终解释，但对固体物理学的发展而言却不可或缺。通过与19世纪电磁理论的结合，量子力学为当下的无线通信技术提供了蓝图。目前，致力于21世纪纳米技术研究的科学家们，仍然要仰仗量子物理学家在20世纪20年代所取得的那些成就。

或许，正是两次世界大战之间的短暂和平期，为物理学的上述发展提供了机会。德国、法国、意大利、英国、丹麦、荷兰和美国科学家之间的合作与交流，使物理学迎来了前所未有的繁荣发展时期，直到1938年欧洲战火重燃。物理学在与时间赛跑，并随着20世纪30年代原子核结构的发现而加快了脚步。就在德军突袭波兰的前一年，德国和奥地利的物理学家们发现，将某些质量较大的不稳定原子核分裂为质量较小的原子核时会释放出巨大的能量，比如，一磅铀由此产生的破坏力相当于8000吨TNT炸药（一种烈性炸药）。随后，量子物理领域的科学合作因地缘政治轴心的形成而破裂。20世纪40年代，物理学的研究重心从欧洲转移到美国。固体物理学的发展则不得不等到第二次世界大战结束，主要是在英、美两国。遗憾的是，在通俗科幻小说作者们描写的那些发生于遥远时空的军事冲突中，他们已精确地预见了一个残酷的事实：人性的发展将远远落后于技术进步。

正如第二次世界大战后物理学活动的温室从欧洲转移到美国一样，科幻小说的中心也经历了一次类似的转移。雨果·根斯巴克在1928年春

季出版的《惊奇故事》上发表了一篇题为“科学化的兴起”的文章。他写道：“有一件事令我们感到满足。可以毫不谦虚地说，在杰出的科幻小说作者群体中，90%都是美国人，其余则散布于世界各地。”这一断言忽视了儒勒·凡尔纳、赫伯特·乔治·威尔斯等欧洲科幻小说先驱们对科幻小说的开创性贡献。

尤其是凡尔纳，他被很多人称为“科幻小说之父”，因其对未来技术的精准描述（如“比空气重的飞行交通工具”、长距离水下航行、火箭探月等）和不可思议的异域场景构建（比如，中空的地球和“神秘岛”）而为人称道。这源于他遵循的是与科学研究相同的指导原则：无论是揭示新的科学规律还是创作一种新型推理小说，人们必须涉足未知的领地。只在安全而熟悉的道路上前行，终究无法抵达新大陆。爱德华·威尔逊曾经忠告世人：对于普通人来说，既然我们无法完成牛顿、爱因斯坦式的创举，那么最好从已知的世界出发，进行小范围的探索。比方说，假如世界真是平的，就应该避免离家远航，而尽量确保海岸线始终在我们的视线范围内。凡尔纳常常在既有科学发展的基础上展开合理推断，对一些细节（或者某种符合自然规律的神奇例外）进行巧妙处理，从而构想出一项有可能实现的技术。

儒勒·凡尔纳的冒险故事通常以该作品的出版年代为创作背景，传奇英雄将被在物理学看来不可能实现的传输方式带入充满异域风情的场所。他的第一部成功小说——《气球上的五星期》（*Five Weeks in a Balloon*），就是以这种模式创作的，故事中的三位冒险家于1863年前往未知的非洲地区探险。此后，他的《地心游记》（*Journey to the Center of the Earth*）、《海底两万里》（*20,000 Leagues Under the Sea*）、《从地球到月球》（*From the Earth to the Moon*）、《神秘岛》（*The Mysterious Island*）和《征服者罗比尔》（*Robur the Conqueror*）等作品，也都沿用了这一模式。然而，在他写作的第二部小说（尽管出版时间最晚）《二十世纪的巴黎》（*Paris in the Twentieth Century*）中，凡尔纳设计了一场他认为最与众不同的冒险。

这部小说是凡尔纳作品中的一个异类，写于1863年，讲述了在1960年的巴黎，一位年轻大学毕业生的日常生活和世俗体验。与凡尔纳对技术进步一贯持有的乐观态度相反，这部小说流露出他对未来世界的悲观绝望：人们将商业和工程技术视为最高价值，对文学、音乐等文化上的追求却不屑一顾。凡尔纳的出版商认为这份手稿谴责了商业的胜利，无法带来商业价值，便说服凡尔纳将它锁进了保险箱。直到20世纪90年代

末，人们用喷灯熔开了钥匙已遗失且一直被认为空无一物的保险箱，这部作品才重见天日。

这部短篇小说当然不可能被误认为典型的凡尔纳式冒险故事：故事的主人公是一位年轻的诗人，丢掉了在他叔叔银行的工作，无以为生，还与他仅有的几个朋友和爱人失去了联系。小说的结尾是，在一场凛冽的暴风雪中，这个年轻人漫无目的地在巴黎街头游荡，最终在一处葬有众多19世纪法国著名作家的公墓里失去了知觉。然而，它对20世纪的生活进行的惟妙惟肖的刻画，却是凡尔纳小说的典型特征。这部写于1863年的小说描述了依靠内燃机技术安静、有效地行驶的汽车（比尼考罗斯·奥托发明四冲程发动机早了13年，比亨利·福特开始大规模生产汽车早了40多年），其能量来源涉及氢气的燃烧；高架列车由压缩空气驱动（伦敦地铁在这部小说写作的当年开通，高架轨道直到5年后才真正开始建设）；城市的夜晚被电灯照亮（5年后，俄亥俄州的克利夫兰获得了“第一个电灯之城”的称号）；摩天大楼里有电梯（这又比纽约8层高的公平人寿大厦安装电梯的时间早了5年）。

凡尔纳设想，到1960年全球通信将成为现实，一个世界范围的电报网将把巴黎、伦敦、法兰克福、阿姆斯特丹、都灵、柏林、维也纳、圣彼得堡、君士坦丁堡、纽约、瓦尔帕莱索、加尔各答、悉尼、北京和努库希瓦岛[2]连接起来。不仅如此，他还想象出19世纪末才真正发明的“摄影电报”，这种电报“允许传送任何形式的文本和图像，无论是手写稿还是印刷稿；信用证或合同的签署可以在5　000里格[3]以外完成”。现代传真机就是量子力学在现实中的一种应用！

凡尔纳还在这部小说中指出，机械上的进步将引发军备竞赛，带来具有超强破坏力的大炮以及同样难以应付的装甲防护技术，世界各国只能束手无策地放弃战争。小说主人公的朋友们哀叹军人这一崇高职业的消失，他们注意到“法国、英国、俄国和意大利已经解散了它们的军队。战争引擎在19世纪就已经如此完善，以至于整个战争过程都显得荒谬可笑”。凡尔纳的确精准地预测到由洲际弹道导弹带来的“确保相互摧毁”战略，但他低估了人类为发动战争寻找借口的能力。

***

发明量子理论的那些年轻的物理学家和20世纪二三十年代的科幻小说迷之间有着深刻的相似之处，那就是他们都能超越现实——并非出于信仰，而是基于理性——像接纳现实一样接纳“不可能”，暂时放下内心

的疑问。

科幻小说拥趸们津津乐道于那些几乎不可能存在的事物，诸如超光速宇宙旅行、外星生物、能够发出致命毁灭光束的手持式射线枪、飞行汽车以及人形机器人。在量子力学诞生之初，物理学家们想分析令人费解的实验数据，就需要借助更加异想天开的观点。譬如19世纪下半叶，尽管光已经在理论和实验方面均被证明是一种波，它却能够表现出粒子行为；而所有固体物质的运动则有像波一样的表现。

尽管这些理论对宇宙的内部运行状况做出了精准的预测，但物理学家们所面临的研究工作却艰深复杂。因此，他们不阅读玄妙奇异的科幻冒险故事，而是选择老套的廉价侦探小说和美国西部影片来减压，也在情理之中。事实上，基于这些西部影片情节的可预测性，尼尔斯·玻尔（量子理论的建立者之一）和他的同事们在与神秘的原子物理“斗争”之余，建立了一套关于西部片情节发展的理论。据一位参与者回忆，在西部片中，尽管总是恶棍先举枪，但英雄总能先干掉对方。对于这种后发优势，玻尔提出了一个假说，他认为正是求生、自卫的本能使得英雄可以对恶棍的举动迅速做出反应，而恶棍处心积虑地思考何时举枪射击的过程，实际上阻碍了自己。他的一些学生质疑这种解释，他就用科学家的方式解决了这个问题：用玩具手枪在哥本哈根研究所的走廊里开展了实证实验（实验数据证实了玻尔的假说）。

大多数关于量子力学的讨论，无论是在专业层面还是公众层面上，通常先介绍那些挑战现有理论的实验发现，再讲述这些实验数据如何促使物理学家们提出新的观点，以解释实验结果。在这本书中，我们不会这么做。借用20世纪70年代电视节目《揭秘哥伦布》的做法[4]，我将先解释原子的奥秘，再描述相应的实验证据。

为了理解量子力学，我们必须接受三条貌似不可能的定律：

- 光实际上是由不连续的能量片段组成的一种电磁波。
- 物质由具有波动属性的不连续粒子组成。
- 无论光还是物质，任何事物都有“内禀角动量”或称“自旋”，且只有不连续值。

至此，我们有理由提出质疑：为什么我们没有更早地注意到这些？我们如此明察秋毫，怎么可能从未注意到光的粒子属性、物质的波动属性，以及二者持续存在的自旋？事实证明，这些在日常生活中很容易被我们忽视。尽管从生理结构上说人眼有能力探测到一个光粒子，但我们很少遇到单独或少量出现的光粒子。在晴朗的日子里，每平方厘米（大约相当于你拇指指甲的面积）范围内的光线，由每秒超过一万万亿的能量片段组成，所以它们的粒子属性不易显现。

第二条定律讨论了物质的波动属性。我在这本书的第3章中将会提到，棒球被抛出所产生的波长小于原子核尺寸的万亿分之一，因而检测不到。相较而言，原子内一个电子的波长则与原子的尺寸相当，所以当我们试图理解原子内部电子的行为方式时，这种波动性不容忽视。

原子与光在微观世界中相互作用，原子中电子运动的波动性对于研究相互作用的过程中如何吸收或失去光中包含的能量极其关键。因此，任何仅凭我们的日常经验建立的原子或光的模型，都无法对实验结果做出准确说明。有关“内禀角动量”或称“自旋”的第三条定律，其影响非常微妙，当两个不同电子或原子十分靠近，以至于它们的物质波发生重叠时，这条定律的影响力将开始显现。这一效应至关重要，也是理解固体物理学、化学和核磁共振成像的关键所在。

量子力学的这三条基本定律貌似荒谬，但我们必须知道，对自然现象的反直觉假设并不是量子力学独创的。提出一个看似古怪的想法来描述物质世界的某个方面，然后展开逻辑推理，再通过实验对推理的结果加以验证；如果这一古怪的想法与检验结果相符，就接受它。这正是我们对“物理学”的定义。

至少在过去的400年间，“古怪的想法”一直是物理学的标志。17世纪中叶，牛顿第一运动定律指出，任何运动中的物体都将保持原来的运动状态，直到外力迫使它改变运动状态。就个人经验而言，当我以每小时88千米的速度驾车沿高速公路匀速直线行驶时，我必须持续施加动力才能保持此速度。如果我把脚从油门上移开，这种匀速直线运动将无法保持（即使我的轮胎是笔直向前的），而会逐渐减慢直到最终停下来。这自然是由于其他外力对我的汽车施加了影响，比如空气阻力或轮胎和地面间的摩擦力。我们并不觉得摩擦力的影响奇妙而神秘，因为我们已经花了几个世纪的时间去接受“耗散力”的概念。这些力对我们来说是“无形的”，因此牛顿需要惊人的洞察力和强大的抽象思维能力，去想象在没有这些力的作用下一个物体如何运动。有关阻力和摩擦力的这一

古怪想法，适用于诸如人类和苹果等宏观世界的物体，它在与直觉相悖这一点上不亚于任何量子理论。

量子世界更加神秘，因为除了像原子队长和不可思议的收缩人这样的超级英雄之外，我们大多数人很少探索一个原子的内部。尽管如此，大约花了1　600年的时间，亚里士多德的观点才被牛顿第一运动定律推翻（亚里士多德认为，运动的物体减速并停下来不是因为摩擦力，而是因为它们渴望恢复到在地面上的“自然状态”）。

在量子理论出现之前的一个世纪里，迈克尔·法拉第和詹姆斯·克拉克·麦克斯韦等物理学家认为，电荷和磁体之间的感应力是由不可见的电场和磁场产生的。法拉第率先指出，电荷和磁体产生的“力的区域”（简称“场”），只能间接地通过它们对其他电荷或磁体的影响进行观测。当时的科学家对这种古怪想法嗤之以鼻，对他们来说，比法拉第的理论更糟糕的是他的出身：他是一个自学成才的实验科学家，没在像牛津、剑桥这样体面的大学学习过。但是，麦克斯韦认真研究了法拉第的理论，并从理论上证实了可见光由电场和磁场振荡产生的电磁波组成。

通过改变不同电场和磁场的振荡频率，可以产生不同波长的电磁波：从波长可达几米的无线电波，到波长小于一个原子直径的X射线。这两种形式的光都超出了我们肉眼可见的范围，但可以用合适的仪器检测。法拉第和麦克斯韦的奇特理论是我们理解各种电磁波的基础，如果没有电磁波，生活中就不会有广播、电视、手机以及无线局域网（Wi–Fi）。

如果物理学的进步在本质上包含对奇特理论的引入和接纳，那么为什么唯独量子力学以令人费解著称？从某种程度上说，这是由人们对量子力学基础理论的不熟悉导致的。在我看来，“电荷在空间中产生场”“即使在一个黑暗的房间里，我们周围也都是不可见的电磁波”，这类说法并不比“光是由被称为‘光子’的一系列不连续的能量单元组成的”更直观易懂。然而，诸如“磁场”和“无线电波”这样的词语属于常见术语，而“波函数”和“物质波”则不是——至少目前是这样。读完这本书，这些术语也将成为你的日常生活用语的一部分。[5]

[1] 但是很抱歉，女士们，我已经结婚了！

[2] 努库希瓦岛，马克萨斯群岛最大的岛，即法属波利尼西亚。

[3] 1里格≈5 557米。——编者注
[4] 我们会采用昆汀·塔伦蒂诺的方式来描述量子物理：先给答案，后提问题。
[5] 至少，这样你就能明白，为什么自己收到的聚会邀请那么少！

第2章
得诺奖的光电效应

在《惊奇故事》1928年8月刊的封面上（如图1–1所示），巴克·罗杰斯以在半空中背着飞行装置的年轻人形象炫酷登场。尽管喷气飞行背包从此以后就被打上“巴克·罗杰斯物品”的烙印（升空带也很快出现在巴克·罗杰斯的系列冒险漫画故事中），这期《惊奇故事》的封面实际上展现了爱德华·埃尔默·史密斯创作的《宇宙云雀号》（*The Skylark of Space*）的故事：科学家迪克·斯顿正在测试一种采用了新型化学物质的飞行装置。当电流通过该物质，并且这种“X元素”与铜相接触时，铜“原子的内部能量”就会被释放出来，为个人升空带、宇宙飞船（即书名中的“云雀号”）和射击“X音爆弹”的手持武器提供能量。

《宇宙云雀号》没有对“X元素”和电流共同作用下释放出来的铜“原子的内部能量”的确切性质做出清晰解释。一位与斯顿敌对的科学家说：“多年以来，化学家已经知道所有物质中都储存着巨大的原子内部能量，但一直认为它是‘被束缚的’，即不能被释放出来。但是，斯顿把它释放出来了。”即使在1928年，科学家们也知道怎样释放存储在分子内原子间化学键中的能量，如硝化甘油或TNT炸药。根据爱因斯坦的方程式$E=mc^2$，被“X元素”释放出来的巨大能量可以由质量转化而来。因此，存在这样一种可能性：当一艘由“X元素”驱动的宇宙飞船不慎被设置为最大推力时，加速度之大将导致船上无人能移动至控制台进行减速操作。只有当船上的铜燃料消耗殆尽，飞船才会停止运动。这种不受控制的加速度导致宇宙飞船以数倍于光的速度飞行，在试图说明爱因斯坦的质量与能量之间的相互关系原理时，这种情况与狭义相对论相悖。当斯顿思索如何做到与爱因斯坦的著名理论相一致时，他的同伴答道：“那是一种理论，而对距离的测量则是一种事实，这一点你已通过我们的实验获知。”就像其他的优秀的科学家一样，斯顿同一观测结果是爱因斯坦理论的正确性的最终仲裁者，“没错儿，又一个好理论被推翻了。”

《宇宙云雀号》中的科学家们不应该如此迅速地抛弃爱因斯坦的理论，因为他们利用“原子内部能量”的“X音爆弹”，证实了爱因斯坦的另

一项理论。对“X元素”的应用，与巴克·罗杰斯、飞侠哥顿以及其他通俗科幻小说和漫画中的英雄们使用的射线枪一样，都与该理论相去不远。这已经反映在本章开头关于量子理论的第一条定律中，即爱因斯坦在提出狭义相对论的同年所指出的，所有的光都由“子弹”组成，即被称为“光子”的不连续的能量片段。

现在，我们知道了什么是量子力学，那么在哪些问题上会用到这些新的物理学理论呢？前文提到的“紫外灾难”涉及一个物体发出的光的亮度与温度的函数关系。某些物质是黑色的，如石墨或煤尘，因为它们能吸收几乎所有照向它们的光。在平衡状态下，吸收的光能与放出的光能形成均势。这类黑体的光谱，即在特定频率下会辐射出多少光，仅取决于黑体的温度。无论是金属、绝缘体、气体、液体，还是人，只要温度相同，光谱便相同。

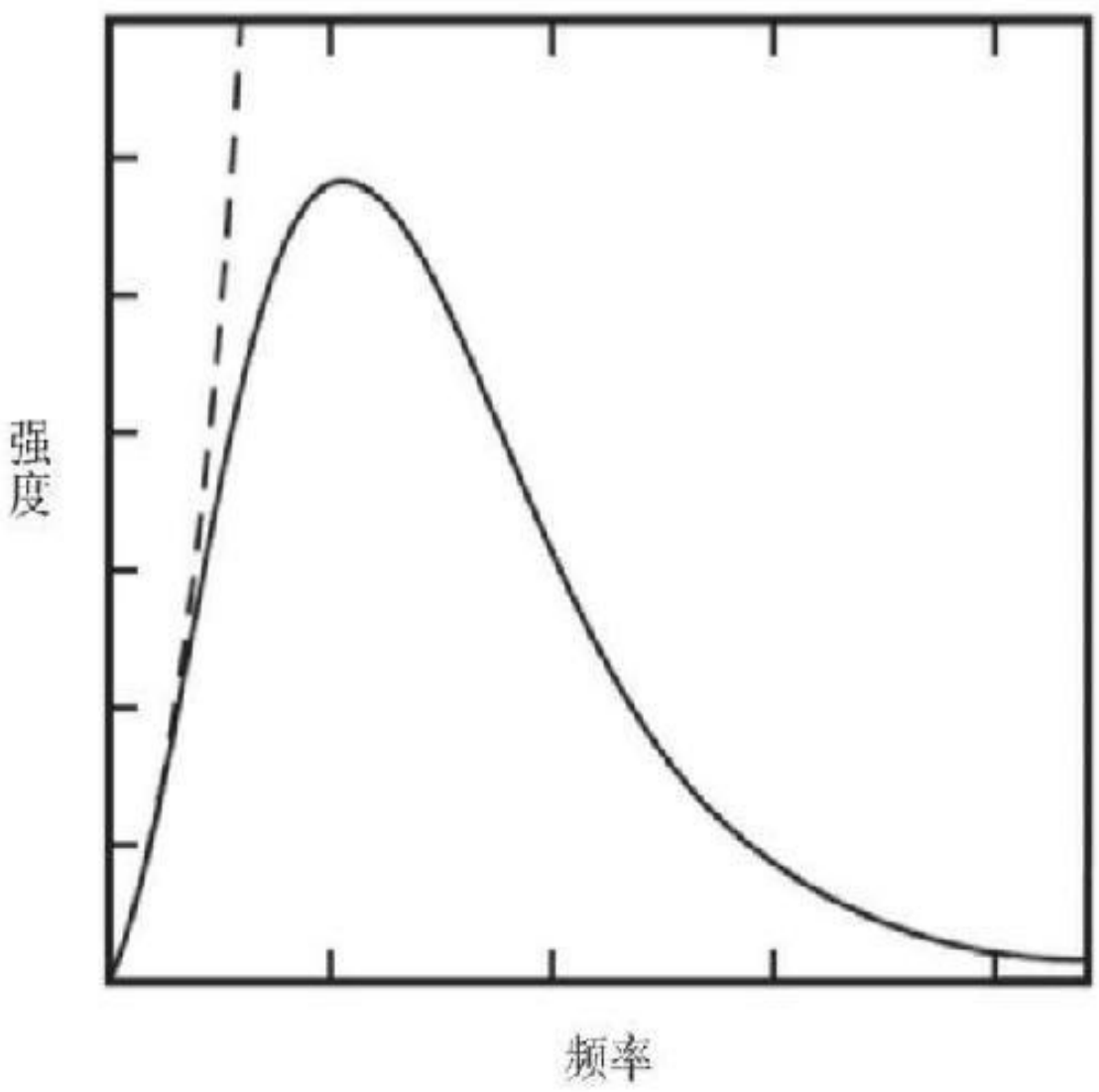


图2–1 黑体辐射的光强是光的频率的函数。实测曲线（实线）表明，辐射光的总量是有限的。而根据量子力学出现之前的物理学原理，曲线随着光的频率的增加而持续地上升。也就是说，经典物理学预测，物体即使在室温下也会在紫外区发出无限的光能。这一结论显然很可笑

19世纪下半叶由詹姆斯·克拉克·麦克斯韦建立的电磁波理论，能够解释一个发光物体在低频时的能量辐射情况（如红外区）。但在较高频率时（高于可见光频率，如紫外区），这一理论的预测结果却是荒谬的。计算表明，来自任何热体的光都会在光谱的紫外区变得无比强烈。如果真是这样，当人们注视壁炉里发光的余烬或打量烤箱的内部时，就会立刻被致命剂量的X射线烤焦。这种所谓的“紫外灾难”（如前所述，相较于其他人，这更是一场针对那些做出预测的理论科学家的灾难），在普朗克提出解决方案之后不复存在：当发光物体内部的原子发射光波

时，原子失去能量的过程仿若下梯子，且总是一级一级地往下走，不能在梯级间进行任何跨越。我们将在本书的第四部分解释为什么这可以解决“紫外灾难”的问题。现在，让我们看一下承载这些可能的能量值的“梯子”。

根据理论推导和大量的实验证据，普朗克深信光是一种连续的电磁波，就像湖面上的涟漪[1]。普朗克的“原子能量损失的不连续”理论也是相当谨慎的（是科学思维的创新应有的那种谨慎）。结果，普朗克刚因将“量子精灵”放出瓶子而获得很高的声望，关于原子和光如何相互作用的一系列实验难题就纷至沓来，需要超出普朗克意愿的更为大胆的进步。在科学家们对从发热物体上发出的导致“紫外灾难”的光进行测量的同时，菲利普·莱纳德则在着手研究暴露在紫外线下的金属释放出的电子。这将导致另一场灾难，无论是对科学还是对个人来说。

在19世纪晚期，物理学家们发现某些特定的材料，如镭和钍，会以“放射”的形式释放出能量。于是，科研人员开启了“图书馆模式”：对不同物质发出的不同类型的射线进行分类。他们采用了希腊字母（用α、β、γ等代替a、b、c等）命名法，从“阿尔法射线”开始——“阿尔法射线”是从元素周期表末端的某些元素的原子[2]中发射出的氦原子核（含有两个质子和两个中子）；然后是“贝塔射线”（高速电子束）；接下来是“伽马射线”（超高能量的电磁波辐射）。[3]威廉·伦琴当时发现一种放射线能使照相底片感光，穿透纸张和人体，却无法穿透金属或骨头，他将这种未知的放射线命名为“X射线”。伦琴的发现在射线的希腊字母命名法出现之前，他使用了字母“X”，因为它也被用来表示数学中的未知数（伦琴的“X射线”是科幻小说中许多带有未知的“X”属性的人或物质的原型，如X战警、X教授、X行星、X维度、X元素，以及“X—未知”）。随后的研究表明，X射线只是一种电磁波，也就是能量高于可见光和紫外线而低于伽马射线的光。

这些种类丰富的放射线为19世纪末的科学家们提供了物质研究的新工具。通过将不同的材料暴露于这些放射线中，并观察产生的结果，来探测原子的内部情况。这是有史以来第一次科学家们能够直接探测原子的内部情况。不可否认，这种检测方法不如钟表匠的螺丝刀那般精细，而更像粗暴的锤子，但却是当时唯一可用的检测方法。

莱纳德当时就职于海德堡大学，研究光照对不同种类金属的影响。他通过一系列仔细的实验发现，当被紫外线照射时，某些金属会释放出“贝塔射线”，即电子。实际上，他观察到的电子来自“电子的海洋”，

这也解释了为什么所有金属都是热和电的良导体。光承载着能量，物体吸收能量就会变热。金属中的一部分过剩能量会转移给电子，如果电子能量充足，就会从金属表面逸出，这种情形类似于高能量的水分子离开一杯热咖啡的液面而在杯子上方形成蒸汽。从此以后，菲利普·莱纳德开始系统地研究紫外线的频率和强度，对特定金属发射电子的数目与速度的影响。然而，麻烦也就此开始。

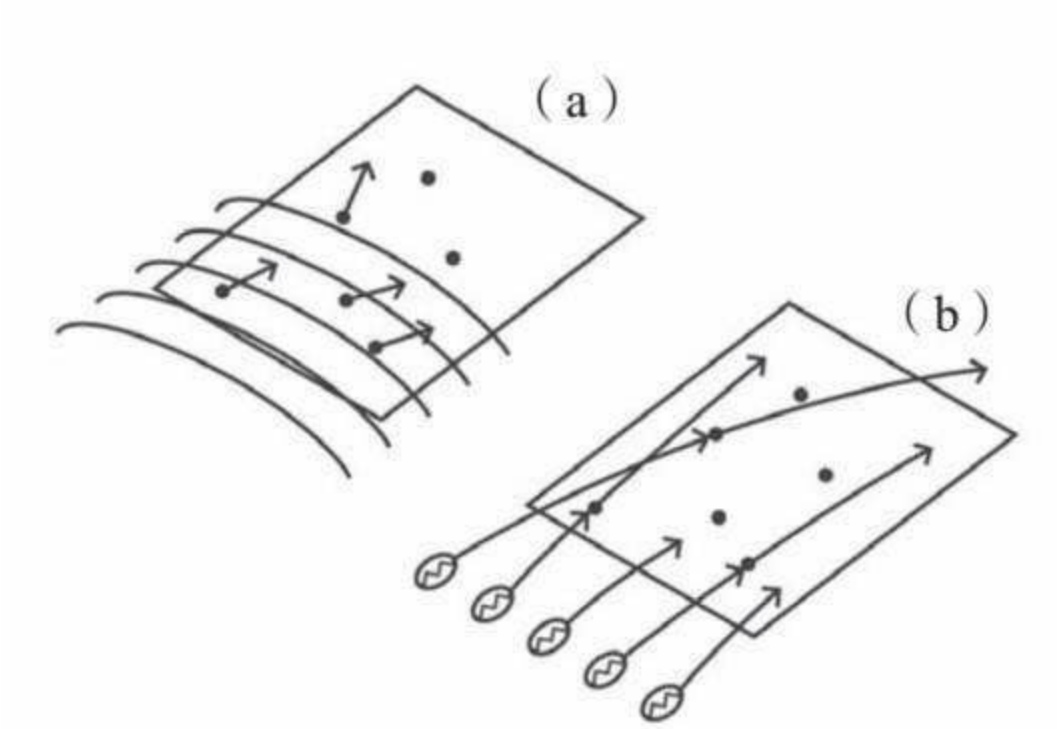


图2–2 沙滩上的小鹅卵石，它们既可以被海浪推上沙滩（a），也可以被“光子子弹”打到沙滩上（b）

将一种金属想象成沙滩，金属中的电子是沙滩上随机分布的小鹅卵石（如图2–2所示），拍打沙滩的海浪可以被看作莱纳德实验中照射金属的紫外线。这片假想的沙滩与海水之间有一个平缓的坡度，因此海浪必须对抗重力做功才能把小鹅卵石推上沙滩。当小鹅卵石爬上沙滩，我们就将它们视为“自由”的。作为我们想象的金属中电子的替身，它们代表莱纳德实验中那些被紫外线照射而从金属表面逸出的电子。在这个类比中，推动小鹅卵石来到沙滩上的能量理应来自海浪。海浪越大，小鹅卵石的能量也就越大。海浪运动越频繁，被推上沙滩的小鹅卵石的数量就越多。如果海浪较小，可能需要几个海浪才能把小鹅卵石推上沙滩。这完全合理，但却不是莱纳德所观察到的。

莱纳德发现，电子离开金属的能量不取决于光强。尽管提高光强确实能使每秒发射的电子数目有所增长，但并不能影响电子的速度。根据实验可以知道，每秒发射的电子数目是由波的频率决定的，即每秒有多少波峰到达，与振幅无关。此外，电子的发射有一个边界条件：如果光的频率低于一个特定值（该值随金属材料的不同而变化），即使光强再大，也没有电子逸出。在前文的类比中，这意味着如果每秒钟的波峰数目低于特定值，那么即使发生海啸也无法将小鹅卵石推上沙滩。一旦每秒钟的波峰数目超过特定值，那么即使非常柔和的海浪也能将小鹅卵石推上沙滩。因此，如果光的频率高于特定值，那么无论光的强度如何，电子都会立刻逸出。在光被视为连续的电磁波的背景下，理解这些实验结果极具挑战性，然而在本章开头，我们已经给出了这个问题的答案：光不是一种连续的波，而是由许多被称为“光子”的单个“能量弹”组成的。

实际上，光是由不连续的能量片段组成的，这如何解释莱纳德的实验结果呢？将小鹅卵石温柔地推上沙滩的那种连续、均匀的波浪，实际上是向小鹅卵石开火的机关枪射出的子弹。光是光子的集合，光的亮度由每秒内通过特定面积的光子数决定。对我们的“机关枪”来说，这相当于“子弹”发射的速率，也就是说，每秒发射的子弹越多，光的强度就越大。每秒射出一发子弹是一个弱光源，而每秒射出100万发子弹则是一个强光源。

如果你将照射金属的光想象成机关枪射出的子弹，而非连绵不绝的海浪，莱纳德的实验结果就变得完全合理了。他发现光越亮，从金属表面逸出的电子就越多。在“机关枪”这个类比中，更亮的光意味着每秒有更多的“子弹”去推动更多的小鹅卵石。光线进入金属和电子逸出之间没有时间间隔，因为一旦子弹击中小鹅卵石，并且有足够的能量让小鹅卵石蹦上沙滩，效果必然立竿见影。子弹的飞行速度越快，传输给小鹅卵石的能量就越多，小鹅卵石就能更快地蹦到沙滩上。也就是说，每个光子的能量越大，逸出的电子也会有更大的动能。如果子弹的速度太慢，它们可能会使小鹅卵石移动一小段距离，但不会到沙滩上。因此，这也解释了莱纳德观察到的“阈值效应”。唯一的问题是，莱纳德只考虑了光的频率，而没有通过控制实验中光的能量去改变逸出电子的能量。这使我们想到莱纳德的个人灾难，这一问题导致他陷入与科学毫不相干的痛苦。

如果光确实是由不连续的能量片段组成的，那么是什么决定了每个

片段的能量呢？普朗克对发光、发热物体的研究指出，原子只能通过有限的“跃迁”损失能量。为了使公式成立，他假设能量的“跃迁”与发射光的频率成比例。也就是说，发射光的频率越大，跃迁的能量也就越大。我将在后文中说明为什么这个假设成立。现在的重点在于，如果能量和频率成比例，那么我们可以说能量等于频率乘以一个常数。

我们经常处理简单的比例关系，比如，你以恒定的速度驾车行驶的时间越长，行驶的距离就越远。为了弄清楚行驶了多远，你需要用行驶时间乘以一个“常数”，即你的恒定速度（比如，每小时96千米）。那么，行驶时间（2小时）和速度（每小时96千米）的乘积将决定行驶距离（192千米）。同样地，光子的能量与频率成比例，频率和常数相乘就能得到能量值。普朗克使用字母h来表示这个常数，每一位后来的研究者也都沿用了这一常数，因此，h被称为“普朗克常数”。描述发光体中的原子以发射光的形式损失能量的公式如下：

能量=h×频率

这个公式从数学的角度看与“距离=速度×时间”没什么不同，让我们把一些数字代入这个简单的公式。测量能量的方式之一是用叫作“焦耳”的能量单位，这是以詹姆斯·焦耳的名字命名的，这位苏格兰物理学家证明了热和机械做功在能量上的明显等价性，从而为热力学领域奠定了基础。比如，以每小时96千米的速度掷出的大联盟棒球的动能是53焦耳，一辆以每小时96千米的速度行驶的汽车的动能是600　000焦耳。频率是用来描述一个周期性函数在给定的单位时间内实现的完整循环的次数，通常以每秒钟的循环次数来表示。幼儿园操场上的秋千前后荡一次需要2秒钟，每秒只能完成1/2个周期，因此它的频率是每秒0.5周。每1/10秒就能前后荡一次的秋千，每秒可以完成10个周期，因此它的频率是每秒10周。可见光的频率是每秒10^{15}周。为了使计算得到的热发光体的波长与实验测量的结果相符，普朗克不得不将常数h的值设为每秒6.6×10^{-34}焦耳，这个值非常小。

在验证自己的公式时，普朗克认为原子只能以特定的步幅损失能量，这些能级间的最小能量差应该是E=h×f。对于频率为每秒10^{15}周的光来说，通过该公式可以得出相邻能级间的能量差是6.6×10^{-19}焦耳。如果将光子的能量与快球所具有的50焦耳动能相比较，你会发现相较我们日常活动的能量规模，这一能量差小到几乎不可测量的程度。因此，量子世界的能量跃迁实际上是一种步幅非常小的变化。但步幅的大小无关

紧要，更重要的是步幅是“存在”的。

如前所述，普朗克的量子假说实际上有些保守。对他来说，光仍然是一种连续的电磁波，就像拍打沙滩的海浪一样。尽管他提出原子只能以不连续的步幅损失能量，但他并未大胆地表明，当原子以这种形式损失能量时，发射的光也是不连续的能量片段。然而，正如幽默作家詹姆斯·瑟伯所说：“天使畏惧处，愚人敢闯入。天使皆在天堂，愚人却活在世上。”在把量子微粒的属性拓展到光的问题上，普朗克的犹豫不决很可能是出于年龄考虑。毕竟，他提出量子假说时已经42岁了。这一重任被交给了一个26岁的年轻人，他提出，如果把光本身看作不连续的能量片段，就像海滩例子中的机关枪子弹，每颗子弹的能量值可由E=h×f计算出来，就可以对莱纳德的实验结果进行定量和定性说明。这个年轻人就是阿尔伯特·爱因斯坦。

当爱因斯坦撰写关于“光电效应”的论文时，他只是一个专利局的试用三级技术员，“光电效应”在当时被用来描述莱纳德的实验。不久，爱因斯坦的境遇发生了改变：他的这篇论文发表于1905年，同年他又发表了狭义相对论，随后发表了描述能量和质量间转化关系（$E=mc^2$）的论文；单是这一年发表的另外两篇从原子尺度解释布朗运动和扩散过程的论文，便足以稳固他作为顶级理论物理学家的地位。这些论文发表后，爱因斯坦在短短几年内多次被授予教授职位，各种荣誉也接踵而来。大多数科学家都会因自己的研究与爱因斯坦相关而激动不已，除了莱纳德。原因很简单：爱因斯坦是犹太人，莱纳德则是一名狂热的反犹太分子，就连阿道夫·希特勒也称他为“首席雅利安物理学家”。

因此，莱纳德有关紫外线对金属影响的实验给他个人带来了灾难。莱纳德竭尽所能地抨击爱因斯坦及其对“光电效应”实验的解读，以致在学术界身败名裂。

爱因斯坦是幸运的，莱纳德并非唯一强烈反对“光由不连续的能量片段组成”这一假说的物理学家。包括美国物理学家罗伯特·密立根在内，几乎所有物理学家都曾深信光是一种连续波，而爱因斯坦的理论不可能是正确的。（他的原始论文标题将自己的理论描述为“试探性观点”，巧妙地表达了“这不是一个严密的理论，但如果它被确认是正确的，我就应该得到应有的声誉”。）我之所以说爱因斯坦幸运，是因为他的观点最终被密立根证明是正确的。作为当时最严谨细致、天赋很高的实验科学家之一，密立根用了10年时间去证明爱因斯坦是错的。但最终结果显示，爱因斯坦的假说是对“光电效应”唯一合理的解释。尽管密

立根仍然认为爱因斯坦的光子理论是疯狂的，但他还是忠于自己的实验数据。这些数据不仅明确地支持了爱因斯坦的观点，也为他自己赢得了诺贝尔物理学奖。爱因斯坦的“试探性观点”如今已被广泛接受，爱因斯坦获得的诺贝尔物理学奖，并不是因为他在相对论方面的贡献或$E=mc^2$，而是因为他提出的“光电效应”定律，以及引入“光子”这一概念（尽管吉尔伯特·路易斯于1926年才创造了“光子”一词）。

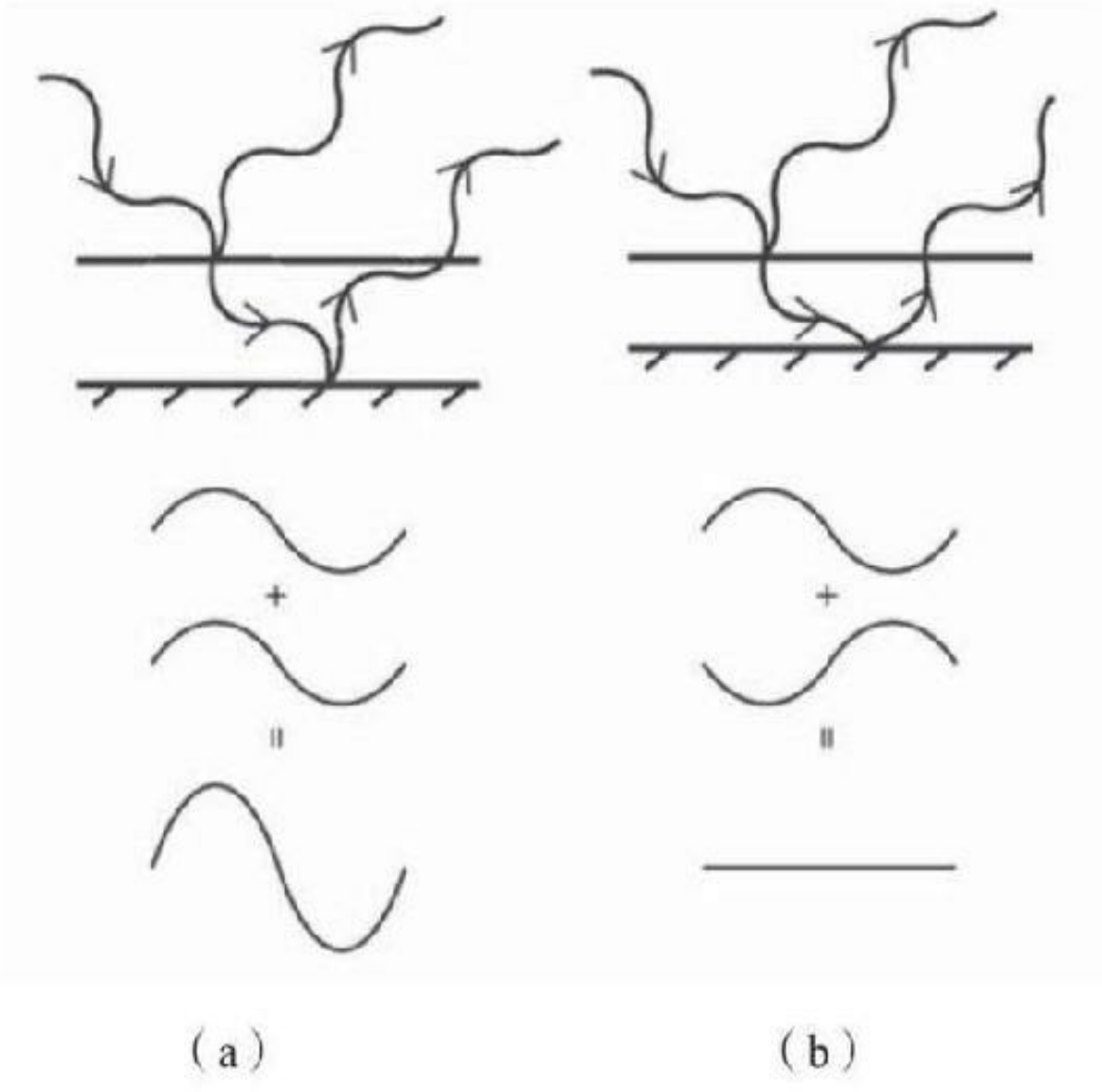


图2–3 光波在光滑的油层顶部和底部反射的示意图。在图2–3（a）中，光的波长和油层的厚度，使从上表面反射的波和穿过油层并从下表面反射后离开油层的波发生了相长干涉。在图2–3（b）中，光的波长和油层的厚度产生了相消干涉，此时，在上表面观察不到任何光

长久以来，基于大量有说服力的实验证据，很多智者都坚信光是一

种波。只需给出一个例子便可以说明光的波动属性，想一想暴风雨过后油层表面呈现出彩虹的颜色。任何居住在城市或在凌乱污秽的道路上驾车行驶的人，对被雨水浸透的潮湿地表的薄油层反射的光线光谱都不会感到陌生。在这种情形下，油被水排斥，从而形成了可能只有零点几毫米厚的可以自由移动的薄油层。油层的表面很难均匀分布，因此油层的厚度因地而异。射向油层的光，一些会在上表面发生反射，另一些则会穿透油层，然后从油水的分界线处反射回来。如图2–3所示，如果油层上某一点的厚度恰好等于一种特定颜色光的波长的1/4，[4]则从上表面反射的光和穿过油层反弹回来的光将恰好“同相”，它们会发生相长干涉，该颜色的光变得尤为明亮。而此处所有波长不是油层整数倍的有色光，则会发生“相消干涉”，颜色不会被有效地增强。上述现象被称为“干涉”，是波的标志性特征。

因此我们必须厘清，为什么各种光现象显示光是一种波，而它实际上却是由光子组成的。一个容易想到的解释是，光的波动性质是许多光子相互作用的累加表现。唉……如果真的这么简单就好了！考虑如下情形：如果向薄油层发射的不是连续光束，而是每次一个光子，则光子会从油层的上表面或下表面反射回来，并被某种光传感器检测到。每当有光子从油层表面反射回来时，我们就会在传感器的特定位置观测到一道闪光。当许多这样的光子被反射回来后，这些闪光形成的图案将是一个干涉图案，与使用连续光束的情况相同。换言之，即使光子逐一击中薄油层，它们经过反射而被叠加起来，也会产生像波一样的相长干涉图案。

从技术上讲，光子被定义为辐射场的激发量子。是的，这种解释对我们有益！为了达成目的，我们先接受光子的如下概念：光子是以光速运动的离散实体，它具有确定的能量（根据E=h×f，是由光的频率决定的）、动量（根据“波长=光速/频率”，是由波长决定的）和内禀角动量（光子的“自旋”=h/2π，沿光子的运动方向进行测量）。光子在运动时不会像涟漪那样扩散，而是保持传播方向不变，直到与物质或其他光子发生相互作用。诸如“光子有多大”“光子究竟是波还是粒子”这样的问题，没有简单或令人满意的答案。如果这些问题令你感到困惑，欢迎加入我们！这是一个拥有许多杰出人物的庞大组织，领军人物是在量子力学发展早期引入“光子”概念的爱因斯坦。诚如爱因斯坦所言：“50年的深思熟虑并未使我接近‘光子是什么’这一问题的答案，今天所有人都认为自己知道这个问题的答案，那不过是自欺欺人。”

[1] 例如，太阳光穿越宇宙的真空到达地球，不需要介质就能传播是电磁波的一大特性。

[2] 当原子核发射出一个阿尔法粒子，它会衰变成另一种元素，具体讨论见第三部分。

[3] 乔治·伽莫夫，天才物理学家和著名恶作剧者，一度将“Hans Bethe”（读作“贝塔”）添加为他和他的研究生埃尔佛·阿尔法一起撰写的论文的共同作者。如此一来，在科学论文索引中这篇文章的作者名单将是：α，β，γ。

[4] 对于薄油层，产生相长干涉的厚度应是光的波长的1/4；而对于上下有空气的玻璃板，产生相长干涉的厚度应为光的波长的1/2。

第3章
神奇的物质波

《科学奇妙故事》（*Science Wonder Stories*）1930年2月刊的读者们有幸读到了激动人心的《死亡飘带》（*Streamers of Death*）和《来自木星的救援》（*A Rescue from Jupiter*）；他们“前往”《双珀斯之地》（*The Land of the Bipos*），并“拜访”了《百人世界》（*The World of a Hundred Men*）。那一期的封面图片呈现了“双珀斯”故事中的一幕：两名闯入桑伯恩博士家庭实验室的盗贼，被困在了一个大玻璃装置里，桑伯恩博士当时正在探索将生物体传送到“另一个世界”（文中并未明确说明“另一个世界”是在现有宇宙中，还是在其他地方）的方法。图中足以容纳两位成年人的玻璃装置被称作“阴极射线管”，尽管从外观上看，它与老式电视机中的阴极射线管完全不同。桑伯恩现身后扳动开关，将两名盗贼转变成电流。随后，两名盗贼以光速前往“双珀斯之地”，在那里被重新转化成人形。“双珀斯”是一种身高约0.9米的企鹅，显然是一个智慧生物种群。这个故事中的传送手段，可能是《星际迷航》（*Star Trek*）中著名的“传送装置”的远祖。桑伯恩仅凭一己之力便创造了如此超凡的科学奇迹，但或许我们不应该大惊小怪，因为桑伯恩博士的日常工作是……一名药剂师。

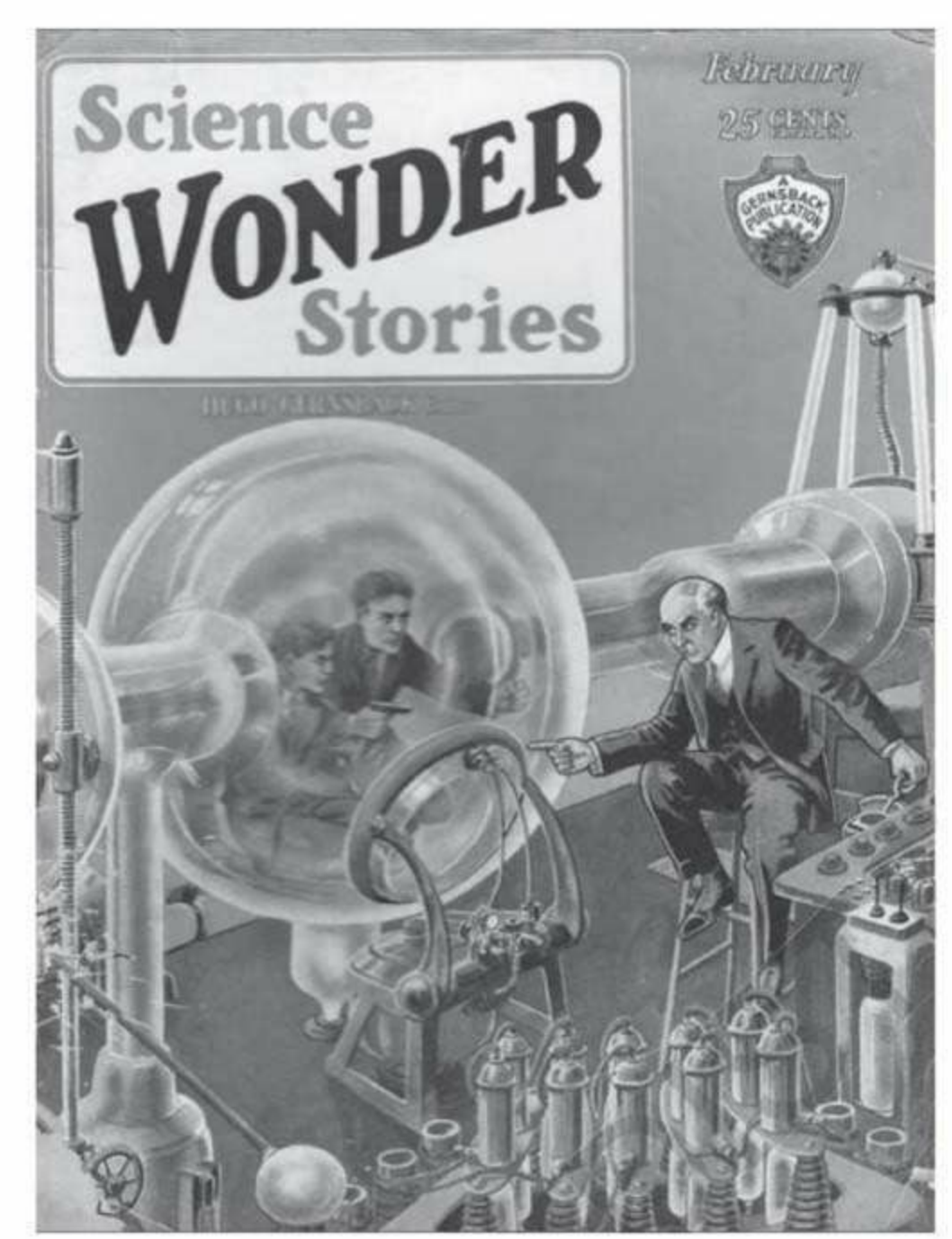


图3–1 桑伯恩博士准备测试他自制的传送装置（看起来就像一根巨大的电子管）。在《科学奇妙故事》1930年2月刊中，这个传送装置把两名闯入桑伯恩实验室的盗贼传送到了“双珀斯之地”

《科学奇妙故事》不仅刊登充满奇思妙想的科幻小说，也对现实世界中的科技发展现状进行描述和讨论。1930年2月刊的“研讨专栏”转载了一篇有关“人类能否摆脱引力束缚”的论文，并附上了一些资深专家的来信。应杂志要求，沃尔夫的德语论文被翻译成英语。沃尔夫引用了美

国物理学家查尔斯·布鲁斯的调查报告来博人眼球，宣称发现了一种硅酸盐成分的材料（但具体成分只有布鲁斯知道），仅表现出9.2米/秒^{2}的重力加速度，而不是普通物质9.8米/秒^{2}的重力加速度。“如果这是真的，它将是一项了不起的成就。”沃尔夫肯定地说。因为“通过增加这种神秘物质的有效性能，人们可能会摆脱引力而获得近似或完全的自由，让我们拭目以待”。

然而，沃尔夫认为我们不应该对此抱有期待，因为随后他便指出，这样一种材料与牛顿的万有引力定律之间存在着“不可调和的矛盾”。万有引力定律表明，无论由何种物质组成，所有下落物体的加速度都是相同的。沃尔夫提醒读者，布鲁斯的报告“只能当作小说阅读”。如果万有引力定律当真有例外和偏差，此前必然会以各种各样的方式出现，而无须通过神秘物质的发现来认清这一点”。“飞行汽车”是一种空想，早在1930年就有人证明了！但接下来，沃尔夫犯了计算上的错误。他认为已有化学燃料会将任何宇宙飞船限制在距离地表400千米以内的高度，远小于384 000千米的地月距离，据此否定了太空旅行的可能性。

这一点遭到了《科学奇妙故事》编委会成员们的质疑，特别是来自马萨诸塞州伍斯特市克拉克大学的罗伯特·哈金斯·戈达德。戈达德在信中指出，1919年他发表在学会（资助他做火箭研究的史密森学会）杂志上的论文已经证明，多级火箭可以摆脱400千米的飞行高度限制，美国国家航空航天局在戈达德的论文发表50年后即采用了这种设计。尽管我们对“飞行汽车”和“永动机”[1]的期待破灭了，但科幻小说中描写的乘火箭去月球或更远地方旅行的情节却成真了。

戈达德是一位早期的杰出科学家，他的研究为很多科幻故事的创作提供了灵感，他的研究领域和课题又受到科幻小说的影响。在作为科幻迷写给赫伯特·乔治·威尔斯的一封信中，16岁的戈达德说阅读《世界之战》（*The War of the Worlds*）对他影响很大，以至于不超过一年时间，他就“认为‘高空研究’领域是当下最令人着迷的研究方向”。戈达德当然不是第一个在科幻小说中找到灵感的科学家。出生于特兰西瓦尼亚的科学家赫尔曼·奥伯特被誉为“欧洲火箭之父”，11岁时他阅读了儒勒·凡尔纳的《从地球到月球》，这部作品为他的整个学术生涯指明了方向。奥伯特和他的学生韦纳·冯·布劳恩担任了1929年弗里兹·朗拍摄的科幻电影《月里嫦娥》（*Women in the Moon*）的技术顾问。这部影片中的火箭发射倒计时，无论在荧屏上还是现实世界中，都是第一次出现。

除了科幻小说，《科学奇妙故事》还设置了“什么是科学”“科学问答”，以及“本月科学新闻”等固定栏目，向读者普及真实的科学知识。“本月科学新闻”栏目刊载过一条题为“电子的双重性质被发现”的简讯，全文如下：

> 英国科学家乔治·佩吉特·汤姆森在物理学领域有了新发现。他指出，电子既像飞行的粒子，又具有波的特征。他将金、镍、铝和其他金属碾压成厚度仅为金箔厚度1/10的薄片，再用电子击打它们。穿过薄片后，电子与感光底片接触成像，得到了同心圆或其他圆形图案。

即使有对真实反重力屏障的化学成分的详尽描述，其意义和影响力也无法超越电子“二象性”的发现。

***

本章开头的第二条量子定律指出，正如光具有粒子属性一样，物质也相应地具有波属性。与上一章提到的光电效应不同，物质的奇特对称性假说的提出，并不是为了解决有悖于经典物理学理论的神秘实验现象，而是因为这是一种奇特的对称性。

1923年，路易·维克多·德布罗意公爵（没错儿，他既是一位物理学家，也是一位货真价实的法国公爵）被“光是由微小粒子组成的”这一反直觉的观点深深吸引，并提出有一种波（原名“导航波”）与电子、质子和原子等真实粒子的运动相关。德布罗意认为，此前之所以未探测到这种“导航波”，是因为它的波长与运动物体的动量成反比。也就是说，物体越大（越容易探测），它的“导航波”的波长越小。

如何验证“波与物质的运动相关”呢？我们在上一章提到，白光在浮在潮湿地面的薄油层上反射形成含有多种颜色的光谱，这种干涉效应便是对这类波存在的一个绝佳证明。回顾一下前文的内容：当薄油层的厚度恰好等于给定有色光波长的特定比例时，从上表面反射的这种颜色的光波，和那些穿过油层从下表面反射回来再从上表面射出的光发生相长干涉。在这种情况下，我们看到的光的颜色变得更加明亮。而其他颜色的光波则发生相消干涉。因此，最终的结果是：当白光照射到薄油层上，其中一种颜色在某一点上的反射特别明显；因为油层不同，位置的

厚度各异，所以我们能在油层表面观察到不同的颜色。

一个油层的厚度为数千纳米（1纳米大约是三个碳原子并排时的长度），而可见光的波长范围是从红光的650纳米到紫光的400纳米。因此，只有厚度在可见光波长几倍范围内的薄油层，才能呈现出前文所述的干涉图案（如果油层太厚，光在穿过油层时极有可能被吸收，而不会经反射后回到油层的上表面）。如果想利用类似的干涉效应去验证物质的波属性，我们先要了解“物质波的波长”。德布罗意指出，对任何运动物体而言，其“导航波”[2]的波长与动量之间的关系如下：

$$动量\times波长=h$$

这个公式表明，动量越大，波长越小，两者的乘积是一个常数——德布罗意认为它应该是普朗克常数。同样地，从数学的角度看，这个公式和上一章提到的距离与时间的关系式，即距离=速度×时间，其实大同小异。为了测算驾车从密尔沃基到芝加哥的时间，我们注意到距离是常量，约为192千米，不能更改。如果我们的平均速度是每小时96千米，那么根据公式，行驶时间为2个小时。如果速度更慢，行驶时间会更长；想要将行驶时间缩短至1个小时，行驶速度必须达到每小时192千米[3]。从理论上讲，只要我们愿意，行驶时间可长可短。为了使等式成立，在距离不变的前提下，改变行驶速度即可。

物体的动量被定义为其质量与速度的乘积。物体质量越大，特定速度下的动量越大，越难停下来。以相同速度奔跑的橄榄球中后卫和芭蕾舞女演员，你更希望与谁相撞？如果将大联盟快球的质量和速度带入德布罗意波长公式，我们就会发现快球的物质波波长小于一个原子核直径的$1/10^{15}$。任何你能想到的结构都无法使棒球的干涉效应得以显现。

使物质波波长增加的方法之一是减小物体的动量，因为波长与动量的乘积是恒定的，而最简单的方法则是考虑质量更小的物体。换言之，越小的物体，动量越小（比如，芭蕾舞女演员比橄榄球中后卫的动量更小），物质波的波长越大。一个电子的质量显然比一颗棒球的质量小得多，相应地，动量也更小。即使电子以0.1倍的光速运动，它的动量也只有棒球动量的$1/10^{24}$，而它的物质波波长则是棒球的10^{24}倍。对这样一个电子来说，其物质波波长大约是1/3纳米，约等于一个原子的直径。为了观察能够反应物质波动属性的干涉效应，我们需要将一束电子发射到厚度仅为几个原子的“薄油层”上。这一厚度虽然小，但幸运的是这种“油层”是天然存在的，我们称之为“晶体”。

一块方糖大小的任何固体都有将近10^{24}个原子。这些原子的排列方式、化学成分以及与相邻原子的连接特征，决定了该固体是可导电、有光泽（即反射光），如金属；还是不导电且对于可见光透明，如钻石。考虑一下碳原子，在化学上一个碳原子一般具有4个化学键。一堆碳原子连接的方式有很多，如果让它们以一种无序、任意的方式连接，最终会形成烟灰[4]结构。如果小心地放置每一个碳原子，使其彼此相连，每个碳原子的4个化学键都有理想的强度和位置，这种均匀、周期性的排列方式形成的是钻石结构。从化学的角度看，钻石与烟灰无异，因其皆由碳原子组合而成。然而，它们却有截然不同的结构（钻石坚硬，烟灰质软）、导电性（烟灰是电的良导体，钻石则是理想的绝缘体）、光学特性（烟灰吸收可见光，呈黑色；钻石则是透明的）和金融属性（钻石因稀有而价值不菲，烟灰则一文不值）。如果烟灰和钻石的化学成分完全相同，那么它们之间的属性差异必然归因于碳原子的排列方式。直到薛定谔和海森堡建立了完整、正式的量子力学理论，我们才能深入理解，为什么碳原子在一种环境下能够形成某些类型的化学键，而在另一种环境下结果却大相径庭。在后面的章节中，我们会讨论如何用量子力学解释化学。而眼下令我们感兴趣的是：对于特定的固体，原子像杂货店中待售的橙子一样以某种方式排列，这种排列方式使大尺寸、三维、均匀的晶体结构成为可能。

如图3–2所示，对于干涉实验，这些原子的层状排列可被视为原子尺度的“油层”，均匀的层状结构可以反射穿透其表面的电子束，每层的厚度都是一个原子大小，刚好是这些电子的物质波波长的特定比例。因此，如果将一束电子以适当的速度发射出去，其动量将使得物质波波长与晶体中原子层间的距离相当。射入的电子会被晶体中每个原子周围的电子所排斥，因为同性相斥。鉴于电子束和晶体内电子之间的碰撞都是随机的，有人认为，无论从哪个方向看，散射电子的强度应该是均匀的。但量子力学告诉我们，事实并非如此。

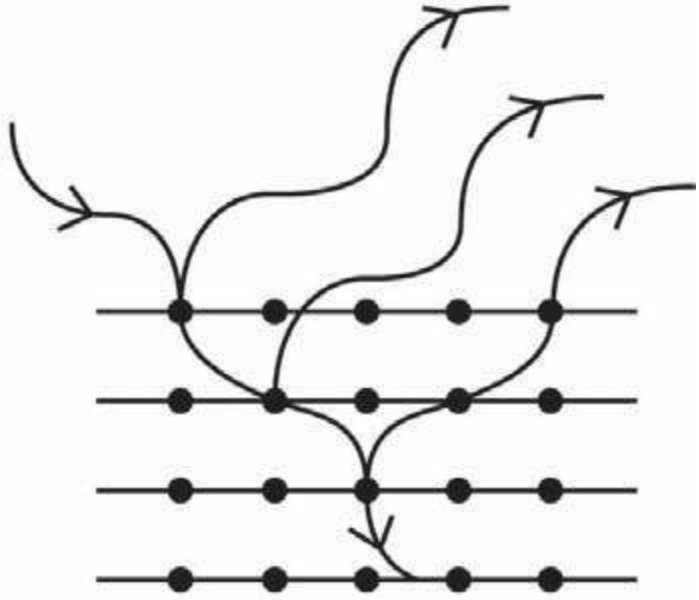


图3–2 电子的物质波在晶体中的原子晶面处发生散射的示意图。如果固体中原子间的距离与电子的物质波波长相当，就可以观察到散射电子的干涉图案。在发生物质波相长干涉的方向上，电子的强度较高；在发生物质波相消干涉的方向上，则不会观察到电子

当光在油层上发生散射时，入射的白光中包含所有颜色，但只有某些颜色的光发生了相长干涉。同样，我们发现散射电子的强度也不是均匀的。在某些区域我们会发现高强度的散射电子，而在其他区域则没有电子，得到的图案也如我们预期的那样属于干涉波，而不属于粒子碰撞。由图3–3可知，绿色激光穿过细金属丝网和电子束穿过石墨晶体后产生的两幅干涉图案惊人地相似。绿色激光的波长远大于电子束的物质波波长，金属丝网中线与线的间距也相应地大于碳晶体中的原子间距。但如果晶体中均匀原子层的散射电子强（在电子具有合适的动量，使得它们的物质波波长等于原子间距时），它们就会显示出一样的干涉图案，就像波长与晶体中原子间距相同的X射线从同一晶体上反射后的结果一样。这种干涉图案不仅适用于散射电子，也适用于那些穿透晶体薄片的电子，正如1930年2月刊的《科学奇妙故事》中那条关于汤姆森实验的简讯所说的那样。

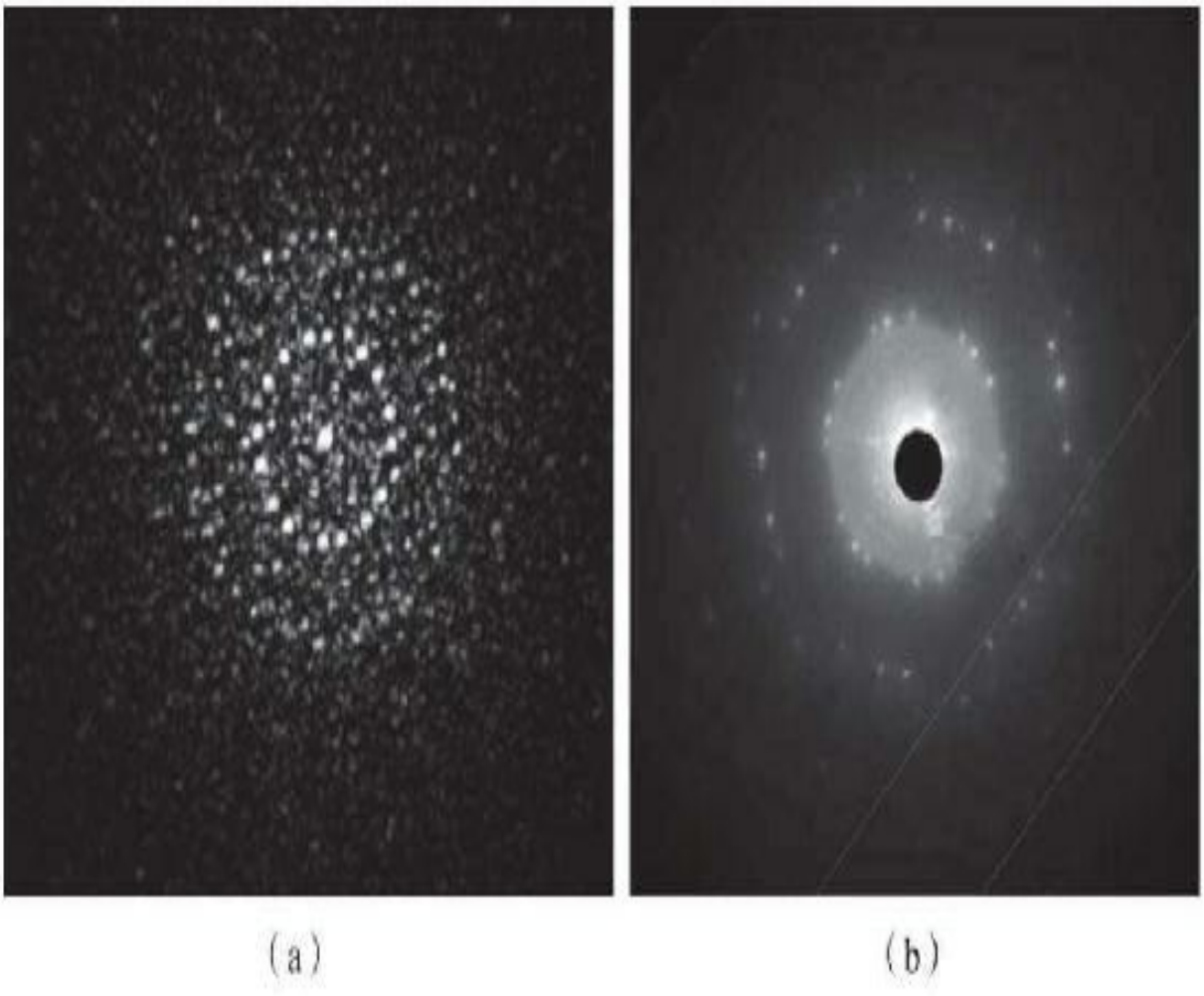


图3–3 光的衍射（a）和电子衍射（b）示意图。让一束绿色激光穿过细网状的金属丝屏风（和纱门相似），打在离屏风约一米远的墙上，可以得到a图。散射的光呈周期性排列，产生对称的相长（明亮的绿点）和相消（暗区）的干涉图案。在b图中，阴极射线管中的电子束穿过石墨晶体，通过选择电子的动量，可以使电子的物质波波长等于晶体内原子间的距离。晶体中的原子对电子的散射与细金属丝网对激光的散射方式相似

与前一章所述光子的情形相似，这种干涉效应并不是大量电子相互作用的波状产物。在图3–3中，每当有电子穿过晶体，击中一块有化学涂层的屏风时，屏风就会发出闪光，电子因此被探测到。对此，你可能并不陌生，这正是老式电视阴极射线管的工作原理。（现代液晶显示器的工作原理与此不同。）通过减小射向晶体的电子束的流量，我们可以将击中晶体的电子数目控制为每隔几秒一个，那么，我们看到的将是不完整的干涉图案，而只是电视探测器显示器上的一系列不连续的闪光。我们向屏风发射更多电子，就能得到更多闪光。如果我们记录下每道闪光出现的位置，再将它们叠加起来，就会看到如图3–3所示的干涉图

案。倘若硬球般的电子与晶体原子中的电子发生碰撞，然后随机向各个方向运动，我们将会看到亮点均匀地分布在屏风上。

X射线相当于波长约为一个原子直径的电磁波，与我们在散射实验中使用的电子束一样。X射线被晶体内原子中的电子散射出来，其中的原理比电子之间的相互排斥复杂得多。但我们可以降低光的强度，使X射线中的光子同样以每隔几秒一个的频率击中晶体。探测屏会记录下光子散射形成的不同闪光，将大量闪光叠加之后，我们会再次观察到同样的干涉图案[5]。粒子性和波动性的“二象性”对称既适用于物质，也适用于光。我们将会发现，这确实是20世纪最出人意料的科学故事。

[1] 戈达德准确地指出，布鲁斯提出任何重力屏障都能使一个人做很小的功就提起一个大质量的物体，如果去除这个重力屏障，该物体就会像正常质量的物体一样下降，它输出的能量会比提起重物时花费的能量更大，因而违反了能量守恒定律。

[2] 导航波，这是德布罗意当时的说法，后来的物理学家称其为“物质波”。——译者注

[3] 当然，我们也必须注意交通警察！

[4] 从技术上讲，烟灰指由煤、油或木材等燃料不完全燃烧形成的颗粒，主要成分是碳，但也因燃烧质的不同而含有其他元素。这里用烟灰代指“无定形碳”。

[5] 出于技术性原因，两干涉图案也可能存在着细微差异。电子在晶体顶部的几个原子层的散射最强，而X射线可以穿透到晶体内部更深处。这是因为产生电子散射的电子间排斥力，远大于光子—电子之间的相互作用。如果顶层的晶体结构与晶体的体相结构不同，我们可能就会观测到不同的干涉图案，但这个细节并不影响波—粒对称性。

第4章
超能力般的粒子自旋

由杰里·西格尔和乔·舒斯特创作的超人系列漫画，在很长一段时间里都无处发表。他们两人多年来四处碰壁，最终不得不将他们创作的故事连同超人形象的版权以130美元的价格卖给国家出版公司。这在1938年是一个好价钱，但与超人形象随后创造的价值相比，显然微不足道。1938年6月，超人漫画作品在《动作漫画》（*Action Comics*）创刊号上首次发表，很快便有了专属刊物，每期销量多达百万份。这个“未来的男人”被改编成真人电影、动画短片和风靡一时的广播剧，还被多家报纸同时连载。

毫无疑问，西格尔和舒斯特创作的超人漫画的一个极诱人之处在于，主人公克拉克·肯特，外表平凡无奇，默默无闻，却是地球上最强大的人。朱尔斯·费弗曾在《伟大的漫画英雄》（*The Great Comic Book Heroes*）中指出，布鲁斯·韦恩必须穿上他的蝙蝠侠服装才能成为蝙蝠侠，拉蒙特·克兰斯顿则必须依靠他的斗篷、下垂的帽子和红围巾才能成为打击犯罪的“影子”密探；超人却不同，他有着与生俱来的超能力，克拉克·肯特只是他的伪装——一个弱不禁风、笨拙、无能的普通人。对于那些认为自己真正的潜力尚未被发现的人来说，超人是他们的榜样。

量子力学有一个惊人的发现：作为构成原子的粒子，电子、质子和中子也有一种神秘特性。20世纪20年代，物理学家们曾认为它们是温和的亚原子粒子，可以通过质量和电荷来表征。但他们很快就发现，这些粒子拥有一种隐藏属性或者说一种“超能力”，即“自旋”。

1925年，有人提出每种基本粒子的行为都像一个旋转的陀螺[1]，围绕一个内轴旋转。这个属性不仅针对物质，对于光子也是这样。这种旋转与电子绕原子核所做的“轨道运动”无关（薛定谔最终证明，将电子围绕带正电的原子核运动，类比为太阳系中行星围绕太阳运转，在技术上是不准确的），即使亚原子粒子处于不与任何原子或分子结合的自然状态，这种旋转也是存在的。

这种固有的旋转之所以被称为“自旋”，是因为电子像旋转中的女芭蕾舞者一般，绕着一个内在的轴旋转。所有亚原子粒子都处于自旋状态，这一事实的意义重大。不考虑电子的自旋，我们就无法理解化学和固体物理学。所有组成原子的粒子都有一个与其自旋相关的特征，即电子、质子和中子都有与由电流产生的磁场无关的内部磁场。通过这个磁场，粒子的自旋属性第一次为世人知晓。

通俗科幻小说常常以“磁性”作为各种技术奇迹发生的基础，比如，比空气重的悬浮船；“反磁性”则经常被用于力场光束或其他攻击性武器。自20世纪60年代起，报纸连载漫画的读者们已经开始想象，由于磁性的存在，个人飞行装置终有一天会变成现实。图4–1展示了一幅20世纪60年代的《至尊神探》（*Dick Tracy*）漫画，图中崔西（剪影）和他的助手萨姆·卡齐姆侦探，使用磁力飞行垃圾桶追捕罪犯。（崔西的通话工具是一部“收发两用无线电手表”，这几乎是移动电话的前身。）人们期待磁性能在未来引领世界，如图4–1的文字：“控制了磁性的国家将控制这个宇宙。”



图4–1 20世纪50年代，《至尊神探》连环漫画预言未来人们可以搭乘磁力飞行垃圾桶旅行

与磁性类似，自旋也是飞碟和未来概念武器的一大特征（有时兼具磁性和自旋属性，如1930年4月刊的《空中奇迹故事》（*Air Wonder Stories*）的封面所示，见图4–2）。直到1928年保罗·狄拉克给出电子运动的相对论性量子力学方程，粒子自旋和磁性之间的根本联系才得以揭示。

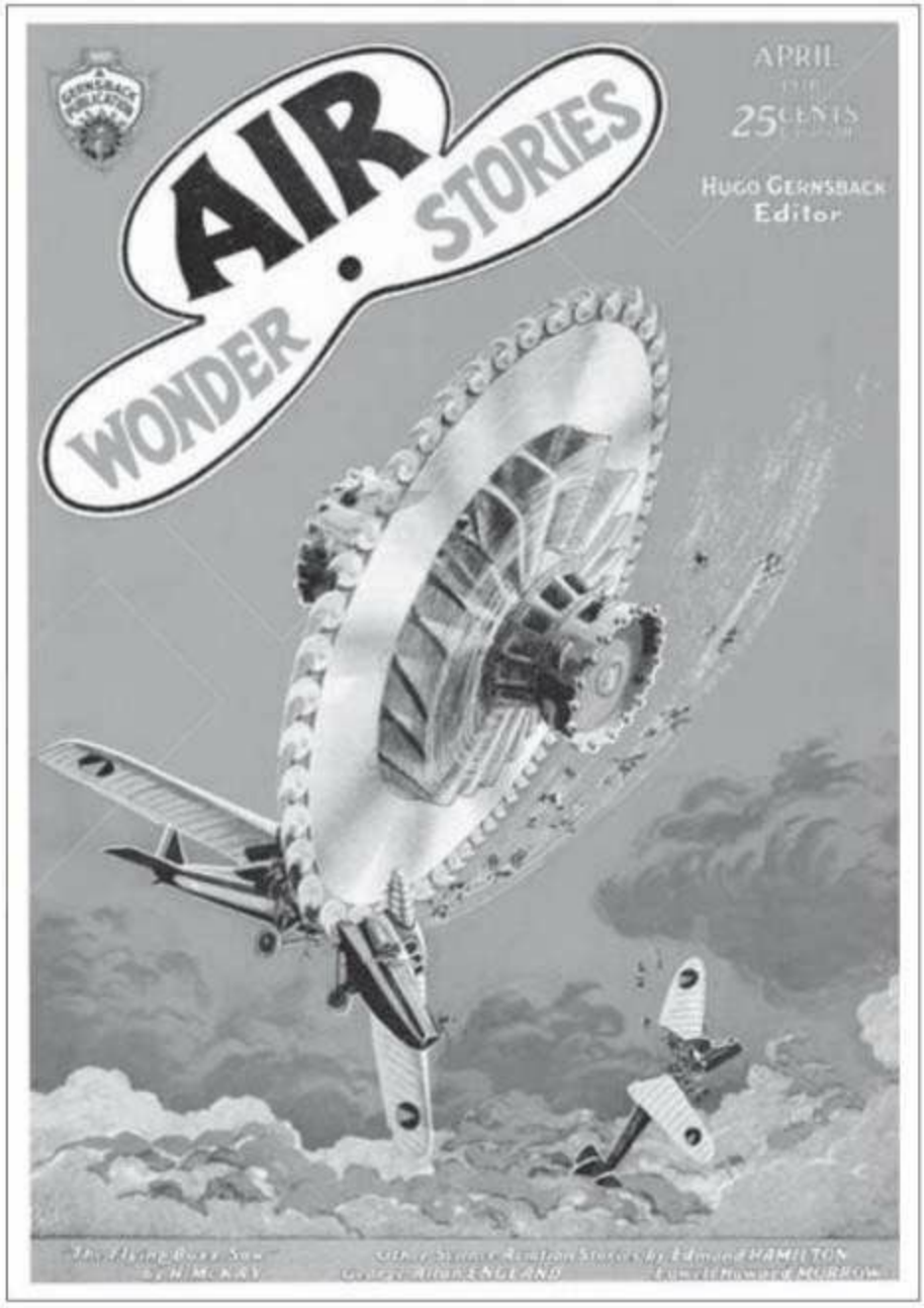


图4–2 角动量是“未来战争武器”经常运用的物理学原理，如1930年4月刊的《空中奇迹故事》的封面所示

第三条量子定律表明，任何事物，无论物质还是光子，都如旋转中的芭蕾舞者一般，围绕其自身的轴旋转。对普通物质而言，这种旋转只涉及一个问题：顺时针旋转还是逆时针旋转？此前，我们讨论了线性动量的定义，它等于物体的质量和速度的乘积。在第3章中，物体是沿直线运动的，因此我们采用了“动量”这一简化的说法，而没有使用“线性

动量”这一更为准确的术语。一个物体的动量越大，改变其运动状态就越难。一个以每小时160千米的速度掷出的棒球比以每小时1.6千米的速度掷出的棒球具有更多的动量，后者可以徒手接住，无须棒球手套，但我不推荐徒手去接前者（事实上，你需要站得离投球手非常近，才能在慢球落地之前接住它）。

同样地，“角动量”与旋转的“线性动量”相对应。旋转可以绕着物体自身的轴进行，如旋转的陀螺；也可以围绕一个远距离的轴进行，如绕地运行的月球。在量子物理学中，电子或质子的自旋比起轨道卫星来，更像一个旋转的陀螺或芭蕾女舞者。此外，原子内部粒子的自旋并不是任意的，而是必须对应角动量的特定值。譬如，一辆车的线性动量有两个值：以给定的速度（例如每小时16千米）的倍数，向前或向后移动。因此，汽车可以以每小时向前或向后移动48千米，但在任一方向上都不能以类似每小时20.8千米的速度移动。

实验结果表明，宇宙中某些基本粒子的内禀角动量可以为零（在特殊情况下），可以是普朗克常数h除以2π，还可以是普朗克常数h除以2π的倍数（如2×h/2π，3×h/2π等。这里的单位增量h/2π相当于前例中的每小时16千米的增量）。光子是这些基本粒子中的一种，其内禀角动量为h/2π。其他基本粒子（如电子、质子和中子）的内禀角动量要么是h/2π的1/2，即（1/2）×（h/2π）；要么是h/2π的倍数（如3/2×h/2π或5/2×h/2π）。宇宙中存在的最小角动量可以是h/2π的整数（0、1、2等）倍，也可以是（1/2）×h/2π的奇数（1、3、5等）倍。对于一个物体而言，其内禀角动量无论是h/2π的整数倍，还是h/2π的整数倍的1/2，都会对它与其他全同粒子的相互作用产生深刻的影响。

2π只是一个数值，如果h/2π是对角动量的量度，那么普朗克常数h是角动量的单位。当普朗克引入经验常数h来解释热发光体的发射光光谱时，他并没有意识到自己已经和宇宙基本常数不期而遇。在构建宇宙模型时必须指定一组基本数字，譬如电子的质量和光的速度。如果一个人骑自行车就能达到光速，世界看起来将截然不同。同理，如果普朗克常数是一个更大的数值，日常生活中就将充满量子现象。

在艾萨克·阿西莫夫的小说《神奇的旅程II：目的地大脑》（*Fantastic Voyage II: Destination Brain*）中，一群科学家被微缩成比单细胞还小的尺寸，以便进入一位受伤的科学家体内（这位受伤的科学家找到了高效节能的“变小”方法）做手术。阿西莫夫提出，这一微缩过程背后的机理涉及制造一个能够减小普朗克常数的场。玻尔将原子视为球

体，计算出原子的半径为r0的倍数，$r_0=h/[（2\pi）m_ec\alpha]$。其中，m_e是电子的质量，c是光速，α被称为“精细结构常数”，它们是另一组基本常数（如h，c和电子电荷数）的集合。如果可以随意调整普朗克常数，使其变大或变小，就能通过改变原子的基本尺寸来放大或缩小任何物体。我们无法在现实中做到这一点，这反映出常数的基本性质——恒定不变。

爱因斯坦在1905年提出，宇宙中最快的速度是光速。尽管这一假设令当时的物理学家们半信半疑，但宇宙及其运行规律证明光速的确是真空条件下的最高运动速度。显然，亚原子粒子的内禀角动量只能是$h/2\pi$或者$（1/2）\times h/2\pi$这两个基本值的倍数。因此，粒子自旋对宇宙的影响似乎不容小觑。

电子带有负电荷，而质子带有等量的正电荷。早在19世纪20年代，人们就已经知道移动的电荷（也就是电流）会产生磁场。这是电磁体和发动机的物理学原理。如果一个带电的球体围绕着一条穿过它的中心的直线旋转，就会产生电流，进而产生磁场。有了内禀角动量，就可以解释为什么每个电子和质子都会因自旋而产生其内部磁场。实际上，内禀角动量是为了解释实验中观察到的原子内部磁场而提出的。也就是说，对磁场的观察在先，后为了解释磁场存在的原因，又提出了内禀角动量理论。

实验中观察到的电子和质子的磁场，真的是由基本粒子的自旋引起的吗？严格地说，答案是否定的。最简单的原因是，在原子核中发现的另一种基本粒子——中子，其质量与质子几乎相同，它不带电荷，但也有一个内部磁场！如果质子磁场的产生是由于作为一个带电物体，质子的旋转可以被看作一系列的带电线圈，每一圈都可以产生一个磁场，那么一个不带电物体（如中子）的旋转就不应该产生磁场[2]。

此外，即使我们不知道中子的存在，我们也不能将电子的磁场解释为电子围绕内在的轴旋转产生的结果。探测得到的电子磁场之大，需要电子以极快的速度自旋，甚至超过光速。

内禀角动量（自旋）理论能解答哪些实验问题呢？1932年，奥托·斯特恩和瓦尔特·格拉赫让原子束通过特定的磁场，以探测实验室磁场和原子内部磁场之间的相互作用。在不考虑任何轨道运动的情况下，他们仍然观察到一个基本粒子的内部磁场，而且这个磁场有两个值。电子仿佛拥有一个包含南北极的固有磁场，相对于斯特恩和格拉赫使用的磁场，这种磁场只能指向两个方向。电子或者指向与外部磁场相同的方

向，它的北极指向实验室磁场的南极；或者指向与外部磁场相反的方向，电子的北极指向实验室磁场的北极。

尽管斯特恩和格拉赫的实验清楚地表明，电子拥有内磁场。然而，一系列缜密严谨的实验却证实，这个磁场与电子围绕带正电的原子核的轨道运行无关，而是出于电子自身的原因。实际上，某些元素能够吸收和反射光就反映出原子内部必然有一定的磁性，这主要是由自旋产生的。

那么，为什么说电子、质子和中子的自旋与它们的内部磁场有关呢？这恐怕要从一个年少轻狂的故事说起。1925年，荷兰莱顿的两名研究生塞缪尔·古德斯密特和乔治·乌伦贝克撰写了一篇论文，提出由带电荷电子的内在旋转产生的磁场，可以用来解释原子发射光谱的异常。他们将论文提交给他们的一位物理学导师保罗·埃伦费斯特，埃伦费斯特指出，文中所说的电子围绕其内轴“旋转”存在着诸多问题。埃伦费斯特的前辈亨德里克·洛伦兹很快就计算出，古德斯密特和乌伦贝克的假设想要成立的话，电子就必须以比光速更快的速度旋转，根据前文提到的公式$E=mc^2$，电子的质量将大于质子。（假如当时已经发现了“中子”，他们很快会发现，观察到的磁场不可能来自带电粒子的自旋。）面对失败，古德斯密特和乌伦贝克准备放弃这个研究课题。然而，出乎他们意料的是，埃伦费斯特已将他们的论文提交，不日付梓。埃伦费斯特安慰他们说，尽管他已经意识到了他们的错误，但他们的想法也有可取之处，毕竟“年纪尚轻，做点儿蠢事也没关系”。

从某种程度上讲，古德斯密特和乌伦贝克使用“旋转”（spin）这一术语来解释亚原子粒子的内禀角动量和磁场是不合适的。这一术语容易使人先入为主地认为电子能像陀螺一样旋转（事实上，一个电子的内禀角动量或为+（1/2）h/2π，或为 –（1/2）h/2π，没有其他值，这很容易让人联想到顺时针旋转或逆时针旋转）。最终，狄拉克提出的全面考虑相对论性效应的量子力学方程，合理地解释了电子的内禀角动量。在求解狄拉克方程的过程中，人们发现电子具有一个额外的“量子数”，对应着（1/2）h/2π的内禀角动量，以及一个完全符合观测值的磁场。从某种意义上说，这一额外的“量子数”是电子的内在属性，就像电子的质量和电荷一样[3]。古德斯密特和乌伦贝克用错误的理由给出了正确的答案，他们因此被授予若干奖项和奖章。

我已经表明，电子、质子、中子和其他基本粒子的内禀角动量，是理解元素周期表、化学和固体物理学的关键。在本书的第12章，我会介

绍泡利不相容原理。这个原理认为，如果两个电子（也适用于两个质子或两个中子）彼此靠得太近，以至于它们的物质波相互叠加，那么这两个电子的自旋方向只有相反，即一个电子的自旋为+h/2π，另一个电子的自旋为– h/2π，它们才能处于相同的量子态。这被称为“隐藏”[4]，除非在特定情况下，比如磁性和内禀角动量发生了联系，才能将两个电子区分开。

电子能够以顺时针和逆时针的方式自旋（在旋转轴确定的情况下），这表明其内在磁场可以“向上”或者“向下”。自然界中的所有磁体都有南北两个磁极。如果我们将一块磁体做成圆柱形，就像一根粉笔，那么如图4–3所示，将有一个从北磁极发出的磁场，绕过圆柱体，被拉进南磁极。磁场在空间中的变化与两种电荷间产生的电场[正电荷和负电荷，分别位于圆柱体的两端，见图4–3（b）]的变化相同。我们将电荷的这种排列称为“偶极子”。如前所述，磁场的分布在空间变化上与电场相同，我们称之为“磁偶极子”。原子核中的质子、中子以及绕原子核旋转的电子的最优构象是：它们自行定位，以使任何一对粒子的磁场可以互相抵消。因此，如果一个磁体的北极指向“上”，则第二个磁体的北极指向“下”。

如图4–3（a）所示，偶极子电场与单一的正电荷或负电荷（即所谓的“单极子”）不同。尽管大量调查和理论预测显示，磁单极子应该是存在的，但我们在宇宙中尚未观测到单独的自由磁极，即仅有一个北极或一个南极。它们总是成对出现，构成一个磁偶极子。但是，没找到并不意味着不存在，而只能说明我们还没有找到它们。

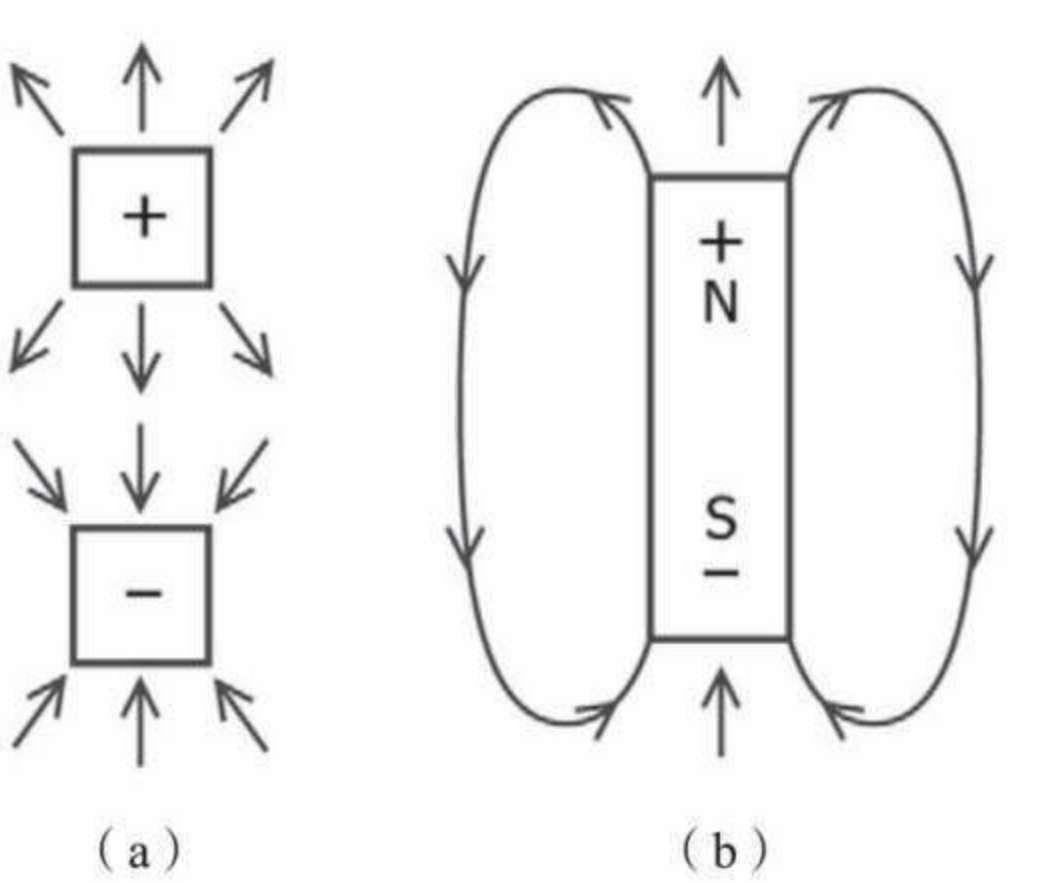


图4–3 单独的正电荷和负电荷（a）以及两个电荷形成的偶极子电场（b）示意图。在一个磁偶极子中会找到相同的磁场线，其中北极相当于正电荷，南极相当于负电荷

如果我们想要理解硬盘的工作原理，就必须弄懂磁性。此外，如果没有自旋，化学将会是谜一般的存在。同样，如果不理解电子的自旋对电子在金属、绝缘体和半导体中的相互作用的影响，就不会有晶体管，也就没有电脑、手机、MP3播放器，甚至电视遥控器，人类将倒退回就连最“反乌托邦”的科幻小说作者也想象不到的蛮荒状态。

[1] 我们很快就会发现，尽管这是一个生动形象的比喻，但我们不应该从字面来理解“旋转的陀螺”的意思。

[2] 即使我们已经知道中子（和质子）由带电的夸克组成，这一观点仍然有效。因为根据这样的解释，为了达到观测到的该粒子的磁场强度，夸克的旋转速度也必须比光速快。

[3] 许多物理学家在追问下会承认，他们脑海中的电子是一个粒子，有一个大箭头从里面伸出来，在电子旋转的时候指向“上”或“下”。如果你发现“电子像陀螺一样旋转”的画面在你脑中挥之不去，就说明你和我们这些专业人士在用同样的方式思考！

[4] 这里的“隐藏”是指在不考虑自旋的情况下，两个电子的量子态是完全一样的，很难分辨。———译者注



第二部分

探索未知的谜题

第5章
波函数的发现与认知

1958年，乔恩·奥斯特曼（普林斯顿大学原子物理学博士）在亚利桑那沙漠的吉拉公寓研究中心开始了他的博士后研究工作，参与了探索“本征场”性质的实验。这个“本征场”包含除万有引力以外的所有能将物质凝聚在一起的力。电磁力便是其中之一，它使带负电荷的电子被原子核中带正电荷的质子吸引。事实上，电磁力远比引力要强，电子和原子核内质子间的静电吸引力是万有引力的10^{38}倍还多。因此，我们确实可以将万有引力对将物质凝聚在一起的“本征场”的影响忽略不计。

除了电磁力，本征场中必须含有其他形式的力，作用于每个原子核内的质子和中子。异性电荷相互吸引，同性电荷相互排斥。原子核中带正电荷的质子之间由于静电力而相互排斥，核内不带电的中子则不受静电力的影响。电荷间的距离越近，它们之间的静电力（库仑力）就越大。由于原子核内质子间的距离小于10^{-13}厘米，它们之间的排斥力非常强大，任何能将其克服的力也必然非常强大。因此，物理学家们将其命名为“强力”，它也是“本征场”中使物质聚集在一起的组合力之一。起初，人们认为强力在原子核内质子和中子之间发生作用，使它们结合在一起。但大量理论和实验方面的证据表明，原子核内的每个粒子都由“夸克”组成（相比中子，夸克是带电的）。现在，强力被视为将夸克聚集起来，并渗透到原子核内的相邻粒子的力。这种力的实验证据是间接的，因为将质子和中子分开并直接探测夸克是十分困难的。但是，原子核内显然有一种吸引力在发挥作用，这种力能够克服毗邻质子间的排斥力。

此外，尽管有强力的束缚，一些元素的原子核仍不稳定，并且发射出高能电子，这令物理学家们深感疑惑。1932年，詹姆斯·查德威克发现了中子这种不稳定的粒子。自由中子的半衰期约为15分钟，即在1/4个小时内，原子核外的自由中子有50%会衰变成一个质子、一个电子和一个中微子（严格来说是“反中微子”）。中子不带电，所以这种衰变与电磁效应无关，而且是在原子核外部，强力也不起作用。研究发现，某些原子核内的中子也会发生衰变。

一定有其他类型的力可以将中子转变成质子。这种额外的力不比强力更强（否则原子核根本不会聚集在一起），但它似乎也不是简单的电磁力。这种相对较弱的力被创造性地称为“弱力”，它是组成本征场的第三种力。原子核内部的强力约比电磁力强100倍（这就是为什么含有90~100个质子的原子核，如铀和钚，是稳定的），而弱力是电磁力的10^{-11}。

20世纪50年代末，吉拉公寓中心的物理学家们试图探索控制原子内部运行的本征场的性质，他们对本征场被移除后的情况进行了研究。这种做法源于研究亚原子物质的传统实验技术——粉碎原子。实际上，这些“原子粉碎者们”研究的并非原子的碰撞，而是其组成部分（如质子和中子）的碰撞。粒子加速器推动质子在环形轨道上以接近光速的速度运转。[1]当这些质子与固定目标或运动方向相反的质子相撞时，爆发出的巨大能量可以产生其他奇特的粒子，这是爱因斯坦$E=mc^2$这一公式的现实应用。通过这种方法，我们明确了物质的结构。

在对本征场进行尝试性探索时，物理学家们采用了一种更为精细的手段，但其破坏性并不亚于原子粉碎。为了分离并移除本征场，他们创造了另一个与原有本征场完全“异相”的本征场。在这里，他们采用了与图2–3（b）所示相同的干涉原理。比如，消音装置会制造一个与环境声音成180度异相的声波，从而使两个波的波面相互抵消，噪声被消除。同理，为了消除物质的本征场，必须确定这个场的频率和相位，并制造一个振幅相同但相位恰好相反的场。因此，要消除物质的本征场，就要有一台本征场生成器。

离开电磁力、强力和弱力，原子或原子核将无法维持原有形态，一切物质都会快速而猛烈地分崩离析。不幸的是，在1959年的一次实验中，奥斯特曼博士意外地被锁进了本征场室，类似的命运降临到他的身上。奥斯特曼，以及当天本征场消除实验的对象第15号混凝土块，在他们身上的强力、弱力和电磁作用失效后，丧失了物质形态。通过一个迄今为止人们知之甚少的方法，奥斯特曼以原子、细胞为单位重构自己，成为拥有“超能力”的“曼哈顿博士”。

乔恩·奥斯特曼（曼哈顿博士）是阿兰·摩尔和戴维·吉布森漫画小说《守望者》（*Watchmen*）（最早以12期迷你小说的形式于1986—1987年发表）中的人物形象。图5–1展示了《守望者》中奥斯特曼第一次以“后本征场提取形态”现身时的场景。曼哈顿博士再生时的一个显著特

征就是他亮蓝色的皮肤，而他原本是典型的白皮肤高加索男人。（曼哈顿博士的另一个不容忽视的特征是，当他在吉拉公寓自助餐厅的午餐桌上第一次成功地重构自己的肉体时，他是全裸的。故事的这个情节交代得很清楚——我们物理学家在性别上是非常“安全”的！）

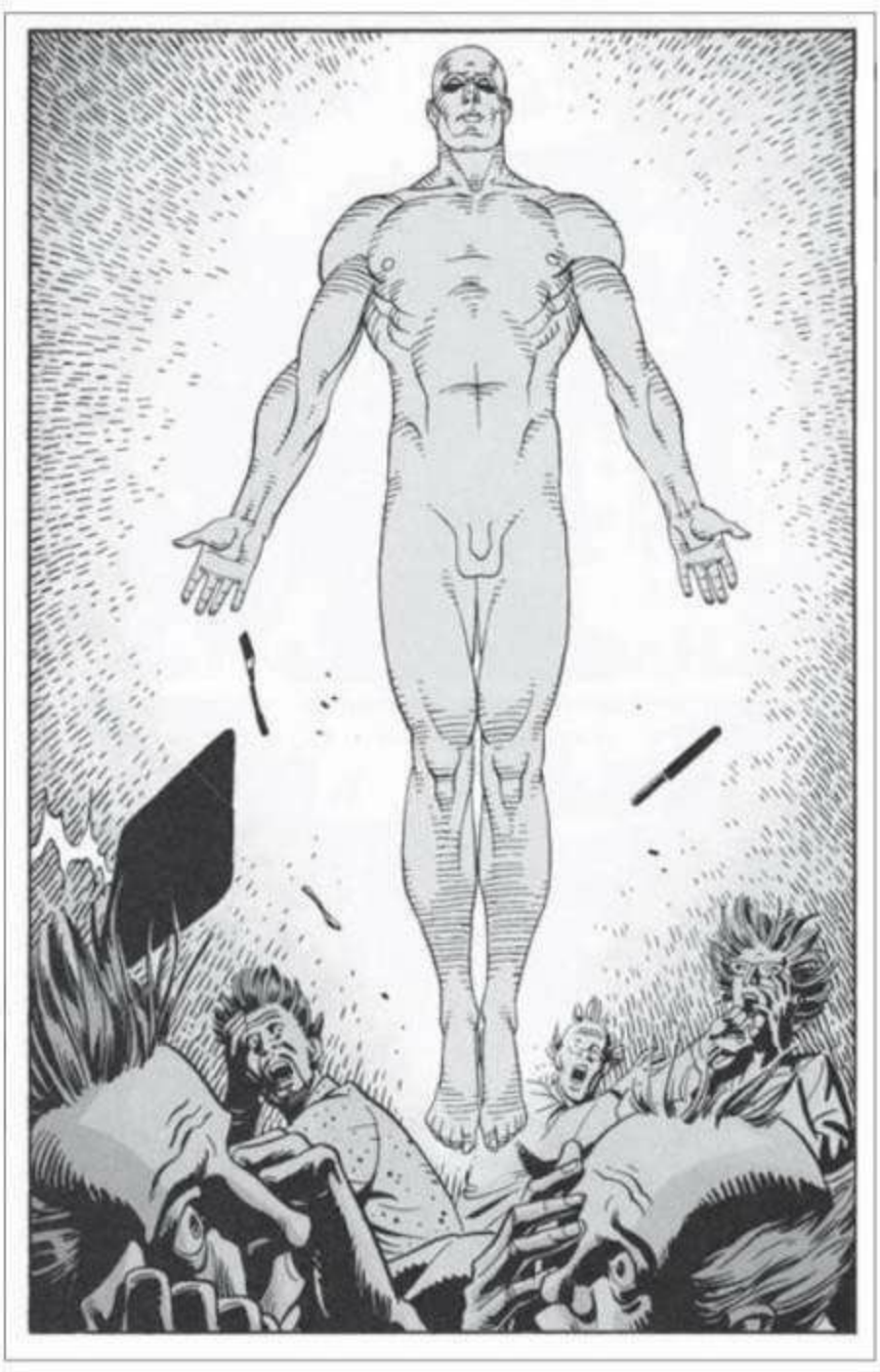


图5–1 在漫画小说《守望者》中，物理学家乔恩·奥斯特曼在他的“内场”消失后第一次“重构”自己

单纯从现实角度看，在人体内部连接数万亿个原子的化学键中储存了大量的静电能。去除一个人的“本征场”所需要的能量比美国的所有发电厂同时满负荷运行所能提供的能量还要多。即使我们能够令强力、弱力和电磁力失效，也没有哪个可怜的科学家能够在经历了肉体毁灭这一悲惨遭遇之后重构自己。但是，考虑到曼哈顿博士在《守望者》漫画中展示出的一系列能力，似乎确实有一些有趣的物理现象在起作用。

除了亮蓝色的皮肤之外，奥斯特曼获得的超能力包括：随意改变身体大小，将自己和他人从一个地点迅速传送到另一个地点，分解其他人或物体，预测未来——同时经历过去、现在和未来。也就是说，在本征场被去除并重生为曼哈顿博士之后，乔恩·奥斯特曼似乎已经可以独立地控制他的量子力学波函数了。

现在，我们到达了这个神奇故事的关键所在，即什么是波函数？为什么控制了波函数就如同拥有了超能力？简言之，任何物体的量子力学性质都反映在其波函数中。通过对波函数进行简单的数学运算，我们可以计算出在任何空间和时间点上发现一个物体的概率密度（单位体积内的概率），无论它是一个电子、一个原子或是一个巨大的蓝皮肤裸体物理学家。如果波函数真的可以被随意改变，在本书后面的章节中你将会看到，你几乎可以立即出现在某个遥远的地方，理论上甚至不需要在起点和终点之间移动；你可以改变自己身体的大小（从很大到很小）；你可以将自己复制成不同版本；你可以预知自己在未来的发展变化。你将散发出蓝色光芒，尽管我们稍后会了解到，这更多是高能电子泄漏的结果，是在原子层面上重构自己的副作用。

***

乔恩·奥斯特曼不是一个真实存在的人，也不存在与“本征场”相关的波，更没有诸如“本征场”一样的事物。但前面有关自然界基本力的其他讨论（电磁作用、核内的强力和弱力）则是正确的。本书第一部分描述的实验表明，存在与电子和原子的运动相关的波，事实上，这种波与所有物质的运动都有关。埃尔温·薛定谔在他的薛定谔方程中引入的波函数概念，是理解所有原子和分子物理学的关键。鉴于波函数在理解化学键将所有物质聚集在一起的问题上发挥的核心作用，它也可以被称为“本征场”。

20世纪伊始，物理学家们就原子内部的电荷是均匀地遍布整个原子，还是点状集中于带负电的电子和带正电的质子这个问题展开讨论。

1911年，欧内斯特·卢瑟福、欧内斯特·马士登和汉斯·盖格通过一系列的实验使科学家们确信，原子是由集中在非常小的原子核内的大质量、带正电荷的质子，以及核外质量较轻的、在静电力的作用下被原子核吸引的、带负电的电子组成的。这大概是你自小学起便了然于胸的“原子太阳系模型”。但是，一个带电的“原子太阳系模型”在稳定性方面存在很大的问题。

地球被万有引力拉向太阳，那么，是什么使我们的星球不被吸入太阳呢？这是一个普遍存在的误解，其实地球每时每刻都在向着太阳靠近！不要惊慌，我们并不是在死亡螺旋上等着被烧焦。地球正沿着与它与太阳间的假想连线几乎成直角的方向高速运动，太阳引力使地球偏离了它的直线运动路径（运动中的物体将持续保持运动状态，除非受到外力的作用，例如太阳引力）。地球向着太阳的加速度运动与偏离太阳的运动相结合，形成了一个圆形的轨迹（真实的轨道是一个椭圆）。在太阳系中，行星的稳定运行轨道只有通过不断地向太阳靠近才能实现。地球保持稳定的轨道运动，是因为没有什么能使它的速度减慢（与宇宙中粒子的碰撞产生的摩擦力很小，可以忽略不计）。

在一个原子中，质子和电子间的静电吸引力在数学上与万有引力相似，因此有观点认为，电子沿圆形或椭圆形轨道绕原子核运动，和太阳系内行星绕太阳运动的方式相同。二者之间的主要区别在于，行星绕太阳运行时不会释放出能量，但绕原子核运动的电子却会损失能量。实际上，建立量子力学的部分原因是为了解释为什么所有的原子都不受“死亡螺旋”的影响而毁灭。

早在美国内战时期，人们就已经知道，每当一个电荷改变了它的运动方向，比如电子沿着椭圆轨道绕原子核运动，就会发出电磁辐射，也就是光。由于光本身携带能量，电子在轨道运行过程中应该会损失能量，电子移动得越慢，就越难克服原子核内带正电质子的吸引力。在很短的时间（小于10^{-12}秒）内，它们就会呈螺旋状坠入原子核。然而，原子间形成了化学键，使得食盐、沙子和DNA（脱氧核糖核酸）等物质的存在成为可能。化学键让分子和固体物质结合在一起，这离不开相邻原子之间沿轨道运行的电子间的相互作用。如果电子位于原子核表面，这种分子和固体物质间的结合将是不可能的。这其中一定有什么地方出了问题，如果加速的电荷不能发出电磁辐射，收音机和电视就都不可能存在[2]。

在解决这一难题的过程中，尼尔斯·玻尔迈出了重要的一步，他于

1913年提出，可以假设原子中的电子沿着特定的轨迹绕原子核运动。也就是说，电子可以在特定轨道间跳跃，但不会绕原子核外的任意轨道运行。打个比方，在明尼苏达州明尼阿波利斯市内的一系列湖泊周围铺设了可供绕行的道路。每个湖泊都被几条路环绕：一条人行道，一条自行车道，一条机动车道，道路之间是绿化带。玻尔提出的电子轨道与这些道路类似，如图5–2所示，电子可以在轨道上自由行驶，但是禁止践踏绿化带。轨道距离原子核越近，电子就被束缚得越厉害。因此，移除一个内侧轨道上的电子需要的能量多于移除一个外侧轨道上的电子所需的能量。电子可以从一个外侧轨道跃迁到内侧轨道，同时以光的形式辐射一定的能量。另一方面，通过吸收一定的能量，电子可以从内侧轨道跃迁到能量更高的外侧轨道（只要电子的跃迁路径上有开放、可用的空间即可）。玻尔指出，尽管按麦克斯韦方程式，不断改变运动方向的电荷会发射电磁波，但出于某种他尚不能解释的原因，电子在轨道上运行时不会发射光，而只在从一条轨道跃迁至另一条轨道时才会发射光。

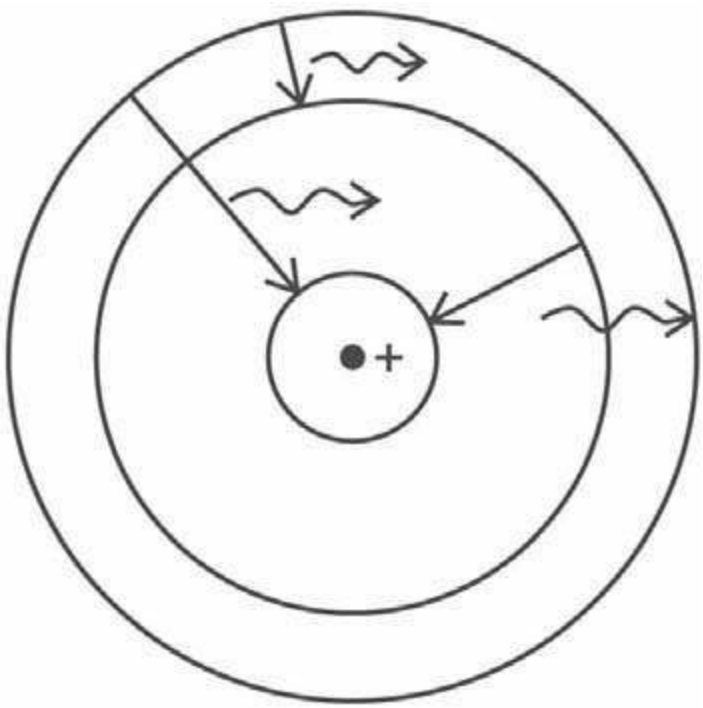


图5–2 玻尔提出的绕带正电的原子核运动的不连续的电子轨道模型示意图。电子只能在特定的轨道上运行，电子所具有的能量多少取决于它所处的轨道。仅当电子从一条轨道跃迁至另一条轨道时才能吸收或发射光

玻尔所说的只有特定的不连续的电子轨道才有可能存在，是对不同原子的发射光谱的尝试性解释。为什么氖灯的光是红色的，而钠灯的光是黄色的？事实上，氖、钠以及所有原子的特殊颜色，是因为这些原子

中的电子只吸收（或发射）特定颜色的光。有10个电子的氖原子（核内有10个质子）和有11个电子的钠原子（核内有11个质子）在化学上的差别，使得红光和黄光在电磁波谱（即光谱）上所属的部分不同。

我们可以在晚餐时测试这一量子理论，向着餐桌上的烛火撒一点儿盐（不要太多，否则会弄熄火焰），你会在烛光中看到明显的黄色。火焰中的高能原子会激发食盐晶体中钠原子的电子发生跃迁，从一个量子轨道跃迁至另一个轨道，当电子回到原来的轨道上时，就会发出黄光。然而，烛光与钠无关，而是由于烛芯附近炙热的气态原子中的电子被激发跃迁至高能量轨道。当电子回归低能状态时，它们就会发射光子。没有量子力学，我们就不能完全理解“火”这一古老的技术。

每种元素都有其独特的吸收（发射）光谱线，特定波长的光对应电子从一个轨道到另一个轨道的跃迁。正如世界上不存在两个完全相同的指纹或两片完全一致的雪花，两种不同元素的吸收光谱线定然有别。通过测量一个原子发射光的波长，我们可以识别出元素或分子，宇宙中第二丰富的元素“氦”（第一丰富的元素是“氢”）就是这样被发现的。当人们研究太阳光的吸收光谱线时，发现了氢的光谱线，但是还有其他一系列光谱线不属于地球上任何已知的元素。人们依据希腊神话中太阳神赫利俄斯的名字将这种新探测到的元素命名为“氦”。

如果你想知道一种未知元素的线性光谱长什么样子，去看看由国家联合出版公司——超人和蝙蝠侠系列作品的出版商——在1955年11月发行的科幻小说选集《奇特的冒险》（*Strange Adventures*）就知道了。如图5–3所示，科学家肯·瓦伦发现了“一种放射性金属元素，迄今为止[3]在太阳系中尚未被发现”。为了追踪这种新的金属元素的来源，瓦伦博士使用了一台闪烁仪。故事中的文字告诉读者，这是一种能够探测到“最小剂量的放射元素”的装置。今天，闪烁仪被用来探测大气中光学性质的微小变化，而在1955年它是被用来测量电离辐射的仪器。瓦伦博士发现该放射性元素是被一艘外星飞船带到地球上来的，这导致他被两名想要点燃整个地球的潜在入侵者俘获。显然，如果地球变成燃烧的太阳，月亮的温度就会上升，从而适合外星人生存。尽管设法掌握了星际旅行的技术，但这些外星人并未发现太阳不是被点燃的巨大星球。对他们而言，这个问题将永无定论，因为瓦伦博士和他的化学家同伴汉克·弗瑞斯特成功地欺骗了外星人，让他们放弃点燃地球的计划并离开了太阳系。



图5–3 1955年，美国DC漫画公司出版的科幻漫画小说书中对吸收光谱线的精确描绘。图中讨论的元素只吸收特定波长的光，从而提供了关于其元素组成的信息。线性吸收光谱是原子的量子属性之一

从某种意义上说，玻尔提出原子的线性光谱源于在不连续的轨道上运行的电子吸收或发射能量，只是为了强调原子光谱的神秘性。现在，人们不再困惑于原子为何吸收或发射特定波长的光，而是好奇为什么原子核外只能存在特定的电子轨道。物质波假说为我们提供了答案。

薛定谔是最早认识到德布罗意的物质波假说能够巧妙地解释为什么电子没有坍缩进原子核这个谜题的物理学家之一。因为如果确实有波与电子的运动相关，就像《科学奇妙故事》报道的汤普森的实验观察（以及图3–3所示的实验）发现的那样，这种波必须是“驻波”。

一个两端固定的吉他弦（见图5–4），除了在两个固定点处的振幅为零的波以外，不能以其他任何波长振动。这就是为什么当弹拨吉他弦

时，它们只以一定的频率振动。如图5–4（b）所示的波长是根本不可能存在的。这是一种乐器的全部魅力所在，能以所有频率振动的弦，无益于演奏和声。可能存在的受固定点限制并且不能沿弦移动的波，被称为“驻波”。

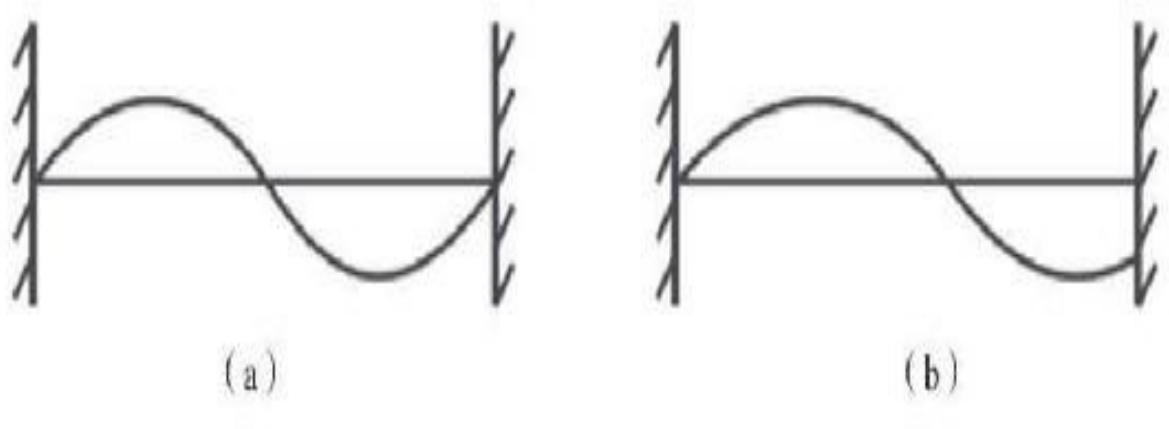


图5–4 两端固定的弦上允许存在的驻波示意图（a）和不可能存在的驻波示意图（b）

假设当我们沿着明尼阿波利斯市哈里特湖畔的小径漫步时，有一种波与我们相关（确实有一个物质波与我们一起运动，但它的波长小得无法探测）。当回到起点时，我们的波必须完美、平缓地与我们开始漫步时的波融合在一起。如果漫步开始时我们的波恰好处于最高点（波峰），那么在我们绕湖行走的过程中，波会振荡到波谷，再回到波峰，循环往复。当我们再次回到起点，波也必然再次回到波峰的位置。这个关于波的简单常识（如果我们回到曾经是波峰的起点时波处于波谷的位置，那么波的循环看起来会是什么样子呢？）带来的直接结果是，只有那些长度是特定波长的整数倍的湖畔小路才是可能的。

同样地，与一个在封闭轨道上运行的电子相关的波，在电子旋转一周后又回到相同的位置，就只能假设其波长是特定的。只要电子完成一次轨道运动，相关的波必须处于起点。这种“单值”约束，即在任意点上波只能有一个振幅（也就是说，这一点不能既是波峰又是波谷），将可能的波长范围从无穷大缩小至与很小的一组特定轨道相对应。就像吉他弦有最低音高，在原子核的周围也存在一个能量最低的驻波电子轨道。这样一来，电子就不会随着绕核运动轨道半径的持续减小而不断损失能量，并呈螺旋状坠入原子核。很显然，真实的物质波的驻波波长不可能比能量最低的电子轨道的长度更短。德布罗意的物质波假说解释了原子的稳定性，以及原子的线性光谱。

在薛定谔做了关于原子中电子的“驻波”模型的研究报告之后，听众席中的资深物理学家彼得·德拜指出，如果电子有波动性，就应该有一个能正确描述其波动性的方程（就像麦克斯韦的电场和磁场方程，能够精确地描述电磁波的性质，也就是光的性质），他鼓励薛定谔找到相应的方程。受到启发后，薛定谔仅用了6个月的时间就完成了这项任务。通过薛定谔的工作，人们认识到电子不能被视为原子核的“迷你行星”。这个方程最终以薛定谔的名字命名，它帮薛定谔获得了诺贝尔物理学奖，也改变了未来，还引发了关于量子力学性质的哲学争论。对此，薛定谔备感困惑地声称，他为自己所做的有关量子力学的一切事情感到抱歉。

[1] 一些加速器使用电子或原子核来代替质子，其原理都是相同的。

[2] 在那样的世界中，用小丑库斯提的话说就是，“活人会嫉妒死人”。

[3] 20世纪50年代正值漫画发展的黄金时期，弗雷德里克·沃瑟姆创作的《纯真的诱惑》（Seduction of the Innocent Scare）一书引发了人们的焦虑，他们担心漫画书可能会腐蚀青年读者的思想（说到底，这难道不是文学会做的事吗？）。但是，几乎没有人能否认，这些漫画书确实拓展了读者的词汇量，也提升了读者的阅读理解能力。

第6章
打开未来之门的薛定谔方程

薛定谔方程之于原子物理学，堪比牛顿运动定律在经典力学中的地位。早在17世纪，改变物体的运动需要外力作用的理论已为人所知。但缺乏一种精确计算方法，告诉我们任何给定物体的运动状态将如何随着外力作用而发生改变。牛顿找到了一种简练的表达式，看似简单（物体受到的外力等于其质量与加速度的乘积，即F=m×a），却能够广泛解释复杂的运动。

初学物理学的人也会知道，仅找出作用力是不够的，还必须揭示出这些力如何使物体的运动状态发生改变。有了牛顿运动定律，我们就能够确定万物的运动轨迹，从滑雪者到船行者，从跑步的人到汽车，从发射到月球的火箭到月球本身（更不用说从树上掉下来的苹果了）。我们知道牛顿运动定律是正确的，因为它对运动的计算结果完全符合实验观测的结论。

同样地，在量子领域，不能仅找到与物体运动相关的波，还需要一个方程。如果知道作用于物体的外力大小，就可以通过这个方程计算出外力作用对“物质波”的影响。

一个简单的氢原子，由原子核内的一个质子以及与质子之间存在静电吸引力的一个核外电子组成。在《守望者》漫画及电影中，曼哈顿博士额头上的符号就是一个氢原子模型。鉴于我们已经知道带负电荷的电子和带正电荷的原子核之间的静电吸引力的本质，也知道存在一种与原子中电子运动相关的波，那么我们需要的是一个“物质波方程”，它能够计算出原子中电子的性质。其计算结果，如原子的平均直径或电子的平均动量，可以与实验观测结果进行对比，以检验物质波理论的正确性。从物理学的角度讲，任何不能用实验检验的方程都是没有意义的。

尽管波函数方程比牛顿的F=m×a复杂得多，薛定谔还是找到了这样的方程。事实上，除个别简单情况外，人们经常需要用电脑来解薛定谔方程。然而，计算上可能存在的困难并不能证明方程是错误的。应用牛

顿的F=m×a计算一个房间中超过10^{24}个空气分子的加速度，会超出世界上最大的超级计算机的计算能力。虽然无法完成运算，但我们知道这样的运算在原则上是可行的。薛定谔方程的重要性在于，根据物体的相关作用力，我们可以计算出物体的波函数。尽管运算方法很复杂，但求解路径是清晰的。

我们将跳过薛定谔方程的产生过程，跳过那些数学实验和错误、物理上的直觉，跳过对能量守恒定律的创造性应用。因为真正令我们感兴趣的是量子力学如何为我们带来了以发光二极管、笔记本电脑、手机和遥控设备为代表的“未来”生活方式。对我们而言，薛定谔方程的形成过程并不重要，我们也不会尝试着去解方程，即使是单个电子在真空中沿直线运动这种最简单的情况。薛定谔方程包含在空间和时间上波函数的变化率，因此需要借助微积分来求解。此外，它还涉及虚数（负数的平方根）。我们真正需要做的是讨论薛定谔方程的意义，并指明不同的解如何促进了半导体晶体管的发明，或者半导体激光器的发明。

言归正传，薛定谔方程最常见的数学表达式如下：

$$-\hbar/2\mathrm{m}\,\partial^2\Psi/\partial\mathrm{x}^2+\mathrm{V}(\mathrm{x},\mathrm{t})\Psi=i\hbar\,\partial\Psi/\partial\mathrm{t}$$

其中，$\hbar$是我们熟悉的普朗克常数（$\hbar$是一种数学上的缩写，表示此处的普朗克常数值应该除以2π，即$\hbar=\mathrm{h}/2\pi$），m是我们对其波函数（Ψ）感兴趣的物体的质量（通常是电子的质量），V在数学上代表作用在物体上的外力，i是–1的平方根[1]。Ψ随时间的变化率表示为$\partial\Psi/\partial\mathrm{t}$，Ψ随空间的变化率表示为$\partial\Psi^2/\partial\mathrm{t}^2$。这个方程看上去既烦琐又复杂，在这里我对它进行了简化处理，将它变成简单的一维形式：电子只能沿直线运动。用这个版本的方程解释三维运动需要一些附加条件，但我们不会去求解这个方程。

已知原子中电子所受的作用力，我们就可以通过求解薛定谔方程计算出电子的可能位置以及它们的能量值。在薛定谔方程中，物理量V代表外力对电子所做的功，它可以改变电子的能量。出于一些暂时无须深究的原因，V实际上指作用在电子上的“势能”。

在一般情况下，这些力随时间和距离而改变。在方程式中，符号V（x，t）表明这些力与势能V随时间t和空间x的变化而变化，V（x，t）

表示在不同的位置x和不同的时间t，V可以取不同的值。有时，作用力不会随时间而改变，如带负电荷的电子和原子核中带正电荷的质子之间的静电吸引力。在这种情况下，我们只需要知道静电力如何随两个电荷间的距离发生变化，就可以确定空间中所有点的势能V。

我一再强调，V的值取决于空间位置x和时间t。对V有实质性影响的因素也会对波函数Ψ产生实质性影响。在数学上，如果一个表达式的值不是固定的，而是随地点和时间的不同而改变，这样的表达式就被称为“函数”。看过地形图的人都能理解函数的概念，地形图上的不同区域会用不同的颜色来表示，代表不同的海拔高度。这就是为什么Ψ被称作“波函数”。通过这个数学表达式，我们知道物质波的值取决于电子的位置（x）和测量时间（t）。在下一章中，我们将探讨海森堡的理论，谈一谈微观世界的物质在时间和空间上的“不确定性”。

对于一个靠近质子的电子，就像在氢原子中那样，电子受到的唯一作用力是静电吸引力。因为静电吸引力的作用不随时间发生变化，所以势能V只取决于空间中两个电荷之间的距离。因此，我们可以通过解薛定谔方程，得到与特定的势能V相对应的波函数形式。波函数Ψ也是一个数学函数，它的值随空间位置的变化而不同。然而，发生了一桩怪事（量子物理学领域的“怪事”不胜枚举）：当薛定谔第一次将这个方程应用于氢原子时，他对“Ψ”代表什么的理解竟然是错误的！

薛定谔认为，Ψ不可能是与原子内部电子相关的物理量，这是因为他推导得出的关于Ψ的数学方程涉及虚数i。这看起来很可笑，因为物理上的任何可观测量必须是实数。但是，通过一些数学方法，我们可以消去数学函数中的虚数。比如，得到波函数Ψ后，对它求平方，即让它和自身相乘（$\Psi\times\Psi=\Psi^2$，读作“psi/泼赛”平方），我们会得到一个新的数学函数Ψ^2。我们为什么要那么做？我们应该对数学函数Ψ^2做出怎样的物理学解释？

薛定谔注意到，在完整的三维形式的物质波方程中，Ψ^2的物理单位是体积分之一，而波函数Ψ的单位是1/（体积$^{1/2}$），这就是考虑Ψ^2而不是Ψ的原因。单位是1/体积的量具有物理学意义，而单位是1/（体积$^{1/2}$）的量则无法测量。薛定谔认为，如果Ψ^2和电子的电荷相乘，将得出单位体积的电荷，即电子的电荷密度。这看似合理，却是错误的。Ψ^2的确拥有数密度的形式，但是薛定谔对于方程解的物理意义的诠释是不正确的。

在薛定谔提出物质波方程的同一年，马克斯·玻恩指出，Ψ^2实际上应该代表电子在原子内部的“概率密度”，即在原子内部任意点上发现电子的概率。薛定谔认为这是无稽之谈，但玻恩的解释在学术界得到了广泛认可。

薛定谔方程对于量子力学的意义等同于牛顿公式对于经典力学的意义。牛顿指出，从本质上说，已知施加在物体上的合力，就可以算出未来某一时刻物体在空间中的位置。薛定谔则声称，已知势能V，就能算出在过去、现在或未来的某一时刻，在某个位置上找到该电子的概率。

已知在空间中的各个位置上发现电子的概率，就能计算出该电子与原子核内质子之间的平均距离，我们将这个距离称作原子的尺寸。事实上，原子内的能量、它的平均动量，以及任何我想测量的物理量，都可以用薛定谔方程来计算。我们知道薛定谔方程是计算原子内电子的波函数Ψ的正确方法，因为根据薛定谔方程计算出的原子性质与实验观测结果非常吻合。这是检验理论的唯一有效方式，也是我们看重物质波和波函数概念的唯一原因。

起初，薛定谔将他的方程应用于最简单的原子——氢原子，其原子核内只有一个质子，核外也只有一个绕核运动的电子。对于作用在电子上的力，他使用了人们熟知的静电吸引力定律，这个定律对两个异种电荷间的相互作用的准确描述已得到广泛证实。求解的过程不涉及其他假设和临时性的猜想，他通过解方程得到了一组可能的解，即一组不同的Ψ函数，对应于电子的不同概率密度。这与被拨动的琴弦产生一组不同的可能波长的情形类似。对于每一个概率密度，都对应着一个不同的平均半径，以及一个不同的能量值。显然，氢原子中的单电子在任何时间点都只能有一个能量值和一个平均半径。薛定谔发现电子具有一组可能的能量值，其排列方式和大型报告厅的座位排列方式很像（如图6–1所示）。第一排座位离前面的黑板比较近，下一排座位距离黑板稍远，以此类推，一直到距离黑板很远的座位，坐在那里的学生可以轻而易举地溜出教室。

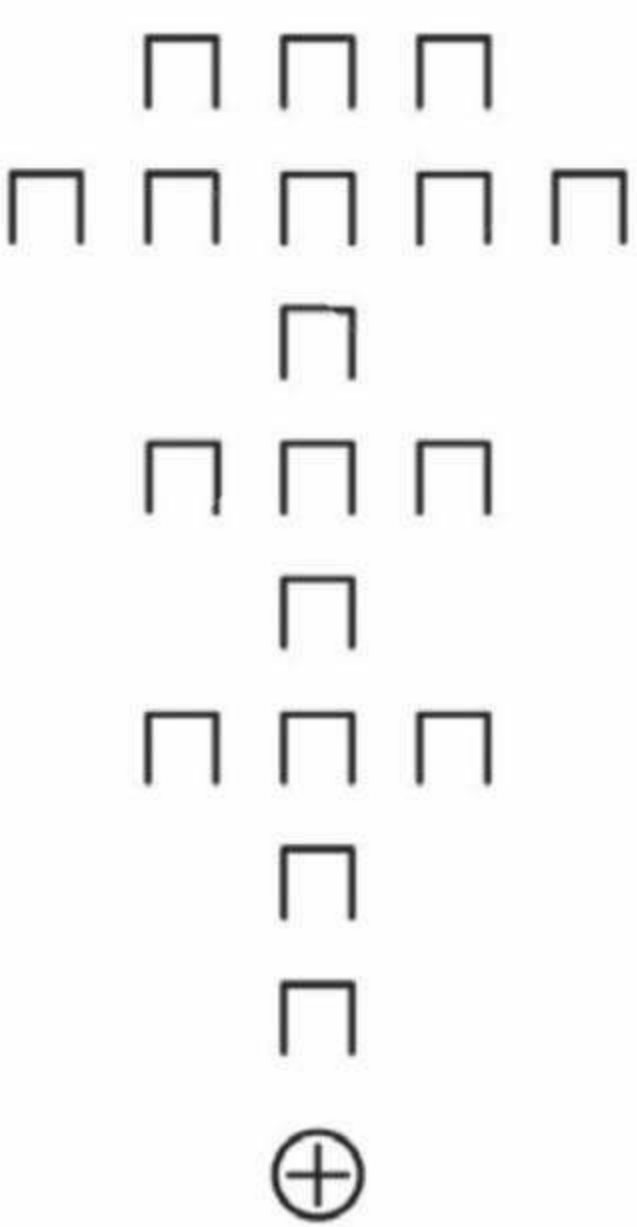


图6–1 用薛定谔方程求得的单电子原子可能的量子态示意图，表示为电子在报告厅中占据的座位。在这个类比中，报告厅前部，也就是图6–1的底部，是带正电的原子核所在的位置。吸收或释放能量时，电子会从一排跃迁至另一排

只有一个电子的原子好比只有一个学生的报告厅。如果这个报告厅有一定的倾斜度，前低后高，那么这名学生可以通过坐在最前排座位来降低他（她）的能量，此时这名学生处于最低能量状态。与此类似，薛定谔发现单个电子的概率密度与其最低能量值相对应，原子的这种结构被称为“基态”。如果电子吸收了额外的能量，比如吸收光或与其他原子发生碰撞，那么它可以从最前排的座位跃迁至更远的座位。（当电子有

了足够的能量时，它可以彻底离开报告厅，成为一个自由电子，而留下一个带正电荷的离子对简单的氢原子而言，它会变成一个质子）。

薛定谔方程一次性地解释了为什么原子只能吸收特定波长的光。对原子中一个带正电荷的原子核吸引的电子而言，只有特定的能量值对应于薛定谔方程的有效解。电子通常处于最低能量状态——基态。从原子外部吸收能量后，它们可以从报告厅最前排的座位移动到较靠后的一排，离出口更近，只要那里有空位。那些还记得高中化学知识的人可能知道，每一个“座位”实际上可以容纳两个电子。电子所在排和它即将移至的那排之间存在精确的能量差，电子必须从一个座位移动到另一个座位，而不能在排与排之间停留。不同原子的原子核内有不同数目的质子，相应的Ψ函数也会略有不同，正如吉他上的每根弦都有不同的基本频率和泛音。

薛定谔方程带来了一个有趣的结果：在一个原子中，除特定能量值外，电子的其他能量值都是被“禁止”的。薛定谔方程的解与电子的圆形或者椭圆形轨道无关，而是关于电子的各种可能的概率密度。换句话说，一个电子有“禁止能量”值的可能性为零，我们永远也观测不到被“禁止”的能量状态。

只有当提供给原子的能量（例如，以光的形式）恰好等于排之间的能量差时，电子才能跃迁至另一排。因此，当电子从一排跃迁至另一排时，任何特定的原子都会吸收或发射某个波长的光，其他的光则会被原子忽略。

最值得注意的是，当薛定谔在方程中输入氢原子中质子和电子间的静电吸引力时，他得到了一组对应于不同概率密度的可能的波函数。在确定Ψ符合“归一化”特点（也就是我们常说的将电子在空间各处出现的概率相加，总数是1）后，薛定谔通过解方程得到了一组可能的电子能级，这与在实验中观察到的氢原子的能级跃迁完全一致。无须轨道假设，也不用忽略电子绕圆形轨道运动会辐射能量的事实，你只要将原子中带负电荷的电子和带正电荷的原子核间的相互作用力输入薛定谔方程，它就会自动告诉你光的吸收或发射可能产生的线性光谱。

薛定谔方程彻底否定了电子绕椭圆轨道运行的假说，并代之以在空间中的某个点找到电子的概率密度。在本质上，物理学又回到了认识的原点。20世纪初，科学家们曾认为原子就像一个带正电荷的实心布丁，电子则是嵌在布丁表面的棉花糖。在这个模型中，原子吸收和发射特定

波长的光，这个波长对应于受到限制的电子的基本振动频率。卢瑟福证明原子有一个小的带正电荷的原子核，电子绕原子核进行轨道运动。但是，这个模型无法解释电子为什么不呈螺旋状坠入原子核，也无法解释线性吸收光谱。薛定谔的原子模型保留了小的带正电的原子核，但带负电的电子则像果冻一样以“概率密度”的形式“涂抹”在原子核上。当薛定谔在阿尔卑斯山上一边进行科学研究，一边寻欢作乐之时，沃纳·海森堡则独立地提出了电子位置的“不确定性原理”。

[1] 按照数学惯例，一个正数与一个负数的乘积是一个负数，两个负数的乘积是一个正数，任何实数的平方都不为负。我们当然可以想象存在这样的数，但是它们不在我们处理的实数范围之内，因此被定义为“虚数”，并以小写的字母i表示，因此i×i=–1。

第7章
著名的海森堡不确定性原理

在薛定谔提出他的方程之前，沃纳·海森堡正在发展原子物理学的另一种理论。物质的波动性也是著名的海森堡不确定性原理的核心，但海森堡对德布罗意的物质波如何解释原子的吸收光谱线的问题持完全不同的看法。按照前文的讨论，电子在圆形轨道上绕原子核运转的传统观点与电子发射光谱的不连续变化不符。海森堡对电子的行为以及电子在原子内位置的思考陷入了困境，最终他选择放弃计算电子的位置。这是一个成功的策略。

物理学是一门实验科学，为了解决原子测量问题与电磁学、热力学理论之间的冲突，量子力学应运而生。海森堡认识到，相较永远无法被证实的预测，任何关于原子的理论都需要（而且只需要）与实验观测相一致！谁会关心电子在原子内部的“真正”位置呢？谁能够确切地测量出电子的位置，从而证真或证伪这种预测？如果不能，就忘了它吧！什么是可以测量的呢？比如，线性光谱中一个原子发射的光的波长。所以，让我们建立一个理论来描述原子从一种状态转换到另一种状态时的能量差。海森堡的原子模型由一组用来描述电子可能处于不同状态的数字，以及使电子从一种状态转变为另一种状态的规则构成。当与观测到的氢原子吸收或发射光谱做比较时，海森堡的方法得出的结果与观测值完全相符。

1925年，海森堡前往位于北海东南隅的德属赫尔戈兰岛静修，在那里他对自己的理论方法的细节进行了完善。与薛定谔形成鲜明对比的是，海森堡深知，他最优秀的工作都是在排除所有干扰的情况下完成的。尽管这种与世隔绝的状态客观上满足了他拓展思路的要求，他来到岛上生活的动机却相当现实：海森堡患有严重的过敏症，为了躲避哥廷根附近的花粉，他来到了树木稀少的赫尔戈兰岛。在这座偏僻的海岛上，海森堡殚精竭虑地发展自己的理论，漫步山间是这位徒步爱好者仅有的休闲活动。

在这座岛上，海森堡为电子在原子中可能存在的状态构建了一组对

应的值，并给出了电子在不同状态之间转换的规则。他回到柏林，向马克斯·玻恩展示了他的理论雏形。玻恩起初感到很困惑，但在他反复审视海森堡的工作，并试图理解这些转换规则的过程中，他产生了一种强烈的似曾相识的感觉。玻恩和柏林的另一位物理学家帕斯库尔·约当最终认识到，海森堡独立发展出了一套用以描述他的理论的数学符号，即“矩阵”。这种数学符号是100多年前对求解一系列存在很多未知变量的方程有浓厚兴趣的数学家发明的，这个数学分支被称为线性代数或矩阵代数。因此，海森堡在不经意间重新发明了一个已经转动多年的“车轮”。

顺便说一句，这是常有的事情。我们发现，在物理学中，解决一个极富挑战性的问题所要用到的数学方法，多半已经问世一个多世纪了。数学家们只是在做他们的本职工作，而不是为了预测或解决任何物理问题。有两个著名的例外：牛顿为了检验他对天体运动的预测，发明了微积分；现代弦理论学家在研究物理学前沿问题的同时也在发明必要的数学工具。

海森堡运用矩阵计算法建立的理论，是对电子在原子中行为的另一种解释，他因此获得了1932年的诺贝尔物理学奖。海森堡的理论发表于1925年，过了不到一年时间，薛定谔就建立了物质波方程来解释原子中电子的相互作用。除了都能精确地预测原子的线性光谱之外，两种理论对量子世界的描述看起来没有任何相似之处。1926年，薛定谔成功地通过数学运算将一种理论转化成另一种，从而证明两种理论实际上是等价的。尽管这两种理论都没有采纳电子椭圆轨道的说法，但它们都依赖于德布罗意的物质波假说。这两种理论都利用了我们今天称之为“电子的波函数”的概念，并给出了计算原子中电子的平均动量、平均位置和其他性质的数学方法。按照本书的写作目的，我们不需要深入探讨这两种理论，因为我们的目标是理解量子力学的概念是如何为诸如激光和核磁共振成像等现代科学奇迹奠定理论基础的。

***

在海森堡的理论中，有一个不容忽视的环节引发了大量的误解和广泛的争论，这就是著名的“不确定性原理”。如果你不介意，容我赘言几句，澄清一下“不确定性原理”的真实含义。其实这不太复杂，只要承认物质的波动性即可。

不确定性原理假定了一个粒子位置的不确定性和其动量的不确定性

之间的关系。海森堡发现这两种不确定性的乘积必须（稍后会提到）大于普朗克常数h除以4π。用普朗克常数除以4π的原因与对波的技术处理有关，在这里我们无须关注。普朗克常数h一次又一次地出现在对原子体系的描述中，这表明普朗克对能量的粒子属性的初始猜想准确无误，通过引入h，他发现了一个自然界的新的基本常数。在理解宇宙是如何组成和运转的过程中，普朗克常数与光速以及电子的电荷同等重要。

在此我要强调一下，不确定性原理并不要求被测量粒子的位置或动量的精确性，也不要求永远不能同时测量一个粒子的位置和动量，但它确实抓住了测量问题的症结所在。

假设我可以通过实验同时测量一个电子的位置和它的动量（接下来，我就来介绍如何测量）。我可能会发现，电子位于距离某一给定点*x*=2.345 289 765 439 017 654 38厘米的位置上，而且它的动量值为*p*=14.254 489 765 539 989 021千克·米/秒。在测量的过程中，肯定会得到带有很多位小数的结果，但为了确认它们确实是电子的位置和动量值，我在完全相同的条件下重复做实验。如果它们都是位置和动量的真值，我应该可以再次测量得到这些结果。第二次进行测量，我发现电子的位置是*x*=2.345 289 112 098 769 379 0厘米，动量值是*p*=14.254 410 087 649 583 200 2千克·米/秒。一方面，*x*和*p*值的前几位小数与之前的测量结果完全一致；另一方面，后几位小数，则与第一次的测量结果完全不同。

在多次实验之后，我发现电子的平均位置是2.324 28厘米，平均动量值是14.254千克·米/秒，如图7–1所示。也就是说，唯一可信的测量结果是位置和动量的平均值。我可以用电子在某一位置出现的次数和该位置的值作图，这样的图看起来就像我们熟悉的钟形曲线，有史以来学生们一直对它有所了解并心怀畏惧。这条曲线的最高点表示在观测中出现次数最多的位置，也表明了电子的平均位置。在最高点，曲线变得很狭窄；在半高处，曲线的宽度对应它的“标准差”，标准差告诉我们在多大范围内我们可以相信由钟形曲线得到的平均值。标准差越大，平均值的不确定性也越大。这些标准差在数学上也被称为“不确定性”，受到海森堡“不确定性原理”的限制。

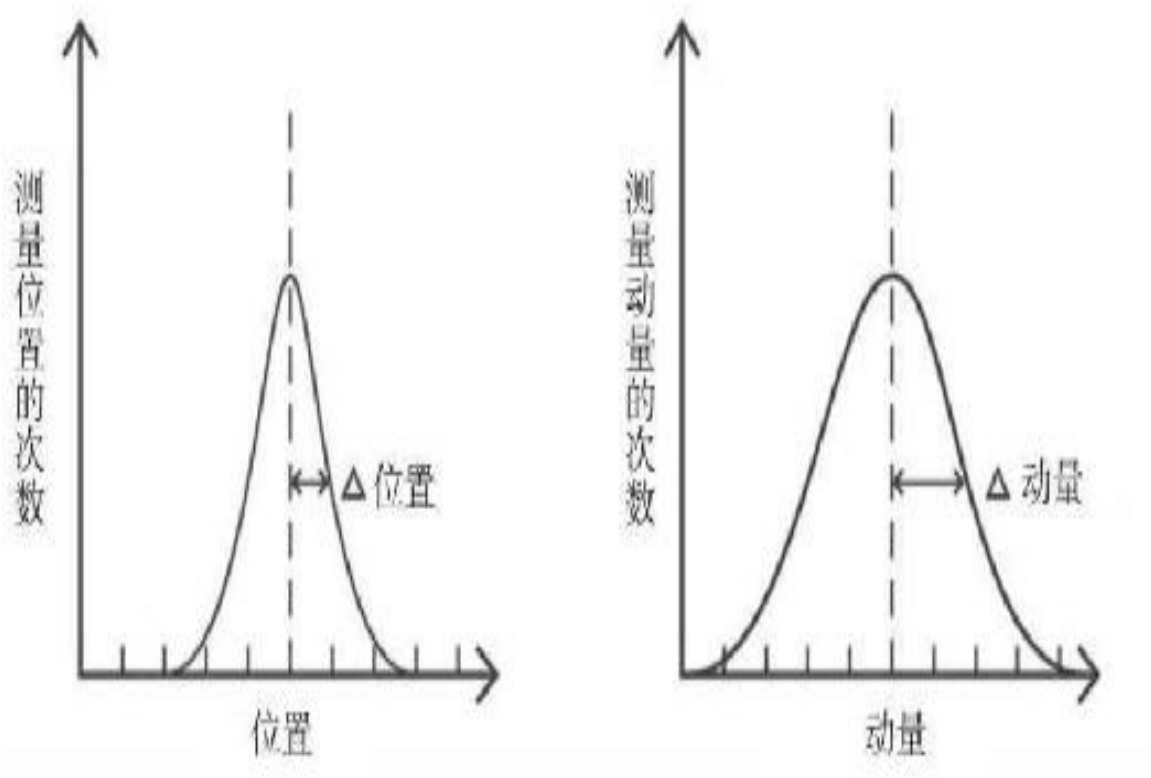


图7–1 位置（左图）和动量（右图）测量值的直方图。垂直的虚线代表位置和动量的平均值，小箭头表示每一种测量值的标准差

为了说明标准差，我们来举个例子。某班的100名学生参加期末考试，如果所有学生都恰好得到了百分制的50分，那么平均分是50分，标准差为零。也就是说，如果有人告诉你平均分是50分而标准差为0，那么任何一名学生的考试分数都不会存在模糊性或不确定性。现在，如果有90个学生得了50分，5名学生得了55分，5名学生得了45分，此时平均分仍然是50分，但学生的分数有了一个小的分布范围。尽管平均分仍然是50分，但一些学生得到的是和平均分不同的分数。现在，有一个值得注意的小问题：随机选择一名学生，他的分数是否等于平均分50分？在极端情况下，这100名学生可以得到完全不同的分数，从1、2分的低分到50分上下，再到98、99和100分满分。平均分仍然是50分[1]，但现在分数的分布范围是从1分到100分。100名学生中只有一名学生的期末考试分数恰好等于班级的平均分，巨大的标准差表明，对于任意一名学生的表现而言，平均分都不是特别有意义或有代表性的指标。因此在处理大量数值时，我们必须问的两个问题是：平均值是多少？标准差是多少？

再回到我同时测量一个电子的位置和动量值的问题上。我发现多次

实验之后，我得到的是一条关于电子位置的钟形曲线，该曲线给出了电子的平均位置；我还得到了一条关于电子动量的钟形曲线。这两条钟形曲线的标准差就是海森堡不确定性原理所论述的内容。海森堡的理论告诉我们，电子位置的标准差与电子动量的标准差是相互联系的，改变其中之一就会使另一个发生变化。图7–1中的两个分布范围不是独立的，缩小一个分布范围必然会使另一个范围扩大。海森堡经计算得出，两个标准差的乘积不能小于$h/4\pi$。任何设法缩小动量标准差的实验（以此为例），都必然会扩大位置的标准差。

为什么电子位置的标准差和电子动量的标准差是相关的呢？因为物质波与电子的运动相关。物质波的波长在某种意义上决定了电子位置测量的精确度，这个波长与电子动量之间的关系为：动量×波长=h。

假设已知电子的动量值，而且相当精确。那么平均动量即动量，就像我们前面讲过的班级期末考试的例子，100名学生全都得到了相同分数——50分。对于这种电子，其物质波的波长是同一个值，如图7–2上面曲线所示。根据定义，一个单一的波会从宇宙的一端无限延展到宇宙的另一端。那么，对于一个如此完美的波，电子的位置将会是怎样的呢？它的平均值可以很清楚地测定，但是对应的标准差会是无穷大的。

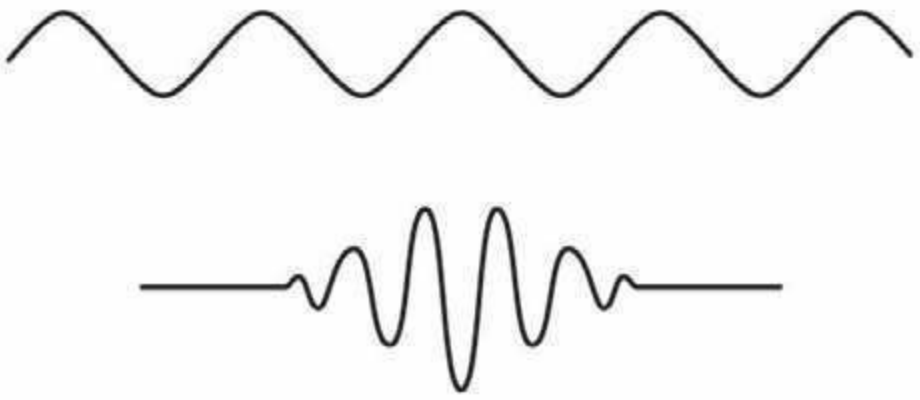


图7–2 电子的两个可能的物质波示意图。上面的曲线表示的是单一的波。鉴于只有一个波长值，动量值也是精确的，其代价便是电子位置的无限不确定性。在下面的曲线中，许多不同波长的波集合起来形成“波包”。电子空间位置的不确定性降低了，但是电子动量的不确定性却相应地增加了

海森堡得出的电子位置和动量的标准差之间的相关关系，是由于电子的位置和它的物质波波长相关，物质波波长又与电子的动量相关。为了缩小电子位置的标准差，除平均位置附近的小区域外，其他位置对应的电子物质波的波长应为零。但是，为了形成一个类似图7–2下面曲线

所示的波包，需要将许多波叠加起来，这些波的波长略有不同，这样一来，它们就会在平均位置附近的狭窄区域之外被破坏性地消除。根据波长与动量的关系式——动量×波长=h，将许多不同的波长进行叠加，相当于说局部区域内的电子有多个可能的动量值。我们希望求得的电子位置越精确，也就是说，位置的标准差越小，我们需要叠加的不同波长就越多，而相应的动量值的标准差也越大。由此，两个标准差因物质波关系式（动量×波长=h）而产生了相关关系。

当然，如果不考虑电子的动量，我们可以按照所需的任意精确度测量一个电子的位置，反之亦然。电子是具有精确的动量（精确到没有标准差），还是具有精确的位置（精确到没有标准差），取决于我们想进行何种测量。在没有给出问题之前不会有答案，我提出什么问题决定了我会得到什么答案。

前面描述的一束波被称为“波包”，如图7–2下面曲线所示，在小于波包的尺度上去讨论电子的位置是毫无意义的。我如何测量电子的动量呢？一种方法是记录它在两个不同时刻的位置。知道了移动的距离和时间，我就能确定它的速度，再用速度乘以质量（假设我可以规避相对论修正）就可以得到动量。我如何得知电子在两个不同时刻的位置呢？汽车的速度不难确定，你只需要确定汽车在两个不同时间点上的位置。那么，我如何看到一个电子呢？和我看见一辆汽车的方式相同：光照射在汽车上，再反射到我的眼睛里（或其他探测器上）。汽车比可见光的波长大很多，因此为了观测电子，我们需要波长小于电子波包范围的光。频率×波长=光速，这一简单的公式给出了光的波长和频率之间的关系。由于光速是一个常数，波长越小，光的频率就越大，根据能量=h×频率，光子的能量也越大。因此，为了测量一个波包很小（位置的不确定性很小）的电子的动量，我必须用非常高能的光子去撞击它。当光子从电子上反射回来，电子的反冲击改变了光子的动量。经过仔细的数学分析你会发现，海森堡的不确定性原理是最佳结论。你可能会想，或许有一种巧妙的方案，可以绕过光的波长的限制，就能确定电子的位置和动量。很多人做过尝试，但都失败了。

如果海森堡简单低调地把他的原理命名为“标准差的补充原理”，我们或许就可以避免不计其数的“量子力学证明，任何事都具有不确定性”的空洞言论。

在深入了解了著名的不确定性原理的物理学含义之后，我们现在来看看下面这则经典的“书呆子”幽默：

沃纳·海森堡因为驾车超速而被一名高速公路的巡警拦下，巡警走到海森堡的车前，俯下身问他：“你知道你的驾驶速度有多快吗？”海森堡答道：“不知道，但是我知道我现在的位置！”

***

对于钟形曲线的平均值和标准差的理解还和气候变化相关，这也解释了为什么科学家对全球平均气温升高了几摄氏度表现得那么紧张，虽然这听上去并不是那么可怕。

在北美气温直方图上，横坐标给出了日均气温，纵坐标给出了一年中不同的日均气温出现的天数。与预想的一样，我们看到了一个钟形曲线，与班级考试分数以及对电子位置或动量的测量所得到的曲线大体相同。在一年的温度直方图上，日均气温会出现一个峰值，峰值外较低或较高的温度是曲线的两条小尾巴。

全年平均气温升高几摄氏度会带来哪些影响呢？简单回顾一下班级考试的例子，这个问题的答案就显而易见了。假如我们给每位学生的期末考试成绩额外加上5分，如果先前的平均分是50分，现在就会变成55分，最低分则从零分变为5分，可能出现的最高分从100分增加至105分。平均成绩从50分增加至55分，这样的变化似乎不大，对大多数学生也没有太大影响。给每位同学的分数都统一加上5分，曲线的形状不会发生改变。此外，我没有改变成绩的等级标准，比如多少分以上是A，多少分至多少分是B，等等。在这种情况下，我发现通过将分数上调5分，得A的学生人数显著增加。平均分的微小改变，虽然不会对大多数学生的考试分数产生重大影响，却会对那些接近却没有达到A分数等级线的学生产生显著影响。

全球平均气温升高几摄氏度与给每位学生额外加5分的情况类似，因此气温高于正常平均温度的天数（对应于那些通过加分得到A的学生）将会更多，这正是导致极端气候状况出现的原因。平均气温升高几摄氏度对每一天的影响并不大，在像明尼苏达这样的州，这种情况在冬天甚至会备受欢迎，因为这意味着不会有极端寒冷的天气。但是，美国其他地区在夏天就会有很多天的气温比正常温度高。要加热或冷却像墨西哥湾这么多的水需要很长时间。这些“比平常热”的日子的热量被“存储”在海洋中，更高的水温可以为飓风、热带风暴和其他极端天气事件提供能量。而且，高温天数越多，北方区域就会有更多的冰融化。初降

的雪能够反射80%~90%射向它的太阳光，而液态水能吸收（并存储）70%的太阳光，由此形成了“更高的温度导致气候变暖”的正反馈机制。这和海森堡的不确定性原理一样，平均值不像标准差的宽度那么重要，钟形曲线那条长长的尾巴才是导致我们毁灭的原因。[2]

[1] 严格来说，此情形下的平均分是50.5分。但是，你应该能懂我的意思。

[2] 不好意思，没有理由开这样的玩笑。





扫此二维码，加我微信好友

扫此二维码，添加微信公众号

还有什么想要读的书？

加小编私人微信wordgai或搜索订阅号微信“互联网分享社区”

按照订阅号书单提示下载

第8章
平行宇宙中的曼哈顿博士

我在第5章中说过，曼哈顿博士在《守望者》漫画小说和影视片中展示出的令人惊叹的超能力，是他控制量子力学波函数的结果。现在，我们对波函数有了更深的了解，我们来看看它是如何发挥作用的。

当然，任何物体，从电子、原子、分子到棒球，再到科学家，都有其量子力学波函数。对于任何比原子大的物质，不考虑物质波的存在，没有多大问题。这是因为质量越大，动量就越大，波函数的空间范围也就越小。任何大于一个原子或一个小分子的物体，其质量都大到让其物质波的波长小到无法检测。基于此，我们必须承认曼哈顿博士是超越自然法的一个奇迹般的特例，他可以不受动量的影响，独立控制自己波函数的空间范围。一个成年男性的物质波波长通常不会超过一个原子宽度的10^{24}分之一，曼哈顿博士一定有能力改变他的波函数，使他的波函数能延伸到很远的地方，如同地球到火星的距离。

量子力学波函数包含一个物体的所有信息。如果我们想知道物体的平均位置、平均速度、能量，围绕一个给定轴旋转的角动量，以及这些物理量如何随时间演化，我们可以对波函数进行各种数学运算，从而得到该物体的任何性质的测量值。

之所以被命名为“波函数”，是因为这是一个能反映真实的波属性的数学函数。我们来回顾一下：在数学中，如果输入一个值，就可以计算出一个与之对应的值，那么这种关系可以用“函数”来表达。以恒定速度行驶时，距离与时间关系的简单方程式，即距离=速度×时间，就是一个数学方程。如果你的速度是每小时96千米，你行驶的时间为1/2小时、1个小时、3个小时，那么你可以通过这个简单的方程计算出你的行驶距离（在本例中，分别是48千米、96千米、288千米）。大多数数学函数都比这个例子复杂，甚至会像薛定谔波函数那样复杂难懂，但是它们都与一些输入值或输出值有关系。就一个原子中一个电子的量子力学波函数而言，如果你告诉我电子在三维空间中相对于原子核的位置，我就可以根据薛定谔方程求出电子波函数的振幅。

波函数具有波属性，就像振动的琴弦，或被掷入水中的石块在池塘表面荡起的涟漪，这意味着什么呢？我们在时间和空间上利用振幅的周期性变化来区别不同的波。石块被掷入水中荡起的涟漪，有一些点的水波高度是“大而正向”的（即水面高于正常水面），这些点处于波峰；另一些点的水波高度低于正常水面，这些点处于波谷；而在其他位置，波的振动幅度为零——水面的高度与未掷入石块时相同。

波峰和波谷的振幅通常随着与波源距离的增加而减小，这就是如果有一块岩石被掷入太平洋的中心，我们在加利福尼亚的海滩上并不会有所察觉的原因。一些大的扰动将引发海啸，即使距离很远依然能保持较大的振幅。想必曼哈顿博士能够对他的量子力学波函数的振幅进行调整，以便在与他本人相距甚远的某处产生一个可感知的振幅。他通过这种方式实现了“瞬移”，但在量子力学中，我们称之为“隧穿”。

薛定谔方程可以被视为作用于物体的力函数，通过它我们能够计算出一个物体的波函数。例如，如果不存在合外力作用，电子将做匀速直线运动，并有由它的动量决定的明确的物质波波长。如果这个电子击中一个障碍物，并且没有足够的能量穿透这个障碍物，它将会被反射回来，向着来时方向的反方向运动。

这就是我们熟悉的镜子的反射现象。光波以直线形式运动，穿过镜子的玻璃表面，到达镀银底板。由于无法穿透金属，它们沿着另一个直线轨迹被反射回来。反射光线与垂直于镜面的直线间的夹角与光线的入射角度相同。

实际上，没有金属底板我们也能观察到这种反射现象。我们都知道，在晚上，当我们从一个光线充足的房间向外望去时，玻璃窗就像镜子一样。在这种情况下，光在玻璃和空气这两种不同的介质中传播时将发生反射，特别是当我们从一个角度去观察窗户时。如果我们观察的方向与玻璃表面所成的夹角大于由玻璃和空气的光学性质所决定的特定角度，这种反射会更加明显。而当我们把脸贴在玻璃上时，这种反射效应就消失了，因为此时我们看到的大多数光线都是垂直于玻璃表面的。光在玻璃中的传播速度比在空气中慢（稍后将详细论述），这种光的传播速度上的差异（出于技术原因，我们以材料的折射率来表示这种差异）决定了光的反射效果。这种情形在白天也会发生，但当从室外射进室内的光线多于从室内射出的光线时，这种现象就不那么明显了。

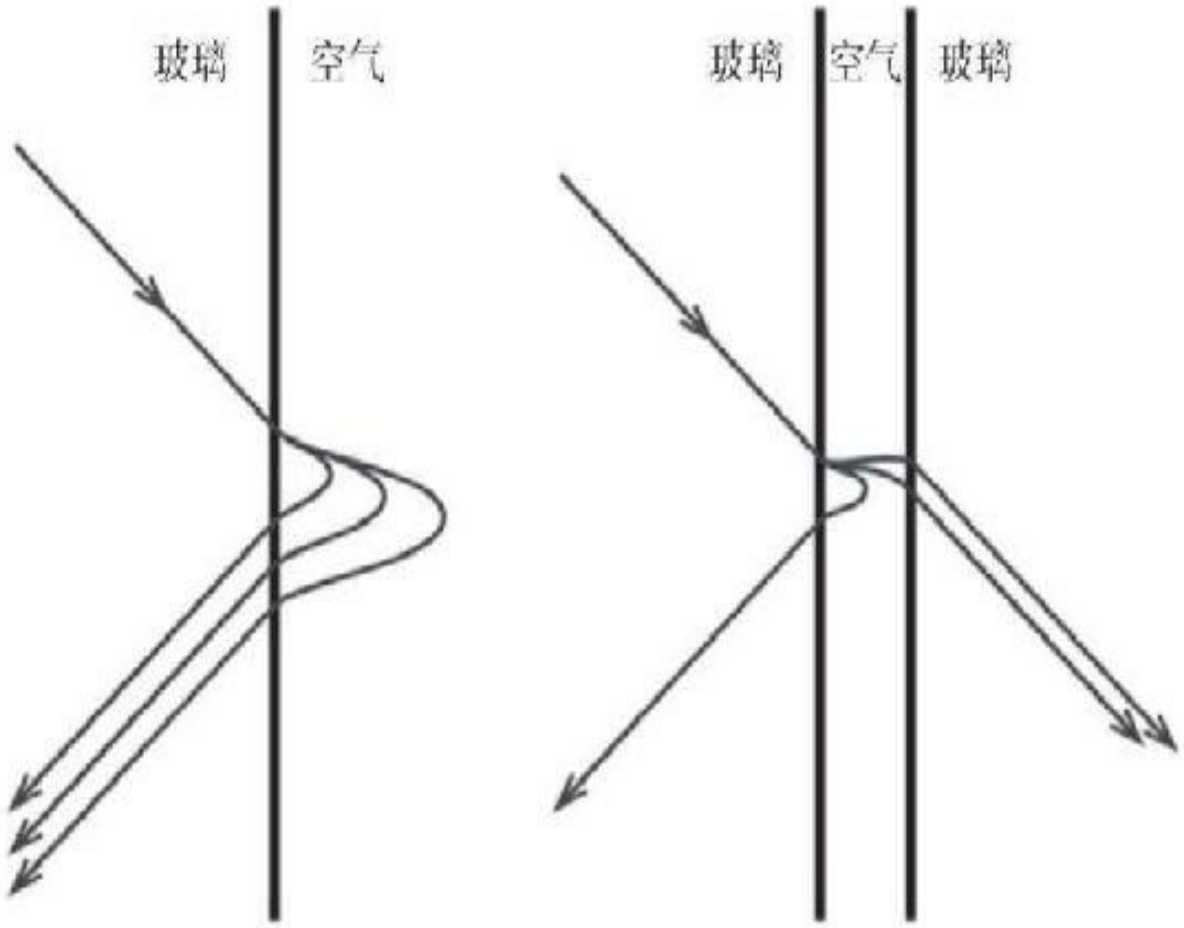


图8–1 一个波在玻璃/空气界面上反射时，有一小部分出于振幅的原因从玻璃中渗透到空气中的示意图。如果在第一块玻璃附近放置另一块玻璃（间隔不超过若干个光波波长），波就能够传播到第二种材料中去。在量子力学“隧穿”的过程中，物质波也会发生类似的现象

现在，假设我们在夜晚从一个光线很强的房间里望向窗户，玻璃就像一面镜子那样照出我们的样子。现在，想象在第一层玻璃后面还有第二层玻璃，就像一扇双层窗户，只不过两层玻璃之间的间隔不是7厘米，而是百万分之一厘米。在这种情况下，尽管光线在没有第二层玻璃时能够完全反射回去，第二层玻璃的存在却使一些光能够穿过全部两层玻璃，尽管两层玻璃间存在间隔。这种现象是光的波动性的标志（为了便于讨论，我们暂且忽略光实际上是由不连续的光子组成的这件事）。事实证明，光波在第一个玻璃—空气界面上并没有完全反射回去，而是有一小部分振荡的电场和磁场渗透到了空气中。这种现象仅发生在距离界面很近的一个很小的区域内，通常无关紧要。但是，当第二层玻璃非常靠近第一层玻璃时，一些光波没有被反射回去，而是进入了第二层玻璃。这种“渗透效应”不是光独有的；任何波都可能发生渗透现象，包括

物质波！

这种“渗透效应”在对电子、质子和中子的观测中都有发现，这是量子力学的最神奇之处，它为物质的波动性提供了精彩的证明。我们在这里用金属及其电子代替一块玻璃和光线，玻璃—空气界面则由金属表面的势垒代替，势垒可以是真空层或电的绝缘体。电子通常没有足够的能量离开金属，而且会在界面上被反射回来。如果在势垒的另一侧放置另一个导体，而且这个势垒与电子的物质波波长相比不算太厚，就存在物质波通过渗透穿过势垒的可能性。尽管电子没有足够的能量跨越间隙，但因为它的物质波能够穿过势垒进入另一个导体，因而可以在第二个导体中发现它。

尽管电子没有制造出一条“隧道”来通过绝缘体或真空层，但物质波显示出这种渗透效应，因此这种现象被称为量子隧穿。回想一下，“波函数的平方”代表在时间和空间某一点上发现电子的概率密度。如果物质波渗透至势垒的概率很小，那么在势垒另一侧的第二个导体中发现电子的概率也很小。但是，任何概率大于零的事件都会发生，只要进行足够多的尝试。如果我们让一个电子向着特定高度和宽度的势垒运动，相应的波函数显示电子有极大的概率会在界面上被反射回来，至少可以达到99.999　9%，这表明电子只有百万分之一的概率会出现在第二个导体中。但是，如果100万个电子击中势垒，就会有一个通过势垒；如果1 000亿个电子击中势垒，就会有100万个电子“隧穿”到第二个导体中。在我们将全部电子发射出去后，我们并不知道哪一个电子会成功地进入第二个导体，但是基于势垒的性质，我们可以自信地预测出平均有多少电子能穿过势垒。在本书的第五部分我们将会讨论，许多个人电子设备都利用了量子隧穿来控制电路中的电流。深奥的量子力学因此变得平易近人，真切实用。

电子能做到的，曼哈顿博士也能做到，至少在漫画书或特效预算充足的影视片中可以实现！很可能是通过他对自己的量子力学波函数的奇迹般控制，曼哈顿博士能够拓展他的物质波波长，这种拓展不像二极管中的电子那样仅限于几纳米，而是超过57 936 384千米[1]。在遥远的地点有足够大的振幅，曼哈顿博士突然出现在新地点的概率就非常大。他从未真正处于起点和目的地之间的宇宙空间中，而是有能力将他想要去往地点的概率密度调整为最大值。与商业飞行相比，这无疑是一种既经济又快捷的方式。

由于薛定谔方程是线性的，所以曼哈顿博士能够随意改变自己的大

小（如图8–2所示）。在数学中，如果一个方程式只取决于关键变量（在薛定谔方程中，关键变量是波函数Ψ），而不是变量的平方、三次方或平方根等[2]，我们就说这个方程式是线性的。Ψ=Ψ是一个非常简单的线性方程，当然也是一个真命题。这个方程式简单到对于Ψ取任何值都是成立的，比如Ψ=1，这个方程告诉我们1=1（我们当然知道）。如果Ψ的值取10，这个简单的方程告诉我们10=10，这也是一个真命题。既然薛定谔方程是线性的，如果我们让Ψ乘以一个常数，在这种情形下，不管这个常数是大是小，方程仍然成立。通过让波函数乘以一个常数（即第6章所描述的“归一化”），我们确保Ψ^2可以表示概率密度，其值在0到1之间。此外，薛定谔方程是线性的，这意味着如果方程有两个可能的解，如Ψ_A和Ψ_B，那么它们的和$\Psi_A+\Psi_B$也是方程的解。所以，曼哈顿博士大概也可以让他的波函数乘以一个小于1的值，从而将他自己缩小，尽管我们从未看到他在漫画或影视片中使用这种能力。


现在是5月份，我已经在这里两个月了。
估计敌人这周就会投降了，他们中的很多人都已经放弃了……

图8–2 漫画小说《守望者》中的一个例子，当曼哈顿博士将自己的量子力学波函数与一个大于1的常数相乘时，他的物理性质不变

如图5–1和图8–2所示，乔恩·奥斯特曼在本征场实验室中遭遇不幸后，他重构自己后拥有了闪亮的蓝色皮肤。波函数没有颜色，对于奥斯特曼变蓝的原因，至少有三种可能的解释：第一，他对未来之事了若指掌，生活变得毫无乐趣可言；第二，他很沮丧，因为他认识到“一切都没有终点”；第三，他正在发出切伦科夫辐射。

《守望者》漫画的画家戴维·吉布森在一次电台采访中说过，为了不断地提醒读者乔恩的转变，他选择将曼哈顿博士的蓝色作为一种视觉上的强化。如果曼哈顿博士是红色的，他看起来就像着了火，绿色形象和绿巨人太像，其他颜色则太接近实际肤色。尽管如此，这并不意味着我们不能执着于对其所蕴藏的物理学机制进行探索。事实上，考虑到曼哈顿博士的来历，如果他能以任何可见光谱中的颜色发光，那一定是蓝色。

某些元素在发生放射性衰变的过程中，可能会发射出高速电子作为核反应的副产品。当那些电子（又被称为“贝塔射线”）在介质中的运动速度超过光在介质中的运动速度时，它们就会在光谱的蓝色至紫外波段发出电磁辐射，这被称为切伦科夫辐射。

最后这句话无疑令人费解，因为爱因斯坦狭义相对论的一条核心原理是，没有任何物质的传播速度能比光快。但是严格来说，这并不准确。对这一原理的更为准确的表述是：在真空中，没有任何物质的传播速度能比光快。真空中的光速是每秒3亿米，这的确是宇宙中最快的速度。然而，光在像水或玻璃这样的稠密介质中的传播速度要慢得多。

那些注意到插在水中的吸管看起来在水—空气界面处“被折断”的人，观察到了一种光学效应，这是因为光在水中的移动速度比在空气中慢，如图8–3所示。光必须从吸管表面被反射回来并进入我们的眼睛，才能被我们看到。在水—空气界面处光的传播速度的改变导致沿直线传播的光线发生了弯曲，这种现象被称为“折射”。当然，从水面以上部分吸管反射出的光线不会弯曲，而是以直线传播。当我们观察到沿直线传播的反射光和弯曲的折射光时，我们将这种图像解析为吸管在水面处被“折断”了。



图8–3 由于光在两种介质中的传播速度不同而在水—空气界面处被“折断”的铅笔示意图

为什么光的传播速度在水和其他介质中要慢一些？这是因为在这些介质中电磁波与每个原子周围的电子发生了相互作用。跑步穿过泳池时，倘若你将双臂尽可能地向身体两侧张开，增加水的阻力，你就会跑得更慢。光受到电子的“电磁阻力”，这使它的运动速度明显减慢。光在水或玻璃中的传播速度是它在真空中的75%，这还是比较快的。但是，高速电子在这些介质中移动时发生的相互作用较少，因此一个电子在水中的移动速度有可能比光快。当这种情形出现时，电子（电子也会与介质中原子周围的电子产生相互作用，只是不像光的相互作用那么强烈）将产生“电磁音爆”，在电磁波谱的蓝—紫外波段辐射光。蓝色的辐射光被称为切伦科夫辐射，以帕维尔·切伦科夫的名字命名。1934年，帕维尔·切伦科夫发现并解释了这一现象，并因此获得1958年的诺贝尔物理学奖。

空气比玻璃和水的密度要小得多，光在大气中的移动速度，相比真空中的最大速度，只慢一点儿。尽管如此，为了解释漫画书中虚构人物背后的科学原理，我们假设高速电子在空气中运动有可能产生切伦科夫辐射。我们也可以猜测，当曼哈顿博士在他的本征场被移除后重构自己

时，他的重构方式导致高能电子持续渗透，从而使他发出健康的蓝光。为了保持他的电中性，地球上总有许多他可以利用的电子。如果他想使自己的肤色变暗（他曾经这样做过），改变电子向外渗透的速度即可。

位于深水池底部[3]的核反应堆发出蓝色的光，这种切伦科夫辐射表明反应堆呈活动状态并发射出贝塔射线。在电影《守望者》中，有人设计陷害曼哈顿博士，他被指控为导致密友和前女友身患癌症的罪魁祸首。为了使奥斯特曼身边的人罹患癌症，并顺理成章地嫁祸给奥斯特曼，陷害者使用卑鄙的手段，让这些人暴露在已知可致癌的放射性同位素中，比如锶90。这些放射性同位素由于能释放出贝塔射线而有致命性。

曼哈顿博士的另一个引人注目的特点是，他能够同时经历过去、现在和未来。本征场被移除后的乔恩·奥斯特曼只能看到和他自己有关的未来，如果他想了解未来之事，就必须亲自参与或在某一时刻被告知这些事。同样地，如果曼哈顿博士确实能够控制他的量子力学波函数，因为波函数包含了时空中关于物质概率密度的全部信息，他有这样的特点也是合理的。

一个物质的波函数中蕴藏的有关该物质未来演化的信息，比其他任何信息来源都要多。这一点至关重要。如果我们只知道波函数，波函数又只能告诉我们物质在时空中的概率密度，那么，即使在最理想的状况下，我们也必须接受仅能知道物质所处位置的概率这一事实。当我们用波函数去处理物理学中其他非量子力学的概率和统计问题时，它会让我们的生活变得更简单。想象一下此时此刻，你正在阅读这本书，牛顿运动定理可以近乎完整地描述你所在房间中空气分子间的相互作用力。然而，对空气应用这些方程需要同时求解10^{24}个分子的相互作用力。在这样或相似的情况下，相较独立地处理每个分子，更加合理的方案是使用诸如平均压力之类的概念。所以，在量子世界，使用概率密度是一种必然，而非出于方便。即使有无限快速和无限精确的观测，我们也永远不会知道物体的精确位置，而只能得到它的平均位置。

这就是物质的波属性。让我们回想一下上一章讨论过的海森堡不确定性原理，即电子的物质波波长与它的动量直接相关。单一的波只有一个波长，因此我们确切地知道它的动量，但代价是我们无法获知有关电子位置的任何信息。我们越想精确地定位电子，它的动量值就变得越不精确。如果我们对它的位置有充分的了解（这正是物理学家们所渴求的，他们希望终结“概率密度”的观点），那么这将以对它的动量一无所

知为代价。原则上，电子的动量可以取零到正无穷之间的任何值，因此我们不得不依赖于有关其位置的概率解释。为了应用牛顿运动定律，我们需要同时知道位置和动量，所以应用概率是我们能使用的最好方法。

当然，已知曼哈顿博士在未来可能处于某一特定状态的概率，比如在火星上与他的女朋友交谈，并不能保证他可以在这颗红色星球上解决感情问题。只在概率为100%时，某件事情才肯定会发生；如果概率为零，某件事情就绝无可能发生。

在大多数情况下，最可能出现的结果确实是我们观察到的结果。但是，没有被观察到的其他结果的概率呢？薛定谔方程的解对应什么？休·埃弗雷特三世给出了一种解释。埃弗雷特认为，所有这些概率都描述了在无限多的平行宇宙中，其他世界上真实发生的事情！如果发生某件事的概率是10%，那么埃弗雷特认为，在10%的可能存在的平行世界中，这一事件确实会发生。我们生存并体验的世界，是一种对多元宇宙中存在的多个可能世界的不断的现实排序。我们所经历的一切，都在另一个世界上发生并产生不同的结果。

即使按照量子力学的标准，埃弗雷特的观点也太过离经叛道。他在自己的物理学毕业论文中论述了“多世界”的观点，1957年，他凭借这篇论文获得普林斯顿大学博士学位。但与此同时，他的观点却完全被科学界所忽视。失望之余，埃弗雷特放弃了纯粹的科学研究，转而为美国国防部计算多种核武器的放射性沉淀物。他于1982年去世，在此之前，他的想法得到了一小群理论物理学家的认可，特别是布莱斯·德威特，用以描述埃弗雷特理论的“量子力学的多世界解释”这一术语实际上是由德威特创造的。时至今日，尽管认同“多世界解释”的物理学家仍然为数不多，但数量却在不断增长。因为那些尝试着调和量子力学和爱因斯坦广义相对论的科学家们，发现了多世界模型的应用价值。

无论是在埃弗雷特的论文发表前还是发表后，平行宇宙显然是科幻小说的普遍特征。有时候，多维世界与我们的世界判若云泥，如埃德温·阿伯特创作并出版于1884年的二维世界故事《平面国》（*Flatland*），或者发表于1931年的默里·莱茵斯特的短篇小说《第五维弹射》（*The Fifth Dimensional Catapult*）。1896年，赫伯特·乔治·威尔斯撰写了《普拉特纳的故事》（*Plattner’s Story*），故事的主人公戈特弗里德·普拉特纳在寄宿学校化学实验室中的神秘绿色粉末的作用下，来到一个围绕绿色太阳运行的平行世界，那里居住着长着人类脑袋和蝌蚪状身体的奇怪外星生物。难以想象，哪一组可能的波函数会带来这样的结果。在威尔

斯的短篇小说《戴维森双眼的奇妙变化》（*The Remarkable Case of Davidson's Eyes*）中，一起实验室事故使西德尼·戴维森获得了看到另一个世界的能力。尽管他的其他感官信息并未发生变化，但他看到在另一个世界里，一艘船停泊在南部海岛上收集企鹅蛋。渐渐地，西德尼的视力恢复正常，但他随即发现，他在"另一个世界"看到的那艘船是真实的，那时它正在安提波德斯群岛收集企鹅蛋。虽然威尔森在作品中没有对此做出明确的解释，但我们推测在实验室中，当戴维森在一个强大电磁体的两极间俯下身时，他获得了一种通过"空间中的扭结"看东西的能力。这个扭结到底属于戴维森所在的世界还是平行世界，仍然有待解释。

在埃弗雷特发表了关于量子力学"测量问题"的最新解决方法的几年后，20世纪60年代DC漫画中的超高速能力者"闪电侠"通过振动到达了一个平行地球，与20世纪40年代的"闪电侠"一起冒险（同样的能力，不同的服装和人格）。在1967年播出的《星际迷航》中，离子风暴导致传送器发生故障，柯克船长、麦考伊博士、史考特工程师和乌乎拉中尉被送到另一个宇宙中的"企业"号星际飞船上，这艘星际飞船上的船员与他们的相貌一致（"山羊胡子"是两组船员间的明显区别）。在这个镜像宇宙中，"企业"号的船员们冷血暴力，不过，柯克船长对女士顾盼流连的目光倒是一直没变。

漫画书中的角色们经常通过星际旅行到达平行宇宙中的另一个地球，故事暗示漫画书读者所在的缺少真正超级英雄的宇宙是"真正的宇宙"。然而，我在美国物理研究所偶然发现的一张照片警示我们，事情可能比我们想象中更复杂。这张照片（见图8–4）记录了尼尔斯·玻尔（量子力学的奠基人之一）1957年访问普林斯顿大学物理系并会见若干物理专业研究生的场景。照片中右二是休·埃弗雷特三世，其他的学生没有被认出来，但最左侧的那个人看上去很像乔恩·奥斯特曼！想到奥斯特曼于1957年在普林斯顿大学获得了物理学博士学位，他确实可能被选为学生代表，获得聆听伟大的物理学家教诲的机会。量子力学引入现代思想的那些概念令人费解，同样地，"漫画书中的人物生活在我们中间"这样的提法可能为时过早！

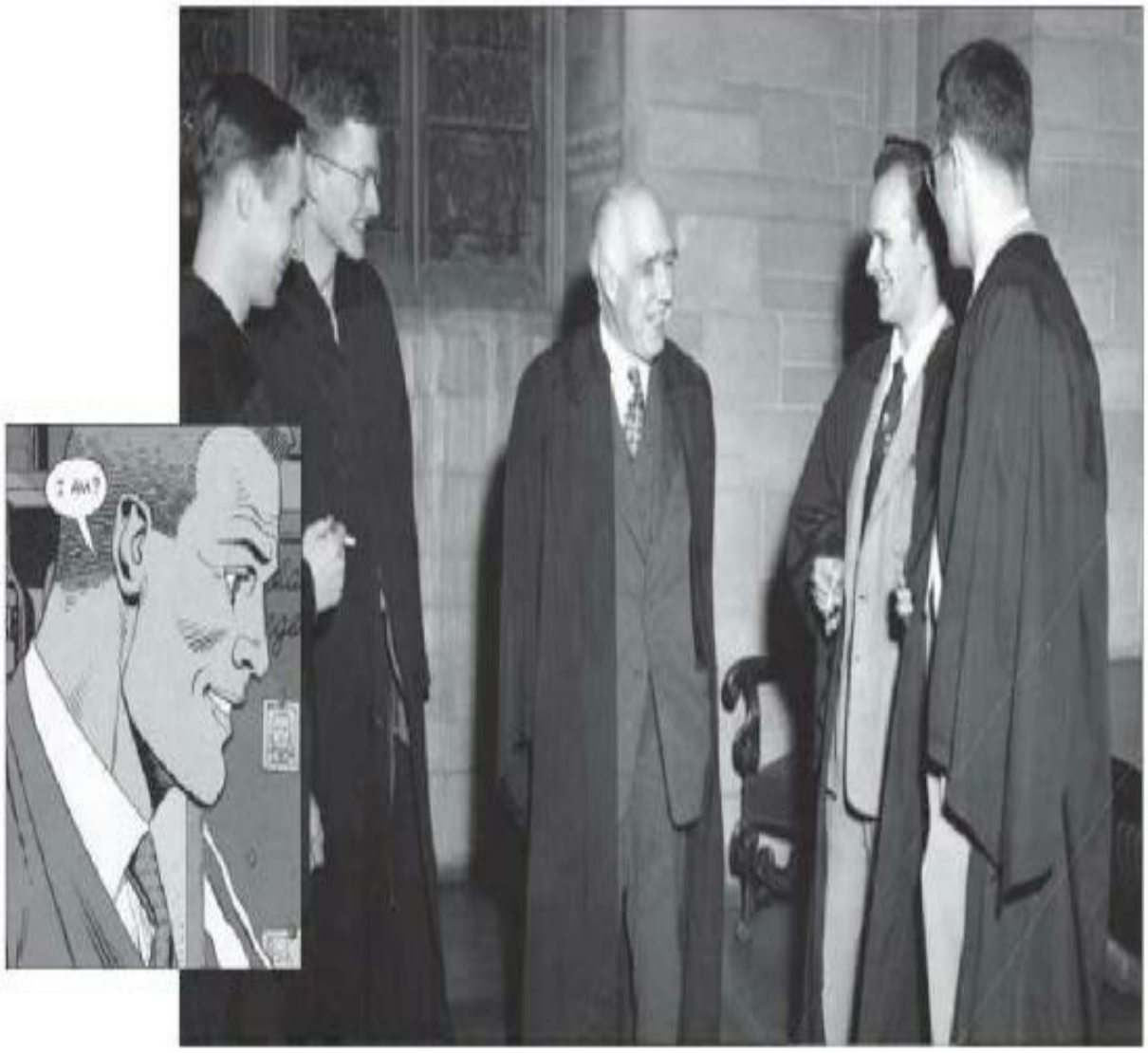


图8–4 1957年，尼尔斯·玻尔（中）在普林斯顿大学与一些物理专业研究生聊天。右二紧挨着玻尔的是休·埃弗雷特三世，为了解决量子力学中的“测量问题”，他即将发表有关平行宇宙的论文。最左边的研究生与乔恩·奥斯特曼有着惊人的相似之处（见小图），他将成为“平行世界”中的“曼哈顿博士”

[1] 57 936 384千米是地球到火星的最短距离。

[2] 像$\Psi^2=2\Psi$这样的方程就是一个非线性方程，其实数解为$\Psi=2$或者$\Psi=-1$，但是Ψ的值增加9倍时则不成立，比如$\Psi=20$或-10。

[3] 反应堆放热使水沸腾，产生的蒸汽推动涡轮发电机发电。



第三部分

原子的传奇世界

第9章
原子是我们的好朋友

在1949年华纳兄弟出品的音乐电影《梦中情》（*My Dream Is Yours*）中，年轻的多丽丝·戴为了获得一档热门电台秀的主唱职位而参加了试音。她没有采纳经纪人（杰克·卡森饰演）的建议，演唱温柔的情歌来取悦赞助商，反而纵声演绎了一首节奏感十足的快歌，赞美了一项“新发明……像加法机般大……没有几个人见过它”。随着她的继续演唱，伴随着“嘀，嘀，嘀”的副歌，我们逐渐明白多丽丝·戴在歌颂一台盖格计数器，并将自己怦然跃动的心和它相类比。

5年后，在另一部电影中，铀矿勘探者米基·鲁尼在一台嘀嗒作响的盖格计数器的引导下来到一个原子弹测试点。在那里，核武器爆炸在即，对此毫不知情的他走进一间摆满人体模特的测试房内休息，在倒计时的时候还吃起了花生酱三明治。鲁尼甚至不用躲进冰箱模型，就成了核爆炸的幸存者。但暴露于放射性物质中的米基·鲁尼又出现在《原子小子》（*The Atomic Kid*）影片中，这位“原子小子”利用自己的新技能在黑暗中发光，并打出爆炸性的喷嚏，帮助美国联邦调查局（FBI）粉碎了一个间谍团伙的阴谋。

继米基·鲁尼在核武器测试基地遭遇不幸之后，1961年上映的影片《亚卡的野兽》（*The Beast of Yucca Flat*）对受到核辐射的后果展现也不甚准确，但却更加阴暗。在这部警示性影片中，前瑞典摔跤手托·约翰逊（来自外太空9号计划），意外闯入了一场原子弹试验。约翰逊扮演叛逃的科学家约瑟夫·贾夫斯基，为了躲避追杀，他在原子弹即将爆炸之时来到了著名的沙漠亚卡试验基地。核爆炸产生的辐射将约翰逊变成了一个粗笨、愚蠢、嗜杀的怪物（尽管这副形象和爆炸前相差无几）。

毫无疑问，1946年8月，随着约翰·赫西的文章《广岛》（*Hiroshima*）在《纽约客》（*New Yorker*）上的发表，核辐射的真实后果已为公众所知。但是，在第二次世界大战刚刚结束的几年里，大众娱乐在很大程度上保持了对以原子能为动力的未来世界的乐观看法。在

1957年的电视节目《迪士尼乐园》（*Disneyland*）中，德国火箭专家海因茨·哈勃博士在其主演的《我们的朋友——原子》中，把原子能比作瓶中的精灵，它可以满足人类的三个愿望，让我们拥有更光明的未来。第一个愿望是能源，从电力的产生到原子能飞机；第二个愿望是食物和健康，包括用核辐射来进行食品消毒和治疗疾病；第三个愿望是智慧，即明智和平地利用核能。

1952年，《科利尔杂志》（*Collier's Magazine*）委托科学作家沃纳·冯·布劳恩、海因茨·哈勃和维利·莱等人撰写了一系列文章，预测未来的太空旅行。加上切斯利·博尼斯戴尔（他为《登陆月球》绘制了背景插图）和罗尔夫·克里普绘制的图片，这些文章被制作成三期杂志，随后又以"穿越宇宙边界"（*Across the Space Frontier*）为题被汇编成书。在这个系列文章里，原子能"妖精"将再次为空间站的运行提供能量，并使载人登陆火星任务成为可能。在瑞典前摔跤手发生令人恐惧的变异之前，人们的确有一种乐观的期待，那就是我们对原子的驾驭，加上对核物理的理解，能使科幻小说中的乌托邦成为现实。

尽管我们幸运地规避了"在黑暗中发光"的米基·鲁尼等可怕的变异人的出现，但我们也从未搭上原子能飞机。问题到底出在哪里呢？好吧，原子能飞机从一开始就是一个糟糕的主意。哈勃在戴尔公司发行的"迪士尼乐园电视节目"纸质视听指南中提及："在航空领域，燃料的重量始终是令人沮丧的限制性因素。"（现在，令人沮丧的是喷气燃料的成本。但在1956年，没有人预见到廉价石油的终结。）尽管一个较小的核反应堆可以代替大质量的燃料，然而，为了防止乘客和机组人员遇难或受到辐射伤害而采用的必要防护设施，其重量会超过节省的燃料重量。哈勃建议用水做护盾，但这样一来，质量更大的飞机需要长达几千米的起飞跑道。只是为了避免在长途飞行中补充燃料便如此大费周章，似乎不值得。

与原子能飞机类似，有关原子能汽车的构想也胎死腹中。1957年，福特汽车公司推出了一款名为"核子"[1]的汽车，其内燃机被一个放在后备厢中的小型核反应堆取代。核裂变反应产生的热量会使水沸腾，产生的蒸汽将驱动涡轮机为轮子提供动力，同时提供电力，就像核电站一样。根据预测，在核反应堆能量耗尽之前，"核子"能够行驶8 000千米。续航里程上的这种改进，补偿了驾驶人员受到核辐射的风险，以及交通事故对其他汽车驾驶员造成的伤害。尽管"核子"汽车从未投入生产，但在福特公布的3/8比例的模型中，乘客区后面为核反应堆工作的迷你冷

却塔，以及尾部与车身等高的两个散热片，却非常醒目。

在水下运输领域，原子能的优势明显抵消了它在成本上的劣势。美国海军的第一艘核动力潜艇“鹦鹉螺号”于1954年下水，从那时起，全球范围内有相当数量的潜艇舰队都以小型核反应堆为动力来源。儒勒·凡尔纳的小说《海底两万里》中的“鹦鹉螺号”是由来自海洋的电力所驱动的，其工作原理在小说中没有明确交代（“教授，”尼摩船长说道，“我的电并非人世间普通的电，这就是我想说的全部……”），但它能够航行较远的距离而不用补充燃料。（“两万里格”指的是“鹦鹉螺号”的航行距离，而不是它在水下的深度，这一深度约为9.6万千米。）由于潜艇仅应用于军事领域[2]，成本方面的限制几乎可以忽略不计。

与其他产生热量的方法相比，核能确实非常高效，至少与产生相同能量所需的化石燃料相比，核能很高效。问题出在细节方面，特别是核废料的处理。化石燃料的燃烧排放是有害的，但这种危害是逐渐形成的；而核废料的放射性危害立竿见影。要理解为什么原子核衰变与我们有关，我们首先要弄明白原子核是怎样保持稳定的。

在欧内斯特·卢瑟福等人进行高速阿尔法粒子（由两个质子和两个中子组成，本质上是一个氦原子核）穿透金属箔的实验中，他们发现在极偶然的情况下——大约万分之一的概率，阿尔法粒子会被金属箔完全反射回来。由此他们得出结论：原子内部的大部分区域是空的（现在我们知道，这些区域分布着电子的“概率云”），其中有一个很小的带正电荷的内核。正电荷必须位于原子的中心，因为只有集中的正电荷才能产生足够的排斥力，使得高速阿尔法粒子（本身带两个正电荷）的运动方向发生偏转。考虑到只有万分之一的阿尔法粒子的运动方向发生明显的偏转（因为需要直接碰撞才能将阿尔法粒子完全反向弹回）[3]，这个原子核应该很小，事实上，只有原子直径的万分之一。

原子中的正电荷聚集在原子核内，这一结论解决了原子的结构问题，但也引出了另外一些问题。化学研究表明，原子中正电荷的数量（与电子所带负电荷的数量相等）决定了它的化学性质。氢原子的原子核内有1个质子，氦原子有2个质子，碳原子有6个质子，金原子有79个质子。电子的质量大约是质子质量的两千分之一，因此原子的全部质量几乎都来自原子核。但是，原子的质量并不等于质子的质量。氢原子的质量与1个质子的质量相同，但是氦原子的质量等于4个质子，碳原子的质量等于12个质子，金原子的质量则相当于197个质子。

为什么氦原子的原子核内只有两个正电荷，而其质量却是氢原子的4倍？有一段时间，物理学家们曾认为原子核内既包含质子也包含电子，也就是说，一个氦原子的原子核由4个质子和2个电子组成。如果是这样，它的质量将是只有一个质子的氢原子质量的4倍，与观测结果一致；它的总电荷为+ 4–2=+2，也与实验结果相符。由于电子的质量比质子小得多，当时的测量手段还不精确，所以无法排除这种可能性。

科学家们进行了相关实验，来研究原子核磁场以及磁场对原子内电子吸收光的方式的影响。他们的结论是，以氦原子核为例，它不可能由4个质子和2个电子组成。相反，氦原子核内必须有两个质子和两个其他粒子，这种粒子的质量与质子相同，但是不带电荷。1932年，詹姆斯·查德威克用阿尔法粒子轰击铍时，发现了原子的新组成成分：中子。就这样，原子核的秘密被揭开了：原子是由质子和中子构成的原子核，以及绕着原子核运动的核外电子组成的。

但接下来，我们要面对的是一个更具挑战性的谜题。众所周知，正电荷之间会互相排斥（毕竟，这是卢瑟福发现原子核的基础），那么为什么原子核中带正电的质子不会飞离彼此呢？答案是，它们确实想飞离彼此。质子“感受”到的来自原子核内外的静电力是相同的。它们停留在体积较小的原子核内，这意味着它们还受到另一种更强大的力的作用，这种力阻止它们离开原子核。考虑一下每种元素的质量较大的成员，可以找到有关这种力的一条线索，这些成员被称为“同位素”。原子核内质子数相同（这使它们具有相同的化学性质），而中子数不同（因此具有不同的质量）的两个原子互为同位素。氢元素的同位素中都含有一个质子，并且含有0、1或2个中子。[4]但是，氦或其他任何元素的同位素，都不能在拥有两个或更多质子的同时而没有中子。这表明，原子核内的中子对于使原子核保持稳定的“强力”的形成，起到举足轻重的作用（这里的“强力”就是我们在第5章中提到的“强力”）。

这种“强力”比电磁作用强多少呢？如果这种力比静电力大10倍，将很难形成像硅（含有14个质子）或者钛（含有22个质子）这样的重元素。如果这种力比静电力强1 000倍，那么我们可能会看到原子核中有几百个质子的元素，但我们没有看到这种情况。地球上发现的最重的天然元素是有92个质子的铀，这表明这种能够维持原子核稳定的强吸引力，大约比质子之间的静电力强100倍。

可是，铀也是不稳定的，如果你等待足够长的时间，所有的铀都会经过所谓的“放射性衰变”，转变为原子量较小的元素。铅有82个质子和

125个中子，是不会衰变的原子量最大的元素，因此是稳定的。你可以构建更重的原子核，但如果质子和中子搭建的“积木塔”过高（每多出一个质子，就意味着要有更多的中子使它们聚在一起），轻微的扰动就会使塔倒塌。一旦发生这种情况，原子核将以高能光子（伽马射线）或高速亚原子粒子（如电子、质子或阿尔法粒子）的形式发出辐射，损失能量。

事实上，一些较大的原子核极不稳定，你只需轻轻一击，便可将它们击散。在20世纪50年代中期，诱使米基·鲁尼进入原子弹测试点的贵重的铀，就是这样一种元素。19世纪末的一本字典将铀描述为“一种沉重且一文不值的金属”。然而到了1938年，奥托·哈恩和弗里茨·斯特拉斯曼使一个铀原子核发生分裂，从此，人们对铀的认识彻底改观。

核裂变是让一个质量大的原子核分裂成两个质量大致相等的原子核的核反应形式。事实证明，为了让一个铀原子核发生分裂，必须用缓慢移动的中子温和地撞击它。电子太轻，不会造成太大的破坏，而质子或带正电的阿尔法粒子会被铀原子核的大量正电荷排斥而发生偏转，不能到达足够近的位置，所以无法对原子核造成任何伤害。因此，直到1932年查德威克发现中子，人们才找到了轰击铀原子的合适工具。

然而，在查德威克实验的放射性衰变过程中释放出的中子能量太高了。快中子具有很大的动量，根据德布罗意的物质波假说，动量越大，物质波的波长越小。在原子中发现原子核始终是一个难题——如果电子的概率云等于原子的“大小”，它和你拇指的指甲盖一样大，那么原子中的原子核比拇指指甲盖的一个细胞还要小。1937年，意大利物理学家恩利克·费米发现，当一束中子击中一块石蜡时，由于与大的石蜡分子相撞，中子的移动速度减慢，但不会像轰击同等大小的铅那样停下来。中子移动得越慢，动量越低，物质波的波长越大。物质波越长，中子就越有可能与原子核的物质波交叠。就像夜晚中的你在花园漫步，倘若你将双臂伸开，而不是将它们垂放于身体两侧，你的身体碰到灌木丛的可能性更大。

如果中子击中铀原子核，那么原子核内的强力将有可能捕获这个中子（回想一下，强力的作用范围很小，中子必须恰好在原子核中才能受到强力的作用），使铀原子核稍微变重。但是，铀原子核中质子和中子的堆叠勉强处于稳定状态，额外增加一个中子将使原子核不堪重负。因此，这样的原子核通常会坍缩成两个更小的原子核（典型生成物是Kr氪，有36个质子和48个中子；以及Ba钡，有56个质子和81个中子；也会

检测到其他的裂变产物），同时释放出两三个移动更加缓慢的中子[5]，并以更小原子核的动能和伽马射线的形式释放出能量。

核裂变产物的动能从何而来？答案是来自静电吸引力。即使物体间相距甚远，万有引力和电磁力仍然可以发挥作用（尽管距离越远，力越弱）；而当作用长度大于中子的直径时，保持原子核形态的强力就不再起作用了。因此，一旦两个大的原子核碎片在铀裂变过程中分离，就不再有强力将它们拉紧。但是，氪原子核中的36个质子与钡原子核中的56个质子互相排斥，因为它们起初靠得很近，它们之间的排斥力很大。原子核裂变产物的动能造成了核爆炸的可怕破坏力，这种动能来自基本的静电力。像铀或钚这样的元素比轻元素更容易分裂，但如果强力被关闭，即使是暂时的，所有的物质也会发生剧烈爆炸。

“放热”是许多化学反应的产物，比如炸药爆炸。我所说的“放热”是指反应产物的动能比初始反应物要大。几乎所有化学反应都以电子伏特为基准能量单位，其范围大约是10电子伏特到零点几电子伏特。（有时化学反应的能量是零点几电子伏特；而在另一些情况下，由于所处化学反应的环境不同，化学反应的能量可能是10电子伏特，甚至更多。）相比之下，一个铀原子核分裂成两个更小的原子核，能释放出大约2亿电子伏特的能量。因此，裂变原料中每个原子在核裂变过程中释放出的能量，都比化学反应要高得多。不过，从单个铀原子中释放出的2亿电子伏特，比蚊子叮咬更不易察觉。如果聚集几千万亿个铀原子，尽管它们的总重量只有几千克，但它们释放出的能量却是毁灭性的，相当于两万多吨炸药释放出的能量。

1.36千克铀原子是危险的，但0.68千克铀原子却不危险，这是为什么呢？铀原子核捕获一个慢速移动的中子并裂变成两个较轻的原子核后，它会释放出两三个慢速移动的中子。因此，一个铀原子的衰变为另外两个铀原子核的裂变提供了条件，这两个铀原子又会分别造成两个铀原子核的衰变。从单个原子的核裂变开始，大量额外的原子将在链式反应中被诱发衰变，但前提是，第一个铀原子释放出的中子击中了其他原子核。别忘了，原子内的大部分区域都是空的，而且原子核的直径只是原子直径的万分之一。如果衰变的铀原子周围没有足够数量的其他原子，衰变将保持在低水平，这种衰变能够提供能量（对于核电站很有用），但不足以引发链式反应。

原子弹制造的诀窍在于，让两个质量均小于“临界质量”（这一质量可以保证链式反应的进行，因而被定义为“临界质量”）的铀块迅速合为

一体，使反应不断继续。引发链式反应的关键不是质量，而是铀原子的数量。足够多的铀原子使得释放出的中子很有可能击中另一个原子核并引发另一个核裂变反应。在这种情况下，几千克铀就可以灭绝几平方千米范围内的生物，并且在更远的地方仍可以造成大面积的破坏。

在20世纪50年代初期，如果父母花费50美元购买“吉尔伯特铀238原子能实验室”，孩子们就能够学习所有关于放射性元素的知识。这套工具是化学实验组合的核物理版本，具有品种齐全的放射源，能够发射阿尔法、贝塔和伽马射线，一个盖格计数器，以及一个迷你云，用来观察高速放射性粒子的运动轨迹。工具箱内还有一本指导手册，以及一篇题为《看看大梧如何让原子分裂》（*Learn How Dagwood Splits the Atom*）的知识性漫画。这篇漫画式文章在科学方面的表达深入精确，乔·康西丁为这篇文章写了引言，他是一家国际新闻机构的记者，报道过比基尼环礁核试验，并为1947年关于原子能的纪录片《原子弹的秘密》（*The Beginning or The End*）撰写了剧本；曼哈顿计划的军事工程负责人莱斯利·格罗夫斯中将为这篇文章撰写了前言。在这篇文章的漫画故事中，魔术师曼德里克将大梧·巴姆斯特德和他的妻子布兰迪，以及他们的孩子和狗缩小到亚原子尺寸，使他们能够和大力水手、奥利弗以及小屁孩一起，目睹原子核衰变和链式反应内部运行机理。图9–1展示的是这个漫画故事中的一页，即使有大力水手的帮助，大梧也难以克服将铀235原子核聚在一起的强力。尽管如此，当他使用一个“中子火箭筒”恰好击中原子核时，就引发了核裂变的链式反应。


魔术师：从单个铀原子裂变过程中释放出来的中子继续猛烈地撞击其他铀原子！更多的中子！百万个铀原子裂变！更多的中子！上千亿个铀原子裂变！这就是链式反应！
大梧：不行——你得去人群中，坐在观众席上看链式反应！
1
2
3
4
5
6

图9–1 《看看大梧如何让原子分裂》中的一页。魔术师曼德里克将大梧·巴姆斯特德和他的家人缩小到亚原子尺寸，在大梧抱起他的女儿试图快速离开核反应堆时，魔术师叙说着铀原子核裂变引发的链式反应的原理

1945年8月7日，世界各地的人们都从当地的报纸上读到了前一天美国军方成功地在日本广岛引爆一颗原子弹的消息，但这并不是原子武器第一次进入公众视野。图9–2展示的是1929年刊登在报纸上的一组巴克·罗杰斯的漫画。巴克·罗杰斯和他的同事们乘坐的潜艇被一条巨型章鱼紧紧抓住，对他们而言，重获自由的唯一机会就是利用原子鱼雷可怕的破坏性潜能将自己炸飞。比“曼哈顿计划”早了16年，连环漫画《巴克·罗杰斯，公元2429年》（*Bauck Rogers,2429 A. D.*）的作者菲利普·弗朗西斯·诺兰和迪克·卡尔金斯就自信地认为，他们的读者会明白原子鱼雷是常规水下导弹的威力增强版。



图9–2 在1929年日报报业集团的漫画连载中，巴克·罗杰斯发射一颗“原子鱼雷”造成的毁灭性结果

此外，在通俗冒险类杂志中，早在美国轰炸广岛和长崎的6年前，日本也已经知道原子武器毁灭一个大城市的能力。在1939年9月出版的《特工人员5号》（*Secret Service Operator No. 5*）杂志的第47期中，美国受到了入侵部队“黄色秃鹫”的攻击，这支部队隶属于日本帝国。在一个名为“黄色秃鹫的尸体骑兵”的故事中，“黄色秃鹫”军队用一颗原子弹将华盛顿特区夷为平地，杀死了美国总统、特工Q–6（特工人员5号的

父亲）和大多数华盛顿的政客。

1914年，赫伯特·乔治·威尔斯在他的科幻小说中使用了“原子能”（atomic）一词。这是在小说中用“原子能”一词修饰武器，以表示武器的杀伤力被增强的最早记录之一。威尔斯在《解放全世界》（*The World Set Free*）一书中，描写了原子弹从无噪声的原子能飞机上掉落，表现出可怕的毁灭性力量的场景。

那么，普通大众是如何在曼哈顿计划出现的几年前就知道“原子能武器”的呢？这在一定程度上要归功于弗雷德里克·索迪的著作，此人是欧内斯特·卢瑟福进行原子核放射性早期研究时的同事。索迪写了一系列科普读物，其中最著名的是1909年出版的《镭的阐明》，它是当时的畅销书。赫伯特·乔治·威尔斯对这本书印象深刻，他在《解放全世界》这部小说中使用了“原子能武器”的概念，这种武器仅几千克重，却能释放出巨大能量，并造成致命的辐射伤害。在威尔斯的小说中，一场爆发于欧洲国家和美国之间的原子能战争，催生了原始联合国。幸存的世界各国领导人决定建立新的世界秩序和一个世界政府。

1932年，这部小说给一位特殊的读者留下了深刻印象。威尔斯对世界政府的构想，以及对可怕的原子能武器的描述，令匈牙利物理学家利奥·西拉德感到兴奋。这位威尔斯小说的爱好者的能力很强，他在1933年构想出第一个可能的原子核链式反应（他在1934年为它申请了专利，比哈恩和斯特拉斯曼第一次让铀原子核分裂早了4年）。1939年，西拉德起草了一封信，由他本人和爱因斯坦签名后，寄给了当时的美国总统富兰克林·罗斯福，强烈建议美国发展原子能武器计划，并最终促成了曼哈顿计划的实施。因此，索迪为一般读者撰写的科普读物，激发了赫伯特·乔治·威尔斯的灵感，使其在自己的科幻小说中提出了原子能武器的可行性；威尔斯的小说又直接推动了现实世界中原子弹的制造。当出版商雨果·根斯巴克在1926年推出科幻通俗杂志《惊奇故事》时，他在创刊号中再次刊登了威尔斯创作的一篇经典小说。根斯巴克是否对他的杂志的座右铭“今日奇谈怪论……明日冷酷现实”有清晰的认识？现在看来，这一点很值得怀疑。

[1] 物理学家用一个“核子”来定义原子核内的一个粒子，可以是一个质子或者一个中子。

[2] 迪士尼乐园节目《我们的朋友——原子》的赞助商是通用动力公司，它也是核潜艇制造商。

[3] 假设阿尔法粒子在撞击原子核之前被静电力排斥。

[4] 为了使原子核保持稳定，中子和质子必须在数量上达到一种平衡状态——因此，像氢元素的同位素，具有一个质子和两个中子，可能是不稳定的，并且会“衰变”，这一点我们很快就会提到。

[5] 取决于铀原子核裂变过程中形成的具体的衰变碎片。不稳定的铀原子核究竟如何衰变为更小的原子核，这是一个复杂的过程。

第10章
或快或慢的原子核衰变

无论是米基·鲁尼在《原子小子》中的不幸遭遇，还是托·约翰逊在《亚卡的野兽》中的意外突变，这些都是对核辐射所造成伤害的荒谬、失真的描述。到20世纪50年代中期，多丽丝·戴对盖格计数器的奇妙之处的歌颂，已然被湮没在核武器试验结果带来的悲观情绪里。

原子弹爆炸发生在第二次世界大战的最后一年，10年后，科幻电影将接触放射性沉降物的真正风险清晰明确地表现为“不可遏制”。在1954年华纳兄弟公司出品的电影《它们！》（*Them!*）中，詹姆斯·惠特莫尔和詹姆斯·阿尼斯与巨大的变异蚂蚁展开了激烈战斗，这些蚂蚁由于接触了新墨西哥沙漠地区残存的放射性物质而变异至直升机大小。同样地，格伦·曼宁中校也因为接触到放射性物质而变身为《惊天50尺男巨人》（*The Amazing Colossal Man*，1955年）中的主人公，并于1958年回归出现在《巨兽之战》（*War of the ColossalBeast*）中；吃了含有放射性同位素水果的蝗虫体型急剧增大，这是《末日的开始》（*The Beginning of the End*，1957年）中的情节；与之类似的还有电影《海底来物》（*It Came from Beneath the Sea*，1955年）中大到惊人的章鱼，因为它们食用了受到放射性污染的鱼类；沼泽中的放射性污染给原本宁静的小镇带来了一场灾难，这是《致命水蛭》（*The Attack of the Giant Leeches*，1959年）的故事。但也有特例，放射性物质导致生物的“小型化”，就像《不可思议的收缩人》（1957年）所展现的；早在曼哈顿计划实施的5年前，《独眼巨人博士》（*Dr.Cyclops*，1940年）的收缩光束就已经靠原子能射线提供能量了。

“放射性”是对原子核放出粒子或光的现象的统称。正如我们在上一部分所讨论的那样，在原子中的电子从一个能级跃迁至另一个能级的过程中，它们会吸收或发射光[1]，这些光的波长范围很广，从微波到红外线、可见光，再到紫外线和X射线。将量子力学的规则应用于原子核内的质子和中子时，我们会发现类似的情形，即只有某些量子化能级有可能存在。根据海森堡的不确定性原理，原子核内部量子化能级间的能量差会比原子内能级间的能量差大得多。这是因为原子核内的空间比原子

本身要小很多，所以质子和中子在位置上的不确定性降低了。而它们动量值的不确定性会增加，动量越大（质量乘以速度），动能也就越大（动量的平方除以质量的二倍）。原子中典型的电子跃迁释放的能量约为几电子伏特，偶尔也能够观察到X射线的发射，其能量为1 000电子伏特；而原子核内发生能量转移时会释放出由伽马射线组成的电磁辐射，其能量为几百万电子伏特。

当原子核内的质子和中子从较高能级跃迁至较低能级（被称为“基态”）时，除了释放出伽马射线光子以外，还有其他方法可以释放能量。比如，一些原子核可以放出阿尔法粒子（由两个质子和两个中子组成），以此降低能量。组成氦原子核的两个质子和两个中子彼此结合得十分紧密，如果较大的处于激发态的原子核要发射它的任何质子或中子，最优选择就是以阿尔法粒子的形式释放能量，而不是损耗更多的能量分解阿尔法粒子。这样一来，较大原子核内的质子数减少了两个，因而质子之间的排斥力也减小了。释放出的阿尔法粒子有相当大的动能（通常是几百万电子伏特），这使卢瑟福和索迪在研究原子结构时很容易探测到它们，原子核正是在此研究的基础上被发现的。

尽管原子核可以发射阿尔法粒子来降低它的能量，阿尔法粒子内部的质子和中子仍然受制于强力，这种强力就像一道屏障一样将亚原子粒子约束在原子核内。这种屏障足够高，一般来说，任何阿尔法粒子都别妄想能越过屏障，以摆脱原子核的束缚。可是，由于我们已经观察到了阿尔法粒子离开较大原子核的现象，这其中一定存在某种机理，使阿尔法粒子能够越过屏障。这里，量子隧穿效应这一奇特现象开始发挥作用。强力对于维持原子核的稳定状态十分有效，以至于阿尔法粒子只有10^{-38}的机会能够逃出来。然而，阿尔法粒子在原子核内部空间中较小的不确定性造成了动量上巨大的不确定性，使其在原子核内部“四处游荡”，以每秒钟10^{21}次的力度撞击强力屏障。因此，如果等上几十亿年，我们将会观察到一个阿尔法粒子“量子隧穿”到原子核外。一旦超出强力的作用范围，阿尔法粒子就会因为受到静电力的作用而被高速推出去，这种静电力也将能量传递给正在裂变的铀原子核碎片。

几十亿年很漫长，那么，我们怎样才能观察到阿尔法粒子被放射性同位素发射出来，而又无须等待那么久呢？这个问题的答案有助于我们理解放射性半衰期的概念，进而阐明地球的年龄是多少。

我们先来看有关概率的基本内容：一项在0到999之间随机抽取一个

三位数的彩票游戏，会产生1　000个可能的结果。彩票办公室随机抽取三个数字，因此某一天的获奖数字可能是275，而接下来的一天可能是130或者477，等等。如果我购买一张有特定数字组合的彩票，比如927，那么我有千分之一的机会赢得大奖。假设我总是购买927这个号码，第一天我就能中大奖，这是有可能的，尽管概率只有千分之一。也有可能在927成为中奖数字之前，我需要等待相当长的一段时间。某些数字组合可能多次成为中奖号码[2]，因此，在927成为某一天的中奖号码之前，我可能需要长时间地购买彩票。

彩票游戏和不稳定的原子核衰变之间的一个重要相似性在于，“事件”发生（彩票号在某一天中奖，或者使原子核转变为更稳定的形态，并放出辐射）的概率在任意一天都是相同的。在美国的大多数州，真实、标准的彩票游戏对于在其他所有的号码组合被抽中之前，某一组号码是否可以重复中奖并没有限制。在任何一天，某一个号码组合被抽中的概率与其他号码组合完全相等。同样地，在量子力学中，向较低能量状态跃迁是一个概率事件，原子核的衰变可能发生在第一天，也可能发生在第100天，或者第100万天。在回归较低能量态之前，原子核处于激发态的时间没有上限。即使原子核能长时间处于激发态，它在第100万天或第一天回归基态的概率也是相同的。假如一个人购买彩票的时间足够长，那么最终每个可能的号码都会中奖。同样地，如果等待足够长的时间，那么每一个不稳定的原子核都会衰变到较低的能量态。

原子核衰变的概率可以很高，也可以很低，这是由原子核及其所处的不稳定激发态的性质决定的。这就好比买彩票，为了中大奖，你可能只需要猜从0到9中的一个数字，也可能需要按精确的顺序猜7个随机组合的两位数。如果是第一种情况，你用不了多久就能猜中；但如果是第二种情况，在中大奖之前，你需要耗费的时间恐怕要比几辈子还长（如果彩票每天都有不同的中奖号码）。同理，一些元素的不稳定原子核几天或几个月就会发生放射性衰变，而另一些原子核的放射性衰变可能要等几十亿年的时间才会发生。然而，这并不意味着前一类原子核不可能长时间不发生衰变，也无法保证后一类原子核不可能马上发生衰变。尽管我从未如此幸运，但第一次买彩票就猜中全部7个中奖号码也是有可能的。

如果我从大量放射性原子入手，那么随着时间推移，避免衰变成其他同位素的原子数目曲线将遵循“指数时间关系”。为了理解这个概念，想象一辆时速为96千米的汽车突然紧急刹车，那么汽车完全停下来需要

多长时间呢？如果我们假设制动器提供了一个每小时16千米的恒定“减速度”，那么只需6秒钟，汽车就会停下来。如果制动器提供的减速度取决于汽车在某一时刻的行驶速度呢？也就是说，当汽车的行驶速度很快时，制动器能提供一个很大的力，使速度减慢；但是，如果你开车的速度慢得多，比如在停车场，那么制动器会提供一个较小的力。如果减速度和速度成比例，那么这辆车根本停不下来！（当然，它可能以非常慢的速度移动相当长的时间，出于某种意图和目的，我们也可以说它已经停止了；但是，如果我们要测量速度，就会发现它的速度非常小，有可能比百万分之一千米的时速还小，但绝对不会达到零。）在减速度恒定的情况下，汽车的速度随时间线性减小；在减速度随车速而改变的情况下，车速起初会急剧下降，因为它的行驶速度很快，这意味着它的减速度也很大。但是，随着它的行驶速度越来越慢，制动力减弱，汽车将以非常缓慢的速度移动相当长的时间，而制动器只会提供非常微弱的力。汽车的速度—时间曲线是一个被称为“指数式衰减函数”的凹曲线。

装载速度敏感型制动器而不断减速的汽车只是假设的存在，在现实生活中，人们更加熟悉的是另一种与之相反的现象，即增长速度越来越快的“指数式增长”，比如存款的复利。复利存款，在初期只会有小幅增长。但随着时间的推移，本金和利息都会被计入复利的计算范围，由于你的银行存款余额受益于指数式增长，你的收益将会很快增加。

我们在氢的不稳定同位素氚的衰变过程中，发现了这样的指数依赖关系。通常，氢原子的原子核内有一个质子。更大的原子核则需要中子来形成强力，以克服质子间的静电力。氢原子的原子核内只有一个质子，所以它是唯一不需要中子的元素，不过中子在氢的原子核内也是可以存在的。在氢原子中，一个电子与原子核内单个质子之间的静电力将电子束缚在量子力学“轨道”上。原子的化学性质是由它拥有的电子数决定的，电子数则取决于原子核中的质子数。因此，可以构建另一种形式的氢原子，包含一个质子和一个电子，并且原子核中含有一个中子。在大多数情况下，这种原子表现得与普通氢原子一样，我们将这种同位素命名为氘。如果原子核内有两个中子和一个质子，核外有一个电子在“轨道”上运行，这种同位素叫作“氚”[3]。

如图10–1所示，氚不稳定，通过某种机制，它会衰变成氦的同位素，并释放出如第8章所述的使曼哈顿博士散发蓝色光芒的高速电子（贝塔射线）。图10–1展示的是漫画《看看大梧如何让原子分裂》中的另一页，即将两个中子加入一个氢原子核，产生了不稳定的结果。氚的

衰变速率很快，对于一个给定的原子核来说，大约只需要12.5年，同位素就有50%的可能发生衰变。

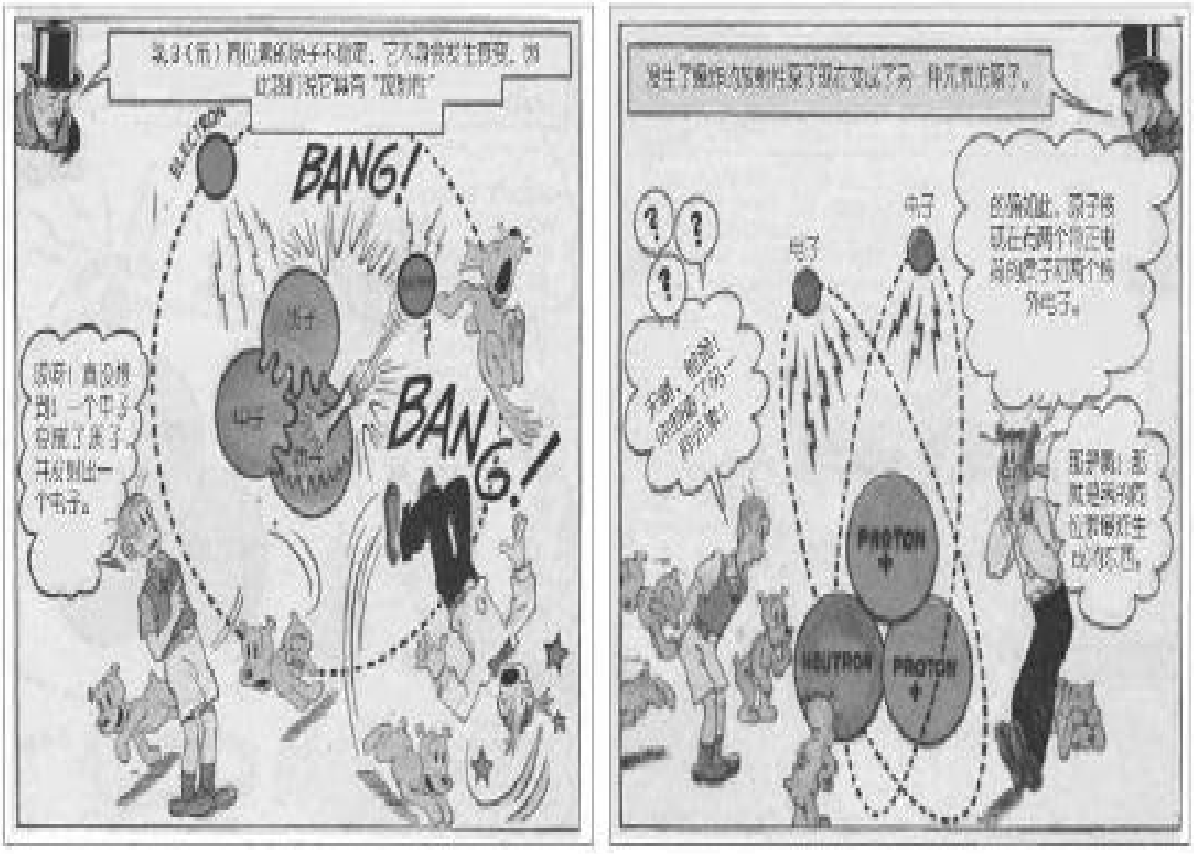


图10–1 《看看大梧如何让原子分裂》中的一页。其中，大梧和他的儿子小巴姆斯特德还有他的狗黛西，一起见证了一个氚核经放射性衰变成为氦的同位素的过程

如果衰变速率如此之快，为什么仍然存在氚呢？因为氚不断地被制造出来。当宇宙射线形成的高速中子与大气中的氮原子发生碰撞后，不稳定的氮原子核就会衰变成普通的碳原子和氚。在上层大气中生成的氚会被氧原子捕获，形成一种“重水”（别忘了，除了原子核更重以外，氚的化学性质与普通氢原子类似）。这种富含氚原子的水以雨滴的形式降落到地面。因为我们知道氚的衰变曲线，因此，将海洋表面的水与深海中的水做比较，我们就可以通过氚的分布变化来测定洋流的循环时间。

在理想情况下，为了测量氚随时间衰变的情况，我们希望获得从100多年前直到今天的雨水样本。氚的含量随雨水年份的不同而发生变化，因此通过测量雨水样本中氚的含量，我们就可以验证氚衰变的指数时间关系。但问题是，我们没有办法获取一个世纪以前的雨水样本。

1954年，谢尔顿·考夫曼和威拉德·利比在《物理评论》（*Physical Review*）上发表了一篇文章，他们二人退而求其次，对陈年葡萄酒中的氚含量进行了测量。如图10–2所示，每瓶葡萄酒中的氚浓度随标签所示的年份而变化。结果表明，在1954年进行测量时，1951年的罗纳河谷艾米塔日葡萄酒中的氚含量相当高，而1928年的波尔多洛捷酒庄葡萄酒中的氚含量则明显低得多。整个曲线可以用指数时间关系很好地描述。根据该曲线，如果在1954年我们想要一瓶氚浓度为1951年艾米塔日葡萄酒中氚浓度1/2的葡萄酒，我们会选择1939年的葡萄酒，由此推断氚的“半衰期”是12.5年。

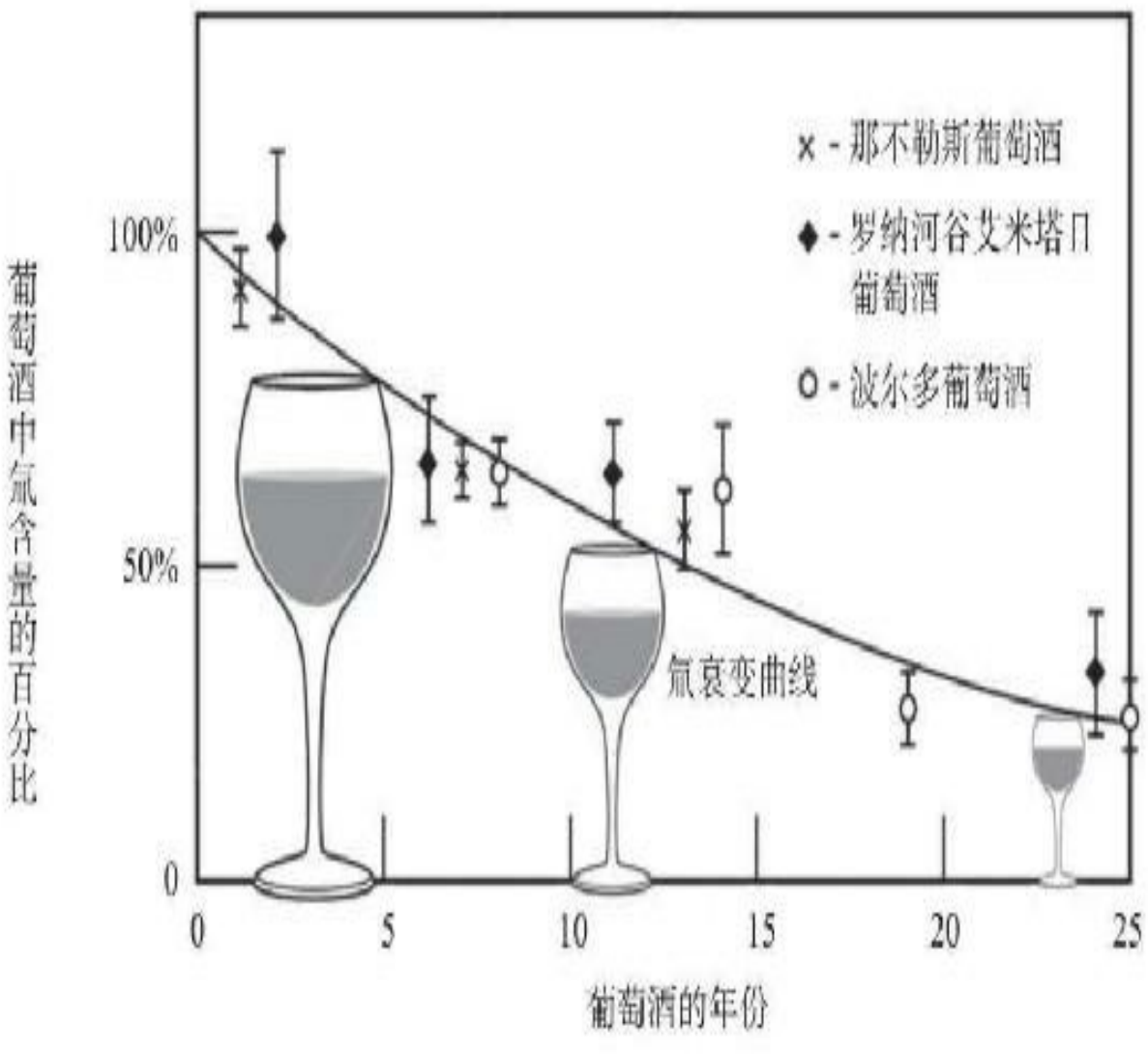


图10–2 含有“重水”的葡萄酒中氚含量随时间变化的示意图。葡萄酒的年份根据葡萄酒瓶身的标签确定。由于放射性衰变，时间越久远，氚含量越低。实线是将实验数据按照半衰期为12.5年

的指数时间关系进行拟合的结果。该图获得了谢尔顿·考夫曼和威拉德·利比的授权，《物理评论》1954年，第93卷，第1 337页

不同的放射性原子核具有不同的衰变速率。所有不稳定的原子核都遵循指数衰变函数，但是衰变周期可能大不同——从几分钟到几十亿年。通过测量衰变周期短的原子核，比如葡萄酒瓶中的氚，我们能够确认衰变的原子核的数目确实遵循指数时间关系。我们假设原子核的物理性质不随我们选择的元素种类不同而变化，对于那些衰变速率很低的原子核而言，其衰变周期会很长。尽管如此，我们仍然能够测得指数衰变曲线起始部分的数据。对这条曲线的数学拟合显示，当衰变函数到达50%这一点时，我们就可以据此得出半衰期，比如铀的半衰期是几十亿年，尽管我们并不能在实验室里待上这么久来测量完整的半衰期。

如果某放射性原子核的半衰期为一年，那么假设开始时我有100万个原子，一年后我大概会剩下50万个原子。衰变速率与原子的年龄无关，在接下来的一年，余下的原子中又有50%将会发生衰变。也就是说，最开始的100万个原子，到一年后将变成50万个，两年后变成25万个，三年后变成12.5万个，以此类推。

由于确知原子核的半衰期，我们可以用碳元素年代测定法去测量考古文物所属的年代。假设开始时我们有100万个不稳定的碳同位素。普通的碳原子核内有6个质子和6个中子（相应地，有6个电子处于量子力学“轨道”上），是一种已知的非常稳定的元素。因为其原子核内有12个粒子，这种形式的碳也被称为“碳12”。有时，宇宙射线与空气中的氮原子发生碰撞会产生一种具有6个质子和8个中子的碳的同位素。因为它具有与碳12相同的质子数和电子数，这种更重的同位素的化学性质与普通碳原子相同。然而，这种含有8个中子的碳原子（称为“碳14”）是不稳定的，会衰变为氮14。

这种罕见的碳14由宇宙射线的随机碰撞不断地被制造出来，也不断地衰变成另一种元素。世界上大约97%的碳是普通的碳12，3%的碳是更重且不稳定的碳14。这一比率在我们吃的食物、穿的衣服以及几乎所有含有碳原子的食物中都是相同的。因此，我们身体中约有3%的碳是不稳定的碳14。碳14变为铍元素的半衰期大约为5　700年。因此，在一般情况下，我们通过碳14在饮食中的随机分布来摄取它，而且，当我们代谢体内的老旧细胞时，也会排出碳14。这个过程随着我们生命的结束而停止（地球表面的宇宙射线通量很低，我们无须担心尸体内会产生碳14）。在死亡时，我们的身体、皮肤、组织和骨骼中的碳14含量维持在

3%左右的水平。如果一位未来的考古学家发现了我们的骨骼，测量了碳14含量并发现它只是碳12含量的1.5%，那么她可以自信地宣称我们大约死于5 700年前。如果碳14的含量是碳12的0.75%，表明已经过了两个半衰期，那么我们大约死于11 400年前。按照这种方法，任何包含有机物质的材料，无论是古代的骨头还是“都灵裹尸布”，都可以根据它的碳14含量来判断它的年代。威拉德·利比利用陈年佳酿得到了关于氚衰变的全新结果，他也因发现了碳14年代测定法而获得1960年的诺贝尔化学奖。

长半衰期的同位素，比如铀235和铀238，它们的半衰期约为数十亿年。这两种形式的铀是在超新星爆炸中产生的，超新星爆炸创造了所有形成太阳系中行星和卫星的原子。假设最初形成的铀235和铀238的丰度相同，通过测量来确定它们各自的半衰期，看看今天地球上铀235和铀238的比值，我们就能够计算出地球在太阳系中运行了多长时间，使铀元素的同位素衰变至今天的比例。答案是：大约45亿年。

至此，我们借助对量子力学的理解而知道了地球的年龄，量子物理学在固体物理学领域发挥着基础作用。没有量子力学，就不会有半导体革命，我们今天使用的许多电子设备也不可能存在。当然，你有权相信，地球实际上比通过放射性同位素测定的年龄要年轻得多，不过，为了坚持这一立场，你不应该再相信你的手机了！

发射出伽马射线、阿尔法粒子或贝塔粒子的元素具有放射性，当物质接触到这些核辐射物，即被描述为“受到辐照”。本章开头曾经提到，20世纪50年代的大多数科幻电影将动物或人类受到核辐射之后发生的变异描述为“巨大化”，偶尔表现为“小型化”。抛开好莱坞电影情节，接触放射性物质的真正后果究竟是什么呢？实际上，不同的放射性物质造成的损害不尽相同。

当一个原子核从高能量态跃迁至低能量态时，就会产生放射性辐射。你应该还记得，原子核内的量子态之间的能量差大约是100万电子伏特，而原子内电子态之间的能量差约为几电子伏特。电子在跃迁的过程中会以可见光的形式释放或吸收能量，而原子核内量子跃迁释放的能量则要大得多。当一个氖原子中的电子发生量子跃迁时，它们发出红光，我们将其应用于霓虹灯。而当氖原子的原子核发生量子跃迁时，释放的能量大约是电子跃迁的100万倍，并有可能造成广泛破坏。我们在充满可见光和紫外线的环境中进化至今，除了晒伤（以及随之而来的长时间的皮肤损伤），这些光线辐射并不会伤害我们。

如果你在核武器试验场附近徘徊，你会暴露于放射性沉降物中——放射性同位素是核裂变反应的副产品。核爆炸会产生各种危险且不稳定的原子核。当它们从较高的能量态回到较低的能量态时，就表现出放射性。相较贝塔射线或高能电子，你更倾向于这种放射性来自由两个质子和两个中子构成的阿尔法粒子。这是因为无论是阿尔法粒子还是贝塔射线，其以动能形式存在的能量，大约都是100万电子伏特。动能的数学表达为KE=（1/2）mv^2，其中m是物体的质量，v是物体的速度。所以，对于给定的动能，物体的质量越大，速度就越小。质子和中子的质量大约是电子质量的2　000倍，因此阿尔法粒子的质量几乎是电子质量的8000倍。如果一个阿尔法粒子和一个贝塔粒子的能量相当，由于它们都来自原子核的量子跃迁，那么阿尔法粒子的移动速度将比贝塔粒子慢90倍。粒子在物体中的移动速度越慢，它在物体中每一个原子附近停留的时间就越长，从而增加了与原子周围的电子发生碰撞并损失能量的可能性。移动速度较慢的阿尔法粒子甚至可以被一张纸阻止，而且它们几乎不会穿透一个人的衣服；而要阻止移动速度更快的贝塔射线，则需要用0.635厘米厚的铝片，而且它可以穿透衣服到达你的皮下部位。

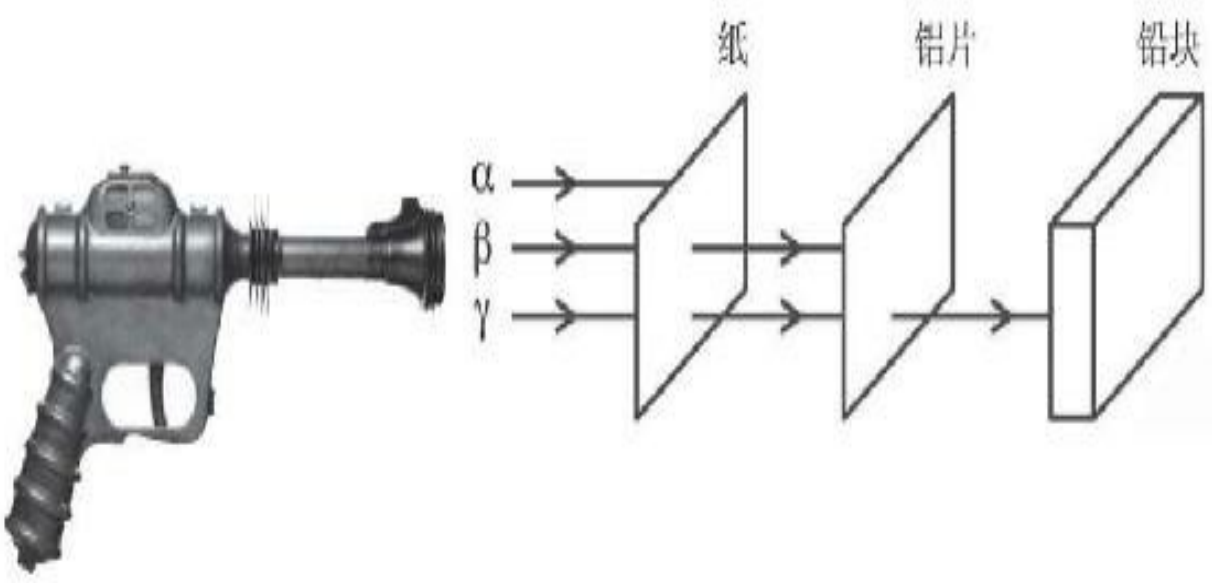


图10–3 1936年巴克·罗杰斯的玩具射线枪的素描图。在故事中，它可以发射出由阿尔法粒子、贝塔射线和伽马射线光子组成的放射性物质。（图中展示的是一把巴克·罗杰斯XZ–38型粉碎者手枪，实际上并不能释放出高能亚原子粒子）。这三种类型的辐射，能量都约为几百万电子伏特，却需要不同的屏障来阻止它们。阿尔法粒子被一张纸挡住了；贝塔射线可以穿透纸张，但被一层薄铝片挡住了；伽马射线可以穿透纸和薄铝片，需要用厚铅块才能挡住它

伽马射线是高能量的光，它的能量是X射线的几百倍。一当量剂量

的伽马射线对人体造成伤害大约相当于拍20次牙科X射线片。因为伽马射线由光子组成且不带电荷，不会直接与原子中的电子发生相互作用，这令它们更难被阻止。需要用1.25~2.5厘米的致密材料（如铅）来阻挡伽马射线，而且它们会穿透人体。一些原子核（如铀238）也会放出中子[4]，它们本身是无害的，但当它们与人体中的氢原子相撞时，产生的高速射出的质子却具有很大的破坏性。

如果你很不幸地吞下了一个不稳定的原子核，而且它在你的体内发生了放射性衰变，那么你很可能一命呜呼。你体内的放射性粒子可以直接进入你的器官，从它们攻击的原子中夺取电子，破坏细胞内的化学键，造成大范围的染色体损伤。

2006年，俄罗斯记者亚历山大·利特维年科因为饮用了含有钋210的茶而被谋杀身亡。这种不稳定原子核的半衰期仅为138天，并在衰变的过程中释放出高能阿尔法粒子。0.45千克钋210以将近64 000瓦的功率放出能量。因为它的衰变概率很大，即使0.05毫克的钋210也会致命（据悉，利特维年科死亡时体内的钋含量多达10毫克）。因此，外部环境中的阿尔法粒子不会给人造成太大的麻烦，但如果在人体内，却会致命。幸好，“吉尔伯特铀—238原子能实验室”在1952年停售。我曾在上一章提到，这套玩具包含一个迷你云室，它提供的放射性同位素中包含少量寿命短但效力很强的放射性钋210！

当然，某些形式的辐射足以杀死它们攻击的活细胞，这有时是一件好事。从超市购买的生肉，它的细胞已不再是活细胞，但它里面的沙门氏菌或其他致病细菌却非常活跃。暴露于放射性环境并不会使已经死亡的食物细胞遭受严重损害，但辐射能穿透食物并杀死其中的细菌，使食物吃起来更加安全。暴露于放射性环境不会使食物内稳定的原子核转变成不稳定的原子核，也就不会有放射性。

许多核辐射危害的产生，是由于带负电的贝塔射线或带正电的阿尔法粒子、伽马射线光子与原子相撞，并使原子失去电子。这一过程被称为“离子化”，当一个原子失去部分或全部的电子时，它的化学性质就会发生根本性改变，这些改变有时是有益的。地球不断受到宇宙射线的攻击，这些射线主要（但不完全）来自太阳和其他遥远星系的高能质子。当这些质子（其中一些有10^{18}电子伏特的能量）攻击大气层时，它们可以产生大量其他的基本粒子，这些粒子能以接近光的速度运动。这样的粒子如果击中我们的DNA，将导致电离辐射损伤，并改变我们的遗传密码的化学性质。如果受损伤的DNA碰巧处于精子或卵细胞中，这些变异

就可能会遗传给后代。以这种方式暴露于宇宙射线引发的是基因的自然变异，可能导致生物体的有害变异，但偶尔也能改进生物体适应环境的能力。

但是，不损害原有生物体且能引发基因突变，从而提高后代的繁殖成功率，这种情况非常罕见。更常见的情况是，电离辐射摧毁了细胞本身，或者导致DNA的改变和恶性肿瘤的形成。这与《惊天50尺男巨人》和《致命水蛭》等科幻影片中失控的细胞繁殖的情节截然不同。

[1] 还有一种情况，在电子从高能量态跃迁至低能量态的同时，原子中的另一个电子被发射出来。但在大多数情况下，原子中的电子在能量跃迁过程中会吸收或发射光子。

[2] 我玩彩票的经历为这种现象提供了直接的经验性证据。

[3] 原子核内有两个中子和两个质子的元素叫作氦；如果它是从较大的不稳定原子核中释放出来的，则被称为阿尔法粒子。

[4] 中子的发现使人们得以更好地理解了核辐射的特性，且改变了以某种“射线”为中子束命名的方式。

第11章
太阳中心的核聚变反应

在物理学家乔恩·奥斯特曼之前，科幻故事中出现过另一位物理学家——菲利普·索拉尔。在1986年的DC漫画《守望者》中，奥斯特曼在吉拉公寓的实验室内因其本征场被意外移除而分崩离析，之后他将自己重构为拥有超能力的曼哈顿博士。在1962年的金钥匙漫画系列《索拉尔——原子之人》中，菲利普·索拉尔在原子城因核试验研究被蓄意破坏而暴露于致命剂量的核辐射中。然而，他幸存下来，并获得了“量子力量”。在第二期中，索拉尔因原子弹爆炸而人间蒸发，但他凭借顽强的意志力将自己重构为“索拉尔博士”。作为研究生院的一名“幸存者”，我对奥斯特曼和索拉尔在实验室中成为超级英雄后一直保留其博士头衔的意愿感同身受。一旦你经历了研究生资格考试的严峻考验，你会发现，从亚原子状态重构自己，并不像你想象的那样富有挑战性。

在为DC公司《守望者》时，作家阿兰·摩尔最初使用的是另外一个出版商查尔顿漫画旗下的超级英雄形象。查尔顿公司当时已宣布破产，并被超人和蝙蝠侠系列漫画的出版商DC漫画公司收购。但是，DC漫画的编辑发现，如果摩尔这样做，许多角色都无法在未来的故事中使用，因此他建议摩尔改用原创角色。

曼哈顿博士的原型是原子队长，原子队长的能力是遵从量子力学原理的，因为他能够操纵能量，并主要用于飞行、超强力量和爆炸。索拉尔博士虽然不是查尔顿漫画公司的漫画人物，但似乎是更接近曼哈顿博士的早期漫画形象，因为索拉尔也可以改变自己的身体大小，分身成多个副本，并操纵物质和能量。与曼哈顿博士不同的是，当索拉尔博士使用他的超能力时，他的皮肤不会变蓝，而是变绿。原子队长、索拉尔博士和曼哈顿博士之间的差别显而易见，因此他们不大可能是休·埃弗雷特多重世界理论中处于三个平行世界中的同一个人。

1965年，《索拉尔——原子之人》发行的第14期“索拉尔的点金术”，是对量子力学力量的一次更准确的展现。在这个故事中，由于控制棒损坏（其作用是吸收中子，降低铀裂变的速率，一座水下核反应堆

达到了临界状态。通常情况下，索拉尔博士的能量通过暴露于核辐射而被激活，而这一次，当他潜入水下修理反应堆时，却发现自己的能量被放射性物质削弱。最终，他被一名穿着铅防护服的工作人员救出，而且他受到的额外辐射临时赋予索拉尔一种新的超能力。如图11–1所示，无论何时，当索拉尔博士与一个物体发生物理接触时，他都会将原有的元素转变为元素周期表上它的相邻元素。在图11–1中，他将含有79个质子的金转化为含有80个质子的汞；在此之前，他抓住了一根铜棒（29个质子）并将其转化为锌（30个质子）；在飞行时，他甚至因为将氧气（原子序号第8）转化成氟气（原子序号第9）而感到窒息。这种新的超能力似乎能让索拉尔博士接触的任何物体内部的中子发生贝塔衰变。


正如我所料，塞恒尔，钢变成了铑！你使它的原子序数从第 29 变成了第 30。
让我们用金来试试！它的原子核中的质子数是 79，如果你使它的原子序数变成第 80，它就会变成汞！
奇怪的转变又一次发生了。
等等……
求！你让你接触到的任何元素的原子核中都增加了一个质子……从而改变了它的原子结构！
这会让我象行走的炸药一样危险……

图11–1 在《索拉尔——原子之人》的第14期，一次额外的核事故临时赋予索拉尔博士（穿戴红色潜水服和面罩）一种超能力，能够借助物体中的“弱核力”使他直接触碰的物体内部发生贝塔衰变，从而将金转化成汞

我们在第9章中说过，中子提供的强力可以克服静电力，把质子和中子结合在一起，从而使原子核保持稳定。如果没有中子，静电力会促使质子飞离原子核。质子也表现出强力，但如果没有中子，仅由质子组成的原子核将难以保持稳定。原子核外的中子本身并不稳定，实验室中一个单独的中子会衰变成一个质子和一个电子，其半衰期约为10.5分钟。由此生成的电子的移动速度非常接近光速，如果这个过程发生在原子核内部，就是不稳定同位素发射贝塔射线的过程。

一个孤立体系的质量和能量在任何过程中都必须保持不变，所以一个“静止”的中子[1]只能衰变成质量小于中子的基本粒子。因此，一个中子会衰变成一个质量稍小的质子，而一个“静止”的质子则不能衰变成一个更重的中子。因为中子是电中性的，而质子带有正电荷，为了保证原子核衰变前后总电荷数保持不变（在物理学中，除了能量守恒定律和角动量守恒定律之外，还有一条我们前面未提及的原理，即“电荷守恒定律”。它也是自然界的普遍规律之一，因为电荷在任何过程中都不能被创造或消灭），在衰变过程中必须产生一个带负电荷的电子。一个电子大约是一个质子质量的两千分之一，小于中子和质子间的质量差，因增加一个电子仍然符合质量守恒定律。尽管一个中子衰变成一个质子和一个电子，意味着在衰变过程中质量和电荷均守恒，但是测量质子和高速电子（“贝塔射线”）的动能并和中子的剩余能量加总，结果发现一些能量在衰变过程中消失了。虽然不是很多，但足以引起重视，并带来麻烦。

20世纪20年代末，当物理学家发现了这种现象，并认识到它似乎违反了能量守恒定律时，他们面临两个选择：第一，放弃能量守恒定律，至少在中子衰变的问题上；第二，发明一种当时的仪器测量不到，但能带走“消失的能量”的神奇粒子。1930年，沃尔夫冈·泡利建议物理学界选择第二种。恩利克·费米认为，这种“幽灵粒子”必须呈电中性，且质量很小或者为零，他将这种粒子命名为“小的中子”，或“中微子”[2]。最终，人们建造了探测器来探测这种粒子，并于1956年证实了它们的存在。这些粒子不仅真实存在，而且是宇宙中最普遍的粒子。中微子与物质间的相互作用是由仅为电磁作用力的一千亿分之一的弱核力决定的。因此，中微子能够轻易穿过普通物质而几乎不与之发生反应（长度超过两光年的铅，才能阻挡住一个中微子）。如果你伸出大拇指，那么在1

秒钟内将有超过100万个中微子穿过你的指甲。

索拉尔博士在受到超量核辐射后，获得了一种超能力，使他接触的任何物体发生贝塔衰变。如果一个含有79个质子、79个电子和118个中子的金原子，它的一个中子自发地衰变为一个质子和一个电子，那么它将有80个质子、80个电子和117个中子。汞最轻的稳定结构有80个质子、80个电子和118个中子，因此在图11–1中，索拉尔博士将创造一个含有117个中子的汞的不稳定同位素，其半衰期约为2.5天。这样一来，索拉尔就有时间完成他的冒险，尝试将汞再变回金。实际上，通过中子的贝塔衰变将一种元素转变成元素周期表上它的相邻元素，这并非炼金术士梦寐以求的化铅为金（通常，贝塔衰变会将含有78个质子的铂转变为含有79个质子的金。根据全球贵金属交易价格，你的做法很可能以赔钱收场），而一个被称为“逆贝塔衰变”的过程会将汞变成金。尽管我们不能随意地在地球上启动这种转变，但幸运的是，这一过程在太阳中心持续地发生，产生阳光，为地球上的一切生命活动提供能量。

植物通过光合作用把太阳光转化成化学能存储在体内，化学能为植物提供了维持新陈代谢所需的能量，太阳光的能量来源则是恒星内部的核聚变反应。4个质子，即氢原子核，在太阳中心的巨大压力和极高温度的作用下，融合形成氦原子核。但是，一个氦原子核由两个质子和两个中子组成，并非4个质子。我们说过，使原子核保持稳定的强力来自中子。因此，为了把氢变成氦，必须先将两个质子结合起来，然后通过“逆贝塔衰变”将其中一个质子转化成一个中子。

我在前文中曾经指出，一个质子不能转化成一个中子，因为质子的质量小于中子的质量，较轻的物质不能衰变成较重的物质。但如果两个质子相撞，在弱力的作用下，通过逆贝塔衰变就可将一个质子转变成一个中子，如图11–2所示。质子和中子在强力的作用下结合起来（成为一个氘原子核，氘是氢的一种同位素），其能量低于单个质子与单个中子的能量之和；相应地，与一个质子和一个中子的质量之和相比，能量较低的氘原子核质量更小。尽管质量的差别很小，通过$E=mc^2$计算出的能量差却很大，这些能量在氘原子核形成的过程中以2.225×10^6电子伏特的伽马射线的形式释放出来。除了一个中子，在形成氘原子核的反应过程中还产生了一个“反电子”（拥有像质子一样的正电荷，以及与电子相同的质量）和一个中微子。

弱力的作用范围大约是强力的千分之一，而强力仅在不超过一个原

子核直径的范围内起作用。两个带正电荷的质子互相排斥，它们之间的距离越近，排斥力就越大。因此，想要给弱力创造一个发挥作用的机会——通过逆贝塔衰变将一个质子转变成一个中子，就必须克服两个质子之间的静电力，使它们紧密接触。太阳中心的温度极高、压力巨大，所以两个质子以较高的速度发生碰撞的概率很高。然而，即使在太阳中心，当质子之间的距离太过接近时，它们的移动速度也不足以克服静电排斥力。那么，它们是怎样克服这一静电力的呢？答案是：通过量子力学的“隧穿效应”[3]！就像在放射性衰变过程中阿尔法粒子通过隧穿效应克服原子核周围使质子和中子聚集在一起的强力那样，结合在一起形成最简单的氢同位素的两个质子，也必须通过隧穿效应来克服彼此之间的静电力。

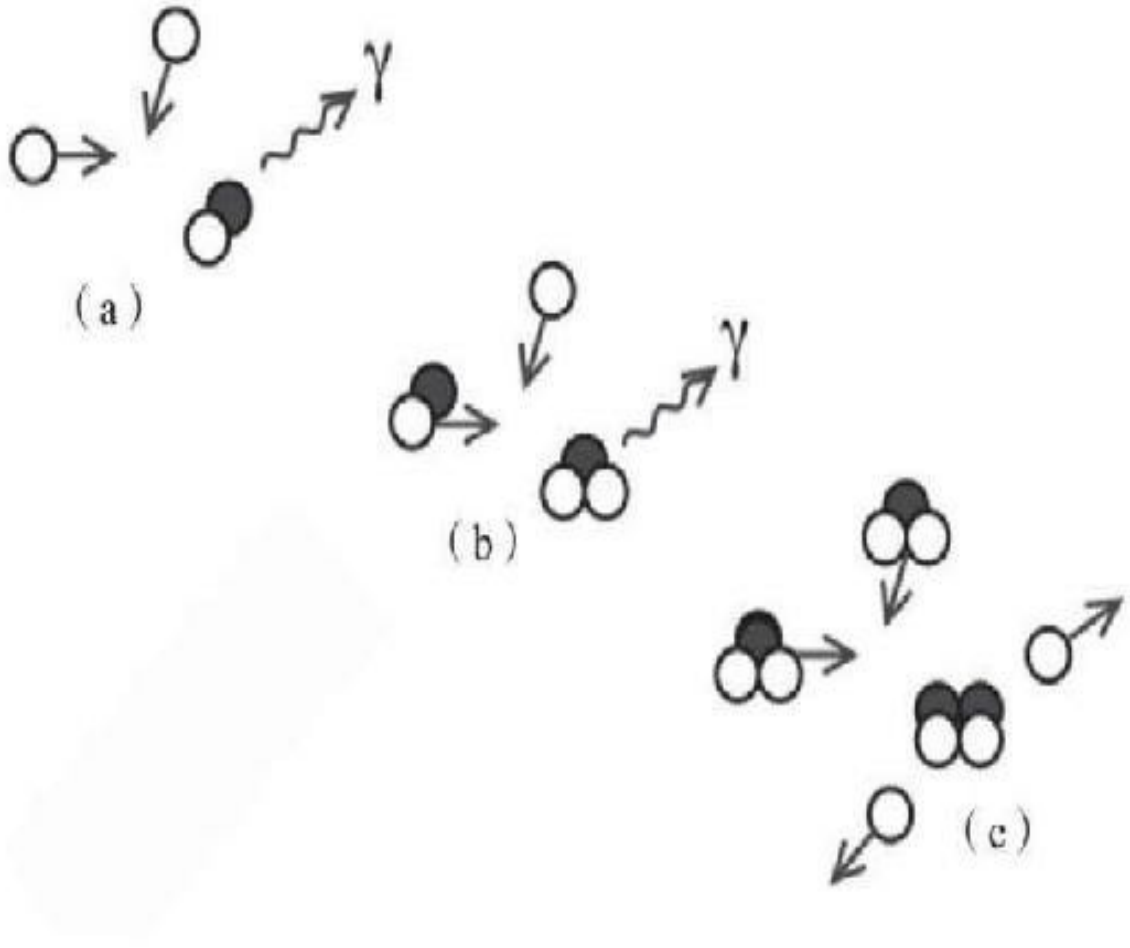


图11–2 在太阳中心，质子（氢原子核）经核聚变反应形成阿尔法粒子（氦原子核）的示意图。在步骤（a），两个质子（用空心圆来表示）通过隧穿效应结合在一起，弱力将其中一个质子（空心圆）转变成一个中子（实心圆）。质子和中子随后结合形成一个氘原子核，并放出伽马

射线（为简单起见，正电子和中微子的释放没有表示出来）。在步骤（b），氘原子核与另一个质子相撞，形成一个受束缚的“质子—质子—中子”原子核，被称为氦—3。在步骤（c），我们给出了一个可能的反应，即两个氦—3原子核相撞形成一个稳定的氦—4原子核（包含两个质子和两个中子），同时释放出两个质子和伽马射线。在相似机制的作用下，氦原子核可聚变产生碳、氧等更重的元素

在太阳中心形成的氘原子核是稳定的，并继续与其他质子发生碰撞。这个氘原子核与另一个质子相结合，形成含有两个质子（氦）和只有一个中子的原子核（氦—3，氦的一个较轻的同位素）。在这里，需要再次借助量子力学的“隧穿效应”，使第二个质子到达距离氘原子核足够近的位置，克服质子之间的静电力，强力才能发挥作用，让第二个质子稳定地待在这个更大的原子核中。于是，束缚态下的较低能量使原子核释放出伽马射线。与两个氘核聚变成普通氦核（两个质子和两个中子）的反应相比，这个反应发生的概率更高。

有许多不同的途径可以使氦—3或氘的原子核相互作用，从而形成稳定的氦原子核，所有这些都依赖于量子力学隧穿效应，使带正电的原子核之间的距离足够小，到达强力的作用范围，从而使大量的能量以原子核、伽马射线和中微子的动能形式被释放出来。中微子穿过太阳，向着各个方向运动，伽马射线加热太阳中心区域的原子核和电子，使它们加速并发出各种波长的电磁辐射。太阳中心的光在到达太阳表面之前会散射多次，此后仅需8.5分钟便可到达地球。在到达太阳表面之前，每个光子平均需要花4万年的时间与太阳内部高度密集的核物质发生碰撞。向外膨胀的能量压力抵消了万有引力向内的收缩力，使太阳的直径保持相对稳定。

除了给我们提供能量，这种核聚变过程也是比氦重的元素的合成机制。太阳实际上是一个大得多的恒星在经历了“超新星爆炸”之后形成的第二代恒星。太阳释放出巨大的能量，每秒燃烧掉大约6亿吨氢。最终，恒星的氢燃料会耗尽，恒星发生坍缩，温度和压力的上升使氦原子核发生聚变反应并生成碳。这个过程继续进行下去，又会产生氮、氧、硅和其他元素周期表上的重元素，直到产生铁和镍。然而，产生的原子核越大，聚变反应释放的能量就越小，到了生成铁和镍这一阶段，向外释放的能量已不足以抵消向内的万有引力。在这个阶段，恒星向内坍缩，生成比铁重的元素。当这颗恒星变为超新星时，会伴随着能量的爆炸性释放，几周内释放的能量就相当于太阳在它的整个生命周期内释放的能量。组成太阳和太阳系中的行星的那些元素，都是大恒星在经历超新星爆炸后产生的。

原子弹的威力来自较大的原子核分裂，如第9章描述的铀或钚的核裂变过程。核电站用的是核裂变反应堆，以稀有的放射性同位素为燃料，它们的副产品是不稳定的同位素，有放射性并且对人体有害。在原子弹之后，人们又研制出氢弹。这种武器利用核裂变反应引起核聚变反应，即利用原子弹爆炸的能量驱动氢和氦的重同位素发生聚变并释放出更多的能量。50多年来，科学家们一直在尝试建造一座能够用于发电的核聚变反应堆，安全利用并有效控制氢弹和太阳的能量，以满足人类的电力需求。一个核聚变反应堆所需的燃料主要是氢的同位素（通常是氘和氚），可以从自然界的海水中将它们提取出来，而且其副产品没有放射性。核聚变反应堆的建造难点在于，在一种可控的方式下模拟太阳中心的温度和压力。尽管技术上的挑战实在令人生畏，但由欧盟、美、日、俄、中、韩、印度组成的联合体，正在努力一起建造一座试验性核聚变发电站，以验证利用核聚变发电的可行性。

20世纪80年代末期，关于在一系列小型桌面实验中，利用钯电极电解重水而实现了核聚变的报道轰动一时。这种所谓的“冷聚变”实验提出，嵌入金属电极内的氘原子核，能够发生核聚变反应并产生氦原子核，同时释放出热量。然而，无论该装置中发生了什么，都不可能是核聚变反应，这对于参与这个项目的化学家而言反倒是一件好事。因为这种特殊的核聚变反应的副产品是高能中子，足以杀死实验室中的每一个人。此外，太阳中心的核聚变反应发生在数百万摄氏度的高温下，质子们需要通过量子力学隧穿效应来克服它们之间的静电力。在室温条件下，钯电极中的核聚变反应的顺利进行更要依赖于隧穿效应。量子力学的一个公认的特征是，隧穿效应概率深受物体的质量影响，质量越小，动量越低，物质波波长越长，在势垒中穿行的距离越远，在势垒另一侧发现该物体的概率越大。虽然质量差异本应对核聚变过程产生很大的影响，但是冷聚变实验的参与者们却发现，使用重水或普通水对实验结果没有任何影响。

若要使“冷聚变”变成现实，就需要放弃量子力学的基本定律，而这些定律是我们理解固体物理学、激光、晶体管，以及所有应用量子力学基本定律的个人电子设备的基础。不过，如果我们真能实现“冷聚变”，人们就会自然地放弃这些定律。毕竟，一个能够产生太阳般巨大能量的小圆筒，可以成为喷气飞行背包的能量之源！

[1] 所谓静止的中子，指的是静止不动、在空间中被孤立的中子；或者与我们具有相同移动速度和方向的相对静止的中子（被称为中子的“静止框架”）。

[2] 基于我们无须关注的技术性原因，当中子发生衰变时，它释放出一个质子、一个电子和一个反中微子（中微子的反物质版本）。如我所说，我们此刻不需要关心这个特殊的细节。

[3] 著名的天体物理学家亚瑟·爱丁顿爵士是最早认识到太阳的能量来自核聚变反应的科学家之一。然而，在建立量子力学之前，很多物理学家认为太阳中心的温度较低，不具备发生这些过程的条件。对此，爱丁顿在1920年回答道：“我们不与批评家争辩恒星的温度是否足以为这类反应过程提供支持条件，我们只会告诉他们去找个更热的地方。”



第四部分

量子力学的神奇力量

第12章
水火不相容的费米子

利用量子力学理论对原子性质做出的预测，如处于激发态的氢原子回归基态时发射的光的波长，与在实验中测得的波长，两者之间的一致程度令人称奇。倘若量子力学仅此而已，它当然无法“开创未来”，我们也会一直生活在“真空管时代”，不会有笔记本电脑、手机、DVD和核磁共振成像等电子设备。

薛定谔和海森堡对量子力学的论述准确地解释了单个原子的性质，但是我们很少遇到一个单独存在的氢原子，或其他任何单独存在的原子或分子。一立方厘米的液体或固体约为一块方糖大小，通常包含10^{24}个原子。量子力学的强大之处在于，它可以为这10^{24}个原子的性质提供解释，也可以解释为什么有些材料是金属，有些材料是绝缘体，有些材料是半导体。幸运的是，如果我们明白了当两个物体间的距离足够近时，它们的薛定谔波函数会重叠，我们基本上也就理解了10^{24}个原子彼此靠近可能产生的结果。

截至目前，我们已经广泛使用了本书第一部分给出的量子力学的前两个定律：光是由被称为光子的不连续的能量片段组成的，以及任何运动的物体都有一种波与之对应。我们尚未使用第三条定律：所有的物质和光都具有自旋属性，并对应角动量的不连续值。为了理解原子中电子能级的排布细节，我们需要应用此原理，但我们没有必要深入探究排布的复杂性。如果我们想从根本上理解半导体时代和即将到来的纳米技术革命，就不可避免地要用到有关电子能级排布的相关知识。

所有亚原子粒子都有内禀角动量，被称为“自旋”。自旋与磁场对应，每一个电子、质子和中子都可以被看作一个小的条形磁铁，有一个南极和一个北极。实验观察结果表明，电子有内生磁场，自旋的概念正是为了解释这个内生磁场而提出的，所以只依照字面意思，将自旋理解为亚原子粒子可以像女芭蕾舞者那样进行物理旋转。内禀角动量是电子性质中不可或缺的一部分，就像电子的质量和电荷那样真实存在，因此，想象一个与物理旋转无关的内禀角动量，这确实令人困惑。尽管如

此，“自旋”这一术语使用已久，因为遵从学术惯例是一条基本的治学原则。

正如第4章所介绍的，电子的内禀角动量恰好是$\hbar/2$（如前所述，$\hbar$为$h/2\pi$）。一个“自旋”的电子的内禀角动量的值为$+\hbar/2$或$-\hbar/2$，就像女芭蕾舞者可以进行顺时针或逆时针旋转一样。对于电子（或者质子、中子）而言，其内禀角动量不可能取其他的值。20世纪30年代，恩利克·费米和保罗·狄拉克最早提出了内禀角动量为$\pm\hbar/2$的量子粒子的整体排布规律。为了纪念他们做出的贡献，物理学家们将所有内禀角动量为$\hbar/2$的粒子称为“费米子”。

测试两个费米子，比如两个电子。所有的电子看上去都很相似，这不是反费米者的偏见，而是对“所有给定类别的基本粒子都是全同的”这一事实的反映。例如，没有办法在电子间做出辨别和区分。类似地，所有质子都是相同的，中子也一样。这三种亚原子粒子具有不同的质量和电荷，因此它们可以互相区分开。但是，如果我们使两个电子彼此靠近，物质波发生重叠，就不存在可观测的属性能将这两个电子区分开来。

如果我将一块石头掷入池塘，就会荡起一组同心圆形状的涟漪（图12–1左图）。如果我将两块石头掷入水中，它们的落水点彼此间隔一小段距离，那么每块石头都会形成一组涟漪，组合在一起的效果是一个复杂的干涉图案（图12–1右图）。在某些位置上，来自每块石头的涟漪叠加在一起，在水面上形成了比单个石头更大的扰动。而在其他一些位置上，两组涟漪完全异相，即有的涟漪处于波峰位置，有的涟漪处于波谷位置。综上所述，投掷两块石头产生的波纹图案，不只是投掷一块石头所产生的图案的简单复制。

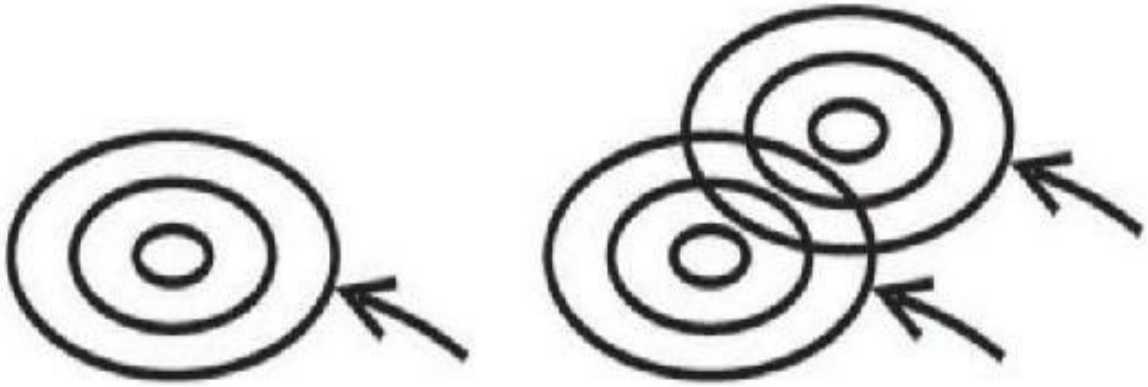


图12–1 一块石(头a)被掷进水中（左），以及两块(b石）头被同时掷进水中，它们的距离很近但互不接触（右），我们在池塘表面分别观察到的涟漪示意图

所有物质都有量子力学波函数。当两个电子彼此靠近时，它们的波函数会重叠，可以描述为“双电子波函数”。对于两块被掷入池塘的石头而言，如果石头是相同的，并以相同的方式被掷进水中，那么哪一块石头在左、哪一块石头在右，并不会影响我们在水面上观察到的干涉图案。同样地，在原子物理学中，我们能测量的任何物理量，比如电子在不同能量态之间跃迁而发射的光的波长，都不取决于人们对电子的辨识和区分。对于被扔进水中的石头来说，它们确实是可以区分的，因为我们可以通过一种有意义的方式来定义左边的石头和右边的石头。而海森堡告诉我们，试图将电子的位置测量得比其物质波的长度范围更加精确，这种努力是徒劳的。当两个物质波重叠时，像“左”和“右”这样的概念变得无关紧要，我们所拥有的只是双电子波函数。

假如我有两个电子，我将它们创造性地命名为电子1和电子2。我把它们放在一起，使它们的波函数重叠。这两个电子是不可分辨的，将哪一个标记为“电子1”，哪一个标记为“电子2”，对测量结果没有任何影响。那么此时此刻，这两个电子有任何不同之处吗？当然有！这两个电子有相同的电荷和质量，但它们可以有不同的内禀角动量。两个电子的内禀角动量可以都为$+\hbar/2$或者$-\hbar/2$，也可以其中一个为$+\hbar/2$而另一个为$-\hbar/2$。内禀角动量对于理解固体物理学至关重要。

想象一条色带，它的一面为黑色，另一面为白色。这条色带的每一面都代表一个电子。如果我手持色带的两端并使白色面朝向你，它代表电子的内禀角动量是$+\hbar/2$；如果黑色面朝向你，则代表内禀角动量是$-\hbar/2$。现在，如果我将色带两端间的距离拉大，我可以很容易地区分它们——一端在右边，另一端在左边。如果我让它们靠得很近，相互重叠，我就很难将它们区分开来。在这种情况下，我可以将它们描述为“一条更长的色带”。我还可以通过其他方式，如右手握住色带的一端使其白色面向外，左手握住另一端使其黑色面向外，来表示一个电子的内禀角动量是$+\hbar/2$而另一个电子的内禀角动量是$-\hbar/2$的情形。图12–2显示的色带的两端都是白色面向外，表明两个电子的内禀角动量都为$+\hbar/2$。根据理查德·费曼在题为“存在反粒子的理由”的文章中的描述，此图经过了戴维·芬克勒斯坦因的修改。我想我无须强调，“色带”只是一个用来帮助我们形象化地理解双粒子波函数的简单比喻，而不是真实的波函数。

图12–2的色带代表一个双电子波函数，其中两个电子的内禀角动量都是+ħ/2。如果两个电子的距离靠得很近，就可以描述为一个波函数，我用一条色带来代表它们。对一个电子的改变也会传导至另一个电子。如果我交换它们的位置，将右手的电子移动到左手，而将左手的电子移动到右手，会怎么样呢？如果我这样做却不松开色带的任何一端，通过交换它们的位置，我会使色带扭转半圈［图12–2（b）］。这与初始状态不同，通过观察可知，色带的左右两端互换了位置。

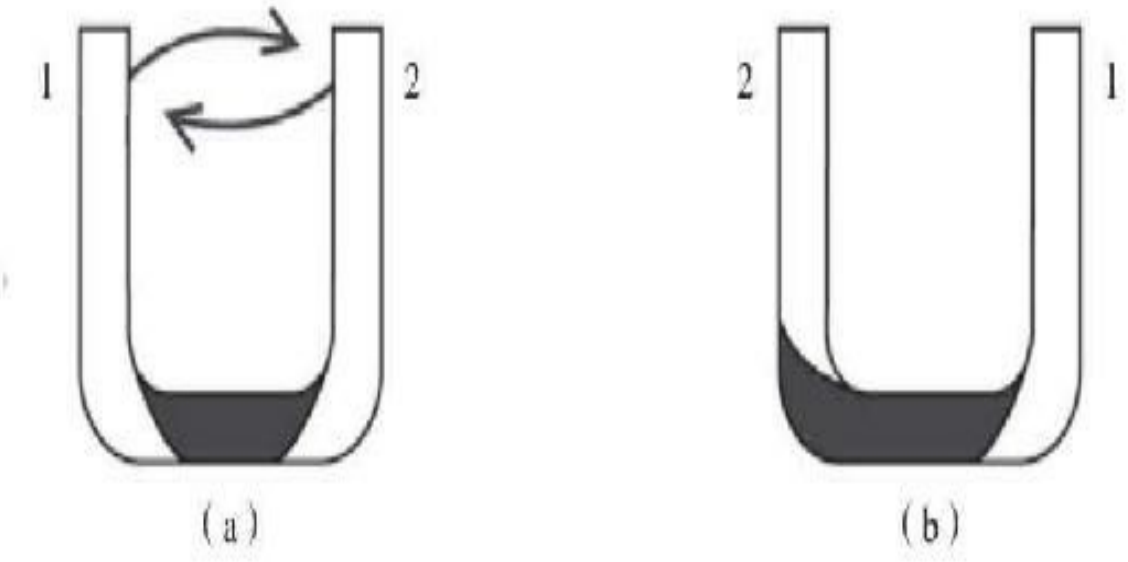


图12–2 每面为不同颜色的色带示意图，色带的两端都是同样颜色的面朝外（此例中是白色面朝外）。将两端交换位置将导致色带扭转一半，要想使色带完全扭转，需要再一次交换两端的位置，然后将色带的一端翻转两次便可消除扭结

这就是“费米子”的核心内容，它决定着电子之间相互作用的方式，也是元素周期表、化学和固体物理学的基础。

如何在数学上将两个电子的波函数结合起来，以交换两个电子的位置就可改变状态，再交换一次又回到最初状态呢？一个简单的做法是：将双电子波函数Ψ表示为两个函数A和B的差，即Ψ=A–B，其中A和B分别取决于在位置1和位置2上的电子的波函数。就像交换色带的两端那样，通过一个扭转将两个电子互换位置。在这种情况下，波函数可以写成Ψ=B–A。交换两个电子位置的过程相当于将原有的双电子波函数乘以（–1）。如果我们想回到最初状态，只需再扭转一次，就可重新得到Ψ=A–B。

任何可测量的物理量都无关乎我把哪个电子标记为电子1，哪个标

记为电子2。将双电子波函数写成A–B，交换两个电子的位置相当于波函数乘以（–1），这不会对我们的测量结果产生任何影响。尽管波函数Ψ包含了关于量子力学体系的所有信息，但告诉我们在时空中的某一点发现物质的概率的却是波函数的平方Ψ^2。Ψ^2也被用于计算电子的平均位置［我们用所有可能的位置乘以电子在该位置出现的概率（Ψ^2），然后相加］、平均动量，等等。因为–1的平方是$(-1)^2=(-1)\times(-1)=+1$，所以Ψ=A–B是表示两个内禀角动量为$\hbar/2$的电子的一种切实有效的方法。在第8章中，曼哈顿博士随意改变自身大小的能力被归因于薛定谔方程是线性的。这在此处同样重要，因为如下的论述只对线性方程才成立：如果A和B分别是薛定谔方程的解，那么Ψ=A–B也是薛定谔方程的有效解。

我们马上会想到，将双电子波函数写成Ψ=A–B会造成一个严重的后果：如果我们尝试让两个电子处于相同的位置，或者相同的量子态（当它们足够接近，可描述为一个双电子波函数时），即让函数A等于函数B，会发生什么呢？当A=B时，双电子波函数为Ψ=A–B=0。如果Ψ=0，那么波函数的平方$\Psi\times\Psi=\Psi^2=0$。从物理学的角度来讲，这意味着在同一个位置，找到两个量子态完全相同的电子的概率为零，也就是说，这种情况永远也不可能发生。回想一下我们在第8章中讨论过的量子隧穿效应，当一种金属与另一种金属被真空隔开时，电子可以通过隧穿效应从一种金属到达另一种金属。我们曾经指出，尽管概率很小，约为10^{12}分之一，但仍然有可能在第二种金属中发现电子。只在概率肯定为零时，该事物才永远不会被观测到。如果一件事物永远不能被观测到，在物理学中我们就说它是“禁止的”。

从电子的内禀角动量值为$\hbar/2$这一事实出发，我们就可以理解元素周期表的结构。在第6章中，我们讨论了当势能V是带负电荷的电子和带正电荷的原子核之间的静电吸引力时，薛定谔方程的解是什么。薛定谔发现有一组可能的解对应着不同能量态，我们认为这与图6–1所示的礼堂中的一排排座位没什么不同。有些座位距离礼堂的前部很近，有些座位则离教室的前部较远。这些座位的排列仅取决于带正电的原子核与带负电的电子之间的吸引力。现在，我们明白了为什么一个原子中的所有电子不是简单地堆积在前排的座位上，即处于能量最低的量子态。因为要是这样的话，所有电子就会都处于相同位置且具有相同的量子态，如我们刚刚讨论的那样，发生那种情况的概率为零。

有一个生动的术语可以用来描述在同一个位置上没有任何两个电子

可以拥有完全相同的量子态这一事实，它就是泡利不相容原理。沃尔夫冈·泡利是量子力学的开创者之一，为了得出元素中的电子组态，泡利于1925年提出了这个基本假设。如图12–3（a）所示，只有一个电子的氢原子于最低能量态。因为这种元素中仅有一个电子，不相容原理在这里不起作用。在元素周期表上氢的下一个元素是氦，它有两个电子。现在，我们要拓展“礼堂”这个物理学类比：礼堂里的每一个“座位”都是“双人座”，可以容纳两个电子，但前提是它们彼此移动方向相反（比如，一个电子的自旋“向上”，另一个电子的自旋“向下”）。如图12–3（b）所示，这两个电子都处于最低能量态，一个电子的内禀角动量值为$+\hbar/2$，另一个电子的内禀角动量值为$-\hbar/2$，每一种自旋态都可以算作一种量子态。因为没有其他可能的内禀角动量值，锂元素［元素周期表上氦的下一个元素，如图12–3（c）所示］中的第三个电子不得不处于下一个更高的能级。如果锂元素的三个电子都处于最低能级，那么至少有两个电子的内禀角动量值为$+\hbar/2$或者$-\hbar/2$，而出现这种情形的概率是$\Psi^2=0$。如图12–3（d）所示的碳元素有6个电子，两个处于基态，余下的4个处于下一排较高的“座位”，并且能以各种各样的方式形成4个化学键。相比于未成键的状态，因为形成这些化学键，对于碳原子以及其他通过化学方式与碳原子相互作用的原子来说，它们的能量降低了。如果碳原子中的6个电子都降至最低能量态，就不会有额外的能量使它们与其他原子形成化学键。因此，如果没有泡利不相容原理，就不会有甲烷、钻石以及DNA。

我们来看一下铝原子，它拥有13个电子，如图12–3（e）所示。除了一个电子以外的其他12个电子的能量态都是两两配对的，因此只有一个电子可以参与形成化学键。其他12个电子在化学上呈惰性并形成铝原子的内层，但这并不意味着我们无法利用这些内层电子。泡利不相容原理迫使电子处于越来越高的能量态，相当于让一些学生坐在距离礼堂前部较远的座位上。如果我们可以让其中一个电子脱离基态（报告厅的第一排），就会出现一个空座位，如同我们突然把一名坐在第一排的学生赶出去。于是，坐在后排的某个学生就有机会挪至这个前排的空位上。当一束高能电子击中一个原子时，就会发生这样的情形。如果是这样，当一个外层电子移至更低的能量态时，它就会在跃迁的过程中发射一个X射线光子。如果我们需要用特定波长的X射线对晶体进行散射研究，这实际上是在实验室中产生X射线的一种非常有效的方法。

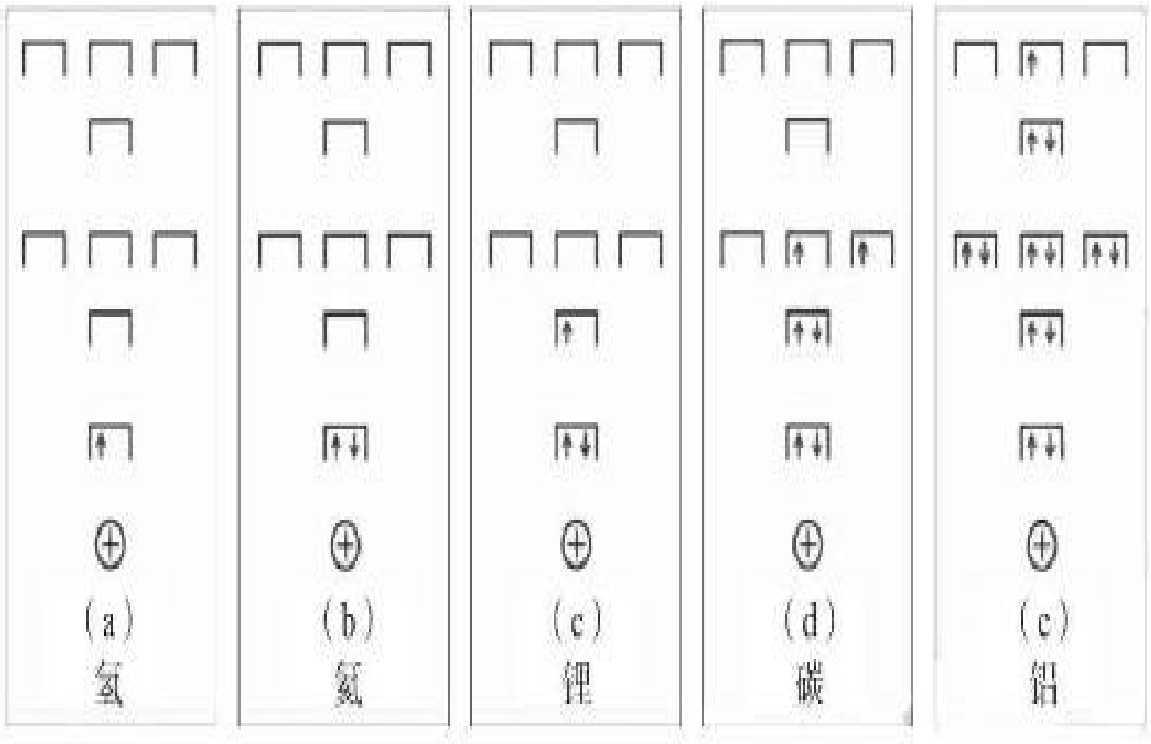


图12–3 用“礼堂”中的一排排座位代表对原子中的一个电子求解薛定谔方程所得到的可能的量子态解。泡利不相容原理表明，每一个座位可以安置两个自旋方向相反的电子。自左向右分别展示了氢、氦、锂、碳和铝原子中包含的1个、2个、3个、6个和13个电子分别所处的量子态

最后几个电子未同其他电子处于配对的量子态，因而可以参与化学键的形成，它们是如何与相邻铝原子中的未配对电子相结合，在一立方厘米的铝内将所有10^{24}个原子聚集在一起的呢？钻石中各个碳原子的最后一个未配对电子彼此间是如何互相结合并形成了一种坚硬的绝缘体？尽管铝和钻石的材料性质完全不同，但它们的电子排布都符合泡利不相容原理。

我们可以用约翰·齐曼提出的一种聪明的理论来解释为什么一些固体是金属，而另一些固体是绝缘体。满足泡利不相容原理的一个简单方式是，永远不要让电子在相同的时间出现在同一位置上。假设有一列原子，每个原子旁边都有一个盒子，那么我可以在这些盒子（我们很快会知道这些盒子究竟是什么）中放入一个电子，所有这些电子都处于同一量子态。这不会造成任何问题，通过为每个电子提供一个容器，原则上我已经将它们区分开了。我可以说出哪一个电子在右边的盒子里，哪一个电子在左边的盒子里，这就好像我能分辨出被掷入池塘的两块石头。盒壁使得相邻电子的物质波不会发生重叠，因而10^{24}个电子可以都处于

相同的量子态，总的波函数则是单个电子的波函数重复10^{24}次。每个电子都可以用一条专属色带来表示，如图12–2所示，任何色带都不能用来表示一个以上的电子。当我计算盒子中每个电子的平均能量时，假设盒子的宽度等于固体中原子之间的距离，我得到的能量值约为3电子伏特（精确的能量值显然取决于固体中原子排列的各种细节，即固体的“晶体结构”），这便是我将一个电子移出盒子所需要的能量。当然，因为每一个电子都具有两个可能的内禀角动量值，所以我可以在每个盒子中放入两个电子（每个盒子相当于一个“双人座”），只要它们的内禀角动量值分别是$+\hbar/2$和$-\hbar/2$。

如图12–3（d）所示的碳原子很容易“重新排布”4个后排电子的座位，允许量子力学波函数进行一些组合，以形成不同的量子态结构，这些结构可以参与大量的化学反应。在蛋白质和DNA中，碳原子可以形成一条直线形式的强化学键；它还可以形成石墨——三个强化学键处于一个平面内，一个弱键位于平面上方或下方，这就是为什么用石墨做铅笔芯，写字方便顺畅；如果这些座位经设置形成了4个等价的强化学键，我们将这样的碳结构称为“钻石”。在每一种情况下，碳原子中都有4个电子能够参与形成化学键，可以用4个盒子来表示，每个盒子中有一个电子。根据泡利不相容原理，我们知道每个盒子还可以再容纳一个电子，这个电子的自旋方向与第一个电子完全相反。当两个碳原子足够接近时，包含未配对电子的量子态将发生重叠，两个电子可以用一个双电子波函数来表示。最终我们发现，如果未配对电子填满每个盒子的“双人座”（完成配对），那么每个电子的能量将降低［图12–4（a）］。也就是说，为了将电子从盒子中移除，必须对原子施加能量，从而使每个电子都恢复到不配对状态。重叠的电子波函数在原子间形成了化学键，将原子束缚在晶体结构中。电子在空间中的分布满足泡利不相容原理。在一个钻石晶体中，每一个碳原子都被其他4个碳原子包围，形成一个正四面体，4个碳原子中未配对的电子可以占据第一个碳原子盒子中“双人座”的第二个位置［见图12–4（b）］。

还有一种方式也满足泡利不相容原理。假设不存在“盒子”，而且允许电子在整个固体中自由移动。在这种情况下，两个电子可以在同一时间处于相同的位置，但必须保证它们处于不同的量子态。对于最后一个不配对的电子，比如图12–3（e）中铝原子的第13个电子，它在最低量子能级上有多少种不同的排布方式呢？答案是：与固体中的原子数目一样多。尽管我无法确定电子在固体中的具体位置，但我可以算出电子处于不同量子态时的动量，从而得到一个波长相当于整个固体长度的物质

波。因为动量×波长=普朗克常数，因此这个大的波长对应一个非常小的动量，也对应一个非常小的能量。在另一种极端情况下，最小的物质波的波长相当于固体中原子间的距离。这种波长很短，因而它的动量很高。最短波长对应的最高能量大约是3电子伏特，它也取决于固体中原子结构的细节。

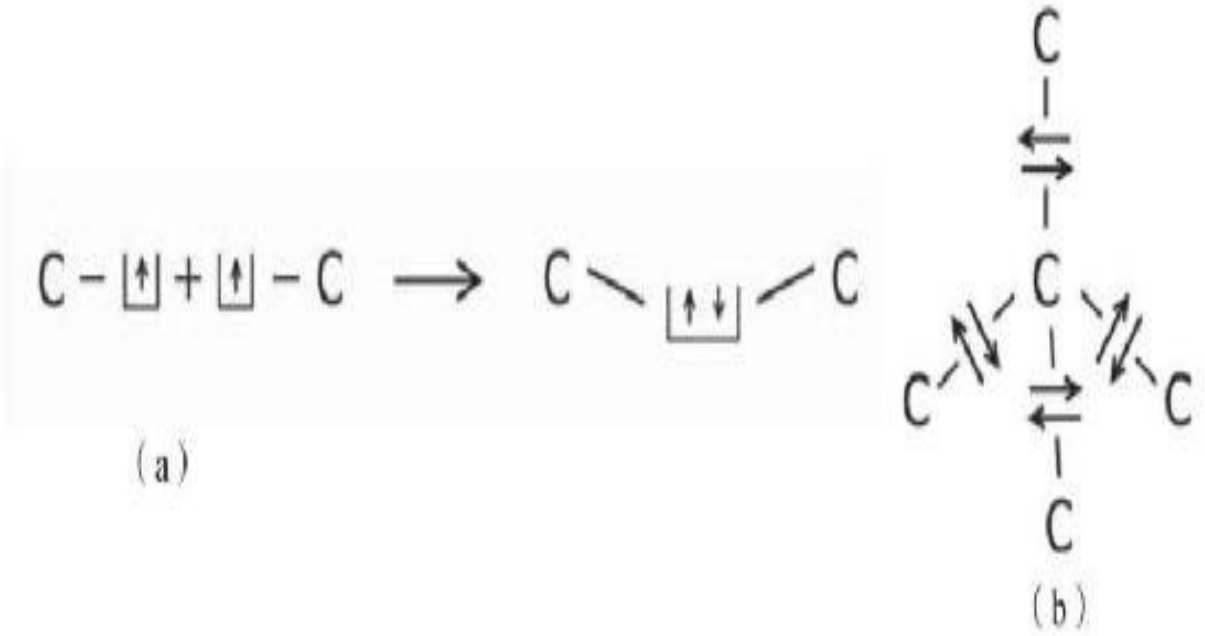


图12–4 两个相邻碳原子上的未配对电子相互重叠形成碳—碳键，从而使整个体系的能量降低的示意图（a）。图12–4（b）展示的是钻石中碳原子形成的四面体结构，包含4个化学键

因此，无论电子被放在每个原子的盒子中，还是可以在整个固体中自由移动，我们都会得到约3电子伏特的能量。然而，在第二种情况下，电子能以不连续的动量态在整个固体中自由移动，3电子伏特是最活跃的电子的能量；而当电子被放入盒子，3电子伏特则是每个电子的能量。处于自由移动状态的电子的平均能量小于3电子伏特，接近1.5电子伏特。在“电子被放在盒子中”这种情况下，每个电子都有相同的能量，平均能量也是3电子伏特。因此，固体作为一个整体，可以通过使电子在晶体中自由移动来降低整体的能量。但这并不适用于所有固体，一些材料可以通过将每个电子限制在原子周围的盒子中来降低整体的能量。我们把电子能够在其中自由移动的材料称为金属，把电子被放在盒子中的材料称为绝缘体。

这便是量子力学对固体物理学做出的一种解释。在很低的温度条件

下，所有固体或者导电或者不导电，我们将前者称为金属，将后者称为绝缘体。

金属（比如铝）是电的良导体，因为其最外层电子满足泡利不相容原理，它们处于不同的动量态，并且可以在固体中自由移动；而绝缘体的每个电子都处在原子周围的盒子（化学键）中。为了把一个原子从金属固体中移除，我必须首先捕获其中一个自由移动的电子，并将它束缚在一个带正电荷的原子上，即把它放进一个盒子里，这样一来，我就可以把中性的原子从固体中拉出来。但是，这会消耗若干电子伏特的能量，而且这些能量相当于使金属中的原子聚集在一起的结合能。由于金属中的原子之间不以化学键直接结合，因此原子很容易互换位置，这就是为什么金属可以轻易地被拉伸成线状或被压成薄片，而不丧失它们结构上的一致性。如果光被固体吸收，则总有一个自由电子能够吸收光的能量并将这些能量再次释放出来，这就是金属能反光并有金属光泽的原因。自由电子的存在，使金属成为电和热的良导体。

绝缘体（比如钻石）中的所有电子都被束缚在化学键中（就像我们讨论过的，每个盒子中有两个电子）。因此它们是电的不良导体，而且只能通过原子的振动（声波）导热。如同原子中的电子一样，盒子中的电子只能处于特定的能量态，如果其他能量态的光照射到绝缘体上，光子的存在会被忽略。这就是钻石、玻璃等一些绝缘体能透过可见光的原因。材料的性质与电子所处盒子的构造之间关系密切，这就是为什么晶体结构的变化，比如碳从石墨变为钻石，会在光学和电学性质方面发生巨大变化。在这里，盒子是指原子间直接的、刚性的化学键［图12–4（b）］，这些化学键的种类和成分决定了晶体的结构和硬度（钻石很坚硬，而用来做铅笔芯的石墨很软）。我们可以从最本质的层面上理解绝缘体和金属之间的所有不同，即固体中原子的最后几个未配对电子为满足泡利不相容原理，存在于真实空间（绝缘体）还是动量空间（导体）中。

因此，通过摆弄一条一面黑色、一面白色的色带，我们了解了世界为什么是现在这个样子。注意，并非所有物质的内禀角动量值都等于$\hbar/2$。一些物质，比如氦原子或者光子，其内禀角动量值为零或者，这一貌似微小的差异催生了超导体和激光。

第13章
如蜜蜂般团结的玻色子

伯特·荷尔多布勒与爱德华·威尔逊在《超个体：昆虫社会的美丽、优雅和奇妙》一书中提出，黄蜂、蚂蚁、蜜蜂或者白蚁的聚居地（巢穴），可以被整体地视为一个动物体。他们认为，每一只昆虫都是“超个体”中的一个类似“细胞”的成分：觅食者是眼睛和感觉器官，守卫者们起到免疫系统的作用，蚁后（蜂后）则扮演生殖器官的角色。“超个体”和普通动物之间的一个最重要的区别在于，前者缺少作为核心的大脑或神经系统。然而，每个聚居地内部都通过昆虫间的交互规则来管理它的组织和规模，由此聚居地可以达到远超单只昆虫能力的发展水平。正如通俗科幻小说的读者所知道的那样，这也是人类击败外星人侵略的手段（或者至少是其中的一种手段）。

西奥多·斯特金的科幻小说《宇宙掠夺》（*The Cosmic Rape*）于1958年出版，与此同时，小说的删节版在《银河杂志》（*Galaxy*）上发表，题为“与美杜莎相会”（*To Marry Medusa*）。故事中，外星智慧生命采取了非常规的手段来征服地球。外星人实际上是一个宇宙孢子，能够控制人类个体的心智。它惊奇地发现，尽管地球这颗行星被建筑物、桥梁、公路等复杂的结构所覆盖，地球人之间并不存在精神上的连接。根据孢子征服其他行星的过往经验，只在独立个体的原始智慧以一种协作的方式思考，就像一群蚂蚁或蜜蜂那样，才能建造出地球上的各种高级基础设施。入侵的孢子从未遇到哪个物种的个体可以独立设计桥梁或建筑物，孢子因此推断，地球人之间曾经存在的集体连接已经被切断。于是，孢子制订了一个重新建立连接的计划，让所有的地球人同步思考和工作。它的计划成功了，但对于外星生命体而言却是不幸的。当它发现自己不是在对付一个人的心智，而是几十亿人的集体意识时，人类的“蜂群思维”迅速策划了一个有效的反击计划，摧毁了外星孢子的入侵。斯特金用这种方式描述了玻色—爱因斯坦凝聚态的合作行为。

在斯特金的小说中，外星孢子创造了人类的宏观量子态，单个波函数包含了关于其组成元素的全部信息。任何一个元素，也就是斯特金小说中的一个人，他的变化都会被立刻传输给波函数中的所有其他元素，

即小说中其余的人。这种情形在现实世界中频繁发生，表现为超导体中成对电子间的量子相互作用或超流体中氦原子间的相互作用。这些发生凝聚的粒子，其内禀角动量值是$\hbar$而不是$\hbar/2$的倍数。内禀角动量值为$\hbar$的整数倍的粒子被称为玻色子，它们遵循萨蒂延德拉·玻色和阿尔伯特·爱因斯坦创建的一种量子统计方式——“玻色—爱因斯坦统计”。

在前一章中我们讨论了费米子，费米子的内禀角动量值可以为$+\hbar/2$或$-\hbar/2$，但不可以是任何其他值。这从本质上来讲是不对称的，因为我们可以对一个顺时针旋转和一个逆时针旋转进行区分。当两个费米子之间的距离很近以至于它们的波函数发生重叠时，我们用一面黑、一面白的色带来表示这种情况。这两种颜色的意义在于，我们可以轻而易举地分辨出内禀角动量值为$+\hbar/2$和内禀角动量值为$-\hbar/2$的电子，就像我们可以轻易地分辨出色带的黑面和白面。但是，实验已经揭示出在一些情况下，内禀角动量的值可以取0、$\hbar$或$2\hbar$，等等，而不可以取任何分数值。我们首先考虑内禀角动量值为零的量子物质的情况，再考虑内禀角动量值为$\hbar$的粒子，比如光子。

作为原子的基本组成部分，电子、质子、中子均为费米子，什么样的物质内禀角动量值会是零呢？氦原子便是一个例子。一个氦原子核内包含两个质子和两个中子，每一个粒子的内禀角动量值为$+\hbar/2$或$-\hbar/2$。由于两个质子是全同的，当它们在原子核中处于最低能量态时，它们会以$+\hbar/2$和$-\hbar/2$配成对，因而总的内禀角动量值为零，两个全同中子的情况与之类似。同样，如图12–3（b）所示，两个电子也是配对的。综上所述，当处于最低能量态时，一个氦原子的总内禀角动量值为零。

内禀角动量值为零的粒子是对称的，在这种情况下我们不能用顺时针或逆时针来描述它的自旋。当两个这样的粒子彼此靠近，它们的波函数发生重叠时，我们将用一条两面皆为白色的色带来表示它们。我再强调一次，色带用来比喻双粒子波函数，因此我们将忽略一些问题，因为它们只会导致我们偏离现在的讨论。

让我们重复一下第12章的色带实验，只不过我们现在使用的是一条两面同色的色带，比如白色（图13–1）。我抓住它的两端，而且很明显，色带的白面朝外［图13–1（a）］。接下来，我互换两端的位置，左边的一端现在在右边，就像第12章那样，这一过程使色带扭转了半圈［图13–1（b）］。当然，色带现在仍然是白面朝外。我可以通过翻转色带的一端来消除扭结，这样背面将转到外面［图13–1（c）］。当色带的一面是黑色而另一面是白色时，这是一个禁阻操作，因为它改变了

色带的状态（色带的两端原来都是白面朝外，操作后会有一端是黑面朝外）。但是，如果色带的两面都是白色的，这个对称性意味着我能够翻转色带的一端以消除扭结，而且不改变其他任何事情。重点在于，白色的色带经过一次翻转就可以回到它本来的状态，而黑—白色带则需要两次翻转才能恢复原状。

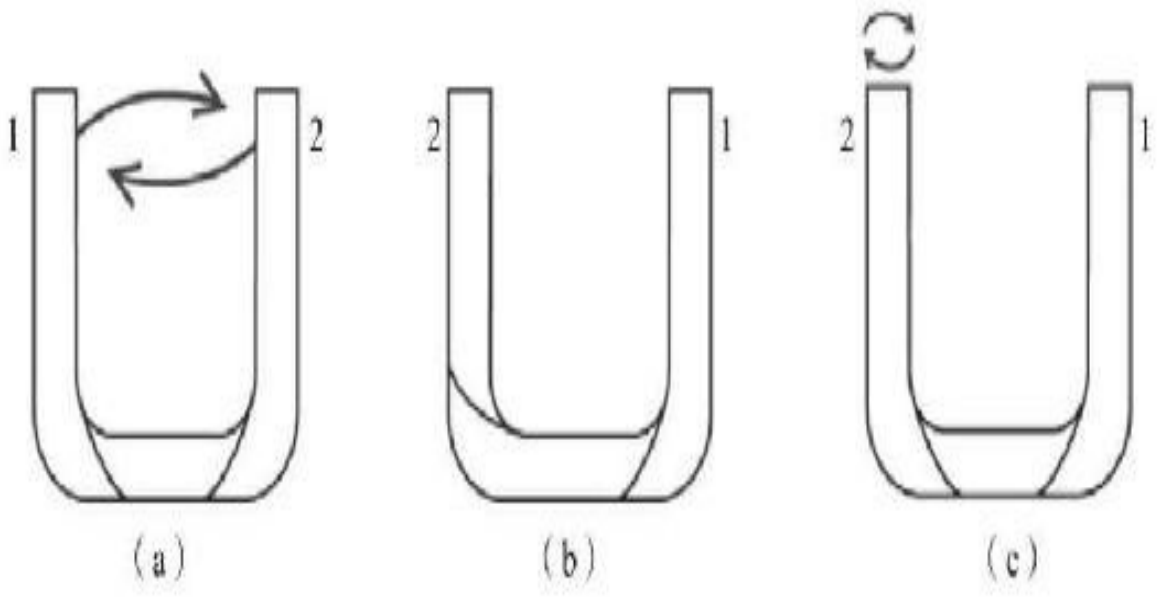


图13–1 图a为两面同色的色带示意图。交换色带两端将使色带扭转半圈（图b），旋转色带一端可以将扭结解除（图c），使色带恢复原状

这种对称性表明，内禀角动量值为零的粒子（如氦原子），以及内禀角动量值为$\hbar$的光子，都被称为玻色子，它们的行为可以用双粒子波函数来表示，写作两个函数A和B之和，即$\Psi=A+B$，而不是费米子的$\Psi=A–B$。[1]与之前相同，A和B是在位置1和2处的单粒子波函数的乘积。如果粒子1和粒子2交换位置，双粒子波函数$\Psi=A+B$的值保持不变，但此时Ψ将表示为$\Psi=B+A$。因此，$\Psi=A+B=B+A$。当内禀角动量值为零或者$\hbar$的两个粒子彼此靠近，它们的物质波发生重叠时，产生的双粒子波函数的值取决于单粒子波函数的值。

将双粒子波函数写作$\Psi=A+B$会产生什么结果呢？让我们来回顾一下，对于像电子这样的费米子，其双电子波函数为$\Psi=A–B$，这意味着两个电子都处于相同量子态（即A=B）的概率为零。对于玻色子而言，$\Psi=A+B$表明两个粒子处于相同量子态（即A=B）的概率很高。因为当A=B时，有$\Psi=A+A=2A$，且概率密度$\Psi^2=2A\times2A=4A^2$。对于一个处于

$\Psi=A$量子态的单独粒子，其概率密度为$\Psi^2=A\times A=A^2$，两个单独粒子的概率密度为$\Psi^2=A^2+A^2=2A^2$。因此，只要在第一个粒子附近引入第二个粒子，它们都处于A量子态的概率是两个单独粒子同处量子态A时概率的两倍。尽管两个粒子处于相同量子态的概率不是100%，但与单粒子的情形相比，概率已经有所提高。两个粒子处于相同位置并具有相同量子态的概率更高，表明这种情况更有可能发生。

当一个系统的温度降低时，粒子就会沉降至较低的能量态。如果粒子可以通过某种方式加以区分，比如它们的波函数不发生重叠，我们就不需要考虑费米—狄拉克统计或玻色—爱因斯坦统计。而且我们会发现，在较低温度条件下，有些粒子处于最低能量态，有些处于次低能量态，有些处于较高能量态，而处于很高能量态的粒子数目可以忽略不计。对于费米子，比如固体中的电子，无论温度高低，仅有两个电子可以占据最低能量态（一个内禀角动量值为$+\hbar/2$，另一个内禀角动量值为$-\hbar/2$）。与可辨识粒子的情况相比，玻色子在低温条件下集中处于最低能量态（基态）的概率更高。对于玻色子，在每个位置和每个自旋方向上仅能有一个粒子的规则不再适用，很多粒子可以处于相同能量态。这些内禀角动量值为零或者$\hbar$的粒子遵循玻色—爱因斯坦统计规则，这种聚集于基态的现象被称为“玻色—爱因斯坦凝聚态”。

为什么在低温条件下才能观察到这种凝聚态？如果粒子间相距甚远，那么它们的波函数几乎不会发生重叠，所有关于“不可辨识粒子”的问题也与此无关。温度计只是用来跟踪记录每个粒子平均能量的装置，能量越低，粒子的动能越低，动量也越小。根据德布罗意关系式，一个较小的动量对应一个较长的物质波。如果涉及的粒子的物质波较长，不同的全同粒子的物质波之间就更容易发生重叠。类似地，将粒子限定在一个小区域内也会增加波函数相互作用的概率。因此，低温和小区域（通过高压来实现）有助于形成玻色—爱因斯坦凝聚态。

玻色—爱因斯坦凝聚态有哪些特殊属性呢？我们已经考察了两个全同玻色子的情况，它们的波函数重叠使得它们可以用一个双电子波函数来表示。随着气相玻色子的温度降低，数百万个全同原子的波函数发生重叠，全部处于相同的量子态。我们因此得到了一个能描述数百万个原子行为的单一波函数。通过这种方式，难以辨识的玻色子们表现得像一个统一体，无论一个原子发生了什么情况，都会复制到其他原子上。玻色—爱因斯坦凝聚态与1960年的科幻电影《魔童村》（*Village of the Damned*）中被魔鬼占据身体的小孩们如出一辙：皮肤白皙、金发碧眼

的孩子们相当于玻色—爱因斯坦凝聚态下的全同粒子，电影中一个孩子习得的知识可立即与其他所有孩子共享的事实，则是描述这种凝聚态的多粒子波函数作用的必然结果。

1995年，美国物理学家埃里克·康奈尔和卡尔·韦曼，以及德国物理学家沃夫冈·克特勒分别在实验中直接观测到真正的凝聚态，从而证实了玻色和爱因斯坦在1925年的理论预测。他们因这项成就而共同获得2001年的诺贝尔物理学奖。他们在研究中使用了数千个铷或钠的同位素，并将它们冷却到高于热力学绝对零度的百万分之一开氏度。因为玻色—爱因斯坦凝聚态是短暂的量子物质，因此不易获得或被观察到。然而，现实世界中还存在更强大的系统，它们具有将玻色子凝聚成一个低能量子态的突出特性。

如前所述，氦原子的总内禀角动量值为零，是玻色子。氦原子中的两个基态电子处于配对状态［图12–3（b）］，因此氦原子不与其他原子发生化学上的强相互作用。氦的这一特性，即电子成对地填满“整行”轨道，与氖、氩等其他一些元素相同，它们被称为惰性或稀有气体。这些元素一直保持气态，直到温度极低时，电荷排布上的微小振荡在原子间产生了微弱的静电吸引力。氦原子间的相互作用太弱，直到比绝对零度高出4.2开氏度时才能变成液态。即使在常压下进一步冷却，氦也不会形成固体，而是会产生一种量子层面上的转变，一些原子发生凝聚。

假设液态氦的温度持续降低直到绝对零度，按我们的预期，氦最终会变成固体，但根据不确定性原理，事实上它会一直保持液态。在低温条件下，原子的波函数发生重叠，每个原子的位置不确定性较低，动量不确定性较大，这些能量构成了氦原子的部分基态能量（被称为“零点能”）。原子的质量越小，零点能就越大，对于氦原子而言，即使在绝对零度，这部分能量也足以阻止原子结合成晶状固体。氢的质量比氦更小，但由于氢分子间较强的静电力，氢在高于绝对零度14开氏度时变成固体。对于更重的元素来说，每个原子动量上的不确定性并不足以使其克服在低温时变成固体的趋势。尽管氦在常压下不会以固态形式存在，然而随着一些氦原子在基态下凝聚，它会在高于绝对零度2.18开氏度时经历一次“相变”。

部分原子已经凝聚成同一个量子态的流体具有怎样的性质呢？其中一个奇妙的特性是，流体没有黏度！黏度表示所有普通流体内部的摩擦力大小，你可以将其理解为流体运动的阻力。水的黏度很小，而糖浆和

电机润滑油的黏度则大得多。没有黏度的流体一旦开始运动，将持续地以恒定速度流经软管而不需要额外施加外力。这样的流体被称为“超流体”，因为它与普通流体的行为类似，却拥有量子力学的力量！[2]

1965年，实验人员在高于绝对零度4开氏度的条件下，让一个盛有液态氦的圆筒围绕着一个穿过其中心的轴旋转。这个圆筒内还装有金属屑，因此液体必须穿过金属屑之间的小孔和缝隙。液态氦在这种温度条件下还不是一种超流体，它开始随着容器旋转。于是，它的温度被降至2.17开氏度，在此温度条件下，一些氦原子会凝聚成超流体。当容器的旋转停止时，超流体仍以原来的速度继续运动。如果你停止搅拌杯子里的咖啡，液体在几秒钟之后就会静止下来，但是超流体状态的氦可以在数小时之内保持原有的运动速度，直到实验人员终止实验。

如果这个系统被加热到高于绝对零度2.17开氏度以上，超流体就会变成普通的流体，并迅速停止运动。在这里，低温是关键条件。在足够低的温度条件下，较低动量的氦原子有一个较长的物质波。因此，大量氦原子的波函数之间将发生重叠，所有原子都可以通过一个量子力学波函数来描述，这些原子一起形成了一个巨大的“超原子”。要使凝聚态中的一个氦原子的运动速度减慢，就必须通过减慢多原子波函数来实现；如果原子的旋转速度并不快，就没有足够的能量去减慢多原子波函数，超流体将保持原有的运动速度。

许多金属，甚至是一些非金属材料，都有一种类似于超流体的电学性质，被称为“超导电性”。超导电线没有电阻，类似于有超流体流过的橡胶软管。任何流入软管一端的无黏度流体都会以相同的速度从软管的另一端流出，不管软管的长度或堵塞程度如何，哪怕它环绕赤道！尽管我们不知道超导线圈中的电流是否会永远流动，但实验已经证实，10年后，一个闭合回路的超导体中的电流相比初始数值，只减少了不到10^{14}分之一。

在普通的电导体中，外部施加的电压会产生电流。导体的电阻越小，给定电压所能产生的电流越大。在水流与电流的类比中，水压的作用与电压相似。压力越大，水受到的推力也越大。从水龙头流入橡胶软管的水流与电流类似，如果水管沿长度方向有阻塞，就会增加水流动的难度，这与电线中的电阻类似。水在与水管中的局部阻塞以及管壁的碰撞过程中会损失能量，因此需要持续施加压力才能使水流持续地从软管的另一端流出。类似地，由于电流与电线中的缺陷发生碰撞，电流也会损失部分能量。这就是为什么恒定的推力（即电压）会产生恒定的流动

（即电流），而不是加速的流动（根据牛顿第二定律，力=质量×加速度，这意味着如果力是恒定的，那么加速度也应该是恒定的）。超导体没有电阻，即使不施加电压，电流也会保持不变，就像超流体状态的氦原子能够持续保持原有的运动速度。

金属中的电流是由电子而非氦原子形成的。你应该还记得，电子是内禀角动量值为$\hbar/2$的费米子。为了形成玻色—爱因斯坦凝聚态，两个电子必须配对组成复合粒子，其中一个电子的内禀角动量值为$+\hbar/2$，另一个电子的内禀角动量值为$-\hbar/2$。因此，复合粒子的总内禀角动量值为零，因而是玻色子。如此一来，在足够低的温度条件下，这些成对电子会形成凝聚态，并且没有阻力地流动。

电子带有负电荷，负电荷之间会互相排斥，可是为什么两个电子能结合在一起形成一个玻色子？答案是：带正电荷的原子，我们称之为“离子”。我们在上一章讨论过，在诸如铅之类的金属中，每个原子的最后几个未配对的电子都处于动量态。当电子处于动量态时，它能够在固体中自由移动。金属原子最初是电中性的，如果一个电子离开它所属的原子，就会留下一个带正电荷的离子（“离子”是指由于得到或失去电子而带有净电荷的原子）。这些金属离子有规律地排布在一起，构成了晶体。由于带负电荷的电子在金属中自由移动，带正电荷的离子会被它们吸引。阳离子因为太大而无法离开它们在晶体中的固有位置，但在静电吸引力的作用下，它会捕获带负电荷的电子。

随着电子的自由移动，它会将附近带正电荷的离子拉向它的运行轨迹，这与《X战警》漫画书中“万磁王”（能够掌控磁力的变种人大师）使用他的变种人能力时，金属物体向着他弯曲的情况类似。随着时间的推移，离子之间会相互排斥，并回到它们在晶体结构中的原有位置。当温度低于7开氏度时，铅离子移动缓慢，在吸引了第一个电子之后，它的带正电的路径还能够维持足够长的时间，从而使第二个电子也被吸引过来。通过这种方式，两个带负电荷的电子结合在一起形成所谓的“库珀对”（以莱昂·库珀的名字命名，他率先从理论上证明了，在低温状态下，这种结合机制在金属中是可行的）。当两个电子处于最低能量态时，它们的内禀角动量值分别为$+\hbar/2$和$-\hbar/2$，因此由这两个电子组成的“库珀对”的内禀角动量值为零，我们可以将其视作一个玻色子。

当金属中的部分电子形成库珀对，并且凝聚到一个低能态时，我们就会观测到超导现象。当许多库珀对的波函数发生重叠时，它们就会形成一个多粒子波函数。在普通金属中，电流与振荡的原子或者金属中的

缺陷发生碰撞会损失能量，这就是为什么需要一个恒定的电压来使电流保持稳定。要想减慢由波函数重叠的库珀对凝聚形成的超级电流的速度，就必须通过碰撞把库珀对拆开，并改变所有波函数重叠的库珀对的能量。但在温度较低或电流较缓和的情况下，这是不可能实现的。库珀对能够负载电流（假设电流不太强）且没有任何损失，就像超流体中的氦原子能够一直保持原来的运动状态一样。

在金属中有许多可以自由移动的电子，但并不需要所有电子都结成库珀对才能让金属显示出超导性质。那么，那些没有结成库珀对的电子在做什么呢？电阻对它们仍然起作用，但由于超级电流的存在，这部分电子将不再参与电流的传输。举个例子，我有两条路可以到达目的地，其中一条是崎岖不平、坑坑洼洼的土路，限速每小时8.054千米；另一条是没有最高时速限制的高速公路，毫无疑问我会选择第二条路。一旦金属被冷却到可以形成库珀对的低温，金属中的所有电流将全部由具有超导性的库珀对来传输。类似地，在超流体中，并不是所有的氦原子都处于凝聚态。只要超导体或者超流体中的部分粒子处于能量较低的凝聚态，它们就会表现出协同行为。

超导体不仅可以不受阻碍地传输电流，它们也是完美的抗磁性物质，这意味着它们会排斥任何外部磁场。一些金属会被磁体吸引，一些实际则不会，金和银就属于后一类金属。如果你能用冰箱贴把你的金首饰吸住，那么你应该考虑退货。金原子的内部磁场的极化方向与外部磁场相反，因此它们会形成一个北极，正对着外部磁场的北极。因为北极和北极相斥，所以磁体对金不起作用；或者，如果外部磁场足够强，金就会因为它所具有的抗磁性而被磁体推开。

之所以说超导体是完美的抗磁性物质，是因为它们产生的电流在固体内部形成磁场，恰好抵消了外部磁场的影响。超导体没有电阻，一旦电流产生，只要施加外部磁场，电流就可以持续不断地使得超导体成为建造磁悬浮列车轨道的理想材料。目前，超导材料的缺陷在于，大多数金属只在超低温条件下才具有超导电性。在第六部分，我们会介绍被称为“高温超导体”的材料，这些材料在较高的温度条件（尽管还达不到室温）下就可以显示出超导电性，它们甚至不是金属。

除了在粒子加速器或者大量宇宙射线中产生的某些基本粒子之外，大多数有质量的玻色子都是复合粒子，比如氦原子核或者库珀对。然而，有一种很常见的无质量粒子，它的内禀角动量值为$\hbar$，并符合玻色—爱因斯坦统计规则，这种粒子就是光！

我们在第1章中提到，马克斯·普朗克对发热物体的发光光谱的解释（见图2–1），开启了量子时代。对物体的发光强度进行测量的结果，可用光的频率函数来表示。我们会发现，在低频和高频区域仅有很少的光，而且光强峰值对应的频率只取决于物体的温度（图2–1可表示现在你身边任意一个物体的发光光谱）。在普朗克之前的理论物理学的计算结果表明，在低频区域光强的确很小，但会随着频率的增加而无限增大。我们现在已经掌握了足够多的量子统计数据，让我们来看看这些理论物理学家到底错在哪里。

一盒分子，比如气体，会有一定的总能量，能量的大小取决于它的温度。非量子热力学的一个核心原则是，当气体分子互相碰撞时，会传递它们的能量，因此在平衡状态下，每个分子的能量相同，都是气体总能量的一部分。因为存在随机的波动，所以我们可能会发现能量略多或略少于平均能量的分子。但随后与其他分子的碰撞，会使该分子的能量回归平均能量。将盒子中数万亿兆个分子的平均能量加在一起，你会得到气体的总能量。这不仅非常合理，也是在真实的气体中观察到的情形（当分子的量子属性可以忽略时，即在高温低压条件下，分子的物质波不会发生重叠）。

如果盒子中充满光线，并被当作延展的电磁波来处理，情况又会如何呢？盒子中处于某一温度的原子在它们正常的位置附近来回振动。在量子力学出现之前，人们就已经知道振荡的电子会发出电磁波，这是无线电收音机和电视的工作原理。如果盒子中有一些灰尘能够吸收并发射光线，起到与上文描述的气体分子间的相互碰撞相同的作用，那么每个波都将具有相同的能量。

在1900年马克斯·普朗克的论文发表之前，非量子热力学是热力学的唯一存在形式。这种热力学理论认为，每个波的能量等于系统温度乘以一个常数。对于充满气体分子的盒子来说，这一方法非常适用。在这种情况下，将数万亿兆个分子的能量相加，就能得到气体的总能量。一万亿兆是一个很大的数字，但也只是一个数字。然而，盒子中的波的频率是没有上限的。在弹奏两端固定的吉他弦时，会存在一个可能的最低频率，但是原则上，最高频率却没有上限。如果每个可能的波都有相同的能量，并且有无限多可能的波，那么盒子中光的总能量也是无限的！幸运的是，真实物体并非这样，否则，所有物质都将以X射线或伽马射线的形式释放出无限多的能量。这是毁灭性的，所以物理学家称其为“紫外灾难”。

为了解决光强度谱图在计算和观测上的矛盾，普朗克假定盒子中的原子只能以与光的频率成比例的步幅损失能量，从而提出了能量=h×频率这一关系式。经过百余年的不断探索，量子力学已经取得了长足发展。与普朗克在1900年提出的理论相比，我们可以用更简单的方法来解释实验中观测到的所有物体的发光光谱。

装满光的盒子可以被看作一种光子气体，其中每一个光子的内禀角动量值都是。因此，这些光子都是玻色子，它们遵循玻色—爱因斯坦统计原则。对于气相的玻色子，粒子处于较低能量态的概率更高。大多数玻色子都处于最低能量态，少数玻色子处于较高能量态，个别玻色子会处于很高能量态，最高能量态被占据的概率则很小。

光子气体的能量是光的频率函数，它等于光子的能量（E=ℏ×f）乘以处于该能量态的光子数目。大部分光子都处于低能量态，高能量态被占据的概率很小，因此高能态的光子对平均能量的贡献也很小。单个光子的能量越大，处于该能量态的光子数目越少。将单个光子的能量与处于该能量态的光子数目相乘，可以得到每个频段的平均能量。这一能量在低频区很小，在中频区达到峰值，在高频区又变得很小，与实验观测结果完全相符。

这有点儿类似“强力球”或乐透彩票的奖金。为了赢得大奖，彩票玩家必须猜对全部6个数字。即使没有人猜对全部6个数字，猜对其中几个数字的情况也是有可能发生的。只猜对3个数字的人会得到一笔数额较小的奖金，比如10美元。猜对4个数字的人可能会赢得一万美元，猜对5个数字的人可能会赢得10万美元。奖金额度起初很小，许多玩家可能只猜对了一两个数字，他们颗粒无收；有些玩家猜对3个数字，但他们赢得的奖金数额很小；猜对4个数字的玩家更少，他们会赢得一笔不少的钱；很少有人能猜对5个数字，所以他们赢得的奖金占比比较小（巨额的奖金池，但是获奖者很少）。根据彩票机构发放的总奖金额与奖金的级别作图，我们会发现奖金额在一开始时很小，逐渐到达某一峰值，随后又开始减少。

当我们设定了容器大小后，盒子中气体分子的数目便是固定的，但光子数目却可以随着温度而改变。热的物体会发出很亮的光（也就是放射出大量的光子），冷的物体则放射出较少数目的光子。在高温状态下，表示光子数量的指数型曲线的尾部会延伸至更高能量区域。发光体的发光光谱峰值与频率有关，因此取决于这个物体的温度：冷的物体的峰值出现在频率较低的位置，物体的温度越高，曲线的峰值就越大。

因此，我们可以根据测量到的可被视为“黑体”的物体光谱，来确定非常热的物体的温度，比如鼓风炉的内部或者太阳表面的温度。当然，这项技术也适用于冷的物体。宇宙空间中充满微波辐射，这种辐射是来自“创世大爆炸”的残余能量，其光谱可以表示为频率函数。通过对该光谱进行测量，我们发现，如果宇宙的特征温度为2.7开氏度，则完全符合普朗克表达式。第2章的图2–1实际上显示的是测量宇宙微波辐射的黑体光谱，这种辐射遍布宇宙，此时此刻也遍布在你这名“无畏”的读者周围！根据测量到的宇宙膨胀速率，我们可以推算出宇宙大约花了150亿年的时间才冷却到现在的温度。量子力学是为了解释原子与光相互作用的方式而发展起来的，它告诉我们可以利用放射性同位素的衰变规律来确定地球的年龄。现在我们知道，量子物理学也向我们揭示了宇宙中最古老事物的年龄——宇宙的年龄！

[1] 如第12章所讨论的，函数A和B是单粒子波函数的乘积，A=Ψm(1)Ψn(2)，B=Ψn(1)Ψm(2)，其中Ψm(1)表示一个在位置1处于量子态m的玻色子的波函数；而Ψn(2)代表一个在位置2处于量子态n的玻色子的波函数。如果粒子1和2的位置互换，那么总波函数Ψ=A+B=Ψm(1)Ψn(2)+Ψn(1)Ψm(2)保持不变。

[2] 氦变成超流体时发生的变化，或者电子在超导体中形成“库珀对”，并不属于严格意义上的玻色—爱因斯坦凝聚态。真正的玻色—爱因斯坦凝聚态与超流体或超导态的区别是一个很专业的问题，为了便于理解，我们在这里可以将它们等同起来。



第五部分

伟大的技术与发明

第14章
荧光材料和隐形墨水

1933年，纽约市内耸立着许多摩天大楼，但其中只有一幢有86层高。在现实世界中，帝国大厦的第86层被专门用作观光层；但在通俗科幻杂志描绘的世界里，帝国大厦的86层被租给了一个人，他把那里当作他的私人住宅，并配有一个馆藏丰富的图书馆和先进的化学、医学以及电子实验室。此人文武双全，经常与他的5位助手一起进行全球探险活动，这5名助手都是来自不同领域的专家，分别是化学、法律、电子科学、工程学和考古学。这支探险队的领袖并不满足于单纯依赖他的卓越智力和强健体魄，他也使用了许多看似不可思议的发明和小型装置。若干年后，现实世界的科学家和工程师掌握了我在这本书中讲述的量子力学原理，并设法取得和通俗科幻杂志中最伟大的英雄之一——克拉克·萨维奇相似的成就，使得小说中的许多非比寻常的装置出现在现实世界中。克拉克·萨维奇的渊博学识足以让他拥有多个博士头衔，不过，由于他在约翰·霍普金斯大学取得了硕士学位，又花了几年时间在维也纳研究脑外科与神经学，所以他的朋友和大众都称他为“医生”。

萨维奇医生的探险故事被刊载在以他的名字命名的通俗科幻杂志上，他的第一个故事《青铜人》（*The Man of Bronze*）发表于1933年3月，作者是莱斯特·丹特。也是在这一年，《萨维奇医生》（*Doc Savage*）成为美国报刊亭中最畅销的通俗科幻杂志之一。在接下来的16年里，丹特又以近乎每个月一部的速度创作了160多部有关萨维奇医生的完整小说。凭着1个单词1美分的写作收入，丹特夫妇过着探险和旅行的生活，这也是他创作小说的灵感源泉。萨维奇医生和他的团队经常驾驶游艇或潜艇出海远航，与现代海盗作战，或者探索恐龙时代的岛屿。丹特夫妇则在一艘12.19米长的帆船上度过了几年时光，他们沿着美国东海岸航行，白天在加勒比海垂钓和寻宝，晚上创作通俗冒险故事。丹特拥有飞行员执照，会发电报，喜好登山，曾在死亡谷中勘探黄金，通晓各种冷门知识，并被选为探险家俱乐部的会员。

作为丹特笔下最著名的文学人物，萨维奇医生成为后来一系列科幻人物的原型。比如，超人和蝙蝠侠（萨维奇医生来到北极的避难所中搞

新发明，那里被他称为“孤独堡垒”。而且，他将许多打击犯罪的小装置集中在一件实用的背心上），詹姆斯·邦德（他的领带和夹克纽扣中藏有铝热剂，他的车能够制造烟雾来遮挡追踪者的视线），漫威卡通漫画中的“神奇四侠”（他们也居住在一座摩天大楼中，萨维奇医生的两名助理之间的关系预示着“石头人”和“霹雳火”这两个角色之间的关系），还有《星际迷航》中的斯波克先生（萨维奇医生通过扼住敌人颈部的某处神经来使他们瘫痪）。

萨维奇医生发明的小型装置也领先于他的时代。1934年，他使用了一种雷达，远早于现实世界的雷达在第二次世界大战中的首次亮相。（据丹特所述，1943年的萨维奇小说中关于雷达的注释，在刊物付梓前被军方责令更换成另一种装置。）当飞行员被迫在大洋上将自己弹射出机舱时，萨维奇医生使用鲨鱼驱逐器和有色染料来定位飞行员的位置，这比美国海军采用的类似发明早了10年。萨维奇也发明了一个小型追踪装置，当它被安在汽车上时，会发出无线电信号，可实现汽车的远程定位。此外，萨维奇医生还有一项发明——隐形书写，这项发明背后的量子力学原理与激光相同。

在1933年的《青铜人》故事中，萨维奇和他的探险队为了得到他刚刚辞世的父亲的消息，搜索了他们位于帝国大厦86层的住所。萨维奇知道，他的父亲经常会以一种隐形书写的方式给他留下信件，于是他拿出了一个类似幻灯的小金属盒子。萨维奇向团队中的电子专家朗·汤姆展示了这个盒子，并借机对这位队友进行了测试，问他是否认识这个装置。“当然……这是一个能产生紫外线的提灯，或者我们通常所说的黑灯。它发出的射线是人眼看不见的，因为……它们的波长小于可见光。”朗·汤姆随后指出，尽管我们无法察觉，但很多寻常物质，比如奎宁和凡士林，在被紫外线照射时会发出荧光。他们将提灯发出的紫外光照向了萨维奇办公室的一扇窗户，果然有一条来自萨维奇父亲的留言显现出来，每个字母都闪着蓝光。这条留言将他们引向一处藏有一些重要文件的隐秘地点，在这些文件的指引下，他们踏上了通往虚构的中美洲国家伊达尔戈的探险之旅。萨维奇与他的父亲，以及在后来的通俗冒险故事中与其他队友通过隐形书写交流的方式，依赖于量子能级间的不同跃迁速率。

我们已经知道，被束缚在原子中的电子有特定的能级。这种“不连续能级”带来的结果是，只有被允许的能量态之间发生电子跃迁时，原子才能吸收或损失能量（我们将忽略原子核内部质子和中子的跃迁，因

为这些跃迁的能量规模在伽马射线级别，我们现在感兴趣的是电磁波光谱中可见光的跃迁）。只在原子吸收或辐射光子以及与另一个电子或原子发生碰撞的过程中产生的能量变化，恰好等于两个能级间的能量差时，才会引起电子跃迁。

在前文中提到的礼堂类比中，成排的座椅代表被允许的能量级，学生可以从位于礼堂前部的座位向后移动到礼堂后部的空座位上。然而，学生不能站在两排座位之间，而且只在他们吸收的能量恰好可以让他们从一排移动到另一排时，才能换座位（前提是他们的目标座位是空的）。同样，原子必须释放出一个能量恰好等于其起始和终止能级间的能量差的光子，才能从高能量态回到基态。也就是说，只有满足能量守恒定律的电子才被允许发生跃迁。这解释了当把一个原子放到高温环境中时，为什么我们只能观察到数量有限的光谱线（第5章图5–3）。不同的元素都具有不同的被允许的量子能级，因而能级间的能量差以及电子在不同能级之间跃迁时发出的光的频率也不同。

仅凭一个电子可以在两个能级之间跃迁这一事实，并不能知道电子跃迁速度的快慢。对于一组原子来说，跃迁概率较大的电子所对应的光线会更明亮。有一些光谱线虽然也会呈现出来，但却很黯淡，这是因为无论何时，这些谱线对应的电子跃迁的发生概率都很低。量子理论的一个最伟大的成功之处在于，它确实可以对电子跃迁速率（每秒钟内原子中一个处于激发态的电子降至较低能量态，并在这个过程中释放出一个光子的概率）进行预测。因此，量子理论不仅可以正确地预测出一个给定的原子能观察到什么样的波长，还可以预测出光谱线的明亮程度。

是什么决定了电子跃迁速率呢？这一个问题相当复杂，取决于起始状态和最终状态的波函数细节。重点在于，量子力学可以对如下事实进行解释：第一，原子中的电子只能有特定能量；第二，只有被允许的能量态之间的电子跃迁才有可能发生；第三，每秒钟内一个特定电子发生跃迁的概率。也就是说，量子理论可以解释为什么我们只能观察到原子的离散而非连续的发光光谱，也能预测出光谱线的波长和强度，这些都与实验结果十分吻合。现在，既然我们对原子如何与光相互作用已经有了足够的了解，就可以解释20世纪最重要发明中的两项——激光和荧光人偶了！

我们先来看荧光材料。固体中的每一个原子都有最高可占据能级（如图12–3所示），当10^{24}个这样的原子聚集在一起时，所有这些座位就拓展成量子态的观众席，如图14–1所示。根据泡利不相容原理，每个

座位实际上都是一个可以容纳两个具有相反内禀角动量值（分别是+ħ/2和–ħ/2）的电子的双人座。因此，基态观众席内的10^{24}个座位可以容纳2×10^{24}个电子。

如果固体中的原子通过把它们的电子放入盒子来形成化学键，就像钻石中的碳—碳键那样（图12–4），那么观众席上的每个“双人座”中都会有两个电子，礼堂座无虚席［图14–1（a）］。电子将不得不跃迁至更高的能量态，于是，这些较高的能量态也被拓展为观众席的一部分。那些形成像钻石一样的固体的原子，可以被视为坐满电子的乐池，以及与乐池座位数相同但完全空置的更高能级的包厢。当固体在外部电压的作用下形成电流时，电子会获得动能，但必须以存在电子可用的且未被占据的更高能量态为前提。因此，仅有那些在热能或光照的作用下上升到包厢座位的电子才能够参与电流的形成。钻石是电的绝缘体，因为在通常情况下，包厢中的电子太少，无法提供强电流。

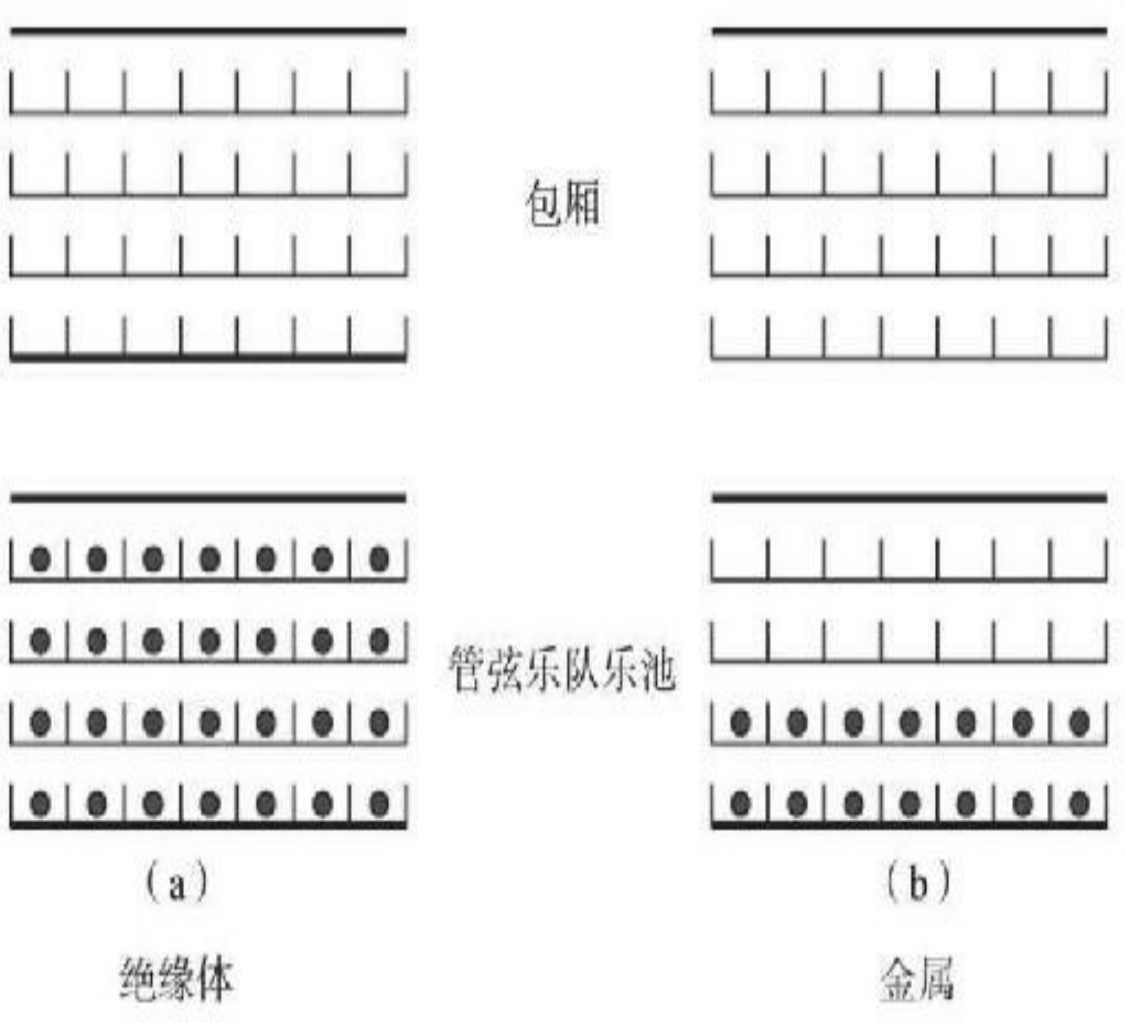


图14–1 固体中最高可占据能级的量子态能带和第二高可占据能级的量子态能带的示意图。在绝缘体中（图a），低能带就像已坐满乐手的乐池，它与处于空置状态的能带（包厢）被一个过道隔开。在金属中（图b），低能带的乐池只有一半座位被占据，电子很容易跃迁至空座位

相比较而言，金属中的基态电子被局限在“动态空间”中，而且能容纳2×10^{24}个电子的乐池仅坐了10^{24}个电子。因此，乐池内还有许多空座位，如图14–1所示，当电子携带电流时，很容易从一个座位移动至另一个座位。

为了制造一个非金属“荧光”体，我们需要一个充满电子的乐池，一个空的包厢区域和一组中间排座位［同样未被占据且恰好位于包厢区域下方（如图14–2所示）］。为了便于讨论，我们假设让一个电子从乐池跃迁至包厢座位需要使用蓝光，而使用较低能量的绿光可以使电子跃迁至中间排座位。包厢和中间排之间的过道属于电磁光谱的红外区域，中间排座位可能来自固体中的另一种不同元素或化学物质。

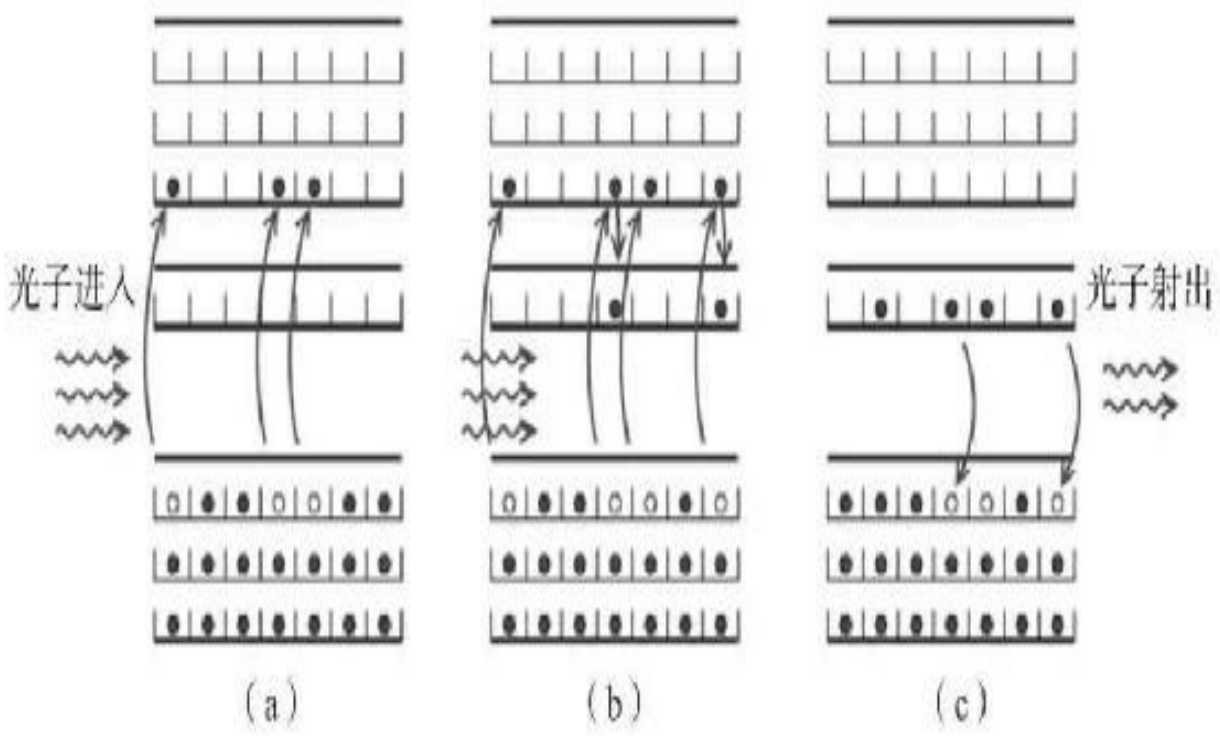


图14–2 由满员的低能级乐池、空的高能级包厢和能级介于前两者之间的中间排组成的荧光体的能带结构示意图。当固体受到白光照射时，电子很容易从乐池跃迁至包厢，当电子回到较低能级时，就会发射光子。在个别情况下，电子最终会落在中间排，从这里回到乐池的跃迁速率较低。当白光照射停止时，这些处于中间排的电子最终会回到乐池，并在这个过程中发射很少量的较低能量的光子。所以，荧光材料能在黑暗中发光

现在假设电子从乐池到包厢的跃迁速率很高。这意味着让电子从乐池跃迁至包厢很容易，之后电子又会很快回归乐池。中间排则不同，它的电子跃迁概率非常低，因此我们很难让一个电子从乐池跃迁至中间排。一旦处于中间排，电子回到最低能态的概率就会非常低。因此，这些电子在回归最低能态之前将在这种状态下停留很长一段时间。

现在，如果我们用白光照射这种固体会发生什么呢？白光是由光强相同的所有颜色的可见光组成的。由于量子化能级的不连续性，原子将忽略蓝色、绿色以外的其他颜色的光。蓝光很容易被吸收，因为从乐池到包厢的跃迁速率很高。当然，包厢中的电子回到乐池的概率也很高，并在这个过程中释放出蓝光光子［图14–2（a）］。在绝大多数情况下，这个循环会持续进行：乐池吸收蓝光，让电子跃迁至包厢；电子很快又从包厢回到乐池，并发射出另一个蓝光光子。在个别情况下，如果我们重复这一过程的次数足够多，中间排的一个座位就会被电子占据，这个电子或者是从乐池直接跃迁至这一能级的（尽管概率很低，但如果

进行足够多的尝试，这种情况终究会发生），或者是没从包厢回到乐池，而是回到中间排［图14–2（b）］。当电子从包厢回到中间排时，我们不会看到它发射的红外线，除非我们有对这部分光谱线敏感的特殊探测器。一旦来到中间排，电子就会停留在那里，直到一个红外光子将它激发到包厢（这不太可能，因为在我使用的白光中，需要用到的红外线部分的能量很少），或者电子回到乐池，并在此过程中发射出一个绿光光子（这有可能发生，但是电子跃迁概率较低）。

我们先用白光照射这个固体，蓝光被吸收后又被发射出来，最终固体中的电子会处于中间排，在乐池内留下空座。再将光源关闭，所有处于包厢的电子会迅速回到乐池，处于中间排的电子也会回到乐池［图14–2（c）］并发射出光子。所以，固体现在虽然处于一个完全黑暗的房间，但也会发光！之后，随着中间排电子数目的减少，固体发出的光越来越黯淡，直到它再一次受白光照射补充能量。许多妙不可言的玩具就是利用这种简单的量子力学原理制造出来的。

萨维奇医生的隐形书写必须使用一种“墨水”，在这种墨水中，乐池和包厢之间的过道处于光谱的远紫外区域，中间排和乐池之间的过道对应蓝光。萨维奇医生用黑灯发出紫外光让电子跃迁至包厢，随后又让中间排坐满电子。根据通俗冒险故事中的描述，蓝色字迹很快就消失了，我们假设电子在中间排停留的时间仅有几秒钟。在普朗克的太阳光谱中，紫外线的强度太弱，不足以为这些能量态充电，这就是为什么萨维奇医生需要使用黑灯。

包厢和中间排之间的过道，以及在黑暗中电子处于这些能量态的时间，取决于为了保持这种状态而在固体材料中添加的特定元素。为了让电子跃迁至这些能级，我们不需要使用紫外线或可见光，任何能让电子从乐池跃迁至包厢的能量来源都可以。

早在20世纪50年代，一些闹钟的指针上已经涂有镭元素，持续释放出的阿尔法粒子为保证荧光材料的包厢坐满电子提供了必需的能量，指针因此可以在黑暗中发光。当镭发射出一个阿尔法粒子之后，原子核转变为同样具有放射性的氡。于是，闹钟的荧光材料被有害性更低的物质取代。尽管如此，放射性材料具有以均匀的速度发射能量的性能，所以我们很难弃用它们。烟雾警报器使用一种放射性同位素来制造粒子束，当这束粒子探测到烟或霾时，就会触发警报。某些有夜光功能的手表，已经将外部能量源从镭替换为氚。嘉年华的餐盘也不再像20世纪30年代那样在鲜艳夺目的橙红色釉面上涂上铀的氧化物，这令大多数用餐者备

感放心。

第15章
“死光”：天使还是魔鬼？

巴克·罗杰斯的漫画风靡一时，由该漫画改编的广播剧也大获成功。1934年，“飞侠哥顿”冒险主题漫画问世，与巴克·罗杰斯系列形成竞争之势。至20世纪30年代中期，以这两大漫画为灵感来源的玩具射线枪在市场上供不应求，戴茜制造公司（该公司拥有制造冲压金属版本的“巴克XZ–31型火箭手枪”的生产许可）为此将钢材和纸箱消耗殆尽。1960年，激光被发明出来，对此公众首先想到的是，这是否意味着科学家们最终掌握了备受期待的“死光”技术。考虑到在科幻世界里，射线枪在征服宇宙过程中发挥的重要作用，公众的这种反应不足为奇。

1958年，贝尔实验室的查尔斯·哈德·汤斯和亚瑟·莱纳德·肖洛为他们设计的一种能够发射出高密度可见光束的激光器提交了专利申请。1960年，加利福尼亚休斯研究实验室的西奥多·哈罗德·梅曼成功地建造了第一台激光发生器装置。在当年的新闻发布会上，多家媒体的记者轮番向梅曼提出他是否实际上发明了“死光”这一问题。贝尔实验室的科学家们则收到相关管理部门的指示，在公开场合禁止谈论任何关于用激光作为致命武器的问题，竭力避免说出任何可能引起误解或被错误引用的话。1961年，《底特律新闻报》（*Detroit　News*）报道了贝尔实验室的一位科学家的演讲，内容涉及他们的激光项目。该报道重点指出，“死光”将是激光这项发明的第一项应用。1964年，也就是梅曼宣布发明激光的4年之后，在米高梅影业出品的007系列影片之《金手指》中，詹姆斯·邦德被绑在桌子上，忍受着缓慢痛苦的死亡威胁。1959年出版的007原版小说中的圆盘锯，在电影中被一束高能量的工业激光取代，它的射线沿着桌边缓慢移动，准备把邦德一分为二。

激光发生器与荧光体的物理学原理基本一致。根据化学成分和材料性质，激光不仅能发射绿光，也能发射红光、绿光、蓝光、紫外光和红外光。激光和荧光体之间的两大区别在于，在激光中，中间排座位几乎完全被电子占据，更重要的是，中间排的所有电子会同时回到基态。

如何保证位于激光中的所有电子同时回到基态，并放出光子呢？回

想一下荧光体与礼堂的类比，如图14–2所示，我接下来采用的论证方法与上一章基本相同。乐池中的电子，可以在电流的作用下或通过吸收光的方式跃迁至包厢，从而在乐池内留下空位。电子从乐池到包厢的跃迁速率很高，它们回到乐池同样很容易，并发出光。在个别情况下，电子不会从包厢回到乐池，而是来到中间排座位。电子跃迁进入或离开中间排的速率很低，因此它们会较长时间地保持这个状态。如果电子跃迁至包厢，再从那里到达中间排，且这一过程比它们自发地从中间排回到乐池的速度快，我们就能使中间排的电子数目与乐池中的几乎一样多。

现在，我们已经为激光的生成做好了准备，如图15–1所示。电子从中间排回到乐池有两种途径：自发回去或者被推回去。在某些材料中，电子自发地从中间排回到乐池的跃迁速率是电子从包厢回到乐池的速率的亿分之一。这解释了为了填满中间排，我们需要先让电子跃迁至包厢的原因。什么可以将一个电子推回乐池？答案是：光。

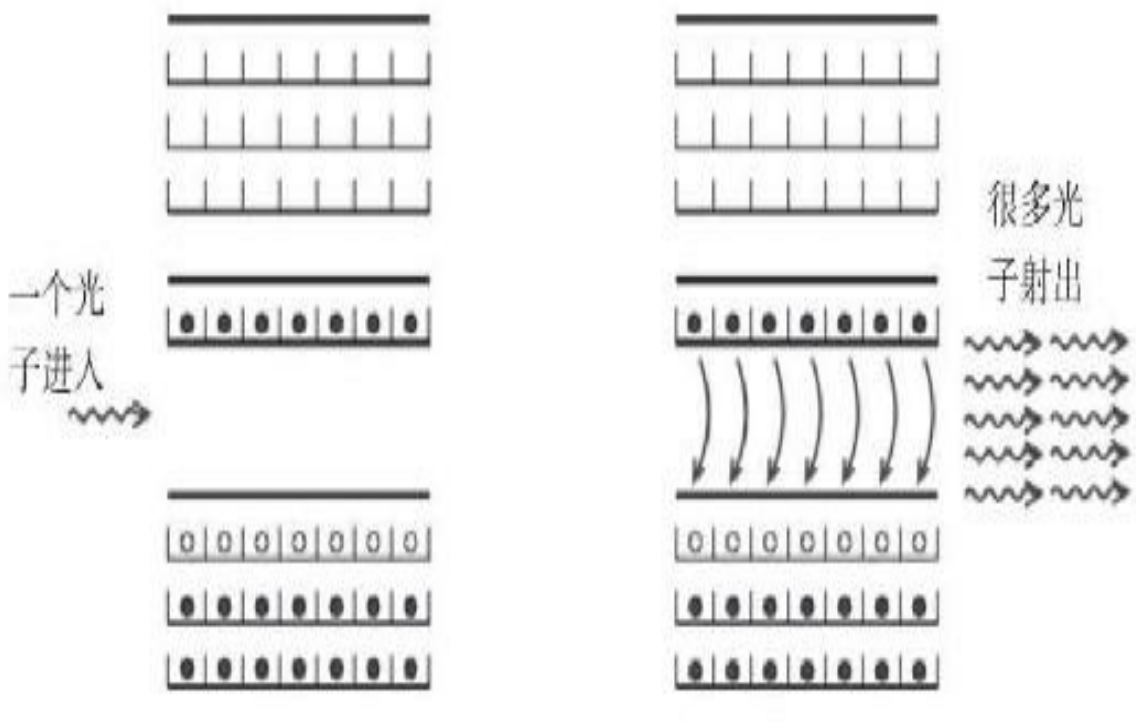


图15–1 来自第14章的礼堂模型，只不过此图中中间排的上座率很高。一个光子可以把一个处于中间排的电子推回乐池，并在此过程中发出一个光子；这个光子又可以使另一个电子发生同样的跃迁。最终产生的净效果是，大量电子跃迁至较低能带，并辐射出相同能量的光子。这一过程就是激光的基本物理学机制

当电子从中间排回到乐池时，它的波函数可以表示成乐池和中间排

的量子态的叠加。在这一过程中，电子的平均位置可以被看作它在每个态的对应值之间进行振荡。因为振荡的电荷会以其振荡频率发射电磁波，我们从量子力学角度对这一过程进行分析发现，此过程中释放的不连续的能量包（即一个光子）的能量，恰好是中间排和乐池能级之间的能量差。

一旦有光子发出，其电磁波就会使中间排的一个电子发生振荡，从而回到乐池，并发出光子。第二个光子又会使另一个电子发生跃迁，并产生能量相当于中间排和乐池这两个能带的能量差的光子。在这种情况下，大量的电子会回到乐池，每个电子都被一个光子的振荡电场所驱动。因此，一个光子将会引发数万亿个光子的发射，它们都具有相同的能量，并在同一时间发出。光子的运动速度很快，以至于在第一个电子从中间排回到乐池，与数万亿个电子从中间排回到乐池之间，没有明显的时间差。这种通过受激辐射产生放大的光的装置，被简称为“激光器”。

当然，如果想多次发射激光，就必须反复让电子跃迁至包厢，继而回到中间排，最后回到乐池，并发出光子。因此，多次发射激光需要耗费大量的能量。每秒钟内想要发出的光子越多，需要耗费的能量就越多。演讲使用的激光指示器的激光密度相对较小，所以可以用两节AA或AAA电池提供能量；而切割用的工业激光则需要1 000瓦特的能量。

激光器发射的光是相干光。受激辐射产生光子的工作物质通常被封装在谐振腔内，谐振腔的两端各有一面反射镜，而且只有一端有一个小孔，可以让光线射出。这就好比礼堂的所有墙壁都能反射光子，但只有那些沿着完全正确的方向，朝着唯一的出口移动的光子，才能离开。那些留在礼堂内的光子会来回反射，产生更多的从中间排到乐池的跃迁。由此形成了一个紧密聚焦的激光光束，如果光子处于相同相位时，它们在离开谐振腔时就会表现出最小散射。因此，除非你直视射出激光的小孔，否则你是看不到激光的，这与灯光均匀地向所有方向扩散的白炽灯不同。无论从哪个角度，我们都能看到白炽灯的光，但在某种意义上，这些光子的能量被浪费了，因为光射在了我们并不需要看到的物体上。只有当激光束在物体表面发生反射时，它才能被看到。如果空气中没有灰尘或微粒使激光束发生散射，看到它的唯一可能方式就是移动至它传播路径上的某处。经测量，从地球上某个实验室发出的一个致密狭窄的激光束，在行进了386　242千米抵达月球之后，其宽度仅增至约3.2千米。

当电子在光子的激发下从中间排回到能量较低的乐池时，它们都会发出能量相同的光。因此，激光只有单一的颜色，被称为“单色性”。将氦和氖两种气体混合，是一种产生红色激光的高效机制。这两种元素的外层量子能级完全被占据［如图12–3（b）所示］，因此表现出化学惰性，即它们不会通过形成任何形式的化学键来降低它们的能量。当一束电子通过这种气体混合物并与氦原子发生碰撞时，电子的动能发生了转移。氦原子中的一个电子受激从基态跃迁至激发态。由于氦、氖原子的量子能级之间的间隔，当一个电子处于更高能级的氦原子与一个氖原子发生碰撞时，电子会在氖原子中持续地处于激发态。当所需频率的光激发了氖原子时，它们就会回到基态并发出红色的光子。

用带电荷（即离子化）的氩气代替氦—氖混合物，可以产生绿色激光。使用半导体二极管，人们就可以摆脱气体工作材料的限制，制造出能够产生红光、绿光、蓝光的固体材料激光器。相比较蓝光光子2.6电子伏特的能量和475纳米的波长，红光具有更低的能量（1.9电子伏特）和更长的波长（约为650纳米）。二者的波长看似相差无几，但用在DVD中，效果会有很大的不同。

凡是仔细观察过由一系列黑白点组成的老报纸图片的人都会明白，图像中所包含的信息可以表示为一系列像素点。DVD和CD（可擦写光盘）通过视频或音频播放系统的一组指令来编码图像和声音。像素是二进制的，它们只有两种状态：开或关，亮或暗。所有数字信息几乎都可以表示成由0和1组成的字符串。

价格低廉的小型固态激光器的发展，使人们能够读取存储在光盘上的那些“0”和“1”。从光盘的亮面反射出来的激光将被一个光学传感器探测到。如果光盘的表面是平滑的，那么沿直线传播的激光将被直接反射到光学传感器上，光盘的相应位置会被标记为一个亮点。如果激光射在光盘上的粗糙区域（比如，光盘上某个凹陷的小坑或者小凸起），那么光会沿着随机的方向散射，而不是被反射到光学传感器上。因此，传感器会把光盘的这一位置标记为一个暗点。把亮点表示为“1”，把暗点表示为“0”，我们就可以存储和传输数字化信息了。

激光沿着光盘移动，记录下平滑和粗糙区域的顺序，并将其表示成“1”和“0”，解码这些数字就可以播放出美妙的音乐。实际上，固定激光而移动光盘的做法更容易（通常是以每分钟几百次的速度转动光盘）。“1”和“0”的密度越大（即在一定长度内包含的信息量越大），视频和音频信号的分辨率越高。正是由于量子力学的发展，激光对娱乐活

动产生了重要的影响。

如果你想粉刷一个5.08厘米高的兽人雕像（随便举个例子），你肯定不会选择粉刷房屋用的那种大刷子（假设你不打算只涂抹一种颜色）。为了在小雕像的细部涂上不同的颜色，你需要一把非常精致的小刷子，虽然它会令粉刷房屋的过程变得乏味漫长，但却非常适合涂抹雕像的细部。当光被用作探针时，波长就如同刷毛的精细程度，我们无法用波来探测尺寸小于波峰和波谷间距离的物质。

这就是为什么我们使用光学显微镜，看不到病毒或几纳米尺寸的物体。为了“看见”这样的小型结构，你要么使用波长为几纳米甚至更小数量级的光（比如高能X射线），要么使用高速电子。通过改变施加在电子束上的加速电压的大小，可以比较容易地控制电子的动量，从而调整电子的物质波波长。一组充电金属板可以聚焦电子束，对从物体表面反射或穿过物体切片的电流进行探测，电子显微镜可以提供原子尺度分辨率的图像。这是量子力学的又一应用。

早期的光盘存储介质只有红外固态二极管激光器。因为红外光的波长相当长，因而比特的密度（单位区域的比特）比较小。光盘的尺寸是固定的，这意味着光盘上凹坑之间的间隔较大，一张标准光盘大约能存储6亿~8亿比特的信息。由于可用的“1”和“0”较少，早期光盘虽能够存储足够多的音乐信息，却无法满足存储高质量视频的需求。有了可见红光固态激光器后，光的波长缩短了，更小、更窄的凹坑（以及数据压缩技术的发展）使得光盘上的比特数目多达50亿。这些数字化光盘的用途非常广泛（因而得名DVD），它们可以同时对图像和音乐进行编码。随着近年来价格相对低廉的蓝光固态激光器的发明，比特的密度进一步增加。现在，我们可以用更高的分辨率来储存影片，高清蓝光DVD播放器让我们足不出户便可拥有影院般的观影体验。

光盘上的凹坑是怎样形成的？答案是：通过另一道激光。1966年的第16期《索拉尔——原子之人》在常规故事之后，还为读者们准备了一个专题，揭露了“原子谷的秘密”。其中一页讨论了“死光的诞生”，死光在该漫画中指由装在来复枪上的激光器发出的光。由激光器发出集中的光子束确实会造成很严重的伤害，具体取决于它照射的材料。激光携带能量，当材料吸收这些光时，必须设法分散由激光提供给每个原子的多余能量。“温度”是物理学中用来表示每个原子的平均能量的量度。如果某种材料不能释放出它吸收的能量，这些能量就必然会转变为原子的振动，材料的温度上升。如果激光的功率密度足够大（即每秒钟内单位面

积吸收的光子数目），材料被激光加热的速度将会比多余热量被传递给固体的其余部分的速度快。在这种情形下，原子可能会振动得十分剧烈，导致化学键发生断裂，材料发生液化或气化。20世纪60年代，激光的能量大小是通过它们能够熔化的吉列剃须刀刃的数量来衡量的。在激光烧蚀技术中，被激光束气化的物质通常状态下是固态，烧蚀产生的物质蒸汽会凝结在基底材料表面，或者与另一种化合物发生反应。科研实验室用该技术合成新型半导体材料。

当在DVD和CD光盘上写入信息时，比如，在一些家用电脑的CD/DVD刻录机中，激光不必使光盘气化。确切地说，激光将使光盘涂层发生化学反应，使光盘表面变暗，不再反射光线，或者使材料熔化。迅速冷却后，被熔化的区域并不会变得平滑均匀，而是变得粗糙，形成凹坑，使CD或DVD播放器中的另一个激光束发生散射。在CD和DVD的商业化生产过程中，激光被用于刻录母盘，以及冲压包含编码信息的多张复制品。

将激光用作“死光”的麻烦在于，激光很难达到造成重大破坏所需的功率密度。为了在DVD光盘表面熔化一小块区域，必须在很短的时间内提供大量的能量，其速度要快于能量转移到材料其他部分的速度。因此，问题的关键在于能量的传递速率，在物理学中我们称为“功率”。人们可以制造出能在坦克装甲板上熔化出一个大洞的激光，但即便不把供能装置计算在内，激光器也会有桌面那么大。

图15–2《索拉尔——原子之人》中的“死光的诞生”那一页暗示了激光在治疗疾病和造成伤害两方面的潜力。这在其他漫画书中也有所提及。在“光和死亡”（*A Matter of Light and Death*）（1979年《动作漫画》第491期）中，超人用他的聚焦热视线消除了导致其同伴失明的重度白内障。超人先将两块煤挤压成两块钻石，这比你想象的难得多。正如超人在挤压煤炭时想的那样：“将碳从煤的状态转变成钻石，这对我来说也绝非易事！即使形成一块天然钻石，也要经历数百万年漫长的自然演变，耗费大量的地下压力……更何况是两块！”煤炭是植物经泥炭化后被深埋所形成的化石燃料，在超人挤压煤块的过程中，那些存在于煤块而不存在于钻石中的杂质（比如硫、氮和其他化学物质）的去向，在漫画中并没有交代。超人将这两块大钻石放在他朋友的眼前，然后使用了热视线。在进行这项操作时，“明日之人”暗自思忖：“这些钻石正在过滤我的热视线光束并将其聚焦成两个超级激光束，这让我可以做到人造激光无法做到的事——消除那些白内障，恢复他的视力。”（超级

英雄总在头脑中思考自己的行为，这对读者来说是一件好事！）1987年，史蒂芬·托克尔获得了一项专利，他用曾应用于半导体表面的能发射紫外光（不同于超人的由红外光组成的热视线）的准分子激光器，实施了首例眼科手术。尽管激光手术不是治疗白内障的常见方法，但时至今日，用于重塑角膜以矫正近视等激光手术已经非常普遍了。


原子谷的秘密——死光的诞生
一束奇异的强光从最高机密测试实验室射出……
眨眼间，7.62 厘米厚的坦克装甲板就像黄油一样熔化了！
这是“原子谷”研制出的不可思议的实验激光枪——死光枪
激光的名字来自受激的辐射而产生的放大的光！
简单来说，这意味着让入人造红宝石两的光线可以来回反射，从原子中激发出更光子。
在极短的时间内达到临界状态，射线从圆筒的一端发射出来。
激光束只有一种颜色，属于相干光。每传播 1.6 千米增加的范围不到 0.76 厘米。
普通的人造光，包含可见光光谱中所有颜色的光，这种光传播范围太广而没有足够的能量。
但是，死光也是希望之光！原子谷的科学家们为了获得有价值的结果而在医学实验室里做实验。
“太棒了！激光清除了实验动物身上的癌细胞，而且没有伤害健康组织！相信它很快就可以用于人体了！”

图15–2 1966年的第16期《索拉尔——原子之人》中有教育意义一页，展示了正义与邪恶势力如何应用激光

当萨维奇医生使用只有在紫外线照射下才能被看到的隐形书写方式进行交流时，他应用了与荧光材料相同的物理学原理，他对这些是否了解呢？也许他并不了解DVD播放器的全部工作细节，但萨维奇医生对基本量子力学理论的了解是毋庸置疑的。在1936年出版的萨维奇医生冒险故事之《恐怖的南极》中，他和他的探险队粉碎了由一群盗贼和杀人犯精心策划的在南极峡谷中开采铂的行动。这些恶徒能够融化大量的冰，并使用一种奇怪的热射线杀害企图阻止他们的证人。除了萨维奇医生以外，这种热射线让其他所有人都困惑不解。萨维奇医生在这个故事的结尾处解释道：“人们早就知道，环绕地球的大气层阻挡了许多来自太阳的射线，其中有些射线是无害的，而有些射线则可能对人造成严重伤害，甚至是致命的。举例来说，根据薛定谔的理论，空气中的粒子是由原子组成的，而这些原子是由振动的带电球体构成的。”

医生正确地推断出，他的对手有“一种装置，可以改变地球上空有限区域内的大气层的性质，允许宇宙射线通过毛毯般厚实的大气层”。早在曼哈顿计划实施的9年前，萨维奇医生便使用了薛定谔的理论，并与可以随心所欲地在南极上空造成臭氧层空洞的狂徒作战，这表明他不但精通量子物理学，也深谙惩奸除恶之道。

第16章
半导体和二极管

50年前的通俗科幻小说和漫画书曾预测，到2000年机器人将挣脱枷锁，反抗人类霸权。这一切得以实现的前提条件是，机器人必须具备能够独立自主地进行思考的电子大脑。它们必须拥有非常精密的计算机，其数学运算能力远远超过20世纪50年代的“差分机”。事实上，我们今天的计算机比50年前的科幻作家们想的还要复杂精巧，这都得益于科学家们的努力。1947年，贝尔实验室的研究人员利用当时量子力学研究的最新进展，开发了一种可以使电子大脑的体积大减而计算能力大增的新型装置——晶体管。

在1957年DC漫画公司出版的《漫画试读》（*Showcase*）第7期中，“未知挑战者”团队与位于巨型机器人顶部的一台精密计算机展开交锋。挑战者团队由4位冒险家组成，包括一位试飞员、一位爱探险的摔跤冠军、一位教授兼深潜专家，以及一位热衷于登山的马戏团驯兽师。作为机上仅有的4名乘客，他们在空中遭遇了风暴，飞机坠毁。然而，他们却幸存下来。他们认为自己获得了重生的机会，便投身于历险活动。他们击败了外星侵略者、疯狂科学家以及海底的怪物，一次次死里逃生。坦率地说，如果换成是我，在经历了空难事故之后，我会有截然不同的反应，比如，我不会去寻求更多的疯狂冒险，不会在没有降落伞的情况下跳出机舱，不会把硝化甘油炸药当作玩具。然而，挑战者团队的4名成员并不像我这般谨小慎微，他们的冒险故事扣人心弦，他们还成了漫威漫画公司于1961年推出的“神奇四侠”作品的原型。

在《漫画试读》第7期中，挑战者团队面临的对手是新型计算机ULTIVAC，一个高达15.24米并能够独立思考的机器人。ULTIVAC是由德国科学家费利克斯·海塞制造的，“二战”结束时，他被美军俘虏，作为战犯被关进监狱。海塞的助手是他在狱中结识的银行抢劫犯弗洛伊德·巴克。坐牢期间，他们通过上物理课来消磨时间——海塞向巴克传授物理学知识。获释后不久，他们就设计并建造了一台巨型计算机（见图16–1）。科学家认为ULTIVAC必须庞大到“能够完成我们想让它做的所有事情，它将成为有史以来最了不起的计算机”。显然，就像故事后来

揭示的那样，在洋基球场展示他们的发明，并向前来观看“两吨钢铁……能像人一样思考和说话”的人们收取入场费，也在他们的“致富计划”之列。这种公开展览遭到了ULTIVAC的反抗，它在科学家琼·罗宾斯的协助下出逃，ULTIVAC因此相信了人类和计算机之间的友情。ULTIVAC在一群政治家、科学家和国家领导人面前讲话并做出承诺：“如果人类做出让步，我愿致力于协助人类的事业！”然而，建造ULTIVAC的德国科学家并没有把ULTIVAC交给政府，而是对它造成了致命伤害。在最后一幅漫画中我们可以看到，经过了一番有效的紧急修复，ULTIVAC变成了一台静止的计算机。在图16–2中，罗宾斯博士在故事的结尾对挑战者团队说道：“使ULTIVAC像人类一样思考的希望已经破灭！但是作为纯粹的机器，它在知识方面对人类仍然贡献良多！”



图16–1 《漫画试读》第7期的插画，未知挑战者团队发现“ULTIVAC是松散的”。被盟军逮捕的德国科学家海塞对他的狱友、银行抢劫犯弗洛伊德·巴克讲解物理学知识，获释后他们设计并建造了一台新型计算机——ULTIVAC

1957年，计算机确实开始在知识方面对人类做出大量贡献，在解决复杂的问题上助人类一臂之力。1946年，宾夕法尼亚大学的科学家们建造了第一台电子计算机，名为ENIAC，即“电子数字积分计算机”（Electronic Numerical Integrator and Computer）的英文缩写。这台计算机长约24米，重约2.43万千克。那时，半导体尚未问世，所以ENIAC

使用了将近17 500根真空管和超过7 000根晶体二极管。它归美国军方所有，执行的首个运算任务是氢弹项目。曾经建造ENIAC的科学家们后来为雷明顿·兰德公司（即后来的斯佩里·兰德公司）工作，并于1951年建造了UNIVAC——一台通用自动计算机，使用了超过5 000根晶体管，每秒钟能执行近2　000次运算。在20世纪50年代早期，这台计算机以高达12.5万美元的价格被卖给了美国军方和大公司；哥伦比亚广播电台还播出了UNIVAC对德怀特·戴维·艾森豪威尔将军将在1952年当选美国总统的预测。尽管UNIVAC无法行走，也不能与喷气式飞机作战，却形如ULTIVAC般庞大（见图16–2）。如果没有半导体革命，提升这种设备的计算能力就需要使用越来越多的真空管和复杂的导电线缆，只有少数大型企业或政府才有财力购买这样的机器。



图16–2 《漫画试读》第7期的最后一幅漫画，琼·罗宾斯博士向未知挑战者团队描述关于

ULTIVAC的最终安排。尽管“只是一台静止的计算机”，但它“在知识方面对人类仍然贡献良多”

一场革命将扭转这种局面，并带来体积更加小巧、性能更加强大的计算机。1939年，贝尔实验室的一位科学家罗素·奥尔发明了半导体二极管，为这场革命奠定了基础。现在，我们有足够多的量子力学知识去理解这个装置和它的大个子兄弟——半导体晶体管——是如何工作的，以及为什么很多人认为它们是20世纪最重要的发明。

我们需要了解的第一个知识点就是半导体的定义。在这本书的第四部分，我们讨论了两种材料——金属和绝缘体。金属中每个原子的价电子（最后几个来配对的电子）处于不同的动量态，以满足泡利不相容原理。这些电子在动量上的不确定性较小，而在位置上的不确定性较大，它们可以在整个固体中自由移动。在低温条件下，金属中有许多电子携带电流。绝缘体通过从空间上限制每个原子的价电子来满足泡利不相容原理，这些电子被束缚在原子间的化学键中，就像第12章的图12–4描绘的钻石内部的碳—碳键一样。在高温条件下，其中一些电子能够被热能激发跃迁至较高能量态（即从乐池到包厢），它们可以导电；但在低温条件下，所有电子都被束缚在原子的化学键中，因而材料是绝缘体。

但是，怎样才算低温呢？低是相对于什么来说的？在区分低温和高温时，一个方便而自然的温标就是室温。这就有了第三类材料：在室温下，相较玻璃或者木材等绝缘体，它们的导电性更好；但是相较银或铜等金属，它们的导电性却差得多。像这种部分导电的固体，被称为“半导体”。

回顾一下上一章的内容，激光是一种乐池的所有座位都被电子占据的材料，而其包厢的所有座位都是空的。让我们暂时忽略乐池和包厢之间的中间排座位。在绝缘体中，乐池与包厢之间的能量差通常为5~10电子伏特，恰好属于电磁光谱的紫外光部分。因此，只有能量在这一范围内的光才能使电子跃迁至包厢（正如第14章中萨维奇医生的“隐形书写”）。这种光的强度通常较低，而且在室温条件下，来自原子的热能也不足以让可观数量的电子跃迁至包厢。所以，如果在绝缘体上施加一个电压，其在室温条件下产生的电流小到可以忽略不计。在半导体中，乐池与包厢之间的能量差要小得多，通常为1~3电子伏特。可见光的光子能量为1.9~3.0电子伏特，有足够的能量让电子跃迁至包厢。同样，在室温条件下，原子的热能也足以让部分电子跃迁至高能带。当然，充满电子的低能带与空的高能带之间的能量差越大，在室温条件下通过热能激发跃迁至包厢的电子数量就越少。

之所以能用半导体材料制成操作便捷的光探测器，是因为充满电子的低能带和空的高能带之间的能量差恰好对应光谱中可见光部分的能量值。比如，某种特定材料的能带差是1电子伏特（该能量对应的光位于光谱的红外区域，我们的肉眼看不见）。通常，在黑暗环境中，一些电子会被热能激发跃迁至高能带，并在乐池中留下空位。这些失去电子的座位也能够导电，因为会有另一个电子迁移到这个位置，如图16–3所示。这些失去电子的“空穴”扮演着“正电荷”的角色，这是固体中电流传导的量子力学本质的一个独特方面。这一现象也存在于绝缘体中，只不过乐池中的空位和包厢中的电子都很少，因此产生的效果可以忽略不计。半导体中跃迁至包厢的电子随后又会回到乐池，而其他的电子则会被热能激发跃迁至包厢。因此，在任何时刻，半导体中都会有大量的电子和空穴能够传导电流，但电流远小于等效的金属导线所能负载的电流。现在，如果我用1电子伏特或更高能量的光照射这个半导体，通过增加光的强度，我可以让许多电子受激跃迁至空的高能带，在原本充满电子的低能带中留下许多空穴，材料的导电能力因此显著提高。这样的半导体在电路中就像一个闭合的开关，电子设备现在可以开始工作了。

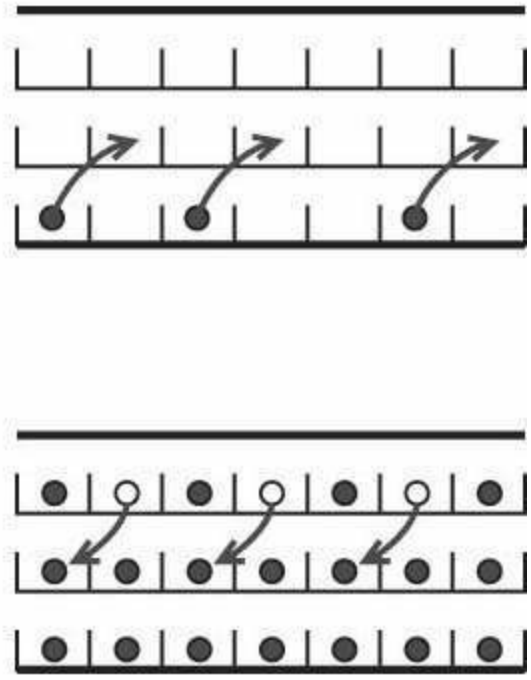


图16–3 一个半导体中几乎被电子填满的较低能量带和几乎空着的较高能量带的示意图。一些能够传输电流的电子将跃迁至包厢（由于它们较易到达较高能量带，因此它们能够获得动能并传输电流）。与此同时，乐池中的空穴也能扮演负载电流的正电荷的角色，因为其他电子会迁移至此填补空穴

就这样，量子力学使电视遥控器成为可能！遥控器将一束红外光（肉眼看不见）发射到你的电视机上。如果遥控器的前端没有指向电视机，信号就无法到达感光器，电视机的设置将保持不变，一旦光束到达半导体并被吸收，材料的导电性就会增加，电路就会闭合。当你按下遥控器上的一个按钮时，发射的红外光束将通过一系列事先设定的脉冲序列（不是摩尔斯电码）来编码信息，将指令发送给电视机。

烟雾探测器的工作原理与此相同。一些机型将红外光直接照射到一个光探测器上。当烟雾粒子让红外光束发生散射时，主电流回路就会被切断，而次级回路送出电流拉响高亢的警报。另一些机型使用少量的放射性同位素镅，它们在衰变时释放出阿尔法粒子，这些阿尔法粒子使放射源周围的空气带电。烟雾粒子会捕获这些电荷，同样地，一旦主电流回路被切断，次级回路就会拉响警报。从你走近时自动开启的门，到夜幕降临时自动开启的街灯，我们其实并未从中察觉，我们是多么频繁地使用了光照会显著地改变电学性质这一半导体的性能。

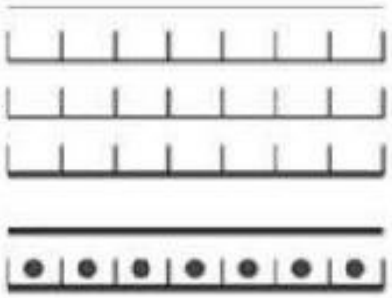
在1938年的广播剧《魅影奇侠》（*The Shadow*）中，光探测器发挥了至关重要的作用。魅影侠在现实生活中是一位风度翩翩，名叫拉蒙特·克兰斯顿的富贵闲人，其真实身份只有他的忠实助手与伴侣马戈·莱恩知晓。魅影侠在“东方”习得了各种各样的精神力量，可以蒙蔽人的心智。在《死亡逼近魅影侠》（*Death Stalks the Shadow*）中，一位阴险狡猾的律师彼得·默多克，用固态光传感器为魅影侠设置了一个死亡陷阱。当拉蒙特和马戈来到一家夜总会时，他们注意到一扇暗藏机关的门，每当有侍者靠近时便会自动开启。拉蒙特向他的伴侣解释说，那扇门是由门两侧的含铬装置发射和接收光电射线来控制的，每当光束被切断时，门就会打开。拉蒙特感觉这种装置会给他带来危险，因为“魅影侠可以躲避人类的视线，但光电射线可以探测到他的存在”。

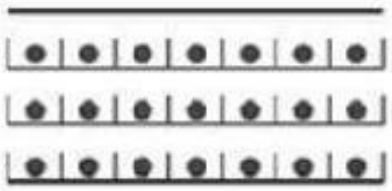
这正是彼得·默多克的计划，他雇用了一名电工将一个密闭的房间与一道钢门连接起来，做成密室陷阱。一旦魅影侠进入房间，隐形光束（“你看不见它，这是红外光束。”电工解释道）就会被切断，钢门随即砰然锁闭。密室陷阱布置好后，电工被默多克杀死了，因为死人是无法泄露默多克的计划的。如默多克所料，魅影侠确实进入了房间，钢门猛然关闭并通了电，有毒气体被注入密室。在经历了所有这些突发状况后，魅影侠发出了低沉轻蔑的笑声。这不单是因为魅影侠知悉潜藏的人性之恶，还因为在20世纪30年代的系列广播剧中，即使拥有法律学位的犯罪高手也显得智谋不足。为了嘲弄他的对手，默多克把电工的尸体与

魅影侠一同锁在了密室里。魅影侠从死去工人的工作服中找到了一副钳子，成功地切断了房间里的电。那扇钢门对他不再构成威胁，魅影侠逃出了房间，抓住了默多克和他的团伙，并把他们移交给行政长官韦斯顿，韦斯顿把默多克关进了死囚牢房（罪恶之草终结苦果）。所以，就算红外线探测器也不敌……魅影侠！

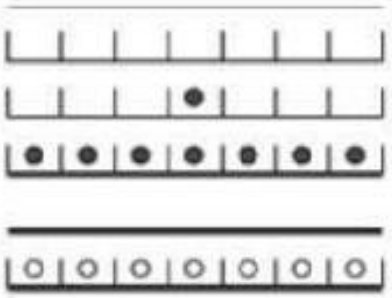
如果这便是半导体的唯一优势，那么我们今日的世界与20世纪30年代的世界，绝不会截然不同。在半导体材料中加入化学杂质后，半导体的真正威力才得以发挥，这一过程在化学上被称为“掺杂”。在图16–4中，以充满电子的低能带和空的高能带为特征的体系，就如同礼堂中满负的乐池和空的包厢。当讨论激光的物理学原理时，我们引入了中间排这一能级，其能量低于包厢，它是由在材料中添加的另一种化学物质产生的（通常是磷）。半导体中可以包含两种中间排能级：能量接近于空的包厢的能级，以及能量略高于充满电子的乐池的能级，这取决于添加的化学元素。如果我正确地控制材料的化学构成，就能确保在空包厢的前排的每个座位上都有一个电子［图16–4（a）］。这样一来，即使在室温条件下，由于被电子占据的中间排座位和空的包厢之间只有非常小的能量差，几乎所有的电子也都能跃迁至包厢，它们留下的空穴不在乐池，而在中间排［图16–4（b）］。

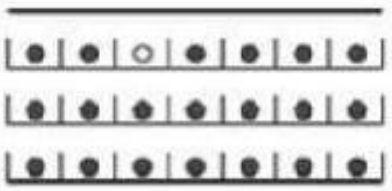
仔细观察元素周期表，我们可以在充满电子的乐池后方设置一排座位（我们暂且称为“休息室”）［图16–4（c）］。休息室通常是没有电子的，这取决于所添加的杂质原子以及半导体材料的化学性质。随后，一个电子从满员的乐池中跃迁至休息室，留下一个空穴，而不必跃迁至包厢［图16–4（d）］。能量较低的休息室座位与能量较高的中间排座位之间相距太远，处于这些能量态的电子很难在座位间移动。对于电流的传输而言，中间排和休息室都是无效的，但这两个能带可以向包厢内添加电子，或使乐池内留下空穴，从而极大地改变了半导体的电阻。第一种情形是，中间排电子跃迁至包厢，这种半导体被称为N型半导体，因为产生的净效果是增加了可移动的带负电荷的电子。第二种情形是，较低能级的休息室从乐池接收电子，使低能带中产生空穴，这种半导体被称为P型半导体，这是因为新增的负载电流的空穴是带正电荷的。由于此前被添加到半导体材料中的杂质原子是电中性的，让一个中间排电子跃迁至包厢，将在较高能级中留下一个带正电荷的座位；而允许一个电子进入休息室，并在乐池内留下一个可移动的带正电荷的空穴，会使休息室的座位带上负电荷。





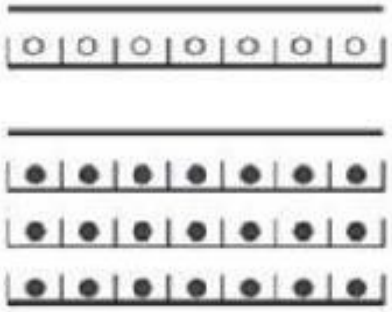
(a)



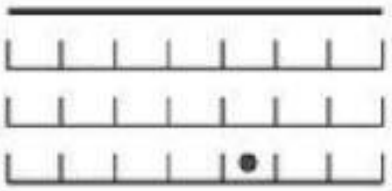


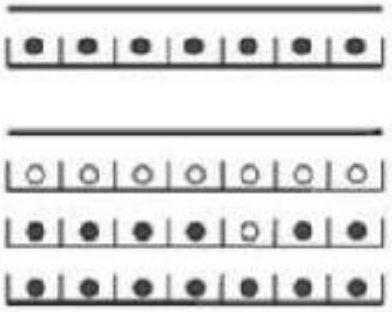
(b)





(c)





(d)

图16–4 掺入了化学杂质的半导体示意图。添加的杂质原子在包厢前方形成了中间排能级，它在低温条件下通常充满电子（图ae），s在室温条件下电子很容易跃迁至包厢能级（图b）。在另一种情况下，添加的杂质原子可以在充满电子的乐池后方形成中间排能级（图c），它在低温条件下通常是空的。在室温条件下，电子很容易从乐池跃迁至中间排的休息室座位，在乐池内留下能够负载电流的空穴（图d）

我们在一个半导体中加入N型杂质或P型杂质，电子或空穴的数目将增加，半导体的导电性将增强。当然，如果我们想要的只是一个更好的电导体，那么我们应该使用金属。事实并非如此！当我们让两种半导体材料发生接触时，才会体现出掺杂的真正价值所在。其中一种半导体仅含有N型杂质，它的包厢中有大量可移动的电子，中间排有固定的空穴；另一种半导体仅含有P型杂质，它几乎充满电子的乐池内有可移动的空穴，有电子位于休息室座位上。如果这两种半导体材料的长度都是1.6千米，那么我们预计，在距离交界面很远的地方，每一种材料仍会表现出普通的N型或P型半导体的性质，但在两种材料的交界面它们将变成另一种物质。

N型半导体材料的包厢中有电子，但乐池中没有空穴；P型半导体材料的乐池中有可移动的空穴，但包厢内空空如也。如图16–5所示，当它们互相接触时，电子可以从N型半导体的一侧向P型半导体的一侧扩散（空穴则会反向扩散），在两种材料的交界面，电子与空穴重新结合在一起。换句话说，包厢中的电子可以移动到乐池的空穴中（泡利不相容原理告诉我们，任何两个电子都不能处于相同的量子态，因此只有存在空穴时，电子才能向较低能级跃迁）。而且，当这种情况发生时，就好像一个电子和一个空穴同时从材料中消失了。但是，N型半导体的中间排座位所带的正电荷和P型半导体的休息室座位所带的负电荷不会移动。随着越来越多的可移动电子进入可移动的空穴，N型半导体材料的中间排的正电荷与P型半导体材料的休息室的负电荷逐渐累积，但这两种电荷都不能移动到另一侧的半导体中。

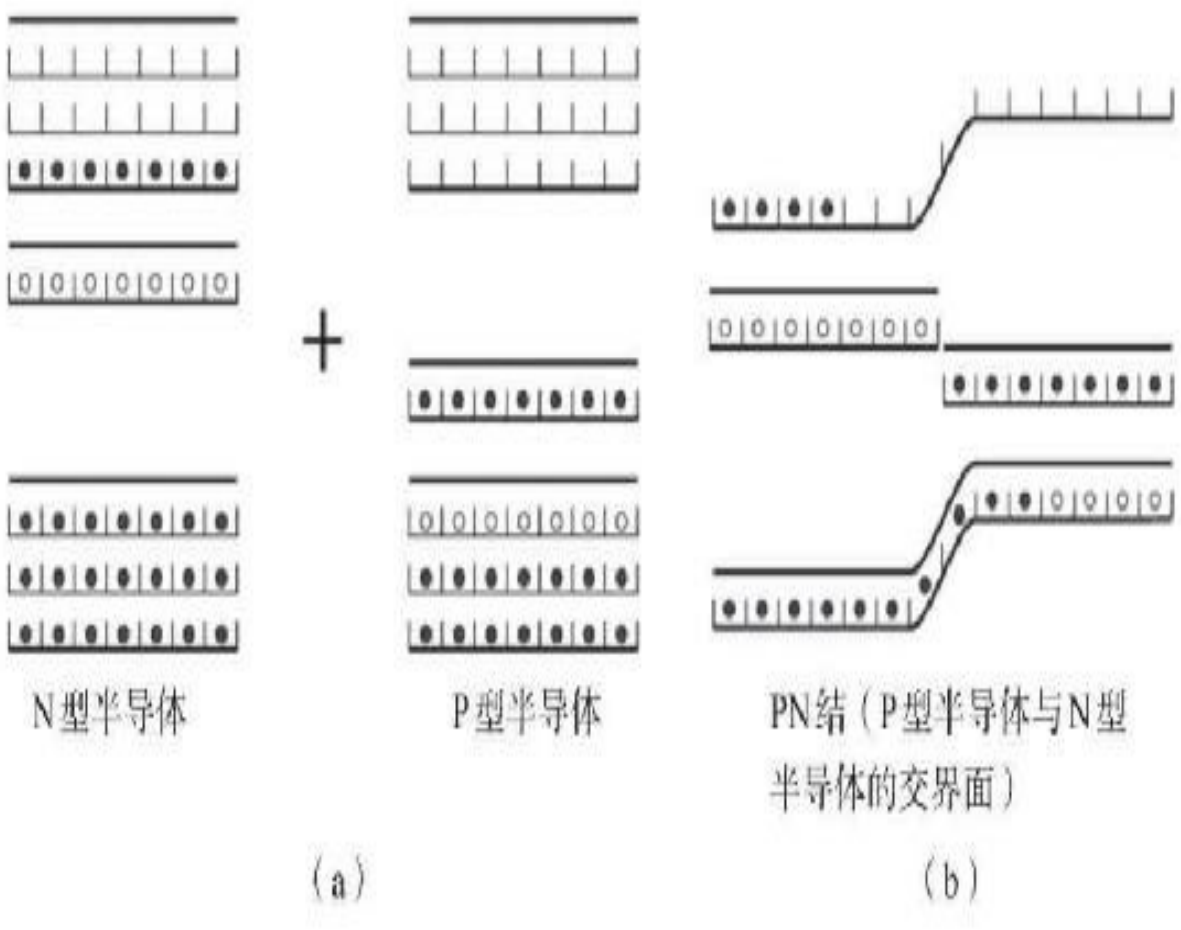


图16–5 N型半导体和P型半导体发生接触的示意图（图a），来自N型半导体一侧的电子进入P型半导体一侧的空穴，分别在N型半导体和P型半导体中留下带正电荷的中间排座位和带负电荷的休息室座位。这些带电的中间排座位和休息室座位形成了一个内电场，影响了通过半导体的电流。在这个内电场的影响下，两个礼堂相对倾斜（图b）。为了作图简便，图b仅画出了包厢和乐池的第一排座位。如果向这个交界面施加一个外部电压，它就可以抵消这个内电场，使电流可以很容易地从一侧流动到另一侧

这样产生的净效果是，在N型半导体一侧的带有正电荷的中间排和在P型半导体的一侧带有负电荷的休息室所形成的区域内，产生了一个电场。最终，该电场将足够强大，阻止更多的电子和空穴跨交界面移动，并形成一个内部电压。你应该还记得，这些量子态的能量是通过薛定谔方程求得的，并且取决于半导体内每个原子中带正电的原子核和带负电的电子之间的静电吸引力。这一跨越N型半导体和P型半导体的交界面的电场的存在，其作用是相对于N型半导体一侧的座位，P型半导体一侧座位的能量得以提高，如图16–5（b）所示。结果是，左侧的电子会更难移动到右侧，而右侧的空穴也更难移动到左侧。由此产生了固体物理学中最具革命性的装置之一——二极管。

跨越P型半导体和N型半导体交界面的内电压起到了“单向门”的作用，如同为电子准备的一道单向旋转栅门。当然，单向阀是相当普遍的，从你的心脏瓣膜到早期收音机中的“猫须”整流器（可将交流电转变为直流电）。固态半导体二极管体积小、耐用，并且可以很容易地根据特定电子产品的需求量身定制。如果施加在交界面的外电压与内电场的极性相反，它就会抵消交界面处的内在能量势垒。左右两侧的座位将会排成一行，仿佛没有内电场。电子从N型半导体一侧移动到P型半导体一侧将变得容易，并产生电流。如果施加的外电压会使内电压增加，与电流方向相反的电场将会变强，右侧的座位会被推至更高的能量态。此时，二极管如同一个高电阻器。这种方向性在无线电探测和电力供应方面非常重要，在这两种状况下，输入的交流电必须被转变为直流电。

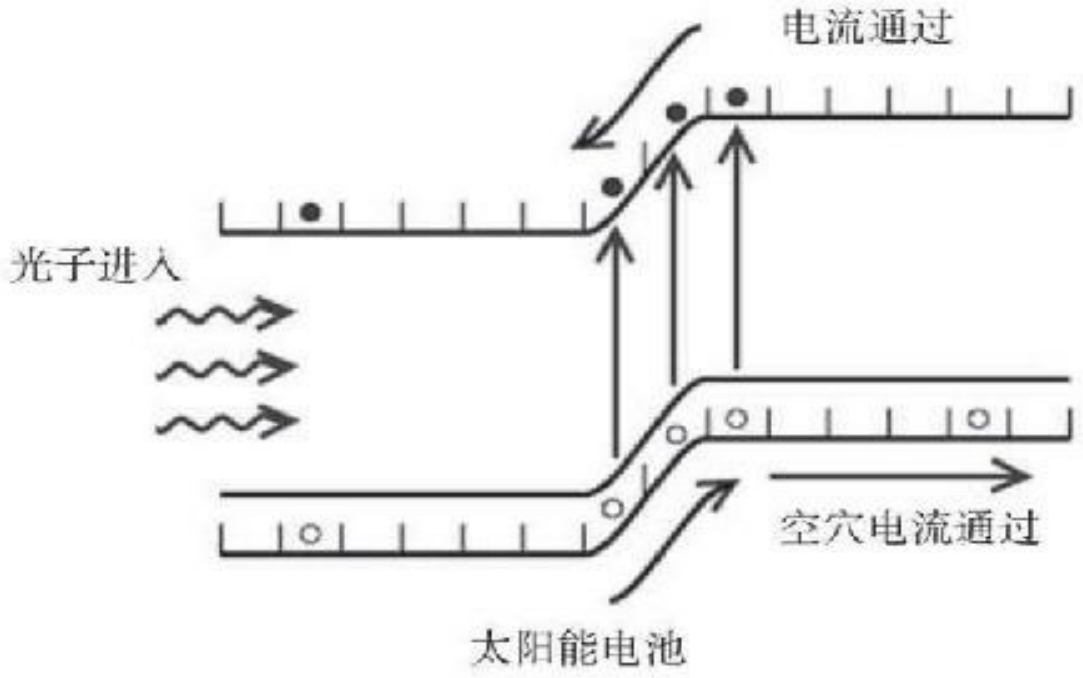
对通过二极管的电流进行调节的方法之一是，改变阻止电荷从一个区域移动到另一个区域的势垒。除了在P/N半导体交界面处由内电场制造的势垒外，我们还可以组装一个二极管，其中由相同半导体组成的两个区域被一片很薄的绝缘体隔开，电子只有采取量子隧穿的方式才能穿过这个绝缘体！改变施加在绝缘体上的电压，可以起到改变势垒高度的作用，隧穿电流对势垒高度非常敏感。这样一来，只需施加小的电压就可以对电流产生较大影响，所以这些二极管是手机等许多电子消费品不可或缺的组成部分。尽管我无法对任何一个特定的电子能否穿过势垒进行预测，但对于大量电子，我能够准确地推断出穿过势垒的电子比例。因此，我们就可以运用最神奇的量子力学现象之一来设计电子设备，让它们能够以常规、可靠的方式运行。

电流的单向门有时指的是“整流器”，它可将交流电转换成只朝一个方向运动的电流，比如在无线电接收器中。1939年，贝尔实验室的一位科学家罗素·奥尔在研究整流器中的半导体的电学性质时，测试了一个碰巧含有一个PN结的样品。在他研究这块样品不同寻常的电流负载情况时，他惊奇地发现，当他用一盏40瓦的台灯照射该样品时，材料中自动产生了巨大的电压。就这样，奥尔在研究整流器的过程中发明了太阳能电池。

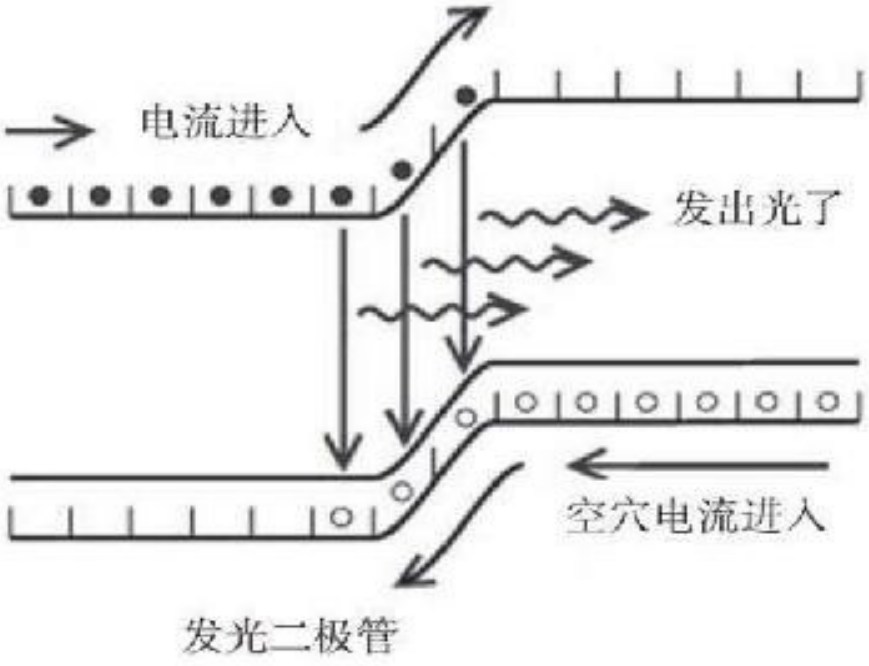
如果我用光照射半导体PN结，如图16–6（a）所示，由于乐池与包厢之间的能量差在左右两侧是相同的（内电场刚好调节了两侧的能量差），两侧都将吸收光子，使包厢中有电子出现，乐池中有空穴出现。在二极管中，我们所有关于电子的讨论都适用于空穴，因而我们将只关注电子。从电子的角度看，如果它们位于内电场的P型半导体一侧，那

么它们处于最高能量态。这些电子很容易从能级最高的包厢移动到左侧，穿过整个器件。在材料的各个部分都会出现电子和空穴，但在P型半导体和N型半导体交界面附近的电子将因为受到内电压的影响而离开高能级，并穿过器件。我们只需用光照射二极管，便能够产生电流和可利用的电能。因此，太阳能电池是一个因受到光照而产生电流的PN结。

发光二极管（LED）则是一个通电时能产生光的PN结。如何使二极管发光呢？在距离交界面很远的地方，这个器件看起来恰如普通的N型或P型半导体。在N型半导体材料中存在大量电子，但只有少量空穴（因为电子并非来自充满电子的低能带，而是由化学杂质引入的）。因此，当电子从几乎空着的包厢回到乐池时，只有很少量的光产生，这是因为它们能坐的空穴很少。如果我通过施加外电压的方式迫使电子从N型半导体一侧向P型半导体一侧移动，在交界面处就会有许多电子，也会有许多空穴向相反方向移动［图16–6（b）］。随着电子移入空穴，它们会发射出光子。让电子跃迁至较高能量级并进入P型半导体需要电能，而我们以光子的形式回收了一些能量。如果我们在LED外面包裹一个圆柱形塑料透镜，就可以得到一个没有灯丝的光源，而且这个光源非常高效（因为仅有极少量的电能转化成废热）。



（a）



（b）

图16–6 一个吸收光的PN结让电子跃迁至包厢并在乐池内留下空穴的示意图。P型半导体一侧（图的右半边）包厢内的电子具有较高的能量，很容易移动至N型半导体一侧（图的左半边）的包厢。由此，通过吸收光产生了电流（图a），这种二极管被称为太阳能电池。另一种情况是，让一个电流通过二极管，将电子从N型半导体一侧推到P型半导体一侧（空穴的移动方向正好相反），那么在电子和空穴的密度基本相等的交界面区域，电子将有许多机会从包厢回到乐池，并发出光子（图b）。这种二极管被称为发光二极管

20世纪60年代制造的LED灯只能产生低强度的红色光。在过去的30年中，LED灯的亮度增加了上万倍，白光LED灯的亮度相当于60瓦的白炽灯泡。LED灯的使用寿命比普通的白炽灯泡更长，一些制造于20世纪七八十年代的LED灯至今仍可使用。近年来，用有机半导体取代发光二极管中的硅成为趋势，因为有机发光二极管（OLEDs）发出的光扩散范围更大，在某些情况下比硅基LED灯还要明亮。有机发光二极管使用由碳分子组成的长链基团（化学家称为“有机分子”），作为半导体元件。也许在不久的将来，传统的白炽灯将被更加环保节能，并且比紧凑型荧光灯更经久耐用的白光LED灯所取代。这都要归功于量子力学。

接下来，我想讲一段我自己与二极管有关的经历。我读研究生期间，研究组里有一张属于我的书桌，我的研究生毕业论文最终就是在这张书桌上完成的。在我入学前不久，高年级学生彼得说服了我们的教授，在彼得工作的实验室里安装了一部电话。那时候，美国司法部门尚未将美国电话电报公司拆分成“贝尔七兄弟”[1]，人们还只能从占据行业垄断地位的贝尔电话公司订购电话机，然后由贝尔公司派人上门安装座机（那时的手机用户屈指可数）。为了节约开支，我们的教授订购了一部只能接听来电而不能拨打的电话。电话公司的安装人员刚一离开，彼得就从墙上取下了电话，将它拆开，并与另一部允许外拨的电话进行了仔细对比。在一个关键的接合点，彼得发现了一个二极管——一种仅允许信号向一个方向传播的器件。拆除这个半导体器件并重新连接线路后，彼得就能够向外拨打电话了。

我对这一切毫不知情。隔天是星期六，电话公司的人过来检查线路，并将写有电话号码的纸贴在了话机上。片刻之后，公共休息室的电话响了，我当时正在那里学习，就把电话接了起来。电话公司的工作人员在电话里表达了歉意，并表示他们只是想确保实验室的电话可以向外拨号。电话公司的人离开没多久，彼得来到休息室，并告诉我关于他“修好”实验室电话的事情。在我跟他说起电话公司的人早些时候来过，想要确保实验室的电话既能接听也能外拨的事后，他大惊失色，冲到实验室，并发现电话不能外拨了。我眼看着他把电话从墙上摘下来，打开塑料外壳后在里面找到一张白色小卡片，这张卡片被塞在一团电线

的下面。他取出卡片，上面写着：“这回再试试，神童。”

果不其然，电话已经被重置了。总之，如果没有固态二极管的发明，电子产品将会复杂和笨重得多。

[1] “贝尔七兄弟”，7个本地电话公司。———译者注

第17章
晶体管和闪存设备

二极管的发明是人类进入半导体时代迈出的重要一步，第二个重大进步也是由贝尔实验室驱动的，这就是晶体管的发明。晶体管内包含两种不同的结构：一种是将另一个N型半导体添加到一个PN结上（制成一个NPN器件），另一种是更容易理解的场效应器件。接下来，我要讨论的是场效应结构，因为这有助于我们理解闪存记忆棒（也被称为USB）的工作原理。

本章的论述并不取决于半导体材料是N型还是P型，不过为简明起见，我们选用一个P型半导体。想象一块半导体矩形板，比如硅，如图17–1（a）所示，其长度和宽度均大于它的厚度。我们在半导体顶部放置一个与半导体的接触面积较小的绝缘体，比如二氧化硅，其晶体形态被称为“石英”，其无定形态被称为“玻璃”。半导体上表面的两端各有一个金属电极，不与绝缘体接触。在一个电极上施加电压，产生的电流将通过半导体并从另一个电极流出。这是在一定电压下测量通过某种材料的电流的一种方法，在电流通过半导体的过程中，绝缘体不起任何作用。绝缘体两侧的金属电极中都有过量的自由电子，在它们与P型半导体发生电接触的位置形成了有效的PN结。如果我们试图使电子流过掺入了化学杂质的P型半导体材料，PN结将导致电流在半导体中的移动变得异常艰难。现在，为了将这个元件制成晶体管，我们把一层金属放在绝缘体的顶部。如图17–1（a）所示，在半导体顶部有两个彼此分开的金属电极，它们之间有一个绝缘体，在绝缘体板顶部是另一个金属电极。这样一来，我们就制成了一个场效应晶体管[1]。

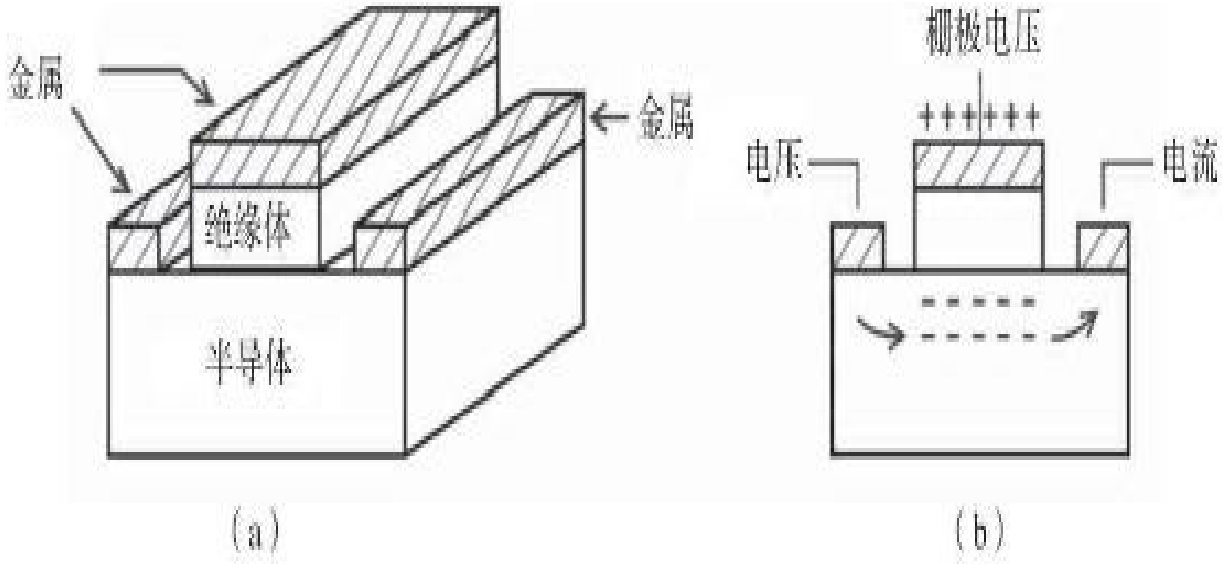


图17–1 一个简单的晶体管结构示意图（图a）。半导体顶端的两个金属电极的作用是让电流通过器件，一块薄绝缘体（如玻璃）被置于它们之间，其上方还有一个金属电极。若正电压被施加在栅极上，正电荷就会在绝缘体上方聚集，将半导体中的电子吸引到绝缘体下方的区域（图b）。这些电子会增强半导体传输两个金属电极间的电流的能力，栅极电压使电流变得更大

如果我们对绝缘体上面的金属电极施加正电压，会发生什么呢？由于这个金属电极与不导电的绝缘体相接触，所以电荷只能停留在金属上，没有其他地方可去。但是，由这些电荷形成的电场会透过绝缘体延伸到半导体中。与绝缘体相比，半导体的导电性尽管不像金属那样优良，但也是一个不错的导电体。电子会被电场拉向“绝缘体—半导体”交界面区域。在没有电压的情况下，金属呈电中性，没有任何因素可以将半导体中的任何电子拉向这一区域。如果在绝缘体上施加电压，正电荷将在绝缘体顶端聚集，在半导体中将会形成一个连接半导体两端金属电极的电子通道［如图17–1（b）所示］。这将减弱金属电极接触半导体所形成的每个PN结的电场，而半导体传输电流的能力将会大大提高。从某种意义上讲，绝缘体顶端金属上的正电压为电子的流动打开了一扇门。在绝缘体上施加负电压则会将电子推离“绝缘体—半导体”交界面，电子流动的能力变弱（在这种情况下，门被关闭）。因此，晶体管为我们提供了一种在栅极上施加一个小的电压，就能显著地改变并增大通过半导体的电流的新方式。

在上一章中，我们讨论了PN结的内电场对于半导体中能带的影响，改变电场会改变由薛定谔方程计算出的量子能量态。如果不施加电压，P型半导体上就会有额外的电场，可流动的电子也会很少。如果在

绝缘体上施加正电压，就会改变乐池和包厢的量子能量态，这种改变在半导体接近绝缘体上正电荷的区域表现得最为明显。在接近绝缘体的区域，电子受热激发跃迁至包厢。因此，当有正电压施加在一个P型半导体上时，半导体接近绝缘体的区域传输电流的能力将会显著增强。通过这个器件的电流对栅极电压的敏感度，是由充满电子的乐池和空的包厢的量子能量态的变化引起的，固体的相关量子理论可以对此做出解释。

如果施加在绝缘体上的电压随时间而改变（以天线接收到的弱无线电信号为例），那么通过半导体的电流也会随时间而变化，并产生放大电压信号的效果，启动扬声器，使人们听到无线电信号。凭借这种放大功能，这些晶体管元件最早被用于晶体管收音机和电视机等领域，取代了真空管，使得这些电子消费品变得更加轻便小巧。

通过加热金属线直到使它内部的电子“汽化”，真空管可以实现与晶体管类似的功能。施加在显示屏上的电压会将这些自由电子吸引到一个集电器上；根据电压的变化，这些电子会向着集电器加速运动，或从集电器反射回来；为了最大限度地减少由空气分子导致的电子束的散射，应该除去管内所有的空气。但是，这样的装置笨重易碎，功耗大，产生大量的热（因此，它们之间必须有一定的间隔），而且造价高昂。半导体晶体管能够完成相同的任务，却不需要用真空玻璃管。这种元件设计紧凑，坚固耐用，产生的废热少；仅有的限制表现在绝缘体的构造、金属电极的应用，以及将该元件接入电路的巧妙设计等方面。

如果能使晶体管小型化，就能将几个晶体管安在单个硅片上。通过改变为半导体提供额外电子或空穴的化学杂质的浓度，以及放置其他金属电极和绝缘体的方式，可以将二极管、电阻、电容连同晶体管一起集成到一个半导体上。这样一来，一个复杂电路的各种元件就可以被整合到一个半导体芯片上。1958年，也就是未知挑战者团队与机器人ULTIVAC一较高下的一年后，罗伯特·诺伊斯和杰克·基尔比分别独立设计和制造了世界上第一块集成电路。这块集成电路在一块硅晶片上集成了5~10个晶体管。我在本书的引言部分提到了摩尔定律，即一块集成电路上的晶体管数量每两年增加一倍。这一预测的精确性甚至令摩尔本人感到吃惊，到2010年，一块硅晶片上的晶体管数量可能超过10亿个。对计算机微处理器中的晶体管数量进行的统计表明，在一所普通大学的校园里，晶体管的数量多于银河系中的恒星。

这些晶体管可以放大信息，比如增强手机中微弱的电磁波信号，但它们的作用不仅限于此。它们也能存储和操控信息。当一个大的正电压

被施加在绝缘体栅极上时，半导体的电流输送能力会显著增强。移除这一电压，半导体会回到较差的导电状态。第一种情形可以被表示为“1”，第二种情形可以被表示为“0”。在上一章中我们讨论过，DVD和CD都能够用一系列“1”和“0”编码复杂的信息，集成电路上的晶体管也有类似的功能。然而，晶体管为微小扰动下的极端敏感性提供了可能。科研实验室中已经制成了尺寸小于100纳米的晶体管，根据在栅极上所施加电压的情况，可以探测到单个电子的运动情况。晶体管可以被用作计算机中控制“开”或“关”状态的逻辑元件，据此可以制造出由单个电子的运动来控制“开”或“关”状态的晶体管。

用仅由两个字母组成的文字系统创作出复杂的文学作品，这可能会令人惊奇。但如果在词的长度方面不加任何限制，这一文字系统将会有足够的灵活性去进行最复杂的数学运算。对于二极管和晶体管如何组合起来实现多种逻辑功能，以及构成这些逻辑运算基础的布尔数学体系，应专门著书详述。尽管如此，我还是想讨论一下晶体管结构方面的一项改进，它已然改变了我们的日常生活。

计算机信息的长期存储是通过磁盘驱动器来实现的。磁盘以磁畴来标记“1”和“0”：指向一个方向的磁场被记作“1”，指向另一个方向的磁场被记作“0”。[2]一个外加磁场可以极化磁盘上的区域（“位”），并写下编码信息的“1”和“0”的序列。将一个更小的磁性传感器（一个层状的金属结构，它的电阻对外加磁场非常敏感）放置在磁盘附近。如果一个“位”的磁场指向一个方向，传感器将会产生一个电阻值；如果“位”的磁场指向相反方向，则会产生另一个电阻值。磁盘就像DVD或CD一样，以超过每分钟5　000转的速度旋转。传感器刚好位于磁盘驱动器的上方，它们之间的距离相当于人类头发直径的1/100。为了存储更多的信息，磁盘上单个“位”占据的区域越来越小。这样的磁力装置无须外接电源即可存储信息（一旦“位”被磁化，所有“位”的磁化方向都相同），而且故障率较低（尽管人们担忧磁盘驱动器会崩溃，但就其耐用程度而言，这种存储媒介是非常可靠的），这是对工程师们高超技艺的证明。

晶体管也能存储信息。如果不在栅极金属上施加电压，半导体的导电性就会较差（记作“0”）；而施加正电压时，半导体的导电性较强（记作“1”）。一旦外加电压被移除，电路中的所有晶体管在默认情况下都会回到它们的弱导电状态。

怎样才能使具有强导电性的晶体管通道得以保持，也就是说，在外电压被移除后，防止“1”变成“0”？闪存设备在我们之前描述的场效应结

构上增加了一个很小的褶皱。相较标准的场效应晶体管结构，闪存设备在绝缘体中距离半导体上表面很近的位置上增加了第二个金属电极。因此，这个器件现在包括：一个金属栅极，一层薄薄的绝缘体，另一个薄金属电极，以及位于半导体上部的一层薄薄的绝缘体。

那么，第二个薄金属电极的作用是什么呢？如果半导体上表面的左右两个电极发生短路，再在栅极金属上施加一个大的电压，电荷就可以通过量子隧穿到达绝缘体内部的这个电极。该电极不与任何外接导线相连，因而被称为“浮栅”。浮栅可以是一层薄金属，也可以是一层硅纳米晶，这些硅纳米晶必须彼此分开，电荷才能保持在硅纳米粒子上而不会移动到其他地方。带电的浮栅在半导体中产生了一个电场，这个电场会影响电流传输通道，即使栅极上的电压被移除，晶体管元件也将保持“强”或“弱”的导电状态（即被记录为“1”或者“0”）。在施加极性相反的电压之前，即使晶体管已经从任何电源上断开，现有数据仍然能够被保存下来（这种存储被称为“非易失性存储”）。这类晶体管存储器是由桀冈富士雄发明的。据说，桀冈的一位同事在描述对存储器中的信息进行删除操作的速度时表示，这让他联想到照相机的闪光灯，“闪存”这一俗称便来源于此。截至我写作这本书时，能够存储256千兆字节的闪存设备已进入生产阶段。

非易失性存储器也给摄影界带来了巨大的变化。传统的非数码相机通过光子在感光胶片上引起化学反应的方式记录图像。信息通过胶片上的分子吸收光子（在胶片上产生化学反应）的方式而被存储下来，再经过一系列湿法化学步骤被冲印成照片。传统胶片中单分子尺寸的感光颗粒，如今被像素网格取代。当光子撞击特定像素的光传感器时，如果它们被吸收，就会产生可移动的电荷。使用不同的半导体，可以改变充满电子的低能带和空的高能带之间的能量差，这样光传感器就可以在光谱中的红外光、可见光或紫外光部分成像。包厢内的电荷可以被转变成电压，并被储存在闪存中。每一个像素点的位置是已知的，因此我们可以获得击中光传感器的大量光子的数字化记录。

直到不久前，笨重的阴极射线管还是电视机的特征之一。然而现在，只要图像被数字化采集，我们就可以利用半导体晶体管技术，将其呈现在平板显示器上。在这种情况下，信息单位由“位”变成了显示屏上的像素，每个像素点上都有少量“液晶”（一种长碳链的有机分子结构）。几何结构上的限制和沿着碳链方向分布的静电荷，将使这些长碳链有机分子呈现出不同的排布方式，从松散、随机的方式，到与粗花呢

面料的编织方式类似的人字花样，再到如盒中火柴般的有序堆积方式。就像无论排列得多紧密，都可以很容易地从盒中倒出火柴一样，这些分子既保留了填充容器的能力，也能像液体一样流动。

当温度改变或被施加外电压时，某些液晶分子将会从一种排布方式转变成另一种。在冰经历相变融化成水后，其光学性质会发生剧烈变化。同样，当某些液晶在外电压的作用下，从一种排布方式转为另一种排布方式时，它们的光学性质也会发生相应的改变，比如材料是否反光，是否有光泽，或者因吸收光而呈现黑色。早期的液晶手表有“不连续数字8”图案的金属电极，在不同的金属电极上施加电压，电极上方的液晶区域会呈现黑色，从而根据一天当中的不同时间显示不同的数字。为了显示更加复杂的图像，每一个液晶像素点的后面都有一个电容器和一个薄膜晶体管。彩色滤镜可以将灰阶图像转变为彩色图像，通过改变每个像素点被打开和关闭的时间，人们可以看到变化的图像，与1936年12月刊的《惊奇故事》通俗科幻杂志封面所展示的电视屏幕类似（见图17–2）。



图17–2 尽管封面上的宇宙战士们看似正在观看平板显示器，但鲍勃·奥尔森的故事表明，他们实际上在看一个三维电视显像管的图像

即时显示存储图像（或视频）的功能，数据传输方面的便利性，巨大的存储容量，以及有上述功能的相机与其他设备（比如手机或电脑）的结合，这些已然超乎通俗科幻杂志的预期。不过，还有一个特例。如图17–3所示，早在1964年，漫画家切斯特·古德就已经想象出一种可以佩戴在手腕上，并具有无线可视双向通信功能的小型装置。可以进行视频传输的腕式电话如今已然成真，量子力学再次使科幻变成了现实。接下来，我们只需要弄明白怎样建造利用磁性飞行的私人“垃圾桶”（第4章的图4–1）就行了！



图17–3 崔西正在使用一个具有视频功能的双向通信腕式电话。这个小玩意儿于1964年出现在漫画中，比它在现实生活中的出现时间早了40年

[1] 场效应晶体管的学术名称为“金属氧化物半导体场效应晶体管”，英文缩写为MOSFET。

[2] 基于技术原因，磁盘驱动器上实际的“位”包含若干个磁畴，排成不同的序列来代表“1”和“0”，但为了实现本书的写作目的，我们可以将这种情况简化成表示“1”或“0”的单个磁畴。

第18章
自旋电力学和硬盘驱动器

在探索原子内部世界时，物理学家们取得的最惊人的发现之一就是电子，它是亚原子粒子中携带负电荷的基本单位，也是一个小磁体，如第4章图4–3所示。这种内部磁场与一种被称为“自旋”的性质有关，不过，自旋这一术语的使用并不准确。因为内部磁场确实与内禀角动量有关，但它不是由电子的陀螺式旋转引起的。尽管如此，物理学家们在谈及电子（质子或中子）的内部磁场时，不可避免地会提及粒子的自旋。

晶体管通过在导电材料顶部的绝缘板上施加电压，来调节通过半导体的电流。在这种情况下，通过半导体的电流是由带负电荷的电子构成的。在迄今为止的大多数电子设备中，电子的内部磁场都被忽略了。正如你预想的那样，以电子自旋为理论基础研制而成的电子设备，考虑到了电子的内部磁场。这一研究领域被称为“自旋电子学”或“磁电子学”。在这类电子设备中，电子的磁场是被探测和操控的信号的重要组成部分。计算机硬盘就是自旋电子学的一种应用形式，尽管下一代计算机可能会使硬盘显得多余。

如第15章所述，DVD以“1”和“0”的二进制编码信息，分别对应碟片上平滑或有凹坑的区域。从光盘表面的平滑区域反射回来的激光，将会顺利到达光传感器；而如果激光击中了光盘表面的凹坑，则会发生漫反射，反射光不会到达传感器。类似地，计算机里的硬盘驱动器是一种磁性材料，存在以特定模式磁化的区域，这个模式的最小单元被称为“位”。驱动器将信息以1和0的形式存储为磁化区域，当北极指向一个方向时代表“1”，指向另一个方向时代表“0”。在不同区域上方移动磁体可以将数据写入相应区域的每个“位”（在当前硬盘驱动器中），每个区域中内部磁场的方向与外部磁场的方向相同。想要形成相反的磁化样式，需要使用相反方向的磁场。使用去极化磁场，则可以清除这些“位”。为了读取硬盘上存储的“1”和“0”形式的信息，硬盘驱动器用“巨磁电阻”或“磁性隧道结”等装置作为探测器。

所有的固体内部都有可以安置电子的被允许的量子能量带，将能量

带分开的能量间隔里不允许出现电子。绝缘体与金属的不同之处在于，对于绝缘体（或者半导体）而言，较低能量带（乐池）被电子填满，每一个可能的能量带都被一个电子占据。相对而言，在金属中，能量较低的乐池只被填充了1/2，如第14章图14–1（b）所示。如果对金属施加一个电压，电子就会加速运动，动能增加。回想一下，我们关于水管与金属线的类比：电压好比水压，电流就如同通过水管的水流。由于金属中能量较低的乐池中总有一些空穴，乐池中的电子总能跃迁至更高能量态，因而材料能够导电。

在电压一定的情况下，金属导体中电流强度的决定因素是什么呢？通常，电子可以利用金属导线中的原子做自由移动——只要原子处于均匀排列的晶体结构中，它们就不会阻碍电流的传输。这好比一个人在城市的人行道上奔跑，只要混凝土路面平坦均匀，就不会被绊倒。但如果人行道上有坑洞或者凸起的树根，跑步的人就很可能被绊倒。现实中使用的任何金属导线都存在缺陷，比如晶体瑕疵，以及在制造过程中不可避免地掺入的固体杂质。被电压加速的电子会在缺陷处发生散射，并将一些动能转移给这些缺陷处的原子。

这种散射有时是有益的，比如在白炽灯或是烤面包机中，强大的电流被迫通过狭窄的细金属丝，加速移动的电子把它们的大量能量转移给金属导线的原子，使得这些原子在它们通常的位置附近剧烈地振动。这种振动使金属丝的温度升高，发出赤热的光（比如烤面包机的线圈），当电流更大而金属丝更细时，这种振动将使所有电子都受激跃迁至更高能量态，金属丝发出所有频率的光，这些光被人眼识别为白光（比如灯泡的灯丝）。有时，电子与金属导线中的原子发生碰撞而损失能量又是一件坏事，比如在电力传输的电缆中。为了弥补这种能量损耗，输电线路的电压必须非常高，因此需要沿输电线路设置变电所和变压器。

计算机硬盘驱动器用有磁性的原子来散射电子，识别磁化“位”的不同磁场。一层薄的非磁性金属像三明治中的火腿片一样，被夹在两层磁性金属之间。在没有外部磁场的情况下，一片磁性“面包”被永久地极化了，其磁场指向层状结构的一个方向，另一片“面包”则在另一个方向上被极化（被非磁性中间层分隔开的两个磁性层之间的量子力学耦合属性，使这种结构处于低能量态）。

想象一下，一股电子流垂直进入这个“三明治”的顶部，穿过一片磁性“面包”，再穿过由非磁性金属做成的“火腿”夹层，最后穿过另一片磁性“面包”，如图18–1所示。当电子流刚进入第一个磁性层时，电子尚未

被极化，它们的内磁场可能指向一个方向（自旋“向上”），也可能指向另一个方向（自旋“向下”）。第一个磁性层极化了这些电子，所以那些移动到非磁性夹层的电子，其内部磁场方向与第一个磁性层的磁场方向相同。当它们到达第二个磁性层时，这一层通常具有与第一个磁性层方向相反的磁场，因此大多数被第一层极化了的电子都被反射回去，仅有极少量电流通过第二个磁性层并离开“三明治”。如果一个给定的电压只产生了极少量电流，我们就称该器件对于垂直穿过“三明治”的电流具有很大的电阻。

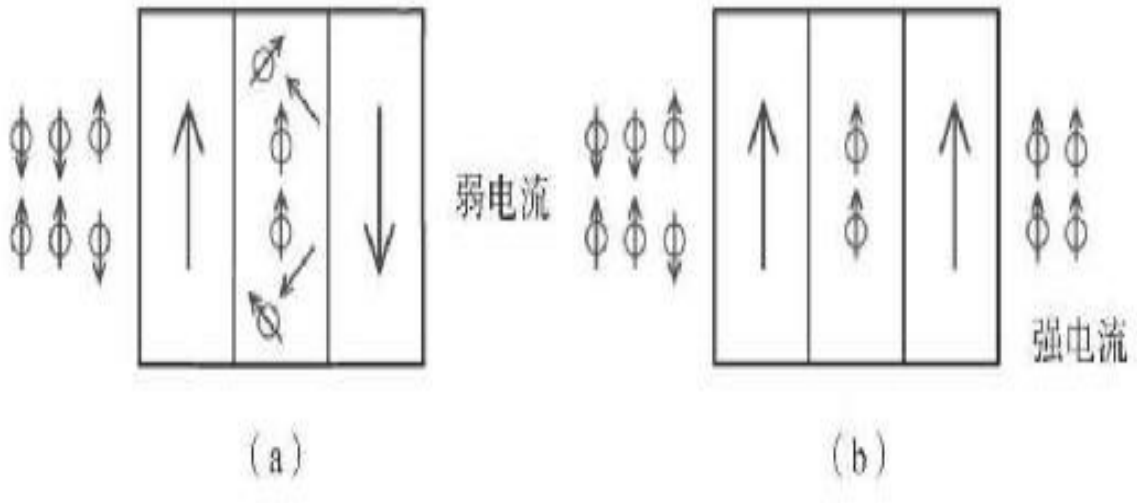


图18–1 计算机硬盘驱动器中通过电流测定磁场的器件结构示意图。一束电流既带有负电荷，又有因自旋而产生的内部磁场。电子流进入装置后被第一个磁性层极化。在图a中，第二个磁性层与第一个磁性层的磁场方向相反，因此被第一层极化的电子被第二层排斥，导致电流变得很小。在第二种情况下，第二个磁性层与第一个磁性层的磁场方向相同，因而被第一层极化的电子能轻易地通过第二层。所以，第二种情况（b）表现出对电流的低电阻，而第一种情况（a）则代表一个高电阻状态

现在，这个结构被放置在一个外部磁场中，比如由计算机硬盘中磁化的比特所产生的外部磁场。这个外部磁场迫使“三明治”中的两个磁性层指向相同的方向［图18–1（b）］。现在，当一束电流通过这个结构时，第一层如上文所述极化了电子的内部磁场，与第一层磁场方向相同的第二层可以让电子流轻松通过，因此将会有较大的电流通过这个器件。外部磁场可以引起电阻的巨大变化，变化幅度高达80%以上（严格说来，它们在技术上被称为“巨磁电阻效应装置”），这意味着对很小的磁场它们也非常敏感。因此，硬盘的磁化比特可以变得更小，而且仍然能够有效地读取“1”和“0”的序列。更小的比特意味着可以在一个磁盘区域写入更多的信息，自引入自旋电子学装置后，计算机硬盘驱动器的存

储能力得到了显著提升。

第一代苹果数字多媒体播放器能够将大量的数据文件存储在一个小型磁光盘上，也正是因为用于读取信息的传感器是利用巨磁电阻效应制造出来的。将更小的磁化“位”以更高的密度存储，是促进硬盘的磁传感器向前发展的一个驱动因素。磁传感器也可以利用另一种量子力学现象——隧穿效应来检测“位”的磁场。这些传感器具有与图18–1中的器件基本相同的结构，唯一的区别在于，两片磁性“面包”中间放置的不是一层非磁性金属，而是一个薄绝缘体。这样一来，电流只能通过隧穿效应穿过装置，而且这一过程的发生概率对交界面每一边的“磁化”情况非常敏感。这些器件中甚至配置了更加灵敏的探针，可以探测非常小的磁场，目前已被应用于商业化的计算机硬盘驱动器。每当我们访问计算机中的信息时，我们都是在现实生活中利用量子力学的隧穿效应。

巨磁电阻效应背后的基本使命是，在未来的自旋电子学装置中实现新的应用。1988年，阿尔贝·费尔和彼得·格伦贝格分别在法国和德国独立发现了“巨磁电阻效应”，他们因此共同获得2007年的诺贝尔物理学奖。1997年，基于巨磁电阻效应的硬盘问世。实际上，依据量子力学原理设计制造的装置能够快速进入消费品领域，并非稀有之事。比如，1948年，贝尔实验室发明了晶体管；到1954年，人们已经可以买到第一代（昂贵的）晶体管收音机了。

第19章
X射线视力和核磁共振成像

1963年，在罗杰·科曼执导的科幻题材影片《X：有透视眼的男人》中，詹姆斯·泽维尔医生在寻找改善病人护理方式的过程中，研制出一种类似眼药水的血清，这种血清能让人透视固体物质。为了获得合理、可靠的实验结果，他舍弃了动物实验，在他自己身上进行测试，并因此获得了透视人体能力。尽管这项研究取得了成功，他的资助机构却对他宣称的“X射线视力”提出了质疑，并终止了对他的资助。这对任何科学家而言都无异于致命一击。不过，这种透视人体的能力，成功地拯救了一个孩子的生命，因为他发现这名小女孩即将接受的手术是不必要且无效的。不幸的是，泽维尔医生的X射线视力变得越发强大，以致闭上眼睛或是佩戴墨镜都不能令他获得喘息之机。《圣经》中所言“如果你的一只眼睛使你犯罪……”是这部影片结局的关键所在，由此可知，善良的医生最终未得善报。

幸运的是，我们可以安全地透视人体内部，检查他或她体内的器官，辨识健康组织和肿瘤，而不必承受像泽维尔医生那样的灾难性后果。我现在提及的这种设备已在大多数医院和诊所普及，它就是核磁共振成像（简称MRI）。这种医疗手段能够生成精细的高分辨率人体内部图像，生动地诠释了我们如何在20世纪二三十年代的科学家们对于主宰原子和光的运行规律的强烈好奇心的驱使下，对事物的量子本质有了深入理解，以及如何促成了50年前的未来学家预测不到的技术大发展。

我们在判断基本亚原子粒子会遵循哪种形式的统计规律（是费米—狄拉克统计，还是玻色—爱因斯坦统计）时，利用了它们的内禀角动量。尽管在描述二极管和晶体管的物理学原理时，我们并没有直接引入自旋的概念，但它对于我们理解固态金属和固态绝缘体的本质是非常重要的。斯特恩和格拉赫最早运用与自旋相伴而生的内部磁场，测量到亚原子粒子的自旋；远程探测由原子核中的质子自旋产生的磁场，则使核磁成像得以实现。

人体的主要成分是水，水分子是一个氧原子和两个氢原子通过共价

键结合而成。每个氢原子核中都含有一个质子，该质子的内禀动量值为±ħ/2，而且它有一个小的内部磁场，有南北两极。当我们将水分子置于外部磁场中时，氢原子中质子的磁场方向既可与外部磁场相同（当外部磁场的北极向上时，它的北极也向上），也可与外部磁场相反（外部磁场的北极向下时，它的北极向上）。原子核中的质子拥有一系列被允许的量子能级，恰如电子有它可能的能量态。如果质子的磁场与外部磁场方向相同，它就会处于一个较低能量态。如果质子的磁场方向与外部磁场相反，它就会拥有较高的能量。图19–1表明，将氢原子放在强磁场的两极之间，被单个质子占据的能级将会分成两个差别很大的能量值：当质子的磁场方向与外部磁场相同时，质子的能量将比没有外部磁场时更低；相应地，如果质子的磁场方向与外部磁场相反，质子的能量将比没有外部磁场时更高。

假设质子的磁场与外部磁场方向相同，处于较低能量态［图19–1（b）］。如果我们以光子的方式提供能量，就可以使质子跃迁至较高能量态，即质子的磁场方向与外部磁场方向相反的状态。这种共振吸收产生的光谱与一个原子中电子可能的能级产生的线性光谱非常相似。光子为质子的内部磁场的反转提供了能量，比如从向上变为向下。这就如同我有一个顺时针旋转的陀螺，我可以利用适当的能量脉冲来使它变成逆时针旋转。

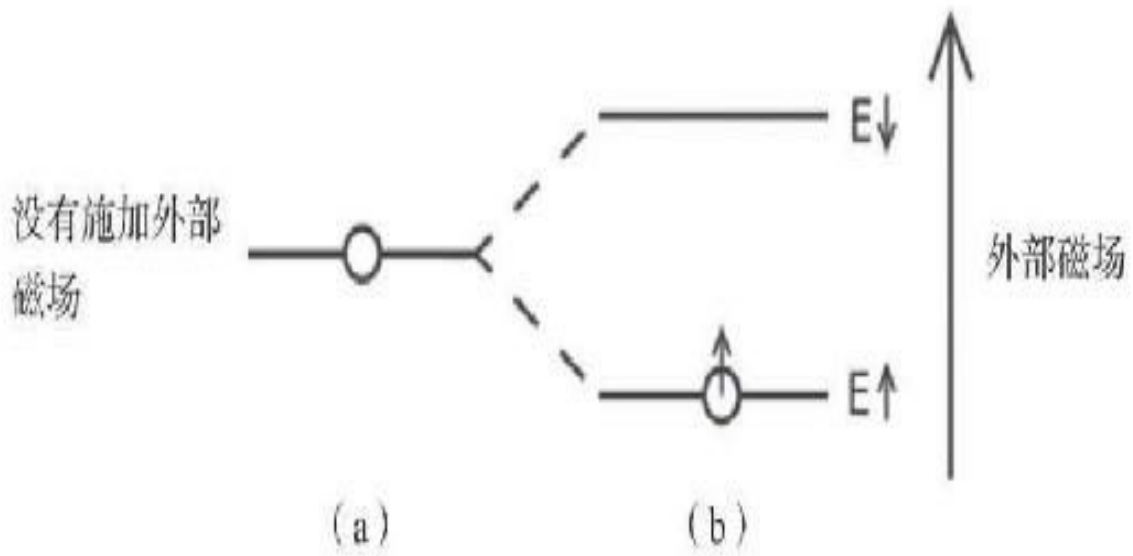


图19–1 没有外部磁场（图a）与有外部磁场（图b）时氢原子核中单个质子的能级示意图。在第二种情形中，如果质子的内部磁场方向与外部磁场相同，质子的能量将会降低；如果内部磁场

与外部磁场的方向相反，质子的能量则会升高。图中质子的自旋方向与外部磁场相同，因而处于较低能量态。如果质子的自旋方向与外部磁场相反，则质子会处于较高能量态

外部磁场越强，质子能级的差别程度就越大。也就是说，相比较弱的外部磁场，当质子处于较强的外部磁场中时，需要更多的能量来使质子磁场反转。如果将氢原子置于相当于地球磁场20 000~60 000倍强度的外部磁场[1]中，当质子磁场分别与外部磁场同向和异向时，前一种情况的质子能量是后一种情况的百万分之一。相比之下，水分子中氢原子与氧原子的结合能接近5电子伏特。我们在第2章中曾经提及爱因斯坦的理论，即光子的能量与它的频率成比例（E=h×f）。能够使质子磁场从一个方向反转到另一个方向［如图19–1（b）所示］的光子，处于电磁波谱的无线电波部分。正因为这种形式的电磁辐射能够穿透人体（这就是为什么即便你身处晶体管收音机和天线之间，仍然可以收听广播节目），这一能量范围的电磁波非常适合探测人体中质子的磁场方向。

于是，核磁共振成像的构想开始形成。将人体置于巨大的磁场中，其强度足以使人体内的每个水分子中的质子都产生可在实验中检测到的能量变化。向人体直接发射无线电波，使质子的磁场从一个方向变为另一个方向，如果被吸收的光子越多，水分子的数量就越多。那么，我们如何确定无线电波是否被吸收了呢？高强度地暴露于无线电波，将会使许多质子从低能量态跃迁至较高能级。当射频光被关掉后，氢原子的质子就会回至较低能量态，并发射出光子。在这一过程中，人体将会“在黑暗中发光”，即发射出能够被探测到的射频光，这种光也是共振吸收的标志。由此我们可以测量出在人体内的主要部分，因磁场变化而同向排列的质子数量。[2]

我们是如何获得关于人体横断面的高分辨率图像的呢？通过改变磁场的强度，使磁场在人体左侧时强度变小，而在人体右侧时强度增大，其强度从一侧到另一侧呈线性增加。因为能量差取决于外部磁场的强度，所以它在左侧会比较小，而在右侧则会比较大。因此，能引起质子磁场反转的最小能量，同样是右侧大于左侧。通过改变无线电信号的频率，我们就能分别测量出人体左、中、右部吸收的光子总量。利用围绕在人体周围的圆柱体中的辅助磁体，我们可以得到空间分辨率的质子密度信息。如图19–2所示，核磁共振成像使我们得以探测一组三包巧克力花生酱杯糖果的内部秘密，通过应用高级量子力学，我们可以确认在巧克力涂层之下的确包裹着美味的花生酱。

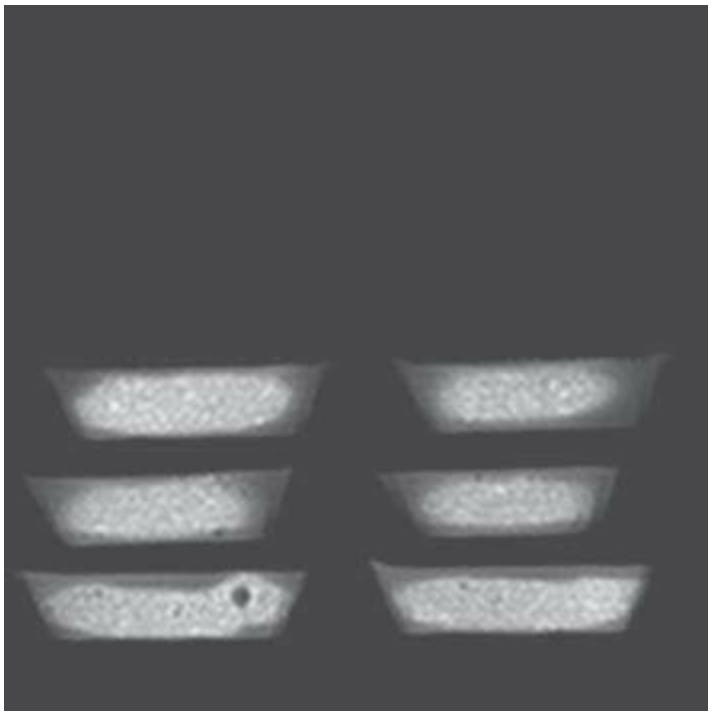


图19–2 三包巧克力花生酱杯糖果的核磁共振成像示意图。它为我们对比巧克力涂层和内部填充物提供了基础，让我们不需要咬破糖果就能证明花生酱的存在（尽管我们愿意为科学研究做出这样的牺牲）。感谢明尼苏达大学的布鲁斯·哈默尔教授提供该图片

但是，人体内的所有细胞都有水分子，因此人体中所有的位点上质子吸收光子的现象都很明显。那么，明暗对比从何而来？来自能显现出核磁共振吸收信号的其他元素，比如钠、磷、碳、氧、氮和钙。这些元素的无线电波共振频率与氢元素不同，因此能够和单个质子的信号区分开。然而，更加强大的技术涉及的并不是磁感应信号本身，而是信号消失和再次出现的方式。

在外部磁场的作用下，水分子中大量氢原子的质子会与外部磁场同向排列，这样一来几乎所有较低能量态都会被占据；而质子的磁场方向与外部磁场方向相反的较高能量态，则较少被占据。[3]在射频光的持续照射下，越来越多的质子跃迁至较高能量态，直到处于较高能量态（磁场向下）的质子数目与处于较低能量态（磁场向上）的质子数目相等。此时，质子所具有的净磁化强度为零。现在停止光照，处于较高能量态的质子将回到较低能量态。这一过程的特征时间对于水分子所处的环境高度敏感，因为质子磁场极化的难易程度取决于质子的磁场与其他原子热振动的相互作用，以及质子的磁场与它周围其他元素的原子磁场的相互作用这两个方面。通过细致的实验，人们发现净磁化强度的恢复对时间的依赖程度，在人体内不同的组织中不尽相同，这就为所得图像中的

明暗对比提供了基础。我们可以根据磁化时间的不同，检查血管堵塞、囊肿或增生，并判断肿瘤是否为良性。通过仔细测量质子恢复到初始磁化强度这一过程需要的时间，能够实现从前需要依靠“X射线眼”才能完成的那种全面彻底的诊断。

当然，应用核磁共振成像来产生三维图像，还需要解决一大堆复杂的技术问题。我并不打算把如何制造成像装置的方法告诉你，而只会解释它背后的基本量子力学原理。毋庸置疑，如果没有应用固态集成电路的高速计算机来记录、存储和分析射频吸收数据，上述一切都将毫无意义。因此，从某种意义上来说，量子力学分别在两个独立的层面上使核磁共振成像成为可能。

如果能用核磁共振成像设备来检查患者的体内器官，从而做出医疗诊断，詹姆斯·泽维尔医生就可以避免悲剧命运。X战警的变种人领袖、世界上最强大的心灵感应者查尔斯·泽维尔教授（二人并无亲属关系），可以通过类似的手段读取人们的思想。这一点核磁共振成像恐怕无法做到，但通过使用功能性核磁共振成像（fMRI），我们能够确定一个人正在使用大脑的哪个区域，并由此推断出他们正在想什么。[4]你体内的所有细胞都有特定的功能，而且需要消耗能量来完成人体指派给它们的任务。神经细胞通过生产和传输电压及离子流来处理信息。当我们吃东西时，我们摄取了原本由植物产生的储存了化学能的分子，植物利用来自太阳光子的能量制造复杂的糖分子。每个细胞内的线粒体利用这些糖来合成三磷腺苷（ATP），并释放一些存储的能量，细胞可以用这些能量来发挥各自不同的功能。产生ATP的化学反应，是由氧气分子（与葡萄糖）的结合和二氧化碳分子的释放引起的。因此，无论何时，假如一个细胞处于活跃的工作状态，特别是持续处于这种状态，为了维持产生ATP所需的足够的氧气分子，流向这个细胞的血液流量就会增加。通过观察血液的流向，我们就能确定哪些细胞最为活跃。

神经元不存储葡萄糖，一旦你开始进行脑力劳动，几秒钟之后，含有活跃神经元的区域的血流量就会增加。大脑约占身体总质量的3%，却消耗了全身总能量的20%。根据你正在进行的任务，去使用大脑的不同区域：坐着读这本书，或者边走边读这本书，或者边洗澡边读这本书。因此，通过检测大脑的哪些区域正在接收更多的含氧血液，而无须直接观察这个人，我们就能弄明白他正在从事什么活动。这种通过血流量变化来确定大脑活动的技术，其真正力量在于区分不同的大脑活动——到底是在进行心算，还是在回忆一个美好的夏天。在这种情况下，

人脸上安逸的微笑并不会透露出他正在进行哪种思考。

当对一个人的大脑进行核磁共振扫描时，空间分辨率可以达到毫米级别，时间分辨率可以达到1~4秒。一方面，当红细胞负载氧气时，它们是反磁性的，这意味着它们的内部磁场方向与外部磁场相反。另一方面，脱氧血红蛋白是顺磁性的，也就是说，它们的内部磁场方向与外部磁场一致，但在没有外部磁场的情况下，不存在净磁化作用。我们可以利用核磁共振成像技术来检测大脑皮层深处的区域，并确定它的血流速度。通过测量饱和的射频辐射停止后净磁化强度对时间的依赖性，我们可以判断出大脑中的哪个区域需要额外的氧气和能量。

阿尔弗雷德·贝斯特在他1953年的小说《被毁灭的人》中，写出了在一个几乎所有人，尤其是警察，都受控于心灵感应的世界里，本·赖克在实施谋杀并掩盖真相的过程中所面临的困难。逻辑思维、洞悉他人默想之事的能力，长久以来一直是科幻小说的一个特征。在西奥多·斯特金的小说《超人类》《宇宙掠夺》，以及哈默尔的电影《魔童村》中，角色之间所展现出来的合作行为，都要以不同人类个体间神经元活动的远程连接能力作为前提。当然，一台功能性核磁共振成像设备要比科幻小说、杂志和漫画书中经常描述的简洁的“心灵感应”的头盔大得多，而且这项技术只能提供关于人脑中血流量的信息。尽管质疑声不断，但有些人相信，终有一日这种技术能够应用于精确的测谎仪，帮我们直接感知一个人的思想和意图。量子力学已经把我们带入了50年前的科幻作者难以想象的世界，现在，它正在把科幻世界中的一些想象变成现实。

[1] 这就是为什么在磁体处于工作状态时，人们不能将不相关的金属物体带进核磁共振成像室。

[2] 实际上，无线电波信号是连续不断地打开和关闭的，但是我们探测到的是当整个体系回到较低能量态时发射出的无线电波。

[3] 因为人体的温度是37摄氏度，即使没有无线电波频率的光，也有足够的热能让质子跃迁至较高能量态。增加外部磁场的强度会增大不同能量态之间的能量差，这样在黑暗中会发现更少的质子。一台核磁共振成像设备的检测灵敏度相当高，它能够探测到在无线电波的作用下跃迁至较高能级的那一小部分质子。

[4] 这项技术还停留在实验阶段，因此你还不用购买“锡箔帽”。



第六部分

开启未来世界

第20章
量子计算机和量子通信

我已经解释了量子力学的基本概念，并讲述了如何利用这些原理来解释单个原子、原子核以及多体系统（比如，金属和半导体）的性质。通过对激光、二极管、晶体管和光盘驱动器所蕴含的物理学原理的说明，我们现在对笔记本电脑、DVD播放器以及移动电话之类的现代科技产品的基本组成部分已经有所了解。在21世纪，这些产品已成为许多人日常生活不可或缺的部分。如果没有量子力学，我们已经习以为常的这些设备和装置，就根本不可能存在。

显然，我们尚未对计算机之类的电子消费产品的运行方式进行细致描述。通过巧妙地组合晶体管和二极管中的电流输入，人们能够构造出不同的体系，使得两束强电流互相抵消并得到一个低强度的电流（两个“1”组合在一起变成一个“0”），或者仍然得到一个高强度的电流（两个“1”组合在一起产生了另一个“1”）。类似地，如果一个电流值较高，而另一个电流值较低，则可以建造一个环形电路，根据需要输出或高或低的电流。由此，人们可以操控计算机中的“1”和“0”。对计算机中应用的布尔数学体系、逻辑门以及数据存储与处理方法进行全面讨论，将会是一件十分吸引人的事情（从我这个书呆子的角度来看是这样的），但这样的讨论并不会涉及新的量子力学原理和应用。

不过，我想顺便说一下，我们在第三部分讨论的物理学现象（放射性）有时会对以第五部分的物理学原理作为基础的装置（固态器件）产生干扰。几乎所有人都经历过在没有特殊原因的情况下，电脑程序毫无反应或完全崩溃的那种沮丧，这时只能通过重新启动操作系统来解决问题。有时候，这类问题的根源在于钍，它是一种放射性元素，是电路封装材料中的污染物（钍元素像铅元素一样常见）。当钍原子核发生衰变时，它会发射出一个阿尔法粒子，高能量的氦原子核会干扰某个晶体管中的电流。所以，量子力学赐予我们的东西，它也会收回去。

移动电话和无线电塔之间发送和接收电磁波信号，并与陆基路由器相连的策略是相当巧妙的。当前的系统使用非常复杂的协议来选定传输

电话信号的最佳区域，或者“单元”，但是移动电话对基本量子力学原理的应用主要表现在晶体管和二极管的应用上。无绳电话的核心是“模—数”转换器，在将语音声波转换为电信号时（就像在传统的固定电话中那样），这个转换器会产生一个可变电压，再通过有效的运算放大器（由一系列的晶体管和电阻器组成），将该可变电压转换成“1”“0”的信号。显然，也必须存在能够进行反向操作的装置，这样“数—模”转换器才能将接收到的信号转化成我们听到的各种声音。

最新一代的移动电话的一个炫酷之处在于它的触摸屏。许多简单的触摸屏（如自助信息显示屏或自动取款机屏幕），可以探测由手指的电导和电容引起的电场变化；而最新的多点式触摸屏则会沿着屏幕的内表面传送发光二极管产生的红外光束。触摸屏会使一些红外光发生散射，通过检测屏幕后方的哪一个光电探测器接收到了散射光，可以判断出你手指的位置。触摸屏背后的量子物理学原理主要应用于红外发光二极管和光电探测器。

因此，我不想钻研各种电子产品的工作机制，这未必能为我们的量子力学讨论锦上添花。我打算用本书最后一部分来描述量子物理学将如何塑造未来，也就是说，我想要讨论的是那些从现在起5年、10年甚至20年后，即将走进人们生活的那些概念和装置。我不会尝试做预测，那只会徒劳无功，我更愿意解释与“量子计算机”和“纳米技术”等相关的量子力学原理。我们已经了解了量子力学的基础知识，接下来我们会讨论一些新奇的高级应用，或许在不久的将来，它们就会出现在你身边的电子消费品店中。

根据第18章的描述，应用了巨磁电阻效应和磁性隧道结的硬盘磁头传感器更加灵敏，这意味着磁头能够探测到更小的磁化“位”，从而使硬盘驱动器的存储容量增加。这些磁性传感器也能加快数据检索速度。传感器内磁层极化和去极化的速度很快，即使硬盘盘片以每分钟10 000转的速度旋转，传感器也可以读取存储在磁化“位”中的信息。新一代“自旋电子半导体”装置甚至可以进一步提高计算机的运行速度，因为它不再需要独立的磁存储介质。

研究人员对利用电子内部磁场来处理信息的半导体晶体管结构产生了极大的研究兴趣。使用磁性金属作为半导体器件上的电极，就有可能将极化的电子注入半导体。通过改变半导体器件中的磁场，能够在不改变电荷载体浓度的情况下控制电流，就像我们在第17章中所讨论的场效应晶体管那样。研究人员的最终目的是研制一种器件，这种器件有用来

代表“1”和“0”的“高—低”电流水平的更灵敏的“开—关”转换器，在两种状态间的转换速度更快，而运行时消耗的能量更少。

最后这一点很重要。计算机中的每一根晶体管在驱动电流从低值到高值再回到低值的过程中，都会产生少量的热（电流通过烤面包机的电阻丝或灯泡灯丝时都会产生热量，同样的物理学原理也适用于半导体晶体管）。数以百万计的晶体管被安放在一个有限空间里，将导致温度明显升高，限制集成电路的工作效率。因此，在大多数计算机机箱内都需要安装多个散热风扇。自旋晶体管的功率更小，可以彼此紧贴放置，使微处理器具备更强大的计算能力。

此外，如同在一个集成电路中那样，既有能力存储磁性信息也能操控“1”和“0”，这表明在单个芯片上整合磁性数据存储功能和计算机的逻辑功能是有可能的。在20世纪50年代晚期，当未知挑战者团队与一台能够进行独立思考的计算机进行对抗时，人们认为这种装置的尺寸必得与一间大房子相当。有了量子力学技术，未来我们甚至可以将自己的“ULTIVAC”放在后裤兜里随身携带。

对计算速度的需求驱使人们对量子力学在计算机中的更加不同寻常的应用产生兴趣，这种计算机通常被称为“量子计算机”。当然，从某种意义上来说，所有的计算机（除了算盘和计算尺）都是量子计算机，因为如果没有关于物质性质的量子力学理论，二极管和晶体管这两种基本的数据处理元件的发明根本无从谈起。

简单来说，相较利用流经半导体的或高或低的电流，或是利用其北极指向一个（或另一个）方向的磁性材料的一个区域来代表“1”或“0”，量子计算机中的原子就是“1”和“0”。有研究指出，量子计算机可以将原子、原子核、离子、光子或电子用作基本计算元件。为简便起见，我将重点讨论电子。电子具有$+\hbar/2$和$-\hbar/2$的内禀角动量，在量子计算机中，它们是代表“1”和“0”的元件。

尽管这种方式有可能最大限度地减小计算机的尺寸，然而仅凭这一点并不足以推动量子计算机的研究。量子计算机在理论上需要使用成对的全同粒子，它们以波函数重叠的方式排布。回想一下我们在第12章中提到的，当两个电子彼此足够接近时，它们的物质波将互相干涉。在这种情况下，我们用一条色带代表双电子波函数，色带的一面是白色的，另一面是黑色的。在图12–2中，色带两端朝外的面都是白色的。但是，我们也能够使色带两端朝外的两面都是黑色的，或者左边是黑色而右边

是白色，反之亦可。为了表示这4种可能性（白、白；黑、黑；黑、白；白、黑），使用传统的计算机元件将需要两个晶体管，而且它们每次只能产生这些状态中的一种，也就是依次产生。

对第12章中的量子色带而言，这4种状态可能同时存在。假设色带处于一个黑暗的房间，并且我们不知道哪一面向外。在这种情况下，所有的4种状态都有可能出现，在我们打开灯并检查色带之前，色带都可以同时代表这4种可能的状态。需要4个独立的传统“位”才能表示的这4种状态，只需要两个“量子比特”或“量子位”就能搞定。尽管在处理多于两个相互纠缠的波函数时，色带的类比不再适用，但类似的论述仍然成立。因此，三个量子位即可代表8个不同的传统状态，10个量子位就可以完成1 024个经典“位”的工作。

这种并行能力意味着量子计算机的计算速度必然比传统计算机快得多。对国家安全、电子商务或仅信用卡在加油站的消费记录等信息进行加密，涉及一些大数的质数因子的知识，这些数字很大，即使最快的传统计算机也不能在合理的时间内计算出它们的质因数。然而，量子计算机可以凭借其同时运行多项任务的能力来改变这种状况。一个小尺寸的量子计算机原型机已经能够成功实现两位数的质因数分解（15=5×3），但是全面运行的量子计算机尚未问世，乐观估计还需要多年时间。然而，这类设备一旦被建造出来，数据安全和密码学领域将会发生巨变，届时要靠我们所有人的力量来保护这项技术不落入坏人之手。别忘了，在影片《变形金刚》（2007年）中，邪恶的霸天虎曾使用量子计算机侵入美国五角大楼的电脑安全系统，仅用10秒钟就破解了最强大的超级计算机花20年才能破解的密码。

现在，如果我说在进行检测之前，两个物质波重叠的电子可以表示所有4种自旋组合，可能像在说谎。你或许会说，任何一对晶体管都可以代表所有4种状态，如果我们没有监测通过它们的电流是高是低。但是，量子自旋的情况与之存在本质区别，这触及了有关测量在量子力学中作用的一些哲学争论的核心。

从这本书的开头到现在，我成功地迷惑了你们，现在是时候说出真相了。量子状态下重叠的电子波函数与涉及晶体管的传统情形之间的差异，以及量子色带可以同时代表全部4个可能结果的原因在于，如果色带始终处于黑暗中，也就是说，在我对其进行检查之前，色带颜色的概念是不明确的。

让我们暂时回到真实的电子世界。我已经详细说明了为什么一个电子只能具有两个可能的内禀角动量值中的一个，即或者顺时针旋转（自旋“向上”），或者逆时针旋转（自旋“向下”）。但是，我们从未问过这样的问题：“向上”或“向下”是相对什么来说的？顺时针或逆时针旋转围绕的是哪个轴？

与内禀角动量相关的是一个具有北极和南极的内部磁场。如果我不对这个磁场进行测量，换句话说，在没有外部磁场的情况下，我就不知道其磁极指向何处。如果我使用外部磁场并测量电子的磁场指向，那么内部磁场或者与外部磁场同向，或者反向（就像我们在第19章中讨论的核磁共振成像那样）。如果我施加的外部磁场的北极指向你所在房间的天花板，这就定义了“上/下”的方向，电子的磁场将指向天花板或者地面。如果外部磁场的方向指向你房间中的某一面墙，这也定义了“上/下”的方向，电子的磁场将会指向该墙壁或其对面的墙壁。如果我施加了一个外部磁场并测量电子的磁场，这定义了理解“顺时针旋转”和“逆时针旋转”的轴。然而，在我付诸行动以前，我只能说电子处于所有这些可能的状态。所以，一个量子系统可以同时代表多个可能的状态。[1]

爱因斯坦对这一情况有所察觉，他在晚年花费了相当多的时间和精力，试图解决它，因为它为信息的超光速传播提供了可能。比如，合理地安放两个电子，使它们的波函数重叠，并可以用一个双粒子波函数来描述，它们的总内禀角动量值为0。一个电子的内禀角动量值等于$+\hbar/2$，另一个电子的内禀角动量值等于$-\hbar/2$。假设我无法分辨这两个电子，但当我测量左边的电子并发现它的内禀角动量值是$+\hbar/2$时，我不仅能够从逻辑上推理出另一个电子的内禀角动量值肯定是$-\hbar/2$（因为我已经知道总内禀角动量值是0），而且我也能推断出第二个电子将绕着哪个轴进行逆时针旋转！测量第一个电子磁场的过程不仅为这个电子选择了一个方向，也为另一个电子选择了方向，因为它们都是包含了系统所有信息的波函数的一部分。

现在，有趣的地方来了。假设我有一条代表两个电子的可以无限延展的色带。我先抓住色带的一端，然后拖着色带的另一端穿过城镇，保持电子间的连接。接下来，我将其中一个电子置于一个外部磁场来测量它的自旋。这样做，我不仅会知道这个电子磁场的指向是与外部磁场相同还是相反，也定义了电子磁场的方向概念，还确定了另一个电子的性质。归根结底，这是因为两个电子被表示为同一个双电子波函数，因此其行为也像一个统一的实体。在这种情况下，纠缠的量子态如同童话故

事中的双胞胎，以特殊的纽带彼此连接，发生在其中一人身上的事情瞬间便会被另一人感知。爱因斯坦表示反对，因为这将使信息从宇宙的一点传输到另一点，而且速度可能比光速还快。借用爱因斯坦那个著名的说法，这种现象代表着“如鬼魅般的远距离作用”，他拒绝接受这样的理论。

这种现象是否确实提供了一种即时信息传输机制？如果是这样，我们如何调和它与狭义相对论之间的矛盾，即任何事物包括信息，都不可能超过光的传播速度？已有不少著作以此为题，它至今仍是物理学家们争论的热点问题。正如大人被孩子问及“来世”之本质时所给出的答复，专家们对此也持有不同的见解。在被观察到的那一刻，量子系统究竟“发生”了什么？这样的问题定会激起你的阅读兴趣。不过，对这些问题的全面探究并不是本书的重点。所以接下来，在对两项内容进行简要论述之后，我将结束相关讨论。

首先，仅当两个电子被描述为单个波函数时，超光速信息传输的问题才能成立。而且，只在我将可以无限延展的色带越拉越远，色带也不会断裂时，才能实现超光速信息传输。正如你所料，色带被拉伸得越远，色带两端之间相互重叠的物质波就越容易受到一些干扰。一旦两端之间的连接被切断，对其中一个电子自旋状况的测量将不会对另一个电子产生任何影响，因为现在它们已成为两条不同的色带。这一过程可以高度概括为：为了使这一过程得以持续，两个电子波函数必须一直保持纠缠状态，任何干扰这一状态（破坏色带）的物质或能量都会导致退相干。实验物理学家一直忙于应对退相干这个巨大的挑战，一台量子计算机能否被研制成功，并发挥其潜能，仍有待考察。

其次，人们在已出版的科普读物中读到的有关“隐形传输技术”的最新实验，往往指的是关于量子态的信息传输，与上文描述的情况类似。研究人员并不是在进行像《星际迷航》中那样将人类进行“瞬间传输”的实验，也不是从宇宙中的某处向另一处发送原子或电子。所以，在未来相当长的一段时间里，你仍然无法摆脱每天的通勤辛苦。

最近的一些实验确实支持了这样一种观点，即关于两个纠缠的量子的信息，比如光子的极化，即使相隔很远也能传播。这是因为，现在的实验技术更加先进，以前只存在于理论上的构想已能被实验证实，比如图20–1中1998年第19期《美国正义联盟》冒险故事的情节。与早期的科幻作品预言科学发展的情况不同，现在，科学正在赋予漫画创作的灵感。



图20–1 在《美国正义联盟》（*Justice League of America Colleagues*）第19期中，原子侠（其真实身份是物理学教授雷·帕尔默）向他的美国正义联盟战友们讲述关于量子纠缠的最新实验，即安东·蔡林格及其同事发表在1998年的《物理评论快报》（*Physical Review Letters*）上的相关研究成果。第二幅图表现的是对于量子力学原理的过度解读，“我们将避开这一陷阱，就像我们避开正义联盟可能遇到的所有其他陷阱那样”

[1] 这类似于第7章中讨论的位置和动量测量的问题，你得到的答案将取决于你提出什么样的问题。

第21章
太阳能电池和纳米技术

正如我在本书的引言中提到的那样，通俗科幻故事的作者们曾经预测，未来人类将会进入一个能源生产与储备的新纪元。而事实上，由于量子力学的出现，我们所经历的大多是信息技术领域的深刻变革。

为什么在喷气飞行背包和飞行汽车问世之前，需要一种新型的能量传送系统？强调一点，我们不会像发现“卡沃尔物质”，或者其他一些具有反重力性质的神奇物质那样，违反任何物理学定律。因此，喷气飞行背包必须提供一个与人体重量相等的向下推力，以便让人离开地面。想象一下，将一个81千克重的人抬升至100米的空中需要多少能量。仅是做到这一点，并且未将喷气飞行背包从一处飞至另一处所需的任何能量考虑在内，就需要消耗80　　000多焦耳的能量，相当于0.5×10^{24}电子伏特。

你应该还记得，在几乎所有化学反应的过程中，都会发生电子伏特数量级的能量转移。因此，将一个人抬升到20层高的建筑物上，大约需要10^{24}个分子的燃料。但实际的能源消耗并不像看起来的那么多，因为体积为20立方厘米的任何固体几乎都含有这一数量级的原子（1立方厘米大约相当于一块方糖的大小）。每加仑[1]燃料约为4 000立方厘米，能够产生超过10^{26}电子伏特的能量。如果真是这样，我们为什么还要开车去上班呢？

问题在于，有起必有落。一旦喷气飞行背包停止供应用以维持我们被抬离地面后的巨大势能的能量，我们就会跌落地面。因此，在空中的每一秒，都需要持续消耗喷气飞行背包中储存的化学能量。燃料耗尽的速率取决于我们获得向上推力的具体原理，大多数供能装置只能使我们的飞行持续一两分钟。我们的确可以驾驶喷气飞行背包去上班，前提是我们的住所与办公室之间仅隔几个街区。

注意，能耗最大的部分就是克服万有引力，将我们抬升到空中需要消耗80 000多焦耳的能量。相比之下，以每小时64千米的速度飞行，只

需要13 000焦耳的动能（忽略为了克服空气阻力必须做的功）。这就是我们尚未拥有飞行汽车的原因。如果你所携带的绝大部分燃料都被用于将你抬离地面，而能将你带往目的地的燃料所剩无几（在某种程度上，这已经违背了我们使用汽车的初衷，不管它能不能飞），那么你的燃油里程将根本不存在。

燃料的能量含量已经有所改进，喷气飞行背包的原型机能使参与测试的飞行员在空中悬停一分钟以上，但归根结底，飞行时间越长，需要的燃料就越多（喷气飞行背包也越重）。当然，还有其他方法可以替代化学燃料反应以获取推力。我们可以使用核反应堆，正如我们在第三部分看到的那样，核反应堆中每个原子产生的能量约为化学燃烧反应的100万倍，但是让你身后背着一座核电站的想法并不令人神往（除非你是超能敢死队队员）。

在2008年的电影《钢铁侠》（*Iron Man*）中，托尼·史塔克设计了一身包含大量高科技装置的盔甲，这些装置几乎都是基于物理学上可行的方式设计的，只有一个例外——“心脏反应堆”。它为史塔克的高科技战衣提供动力，它的外观为一个冰球大小的圆柱体，它能够产生“3 000兆瓦的动力”，足以使一个喷气飞行背包悬浮在空中并飞行数个小时。但遗憾的是，我们无法制造出这种紧凑、轻盈、含能量高的电池。

如果真的发生了通俗科幻杂志所预测的能源革命，我们能驾驶由某种外来能源驱动的喷气飞行背包去上班，或者去街角的杂货店购物，那么我们对传统化石燃料的需求将会显著减少，地缘政治关系也将发生戏剧性变化。潜在的喷气飞行背包技术有一个重要用处，它不关乎交通运输，而关乎“止渴”，能带来立竿见影的有益效果。

根据世界卫生组织的统计，截至2009年，全球40%的人口缺少可饮用的淡水。将海水转化成淡水的最直接方法就是使海水沸腾，将液态水转化为气态，而将水中的盐分留在残余物中。这正是海洋蒸发过程中发生的情况，也是雨水不含盐的原因。使用太阳能电池来提供使大量海水沸腾所需的巨大能量并非易事，但如果有一台能够使喷气飞行背包畅行无忧的供能装置，超过20亿人的生活将发生深刻的改变，即使每个人仍然要借助地面交通工具出行。

量子力学能否为能量生产提供助力，使20世纪30年代的喷气飞行背包梦想变成现实？这是有可能的。2005年，全球的能源消耗量约为16万亿瓦特，未来这一数值肯定会继续增长。不少专家预测，未来20年内，

能源需求量将增长50%。一个可以满足这一额外需求的策略是，在未来的20年中，以每天一座的速度建造能够提供10亿瓦特能量的新发电站。这似乎不太可能。

另一个策略是，利用在很大程度上为世界各国所忽视的巨大能量——太阳能。地球表面接收了10^{17}瓦特的能量，是全球能源消耗量的6000多倍，足以满足未来数十年的全球能量需求。根据第16章的论述，简单的二极管可以起到太阳能电池的作用，这种二极管由一种加入了能提供多余电子的杂质的半导体，和一种加入了能提供多余空穴的杂质的半导体结合而成。当二极管吸收一个光子时，一个电子就会跃迁至较高能带，在充满电子的较低能带留下一个可以移动的空穴。这些载流子受到来自PN结处强大内电场的作用，仅用太阳光照射，就可以向装置外输出电流。提高这些装置的光电转化率的工作正在进行，为了最大限度地增加一定强度的太阳光照射所产生的电流。然而，即便现有太阳能电池的光电转化率只有10%（也就是说，照射在太阳能电池表面的90%的能量，都无法转化为电能），只需一个长和宽各为160千米的太阳能电池组，就能满足全美的电力需求。

问题是，我们手中并没有足够的太阳能电池来覆盖2.58万平方千米的电网，而且按照当前的产能，建造这些装置需要花很多年的时间。此外，即使有足够的太阳能电池，我们还需要将电能从光照充足的区域输送至人口稠密而光线暗淡的大城市。在这里，量子力学可以再次发挥作用。

在第13章中我们看到，在低温条件下，当某些金属中的电子由于晶格中阳离子的极化作用而形成电子对时，这些金属会变成超导体。电子的内禀角动量值为$\hbar/2$，符合费米—狄拉克统计原则，即没有两个电子可以处于相同的量子态。当金属中的电子在低温条件下结成电子对时，它们就形成了总内禀角动量值为零的复合载流子。这些成对的电子符合玻色—爱因斯坦统计原则，而且随着温度的降低，它们会凝聚成一个较低能量态。如果固体的温度足够低，中等强度的电流将没有足够的能量使电子离开这个最低能量态，因此这些固体可以在没有电阻的情况下负载电流。超导电性这一现象从本质上讲是一种量子力学效应，而且只有在低于零下248摄氏度的极端低温条件下，才能在金属中观测到。

至少在1986年之前是这样的。因为在1986年，来自瑞士苏黎世IBM（美国国际商用机器公司）研究实验室的两位科学家约翰内斯·柏诺兹与卡尔·米勒发表了研究报告，宣称在零下237摄氏度时，一种陶瓷

变成了超导体。这一温度仍然很低，但在当时它创下了能够观察到超导电性的最高温度纪录。自从科学界了解到这类包含铜、氧和稀土金属的材料可以表现出超导电性，一场竞争就此展开：世界各地的科学实验室尝试着将大量元素进行多种多样的组合。一年后，一群来自休斯敦大学和亚拉巴马大学的科学家发现了一种包含钇、钡、铜和氧的复合物，这种复合物在零下182摄氏度时就会完全变成超导体。许多皮肤病诊室中用来治疗疣的液氮，温度更低一些，为零下194摄氏度。这些材料被称为“高温超导体”，使用在许多免预约诊所中就能找到的制冷剂，就可以将它们转变成零电阻的状态。这些材料为什么能够在相对“温暖舒适”的温度下变为超导体，目前尚无明确解释，相关研究仍然是固体物理学领域的一个令人兴奋的分支。用来解释这一效应的最有前途的模型援引了新的机理，研究者们用量子力学的方法推导出这些固体中的电子的凝聚态。

高温超导体将成为向需要电能的人口稠密地区，远程输送由太阳能电池组或风力发电机组产出电能的理想材料。尽管需要保持低温状态，液氮却很容易生产，为了满足实验需要而购买的液氮比牛奶的价格还便宜（当然也比瓶装水便宜）。遗憾的是，到目前为止，一些具有挑战性的材料科学问题限制了这些陶瓷材料能够负载的电流量，如果将它们用于输电线路，它们将不再是超导体，而且有比普通金属更高的电阻。

如果这些问题得以解决，那么除了传输电力，这些发明同样有助于交通运输领域的变革。如同我们在第13章中讨论的，除了可以在无电阻状态下传输电流，超导体也是完美的抗磁性物质，完全排斥任何外部磁场。这种材料会产生屏蔽电流来抵消试图穿透超导体的外部磁场，而且，因为超导体中的电流不受电阻影响，所以屏蔽电流能够持续流动。如果能够制造出足以负载对抗较大磁场的高强度电流的高温超导体，高速磁悬浮列车就有可能成为现实，其成本主要来自相对便宜并安全的液氮冷却剂等。

在发表了陶瓷的高温超导电性这一发现的一年之后，柏诺兹和米勒获得了诺贝尔物理学奖。然而，20多年后，火车仍然没有悬浮行驶在由新型铜氧化物制成的铁轨上。与巨磁电阻效应和固态晶体管不同（这二者都只用了不到10年的时间便从实验室走入了现实世界，相比之下，由高温超导体所带来的巨大改变，尚未真正实现。尽管如此，关于这些材料的研究仍在进行，也许在未来的某一天，无论是空中架设的输电线，还是地面铺就的铁轨，都会用到高温超导体。

在不久的将来，基于量子力学的装置可以利用的另一种尚未开发的能源是废弃物。在这里，我指的不是垃圾，而是废热——任何燃烧过程产生的副产品。

为什么汽车引擎盖下会产生废热？因为热和功都是能量的表现形式。在物理学上，功涉及施加在物体上的力以及物体在力的方向上通过的距离。比如在汽车引擎中，快速移动的气体分子撞击活塞，由此产生的力可以将活塞抬起。物理学上的热，指的是原子平均能量不同的两个系统之间的能量传递。让一个原子振动剧烈的固体与另一个原子振动缓慢的固体互相接触，原子间的碰撞和相互作用使得振动剧烈的原子慢下来，而振动缓慢的原子快起来。我们可以说，第一个固体的初始温度较高，而第二个固体的初始温度较低；通过碰撞，它们交换了热量，直到最终达到同一温度。我们可以对某一体系做功，并将所有的功转化成热。但是，热力学第二定律告诉我们，我们永远也不可能将一定量的热完全转化为功。

为什么？因为原子碰撞具有随机性。考虑一下汽车活塞内部的分子，在点火火花和压缩冲程导致汽油和氧气分子发生燃烧反应之前，它们向着各个方向快速移动并相互碰撞，还与气缸的内壁、顶部和底部发生碰撞，气缸的所有内表面受到的压力都是一样的。随着燃烧反应的开始，汽油和氧气的混合物经历了一个爆炸式的化学反应，产生其他种类的化学物质并释放热量；也就是说，反应产物比爆炸前的反应物具有更大的动能。气体分子与活塞发生碰撞时，这一更大的动能形成了对活塞顶部更大的推力，使活塞上升，并通过由轴和齿轮组成的精巧系统，将这种上升力转变为施加在轮胎上的旋转力。然而，在化学物质发生爆炸后，尽管只有施加在活塞上的作用力转化为有用功，但气缸的所有内表面都受到了更大的压力。气体分子会使气缸壁和活塞升温，从利用汽油驱动汽车的角度看，这些热都被“浪费”了。

当热量被转化为功，由热力学第二定律可以确定废热的量。对汽车而言，即使在最好的情况下，也仅有1/3的化学能可以转化成驱动汽车的能量，而且很少有汽车引擎能够达到这样的效率。引擎盖下面有许多能量未被有效地利用。类似地，发电站的冷却塔将大量的热释放到大气中。据估计，每年有超过一万亿瓦特的能量因为没有被转化为功，而以废热的形式被浪费掉。在未来，利用被称为“热电材料”的固态装置，这种情况或将发生改变。这些体系能将温差转变为电压，可被看作将光转化成电压的太阳能电池（也被称为“光伏”装置）的“废热”版本。

热电材料的物理学原理与不含水银的固态温度计相同。请思考让两种不同的金属互相接触的情形，我们讨论过，金属可被视为只有1/2的可用座位被占据的礼堂，因此，如果金属中的电子从光、外电压或热量中吸收能量，就会有许多的空穴可供电子占据。不同的金属中有不同数量的电子位于部分座位被占据的较低能带。请想象两个礼堂，每个礼堂中就座的人数不一样，就像某些酒店的宴会厅一样，它们被一个可移动的墙壁隔开。其中一个礼堂内有200人，而另一个礼堂内只有100人。现在，移开墙壁，将它们合并为一个大礼堂。每个人都想坐在前排座位，因此会有50个人从第一个礼堂移至另一个礼堂的空座位，直到每个礼堂都有150人就座。但在墙壁被移开前，两块金属都是电中性的。在小礼堂中增加50个电子会使净电荷为负，而从大礼堂中移走50个电子会产生净正电荷。因此，只要两块金属进行电接触，在它们交界处就会产生电压。如果两边成排座椅的排布方式差异显著，随着温度升高，每一边的电子数都将改变，从而产生随温度而变化的电压。这样一来，知道了与两种金属交界处测得的电压值相对应的温度，就可以利用这个被称为“热电偶”的简单器件测量环境温度。

热电元件使用名义上的匀质材料（通常是某种半导体）获得和热电偶相似的效果。如果固体的一端比另一端热，那么与温度较低的一端相比，温度较高的一端将会有更多的电子从完全被填充的较低能带跃迁至基本空置的较高能带。对于一些材料而言，几乎被填满的能量较低的乐池中的空穴的移动速度，要比能量较高的包厢中的电子的移动速度慢得多，因此我们可以将注意力集中在电子上。在材料较热一端受激跃迁的电子会扩散到较冷的一端，堆积于此并产生电压，以阻止其余电子穿过半导体，这一电压可以像电池一样被用于驱动任何设备。为了制作高效的热电装置，人们需要这样一种材料，它是电的良导体（使电子可以轻而易举地穿过固体），但同时又是热的不良导体（使温差贯穿整个固体）。许多实验室正在研发适用于热电装置的材料。举例来说，具有商业可行性的热电器件可以应用于混合动力汽车，吸收引擎产生的废热，将废热转化成电压给电池充电。在未来世界中，通过我们对量子力学的理解，固态热电设备将被发明出来，尽管它们无法使汽车飞行，但却可以让汽车行驶得更远。

从原子的随机振动中获取电能的另一种方式是利用“纳米发动机”。这些发动机由直径仅为几纳米的特殊电线组成，电线的成分是氧化锌或被称为“压电材料”的其他物质。对这些物质而言，机械应力会使晶体结构发生微小变化，并产生一个小电压。由这些压电材料制成的纳米线的

排布已经取得了进展，任何移动或振动都会导致纳米线的收缩和弯曲，进而产生为另一个纳米机器或纳米器件提供能量的电压。

最终，我们会问，量子力学能否帮助我们研制出驱动个人喷气飞行背包的小型、轻量化电池？答案可能取决于发展中的“纳米技术”。“纳”（nano）源于希腊语，有“矮小”之意，1纳米是10亿分之一米，大约相当于三个原子直径的长度。我们先看看普通电池是如何工作的，再讨论为什么纳米工程或将促使更强大的能量存储装置的诞生。

在汽车引擎中，来自火花塞的电能会引发汽油和氧气的燃烧化学反应。电池则是利用化学反应来产生电压。

在电解反应中，电流流经反应物（通常是液态形式）并提供能量，引发化学反应。比如，产生氢气的一种方法（不涉及化石燃料的燃烧）是分解水分子。为了达到目的，我们将两个电极插入一杯水，并将电极与外电源相连接，使电流通过液体。一个电极试图把电子从水中拉出来（纯水是很好的绝缘体），另一个电极则试图将电子推进水中。输入的电能克服了使水分子中的原子聚集在一起的结合能，带正电荷的氢离子（H^+）被试图释放电子的电极吸引，而带负电荷的氢氧根（OH^-）则向试图接收电子的电极移动。最终结果是，水分子被分解成气态氢和氧分子。

电池实际上利用了电解反应的逆过程，不同的金属被用作电极（比如镍和镉）。之所以选择它们，是因为它们可以和特定的液体发生化学反应，留下带正电或带负电的反应物。在金属电极接触化学液体的地方，金属电极会失去或者得到电荷，这取决于所进行的化学反应。两个电极之间会设置一处屏障，使液体无法从一个电极移动到另一个电极。于是，负电荷（电子）在一个电极上堆积起来，而另一个电极上缺失的电子越来越多。

一个电极上的过量电子间相互排斥，存在离开电极的趋势。这些电子可移至带正电荷的电极的唯一方法，就是用一根电线连接电池的两端。这样一来，存储的电荷就能流过电路并为设备的运行提供能量。在碱性电池中，一旦液体中的化学反应物消耗殆尽，装置就失去了为电极充电的能力。当电池放电时，电流流出，“金属—液体”化学反应向着一个进行；而从相反方向将电流输入电池时，电池将恢复到它的初始状态。这种电池被称为“充电电池”，近年来，这种电池在能量储存能力的提升方面表现得最突出。

由于电子消费品对外部电源的需求，充电电池的能量含量和存储容量都有了很大的提升。在电池中，电极应该能较容易地释放或接收电子。仔细观察元素周期表我们就会发现，在电子结构上类似于钠原子和氢原子的锂原子，有一个未配对电子［如图12–3（c）所示］且很容易逸出，从而留下带正电的锂离子。利用这些锂离子的电池，含有一个锂钴氧化物电极，另一个电极则通常由碳组成，锂电池可以产生约为碱性电池两倍的开路电压。锂电池比那些将重金属用作电极的电池要轻便，而且一个重量为226克的锂电池能够产生超过10万焦耳的能量，相比之下，一个重量相当的镍金属氢化物电池仅能产生5万焦耳的能量，而一个226克的铅酸电池仅能产生33　000焦耳的能量。这些质量小、能量容量高、可充电的锂电池因此成为手机、苹果多媒体播放器和便携式笔记本电脑的理想能量来源。

电池中所有的电化学反应，在电解液中的化学物质与电极表面发生物理接触时就开始了，因此电极的表面积越大，可供进行化学反应的地方就越多。增加表面积的方法之一是使电极尺寸变大，但这与我们对电子设备的小型、轻量化需求相悖。增加电池容量的另一种方法是研制不同的电极。事实上，纳米结构的电极在原子尺度上存在褶皱，显著地增加了可用于电化学反应的表面积，而电极质量却不会增加。最近对由硅纳米线制成的电极的研究发现，它们可以存储10倍于碳电极的锂离子而不会明显增大。尽管无法与钢铁侠的心脏反应器相提并论，但在纳米尺度上研制和操控材料的能力，正在使电池具有科幻小说描述的特性。

在衣物清洁方面，纳米技术也可以为我们提供帮助。用纳米纤维制成的纺织品具有抗皱、防染色的性能。除了能给我们更纯洁的白色，纳米技术也能帮助我们保持身体健康。一个5纳米的晶体仅含有3　300个原子，但这样的纳米颗粒是高度精确的药物传输系统的极佳平台，比如绕过正常细胞，直接对癌细胞使用化疗药物。

我们对纳米材料的利用才刚刚起步。在元素周期表中有92种稳定元素，它们的电子排布的具体细节决定了它们的物理学、光学和化学性质。晶体硅的最低能量态和最高能量态的能量差约为1电子伏特，要想获得具有不同能量差的半导体，就必须选择一种不同的化学元素。如果晶体硅中的能量差可以随意调节，而不与其他可能对材料的性能产生有害影响的化学物质形成合金，许多技术应用都将成为可能，或得到改善。近期的研究表明，我们确实能使硅变为“可调谐”半导体，只要我们能把它变小。

在礼堂类比中，充满电子的乐池与空的包厢之间的能量差是1电子伏特（光谱的红外光部分）、2电子伏特（红光）还是10电子伏特（紫外光），取决于构成固体的元素，以及每个原子与相邻原子的量子力学波函数重叠和相互作用的具体细节。在可直接用肉眼或光学显微镜观察的较大晶体中，离开固体一端的电子会受到许多散射和碰撞，因此，晶体边界对电子波函数产生的任何影响在电子到达另一端的时候都会消失。如果固体的尺寸在电子的物质波波长范围内，当电子位于小晶体中时，固体的尺寸对它们实际上是有影响的。装着这些电子的“盒子”（晶体）越小，它们在位置上的不确定性就越小，而它们在动量上的不确定性就越大。因此，我们可以通过控制固体的体积来确定纳米晶体的能量差，将固态元件的设计者们从“化学的专制”中解放出来。

20世纪二三十年代，由几位物理学家发现的掌控原子与光以及原子之间的相互作用的规律，不断塑造和改变着我们赖以生存的世界。

[1] 1加仑≈3.79升。——编者注

后记

向科学致敬！

清晨每当我望向窗外，发现在遥远的天际线上根本找不到齐柏林飞艇的影子时，我便会知道世界并未变成通俗科幻杂志预测的样子。然而，在我起床之前，可编程固态定时器已启动咖啡机，为我煮制早餐咖啡。所以，倘若没有量子力学带给世界的诸多好处，我简直不知道该如何叫醒自己。

正如引言中所说，我们正身处一个里程碑式的发展时代，生活中充满各种各样的技术创新。50年前，通俗科幻杂志和漫画的作者们曾对遥远的21世纪做出预测，然而毫无疑问，那些预测偏离了今日的现实（有些与现实相去甚远）。未来或许难以预测，但比起关于未来技术的错误判断，科幻作家们似乎更缺乏展望未来社会形态的能力。比如，在20世纪50年代，没有几位科幻作家能预见到有多少公共和私人空间将禁止吸烟；他们中的大多数人都认为，到2000年，所有科学家都叼着烟斗仍是一个普遍存在的事实，就像1950年一样。

对于那些试图描写未来生活场景的作者而言，预测语言的演变是另一项挑战。从1929年的“巴克·罗杰斯”报纸连环画开始读起是一件十分有趣的事情，你不仅会读到关于“火箭船”“分解射线”“升空带”的描述，还会发现20世纪早期美国口语的表达方式，在25世纪仍然流行并且易于理解。巴克在20世纪20年代进入假死状态，直到500年后才清醒过来，所以他使用500年前的俚语是情有可原的，但很显然，25世纪的所有人都像他那样说话。在未来的500年里，性别平等的观念似乎也发生了倒退。巴克的未婚妻带领一支侦查小分队进入了敌人在火星上的领地，而她本人却和其他成员走散了（手机在未来似乎是一项被遗失的科技）。巴克在基地飞船上抱怨道：“相信一个女人能承担男人的职责，就会发生这样的事情！”他的副官应和道：“女人全都一个样，能把男人逼疯！”这再次证明科幻作家笔下的未来世界的生活，并不像他们标榜的那样美好。

50年前或者更久以前的一些科幻小说作者，对未来抱持相当乐观的态度。这些作家没有刻画以核战争和国家之间（以及人类与外星物种之间）持续不断的敌对行动为时代特征的反乌托邦式的未来，而是自信地认为，在未来，由于科学的发展，人类将战胜大多数疾病！

科学可以让20世纪50年代的家庭主妇们从繁重的家务劳动和做饭的事情中解脱出来。1949年5月出版的《科学画报》（*Science Illustrated*）预测，一种“新的布线方式或将使全电气化住宅变成现实”。这种布线方式包括使用一台小型变压器，将工作电压从110伏降至24伏。文章指出，使用较低电压的好处在于，它能够使许多家用电器安全运行。实现全电气化住宅需要一个价值5美元的变压器，在十几个家庭的共同分摊下，这项支出也变得较为合理。一张宣传画显示：“一位年轻的家庭主妇……通过床头面板上的遥控开关……可以启动厨房的滴滤式咖啡机，开关收音机，为晚归的丈夫点亮院子里的泛光灯……启动电动洗碗机和烤面包机，还可以对室内乃至院落里的每一盏灯和电源插座进行单点控制。”绘图者那时还无法想象无线技术，以及可预先编程操作的半导体传感器，否则床头面板上的遥控开关也将从画面上消失。难怪社会理论家担心，在这样一个“家庭主妇的乌托邦”里，年轻的家庭主妇们会感到无所事事。

同样，科学也改变了我们的工作场所。在21世纪的今天，没有多少人关心喷气飞行背包，大多数人真正关心的是：我们的4个小时工作制在哪里？一个普遍的看法是，到2000年，人们将有大量的闲暇时间，如何满足大众休闲娱乐方面的需求将成为当务之急。然而，对于我们中的很多人来说，每天的实际工作时间却延长了，这都要“感谢”量子力学的发展带来的现代电子产品，频繁联络已经演变成全天候相连。

50年前的年轻人可能没有读过《现代力学》（*Modern Mechanics*）和《大众科学》（*Popular Science*），但是他们通过漫画书上的科学研究和技术创新看到了更加光明的未来。在今天，一本畅销漫画的销量可能只有几十万份，而1960年《超人》漫画的销量每期超过80万份，研究发现，每一本还会被另外10个孩子分享阅读。这些定价仅10美分的4色漫画期刊，培养了孩子们通过科技改善生活的人生态度。

尤其是“明日之人”，许多描绘未来世界的经典故事都以他为主角。超人在20世纪四五十年代大受欢迎，他以主角或配角的身份出现在多达7部国家联合漫画公司（DC漫画公司的前身）出版的漫画作品中。除了讲述他自己故事的《动作漫画》和《超人》，在漫画《露易丝·莱恩

——超人的女朋友》（*Lois Lane,Superman's Girlfriend*）、《吉米·奥尔森——超人的朋友》（*Jimmy Olsen,Superman's Pal*）、《世界最佳拍档》（*World's Finest*，在这部作品中，超人每个月都与蝙蝠侠和罗宾合作）、《超级小子》（*Superboy*）以及《冒险漫画》（*Adventure Comics*）中都能找到这个拥有钢铁之躯的男人。

在1958年的第247期《冒险漫画》中，少年超人遇到了三位拥有超能力的少年。他们在超人身上搞了几个无伤大雅的恶作剧，然后告诉他，他们来自1 000年后的未来世界。这些超级少年通过时间旅行回到过去，是为了招募超人加入他们的俱乐部——超级英雄军团。显然，1000年后，来自地球和其他星球的一群拥有各种力量和本领的少年，将联手打击整个联合行星中的犯罪与邪恶活动。以"超级英雄军团"为主题的故事后来被证实深受读者欢迎，并在《冒险漫画》中成为固定专栏。最终，超级英雄军团拥有了自己的专属刊物。

根据超级英雄军团故事的描述，开始于20世纪60年代的宇宙空间计划和登月竞赛，将在由科学主宰的30世纪达到顶峰！在超级英雄军团的世界中，如果你发现自己遇到了麻烦，你要做的不是打电话报警，而是去找科学警察！

尽管邪恶的暴君和好战的外星物种在2958年仍将困扰人类，超级英雄军团仍然可以带给人们一种普遍的进步感和希望，从某种程度上讲，这可能正是他们受欢迎的原因。1 000年之后，智慧和知识将获得荣耀和奖赏。在《冒险漫画》第321期中，超级英雄军团的创始人之一"闪电小子"因"泄露"了集中器的秘密而被指责"背叛"了军团，并被判处终身监禁。他的囚室里有三个醒目的按钮，按下后分别提供三种最基本的生活必需品：食物、水以及……书籍！超级英雄军团的作者向我们保证，未来我们将生活在科学的黄金年代。

同样，在漫威漫画公司（20世纪50年代中晚期，该公司被称为亚特拉斯漫画公司）旗下的作品中，科学家也被赋予了显赫的社会地位。由斯坦·李和杰克·科比在原有人物的基础上重新创作的第一期《神奇四侠》漫画于1961年11月发行，讲述了一个四人团队乘坐"命途多舛"的宇宙飞船去太空执行任务，回来时变为拥有超能力的"神奇四侠"的故事。20世纪60年代，在这些超级英雄重返漫威宇宙之前，那里仍有许多威胁需要处理。《惊奇故事》《神奇幻想》《惊奇小说》《神秘之旅》和《悬疑故事》都描写了来自不同时空和维度的巨大而骇人的入侵者们，他们为了征服全世界而发动持续攻击。这些潜在的征服者们让地方执法

部门和军队束手无策，某位科学家却能凭借一己之力将他们挫败！

幸好有科学家，因为地球人不得不全力应付像皮道尔[1]、罗尔格[2]、斯玻尔[3]、奥尔戈[4]、格鲁特[5]、罗姆布[6]、玻姆布[7]、摩姆巴[8]、德拉格姆[9]和克拉格姆[10]这样的怪物。这些生物大多高过6米，而且绝非普通的大眼怪物或者可怕的巨型虫，它们由岩石、烟、火、水、电、木材、泥浆或者“缓慢流动的油漆”构成。然而，所有这些怪物都不及外太空税吏奥格那样令人心生畏惧！

1960年11月出版的第13期《惊奇故事》（见图A–1）极具代表性，从中我们听到了来自亲历者的证词：“我挑战了格鲁特，一个来自X行星的怪物！”这大概就是古姆以及他的儿子古格姆所在的X行星，他们和X行星的统治者克寇都是来自X行星的生物。格鲁特是一个巨大的树状生物，他来到地球，企图偷走一整个村庄，并把它带回家乡进行研究。子弹伤不了格鲁特，而且他的木质皮肤“太硬而无法点燃”。格鲁特利用他的精神控制力，指挥其他的树木进行移动并听命于他，小镇防御系统很快就陷入瘫痪状态。如果没有科学家莱斯利·埃文斯的及时救助，小镇将沦陷。埃文斯昼夜不停地工作，几天后，他制造了一种能够使格鲁特陷入休眠状态的武器——变种白蚁。如图A–2所示，当小镇警长懊悔自己“从没有想到这个办法”时，一位惊魂未定的小镇居民说道：“这就是为什么埃文斯是一位科学家，而你只能成为一名警长！”与此同时，埃文斯的妻子拥抱着她的丈夫，郑重地说：“哦，亲爱的，请你原谅！我以前真是傻透了！我再也不会抱怨你了！永远不会！”


APPROVED BY THE COMICS CODE AUTHORITY
《惊奇故事》
我挑战了格鲁特，
一个来自X行星的怪物！
看吧！我是格鲁特，我所向无敌！谁敢挑战我？
我要向你发起挑战，格鲁特！我将在午夜之前摧毁你！

图A–1 《惊奇故事》第13期封面描绘了科学家莱斯利·埃文斯的冒险故事，在漫威漫画的“前超级英雄时代”，这种来自外太空的巨型入侵者以每月数次的频率威胁着地球



图A–2 《惊奇故事》第13期的最后一幅图，展示了埃文斯挑战格鲁特之后获得的奖励——开启了“崭新而更加美好生活”，他的妻子从此“再也不会抱怨了”

或许，将科学家描绘为拯救全世界的英雄只是一种漫画手法。然而我希望，读完这本书你也会赞同，将推动量子力学发展的物理学家们比作“改变世界的英雄”是恰如其分的。今日的量子力学，其线索自数百年前就已闪现。事实上，科学一直在改变我们的未来。从活字印刷版到蒸汽机，到无线收音机，再到笔记本电脑，技术创新一次又一次深刻地改变了人与人、群体与群体，以及国家与国家之间的相互关系。

来自一个领域的科学发现，会推动其他领域取得突破性进展。通过解析X射线散射的数据，我们弄清楚了DNA的结构。这种在量子力学基础上发展起来的X射线光谱技术，是为了促进固体物理学家对晶体结构的研究。50多年前，贝尔实验室的科学家们发明了晶体管，如果没有基于晶体管的高速计算机和数据存储装置，解码人体基因组根本无法实现。利用20世纪物理学家们的研究成果，一场由21世纪生物学家们掀起的科学革命正蓄势待发。几年之后，是否会有一本书描述“生物学家们如何改变未来”，时间自会证明。但有一件事是毋庸置疑的：要想拥抱和参与那样的未来，我们必须培养科学研究所需的严谨的思维、理性的好奇心、怀疑的精神和缜密的推理能力。当“不可征服的奥尔戈”重返地球时，我们一定能将其击败！

[1] 皮道尔，漫威漫画中的巨型怪兽，见《怪兽出笼》第2卷第2期。——译者注
[2] 罗尔格，来自蜘蛛星的蜘蛛王，见《神秘之旅》第64期。——译者注
[3] 斯玻尔，科学家制造出的巨型变异阿米巴变形虫，见《悬疑故事》第11期。——译者注
[4] 奥尔戈，门特勒罗尼茨的战士，要征服地球，见《惊奇小说》第90期。——译者注
[5] 格鲁特，丧失记忆的绿色大猩猩状外星人，见《神秘之旅》第67期。——译者注
[6] 罗姆布，入侵地球的外星物种，被人类俘获，见《惊奇故事》第10期。——译者注
[7] 玻姆布，来自其他星球的外星征服者，见《神秘之旅》第60期。——译者注
[8] 摩姆巴，想要征服地球的未知外星种族，见《惊奇故事》第23期。——译者注
[9] 德拉格姆，想要征服地球的燃烧着的入侵者，见《惊奇小说》第76期。——译者注
[10] 克拉格姆，想要征服地球的云状外星人，见《神秘之旅》第78期。——译者注





扫此二维码，加我微信好友

扫此二维码，添加微信公众号

还有什么想要读的书？

加小编私人微信wordgai或搜索订阅号微信“互联网分享社区”

按照订阅号书单提示下载

致谢

有时候，就像人们常说的，好运气胜过最精心的谋划。在大学和研究生院学习量子力学、统计力学和固体物理学时，我有幸获得了杰出教授们的指导。我的第一堂量子物理课是由蒂莫西·布瓦耶教授讲授的。他的课堂教学为我们打下了坚实的量子物理学基础，同时，他在原子行为的非量子力学解释方面所进行的研究（包括经典的电动力学与零点辐射场的结合）表明，对自然现象进行观察和解释的方法不止一种。我也很高兴能借此机会向赫尔曼·卡明斯、弗雷德·史密斯、肯尼斯·鲁宾、威廉·米勒、罗伯特·阿尔法诺、罗伯特·萨克斯、里奥·卡达诺夫、赫尔穆特·弗里切、西德尼·内格尔，以及罗伯特·斯特里特等前辈表达我的感激之情，感谢你们在课堂内外向我解说这个迷人的物理学领域以及它的诸多应用。还有我在明尼苏达大学的学生们，他们是本书众多案例的灵感之源。

撰写一本关于量子力学的科普读物是一项极具挑战性的工作，因为在试图针对非专业人士而简化专业内容的过程中，极易弄巧成拙，以致歪曲了理论的基本内容。我对本杰明·贝曼的贡献深表感激，他通读了整本书稿，并提供了宝贵的修改意见。此外，威廉·齐默尔曼、丹·达尔伯格、米歇尔·詹森、布鲁斯·哈默尔和马可·佩洛索阅读了部分章节，感谢他们的深刻见解和中肯建议。还要感谢钱永忠、保罗·克罗韦尔、约翰·布罗德赫斯特、艾伦·戈德曼和罗杰·斯度谔在本书写作过程中提供的帮助，以及布鲁斯·哈默尔为本书第19章提供的核磁共振成像照片。这本书中如有任何疏漏或令人费解的论述，都由我本人负责。

我也要感谢哥谭出版社的所有工作人员，特别是我的编辑帕特里克·穆利根，让我有机会与大家分享量子力学中精彩和实用的部分，以及它们在核物理与固体物理学中的应用。在这本书的写作和编辑的过程中，帕特里克的指导使书的内容得到极大的改进，这本书的完成离不开他自始至终的支持。文字编辑艾琳·切蒂对这本书贡献良多，大大提高了这本书终稿的可读性。这本书出色的英文版封面插图出自迈克尔·凯尔奇之手，埃尔克·西加尔为英文版的装帧进行了精心设计。克里斯托弗·琼斯绘制的精彩素描，为整本书中的烦琐概念增添了完美的图示。我还要感谢亚历克斯·舒曼和布瑞恩·安德松提供的电子和激光衍射图，

以及玻璃杯中的铅笔图（感谢埃里克·马蒂斯的乔恩·奥斯特曼的铅笔）。这本书中引用的一些科幻小说杂志购自加利福尼亚州旧金山市的Kayo书店，只有在这里才能找到那些旧时的通俗读物。哥谭出版社的特拉弗斯·约翰逊和威廉·莫里斯奋进娱乐公司的杰克·休格曼在从粗糙的初稿到最终定稿的艰难审读过程中给予我很大的帮助。我的经纪人杰伊·曼德尔一直是我的坚实后盾，他贯穿项目始终的洞察力、建议以及对我的鼓励至关重要。

这本书的完成同样离不开我的妻子特蕾泽给予我的无条件的支持与无限度的耐心；还有我的孩子们，托马斯、劳拉和戴维，在我写作这本书的过程中，他们慷慨地放弃了属于他们的父子时光。长久以来，包括在我写作另外两本书的过程中，卡洛琳和道格·科尔斯的友谊和支持一直陪伴着我，卡米尔和杰夫·纳什始终与我同舟共济。对于他们四人，我深怀感激。

当我在这本书的初稿创作方面苦苦挣扎之时，我的儿子托马斯和妻子特蕾泽给我提供的编辑建议、辅助调查以及适当的劝告，对我来说弥足珍贵。感谢他们的辛勤工作和鼓励，对此我由衷地感到自豪和幸福。能得到来自家人的爱与支持是我最大的幸运，我明白，只要有家人的陪伴，未来便胜过最明媚、乐观的科幻预言。

注释

前言

1. "well into the twenty-first century, we still await flying cars, jet packs": *Follies of Science: 20th Century Visions of Our Fantastic Future,* Eric Dregni and Jonathan Dregni (Speck Press, 2006).

2. "consider the long-term data storage accomplished by the Sumerians": *Ancient Mesopotamia: Portrait of a Dead Civilization,* A. Leo Oppenheim (University of Chicago Press, 1964); *The Sumerians,* C. Leonard Woolley (W. W. Norton and Co., 1965).

3. "In 1965 Gordon Moore noted": *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution,* T. R. Reid (Random House, 2001).

第1章 量子力学三部曲

1. *Amazing Stories: Cheap Thrills, The Amazing! Thrilling! Astounding! History of Pulp Fiction,* Ron Goulart (Hermes, 2007).

2. "at the German Physical Society, Max Planck": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory,* George Gamow (Dover, 1985).

3. "Buck Rogers first appeared in the science fiction pulp *Amazing Stories*": *Science Fiction of the 20th Century: An Illustrated History,* Frank M. Robinson (Collectors Press, 1999).

4. "or what publisher Hugo Gernsback called 'scientifiction'": *Alternate Worlds: The Illustrated History of Science Fiction,* James Gunn (Prentice-Hall, 1975).

5. "Given the amazing pace of scientific progress": See, for example, *The Victorian Internet: The Remarkable Story of the Telegraph and the Nineteenth Century's On-Line Pioneers*, Tom Standage (Berkley Books, 1998); *Electric Universe: How Electricity Switched on the Modern World*, David Bodanis (Three Rivers Press, 2005).

6. "a revolution in physics occurred": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, George Gamow (Dover, 1985).

7. "'It is a great source of satisfaction to us'": "The Rise of Scientification," Hugo Gernsback, *Amazing Stories Quarterly* 1, 2 (Experimenter Publishing, Spring 1928).

8. "As Edward O. Wilson once cautioned": "The Drive to Discovery," Edward O. Wilson, *American Scholar* (Autumn 1984).

9. "Jules Verne considered the most extraordinary voyage of all": *Paris in the Twentieth Century*, Jules Verne (Random House, 1996).

10. "In one participant's recollection, Bohr proposed a theoretical model": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, George Gamow (Dover, 1985).

11. "Faraday was the first to suggest that electric charges and magnetic materials": *Electric Universe: How Electricity Switched on the Modern World*, David Bodanis (Three Rivers Press, 2005).

第2章 得诺奖的光电效应

1. "The Skylark of Space," Edward Elmer Smith, with Lee Hawkins Garby (uncredited) (The Buffalo Book Co., 1946); first serialized in *Amazing Stories*, 1928.

2. "this theory predicted results that were nonsensical": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

3. "Planck firmly believed that light was a continuous electromagnetic wave": *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone*, Kenneth W. Ford (Harvard University Press, 2004).

4. "In the late 1800s, physicists had discovered that certain materials": *The Strange Story of the Quantum*, 2nd edition, Banesh Hoffman (Dover, 1959).

5. (footnote) "George Gamow, brilliant physicist and famed practical joker": *Eurekas and Euphorias: The Oxford Book of Scientific Anecdotes*, Walter Gratzer (Oxford University Press, 2002).

6. "Lenard was working at the University of Heidelberg": *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

7. "When Einstein wrote his paper on the 'photoelectric' effect": *Einstein: His Life and Universe*, Walter Isaacson (Simon and Schuster, 2007).

8. "Fortunately for Einstein": *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

9. "Millikan was one of the most careful and gifted experimentalists of his day": Ibid.

10. "Technically, a photon is defined as": "Light Reconsidered," Arthur Zajone, in *OPN Trends*, supplement to *Optics and Photonic News* ed. by Chandrasekhar Roychoudhuri and Rajarshi Roy, 14, S-2 (2003).

11. "As Albert Einstein reflected, 'All the fifty years of conscious brooding'": "The first phase of the Bohr-Einstein dialogue," Martin J. Klein, *Historical Studies in the Physical Sciences* 2, 1 (1970).

第3章 神奇的物质波

1. *Science Wonder Stories* (Stellar Publishing Company, Feb. 1930).
2. "Goddard was an early example of a prominent scientist": *Different Engines: How Science Drives Fiction and Fiction Drives Science*, Mark L. Brake and Neil Hook (Macmillan, 2008).
3. "In 1923, Prince Louis de Broglie": *The Story of Quantum Mechanics*, Victor Guillemin (Charles Scribner's Sons, 1968); *Physics and Microphysics*, Louis de Broglie (Pantheon, 1955).
4. "These crystalline arrangements of atoms can be used as atomic-scale 'oil slicks'": *Men Who Made a New Physics*, Barbara Lovett Cline (University of Chicago Press, 1987).

第4章 超能力般的粒子自旋

1. "Jerry Siegel and Joe Shuster eventually sold their story": *Men of Tomorrow: Geeks, Gangsters and the Birth of the Comic Book,* Gerald Jones (Basic Books, 2004).

2. "As Jules Feiffer argued": *The Great Comic Book Heroes,* Jules Feiffer (Bonanza Books, 1965).

3. "It was proposed in 1925 that every fundamental particle behaves as if it is a spinning top": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

4. "*Air Wonder Stories*": *Pulp Culture: The Art of Fiction Magazines,* Frank M. Robinson and Lawrence Davidson (Collectors Press, 1998).

5. "In Isaac Asimov's novel": *Fantastic Voyage II: Destination Brain,* Isaac Asimov (Doubleday, 1987).

6. (footnote) "When I described Asimov's suggestion in my 2005 book": *Civil War Files,* Mark O'English (Marvel Comics, Sept. 2006).

7. "Does the experimentally observed magnetic field of electrons": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

8. "Two Dutch students in Leiden, Samuel Goudsmit and George Uhlenbeck, wrote a paper in 1925": Ibid.

9. "'young enough to be able to afford a stupidity'": "George Uhlenbeck and the Discovery of Electron Spin," Abraham Pais, *Physics Today* (December 1989); *The Conceptual Development of Quantum Mechanics,* Max Jammer (McGraw-Hill, 1966).

第5章 波函数的发现与认知

1. "In 1958, Jonathan Osterman": *Watchmen*, written by Alan Moore and drawn by Dave Gibbons (DC Comics, 1986, 1987).

2. "In addition to electromagnetism, the intrinsic field must be comprised of forces": *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone*, Kenneth W. Ford (Harvard University Press, 2004).

3. "The neutron, discovered in 1932": *The Atom and Its Nucleus*, George Gamow (Prentice Hall, 1961).

4. (footnote) "when Guido, a superstrong member of a team of super-powered mutants": *X-Factor* # 72, written by Peter David and drawn by Larry Stroman (Marvel Comics, Nov. 1991).

5. "At the start of the twentieth century, physicists debated": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, George Gamow (Dover, 1985).

6. (footnote) "to quote Krusty the Clown": *The Simpsons*, episode # 3F08, "Sideshow Bob's Last Gleaning," written by Spike Ferensten and directed by Dominic Polcino (Nov. 1995).

7. "An important step in reconciling this puzzle was Niels Bohr's suggestion in 1913": *Niels Bohr: A Centenary Volume*, edited by A. P. French and P. J. Kennedy (Harvard University Press, 1985).

8. "This newly detected element was named helium": *Helium: Child of the Sun*, Clifford W. Seibel (University Press of Kansas, 1968); *Reading the Mind of God: In Search of the Principle of Universality*, James Trefil (Charles Scribner's Sons, 1989).

9. *Strange Adventures* # 62, "The Fireproof Man," written by John Broome and drawn by Carmine Infantino (DC Comics, Nov. 1955).

10. (footnote) *Seduction of the Innocent*, Frederic Wertham (Rinehart Press, 1953).

11. "Following a seminar presentation by Schrödinger of the 'standing wave' model of electrons in an atom": *Schrödinger: Life and*

12. *Thought*, Walter Moore (Cambridge University Press, 1989); *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

第6章 打开未来之门的薛定谔方程

1. [footnote] "Historians of science debate to this day the identity of the woman": *Schrödinger: Life and Thought*, Walter Moore (Cambridge University Press, 1989); *Faust in Copenhagen: A Struggle for the Soul of Physics*, Gino Segre (Viking, 2007).

2. "When Schrödinger first solved this equation for the hydrogen atom": *Men Who Made a New Physics*, Barbara Lovett Cline (University of Chicago Press, 1987).

3. "One intriguing consequence of the Schrödinger equation": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

4. "Schrödinger's equation destroyed the notion": *Men Who Made a New Physics*, Barbara Lovett Cline (University of Chicago Press, 1987).

第7章 著名的海森堡不确定性原理

1. "Heisenberg's struggle to envision what the electron was doing": *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

2. "In 1925 Heisenberg exiled himself to the German island of Helgoland": Ibid.

3. "It is the standard deviations of these two bell-shaped curves": *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone*, Kenneth W. Ford (Harvard University Press, 2004).

4. "explains why scientists are concerned about an increase in the average global temperature of a few degrees": *Potential Impacts of Climate Change in the United States*, CBO Paper (Congressional Budget Office, May 2009).

5. "Fresh snow reflects 80 to 90 percent of all sunlight": *Energy in Nature and Society*, Vaclav Smil (MIT Press, 2008).

1. "Dr. Manhattan": *Watchmen,* written by Alan Moore and drawn by Dave Gibbons (DC Comics, 1986, 1987).

2. "The quantum mechanical wave function contains all the information": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

3. (figure caption) Image adapted from *The Atom and Its Nucleus,* George Gamow (Prentice Hall, 1961).

4. "this 'leakage effect' is observed for electrons": *The Atom and Its Nucleus,* George Gamow (Prentice Hall, 1961); *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory,* George Gamow (Dover, 1985).

5. "the Schrödinger equation is linear": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

6. "'nothing ever ends'": *Watchmen* # 12, written by Alan Moore and drawn by Dave Gibbons (DC Comics, Oct. 1987).

7. "Dave Gibbons, the artist of *Watchmen,* once stated in a radio interview": Interview with Dave Gibbons and James Kakalios, Minnesota Public Radio, *Science Friday,* hosted by Ira Flatow, March 27, 2009.

8. "they emit electromagnetic radiation in the blue-ultraviolet portion of the spectrum": *Introduction to High Energy Physics,* 2nd edition, Donald H. Perkins (Addison-Wesley, 1982).

9. "then as the wave function contains *all* the information": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

10. "One interpretation was provided by Hugh Everett III": *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics,* edited by Bryce S. DeWitt and Neill Graham (Princeton University Press, 1973); *The Many Worlds of Hugh Everett III,* Peter Byrne (Oxford University Press, 2010).

11. *Flatland*, Edwin Abbott (Seely and Co., 1884).

12. "The Fifth Dimensional Catapult," Murray Leinster, first published in *Astounding* (January 1931).

13. "Plattner's Story," H. G. Wells, from *Thirty Strange Stories* (Harper and Bros., 1897).

14. "The Remarkable Case of Davidson's Eyes," H. G. Wells, from *The Stolen Bacillus and Other Incidents* (Methuen, 1895).

第9章 原子是我们的好朋友

1. "joined by the refrain of 'tic, tic, tic'": "Tic, Tic, Tic," sung by Doris Day in *My Dream Is Yours* (Warner Bros., 1949), music by Harry Warren and lyrics by Ralph Blaine.

2. *The Atomic Kid* (Republic Pictures, 1954), written by Blake Edwards, Benedict Freedman, and John Fenton Murray and directed by Leslie H. Martinson.

3. 102 *The Beast of Yucca Flats*, written and directed by Coleman Francis (Image Entertainment, 1961).

4. "the true effects of radiation exposure were publicly known": "Hiroshima," John Hersey, *The New Yorker*, August 31, 1946, reprinted in *Reporting World War II: American Journalism 1938–1946* (Library of America, 1995).

5. "The 1957 television program *Disneyland* featured Dr. Heinz Haber": *The Walt Disney Story of Our Friend the Atom*, Heinz Haber (Dell Publishing, 1956).

6. *Across the Space Frontier*, edited by Cornelius Ryan, written by Werhner Von Braun, Oscar Schachter, and Willy Ley and illustrated by Chesley Bonestell (Viking, 1952).

7. "In 1957 Ford proposed a car called the Nucleon,": *Alien Hand Syndrome*, Alan Bellows (Workman Publishing Co., 2009).

8. *Twenty Thousand Leagues Under the Sea*, Jules Verne (Dodo Press, 2007).

9. (footnote) "The sponsor for the Disneyland program": *Fast Food Nation*, Eric Schlosser (Houghton Mifflin, 2004).

10. "When Ernest Rutherford's lab conducted experiments": *The Atom and Its Nucleus*, George Gamow (Prentice Hall, 1961); *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

11. "For a while, physicists thought that the nucleus contained both protons and electrons": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

12. (footnote) "To maintain stability in a nucleus requires a critical balance of the number of neutrons and protons": Ibid.

13. "A dictionary from the end of the nineteenth century": *The Walt Disney Story of Our Friend the Atom*, Heinz Haber (Dell Publishing, 1956).

14. "In 1937 Italian physicist Enrico Fermi": *The Atom and Its Nucleus*, George Gamow (Prentice Hall, 1961).

15. "Gilbert's U-238 Atomic Energy Lab": created by Alfred Carlton Gilbert (founder of the Gilbert Hall of Science in New York City in 1941), with consultation with the physics faculty at MIT (1951).

16. *Learn How Dagwood Splits the Atom*, written by John Dunning and Louis Heil and drawn by Joe Musial (King Features Syndicate, 1949).

17. "Buck Rogers newspaper strip published in 1929": *Buck Rogers in the 25th Century: The Complete Newspaper Dailies*, vol. 1, *1929–1930*, written by Philip Nowlan and drawn by Richard Calkins (Hermes Press, 2008).

18. *Secret Service Operator No. 5*, issue # 47, written by Wayne Rogers (under the pen name Curtis Steele) (Sept. 1939).

19. *The World Set Free*, H. G. Wells (Quiet Vision Publishing, 2000).

20. *The Interpretation of Radium: Being the Substance of Six Free*

Popular Experimental Lectures Delivered at the University of Glasgow, Frederick Soddy (G. P. Putnam's Sons, 1909).

21. "This novel made a strong impression on one particular reader": *Different Engines: How Science Drives Fiction and Fiction Drives Science*, Mark L. Brake and Neil Hook (Macmillan, 2008).

第10章 或快或慢的原子核衰变

1. *Them!* written by Ted Sherdeman, Russell Hughes, and George Worthing Yates and directed by Gordon Douglas (Warner Bros., 1954).

2. *The Amazing Colossal Man,* written by Mark Hanna and Bert I. Gordon and directed by Bert I. Gordon (Malibu Productions, 1957).

3. *War of the Colossal Beast,* written by Bert I. Gordon and George Worthing Yates and directed by Bert I. Gordon (Carmel Productions,1958).

4. *The Beginning of the End,* written by Fred Freiberger and Lester Gorn and directed by Bert I. Gordon (AB-PT Pictures Corp., 1957).

5. *It Came from Beneath the Sea,* written by George Worthing Yates and Hal Smith and directed by Robert Gordon (Clover Productions, 1955).

6. *The Attack of the Giant Leeches,* written by Leo Gordon and directed by Bernard L. Kowalski (American International Pictures, 1959).

7. *The Incredible Shrinking Man,* written by Richard Matheson and directed by Jack Arnold (Universal, 1957).

8. *Dr. Cyclops,* written by Tom Kilpatrick and directed by Ernest B. Schoedsack (Paramount, 1940).

9. "Even though the nucleus can lower its energy by ejecting an alpha particle": *The Atom and Its Nucleus,* George Gamow (Prentice Hall, 1961).

10. "One important similarity between the lottery scenario and the decay of unstable nuclei": *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone,* Kenneth W. Ford (Harvard University Press, 2004).

11. *Learn How Dagwood Splits the Atom,* written by John Dunning and Louis Heil and drawn by Joe Musial (King Features Syndicate, 1949).

12. "why is there any tritium still around": *The Atom and Its Nucleus,* George Gamow (Prentice Hall, 1961).

13. "Sheldon Kauffman and Willard F. Libby did the next best thing": "The Natural Distribution of Tritium," Sheldon Kaufman and W. F. Libby, *Physical Review* 93 (1954), p. 1337. See http://link.aps.org/abstract/PR/v93/p1337 for this article.

14. "Elements that emit gamma rays, alpha particles, or beta particles": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

15. (figure caption) Buck Rogers ray-gun image from *Raygun,* Eugene W. Metcalf and Frank Maresca, photographed by Charles Bechtold (Fotofolio, 1999).

16. (figure caption) Penetration of matter by radiation image adapted from www.hyperphysics.phys-astr.gsu.edu Web site.

17. "Russian journalist Alexander Litvinenko was murdered": *The Terminal Spy: A True Story of Espionage, Betrayal and Murder,* Alan S. Crowell (Broadway, 2008).

18. "When some of these particles strike the DNA in our cells": "Cosmic Rays: A Review for Astrobiologists," Franco Ferrari and Ewa Szuszkiewicz, *Astrobiology* 9, 413 (2009).

第11章 太阳中心的核聚变反应

1. "In the 1962 Gold Key comic book series": *Doctor Solar—Man of the Atom*, written by Paul S. Newman and drawn by Bob Fujitani (Gold Key Comics, 1962), reprinted in *Doctor Solar—Man of the Atom*, vols. 1–4 (Dark Horse Books, 2004–2008).

2. "Captain Atom": *Space Adventures* # 33, written by Joe Gill and Steve Ditko and drawn by Steve Ditko (Charlton Comics, Mar. 1960), reprinted in *Action Hero Archives*, vol. 1 (DC Comics, 2004).

3. *Dr. Solar, Man of the Atom* # 14, written by Paul S. Newman and drawn by Frank Bolle (Gold Key Comics, Sept. 1965), reprinted in *Doctor Solar—Man of the Atom*, vol. 2 (Dark Horse Books, 2005).

4. "Neutrons themselves are not stable": *The Story of Quantum Mechanics*, Victor Guillemin (Charles Scribner's Sons, 1968).

5. "When physicists in the late 1920s discovered this phenomenon": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, George Gamow (Dover, 1985).

6. "fortunately this inverse process occurs constantly in the center of the sun": "Nuclear Astrophysics," M. Arnould and K. Takahashi, *Rep. Prog. Phys.* 62, 395 (1999).

7. (figure caption) Image adapted from www.hyperphysics.phys-astr.gsu.edu Web site.

8. (footnote) "To this Eddington replied in 1920": "Arthur Stanley Eddington: A Centennial Tribute," Joe S. Tenn, *Mercury* 11 (1982), p. 178.

9. "the average photon spends forty thousand years colliding": "How Long Does It Take for Heat to Flow Through the Sun?" G. Fiorentini and B. Rici, *Comments on Modern Physics* 1 (1999), p. 49.

10. "Our sun converts a great deal of hydrogen": "The Evolution and Explosion of Massive Stars," S. E. Woolsey and A. Heger, *Reviews of Modern Physics* 74 (Oct. 2002), p. 1015.

11. "For more than fifty years, scientists have been attempting to construct a fusion reactor": *Sun in a Bottle*, Charles Seife (Viking, 2008); "Fusion's False Dawn," Michael Moyer, *Scientific American* 302, 50 (2010).

12. "This so-called cold fusion process": *Bad Science: The Short Life and Weird Times of Cold Fusion*, Gary Taubes (Random House, 1993).

第12章 水火不相容的费米子

1. "The agreement between theoretical predictions": *QED: The Strange Theory of Light and Matter,* Richard P. Feynman (Princeton University Press, 1988).

2. "The collective behavior of quantum particles": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

3. "Think about a ribbon": The argument involving a ribbon with different colors on each side is adapted from that in "The Reason for Antiparticles," Richard P. Feynman, in *Elementary Particles and the Laws of Physics,* Richard P. Feynman and Steven Weinberg (Cambridge University Press, 1987). Feynman credits this analogy to David Finkelstein.

4. "described as the difference of two functions, A and B": *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone,* Kenneth W. Ford (Harvard University Press, 2004).

5. "Wolfgang Pauli, one of the founding fathers of quantum mechanics": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory,* George Gamow (Dover, 1985).

6. "One easy way to satisfy the Pauli principle": *Electrons in Metals: A Short Guide to the Fermi Surface,* J. M. Ziman (Taylor and Francis, 1963).

第13章 如蜜蜂般团结的玻色子

1. *The Superorganism—The Beauty, Elegance, and Strangeness of Insect Societies*, Bert Hölldobler and Edward O. Wilson (W. W. Norton & Co., 2008).

2. *The Cosmic Rape*, Theodore Sturgeon (Pocket Books, 1958).

3. (footnote) *More Than Human*, Theodore Sturgeon (Farrar, Straus and Young, 1953).

4. "Bose-Einstein condensate": *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone*, Kenneth W. Ford (Harvard University Press, 2004).

5. "This symmetry indicates that the two-particle wave function": Ibid.

6. *Village of the Damned*, written by Stirling Silliphant, Wolf Rilla, and Ronald Kinnoch and directed by Wolf Rilla (Metro-Goldwyn-Mayer, 1960).

7. "helium is an example of an atom": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

8. "Experimentalists in 1965," "Gyroscopic Detection of Persistent Flow of Super fluid Liquid Helium," J.B. Mehl and W. Zimmermann Jr., *Physical Review Letters* 14, p. 815 (1965).

9. "an electrical analog to superfluidity": *The Path of No Resistance: The Story of a Revolution in Superconductivity*, Bruce Schechter (Simon and Schuster, 1989); Introduction to Superconductivity, 2nd Edition, Michael Tinkham (Dover, 2004); "Observation of Persistent Current in a Superconducting Solenoid," J. File and R.G. Mills, *Physical Review of Letters* 10, p. 93 (1963).

10. "Max Planck and how his explanation of the spectrum of light": *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002); *Men Who Made a New Physics*, Barbara Lovett Cline (University of Chicago Press, 1987).

11. "What if the box were filled with light": *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, George Gamow (Dover, 1985).

12. "The box containing light can be considered a gas of photons": Ibid.; *The Atom and Its Nucleus*, George Gamow (Prentice Hall, 1961).

第14章 荧光材料和隐形墨水

1. "In our world the eighty-sixth floor of the Empire State Building": *Doc Savage: His Apocalyptic Life*, Philip Joes Farmer (Doubleday, 1973); *A History of the Doc Savage Adventures*, Robert Michael "Bobb" Cotter (McFarland and Company, 2009).

2. "Dent and his wife lived for several years on a forty-foot schooner": *Lester Dent: The Man, His Craft and His Market*, M. Martin

3. McCarey-Laird (Hidalgo Pub. Co., 1994); *Bigger Than Life: The Creator of Doc Savage,* Marilyn Cannaday (Bowling Green State University Popular Press, 1990).

4. "called his Fortress of Solitude": *Fortress of Solitude,* Lester Dent (under the pen name Kenneth Robeson) (Street and Smith, 1938); reprinted in *Doc Savage* # 1 (Nostalgia Ventures, 2006).

5. "his tie and jacket buttons hid . . . and his car could produce": "The Bronze Genius," Will Murray in *The Man Behind Doc Savage: A Tribute to Lester Dent,* edited by Robert Weinberg (Weinberg, 1974).

6. "the comic-book superhero foursome": "Introduction to *The Fortress of Solitude*" in *Doc Savage* # 1 (Nostalgia Ventures, 2006).

7. "Doc's gadgets were similarly ahead of his time": "The Bronze Genius," Will Murray in *The Man Behind Doc Savage: A Tribute to Lester Dent,* edited by Robert Weinberg (Weinberg, 1974).

8. "According to Dent, a reference to radar": *Doc Savage: His Apocalyptic Life,* Philip José Farmer (Doubleday, 1973).

   The Man of Bronze, Lester Dent (under the pen name Kenneth Robeson) (Street and Smith, 1933); reprinted in *Doc Savage* # 14 (Nostalgia Ventures, 2008).

9. (footnote) "'Ralph 124C 41+'": The relevant paragraph, containing a detailed description of what we would today term "radar," is reproduced in *Alternate Worlds: The Illustrated History of Science Fiction,* James Gunn (Prentice-Hall, 1975).

10. "What determines these transition rates": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles,* Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974); *QED: The Strange Theory of Light and Matter,* Richard P. Feynman (Princeton University Press, 1988).

第15章 “死光”：天使还是魔鬼？

1. “the demand for Buck Rogers– and Flash Gordon–inspired toy ray guns”: *Raygun*, Eugene W. Metcalf and Frank Maresca, photographed by Charles Bechtold (Fotofolio, 1999).

2. "At his press conference in 1960, Maiman was peppered": *The Laser Odyssey*, T. H. Maiman (Laser Press, 2000).

3. "scientists from Bell Labs were instructed by management": "Bell Labs and the Ruby Laser," D. F. Nelson, R. J. Collins, W. Kaiser, *Physics Today* 63, 40 (2010).

4. *Goldfinger*, written by Richard Maibaum and Paul Dehn and directed by Guy Hamilton (Metro-Goldwyn-Mayer, 1964).

5. "The circular buzz saw of the 1959 novel": *Goldfinger*, Ian Fleming (Jonathan Cape, 1959).

6. "How can one ensure that all the electrons residing in the laser levels": *Lasers and Holography: An Introduction to Coherent Optics*, 2nd edition, Winston Kock (Dover, 1981).

7. (footnote) "a mixture of two gases, helium and neon": *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe*, Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

8. (footnote) "the above argument applies to electric dipole transitions": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974); *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Richard P. Feynman (Princeton University Press, 1988).

9. "The device produces *l*ight *a*mplification by stimulated *e*mission of *r*adiation": *Lasers and Holography: An Introduction to Coherent Optics*, 2nd edition, Winston Kock (Dover, 1981).

10. "sent out from a lab on Earth": *They All Laughed: From Light Bulbs to Lasers: The Fascinating Stories Behind the Great Inventions That Have Changed Our Lives*, Ira Flatow (Harper Perennial, 1992).

11. "Both of these elements . . . are thus chemically inert": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

12. "Digital video discs (DVDs) and compact discs (CDs)": *How Everything Works: Making Physics Out of the Ordinary*, Louis A. Bloomfield (John Wiley and Sons, 2008).

13. "Birth of the Death Ray,": *Dr. Solar—Man of the Atom* # 16, written by Paul S. Newman and drawn by Frank Bolle (Gold Key Com-

14. ics, June 1966), reprinted in *Dr. Solar—Man of the Atom*, vol. 2 (Dark Horse Books, 2005).

15. "the number of Gillette razor blades they could melt through": *They All Laughed: From Light Bulbs to Lasers: The Fascinating Stories Behind the Great Inventions That Have Changed Our Lives*, Ira Flatow (Harper Perennial, 1992).

16. "Superman removes the thick cataracts that have blinded a companion": "A Matter of Light and Death," *Action* # 491, written by Cary Bates and drawn by Curt Swan (DC Comics, Jan. 1979).

17. "Eight years later, Dr. Stephen Trokel": *Excimer Lasers in Ophthalmology*, edited by David S. Gartry (Informa Healthcare, 1997).

18. *The South Pole Terror*, Lester Dent (under the pen name Kenneth Robeson) (Street and Smith, 1936); reprinted in *Doc Savage* # 11 (Nostalgia Ventures, 2007).

第16章 半导体和二极管

1. "robots would break free": *Follies of Science: 20th Century Visions of Our Fantastic Future,* Eric Dregni and Jonathan Dregni (Speck Press, 2006).

2. "The Challengers were four adventurers": *Showcase* # 6, written by Dave Wood and drawn by Jack Kirby (DC Comics, Jan.–Feb. 1957); reprinted in *Challengers of the Unknown Archives,* vol. 1 (DC Comics, 2003).

3. "The Challengers' challenge": "ULTIVAC is Loose!," *Showcase* # 7, written by Dave Wood and drawn by Jack Kirby (DC Comics, Mar.–Apr. 1957); reprinted in *Challengers of the Unknown Archives,* vol. 1 (DC Comics, 2003).

4. "In 1946, scientists at the University of Pennsylvania": *Quantum Legacy: The Discovery That Changed Our Universe,* Barry Parker (Prometheus Books, 2002).

5. "a Bell Labs scientist, Russell Ohl": *Crystal Fire: The Birth of the Information Age,* Michael Riordan and Lillian Hoddeson (W. W. Norton and Co., 1997).

6. "Semiconductors make convenient light detectors": Ibid.

7. "smoke detector": *The Way Things Work*, David Macaulay (Houghton Mifflin, 1988); *How Everything Works: Making Physics Out of the Ordinary*, Louis A. Bloomfield (John Wiley and Sons, 2008).

8. "The Shadow, who in reality is Lamont Cranston, wealthy man-about-town": *The Shadow Scrapbook*, Walter B. Gibson (Harcourt Brace Jovanovich, 1979).

9. *Death Stalks the Shadow*, author unknown (original air date October 9, 1938, on the Mutual Network).

10. "when different chemical impurities are added": *Introduction to Solid State Physics*, 7th edition, Charles Kittel (John Wiley and Sons, 1995).

11. "the junction between the p-type and n-type": *Crystal Fire: The Birth of the Information Age*, Michael Riordan and Lillian Hoddeson (W. W. Norton and Co., 1997).

12. "Solid-state semiconductor diodes": *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition, S. Sze (Wiley-Interscience, 1981); *Electronics: Circuits and Devices*, 2nd edition, Ralph J. Smith (John Wiley and Sons, 1980).

13. two regions of an identical semiconductor are separated by a very thin insulator": Ibid.

14. "In 1939, Russell Ohl, a scientist at Bell Labs, was studying the electrical properties of semiconductors": *Crystal Fire: The Birth of the Information Age*, Michael Riordan and Lillian Hoddeson (W. W. Norton and Co., 1997).

15. "a light-emitting diode (LED) is a pn junction": *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition, S. Sze (Wiley-Interscience, 1981); Electronics: Circuits and Devices, 2nd edition, Ralph J. Smith (John Wiley and Sons, 1980).

16. "In the past thirty years the luminosity of these devices": "From Transistors to Lasers to Light-Emitting Diodes," Nick Holonyak

Jr., *MRS Bulletin*, 30, 509 (2005); "The Quest for White LEDs Hits the Home Stretch," Robert F. Service, *Science* 325, 809 (2009).

第17章 晶体管和闪存设备

1. "the invention of the transistor": *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution,* T. R. Reid (Random House, 2001).

2. "the field-effect structure": *Crystal Fire: The Birth of the Information Age,* Michael Riordan and Lillian Hoddeson (W. W. Norton and Co., 1997).

3. "In 1958, just a year after the Challengers": Ibid.

4. "Estimates of the number of transistors": *Astronomy: The Solar System and Beyond,* 2nd edition, Michael A. Seeds (Brooks/Cole, 2001); "One Billion Transistors, One Uniprocessor, One Chip," Yale N. Patt, Sanjay Patel, Marius Evers, Daniel H. Friendly, and Jared Stark, *IEEE Computer* (September 1997).

5. "the transport of a single electron can be detected": "The Single Electron Transistor," M. A. Kastner, *Rev. Mod. Phys.,* 64, 849 (1992); "Artificial Atoms," Marc A. Kastner, *Physics Today* (January 1993).

6. "a complex literature using an alphabet consisting of only two letters": *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution,* T. R. Reid (Random House, 2001).

7. "Flash memory devices add a second metal electrode": "A Floating-Gate and Its Application to Memory Devices," D. Kahng and S. M. Sze, *The Bell System Technical Journal* 46 (1967), p. 1288; "Introduction to Flash Memory," R. Bez, E. Camerlenghi, A. Modelli, and A. Visconti, *Proceedings of the IEEE* 91 (2003), p. 489; "Reviews and Prospects of Non-Volatile Semiconductor Memories," F. Masuoka, R. Shirota, and K. Sakui, *IEICE Transactions* E 74 (1991), p. 868.

8. "What's the point of the second metal layer": "Volatile and Non-Volatile Memories in Silicon with Nano-Crystal Storage," S. Ti-

wari, F. Rana, K. Chan, H. Hanafi, W. Chan, and D. Buchanan, *IEDM Technical Digest* (1995), p. 521.

9. *Amazing Stories* (Teck Publications, December 1936).

10. "Wrist phones that are capable of video transmission": "Bell Labs Reports Progress on 'Dick Tracy' Watch," *APS News* 8, 6 (June 1999); "Yesterday's Dreams and Today's Reality in Telecommunications," Robert W. Lucky, *Technology in Society* 26 (2004), p. 223.

第18章 自旋电力学和硬盘驱动器

1. "devices characterized as 'spintronic'": "Spintronics," David D. Awschalom, Michael E. Flatte, and Nitin Samarth, *Scientific American* (June 2002).

2. "'giant magnetoresistance'": "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices," M. N. Baibich , J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, *Physical Review Letters* 61 (1988), p. 2472; "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange," G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, *Physical Review B* 39 (1989), p. 4828.

3. "In any real metal wire there will be defects": *Introduction to Solid State Physics,* 7th edition, Charles Kittel (John Wiley and Sons, 1995).

4. "Imagine a flow of electrons perpendicular": "Spintronics," David D. Awschalom, Michael E. Flatte, and Nitin Samarth, *Scientific American* (June 2002).

5. "magnetic sensors on hard drives that employ another quantum mechanical phenomenon—tunneling": "Frontiers in spin-polarized tunneling," Jagadeesh S. Moodera, Guo-Xing Miao, and Tiffany S. Santos, *Physics Today* (April 2010).

6. "the first (expensive) transistor radio": *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution,* T. R. Reid (Random House, 2001).

第19章 X 射线视力和核磁共振成像

1. *X: The Man with the X-ray Eyes*, written by Robert Dillon and Ray Russell and directed by Roger Corman (Alta Vista Productions, 1963).

2. "Associated with the spin is a small intrinsic magnetic field": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

3. "The idea begins to form": *How Does MRI Work? An Introduction to the Physics and Function of Magnetic Resonance Imaging*, Dominik Weishaupt, Victor D. Koechli, and Borut Marincek (Springer, 2008).

4. "spatial resolution throughout a cross section": *Naked to the Bone: Medical Imaging in the Twentieth Century*, Bettyann Holtzmann Kevles (Rutgers University Press, 1997).

5. "functional magnetic resonance imaging": *Introduction to Functional Magnetic Resonance Imaging: Principles and Techniques*, Richard B. Buxton (Cambridge University Press, 2002).

6. *The Demolished Man*, Alfred Bester (Shasta Publishers, 1953).

7. *More Than Human*, Theodore Sturgeon (Farrar, Straus and Young, 1953).

8. *The Cosmic Rape*, Theodore Sturgeon (Pocket Books, 1958).

9. *Village of the Damned*, written by Stirling Silliphant, Wolf Rilla, and Ronald Kinnoch and directed by Wolf Rilla (Metro-Goldwyn-Mayer, 1960).

10. "to directly discern a person's thoughts and intentions": "The Brain on the Stand: How Neuroscience Is Transforming the Legal System," Jeffrey Rosen, *The New York Times Magazine* (March 11, 2007); "Duped," Margaret Talbot, *The New Yorker* (July 2, 2007); "Head Case," Virginia Hughes, *Nature* 464, 340 (March 18, 2010).

第20章 量子计算机和量子通信

1. "In this way the 'ones' and 'zeros'": *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution*, T. R. Reid (Random House, 2001).

2. "analog-to-digital converter": *How Everything Works: Making Physics Out of the Ordinary*, Louis A. Bloomfield (John Wiley and Sons, 2008).

3. "the newest multitouch versions": "Hands-On Computing," Stuart F. Brown, *Scientific American* (July 2008).

4. "'semiconductor spintronic' devices": "Spintronics," David D. Awschalom, Michael E. Flatte, and Nitin Samarth, *Scientific American* (June 2002).

5. "resulting temperature rise . . . can limit the integrated circuit's performance": Electronics: Circuits and Devices, 2nd edition, Ralph J. Smith (John Wiley and Sons, 1980).

6. "A 'quantum computer' is a different beast entirely": *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer*, George Johnson (Vintage Books, 2003).

7. "A small-scale prototype quantum computer": "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring," Peter Shor, *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, p. 124 (IEEE Computer Society Press, 1994); an accessible summary of Shor's algorithm can be found in Chapter 5 of *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer*, George Johnson (Vintage Books, 2003).

8. *Transformers*, written by Roberto Orci and Alex Kurtzman and directed by Michael Bay (Dreamworks, 2007).

9. "the reason that the quantum ribbon can represent all four possible outcomes simultaneously": *Teleportation: The Impossible Leap*, David Darling (John Wiley and Sons, 2005).

10. "Einstein smelled a rat in this scenario": Ibid.; *The God Effect: Quantum Entanglement, Science's Strangest Phenomenon*, Brian Clegg (St. Martin's Griffin, 2006).

11. "'spooky action at a distance'": *Einstein: His Life and Universe*, Walter Isaacson (Simon and Schuster, 2007).

12. "Books have been written over the question": And I'm not kidding! See, for example, *The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation*, edited by D. Bouwmeester, A. K. Ekert, and A. Zeilinger (Springer-Verlag, 2000); *Entanglement: The Greatest Mystery in Physics*, Amir D. Aczel (John Wiley and Sons, 2002); *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer*, George Johnson (Vintage Books, 2003); *Quantum Computing*, 2nd edition, Mika Hirvensalo (Springer-Verlag, 2004); *Teleportation: The Impossible Leap*, David Darling (John Wiley and Sons, 2005); *The God Effect: Quantum Entanglement, Science's Strangest Phenomenon*, Brian Clegg (St. Martin's Griffin, 2006); *The Age of Entanglement: When Quantum Physics Was Reborn*, Louisa Gilder (Alfred A. Knopf, 2008).

13. "the two electrons' wave functions must remain 'entangled'": *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer*, George Johnson (Vintage Books, 2003).

14. "recent experiments in 'teleportation'": *Teleportation: The Impossible Leap*, David Darling (John Wiley and Sons, 2005).

15. "experiments . . . concerning two entangled quantum entities": "Experimental Entanglement Swapping: Entangling Photons That Never Interacted," Jian-Wei Pan, Dik Bouwmeester, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, *Physical Review Letters* 80, 3891 (1998), "Experiment and the Foundations of Quantum Physics," Anton Zeilinger, *Reviews of Modern Physics* 71 (1999), p. S288.

16. "from a 1998 issue of the adventures of the Justice League of America": *JLA* # 19, written by Mark Waid and drawn by Howard Porter (DC Comics, 1998).

第21章 太阳能电池和纳米技术

1. "'cavorite'": Discovered by Dr. Cavor as described in *The First Men in the Moon*, H. G. Wells (George Newnes, 1901).

2. "how much energy it takes to lift": *Conceptual Physics*, Paul G. Hewitt (Prentice Hall, 2002).

3. "every chemical reaction . . . on the order of an electron Volt": *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Robert Eisberg and Robert Resnick (John Wiley and Sons, 1974).

4. "prototype jet packs have been able to keep test pilots aloft": *Jetpack Dreams: One Man's Up and Down (But Mostly Down) Search for the Greatest Invention That Never Was*, Mac Montandon (Da Capo Press, 2008).

5. *Iron Man*, written by Mark Fergus, Hawk Ostby, Art Marcum, and Matt Holloway and directed by Jon Favreau (Marvel Studios, 2008).

6. "According to the World Health Organization": "How Hard Is It to Convert Seawater to Fresh Drinking Water?" Ethan Trex, *Mental Floss* (August 2009).

7. "Global consumption of energy, which in 2005": *Energy*, Vaclav Smil (Oneworld Publications, 2006).

8. "The surface of the Earth receives": Ibid.

9. "present production capacity": "High Growth Reported for the Global Photovoltaic Industry," Reuters (Mar. 3, 2009); "A Solar Grand Plan," Ken Zweibel, James Mason, and Vasilis Fthenakis, *Scientific American* (Jan. 2008).

10. "two scientists, Johannes Bednorz and Karl Müller": *The Path of No Resistance: The Story of the Revolution in Superconductivity*, Bruce Schechter (Simon and Schuster, 1989).

11. "'thermoelectrics'": *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, edited by D. M. Rowe (CRC, 2005).

12. "extract electrical power from random vibrations involves nanogenerators": "Self-Powered Nanotech," Zhong Lin Wang, *Scientific American* (January 2008); "Nanogenerators Tap Waste Energy to Power Ultrasmall Electronics," Robert F. Service, *Science* 328, 304 (2010).

13. "In a battery, making use of essentially a reverse electrolysis process": *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, 2nd Edition, Isidor Buchmann (Cadex Electronics, 2001); *The Battery: How Portable Power Sparked a Technological Revolution*, Henry Schlesinger (Smithsonian, 2010).

14. "improvements in the energy content and storage capacity of rechargeable batteries": *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, 2nd Edition, Isidor Buchmann (Cadex Electronics, 2001)

15. "Nanotextured electrodes": "Nanostructured Electrodes and the Low-Temperature Performance of Li-Ion Batteries," Charles R. Sides and Charles R. Martin, *Advanced Materials*, 17, 128 (2005); "High-Rate, Long-Life Ni-Sn Nanostructured Electrodes for Lithium-Ion Batteries," J. Hassoun, S. Panero, P. Simon, P. L. Taberna, and B. Scrosati, *Advanced Materials*, 19, 1632 (2007).

16. "silicon nanoscale wires": "High-Performance Lithium Battery Anodes Using Silicon Nanowires," C. K. Chan, H. Peng, G. Liu, K. McIlwrath, X. F. Zhang, R. A. Huggins, and Y. Cui, *Nature Nanotechnology* 3, 31 (2008).

17. "Nanoscale filaments woven into textiles": "Smart Nanotextiles: A Review of Materials and Applications," S. Coyle, Y. Wu, K.-T. Lau, D. DeRossi, G. Wallace, and D. Diamond, *Materials Research Society Bulletin* 32 (May 2007), p. 434.

18. "highly refined pharmaceutical delivery systems": "Less Is More in Medicine," A. Paul Alivisatos, *Scientific American Reports* 17 (2007), p. 72.

后记

1. "Buck Rogers newspaper strips": *Buck Rogers in the 25th Century: The Complete Newspaper Dailies*, vol. 1, *1929–1930*, written by Philip Nowlan and drawn by Richard Calkins (Hermes Press, 2008).

2. "New Wiring Idea May Make the All-Electric House Come True,": *Science Illustrated* (May 1949).

3. "in 1960 sales of *Superman* comics": *The Ten-Cent Plague: The Great Comic-Book Scare and How It Changed America,* David Hajdu (Farrar, Straus and Giroux, 2008).

4. *Adventure Comics* # 247, written by Otto Binder and drawn by Al Plastino (DC Comics, 1958); reprinted in *Legion of Superheroes Archives,* vol. 1 (DC Comics, reissue edition, 1991).

5. *Adventure* # 321, written by Edmond Hamilton and drawn by John Forte (DC Comics, June 1964); reprinted in *Showcase Presents Legion of Superheroes,* vol. 1 (DC Comics, 2007).

6. "Similarly, over at Marvel Comics": See, for example, *Marvel Masterworks Atlas Era Tales to Astonish,* vol. 1 (Marvel Comics, 2006) and vol. 2 (Marvel Comics, 2008); *Marvel Masterworks Atlas Era Tales of Suspense,* vol. 1 (Marvel Comics, 2006) and vol. 2 (Marvel Comics, 2008); *Amazing Fantasy Omnibus* (Marvel Comics, 2007).

7. *Tales to Astonish* #13, "I Challenged Groot! the Monster from Planet X!" written by Stan Lee and Larry Lieber and drawn by Jack Kirby (Marvel Comics, Nov. 1960); reprinted in *Marvel Masterworks Atlas Era Tales to Astonish,* vol. 2 (Marvel Comics, 2008).

8. *Strange Tales* # 90, "Orrgo . . . the Unconquerable," written by Stan Lee and Larry Lieber and drawn by Jack Kirby (Marvel Comics, Nov. 1961).

图片说明

The copyrighted DC Comics, Marvel Comics, Gold Key Comics, Tribune Media Syndicate, King Features Syndicate, Experimenter Publishing, Stellar Publishing, Teck Publishing, and Dille Family Trust illustrations in this book are reproduced for com- mentary, critical, scientific, and scholarly purposes. The copyright information anddates adjacent to the illustrations refer to when the illustrations were first published.

All line drawings copyright James Kakalios and Christopher Jones.

Figure 21: Photograph by Alan Richards, courtesy of AlP Emilio Segre Visual Archives.

Figure 25: Data from Figure 1 from “The Natural Distribution of Tritium,” Sheldon Kaufman and W. F. Libby, *Physical Review* 93, p.1337 (1954); http://link.aps.org/abstract/PR/v93/p1337.

The copyrights and trademarks in the Challengers of the Unknown, June Robbins,ULTIVAC, Felix Hesse, Floyd Barker, the Atom, Wonder Woman, Plastic Man, Green Lantern, Ken Warren, Dr. Manhattan, Jon Osterman, and related logos and indica areowned by DC Comics Inc.

The copyrights and trademarks in Groot, Leslie Evans, Evans’s wife, town sheriff, by-stander, and related logos and indica are owned by Marvel Entertainment Group Inc.

The copyrights and trademarks in Dr. Solar, Dr. Clarkson, and related logos and indicaare owned by Random House Inc.

The copyrights and trademarks in Dick Tracy and Sam Catchem, and related logosand indica, are owned by Tribune Media Syndicate Inc.

The copyrights and trademarks in Dagwood Bumstead, dog Daisy and

puppies, Alex-ander (Junior) Bumstead, Cookie Bumstead, Mandrake the Magician, and related logos and indica are owned by King Features Syndicate Inc.

The copyrights and trademarks in Buck Rogers and Wilma Deering, and related logosand indica, are owned by Dille Family Trust Inc.

The cover illustrations of *Amazing Stories*, August 1928, December 1936; *Science* Wonder Stories , *February 1930;* Air Wonder Stories , *April 1930; and related logos and* indica are owned by their respective copyright holders.

图书在版编目（CIP）数据

魔鬼物理学. 2，迷人又有趣的量子力学 /（美）詹姆斯·卡卡里奥斯著；孔垂鹏，张彧彧译. -- 北京：中信出版社，2018.2
书名原文：The Amazing Story of Quantum Mechantics
ISBN 978-7-5086-8475-8
I. ①魔… II. ①詹…②孔…③张… III. ①物理学–普及读物 IV. ①O4-49
中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第312454号

魔鬼物理学2：迷人又有趣的量子力学
著者：[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯
译者：孔垂鹏 张彧彧
出版发行：中信出版集团股份有限公司
（北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编100029）
电子书排版：萌芽图文

中信出版社官网：http://www.citicpub.com/
官方微博：http://weibo.com/citicpub
更多好书，尽在中信书院
中信书院：App下载地址https://book.yunpub.cn/（中信官方数字阅读平台）
微信号：中信书院



$E=MC^2$

魔鬼物理学 3

超级英雄故事里的物理学

[美] 詹姆斯·卡卡里奥斯◎著
（James Kakalios）
徐立子◎译



让蜘蛛侠演示摆球振荡，
让闪电侠解释牛顿运动定律，
让万磁王展示电磁感应，
这样学物理是不是更好玩儿？

THE PHYSICS OF SUPERHEROES

More Heroes! More Villains!
More Science!

中信出版集团

魔鬼物理学.3，超级英雄故事里的物理学

[美]詹姆斯·卡卡里奥斯 著
徐立子 译

中信出版社

目录

献给

推荐序

新版自序

自序

导论 科学是如何拯救超级英雄的

第一部分 力学

- 第1章 超人诞生
- 第2章 氪星引力的秘密
- 第3章 格温·斯黛西之死
- 第4章 闪电的真相
- 第5章 蚁人的大世界
- 第6章 水下的英雄
- 第7章 蜘蛛侠荡起来
- 第8章 蚁人的阿喀琉斯之踵
- 第9章 陀螺人为什么能转不停？
- 第10章 蚁人真的听不见也看不见吗？
- 第11章 闪电侠与狭义相对论

第二部分 能量

- 第12章 吃货闪电侠

第13章 缺失的功
第14章 冰人如何克敌制胜？
第15章 钢铁侠遭遇强敌
第16章 静电的意外魔力
第17章 超人教给蜘蛛侠的电学知识
第18章 电王跑起来就成了万磁王
第19章 万磁王跑起来就成了电王
第20章 X教授的超级力量
第三部分 现代物理学
第21章 微观宇宙之旅
第22章 平行宇宙究竟在哪儿？
第23章 幻影猫为什么能够隧穿？
第24章 被固体物理学痛击的钢铁侠
第25章 制服的诱惑
第四部分 例外的变异
第26章 超级英雄的失误
后记
致谢
附录一 重要公式
附录二 推荐书目
图片说明
版权页

献给泰蕾兹

推荐序

无论从哪个角度来说，歪心狼（Wile　E.）都不能算作一个超级英雄，但我必须承认，它总能让我想到物理学。它是个倒霉的大坏蛋，动画中的每一集，它都在徒劳无功地追赶哔哔鸟（Road　Runner），就像西西弗斯一样，但最后它总能捡回一条命。作为一个痴迷看电视的小男孩，当我看到歪心狼跑离悬崖，停在半空，意识到脚下空空之后才掉下去的场景时，我还是会产生些许怀疑。我总觉得，不管一个人是否意识到重力的存在，都不会影响重力发生作用。

这个例子跟超级英雄没什么关系，里面只是提到了电视动画片的角色，而不是漫画里的角色，但我之所以把这个问题提出来，是因为它说明了有关物理教学的很重要的一点：没有什么东西比挑战错误的见解更让人印象深刻的。事实上，一些专门研究物理教学的人认为，只有鼓励学生挑战自己的错误观念，才能帮助他们真正掌握你教给他们的东西。我不知道这是不是真的，但我确实知道，如果你想了解大众的误解，那么追溯其文化见解的源头是一个很好的做法。如果这意味着要研究超人或《星际迷航》，我也完全赞成！

然而，千万不要以为我把漫画与大众的误解相提并论是想要诋毁前者。完全不是！事实上，漫画书中有时候说的是对的，詹姆斯·卡卡里奥斯在这本书（讲述了从氪星的引力到《X战警》中的量子物理学的广泛知识）的导论中提到，学生们经常抱怨，在物理学入门课上学到的知识跟他们毕业之后要面对的真实生活一点儿关系都没有。但当他们学习了超级英雄故事里的物理学之后，这种抱怨再也没有出现过！

有人可能会想，对于学生而言，超人是否比滑轮、绳子和斜面更真实。但学生不会抱怨的真正原因无疑是漫画中的例子更有趣，而斜面很无聊。这或许是我们应该学习超级英雄故事里的物理学的一个最重要的原因了。你不仅可以了解到许多有趣的物理学知识，比如日常现象或深奥的现代科学，而且思考过程本身也很有趣。此外，像量子力学这样的学科听起来似乎有点儿吓人，但谁又会被可爱的幻影猫吓到呢？

那些年轻时痴迷过漫画的人可能还记得，他们有时会憧憬我们的世

界是否也能像漫画里超级英雄生活的世界那样激动人心、精彩纷呈，但这种想法往往令他们怅然若失。事实上，在过去的400年里，科学向我们揭示了大自然的种种神奇，了解这些科学知识其实是充满乐趣和激动人心的事情。真相远比小说更不可思议，哪怕是漫画小说。找出真相的过程更是妙趣横生。

劳伦斯·克劳斯

俄亥俄州克利夫兰

新版自序

当我的研究生毕业论文即将完成的时候，我的论文导师对我说的话让我印象深刻：没有什么科学研究是“已完成”的。无论你得到了什么样的答案，总还有一些开放性问题有待解决——松弛的线还需拉紧。本书的英文版第一版出版之后，我发现写书也是一样，没有哪本书可以说是彻底完成了的。作者把稿子交给编辑，经过编校和印刷等环节，书终于摆在了书店的书架上，而此时线仍然是松弛的，因为作者总有更多的话想说，或者想把说过的话说得更好。

因此，很高兴出版社给我修订本书的机会，于是就有了第二版。2005年本书首次出版后，我从读者那里得到了很多反馈，他们提出了很多值得关注的话题。我估算了超人在纵身一跃跳上高楼之前需要用多长时间起跳，这引起了许多读者友好的讨论，我很高兴有机会在第二版中对这个问题进行详细阐述。

此外，第一版出版后不久，我又找到了很多可以解释物理学原理的超级英雄漫画插图。如果我能早点儿发现它们，肯定会将其收录在书中。第二版还涉及流体力学、角动量以及材料科学，这些内容分布在关于海王、尖峰人、旋风以及其他美国正义联盟和复仇者联盟成员的章节里。为了优化问题讨论的流程，我对力学部分的章节进行了重新排序，并对每一章都进行了较大程度的修订。此外，数据分析表明，出第二版时有12.7%的笑话已经过时了，这些笑话在某些情况下是“三点法则”的反例（两句妙语之后总会跟着一句无聊的话）。我希望第二版可以让你们有趣、高效地学习物理学的基本原理。

除了我在第一版中感谢的所有人外，我还要对在第二版中给予我帮助的人表示感谢。这一版的英文编辑——哥谭出版社的帕特里克·马利根非常优秀且有见地。我要感谢我的儿子托马斯，他仔细阅读了新增章节，并提出了改进建议，这让我引以为豪。负责运营海王的非官方网站的劳拉·焦瓦格，以及海王朝拜网站的罗布·凯利，他们提供了很多必不可少的关于海王的信息和图片，我要感谢他们付出的时间和精力。我还要再次感谢珍妮·艾伦帮忙收集了第二版新增的各类数据。

自序

我从小就是一个漫画迷，但跟大多数漫画迷一样，高中的时候我放弃了这一爱好，转而去追女孩子了。我母亲理所当然地趁机扔掉了我的所有“藏品”。几年以后，我读研究生时，又重新捡起了这个爱好，我把看漫画当成是疏解写论文压力的一种方式。现在，作为一个成年人，我的漫画藏品已大致恢复到高中时期的规模（我妻子称其为“火灾隐患”），但为了安全起见，我还是不让我母亲靠近我的藏品。

1998年我在明尼苏达大学当物理老师，学校开了一门新课程叫作“新生座谈会”。这是面向大学新生开设的一种小型的座谈会形式的课程，学生可以得到学分，但并不绑定具体课程。学校鼓励教授们发掘不落窠臼的话题，具体课程包括生物伦理学和人类基因组，红色（化学课程），贸易与全球经济，从沙盘到华尔街的复杂系统等。2001年，我开设了一门物理学课程，叫作“我从漫画里学到的物理学万象”。这门课程讨论的是传统物理学的基本知识，但我没有使用弹簧承受的重量、从斜面上滑落的物体等例子，我所用的例子都来自超级英雄四色漫画，着重讲述的是漫画里正确运用物理学知识的场景。

尽管本书的灵感来源于那门课，但这并不是一本教材。本书面向非专业人士，即那些希望以不太痛苦的方式学习现代科技生活背后的基础物理学知识的读者。书里讨论的话题包括力与运动、能量守恒、热力学、电与磁、量子力学、固体物理学和材料科学；书中也解释了真实的应用案例，比如汽车安全气囊、晶体管、微波炉等。我希望读者能全身心地享受这杯超级英雄冰激凌圣代，而不会意识到我偷偷摸摸给你吃了些菠菜。

本书既要献给漫画书的忠实粉丝，也要献给那些分不清蝙蝠侠和人蝠的人。因此，我会讲一讲漫画里那些超级英雄的历史和背景。为了介绍某个特定的超级英雄或者故事所涉及的物理学知识，我会用到不同漫画里的关键情节。所以，对于没有看过这些漫画的人来说，可要小心剧透的危险了。

如果读者希望找到相关引文的原始资料来源，可以参看本书末尾。

我列出了参考书目以及最新版本的漫画书单。漫画封面上印刷的日期并不表示它初次上市的时间。为了延长销售时间，这个日期表示的是这本漫画退货给出版商的时间。为了吸引爱好收藏首期杂志的新读者，有时候漫画会重新开始编号，但漫画名称保持不变。如果没有特别说明，这些编号指的都是首印时使用的编号。我在本书最后的注释里列出了每本书的编剧或漫画师，有些人（墨线稿作者）没有出现并不代表他们对于最终的漫画作品没有贡献（这和“追本溯源”不是一码事儿），而只是反映了一个客观事实，即编剧或漫画师对某一个漫画场景中的物理学知识负主要责任。

漫画里关于物理学的所有讨论都会引起物理学家和漫画粉丝的仔细审视，这两种人都以其对细节的关注而著称。我所选取的每一个案例刚好都可以解释一个特定的物理学原理。有时，最新一期的内容可能会与我在本书中解释的超能力的原理相矛盾。考虑到这些人物在不同的漫画里已经存在了半个多世纪，肯定会有与我所做出的解释相反的例子。因此，在多数情况下，对超级英雄的超能力的物理学解释只是提供了对他们这种天赋的一种可能的解读，漫画迷们敬请注意，本书并不是要对那些人物的超能力和经历做出一种确切的解释。

此外，也请物理学同行们注意，本书是写给非专业读者的。我会尽可能地把事情简单化，但我也承认，现实世界中存在很多不完美的地方，也更为复杂。如果对书中的多数内容进行详尽的讨论，几本书也讲不完，正如在阿兰·摩尔和戴夫·吉本斯所著的《守望者》中曼哈顿博士最后说的那句话：“万物无终点，阿德里安。万物永无终点。”

物理学世界中所使用的语言从本质上说都带有数学性质。这是一个深奥的哲学问题（物理学家尤金·维格纳称其为“数学的不可思议的有效性”），所有研究过这个问题的人都深感困惑与不安。在一本关于超级英雄漫画的书里，我很想一点儿数学都不涉及。但这绝对是骗人的，就如同在一本介绍毕加索的书里却没有配上他的画，或者在一本关于爵士乐历史的书中没有附赠CD（激光光盘）一样。想要好好讨论物理学，数学必不可少。

读者可能会说自己不懂数学，或者没办法用数学思维思考。但在本书里，我们需要知道的就只是1/2+1/2=1。如果1/2+1/2=1对你来说还可以接受，那么2×（1/2）=2/2=1应该也不难，很显然两个半个就是一个。这简单到让你不敢相信自己已经用上了代数知识（自从高中毕业后，你就再没想过会用上它）。

很多学生早就发现，代数中有个小窍门：如果有一个等式成立，比如1=1，那么我们可以在等式两边同时加上、减去、乘以或者除以（除数不为0）任一数字，等式仍然成立。所以，如果我们在1=1这个等式的左边和右边同时加上2，就会得到1+2=1+2或者3=3，这个等式仍然成立。如果我们在1=1这个等式的左边和右边同时除以2，就会得到1/2=1/2。因为1=1，所以1/2+1/2=1，即2/2=1。现在我跟各位读者约定：如果在出现数学等式的时候，你能做到不紧张，那么我用到的数学知识也不会比这个例子更复杂。数学能够让你畅通无阻，你的数学知识有益无害。但如果你想计算本书之外的某种情况下的速度或者力，你也可以应用本书教授的方法。不管怎么说，我向你保证，书的最后绝对没有小测验！

导论 科学是如何拯救超级英雄的

我曾经想，我的学生会不会觉得学物理是在浪费时间，但这个疑虑几年前就已经消散了。有一天我吃完午饭，回到学校的物理教学楼，听到迎面走来的两个学生正在聊天。从他们的表情以及我听到的只言片语中，我猜测他们应该刚考完分级考试。接下来我听到了如下对话（出于礼貌的考虑，我对其中的脏话做了删节处理）。

高个子学生向他的朋友抱怨道：“我只想×××低买高卖，我才不想知道什么×××的球从×××悬崖上扔下去是怎么回事。”

从这番话里我们可以知道两件事情：第一，发财的秘诀是低买高卖；第二，传统物理学课堂上的案例在很多学生看来与日常生活毫无关系。

现实世界是复杂的。为了在物理课上把一个概念讲清楚，比如牛顿第二定律或者能量守恒定律，几十年来，物理教师们创造出一大堆程式化的问题，像抛物线运动、动滑轮的承重或者弹簧质点的振动。这些问题实在太抽象了，学生们禁不住抱怨道：“现实生活里什么时候会用到这些东西啊？”

我在教物理课的时候曾玩过一些新花样，就是用超级英雄漫画里的例子来解释物理学定律的应用。这非常有趣，当我在课堂上引用超级英雄漫画里的例子时，我的学生从来不会去想，他们什么时候才会在现实生活中用到这些东西。显然，他们心里都有一个梦想，毕业之后，他们会穿着紧身衣与恶势力抗争，保护我们的城市。作为一名守法公民，我觉得安全感倍增，因为我知道我的科学界同人里有很多人会被视为“疯子”。

我最开始把漫画和大学教育联系起来是在1965年，当时我以12美分的高价买了《动作漫画》（*Action Comics*）的第333期，里面讲述了关于超人的故事。那时候我还不是特别迷恋这位钢铁英雄，只是被书的封面文字所吸引（见图1），据说书里介绍了高等学府的内部运作方式。那时候我还是个孩子，对于大学生活感到很好奇。

《动作漫画》第333期中有一个故事叫“超人的超级失误”，在这个故事里，超人由于对人类做出的杰出贡献，将被授予大都市工程学院的超科学荣誉博士学位（我要指出的是，我在读研究生的时候没听说有这么一个学位）。在这期漫画的封面上，超人身处学校的大礼堂，正用他的热视线在青铜奖状上“写下”自己的名字。他旁边那些穿着毕业礼服的年长教员惊恐万分，因为他们看到的不是超人，而是一条喷火的巨龙。这些幻象都是超人的死对头卢瑟搞的鬼，卢瑟的计划就是不停地扰乱超人的认知，让超人丧失判断力和斗志，从而无法阻止他的邪恶计划。[1]尽管我当时只是一名小学生，但我仍觉得这期漫画对大学生活的这些描述可能不太真实。然而，这个封面上有两点倒是非常准确：第一，所有的大学教授都穿着长袍，戴着帽子；第二，所有的大学教授都是80多岁的白发老人。



© 1965 National Periodical Publications Inc. (DC)

图1 《动作漫画》第333期的封面（描绘了超人造访大都市工程学院的不幸之旅）

这是我第一次意识到漫画和大学可以联系在一起，但绝不是最后一次。后来的几年里我一直兴致勃勃地看漫画，收集漫画。（对我来说，这可不是一种罪恶的享受，因为我觉得根本就没有罪恶的享受这回事。随大溜是没有安全感的表现，你喜欢什么就是什么，你不应该因为自己的兴趣爱好而感到愧疚。）我在看漫画的过程中发现，编剧和漫画师在创作漫画的时候所提到的科学知识经常是正确的，这超出了我的预期。那些对超级英雄漫画不太了解的人可能会很惊讶地发现，漫画里的许多事在科学上可能都说得通，我们确实可以从漫画里学到很多科学知识。

图2就是一个典型的例子，这幅图取材于1958年4月第93期《世界最佳拍档》中的一个场景。国家漫画出版公司（后来叫侦探漫画公司，现在叫DC漫画公司）的超级英雄包括超人、蝙蝠侠和罗宾，《世界最佳拍档》里的每一期都在讲述这三个超级英雄共同冒险的故事。在这一期的故事里，大坏蛋维克多·丹宁在试图偷取“大脑增强机”时，阴差阳错地获得了天才智商。他凭借自己的天才智商犯下了一系列“超级罪行”，引起了蝙蝠侠、罗宾和超人的注意。他的很多计划都被我们的超级英雄挫败了，于是丹宁决定铤而走险，试图找到蝙蝠侠和罗宾的大本营——蝙蝠洞（书里并没有解释为什么找到大本营就能打败蝙蝠侠和罗宾，它只是理所当然地说每个大坏蛋都想知道蝙蝠洞的所在）。



图2 第93期《世界最佳拍档》杂志中的一个场景（获得天才智商的大坏蛋正在讲解自己的计划，他想利用地下冲击波的频散确定蝙蝠洞的位置）

丹宁派出自己的心腹在哥谭市外围埋下炸药，并在他的地震探测仪上观察冲击波。丹宁的理论是穿过洞穴的冲击波速度与穿过岩石的冲击波速度不同，据此就能找到蝙蝠洞的位置。

在这个例子里，大坏蛋维克多·丹宁的做法是有可靠的科学依据的，声速或者冲击波的速度确实会受其所穿过物质的密度的影响。声波需要介质才能传播。在密度较小的介质中，比如空气，分子间的空隙较大，这使得气压波很难传播，远不如水、钢、公寓的薄墙等介质。大致来说，介质密度越大，声音传播速度越快，所以西方电影中的人物总是把耳朵放在钢轨上听声音，以此判断是否有火车即将到达。你可以通过钢轨听到火车振动的声音，而通常这时候火车的距离还很远，根本看不见，而且通过空气传来的声音也会更晚到达。事实上，地质学家正是用声波速度的变化来探测地下油田或者天然气矿藏的位置。然而，漫画里的科学家及其工作方式却与真实情况相差甚远。在同一期《世界最佳拍档》里，就有一处不太科学的描述（见图3）。大脑增强机的发明者约翰·卡尔博士在一次科学会议上介绍了他的最新实验。他吹嘘说，他的设备可以把任何人的智力提高100倍。不幸的是，卡尔指出了一点不足：“目前缺少一项关键要素（来让他的设备运行起来），但我还没找到到底是什么！”这相当于发明了一台能把铅变成金子或者能把水变成油的机器，但只差一个要素就能让机器运转（没人知道到底存不存在这个东西）！在科学会议上，很少有人把这种未完成的工作拿出来介绍（至少不会有意这么做）。维克多·丹宁出席了这次会议（他正是在这次会议上动了偷取大脑增强机的念头，但这台机器存在内在设计上的缺陷），但他被贴上了“邪恶的前科学家”的标签。称丹宁为前科学家是有些道理的，因为对于物理学界，甚至是整个科学界来说，一旦被划归“恶人”的行列，你就会被踢出这个圈子，并被剥夺“科学家”的头衔。



图3 第93期《世界最佳拍档》杂志中的另一个场景（“邪恶的前科学家”维克多·丹宁首次看到了

只缺一个要素的“大脑增强机”）

科学原理与超级英雄故事的结合出现于20世纪40年代（漫画迷称那段时间为“黄金时代”），在20世纪50年代后期和60年代（所谓的“白银时代”）变得更常见。这两个时代之间是漫画的“黑暗时代”，当时漫画的销量直线下滑，超级英雄的概念受到精神病专家、教育家和议员的抨击。漫画所受到的犹如天壤之别的对待存在种种原因，而且有待商榷。由于在本书中，我将主要用超级英雄来解释科学概念，因此有必要先花一点儿时间来介绍一下这些神秘英雄的起源。

超级英雄从哪里来？

在漫画出现之前，先有了连环画[2]。在维多利亚时代的英格兰被戏称为“廉价恐怖小说”的宽幅周报上会刊登一些幽默连环画，它们带有典型的英国音乐厅式娱乐的特点。这些连环画在穷苦大众中的流行触犯了中产阶级的敏感神经。19世纪90年代，约瑟夫·普利策和威廉·伦道夫·赫斯特两大报业巨头展开了激烈的竞争，催生了报纸连环画，这些连环画深受英语说得尚不熟练的新移民的喜爱。于是，报纸连环画成了那时发行量大战的有力武器。事实上，赫斯特报业与理查德·奥特考特极具视觉冲击力的角色——黄孩子（甚至在社论版出现过）是如此密不可分，以至于很多评论家把赫斯特富于煽动力的报纸也戏称为“黄色新闻”。

尽管之前偶有以杂志形式呈现的连环漫画（像1903年的《巴斯特布朗》、1906年的《小尼莫》以及1910年的《马特和杰夫》），但真正意义上的漫画直到1933年才出现。那时，报刊亭里堆满了低俗杂志，10美分就能买到一个原创故事。严格控制成本的一个手段就是用质量很差的纸印刷杂志。这些杂志中有顶着流行标题的悬疑小说，比如《侦探小说周刊》与《黑色面具》（最初刊登了达希尔·哈米特和雷蒙德·钱德勒的作品）；有科幻小说，比如《奇趣故事》和《惊奇故事》（西奥多·斯特金、艾萨克·阿西莫夫和雷·布莱伯利都是从这里起步的）；有恐怖和幻想小说，比如《未知》和《诡丽幻谭》（这是霍华德·菲利普斯·洛夫克拉夫特、罗伯特·欧文·霍华德以及剧作家田纳西·威廉斯的大本营）；还有动作探险小说，比如《阴影》《蜘蛛》《G8和它的撒手锏》《神秘的吴芳》《萨维奇博士》。在全盛时期，某些标题充满噱头的杂志甚至每个月能卖出数十万册。毕竟，在大萧条时期，10美分也不是一笔小

钱。在当时竞争激烈的市场环境中，乔治·亚诺希克、乔治·戴拉寇克、哈里·维尔登贝尔格和麦克斯韦尔·盖恩斯（在成为漫画出版商之前是一名教师）决定碰碰运气，他们把周日报纸副刊上的彩色漫画重新印在小报尺寸的纸上，再折叠成$6^{5}/_{8}$英寸×$10^{1}/_{8}$英寸[3]的小册子（这建立了漫画的标准尺寸，并且沿用至今）。漫画《游行趣事》是随着宝洁公司的优惠券以及类似的赠品免费发放的。最开始印出来的1万本广受欢迎，于是他们决定把下一期贴上10美分的价签，拿到报刊亭去卖。报刊亭的漫画卖得很快（尽管里面的内容都是周日报纸上刊登过的内容），这说明这类“有趣的书”前景一片光明。

报纸连环画通过“分销辛迪加”被卖给本地报纸，这样一来，这些漫画的重印权就被牢牢控制了。为了满足那些没办法保障重印权（或者不愿意掏腰包）的漫画出版社对内容的需求，马尔科姆·维勒–尼科尔松少校雇用了一群急于找工作的年轻画家和作家，创作原创漫画。这些全新的故事被刊载在《新乐漫画》上，由国家联合出版公司出版。有了这些维勒–尼科尔松工作室出品的已画好、上色，且配了文字、即刻可以付印的漫画，出版商们就不用再去承担当时强大的小说杂志开出的高昂价格了。很快，曾占据低俗杂志的故事开始用漫画的方式被讲述出来，各式各样的漫画占据了报刊亭。漫画的题材包括：侦探和警察故事，恐怖元素，滑稽的动物和直白的笑点，冒险英雄，情报机构，拥有神秘力量的反犯罪斗士等。1938年，来自另一个星球的奇怪访客整合了所有这些特点，他拥有远超地球人的力量和能力。

超人是由克利夫兰的两个年轻人杰里·西格尔和约瑟夫·舒斯特创作出来的漫画人物，他们的梦想就是通过创作大众喜爱的报纸冒险连环画赚大钱。他们把埃德加·赖斯·巴勒斯笔下的两个人物——泰山和火星上的约翰·卡特结合起来，创造出与传统的科幻探险小说的主人公截然不同的形象。故事讲述的并不是一个普通地球人到奇怪的陌生星球的旅程（像飞侠哥顿或者巴克·罗杰斯的故事），而是有着神秘力量的外星居民造访地球的经历。这项创新，以及英雄人物所穿的鲜艳的制服（灵感大概来自那时候马戏团里身着制服的大力士），再加上别出心裁地赋予英雄冒险家以秘密身份，使得他们的连环画完全与众不同，但这也导致每一家报纸“分销辛迪加”都断然拒绝了他们的作品。经过4年多的失败，西格尔和舒斯特备感绝望，于是他们打算把超人这个概念兜售给更小众的漫画市场。他们终于找到了一位乐于倾听的听众——年轻的编辑谢尔登·迈耶，他在西格尔和舒斯特粗糙的连环画中看到了市场潜力。维恩·沙利文即将出版的一本新漫画还欠缺一个主线故事，迈耶认为这

个新角色正好可以解燃眉之急。由于没有时间把连环画改成漫画的格式，他们只得把原来的连环画（两周的内容）剪下来，再拼贴成一个13页的故事。然后，他们把连环画中的一幅画作为封面——超人将一辆现代轿车举过头顶，坏人们四散奔逃。1938年6月，第一期《动作漫画》上市，定价10美分。后来的事，就像人们知道的，已被载入历史。

进化生物学告诉我们，随机的突变可能会产生新物种。当这些新物种表现出对变化的环境更强的适应能力时，它们就会占据一个生态位。漫画也是这样，它引起了大萧条时代读者的共鸣，迅速获得了成功。很快，报刊亭里就铺满了超级英雄漫画，每一个超级英雄都有不可思议的能力。

所有这些新角色所拥有的核心特质都与超人截然不同，只为了不再重蹈福塞特公司的惊奇队长的覆辙，该公司被国家漫画出版公司（其拥有西格尔和舒斯特作品的相关法律权利）起诉侵权。这些新的超级英雄大多数只有一种超能力，比如超快的速度（闪电侠和强尼快客）、飞行（鹰侠和黑兀鹰）、力大无穷（时侠和美国队长），也可能一种超能力都没有（蝙蝠侠）。有些超级英雄是靠“科学方法”获得了超能力，比如20世纪40年代出现的闪电侠，他因为在一场化学实验事故中吸入了某种“硬水”[4]而拥有了超级速度；化学家雷克斯·泰勒发明了一种药剂，可以让人拥有一个小时的超强力量和超快速度，他因此成为时侠，致力于打击犯罪；完全不符合征兵条件的史蒂夫·罗杰斯在注射了“超级士兵”血清（在今天，这种东西相当于“类固醇”）之后成为美国队长。

更常见的情况是，主人公的超能力来自神秘或者超自然的力量，比如得到了地球某个隐秘角落的神奇物体，或者是受到了某种辐射。所以，受时代所限，漫画反映的仅仅是流行文化。比如，20世纪40年代，超级英雄绿灯侠偶然得到了古代中国的一盏神秘的绿灯，他用它打造了一枚戒指，戴上戒指的人就可以拥有很多种超能力，但它对木制品无效。从当时的文化背景看，20世纪40年代的世界人民彼此还不够了解。在人们不甚丰富的想象中，远东和刚果还是一片充满魔力和神秘宝物的广袤大地。1959年，绿灯侠的形象被重新塑造，他换上了新制服，新的灯和戒指也都变成了外星物品，戒指对黄色的物体无效则被归因于它存在一些杂质。[5]与此类似的是，绿灯侠的伙伴——鹰侠在20世纪40年代时，是由一位埃及王子化身而成，到了20世纪60年代却变成了纳冈星的星际警察。

这种变化一直持续到现在。1962年，彼得·帕克被一只从物理实验

室里跑出来的受过辐射的蜘蛛咬了一口，获得了蜘蛛侠的超能力；2000年（在2002年的电影里也是一样）重新诠释这个角色时，咬了帕克一口的是从分子生物学实验室里逃出来的一只转基因超级蜘蛛。唯一没有变的是，超级英雄的出现与流行文化中的焦虑情绪密不可分，这种情绪可能来自20世纪40年代的遥远异族，可能来自20世纪60年代的核辐射，也可能来自目前的基因技术。

20世纪30年代后期和40年代的超级英雄形象，反映出大萧条和第二次世界大战时期的社会状况。“二战”结束后，那些在国外一直看漫画的士兵们回到国内，还是继续看漫画，一些出版商为了迎合这些读者的口味，推出了更多面向成年人的充满视觉暴力的漫画故事。一些年轻的编剧和漫画师曾经在军队服役，战时的经历使得他们在战后创作的故事带有一种更严肃，甚至更黑暗的基调。从他们开始，漫画的目标读者就是年青一代。1945年，麦克斯韦尔·盖恩斯结束了与国家漫画出版公司的合作，成立了一家新出版公司叫作“教育漫画”，出版的作品包括《图解科学》《图解美国史》《图解圣经》等。1947年在他不幸离世之后，他的儿子威廉·盖恩斯将公司的名字改为“娱乐漫画”（EC），出版的漫画也改成像《地穴传说》《犯罪悬疑故事》《奇异科学幻想》《恐惧之巅》这样的作品。这些漫画并不适合惊奇队长的读者们，也不是给他们准备的。总有人会发现这一点，并提出不同意见，这只是时间问题。

1953年，弗雷德里克·沃瑟姆博士写了一本畅销书《诱惑无辜》，强烈抨击了这些惊悚故事，认为它们摧毁青少年的心智，导致青少年犯罪。每一代人都会经历这样一个循环，所以在第二次世界大战后，越来越多的家长和政治人士认为流行文化影响了年轻人的想法和习惯。由参议员埃斯蒂斯·基福弗领导的美国参议院青少年犯罪委员会举行了针对漫画与青少年犯罪关系的听证会。一开始，委员会只想集中探讨恐怖和犯罪漫画，但委员会顾问沃瑟姆提出了超级英雄漫画的问题。为了规避政府的审查和监管，几家主要的出版公司建立了一个自律性机构——漫画规则管理局（CCA）。这些出版公司制定了一系列规则，明确规定漫画中不能出现血腥、淫秽、滥用毒品、僵尸和吸血鬼之类的内容，合格的漫画封面上会有漫画规则管理局的认证章。管理局制定的大多数规则几乎让EC公司的漫画全军覆没（唯一幸存的是一部比较新的讽刺漫画《疯狂》）。所有的漫画故事出版前都要交由CCA（CCA雇员的薪水由各个出版公司支付）审批，这有点儿像现在的电影分级委员会。

在20世纪50年代和60年代，漫画规则管理局扮演了一个相当重要的

角色，有了它，家长们就能确信孩子们看的漫画是无害的。但是，随着漫画的核心读者群渐渐长大，漫画规则管理局的影响日渐式微。一个直接的表现就是，封面上印有CCA认证章的漫画书越来越少了。1964年，认证章的大小相当于一枚邮票，即2/3平方英寸[6]（这是一项重要的营销手段，让家长相信书中的内容是适合孩子阅读的）；到1984年，认证章的大小已不到1/4平方英寸；2004年时认证章小到了1/10平方英寸，几乎不太容易看到。（我们说的主要是DC漫画，漫威漫画2001年时就退出了CCA，改用自己的分级体系，类似于电影分级中的PG级、PG–13级和R级。）

主要分销网络的缩水以及电视的竞争造成漫画销量大幅下滑，这几乎使漫画行业遭受灭顶之灾。1953—1956年，只有屈指可数的几种超级英雄漫画还在出版，而在鼎盛的黄金时代，报刊亭里销售的超级英雄漫画有130多种。这一时期，对于还在坚持出版漫画的那些公司来说，只有滑稽的动物故事、西部故事或者青春爱情故事是相对安全的题材。

1956年，为了试水超级英雄市场，国家漫画出版公司决定在《展示橱》第4期中塑造全新的闪电侠形象。《展示橱》各期的销量表明，超级英雄市场已经开始回暖，在后来的几年里，国家漫画出版公司又创造了一系列新人物，包括绿灯侠、原子侠、鹰侠等。漫画书的“白银时代”开始了，从此，超级英雄成为漫画书的支柱。

从《展示橱》第4期开始，漫画故事里就出现了正确的物理学原理。1957年“冷战”高峰时期，苏联发射了“史波尼克”号人造卫星，导致美国国内对于在校学生的科学教育质量产生明显的焦虑情绪。漫画规则管理局的认证章确保了漫画书的内容对于年轻读者是无害的，书中的科学概念则使一些人相信，这些四色的奇幻之旅也有着正向积极的意义。

除了准确的科学知识，白银时代的漫画书里还会出现其他学科的深度知识。比如，《原子侠》第21期“被取消的生日冒险”（作者加纳·福克斯既是一名律师，也是流行科幻杂志的作者）中有一个情节就来自1752年的一段鲜为人知的历史：当时，英国用格里历[7]代替了罗马儒略历，由于新旧历法的转换，少了11天。为了使英国的日期与欧洲其他国家一致，1752年9月2日的下一天变成了9月14日。两期之后，《原子侠》的读者来信栏目中刊载了一名粉丝的信，抱怨角色选得不怎么样，比如法官菲尔丁根本没什么名气。《原子侠》漫画的编辑尤利乌斯·史瓦兹（也叫朱利·史瓦兹），也是1956年重塑闪电侠的那个人，在读者来信栏目里对此进行了申辩。他指出，现在正是读者了解《汤姆·琼

斯》一书的作者——亨利·菲尔丁的好时机，毕竟，原子侠就是这么做的。

有时候，即便与剧情没什么关系，漫画故事里还是会出现一些历史或者科学小常识。这些常识通常出现在一个文本框里，比如，在《英勇与无畏》第28期里，国家漫画出版公司的超级英雄们首次以“美国正义联盟”的方式亮相，海王靠河豚游泳，他用自己的“鱼类心灵感应”与这条河豚沟通，这条河豚漂浮在海面上时能够获取一些重要信息。漫画中有个文本框里写着“通过向喉咙后面的一个气囊吸入空气，河豚会膨胀得像个足球，背朝下浮在水面上”。

为什么要花力气写这些知识呢？这可能是因为作家们以前创作低俗小说时养成的习惯。在成为国家漫画出版公司的漫画编辑之前，莫特·韦辛格和尤利乌斯·史瓦兹一直是科幻小说的忠实粉丝，还是科幻小说和奇幻小说作者的出版经纪人，雷·布莱伯利、罗伯特·布洛克和霍华德·菲利普斯·洛夫克拉夫特也是这样。部分漫画编剧以前是低俗科幻小说家，所以，他们简直就是偏门的历史和自然知识的移动“图书馆”。雨果奖获得者阿尔弗雷德·贝斯特著有经典科幻小说《被毁灭的人》和《群星，我们的归宿》，在20世纪40年代的时候也创作过漫画故事，最初的绿灯誓词就出自他之手。在一篇自传性的文章里，贝斯特提到，他曾在纽约公立图书馆花费了很多时间，查阅参考书，搜集奇闻逸事，来构思自己的故事。了解很多知识也可以帮助这些低俗小说家获得经济收入，因为他们的报酬都是按字数计算的。因此，他们经常会在故事里放入各种各样与内容关系不大的素材，就像下面这个笑话一样：

问：换灯泡需要多少位低俗小说家？

答：灯泡的历史可以说是一段遥远而有趣的故事，故事开始于1879年新泽西的门罗公园，直到今天……

白银时代的漫画编剧之所以把作品写得啰啰唆唆，可能是出于一些经济上的原因，另外，他们也有可能是为了自我保护而在故事中添加了知识性内容。正如前文中提到的，在故事中加入科学知识和原理，可能是出自编剧和编辑想让作品起到教育作用的真实愿望，或者出于躲避政府部门关注的求生本能。

看漫画书的物理学家

作为一名物理学博士，无论是读经典漫画还是最新的超级英雄漫画，我都发现书里有很多关于物理学概念的解释和应用是正确的。当然，几乎所有的超能力本身都明显违反了基本的物理学定律。但是，很多漫画书其实只有一个“不合常理的奇迹”，你只有认可这一点，超级英雄的故事才能成立，而关于英雄与反派人物的其他内容都符合科学原理。因为这些故事的主要目的是娱乐读者，所以如果在阅读的过程中，读者也获得了一些知识，就是意外收获了。

我要讲的就是这些意外收获，正如图2所展示的一样。在本书中，我将会介绍一些科学原理，并用我在漫画书里找到的情节来作为例证。我会有选择地介绍跟物理学概念有关的人物和情节，而不是对一系列超级英雄故事中的物理学原理进行系统性讲解。在本书的最后，读者将看到物理学入门课程中的一些关键概念，为了增加趣味性，我还加上了一点儿量子力学和固体物理学的进阶知识。通过了解一些漫画故事中蕴含的物理学原理，我们同时可以了解这些原理在真实生活中的应用，包括电视、电话以及元素的恒星核合成。

我将侧重介绍白银时代的漫画史（从1956年《展示橱》第4期中闪电侠的重塑到1973年《超凡蜘蛛侠》第121期中的格温·斯黛西之死），因为这一时期的作者比黄金时代的作者更努力地把科学原理融入自己创作的故事中。此外，白银时代的超级英雄也更为大众熟知，这些英雄的偶像地位使其事迹更广为人知，你不需要去当地漫画店成堆的过期杂志里搜寻他们的故事。漫画故事里引用的科学知识有问题，这实在太常见了，本书的重点并不在这里。如果这样做，就会显得我太过苛刻（很明显，这些漫画书本来也不是作为科学课本使用的，尽管偶尔会有学生偷偷摸摸把它们带进课堂），而且支持性材料都是反面例子的话，也很不利于我阐述自己的观点。然而，有时候我们会发现漫画书中的有些场景在物理上根本不可行，就连“不合常理的奇迹”都算不上。

在正式开始之前，我想先简单讲讲人们对于物理学家常见的误解。大家通过看电影会对物理学家形成一种错误的印象，事实上物理学家不需要了解所有方程式和基本常数，也不需要有像机器一样的心算速度和准确度。物理学家不可能记住所有问题的答案，他们只知道应该提出什么问题。对于一种现象如果能提出正确的问题，答案很快就会显露出

来，至少我们能知道找到答案的方法。

为了说明为什么提出正确的问题比给出一大堆正确的答案更重要，我们可以想象一个简单的物理实验：把球抛出去。对此我们可以提出很多问题，比如，球会飞到多高？球会向右偏多少？球多久会落地？球的速度有多快？球的轨迹是什么样的？然而，我要说的是，有一个简单的问题包含了以上所有问题，它才是关于球的运动的核心问题：这个球有选择吗？如果这个球在运动中没有任何选择，它的轨迹就完全是由外部力量决定的。一旦我们判定这些力的本质及其对球的运动的影响，我们就能计算出由掷球者给定了初始速度的球的运动轨迹。这个轨迹包含我们想知道的所有问题，包括球会飞到多高、多远，过多久才会落地，速度有多快等。如果我们以完全相同的位置和速度抛出这个球，它就一定会以特定的轨迹运动，因为它别无选择。

这就是物理学的美与吸引力所在，至少对于像我们这样以研究物理学为生的幸运儿而言是这样。如果我们能确定施加在物体上的力，以及这些力是如何影响物体运动的，我们就能预测其未来的发展。通过严谨的实验，这些预测是能够被验证的；如果这些预测是正确的，它们还能证实我们对于自然规律的认识。而如果这些实验结果与模型不符（开始时这样的结果更常见），我们就要修正方程式，然后再次尝试。[8]通过这种方式，我们对自然的认识不断增加，最后我们终于得到了一个有效的模型，形成了一种理论。把通过这种详尽的检验所得出的理论贬低为“不过是一种理论”，就相当于把希望钻石轻视为“不过是一块水晶”。

获得科学知识的代价就是我们的质疑也在不断增长：我们知道得越多，就会更加确信尚有未知。科学拥抱质疑，因为我们能够相信的唯一答案就是从一次次的质疑和实验中提炼出的答案。在本书中，我将要跟你们分享这种真正的乐趣，看看为数不多的关键问题是如何丰富我们对于这个世界的认知的。

跟所有标准的物理学入门教材一样，我将首先介绍由艾萨克·牛顿阐释的基本运动定律。通过把这个深刻的贡献与现代思想相结合，我们要举的漫画中的第一个例子对西方文明做出了同样重要的贡献。他是第一位真正的超级英雄，他的速度快过子弹，力量大过火车头；跟我们要讨论的内容关系最密切的一点是，他纵身一跃就能跳上高楼。

[1]为此，莱克斯·卢瑟几次在公开场合帮助过超人，让超人看不穿他的真实意图。卢瑟把这

一计划执行得非常彻底，当超人被另一个反派用致命的氪星剑威胁时，他还救了超人的命。你可能会认为在这个时候放弃“混淆视听”的计划，直接让那个坏蛋杀死超人不是更简单吗？但又有谁能真正理解犯罪天才莱克斯·卢瑟的想法呢？

[2]用文字或者绘画讲故事500年前就出现了，中世纪木刻的“宽幅印刷品”中就配有镶板边界、速度线以及对白气泡。

[3]1英寸≈2.54厘米。——译者注

[4]当水（H_2O）中的两个氢原子各自拥有一个额外的中子时，就叫作重水，而含有大量矿物质的水则叫作“硬水”。对于黄金时代的闪电侠来说幸运的是，20世纪40年代还没有软水机。

[5]因此，不管在哪个时代，一个可以有效应对绿灯侠的武器就是黄色的木质球棒。

[6]1平方英寸≈6.45平方厘米。——译者注

[7]格里历就是我们现在使用的公历。——译者注

[8]我们对于世界的了解已经如此之多，以至于物理学家只有专注于实验或理论研究其中一个领域，才能取得进一步的进展。实验主义者在实验室进行研究和测量，而理论家则忙于计算和计算机模拟。我是一个实验主义者，而史蒂芬·霍金是一个理论家（我们两个的差别就始于此）。在实验和理论研究中都取得骄人成绩的最后一位物理学家是恩里科·费米。

第一部分 力学

第1章 超人诞生

《超人》第1期中介绍说，在遥远的氪星，有一位科学家乔–艾尔（Jor-El），他发现自己所在的星球即将爆炸，没人能够幸免。由于只有一艘小型飞船，他和妻子决定保护他们尚在襁褓中的儿子卡尔–艾尔（Kal-El），把他送到地球上以逃过此劫。[1]飞船穿过浩瀚的宇宙，坠落在地球上，婴儿毫发无伤。堪萨斯的一对膝下无子的肯特夫妇发现了他，把他送到孤儿院。后来，肯特夫妇出于愧疚返回孤儿院（超人宝宝已经把那里搅得天翻地覆了），领养了卡尔–艾尔，给他起名克拉克，并把他抚养长大。克拉克·肯特长大成人之后，拥有了一系列超能力，从此他踏上了为真理、正义和美国之路而战的漫漫征途。

当超人在黄金时代首次现身时，他的能力与现在大不相同。比如，他举过头顶的是汽车，而不是整块大陆；他速度很快，快过火车，但达不到光速；他还不会飞行，只能跳得很高（最开始是1/8英里[2]）。

杰里·西格尔和约瑟夫·舒斯特最初创作出来的超人形象是在动作英雄的基础上加入了一些科幻小说的成分，以使英雄的超凡力量带有那么一丝现实色彩。超人在地球上的力量源自他的氪星血统，因为他在母星上的重力比在地球上的重力更大。因为月球比地球小很多，所以同一个物体在月球上的重力也更小，比在地球上更轻。这样的话，一个肌肉和骨骼适应了地球引力的地球人在月球表面上就能跳得更远，举起更重的东西。超人的力量也是一样，他的超强力量（“力量大过火车头”）和坚韧的皮肤（“子弹也无法穿透”）都是因为他移居的这个星球比氪星的重力作用小得多。尽管超人在婴儿时期就被送到了地球，但是氪星人的DNA（脱氧核糖核酸）还是让他的肌肉和骨骼能适应比地球更强的引力。

到了20世纪40年代后期，超人掌握了飞行能力，他能在空中选择和变换飞行轨迹。[3]这时候，我们可以认为超人的自由意志超越了物理学

原理。渐渐地，他获得了更多不能由其母星的超强引力解释的其他超能力。这些超能力包括各种超级视力（热视线、X射线视力等）、超级听力、超级呼吸，还包括超级催眠术[4]。

1960年3月出版的第262期《动作漫画》修改了超人的超能力来源，称超人之所以具有这些非凡的能力，是因为地球围绕着黄色太阳运行，氪星则围绕着红色太阳运行。太阳颜色的作用既体现在它的表面温度上，也体现在它外部的大气层上。太阳光谱中的蓝光被大气层极大地散射了，因此天空是蓝色的。太阳大部分时间看上去是黄色的，这是因为大气层吸收了光谱中的蓝色部分。只有清晨和黄昏例外，这时太阳接近地平线，太阳光要在大气层中穿越更长的距离，几乎所有波长的光都被吸收了，除了低能量的红光，因此落日才呈现为红色（黄昏时空气中含有比清晨时更多的颗粒物，所以造成了太阳的色差）。这些光谱特征基本不受地球表面大气层化学成分的影响。至于为什么太阳光从黄色（波长为570纳米）变成红色（波长为650纳米）能让一个人拥有赤手掰弯钢铁的能力，我也无法解释。所以，在这个时期，《超人》不再是科幻故事，而是关于一位神奇英雄的漫画故事。在漫画书里，为了更好地解释超级英雄因获得新能力或者接触新环境而改变出身是一件很常见的事，漫画迷还造了一个词——“重塑”（retconning），以说明这种持续不断的变化。

有趣的是，超人的对手在这段时期也经历了相似的变化。在早期的《动作漫画》和《超人》中，西格尔和舒斯特为年轻落魄的大萧条读者编织了复仇的幻想。超人最早的打击对象是那些腐败的房产主、煤矿主、军火商，以及华盛顿的说客。在一个早期的故事里，超人抓着一名说客与其同时从高楼上坠落，以达到从心理上威吓对方的目的。在超人的英雄生涯刚开始时，很少有人知道超人的存在，所以那个说客觉得自己掉下去必死无疑。于是，他赶紧说出超人想得到的信息，不想再掉下来一次。到了20世纪50年代，不仅《超人》漫画每个月的销量有数百万册，超人还成了广播剧、电影短片（动画片或真人动作片）和流行电视节目里的明星。在这一时期，超人的对手也变成了各式各样的犯罪高手，比如玩具人、恶作剧大王、莱克斯·卢瑟。超人会挫败他们试图攫取财富或者统治世界的计划，同时不打破既有的权力结构。对手的能力不断增强，相应地，超人的超能力也日益强大，以至于编剧也没办法给他找到势均力敌的对手。来自超人母星的放射性碎片，也就是氪石，成了超人的常用道具。[5]

我在这里想讨论的就是氪星最后的子民——黄金时代的超人。

跳跃公式

在最初的漫画故事里，超人不会飞行，他只能纵身一跃跳上高楼，因为地球的引力较小。

那么，他到底能跳多高呢？根据《超人》第1期，超人最高能跳1/8英里，也就是660英尺[6]。假设他能在垂直方向上跳得这么高，那就相当于30多层楼的高度，这在1938年已经很不可思议了。下面我们把这个问题换一个问法：超人从人行道上跳起来的时候，若想跳到660英尺高，他的初始速度至少是多少？

不管我们要描述的是跃起的钢铁之躯还是前文例子中那个被抛出的球的运动轨迹，我们都要从艾萨克·牛顿在17世纪中期提出的关于运动的三个定律开始。这三个定律通常表述为：第一，如果没有外力的作用，静止的物体将保持静止，做匀速直线运动的物体将保持这种运动；第二，如果施加了外力，物体的运动速度或者方向将发生改变，运动速度的变化率（加速度）乘以物体的质量等于外力；第三，对于施加在物体上的每一个外力，都存在与其大小相等、方向相反的反作用力。前面两个定律可以简单地用下面这个数学方程式来表述：

力=质量×加速度

也就是说，施加于物体的外力F等于物体速度的变化率（加速度a）乘以物体的质量m，即$F=ma$。

加速度是衡量物体速度变化率的指标。一辆静止的汽车加速到60英里/小时，它的速度变化是60英里/小时－0英里/小时=60英里/小时，用这个速度的变化量除以变化所用的时间就可以得到加速度。所用的时间越长，达到某个速度变化量所需要的加速度就越小。如果一辆汽车从0英里/小时加速到60英里/小时用了6秒，它的加速度就远远大于用时6小时或者6天的加速度[7]。在三种情形下，虽然最终的速度都是60英里/小时，但加速度却截然不同，因为速度变化所需要的时间各不相同。根据牛顿的公式$F=ma$，产生更快加速度的力要明显大于产生较慢加速度的力。

当加速度是0的时候，物体的运动状态保持不变。这时，运动的物体将继续保持直线运动，而静止的物体将继续静止。在$F=ma$这个表达式中，当$a=0$时，$F=0$，这就是牛顿第一定律的主要含义。

从数学的角度看这很简单，但这却引发了一场挑战常识的革命。牛顿认为（他这么说是没错的）对于一个正在运动的物体，若没有外力的作用，那么这个物体就会一直保持直线运动。然而，不管是你我，还是牛顿，从来都没见过这种情况真的发生。日常生活经验告诉我们，要想让一个物体保持运动，我们必须持续施加外力推或拉它才行。行驶的汽车不会一直跑，只有当我们一直踩着油门时，才能提供足够的动力。当然，当我们停止推或拉的时候，受摩擦力和空气阻力的影响，物体的运动速度就会变慢，并最终停下来。在实际生活中，我们不施加外力并不意味着没有其他力作用于这个物体。牛顿提出的定律没有错，只不过我们在应用时要考虑到摩擦力和空气阻力。我们只有战胜这些看不见的阻力，才能让物体一直运动下去。如果我们的推力或拉力刚好等于摩擦力或者空气阻力，物体所承受的力的净值就是0，这个物体就会一直保持直线运动。若把推力或拉力加大，就会产生一个与当前运动方向相同的力。质量m把力与加速度联系在一起，它反映了物体对于改变其运动状态的抵抗程度。

在此有必要指出，重量和质量是两个不同的概念。“重量”衡量的是物体受到的重力作用，而“质量”衡量的是某个物体含有多少物质（对于专业人士来说，这些物质就是“原子”）。物体内部原子的质量使物体具有惯性，惯性指的是物体对于外力的抵抗。即使在外太空，物体的质量也跟在地球上一样。物体在外太空可能“没有重量”，因为周围星球对它的引力微乎其微，但它还是不愿意改变其运动状态，因为它具有质量。在太空中行走的宇航员不可能抓起空间站然后把它扔出去（假设他有一个能立足的地方），即便空间站“没有重量”。事实上，空间站的质量非常大，即使宇航员使出浑身力气，其产生的加速度也是微不足道的。

对于地球（或者其他星球）表面的物体而言，由重力产生的加速度用字母g来表示。重力作用于质量是m的物体所产生的力，就是这个物体的重量。重量=质量×重力加速度（$W=mg$），这其实是当$a=g$时，$F=ma$的另一种表现形式。质量是物体的固有属性，在公制计量法中用千克来衡量；而重量代表了重力对物体所施加的力，在美国用磅力来衡量。在欧洲，重量通常也用千克来表示，严格来说这是有问题的，但总比用公制计量法中的单位“千克·米/秒2”（也称为“牛顿”）要方便一

些。如果对1千克的物体与1磅力的物体做个比较，二者之间的换算关系就是1千克相当于2.2磅力。我用的词是“相当于”而不是“等于”，这是因为磅力是重量单位[8]，而千克是质量单位。这个物体在月球上的重量会小于2.2磅力，在木星上会大于2.2磅力，但它的质量始终是1千克。在公制计量法下进行计算时，我们会继续用千克·米/秒^{2}而不是“牛顿”，以此来提醒自己任何一个力都可以用$F=ma$来表示。

我们来简单概括一下，超人的质量在任何时候都是一个常数，因为质量反映的是他的身体里有多少个原子。但是，他的重量反映的是他身处的某种大质量的物体与他之间的引力。跟在地球上的重量相比，超人在木星上的重量会大一些，在月球上会小一些，但他的质量始终不变。一个人离某个星球或者月球的距离越远，引力就越小，但从理论上讲引力永远不会是0，除非这个人与星球之间的距离无限远。人们总喜欢把质量和重量当成一回事，特别是对于地球上的物体来说，重力加速度是不变的。由于接下来我们要做的事就是比较超人在氪星上的重量和在地球上的重量，所以一定要抵制住这种倾向。

牛顿第三定律讲的是一个常见概念：当你按压一个物体的时候，那个物体也会反过来对你施加压力。这个定律又被表述成：“每一个作用力都会有一个与其大小相等但方向相反的反作用力。”你能靠墙站着的前提是墙对你有支撑，即用大小相等但方向相反的力推你。如果反作用力与作用力的大小不相等，就会产生一个非零的合力以及加速度，你可能会撞进墙里。当我们前文中提到的宇航员用力推空间站时，他对空间站施加的力产生了一个很小的加速度，但空间站对他施加的反作用力会产生一个大得多的加速度（因为他的质量小得多）。

假设超人和绿巨人浩克手里拿着体重秤（这个设备可以衡量引力所产生的作用力，也就是你的重量）互相对抗。当他们朝对方推体重秤的时候，不管左边的超人使多大的劲，只要他们保持静止，右边绿巨人的体重秤的读数就会保持一致。另外，不管超人推得多用力，只要绿巨人浩克一点儿不用劲，而是拿着自己的体重秤向后退，超人体重秤上的读数就是0[9]。力总是成对出现的，你推或者拉某个东西，这个东西一定会反过来推或者拉你。当你站在人行道上时，引力把你拉向地心，你的脚会对地面施加一个压力。地球另一端的人不会掉下去，是因为引力把每一个人拉向地心，不管这些人身在何处。你站在地面上时没有加速度，是因为地面对你有反作用力，大小刚好等于你的重力。在超人一跃而起的那个时刻，他的腿对地面施加了一个大于他的重力的力。因为力都是

成对出现的，他对地面的推力也产生了地面对他的推力。因此，这个向上的力让他跃向高处。

牛顿的运动定律可以总结为两点：第一，运动状态的任何变化都是由外力造成的（$F=ma$）；第二，这些力都是成对出现的。我们在描述物体运动的时候，不管是简单运动还是复杂运动，从抛出一个球到星球的运行，只要有这些知识就足够了。实际上，我们现在懂得的物理学知识已经足以让我们搞清楚超人跳上高楼所需要的初始速度了。

轻轻一跃

超人跳起来时的初始速度非常快（见图4）。他跳跃达到的最高处距离地面660英尺，这时他的速度是0，否则这一点就不是最高点了。超人会减速是因为一个外力，也就是重力的作用。这个力的作用方向是向下的，朝向地球表面，与超人跳起来的方向相反。所以这个加速度事实上是减速度，让超人的速度变慢，直到达到660英尺高，他才停了下来。

想象一下顶着狂风滑冰。你用脚蹬了一下冰面，迎着风飞快地滑去，但是风对你施加了一个与你的运动方向相反的阻力。如果你不再蹬冰，大风就会使你的速度变慢，最后你会停下来。但风仍在向后推你，所以你会有加速度，只不过此时是向后退。当你回到你的出发地点时，你的运动速度就跟出发的时候一样，只不过方向相反。这个水平方向上的恒定不变的风对滑冰者的影响就跟超人跳起来的时候地球引力对他的影响一样。在超人跳起来的那一刻、在跳跃的过程中，以及在最高点处，重力都是一样大的。由于$F=ma$，他的加速度也始终保持不变。为了计算出多大的初始速度能让超人跳到660英尺高，我们先得弄清楚，在加速度g恒定不变的条件下，超人在下落的过程中速度会有什么样的变化。

© 1938 National Periodical Publicationslnc.(DC)

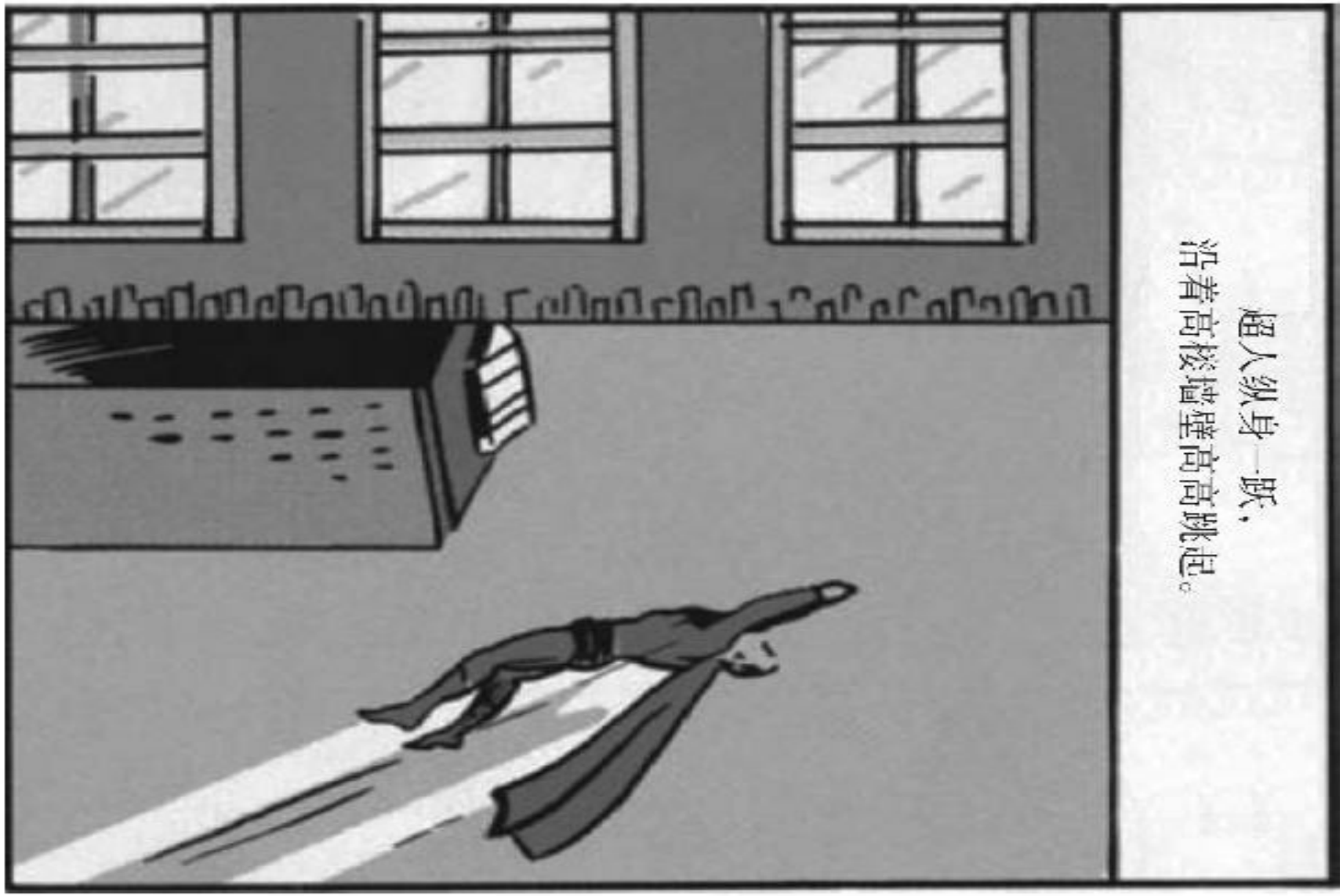


图4 在《超人》第1期（1939年6月）中，超人纵身一跃跳上……你们懂的

我们都知道，一个人要想跳得越高，他离开地面时的速度就得越快。那么，初始速度和最高点之间到底有什么样的关系呢？当你行进时，距离是由平均速度和时长决定的。假设你开车开了一个小时，平均速度是60英里/小时，你与出发点的距离就是60英里。因为我们不知道超人那一跳持续了多久，只知道最后高度为660英尺，所以我们就要进行一些代数运算。根据定义，加速度是一定时间内速度的变化量，而速度是一定时间内距离的变化量。最后我们发现，超人的初始速度v与最终高度h之间的关系是$v\times v=v^2=2gh$。那就是说，超人跳的高度取决于他的初始速度的平方。如果他的初始速度增加一倍，他的高度将是原来的4倍。

为什么超人跳的高度取决于初始速度的平方呢？因为他这一跳的高度是由他的平均速度乘以他在空中停留的时间得到的，而他在空中停留的时间是由初始速度决定的。当你踩刹车的时候，你的车速越快，车停下来需要的时间就越长。同样，在离地的那一刻，超人的速度越快，地球引力让他变慢并最终停下来（也就是到达最高点）所需要的时间就越长。由于重力加速度约为32英尺/秒^2（这是实验观测值，也就是说，一个物体掉落的时候，初始速度是0，第一秒后它的速度是32英尺/秒，第二秒后是64英尺/秒，以此类推），通过表达式$v^2=2gh$，我们可以得知，要想跳到660英尺高，超人的初始速度应约为205英尺/秒，相当于每小时140英里！所以，你现在知道为什么我们这些弱小的地球人没法跳上高楼了吧，能够跨过垃圾桶已经不错了。

在上面的论证中我们用到了超人的平均速度，即用他的初始速度（v）加上最终速度（0）再除以2。在这里他的平均速度是$v/2$，这也是$v^2=2gh$这个公式里g、h前面的系数“2”的出处。实际情况是，超人跃起后，他的速度在不断变慢，位置在不断升高。要解决连续变量的问题，就得用到微积分（别担心，我们不会用），而到目前为止我们只用到了代数。牛顿为了应用他的运动定律发明了微积分，这样他就可以进行各种运算了。当然，微积分对我们而言有些难度。还好，就目前这个例子而言，用严谨的微积分方法算出来的表达式，和我们用简单方法推导出来的表达式基本一样，就是$v^2=2gh$。

超人是怎么获得超过200英尺/秒的初始速度的呢？就像我们在图5中看到的，他是通过一个被物理学家称为“跳跃”的力学过程实现的。超人蹲下来，向地面施加了一个很大的力，从而让地面对他产生反作用力

（根据牛顿第三定律，力都是成对出现的）。我们可以想见，要想在跳起来的时候达到140英里/小时的初始速度，需要非常大的力。为了计算出这个力到底有多大，我们需要用到牛顿第二定律：$F=ma$，即力等于质量乘以加速度。如果超人在地球上的重量是220磅力，他的质量就应该是100千克。为了计算力，我们需要知道他从静止到跳起来达到140英里/小时的初始速度的过程中加速度是多少。我们知道，加速度描述的是速度的变化量除以对应的时间。如果超人用腿蹬地的时长是1/4秒，他的加速度就是0到200英尺/秒的速度变化量除以1/4秒的时长[10]，即800英尺/秒^2（在公制计量法中相当于250米/秒^2，因为1米约等于39英寸）。这个加速度相当于一辆汽车用1/10秒的时间从0加速到100英里/小时。超人的加速度来自他的腿产生的蹬地力，这个力使他飞向空中。$F=ma$这个公式的关键在于，运动中的任何变化必然与作用力相关，变化越大，力越大。如果超人的质量是100千克，能让他跳到660英尺高的力就是$F=ma$=100千克×250米/秒^2=25000千克·米/秒^2，约为5600磅力。

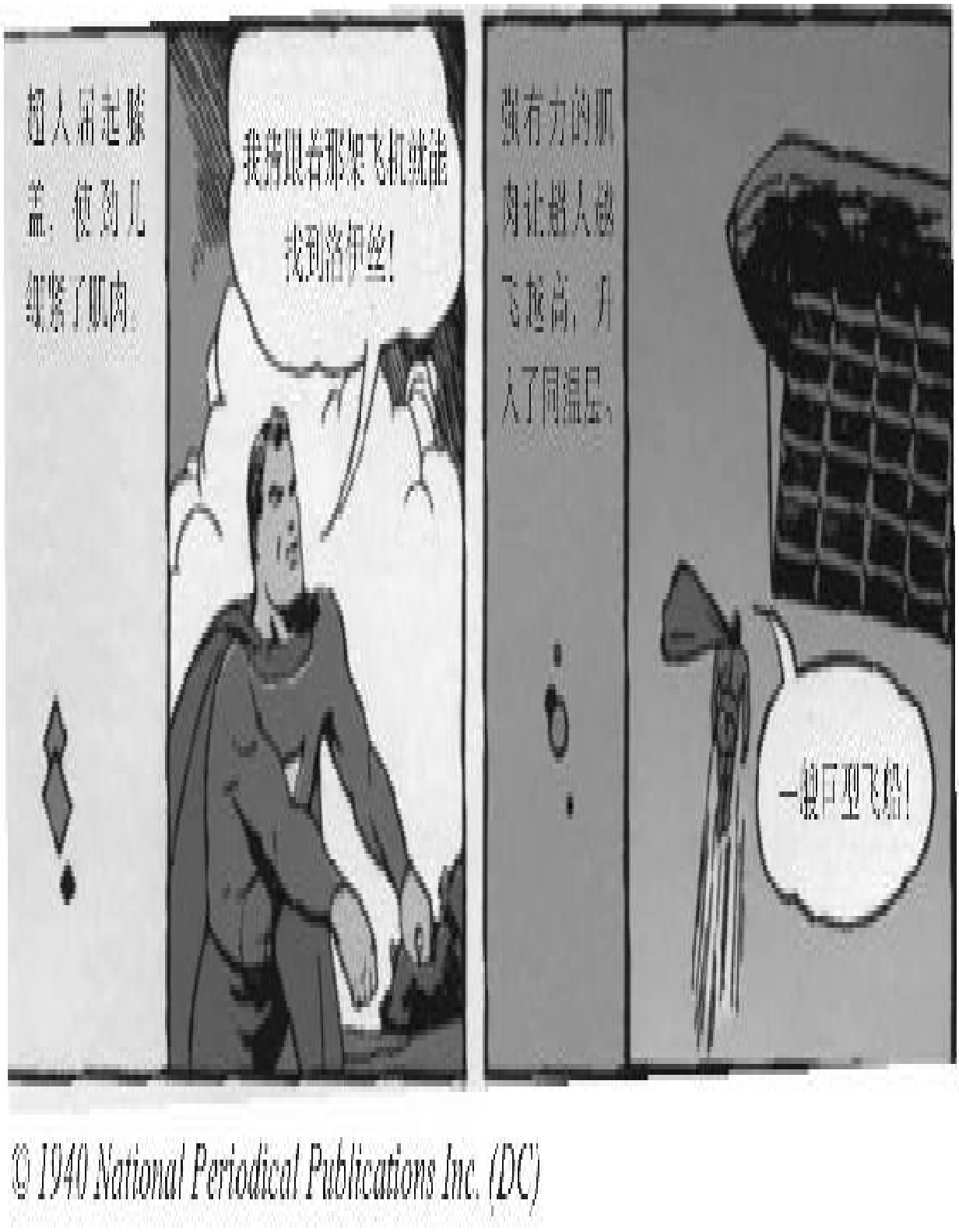


图5 《动作漫画》第23期中描绘了超人为了实现惊人一跃，达到极大的初始速度的详细过程

超人的腿能产生5600磅力的力，这合理吗？不是没有可能，条件是

超人的腿在氪星上能支撑起自己的身体。假设这比在氪星上静止站立时所需要的腿部力量大70%，那么，在这个例子里，超人在其母星上的重量大约是3300磅力。他在氪星上的重量取决于他的质量和氪星的重力加速度。我们假设超人的质量是100千克，不管他在哪个星球上都一样。如果超人在地球上的重量是220磅力，在氪星上是3300磅力，氪星上的重力加速度就是地球的15倍。

根据$F=ma$，“距离=速度×时长”以及“加速度就是一定时间内速度的变化量”，还有我们观测到的超人能够“纵身一跃跳上高楼”等条件，我们可以得知，同一物体在氪星上受到的引力是在地球上受到的引力的15倍。

恭喜各位，解出了一道物理题。

[1]我已为人父，对于乔–艾尔此举深有感触。我无数次想把我的孩子们装进飞船送到遥远的太空。

[2]1英里≈1.61千米。——编者注

[3]在1941—1943年由弗莱舍工作室（之后是菲莫斯工作室）出品的动画片里，超人经历了首次飞行。超人不断屈膝跳跃，这样的动作制作起来实在太花时间，也太耗经费，编剧索性就让超人飞了起来。渐渐地，这个能力也被移植到漫画里。

[4]最后这种超能力——超级催眠术是用来解释为什么一副简单的眼镜就能使超人完美地伪装自己，以致没有人发现温文尔雅的记者克拉克·肯特和举世闻名的超人其实是同一个人。根据《超人》第330期中的描述，超人显然是对看到他的每个人都施了超级催眠术，让他们相信他的脸与克拉克·肯特的脸完全不同。

[5]母星上的放射性元素对超人的影响非常强烈，而他对地球上的放射性同位素却始终免疫，这更像谈判的结果，而不是出于身体的原因。氪石的首次出现是在1943年《超人的冒险》系列广播剧中，可能是给超人配音的广播剧演员疲惫不堪需要休息的时候，氪石自然而然就出现了。广播剧的编剧创造出让超人惧怕的矿石，另一个演员就可以在广播里发出呻吟声以扮演受伤的超人了。几年后，漫画书的编剧也采用了这种创造性装置，对超人有不同作用的五彩缤纷（绿色、红色、金色、银色等）的氪石就这样被引入漫画世界。

[6]1英尺≈0.30米。——译者注

[7]你永远也忘不了你第一次开车时速度有多慢！

[8]1磅力≈4.45牛顿。——编者注

[9]绿巨人浩克可比多数人以为的要聪明得多（毕竟他变身之前是个物理学家）。

[10]专家们会说，这个蹬地时间太长了，实际应该不到它的1/10。我们会在下一章中详细讨论这一点。

第2章 氪星引力的秘密

我们已经知道，要想跳上高楼，超人应该来自一个引力是地球15倍的星球。那么接下来的问题是，这样一个星球是如何形成的？要想回答这个问题，我们必须先了解星球引力的本质，并且要再一次仰仗牛顿的天才发现。尽管这可能要用到更多的数学知识，但请少安毋躁。再看几页，你就会了解牛顿的苹果与引力之间存在什么样的联系。

艾萨克·牛顿在阐明了三个运动定律、发明了微积分之后觉得还不够，又提出，由于两个物体间存在万有引力，所以会对彼此产生作用力。为了说明行星的轨道，牛顿总结出，两个相隔距离为*d*的具有一定质量的物体（分别为质量1和质量2）之间的引力可以由以下公式得出：

$$\text{引力}=G\times(\text{质量}1\times\text{质量}2)/\text{距离}^2$$

其中，*G*是万有引力常量。这个表达式描述了任意两个物体之间的万有引力，包括地球和太阳、地球和月亮，也包括地球和超人。如果一个物体是地球，另一个物体是超人，两者之间的距离就是地球半径（从地心到地球表面超人站立的地方的距离）。对于一个质地分布均匀的球体，比如行星，所有物质受到的引力都指向这颗行星的中心。因此，我们用地球半径来作为牛顿等式中两个物体（地球和超人）之间的距离。这个力就是超人所感受到的（也是我们每个人感受到的）重力。有了超人的质量（100千克）、地球的质量，以及超人与地心之间的距离（地球半径）、万有引力常量，我们就可以算出超人与地球之间的引力，即*F*=220磅力。

但这只是超人在地球上的重力。有意思的是，这两个关于超人所受地球引力的表达式其实是一回事。我们比较一下这两个表达式：超人的重量=质量1×*g*，引力=质量1×［（*G*×质量2）/距离^2］。因为两个等式的左边是一样的，超人的质量100千克也没有变化，所以重力加速度*g*就等于（*G*×质量2）/距离^2。把地球的质量和地球半径代入公式，使其分别代表质量2和距离，就得到*g*=10米/秒^2=32英尺/秒^2。

牛顿的万有引力公式的奇妙之处在于，它可以告诉我们重力加速度

这个数值的来历。对于月球表面的某个物体，其重力加速度只有5.3英尺/秒^2，大约是地球的1/6。

这才是牛顿和苹果这个故事的真正意义所在。并不是说在1665年，牛顿看到一个苹果从树上掉下来，就突然意识到重力的存在；也不是说，他看到一个苹果掉下来，就马上写出$F=G（m_1×m_2）/d^2$这个公式。事实上，牛顿在17世纪提出的这一见解告诉我们，将苹果拉向地球的力和将月球拉向地球的力是完全相同的。为了使月球按固定轨道绕地球运行，必须有一个力量拉动它不断改变方向。

根据牛顿第二定律$F=ma$，如果没有施加额外的力，物体的运动状态就不会发生变化。如果你把一根绳子系在一个水桶上，然后水平绕圈，你就必须一直拉紧绳子。如果绳子所受的拉力不变，这个桶就会一直保持规律的圆周运动。绳子的拉力没有作用于桶的运动方向上，因此它只能改变速度方向，而不是大小。一旦你松开绳子，桶就会飞出去。

回到月球的例子。如果没有与地球间的引力，月球就会沿着一条直线从地球旁边掠过。如果存在引力，而月球本身是静止的，它就会受引力作用撞向地球。月球与地球的距离以及它的运行速度刚好与引力平衡，因此它能够沿着一个固定的轨道运行。月球不会飞出去，因为它与地球的引力拉着它，使它“落向”地球，同时它的运行速度又让它不会被地球引力拉得更近。月球沿着圆形轨道绕地球运行，地球沿着椭圆形轨道绕太阳运行，苹果从树上落向地面，都是同一种力作用的结果。这个力还让超人跳起来之后的速度不断变慢，最后落到大楼的楼顶。我们知道，为了完成如此有力的一跃，他的身体必须能适应重力加速度是地球15倍的环境，这也告诉了我们氪星的地质情况。

根据牛顿的引力定律，如果两个物体之间的距离增加，那么它们之间的引力变化与距离的平方成反比，这使得所有行星都是球形的。球的体积与半径的立方成正比，表面积与半径的平方成正比，引力与半径的平方成反比，这些因素决定了只有球体才是强大引力下最稳定的存在形式。事实上，关于如何区分小行星和小型行星这个天体物理学问题的一个方法，就是看它的形状。你手里握着的小石头的形状是不规则的，因为它自身的引力不足以将其形塑成球体。然而，如果这块石头有冥王星那么大，它的引力就会很大，它的形状也只能是球体。所以，像《超人》中的比扎罗母星那样的立方体行星必须非常小。如果不想变成球体，那么从这个行星的中心到地表的平均距离不应超过300英里。然

而，这么小的立方体行星也没有足够的引力稳住其表面的大气层，所以那将是一片没有空气的不毛之地。可是，从漫画中我们看到，比扎罗母星的天空和地球一样，都是蓝色的。（如果这真是比扎罗的出生地，它的天空难道不应该是别的颜色吗？）这表明，在这个立方体行星上，其实是有空气的。我们只能得出这样的结论：虽然在读漫画书的过程中我们有很多次都感觉自己穿越到那个世界，但从物理学角度讲，这颗行星是不可能存在的。

我们还是接着讨论像氪星这样的球状行星。如果氪星上的重力加速度g_K是地球上的重力加速度g_E的15倍，这两个加速度的比率就是$g_K/g_E=15$。前文说到行星的重力加速度是$g=Gm/d^2$。距离d是行星的半径R。行星的质量（或者某个物体的质量）就是它的密度（通常用希腊字母ρ来表示）和体积的乘积，在这里体积是指球体的体积（因为行星是个球体）。由于氪星与地球的万有引力常量一样，所以g_K/g_E这个比率可以用以下这个公式表达：

$$g_K/g_E=[\rho_K R_K]/[\rho_E R_E]=15$$

ρ_K和R_K分别代表氪星的密度和半径，ρ_E和R_E分别代表地球的密度和半径。我们在比较氪星的重力加速度与地球的重力加速度时，只需要知道每个行星密度与半径的乘积即可。如果氪星的大小与地球一样，它的密度就应是地球的15倍；如果它们的密度一样，氪星的体积就应是地球的15倍。

正如我们在本书开头讨论的，如果说物理学的本质是提出正确的问题，那么在生活中也是这样，每一个答案都会引出更多的问题。我们已经知道，如果超人在地球上轻轻一跃就能跳到660英尺高（一栋高楼的高度），那么他的母星氪星的密度乘以半径就必须是地球的15倍。我们接下来就要问，在氪星与地球大小相同（$R_K=R_E$）的条件下，氪星是否因为具有更大的密度（准确地说就是$\rho_K/\rho_E=15$）而产生更大的重力？事实证明，如果地球上的物理学原理同样适用于氪星（不适用的话，就趁早别讨论了），那么氪星的密度根本不可能是地球的15倍。

我们刚刚说到，质量等于密度乘以体积，也就是说，密度是某个物体单位体积的质量。接下来，为了搞清楚到底是什么决定了密度，以及为什么不能简单地说氪星的密度是地球的15倍，我们需要从原子的层面进行分析。物体的质量和体积都是由组成它的原子决定的。原子是由位

于原子核内的质子和中子，以及绕原子核运动的电子组成的。带有一定数量正电荷的质子与带有相同数量负电荷的电子取得了平衡。中子是位于原子核内比质子稍重的不带电粒子（关于中子在原子核中到底起什么作用，我们将在第15章具体讨论），与质子或者中子相比，电子非常轻。原子的质量基本上是由原子核内的质子和中子决定的，因为电子的质量只有质子的1/2000。

原子的大小则是由电子决定的，准确地说，是由电子的量子化轨道决定的。原子核的直径大约是一万亿分之一厘米，原子的半径是电子与原子核的距离，大约是原子核半径的一万倍。如果把原子核比作小孩玩的弹珠（直径是1厘米），把这颗弹珠放在足球场一侧的球门区里，电子轨道的半径就相当于弹珠到另一侧球门区的距离，大约为100码[1]。物体中原子之间的空隙主要由原子的大小决定（原子的体积摆在那里，你不可能让这些原子离得更近了）。

如果氪星上的量子力学原理和地球上一样，由一定数量的原子组成的石头的大小就跟这块石头到底在哪颗行星上没什么关系了。在引力更强的行星上，这块石头会更重，但是它内部的原子数量以及原子之间的距离（这两个因素决定了它的密度）跟这块石头在何处没有关系。由于原子的数量还决定了石头的质量，所以任何一种物体的密度都是不变的，不管它来自于哪颗行星。多数固体物质的密度都很相近，处在同一个数量级。比如，水的密度是1克/立方厘米，铅的密度是11克/立方厘米（1克等于1千克的1/1000）。铅的密度更大，主要是因为铅的原子比水大10倍。地球的表面有很多水，也有很多岩石，因此地球的平均密度是5克/立方厘米。事实上，地球是太阳系中密度最大的行星，水星和金星紧随其后。即使氪星是由固体铀组成的，其平均密度也只有19克/立方厘米，不到地球的4倍。如果想让氪星具有15倍于地球的引力，氪星的密度就必须是75克/立方厘米。然而，自然界中还没有哪种物质具有这么大的密度。

如果氪星的密度跟地球一样，为了具有更强大的引力，它的半径就必须是地球的15倍。但是，这并不比密度问题更简单。在太阳系中，行星的大小各不相同，行星的地质构成与其大小有着密切的联系。天王星的半径是地球的4倍，比天王星大的还有海王星、土星和木星。但这些行星都是由气体组成的巨行星，没有牢固的地幔，无法建造城市，更不可能让类人生命存活。事实上，如果木星再大10倍，就跟太阳差不多大了。这样一来，木星的引力就会引发核聚变，太阳耀眼的光也是来自核

聚变。所以，如果木星再大一点儿，它就不再是一颗巨大的行星，而是会变成一颗小恒星。大型行星都是气态的，因为如果要形成一个很大的星球，就需要大量的原子，而宇宙能够提供的原材料基本上只有氢气或氦气。准确地说，宇宙中的基本物质，有73%是氢气，有25%是氦气。要形成一颗固态的行星，你要用到的其他物质——比如碳、硅、铜、氮等——在已知的宇宙中只占基本物质的2%。所以，大型行星通常都是气态的，它们在远离恒星的地方运行，那里的太阳辐射很弱，不会把这些行星表面的气体蒸发掉。构成固态行星所需的重元素的浓度比较低，所以这些行星会小一些，离恒星也近一些。如果这些固态的内行星太大，太阳引力就会立刻让它四分五裂。[2]氪星上的科学家既然能够建造出超人宝宝乘坐的飞船，这样的事情就不可能发生在半径是地球15倍的一颗气态行星上。

难道超人以及地表与地球类似但重力加速度是地球15倍的氪星，根本就不可能存在吗？也不尽然。我们刚才提到，自然界中没有一种常见物质的密度是地球的15倍。但是，天文学家发现了超物质这种超新星爆炸后的残余物，其密度大得离谱。我们知道，当气态行星的大小超过一定阈值的时候，其中心产生的引力的压缩作用会非常强，让不同原子的原子核产生聚变，变成更大的原子核，同时释放大量的能量。这种能量的来源可以用著名的爱因斯坦方程$E=mc^2$来表达，也就是能量E等于质量乘以光速的平方。聚变后的原子核质量实际上比两个单独的原子核要轻一点儿。这个质量上的小差异，乘以光速的平方（一个很大的数字），就会产生非常大的能量。这股能量从恒星的中心向外辐射，产生向外的动能，与向内的引力作用平衡，从而使恒星的半径保持稳定。当所有的氢原子核聚变成氦原子核之后，又有一部分氦原子核会聚变成碳原子核，碳原子核又会聚变成氮、氧以及其他较重的元素，包括铁。随着恒星产生越来越重的原子核，这个聚变过程会不断加速，所以铁和镍都是在这个恒星的生命走向尽头的时候生成的。原子核越来越重，聚变的效率在不断降低，所以当铁原子核发生聚变时，产生的能量已经不足以平衡向内的引力作用了。于是，引力占了上风，迅速把这颗星球压缩到很小的体积。此时，恒星中心的压力非常大，最后一次核聚变会产生包括铀在内的各种更重的元素，同时释放出巨大的能量。大型恒星生命的最后这个阶段叫作“超新星”阶段，伴随着最后一次能量爆发，恒星内合成的各种元素在宇宙中四处飞散。最终，宇宙中的引力会把它们聚合在一起，形成行星或者恒星。你身体中的每一个原子，你坐的椅子，或者《动作漫画》第1期的纸张和油墨中的每一个原子，都是由某颗消逝的恒星的残余物质合成而来。所以，我们全都是由星尘组成的，如果你

不喜欢这个词，我们也可以说自己是由太阳的“排泄物”组成的。

大型恒星中心的引力非常大，以至于在超新星爆发之后还留下一个巨大的残核。引力将质子和电子压缩成中子，最后挤压在一起，成为由核物质组成的固体。这种大型恒星的残余物被称为“中子星”，它们的密度仅次于黑洞（来自更大的恒星残骸，其引力强到连光都无法逃逸）。与铅的密度（11克/立方厘米）相比，中子星的密度约为10^{14}克/立方厘米。也就是说，在地球上，一茶匙的中子星物质重量会超过1亿吨。所以，这种物质应该可以增强氪星的引力。

如果一个行星的大小跟地球差不多，在其中心有些许的中子星物质，就会极大地提升这颗行星对其表面物体的引力。事实上，在这颗和地球差不多大小的行星的中心，只需要有一个半径为600米（相当于6个足球场的长度）的由中子星物质组成的球体，就能产生150米/秒^{2}的重力加速度，而地球上的重力加速度仅约为10米/秒^2。所以，如果氪星的引力要达到地球的15倍，它的中心就必须有中子星物质。

这样一来，我们就知道氪星为什么会爆炸了。密度这么高的核心会对星球表面产生巨大的压力，导致那里很难有稳定的物质分布。在这样一个星球上，火山活动和板块运动都会导致巨大的灾难。强地震来临前的种种信号会向科学家们发出警告，促使他们把小孩用飞船送到其他遥远的星球去，最好是没有中子星核心的星球。

我们应该向杰里·西格尔和约瑟夫·舒斯特这么伟大的科学见解致敬。1938年，这两个来自俄亥俄州克利夫兰的年轻人对天体物理学和量子力学的了解甚至超过当代的许多物理学教授，又或者他们只是非常幸运地猜中了答案。在他们创作出这个故事的5年前，天文学家沃尔特·巴德和弗里茨·兹维基刚预言了中子星的存在，而相关的确切证据直到20世纪60年代才被发现。也许，如果国家漫画出版公司的谢尔登·迈耶没有尝试推出超人漫画，西格尔和舒斯特就会在像《物理评论》这样的科学杂志上发表文章，那样的话，科学和漫画的历史都将被改写。

在上一章里，我提到了一个问题：当超人纵身一跃跳上高楼的时候，他离地那一刻的加速度应该是多少。通过计算我们得知，为了跳到1/8英里的高度，他起跳时的速度应该是200英尺/秒，或者说是140英里/小时。如果他蹬地用的时间是1/4秒，那么他对应的加速度就是800英尺/秒^2，也就是重力加速度的25倍。

本书英文版第一版出版后，有细心的读者指出，我高估了超人起跳所用的时间。用于确定起跳速度的公式$v^2=2gh$，也可以用于计算他跳起来时的加速度。在这种情况下，速度仍然是200英尺/秒，但我们用的不是g，而是他的跳跃加速度。之前我们用的高度是建筑物的高度，也就是1/8英里，现在我们用的高度是从他准备起跳时蹲着的高度到他将要跃离地面时站直的高度之差。这个距离最多也就是3英尺，所以我们之前估计他的跳跃加速度能达到800英尺/秒^2，而重新计算之后我们发现他的加速度肯定超过了6600英尺/秒^2。这也就是说，他起跳用的时间不是1/4秒，而只有0.03秒。没错，他真是太厉害了。

如果起跳时间是1/4秒，那么跳跃的加速度也比较小，而超人的腿需要施加在地面上的力就是5600磅力。如果起跳时间只有0.03秒，那么更大的加速度就导致施加在地面上的力会超过46000磅力。基于我们在第1章中所讨论过的知识，我们可以得出以下结论：氪星上的重力加速度g_k是地球上的重力加速度的125倍，而不是之前我们估计的15倍。

在第1章里，我取了一个比较长的时间，也就是1/4秒，原因主要有两个。我在课堂上曾经做过一些非正式的实验，我让学生们跳起来并记录下他们蹬地的时间，基本上时间都不到一秒，平均下来大约是1/4秒。当然，我的学生里没有谁能跳上高楼。第1章的目的就是为了解释什么是加速度，了解速度变化的时间间隔。更重要的是，在这一章里，我有意使用了较小的跳跃加速度和腿部力量数值。如果我采用了0.03秒这个跳跃时间，得出的结论就会是氪星上的重力加速度是地球上的125倍，我估计大家应该都会觉得不太可能会存在这样一颗星球。相对来说，引力为地球15倍的行星似乎还比较合理，而且要说明这样的星球同样是不可能存在的，就需要讨论物质的密度和大型行星的地质情况。我的目标是用超级英雄的力量来阐明真实世界中的物理学。

时不时会有读者要求我解释清楚，氪星上的重力加速度怎么会只有地球的15倍。我就会用以上的论述来解释我的理由。一些漫画迷会抗议说：“看吧，跳起来的时间只有1/4秒，根本就不符合现实！”对此我想说的是，我们正在讨论的是氪星之子的英雄事迹，他能够徒手使钢铁弯曲，让河水逆流，而这些人觉得不现实的，竟然是他纵身一跃跳上高楼时蹬地所用的时间！而关于这一点，几乎所有人的意见又都一致了。我毫不介意有人纠正我的错误，事实上，我震惊地看到热情的读者拿起笔来，认真地计算，这让我更加诚实和严谨。毕竟，这才是最重要的。

[1]1码≈0.9米。——编者注
[2]这是由于行星的一侧靠近太阳，会产生不平衡的作用力。

第3章 格温·斯黛西之死

如果说参议院的听证会标志着漫画的黄金时代的结束，那么给了白银时代致命一击的则是漫画本身。现在看来，白银时代（从20世纪50年代后期到20世纪60年代）的漫画充满了对未来的乐观预期，而且近乎盲目。20世纪50年代末期到60年代初期，DC漫画公司的尤利乌斯·史瓦兹和他的同事们重新塑造了黄金时代的漫画人物，像闪电侠、绿灯侠、绿箭侠（结合了蝙蝠侠和罗宾汉的特点，箭袋里装满了各式各样的箭头，比如“拳击手套箭头”和“手铐箭头”，这些东西违反了好几个空气动力学基本原理）。这些人物延续了他们在黄金时代的积极与正义，故事长度通常为20~22页，由情节驱动，但没有给人物的发展留出多大的空间。DC漫画书中白银时代的超级英雄会通过某种根本不可行的方法获得超能力，然后自然而然地用这些超能力去打击犯罪、保护人类（当然，还要穿上花花绿绿的制服），却从来不会质疑自己的职业诉求。

DC漫画公司的主要竞争对手漫威漫画公司中的超级英雄则完全不一样，像绿巨人浩克或者X战警这些故事人物都具有一定的悲情色彩，走霉运对于他们而言简直是家常便饭。1961年，漫威漫画公司（原名时代漫画公司）濒临倒闭。在黄金时代的巅峰期时，它曾经创造出霹雳火、海王子纳摩以及美国队长等人物，但后来却沦落到只能靠怪物漫画、西部漫画、搞笑的动物故事以及年轻人的浪漫爱情故事苟延残喘。然而，DC漫画公司的老板杰克·利博维茨和漫威的出版人马丁·古德曼之间的一场高尔夫球比赛，将这一切都改变了。利博维茨吹嘘说DC漫画公司的成功源自一个特别系列——《美国正义联盟》，这个联盟中有神奇女侠、闪电侠、绿灯侠、海王、火星猎人以及其他英雄，他们携手与各个超级反派做斗争。古德曼回到办公室之后，叫来了编辑斯坦·李（他是古德曼的外甥，也是公司仅存的最后一名全职员工），让他出版一本包含一系列超级英雄的漫画。那时候漫威漫画公司已经不出超级英雄漫画了，所以斯坦·李没办法像DC漫画公司那样把不同漫画里的人物组合在一起。最后，他创造出一个全新的英雄系列。这个由斯坦·李编剧，由杰克·科比绘制的《神奇四侠》系列取得了巨大的成功，将漫威带出绝境，并走上成功之路。[1]

斯坦·李和杰克·科比最具独创性的贡献在于，他们让漫画角色不断

成长，并拥有独特的个性。与DC的超级英雄的一个显著不同是，漫威的超级英雄并没有把自己的超能力当成是上天的恩赐，而总是感叹命运的捉弄。在《神奇四侠》第1期里，当宇宙辐射把本·格瑞姆变成巨大的橘红色石头人时，他并没有因为获得新的超能力而扬扬自得，反而愤愤不平地贬损自己变成了移动的红砖小院，一心想回归人形。在漫威漫画里，最爱抱怨生活的当然是蜘蛛侠。

1962年，在由斯坦·李编剧、斯蒂夫·迪特科绘制的《惊奇幻想》第15期里，年轻的彼得·帕克是个瘦小而木讷的高中生，总是没完没了地受到学校里的风云人物的欺负。帕克是个孤儿，与疼爱他的梅婶和本叔生活在一起。他没办法和那些受欢迎的学生一起参加课后活动，只能独自沉迷于科学，因此参加了一次关于辐射的物理学实验。正如白银时代漫画里的常见套路一样，辐射事故给他带来了超能力。在这个故事里，一只意外受到辐射的蜘蛛咬伤了帕克，并在他体内留下受到辐射的蜘蛛血。

帕克发现，被蜘蛛咬的这一口让他获得了很多蜘蛛才有的习性，比如高度的灵活性和飞檐走壁的能力。因为蜘蛛可以举起比自身重几倍的物体，帕克的力量也有了“几倍”的增长。帕克还获得了第六感，可以提前感知危险，你称之为“蜘蛛感”。大家猜测，斯坦·李可能因为没能打死浴室里的蜘蛛，就将其归咎于蜘蛛有一种预知灾难的第六感。幸运的是，帕克没有像蜘蛛一样，从肛门中喷出蜘蛛丝，而是利用化学和力学知识，制造出一个戴在手腕上的蛛丝喷射器，这一点可能要感谢漫画规则管理局。[2]

帕克受尽了同学们的嘲笑和欺辱，所以他最开始把这些超能力当作能让他扬名立万的手段。在职业摔跤比赛中成功展示了自己的能力之后，他又给自己做了一套红蓝相间的制服和面具，作为比赛服装。在电视首秀的前夜，他觉得自己充满力量，还傲慢地拒绝帮助保安追捕逃跑的小偷，虽然这对他而言易如反掌。然而，等他回到家时却发现本叔被歹徒杀害了。在他用超能力抓住了这个歹徒后，他懊恼地发现，这就是他前几天放过的那个小偷。此时，他终于明白本叔对他说过的那句话，“能力越大，责任越大”。从此以后，帕克便致力于打击犯罪、惩恶扬善，成为众人喜爱的蜘蛛侠。

但是每一期里，他还是会不停地抱怨生活。李和迪特科的一个创新之处就在于，他们在《蜘蛛侠》中引入了一系列让蜘蛛侠头疼的现实生活中的问题和困难，甚至比他的对手们还要讨厌。彼得·帕克要面对高

中生轰轰烈烈的恋爱与妒忌、囊中羞涩、对梅婶身体的担心、过敏反应，还包括扭伤的胳膊（在《超凡蜘蛛侠》第44~46期里，他的胳膊一直吊着绷带），还要与秃鹫、沙人、章鱼博士、绿魔对抗。而最具破坏性的现实问题（这个问题也宣告了盲目乐观的白银时代的终结）则是，1973年《超凡蜘蛛侠》第121期中彼得·帕克的女朋友格温·斯黛西死了。她的死并非出自编剧、编辑或是读者的意愿，而是由于牛顿运动定律。

在《超凡蜘蛛侠》第14期中，绿魔作为神秘的反派头目首次登场，并成为蜘蛛侠的头号对手。在经典的《超凡蜘蛛侠》第39期里，绿魔不但变得更强大，得到了更多的高科技装备，比如恶魔滑翔机和南瓜炸弹，他还撕下了蜘蛛侠的面具，知道了他的真实身份是彼得·帕克，这让绿魔在二人的对决中占据了优势地位。在《超凡蜘蛛侠》第121期中，绿魔绑架了蜘蛛侠的女朋友格温·斯黛西，把她带到了乔治·华盛顿大桥[3]的顶端，以她为诱饵引来蜘蛛侠。在打斗的过程中，绿魔将格温从桥上推了下去（见图6和图7）。



© 1973 Marvel Comics

图6 在《超凡蜘蛛侠》第121期中，格温·斯黛西从乔治·华盛顿大桥坠落，濒临死亡的边缘，注意倒数第二幅图里的文字——“咔嚓”



© 1973 Marvel Comics

图7 目睹格温·斯黛西的死，让蜘蛛侠学到了一堂残酷的物理课，而绿魔的所谓科学天赋也让人产生了质疑

尽管在格温坠入河水前的最后一刻，蜘蛛侠用蛛丝拉住了她，但格温还是死了。“你用蛛丝拉住她之前，她就死了！”绿魔嘲讽道，“从那么高的地方摔下去，不管是谁都死定了——根本不用撞到地面！”显然，发明了恶魔滑翔机和南瓜炸弹这些高科技装备的绿魔，对于动量守恒定律存在一些误解。

如果可怜的格温确实因为“高空坠落”而死，那么跳伞运动员和伞兵们秘而不宣的命运则说明航空业存在着不可言说的阴谋。所以长久以来，漫画粉丝们一直在争论，到底是高空坠落还是蛛丝害死了格温。在2000年1月的《巫师》杂志里，这个问题被列为漫画中的头号争议问题。（其他问题还有：绿巨人浩克和超人谁更强壮？闪电侠和超人谁速度更快？[4]）现在，运用物理学的知识我们就可以知道格温·斯黛西真正的死因是什么了。

我们要问的关键问题就是：蜘蛛侠的蛛丝拉住高空坠落的格温时要承受多大的力？

格温·斯黛西的最终命运

要想知道拉住格温·斯黛西的力有多大，我们先要知道在蛛丝拉住她的时候，她的坠落速度是多少。我们前面讨论过超人轻轻一跃跳上高楼所需的速度，当时我们发现初始速度v与最终高度h（此时他的速度是0）有关，这个关系可以用$v^2=2gh$来表示，其中g代表重力加速度。从h这个高度以$v=0$的初始速度坠落，并以万有引力常量为加速度不断加速的过程，其实就是从起始点向高度为h的点跳跃的反向过程。

因此，我们可以用$v^2=2gh$这个表达式来计算在蛛丝拉住格温之前，她的速度是多少。假设蜘蛛侠是在她掉落了大约300英尺的地方拉住了她，那么格温的速度大约是95英里/小时。同样，空气阻力会让她的坠落速度稍稍减慢，但正如我们在图6中看到的，她是沿着流线型的轨迹掉下去的。我们接下来要说的是，对于格温来说，危险并非来自速度，而是来自水面对她的冲击力。

要想让格温的速度从95英里/小时变成0，就需要由蜘蛛侠的蛛丝施加一个外力。这个力越大，格温的坠落速度的变化量就越大，或者说减速越快。为了算出在格温落入河水之前把她拉住需要多大的力，我们又要用到牛顿第二定律，即$F=ma$。我们知道，加速度就是某段时间内速度的变化量。在表达式$F=ma$的两边同时乘以减速所花费的时间，就可以得到：

力×时间=质量×速度的变化量

一个物体的动量等于质量与速度的变化量的乘积（即等式的右边），而等式左边力与时间的乘积叫作冲量。那么，由上面这个等式我们知道，要想改变一个运动物体的动量，就必须在一定时间内施加一个外力。时间越长，改变同样的动量所需要的力就越小。

这也是汽车安全气囊的原理。当你开车沿着高速公路行驶时，假设行驶速度是60英里/小时。当你的车撞到障碍物停下来时，你的身体仍会以60英里/小时的速度继续向前冲，因为除非有外力作用（瞬间产生），否则物体会继续保持运动。在没有安全带和安全气囊的年代，施加这个外力的通常是方向盘。你的头撞上方向盘只是一瞬间的事，所以让你的头停下来所需要的力也是非常大的。安全气囊遇到压力会迅速膨胀，与撞上方向盘相比，你的头与膨胀起来的安全气囊接触的时间更长，让你的头停下来所需要的力也就更小。所以，安全气囊能够减轻紧急刹车造成的伤害。当然这个力还是很大，可能会让开车的人失去意识，但它不会造成致命伤害。力与时间的乘积始终不变，因为结果都是一样的，即速度从60英里/小时减至0。这个物理学原理也解释了为什么拳击手会在受到击打时蜷缩身体，他们这样做是为了延长自己的脸和对手的拳头接触的时间，以减轻脸部所承受的力。

我们再来说蜘蛛侠，他的蛛丝没有弹性，这对格温·斯黛西来说是一件好事，但这也意味着阻止她跌落的时间会很短，这可不是一件好事。这个时间越短，达到一定动量所需要的力就越大。对于格温而言，她的速度变化量是95英里/小时–0英里/小时=95英里/小时，我们假设她的体重是110磅，在公制计量法下是50千克。如果蛛丝只用了0.5秒就让她停止坠落，蛛丝所施加的力就约为970磅力。因此，蛛丝的力差不多是格温重量的10倍。我们知道，一个物体的重力是$W=mg$，其中g是重力加速度，因此我们也可以说在0.5秒的时间内蛛丝所施加的力约相当于10个g。我们在图6中可以看到，当蛛丝让格温停止坠落的时候，她脖子旁边的声音效果（“咔嚓！”）表明在这么短的时间里受到一个这么大

的作用力会产生什么后果。与此相反，蹦极的人从很高的地方跳下来时，蹦极绳要花几秒的时间才能伸展开，这样一来，制动力就能够保持在安全范围内。

以这么快的速度坠落，又在这么短的时间内停下来，对格温而言，其实被蛛丝拉住和撞上水面基本上没什么区别。然而，也有记录显示，有人承受了比格温·斯黛西更大的力却能死里逃生。1954年，约翰·斯塔普上校驾驶一辆尚处于试验阶段的火箭滑车从高空中坠落下来，他承受了相当于40个*g*的力，他的生还简直可以与经受住“无麻醉拔牙”相提并论。当然，斯塔普上校被牢牢固定在滑车内的位置上，滑车对他起到了支撑作用。更典型的例子是，从桥上跳下来自杀的人，死因大都不是溺水，而是脖子被摔断。以很快的速度撞击水面和撞击地面的效果是一样的，因为你坠入水中的速度越快，水发生位移的阻力就越大（第4章说到闪电侠的时候我们会详细讨论这个问题）。这对于格温·斯黛西和蜘蛛侠来说都是一件不幸的事，但却说明漫画里的物理学知识有时候是对的。所以作为读者，我们什么时候都不应停止怀疑。

蜘蛛侠似乎也学到了关于冲量和动量变化的物理学知识。在《蜘蛛侠：极限》第2期里有个故事叫“测试”，这个名字可谓恰如其分。在这个故事里，当擦窗工人从蜘蛛侠身边急速跌落的时候，蜘蛛侠先是牢牢地攀附在摩天大楼的楼顶，然后紧随着坠落的工人跳了下去，他需要解决一个存在于实际生活中的物理学问题，这可比期末考试的压力大多了。当他和擦窗工人之间的距离渐渐缩短（因为蜘蛛侠从楼顶跳下去的时候初始速度比擦窗工人大）时，他想道，“我不能出错。如果我的蛛丝拉不住他，他就会摔断脖子。”正如我们在图8里看到的，蜘蛛侠找到了一个好办法，那就是让自己的速度跟那个工人一样，在两个人相对静止的时候抓住他。（我不知道蜘蛛侠怎样才能放慢自己的坠落速度，变得跟擦窗工人一样——也许是用脚摩擦墙面？）然后，蜘蛛侠射出蛛丝，他强有力的双臂能够经受住动量的变化所产生的巨大冲力。

2002年电影版《蜘蛛侠》里也用到了这个方法。当绿魔把玛丽·简·沃森从皇后区大桥的塔顶扔下去的时候，蜘蛛侠并没有用蛛丝拉住她，这很明显是在向《超凡蜘蛛侠》第121期致敬。这一次，蜘蛛侠随着她一跃而下，抓住她之后，才用蛛丝把两个人吊在（相对）安全的地方，整个过程跟图8所示的一样。看来，英雄的非凡智慧之一就在于吃一堑长一智。

© 2004 Marvel Comics

图8 《蜘蛛侠：极限》第2期（2004年5月）中的故事“测试”中的一幕，漫画中的文本框描述了蜘蛛侠在应用牛顿第二定律时的思考过程

当然，不仅是蜘蛛侠，绿魔从中也有所收获。我们刚才提到，2000年1月的《巫师》杂志描述了格温·斯黛西之死所引发的争议在漫画领域内没有结论这件事。在那期杂志出版的几个月之后，我给《巫师》杂志的编辑写了一封信，信中简述了以上的物理学知识。两年后，2002年8月《彼得·帕克：蜘蛛侠》第45期中的一个故事表明，绿魔也掌握了这些物理学知识。他把格温·斯黛西之死的视频发给媒体，想让蜘蛛侠受到心理折磨。在这段视频里，绿魔把自己刻画成这桩惨剧中一个无可奈何的英雄，他说道：

我发现这个女孩掉下去了，便赶忙调整滑翔机的方向去救她。我开始俯冲，但还没等我抓住她，蜘蛛侠就干了一件蠢事：在她坠落速度那么快的时候，竟然用蛛丝拉住了她。于是，她的脖子就像腐朽的树枝一样断了。

绿魔花了将近30年的时间才搞清楚害死格温·斯黛西的并不是高空坠落，而是骤停。像绿魔这么扭曲邪恶的疯子都能把这个物理学知识搞明白，你们当然更没问题了。

[1]DC漫画公司和漫威漫画公司的知情人士否认有过这样一场高尔夫球比赛。尽管如此，但这场比赛仍被许多粉丝视为“漫威漫画”化腐朽为神奇的契机，它已经成为公认的传奇，不管是不是事实。

[2]在2002年的电影《蜘蛛侠》中，帕克被基因变异的超级蜘蛛咬伤，于是获得了用手腕上的喷射器射出蛛丝的能力。这让制作电影的人无须解释，为什么少年蜘蛛侠能够发明和制造出一种革命性的黏合蛛丝，却一直负债累累。

[3]虽然漫画中绘制的桥很明显是布鲁克林大桥，但它在故事中被称为乔治·华盛顿大桥。2004年，斯坦·李承认这是个错误。在后来重印的版本中这座桥就被更正为布鲁克林大桥了。

[4]答案是闪电侠！

第4章 闪电的真相

一个漆黑的夜晚，狂风大作，中心城警察局的一位科学家巴里·艾伦正准备离开办公室。他驻足在化学储藏室旁，惊叹这里竟然有如此多的化学药剂。尽管他受过科学教育，但还是在这样一个雷电交加的夜晚站在了一扇打开的窗户旁边。突然一道闪电射进室内，击碎了化学容器，容器中的药剂洒在了艾伦身上，同时一股电流也经过他的身体。

幸运的是，这次事故只是把他击晕而已。当天晚上醒来后，他惊奇地发现自己徒步就能轻松地超过行驶的出租车，还能瞬间接住从盘子中掉落的食物并放回盘中。这次事故让他拥有了超级速度，他穿上简单而优雅的红黄制服，利用他的超能力去打击犯罪，成为闪电侠。[1]

跟速度相关的物理现象有很多，在白银时代早期，《闪电侠》的几位主要编剧约翰·布鲁姆、罗伯特·卡耐尔和加德纳·福克斯就提到了一些。由于闪电侠跑得很快，所以经常会飞檐走壁或者在海面飞奔，他甚至能够抓住射向他的子弹。以上这些是否符合物理学原理呢？答案是若闪电侠的超乎寻常的速度成立，一切就都符合物理学原理。

闪电侠在白银时代的第一次亮相是在《展示橱》第4期“雷霆英雄之谜”中，他跑上一座办公楼的外立面，因为他的“超凡速度使其克服了重力作用”。在前文中，我们讨论了一个人的初始速度与他能跳到的最大高度之间的关系。当一个人上升的时候，他的速度会因重力作用而下降，直到达到高度h，此时他的速度为0。在第1章中，我们计算出，超人要想跳到660英尺的高度——相当于三四十层楼，他的初始速度至少要达到140英里/小时。但由于闪电侠的奔跑速度比这快得多，因此他应该能轻易跑上40层建筑的楼顶。当他接近建筑物墙壁的时候，只要他的速度大于$v=\sqrt{2gh}$，他就应该能够沿着外墙跑上楼顶，而不违反任何物理学定律（除了他每小时能跑几百英里这件事）。相反，一个没有超能力的普通人最快的奔跑速度差不多是15英里/小时（不排除跑得更快的可能），这个速度只能让他冲上一个小小的工具棚顶。

但是，关键问题并不在于闪电侠凭借足够快的速度能到达多高的高

度，而在于是否有一个牵引力，使他能沿着垂直的墙壁一直跑到楼顶。即便是走路这个简单的动作，也包含着一系列有趣的物理学原理，如牛顿第三定律所说，力总是成对出现的。你在跑步或者走路的时候，你的脚向地面施加了一个水平的力，它的方向与你前进的方向正好相反。地面对你的脚也会施加一个大小相等、方向相反的力，这个力就是摩擦力。想象一下走在均匀覆盖着一层机油的楼梯上的情况，你就会明白摩擦力有多重要，即便只是对于简单的走路而言也是如此。如果闪电侠的靴子与地面没有摩擦力，他将寸步难行。闪电侠难缠的死对头之一——冰冻队长有一把“冰冻射线”枪，能让所有物体的表面结冰。冰冻队长经常使出这招，在闪电侠面前制造出冰层，没有了摩擦力，闪电侠的超级速度便没有了用武之地。

由于在日常生活中普遍存在并起着基础作用，摩擦现象常常被视为理所当然，事实上这是一种很复杂的现象。为什么在一个平面上拖拉一个物体时会有阻力呢？列奥纳多·达·芬奇和阿蒙东先后在16世纪初期和17世纪中期以科学的方式论证了摩擦力的基本特性，但直到20世纪20年代原子被发现，人们才对这一现象的根本原因有了准确的认识。

物质的原子构成方式主要有两种：第一，以统一的、周期性的晶态结构存在；第二，以随机的、非晶态的聚合物形式存在。当然，多数固体物质都介于这两种方式之间，有序晶态区域之间通常是随机连接的，有时也会被非晶态部分隔开。因此，即使看起来非常光滑的物体表面，从原子层面看也不一定是平滑的。实际上，即便是千分之一毫米（比单个原子大得多）大的物体，其表面就已经像连绵起伏的山脉了，而不是波澜不惊的湖面。因此，如果两个物体相互摩擦，不管这两个物体的表面看起来有多光滑，从原子层面上看，都不啻把落基山脉倒过来压在喜马拉雅山上，然后以某个固定的速度拉着上下颠倒的落基山脉在喜马拉雅山上移动。我们自然会想到像板块运动那样剧烈的地面隆起和大范围的扭曲变形，事实上，原子层面上的摩擦的剧烈程度不亚于此。每移动一下，原子间的连接就会断裂，产生原子雪崩和原子地震。原子重新排列的阻力就是“摩擦力”，没有摩擦力，闪电侠也只能原地踏步。

物体沿着平面运动时受到的摩擦力的大小与物体的质量是成正比的。物体越重，它移动时所要克服的摩擦力就越大。就算有足够大的力，拉动一个又大又重的东西还是比拉动一个又小又轻的东西难。古埃及人为修建金字塔发明了很多巧妙的方法来挪动巨大的石块。

其中一个典型的方法就是利用斜坡。在水平的平滑表面上，物体的

全部重量都垂直作用于这个平面。然而，在倾斜的表面上，虽然重量仍然是向下的并指向地心（想象斜坡上的一条铅垂线），但只有部分重量垂直作用于斜坡表面，其余的重量则都作用于斜坡下方。而摩擦力只与垂直作用于表面的重量成正比，所以，物体在倾斜表面上的摩擦力比在平滑的水平表面上要小。即使表面很粗糙，只要斜坡的倾斜角度足够大，将物体固定在上面的摩擦力就不足以克服重量所产生的向下的拉力，物体就会滑下斜坡。然而，闪电侠是在垂直的墙面上跑，他身体的重量完全没有垂直作用于大楼外墙。因此，从理论上说，他的鞋和墙面之间完全没有摩擦力，他根本跑不起来。

那么，他到底能不能沿着大楼外墙跑上楼顶呢？从理论上说是不行的，至少不是我们通常所理解的“跑步”。他可以跳上墙面，在上面前后迈动双腿，让自己看上去就像在跑步。通常，当闪电侠跑动的时候，他的脚与路面成一定角度，向路面施加压力，路面对他的反作用力（牛顿第三定律）也与路面成一定角度。产生的结果就是，他在垂直方向和水平方向上同时在加速。垂直的速度让他从地面上弹起来，而水平的速度使他向前飞奔。垂直方向上的速度越快，他弹得越高；水平方向上的速度越快，他前进的距离越远。在这短短的一瞬间，重力战胜了小小的垂直速度，把他的脚拉回地面，并准备迈出下一步。跑得快的人，当然也包括闪电侠，在两步之间双脚都是离地的。他们跑得越快，在“空中”停留的时间就越长。如果闪电侠每步弹起的垂直距离是2厘米，在重力把他拉回地面并迈出下一步之前，他在空中停留的时间大概是1/8秒。1/8秒对于闪电侠来说可不算短。如果他的水平速度是5250英尺/秒，也就是3600英里/小时，他两步之间的距离就将超过660英尺。这大约是1/8英里，也就是第1章中超人纵身一跳的高度。只要闪电侠不低于这个速度，他就不用担心脚步失控，因为他迈一步就可以达到一栋楼的高度。

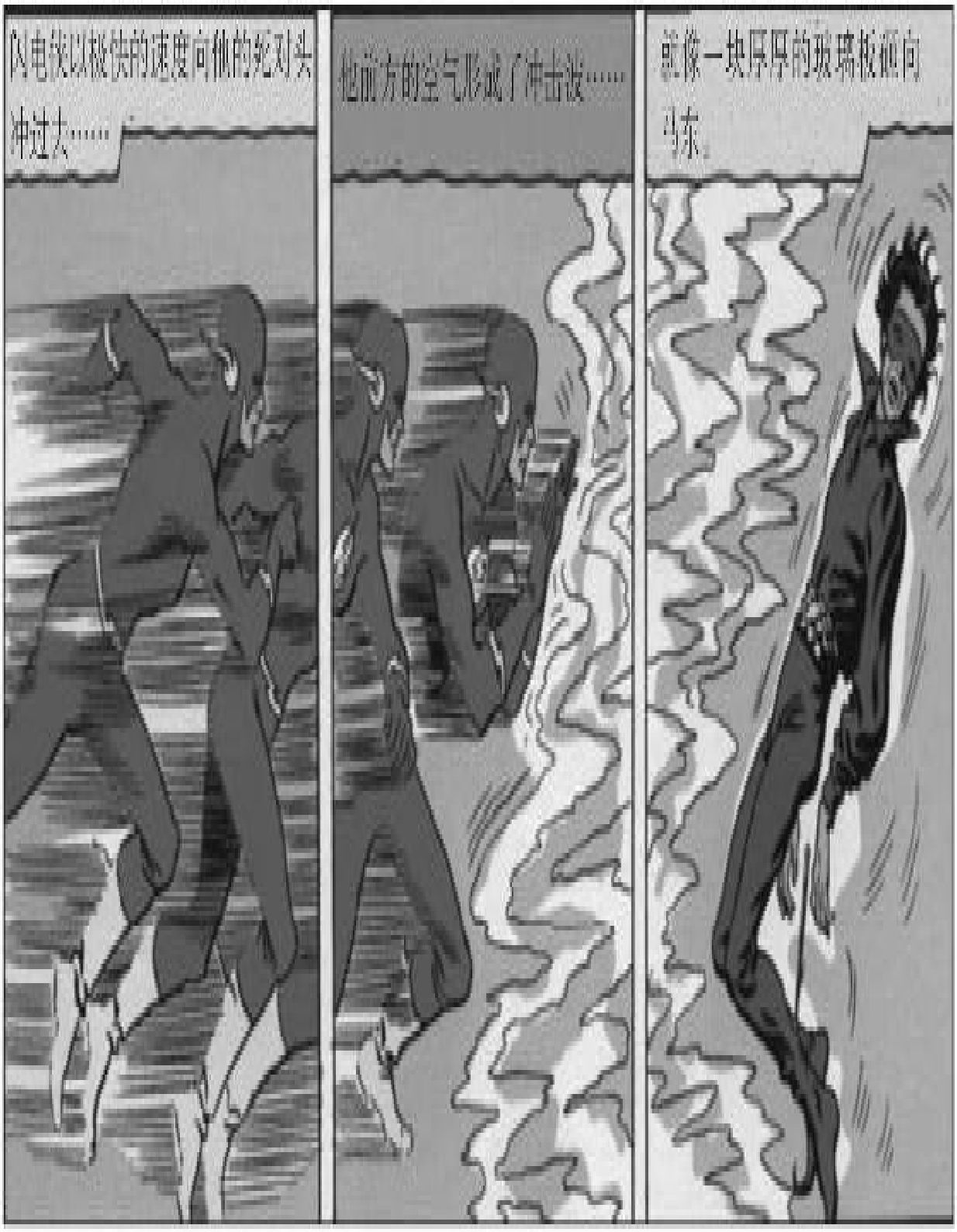
在闪电侠跑上楼顶之前，他需要把自己的奔跑方向从水平调整为垂直。在后面的章节我会继续讨论，运动方向上的任何变化，不管是蜘蛛侠凭借蛛丝飞檐走壁，还是闪电侠在建筑外墙上变换方向，都需要一种外力产生加速度。把运动路线调转90度需要借助一个很大的力，这个力来自闪电侠的鞋与地面的摩擦。除了超级速度之外，闪电侠的“不合常理的奇迹”自然还包括他能够产生并且承受住除超人以外的超级英雄几乎承受不了的加速度。

牛顿运动定律也可以解释为什么闪电侠能在海面或是湖面上奔跑。对于格温·斯黛西来说，撞击水面的最终速度是决定其生死的关键因

素，而闪电侠的超级速度则使他能够在水面上飞奔。当一个人在空气、水或者机油等流体介质中移动时，这些介质会随着你的脚步散开。介质的密度越大，人的动作就越缓慢。在有水的游泳池里走比在空游泳池（也就是装满了空气）里走需要费更大的力气；如果游泳池里装的是糖浆，就更费劲儿了。流体对于运动的阻力就是“黏度”，介质的密度越大，在其中运动的速度越快，黏度就越高。

对于像空气这种比较稀薄的介质而言，相邻分子之间的距离较远。在室内温度和压力条件下，相邻空气分子之间的距离大约是氧分子或氮分子直径的10倍。此外，每一个空气分子都在以1100英尺／秒（750英里/小时）的平均速度（这也是声音在空气中的传播速度）快速移动。当我们在空气中行走时，我们的面前不会形成一堵高密度的“墙”，因为我们的速度比空气分子的平均速度小得多。我们可以想象一下放牛的场景：在牛群奔跑的过程中，如果你想把一头牛赶进牛群，其他牛就会散开。如果这群牛在慢慢走，你用同样的速度把一头牛赶进牛群，它们就能聚成一群。当然，人的移动速度有可能超过声速（1947年，查克·耶格尔上校率先实现此举），但也要为此付出巨大的努力。如果你以比空气分子的移动速度更快的速度挤走空气，你的面前就会产生一块空气密度很大的区域（即冲击波）。

事实上，在“天气巫师的挑战”这个故事中，闪电侠就是用冲击波击退了天气巫师。马克·马东是个不入流的骗子，他偷了已故科学家弟弟的“天气魔杖”，从而能够控制天气。跟漫画里其他那些自我感觉良好的反派一样，一旦拥有了能够掌控大自然的武器，他就马上穿上华丽的制服，自称“天气巫师”，抢劫银行、扰乱警局。在故事的结尾，就像我们在图9中看到的，“闪电侠以极快的速度向他的死对头冲过去，他前方的空气形成了冲击波，就像一块厚厚的玻璃板砸向马东”。这从物理学角度准确地描述了闪电侠的超声速移动的效果，也是20世纪40年代困扰试图突破音障的战斗机飞行员的原因所在。当闪电侠以声速或超声速移动时，他产生的压力波就会形成“声波炸弹”，比如《展示橱》第4期中，一声巨响宣告了闪电侠的首次登场。



© 1959 National Periodical Publications Inc. (DC)

图9 “天气巫师的挑战”（《闪电侠》第11期）中的一幕，说明一个人移动得越快，就越难赶走前方的空气

当闪电侠将自己前面的空气挤压在一起之后，他身后的空气密度就会减小。与正常密度的空气相比，闪电侠身后的这种低密度空气可被视为部分程度的真空。空气会流动过来填补真空，而闪电侠身后这股空气流就会形成尾流区域。他跑得越快，他身后的空气与周围空气的压力差越大，纠正压力失衡所需的力也越大。在运动速度较慢的物体上，我们也能观察到这种现象，比如驶入隧道的地铁列车。封闭的隧道会强化驶离的列车所造成的上升气流，让列车后面的报纸和垃圾飞起来。虽然闪电侠周围并没有密闭空间，但他能够创造出一块低气压区，减缓路人、汽车或者巨型炸弹的坠落，他也可以像图10中那样绕着圈奔跑，形成一个旋涡，把坏人困在里面。



© 1960 National Periodical Publications Inc. (DC)

图10 当闪电侠以极快的速度奔跑时，就会在身后形成一个低密度区域，轻松地把强壮的博拉兹（对，这就是他的本名）和他的赃物送归警局。见《闪电侠》第117期

我们再接着讨论声音在空气中的传播速度问题。当闪电侠的速度大于1100英尺/秒（或者750英里/小时）时，他与其他人就只能通过视觉信息交流了。站在他身后甚至他身边的人都没办法跟他讲话，因为闪电侠的速度比声波的速度还要快。当然，对于站在闪电侠前面的人来说，他们之间可以进行语言交流，但还是会存在障碍。即便他能听到别人讲话，那种声音对于闪电侠来说也会十分尖锐刺耳。

我们所谓的“声波”实际上指的是在一个膨胀与收缩交替出现的区域，介质密度的变化。相邻的两个声波收缩（或膨胀）区域之间的距离叫作声波的“波长”，这与我们听到的音高有关。音高（或者频率）衡量的是每秒经过某个特定点的完整声波周期的数量。波长较长，音调较低（想想看低音提琴的音调，琴弦的长度与其发出声音的波长有关）；波长较短，音调较高。当闪电侠奔跑的时候，即便他没有超过声速，他的高速运动也会影响他听到的音高。假设他朝着一个人跑过去，那个人正在大声地向他发出警告。声波具有一定的波长，表示相邻的两个收缩或者膨胀区域之间的平均距离。当这些密度不同的声波传播到闪电侠耳朵里的时候，如果他是静止不动的，他听到的音调就是由讲话者的声音的波长决定的。但在闪电侠奔跑的时候，先是一个收缩的声波传到他的耳朵里，然后很快下一个收缩的声波又抵达他的耳膜。所以，闪电侠就会听到波长更短、频率更高的声音，因为他正在朝着声音的源头奔跑。他跑得越快，声音的波长和频率的变化就越大。

这种现象被称为“多普勒效应”。如果知道一个静止波源的波长，并用一个移动探测器测量这个波长，就可以确定探测器的速度。或者，你可以发出一个已知波长的波，让它在一个静止的目标处反弹，它就应该以同样的波长返回。如果目标朝着声源移动，反弹回来的波的波长会变短；如果目标朝着声源的反方向移动，探测到的波的波长会变长。天气观测站经常使用多普勒雷达去探测波长的变化，气象学家可以据此计算即将抵达的风暴速度。

这也是雷达枪的基本原理，它使用的是已知波长的无线电波。根据反射波与发射波的波长变化，来确定反射这些波的物体（像是扔出去的棒球或者疾驰的汽车）的速度。目标移动的速度越快，波长的变化就越大，探测到的声波音调就越高。如果闪电侠以500英里/小时的速度向一个人跑过去，这个人用正常的声音讲话，音高大约是每秒振动100次，闪电侠听到的声音就会变成每秒振动166次。虽然声音听起来会很奇怪，但闪电侠可以听清那个人的话。如果他跑得更快，会不会就听不到了呢？人类能够听到的音高极限值是每秒振动20000次，为了让闪电侠听到的音高能达到这个水平，他必须以超过150000英里/小时（也就是声速的0.02%）的速度向讲话者奔去。但如果闪电侠以这么高的速度奔跑，那么除了多普勒效应之外，还会有其他问题产生。

闪电侠抓住飞行的子弹的绝技也符合牛顿运动定律。如果你跑得比子弹快，就不需要防弹技术了。可是那些枪口下的无辜路人怎么办？图

11从物理学角度展示了在这种情况下超级速度的用处。在《闪电侠》第124期里，一个潜在的受害者这样描述：“……这位神奇的极速者仅仅靠与呼啸而过的子弹保持同样的速度，就能够在子弹射中目标之前用手拨开所有的子弹。”也就是说，闪电侠能让自己的奔跑速度与子弹的飞行速度一样，即二者的相对速度为零。你能在飞行的飞机上毫不费力地拿起一本书或者一个杯子，这是因为你和飞机是相对静止的。同理，闪电侠能抓住在空气中飞行的子弹，是因为他与子弹都以1500英尺/秒或者超过1000英里/小时的速度向同一方向运动。《闪电侠》第124期的编者注中指出，“闪电侠抓住子弹就像棒球守场员接住一个速度很快的滚地球，后者是靠迎着棒球的飞行方向挥动手套做到的！”

我们在第3章中讨论过，高空坠落的问题不在于速度而在于减速的过程。对于格温·斯黛西来说，她的制动时间非常短，以至于制动力非常大。我们在前面提到，拳击手受到击打时会蜷缩身体，是为了延长时间，让所受伤害最小化。正如编者注所指出的，闪电侠运用的也是相同的原理。除了能够急速奔跑，巴里·艾伦显然也能够承受加速或者减速时产生的巨大加速度。因此，当闪电侠停下来的时候，他抓住的那颗子弹也停下来了，这样他才能帅气十足地把子弹扔到对手脚下。



© 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

图11 闪电侠表明动量定理依然很重要，即便你奔跑的速度快如子弹（见《闪电侠》第124期）

[1]这种电气化学的奇怪事故再次出现是在《闪电侠》第110期，另一道闪电把相似的化学物质溅到了年轻的沃利·韦斯特身上，让他具有了超快的速度。年轻的沃利成了一名打击犯罪的斗士，他还有一个很有想象力的名字——闪电小子。

第5章 蚁人的大世界

在以蚁人的身份行侠仗义、打击犯罪、抓捕间谍之前，汉克·皮姆博士只是一名普通的生物化学家。他的初次亮相是在“蚁丘中的男人”中，那时候他正在与现代科学家的“克星”——筹集研究资金苦苦纠缠。我们来简要回顾一下这个故事的情节。在一次科学大会上，科学家评审组拒绝了皮姆申请研究项目资金的请求，甚至无情地嘲笑了他。“呸！你研究的那个可笑的理论，简直就是浪费时间，”一个教授嘲笑道，“根本没什么用！”另一位教授说：“你应该做点儿实用的研究！”但是皮姆说：“我只想做能激发想象力的事……比如我的最新发明！”我必须指出，这番交流有两个地方显得特别真实：第一，直到现在，在大学和科研实验室里，仍有两种类型的研究派别互不相让，即为了实际应用而进行的研究和受好奇心驱动的研究；第二，跟一般人不一样，科学家在日常交流里经常会用到“呸”这个字眼。

皮姆在第一次意外（你很自然就会得出这样的结论，因为几乎所有的超级英雄都很容易发生意外，至少在获得超能力的时候）接触缩小药剂时，有了一段在蚂蚁窝里的悲惨经历，这不禁让人想起1954年的一个科幻小说《不可思议的收缩人》。在皮姆用增长药剂恢复到正常身高之后，他立马把这两种药剂都倒进水槽冲进下水道。他意识到这些药剂“太危险了，不能再用在任何人身上”。他发誓说：“从现在起，我要开始研究实用项目了！”至于皮姆觉得什么样的研究比可逆微缩技术更实用，就留给读者自己想象吧。

皮姆的这个誓言在销量喜人的《惊异故事》第27期才被打破。正如图12中所示，在《惊异故事》第35期“蚁人归来”（Return of the Ant-Man）里，这位博士再次（在《惊异故事》第27期以前的故事里，他从未称自己为博士）使用了缩小药剂，并设计出一身醒目的红黑连体衣和一个可以跟蚂蚁交流的电子头盔。事实上，蚂蚁是靠分泌一种含有信息素的化学物质相互交流的，所以，关于皮姆头盔的工作原理我们就不深究了。穿戴上这身装备，科学家汉克·皮姆变身成了不可思议的蚁人，开始与普通罪犯、入侵的外星人以及像豪猪和蛋头这样的超级大反派作战。在与这位正义使者面对面（考虑到体量的差别，当然不是真的面对面）的战斗中，没有哪个坏蛋能获胜，而他凭借的超能力就是11毫米的

身高。

把故事人物缩小到昆虫尺寸的冒险之旅，50年来已经成为经典科幻和漫画作品的主打情节。尽管我们身处21世纪，却始终没有找到能把重量减轻的关键技术。究竟问题出在哪里呢？

不断涌现的新闻报道似乎确认了这样一个等式：科学事实等于科幻小说加上时间。比如，机器人能够组装汽车、打扫公寓；计算机在国际象棋比赛中击败人类世界冠军；治疗性克隆技术有望治愈许多恶性疾病；人类成功登月，在月球上行走后，又安全返回地球，而且是很多次；人类还实地探索了其他星球，至少是太阳系里的星球，但目前主要靠无人飞船。著名物理学期刊刊发了科学论文，讨论以“负能量”的概念来制造“时空穿梭机”的问题。（这种负能量能够防止虫洞坍缩——广义相对论中的概念，是翘曲速度的理论基础，即实现超光速旅行。）



© 1962 Marvel Comics

图12 在《惊异故事》第35期“蚁人归来”的首页，我们第一次看到了汉克·皮姆博士变身后的样子

从技术角度看那些关于未来的预测，《星际迷航》里的手持通信设备已经成为现代人的日常用品。事实上，某些类别的手机已能够进行数字化存储和转换，与互联网连接，这已经超出了20世纪60年代《星际迷航》作者的想象。《星际迷航》里的三录仪——一种和精装书尺寸差不多，能够进行化学和生物学分析的手持设备——也许很快就能买到了。掌上电脑已经普及，DNA芯片分析及相关功能正在研发中。尽管还没有便携式喷气背包和机器人管家，但平板电视、微波炉以及能提供人体内部三维图像的核磁共振成像都表明，我们确实已经来到了未来世界。

虽然以上这些奇妙的想象已经成真，但我们还是没办法随心所欲地把人变大或缩小。与微缩技术相比，实现翘曲飞行和时空穿梭的可能性更大。然而，20世纪60年代，漫画和电影里都在说军方的机密科学实验室很快就会发明出缩小射线。

1966年的科幻电影《神奇旅程》描述了一个外科医疗小组在一个微型潜艇上的冒险之旅，他们被缩小到细菌的尺寸，并被注入一位科学家的血液中，以移除他大脑中的血液凝块。在电影开始之前，屏幕上先出现了一段文字：“这部电影将带你进入未曾涉足之境，看到未曾目睹之景。在我们生活的这个世界上，月球之旅即将启程，我们身边一直有不可思议的事情在发生。总有一天，也许就是明天，你们在这部电影中看到的奇妙之旅终会成真。”3年后，人类成功登上了月球；与30年前相比，今天的奇迹更是随处可见。但是，要等到这样一群细菌尺寸的医生出诊还要过很长时间。到底是什么不可逾越的鸿沟导致皮姆博士无法从根本上改变自己身体的尺寸呢？

微缩过程在物理学上是不可行的（就我们目前所知而言），其原因在于，物质是由原子组成的，原子量级是自然界中的一个基本尺度，无法进行调整。艾萨克·阿西莫夫创作的《神奇旅程》提到，把一样东西变小至少需要满足以下三个条件之一：第一，把原子变小；第二，移除部分原子；第三，让原子排列得更紧密。

我们先来看看原子的大小。在描述原子的动画形象中，或者在“小心放射性物质”这样的警示招贴画里，围绕原子核运动的电子轨道呈现椭圆形，就像太阳系里围绕太阳运行的行星轨道。我们通常认为，从太阳中心到行星运行轨道最外侧的距离决定了太阳系的大小。同理，原子的直径也是由围绕原子核运动的电子的活动范围决定的。原子的大小一

般是1/3纳米，1纳米是十亿分之一米（1米约为39英寸）。在一根人类头发的横截面上，排列着超过300000个原子。

每个原子都有一个原子核，它是由一定数量的带正电荷的质子和不带电的中子组成的。原子中除了带正电荷的质子，还有带同等数量负电荷的电子。如果带相反电荷的物体互相吸引，那为什么带正电荷的质子不会把带负电荷的电子拉进原子核呢？确实有可能这样，但前提是电子保持静止。我们在第2章中讨论过，地球和月球之间相互吸引，月球沿固定轨道围绕地球运行，月球与地球之间的距离和月球的运行速度平衡了地球的引力。同理，电子也是按照一定的轨道围绕原子核运行的。有趣的是，不同原子的大小差别不大，不会超过两倍。原子核中质子的数量与“在轨道上运行”的电子的数量刚好相等。比较重的原子含有更多质子，能够更有力地把电子拉向原子核，但是，电子越多意味着带负电荷的电子间的排斥力越大，它们又会相互远离。这样一种平衡使得原子的大小通常是一亿分之二或一亿分之三厘米。

在这里我必须指出，电子并不是精确地按照椭圆形轨道运行的。事实上，量子力学不是要找到电子的确切位置，而是提供了一种计算与原子核有一定距离的电子的排布概率的方法。电子有可能到达的最远距离（“概率云”的覆盖范围）就是原子的“半径”，这与原子的大小直接相关。在计算原子半径的公式中，我们只需要知道电子的质量及其电荷数、原子核中的正电荷数，以及宇宙的基本常数*h*（*h*也被称为普朗克常量）。在第三部分中，我们将进一步讨论*h*，所以目前我们只需要知道*h*是一个确定的数值，就如同公式里电子的质量及电荷数一样。一旦确定了原子核中正电荷的数量（它决定了我们研究的是哪一种元素），所有因素就都确定了。所以，原子的大小是由一系列基本常数决定的，无法改变。

在艾萨克·阿西莫夫接下来的《神奇旅程：目的地大脑》中，他提出了一种微缩技术，即制造一个“局部畸变场”，以某种方式改变普朗克常量。如果*h*成了一个可变量，把它的值缩小为现值的1/10，就可以把原子的大小缩小为现值的1/100。无须多言，在现实世界里我们还不知道如何做到这一点，正因为如此，*h*仍被视为一个恒定的常量。如果我们能够找到一种改变自然界中的基本常数的方式，比如改变光速或者电子的电荷数，我们的生活将会发生天翻地覆的变化。在那一天到来之前，这些常数还是恒定不变的，因为这些常数决定了原子的半径，所以原子的大小也是不变的。这样一来，我们就无法把原子变小，至少目前

是这样。

那么，关于微缩技术的第二个条件，也就是移除物体的部分原子呢？物体都是由原子组成的，去掉一些应该能让物体变小。当然，电子产品的尺寸缩小表明，有些器件可以用更少的材料制成，还不影响其性能。但对于更复杂的生命体来说，去掉一部分原子可能会造成严重的后果。一个人从6英尺高变成6英寸高，高度缩小为原来的1/12。当然，因为人是立体的，所以在宽度和厚度上也缩小为原来的1/12。用去除一些原子的方法（假设我们能做到这一点，把这些原子存储到安全的地方，当你想要恢复正常身高的时候还能把这些原子放回原处）达到这个目标，意味着你每去除1727个原子的同时只能保留1个原子。即使我们假设原子的移除是均匀的——从所有细胞中去除相同部分的原子——人体的生物功能仍会丧失，至少是严重受损。

想想大脑神经元吧。人们一直有个迷思，为什么只有10%的大脑得到了充分利用？进化论认为，这是对可用脑资源的巨大浪费。如果神经元可以变得更小，并且仍能在大脑中发挥应有的作用，这种突变将具有很强的竞争优势。不仅构成一个人所需要的原子会更少（相应地，通过食物摄取能量的需求也会大大降低），而且如果大脑容量不变，我们还能拥有更多的神经元和突触连接。典型的神经元的尺寸约为千分之一厘米，不管是蚂蚁的神经元还是人类的神经元。人类比蚂蚁聪明（一般来说是这样，但我相信我们肯定能找到反例），是因为我们的神经元数量大约是蚂蚁的40万倍，以及我们也有更多的突触连接，而不是因为我们的神经元尺寸是蚂蚁的1000倍。去除99%的原子后，你的身体细胞会缩减99%，但它们再也无法正常工作。

最后，我们来看第三个条件，即让原子排列得更紧密以增加人体密度，从而压缩人的体积。很不幸，这个方法也不能成功实现人体微缩，道理就和氪星的密度不可能是地球的15倍一样。一方面，固体中的原子已经排列得很紧密了；另一方面，原子周围充满带负电荷的电子，它们没办法挤在一起。这就好比一个容器里装满了弹珠，这个容器的绝大部分空间都会被弹珠占据。除了极少数情况外，每个弹珠基本上都会紧挨着几个相邻的弹珠。当然，弹珠之间还有点儿空隙，却不足以再塞进一颗弹珠。因为弹珠是坚硬的球体、不可压缩，所以从外部挤压这个容器并不会让容器的体积明显减小。把容器的体积变为原来的1/10需要施加足够大的压力，以至于会碾碎所有弹珠。用同样大的压力去压缩一个人只会产生一个拙劣的漫画故事，无法通过漫画规则管理局的审批。

既然微缩技术如此难以实现，那么皮姆，也就是蚁人，是怎么做到的呢？在《惊异故事》第27期里，生物化学家皮姆博士潜心研究数年，希望找到能把物体变小的药剂，直到他被注射了一种抗生长血清。后来，皮姆把他的缩小药剂制成了易于吞服的小药丸。至于他如何缩小其他物体，比如他的制服、头盔、武器，故事里说他发明了一种“皮姆粒子”，这种粒子可以把物体变大或者缩小。但是关于缩小药剂或者皮姆粒子到底是什么原理，漫画未做说明，所以它们只能被归为“不合常理的奇迹”。

第6章 水下的英雄

超人、蜘蛛侠、蝙蝠侠和绿巨人都是非常著名的超级英雄，但也有一些英雄人物，同样在打击犯罪，却没有得到足够的重视。他们是各个英雄团队的创始成员，也面临着巨大的威胁，但我认为这些英雄人物受到了不公平的对待，有些沦落为替补队员，有些甚至更糟。这些英雄包括：蚁人（复仇者联盟的创始成员），弹力男孩和饕餮少年（他们都是超级英雄战队的早期成员），以及美国正义联盟的最初成员——七海之王（也叫水行侠、海王）。

在第8章里，我们将会探讨汉克·皮姆是如何成功地从纸袋里钻出来的（这恐怕是超级英雄世界的最低门槛了），只有11毫米高的蚁人始终竭尽所能弘扬正义。当讨论静电和接地的时候，我会介绍一下弹力男孩（只是简要介绍）。从比斯摩星球来的饕餮少年的真实姓名是丹泽·金，那个星球上的居民已经进化出咀嚼和消化所有类型固体的能力，比如石头、金属、塑料，在他身上我们实在挖掘不出什么重要的物理学原理。然而，超级英雄战队的邪恶敌人会悔恨地发现，没有什么监狱能关得住饕餮少年。在本章中我们将会看到，最不应该被低估的英雄其实是海王。

在1941年11月出版的《多趣漫画》第73期里海王首次登场（见图13），他是由漫画师保罗·诺里斯和编剧莫特·韦辛格联手打造的，后者在20世纪50年代时还担任了超人漫画的编辑。在这个故事里，德国潜艇发射的鱼雷不慎击中了一艘难民船，为了掩盖错误，他们决定击沉载有幸存乘客和船员的救生艇。这时，海面上突然出现了一位英雄，他穿着橙色的上衣和绿色的裤子。他拯救了难民和船员，又教训了德国潜艇的船员。虽然他从未像超人、蝙蝠侠或神奇女侠一样深入人心，但却享有同样的待遇，在20世纪50年代中期的漫画黑暗时代仍然保持每月出版一期的频率，而其他超级英雄漫画则几乎全军覆没。这对于一个能跟鱼聊天的英雄来说还是相当不错的。

到了潜艇附近，海王朝着船体猛地一击——
在这股可怕的力量之下，金属表面凹陷开裂了！

© 1941 National Periodical Publications Inc. (DC)

图13 在《多趣漫画》第73期里，海王首次登场，他一拳就把潜艇打出了一个洞，本来潜艇应该是能够承受海底的压力的

从1941年海王首次亮相起，我们就可以看到，他能在水下呼吸，力大惊人，游泳速度超群，拥有即使在黑暗的海洋深处也能看清物体的敏锐视力[1]，还能跟鱼交流（在他的第一次冒险之旅中，他用植物作为媒介向海豚发送消息。而从第5期开始，他已经能直接对锯鳐发号施令了）。海王的所有这些技能都与已知的流体力学特性相一致（当然，“鱼类心灵感应”需要用到一点儿电磁理论，我们将在第20章讨论这种超能力）。

水下的新鲜空气

海王、漫威漫画中的海王子纳摩[2]，以及漫画中住在亚特兰蒂斯的各个城市的居民，他们的最突出的能力之一就是在水下直接摄取氧气。没有这种超能力，成为一个水下超级英雄似乎也就没什么意义。事实证明，这是一种特殊的能力，它要求自然界中存在“不合常理的奇迹”。海王为什么不通过水来呼吸呢？毕竟，我们就是这么做的！

我们都知道，当肺里充满水时，人就会溺水。但鲜为人知的是，如果肺里没有少量的水，人就不可能正常地呼吸。新鲜空气通过鼻子沿着支气管进入身体，在这个过程中空气的温度升高到与人体一样，同时变湿润。事实上，当空气经过支气管时，必须有100%的相对湿度才能到达肺泡——氧气和二氧化碳就是在这些小圆球中进行交换的。肺泡的直径约为0.1~0.3毫米，比这句话末尾的句号还要小。肺泡壁的另一边是毛细血管，血浆和红细胞经过这些非常细窄的血管，释放出二氧化碳分子，带走氧分子，再流入心脏。毛细血管如此狭窄的原因在于肺泡非常小，只有这样才能实现面积与体积之比的最大化。由于气体交换只通过肺泡壁和毛细血管进行，因此表面积越大，气体扩散的区域就越大。

在肺泡（通过支气管与外部相连）内部与传输血液的毛细血管之间，气体必须完成某种转移。这是借由肺泡表面的液体膜实现的。肺泡细胞内皮如果直接与空气接触就会萎缩，丧失功能，而液体膜起到了隔离作用，从而为气体的转移提供了便利。只有当氧分子从气相转变为液相之后，才能通过两层细胞壁，被快速移动的红细胞吸收。肺泡可以被

视为水里的气泡，肺里如果没有（一点儿）水，我们就无法呼吸；然而，就像生活经验告诉我们的，凡事都是过犹不及。没有鱼鳃的海王无法直接从周围的水中摄入氧气，因此他必须具备某种超能力，让他能在水下呼吸。

但即使是肺泡里的这个液体膜，同样有可能使人窒息。这个液体膜与露珠的形成具有相同的物理学原理，它有可能导致我们呼吸短促，甚至窒息。液体膜表面的张力足以使小的肺泡囊完全封闭，即使深呼吸也无法提供足够的压力，致使氧气分子无法进入血液。

表面张力指的是由流体（比如水）中分子之间的吸引力而产生的拉力。这种吸引力当然存在，否则，液体中的原子或分子变成气态时就会四散而去。对于大多数液体而言，这种力是一种相对较弱的静电吸附（也被称为范德瓦耳斯力），它来自于分子中变化的电荷分布。这个力不能太强，因为水分子必须从其他分子旁边流过，才能通过水管或者装满容器，这是固体做不到的。稍后我会解释壁虎和蜘蛛侠为什么能沿墙面行走，以及爬过天花板，到那时我们也会讨论范德瓦耳斯。

这种吸引力在各个方向上以相等的力拉着水分子，上下的力并不比左右的力更强。对于液体中间的水分子来说，这种拉力是完全平衡的；而液体表面的水分子则只能感觉到它下面水分子的吸引力，因为它上面的空气分子并不会对水分子施加一个向上的吸引力。因此，表面这些水分子只受到向下的净吸引力，这使它们在没有重力的情况下也会弯曲形成一个球形水面。在黎明时分，由于没有阳光的照射，温度较低，大气中的水会凝结在草叶上，表面张力使得这些水形成一个个半球形的露珠。露珠就像一个凸透镜，在清晨阳光的照射下，发出晶莹的光泽，而随着太阳不断升高，露珠会被蒸发殆尽。

让我们的肺泡壁收缩的球形水面就没那么迷人了，必须用极强的压力才能让肺泡囊打开。在生物进化的过程中，当我们面临降低肺泡水层的表面张力这个难题时，自然选择给出了与我们洗衣服相同的解决方案。肺泡壁中的细胞会分泌一种“肺表面活性物质”（pulmonary surfactant），pulmonary指的是肺，surfactant指的是一种长而细的表面活性物质分子，两端有不同的化学基团。静电作用会使得该分子的一端被水分子中的电荷吸引，而另一端则被这些电荷排斥。如果这个细长的分子[3]是非常硬挺的，就像脊柱一样，那么它们被水分子排斥的那一端会指向同一方向（特别是在水的浓度较低时），而被水分子吸引的一端则会在水中散开。在空气与水的交界处，表面活性物质分子可以同时满

足两端的需求，被水分子吸引的那一端会插进水中，而被水分子排斥的那一端则伸到空气中。在这种情况下，表面活性物质分子会干扰水层表面的水分子之间的结合，降低水分子之间的凝聚力，这正是水层表面张力的来源。如果没有肺表面活性物质，肺泡实质上就是水里的气泡，不能有效实现与血液之间的气体交换。这些至关重要的肺表面活性物质直到胎儿发育晚期才会生成，这就是早产儿可能患有呼吸窘迫综合征的原因，在研制出有效的人工肺表面活性物质之前，这是一种致命的疾病。

肺里薄薄的水层所产生的表面张力不会致人死亡的原因在于“肥皂”，这句话从技术角度看不算正确，因为肺表面活性物质不是肥皂。但这句话反过来说却是对的，肥皂是一种表面活性剂，在其细长的分子两端分别有被水分子吸引和排斥的化学基团。肥皂有助于减小水的表面张力，从而去除衣物上的污垢。也就是说，肺表面活性物质能让空气更湿润，让我们的呼吸更畅快。

工作的压力永远压不倒他

1941年，在《多趣漫画》第73期中，海王的首次冒险呈现在一个超大的漫画格（这在漫画书中是首次出现，那时这样的格子被称为“防溅板”真是再合适不过了）中，海王在海里用右臂救下了救生艇中的一个女人，用左臂挥飞了德国潜艇发射的炮弹。我们可以计算一下，海王的皮肤要坚韧到什么程度，才能改变炮弹的飞行方向（我们在第3章中讨论过）。对于一枚1磅重的炮弹，若飞行速度是每秒500英尺，就需要海王用一个30000磅力的力量在一毫秒的时间内将它挥飞。这种力施加在很小的区域上，我们假设是3平方英寸，海王的左臂所承受的压强就是每平方英寸10000磅力，约为大气压强的660倍，与铸铁能承受的压强差不多。一年后，在《多趣漫画》第85期里，这位水行侠在北极把一头成年北极熊向100英里开外的一群偷猎者扔去，有如抛出一个橄榄球（与偷猎者对战时，对一个自然生物做出这样的举动也是够奇怪的，幸好北极熊没有因此受伤）。所以，他会借助鱼的帮助从困境中脱身或抓住罪犯就显得很奇怪了；毕竟，他有更强的实力！

对于海王神力的标准解释是，这是他能够承受海底压力的自然结果。为了能在水下呼吸，海王需要具备承受整个海洋重量的神力，这与你拥有的力量相比只是程度上的不同，并没有本质区别。每次你从椅子

上站起来的时候，你也在举起一片“海洋”，只不过那是一片空气的海洋。如果说海王要对付的是压在他身上的半英里深的水，我们则必须承受压在我们身上的约15英里高的空气。这两种压力都可以用牛顿运动定律来解释。

空气分子以声速运动，大约是每小时700英里。正如我们前面讨论过的，运动中的任何物体，无论是马克卡车还是氧气分子，都会一直保持原有的运动状态，直到有外力作用为止。当氧气分子与你的肩膀发生碰撞时，外力便开始发挥作用。肩膀对氧气分子施加的让其运动方向发生偏转的力，与氧气分子施加给肩膀的力大小相等、方向相反（根据牛顿第三定律）。每秒击中你肩膀的氧气分子越多（即空气密度越大），你肩上承受的压力就越大。在这个例子中，你的肩膀每平方英寸承受的大气压力约是15磅力。我们从来没有注意到这种压力，主要有两个原因。第一，我们的一生都是在大气压力下度过的，人类已经进化出能够承受这种压力的骨骼结构、肌肉和皮肤。第二，空气分子碰撞所产生的压力在各个方向上都是差不多大的。空气通常很稀薄，空气分子之间的距离大约是任何其他分子直径的10倍。因此，虽然从理论上说数英里高的空气都压在我们身上，但自下而上的压力和自上而下的压力基本上相同，所以在正常情况下我们不会感受到来自大气的不平衡的压力。

每平方英寸15磅力的压强似乎很大，但这与海王在海底所承受的压力相比，简直不值一提。氧分子由两个氧原子组成，比水分子（仅由一个氧原子和两个氢原子组成）重。一个典型的空气分子的动量比一个水分子大60%（水分子的运动速度大致与空气分子相当，但水分子质量较小）。然而，液态水分子碰撞所产生的压力比空气分子大得多，因为水的密度是空气的800倍。水分子本质上是直接接触的，这是由范德瓦耳斯力（这也是造成表面张力的原因）这种弱吸引力所致。与气体不同，液体基本上是不可压缩的，压在你身上的液体越多，它的重量就越大。

你在水下所承受的压力比在陆地上的要大，你在水下的距离越深，压在你身上的水的重量就越大。事实上，你所承受的压力与你在水中的深度成正比：

压力=大气压力+（密度×重力加速度×深度）

水的深度是从水面开始测量的（如果深度为零，你所承受的压力就只是大气压力）。水的密度（每立方厘米一克）乘以重力加速度代表的是单位体积水的重量，再乘以深度，等式右边的第二项表示的是单位面

积水的重量，这与水的压强是一样的。

海面下1/8英里处的压力相当于20倍的大气压力，海王宽阔的肩膀面积大约是10平方英寸，因此他要承受相当于3000磅力的重量。要想在这种摧毁性的压力下保持站立姿势，就需要海王的腿部肌肉提供相同的支撑力。我们在第1章中提到，超人在他出生的氪星上重量约为3000磅力，海王的腿起码也得强壮到这个程度，因为他还得潜入更深的海洋。

在《美国正义联盟》第200期里，海王必须与一个身体由纯玻璃构成的外星生物搏斗（见图14）。实际上，玻璃相当坚韧，纯净的玻璃甚至比很多金属还要坚固。然而，在与美国正义联盟的搏斗中，这个外星生物身上的玻璃不可避免地会出现划痕和裂缝，严重削弱玻璃的抗压能力。即便如此，要想打碎这种玻璃仍需要超过每平方英寸1吨力的压强。利用前面的公式，我们可以得出结论，在海面下大约1英里处，压强是每平方英寸2600磅力。海王是能够承受这样大的压力的，但外星入侵者恐怕就不行了。

在水面上方，显然没有水的重量，只有大气压力。由于空气在地球表面的分布是均匀的，因此任何水体的高度都相同，不管形状或面积如何。事实上，如果两个水体在下方相连，就必然具有相同的高度，我们称之为“海平面”。如果没有大气层，海平面的高度是多少呢？这不是一个真正意义上的学术问题。事实上，我们会把上文中的方程应用在实践中，比如计算用吸管喝水时水面的高度，此时没有大气压力，至少大气压力较弱。我们现在要说明的是，物理学对超人的远距离喝水能力有着多么严重的限制！

© 1982 National Periodical Publications Inc. (DC)

图14 在《美国正义联盟》第200期里，海王把由玻璃构成的外星生物拖到了海底，成功干掉了它

最开始用吸管喝水的人是谁，这个人的名字已经消失在时间的长河中。但有证据表明吸管的使用可以追溯到古老的美索不达米亚平原，它现在是伊拉克的一部分。生长在底格里斯河和幼发拉底河两岸（这个地区被称为新月沃土，是农业的发源地之一）的芦苇，不仅能用来喝可口的饮料，把它按在湿黏土（在这些河流沿岸随处可得）上，还可以形成楔形文字（cuneiform，拉丁语中意为“楔形”），黏土晾干变硬后，就可以留下永久的文字记录。公元前4000年的苏美尔人被公认为是最早用文字记录和传递信息的人，其独特的“字母”被称为“楔形文字”。因此用吸管喝水的历史与书写的历史一样悠久，但可以弯曲的吸管则是在很久以后才出现的。

把吸管插进一杯水中，两个“水体”——吸管里的水和吸管外的水——内外相连。我们假设吸管不会紧紧地挨着玻璃杯底部，所以水可以在这两个区域之间自由移动。当把吸管放进玻璃杯里时，吸管外面的气压和吸管内部的气压是一样的。吸管内的水所受作用力与吸管外的水相同，所以吸管内外的水在同一平面上。当我们用嘴含住吸管并开始吮吸时，就把吸管内的空气密封住了，吸管内部的大气压力降低，而吸管外面的大气压力不变，“两个水体之间因此产生了压力差”，结果就是吸管外面的大气压力会使吸管里的水面升高。

吸管里的水最高能达到多少呢？吸管内部的压力越小，吸管内外的压力差就越大。假设超人（白银时代的超人会飞并拥有超级呼吸能力）将一根巨大的吸管放入一大片湖水中。有没有那么长的吸管，连超人都没法用它喝水？有的！吸管内外的压力差越大，把吸管里的水向上推的力就越大。但是吸管外部的压强不能大于每平方英寸15磅力。当我们用吸管喝汽水时，我们会使吸管内的压强降至每平方英寸5~10磅力。超人显然可以做得更好，但即使是他，也不可能让吸管内部变成真空状态。吸管内的最小压强为每平方英寸0磅力，这时吸管内一个空气分子都没有。要想算出在这种极端条件下吸管内的水能上升到什么高度，我们可以使用有关水深和压力的方程，只不过现在等式左边的压力为0，我们要计算的是一个负水深，即水的高度。压强差，即每平方英寸15磅力和0之间的差，可以将吸管内的水推到34英尺高，不管吸管的直径如何。这个高度相当高，但也是有限的高度。如果超人想从一根35英尺长的吸管里喝到水，他可能也只得望水兴叹了。

当然，在白银时代有点儿滑稽的超人冒险精神的指引下，人们总是能编造出一种机制，让超人可以用任意长度的吸管喝水。他确实不能将吸管内的压强降到每平方英寸0磅力，但他也许能把吸管外的压强增加到超过正常水平。如果他在用吸管喝水之前，能快速地用超级呼吸向这片水体中吹一口气，就能造成更大的压强差，从而把吸管内的水推到故事情节所需要的任何高度。

巨大的压力失调会产生更深刻的影响，而不只是让人喝上一口清凉的饮料。在上面的讨论中，我们假设吸管是由某种高强度的金属制成的，因此不会在巨大的压强差下被毁坏。但实际上，吸管内较低的压强意味着每秒内撞击吸管内壁的分子数量比吸管外面少。也就是说，吸管壁两侧受到的力并不平衡。如果这种力足够大，它会使吸管损坏，任何用力吸过纸吸管的人都会知道这个道理。

空气分子的影响通常非常细微，但它们能压碎比纸吸管更结实的物体。如果把力只施加在一个方向上，那么每平方英寸15磅力的压强已经相当大了。把一个容量为55美制加仑[4]的铁桶放在火上，让它用10分钟左右的时间煮沸约3夸脱[5]的水，然后把铁桶密封起来，并移走火源。挤走了桶内空气的蒸汽会逐渐冷却变回液态，体积变小，桶内部的压强也会变小。由于与外界隔绝，没有空气可以进来，所以桶内外的压强差会增大。几分钟后，铁桶就会发生剧烈的内爆。这种极端的事情有时真的会发生，比如用蒸汽清洗铁路罐车。罐车内充满热水，封闭起来以后，蒸汽冷却变回液态，由此产生的压强差会使罐车发生剧烈的内爆。如果大气压力可以造成这么大的破坏，可想而知，能够承受海底压力的海王身体是多么强韧。

谁是真正的飞鱼？

海王最广为人知的能力不仅包括水下呼吸、威武的神力、与鱼类交流，还包括超快的游泳速度。据说他的游泳速度快达每小时100英里，比任何哺乳动物或鱼类都要快。他是怎么做到的？我们又是怎样游泳的呢？

游泳的首要原则是避免下沉，做到这一点的最好方法是漂浮，而漂浮起来的最好方法是让物质的密度小于水。我们想象水下有一个盒子。

如果盒子与同等体积的水的重量完全相同，那么除了颜色不同之外，盒子与这些水没有什么区别。如果我们沿着这个水体画一条假想的线，那么它既不会浮上水面也不会沉到水底。在这种情况下，我们说盒子与其周围流体的浮力是“匹配”的，它会一直停在初始位置。如果盒子的质量大于同等体积水的质量，盒子就会下沉；如果盒子的质量小于同等体积水的质量，它就会上浮并漂浮在水面上。人体内的大部分成分都是水，肺里约有2夸脱的空气，脂肪的密度也比水小。因此，总的来说，人体的密度比水小，所以能在水中浮起来。盐水的密度比淡水大，所以人在海洋中比在淡水湖或池塘里更容易浮起来。钢块的密度比水大得多，如果把它放在水中，它就会下沉。但是，我们可以通过改变金属的体积来降低金属的密度。如果用钢块制造一艘敞篷船，外壳是钢铁，里面是空气，其平均密度就会小于水的密度，它也能浮起来了。

海王可以在海水中随意沉浮，其方法大概与鱼相同：改变某个器官中的空气含量，这个器官就是鱼鳔。鱼鳔可以储存空气，当鱼游到深海域时，鱼受到的水压变大，此时鱼会通过深呼吸，将空气输送到血液中以及鳔中，让鳔膨胀起来。这样做可以增加鱼体的平均密度，使其上浮。同样，当它想向下游时，它可以将鱼鳔中的空气排出，增大鱼体密度。海王有着独特的半人类半亚特兰蒂斯人血统，他显然有一个类似鱼鳔的器官，使他可以在大海之中任意畅游。

能漂浮在水中是游泳的一个必要条件，但仅有这个条件还不够。游泳的人必须向周围的水施加一个向后的力，根据牛顿第三定律，水才能给他施加一个大小相等但方向相反的推力，推动他前进。蛙泳的手部动作（技术上称为“划臂”）会把水向后推，让游泳者向前进。有一个问题长期困扰着那些对游泳的物理学原理感兴趣的人：如果流体的黏度（阻力）变大，游泳者的速度能否更快？这个问题最近在实验中得以解决。显然，黏度较大的流体，比如糖浆，会对游泳者产生更大的阻力；然而，游泳者越用力地推动流体，流体就会对游泳者产生越大的反作用力，推动他向前移动。现实是，在糖浆中移动比在水中更难，就像在游泳池里奔跑的阻力比在空气中要大得多。那么，在游泳过程中，黏度起到的究竟是积极作用还是消极作用呢？

我所在的明尼苏达大学于2004年做了一项实验，由化学工程学教授埃德·卡斯勒主持。他们往学校游泳池里倒了900磅的瓜尔胶粉，使得液体黏度变成普通水的两倍。来自大学游泳队的运动员在“这锅浓汤”中游了几个来回，实验人员把他们所花的时间与平常的用时做比较。实验结

果是：用时一样。在黏度高的液体中游泳，游泳者的划水效率虽然提高了，但他们遇到的阻力也增加了，二者相互抵消。

为了达到每小时100英里的游泳速度，海王利用了一个“不合常理的奇迹”，与闪电侠的情况差不多。但也许他也利用了自然界中游得最快的生物——海豚的一些特性。虽然海豚并不是美国正义联盟的成员，但它的游泳速度能达到每小时20~25英里。速度如此之快，以至于有些科学家认为海豚在某种程度上违反了能量守恒定律。还有人认为，为了达到这样的游泳速度，海豚必须具备很强的肌肉，从而为它的每次划水提供强大的力量。肌肉的密度比水大，但这些哺乳动物并没有沉入海底，这是鲸脂的功劳，而不是脂肪的作用。鲸脂的密度比脂肪低，还具有类似肌肉的弹性，能在海豚游泳时提供助力。对游泳和喜剧而言，有一件事是一样的：时机就是一切。在划水的过程中，海豚会在非常精准的时间点把尾鳍变成拱形，以最大限度地发挥它的推动作用。此外，海豚的身体呈现非常完美的流线型，几乎没有什么部位会产生阻力。

有趣的是，海豚的外皮每两个小时就会完全脱落一次。为了不断生成新的皮肤，海豚不得不耗费更多的能量，那么这个机制的好处是什么呢？物理实验和计算机模拟显示，在游泳的过程中，从海豚身上脱落的一片片皮肤会使其尾流中的涡旋散开。通过抑制涡旋的形成，进而抑制了湍流的形成，较少的湍流往往意味着更快的速度。也许海王的超级游泳速度并非来自他的橙色斑点衬衫，而是满头的头皮屑！

[1]他很少使用这种能力。值得注意的是，在《多趣漫画》第106期里，黑漆漆的画面需要读者“通过自己的眼睛去观察，而不是用海王那双能适应黑暗的眼睛。在海底，一切都藏匿在黑暗之中。但在某处，闪烁着如刀影般微弱的磷光……”

[2]创造纳摩这个角色的人——比尔·埃弗里特，15岁时加入商船队（两年后离开），这段经历可能让他非常熟悉水手的生活。他创造的半人类半亚特兰蒂斯人的英雄，能够在水下呼吸。

[3]这种长长的碳基分子被称为“聚合物”（polymer），因为它包含许多（poly）相似的化学结构（mer，源自希腊语“meros”，意思是“部分”）。

[4]1美制加仑≈3.79升。——编者注

[5]1夸脱≈0.95升。——编者注

第7章 蜘蛛侠荡起来

关于力，我还想再补充一点，主要是关于蜘蛛侠能吊在蛛丝上这件事。基本上每一期《超凡蜘蛛侠》里都会有这样的场景：蜘蛛侠借助蛛丝从一栋楼荡到另一栋楼，穿行在纽约的高楼之间。但是，这真的可行吗？准确地说，蜘蛛侠的蛛丝是不是足够结实，能承受得住他本人以及罪犯、受害者或者他半路抓住的无辜路人的重量？由于蜘蛛侠的摆荡路径是弧形的，蛛丝除了承受蜘蛛侠的重量之外，还要承受另一个力。我们来看看这是怎么回事。

牛顿第二定律（$F=ma$）告诉我们，要想改变一个物体的运动状态，必须施加外力。运动状态的变化既包括量的变化（速度变快或者变慢），也包括方向的变化。如果没有外力作用于这个物体，它将一直保持“匀速直线运动”，即沿着直线一直运动下去。运动状态的任何变化，不管是大小的变化还是方向的变化，都是外力作用的结果。汽车在通过发夹弯道的时候，外力（轮胎与路面的摩擦力）改变了汽车的行驶方向，但行驶速度没有变。

想要改变物体的运动方向，就需要借助外力，而且这个外力只能在它作用的方向上产生加速度。比如，重力会把物体拉向地面，而不管物体一开始是如何运动的。更重要的是，重力只能把物体拉向地面，因为这是它能作用的唯一方向。在黄金时代，如果不会飞的超人以稳定的水平速度从悬崖边一跃而下，他就会因重力作用而下落。重力不会作用于水平方向，所以他在坠落的过程中水平速度不会改变！毕竟，没有外力，就没有变化。但由于重力作用，他的垂直速度会增加，坠落的时间越长，垂直速度越快，就像格温·斯黛西的例子。恒定的水平速度与不断增加的垂直速度产生的净效果是一条抛物线，他坠落的时间越长，曲线就越陡峭。再举一个例子，沿着平行于地面的方向抛出一个时速为90英里且不自旋的快球，它落到地面时的垂直速度跟同一时刻从投手手中垂直掉落到地面的球一样。这两个球会同时落地（假设它们是从同一高度掉落的），因为唯一能够改变它们运动状态的力就是垂直方向上的重力。物体运动状态的变化，不管是运动方向还是运动速度，都源于外力作用。

蜘蛛侠借助蛛丝从一栋建筑物摆荡到另一栋建筑物，他的移动轨迹呈弧形，而不是直线形。因此，即便在他摆荡的过程中速度没有变化，他的运动方向也一直在变，这只能由外力来实现。很显然，这个外力是蛛丝的拉力。所以，蛛丝发挥了两种作用，即提供了两种力：第一，承担蜘蛛侠体重的力；第二，让他沿着弧形轨迹运动的力。如果在摆荡的过程中蛛丝突然断掉，那么蜘蛛侠受到的唯一外力就是重力。此时他会像一个球一样飞出去，他的速度就是蛛丝断开那一刻的速度。

在蜘蛛侠沿弧形轨迹摆荡的过程中，蛛丝的拉力产生的加速度与月球围绕地球转动时的加速度相似。前一个加速度来自蛛丝的拉力，后一个加速度来自牛顿发现的万有引力，它们的共同之处就在于把直线运动变成了曲线运动。地球的引力就是月球的“蛛丝”，它让月球的运动方向发生改变。如果蛛丝的拉力或者地球的引力突然消失，蜘蛛侠和月球都将偏离原本的运动轨迹，以外力消失那一刻的速度继续运动。我们运用一点儿几何和代数知识就可以知道，以速度v沿着圆周轨迹运动的物体，其加速度为$a=（v\times v）/R=v^2/R$，其中R为圆的半径。

蜘蛛侠的蛛丝需要提供一个大小为mg的力，以承受他的体重；还要提供一个大小为mv^2/R的力，以改变他的运动方向。他摆荡得越快（速度v越大），或者摆荡的半径R越小，向心加速度v^2/R就越大。如果蜘蛛侠用长度为200英尺的蛛丝以50英里/小时的速度摆荡，那么除了重力加速度为32英尺/秒^{2}之外，还会有一个27英尺/秒^{2}的向心加速度。如果在公制计量法下蜘蛛侠的质量大约是73千克，他的重量就是160磅力；而为了让直线运动轨迹变成圆周运动轨迹，蛛丝还需要额外提供135磅力的力。因此，蛛丝的总拉力接近300磅力，如果蜘蛛侠在摆荡的过程中还带着其他人，这个力会更大。

一根细线似乎难以承受300磅力或者更大的力，但如果蜘蛛侠使用的蛛丝跟真正的蛛丝一样，就没什么可担心的了。蜘蛛用来织网和从肉食性鸟类嘴边逃命的蛛丝，每磅的强度是钢筋的5倍，而且比尼龙绳的弹性还要强。蛛丝的这种特性源自上千根十亿分之几米粗的坚韧纤维（纤维的数量很多，任意一根都不会对蛛丝整体造成致命性影响），其间散布的充满液体的导管能够分散整根蛛丝的张力。蜘蛛侠用发射器喷射蛛丝的时候，通过调整其化学成分就可以改变蛛丝的特性。与之类似，蜘蛛也能通过改变结晶蛋白质和非结晶蛋白质的相对含量来调整蛛丝的强度。

蛛网具有很大的商业应用价值，因此蛛丝的市场需求量非常大。但

通过养殖蜘蛛来收集蛛丝的做法不太实际（蜘蛛的领地意识非常强，很难人工养殖），有些基因工程实验将蜘蛛的造丝基因植入山羊体内，通过过滤山羊奶即可得到蛛丝，过程也相对简单。然而，培育这样的山羊还是有些难度的。此外，有一些科学家宣称，他们已经取得了初步成果，在实验室中成功地使蜘蛛细胞感染上基因工程病毒，这样细胞就可以直接产生蛛网中含有的那种蛋白质。蜘蛛的这种造丝基因也成功地被注入大肠杆菌和植物细胞中，这类研究具有广阔的商业应用前景。正如吉姆·罗宾斯发表在2002年7月的《史密森杂志》（*Smithsonian*）上的文章《第二个自然》中所说：“从理论上讲，由蛛丝编成的绳子只需要有铅笔那么粗，就可以阻止战斗机在航母上降落。强度和弹性的结合使得它能够承受的冲击力比用于制造防弹背心的凯夫拉纤维还要强4倍。”

真正的蜘蛛丝能够承受超过每平方厘米20000磅力的压强。也就是说，一个直径为1厘米（略短于半英寸）的蛛丝绳截面最多能承受10吨的质量。即使直径只有1/4英寸的蛛丝绳，也可以承受6000磅力的重量，远远超过我们刚才估计的300磅力的数值。所以，就算蜘蛛侠同时带上绿巨人浩克和“肉球”，他的蛛丝也能轻松驾驭。

因此，根据牛顿运动定律，蜘蛛侠凭借蛛丝从一栋建筑物荡到另一栋建筑物、拦下失控的高速列车（出自2004年的电影《蜘蛛侠2》）、用蛛丝编织成防弹护具都是完全可行的。

第8章 蚁人的阿喀琉斯之踵

每个漫画英雄都有其阿喀琉斯之踵，蚁人的弱点就在于他只有11毫米高。就像超人怕氪石一样，蚁人需要提防的是被别人踩在脚下这种更常见的威胁。此外，他的步幅只有几毫米，他在正常身高时迈出的一步，变成蚁人后则需要走几百步。相应地，他移动几英尺所需要的时间也增加了，无怪乎他喜欢搭木蚁的“便车”。[1]他能够骑在蚂蚁身上而不会把它压垮，这说明蚁人的质量也随着体量的变小而变小了，也就是说，在身体缩小的过程中，他的密度没有变（我们知道一个物体的密度等于质量除以体积，如果体积缩小到原来的千分之一，质量也会缩小到原来的千分之一，但它们的比率，即物体的密度是不变的）。皮姆很好地利用了自己的质量变小这一点，他制造了一个弹射器，可以把自己发射出去，飞跃整个城镇。当然，正如我们在第3章讨论的，问题在于他停下来的那一刻，而不是飞行的过程。为了让自己的飞跃完美收场，皮姆发挥了自己的超能力，通过电子头盔指挥上百只蚂蚁组成一个“安全气囊”，为他的落地提供缓冲。蚁人的动能由很多只蚂蚁共同分担，其中任何一只都不会因此受到严重的伤害。

既然蚁人的重量如此之轻，一根弹簧即可让他飞跃好几个街区，而不会让帮助他平缓落地的那些蚂蚁受伤，那么他是怎么挫败像“保护者”和“强盗”这样的大反派，又是怎么应对“某同性恋者的挑战”的呢？尤其是在《惊异故事》第37期里，他是怎么从吸尘器的集尘袋里钻出来的呢（见图15）？在《惊异故事》第38期里，他又是怎么用尼龙绳套抓住一个骗子并让其在空中摆荡的呢？漫画书中对此的解释是，皮姆的身体虽然只有蚂蚁大小，但他仍保有“一个正常人的力量”。我并不想吹毛求疵，但一个正常人（更别说一个正常的生物化学家）是很难把另一个成年人扔过头顶的，即使他用的是一种“几乎牢不可破”的尼龙绳套。如果这一点暂且不提，那么“蚁人拥有一个正常人的力量”的说法到底意味着什么？为什么他只有蚂蚁的体量却能够冲破集尘袋，但又很容易就被吸尘器吸进去了呢？也许我们应该问一个更基础的问题：为什么你能轻松抬起一个20磅的物体，勉强抬起一个200磅的物体，却无法抬起一个2000磅的物体？我们的力量来自肌肉和骨骼结构，它们构成了一系列相互连接的杠杆。事实证明，这些杠杆不太适合抬重物。

“力量”这个词有很多意思，在这里我们假设力量指的就是抬起物体的能力。人类运用自己的聪明才智发明了各种机器，它们各具用途，包括抬起重物。人类最早的一项用来抬东西的发明是机械杠杆。很多人第一次见到的杠杆都是跷跷板，这种设施由一个位于平板中间正下方的支点支撑起整个平板。你坐在跷跷板的一侧，通过杠杆的力量，你可以把你的玩伴高高跷起。如果支点位于平板中间正下方，你就只能跷起一个与你的质量大致相等的人。如果支点的位置更靠近某一端，且有一个成年人坐在这一端，那么远离支点的一端只需坐一个小孩就能跷起这个成年人。这是因为跷跷板或者通常意义上的杠杆都存在一个扭矩。

这位小小的战士发送出信息之后，就召集了一群蚂蚁，进入了这栋旧楼房。

这里太黑了，我几乎什么都看不见！等等——我好像踩到了什么东西！

这个声音是怎么回事？是从我头顶上面传过来的！！我——我被吸到空中了！！

WHIRRRRRRR

我被吸到吸尘器里了！！

好了！现在你出不去了——空气也进不来！过不了多久你就会窒息！你行侠仗义的日子也就到头了！！

这只是他的想法而已！我虽然只有蚂蚁大小，却有正常人的力量！

想要击败集尘袋轻而易举！

我们自由了！

11

© 1962 Marvel Comics

图15 《惊异故事》第37期“被保护者困住”里的一幕，从中我们可以看到蚁人轻如蚂蚁（因此会被吸尘器吸进去），又像正常人一样强壮（可以从吸尘器的集尘袋里钻出来）

如果力是指沿着直线方向推或者拉一个物体的能力，扭矩衡量的就是转动一个物体的能力。一个力作用于一个物体，使其围绕一个点旋转，那么作用力乘以物体到支点的距离就叫扭矩。“扭矩”和“功”在数学上的定义都是力与距离的乘积。对于功来说，距离表示的是物体的位移，也就是说，作用力推动或拉动物体所经过的距离。为了改变物体的能量，力的作用方向必须和物体的移动方向相同。而对于扭矩而言，作用力与物体和支点之间的距离成直角。这个距离有时被称为扭矩的“力臂”，对于一个给定的作用力，力距离支点越远，力矩就越大。

这就是为什么门把手都被安装在离门铰链尽可能远的位置上。你可以尝试通过推动铰链附近的位置来关上一扇门，再试试用同样大小的力在门把手附近的位置关上门。力是相同的，但是推门的位置离铰链较远就使得力臂变长，扭矩增大，关起门来也更容易。扳手也是一种简单的机械，它把一端施加的作用力放大，使另一端产生旋转。如果我们想把一颗特别紧的螺母拧松，有时会用上一个“小道具”，即扳手的延长臂，在能够施加的作用力已经到达极限的时候，我们可以用延长臂来增加力臂和扭矩。再回到跷跷板的例子，只有当跷跷板的支点靠近成年人坐的那一端时（在操场上玩跷跷板的时候，成年人通常会坐在靠近支点的位置），小孩才能抬起这个成年人。在这种情况下，小孩的力臂增长，扭矩增大，足以把成年人跷起。如果没有杠杆作用，这个任务是不可能完成的。

杠杆还决定了蚁人的小拳头能有多大的力量。通过运用杠杆原理，我们的手臂可以把东西抬起来或者抛出去。一个物体，比如一块石头，被放置在杠杆的一端，也就是我们的手上。肱二头肌收缩会产生力，使杠杆的另一端（前臂）向下移动，并抬起杠杆的这一端，也就是我们握着石头的手。当我们想放下石头的时候，则靠肱三头肌的收缩让手向下运动。肌肉只能收缩和舒张，而不能推动物体。因此，为了做出更多的动作，附着在人类骨骼结构各个点上的肌肉组成了一系列杠杆，可谓进化得相当精巧。前臂的杠杆支点位于肘部。这可能有点儿奇怪，两个力位于支点的同一侧。但这类杠杆在本质上和鱼竿一样，在鱼竿的一端（紧靠着绕线轮旁边的支点）施加力的时候，绕线轮会产生旋转，从而钓起鱼竿另一端的鱼。你的肱二头肌产生的拉力大约位于肘前两英寸的位置，而大多数人的前臂长度是14英寸。因此力臂的比例是1∶7，这意味着你的肱二头肌所施加的力到你手上时减少为原来的1/7。是的，为

了举起一块重量为20磅力的石头，你的肱二头肌必须产生一个140磅力的向上的力。

关于这一点我们可能会问：这说明什么呢？为什么人类的手臂里存在一个更费力气的杠杆呢？这看起来完全没有必要。如果人类手臂的主要功能是举起石头，那么这个杠杆应该是违背进化论的头号证据。肱二头肌比手更接近支点（你的肘部），肱二头肌在离肘部两英寸的地方收缩，手在距离肘部14英寸的地方抬起，与力臂的比例1：7相同。当我们把手里的石头扔出去的时候，用到的仍然是这个比例，肱二头肌在距离肘部两英寸的地方收缩，手在距离肘部14英寸的地方举起。这个过程只需要0.1秒，即握着石头的手能够在0.1秒里移动12英寸，速度是10英尺/秒（约7英里/小时）。这只是保守估计，一个普通人利用上臂和肩膀之间的杠杆能够以更快的速度扔出石头，还有极少数人能以高达100英里/小时的速度将棒球大小的物体扔出去。所以，我们手臂中的这个杠杆不是用来抬起大石头的，而是快速把小石头扔出去。我们的祖先中那些善于扔石头或者掷长矛的人通常都是好猎手，一名好猎手能提供更多的食物，也更容易找到配偶，繁衍后代。这样一来，好猎手便把自己的这些“擅长投掷”的基因传给了后代。

当然，我并没有忘记蚁人穿透集尘袋钻出来的事。这位小英雄虽然身长大幅缩减，但是1：7的力臂比例还是跟皮姆一样，不管他是蚂蚁大小还是正常人大小。拳击动作所使用的肌肉与投掷一样，唯一的区别就在于扔出去的不是石头而是拳头。人类肌肉产生的力量大小不取决于其长度，而取决于肌肉的横截面（核磁共振成像的截面，而非手臂的横截面）。如果蚁人的身量是正常人的1%，他的肌肉产生的力量就要缩减为原来的$0.01^2=0.0001$。如果皮姆在正常人大小的时候，能以200磅力的力量出拳，他成为蚁人后，一拳的力量就只有0.02磅力。蚁人的拳头比正常人要小得多，横截面的面积只有0.0005平方英寸（假设他的手约为1毫米宽）。他出拳时产生的“单位面积受力”（压强）是0.02磅力除以0.0005平方英寸，即每平方英寸40磅力。我们可以比较一下，他在正常人大小时一拳的力量是200磅力，除以正常拳头的横截面积5平方英寸，每平方英寸所受的压力也是40磅力。[2]在单位面积上，皮姆在蚂蚁大小时出拳的力量与正常人大小时是一样的。看来蚁人确实能够击穿集尘袋摆脱困境，他也因此成为漫画迷眼中的偶像。

为什么被放射性的蜘蛛咬一口不像想象的那么好

上文中我们讨论的是一个昆虫大小的人能有多大力量的事，下面我想用一点儿篇幅破解关于蜘蛛侠的一个迷思。正如我们刚才所说，如果皮姆变成蚁人后他的密度仍然跟正常人一样，那么尽管他的拳头力量没有正常人那么大，但对于真空吸尘器的集尘袋造成的压力却跟正常人一样。人们会有一种误解，认为这种缩放的原理是双向的，即如果有人被受到辐射的蜘蛛咬了一口（我就是随便举个例子），他就能获得与蜘蛛同等的跳跃能力。也就是说，如果蜘蛛或跳蚤能跳一米高（大约是其身高的500倍），那么当一个人获得了与蜘蛛或跳蚤类似的能力后，他也能跳到自己身高500倍的高度。如果他的身高是6英尺，这就意味着他纵身一跃能跳到3000英尺高！真是这样的话，蜘蛛侠就能把黄金时代的超人（不会飞行，没有从黄色太阳那儿得到超级能力）甩出去好几条街（你完全可以从字面意义上理解这句话）。然而，现实情况并非如此。如果彼得·帕克真的获得了蜘蛛的跳跃能力，那么他能跳达的高度和蜘蛛一样，也是一米。斯坦·李和斯蒂夫·迪特科不明白这其中的道理也算一件好事，否则漫画故事就没那么激动人心、引人入胜了。下面我们来看看他们究竟错在哪里。

你能跳多高取决于哪些因素？通常人们认为有两个因素：你的质量和你的腿向地面施加的力，它们决定了你从地面上跳起来的时候能产生多大的加速度。从你的脚离开地面的那一刻起，唯一一个作用于你身上的力就是重力，它会让你跳起来之后的速度不断变慢。所以，我们要考虑的加速度有两个：你蹬地并一跃而起的加速度，以及伴随整个跳跃过程且最终让你回到地面的重力加速度。如果你以一个很大的初始速度v跳起来，你能到达的高度h就是由我们熟悉的公式$v^2=2gh$决定的，在这里g代表重力加速度。

关于这个等式，还有一个奇妙之处，即一个人能跳多高跟他的质量没有关系。不管你的质量是大是小，只要你以速度v起跳，你最终的高度就取决于重力加速度g以及你的初始速度v。在跳跃过程中还有一个加速度，即在起跳时由你的腿所产生的加速度，而这个加速度确实跟跳跃者的质量有关。根据牛顿第二定律，力等于质量乘以加速度（$F=ma$）。如果给定一个力F，这个跳起来的人质量（m）越大，他的加速度（a）就越小，他的初始速度也就越慢。初始速度慢，意味着跳跃的高度（h）低。

蜘蛛能跳到相当于自己身长30倍的高度，并不是因为它们擅长跳跃。其实，昆虫的肌肉很小（产生的力也小），但它们跳一米高需要承担的质量也很小。跟蜘蛛相比，人类的肌肉更大，能够产生更大的力，但也需要承担更大的质量，相互抵消后的结果就是，人类平均也只能跳大约一米高。当然，有一些人，比如奥运会的跳高运动员能跳得更高，而普通人可能只能跳1/3米（1英尺）高。事实上，跳蚤能跳到自己身长200倍的高度是有一些小技巧的。除了流线型的体型能够使空气阻力最小化之外，跳蚤用它最长的两条腿蹬地可以使力臂最大化。由于用的是后腿，所以跳蚤通常会朝后跳。

在把昆虫和动物的能力移植到人类身上时，人们很容易就会错误地认为比例是最重要的，而不是绝对大小。19世纪的许多著名昆虫学家也犯了同样的错误。在达西·汤普森的经典著作《生长和形态》中有一个简短的脚注写道：“拟人化很容易产生一个问题，这也是童话故事的共同点，即忽略动力学方面的相似性，而纠缠于几何意义上的相似性。”但是，这样的误解也为童话故事和漫画增添了很多的趣味性。

[1]在2008年的《美国正义联盟：机密》中，当原子侠（DC漫画宇宙中可伸缩体量的超级英雄）想要穿过一个房间的时候，他会把自己的身体变大，以增大步幅，减少需要走的步数。而蚁人只能缩小到一个固定的大小，于是只好用蚂蚁作为交通工具。

[2]对于压裂或撕裂一个平面这个问题，我们必须同时考虑力及其作用的面积这两个因素。如果你想走过结着薄薄一层冰的湖面，那么穿雪地靴比穿细高跟鞋的胜算更大。不管你穿的是什么鞋，你的体重是不变的，但高跟鞋鞋跟更大的压强会导致你落入冰冷的湖水中。

第9章 陀螺人为什么能转不停？

罗斯科·狄龙进入青春期后，就迷恋上一种东西，以至于他的整个成年时光也很有可能耗费在这上面。罗斯科与大多数年轻人都不一样，他的独特之处在于对陀螺的痴迷。不管是简单的儿童玩具陀螺还是复杂的陀螺仪，都会让罗斯科着迷不已。但当成年的他开启了失败的犯罪生涯后，就不再玩这些了。第二次坐牢期间，他发现他必须耍一些小花招才能成为一个成功的小偷，而且年少时对陀螺的痴迷为他提供了一个灵感，这正是他所需要的。从监狱出来之后，他便开始全面研究关于陀螺旋转的知识，并组装出一种特殊的陀螺——可以发射毒气弹、尖刀或缠绕的彩带，他似乎因此开辟了一条犯罪的光明之路。当然，他在行窃的时候会穿上有黄色条纹的绿色紧身衣，以此增加人们心中的恐惧。他还练就了以身体为轴旋转的本领，因为他认为“不停地旋转能提高我的智力”。

当然，他在中心城建立起大本营之后，很快就引起了闪电侠的注意，1961年8月的《闪电侠》第122期“小心原子弹”（这始终是个明智的建议）里讲述的就是这个故事。刚开始的时候，尖峰人可以甩掉闪电侠，但最终他还是失败了。这个不停旋转的大盗贼想把闪电侠困在一个巨大的“原子弹”里，它像陀螺一样绕着中心轴旋转。罗斯科威胁说，除非世界各国政府选他作为最高统治者（这和故事的开头相比可是个巨大的飞跃，那时候他还只是一个又蠢又笨的小偷），否则他的原子弹就会炸毁半个地球。如果各国政府不同意他的要求，罗斯科还有一个备用计划。他打算搬到地球的另一边——北非，到了那儿他就能“毫发无伤”了！但如果地球的另一半被原子弹毁灭，其后果一定会波及他所谓的“安全”的一边，这位“智力超群”的犯罪大师似乎并没有意识到这一点。你无须为此担心，因为闪电侠能绕着原子弹极速奔跑，制造大量的压缩空气，从而以逃逸速度[1]把原子弹发射出去，使其永远不会返回地球。然后，闪电侠在地球的另一边抓到了尖峰人，把他交给中心城警察局。事实上，20世纪60年代的闪电侠故事常常以这种方式结尾：在世界范围内犯下恐怖罪行的罪犯被移交给当地部门处理。值得注意的是，尖峰人与闪电侠的每一场对决都以尖峰人被捕入狱结束。看来，罗斯科对陀螺的痴迷并不是他通往成功的犯罪之路的关键因素。

擅长旋转的超级恶棍并不是DC漫画独有的，漫威漫画的巨化人也被一个善于旋转的托钵僧所困扰。托钵僧名叫戴夫·坎农，也被称为陀螺人。坎农是一个变种人，他的超能力是高速旋转。他在1963年的《惊异故事》第50期里首次亮相，当时巨化人和黄蜂侠试图阻止坎农偷走丹利百货商店准备发给雇员的工钱（会旋转的超级大坏蛋总与百货公司莫名其妙地联系在一起，这是科学领域一大悬而未决的难题），双方展开了斗争。陀螺人这个代号本身就反映了其所属物种（尖峰人只是个爱旋转的家伙，而陀螺人却是个变种人），除此之外，尖峰人和陀螺人的另一个区别在于，坎农从未说过旋转能提升他的智力。事实上，他退出蛋头的邪恶组织，被视为相当不负责任的行为。如果其他坏蛋认为你达不到“甲虫”和“惊悚”的标准，你就真的应该好好审视一下自己的生活了。坎农对制服进行了改装，他戴上一个亮绿色的头盔，就像一个导弹头，上面还支着两根折了的曲棍球棒；他上身赤裸，并把自己的名号改为“旋风”。讽刺的是，这个长着“尖角”的绿色头盔并没有为旋风赢得更多尊重。

尖峰人和旋风想跻身邪恶组织的上层，其难度超乎我们的想象，因为他们的超能力涉及物理学中最重要的概念之一——角动量。我们在第3章中解释格温·斯黛西之死背后的物理学原理时，讨论了“线性动量”。当时我们不需要加上“线性”这个修饰语，因为我们只讨论了一种类型的动量。现在我们要考虑的则是一种更普遍的情况，一个物体绕轴旋转或者沿轨道运行。线性动量很简单，因为物体只能沿直线方向运动。但是，从原则上说，一个物体可以绕着无限多个轴旋转。旋转轴可以位于物体内部，就像尖峰人和旋风围绕着一个从头延伸到脚的假想轴旋转。旋转轴也可以不在物体内部，比如力大无比的雷神托尔挥舞他的雷神之锤时，旋转轴是一条沿着雷神的手臂，与锤的运动轨迹形成的平面垂直的线。旋转轴还有可能与物体相隔很远的距离，就像地球绕太阳运行，地球轨道形成一个平面（从理论上说是椭圆），旋转轴穿过太阳、垂直于这个平面。

线性动量守恒的原理表明，如果没有外力作用，直线运动的物体会继续保持直线运动；当外力出现时，动量的变化就等于力与时间的乘积，我们称之为冲量。对格温·斯黛西来说，她被绿魔从乔治·华盛顿大桥顶上推下后，在坠落的过程中她的动量不断增加，其原因就在于作用在她身上的外力——重力。如果蜘蛛侠想要阻止她坠落，他就要用蛛丝对斯黛西施加另外一个力。

在物理学中，与角动量守恒相关的原理已经明确，它与线性动量守恒定律非常相似。线性动量在数学上被定义为物体的质量和速度的乘积。惯性质量反映的是改变物体运动状态的难度，比如，改变一只蚊子的飞行方向比改变一辆马克卡车的行驶方向更容易。对于一个给定质量的物体，它的速度越大，动量就越大，改变其运动状态所需的力也就越大。

同样，一个物体的角动量在数学上被定义为“转动惯量”与转速的乘积，其中，转动惯量反映了物体绕特定轴旋转的难度。一个绕内轴转动的物体或绕外轴旋转的物体将继续保持其运动状态，除非有外力作用。

对于一位滑冰者而言，当他的双臂紧贴身体时，以身体内的轴旋转——就像尖峰人或者旋风那样——会容易一些。向外伸展双臂则会增加旋转轴外的质量，从而增加他的转动惯量。旋转轴外分布的质量越大，旋转起来就越困难。在这种情况下，我们说转动惯量变大了。对于给定的物体，旋转速度越快，角动量就越大。在给定的旋转速度下物体旋转越困难，让物体停下来就越困难，角动量也越大。

如果没有外力作用，沿着直线运动的物体将具有恒定的动量。因此，如果它的质量减轻了，它的速度就会增加，以保持质量和速度的乘积不变（线性动量不变）。这就是火箭和喷气式飞机的飞行原理。（这可是火箭科学！）同样，如果一个旋转物体改变了它的质量分布，它就改变了围绕一个轴旋转的难度，即转动惯量发生了改变。如果没有外部力矩，角动量就不会改变，所以转动惯量的增加将导致旋转速度的降低。当一个花样滑冰运动员想以更快的速度旋转时，他必须把手臂紧贴身体。靠近旋转轴的质量越大，旋转就越容易，转动惯量的减少会加快旋转速度。旋风的头盔上支着的两根折了的曲棍球棒，将质量移向了旋转轴外侧，增加了转动惯量和旋转难度，这进一步证明他绝不是反派阵营里最锋利的武器。

在第8章中，我们讨论了蚁人如何从集尘袋里钻出来的问题，并指出扭矩决定了物体旋转的能力。从数学角度说，它等于物体与旋转轴之间的距离与力的乘积。当力垂直作用于旋转轴时，它会推动物体，但不会改变物体旋转的方式。物体角动量的任何变化都是由外力矩及其作用时间决定的，与冲量（力乘以时间）的方程类似。我们在前几章中看到，如果物体没有受到外力作用，它的运动状态就不可能发生变化，不管它是在做直线运动还是旋转。没有力，就没有变化。一个在外太空中旋转的物体永远都不会停止转动，除非有外力改变它的自转。为什么会

这样呢？这与陀螺仪能够使飞机和导弹保持平稳飞行的基本原理相同，陀螺仪是惯性制导系统的一部分。

罗斯科·狄龙以为，不停地旋转就可以带他走上成功的犯罪之路，在这一点上他可能是错的；但在《闪电侠》第122期里，有一点他是对的，那就是陀螺仪的核心部分是一个旋转的陀螺。陀螺仪之所以能被用来确定方向，关键因素就在于与外界隔绝的陀螺。这样一来，它的角动量才不会发生改变。假设有一个陀螺，从上面看，它正在沿顺时针方向旋转。沿着陀螺旋转的方向弯曲你右手的手指，这时你的拇指指向陀螺旋转形成的那个平面。因此，你的拇指所指的方向可以被看作“陀螺角动量的方向”（在比较不同的旋转物体时，为了保持一致性，你应该用同一只手，左手或右手）。陀螺的主体是一个旋转的圆盘，位于“常平架”上，常平架把这个圆盘与外界的力矩隔离开。最新设计的陀螺仪用的是静电悬浮微型圆盘，而不再使用机械耦合的方法。

对于逆时针方向旋转的圆盘，圆盘的角动量“指向”上方，我们称这个方向为“北”。角动量的方向在没有外部力矩的情况下，是无法改变的。因此，如果我想让圆盘的角动量指向东方，我就必须在圆盘上施加一个力。当你试着改变旋转的自行车轮的方向时，你会发现这很难做到。陀螺仪的旋转盘安装在常平架里，即使转动常平架，旋转盘仍将向着原来的方向继续旋转。

陀螺仪是一个非常有用的导向系统，其旋转盘通常以这样的方式旋转：角动量指向正北（以此为例），无论其所在的飞机或者导弹的方向如何改变，它都会始终指向正北方向。如果火箭偏离了正北方向，调节推进器就可以让火箭回到正确的航向上来。如果再有一个指向东方的陀螺仪，以及一个方向垂直于东北平面的陀螺仪，你就可以在三维空间中准确地找到自己的定位，而不需要任何视觉信息或来自地面的信号。作为小孩子的玩具，这还是很不错的。

旋风刚踏上犯罪之旅时，他的高速旋转技能曾让警察一筹莫展。但最后，就像所有身着制服的反派一样，他也遇到了身着制服的克星——超级英雄巨化人。就在两期之前，汉克·皮姆还没成为巨化人，他那时以蚁人的身份打击犯罪、挫败阴谋。所以，戴维·坎农显得特别倒霉，他不得不应对12英尺高的巨化人皮姆，而不是十几毫米高的蚁人皮姆。然而，通过他对角动量的控制，旋风能够直视对手的双眼。

如图16所示，这是《复仇者联盟》第139期中的一幕。旋风通过增

加自己的旋转速度，制造出一个气垫，带他飞到与巨化人面对面的高度（从理论上讲，在这个阶段，汉克·皮姆的身份是黄衫侠，跟蚁人类似，也是通过微缩的体量对抗坏人）。然而，当旋风威胁皮姆躺在医院里的妻子珍妮特·范·戴因（她也是一个微缩的超级英雄，被称为黄蜂侠）时，皮姆认为最好是以20英尺高的巨化人形象与坎农战斗，而不是以一只昆虫的身份与其厮杀。旋风夸口说，他只要提高旋转速度就能“像直升机一样飞行”，并可抗衡皮姆的身高优势。



© 1975 Marvel Comics

图16 旋风利用自己的变异能力，以自己身体为轴高速旋转，中心处的压力会减小

直升机能停留在空中的固定位置，其背后的物理学原理与飞机的飞行原理是一样的，即牛顿第三定律（力总是成对出现的）。直升机的旋翼是倾斜的，旋转时会推动空气分子向下运动，为旋翼提供一个向上的推力。但在旋风使用他的超级旋转技能时，用的是不是这个原理却让人深深怀疑，因为我们在图16中很难看出他身体的哪一部分起到了直升机旋翼的作用（他头盔上的旋转叶片太小，难以胜任此项任务）。

他很有可能用的是和闪电侠一样的方法，在旋转的空气柱中心制造出真空，从而举起了大坏蛋——强壮的博拉兹[2]。戴维·坎农利用的是龙卷风的原理，龙卷风中快速移动的空气会在中心形成低压区域。旋转速度越快，压力越小，升力就越大。由于角动量守恒，直升机的尾翼与主提升旋翼成直角。若没有这种尾翼稳定器，当直升机离开地面，没有任何外部力矩时，它的总角动量是不会改变的。旋翼转得越快，其角动量也就越大。然而，作为一个独立的系统，直升机的总角动量是一个常数。因此，旋翼角动量的增加必须通过直升机自身的反方向旋转来抵消，只有这样才能保证旋翼与直升机的总角动量不变。直升机的体积相当大，具有很大的转动惯量，所以它不会像旋翼一样快速旋转（谢天谢地），但它还是会旋转，这就对导航定位提出了挑战。而尾翼的旋转方向垂直于顶部旋翼的旋转方向，形成了一个平衡扭矩，使直升机机身指向某个固定方向。

通过反向旋转来平衡和抵消旋转物体的角动量，是超级英雄常常使用的方法。每当闪电侠要对抗像飓风这样的破坏性天气现象时，他就会朝着与飓风的旋转方向相反的方向极速奔跑，制造出所谓的反涡旋。反涡旋的角动量与飓风的涡旋动量相等、方向相反，二者相互抵消，就像未发生飓风一样。

说到旋转，令人惊讶的是，拥有神奇魔力的超级英雄的标志性特征竟然在物理学上都能说得通（当然，前提是允许“不合常理的奇迹”存在）。当雷神托尔想从一个地方快速移动到另一个地方时，他会快速转动他的锤子。他把锤子扔向自己要去的地方，先松开锤子上的手绳，再马上抓住，把自己像个导弹似的发射出去。这似乎完全违反了动量守恒原理。事实上，在《巴特英雄漫画》第3期（描述了超级英雄版的巴特·辛普森的冒险经历）里，辐射人发现有一个类似托尔的角色以这种方式飞行，他愤怒地攻击了这个冒牌托尔，大喊道：“这违反了物理学定律！”然而，这样的交通工具在物理学上其实是可行的。

当雷神转动他的锤子时，双脚站得稳如泰山。这大概就是X战警的敌人“肉球”很难被推动的原因，肉球的特殊能力让他能够坚不可摧地站在地面上，把自己的身体中心与地球中心相连，只要这个连接不断开，要想推动肉球，就得推动整个地球。如果雷神想要飞起来，他只需要在把锤子扔出去时稍稍跃起（切断与地球的联系）即可，甚至不需要松开手绳再重新抓住。如果你像雷神一样强壮，你也可以使用这种技巧轻松自如地在空中飞行。难怪他们用这个家伙的名字命名了一周之中的一天[3]！

角动量的普遍性反映了这样一个事实：几乎所有事物都在以某种形式旋转，从原子中的电子、质子和中子到大质量的星系概莫如是。我们将在第19章中讨论亚原子的旋转，分析它们是如何使铁等金属产生磁性的。关于星系自转的研究，则为一种比磁性更神秘的事物提供了证据，它就是暗物质。

1933年，在西格尔和舒斯特开始构思超人故事的时候，天文学家弗里茨·兹维基提出了一个观点：宇宙的大部分物质都是不可见的，这再次表明漫画创作者需要一直努力追赶科学家那些看似天马行空的想法。（弗里茨·兹维基在1933年与沃尔特·巴德一起宣布观测到了中子星。）通过对后发座星系的观测，兹维基发现，它们的旋转速度过快，不可能保持稳定。在第7章中，我们讨论了向心加速度，当物体以圆周或抛物线的方式运动时，就会产生这种加速度，跟蜘蛛侠靠蛛丝从纽约市的一栋楼摆荡到另一栋楼一样。正如牛顿第二定律所说的那样，任何加速度都必须由外力产生。对蜘蛛侠来说，产生向心加速度的力量源自他的蛛丝的张力。对于旋转的后发座星系而言，在它围绕着星系的内轴旋转时，星系中所有恒星的引力将其聚拢在一起。

我们可以看一下大熊座中的螺旋星系NGC　3198。因为这个星系的侧面朝向地球，所以我们看到的只是一条细线。这个螺旋星系就像留声机上的一张老式唱片，而我们只能看到唱片的边缘。根据多普勒效应，我们知道，所有这些恒星都在围绕着一个垂直于星系平面的轴旋转。我们可以回忆一下在第4章中讨论的内容，当波源相对于观察者发生移动时，声波或光波的波长也会改变。如果波源与观察者之间的距离变远了，光的波长就会变长；如果波源与观察者之间的距离变近了，波长就会变短。波源移动的速度越快，波长的变化就越大，这是用雷达枪测定物体运动速度的基本原理。

在旋转的螺旋星系边缘，恒星发出的光的多普勒频移表明恒星在以

什么样的速度旋转，光的强度则表明星系中有多少颗恒星，以及它们的质量如何。但要把以我们测量到的速度旋转的星系聚拢在一起，这个星系的质量必须大于我们能看到的质量（这意味着需要有更多的恒星，其他物质的质量太小，基本可以忽略），前者大约是后者的10倍。如果蜘蛛侠想高速摆荡，所需要的张力就会超过蛛丝的承受范围，蛛丝会发生断裂，然后蜘蛛侠会沿着平滑的轨迹飞出去。同样，夜空中的星系NGC 3198也不太稳定，它会在其旋转速度和星系内所有恒星引力的共同作用下而分崩离析。在红外光谱图或其他隐藏的天体中寻找尘埃云，还不能为“丢失的质量”提供充分的解释。

事实上，这个问题遍及整个宇宙。宇宙中有些区域有能够发射出X射线的气体，这些气体非常热，大约有100万摄氏度。这些气体聚集在星系周围，但还是一样的问题，可见恒星的质量并不足以产生把这些高温气体聚拢起来的引力。天文学家认为，恒星、星际尘埃或行星的质量都不足以使这些高温气体保持稳定。所以，一定存在我们未探测到的其他引力源。

摆在我们面前的只有两种可能：要么是我们对于引力的理解还不够（这是有可能的，虽然目前的引力理论，也就是爱因斯坦的相对论，已经多次得到实验验证，让我们拥有一定的信心），要么是宇宙中存在很多我们看不到的物质。科学家们倾向于第二种可能，他们普遍认为宇宙的绝大部分质量实际上都存在于所谓的“暗物质”中。20世纪30年代有过一个特例：有人设想出一种“奇迹物质”，它符合所有已被广为接受和广泛验证的物理学原理。截至我写作本书时，关于这种无所不在的物质的组成，科学家们仍然知之甚少。我们在晴朗的夜空中所能看到的一切——数十亿个星系，以及每个星系中包含的数十亿颗恒星——只占宇宙质量和能量的很少一部分。尖峰人和旋风渴望成为犯罪大师，但他们做梦也没想到，他们的超能力的来源（角动量）让我们得出了这样一个结论：96%的宇宙都不可见。

[1]逃逸速度指的是，如果物体以每秒钟7英里的速度发射出去，它就能摆脱地球引力的束缚。

[2]只有白银时代的漫画会给一个厉害的反派起这么个名字。

[3]北欧人用雷神托尔的名字命名了星期四。——译者注

第10章 蚁人真的听不见也看不见吗？

有好几个超级英雄都具备让自己的身体变小的特殊能力。除了漫威漫画中的蚁人和黄蜂侠，还有原子侠、末日巡逻队里的弹力女孩以及DC超级英雄战队中的微型紫罗兰，他们都能把自己的身体变小。他们获得这种超能力的方式各不相同，但他们都有一个共同点：交流对他们来说不是一件容易的事。我指的不是蚁人与黄蜂侠因沟通不畅而离婚这件事，而是他们无法与没有变小的人进行交流。

如果你只有几毫米高，那就没什么人能听到你的声音，你的听觉也不会很敏锐，所以你必须靠非语言手段与没有变小的人进行沟通。蚁人的音调比正常人高，他正常说话的声音就已经达到了普通人类的听力上限。他的听阈也变得更高，普通人类对他说的话，他大多听不到。更糟糕的是，他看到的所有东西都是失焦而模糊的。下面我们来看看在未与外界切断联系的情况下，为什么化身为一个“不到1英寸高的私家侦探”会带来一系列的交流问题。

我们先提出一个基本问题：我们说的话能否被别人听见，以及我们能否听到别人说的话，这些都是由什么决定的？问题的答案与摆锤周期有关。摆锤就是在一根细绳（我们忽略细绳的质量）的一端系上具有一定质量的物体，把细绳的另一端固定在天花板的一个无摩擦力的支点上。这个具有一定质量的物体可以是实心球，比如台球或者保龄球，也可以是一块石头或者蜘蛛侠。我们把这个物体举到某个高度，使绳子与垂直方向形成一个小角度。手松开之后，作用在这个物体上的力包括重力（总是垂直向下）和细绳向上的拉力。拉力的方向与垂直方向成一个角度，并且随着物体的来回摆动而不断变化。重力一部分作用于绳子，另一部分则用于改变物体的速度，使物体在来回摆动的过程中产生加速度。

摆锤来回摆动，从最高的初始位置摆过一个弧形轨迹，又回到初始位置，这段时间就是一个“周期”，这种运动就是“周期性运动”。不管是在蛛丝上来回摆动的蜘蛛侠，还是系在细绳上的台球，摆动一个来回所需要的时间取决于两个因素：重力加速度（g）和线的长度。奇怪的是，周期与物体的初始高度无关（对于小角度的摆动而言）。

摆锤周期是一种固有属性，与物体的初始位置无关。伽利略可能不是第一个发现这一点的人，但他成功地发现了是什么决定了摆动的速度。尽管这听上去很奇怪，跟人们的直觉不太一致，但操场上的秋千荡个来回的时间既不取决于上面坐的人有多重，也不取决于这个人从哪里开始荡秋千，而是取决于秋千座椅与秋千最上面支点之间的链条长度。我们假设秋千不是由一个位置固定的人帮忙推动的，坐在秋千上的人荡秋千的过程中也不会再加劲儿。那么，可以确定的是，荡秋千的起始位置越高，经过最低点时的速度就越快，因为起始位置的角度越大，偏离垂直方向的绳子的张力就越大（沿绳子方向产生加速度）。然而，这难道不应该意味着摆荡一个来回所需的时间更少吗？并不是。由于你的初始位置更高，所以虽然你荡得更快，但你距离弧线底部的距离也更远。更快的速度和更远的距离相互抵消，因此完成整个周期所需要的时间将保持不变，不论初始位置在哪里。正因如此，摆锤或是其他做简谐振动的装置很适合用作计时工具。两个一样的钟表，不管用的是落地大座钟的摆锤，还是老式怀表或者节拍器里的伸缩弹簧，走时都是一样的，这与一开始钟摆是从什么地方开始摆动的无关。节拍器是一种上下颠倒的摆锤装置，它的频率不受初始摆动方式的影响，但会由于摆臂上物体位置的改变而发生变化。

如果摆锤周期与初始位置无关，那么它为什么会与重力以及绳子的长度有关系呢？这不难理解，重力加速度越小，摆锤受到的拉力就越小，运动速度也越慢。摆锤周期在月球上要比在地球上更长，而在外太空，因为重力加速度是零，所以摆锤完全不动，摆锤周期是无限长。为什么绳子的长度与摆锤周期有关？答案在于几何学。摆锤经过的区域就像一块比萨饼，支点就是饼的中心，摆锤的运动轨迹就是饼边。一个完整的比萨饼边的长度，也就是圆周长，为$2\pi R$，其中R代表圆的半径，希腊字母π是常数3.14159……半径（R）越大，周长（$2\pi R$）就越大，比萨饼的饼边也越长。对于摆锤而言，半径对应着连接支点与摆锤的绳子的长度。摆锤的摆臂越长，摆锤要经过的距离就越长，摆动一个来回所需要的时间也越长。

摆锤的频率——一秒内完成的摆动次数——是周期的倒数，周期的定义是摆动一个来回所需要的时间。如果一个摆锤的周期是0.1秒，它摆动一个来回所需要的时间就是0.1秒，一秒内它能完成10个来回的摆动。周期越短，频率越高。周期的平方与摆锤绳子的长度l及重力加速度g的比率成正比，也就是周期$^2=（2\pi）^2\times（l/g）$。为什么l与g的比率决定的是周期的平方而不是周期呢？为什么系数是$（2\pi）^2$呢？要想回答

这些问题，就不得不违背我的许诺——只用到一点儿代数知识。对我们来说，关键在于必须把摆锤的绳子加长为原来的4倍才能使周期翻倍。反之，把绳子变短（比如使用皮姆粒子）就会缩短周期，周期越短，频率越高。

人通过吸入空气让声带振动而发出声音，产生声波。人类的声带与系在一条绳子上来回摆动的物体不同，但作为简谐振动代表的摆锤之美就在于它体现了所有振动系统背后最重要的物理学原理。[1]当皮姆缩小到蚂蚁大小的时候，他大概是原来大小的1/300，声带振动频率相应地增加为原来的17倍（即300的平方根）。正常人讲话的声带振动频率大约是每秒200次，而蚁人的频率为每秒3400次。我们的听力范围是每秒振动20次至每秒振动20000次，所以我们仍然可以听到蚁人的声音，但他的声音听起来会非常高，因为他的胸腔也缩小了。听着11毫米高的超级英雄用尖锐刺耳的声音命令对方投降，蚁人的死对头们没有笑得满地打滚，而是败在了他那一记小小的右勾拳下，真是太奇怪了。

蚁人变身之后，不仅声音变了，听力也会受影响。鼓的振动频率随着其直径的缩小而增大，大的低音鼓音调低沉，小的军鼓音调高亢。当皮姆博士的耳膜因为接触皮姆粒子而变小的时候，他能够感知的频率也相应发生了变化。（人类听觉范围背后的物理学原理相当复杂，但此处我们假设这主要是由耳膜决定的。）在他6英尺高的时候，他能听到的最低频率约为每秒振动20次；在他缩小为蚁人之后，这个频率增大为原来的17倍，每秒振动接近340次。而正常人说话的时候，音高是每秒振动200次，低于蚁人这位微型英雄的感知范围。因此，蚁人和他的微型同伴们在与正常人交流的时候，必须对对方的身体语言保持高度的敏感。

皮姆变身为蚁人之后，除了耳膜的感知频率阈值发生了变化外，他的听觉敏锐度也受到了影响。声带的振动会使通过声带的空气产生压缩和扩张，膈肌收缩使气流进入喉咙。这种密度的变化很轻微，与相邻区域之间的差别平均只有万分之一。密度变化越大，声波所产生的音量或响动就越大，而你只能控制声音发出那一刻的初始密度的变化。被压缩的那部分空气会膨胀，挤压它前面的那块区域，那块区域的空气又会膨胀并挤压下一区域的空气。所以，你听到的是由你的声带发出并传到你耳朵里的一系列声波集，而你嘴里的空气并不会传递到听众那里。如果我告诉你我午餐时吃了大蒜，你会先听到这个信息，然后在离我足够近的时候才能确认这个事实。由于信息会向四面八方传播，离讲话者距离

越远，空气密度的变化（声波）就越小；频率低于远距离听众感知频率阈值时，听众就将听不到任何信息。

反之，如果离声源非常近，耳膜将无法对空气密度的变化做出反应，分辨不同声音的能力就会减弱。这一点很有用，在《原子侠》第4期的“无辜窃贼案件”中，DC漫画世界中的迷你英雄原子侠就发现了这一点。[2]在这个故事里，一个名叫埃尔金斯的大恶棍发现了一种催眠射线，能让其他任何人服从他发出的口头指令。这个大恶棍把只有几英寸高的原子侠置于这种射线下，并发出命令，不许原子侠抓他。但是原子侠把粉红色的橡皮当作蹦床一跃而起，随即把埃尔金斯击倒在地。原子侠之所以能抵挡住催眠射线，原因正如他在故事的结尾所交代的：“他得意地朝我喊出他的命令，那声音对我来说就像打雷一样！因为我完全听不见他在说什么，也就无须听他的指令！”（有趣的是，我的孩子和我几乎每天都会上演同样的一幕，只不过他们还没有掌握微缩技能，我也没冲着他们大声嚷嚷。）

变身为蚁人后遇到的另一个棘手问题就是，视觉模糊不清。光在电磁场中传播时相邻的波峰或波谷之间的平均距离（波长）决定了光的颜色。通常来说，由红光（波长为650纳米）到紫光（波长为400纳米）的各种波长的光等量组合而成的白光，波长是500纳米（1纳米等于十亿分之一米）。要被眼睛感应到，光必须到达眼睛后面的视锥细胞和视杆细胞；要到达这些感光细胞，光必须先通过你的瞳孔。位于眼睛前方的这条通道直径大约是5毫米，取决于你看这本书时房间的亮度。1毫米等于100万纳米，所以瞳孔的直径大约是可见光波长的10000倍。对于光波而言，瞳孔是一条相当宽阔的隧道，可以轻易通过。然而，蚁人的瞳孔直径是正常人的1/300。他眼睛里的这条通道只是可见光波长的30倍左右，而可见光波长仍然是500纳米。所以，光波还是能通过这条“隧道”，但比较勉强。

要想知道当通道的直径只比光的波长大几倍时会发生什么，我们可以想象一下广阔湖面上的水波。两个紧贴水面的码头之间会形成一条通道。当码头间的距离非常远时，比如半英里，我们以水波波峰间的距离作为基准，波浪通过这个区域时并不会发生明显的变化。当皮姆是正常人的身高时，他的瞳孔是可见光波长的10000倍，情况与水波类似。但对于蚁人来说，他所面对的情形就犹如两个相距很近的码头，码头间的距离只比相邻波峰间的距离大几倍。水波还是能够通过这条通道，但是会在码头旁边分散开来，与旁边的障碍物产生复杂的干涉图案，这种效

应被称为“衍射”。当散射波的物体大小与波长差不多时，这种效应最为显著。假设你想通过分析波的干涉图案来探索水波的成因，那么你会发现，当两个码头相距数千英尺时，你会看到清晰的图案；而当两个码头间只有几英尺的距离时，你会看到扭曲混乱的图案。

对于蚁人而言，他看到的东西都是模糊不清的。正因为如此，昆虫的眼睛，尤其是晶状体，与人类以及大型动物的晶状体差别很大，昆虫眼睛里的复合晶状体能调节衍射效应。即便如此，就算苍蝇非常关注时事，也还是没办法看报纸。虽然昆虫的眼睛非常善于探测光源的变化，但却不善于分辨尖锐边缘造成的视觉反差。因此它们要依赖其他感官，比如嗅觉或者触觉，在广阔的世界中探路。然而，蚁人就很不幸了，他受影响最小的一种感觉——嗅觉，恰恰是人类最不敏感的感官。

[1]摆锤的周期性简谐振动是物理学中许多理论模型的基础。在试图描述一些复杂的自然现象时，我们往往会从简单的摆锤运动入手，用约吉·贝拉的话来说，90%的物理现象都是“简谐振动”，剩下的那些则是“随机运动”。

[2]我们将在第13章里进一步介绍原子侠和他的微缩技能。

第11章 闪电侠与狭义相对论

在上一章中，我讲到了闪电侠的速度超过声速时会产生音爆。为什么当一个物体的速度大于或等于声速时，就会发生“爆炸”呢？我们如何基于这一点来理解爱因斯坦的狭义相对论呢？

我们先讨论爆炸，再来说爱因斯坦。假设你站在田野中，闪电侠以声速（每秒1/5英里）向你跑来。如果他从距你10英里处开始跑，那么他会在50秒后来到你面前。如果他在起点处说“闪电”，然后在距你5英里处说“规则”，你会听到什么呢？如果闪电侠的速度比声速慢，那么“闪电”这两个字会早于他到达距你5英里处，然后他才会说出“规则”。结果是，你会先清晰地听到“闪电规则”这几个字，紧接着闪电侠来到你面前。

如果闪电侠的速度比声速快，他会先于“闪电”一词到达距你5英里处。他在那里说出“规则”后接着朝你跑过来。因为“规则”这个词需要传播的距离较短，所以它会比“闪电”这个词更早地到达你的耳膜。结果是，你会听到跟原来顺序颠倒的词组——“规则闪电”。而且，闪电侠来到你面前后，你才会听到这组词。因为闪电侠的速度超过声速，所以他能比声波更快地到达你面前。

如果闪电侠的速度刚好等于声速，他在起点处说出的“闪电”一词就会跟他一起到达距你5英里处。当他说出“规则”时，这个词会与“闪电”同时从5英里处朝你而来，在25秒后你会同时听到这两个词。结果是，你听到的既不是“闪电规则”，也不是“规则闪电”，而是它们重叠在一起。声音是一种压力波，所以两个词的声波重叠所产生的振动比单个词更大。即使闪电侠什么都不说或者什么声音都没有，他在奔跑过程中仅是推开空气所引起的扰动也可以制造出压力波，当他从你身边跑过的同时，你会听到如雷鸣般的声音（或者说“音爆”）。如果闪电侠的速度比声速快，也会造成同样的扰动。但在这种情形下，他跑过你身边之后，以声速传播的音爆才会传到你的耳朵里（而闪电侠说的“闪电规则”这几个字则完全被淹没在音爆中）。射击时的枪声或者猫女挥鞭子的声音，都是子弹或鞭梢的速度比声速快所产生的迷你音爆。

现在的漫画编剧已经意识到，闪电侠制造的这种音爆会伤及无辜。在2004年的《DC：新的疆域》中，白银时代的英雄再次回归。故事发生在20世纪50年代，英雄们初次登场，编剧达尔温·库克描绘了这样一个场景：闪电侠从中城（大概位于美国中西部）跑到了内华达州的拉斯韦加斯。他在一个文本框里写出了闪电侠奔跑过程中的想法：“跑出城市边缘之后我才能突破声障，这是几经探索之后得出的经验，而且不能让飞溅的玻璃伤害行人。”闪电侠说到做到，就像《闪电侠》第202期（第2册）中描绘的那样。在这个故事里，闪电侠失忆了，他穿着普通人的衣服，不知道自己拥有超级速度。当遭遇街头流氓打劫时，他本能地做出了反应，结果他的极速运动震碎了整个街区的玻璃，周围的建筑也都被严重损坏。[1]

不管你听到的是“闪电规则”还是“规则闪电”，只要你的视力够好，你就能通过闪电侠的口型判断出他到底是以什么样的顺序说出了这两个词。这是由于从闪电侠身上反射的光比声音的传播速度更快（前者的速度是每秒186000英里，而后者的速度是每秒1/5英里）。我们也是通过比较闪电和雷声间隔的时间，来确定雷暴的距离。[2]

如果闪电侠的速度接近光速，结果又会怎么样呢？根据爱因斯坦在1905年提出的狭义相对论（之所以叫“狭义相对论”，是因为其没有考虑重力作用，直到1915年他提出广义相对论时，才将重力因素考虑在内），对于以接近光速运动的物体，其运动距离和时间、质量等方面都会发生奇怪的变化。此时此刻并不适合我们展开讨论相对论，如果要认真地讨论这个问题，一本书都讲不完。所以，我只想简单论证一下以接近光速运动会对物体产生什么样的影响，第19章在讲述电与磁之间的关系时也是基于这一点。

狭义相对论可以概括为两个看似简单却富有洞察力的观点：第一，物体的运动速度不可能超过光速（对不起！超人和闪电侠），对于每个人来说光速都是一样的，不管他以多快的速度运动；第二，物理学原理适用于每一个人，不管他是运动的还是静止的。第一点似乎很奇怪。假设子弹的速度是每小时1000英里，闪电侠的速度与飞行的子弹一样，在我们看来，对于与子弹做同向同速运动的闪电侠来说，那颗子弹是静止的（正因为如此，他用手一挥就能轻松地拨开子弹）。但是，对于静止不动的你和极速奔跑的闪电侠来说，光速都是每秒186000英里。就算闪电侠的速度是光速的一半（每秒93000英里），光相对于他的传播速度也不是每秒93000英里，而是每秒186000英里；而与此同时，对站在街

角静止不动的你而言，光速也是每秒186000英里。这是为什么呢？

当闪电侠跑向你的时候，他可以将自己视为相对静止的，而你正在朝着他跑去。根据狭义相对论，你和闪电侠两人都得认可光速为每秒186000英里。为了实现这一点，爱因斯坦认为，从你的角度看，闪电侠会显得更“单薄”（也就是说，他在行进方向上的距离看起来被压缩了），时间对于他来说过得似乎比你慢。从闪电侠的角度看，他手里拿的码尺还是一码长，他的手表还在照常走时，所以他也会对你得出相似的结论（在他看来，你的运动距离被压缩了，时间对你来说过得更慢）。要想测量奔跑的闪电侠手里拿的标尺有多长，你就要看尺子的前端和后端，计算它们经过某一点的时间。对于两个做相对运动的人来说（比如奔跑的闪电侠和静止不动的观察者），如果他们分别处于不同的时间和空间，对于两件事是否同时发生，他们将很难达成一致的意见。速度影响着距离的变化，在第18章中，两者的函数关系在帮助我们理解电流如何产生磁场将起到关键作用。

两个观察者对事件发生的次序存在分歧，这个观点肯定不是爱因斯坦首先发现的，也不是狭义相对论独有的。正如列夫·朗道和G.B.罗默在《什么是相对论？》这本著名的小册子中所说，即使两个观察者都是静止的，他们仍可能对事件的发生次序存在分歧，这取决于他们相对于某个物体的位置。（比如，到左边的房子去。哪座房子？谁的左边？我的左边还是你的左边？）在1967年12月的第175期《闪电侠》中，这种模糊性在“宇宙尽头的赛跑”这个故事的高潮部分发挥了关键作用。外星人强迫超人和闪电侠赛跑，终点是银河系的尽头，从表面上看这是一场因打赌而产生的比赛。然而，这些外星人隐藏了他们的真实目的，他们的真正意图是摧毁闪电侠和超人。比赛结束后，美国正义联盟的成员们查看了监控器。从安装在终点线左侧的监控器上查看比赛结果的联盟成员宣称超人赢得了比赛，而从终点线右侧的监视器查看结果的人则认为闪电侠是胜利者。这部漫画生动地诠释了狭义相对论的一个基本原理，即当物体高速运动时，不同的观察者对事件的先后次序的意见会有所不同，甚至完全相反。在1967年，不止一位读者发现，故事的结尾并没有明确的赢家，这其实是一个巨大的骗局。

信息的传播速度不可能比光速更快，因此对于事情发生的先后顺序，人们经常会意见不一致。要想让每个人对光的传播速度达成一致的意见，就先要承认物体之间的距离会因为运动变短，时间也会变慢。当涉及那些能够以光速运动的人物（比如末日巡逻队中的底片人和惊奇队

长，后者指20世纪80年代后期复仇者联盟中的那个非裔美国女英雄，她能够将自己的身体变成一系列光子）时，漫画里的情节常常会有漏洞。故事里的其他人看不到这些英雄，因为他们的速度与光速一致，所以光不会从他们身上散射出去。又或者，远远看过去他们就像一道闪电，但离近了就什么都看不到了。宇宙所允许的最大速度就是光速，当闪电侠越跑越快的时候，你可能会觉得他能突破这个限制，但这是不可能的。其中的原因在于，从一个静止的观察者的角度来看，他跑得越快，进一步加速就越难。根据牛顿第二定律（力等于质量乘以加速度），如果他奔跑的双脚所施加的力保持不变且没有产生相应的加速度，那么他的质量必然在增加。因此，除了时间变慢、距离缩减之外，他跑得越快，他（相对于我们这些“慢吞吞”的观察者而言）的质量也越大。漫画里曾经提到了这一点。在《闪电侠》第132期里，闪电侠尝试以光速奔跑，但他发现自己其实“慢下来了，我跑得越来越慢，即使我使出全力……”如图17所示，“闪电侠突然意识到一个残酷的事实”，即他无法跑得更快，因为他越来越重。当然，那些了解爱因斯坦狭义相对论的人肯定知道其中的原因。在图18中，一个外星人向他射出了“重力增大射线”！不考虑上下文的话，图17确实为爱因斯坦狭义相对论提供了一个极好的例证。

在《美国正义联盟》第89期里，闪电侠需要在顷刻之间转移走韩国清津的512000个大人和小孩，让他们躲开即将爆炸的原子弹。为了完成这个壮举，他必须以接近于光速的速度移动。当他成功地拯救了这个城镇的所有人，跪在山顶上时，书中提到了极速运动的后果。正如文本框里的文字所描述的：“他逐渐从接近光速运动产生的副作用中恢复过来，目光转向被火焰吞噬的清津。”当然，对于闪电侠而言，他是静止的，而他身边的世界正在运动，且质量在增加。顺便提一下，爱因斯坦在认识到物体动能的增加会带来质量的增加之后，创造出$E=mc^2$这个伟大的方程。



© 1962 National Periodical Publications Inc. (DC)

图17 在《闪电侠》第132期里，闪电侠努力以光速奔跑，他发现自己跑得越快，身体就越重。这难道不是对爱因斯坦狭义相对论的教科书式的解读吗？



© 1962 National Periodical Publications Inc. (DC)

图18 不！闪电侠遭到了外星人“重力增大射线”的袭击！

如果说没有什么物体能比光的速度快，那么闪电侠的宇宙跑步机是如何帮他穿越时空的呢？我必须很遗憾地指出，时间旅行是不可逆的。物体的速度越接近光速，对于静止的观察者而言，时间流逝得越慢。正如下文要讨论的那样，质量会随着速度的改变而改变，并且会遇到一个障碍（我想可以称之为“时间障碍”），这个障碍让物体无法达到或超过光速。所以，时间会变慢，但不可能倒退。然而，如果一个人的移动速度足够快，那么穿越到未来还是有可能的，而且是很久以后的未来，而非一秒钟之后。

在2006年出版的《超级英雄战队》第16期（第5册）中，超级少女突然从21世纪飞到了1000年以后。她一直在追踪一枚外星人的导弹，外星人想征服地球，于是发射了速度惊人的导弹，试图毁灭地球。这枚导弹的飞行速度接近光速，超级少女已经追踪了3天了。最后，她终于追上了这枚导弹，并将其摧毁。而此时，她遇到了生活在3006年的一群超级英雄少年，也就是超级英雄战队，她加入其中，由此开启了一系列冒险之旅。超级少女和超级英雄战队时不时就会流露出不解的思绪，不知道她是如何追着导弹穿越到1000年之后的。对于她的时空穿越之举，漫画中给出的最终解释是，因为她穿越了“泽塔光束”，这种光束能让人跨越到很遥远的未来。但实际上，爱因斯坦的狭义相对论能为其提供一种更合理的解释。

从观察者的角度看，超级少女追上导弹用了3天时间。但对她自己而言，她和导弹基本上是相对静止的，而宇宙正以极快的速度从她身旁经过。如果在超级少女看来，宇宙的运行速度接近光速，那么她会观察到一个戏剧性的时间膨胀效应。根据爱因斯坦方程，如果超级少女的速度是光速的99.9999999963%，那么在她追踪导弹的这3天，对于地球上静止不动的一个人来说，已经过去了1000多年。当她终于放慢脚步停下来时，她发现自己来到了1000多年之后的世界。因此，物理上存在一种有效的穿越到未来的方法，但要注意：第一，对于任何大小的物体来说，想要达到这么快的速度需要消耗极高的能量；第二，这是一趟单向旅程，无法让你再回到过去（但在漫画中，“泽塔辐射”最终消失了，超级少女又回到了21世纪的世界，继续在她自己的漫画故事中冒险）。

那么，经常以极快的速度飞回过去的超人又如何呢？华纳兄弟1978年出品的电影《超人》中有一个这样的场景，为了消除一场毁灭性地震造成的影响（尤其是露易丝·莱恩的意外死亡），超人绕着地球飞得太

快以至于颠倒了时间的方向。这可能吗？我们仔细审视一下这个场景，估计出超人在地球上空的高度、飞行轨道的距离、飞行的周数以及需要花费的时间。基于这些数据，我们可以得出结论：超人的速度确实能达到光速，甚至超过光速，但却不能拯救露易丝·莱恩的生命。他若以如此快的速度运动，就会穿越到遥远的未来，像他的堂姐超级少女那样，也许他能拯救莱恩的子孙后代，但却无法挽救莱恩的生命。

虽然闪电侠不用时常担心距离收缩（其专业术语为“洛伦兹收缩”）的问题，但是时间变慢或者说“时间膨胀”差点儿暴露了他的秘密身份。虽然闪电侠是世界上奔跑速度最快的人，但他的现实身份——巴里·艾伦却有个问题，那就是他每次约会都会迟到。他的未婚妻爱丽丝·韦斯特总在抱怨巴里太拖拉，希望他能向闪电侠学习，而根本没有意识到他们俩是同一个人。如命中注定一般，爱丽丝的父亲也注意到巴里常常约会迟到，并且如《闪电侠》第141期“放慢时间”中所描述的，他对于巴里的手表走时总是比正常时间慢感到十分好奇。爱丽丝的父亲物理学教授T. H. 韦斯特，怀疑巴里的手表之所以走时慢，是因为他变身成闪电侠行侠仗义时，因高速运动而产生了时间膨胀效应。韦斯特发现有人抢劫，于是打电话告诉巴里有人正在实施犯罪，并要求巴里把手表的时间校准。韦斯特知道闪电侠肯定会以超快的速度去追赶这些罪犯，所以他打算稍后见到巴里的时候，看一下巴里手表的走时是否慢了。这个方法本来是可以奏效的，但巴里在与韦斯特会面之前又校准了手表的走时，因为巴里觉察到了韦斯特让他校准手表时间的意图。正如故事所述，巴里说：“我本人作为一名科学家，也非常了解爱因斯坦的相对论，以及超高速运动对时钟的影响！”所以，有时就连物理学教授想要破解这位速度之王的秘密，也会碰钉子。

在理论物理学中，有一种物质的速度可以超过光速，那就是被称为“快子”的粒子，它的速度永远大于光速。在某些情况下，这种粒子甚至可以回到过去（《守望者》中的阿德里安·维特利用这种粒子，使曼哈顿博士失去了预知未来的能力）。快子的概念的提出，原本是为了检验狭义相对论的某些结果。据我们所知，这种粒子并不是真实存在的。更重要的是，就算它们像花花草草一样常见，仍然不可能和我们的真实世界存在任何交集，因为在我们的世界中，没有任何物体的速度可以超过光速。闪电侠可以借助他的宇宙跑步机在过去与未来之间穿梭，但是这台跑步机的真正功能不过是让闪电侠做做有氧运动罢了。

超人和闪电侠靠着他们的超能力穿越时空，这当然也未能逃过物理

学家的眼睛。在本书的英文版第一版出版之后，有人给我讲述了一个故事，内容是关于超人对时空连续性的干扰。早在20世纪50年代，麻省理工学院的一群物理学专业的学生就已经写信给莫特·韦辛格（当时的超人漫画编辑）。他们抱怨说，在最近一期漫画中，超人明显飞得比光速还快，这与爱因斯坦的理论相矛盾。那么，韦辛格是怎么回复的呢？据说，他的回答是：爱因斯坦的理论只是理论，而超人才是事实！

[1]音爆的压力波强度随距离的减小而减小。因此，只要超声速喷气式飞机与街道保持一定距离，就不用担心建筑物被破坏。

[2]雷雨云砧中产生的闪电传播1英里的距离大约需要5微秒（我们从生理角度是没有办法感觉到这个过程的，因为这只是一瞬间的事），而与闪电同时产生的雷声则大约需要5秒钟才能传入我们的耳朵。计算出两者的时间差，再加上我们知道声音的传播速度是每秒钟1/5英里，我们就可以轻松地计算出雷暴距离我们有多远。

第二部分 能量

第12章 吃货闪电侠

也许闪电侠确实能在海面上奔跑，抓住飞行的子弹，但我们还应该思考一个更重要的问题：他每隔多久吃一次饭？

简单地说，隔很短的时间。我们还要问一个更基本的问题：他为什么要吃饭？食物中到底含有哪些人体活动所必需的物质（不管是跑步还是走路，甚至静止不动的时候）？另外，为什么我们只能从有机物中获取这些物质，而不是从石头、金属或者塑料里获得？

闪电侠吃饭的原因跟我们一样：为细胞生长和再生提供基础物质，为新陈代谢提供能量。在你刚出生的时候，你的身体里含有一定数量的原子，但这些原子不足以维系你的一生。随着你慢慢长大，你需要更多的原子，它们通常以复杂分子的形式存在，你的身体将其分解并转化成细胞代谢和生长所必需的基础原料。正如我们在讲述氪星爆炸时讨论过的，宇宙中所有的原子——包括我们摄入的食物——都是由一颗早已死去的恒星中的核反应生成的，氢原子聚合成氦原子，氦原子聚合为碳原子，以此类推。在太阳的聚合反应中，还有一种产物在我们的食物中占次要的地位。超级英雄战队中的饕餮少年靠摄入惰性物质（比如金属或者石头）来满足生命所需，宇宙公敌行星吞噬者摄取的是行星的能量，但人类吃的大部分食物都必须是有生命的东西。只有这样的食物才能为我们提供一种听起来神秘却很寻常的必需品——能量。

“能量”这个词的用处如此之广，以至于想不用“能量”或者“功”来解释问题反倒变成了一个难题。一个最简单的关于能量的非数学定义是，“能量”衡量的是物体运动能力的大小。如果一个物体正在运动，我们就说它具有“动能”；如果它撞上其他物体，就会使其他物体也运动起来。即便物体静止不动，它也具有能量，比如受外力作用（重力），但不产生加速度（比如位于地面上）。这个物体一旦摆脱限制就会运动起来，因此我们说这个物体具有“势能”。

能量包含动能和势能。在某些情形下，一定质量的物体可能两者兼有，比如第3章中格温·斯黛西从桥上坠落的那个例子。当她站在桥上的时候，她具有很大的势能，因为重力从很远的距离之外作用于她。但是她的运动状态受到了限制，因为有桥支撑着她。在她从桥上掉下去后，作用于她的力（重力）使她产生了加速度。她在急速坠落的过程中，重力的作用距离越来越短，她的势能也在逐渐减少。势能不会消失，她在桥顶上的势能在她坠落的过程中逐渐转化为动能。在她坠落过程的任意一点上，她所拥有的动能刚好等于她所失去的势能（忽略因空气阻力而损失的能量）。当她撞击水面时，她的势能减至最小，她的速度和动能增至最大。因此（我们再次忽略空气阻力），她在水面处拥有的动能刚好等于她在桥顶上的势能。接着，动能传导至水面，水面对她产生了一个巨大的作用力，把她的速度变为零，这和第3章中她被蜘蛛侠的蛛丝拉住时的悲惨结局是一样的。

我们也可以想象，蜘蛛侠吊在蛛丝上会像摆锤一样来回摆动。在运动轨迹的最高点上，他是静止不动的（正因为如此，这一点才是最高点），但此刻他远离地面，具有很大的势能。而在最低点处他的势能最小，如果从这一点开始，他是摆荡不起来的。如果他从高一点儿的位置开始运动，他一开始的势能就会转化为动能，在最低点处，他失去的那部分势能恰好等于他得到的动能，此时作用于他的力只有重力（垂直向下）和拉力（垂直向上）。虽然这两个力都不是水平方向上的力，但由于他已经在运动了，他就会保持这个运动状态，直到有外力作用于他。随着他从最低点处向最高点处摆荡，他的动能又转化为势能。如果没有人推他一把，他的能量就不可能超过开始运动时的能量（这些能量又是从哪儿来的呢？），因此他摆荡的高度也不可能超过一开始的高度。事实上，他在把挡路的空气（空气阻力）推开时消耗了一部分动能，所以他摆荡的高度会低于初始高度。

以上关于势能与动能的思考，向我们揭示出物理学领域最深刻的一个理念：能量既不会凭空增加，也不会凭空消失，它只会由一种形式转化为另一种形式。这个理念用专业术语来表达就是“能量守恒定律”。在自然界中，永远不可能出现起始能量不等于最终能量的情况。绝对不可能！

20世纪二三十年代，物理学家在研究原子核的放射性衰变时发现，衰变反应后释放出的电子的能量加上原子核的能量并不等于原子核的初始能量。为了解释衰变反应的能量不守恒现象，沃尔夫冈·泡利提出，

损失的那部分能量被一种仪器观测不到的神秘幽灵粒子带走了。后来，终于有仪器能够观测到这种“幽灵粒子”。它们不仅真实存在，而且中微子（这种神秘粒子的名字听起来有点儿怪，由恩里科·费米命名，其意大利语的含义是“中性的小不点儿”）是宇宙中物质最普遍的存在形式。

在更加日常的情形中，我们要多加注意，把运动过程中所有形式的能量转化都考虑在内。我们可以想象用锤子把钉子钉进木板的过程。当木匠把锤子举过头顶时，锤子所具有的势能会随着敲击钉子的过程逐渐转化为动能。当锤子敲击在钉子上时，锤子的动能就会引发钉子的运动（顺利的话钉子会进入木板），但还有一个副作用，那就是使钉子里的原子剧烈振动，钉子会因此发热。锤子的部分动能引起钉子里原子的振动（钉子进入木板），以及木板中分子键的断裂，这些可以用敲击过程的“效能”来表述。如果我们细心地把这些大大小小的动能加在一起，包括钉子、木头，甚至空气的动能（在敲击钉子时我们听到的“啷”的声音来自压缩周围的空气产生的声波），它们的和将刚好等于锤子在开始敲击钉子之前的初始动能。然而，对于木匠而言，钉子发热和敲打的声响都是能量的浪费，会削弱敲击过程的效能。

有时候，这种能量浪费不容小觑。一辆沿着水平公路行驶的汽车具有一定的动能，这些能量来自汽油与氧气的燃烧化学反应，这个反应是由火花塞的电子打火引燃的。这个小小的爆炸反应所产生的气体会以极快的速度运动，推动活塞做功，动能通过一套精巧的系统被传导到轮胎上。当然，这个化学反应产生的能量并非都用于推动活塞做功，其中很大一部分被用来加热发动机。对于汽车而言，加热发动机并没有什么实际意义。此外，当汽车在高速公路上行驶时，还需要用一部分能量用来推开挡在汽车前面的空气。一辆汽车的效能主要是由空气置换的效能决定的，一辆普通汽车每行驶1英里就会置换6吨空气！汽车或者卡车的体积越大，其在行驶过程中置换的空气就越多，需要的能量也越多。这个原理也解释了为什么双手紧贴身体在水里行走，要比张着双臂容易得多。表面积越小，相同质量汽车的燃料燃烧效率就越高（假设发动机相同）。

绿魔把格温·斯黛西带到乔治·华盛顿大桥的过程中需要消耗能量，当斯黛西到达桥顶的时候，她具备了一定的势能，这些能量来自绿魔的滑翔机燃料燃烧所产生的化学能量。从逻辑上说，根据能量守恒定律，我们既不可能制造出新的能量，也不可能消灭现有的能量，而只能把一种能量转化为另一种。因此，宇宙中现存的能量和物质在宇宙诞生之时

就已经存在了。在一开始时，整个宇宙的体积被压缩到非常小；随着宇宙的膨胀，总的能量和质量保持不变。

能量密度指的是单位体积中的能量，如果总能量保持不变而体积增加，能量密度就会减小。能量和物质能够相互转化，著名的爱因斯坦方程$E=mc^2$就描述了这个过程。$E=mc^2$的含义是，物质可以被看作“能量的减少”。一般情况下，当光子发生碰撞形成物质时，就会产生相同数量的物质和反物质。在大爆炸发生后的瞬间，随着宇宙的膨胀和冷却，夸克——胶子等离子体结合形成质子和中子。早期宇宙中的质子和中子略多于反粒子，具体形成过程目前尚不知道。这种物质的形成过程只发生过一次，那是在宇宙诞生早期，能量密度足够高，能够使物质凝聚成形。到后来（比如现在），由于能量密度低于$E=mc^2$的门槛值，所以无法自发地形成物质。[1]宇宙诞生早期形成的质子和电子，由于静电吸引力而形成了氢原子。地心引力把一些氢原子聚集在一起就形成了恒星。在这些恒星的中心，由于引力势能的作用，氢原子发生核反应，聚合成更重的元素，并释放出动能。

现在我们可以说，宇宙中的所有能量（以及所有物质）都是在宇宙诞生之初就存在的。但这又引出了关于能量的两个更深刻的问题：能量到底是什么东西？它最初是从哪里来的？对于这两个问题，科学家们给出了同样的答案：不知道。

“快”餐

为了搞清楚闪电侠要吃多少东西才能以超级速度奔跑，我们先得计算他的动能。物理学家总想节约能源，所以让我们“循环利用”第1章中的数学算式吧。想要改变一个物体的动能，让它加速或者减速，我们就必须做功。这个“功”在物理学上的含义跟它的通常含义不太一样。

如果一个物体在外力作用下发生了位移，我们就说外力对物体做了功，根据力的方向不同，这个物体的动能会增加或减少。从这个角度看，功是另一种形式的能量，二者的单位也相同。对于一个下落的物体m，作用于它的外力就是引力所产生的重量$F=mg$，物体位移的距离就是它跌落的高度h。因此，功=外力×位移=$mg\times h=mgh$。这就是物体在高度h处所具有的势能，在这个例子中，功可以被视为增加一个物体的

势能所需要消耗的能量。

我们可以回想一下第3章中从桥顶跌落的格温·斯黛西，或第1章中纵身一跃跳上高楼的超人的例子。在这两个例子中，引力所做的功都是mgh。对于格温·斯黛西而言，她的动能增加了；而对于超人，他的动能减少了。二者的不同之处在于，对于斯黛西来说，引力把她向下拉，作用方向与她的运动方向相同；对于超人来说，引力同样把他向下拉，但作用方向与他的运动方向相反。斯黛西一开始时的动能为零，一定距离（在这里指桥的高度）之外的万有引力使她在撞击水面之前的速度达到最快。她的最终速度v与她跌落的距离h之间的关系可以用$v^2=2gh$来表示，其中g是重力加速度。这是一个真命题，经过简单的代数运算（见自序），比如在等式两边同时乘以或除以相同的数字，结果仍是真命题。在$v^2=2gh$的等式两边同时除以2，就可以得到$v2/2=gh$；再在等式两边同时乘以斯黛西的质量m，就可以得到$mv^2/2=mgh$。等式右边是重力对斯黛西做的功，等式左边是她的动能的变化量，即最终动能减去初始动能。因为她一开始的时候没有动能（没有运动就没有动能，但她有大量的势能），所以她的最终动能可以表示为$mv^2/2$。恭喜你，又完成了一道物理计算题。[2]

当闪电侠停止奔跑的时候，他的动能就不再变化。漫画会逼真地表现闪电侠所经历的加速或者减速过程，以及减速的后果。在《闪电侠》第106期中，闪电侠在追逐一个时速为500英里的物体时突然停下来，漫画画面表现为他的双脚在地面划出深深的沟痕（见图19）。使他紧急减速的外力，特别是摩擦力，被这幅画面描绘得非常精确。为了让他的速度从500英里/小时减至零，需要外力对他做很大的功。漫画中闪电侠的制动距离约为15英尺，这是一段相当短的距离，由于功=外力×位移，所以他的双脚施加给地面的力是非常大的。事实上，要想在15英尺的距离内使速度从500英里/小时减至零，至少需要80000磅力的外力！



© 1959 National Periodical Publications Inc. (DC)

图19 在《闪电侠》第106期里，罕见地展现了闪电侠突然减速所产生的现实影响。减速的距离越短，他的靴子就要对地面施加越大的力

与之类似，在《闪电侠》（1989年4月）第15期的第2册中，沃利·韦斯特[3]的速度如此之快，以至于在他想停下来的时候，在北美大地上留下了数英里长的沟痕。通过沟痕的长度，科学家们就可以推测出沃利的速度是多少，可能会停在什么地方，这与警察通过路面痕迹还原车辆事故真相的方法相同。实际上，通过每次闪电侠突然起跑或者突然停下时双脚在地面留下的沟痕，我们就能知道闪电侠在哪儿。好在对于中心城的道路交通部门来说，闪电侠的这种超能力只是偶尔才展现一次。

我们回到闪电侠的饮食习惯这个问题上来，如果动能可以用公式$KE=（1/2）mv^2$来表达，闪电侠摄取的热量就会以其速度平方的量级增长。如果他的奔跑速度是原来的2倍，他就要摄入4倍的热量，即为了达到这个速度，他的食量必须增大为原来的4倍。在白银时代，漫画师卡迈恩·因凡蒂诺笔下的闪电侠身材苗条，没有大块的肌肉，毕竟他只是一个奔跑者。如果闪电侠在地球上的体重是155磅，他的质量就是70千克。当他的速度是光速的百分之一（这基本上是闪电侠奔跑速度的上限）时，他的速度就是v=1860英里／秒，或者300万米/秒。此时，他的动能是（1/2）×70千克×（3000000米／秒）^{2}=315万亿千克·米^2/秒^2=75万亿卡路里。在物理学中，能量的概念非常常见，因此它有自己单独的单位，其中一个就是“卡路里”。0.24卡路里=1千克·米^2/秒^2，也就是说，0.24卡路里等于一个1千克·米/秒^{2}的外力作用1米的距离所做的功。

1千克·米^2/秒^{2}之所以会等于0.24卡路里，是因为在19世纪中期，物理学家对于能量的概念感到非常困惑，而且这种情况很长时间都没有改观。一开始时卡路里被定义为一单位的热，热被视为一种区别于功和能量的概念。后来有位物理学家认识到热只是另一种形式的能量，动能可直接转化为热。这位物理学家名叫詹姆斯·普雷斯科特·焦耳，人们便以他的名字命名一单位的能量（1焦耳=1千克·米^2/秒^2=0.24卡路里）。尽管物理学家使用焦耳来衡量动能和势能，我们在这里还是继续使用更麻烦的千克·米^2/秒^2，以此来强调能量的几个决定因素。[4]

需要注意的是，物理学家口中的卡路里与营养学家口中的卡路里不是一个概念。对于物理学家来说，1卡路里指的是让1克水的温度升高1摄氏度所需的能量，这是在实验室环境中定义能量的一种非常有效的方法。但在这个定义下，一块苏打饼干所含有的能量足可以让24000克水的温度升高1度。也就是说，对于物理学家来说，一块苏打饼干含有的

热量是24000卡路里。为了避免总是出现这么大的数值，1卡路里的食物热量被定义为1000“物理卡路里”的热量。所以一块苏打饼干含有的24卡路里食物热量就等于24000物理卡路里的热量。本来，一个奶酪汉堡的食物热量高达500卡路里就够让人吃不消的了，再想到它含有500000物理卡路里的热量，我们可能以后再也不想吃奶酪汉堡了。

要把闪电侠的75万亿物理卡路里的动能换算成食物热量，就得用这个数值除以1000。换算后的数值看起来小一点儿，但闪电侠还是要消耗750亿卡路里的食物热量才能让自己的奔跑速度达到光速的1/100。也就是说，他得吃1.5亿个奶酪汉堡才能达到这个速度（假设食物热量可以完全转化成动能）。[5]如果他停止奔跑，他的动能就变为零，他要想再跑这么快，就得再吃1.5亿个汉堡。《闪电侠》漫画也提过（20世纪80年代中期），他几乎需要一刻不停地吃东西（甚至在以超级速度奔跑的时候还在吃），来保持超快的奔跑速度。然而在黄金时代、白银时代以及现代，能量守恒定律常常被忽略。现在，闪电侠的超快速度被归因于他拥有“神速力”，它的意思是：别当真，这只是一本漫画书。

奶酪汉堡与氢弹

我们要问的下一个问题是，为什么奶酪汉堡或者其他食物能够给闪电侠提供能量？当物体移动的时候，我们很容易就能知道它具有动能，重力产生的势能也很好理解。但是，还有很多其他形式的能量，我们得好好想想才能知道应该将其归入哪一类，是动能还是势能。闪电侠之所以能通过食物获取能量，不是因为他吃的食物里运动的原子产生了动能，而是因为食物分子的化学键中蕴含着潜在的能量。因为能量既不能新增，也不会减少，而只会从一种形式转化为另一种形式，所以我们需要追本溯源，看看奶酪汉堡里储存的潜在能量是从哪里来的。

为了弄明白食物中储存的潜在能量，我们得先了解几个基础的化学问题。当两个原子离得足够近的时候，如果其他条件也合适，它们就会组成一个化学键，这是一个新的单位，叫作“分子”。分子可能很小，比如两个氧原子组合在一起形成了氧分子（O_2）；分子也可能很长、很复杂，就像人体的每个细胞中都含有DNA分子。两个或多个原子是否能够形成化学键，何时形成，以及形成的条件，是所有化学问题的基础。所有原子都有一个带正电的原子核以及大量的电子。一种物质的化学属性

取决于其含有的电子的数量，以及它们（都带负电荷）通过什么方式与带正电荷的原子核平衡。当一个原子离另一个原子很近的时候，它们的电子可能会交叠在一起，这两个原子之间可能会产生吸引力或排斥力。如果它们相互吸引，电子就会产生化学键，原子就会组成分子。如果它们相互排斥，我们就说这两个原子之间没有发生化学反应。为了确定这个力是吸引力还是排斥力，我们需要用到非常复杂的量子力学计算方法。如果两个原子相互吸引，却被某个限制条件强制分开，原子之间就会产生势能。一旦这个限制条件消失了，这两个原子就会组成一个分子。因此，我们说这两个原子一旦结合在一起，就会处于低能量状态，正如砖块被放在地上的时候重力势能较低一样。要想把这块砖抬至高度*h*就需要对其做功，正如把分子拆成原子需要消耗能量一样。

现在书归正传，闪电侠为什么要吃东西，或者食物为什么能提供他奔跑所需的能量呢？当闪电侠快速奔跑的时候，他会在细胞层面消耗能量，以供腿部肌肉的舒张和收缩，而细胞层面的能量则来自巴里·艾伦吃下的食物。那么，食物中的能量又是从哪里来的？来自植物，不管是直接摄取，还是间接摄取（比如，通过吃肉）。食物所储存的能量实际上就是分子层面的势能。植物会摄入分子的“积木块”，对它们进行处理，把它们摞在一起，建成亚细胞的“积木塔”。这种积木塔一旦建成就相当稳固，而且搭建积木塔的过程会提升分子的势能（除了最下面的“积木”）。

与之类似，植物把简单的分子组合成糖类时也需要做功，从而使分子的势能增加。势能始终储存在糖类之中，直到细胞中的线粒体形成三磷酸腺苷（ATP），储存的能量才会被释放出来。这就如同建积木塔的过程中所做的功会转化为积木块中储存的势能，直到拆掉这座塔，势能才会转化为动能。闪电侠腿部肌肉细胞的ATP释放出的能量比“拆除糖类积木塔”所需要的能量多，尽管闪电侠得到的能量比植物细胞建造积木塔时所做的功少。

植物细胞的能量又是从哪里来的？植物细胞通过光合作用吸收太阳光中的能量，合成糖类。光来自太阳，它是核聚变反应的副产品，在这个过程中，氢核聚合形成氦核。最终，食物中所有的化学能量都由阳光转化而来的，阳光又产生于太阳中心的核聚变反应，这与氢核爆炸时的反应是一样的。所以，地球上的大部分能量都来自于太阳，就像地球上所有的原子（从闪电侠身体里的ATP分子到他放在自己衣服里的那枚戒指）都是在太阳能坩埚里制造出来的。

最后，所有的生命形式都有可能出现，因为一个氦核（包含两个质子和两个中子）的质量略小于在恒星中心聚合在一起的两个氘核（氘核包含一个质子和一个中子）。所谓“略小于”，指的是氦核的质量是两个氘核质量之和的99.3%。这种质量上的微小差异会产生大量的能量，因为根据$E=mc^2$，质量乘以光速的平方才能得到能量值。

99.3%是一个具有魔力的数字，原因有两个方面。一方面，如果一个氦核的质量是两个氘核质量之和的99.4%，氘核就不会形成，氦核也不可能发生聚变反应。在这种情况下，恒星晦暗无光，无法合成元素，也不会发生超新星爆炸，不能形成更重的元素，行星和人类的诞生更是无从谈起。另一方面，如果一个氦核的质量是两个氘核质量之和的99.2%，聚变反应就会释放出过多的能量。在这种情况下，质子会在宇宙诞生早期形成氦核，而在恒星形成的时候就没有可用的核燃料了。这种对自然界的鬼斧神工的源头的追溯，就是现在科学研究关心的问题。

功率决定一切

通常来说，某项任务的约束条件并不是需要多少能量，而是能以多快的速度提供和使用这些能量。就像图19中的闪电侠，他需要在15英尺的距离内让速度从每小时500英里降至零。把这么大的动能降到零所需要做的功超过100万磅英尺，所需要的力至少为8万磅力。如果闪电侠经过较长的距离停下来，比如1英里而不是15英尺，他所需要的力将小于230镑力，他也就不太可能在地面上留下深深的沟痕了。换句话说，如果他有更长的时间来改变他的速度，他改变动能所需要的力就会更小。

在物理学领域，功率被定义为某个系统中单位时间内能量的变化率（我在这里说的“变化”指的是能量从一种形式转变为另一种形式，比如闪电侠的动能转化为他的双脚对地面所做的机械功）。如果我对我的汽车做功，把它的速度从零变为每小时60英里，这个过程可能需要6秒，也可能需要6小时，但最终的动能是一样的。很显然，在第一种情况下，汽车动能的变化率更高。如果你的汽车能在6秒内把速度从零提升到60英里/小时，我们就说你的汽车发动机功率较高。动能和热都是能量的不同形式，能量变化率的单位是千克·米2/秒2，也就是瓦特（以詹姆斯·瓦特的名字命名，他是热力学研究领域的先行者）。我们经常在很短的时间内需要消耗很多的能量，这时候以千瓦为单位就方便多了。

瓦特是功率单位，它衡量的是能量消耗率。为了记录在一小时内消耗了多少能量，我们用功率乘以时间，得到的结果就是千瓦时，电力公司用千瓦时为单位统计你消耗了多少电能。如果一个大型发电厂向100万个家庭都输送1千瓦的电力（这是一个典型家庭的用电量），我们就说这家发电厂具备千兆瓦（10亿瓦）的生产能力。

功率而不是能量决定了我们无法发明出会飞的汽车，尽管我们目前身处20世纪五六十年代的白银时代漫画中所描述的“遥远的未来”。我们以1986年的漫画小说《守望者》里乘坐夜枭飞行器的夜枭为例。在阿兰·摩尔和戴夫·吉本斯创作的这部小说里，夜枭（从理论上讲是夜枭二代）借鉴了查尔顿漫画公司的超级英雄蓝甲虫这个角色，蓝甲虫借鉴的则是DC漫画公司中的蝙蝠侠角色。《守望者》里的丹·德雷伯格拿着从他的银行家父亲那里继承的财产购置了一栋拥有超大地下室的房子，他在地下室里存放了许多工具、专业的超级英雄服装（用于在各种极端环境下与坏人战斗，比如水下、北极以及放射性区域等）、一系列奖杯、从各地带回来的纪念品，还有一个名叫阿基米德的大型飞行器（简称“阿基”）。这个圆形的飞行器与小货车大小差不多，以蓝甲虫的甲虫型飞船为蓝本，它们的飞行原理也一样——凭空想象。

《守望者》里的阿基不具备某个具体的可提供悬浮力或推力的装置，但它可以在夜枭拯救受困于公寓大火的群众时悬浮在半空中，也可以从纽约飞到南极洲。然而，要做到这些需要很大的功率。我们在前文中讨论了与地面距离为h的物体的势能，我们知道势能的公式是mgh，其中m是质量，g是重力加速度。所以，一个物体的质量越大，克服重力把物体抬至高度h所需要做的功就越多。

2009年，一个夜枭飞行器的全尺寸模型出现在华纳兄弟出品的《守望者》电影中，它的质量有4000千克（这个飞行器必须足够坚固，才能在罗夏越狱时承受住警卫的炮火攻击）。把这么重的物体抬升至1/8英里的高度，并成功飞越纽约市的高楼大厦，其拥有的势能必须超过700万千克·米^2/秒^2。这是一个相当大的能量，更重要的是，必须不间断地提供这么大的能量才能让夜枭飞行器悬浮在稀薄的空气中。当夜枭飞行器在距地面200米的高度盘旋时，它的功率是7200千瓦，也就是7.2兆瓦（1兆瓦等于100万瓦）。如果想让阿基飞到其他地方去，就需要进一步为其提供动能，这会大大增加其对电能的需求。如果阿基以每小时700英里的速度飞行约30000英尺，它的功率将超过500兆瓦，而从纽约飞到南极的这段航程则需要超过180000加仑汽油！[6]当我们在《守望者》漫

画小说里看到曼哈顿博士的超能力时，纵使心里万般怀疑，也只能暂且放下。然而，所有超级英雄漫画中最不合常理的奇迹也许就是夜枭飞行器的能源供应问题了。

1986年戴夫·吉本斯绘制的夜枭飞行器没有明显的推进系统。在2009年的电影版中，夜枭飞行器的下部和尾部都加装了喷气推进器，这表明他意识到必须有一些机械装置才能让飞行器运行起来。就我个人而言，如果我设计并制造出像夜枭这样可以悬浮在半空中的飞行器，能以声速飞行超过13个小时，且使用的是一种轻质高效的新型能源，我就不会赤身裸体地坐在位于地下的猫头鹰洞穴里，念念不忘自己过去的行侠仗义之举。我会每天忙着数钞票，它们都是我通过注册专利赚来的。

飞起来的闪电侠

为了跑起来，闪电侠需要通过食物摄取能量，这些能量储存在复杂的分子结构之中。就像搭建积木塔储存势能一样，植物需要做功才能累积能量。当积木塔被推倒时，我们就可以把这些储存起来的势能转化成动能。但是，诱发积木塔倒塌的因素是什么呢？这座塔怎么知道细胞什么时候要释放能量呢？我们体内细胞中的线粒体释放能量的过程涉及很多生物化学机制，但最关键也是最重要的限制性因素，就是吸入氧气呼出二氧化碳这个化学反应。如果没有吸入氧气，储存在细胞内的能量就无法被释放出来，吃东西也没有任何意义。闪电侠跑得越快，他的动能就越大，他的细胞需要释放的势能越多，他需要吸入的氧气也越多。我们在前文讨论过，他必须吃掉数量可观的食物才能提供他奔跑所需的动能。那么，他需要吸入多少氧气呢？他在奔跑的过程中会不会把地球上的氧气都吸光？

要回答这个问题，我们先要计算一下闪电侠跑一英里需要吸入多少氧气。一个跑步的人所需消耗的氧气跟他的质量有关，对于一个6分钟跑1英里的优秀跑步者来说，每千克质量每分钟要消耗70立方厘米的氧气。假如闪电侠的质量是70千克，他每跑一英里就要消耗近30升（1升等于1000立方厘米，比1夸脱少一点儿）氧气。我们假设他在以最快的速度奔跑时，仍然保持这样的氧气消耗水平。30升氧气中约含有10^{24}个氧分子，如果闪电侠的速度是每秒10英里，这就意味着闪电侠每秒要吸入10^{24}个氧分子。这听起来很多，但好在大气中的氧分子数量比这多得

多，有超过10^{43}个氧分子。所以即便他每秒钟消耗10^{24}个氧分子，并且一直以每秒10英里的速度奔跑，那么要想吸光大气中的所有氧分子，也得用上1000亿年的时间。他跑得越快，吸入的氧分子数量越多，但即便他以光速奔跑（他能达到这个速度，虽然很少用到），他也要不停地跑上200万年，才能吸光大气中所有的氧分子。考虑到这些数字，我们的呼吸也变得畅快多了。

我们倒是不用担心地球的大气层了，虽然我们的假设前提是闪电侠在奔跑的过程中呼吸顺畅。但以每分钟几百英里的速度奔跑，闪电侠真能正常呼吸吗？幸运的是，闪电侠在奔跑的过程中身边一直有一个空气囊。在《闪电侠》167期里，这部分静止（相对闪电侠）的空气被称作他的“光晕”，在流体力学中它又叫作“无滑移区”。高尔夫球表面布满了小凹坑，就是出于这个原因。

要想弄明白其中的原理，你可以在家里做一个简单的物理小实验：把浴室面盆的冷水龙头打开，让水流稍小。为了达到最佳效果，事先要把水龙头出水口处的起泡器拆掉。刚开始时，你会看到水流就像抛光的圆柱体，在水龙头出口处粗一些，之后由于表面张力而稍微变细。要不是水冲击面盆发出声音，我们可能都感觉不到水在流动，而误以为它是个固态结构。这种形式的水流，其中的所有水分子都向着同一个方向移动，叫作“层流”。为与另一种极端情况做对比，我们把水龙头开到最大。水流翻腾打转，朝着不同的方向运动，速度相差也很大，这种形式的水流叫作“湍流”。一般情况下，如果你想从水龙头的出口处接到更多的水，你最好让水以层流的方式流出来；而如果是湍流，水流就会打转并从杯中溅出。

即便水是以层流的方式流出来的，所有的水分子都朝着一个方向运动，它们的速度也不尽相同。外层的水分子会与水管壁碰撞，所以它们的动能会向水管转移（水管很坚硬，只会略微变热而不会移动），运动速度会减慢。紧贴着水管壁的薄水层相对于水管是静止不动的，在这个水层旁边的水会损失一些动能，但不是全部。因为与水管中的原子不同，这个“无滑移区”中的水分子是可以移动的。而在水管中心，水会流得更快一些。所以，即便是在层流中，也存在一系列连续的同心环，内环中水的运动速度比外环要快，管道中心的水的运动速度最快。在层流中，所有环都是均匀分布的；而在湍流中，整个管道的水分子的运动都很混乱。

如果拉着水管在静止的水里移动，水的运动状态与上文所述刚好相

反。靠近水管壁的水被水管拖着向前移动，所以内环的水运动得更慢，以此类推。但在这两种情况下，不管是水从水管里流出来，还是水管在水中移动，紧贴着水管壁的水层相对于水管而言都是静止的。同样地，在紧挨着运动物体的地方也会有一层薄薄的空气，这层空气相对于物体而言也是静止不动的。在这个例子中，物体在液体中移动得越慢，无滑移区的振动就越强。当速度达到很快的时候，同心环上的能量转移就会发生混乱，出现湍流。以一定速度运动的物体必须消耗更多的能量才能产生湍流，比其在层流中消耗的能量要大。我们在第6章讲过，海豚为使尾流中的涡旋散开会频繁蜕皮，以提升游泳速度，就是这个道理。

这也是高尔夫球表面会有小凹坑的原因。高尔夫球表面凹凸不平，这有助于减小高速运动的球后方形成的湍流尾迹的横截面。简单来说，这些小凹坑减小了球遇到的空气阻力，湍流尾迹越小，能量损失就越少。这个效应是在偶然的情况下被发现的。在19世纪中期，高尔夫球是由古塔胶制成的光滑的实心球。高尔夫球手经过实践发现，表面布满划痕的旧球比光滑的新球飞得更远。实验研究和流体力学理论的进一步发展，使高尔夫球的设计得以优化，于是它的表面出现了许多小凹坑。

对高尔夫球有益的东西对闪电侠同样有益。当闪电侠奔跑的时候，紧贴着他身体的那层空气与他的身体保持相对静止，因此他一直都随身带着一个气囊。即便在几厘米的薄空气层中，也存在着10^{24}个氧分子。这个“蓄水池”必须不断补充新空气，只有这样才能让闪电侠继续奔跑。

在《闪电侠》漫画中，闪电侠身边的“光晕”不仅能让他在奔跑时呼吸顺畅，还能帮他摆脱空气阻力造成的其他不利影响。比如，燃烧的流星在以极快的速度进入大气层时，由于遭遇了极大的空气阻力，它会变成陨石[7]。可是，为什么闪电侠在快速奔跑的时候没有起火燃烧呢？

《闪电侠》第167期对这个问题做出了解释，但是漫画迷们对这个解释并不满意。闪电侠在获得神速力的同时也获得了“护体光晕”，这些都是“十维空间精灵新手”莫比赋予他的。而在这个故事里，莫比用他的神奇能力去除了闪电侠的护体光晕，只留下了神速力。结果，闪电侠仍然能以很快的速度奔跑，但强大的空气阻力导致他一跑起来就会起火燃烧。

与其说闪电侠遭遇了恼人的小恶魔（这让人感到很奇怪），倒不如说白银时代的闪电侠漫画出版了8年后这个小恶魔才姗姗来迟（更让人感到意外）。在20世纪五六十年代，几乎每个DC漫画中的超级英雄都

会有一个异次元的捣蛋鬼。第一个捣蛋鬼角色是米克斯杰兹皮特先生，这个五维空间中的捣蛋鬼就连超人也对他束手无策。只有在不小心反着说出自己的名字后，米克斯杰兹皮特才会被强制送回五维空间。一旦回到五维空间，他起码在3个月内不能来到三维空间（可能是因为只有这样，读者才不会对他感到厌倦，而且他每次出场时都会让读者眼前一亮）。为了与超人旗鼓相当，蝙蝠侠也被安排了专属的捣蛋鬼——蝙蝠螨。它本想向自己的偶像蝙蝠侠致敬，却总是弄巧成拙，给蝙蝠侠添了很多麻烦。火星猎人荣恩·荣兹有个外星捣蛋鬼名叫祖克，海王的捣蛋鬼是水妖奎斯普。在美国正义联盟的7位成员中，只有绿灯侠和神奇女侠没有专属的超自然或者异次元的捣蛋鬼。

这并不意味着漫画迷都不喜欢闪电侠的小恶魔，相反，是莫比用自己的神奇能力赋予巴里·艾伦以神速力。但这个由作家约翰·布鲁姆、加德纳·福克斯、罗伯特·卡耐尔以及编剧尤利乌斯·史瓦兹在白银时代创作出的故事并没有延续下去，后续的故事都称闪电侠的超能力是偶然获得的，这种说法破坏了其原来故事的精彩程度。莫比再也没有回到闪电侠的漫画中，对于白银时代的大部分漫画迷来说，《闪电侠》第167期的故事成为一段绝唱。

[1]1997年，科学家们找到了能量密度足够大时会自发地形成物质的直接证据。通过让高能伽马射线光子互相碰撞，他们在实验室里创造出电子或反电子粒子对，再现了宇宙诞生那一刻的运行机制。

[2]事实证明，我们本可以在第1章中就讨论能量的定义，然后利用代数运算法则倒推出F=ma这个表达式，而不是从F=ma开始，去推导能量方程。从哪里入手计算取决于个人喜好。无论如何，最后我们总会得到$v^2=2gh$这个表达式。她最终的速度和她的起始高度之间的联系关乎生死，至于是使用哪个等式得出结论则并不重要。

[3]沃利·韦斯特原本是闪电小子，但在1985年，他省略了头衔中的“小子”，继承了白银时代的闪电侠巴里·艾伦的衣钵，成为新的闪电侠。而巴里·艾伦为了拯救我们的宇宙，死在了“反监视者”手里。

[4]注意，千克·米^2/秒^{2}也是重力势能的单位，其公式是PE=mgh，千克、米/秒^{2}和米分别对应质量m、重力加速度g和高度h。这合情合理，因为如果动能等于势能，那么它们也应该使用相同的单位。如果动能的单位是千克·米^2/秒^2，而势能或者功的单位是秒^3/千克或者其他奇怪的单位，我们的分析可就大错特错了。

[5]由于我们摄入的大约一半的热量都用于维持新陈代谢，所以闪电侠可能需要吃掉3亿个奶酪汉堡。

[6]顺便提一句，这么多的汽油质量会超过560吨，所以，阿基的油罐会是飞船上质量最大的东西。

[7]然而，并非所有流星进入大气层时都会发生燃烧反应。为了说明为什么有那么多的氪石都能完整地落到地球，《超人》第130期里称这颗星球的残骸不受空气阻力的影响！

第13章 缺失的功

皮姆通过逆转“皮姆粒子”的极性，把自己变身为巨化人。末日巡逻队里的女演员丽塔·法尔（弹力女孩）在拍摄一部非洲电影的时候，不慎在一座与世隔绝的火山口处吸入了一种神秘的蒸汽；于是她获得了可以随意改变自己身体大小的能力，她既能变得像五层楼那么高，也能微缩到像一只昆虫那么渺小。然而，DC漫画中的超级英雄原子侠只能变小。

原子侠是我最喜欢的超级英雄之一，他的真实身份是一位物理学教授，名叫雷·帕尔默。《展示橱》第43期向我们讲述了帕尔默教授的故事，出于经济方面的考虑，他想要发明一种缩小射线，但一直没有成功。在第145次实验失败后（实际上，他在第145次实验中成功地把厨房的一把椅子变小了几英寸，但紧接着椅子爆炸了，就像其他所有被缩小了的东西一样），他在语音日记中记录道：“把物质压缩……能让农民在同一块土地上生产出1000倍于原来的粮食，也能让一辆大货车运输100倍于原来的货物！”当然，由于会发生爆炸，想让货物完好无损也很困难。

有一天晚上，在开车回家的路上，帕尔默发现有一颗白矮星坠落在附近，他由此找到了发明缩小射线的办法。有了这种外星物质，帕尔默在缩小物体的时候就能有效地规避爆炸问题。或许是因为这个恒星残骸的名字中包含“矮”这个字，所以之前的物理学家并没有发现它具有缩小物体的特性。在本书的结尾部分，我们将详细讨论原子侠的出身和白矮星。可以说，雷·帕尔默把自己的身体缩小到6英寸高（这是他在与罪犯战斗时的典型体量）甚至更小（比电子还小），其背后的物理学原理跟奇怪的火山蒸汽或皮姆粒子差不多。

关于原子侠很重要的一点是，他不像蚁人或者弹力女孩，他不受密度不变这个条件的约束。也就是说，他可以自主控制大小和质量。很显然，白矮星提供了买一送一的“奇迹大礼包”。

雷·帕尔默的正常身高是6英尺，体重是180磅（相当于82千克）。当缩小到6英寸时，他只有正常大小的1/12。他的宽度和厚度也以同样

的比例缩小，如果他不想让自己的样子看起来很奇怪。因此，他的体积缩小为原来的1/1728（1/12×1/12×1/12）。如果他的密度保持不变，他的质量也会变成原来的1/1728，即只有47克或1.66盎司。这实在是太轻了，以至于我们不忍心看到这个弱小的斗士与时间小偷克洛诺斯和光博士之流对抗。幸运的是，对于我们这些善良的人来说，原子侠只需轻轻按一下腰带扣上的“大小与体重控制按钮”（后来他的手套上也加装了这个按钮），就能在大小变为6英寸的同时让体重维持180磅不变。正如我们在图20中看到的，在体重很轻的时候，他可以把一块粉红色橡皮当作蹦床，让自己弹到坏蛋脸上。在撞击的那一刻他又把体重恢复到180磅，这样一来，坏蛋的下巴就相当于被体重不变、体型缩小的原子侠重重地撞了一下。[1]



© 1962 National Periodical Publications Inc. (DC)

图20 在《原子侠》第4期的封面上，原子侠显示出了他对大小和质量的掌控。通过减小自己的密度，他的身体变得很轻，轻到可以把一块粉红色橡皮当作蹦床弹到坏蛋的下巴附近。这时，他迅速恢复自己的质量，一拳击倒了“无辜的小偷”

原子侠经常使用的另一个手段是，在他只有6英寸高时抓住坏蛋脖子上的领带，然后再把体重恢复到180磅。坏蛋的头会被狠狠地向下拽，撞击在桌面或者其他坚硬的表面上，瞬间晕死过去。毫无疑问，这就是20世纪60年代的罪犯在从事犯罪活动时更喜欢把“周五便装”作为工作制服的原因。

因为原子侠能自主控制自己的质量（只在体量缩小的时候），所以他能够借着风产生的气流或者温度梯度飞到不同的地方去。（他还会利用把自己变成电子大小这个超能力，通过电话线到达很远的地方，我们会在第26章讨论这个技能背后的物理学原理。）原子侠经常会像图21描绘的那样，乘着气流优雅地滑行。在《原子侠》第2期的这幅漫画中，原子侠需要降落到一个着火的谷仓上。他把自己缩小到不足1英寸大小，又调整了密度以便让自己“比羽毛还轻”。这样一来，他就能被“屋顶涌起的热气流”托起来。事实上，他经历的应该是一场更艰难坎坷的冒险，通过第一手经验，他验证了物理学的一个分支学科的统计学和力学基础，这个学科就是热力学。



© 1962 National Periodical Publications Inc. (DC)

图21 《原子侠》第2期中的一幕，原子侠缩小了自己的大小和重量，乘着燃烧的建筑上的热气

流飞了起来

第一定律——你永远没有胜算

我们已经讨论过牛顿的三个定律，现在我们来看热力学的三大定律。在热力学领域，对热量流动的研究早于19世纪的科学家对物质的原子特性的认识，所以热力学定律是通过不断摸索得出的经验性总结。科学家们对这些定律的认识过程相当缓慢，他们无比艰难地探索着诸如有用功和热量之间的联系、温度如何测量、相变的本质，以及任何一个机械过程内在的效率低下等问题。现在再来讨论这个话题就没有那么困难重重了，因为我们已经知道物质是由原子组成的。要解释热力学第一定律，我们首先需要了解的一个简单的问题就是，当原子侠借着燃烧的谷仓产生的热气流飞起来的时候，他会受到一个净上升力的作用（图21）。

19世纪的科学家们认为物质都包含一种独立的液体，即“热素”（以前叫“燃素”）。在发生机械性形变时，物体会释放出这种热素液体，所以摸上去是温热的。他们还认为热素液体有“自斥”属性，所以物体受热会膨胀。这种说法现在听起来也许很愚蠢，但如果你不知道物质是由原子组成的，这个热素模型似乎也能合理解释这些现象和其他观测结果。焦耳、本杰明·汤普森等人发现了热的真正奥秘，他们论证了机械功可以直接转化为热能而无须借助任何特殊的流体。“热”描述的是在没有做功（在前面的章节中我们解释了功的定义，即力乘以距离）的情况下任何形式的能量交换。一个物体能量的任何变化只能来自热量的转移或功的作用，这就是热力学第一定律。

当一个物体很“热”时，组成它的原子的动能很大；而当一个物体很“凉”时，原子的动能就很小。因此，一个物体的“温度”只是一个实用的记录装置，记录了物体中每个原子的能量。当某个物体中的原子比其他物体中的原子具有更大的动能时，我们就说这个物体的温度很高；而当物体中的每个原子具有的动能较低时，我们就说这个物体的温度很低。

我们在第4章讨论摩擦力时讲到，两个物体相互摩擦的过程可以被看作原子山脉的相互挤压。被拖拽物体的动能被转化为物体表面所有原

子的振动，每个原子的动能转移被称为“热流动”，两个物体的温度因此升高，但并没有什么热素液体。

在第12章中我们知道，能量只有两种：势能和动能。你房间里的空气分子所具有的能量基本上都是动能。由于每个空气分子的质量都很小，房间里的重力势能（空气分子的质量乘以它与地面之间的距离）也非常小，可以忽略不计。我们下面的讨论与空气的具体化学成分关系不大，所以我们将统一使用“空气分子”这个说法。在图21中，原子侠身体下面的热空气比他上面的冷空气动能更大。当然，这句话不太科学，因为其实并不存在所谓的“热空气”和“冷空气”，而只不过是空气和其他物体比起来更热或者更冷。为了论证方便，我们将只考虑原子侠的体温。

图21中原子侠身体下方的热空气会使他的体温和高度都上升。当高速行驶的汽车撞上静止或缓慢移动的车辆时，前者通常会慢下来，而后者的速度会变快。同样地，空气分子比原子侠身体里的原子动能更大，当它们发生碰撞时，就会把动能转移到穿着制服的原子侠身上，使其发生剧烈振动。由于能量在这个过程中是守恒的，碰撞之后空气的动能（即温度）会降低，而原子侠的体温则会升高。由于物质的原子特性，当两个物体发生热接触时，热量总会从温度高的物体转移到温度低的物体，而不会反方向流动。当暴露在冷空气里时，原子侠制服中的原子会以比空气分子更快的速度来回移动，所以碰撞过后，空气分子的移动速度会反超制服中的原子，让原子侠的体温降下来。

当原子侠的质量轻得能飘浮在空气中时（如图21所示），他周围的空气温度就是一样的，他受到的来自各个方向上的作用力大致相等。在这种情况下，不管他的质量有多小，重力最终会把他拉回地面。热气流能把原子侠托起来，是因为他身体下方的热空气分子的运动速度比他上方的冷空气分子的运动速度要快。因此，在原子侠的身体下方，每秒钟内空气分子会发生更多的碰撞，把他向上托，而且这个力量大于他身体上方的空气分子碰撞时所产生的把他向下推的力。此外，改变快速运动的分子的运动方向，比改变缓慢运动的分子的运动方向所需的力更大。力都是成对出现的，原子侠对空气分子施加的力在改变了这些分子的运动方向的同时，也会对原子侠施加一个反作用力。因此，原子侠会受到不平衡的力的作用，因为在他身体下方的空气分子的碰撞更多，他会被向上托，而不是向下推。当然，这种力是不平滑、不均匀的，而且是不连续、混沌的，所以他偶尔也会往下落，而不是一直向上升。但随着时间的推移，温度梯度的平均力量会将他从热源处推向较冷的区域。

因此，图21中的原子侠既具有动能，也具有势能。由于热气流带来的热量传递，他的体温会稍稍升高（也就是说他体内原子的动能会增加）。由于热空气分子对他做了功，他会被托得更高，他的重力势能也会相应增加。热力学第一定律指出，原子侠总能量的变化值等于热量和功的总和。

我们再举一个例子：蒸汽推动气缸的活塞做功，借助一系列的凸轮和传动轴使车轮转动。当科学家和工程师意识到，热量转移可以做功（也就是说，在一个给定的距离上施加力）时，工业革命就诞生了。在此之前，简单的机械，如杠杆和滑轮，需要消耗存储在人类、耕畜、风或瀑布中的能量才能做功，即把人类或动物从食物中摄取的化学能量转化为功。食物中的势能还要用于完成其他许多任务，比如维持体温、新陈代谢等。因此，用于推动杠杆做功的能量只是其中的一小部分。相反，燃烧煤或石油释放出其储存的化学能量，则能更直接地转化为功。虽然转化效率也达不到100%，但比生物能更高效。

热力学第一定律告诉我们，在最理想的情况下，除去所有的损耗和外部噪声，某种设备所做的功应该正好等于驱动机器的热量（即动能）。根据能量守恒定律，由热量转化而来的功的大小是一定的，不可能更多。

不但不可能更多，就连达到100%的转化率也十分困难。为什么我们不能制造出一台完美的机器，把热量全部转化成功，而不浪费一丝一毫呢？很快我们就会看到，在热量转移的过程中，气体原子的随机运动将严格限制我们从任何机器上获得的功，无论这台机器设计得多么精妙。

第二定律——100%的转化效率是不可能达到的

根据能量守恒定律（热力学第一定律的基础），我们建造出一台转化效率为100%的机器理论上是可能的，即它把热量全部转化为功。因为能量守恒定律告诉我们，能量不可能变多或变少，而只能从一种形式转化为另一种形式。为了弄清楚到底是什么因素限制了热量全部转化为功，我们必须引入一个新概念，它是一个与能量互补且同等重要的概念。这个概念就是“熵”，它与热量密切相关。即使在原子侠没有被热气

流托起时，熵也会让他的冒险旅途十分颠簸。

无论是在位于外太空的美国正义联盟的卫星总部发生爆炸，还是在复仇者联盟的喷气飞船上发生爆炸，都会向外喷出一股剧烈的气流。这是为什么呢？是什么迫使空气冲出美国正义联盟的卫星总部呢？我们用一个通俗的比喻来解释为什么空气会冲向低压区域：“自然厌恶真空。”虽然门开着，但所有空气都留在卫星里，这并不违反牛顿运动定律，然而这种情况根本不可能发生。卫星上发生爆炸性减压，其背后的原因就在于空气分子的随机运动。

想象一下，你坐在一个房间里，而隔壁房间里的空气全都被抽走了。只要连通这两个房间的门关得很严实，你就永远不会知道隔壁房间里有个“真空吸尘器”正在等着你。你所在房间里的空气分子在一定的温度和压力条件下正欢快地运动，这个平静而祥和的景象将伴随着你打开那道门而不复存在。

也许有人会问，为什么一旦打开门空气就会从你的房间进入真空房间呢？事实上，我们应该这么问，为什么不会呢？空气分子会向门移动，如果门是关着的，它们就会被弹开；如果门是开着的，它们就会径直进入真空房间（根据牛顿第一定律）。然而，在门被打开之前，只有一小部分空气分子会朝着门的方向移动，还有一些空气分子会从门的附近离开，因为它们在那儿会与其他运动方向不同的空气分子发生碰撞。可以想象的是，就算门是开着的，除了那些原本就朝着门移动的空气分子之外，其余的空气分子仍然会继续相互碰撞，而不会进入真空房间，这有点儿不可思议。这种现象跟门关着的时候一样，这部分空气分子通过随机碰撞，会远离门附近的区域。只要你坐在门旁边，你就不用担心会窒息，因为在任何时刻总有一部分空气在朝着你运动。空气分子会占据它们能占据的所有空间，虽然每一个分子在大部分时间内都是在房间内的某一小块区域里运动的，但总体看来，房间的任意一个区域内都会有空气分子。

空气分子没有自由意志，门关着的时候，它们会相互碰撞着朝门移动；门被打开之后，它们还是会这么做。唯一的区别（也是一个很大的区别）就在于，一旦空气分子进入真空房间，最初那里并没有空气分子与它们发生碰撞。第一个房间里的原子彼此间碰撞，永远都进不到隔壁房间，与这种单一的模式相比，它们进入真空房间的方式可谓花样繁多。“熵”这个词就是用来描述特定体系的不同排列组合方式的数量的。一副全新的扑克牌（不包括大小王）是按数字由小到大的顺序排列的，

此时它的熵就比较小；一旦这副牌被仔细地洗过了，它的熵就达到了最大值（我们只有1/52的概率能正确预测出最上面的那张牌是什么）。在一副仔细洗过的牌里，很少出现4张A挨在一起的情况，这就像你不大可能知道一个特定的空气分子在房间的精确位置，尤其是它可能出现在两个房间而不是一个房间里。

如果物理学家说系统趋于最大熵，他们指的就是我们即将观测到可能性最多的情况。当彼得·帕克把放在烘干机里的许多双袜子拿出来的时候，一次拿出的两只袜子刚好是一双的可能性不是没有，但不太大。这种情形只是众多可能性中的一种，相较而言，不配对的可能性要大得多。烘干机会使这些袜子呈随机分布状态，所以每只袜子都有可能和其他任意一只袜子被一起拿出来。关于熵的问题只适用于这种完全随机的情况，显然我们可以举出许多这样的例子。

当连通两个房间的门被打开时，第一个房间的空气分子会进入第二个真空房间，我们会说空气分子的熵增加了。房间里的空气分子均匀分布——每个分子占房间内总动能的比例都相同——的方式有很多种，远多于其他情形，比如一个空气分子拥有全部动能，而其他空气分子则完全没有动能。最常看到的事就是最有可能发生的事。旺达·马克西莫夫——变种人绯红女巫，原本是漫威漫画《X战警》中万磁王建立的变种人兄弟会中的大反派，后来改邪归正加入了复仇者联盟。她拥有混沌魔法，当她用手指着某个东西的时候，很快就会有事发生。在《西海岸复仇者》第42期中，她能够改变事情发生的概率，让匪夷所思的事情变得不足为奇。以上这些都表明她拥有改变系统熵的力量，使得百年不遇的事情（比如一个房间的所有空气分子都移动到另一个房间去）频频发生。

为了使汽车气缸内的压缩气体或锅炉产生的蒸汽做有用功，通常情况下，需要让气体从一个密闭的区域分散到更大的空间中去。我们可以想想真空房间外面的空气分子，如果有一种方法能让这些空气分子自动把门推开，而不需要你动手推，那就太好了。当我们打开连通两个房间的门时，因为门的一侧会受到许多空气分子的撞击，另一侧则完全没有力的作用，所以门会被空气分子自动推开。同样是这种不平衡的力，把美国正义联盟的成员从他们的卫星总部推了出去。这种不平衡的力产生得非常迅速，在室温下，空气分子的碰撞间隔时间不到1纳秒（十亿分之一秒）。

随着空气分子进入真空房间，它们的无序程度会加剧，也就是说，

熵增加了。这时如果把门关上，空气就无法再自动推开门了，除非我再次把第二个房间里的所有空气都抽光，恢复到原来的情形（一个房间里有空气，另一个房间是真空状态）。这可不容易，让整个系统恢复到初始状态需要消耗的总能量，比门被推开时所获得的能量还要多。不管做出多么精巧的安排，我们永远都不能把一个系统中的所有能量都转化为有用功，总有一些能量会做无用功。

当汽车发动机中的汽油和氧气混合时，会发生燃烧的化学反应，并释放出热量（反应后的产物的运动速度比反应前更快）。只有那些朝着正确的方向前进且速度更快的分子才会推动发动机的活塞做功，让车轮转动起来。从驾驶者的角度来看，如果在汽油和空气发生燃烧反应之后，所有分子都朝着活塞的方向运动，它们就都能被转化为驱动车轮的力。但是，所有气体分子都朝着一个方向运动的可能性很小，而它们朝着不同方向运动的可能性却很大，即其中只有一部分气体分子朝着活塞运动。从利用化学反应的效能这个角度看，那些没有朝着活塞运动的气体分子做的就是无用功。你不仅不能从一个过程中获得比投入更多的能量，而且熵的存在意味着你常常会得到较少的有用功。

这就是热力学第二定律的核心。没有一个过程能达到100%的转化效率，事实上，大多数发动机只能把不到1/3的能量转化为有用功。热力学第二定律就像一位严苛的女主人，我们似乎没有办法绕过她。真是这样吗？

原子侠的超能力能打破热力学第二定律的束缚吗？你房间里的空气分子具有一定的温度，它代表了空气分子的平均能量。“平均”这个词很关键，因为并非房间里的每一个空气分子都有完全相同的动能。有些分子的移动速度比平均速度快一点儿，有些则慢一点儿。一杯刚煮好的咖啡散发的蒸汽反映出这样一个事实：杯子里的每一个水分子所具有的能量不完全相同。咖啡中有些水分子的能量足够大，它们从液态变为气态（关于相变，我们会在第15章中详细解释），在咖啡杯上方形成一团蒸汽。这杯咖啡的初始温度越高，产生的蒸汽就越多，具有高能量的水分子也越多。当你朝着咖啡吹气，试图把它吹凉时，事实上你并不能降低咖啡的温度，因为你呼出的气约为98.6华氏度（37摄氏度）。没错，你呼出的气比热咖啡温度低，但不足以产生明显的降温效果。相反，你其实是在把能量最高的水分子吹走，让它们无法再回到咖啡里去。一旦它们被永久地从咖啡（蒸汽系统）中去除，咖啡的平均能量（温度）就会降低。这一物理化学过程被称为“蒸发冷却”，它也是冰箱运行的物理学

原理，劲风会让满身大汗的人感到凉爽同样出于这个原因。

让原子侠摆脱热力学第二定律束缚的想法，其实是蒸发冷却的一种变体。我们先让原子侠缩小，只比空气分子大几倍，再给他一个盒子，盒子上有一个带铰链的小盖子。在这个例子中，原子侠的身份是“麦克斯韦妖”，因为这个实验是由詹姆斯·克拉克·麦克斯韦提出来的，用于检验热力学第二定律。房间里所有的空气分子都处在同一温度条件下，这意味着无法利用它们产生的热量来驱动机器。但是，原子侠利用了一个事实，即温度是一个平均值。于是，他根据空气分子所具有的势能对它们进行分拣。他打开自己随身携带的小盒子，把那些朝着他移动且速度较快的空气分子关进去（这是一个保温盒子，这些分子一旦进去就会保持动能不变），而对于那些移动速度较慢的分子，他完全置之不理。很快，他就收集了一大堆空气分子，其动能大于房间里空气分子的初始平均值。此外，由于失去了运动速度较快的分子，余下空气分子的平均能量降低，就像你对着热气腾腾的咖啡吹气一样。接下来，原子侠就可以让他盒子里的那些温度较高的分子与房间里温度较低的分子发生热接触，用产生的净热量为发动机提供动力，做有用功了。

这样看来，原子侠似乎真的可以摆脱热力学第二定律的限制，如果我们不考虑原子侠本身消耗的能量的话。他为了收集高能量的空气分子而开关盒盖的时候，也要消耗能量。在计算这个过程的能量值时，这部分能量也必须考虑进去。如果把他的能量消耗忽略掉，就相当于忽略掉你每天开车上班的汽油成本。如果把原子侠分拣空气分子所产生的热量和功也考虑进来，我们就会发现在收集速度更快的分子时，原子侠会使周围空气分子的能量增加，平均动能变大，最后根本不会产生温度差。如果你吹去咖啡上的蒸汽，但代之以具有同样热量的其他分子，这杯咖啡就不会变凉。

不管你怎么努力（相信我，很多人都试过了），在颠扑不破的热力学第二定律面前，只有一种方案还算可行，我们接下来会讨论它。但不幸的是，这个选项并不适用于地球人。

第三定律——永远结束不了的游戏

熵限制着所有过程中有用功的大小，无论是V–8发动机、燃气轮

机，还是细胞线粒体中的化学反应，那么我们能否绕过它，找到一个没有熵的系统呢？不管实践起来有多么困难，我们都可以假设有这样一个系统，它的所有原子都得到了精确、均匀的排布，它们的位置都不存在不确定性。用像这样的没有熵的系统产生热量、驱动发动机，是否就可以摆脱热力学第二定律的束缚呢？

这之所以不可行，是因为物体的熵及其内在能量（可用于热量的传递）是相关的，我们不可能改变一个而不影响另一个。房间内空气分子的熵是衡量其随机运动情况的标尺。如果降低空气的动能，气体最终会凝结成液体。液体的熵低于其在气体状态下的熵，因为液体状态的分子的位置更加确定。但液体状态的分子的位置和速度仍存在随机性。如果液体的温度进一步降低，直到分子的平均动能不足以克服分子之间化学键的束缚，液体就会凝结成固体。分子之间的化学键具有择优倾向，所以固体的自然形态将呈现为一种特殊的晶体结构，所有的原子或分子都按某种特定的方式排布。在非常低的温度下，所有原子都处于理想的结晶点上，我们可以明确地知道任何给定原子的确切位置。

因此，任何固态晶体的熵都是零；在这类固体中，原子只在其结晶位置上振动。固体仍然有一定的温度，不管这个温度有多低，所以晶体中的原子仍然会振动。只在物质中所有原子的振动都停止时，我们才能真正地排除其位置的不确定性，熵才会为零。只有在温度为零时，熵才为零，这就是热力学第三定律。也就是说，在零度时，所有原子都没有动能，我们说这样的固体处于“绝对零度”。之所以在零度前面加上“绝对”两个字，是因为不管你使用什么类型的温度计，此时它的读数都将为零。请注意，即使是外太空也没有这么冷；即使在真空环境中也存在背景光和杂乱的宇宙射线，而且它们都有能量。事实上，作为宇宙大爆炸残留物的电波背景辐射，其平均温度比绝对零度高3华氏度。所以，即使是在外太空，也有温度和熵。要想摆脱热力学第二定律，唯一的方法就是使用零熵系统，但这只在绝对零度的条件下才能实现。如果蒸汽机里的每样东西都是零度，它怎么给发动机提供能量呢？热力学三大定律就像漫画书里的超级大反派，让我们没办法建造出完美的机器，我们只能接受这个现实。

我们对于熵的讨论在很大程度上依赖于构成物质的原子的波动性，而让人吃惊的是，在大多数科学家相信物质由原子构成之前，热力学第二定律就已形成。从19世纪中叶开始，一些科学家越来越重视原子理论的研究，而有些人仍然不相信原子的存在。这些批评家认为，“物质由

原子构成”这个观点虽然有助于简化关于流体和气体性质的计算，但将物理现实归因于小到看不见的物质是一种毫无意义的做法。许多19世纪末的知名物理学家，包括恩斯特·马赫（飞行器在空气中的运动速度与音速的比值——马赫数，就是以他的名字命名的）都持有这种观点。

尽管如此，原子假说却经受住了时间的检验，最终胜出，这与所有大胆的革命性想法的取胜策略如出一辙。量子革命的领军人物马克斯·普朗克说过：“一种新的科学理论最终获胜，靠的不是说服反对者去接受和理解它，而是反对这一理论的人终将死去，拥抱这一理论的新一代人成长起来。”

不管老一代的反对者怎么说，让年青一代科学家相信原子真实存在的关键性证据是：小物体之所以会振动，是因为更小的分子和原子从各个方向撞击该物体，使其产生了不规则运动。这种现象被称为“布朗运动”，以罗伯特·布朗的名字命名。这位植物学家用一种新的科学仪器——显微镜，观测到水滴中花粉的不规则运动的情况。布朗运动自1828年以来就为人所知，但直到1905年，阿尔伯特·爱因斯坦才做出了令人满意的理论性描述。爱因斯坦提出了做布朗运动的花粉颗粒的扩散方程，并发现了布朗运动与介质温度的关系。爱因斯坦的计算与实验观测结果高度一致，许多物理学家都因此接受了原子假说。这项工作（爱因斯坦博士论文中的一部分）可能不如他同年发表的关于狭义相对论的论文那么具有革命性。然而，由于他阐明了布朗运动的统计学本质，这足以让爱因斯坦声名鹊起，即便不考虑他在相对论和量子力学方面的贡献。

当原子侠缩小到一颗花粉大小（百分之一或十分之一毫米，比人类的一根头发的直径还小）时，他就会体验到布朗运动。这个尺寸非常关键：如果他更大，这种振动就可以忽略不计；如果他更小，他就能穿梭在空气原子间，而不会受到撞击。我们回到乘着气流而行的原子侠的例子，在某一个特定的瞬间，可能会有更多的空气分子从他的身体下方撞向他，他会被向上托，而到了下一刻，他可能又会被向下推。要想借助这种方式前行，无论去哪里都是长路漫漫，很快原子侠就不得不吃晕车药了。

我们无须缩小到像原子侠那么小，就能直接体验到布朗运动。空气对我们耳膜的随机碰撞会使其变形，而这恰好在我们的听阈之内。在一间隔音的房间里坐上大约30分钟，你的听力水平就会提高，并能察觉到空气原子运动所引发的耳膜变形。在一个非常安静的房间里，我们甚至

可以听到空气熵所产生的背景噪声，也就是说我们能听到房间的温度。超级听力，不再只属于氪星人！

[1]因为蚁人体量缩小后密度是不变的，所以他的拳头的力量会与肱二头肌的横截面积一起等比例缩小。他的拳头的力度之所以够大，是因为随着他的肌肉产生的力量变小，拳头的受力面积也变小了。

第14章 冰人如何克敌制胜？

斯坦·李是白银时代几乎所有漫威漫画的首席编剧和编辑，他喜欢把辐射作为他笔下的英雄和反派的超能力来源。彼得·帕克被受辐射的蜘蛛咬了一口，得到了数倍于蜘蛛的力量和能力；神奇四侠受到宇宙射线（太阳以及其他遥远星系的高能量质子）的辐射而拥有超能力；布鲁斯·班纳受到伽马射线辐射（这种辐射更强）变成了绿巨人；马特·默多克被从卡车上倾倒而出的放射性同位素伤了眼睛，双目失明，却意外拥有了“雷达感官”，其他方面的感知能力也大大增强，成为惩恶扬善的超胆侠。在使用了各种各样的放射性物质之后，李厌倦了总是用它们作为超能力来源的做法。在1963年，当他与杰克·科比共同塑造一群新的拥有超能力的年轻角色——X战警——时，他只是声称这些人都是变种人，一出生就拥有神奇的能力和特点。

X战警之一波比·德雷克，代号“冰人”，首次出现于《X战警》第1期。波比的超能力就是把自己的体温和他周围的温度降低到32华氏度（0摄氏度），这样一来，他的身体表面就会形成一层保护性冰壳。在《X战警》第47期中，波比已不再通过自己的超能力生成身体表面的冰层或手中的武器，而是通过降低周围的温度，压缩空气中始终存在的蒸汽做到的。

但是波比从周围环境中移除的所有热量（所有动能），必须通过其他热量来补偿，关于这一点我现在应该不用再做解释了。此外，根据热力学第二定律，增加的热量基本上都会大于减少的热量。冰箱能够减少封闭空间中的热量，但这些热量必须存放在其他地方。此外，冰箱压缩机中的电动机也需要消耗电能，有些电能没被转化为有用功，而是成了“废热”。冰箱的废热从它的背面散发出来，通常是靠着墙的那一面。（如果你想让自己的厨房温度高一点儿，就把冰箱门打开。因为根据热力学第二定律，在冰箱中的冷气努力使房间温度降低的同时，它也会向厨房中散发更多的热。）冰人在降低周围环境温度的时候，其产生的大量热量去了哪里，现在这仍然是一个不解之谜。

冰人的身体表面一开始覆盖的是蓬松的雪，后来在《X战警》第8期里他得到了更强大的力量，身体表面覆盖的就是一层晶莹剔透的冰。

雪和冰的区别在于，当水凝结成固态时，水分子的排布发生了变化。雪花是由云中的水聚合而成的。当蒸汽凝结成水分子的时候，会释放出能量，使周围的空气变暖。密度较低的暖空气会让云始终在高处飘浮着，热气球也是基于这个原理。当越来越多的水分子聚集在一起时，它们会围绕在尘埃旁，形成小水滴。当云的温度超过32华氏度时，水滴就会以雨的形式降落，并将势能转化为动能。被冻住了的雨滴就是冻雨。雪花的形成过程更加奇妙，当蒸汽在尘埃周围慢慢结冰时，就形成了雪花。

原子的化学性质决定了它们排列成固体的方式。金属原子之间的化学作用使它们排布成固态，就像杂货店里码放的橙子一样。水分子则呈V形，氧原子位于顶点，连接着两个氢原子，就像兔耳朵形状的天线。水分子的形状决定了它的排布方式是一个六边形。

化学上的分子排布方式可以解释雪花的对称形态，但其各具特色的花形又是怎么形成的？产生雪花的云相对湿度比较低，水分子必须先扩散到不断变大的雪花里去，才能融入其结构。云中的水分子并不会被推向某个既定的方向，而是朝着不同方向做无规则的布朗运动。如果你以这种“随机漫步”的方式运动，那么想去哪儿都很慢，因为你总在走一步退一步。当你用手去触摸一个温热的物体时，你感受到的暖意是与物体发生碰撞的空气分子传递出来的。这种将能量从一个位置传输到另一个位置的方法被称为“传导”，它的效率相当低。一般来说，除非物体是白热的，否则你就得把手放在很近的地方才能感受到明显的能量转移。

爱因斯坦在其1905年发表的关于布朗运动的论文中提出了一个方程，用以计算在一定时间内做布朗运动的微粒的位移情况。结果表明，在一个不断变大的雪花中，水分子移动一厘米所花的时间是它移动一毫米的100倍。因此，离雪花的核心部分较远的区域吸附水分子的速度会越来越快，那是因为它缩短了做布朗运动的水分子需要移动的距离。六边形的6个尖角由于先得到了水分子，就会先增长，随着它们的不断延伸，它们的增长速度也会不断加快。雪花形成过程的具体细节，比如，树枝状的分叉如何长出第二级分支，水分子中储存的能量在雪花融化和冻结的过程中起着什么样的作用等，都与云的湿度和温度密切相关。雪花的最终结构还取决于它是以什么样的方式将尘埃裹在其中，所以世界上没有两片完全相同的雪花，尽管它们会有惊人的相似之处。而雪花的对称性和近乎完美的秩序性则源于无规则的布朗运动。

在拥有了更强大的超能力之后，冰人能够发射出一种“冰冻射线”，把其他人或者物体冻住，甚至能在自己的脚下造出一座冰山。当他与万

磁王、肉球、惊恶先生、哨兵机器人这些恶人打斗的过程中，为了甩掉敌人，波比常会在脚下造出一个“冰滑梯”，就像图22中那样。从原则上讲，波比确实可以造出一座巨大的冰山，再造出一个斜坡，然后滑行到他的目的地。当然，这本身不会违反任何物理学原理，前提是他确实能以这种方式控制他周围的温度，空气中也有足够的湿气供他造冰山和冰滑梯。然而，令人怀疑的是，波比造的冰滑梯是否足够稳固，尤其是冰滑梯的长度增加时。在某个时刻，波比会偏离冰山的质量中心，在这种情况下往往会发生一些不好的事。



© 1971 Marvel Comics

图22 《超凡蜘蛛侠》第92期中的一幕，由于某种误解，变种人冰人与蜘蛛侠展开了一场战斗（两位英雄因为这种误解打得难解难分，后来才知道他们属于同一阵线，这种事在漫威漫画里

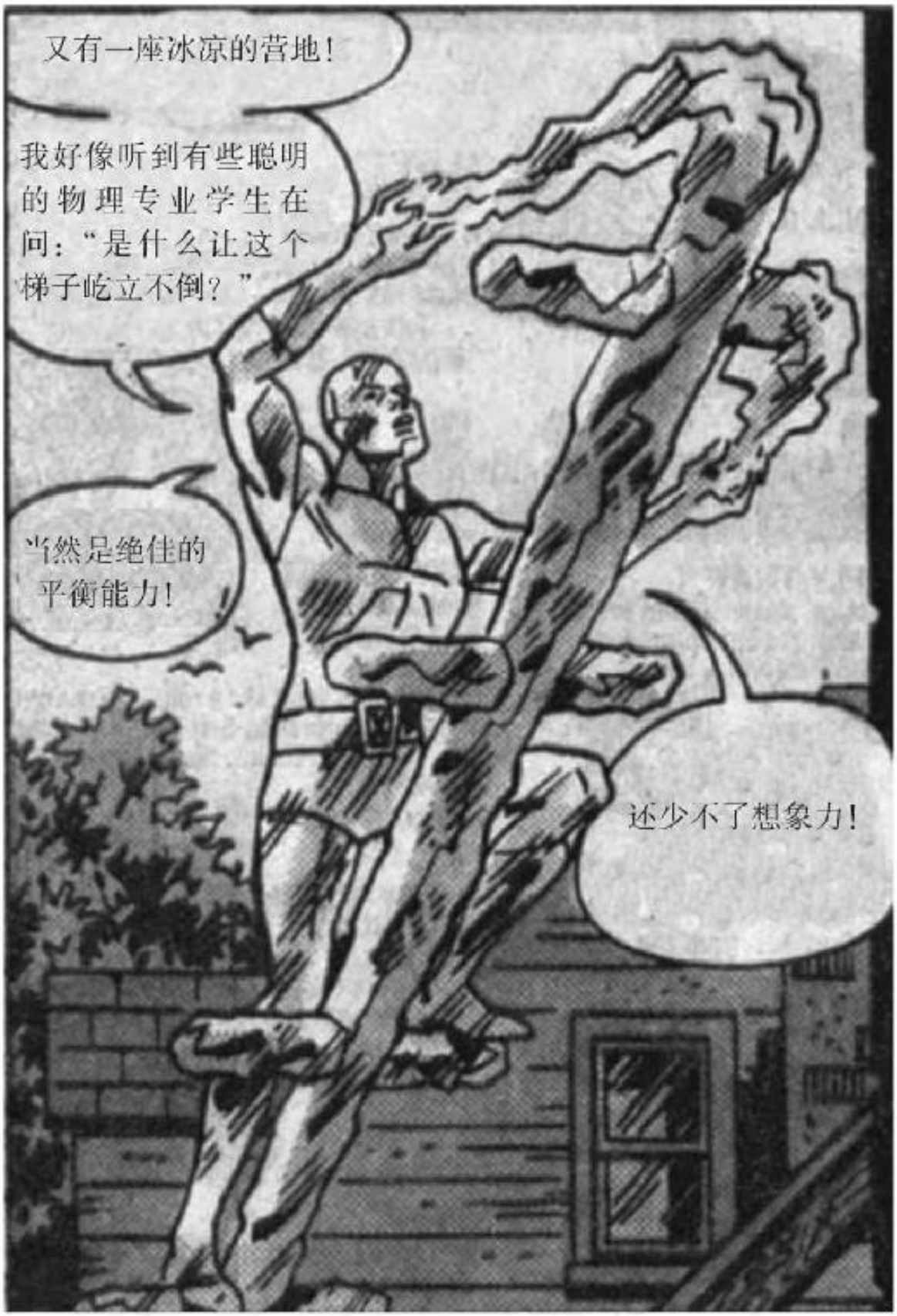
时有出现，基本上每个月就有一两次）。蜘蛛侠没见过冰人的这种冰滑梯并不奇怪，变种人英雄远远滑出了滑梯的质量中心，他们所展现出来的稳定性相当可疑

“质量中心”也被称为“重心”，无论物体的大小如何，密度是否均匀，物体仿佛把所有的质量都集中在这一点上。一把码尺的质量中心正好位于它的中心位置，所以你可以用食指像天平一样顶起码尺，使其与地面平行。如果你的手指离码尺的一端太近，尺子就会倾斜掉落。质量中心取决于物体中物质的分布状况，对于一根棒球球棒来说，它的一端略粗而重，因此其质量中心会更接近粗的一端，而不是细的那端。

要想知道为什么波比的冰滑梯一定会塌，我们可以用一本放在桌面上的书来做个小实验。书的重力垂直指向地面，与桌面的支撑力相互平衡。质量中心位于书的正中间，只要它还在桌面上，它就是稳固的。现在，我们把书放在桌子的边缘位置。一开始时，书只有一小部分伸出桌子。桌子边缘外的书会产生扭转力（力矩），试图翻转这本书，但桌子上的那部分书质量更大，所以书会保持原来的状态。如果你把书再往桌子外放一些，使它的质量中心不再位于桌子上方，而是在桌子外面，书就会发生翻转，掉在地上。

同样地，如果冰人的冰滑梯延伸得太长，他就会远离冰山的质量中心。但是冰山不太可能倒，更可能的情形是，冰滑梯会发生断裂。为了满足基本的物理学原理，波比·德雷克必须用冰柱来加固冰滑梯的底部，以免它发生断裂。有时候，冰人造的这个设施会异常稳固，就像图23里那样，这是《X战警》第47期“我，冰人”中的一幕。要是有哪个物理学专业的学生感到好奇，到底是什么使得冰人的冰滑梯屹立不倒，（一个让人无可反驳的）答案就是，它靠的全是想象力！

20世纪60年代，《X战警》系列漫画的首度亮相并没有在市场上引发强烈反响，以至于1970年这个漫画系列就暂停出版了。5年后，漫威的新管理层决定再次推出X战警系列漫画，而且《全新X战警》（由莱恩·韦恩编剧，由戴夫·科克勒姆绘制）一上市就大受欢迎。但与标题的意思不尽相同的是，一些X战警仍出自原来的漫画；当然，也有很多首次亮相的新人物，比如奥萝洛·芒罗（暴风女）、洛根·豪利特（金刚狼）、彼得·拉斯普廷（钢力士）、柯特·瓦格纳（夜行者），他们都受到漫画迷的喜爱。



© 1968 Marvel Comics

图23 在《X战警》第47期中的一幕，波比·德雷克直接向读者介绍起了他的冰冻变异能力背后的物理学原理，还给出了一个会意的眼神，说明他知道自己的神奇能力有些（好吧，其实是全部）不合理

然而，并不是每个人都表示满意。据说斯坦·李就曾抱怨暴风女操控天气的能力实在太离谱了。对于钢力士能把自己的皮肤变成“有机钢”（我完全不知道这个词的意思，也搞不懂它的物理学原理是什么）或者夜行者的瞬间传送能力，斯坦·李好像并未表示质疑，但是“操控天气的能力”对于一个创造了绿巨人浩克以及银影侠（当他穿梭在外太空的时候，冲的还是浪吗？）的人来说，仍然难以接受。事实上，斯坦·李不应该抱怨这些超级英雄的超能力不靠谱，他本人也曾创作出拥有类似超能力的漫画角色，比如能造冰山和冰滑梯的冰人。

天气其实反映的是大气对能量的吸收情况，这种能量来自阳光。事实上，人几乎无法准确预测天气。当人们想到天气时，脑海中就会出现“风”“雨”“雪”等字眼儿。所有类型的天气都取决于温度的空间差异，以及大气吸收能量的情况。

温度的空间变化与大气密度（给定体积中的空气分子数）的变化有关。当密度较大的空气团移至一个空气稀薄的区域时，空气就会从高密度区域向低密度区域流动，直到该区域的空气密度大致相等。结合我们在前一章讨论过的熵，就能很容易理解这种空气流动现象。如果有一个恒定的能量输入，使一个区域的空气密度始终低于另一个区域，气流或者风就会持续存在。风又可以移动云层，改变能量的空间布局，从而改变气流的运动轨迹，如此循环。当然，地球的自转决定了全世界空气流动的方向。

天气预测的准确程度，受人们在特定时间内对空气速度和温度的了解程度的限制。此外，温度的变化会产生气流，气流又会改变能量的吸收情况，从而产生新的气流。初始条件中的任何微小的不确定性都会被迅速放大，这就是非线性反应。在线性系统中，输入量的微小变化会引起输出量的微小变化；而对于非线性系统，比如天气，输入量的微小变化可能会导致输出量的巨大变化。大家都知道蝴蝶效应，在克利夫兰的一只蝴蝶拍打一下翅膀，几周后在智利可能会刮起一场龙卷风。气象学家能比较准确地预测短时天气，但长时预测就不太可靠了，不管测量系统本身的质量如何。

关于暴风女控制天气的超能力，一个貌似有点儿道理的物理学解释

是，她能够随心所欲地改变大气的温度。如图24所示，让暴风女飞起来的风是由她身体下方的温度梯度形成的。暴风女大概是利用她的超能力使她身体下方的空气温度变得比上方高。空气的温度是其平均动能的量度，所以温度较低的空气的运动速度要比温度较高的空气的运动速度慢。温度较低的空气密度更大，因此会朝着地面移动。移动速度较快、密度较小、温度较高的空气分子，就会占据温度较低的空气分子腾出来的那部分空间，而且它们会以很快的速度朝各个方向移动，并相互碰撞。温度较高的空气分子的平均动能较大，重力势能相对其总能量来说只是一小部分。当暖空气分子靠近冷空气的上部区域，而冷空气分子靠近地面时，位置较低的冷空气分子会与温度较高的地面发生碰撞，并从中获得能量，而暖空气分子在与其下面的冷空气分子碰撞后，将会失去一部分能量。这样一来，原本贴近地面的冷空气变成了暖空气，而上面的暖空气变成了冷空气，于是，又一轮循环开始了。


我试着给南斯一家打电话，但是没有人接。他们住在哈德孙河上游30英里的地方。如果我能制造出强有力的飓风……
……我就能很快到达。
但是要想做到这一点，我必须改变大片区域的天气。这样会造成整个城市上空的大气层紊乱。
如果不是迫不得已，我绝不会这么做。但我没有选择。
最终，我按照自己的意愿改变了自然元素。不论凡人如何应对这一种不可思议的力量。
© 1981 Marvel Comics

图24 《X战警》第145期中的一幕，变种人暴风女用自己的能力控制温度梯度，以改变风的模式，利用对流把自己高高托起

这一过程被称为“对流”，它可以将能量从热的区域传递到冷的区域。

空气中蒸汽的比例取决于大气分子的平均动能（环境温度）和压力。较冷的空气密度较大，能够容纳水分子的空间就比较小。如果暴风女真能控制温度，她应该也可以随意改变气压和湿度。如此一来，她能造成局部大雨、暴风雪，甚至雷击，就不是什么不可理解的事了，尽管她控制雷击的能力会受到外界因素（如地面上聚积的电荷）的限制。总而言之，如果斯坦·李没有因为自己创作出来的冰人角色而感到困扰，他也不应该认为暴风女的超能力很离谱。

关于基因突变与热力学的关系，我们再来思考最后一个问题。根据斯坦·李的说法，变异人，特别是那些拥有超能力的变异人，构成了一个全新的物种——超级人类，他们和绝大多数的漫画书读者（智人）截然不同。19世纪50年代，查尔斯·达尔文和阿尔弗雷德·华莱士分别提出了关于物种进化过程的理论。达尔文的进化论指出，物种的形成是一个缓慢而渐进的过程，目前地球上如此丰富的物种至少需要几亿年的进化时间才能形成。唯一的问题是，根据当时的物理学理论，地球大约只有2000万年的历史。

作为19世纪最重要的科学家之一，威廉·汤姆逊（后来因其对大西洋电缆工程的卓越贡献而被封为开尔文男爵）对导热率进行了计算，挑战了达尔文的进化论。导热率是所有物质的基本性能参数，它反映了在给定的温差下热量传递的效率。金属具有很高的导热率，当温度发生一定的变化时，它能够迅速带走热量，而木头则是热的不良导体。开尔文男爵假设地球诞生时是一个7000华氏度（3871摄氏度）的熔融岩石球体，如果知道了岩石的导热率，就可以确定地球冷却到现在的温度需要多长时间。他的结论是，地球的存在时间太短，不足以实现整个进化过程，最少要10倍于这个时间才行。因此，这被视为达尔文进化论的一个近乎致命的缺陷。开尔文在热力学方面的见解受到了高度认可，上一章中提到的绝对温度，就是以他的名字命名的，被称为“开尔文温度”。而且，他的计算方法也是完全正确的。

虽然达尔文没办法反驳开尔文的计算结果，但他仍然相信自己的进化论是正确的，因为它能够解释诸多的生物学现象。1882年，达尔文去

世。几年后，放射性元素被发现，这时人们才意识到地球内部还有另一个热源，而开尔文没有将其考虑进去，因为他（和当时世界上的其他人一样）没有意识到它的存在。地球内部的这个热源延长了地球冷却到目前的温度所需的时间。1905年，开尔文重新进行了计算，这一次他考虑了由放射性元素衰变产生的热量，最后得出的结论是地球的年龄至少为几亿年，这已经很接近达尔文的观点了。目前测定的地球年龄超过45亿年，这对于生物进化来说绰绰有余。虽然达尔文到死也不知道开尔文的计算结果是错的，但他始终坚信自己的进化论是正确的。

今天，一些进化论的批评者指出了这个理论无法解释的一些特殊生物学现象，但这并不意味着进化论就是无效的。例如，三个具有一定质量的物体相互间的引力所引发的运动非常复杂，无法进行计算，但这也不能证明重力理论就是错误的。已知与未知之间总是存在空白地带，想要改变这个局面，唯一的方法就是利用批判性思维和实验来检测和验证。如果你发现某个科学方法在某一方面不太科学，你就不应该把它应用于你的生活中，这肯定能让你省下不少医药费和电费。

第15章 钢铁侠遭遇强敌

并非每个超级英雄都拥有超出常人的力量和能力。有些超级英雄，比如蝙蝠侠和野猫，仅靠一记右勾拳或者在公共场合内衣外穿的勇气，就能与坏蛋们作战。当然，蝙蝠侠凭借的还有他超常的智力、训练有素的身体，以及一系列打击犯罪的高精尖武器装备。超级英雄的工程师素质随着无敌钢铁侠的首次登场，在《悬疑故事》第39期中达到了巅峰。在天才的电气工程师和军火商托尼·史塔克穿上他那活动自如的红金色盔甲后，他变得力大如牛，他鞋底内置的喷射器能让他在天空中自由飞行，他的手套还能发射冲击光束。

关于史塔克和钢铁侠的种种能力，我还有很多话要说，在第24章讨论固体物理学的时候我会对此进行详细阐释。接下来我要介绍的是钢铁侠的宿敌之一，他给钢铁侠造成了无尽的困扰，是第一个真正让心脏插入碎片[1]的史塔克感到恐惧的人。如果你穿着一身由钢铁制成的衣服，并且你所有的超能力都来自于这身盔甲，那么你最害怕的恐怕就是遇到拥有“熔化射线”的人，因为他能把钢铁像平底锅里的黄油一样熔化掉。不幸的是，布鲁诺·霍根（熔炼者）就拥有一支能熔化钢铁的枪，而且他一心想用这支枪消灭钢铁侠。1963年熔炼者初次登场，那时熔化射线的概念还仅停留在漫画书里。而现在，科学和工程技术的快速发展使得这样的装置不再稀奇。你家里很可能也有。（没错，就是微波炉！）

为什么固体变热后会成为液体？在回答这个问题之前，我们需要先解决一个更基本的问题：为什么原子能组成固体？这一切都归因于能量和熵。在某些情况下，当两个原子足够接近，以至于它们的电子“轨道”发生重叠时，它们的总能量就会降低，还有可能形成化学键。这种能量的降低并不总是非常显著，如果两个原子靠近时的运动速度非常快，它们各自的动能会比结合后造成的能量损失大得多，它们就无法形成化学键。要想把拖车挂在卡车后面，慢慢靠近卡车的拖车一定比以100英里/小时的速度冲向卡车的拖车，挂起来更容易。原子运动得越慢，发生重叠时能量降低并形成化学键的概率就越大。

对于两个原子来说适用的道理，对于200个或2×10^{24}个原子同样适用。随着气体的温度降低，每个原子的平均动能减小，原子发生碰撞时

形成一种新的物质——液体的可能性就越大。给液体传递热量则会产生相反的作用，液体会沸腾甚至蒸发。同样地，当液体的温度达到某一点时，原子将不再自由移动，而是被锁定在一个牢固的结构中。压力在相变中也扮演着非常重要的角色。如果用力地挤压原子，让它们比正常情况下靠得更近，从而改变其温度，就会使其发生相变。

如果原子或分子结合在一起（可能形成液体或固体）时能量降低，我们就必须施加能量才能让原子分开。想让水分子摆脱液体状态需要相当多的能量，这些能量来自于周围的环境，要么是液体的其余部分，要么是水所接触到的物体表面。不论哪种情况下，当水分子从液态变为气态时，也就是说在水蒸发的过程中，它周围的环境肯定要损失一些能量。水分子经历了从液态到气态的相变，将使热咖啡变凉，让出汗的皮肤感到凉爽。

相变发生时的精确温度和压力，取决于原子的电子云发生重叠时的情况。要确定液化或沸腾这类相变发生时的温度，只将打破每一个维系固态或液态的化学键所需要的能量简单相加是不够的，我们还应该考虑原子的熵。对于一个给定的内能，系统倾向于增加原子的熵，因为在其他条件相同的情况下，无序排列比有序排列的可选方式要多得多。在降低能量和增加熵之间做权衡，会产生一个非常有趣的群体行为，即固体中的所有原子都会在相同的温度下发生熔化反应。顺便说一下，烧水时水壶里的气泡是由底部加热的细微不均匀引起的。水壶底部的个别点会比邻近区域的温度更高，水由液体变成蒸汽就首先发生在这些位置。蒸汽形成气泡，然后浮到水面上。

想让固体熔化，就必须对其施加能量。我们可以使用比较慢且常规的方法，比如把固体放进烤箱；也可以用更快的方法，比如熔化射线。在传统的烤箱中，无论是气态火焰还是电线圈等加热元件，都会使烤箱内的平均温度升高。把一个固体，比如一块质量上乘的肉，放在烤箱里。空气分子就会与烤箱壁发生碰撞，而获得更多的动能，这些快速移动的空气分子撞击肉的表面，将能量转移给肉，最后让它达到与烤箱相同的温度。如果我们用的是导热烤箱，就必须等待做布朗运动的空气分子从热的烤箱壁移动至生冷的肉；如果我们用的是对流烤箱，风扇就会产生从热到冷的循环流动。在这两种情况下，肉的表面都会先热起来，然后再过一段时间，肉的中心才能达到较高的温度。随着肉内部的温度逐渐升高，原子振动会越来越剧烈，以至于偏离其平衡位置。在一定的温度条件下，起连接作用的纤维和脂肪开始振动，这表明这些纤维正在

发生相变或熔化[2]。这些组织把生肉中的肌肉细胞连接在一起，所以在发生熔化后，肉会变得更嫩更易嚼。闪电侠利用了同样的原理，才得以从冰冻队长制造的巨大冰块中脱身。[3]

如果你赶时间，又没办法实现高速振动，那么可以尝试另一种做法：同时抓住固体中的每一个原子，来回地迅速摇动，利用内部摩擦力把肉烤熟。这就是微波炉（熔化射线）的作用原理。

固体中的每一个原子都是电中性的，原子核中有许多带正电荷的质子，周围有带相同数量负电荷的电子。但是，电子并非均匀地排布在原子核周围。由于概率云的不确定性和连接原子的化学键的性质，原子一端的电子可能比另一端更多。在这种情况下，原子的一端会带负电，另一端则带正电，就像条形磁体有两个不同的磁极一样。虽然这种电荷数量的不平衡不是很明显，但它产生了一个外部电场。即使分子的电荷分布完全对称，也可以通过外部电场使其极化。

如果在固体上施加一个足够大的电场，不平衡的原子就会与这个磁场方向一致，就像指南针的指针会指向外部磁场的方向一样。如果我现在突然反转了电场的方向，那么所有原子都会旋转180度，指向与原来相反的方向。如果把电场变回原来的方向，原子也会随之再次旋转。如果我把电场的方向每秒钟来回反转几十亿次，原子就会发生剧烈旋转。这种方法能够快速提高物体中每一个原子的平均动能，从而提高其温度。当外部电场作用于物体内部时，会有更多原子在同一时间内来回振动，而不仅仅是物体表面的原子。这个过程比通过空气分子的运动来传递能量的效率高得多。交变电场的振动频率集中在电磁波谱的微波部分，因此这种烹饪设备被称为微波炉。

第二次世界大战期间，因为雷达的应用而发明出微波发射器（磁控管）。这个装置的烹饪功能是在1945年被偶然发现的，珀西·L.斯潘塞在研究磁控管产生出的微波能量范围时，注意到他裤子口袋里的糖块化了。后来进行的爆米花实验，又进一步证明了该设备的非军事用途。

物体中的原子移动得越容易，随着振荡电场的旋转，物体的温度上升得就越快。正因为如此，在微波炉中加热液体比固体更快。你可以在一大块冰上挖一个深洞，并往里面灌满水，然后把这个装满水的“冰杯子”放进微波炉。结果是，水会沸腾，而“冰杯子”仍然是冰冷坚固的。但别让“冰杯子”在微波炉里待太久，因为交变电场也会让它融化，并且比在传统的烤箱中融化得更快。

根据《悬疑故事》和《钢铁侠》漫画里的描述，我们能否推断出熔炼者使用的武器与微波炉的工作原理是相同的呢？答案是：既能也不能。布鲁诺·霍根的首次出场是在《悬疑故事》第47期，他是托尼·史塔克的竞争对手。因为被美国军方发现他使用“劣质材料制造坦克”，霍根丢掉了政府订单，并因此心怀愤恨。后来史塔克的公司与军方签订了合同，但其中存在明显的利益冲突，因为揭发霍根使用劣质部件的报告就是由托尼·史塔克撰写的。后来，当霍根检查一台实验室测试设备（使用劣质零件组装而成）的时候，这台设备突然失去控制，发射出一种能够熔化钢铁的射线[4]。霍根意识到他创造出的这种“检查光线”实际上是一种熔化射线，于是他改装了这台设备，把它缩小成一个便携式装置。他穿上可怕的蓝灰相间的制服（很可惜，这印证了大家对于工程师审美品位的刻板印象），立志摧毁敌人，成为最强者（很可惜，这印证了大家对于现代企业家的道德水平的刻板印象）。他对阵史塔克工业公司和钢铁侠时所取得的胜利只是昙花一现，在故事的最后，霍根发现他的射线对史塔克不再有效，这让他大吃一惊。因为熔炼者并不知道，托尼·史塔克已经发现了熔化射线枪的弱点：它只对铁起作用！史塔克制造出一套“抛光铝”材质的盔甲，它看起来和他平时穿的那套盔甲几乎一样。钢铁侠最终把熔炼者打到毫无还手之力，熔炼者不得不靠着偶然熔化的下水管道上的一段铁管逃之夭夭。

通过这个故事我们就能知道，霍根的熔化射线并不是一种便携式微波装置。微波炉的交变电场能抓住每一个原子，而霍根的武器只对铁（铁原子中包含26个电子）有效，对铝（铝原子中包含13个电子）无效。后来（在《悬疑故事》第90期里），霍根的熔化射线枪的功能细分化了，可以设定成针对石头、金属、木头以及身体（没错！）发射不同的熔化射线。史塔克曾在霍根的枪口下逃过一劫，他当时穿着普通的衣服，被这把枪击中，但却没有受伤。布鲁诺·霍根不知道托尼·史塔克就是钢铁侠，也不知道在史塔克的衬衫下面还有金属胸甲（这是为了避免弹片损伤心脏，见第24章），当时这把枪的设置是针对“身体”，而不是“金属”。

当然，当两个原子之间形成化学键时，它们各自的能量降低情况都是独一无二的。因此，每一个化学键都有其独特的能量特征。从原则上说，我们可以设计出一种微波型武器，专门针对石头中的化学键，而不是金属中的化学键。同样，当振动频率与水相同时，这种武器就能有效地攻击人，而不是无机物（金属）。这种基于微波的“热射线”——这种射线射向人体的话，会造成类似二度烧伤的伤害——最近已经被研发出

来了。发明这种武器的动机是疏散人群，因为它会让人群为了躲避灼伤而分散开来。然而，不管振荡的电场被调节到什么频率，不同金属中铁原子间的化学键和铝原子间的化学键还是过于相似，难以区分，这使得设计出只熔化铁而不熔化铝的武器变得非常困难。

当然，关于熔炼者和钢铁侠的金属盔甲的讨论，引出了一个长期困扰现代人的问题：既然我们能把人送上月球，为什么就不能把金属放进微波炉呢？答案是：金属中的自由电子可能会导致一些很严重的问题。金属具有很高的导热率，在微波炉里与纸张接触的话会引起火灾。外部电场会让电子在整块金属中自由移动，而对于固定的原子来说，外部电场只会让其前后移动。

微波炉里的金属与外界隔绝，其中的电子无处可去，因此它们会堆积在金属的一端。如果金属有尖角或棱，这些堆积的电子会让金属内部产生一个巨大的电场。如果该电场强度超过120万伏特/米，空气就不再能把高电压金属与微波炉壁分隔开，而是会产生电弧（瞬间火花）。因为金属的曲率有所不同，其产生的电场可能小于临界放电水平，而外面包裹着铝箔的黄油块的尖角却足以制造出一个电弧，给微波炉的内部留下永久的痕迹。

[1]在第24章，我会深入讲解钢铁侠的故事，那时你就知道心脏插入碎片是什么意思了。

[2]虽然烹饪过程中由热量驱动的化学变化和结构变化相当复杂，但对我们来说，其中最关键的步骤可被视为熔化相变。

[3]通过高速振动，闪电侠向周围的冰晶传递了能量。即便他只移动了半英寸，振动的速度也会达到每秒100000次，总动能（1/2）mv^2为3500万千克·$米^2$/$秒^2$。每克零摄氏度的冰从固态变为液态，需要消耗336千克·$米^2$/$秒^2$的能量。凭借他的动能，闪电侠能够融化100千克的冰。这让他得以脱身，并把冰冻队长送进中心城监狱。

[4]我必须强调的是，要想简单地把一堆电路和电源装在一个盒子里，然后“意外地发现”它能发射出致命的光线，这基本不太可能（相信我，我已经试过了）。

第16章 静电的意外魔力

到目前为止，我们主要讨论的是力如何改变物体的运动状态，而与人类有关的力基本上就只有重力。不管是让跳起来的超人速度减慢的力，还是让格温·斯黛西加速坠落的力，都可以用牛顿第二定律$F=ma$中的F表示，即重力。但是，在这个宇宙中以及在漫画里，还有其他类型的力。

物理学家发现，仅用4种基本的力就可以解释自然界中各种复杂的物理现象。这4种力分别是重力、电磁力、强力和弱力，后两种力的名字相当没有创意。[1]后两种力只存在于原子核内部。强力将质子和中子紧密地结合在原子核里，没有它，带正电的质子就会互相排斥；要是这样的话，除了氢以外，就不会有其他稳定的元素存在了。弱力则产生了一定程度的放射性（比如放射性核衰变，物理学家由此发现了中微子），如果没有放射性，基本上就不会有超级英雄或超级反派。我们在日常生活中遇到的每一种力，除了重力之外，从本质上说基本上都是静电力。比如，我们的肌肉产生的力，椅子施加在你裤子上以防你跌坐到地板上的力，汽车发动机气缸内的蒸汽所产生的驱动力等。现在是时候讨论电和磁这对力了，让我们看看，这对奇妙的力如何形成“电磁力”。

很少有超级英雄的力量来自电磁力，但白银时代的两位最早的漫画人物——霹雳少年和宇宙男孩，他们的力量就来自电和磁。他们和土星女孩一起，首次登场于《冒险漫画》第247期（1958年4月）。他们从未来穿越而来，就是为了把超级小子招募进超级英雄战队。霹雳少年能徒手制造并发射闪电，宇宙男孩能控制磁性物体，土星女孩则拥有心灵感应能力（稍后我们将讨论这种能力与电磁波传播的密切关联）。因此，超级英雄战队的这三位创始人可以说是电磁理论在实践中的代言人。

这个由不同星球的少年组成的战队来自2958年，每个人都拥有一种独特的超能力。一群十几岁来自未来的超级英雄在当时是非常受欢迎的漫画题材，于是超级英雄战队成为《冒险漫画》中的主角，并最终取代了超级小子的漫画故事。战队的成员随着时间推移不断增多，目前拥有超过30名英雄。漫画编剧在设计每一位英雄的超能力时，都会努力把自然界中的几种基本力和物理定律的基本对称性考虑在内。战队成员星少

侠能把物体变重，轻光少女能把物体变轻，元素少年能把一种元素变成另一种元素（这意味着他能控制核能），巨化男孩能长到惊人的高度，微型紫罗兰能把自己缩小，钢铁少年能把自己变成某种有机铁。在《冒险漫画》第353期里，钢铁少年为了消灭噬日者而牺牲，我阅读这个故事的时候还是个孩子，当时我的心灵受到了极大的震撼。

尽管只有少数超级英雄以电力或磁力作为其超能力的来源，却有不少反派用它们来攫取财富或者统治世界（有时候还会兼而有之）。在接下来的几章中，我们将重点讨论两个坏人——电王和万磁王。（我要把这个问题留给你们：哪个坏蛋和电有关，哪个和磁力有关？）

静电力是自然界最强大的力量！

漫画读者初次认识麦克斯·狄龙是在《超凡蜘蛛侠》第9期，他是一位技术熟练却自视甚高的电工。麦克斯的一个同事被困在高压线上，但麦克斯对他的生死漠不关心，直到工头答应奖励他100美元（1963年的100美元相当于现在的700美元），他才同意拯救这位同事。狄龙在救下了那位不省人事的同事后，还得到了一个意料之外的“奖励”——在他手握高压电线的时候，他被一道闪电击中。跟巴里·艾伦（闪电侠）的情况一样，在这场可怕的事故中，狄龙既没有丧命，也没有被烧伤或者神经受损，反而获得了储存电能的能力，他从此可以随意发射闪电。

这场事故改变了狄龙的能力，但没有改变他的反社会人格。他在拥有了强大的超能力后，设计了一套鲜艳的绿黄相间的制服，还有一个绘制着明黄色闪电图案的面具，并以电王为名开启了自己的犯罪生涯，如图25所示。就我个人而言，如果我掌握了这种强大的自然力，我一定不会在公众场合穿这种令人反感的服装。如果麦克斯·狄龙不是一个招人讨厌的人，他的朋友或许会委婉地向他提出一些着装方面的建议。但正是这种糟糕的穿衣品位，让反派走上了犯罪之路。



© 1963 Marvel Comics

图25 《超凡蜘蛛侠》第9期里的一个场景，超级大反派电王既说明了电磁学中一个相当高深的概念，又展现出了非常不考究的时尚品位

狄龙发现他的身体可以储存电能，并发射出致命的冲击电流。电王会经常出现在“废弃”的发电站，他站在两个变压塔之间，让电流流入他的身体。充电完成后，狄龙就能用手发射冲击电流，但有时他也会用身体的其他部位放电。一旦他的电能耗尽，他就会丧失超能力，必须赶紧充电。从本质上讲，意外事故把麦克斯·狄龙变成了一支可充电的便携式电击枪。

用体内存储的“电能”朝着警察或者身着制服的超级英雄发射冲击电流，是什么样的感觉呢？如果你曾在干燥的冬天用脚底板蹭过绒面地毯，接着用手触碰金属门把手，你就应该知道，物质是由带电的元素组成的。与物体的质量（质量始终大于零）不同，电荷分为两种，分别为“正电荷”和“负电荷”。“异性相吸”这个说法对感情而言不见得都对，但对于带正电和带负电的物体之间的作用力来说，却是一个颠扑不破的真理。吸引力会把两个带相反电荷的物体拉到一起。同样地，两个带有同种电荷的物体，无论是正电还是负电，都会互相排斥。如果一个包装箱由于随机摩擦而获得了多余电荷，这些电荷会转移到盒子里的泡沫颗粒上，每一个轻飘飘的泡沫颗粒就都带上了同种电荷，它们会相互排斥，一旦盒子被打开，这些泡沫颗粒就会飞散出来。

原子中带负电的电子会被静电吸引力拉到原子核中带正电的质子附近。质子越多，正电荷越大，把电子拉进原子核的力量就越大。然而，原子中的电子越多，它们之间的排斥力也越大。这两种力量——原子核的吸引力和电子的排斥力——会大致相互抵消，正因为如此，铀原子中有92个带正电的质子和92个带负电的电子，其大小与碳原子差不多，而后者只有6个电子和6个质子。

两个带相反电荷的物体之间的吸引力或两个带同种电荷的物体之间的排斥力，与第2章介绍的牛顿万有引力定律的数学表达式非常相似。也就是说，两个带电物体（电荷1和电荷2）之间的力可以通过以下公式来表达：

$$力 = k（电荷1 \times 电荷2）/ 距离^2$$

这个表达式是在18世纪由法国科学家查理斯·库仑提出来的，与牛顿万有引力公式十分相似，只不过把质量换成了电荷，把常量G换成了

常量*k*。我们回顾一下牛顿万有引力定律，两个具有一定质量的物体（质量1和质量2）之间的力可以用以下公式来表达：

$$力=G（质量1\times质量2）/距离^2$$

如果我们把质量换成电荷，把常量*G*换成常量*k*，从数学角度讲，这两个表达式就是等价的。因为电荷与质量的单位不同，所以常量*k*的单位与常量*G*的单位也不同，这样才能得出单位相同的力。

*k*和*G*的单位不同，更重要的是，*k*的数值要远远大于*G*。我们想象一下，氢原子核中有一个质子，在原子核外有一个电子在绕核旋转。万有引力会把电子拉向质子，与此同时还有另一个力在起作用，即带正电的质子与带负电的电子之间的静电吸引力。虽然质子的正电荷数与电子的负电荷数刚好相等，但质子的质量几乎是电子的2000倍。当我们用库仑表达式中的*k*乘以电子和质子的电荷数量的乘积时，得到的力是万有引力的10^{40}倍。可见，在原子尺度上，万有引力可以忽略不计。但如果没有静电力，就不会有分子，不会有化学物质，也不会有生命。

既然引力比静电力弱这么多，为什么我们还说引力对行星和人类来说十分重要呢？因为它无处不在。两个物体，无论它们的大小如何，总会因为引力而彼此趋近。虽然有反物质，但它的质量也大于零，因此对其他物质也有正常的引力。任何人都能通过实验的方式证实物体之间总是存在引力。最近一些令人费解的天文学实验称，存在与神秘物质暗能量相关的“反重力”。然而，这种说法是有争议的，在我写作本书时，科学家们对暗能量还一无所知。

电则不一样。电荷有两种不同的类型，即正电荷和负电荷，这为屏蔽电场创造了可能性。绕原子核旋转的电子会受到引力的作用。在这个电子附近的另一个电子会被原子核向内拉，并与第一个电子相互排斥。当第二个电子非常接近原子核时，引力和斥力相互抵消，第二个电子上的净力作用为零。如果我们可以轻易屏蔽万有引力，那么类似神奇四侠的死对头无翼巫师所使用的反重力光盘等飘浮装置将变得司空见惯。不管是带正电荷、负电荷，还是不带电（电中性），所有物质的质量都不为零，都会受到来自其他物体的引力作用。所以，最终获胜的还是万有引力，它能把所有东西聚拢在一起，即便是那些不带电的物体。

但毫无疑问，静电力更强大，想想库仑的静电力表达式。如果你身体里的负电荷比正电荷多10%，那么静电排斥力就足以让你举起一栋同

样是负电荷比正电荷多10%的办公大楼。而且，虽然办公楼的质量比你的质量大得多，但引力却不会把你拴在这栋楼里，反倒是工作和老板会偶尔拴住你。

闪电侠在奔跑的时候，由于靴子和地面之间的摩擦力，他会获得巨大的静电力。要想奔跑，这种摩擦力是必要的，它会让闪电侠在狂奔的时候累积多余的电荷，类似于我们在冬天时用脚底板摩擦地毯。我们的脚底板与地毯发生的摩擦，在原子尺度上是一个剧烈的过程，会造成电在全身的转移。这些多余的电荷互相排斥，不愿在你身上停留。当你抓住门把手的时候，一条电荷返回地面（对它来说，电荷多点儿少点儿完全不会造成困扰）的通路就形成了。如果电荷足够大，它们会跳到空中，闪电就是通过这样的方法把云中过多的电荷释放到地面上的。当你开车的时候，由于轮胎和道路之间发生摩擦，你的车经常带有多余的电荷，停车后打开车门时手就会被电到。被电到的手会感觉很疼，原因有两个：第一，手指的表面积很小，所以单位面积内的电流很大；第二，指尖的末梢神经非常多，对电流十分敏感。所以，最好用手肘去触碰车身或者门把手，你也可以采用我的策略——整个人都趴在车上。你做出这种奇怪的动作，是为了避免你的手被电到所付出的小小代价。（但你会发现，慢慢地，没有人再把车停在你的车旁边了！）

这种由摩擦引起的静电力（技术上叫作“接触起电”）在《闪电侠》第208期中有所体现。闪电侠从一群坏人手里救下了楔石城的居民，人们对他表示感谢。有一个人请闪电侠签名，还拍了拍他的肩膀，结果那个人吃惊地喊道：“喂，看哪！他的衣服上全都是静电！”这些多余的电荷通常应该在闪电侠停止奔跑后，碰到接地的金属物品时被释放出来。事实上，这种接触起电的现象直到2004年才被注意到（之前的50年一直没有人注意），这表明在他打击犯罪的生涯中，除了忽略空气阻力和加速度之外，也对静电力免疫。

我们接着讨论电王，他先在体内储存大量的净电荷，正电荷或者负电荷，然后他才可以放电，就像你的指尖触摸黄铜门把手时产生火花一样。这与电王需要充电才能使用他的超能力是一致的，如果他使用了过多的冲击电流，那么一记漂亮的右勾拳就足以把他打倒。

60多年前，一位瑞士工程师由于在远足的途中遭遇了麻烦而引发了一项技术革新。乔治·德·迈斯德欧在研究为什么芒刺会紧紧钩住他的羊毛远足裤的基础上，发明了一种含有数百万个钩环的紧固带，即魔术贴。几年前，罗伯特·福尔、凯勒·奥特姆及其同事发现，壁虎之所以能

够爬上光滑的墙壁和天花板，是因为它的脚趾上有数百万根微小的毛发，也就是“刚毛”。但是墙壁或天花板上并没有小钩子，是什么让壁虎不会从墙壁或天花板上掉下来呢？静电力！

壁虎脚上的刚毛是电中性的，但它并不需要用脚摩擦绒面地毯就能趴在墙上，因为它会利用刚毛中的电荷波动。壁虎脚趾刚毛的电子一直在四处移动。有时，刚毛的某一侧会有更多的电子，这一侧就会带少量负电荷；有时，某一侧的电子比较少，这一侧就会带少量正电荷。如果刚毛靠近墙的那一侧带少量负电荷，哪怕只有片刻时间，它也会使墙壁带少量正电荷（刚毛所带的负电荷与墙壁表面的电子互相排斥，只留下带正电荷的离子），这样一来，刚毛和墙壁之间就会产生静电吸引力。你大概会认为这种力量（被称为范德瓦耳斯力）非常弱，确实是这样，所以壁虎的每只脚趾上都有数百万根刚毛，才能有足够的静电吸引力来支撑它的体重。

或者也可能是彼得·帕克的体重。漫威的漫画师认为蜘蛛侠在墙面爬行的能力在本质上也是一种静电力，2002年的《蜘蛛侠》电影中就提到，蜘蛛侠刚获得超能力的时候，手指上长出许多有倒钩的纤维。所以，漫画和电影说的都是对的。英国曼彻斯特大学的一份报告讲述了“壁虎胶带”的研发过程，这种胶带由数百万个微小的纤维（每根纤维的长度是人类一根头发直径的1/50）组成，足以支撑蜘蛛侠的体重。利用电荷波动产生的静电力制成的胶带，不同于需要一定固化时间的黏合剂，而且这种胶带原则上可以立即使用和重复利用。胶带上的纤维必须非常细小，才能让表面积与体积之比最大化，因为只有纤维表面过剩电荷的波动才能产生静电吸引力。要想产生足以支撑一个成年人体重的力，超细纤维就必须非常密集。这些工程技术上的难题能否成功解决还有待观察。但是，如果“壁虎胶带”变得像魔术贴一样常见，我就再也不用坐电梯上下楼了！

[1]这4种力结合在一起后会变得非常强大，就像4个反派——万力王、电能生命体（Zzzax）、量子队长和半条命合体一样，西海岸复仇者在“统一场理论”中见识了他们联手作战的威力。

第17章 超人教给蜘蛛侠的电学知识

现在，让我们仔细分析一下电王发出的冲击电流。足够大的正电荷可以把电子从很远的地方拉过来，甚至是通过几英里长的电线。电子在电线中受到的拉力被称为“电压”。电子带负电荷，所以正电压把它们拉向一个方向，负电压则会把电子向相反的方向拉。“电流”指的是每秒钟在电线的一个给定点上通过的电子数。

假设用一根软管把水龙头里的水输送到室外。在这种情况下，推动水在软管里流动的水压就相当于电压，在给定的时间段内流出的水量则相当于电流。水遇到的阻力既来自软管的弯折，也来自软管上的小孔，有些水在到达终点前会从这些小孔漏出去。软管的缺陷越多，让软管末端维持相同水流（电流）所需的水压就越大。然而，水龙头即便没有连接软管，也能产生水流；同样，在没有电线的情况下，只要电压足够大，同样能够产生电流。你的指尖触碰门把手时产生的火花或者从空中击向地面的闪电，都属于这种情况。距离越远，使电荷运动所需要的力就越大，根据库仑的静电力公式，力与电荷的距离的平方成反比。一根存在缺陷和小孔的长软管，与一根存在缺陷和小孔的短水管相比，前者对水流的阻力更大。正因为如此，直到你的手指触碰到门把手的时候，才会感受到静电力的冲击：空气对于电是很好的绝缘体，它可以承受超过120万伏特/米的电场强度。只有当作用于电荷的拉力变得更大的时候，才会战胜空气的阻力。当你接触到静电时，指尖会有刺痛感，所以你肯定不想受到电王的超强电流的攻击。

在《超凡蜘蛛侠》第9期里，蜘蛛侠初次遭遇电王，在这个故事中，电流的基本物理学原理被无视了。在他们俩的气候大战中，蜘蛛侠将一把金属椅子举过头顶后砸向电王，从而成功地躲过了电王的冲击电流。“凡是有点儿科学知识的人都知道，所有的金属都能当作避雷针，”蜘蛛侠说，“就像这把金属椅子一样！”事实上，蜘蛛侠对避雷针功能的错误认识表明，他的科学知识并不是那么渊博。冲击电流没有击中蜘蛛侠，而是击中了那把椅子，但这把椅子没有电！如果电流碰到椅子之后就无处可去了，电王的冲击电流波又为什么会直奔这把椅子（金属或是其他材质）呢？

当你打开厨房水龙头时，水会从水龙头流动至下水道。这是因为水的重力在发生作用，而不是因为水受排水管的吸引向下流，即使你在水龙头上方的天花板上安装一个排水管，水也不可能向上流。回到电荷的问题上，水流的运动受到重力的作用，而电流受到电压的作用。

电荷如果无处可去，就不会流动。事实上，水也是这样。想知道如何做到打翻一满杯水，却洒不出来一滴吗？答案是：在水里打翻这杯水！如果杯里的水无处可去，它就会留在容器里。

同样地，不管物体带有多少净电荷，如果它周围的其他物体也有数量相同的电荷，它就不会放电。从技术的角度讲，拉动或推动电荷的电压衡量的是“电位差”，即电荷从一点移动到另一点的势能差。这就是电王如此危险的原因（除了他糟糕的着装品位）：他能够随意控制自身与周围环境的电位差，以及决定何时何地放电。

给导体施加电压，可以提高导体内电子的势能，就像把一块砖举过头顶会增加它的势能一样。多余的势能会一直储存在砖里，直到它被释放出来，这时势能会转化为动能，使砖块在坠落的过程中不断加速。但是，这种能量转换只在砖下落的时候才会发生。同样地，电压使电线中的电子不断加速，动能以电流的形式持续增加，但只有合上电路开关，电子才有处可去。正如被举起的砖块在被放下之前会始终保持势能不变一样，如果电路不接通，电子就不能在电压的作用下加速。同样地，不管我把水龙头开到多大，如果水管的另一端是完全封闭的，就不会有水流入水管。我必须把水管的另一端打开，水才能在水压的作用下流经水管。用专业术语来表达就是，为了让电线中产生电流，它必须接地[1]。地球，或者说“地”显然是一个很大的物体，它带有巨大数量的电荷。因此，它可以吸收多余的电荷，也可以不费吹灰之力地把电荷传输给电线。为了产生电流，必须有一处电压较低的地方可供其前往，这个道理很明显。但蜘蛛侠似乎并不清楚这一点，而超人从他的第一次冒险开始，就表现出对电流性质的深刻理解。

在第1章里，我们讲述了超人最初的冒险，这在《超人》第1期中也有描述，那时候大多数人还不知道他的存在。故事中，有一个华盛顿的说客贿赂议员，企图让美国参加欧洲战争（1939年），超人想搞清楚是谁在背后为这个说客提供资金支持。这位华盛顿最聪明的说客亚力克斯·格里尔背后的秘密雇主原来是埃米尔·诺维尔，一位军火大亨（在他看来，战争是一笔好买卖）。出于某些原因，格里尔拒绝向穿着红蓝两色的连身内衣、披着飘逸红披风的怪人透露自己雇主的名字。于是，超人

抱着格里尔从高楼顶上跳下去，假装要和他同归于尽。在这一幕之前，为了让格里尔说出真相，超人像扛着一袋土豆一样扛着格里尔在高压线之间穿行，如图26所示。格里尔抗议说这会导致他们触电身亡，但超人却发现可以趁此机会给这位说客上一节物理课。（这节课到底算不算超人为了获得信息，对说客进行心理折磨的一种手段，就留给读者自己评判吧。）“不，不会的。”超人解释道，“小鸟常站在电线上，也没有触电，除非它们碰到接地的电线杆。”



© 1938 National Periodical Publications Inc. (DC)

图26 《超人》第1期中的一幕，真理、正义与美国方式的守护者要求华盛顿的说客说出实情，并向他“亲自”演示了电子接地的原理

超人说得完全没错。只有当你同时接触高压电线和电线杆（或者电压更低的另一根电线）时，才会形成一条电路，使电线中的电流向电压较低处流动，你也就触电了。在这种情况下，电子的流动（电流）贯穿导体——你的身体——将两个点连接起来。

《冒险漫画》第301期“弹力男孩的神秘出身”表明，接地的物理学原理在1000年之后终于被弄清楚了。查克·坦恩偶然喝下了一种超塑血清，获得了超级弹跳力，成为超级英雄战队少年联盟的成员。由于他的超能力听起来愚蠢可笑，战队一开始拒绝了他的加入请求，这让查克感到万分失望。然而，他很好地利用了第二次表现自己的机会，给战队留下了深刻印象。当时有个反派用电击手套击败了科学警察和战队中的土星女孩，而查克成功地制服了敌人。查克知道，当他跳跃到空中与坏人相撞时他不会触电，因为不接地。这个故事正确地解释了接地的物理学原理，我们也许不应该感到奇怪，毕竟它是由超人的联合创作者杰里·西格尔编写的。

看来超人可以教给蜘蛛侠一些关于电流和接地的知识。《超凡蜘蛛侠》第9期“被困的捣蛋鬼”并不是唯一的错误，因为可悲的是，在《超凡蜘蛛侠年刊》第1期（1964年2月）中，蜘蛛侠又一次遭遇了电王。这一次，作为保护措施之一，蜘蛛侠特意在他的脚踝上绑了一根金属丝，以确保自己始终接地！亲爱的读者们切记，如果下次你们遇到了能发射冲击电流的大坏蛋，千万不要让自己接地！

避雷针的工作原理不在于它是由金属制成的，而在于闪电会击中建筑物的最高点（避雷针），然后使电流从避雷针处沿着电线安全地到达地面，从而避免建筑物的屋顶发生火灾。避雷针还可以带走大气中多余的电荷，减小电压差和建筑物被闪电击中的可能性。你的指尖和金属门把手之间的静电反应只在你的手指非常接近门的时候才会发生，因为距离越短，电弧要克服的阻力越小。同样地，闪电也会尽可能把距离和阻力降到最小。所以，在雷雨中你不应该站在树下，因为击中树木的闪电很有可能会通过你继续传播。如果你一个人在雷雨中站在一片空旷的地上，你应该在地面上平躺以降低被雷电击中的概率。如果建筑物的避雷针没有接地，原本通过避雷针的电流就会沿着阻力更大的路径通往地面，经过屋顶和建筑物，造成巨大的人身和财产损失。

因为蜘蛛侠将自己与地面连接在一起，造成这样的伤害就是不可避免的结局，电王的所有电能都会流经他的身体去往势能更低的地方。蜘蛛侠的“蜘蛛力量”虽然能帮他承受住一部分电击，但他把自己与地面连接在一起却造成了太多不必要的伤害。

不知道蜘蛛侠的联合创作者——编剧斯坦·李和漫画师斯蒂夫·迪特科——中的哪一个犯下了如此愚蠢的错误，这主要归因于20世纪60年代漫画的生产方式——“漫威模式”。在漫威那个可怕的竞争对手（李会这样开玩笑地这样形容DC）那里，一本漫画书的编剧会先创作出一个完整的脚本，包括详细的文字说明和对话，每个漫画格气泡的内容，以及每幅画面大致的样子。接下来，编辑会审读脚本，做出必要的修改，并将其交给漫画师，后者会根据脚本把漫画故事绘制出来。之后是着墨、上色，根据脚本中的对话和说明给图配上文字。漫画编剧通常要等到漫画在报刊亭开始售卖的时候才会再次看到自己的作品。只要有足够的编剧和编辑，按照这样的工作流程，每个月产出一定数量的漫画就不成问题。但20世纪60年代初期，漫威的编剧和编辑都很少，实际上只有一个，就是斯坦·李。李作为编辑和编剧，（在1965年）创作了《神奇四侠》《蜘蛛侠》《X战警》《复仇者联盟》《超胆侠》《弗瑞中士和他的咆哮突击队》（“二战”题材漫画），以及美国队长和钢铁侠的故事（都刊载于《悬疑故事》），塑造了奇异博士、霹雳火、尼克·弗瑞（出现在《奇异故事》中），以及巨化人、海王子纳摩和绿巨人浩克（出现在《惊异故事》中）等角色。漫威的漫画故事结构连贯、一脉相承，这毫无疑问是因为这些林林总总的漫画书都出自一人之手。

每个月要创作这么多的漫画故事，斯坦·李根本没有时间为所有漫画创作完整的脚本。而且，为漫威工作的漫画师都是自由职业者，他们完成一期的创作后得到报酬，再绘制下一期的漫画（如果他们不工作，就得不到报酬）。顺便说一下，当时为漫威工作的漫画师都是行业的佼佼者，包括杰克·科比、斯蒂夫·迪特科、唐·赫克、约翰·罗米塔和吉恩·科兰等业界大咖。20世纪50年代，因为被扣上了“诱惑无辜”的罪名，整个漫画行业都处于瓦解的边缘，而这些漫画师能够在这个黑暗时代获得成功，就足以证明他们的才华卓著。他们是用图画讲故事的专家，不需要漫画书编剧拿着脚本在旁边指导他们应该在每个漫画格里画什么。

斯坦·李想出了一个聪明的办法来解决时间不够用而聪明人太多的问题：让漫画师讲故事。李先写出一个简短的大纲，长度从几段到几页不等[2]，描述最新一期的故事情节。从本质上说，他交给漫画师的是一

个故事梗概，比如反派人物是谁，他的超能力是什么，他是如何获得这种能力的，超级英雄的首战是如何失利的，最后又通过什么样的妙计赢得了胜利。漫画师们回到自己的工作室，按照李的大纲，绘制出故事画面。拿到画稿之后，李会加上文字和对话，然后书就可以付梓印刷了。通过漫威模式，李和漫画师们共同创作了一本本漫画书。所以，蜘蛛侠对于基本的电流知识一无所知，李和迪特科都难辞其咎。

李和迪特科对于接地的知识了解得不太透彻，但他们明白电和水在一起会造成短路。在《超凡蜘蛛侠》第9期中，蜘蛛侠与电王战斗的高潮部分是，蜘蛛侠抓起附近的一个消防水龙带（在天花板消防喷淋头出现之前，这种设施是大厦里的常见消防设备），向电王喷射出大量水雾。蜘蛛侠拿起水龙带并打开主压力阀，心中暗说：“我学的到底是什么理科专业，为什么我才想到这个办法呢？”当电王爆炸的时候，他说：“水和电还真是不相容！”

正如蜘蛛侠所想，我们也怀疑彼得·帕克学的到底是什么理科专业，但水和电不相容这一点他倒是没错。城市用水虽然从技术上说是电中性的，但含有高浓度的杂质离子。因此，普通自来水是一种电的良导体。电王的电势能很高，因此他对于超级英雄而言是个致命的对手。蜘蛛侠把电王淋成落汤鸡时，也就相当于使电王接地，从而把电王体内的多余电荷输送出去。这似乎是漫威的创作者们应该补上的一堂物理课。在超胆侠打败电王后，警察需要先用水管把电王淋湿，再把他带进警车，送回警察局。

[1]严格地说，导线不必接“地”，而只需连接到势能较低的地方即可。但最终，任何电流的终点必定是地面。以水为例，我们可以用一根水管连接两个水龙头，让水流入水管。只要两个水龙头之间存在压力差，就会产生水的净流动。但如果想让这个情况持续下去，水压较低的那个水龙头就必须把水排到某个管道里去（在电的例子里就是“接地”）。

[2]有时甚至更短。李曾经与杰克·科比在《神奇四侠》第48期中创作了一个传奇故事。李在脚本中写道：“神奇四侠与行星吞噬者交战。”科比认为这位吞噬者应该有个传令官，向那个遭遇厄运的不幸星球宣告吞噬者的到来，他因此创造出银影侠这个角色。当科比为《神奇四侠》第48期绘制的漫画被送到漫威办公室的时候，李才第一次得知银影侠的存在。

第18章 电王跑起来就成了万磁王

在上一章中我们知道，对于不接地的金属能否导电，李和迪特科确实搞错了。然而，我们应该原谅他们一次。毕竟，在很长一段时间里，他们每个月都要出版一本漫画书，讲述一个激动人心的故事，这种快节奏导致故事中出现了不少科学知识方面的硬伤。正如我在前文中强调的，这些漫画故事绝不能用作物理教科书。然而，在电王登场的那一期《超凡蜘蛛侠》中，我们看到了解释电的基本特性的一个绝佳范例，这实在令人印象深刻。

电王在大白天里抢劫了一家银行，然后像蜘蛛侠那样轻而易举地爬上了大楼的一侧，躲开了警察的追捕。第16章的图25展示的就是这个场景，画面上的一个路人惊呼：“看！一个衣着奇怪的人沿墙壁跑上了楼！”另一位路人说：“他用电流光束吸住大楼的铁梯！就像磁体一样！简直令人难以置信！”

这个场景会让人产生三种感受。第一，大家会好奇为什么现在很少有人用“衣着奇怪”这个说法；第二，人们会追忆过去，那时行人喜欢对眼前发生的事做讲解；第三，人们会备感欣慰，因为电王沿着墙壁跑上楼顶，从物理学角度来说，这意味着他合理地应用了他的能力。正如漫画里第二个路人所说，麦克斯·狄龙（电王）知道电流能够产生磁场。这种现象，即安培效应，是由汉斯·克里斯蒂安·奥斯特（有一种磁场强度单位以他的名字命名）率先发现的，后来由安德烈·马里·安培（电流单位以他的名字命名）做了进一步阐述。为什么电王通过控制电流能够产生磁场，但能控制磁力的万磁王却不能够随意控制电流呢？这个问题的答案揭示了电和磁之间的深层次对称性，在漫画和现实世界中我们都能发现这种规律。

我们先来定义“电场”。一个电荷会对另一个电荷施加静电力。两个电荷离得越远，静电力就越弱。根据其极性，第二个电荷将被第一个电荷拉近或者推远。因此，我们可以说第一个电荷周围有一个“力的作用区域”。如果用另一种方式来表述这个区域，那么我们可以说第一个电荷周围存在一个“电场”。靠近第一个电荷的第二个电荷会被前者的电场推远或者拉近。电场的强度取决于电荷的大小和距离的远近，距离很近

的时候，第二个电荷感受到的力就会很大。而随着距离的增加，力会变小，它与距离的平方成反比（根据库仑表达式）。如果两个电荷时间的距离增加一倍，力就会变为原来的1/4；如果距离增大至原来的3倍，力就只有原来的1/9。

电荷还会产生另一种场，但只在它运动的情况下，这个场叫作磁场。如果把一根通电的电线靠近指南针，指针就会发生偏转，跟磁体靠近指南针时的情形一样（这个现象是奥斯特发现的）。事实上，两根通电的电线，根据电流的方向不同，会互相吸引或者排斥，就像两个磁体靠近时一样。电王的冲击电流所产生的磁场的确可以吸住大楼的铁梯，让电王沿墙面爬上高楼或者吸附在路过的汽车上（他在《超胆侠》第2期中就是用这个方法逃生的）。

两根通电电线之间的力从本质上说并不是静电力。在没有电流通过时，电线呈电中性，电线原子中电子的电荷数与原子核的电荷数刚好相等。当电流从电线中通过时，会有一半数量的电子被带到电线的另一端。只在有电流通过的情况下，电线之间才会产生作用力，这个力是由磁场带来的。

为什么电流会产生磁场，就像普通磁体一样？电磁现象背后的关键因素就是电荷的相对运动，也就是说，电荷之间必须存在相对运动。

如果两个电荷以相同的速度沿同一方向运动，那么从其中一个电荷的角度看，另一个电荷就是相对静止的。在这种情况下，对这两个电荷而言，它们之间唯一的作用力就是静电力。然而，对于实验室里静止不动的人来说，这种运动还产生了一个额外的力，即磁力。磁力与电荷的相对运动有关，这表明磁现象可以用简单的5个字解释：狭义相对论。但要弄明白如何用爱因斯坦在1905年提出的这个理论解释磁场，可就不止5个字那么简单了，我会在不使用复杂的数学知识的前提下尽力解释清楚。

米尔顿·罗斯曼在他的杰作《发现自然法则》中就电荷的相对运动如何产生磁力做出了精彩的论证，他还指出这个力在电荷静止时会消失。我们可以想象两条相邻的长铁轨，其中一条铁轨上有大量的负电荷，电荷之间的距离为一英寸；另一条铁轨上有同样数量的正电荷，距离也是一英寸。在这个虚构的例子中，我们假设这些负电荷和正电荷是源源不断的，无须担心沿着轨道移动的电荷会耗尽。接下来我们引入一个测试电荷（为了便于论证，假设这个电荷带正电），它距离现有的两

列电荷都有一定的距离。这个测试电荷受到的净力为零，因为正电荷的一列对它的排斥力与负电荷的一列对它的吸引力是一样的。现在，两个轨道上的电荷开始以相同的速度朝相反方向运动，负电荷向左，正电荷向右。如果测试电荷是固定不动的，那么在给定长度内，会有相同数量的负电荷和正电荷从它旁边经过，这时它受到的净力仍然为零。然而，如果测试电荷与轨道上的正电荷以同样的速度向右移动，就会产生额外的力。

第11章在论述闪电侠的极速运动所产生的相对论效应时，我介绍了狭义相对论的特性，对一位静止不动的观察者而言，物体的运动距离会缩短。从测试电荷的角度来看，若它与其余正电荷以相同的速度朝相同的方向运动，对后者而言，测试电荷就是静止不动的。对测试电荷来说，铁轨上的正电荷之间的距离仍然是一英寸；但朝相反方向运动的负电荷之间的距离会缩短，即小于一英寸。此时，测试电荷受到的静电吸引力和排斥力就是不平衡的，它会受到净吸引力的作用。因此，我们赋予这个额外的力一个特殊的名称——磁力。没有净电荷（即电中性）的运动物体不会感受到任何额外的力，这与只有正电流或负电流能产生磁场的实验观察结果是一致的。

我们知道，闪电侠的靴子与地面发生摩擦会让他带有电荷。移动的电荷会产生磁场，但闪电侠在极速狂奔的时候，并没有产生一个巨大的磁场，把他所经之处的每一样固定得不太牢的铁质物体（以及部分固定得很牢的铁质物体）吸在身上，真是太奇怪了。我们只能把磁场缺失的原因归结为闪电侠的“光晕”，光晕也能让他免受空气阻力的伤害。[1]

用狭义相对论来解释磁性是由移动的电荷产生的，这种做法确实很奇怪。一般来说，如果物体的运动速度比光速慢得多，我们就很容易忽略相对论效应。当物体的运动速度只有光速的1/10的时候，忽略相对论效应也算不上什么大错误。虽然电荷的移动速度比光速慢得多，但在磁场的产生过程中仍然存在相对论效应。当然，这种效应很不明显。有多不明显呢？我们可以用数学方法加以说明。移动电荷产生的磁场大小等于其电场强度除以光速。光速是一个很大的数字，因此对于一个给定的电场，移动电荷所产生的磁场相当弱，但它仍然存在。如果移动电荷的数量增加，或者运动得更快，就能产生更大的电流，以及更大的磁场。

基于把电流和磁场关联在一起的安培定律，人们制造出很多实用的设备，比如电磁铁。电磁铁是指缠绕着电线的磁性铁芯。流经线圈的电流会产生磁场，并通过铁芯得以增强。《超级小子》第1期中就出现了

这样一个装置。超级小子遇上了一伙窃贼，他们驾驶着从军用仓库偷来的坦克，在镇子里横冲直撞。这个“打砸抢团伙”驾着坦克闯入银行，造成一片混乱。虽然超级小子能够飞上天徒手掀翻坦克，但他决定采取更有技术含量的方法，如图27所示。“我需要一个火车头、一台发电机以及一根几英里长的电线！”超级小子对一名受害者说。超级小子把一台大型电动发电机放进火车头里，并解释道：“这台发电机缠上电线之后就能产生我需要的电流了！现在开始缠电线。”在下一幅图里，我们看到他花了几秒钟时间把这根几英里长的电线绕着火车头缠了一圈又一圈。从图28中我们可以看到他的成果，超级小子启动了发电机（假设有足够的煤让它启动）。他大声宣布：“我造出了一个超大的电磁铁，它可以带我去好多地方！”火车刚好穿过镇中心，来到打砸抢团伙的坦克旁边。“发生什么事了？我们飞起来了！”当坦克被磁性火车头吸住时，其中一个人大叫道。“是火车头，”另一个见多识广的恶棍说，“那个大磁铁吸住了我们的坦克。”



© 1949 National Periodical Publications Inc. (DC)

图27 超级小子展示了电磁学理论的实际应用，他造出了一个便携式的电磁铁（《超级小子》第1期）



© 1949 National Periodical Publications Inc. (DC)

图28 《超级小子》第1期里接下来的一幕，超级小子用自己的体力和脑力抓住了“打砸抢团伙”

从物理学角度看，这是完全正确的。发电机产生的电流经过绕着火车头的几英里长的电线，产生了巨大的磁场。如果在线圈中放入一个铁质火车头之类的磁性材料，它就会使线圈产生的磁场增强。然而，为什么超级小子自制电磁铁所产生的超强磁场没有吸住附近停放的汽车、建筑物上松动的铁质物体，或造成火车头的钢质车轮失灵呢？这一切仍然是个谜。

[1]在《闪电侠》第167期中，当异次元精灵莫比赋予巴里·艾伦超级速度和保护光晕的时候，他完全知道自己在做什么！在故事的结尾，莫比消失了，但巴里·艾伦还没来得及问他沃利·韦斯特（当时的闪电小子）是如何得到光环的。在现在的漫画故事中，闪电侠的光晕来自神速力。从物理学的角度看，这个解释的合理性就和十维空间的精灵一样不可信。

第19章 万磁王跑起来就成了电王

《X战警》第1期中出现的第一个大反派是万磁王，他的超能力是产生并控制磁场。万磁王会向超级英雄投掷导弹，还可以让磁性物体发生偏转，但对于一根小小的木棒就无能为力了。事实上，有一些金属物体也不受万磁王的控制：他能轻易地举起汽车，却无法拿起银汤匙或者金手镯。某些材料即使在没有电流通过的情况下仍具有磁性，而其他材料则没有磁性，那么，磁性来自哪里呢？

电荷运动产生的电流所形成的磁场可以用狭义相对论来解释，但磁铁又是怎么回事呢？我们用来固定食品清单的冰箱贴似乎没有做任何运动，但仍然具有磁性。事实上，静止不动的铁块的磁性也可以用相对论来解释。

宇宙中的每一个质子、电子和中子都有一个微小的磁场，与地球磁场或电流产生的磁场相比，前者显得微不足道。我们可以把电子围绕原子核的运行轨迹（大致）看作一个产生磁场的微小电流回路。即使没有这个“轨道运行”效应，原子内部仍然有磁场。亚原子微粒的微小的固有磁场从何而来？答案涉及量子力学，我们将在后文中讨论。狭义相对论的一个原理是，空间和时间应当被平等地视为一个单一的实体，即时空。当我们把相对论与量子力学方程结合时，我们可以推测出电子有一个非常小的内部磁场，而且理论估算数值与测量值正好吻合。只有把相对论和量子力学结合在一起，我们才能用数学方法理解电子、质子和中子的内部磁场。即使是静止的物体，相对论对其磁性的理解也是至关重要的。所以，没有爱因斯坦，就没有相对论，就没有磁性，最重要的是，也没有冰箱贴！因此，如果没有相对论，我们的购物清单就会从冰箱门上掉下来，静静地躺在地上。如果没有爱因斯坦在理论物理学上取得的辉煌成就，等待我们的就只有饥饿。

通常，原子内部电子的磁场都是成对出现的。如果原子的内部磁场相互匹配，原子就没有净磁场，跟正常的原子没有净电场一样，因为原子核中质子的正电荷数量与电子的负电荷数量相等。大多数材料，比如纸和塑料，都没有磁性；而大多数金属，比如银和金，也是没有磁性的。

如果大多数材料的原子都没有净磁场，那么万磁王如何让自己和其他人都像图29所示的那样飘浮起来呢？这个超能力背后的物理学基础是万磁王能够产生一个非常大的磁场，使原子磁化，进而把我们或者其他物体变成磁体。

在讨论磁悬浮之前，我先强调一点：万磁王并不是通过影响人体血液中的铁元素而把人举起来的。我们暂且不考虑不均匀的压力对人体内的静脉和动脉造成的影响（这会让问题变得更复杂），而主要关注血液的磁性。一些金属元素，例如铁和钴，其内部电子并非成对排布，于是原子就有了净磁场。然而，血液中的铁元素主要存在于血红蛋白中，血红蛋白是一种在你呼吸时负责输送氧气的蛋白质。血红蛋白是一个非常大的分子，包含4个较大的蛋白（被称为珠蛋白，像蜷缩起来的蠕虫）。每一个血红蛋白还含有一个血红素基因，由碳、氮、氧、氢和铁组成。血红蛋白分子中的铁原子会与相邻原子发生化合反应，铁原子与氧原子的化合反应的产物还有另一个名字——铁锈。处理过废铁的人都知道，铁锈会让铁的磁性减弱。铁锈的常见形式之一是三氧化二铁（被称为赤铁矿），没有磁性；铁锈的另一种形式四氧化三铁（被称为磁铁矿）则是有磁性的。铁原子与氧原子结合之后，赤铁矿中铁原子的磁场就消失了，因为铁原子和氧原子发生化学反应后，氧原子中的未配对电子与铁原子中的未配对电子配成了一对。由于血红蛋白中携带着氧气或者二氧化碳，所以铁可能没有磁性，也可能有磁性。但在任何特定的时刻，你的血液中只有一小部分铁有磁性。[1]





© 1963, 1964 Marvel Comics

图29 《X战警》第6期（上）和《X战警》第1期（左下）中的场景。万磁王想要袭击（上）或者逃开X战警中的天使（长着翅膀的那个人），这表明通过磁悬浮原理，万磁王可以让没有磁性的物体悬浮起来，像石头或他本人

即使铁原子没有与氧原子发生化合反应，只要所有原子都没有排列整齐，它也有可能没有磁性。通常情况下，铁或钴中的原子会整齐地排列起来，形成一个区域，叫作“畴”，其中的所有原子的磁场都指向同一个方向。然而，熵会导致畴指向不同的方向，在它们组合起来后磁性互相抵消。把一根铁条加热，原子会获得大量的热能并自由旋转；然后把这根铁条放在一个强大的外部磁场中，外部磁场会使大多数畴都指向同一方向。当铁冷却至室温时，就会产生一个很大的内部净磁场。如果你用锤子击打磁铁或者把它放在炉子里加热，磁畴会随机调整方向，导致磁铁几乎完全消磁。一些可以弯折的、信用卡大小的冰箱贴的磁畴会沿着长边的边缘排列。因为所有冰箱贴的磁场并不指向同一个方向，所以更容易把它们排成一行，其中有的冰箱贴的N极指向冰箱，有的N极则指向相反方向。[2]

如果某种材料的磁畴都指向相同的方向，我们就称这种材料具有“铁磁性”。固体中许多原子都与其相邻原子间存在很弱的磁力作用，如果将其放置在一个很强的外部磁场中，它们将与该磁场的方向一致；但在室温条件下将外部磁场移除后，这些原子又会随机排列。我们称这样的材料（比如氧分子、一氧化氮和铝）具有“顺磁性”。还有第三类材料，由于相邻原子间的相互作用和化学有序性，它们的原子磁场（由电子在原子内转动产生）与外部磁场方向相反。如果把这些材料放在一个外部磁场中，使磁场的N极向上，原子磁场的N极就会朝下。我们称这样的材料具有“抗磁性”，它们会试图消除任何一个外部磁场。金和银都具有抗磁性，如果你能够用冰箱贴把自己的金银首饰吸起来，恐怕有人就得做出解释了！水分子也具有抗磁性，因为我们身体的主要成分是水，所以人类也具有抗磁性。

借助这种抗磁性，万磁王能够让自己和其他人像图29所示的那样飘浮起来。在中等强度的磁场中，你身体中的原子不易被极化。在室温下，抗磁性比较弱，原子的正常振动战胜了外部磁场的作用。但在一个很强的磁场（大约是地球磁场的20万倍）中，你身体中的抗磁性原子就会受到影响，全都指向同一个方向——与外部磁场的方向相反。就像两个磁体N极相对时会互相排斥一样，磁场被极化的人也会与万磁王制造的外部磁场（让我们的原子重新排列的磁场）相互排斥。如果万磁王增强他的磁场，磁性排斥力就会变得很大，足以抵消重力的作用。（也就

是说，向上的磁性排斥力可能会等于或大于重力产生的向下的拉力，因此会有一个向上的净力让人飘浮起来。）需要提供巨大的能量产生一个非常大的磁场，才能达到这种效果，人越重，需要的向上的力就越大。但这是可以做到的，荷兰奈梅亨大学的强磁场实验室在他们的网站上分享了一些有趣的图片和视频，其中有飘浮的青蛙、蚱蜢、西红柿和草莓，表现了现实生活中的抗磁性悬浮。

电流能产生磁场，那么，移动的磁场也能在附近的电线中产生电流吗？读过X战警漫画的人都知道，答案是肯定的。在刚开始与X战警的战斗中，万磁王会运用他的超能力把任何金属物体变成攻击武器或者防御盾牌。万磁王的能力对于具有磁性的金属而言是最有效的，在室温下只有三种元素（铁、钴和镍）具有磁性。万磁王可以通过磁化钢梁中的铁把钢梁变成他想要的任何形状，但对于一枚金戒指来说，他能做的就很有限了，除非他愿意付出极大的精力使抗磁材料极化。但万磁王真正的厉害之处不在于他对磁性材料的控制能力，而在于他对电流的控制能力。

例如，万磁王曾经制造了一个计算机控制面板，用它来自动控制能量衰减，以削弱X战警的超能力，阻止他们破坏自己的犯罪计划。为了防止遭到X战警的破坏，万磁王设计的这个设备没有可供改变程序的按钮或旋钮。万磁王通过控制电流来操控这个面板，再通过控制其产生的磁场施加影响。此外，万磁王通过改变控制面板的磁场，可以产生电流。

变化的磁场是如何产生电流的呢？这个问题的答案又把我们带回关于电流和磁场的最初讨论——相对运动。

就像两个磁体彼此靠近时才有可能相互排斥或吸引一样，外部磁场也会对电流施加作用力。移动的电荷会产生磁场，吸引或排斥其他磁场，无论这个磁场是由另一个电流产生的磁场还是冰箱贴的磁场。若电荷停止移动，停留在外部磁场里的一段电线中，电荷就不会受到外力的作用。[3]如果电荷仍然停留在电线中，而外部磁场开始运动，又会发生什么呢？假设磁场朝着电线的方向移动，从磁场的角度看，移动的不是磁场本身，而是电线。

磁性的本质就在于相对运动。如果你被蒙住眼睛坐在一辆匀速直线行驶的汽车里，当你到达目的地时，你怎么能证明这是车移动的结果，而不是风景变了呢？如果改变运动的速度或方向，你就会感受到一个与

加速度相关的力，由此你会知道自己在移动。但对于匀速直线运动而言，你无法证明是你还是其他东西在移动。你唯一可以肯定的是，你与周围的环境发生了相对位移。

类似的情况是，磁体朝着电线移动，对于磁体而言它自己是静止的，而电线在朝着它移动。但是移动的电荷会产生磁场，并与磁体的磁场发生相互作用。因此，在电线附近移动磁体，带正电荷的离子和带负电荷的电子就会产生电流。电线受到力的作用使电荷可以自由移动。万磁王就是通过这种方式，随意地控制任何设备的电流方向，虽然他操控电流的精确性取决于他操控磁场的灵敏程度。

在考虑磁场对电荷是否有影响时，如果相对运动是唯一重要的因素，且磁体是静止的，电线在磁体附近移动，情况将会如何呢？电荷也会受到力的作用吗？当然！

如果我在太空中拉扯一根电线，电线中的电荷会移动，就像在电线保持静止时对其施加一个电压一样。在任何一种情况下，电荷都会以一定的速度经过一个固定的点。相对于磁体而言，就好像有电流从电线中流过，而且我们知道，电流和磁体会发生相互作用。在这种情况下，移动的电线中的电荷会受到一种力，促使它们流动。当我们拉动电线使其穿过外部磁场时，我们用于拉动电线的能量就被转化为电能。对于线圈来说，是磁体穿过线圈还是线圈穿过磁体并不重要。只要电线中的电荷与外部磁场存在相对运动，即使没有外部电压，也会产生电流。这个机制听起来有点儿牵强，但事实上，你家里用的电就是这么产生的。

发电站的工作原理是，改变线圈的外部磁场，电线中就会产生电流。这就是法拉第定律，这个定律以迈克尔·法拉第的名字命名，他是最先引入电和磁场概念的科学家之一。这个电流所产生的磁场方向与外部磁场的方向相反。这是能量守恒的结果，我们接下来会进一步解释。在某些情况下，这种电流被称为“涡流”，每当线圈的外部磁场增强或减弱时，就会产生这样的电流。

假设我们把一块磁体掰弯，就像一枚有缺口的戒指一样，此时其S极和N极是相对的，再把线圈放在两极中间。一开始时，线圈的平面与磁体的磁极方向垂直，磁场穿过线圈。如果我们把线圈旋转90度，使其不再与磁极方向垂直，穿过线圈的磁场就会非常小。我们再把线圈旋转90度，使线圈再次与磁极方向垂直，穿过它的磁场强度就又变大了。我们再把线圈旋转90度，通过线圈的磁场强度又会变小，以此类推。穿过

线圈的磁场强度的每一次变化，不管是增加还是减小，都会产生电流。随着线圈的旋转，产生的电流方向也会变化。我们刚才描述的就是一个电动发电机的工作原理，通过不断改变穿过线圈的磁场强度，旋转的线圈中将会产生一个电压。把交流电（AC）转换成直流电（DC）是有诀窍的，出于许多实际的原因，我们不会用交流电供给电能。美国的发电机线圈每秒旋转60次，因此美国的交流电频率为60Hz（频率单位“赫兹”的英文缩写，衡量线圈每秒旋转的次数），而欧洲的交流电频率是50Hz。

当通过旋转线圈的磁场发生变化时，就会产生电流。从能量守恒的角度看，为了产生之前并不存在的电流，我们需要消耗能量使线圈旋转。在《黑暗骑士归来》第1期（体现了弗兰克·米勒对DC漫画作品中关于宇宙的未来的反乌托邦设想，超级英雄被迫服苦役，莱克斯·卢瑟统治着国家）中，美国有1/3的电能是靠闪电侠在跑步机上不停奔跑来提供的。在第12章中，我们提到闪电侠发现了能量守恒定律的一个漏洞（可能是通过他的“神速力”），在卢瑟看来，发现了物理规则的漏洞就意味着有利可图。而在现实世界里，我们还没有找到违反能量守恒定律的任何例证，所以涡轮机发电和煮茶的物理学原理别无二致。

几乎所有的商业电厂都靠烧水发电，烧水产生的蒸汽驱动涡轮（类似于风车），涡轮连接着强大磁场中的线圈。当涡轮机转动时，线圈也会转动，从而产生电流。为了把水烧开，我们可以使用煤、石油、天然气等燃料，或者生物质能。另外，核反应产生的热量也可以把水煮沸。所有这些方法都是为了产生蒸汽，推动连接着涡轮且位于磁体两极之间的线圈。煤炭、石油或者垃圾中储存的化学能量与人类食物中的化学能量的来源相同，即植物的光合作用。阳光是太阳中心处核聚变反应的副产品。（因此，所有的发电厂都可以被视为核电站或太阳能发电厂。）

大气温度的差异会引发风力发电设备叶片的旋转，这种温度差异是由大气的吸收或云层的反射造成的阳光分布不均匀造成的。显然，太阳能电池要有阳光才能工作。同样，水力发电（通过把水坝或瀑布中水的势能转化为动能来驱动涡轮机发电）也需要阳光。除了利用潮汐和地热（地球内部的热量）之外，其他所有发电机制本质上都是以某种形式转化太阳能。显然，如果没有阳光，就没有我们。超人故事的创作者们把卡尔—艾尔的超能力来源从具有超强重力的氪星改为太阳，不是没有道理的。

[1]在电影《X战警2》中，万磁王的同伙魔形女在警卫的血液中注入了少量磁性金属，万磁王得以战胜这个警卫，逃离塑料监狱。

[2]做个实验：找两个可以弯折的信用卡大小的冰箱贴，让它们有磁性的一侧相对。如果它们的磁场指向同一个方向，你就可以让两个冰箱贴平滑地相对移动。现在把一个冰箱贴调转方向，使它的长边与另外那个冰箱贴的长边成直角。当你让它们相对移动时，你会感受到阻力的作用。

[3]细心的读者会注意到，即使电线是固定的（相对于一些观察者而言），电子仍在不断运动，因为它们具有以温度为衡量标准的动能。我们讨论的重点是，在没有外部电压或磁场变化的情况下，电线中的电子不会产生净运动，所以它们基本上可以被视为静止的。

第20章 X教授的超级力量

19世纪中叶，在美国西部大开发中可能没有什么身穿制服的斗士，但却有英雄愿意为真理和正义而战。20世纪50年代，美国西部漫画借助“牛仔热”使漫画出版商们渡过难关。那时候，超级英雄漫画因为沃瑟姆博士的《诱惑无辜》所引发的抵制运动而陷入困境。以绿灯侠和美国正义协会的冒险经历为主要内容的《全美漫画》改为由“平原战斗之子”强尼雷霆（白天是老师，晚上是枪手）领衔的《全美西部漫画》，《全明星漫画》也改为《全明星西部漫画》，讲述了双胞胎枪手的探险之旅。在DC的漫画世界中，伤痕累累（身体上和心灵上）的孤胆英雄约拿·哈克斯在美国西部惩恶扬善、行侠仗义，救下了好几位寡妇。同样地，鞭笞和义务警员也在那里弘扬正义，显示了义警风范。而在漫威的漫画世界中，西部故事完全是面对孩子的，《双枪小子》《雄马小子》《林戈小子》《生皮小子》的情节都差不多，小英雄们勇斗盗马贼和马车大盗。19世纪中期，牛仔执法者纵横西部，在现实世界中和漫画世界中皆是这样；物理学家们则忙于阐释电和磁的特性，为现代的无线生活方式奠定了理论基础。

苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦于1862年（正值美国内战爆发）把电和磁联系起来，实现了里程碑式的理论飞跃，开启了科学进步的新纪元。由库仑、高斯、安培和法拉第建立的一系列电磁公式现在被统称为“麦克斯韦方程组”，因为麦克斯韦把这些公式整合起来，建立了电磁场理论。这些科学家中没有一人曾在漫画书中担任主角，但如果没有这些英雄，我们现在只能秉烛夜读。

为了了解烤面包机或电灯泡的工作原理，我们可以先回顾一下前文中水龙头的例子。水龙头的压力类似电压，单位时间内流经水管的水量类似电流。水管存在瑕疵，为了保持水流量，我们必须对水流施加一定的压力。为了展现这两个特点，我们假设用于实验的水管局部有堵塞，管身上还有很多小孔。在这种情况下，部分水流会喷射出去。对于既定的阻力而言，水压越大，水流越大；对于既定的水压而言，阻力越大，水流越小。这些常识可以归纳为一个简单的等式：

电压=电流×电阻

这就是欧姆定律，以格奥尔格·欧姆的名字命名。他是电磁学的先锋科学家之一，电阻的基本单位也是以他的名字命名的。水管越长越细，水管里被堵塞的地方和小孔越多，水流的阻力就越大。在一根狭长的水管一头施加一个很大的水压，到了几英里之外的另一头，就只剩下细小的水流。正因为如此，跨接缆线才会又短又粗，只有这样，第一个电池的电流到达第二个电池时才不会明显减小。

水管上的小孔代表能量损失，这也解释了为什么一个稳定的水压（力）带来的是恒定的水流，而不是牛顿第二定律（$F=ma$）所认为的加速的水流。铜线上显然没有小孔会让电荷漏出去，但其中确实有电阻。电压会对电线一端的电荷产生很大的作用力，因此，它们具有很大的势能。随着电荷在电线中移动，其势能会转化为动能。电荷的动能越大，它在电线中的移动速度就越快，电流也越大。电线上的瑕疵起着减速的作用，快速移动的电荷与这些瑕疵发生碰撞，将一部分能量传递给它们，并引起电线原子的振动（这就是电线变热的原因）。对于给定的电压，电压赋予电荷的动能和转移到电线上的能量共同决定了电流的大小。

这些瑕疵是杂质或者脱离了晶体结构的原子，它们的周围也有电子云，就像电线中的其他原子一样。这些原子与电流发生碰撞后，会来回振动。回想一下第9章中的摆球运动，现在我们使系在细绳上的摆球带一个电荷。当带电的摆球来回摆动时，就产生了电流。由于电荷的运动速度在不断变化，因此它产生的磁场强度也在不断变化。由于变化的磁场会产生电场，所以摆动的电荷会产生与不断变化的磁场同相的不断变化的电场，并辐射到空气中。带电的摆球摆动得越快，产生的电流的频率和磁场强度的变化就越大。由于电和磁都有能量，即使不存在空气阻力，带电摆球最后也会慢下来。由带电摆球的简谐振动所产生的交变电场和磁场有一个特殊的名称——光。

为什么漫画里的X射线眼镜都是骗人的？

电线中振动的杂质原子会产生交变电场和磁场。杂质原子振动得越快，产生的电磁波频率就越高。在室温条件下，电线中所有原子（和电子）的振动频率约为每秒10^{12}次。因此，室温下的任何物体都会发射出频率为每秒10^{12}次的电磁波。具有这种振动频率的电磁波被称为红外辐

射。温度越高，物体中原子的运动速度越快，电磁波的频率也就越高。

基于原子中电荷的振动速度，即每秒钟来回振动的次数，波长（两个波峰之间的距离）长则几英尺，短则与原子核的直径差不多。波长较长的电磁波被称为“无线电波”（频率约为每秒100万次），波长较短的电磁波被称为“伽马射线”（频率为每秒100万亿次以上）。伽马射线的能量更大，与无线电波相比，可能会对人造成更大的伤害。但在本质上，它们都是同样的现象。为了让电线（比如灯泡中纤细的灯丝）中的原子发射出肉眼可见的电磁波（我们称之为可见光），原子必须每秒钟来回振动约1000万亿次。

我们终于可以开始讨论太阳为什么会闪耀了。正如我在第2章中提到的，太阳中心强大的引力使得质子（氢原子核）频繁发生碰撞，一些原子会聚合在一起形成氦核。一个氦原子核的质量略小于两个质子的质量，也略小于两个中子的质量。根据爱因斯坦方程$E=mc^2$，这个质量的差异会产生巨大的能量输出。向外释放的能量平衡了向内的引力，因此太阳在燃烧燃料（太阳耗费的燃料多达每秒钟600万吨氢核）的同时能够保持相对稳定。核聚变反应产生的部分能量以动能的形式存在，快速移动的带电氦核在加速时会发出电磁辐射。

加速度指的是速度的变化率，所以氦核每次加速、减速或因为与太阳中心的其他原子核发生碰撞而改变方向，都会发出光。我们看到的阳光其实是很久以前产生的，因为它是慢慢地从太阳中心扩散到太阳表面的。在雾蒙蒙的夜晚我们很难看见任何东西，因为含有水分的空气将光线朝各个方向散射。太阳中心的密度很大，核聚变反应产生的光平均要花40000年才能从太阳中心扩散到太阳表面。

穿过大气层的大部分来自太阳的光都属于电磁波谱的可见光部分，因此肉眼可见。当地球上没有眼睛的生物进化成有眼睛的生物时，它们的眼睛对最普遍的电磁波最敏感。相较光谱中的“可见光”，太阳发出的X射线很难到达地球。如果我们的眼睛只能看到X射线，那么我们将生活在一个几乎完全黑暗的世界里。那些生活在黑暗中的生物，比如深海动物，由于身处阳光无法到达的地方，所以不会把遗传资源浪费在视力或皮肤色素沉淀上，它们会依靠其他感官来导航。

在白银时代，巧舌如簧的推销员深谙漫画读者的心理，于是卖起了“X射线眼镜”，声称佩戴者能够透视衣物等固体。就算这些X射线眼镜的原理与将红外线辐射转化为可见光的“夜视镜”相似，除了牙医诊所

之外，也并没有足够多的X射线让它们发挥作用。快去把你的钱要回来吧！

主要在夜间活动的动物的视锥细胞较少，对色彩的感知比较弱，它们的光探测器以视杆细胞为主，只能探测到少量的电磁波。但是，任何具有“X射线视力”的动物或人都会经常撞到其他物体上，这使其处于明显的进化劣势地位。原子拥有的电子越多，发出的X射线就越强。所以，X射线能穿透软组织（主要成分是水），并从密度较大的骨骼中反射出来。我猜想超人应该是从眼睛里发射出X射线，穿透几乎不吸收X射线的物质，再反射到他的眼睛里。只有当从外部光源发射的光照在物体上并反射到人的眼睛里的时候，人才能看到这个物体，氪星人除外。要想进化出对波长较短的光敏感的视神经细胞，需要付出昂贵的代价，因此，进化出一种能探测到很少出现的X射线的能力，也就没有什么意义了。

我知道你想要拥有一个锡纸头盔

被称为X战警的超级英雄战队的领导者查尔斯·泽维尔，是一位坐在轮椅上的心灵能力者，他也被称为X教授。他因为脊柱受伤而无法行走，但却能读取并操控别人的思想，因此成为战队的领袖。X教授的心灵感应能力（具备这种能力的还有他的爱徒琴·葛蕾，以及超级英雄战队中的土星女孩）的物理学原理是，随时间变化的电流可以产生电磁波，并被敏感的人探测到。

我们体内的所有细胞都在各司其职。肌细胞可以产生力量，用于肱二头肌的收缩或心脏的跳动。肝细胞可以过滤血液中的杂质，这些杂质由胃细胞和肠细胞吸收而来。神经细胞或神经元的作用是处理信息，其方法之一就是输送和改变电流。在神经元之间移动的带电物质不是电荷，而是缺少至少一个电子或者拥有多余电子的钙、钠或钾原子（这种带电原子被称为“离子”）。离子在大脑中某个区域不断积累会产生电场，并促使其他神经元内的离子移动。移动的离子形成电流，进而产生磁场。神经科学家进行了一项实验，把敏感电极放置在人类的大脑内，它们检测到因这些离子的运动而产生的电场，通常会随时间发生随机变化。实验者根据电极在大脑中的位置，以及大脑所执行的任务，记录下电场呈现出的相干波图像，这种波经过几个振动周期之后又会回归随机

运动状态。神经科学家又展开了一项艰巨的任务，即识别出电压的变化，确定其与行为之间的关系（如果有的话）。人类的思维正是由这些简单而又错综复杂的因素构成的。

虽然科学家们还不知道大脑中的神经元电流是如何产生意识的，但有一点我们是知道的：移动的电荷会产生磁场。反过来，由于大脑中的离子电流不断地改变方向和强度，其对应的磁场也会随时间变化而产生电场。最终的净效应就是，只要有电流产生，就会从大脑向外辐射低频电磁波。这些电磁波的波长、振幅和相位，是由产生电磁波的离子电流决定的。这些电磁波的振幅极其微弱，其功率还不到此刻环绕你的背景电波的十亿分之一（我们生活在无线电波的海洋中，这一点常常被我们忽略，直到某个人打开收音机，无法准确找到某个特定的电台时才会意识到它的存在）。然而，大脑电流产生的电磁波确实存在，但它们很弱，除非在头上戴上传感器，否则很难探测到。对于X教授或是30世纪的土卫六来客（土星女孩）来说，他们之所以有心灵感应能力，是因为他们的大脑足够敏感，能够探测到其他人的大脑产生的电磁波。当然，如果你戴着的金属头盔（红坦克、万磁王和X战警的其他狡猾的敌人都采取过这种防御措施）把你的大脑屏蔽起来，就会阻断电磁波向外传播。

如果你把一块石头扔进池塘，水面上就会泛起波纹，从里向外逐渐变弱。水分子从石头那里得到了动能，但随着波纹变得越来越大，水分子中的能量也会不断向外扩散。当波纹向外扩散时，圆周上每单位长度内的水分子的动能会被稀释。因此，往太平洋中心扔一块石头，不会对加利福尼亚海岸造成明显的扰动。同样，电磁波的强度也会因离波源越来越远而逐渐减弱。所以，如果X教授想对远方的敌人使用他的超能力，需要用到一种放大器，叫作“脑波强化机”。这个机器在《X战警》第7期中作为变异人脑电波自动探测器首次出现，但在后来的故事中其功能发生了变化，可以增强X教授的心灵感应能力。为了探测到遥远的电磁信号，我们必须使用外部放大器，X教授的超能力背后的物理学原理也与其相同。正因为如此，无线广播电台和电视台使用兆瓦级功率来传输信号。瓦是功率单位，衡量的是每秒钟的能量多少（单位为焦耳或$kg \cdot m^2/s^2$），1兆瓦就是100万瓦。广播电台发射的信号功率越大，到达特定远程天线的电磁波的强度就越大，收音机接收到的信号也越强。商业电视台通过一个大天线中的电荷振动来产生信号。你的电视机或者收音机不是用脑波强化机来放大信号的，它是使用晶体管来实现这一功能的。

探测到一个人的大脑产生的电磁波是一回事，探测产生电磁波的神经元电流又是另一回事。换句话说，一个人真能读懂别人的想法吗？答案是肯定的。X教授和土星女孩大概是用与电视原理相反的方式做到这一点的，下面我来解释一下这个过程。

电视信号本质上是一个强大的发射机发出的电磁波，当它被传输到屋顶的天线时，会使电荷以入射信号的频率和振幅来回振动，然后电磁波中的信息会被传输至电视机。老式阴极射线管电视机的核心部分是一个表面为玻璃的显像管，上面涂有一种磷光材料，被高能电子击中时会发出短暂的闪光。这块玻璃板位于一个形状不规则的玻璃盒子的一端。盒子较窄的另一端是一根电线，通电后会释放出电子。这些获得自由的电子穿过有一定电压的金属板，向显像管的另一端也就是涂有磷光材料的玻璃板移动。由于金属板上的电压不同，电子会被引导至玻璃板的特定区域。显像管的内部呈真空状态，旨在减少空气分子的数量，以免造成电子束发散。每当电子束撞击玻璃板时，就会将动能转移给磷光材料，使其发出亮光。然后，金属板上的电压会发生变化，使电子束对准屏幕上的另一个位置，点亮该位置的磷光材料。如果电子束停止撞击，玻璃板就会暗下来。这个过程会一直持续下去，直到电子束扫过整个玻璃板。玻璃板上的明暗区域就会在电视屏幕上生成一个图像。

通过对显像管上的图像做出轻微的改变，可以造成一种图像正在运动的假象。如果在电子束撞击到的三个位置上使用三种不同的磷光材料或滤色器发出红色、绿色和蓝色的光，只要对每个位置上的滤色器所受到的照射量做出细微调整，就可以生成彩色图像。电视显像管背后的基本物理学原理就是，电磁波中包含一系列指令性信息，用来指示施加在金属板上的电压的大小和时间长短。

显像管中变化的电子束会发出电磁波，与天线接收到的电磁波不同，但与电视图像有关。在靠近电视的地方放置一个敏感度高的天线，就可以探测到这些电磁波。如果我们使用适当的软件，就能重构电子束产生的图像。这种“反向电视”上显示的是与电视上相同的图像，从这个角度看它似乎没有什么特别的价值。但是通过它，人们在不接入计算机的情况下就可以读取发送到计算机显示器上的信息。[1]或者，我们也可以用这种方法把信息从一个大脑发送到另一个大脑。

那么，X教授能否通过意念控制其他人的行为呢？最新的实验表明，这确实有可能。事实证明，我们不仅能探测到离子电流在大脑中产生的微弱磁场，还可以探测到其反向过程。神经科学家发明了一种研究

工具，叫作经颅磁刺激（TMS）。他们在测试对象的头部施加一个随机变化的磁场，从而对大脑皮层的特定区域进行电流刺激。实验结果表明，测试对象的反应时间和手部的自主运动能力会受到外部磁场的干扰。

用意念控制他人的行为，这种能力并非只有X教授和土星女孩才有。事实证明，我也拥有如此惊人的精神力量。因为我的课不是让我的学生匆匆离开报告厅，就是陷入沉睡！

[1]1985年，英国国家广播公司宣布他们可以从遥远的距离外监控用户电视屏幕上的图像。最近的研究表明，液晶电视屏幕也很容易被远程监控。

第三部分 现代物理学

第21章 微观宇宙之旅

漫画读者总是希望在每个故事的最后，英雄都能获胜，这是合情合理的。因此，在每个故事接近尾声时，正义到底是如何战胜邪恶的，就成了读者最大的乐趣所在。我不想过分强调这一点，但毫无疑问，敌人越强大，故事就越精彩。正因为如此，20世纪60年代，神奇四侠的故事才这么受欢迎。斯坦·李勾勒出神奇四侠的人物特征和基本的故事情节，杰克·科比则赋予这个故事以精髓。如果超级英雄只能和他们的克星势均力敌，那么在第5期（1962年7月）中，当神奇四侠成为“毁灭博士的囚徒”时，神奇四侠可谓取得了伟大的胜利。

维克托·冯·杜姆是一位科学天才，仅次于神奇四侠的领袖里德·理查兹。理查兹和冯·杜姆上的是同一所大学，都拿到了“科学奖学金”（在漫画世界里，高等院校求贤若渴，就像现实世界里的大学争夺优秀运动员一样）。冯·杜姆的一项“不被准许”的科学实验出了大问题，炸毁了实验室和他的脸，他也因此被开除。他戴上了一个金属面具，穿上了一身高科技盔甲（可以与钢铁侠的盔甲匹敌），以毁灭博士的身份踏上了漫长的征服世界之旅。当然，冯·杜姆没有获得学位，所以不能算真正的博士。很可能是因为他这种未能毕业的痛苦，以及他想羞辱里德·理查兹的渴望，驱使着他从事邪恶的勾当。在20世纪60年代的DC漫画中，很多反派人物最后都会被打败并被抓进警察局，而神奇四侠似乎永远也没有办法在与毁灭博士的战斗中占据上风。因为毁灭博士是欧洲小国拉托维尼亚的独裁统治者，到底应该把这么一位邪恶的国家首脑交给哪个机构处置，确实是个难题。

更重要的是，毁灭博士的自尊心非常强，他宁愿死也不愿意被囚禁起来。因此，这个漫画故事的结局往往是冯·杜姆迷失在太空中或者在另一个维度的空间里游荡，或者被困在时间里，而这些都是他为神奇四侠设计的结局。在《神奇四侠》第10期“毁灭博士归来”的高潮部分，毁灭博士被他用来对付神奇四侠的缩小射线击中。故事的结局是毁灭博士

被缩小后消失，但这并不是我们最后一次见到他。在《神奇四侠》第16期里，神奇四侠来到“毁灭博士的微观世界”，得知毁灭博士原来没有死。当毁灭博士缩小到一定程度后，他进入了一个“微观世界——一个能放在大头针尖上的世界”。后来，在《神奇四侠》第76期里，里德、本和乔尼经历了一场冒险，进入了微观宇宙，也就是由微观世界组成的宇宙（至少是一个银河系），它存在于里德·理查兹实验室的显微镜载玻片上的一个污点里。这样一来，漫画编剧就无须解释《神奇四侠》里那个不可思议的巧合，即神奇四侠和毁灭博士缩小之后竟然会来到同一个微观世界。

如果毁灭博士进入并征服的这个微观世界确实可以安放在大头针尖上，那么它的最大直径只有1毫米。相较而言，地球的直径是13000千米。1千米等于100万毫米，所以微观世界是地球的130亿分之一。在第5章中我们讨论了缩小物体尺寸所面临的种种困难。微观宇宙的密度不可能是地球的60亿倍，除非它是由白矮星物质组成的。而毁灭博士、神奇四侠以及这个微观世界中的居民都能够正常行走，这表明情况并非如此。微观世界里的毁灭博士和里德·理查兹都和平常一样聪明，石头人也一如既往地强壮，所以他们缩小的过程中不可能少了什么原子。因此，我们只能遗憾地得出结论：毁灭博士的微观世界与他的其他“伟大计划”非常相像——理论上令人印象深刻，但很难实现。

如果说构建一个能安放在大头针尖上的世界非常困难，那么在《原子侠》第5期“杜姆的致命钻石”里，原子侠的冒险之旅又该怎么解释呢？雷·帕尔默（原子侠）的一个考古学家朋友把他在蔚蓝群岛的匹克山上发现的一颗钻石带回了常春藤镇，这颗钻石会射出奇怪的射线，把人和家里的猫都变成钻石雕像。“尽管它看起来很坚硬，”在帕尔默教授准备调整自己的大小时，他想，“但是在构成钻石的原子之间其实存在着巨大的空隙！”

确实如此。对大部分原子而言，在带正电的原子核与带负电的电子之间，都是一片空白。当原子侠缩小到亚原子大小时，他竟然在原子内部发现了一颗行星！我实在想象不出这颗行星是由什么组成的，肯定不是原子，因为它比钻石中的电子还要小。在普通物质的原子中存在一整个文明社会，这个发现至少会让帕尔默获得诺贝尔物理学奖，以及全世界的赞誉和无尽的财富。这位英雄具有可贵的品质，他从未想过将这一科学发现公之于众，无论是在《原子侠》第4期和第19期、《美国正义联盟》第18期，还是在《勇敢与无畏》第53期里。

虽然漫画书声称原子内部存在微观世界纯属幻想，但量子力学描述的原子内部世界也很神奇。在原子内部的“大片空间”中存在着与电子运动有关的“物质波”，这些物质波是理解原子物理学的关键。

如果你知道的所有事都是错的，你该怎么办？

现在到了我们深入研究原子世界的时候了。接下来我会讲述一些物理学理论，请大家耐心读下去。当然，我们很快又会回到漫画书的讨论上来，但我们需要先了解一些背景知识，才能理解为什么一些物理学家认为存在平行宇宙和无限多个地球。

19世纪末，越来越多的实验证据表明，我们在前几章中介绍的物理学原理并不能解释原子和光的所有现象。例如，物理学家一直没搞清楚为什么热的东西会发光。把铁拨火棍放在一个火烧得很旺的壁炉里，当它被烧热之后，一开始会发出红光，后来又发出白光。基于前一章中介绍的麦克斯韦的电磁学理论，物理学家们知道，每个原子中的电子会随着拨火棍变热、发光而来回振动，振动频率越快，电磁辐射的频率也越快。早在19世纪，科学家们就发明了用于测量紫外光和红外光的先进技术，这两种光分别位于可见光谱的两侧，我们的眼睛看不到它们。有了这项技术，他们就能精确地测量出当物体的温度升高时，会发出多少特定波长的光。他们发现了两个奇怪之处。第一，发射出多少特定波长的光只取决于物体的温度，而与其他特性没有任何关系。不管物体的成分、形状或大小如何，决定发射光谱的唯一因素就是物体的温度。第二，发射光的总量并不是无限的，这也只取决于物体的温度。后一点成为推动量子力学发展的第一块多米诺骨牌。

一个热的物体发出的光只取决于它的温度，这个事实让我们没办法不劳而获。若两个材质不同但温度相同的物体发射不同的光谱，它们之间就会发生净能量转移，并产生有用功，但这个过程没有任何热量的移动。这显然违反了热力学第二定律，但事实证明，这个现象并不能这样解释。发射光谱只取决于温度，这带来的一个实际好处就是，我们可以建立一个用发射光的强度和波长来测算普通温度计无法度量的温度的函数。太阳表面的温度（约6093摄氏度）和大爆炸的微波背景辐射残留物的温度（绝对零度以上3度）就是这么估算出来的，即通过观测它们的发射光谱得到的。

发光物体发射出的能量并不是无限的，这个发现对物理学家来说并不意外。但令他们深感不安的是，根据麦克斯韦的电磁学理论，光能可以无限增加！麦克斯韦方程组能计算出低频率下的发光量，而且计算结果与观测结果完全一致。当一个热的物体的发光频率增加到光谱的紫外线部分时，光的强度会达到峰值，之后则会随着频率增加而减弱，根据能量守恒定律或常识我们都能得出这样的结论。然而，根据麦克斯韦方程组和热力学理论运算得出的曲线表明，光谱的可见光部分以上的光强会变得无限大。这被称为“紫外线灾难”，尽管这只是理论运算的结果。许多科学家对这个计算进行了一次又一次的检查，但始终找不到哪里出了错。显然，从物理学角度看，确实有些地方不对或者不完整。

麦克斯韦方程组在其他情况下都没有问题（基于这一理论，人们在1895年发明了无线电，进一步推动了电视以及各种形式的无线通信的发展），因此人们一直认为这个方程组应该不存在什么根本性的问题。相反，科学家们认为，问题出在把麦克斯韦的理论应用于发光物体的振动原子上。于是，很多人试图寻找其他方法和理论，来解释发光物体的光谱。我们分析一下，为什么光谱只依赖于物体的温度这件事很重要。如果电磁学理论无法解释少数物质的个别特征，可能有点儿尴尬，但并没有大碍。但是，如果它没办法解释所有物质的共有属性，就说不过去了，必须想办法解决。

1900年，陷入困境的理论物理学家马克斯·普朗克为了解释发光体的发射光谱，在万般无奈之下采取了自己唯一能采取的行动——作弊。他先根据实验得到的光谱能量分布曲线写出相应的数学表达式；一旦他知道自己想要的公式是什么样子，接下来只需找到物理上的论据就可以了。在尝试了各种各样的方案之后，他想出的唯一的解决办法就是给他的公式加上限制条件，对于发光体的原子能量做出规定。普朗克提出，任何原子中的电子只能具有特定的能量。根据“多少”（how much）这个词对应的拉丁语词，这个理论被称为“量子物理学”（quantum physics）。相邻能量级之间的差别实际上非常小，如果挥拍打出的网球的能量是50千克·米^2/秒^2，那么原子中相邻能量级之间的差别还不到100万亿分之一千克·米^2/秒^2。以后你若在广告里听到商家吹嘘说，汽车设计或洗涤剂方面的创新实现了“量子飞跃”，就要心中有数了。

普朗克在计算过程中引入了一个新的常量，它是一个可调参数，用“h”来表示。他认为，一个原子的能量变化只可能是$E=hf$或$E=2hf$或$E=3hf$等，而不可能是介于这些值中间的数字（因此原子的能量变化

值不可能是$E=1.6hf$或$17.9hf$这样的数值），其中f是指特定原子的振动频率。这就好比是，摆球的一个摆动周期是1秒或10秒，而不可能是5秒。普朗克自己也觉得很奇怪，但为了保证计算结果的准确性，他认为有必要做出这个假设。他本想找到发光物体的光谱能量分布的数学表达式后，就把h的值归零。但令他沮丧的是，每当他这么做的时候，他的数学表达式就会回到经典的电磁学理论，得出能量无穷大的结论。避免这种无意义结果的唯一方法就是靠同样荒谬的理论（至少对当时的科学家来说如此），即原子的能量值不是随机的数值，而是只能以$E=hf$为基础发生变化。由于h的值非常小（$h=660\times10^{32}$千克·米^2/秒），所以当我们研究棒球或者行驶的汽车时，从未注意到这个小小的“能量”。但原子中电子的能量级非常重要，绝对不能忽视。

原子中电子的能量值呈离散分布，没有中间值，这确实很奇怪。如果普朗克常量h大得多，对于一辆以每小时50英里的速度行驶在高速公路上的汽车而言，我们就可以想象这种能量值的离散性会导致什么后果。根据量子理论，汽车能以每小时40英里或者60英里的速度行驶，却不可能以每小时50英里的速度行驶！尽管我们可以假设汽车以每小时50英里的速度行驶，并计算出它的动能，但根据量子物理学，汽车是不可能以这种速度行驶的。如果汽车得到了一定的能量（比如一阵风），那么它的速度可以提高到每小时60英里，但前提是风的能量能够精确地弥补动能差。如果风势较弱，没有那么大的能量，就不会对汽车造成影响，汽车会继续按原来的速度行驶。只在风的能量恰好可以弥补所需的动能差时，汽车才会“接受”这个推动力并提速。速度的提高几乎是瞬间完成的，这种加速度可能会对开车的人造成伤害。对于在高速公路上行驶的汽车而言，这种情况十分荒谬，但对于原子内部的电子而言，它却是非常准确的。

我们如何理解原子中电子的能量值只能是特定的离散值呢？你必须接受一个非常奇怪的概念，事实上，与量子物理有关的所有荒谬的观点都可以归纳为一句话：任何物体的运动都会产生波，物体的动量越大，波长越短。

物体只要移动就会产生动量。1924年，物理学家路易斯·德布罗意提出，伴随运动而来的是“物质波”，物质波的波峰或波谷之间的距离取决于物体的动量。虽然物理学家研究的是物体的“波函数”，但我们会着重讨论“物质波”，这表明我们关注的是与客观物体的运动有关的波，这个物体可能是一个电子，也可能是一个人。

物质波不是一种物理波。加速电荷产生的交变电场和磁场的波是光；风吹动水面形成的涟漪，或者把石头抛进水中所形成的同心圆波纹，都是机械波；发声体产生的振动在空气或者其他介质中的传播是声波。然而，与物体的动量有关的物质波与光、机械波、声波都不一样，从某种意义上来说，它只是随着物体一起移动而已。它既不是电场，也不是磁场，既不能脱离物体，也不需要介质来传播。但是，这种物质波会产生实实在在的物理结果。当两个物体相互靠近时，它们的物质波会互相干扰，就像两块石头被扔到同一个池塘里，每块石头都会在水面上形成一系列同心圆波纹，两组波纹相遇后，就会形成相互交错的复杂图案。如果你问某个物理学家，这种波到底是什么，他会列出一大堆数学表达式，但他的潜台词是：我也不知道。这一次，我们那个“不合常理的奇迹”的说法也适用于现实世界，而不只是四色漫画！

只要物体不是以接近光速的速度运动，它的动量就可以被描述为质量和速度的乘积。马克卡车比以同样速度行驶的宝马MINICooper型汽车的动量更大，因为前者的质量比后者大。如果MINI　Cooper型汽车以比卡车快得多的速度行驶，它的动量就会更大。物理学家通常用字母“p”来表示一个物体的动量，用希腊字母拉姆达（λ）表示物质波的波长。德布罗意提出了物质波的概念（1926年由克林顿·戴维森和雷斯特·革末在实验中得到验证），它与物体动量之间的关系为，动量乘以物质波波长等于一个常数，写作$p\times\lambda=h$，这里的h就是普朗克常量。

物体动量和物质波波长的乘积是一个常数，这意味着动量越大，物质波波长越短。由于动量等于质量和速度的乘积，因此大的物体，比如棒球或汽车，动量也很大。速度为每小时100英里的棒球，其动量大约是6千克·米／秒。从$p\times\lambda=h$这个公式可知，因为h的数值非常小，所以棒球的物质波波长（即相邻两个波峰之间的距离）比一个原子直径的$1/10^{32}$还要小。因此，我们不可能在球场上看到物质波。显然，我们不可能探测到这么微小的波，而在大多数情况下，棒球的运动则完全符合牛顿的经典物理学定律。

电子的质量很小，所以它的动量也很小。动量越小，物质波的波长就越大，因为它们的乘积是个常数。在原子内部，电子的物质波波长与原子的大小差不多，所以在考虑原子的性质时，我们不可能忽略这样的物质波。当DC漫画中的超级英雄原子侠缩小到一个原子大小时，他应该会看到一些奇怪的景象。原子侠的身高小于可见光波长，正如我们看不见波长在几英寸到几英尺范围内的无线电波一样，原子侠的视力也跟

正常人不一样，而且他的体量和原子内部电子的物质波波长差不多。漫画中提到，缩小后的原子侠会把看到的一切当成太阳系来理解，因为他的大脑找不到其他有效的参照系来分析他的感官发出的信号。

我们可以想象一个绕原子核旋转的电子，受到原子核中带正电荷的质子的静电吸引力。在电子绕原子核旋转的过程中，只有某些波长符合电子振动的完整周期。当电子回到起始点，完成一周的旋转时，物质波也必须和电子出发时一样，处于同一起始点上。如果电子出发时物质波处于波峰（以此为例），在绕核旋转一周之后却处于波谷，这会比物质波的概念更不可思议且更难以理解。为了避免在完成一个周期时，波长从最大值跳跃到最小值，电子中只有某些波长符合完整的周期。由于物质波波长与电子的动量有关，所以电子的动量只能是某些特定的（离散）值。动量又与动能有关，基于物质波波长在电子绕核旋转一周后不应该变化这个要求，我们可以得出结论：原子内部的电子只具有特定的离散能量值。

这些离散能量值是受物质波波长约束的直接结果，反之，物质波波长之所以受到约束，是因为电子被束缚在原子内这一事实。在空旷的原子中运动的电子，其动量不会受到任何限制，因此它的物质波可以有任意波长。当我拨动琴弦的一端时，如果另一端不固定的，琴弦就可以随意振动。但如果琴弦的两端都是固定的，就像小提琴琴弦那样，琴弦的振动频率就会受限。当我拨动小提琴琴弦时，它只能以一定的频率振动，这取决于弦的长短、粗细以及张力。

同样，由于受到带正电荷的原子核的静电吸引力的作用，电子会在某个轨道上运动。如果以正确的方式“弹拨”它，电子的物质波就会具有更高的能量值。若电子要回归较低能量级，它必须通过跃迁来实现。由于能量是守恒的，电子在回归较低振动频率的过程中，必将释放两个能级间的能量差。由于电子的能量是离散的固定值，所以它从一个能量态到达另一个能量态的过程被定义为“量子跃迁”或“量子跳跃”。在这个过程中，电子释放的能量通常以光的形式存在，光量子又被称为“光子”（这个概念是在1905年由阿尔伯特·爱因斯坦提出的，这一年对他和物理学来说都是繁忙的一年；但是直到1926年，吉尔伯特·路易斯才创造了“光子”这个词）。

在一个玻璃管里充满某种气体，比如氖，接通电流后，电流的高能电子有可能与氖原子发生碰撞。如果高能电子的能量恰到好处，氖原子就会被激发至更高的能量态。之后，氖原子会回归低能量态，并发射出

光子，光子的振动频率取决于两个能量态间的能量差。因此，霓虹灯都具有肉眼可见的颜色。玻璃管内气体的种类不同，对应的颜色也不同。你可以使用任何气体，但只有某些元素能在可见光谱部分发生量子跃迁。如果原子受到高能光子的碰撞，被激发出多种高能态，当它们回归低能态时，就会发出多种波长的光。不同的元素具有不同的低能态和高能态，就像小提琴或吉他的琴弦由于长短、粗细和张力的不同而具有不同的振动频率范围一样。把两根相同的小提琴弦以同样的张力固定，在拨动它们的时候就会产生同样的频率范围。所以，两个相同的原子从激发态回到基态时，也会发射出波长相同的光。

因此，高能光子的发射光谱是独一无二的，就像人类的指纹一样。比空气轻的氦气之所以会被发现，就是因为我们从太阳光中探测到其标志性的发射光谱（“氦”的英文单词源自Helios，意思是希腊的太阳神）。科学家们将这种光谱与氢气和其他气体的发射光谱仔细做了比较后认为，这个范围的波长一定属于一种新元素，由此发现了氦气的存在。

任何物体的运动都会产生物质波，而且物质波的波长与物体的动量成反比。这个概念有些奇怪，但如果接受了这个概念，我们就能理解所有化学理论的基础。把两个原子紧密地结合在一起，它们之间就会产生一个化学键，从而形成一个新的基本单位——分子。为什么原子会结合在一起？一个原子中带负电荷的电子一定会排斥另一个原子中带负电荷的电子。在量子力学出现之前，对于宇宙为什么不是由彼此孤立的原子组成的，一直没有令人满意的根本性解释。

促使原子结合的因素是不同原子中电子的物质波之间的相互作用。当两个原子相距很远时，原子中电子的物质波不会发生重叠。而当两个原子靠得足够近时，它们的电子云就会交叠在一起，电子的物质波就会互相作用，形成新的波形，就像把两块石头同时丢进池塘里所产生的复杂波纹一样，这种波纹与单个石头产生的波纹差别很大。在多数情况下，这种新波形是一种高能且不和谐的噪声，就像由没有受过专业音乐训练或没有天赋的新手同时演奏单簧管和小提琴所发出的声音一样。此时，这两个原子间不会形成化学键，也不会发生化学作用。而在某些特殊情况下，两个物质波会发生干涉现象，形成一种新波形，其能量值比单个物质波要低。此时，两个原子通过物质波的这种相互作用降低了总能量，而原子一旦处于较低的能量态，就需要额外的能量（被称为“束缚能”或“结合能”）才能将它们分开。这样一来，尽管带负电荷的电子

之间有很大的排斥力，但由于电子的物质波特性，这两个原子会通过化学键结合在一起。

有人认为原子的离散能量值来自电子特定的运行轨道，与电子物质波的整数倍波长相对应，这个观点听起来似乎有些道理，但其实并不正确。尽管将原子比作太阳系看似很不错，但电子不太可能沿着圆形或椭圆形的轨道绕着带正电荷的原子核运动。电子在沿着曲线路径运动时，会不断加速。正如上一章所说，加速的电荷会发射出携带能量的电磁波，如果电子在运行轨道上不断发光，它的动能就会逐渐变小，最终电子会在不到一万亿分之一秒的时间内被吸入原子核。这样一来，就没有哪个元素是稳定的了。如果电子真的在环形轨道上运行，就不会有化学反应，也不会有任何物质。

然而，只有一部分物质波波长与离散能量级对应，这一点仍然是正确的，但我们用以得出这个结论的模型只能算一个还不错的比喻，而不是过硬的理论。我们不应该把电子视为具有特定物质波波长、沿着环形轨道运行的点粒子，因为海森堡和薛定谔的全量子理论告诉我们，电子有一个波函数，我们将在下一章中做具体探讨。对于一根小提琴琴弦来说，波到底位于琴弦上的哪个位置，探究这样的问题是没有意义的。同样地，因为原子中电子的物质波会延伸到原子之外，所以我们也不能精确地测量出电子的位置或者运动轨迹。当原子中的电子物质波从一个波形变成另一个波形时，它会发射或吸收光。正如我们将在下一章中看到的，这些物质波将带来无限的地球危机！

第22章 平行宇宙究竟在哪儿？

《展示橱》第4期讲述了巴里·艾伦如何获得超能力，并成为白银时代的闪电侠的故事，这个关于英雄出身的故事反映出白银时代和黄金时代的超级英雄故事都是一脉相承的。巴里·艾伦这位警察局的科学专家，在自己的实验室里一边享用着牛奶和馅饼，一边翻看《闪电侠》第13期，封面正是黄金时代的闪电侠。这时他突然被闪电击中，身上还沾上了化学药剂，但他从此拥有了以光速奔跑的能力。获得超能力之后，他马上就开始思考如何利用超级速度来帮助其他人。他从之前读的那些关于闪电侠的漫画中获得了灵感，于是穿上红黄相间的制服，以白银时代的闪电侠身份开启了惩恶扬善的生涯。这种故事放在今天会被贴上“后现代主义”的标签，但那时大家只是认为其“情节设置还算有新意”。在20世纪60年代的《闪电侠》漫画所描写的巴里·艾伦生活的现实世界中，20世纪40年代的闪电侠（穿着不一样的制服，因一场不一样却同样让人难以置信的化学事故而获得了超能力）是巴里读过的漫画书里的角色。

对于白银时代的闪电侠来说，黄金时代的闪电侠（他的真实身份是杰伊·加里克）是个虚构的人物，但这一切在1961年9月发生了改变。那个月出版的《闪电侠》第123期“两个世界的闪电侠”（见图30），揭示出白银时代的闪电侠和黄金时代的闪电侠都是客观存在的，但他们分处两个平行的地球上，被一道“振动屏障”分隔开。在这个故事中，白银时代的闪电侠（巴里·艾伦）的神速力振动频率，刚好与2号地球的振动频率一致，于是他穿越到那里，他的偶像——黄金时代的闪电侠（杰伊·加里克）就生活在那里。在巴里意识到自己身处黄金时代超级英雄的世界后，他遇到了杰伊并做了自我介绍。“正如你所知，”警察局的科学专家巴里解释说，“如果两个物体以相同的频率振动，它们就可以存在于相同的时空里！”显然，巴里·艾伦作为法医科学家更出色一些，而不是作为一名理论物理学家。不管两个物体的振动频率如何（正如我们在第二部分中看到的，固体中的原子会振动仅仅是因为它们具有一定的温度），它们都不可能同时出现在同一个地点（除非我们讨论的是像光子这样没有质量的粒子）。



© 1961 National Periodical Publications DC)

图30 在《闪电侠》第123期的封面中，读者第一次得知除了我们存在的世界之外，至少还有两个世界

“两个世界的闪电侠”这个故事的作者是加德纳·福克斯，他创作了许多黄金时代的连环漫画。他提出一个理论，用来解释白银时代的闪电侠如何能读到关于2号地球上的闪电侠的漫画书，这也揭示出他本人的工作习惯。正如巴里所说，“一个名叫加德纳·福克斯的作家讲述了你的冒险故事，他说这是他梦中的经历！显然在福克斯睡着以后，他的思维被调到了2号地球的频率！这就解释了他是如何构思出闪电侠这个角色的！”[1]白银时代的闪电侠和黄金时代的闪电侠的这次对话大受漫画迷们的欢迎，从那之后白银时代的闪电侠越发频繁地穿过振动屏障，去往2号地球。（黄金时代的闪电侠居住的地方，尽管在时间上出现得更早，却被称为2号地球，而白银时代的闪电侠所在的世界则被指定为1号地球。）在故事的结尾处，20世纪60年代白银时代的美国正义联盟（包括闪电侠、绿灯侠、原子侠、蝙蝠侠、神奇女侠、超人和其他超级英雄）与2号地球上的20世纪40年代的美国正义协会（包括闪电侠、绿灯侠、原子侠、蝙蝠侠、神奇女侠、超人和其他超级英雄）相遇，并展开了一系列冒险的旅程。这两个超级英雄战队的相遇备受读者欢迎，很快就成为一年一度的传统桥段。但是随着美国正义联盟和美国正义协会相遇次数的增加，读者们逐渐失去了新鲜感。于是，美国正义联盟开始去往其他平行地球，比如3号地球。在那里，美国正义联盟黑化为美国犯罪联盟（大概是为了与欧洲的犯罪组织区分开）。惊奇队长比利·巴特森大喊一声“沙赞”即可变身为超级英雄，他与其他队员一起住在S号地球上，美国正义联盟后来也造访了这里。[2]除此之外，还有X号地球、4号地球等。最终，“多元宇宙”成了对这个无穷无尽的宇宙最恰当的描述。

在美国正义联盟的故事中，关于白银时代与黄金时代的超级英雄的相遇桥段常被冠以“2号地球危机”或“X号地球危机”之类的标题。但后来，故事脉络变得过于错综复杂，同时有多条线在推进。1985年，DC漫画公司试图规范多元宇宙。在为期一年的系列故事里，众多的宇宙被一一简化，这个系列被称为“无限的地球危机”。DC漫画的编剧和编辑借此机会清除了那些不太受欢迎的世界，而把所有最受欢迎的超级英雄全都集中到一个地球（刚好是白银时代的超级英雄所在的1号地球）上。对于漫画迷来说，“无限的地球危机”之所以让人难以忘怀，是因为闪电侠巴里·艾伦和超级少女死了（他们为阻止企图摧毁1号地球的邪恶敌人而壮烈牺牲），超级小子也被从超人的故事中抹去了。与大多数漫画书的结局不同，巴里·艾伦和超级少女再也没有复活（在本书英文版的第一版出版后和第二版出版前的这段时间，他们又都回归了），打击

犯罪的冒险故事再次从克拉克·肯特的少年时期讲起。

虽然这些听上去似乎都很荒谬，但多元宇宙可能是漫画书正确表述的为数不多的物理学概念之一！[3]在《展示橱》第4期出版的4年前，作为对量子力学方程的一种解释，物理学家正式提出多元宇宙这个概念。我再强调一次，一些科学家认为多元宇宙的概念在理论物理学中是站得住脚的。目前的理论物理研究表明，如果有不同的地球存在，它们会与漫威漫画的描述非常相像，你在过往发生的微小变化，也会影响与现实世界没有交集的另一个世界，不管你的振动频率如何。

英雄所见略同

到目前为止，在本书中，我们已经探讨了物理学家所定义的“经典力学”：只要知道施加于这个物体的外力，你就可以推算出它的各类数据（比如把梯子靠墙放，与墙面最大成多大角度仍能使其保持平衡），包括运动速度（比如梯子倒下时的速度）。一个宏观物体在外力的作用下如何运动，取决于我们熟悉的牛顿第二定律（$F=ma$）。对于宏观物体（比如汽车、棒球或人）而言，对其运动起主导作用的力量是重力和电磁效应。在讨论电力和磁力时，我们仍然可以利用$F=ma$这个方程，其中左边的F可以是静电吸引力、静电排斥力，或移动电荷受到的磁场的作用力。“量子力学”作为物理学的一个分支，与“经典力学”的区别就在于，当人们讨论电子、原子以及它们的物质波时，$F=ma$不再适用。

物理学家曾非常努力地“修正”经典物理学（对牛顿力学定律进行微调，而不是完全颠覆），使之也适用于原子，但他们后来不得不承认：原子内部适用一种不同的“力学”。也就是说，需要建立一个新的方程来描述外力对原子的影响。经过大约25年的反复尝试，沃纳·海森堡和欧文·薛定谔几乎同时得出了适用于原子的方程。

大家不要害怕，我们不会讨论海森堡和薛定谔的方程涉及的任何数学运算。我将在下文中列出薛定谔方程，但我们只要像观看动物园里罕见的动物一样看看它就好。海森堡的研究中用到了线性代数，薛定谔用的则是复杂的偏微分方程。要想把他们的方程解释清楚，就会违反我许下的诺言：本书不会用到比高中代数更复杂的数学知识，这个规矩直到现在还未被打破。

然而，关于数学，我在这里要做两点说明。第一，海森堡和薛定谔可以利用现成的数学知识，这与艾萨克·牛顿不同，牛顿为了运用他的运动定律，发明了微积分。海森堡和薛定谔用以建立方程的线性代数和偏微分，数学家们早在18世纪和19世纪就发明出来了，到1925年已经发展得相当成熟了。

数学家们常常会为了构建一套规则而发明一个新的数学分支或分析方法，并通过逻辑推理得出相应的约束条件和原理。后来，物理学家们发现，在描述自然世界的行为时，那些曾经只是为了满足数学家好奇心的理论，变成了他们不可或缺的研究工具。例如，1915年爱因斯坦建立广义相对论时，如果没有伯恩哈德·黎曼于1854年提出的椭圆几何学理论，他的研究难度将大大提高。物理学家利用前人取得的数学成果去推动自己的研究，这样的事屡见不鲜。

海森堡和薛定谔采用的数学方法虽然隶属不同的数学分支，但1926年薛定谔经过认真检验后发现，他们俩的方法在数学上是等效的。因为他们描述的是相同的物理现象（原子、电子和光），而且基于相同的实验数据。虽然他们使用的数学语言迥异，但最终被证明是同一个理论，这也没什么可奇怪的。

薛定谔和海森堡在同一年各自独立地对量子世界做出了相同的阐释。随着时间的推移，某些想法会同时在多个人的头脑中“开花结果”，这样的事不仅仅发生在理论物理学领域，在电视节目和好莱坞电影中也经常出现。《动作漫画》中的超人取得成功之后，包括国家漫画出版公司在内的其他出版社纷纷推出超级英雄题材的漫画，希望能再创奇迹。然而，大量文献记录表明，电影工作室和电视网络会各自独立地做出相似的决策，决定创作某类题材的作品，比如海盗题材的电影或医生题材的电视剧。这种同步性也体现在漫画作品上，比如《X战警》和《末日巡逻队》。1964年3月，在DC推出的漫画《我最伟大的冒险》第80期里，一支非典型意义的超级英雄战队（机甲人、底片人以及必不可少的女性成员——弹力女孩）登场了，他们所具有的特殊力量致使他们遭到主流社会的排斥。该战队的领导者是一位坐在轮椅上的天才，被称为“首席”。他说服战队成员团结起来匡扶正义，与犯罪分子进行持续不懈的斗争。3个月后，漫威推出《X战警》第1期，其中有一群变异人（镭射眼、野兽、天使、冰人和不可或缺的女性成员——惊奇女孩），他们拥有的特殊力量也导致他们被主流社会排斥。X战警的领导者也是一位坐在轮椅上的人，拥有心灵感应能力，被称为“X教授”。他也说服

战队成员团结起来惩恶扬善，与犯罪分子斗争到底。

尽管存在一些区别（X教授的头上和脸上都是光溜溜的，而首席则长着红头发和大胡子），但这两个系列在构思上惊人的相似之处还是让许多漫画迷产生了怀疑：《X战警》是不是抄袭了《末日巡逻队》？然而，对这两种漫画创作者的访谈表明，它们相似的情节更可能是一种巧合。漫画在付印和上市销售之前，需要经历漫长的生产过程，包括构思、创作、绘制、着色、配文等，因此当《末日巡逻队》上市的时候，《X战警》应该也在印刷了。

另一个典型的案例是DC的《沼泽怪物》（由莱恩·韦恩编剧）和漫威的《类人体》（由格里·康韦编剧），这两部作品在1971年的同一个月内先后上市。韦恩和康韦都坚称他们的作品都是独立创作的，而他们是室友这件事也纯属巧合。

如果微观物质的行为受到其物质波的影响，原子物理学就需要建立物质波方程，描述这些波在时空中是如何演化的。1925年，薛定谔（如图31）基本上“猜”出了正确的数学表达式。

$$-\hbar^2/2m\ \partial^2\Psi/\partial x^2 + V(x, t)\Psi = i\hbar\ \partial\Psi/\partial t$$



Photograph by Francis Simon, courtesy of AIP Emilo Segre Visual Archives, Francis Simen Collection

图31 欧文·薛定谔，理论物理学家，诺贝尔奖获得者，花花公子。他提出的薛定谔方程成为量子力学以及现代科技生活的基础

根据薛定谔方程，科学家们建立了一个用以理解光与原子相互作用的框架，这也是薛定谔建立物质波方程的目的所在。在根据薛定谔方程获得的关于微观物质本质的洞见的基础上，下一代科学家发明了晶体管、激光、原子弹和氢弹。如果没有量子理论，想发明晶体管和激光几乎是不可能的。又经过了一代人，CD播放机、个人电脑、手机和DVD播放机也出现了，而且还有更多。如果没有晶体管或激光，这些都不可能出现；如果没有薛定谔方程，晶体管和激光也不可能出现。所以，薛定谔的肖像曾被印在他的祖国奥地利的1000先令的纸币上。对于我们习以为常的21世纪的生活方式，薛定谔确实是当之无愧的缔造者之一。

上文中我说薛定谔“猜”出了物质波方程，用“猜”这个字眼儿也许有点儿过分了。欧文·薛定谔凭借其相当敏锐的物理直觉发现了一个可以描述原子行为的新方程，而普通人可能永远也无法理解像牛顿或薛定谔这样的天才到底是怎么做到的。形成一种新的自然理论所需的洞察力也许要强于艺术创作需要的能力，因为新的物理学理论不仅必须是独创的，还要经过数学方法的验证，且与实验结果要保持一致。如果与实验结果冲突，即使再优雅的理论也毫无价值。

虽然我们无法知道薛定谔是怎么取得这些成就的，但我们知道他是在哪里以及在什么时候做到的。科学史学家告诉我们，薛定谔于1925年提出了他的著名方程，当时他借住在朋友位于瑞士阿尔卑斯山的小屋里，享受他悠长的圣诞假期。我们还知道他的妻子没有住在那儿，但他也不是独自一人。遗憾的是，我们不知道那时和薛定谔待在一起的是他众多女友中的哪一个。

说到这里，你们可能想重新审视一下图31的薛定谔照片。对于“这个人为什么笑”，你们可能也有了新的答案。当然，欧文并不是那种传统意义上的万人迷。如果你思考过有没有哪个数学公式能够增加你对于异性的吸引力，薛定谔方程可能是一个很好的选择。此外，本章中对于量子物理学的简要介绍，也会增加你的异性缘。当然，关于超级英雄漫画背后的科学原理的渊博知识，会赋予你致命的异性吸引力！

两个世界里的薛定谔的猫

薛定谔方程就相当于电子和原子层面的$F=ma$。在确定了外力F的情况下，我们可以通过牛顿第二定律计算出加速度a，以及物体的速度和位置。同样，已知电子的势能V，我们就可以用薛定谔方程计算出单位体积Ψ^2中的电子出现在某处的概率。一旦知道了电子出现在某处的概率，就能计算出电子的平均位置或动量。考虑到平均值是唯一可靠的量，这实际上是一个理论中最重要的部分。

平均值对于量子物理学的重要程度，不同于我们在第13章中提到的热力学中的平均值。热力学之所以要用到一个物体中原子的平均能量，仅仅是因为它比较方便。从原则上说，如果我们有足够的时间和计算机内存，或者拥有闪电侠或超人的速度，就可以追踪房间内每一个空气分子的位置和动量。据此我们可以计算出单位面积的墙壁瞬间受到的力的大小，这个结果与压力测量的值是一样的。此外，在量子理论中，物质的波动性限制了我们的测量能力，所以平均值是我们能得到的最理想的结果。

为什么说物质的波动性让我们很难准确测量出一个原子中电子的精确位置呢？我们可以想象一根两端被固定的小提琴琴弦，它有一个基本振动频率和几个较高的泛音。假设琴弦以一定的频率振动，但是我们听不到这个频率。如果琴弦振动的速度快到让人看不清它在动，我们该如何确认琴弦是否在振动呢？一种方法是触摸琴弦，用手指感受它的振动情况。如果我们的指尖足够敏感（像超胆侠一样），甚至可以确定琴弦刚才的准确振动频率。

我之所以说“刚才”，是因为一旦我们的手接触到琴弦，它就不再像之前那样振动了。它要么停止振动，要么以不同的频率振动。也许我们可以让手指靠近琴弦，而不是直接接触，来确定振动频率。通过这种方式，我们可以感受到由振动的琴弦引起的空气振动。为了提高测量的准确程度，我们必须让手指离琴弦非常近才行。但是，空气的振动将从我们的指尖传递到琴弦上，这也会改变它的振动模式。我们的指尖离琴弦越远，反作用力就越弱，这使得我们无法准确判断琴弦的振动频率。

原子内电子的物质波对扰动同样敏感，对一个电子位置的测量将使电子的物质波受到影响。关于“观察者”在量子物理学中所起的作用我们已经说了很多，但如果你的观察对象比观察工具还要小，你就会对观察对象形成干扰。

量子理论可以精确地测量出放射性元素的原子有半数发生衰变所需

要的时间（这就是所谓的“半衰期”），但不能准确预测出单个原子何时发生衰变。下面这个例子可以清楚地说明这个问题：我从口袋里拿出一枚25美分的硬币，把它抛起来一次（只抛一次），头像面朝上的可能性有多大呢？你很可能会凭直觉回答头像面朝上的概率是50%，但你又不敢确定。对那些认为概率是50%的人，我会对他说：请证明给我看。你很难做到，因为只要我们生活在一个硬币有正反两面的世界里，抛一次硬币就证明不了这个结论。如果你抛1000次（或者一次抛1000枚硬币），你就会发现，对于一个质地均匀的硬币，头像面朝上的概率非常接近50%。但是，概率对于孤立事件没有什么意义，而薛定谔方程所能提供的信息就只有概率，这让那些习惯了像钟表一样精密的牛顿力学的老一代物理学家感到很不适应。此外，量子物理学家还设计出一个概念性实验，打开了潘多拉的盒子（盒子里有一只猫）。

他们设想了这样一种情况：一个盒子里装着一只猫、一瓶密封的毒气，以及一个装着放射性同位素的小盒子。放射性元素的半衰期为一个小时，这意味着，一个小时后放射性同位素有50%的概率会发生衰变。放射性同位素在衰变的过程中会释放出α粒子（又称氦原子核），这种粒子一旦击中装着毒气的瓶子，瓶子就会破裂。因此，一个小时之后瓶子破裂导致猫被毒死的概率为50%，而瓶子完好无损，猫也好好活着的概率也是50%。根据薛定谔方程，在一个小时的时间里，猫可以被描述为“一只死猫和一只活猫的叠加（或平均值）”。而一个小时后，我们打开盒盖向内看去，“猫的波函数的平均值”就会变成一种情况：要么是猫活着，要么是猫死了。但只要不打开盒盖，我们就不知道确切的结果。而如果盒子是透明的，我们就无法确定外界的光线会不会干扰放射性同位素的衰变过程（你应该还记得观察者有时会对量子系统造成影响）。许多物理学家认为这个解释存在一定的缺陷（《美国正义联盟》第19期提到，最近关于光的量子纠缠的实验表明事实确实如此），为了解决问题，他们进行了大量的思考和研究。下文介绍的是一个激进的解决方案，闪电侠和超人就是用这个方法穿越到其他“地球”的。

1957年，物理学家休·埃弗莱特提出，当猫被关在盒子里时，存在着两个几乎完全相同的平行宇宙：在一个宇宙里，一个小时之后猫还活着；而在另一个宇宙里，一个小时之后猫死了。所以，当我们打开盒子向里看的时候，波函数不会坍塌，在那之前猫也不是有50%的概率死亡，有50%的概率活着。事实上，在一个小时之后，我们所做的事情只是确定我们生活在哪一个宇宙里，是猫死了的那个宇宙，还是猫活着的那个宇宙。事实上，由于至少有两个可能的结果，与这些可能的结果相

对应，就会存在许多个宇宙。与某个量子事件的两个可能结果相对应的两个地球将以不同的方式演化。如果另一个地球是刚刚分化出去的，它和我们原本的地球就会很相像。如果分化发生在很久以前，那么这两个地球可能会大相径庭。所以，第二个地球的演化历史可能跟我们的地球很像，但也可能存在很大的差异。[4]

因此，对于漫威漫画中的“如果……会怎么样”的问题，以及DC漫画中不同的地球，量子理论都提供了物理学依据。在一个地球上，杰伊·加里克因实验室事故而吸入“重水蒸汽”，获得超级速度，从此他以闪电侠的身份与他的战友们一起惩恶扬善。而在另一个地球上，警察局科学家巴里·艾伦因被雷电击中而获得超级速度，从此以闪电侠的身份与他的美国正义协会的战友一起匡扶正义。在第三个地球上，又一个极速者——大反派强尼·快克伙同美国犯罪集团犯下了一系列罪行。从原则上说，存在无限多个地球与量子效应的所有可能的结果相对应，但这一理论认为，在这多个地球之间通常不存在任何联系。但是对于闪电侠这种拥有超级速度的人来说，往返于这些地球之间是相当容易的事，其发生频率与读者买杂志的频率差不多。

然而，对于大多数物理学家来说，休·埃弗莱特的理论导致了另一种无限的地球危机。在他们看来，用多元宇宙理论解释薛定谔的猫的问题，无异于饮鸩止渴。然而，这个理论不存在逻辑上或物理学上的矛盾，也没有人能够证明它是错误的。

那些觉得这个理论存在问题的物理学家认为，这种自然理论只能预测出概率，而不能确切描述多元宇宙。多元宇宙模型自问世以来，一直被当成量子理论的疯疯癫癫的“阿姨”，直到不久前还被锁在假想的阁楼里。举个例子，我在本科以及研究生阶段学习量子力学时，从未接触多元宇宙理论。我是偶然邂逅这个理论的，源于我在研究生办公室里看到的一本书，是布莱斯·德威特和尼尔·格雷厄姆于1973年写作的《关于量子力学的多元宇宙的解读》。我把自己该做的作业放在一边，读起了这本书，我因此认为在某处可能存在着另一个詹姆斯·卡卡里奥斯，他按时完成了作业（这个发现对我来说并没有什么实际的好处）。

虽然现在还没有物理学家能构建出多元宇宙模型，但有些理论物理学家都认同一种理论，即弦理论。

为什么超人无法改变历史

在薛定谔方程建立之后的几年里，科学家们找出各种方法来描述电子的物质波与量子层级的电场和磁场的相互作用（被称为“量子电动力学”或QED），以及细胞核内的夸克物质波（被称为“量子色动力学”或QCD）。理论物理学还未完成的一个目标是，如何将由引力物理学所支配的宏观世界与量子世界结合起来。关于引力的作用，有一个非常好的理论，那就是爱因斯坦的广义相对论。关于电子的量子性质，也有一个非常好的理论，那就是量子电动力学。但是，把两大理论结合成一个整体，至今还没有哪个科学家能做到。最接近量子引力理论的就是弦理论。

简单地说，弦理论认为物质本身就是一种波或者能量弦线，这些“弦”是宇宙万物最基本的组成单位。目前，许多物理学家对弦理论持怀疑态度。他们的理由之一是，为了让方程成立，弦理论只能在十一维时空（十维空间和一维时间）中起作用。这确实有点儿尴尬，因为我们生活在三维空间里，没有人见过其他维度。[5]弦理论家对此的解释是，确实存在十一维度时空，但其中的七维空间被卷曲成球形，直径小于10^{-33}厘米（这个长度被定义为普朗克长度）。物理学家对弦理论持怀疑态度的另一个理由与额外维有关：探测这么小的尺度需要更高的能量，目前或者下一代粒子加速器都无法达到。如果没有实验验证，判断一个方程是否正确的唯一方法就是优雅的数学。这可能会让我们误入歧途，虽然经典力学和量子力学中确实蕴含着一定的数学之美，但我们没有理由认为，大自然会真的在乎我们建立的方程美不美。然而，弦理论是量子引力理论唯一的希望，我们只有继续研究，才能知道它是否成立。

研究量子引力的物理学家们援引了多元宇宙的假设，以解决他们在与时间旅行有关的计算中遇到的逻辑矛盾。最近，一些科学家声称时间旅行从物理上讲是不可能的，在现实中也不太可能成真。著名的“祖父悖论”反映了人类穿越到过去会遇到的棘手问题。如果一个人真能回到过去，在他父亲出生之前他就能先杀了他的祖父，从而阻止他自己的出生；但要成功实现这个目标，他又必须降生在世上。为了找到解决这一难题的方法，现代理论物理学家重拾休·埃弗莱特的多元宇宙理论。如果真的存在无数个不同的宇宙，（理论家们认为）当你穿越回过去的时候，时空的严重扭曲将使你进入一个平行于你原本所在世界的宇宙。你可以杀掉你的祖父，但无须担心这样做会影响你自己的存在，因为你的

祖父在你所在的那个世界里是安全的，不会受到你在另一个世界里的所作所为的影响。

早在1961年《超人》第146期“超人最伟大的壮举”里，就出现了祖父悖论、多元宇宙、时间旅行等现代物理学概念。在这个故事中，超人为了帮助罗丽·陆曼瑞思（与他有“特殊关系”的亚特兰蒂斯美人鱼，虽然她是个女孩，也是超人的朋友，但不是他的女朋友），打算穿越到过去。罗丽请求超人帮她阻止亚特兰蒂斯沉没，这是发生在数百万年前的事。超人认为，他曾多次试图改变历史（在之前的《动作漫画》和《超人》里均有体现），但都以失败告终。然而，罗丽的苦苦恳求还是让超人决定放手一搏。我们知道，要想突破音障，就必须施加很大的作用力，速度也要大于每小时1207千米。DC漫画中提出，如果作用力更大、速度更快，就可以穿过“时间障碍”（闪电侠和超人都能达到这样的速度，从而在过去和现在之间来回穿梭）。超人来到了公元前8000000年，距离海岸不远的小岛就是先进的亚特兰蒂斯文明的所在地，但一场破坏力巨大的海底地震引发的海啸即将彻底摧毁这一文明。超人跑到另一个位于安全地带的小岛，这是另一个先进文明的所在地。我们从未听说过这个古老的文明，故事里对它也未做介绍。超人从这个岛上的一栋即将被拆除的建筑物上拿走了一些“奇怪的金属”，用它们制造出一台巨大的起重机，把整个亚特兰蒂斯岛吊起来，安置于第三座安全的荒岛上，使其躲过灭顶之灾。（至于这种金属是由什么元素构成的，能让起重机具有负载整个亚特兰蒂斯岛的强度，我们就不得而知了。）

与之前种种失败的尝试不同，这一次超人成功地改变了历史的进程。于是，他决定在返程的途中多停靠几“站”，借此机会“纠正”各种历史事件。他拯救了在古罗马斗兽场里快要被狮子吃掉的基督徒[6]，即将被英军绞死的内森·黑尔，在小巨角河战役中几乎全军覆灭的卡斯特骑兵团，并出现在1865年4月14日的福特剧院林肯遇刺的地方。如图32所示，约翰·威尔克斯·布斯准备刺杀林肯总统，他喊道：“这就是暴君的下场！”就在他准备开枪的那一刻，一双能捏碎钻石的手抓住了他的手枪。后来，超人就像走进了历史糖果屋的孩子，决定去拯救他的父老乡亲——氪星上的人们。因为他失去了氪星太阳（Rao）的红色光线赋予他的超能力（此时他的惊人能力来自于地球绕之运行的黄色太阳），超人决定用沉船打造一艘太空战舰，把氪星人都运送到其他星球上去。他通过超级视线，看到他的父母带着还是婴儿的卡尔—艾尔来到一颗新的行星上。超人突然意识到自己不经意间创造了一个悖论：如果他的父母没有把还是婴儿的他送到地球上，他又怎么穿越回去拯救他们呢？



© 1961 National Publications Inc. (DC)

图32 超人穿越时空，从约翰·威尔克斯·布斯的枪口下救出了亚伯拉罕·林肯。他真的做到了吗？

当他回到1961年时，超人惊奇地发现历史课本并没有被改写，如图33所示。林肯在福特剧院被枪杀，内森·黑尔和卡斯特骑兵团也未能摆脱死亡的命运。超人不明白这是为什么，因为“（历史）书上写的肯定是事实啊”。当再次开启时空之旅时，超人来到另一个地球上（见图34），那里的历史书忠实地记录了超人在纠正“历史错误”方面所起的作用。



© 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

图33 在与图32同一个故事里，超人意识到，尽管他穿越时空完成了“伟大壮举”，历史却并没有被改变

太神奇了！超人早在1961年就发现了理论物理学家在2001年才发现的东西：只有借助量子力学中的多元宇宙理论，时间旅行才有可能成真。超人确实完成了这些惊人的壮举，改变了历史的进程，但这些都发生在另一个宇宙中，而不是他所在的世界里（见图34）。在漫威漫画《复仇者联盟》第267期里出现了类似的故事，邪恶的时间之王——征服者康为了打败超级英雄，频繁地进行时空穿梭，结果制造出多个地球。这是漫画领先于物理学的范例之一。



© 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

图34 超人来到1961年，发现量子理论学家最近才提出的一种假设——穿越时间会把人带到不同的平行宇宙中去

[1]虽然巴里的解释并无令人兴奋之处，但白银时代漫画书的常见做法就是，只要不是问句，句末的标点就一定是感叹号！

[2]此时，DC漫画公司赢得了与福塞特公司旷日持久的官司，后者成功打造了惊奇队长等漫画角色，但侵犯了超人的版权。这场官司差点儿导致福塞特公司破产，DC漫画公司则买到了惊奇队长的版权。显然，以后DC漫画公司不用再担心惊奇队长与超人漫画的不正当竞争了，也不用担心超人漫画的销售了。

[3]这一次，使用感叹号是有道理的！

[4]《动物侠》第32期完美地重现了“薛定谔的猫”这个实验。为了充分理解这个实验，你最好从第27期看起。

[5]除了米克斯杰兹皮特先生、蝙蝠螨、莫比等捣蛋鬼之外，奇异博士可能也见过其他维度。在《奇异故事》第129期里，有人警告他：“小心特里伯诺！第六维度的暴君！”

[6]与普遍的看法不同，在古罗马丧命的多数基督徒都死在马克西穆斯竞技场，而不是斗兽场。

第23章 幻影猫为什么能够隧穿？

除了能以极快的速度奔跑，闪电侠还可以控制他体内的每个原子的运动状态。在《闪电侠》第116期和第123期里（见图30），他首次展示了这种本领，此后我们能常常看到他运用这种能力了。《闪电侠》漫画的编剧说，通过让身体中原子的振动频率与墙壁中原子的振动频率相匹配，闪电侠就能穿过一堵坚实的墙，而且不管是他自己还是墙壁都不会有任何损伤。但是，我们无法穿过墙壁，并不是因为我们体内原子的振动频率与墙壁里原子的振动频率不一致。正如前文中讨论过的，我们体内原子的振动表现为我们的体温，这个温度范围与墙壁的温度范围有40%是重合的，所以我们体内原子的振动频率跟墙壁中原子的振动频率算是比较匹配了。

然而，在量子力学中有一个现象叫作隧穿。它指的是在适当的条件下，物体可以穿过固体屏障，但对于屏障或自身都不会产生影响。这个奇怪的理论听起来相当不可思议。根据这个理论，电子的运动跟X战警中的凯蒂·普莱德（她的超能力是穿过坚固的墙壁，见图35）或闪电侠的超能力非常相似。



© 1980 Marvel Comics

图35 《X战警》第130期中的一幕，幻影猫（这时她还不是X战警成员）用她的变异能力穿过墙壁，悄悄靠近地狱火俱乐部的白皇后

根据薛定谔方程，我们可以计算出电子从一个位置移动到另一个位置的概率。但基于常识，我们却觉得电子不可能发生这种变化。假设你站在一个露天的手球场里，球场有三面围着铁丝网，第四面是一堵水泥墙。水泥墙的另一侧是另一个露天手球场，同样是三面围着铁丝网，并与第一个球场共用这堵水泥墙。你可以在第一个球场里自由活动，但如果没有超能力，你就不可能穿过水泥墙，进入第二个球场。我们把相关条件代入薛定谔方程，其计算结果表明，你待在第一个球场里的概率很大（这一点儿也不奇怪），但你也有可能出现在第二个球场里。（啊？这太奇怪了吧！）后一种可能性不大，但不是没有。一般来说，只在概率为零的时候我们才能说这件事不可能发生，而在其他情况下只能说它不太可能发生。

这是一种量子力学效应，对古典力学而言，你不可能出现在第二个球场里。它被称为“量子隧穿效应”，事实上这个名称有些问题，因为在你穿过墙壁的时候，并没有挖出一条隧道。墙壁上没有洞，你也不是从墙下面或是上面过去的。即使你在第二个球场朝着墙冲过去，这堵墙仍然是一道坚实的障碍，你返回第一个球场的可能性也是微乎其微。但是，量子物理学家就是用“隧穿效应”来描述这种现象的。根据薛定谔方程的解，我们发现，你朝着墙冲得越快，出现在墙的另一侧的概率就越大。黄金时代和白银时代的闪电侠毫无疑问都是凭借超级速度穿过墙壁的，如图36所示。闪电侠能让自己的动能增加到一个特定的值，根据薛定谔方程，这个时候他穿过墙壁的概率几乎是百分之百。



© 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

图36 《闪电侠》第123期中的一幕，杰伊·加里克——黄金时代的闪电侠，亲身演示了量子力学中的“隧穿”过程。物体的物质波穿过坚固的屏障的可能性很小，但不是不可能。物体接近障碍物的速度越快，穿过去的概率就越大。正如杰伊指出的那样，隧穿过程不会对障碍造成任何影响

我们想象一下，两块金属板中间隔着一层真空。左边金属板上的电子就像第一个露天手球场里的人，而把它们与第二块金属板隔开的物体不是墙，而是一层真空，第二块金属板可以被视为另外一个露天手球场。将相关条件代入薛定谔方程后我们发现，第一块金属板中的电子出现在第二块金属板上的概率非常小，但不是零。电子不会穿过真空层，也没有足够的动能摆脱其所在的金属板。（这是一件好事，否则所有物体中的电子都会逃逸到各个地方，静电会变成最让人头疼的问题。）但是电子的物质波会延伸到真空层，并随着距离的增大而减弱。当光从密

度较高的介质传播到密度较低的介质中时，也会发生类似的现象。在这种情况下，光基本上都会在两种介质的交界面处被反射回来，但仍有少量的光会衍射到密度较低的介质中去。波在密度较低的介质中衍射得越远，它的能量级就越低。由于电子的波函数的平方表示在时空中的某一点发现电子的概率，因此处于一定能量级的“物质波”就表明电子出现在第二块金属板上的概率不为零。如果两块金属板的间隙不算太大（与电子的物质波波长相较而言，即不到一纳米），那么物质波到达第二块金属板中时仍然有可能具有较高的能量级。也就是说，障碍物一侧的电子会朝着障碍物移动，但多数情况下都会被反射回来。如果撞击墙壁的电子有100万个，根据墙壁高度与厚度的不同，反射回来的电子可能有990000个，有10000个电子会出现在墙壁的另一侧。

如果两块金属板的间隔非常大，即便是动能最高的电子，发生隧穿的可能性也微乎其微。人类的动量很大，所以我们的物质波波长非常小，还不到一个原子直径的10^{-24}，远小于把我们与第二个露天手球场隔开的水泥墙的厚度。然而，如果你朝着水泥墙冲过去，你的物质波仍有很小的概率会到达墙壁的另一侧。你的动能越大，穿过墙壁的概率也越大。对此持怀疑态度的人可以自己试试看，无论结果多么令人沮丧，都不要放弃。

固体中的电子以每秒超过一万亿次的速度旋转，因此，每秒钟内它们都有一万亿次机会穿过障碍物。如果朝着障碍物发射足够多的电子，只要墙不是太高或者太厚，总会有一部分电子到达障碍物的另一边。量子隧穿效应不仅在电子身上得到了验证，还是制造一种独特设备的理论基础。这种设备就是“扫描隧道显微镜”（STM），它可以直接对原子成像。如图37所示，当金属针尖离金属板表面非常近时，它就会阻拦金属板表面原子的电子溢出。当电子从金属板表面进入金属针尖时，与针尖相连的一个仪表就会显示有电流经过。隧穿效应是否会发生，主要取决于金属板表面与金属针尖的距离。二者之间的距离仅改变一个原子的宽度，就会让隧穿概率发生上千倍的变化。通过在金属表面缓缓移动针尖，仔细测量出每个位置的电流，就能绘制出金属表面每个原子的位置图。

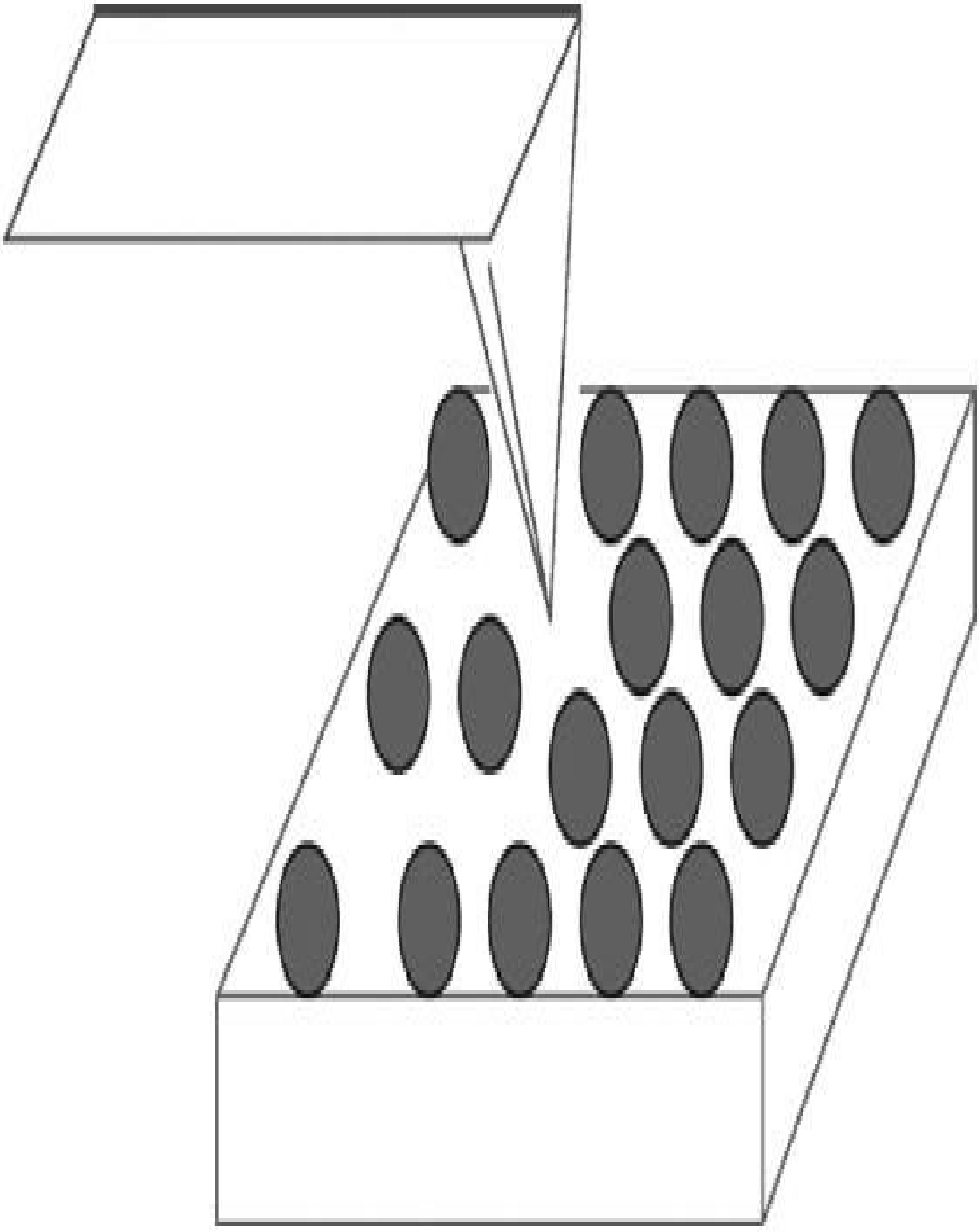


图37 图中展示了“扫描隧穿显微镜”的基本原理。金属针尖距离导体表面非常近，这里的“非常近”是指几个原子的宽度。当针尖划过表面上的原子时，原子的电子概率云可能会发生隧穿，进入到针尖里。当针尖位于原子正上方时，隧穿的概率较高，针尖处的电流相应较大。通过这种

方式，就能对金属表面的原子进行扫描和成像

图38显示的是石墨晶体（也就是我们常说的“铅笔芯”）表面碳原子的位置分布图。灰色并不代表碳原子的真实颜色（碳原子不是黑的、白的或其他颜色），它只表示金属针在某个位置测量到的电流强度，从而反映出某一点的电子密度。从图38中我们可以看出，石墨原子组成一个个六边形，就像雪花的六边形薄片一样。碳原子形成的六边形结构意味着石墨晶体包含很多层碳原子，且层层叠加。它们就像酥皮点心，一层又一层，由二维平面叠加成三维晶体。固体石墨中的平面堆叠得非常松散，很容易就能让它们分开，只需在纸上写写画画就可以做到。事实上，从图38中我们也能推断出，与所有碳原子都有4个同样牢固的键这样的物质（也就是“钻石”）相比，石墨更适用于书写。我们将在第25章对碳键的性质做进一步探讨。

y 轴
x 轴

图38 通过“扫描隧穿显微镜”观察石墨表面的原子所得到的图像，这种形式的碳被用作铅笔芯。每个白点表示一个空间区域，这一点的隧穿电流较大（参见图37）。碳原子的六边形晶格很明显，灰度用来表示隧穿电流。y轴长为1纳米，x轴为0.5纳米。在这里感谢明尼苏达大学的劳拉·亚当斯（Laura Adams）博士和艾伦·戈德曼（Allen Goldman）教授的贡献

在下一章中，我们将探讨晶体管和二极管的物理学原理。简言之，这些半导体设备事实上是一种调节和放大电流的阀门，控制电流的方法之一就是隧穿效应。正常情况下，当两个导体相互靠得很近，并被一层薄薄的绝缘体隔开时，一个导体中的电流是无法流入另一个导体的。如果我们给这个像三明治一样的物体施加一个电压，把两个导体的电子隔开的这堵“墙”的厚度就会发生变化。正如我们之前提到的，隧穿概率对于障碍物的厚度非常敏感。这样一来，就可以用隧穿效应来调节电子在设备中的流动，“隧穿二极管”是手机以及其他许多设备的组成部分。因此，量子隧穿效应并不单纯是一个深奥的理论，也不是只在原子显微镜下才能发挥作用。如果没有隧穿效应，我们生活中的很多产品都不可能出现。

当我们把量子力学理论应用于宏观物体，比如X战警中的幻影猫（见图35）时，我们会发现隧穿仍然是有可能的，尽管概率微乎其微。为什么会这样呢？假设幻影猫的质量是50千克，即便她能以足够快的速度向着墙冲过去，而且每秒钟尝试100万次，要想靠隧穿效应到达墙的另一侧，恐怕也要等到地老天荒了。显然，在这里起作用的还是我们所谓的“不合常理的奇迹”。随着我们掌握的物理学知识的增加，我们现在可以更准确地描述出幻影猫的超能力，她具有改变自己的波函数的能力，从而把隧穿概率提升至接近100%。如果你不小心把钥匙锁在了车里，这一招还挺管用的。

长久以来，漫画中一直有一个不解之谜：如果幻影猫可以穿过墙壁，她为什么没有穿过地板呢？当她发生“相变”不再是实体的时候，她还能走路吗？《X战警》第141期中交代说，幻影猫发生相变后是在空气上行走的，并不接触地面。因为她没有实际形态，所以不会受到脚下的暗门的影响。我们假设她确实可以在空中行走，也就是说，空气对她的脚施加的作用力推动她向前进。如果是这样，那么她那双仍是实体的脚又是如何随着她发生相变的身体穿过墙壁的呢？

如果她穿过固体屏障靠的确实是量子隧穿效应，那么她不会穿过地板是合情合理的。当一个电子从障碍物的一侧穿越到另一侧时，它的能量是不变的。如果它在障碍物的一侧时具有一定的能量，那么在隧穿之后它的能量仍然不变。事实上，只有当物体的能量在障碍物两侧都一样

时，才会发生隧穿。当从一个区域穿过障碍物到达另一个区域时，动能与势能的比值会发生变化。但是，即使没有穿过墙壁，当子弹或者爆炸的气流穿过幻影猫的身体时，她也可以发生“相变”。这意味着她在站立不动的时候也进行了“隧穿”，让“障碍物”从她的身体中穿过。

从技术上讲，在进行隧穿时她是不能动的，因为任何物体对她的作用力都有可能增加她的能量，无论是实木地板还是空气。但同时，她也不能失去任何能量。当她接近墙壁时，她需要做的就是正常前进，调控自己的超能力，让隧穿概率最大化，只有这样，她才能穿过这堵墙。当她想要穿过地板的时候（比如在《了不起的X战警》第4期里，她穿过近100英尺厚的金属来到地下实验室），她会先轻轻跃起，然后在她的脚接触地面时，使用这种超能力，并以稳定的动能和速度向下运动。

第24章 被固体物理学痛击的钢铁侠

如果说有哪一位超级英雄证明了学习物理学的价值，尤其是固体物理学中半导体的价值，那一定非钢铁侠莫属，他身着高科技盔甲，为正义而战。钢铁侠所具有的惊人的进攻和防御能力，靠的是一种现代（1963年）科技奇迹——晶体管。

晶体管确实是一种革命性装置，因为它对电压的放大和调节功能给现代人的生活产生了深远影响。最初，晶体管的作用跟真空管差不多，只是为了让收音机和电视机变得更轻、更高效。随着科学家和工程师成功地把晶体管的尺寸变得越来越小，它在数学计算方面的应用推动了电子计算机的发展。晶体管是我们今天所使用的几乎所有电子设备的核心元件，而且我们已经具备了足够的物理学知识来理解这个神奇的装置是如何工作的。在深入了解半导体的物理学原理之前，我们先回顾一下促使铁头王[1]漫画问世的事件。

在白银时代的漫画书中，“冷战”是每月一期的英雄冒险故事的一大亮点。在DC漫画中，偶然间获得超能力的战斗机飞行员在好几个漫画系列中都扮演了至关重要的角色。在《展示橱》第22期里，来自外星的绿灯侠紧急迫降在地球上，生命垂危。他指派他的能量指环找到一个勇敢、诚实、无所畏惧的人来继承他的指环和绿灯，指环帮助绿灯侠找到一名美国试飞员哈尔·乔丹作为继承人。（在《展示橱》第6期里，战斗机飞行员埃斯·摩根带领未知挑战者投入战斗；在《我最伟大的冒险》第80期里，试飞员拉里·崔纳因一次飞行事故而变成底片人。）漫威的漫画时代开始于1961年（苏联和美国的宇航员在这一年首次进入太空），4位探险家——一位科学家、科学家的女朋友、科学家女朋友的十几岁的弟弟和一位曾经的战斗机飞行员——未经授权就驾驶着飞船越过宇宙辐射带，想要把敌人“发射到太空深处”，但宇宙射线把他们变成了神奇四侠。

在神奇四侠登场一年后，物理学家罗伯特·布鲁斯·班纳博士因受到伽马射线的辐射而变身为绿巨人。

在漫威的早期漫画里，霹雳火、蚁人、蜘蛛侠、雷神和复仇者联盟

都与“冷战”或多或少有关联。但在20世纪60年代，这些超级英雄与“冷战”的联系都不像钢铁侠那么密切。在《悬疑故事》第39期里，漫威的战队中新加入一位才华横溢的发明家和实业家，他就是托尼·史塔克。史塔克利用自己掌握的晶体管技术，为美国军方发明了许多新武器，以协助美国赢得战争。史塔克并不满足于只在实验室里测试他的新武器，他想通过实地实验更准确地评估武器的有效性。我们很快就会明白为什么大多数首席执行官都不会亲自上阵进行质量检验，因为这实在太危险了。陪同史塔克的军方顾问因落入敌人的陷阱而丧命，留下史塔克一人，他的胸口还插着一块金属弹片，与心脏的距离很近，生命垂危。更糟糕的是，他被俘虏了，并被带到了敌军的秘密营地。营地的一位医生检查了史塔克的伤情，发现弹片还在移动，用不了多久他就会因此丧命。

敌军首领提出了一个条件：只要史塔克愿意留在他的武器研发实验室工作（这显然是一个装备精良的营地），他就答应给史塔克做手术。史塔克假装同意了，他打算利用这个机会制造出一种武器，既可以救他自己，也可以消灭敌人。后来，他与一位同样被俘虏的聪明的殷森教授一起发明了一块金属板，充满电之后就能防止弹片刺入史塔克的心脏。史塔克意识到，如果他和殷森想逃出敌军营地，就需要配备进攻性和防御性两种武器。胸部金属板成为史塔克的钢铁盔甲的一部分，其中装配了一系列晶体管。就在史塔克即将被插在他胸部的弹片夺走生命的时候，盔甲做好了，而殷森教授为了让金属板充满电，牺牲自己引开了敌人。后来钢铁侠击败了敌军，为殷森教授报了仇，还释放了营地中的其他囚犯。（2008年的电影《钢铁侠》忠实地还原了这个故事情节，只是敌人变成了中东的恐怖分子。）回到美国之后，托尼·史塔克继续用他的高科技装备和武器保卫美国，与敌人对抗。

在整个故事中，托尼·史塔克成功地让大家相信钢铁侠另有其人，是他雇来的保镖。考虑到敌人曾多次试图绑架史塔克或窃取他的研发计划，这样的故事情节不算牵强。

与形形色色的反派进行斗争好像还不够，史塔克也常被叫去接受参议院委员会的质询，委员会坚持认为把史塔克掌握的技术交给军方是他应尽的义务。但负责调查钢铁侠与史塔克工业公司之间关联的参议员伯德不知道的是，让钢铁侠取得成功的秘密武器——晶体管——早已进入了公共领域。1947年，三位物理学家在新泽西默里山的贝尔实验室里研发出晶体管。为了推广这项新技术，贝尔实验室举办了研讨会，指导那

些有兴趣使用晶体管的公司。造出了更好的捕鼠器还不够，你还必须让老鼠知道！

人靠衣装

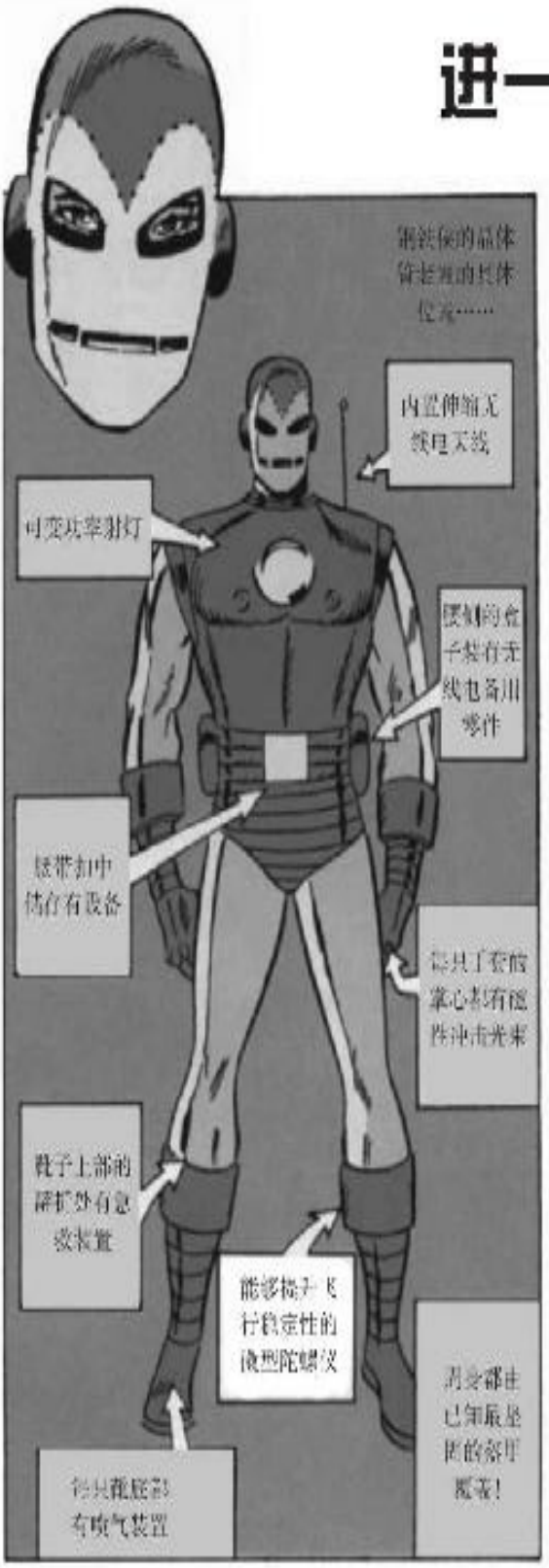
从第一次亮相起，钢铁侠的行头就在不断地改进，既包括装饰性的，也包括有实用价值的。在《悬疑故事》第39期里，他的盔甲是灰色的，但到了第40期，史塔克决定把盔甲的颜色改成金色，以便给异性留下更深刻的印象。你可能会认为，一个长得像埃罗尔·弗林的亿万富翁兼实业家，根本不需要考虑他的秘密身份——钢铁侠对女性是否有吸引力这个问题，但可能正是这种关注细节的态度让托尼·史塔克获得了成功。每隔不到一年的时间，他的行头就会重新设计，图39中这身红色与金色相间、更合身的盔甲与钢铁侠最新的盔甲非常相似，只是细节上有些不同。

这套盔甲中暗藏的武器也经历了持续不断的升级。最初，史塔克手套的掌心部分有一个“抗磁性”发射器，但很快就变成了“冲击光束”。盔甲的胸口部分有一个凹进去的大圆盘，里面最初装有“可变功率射灯”，后来升级为“单束激光”（我真的不知道这是什么）。盔甲的左肩部位最初支着一根无线电天线，随着无线传输和接收技术的发展这根天线后来也被整合到了盔甲里面。

虽然钢铁侠的盔甲非常高级，也很合身，但还是相当重的。史塔克穿上它后能自如行走并举起重达数吨的物体，就是因为“他盔甲中的小小晶体管极大地提升了他的力量”！为了估算出盔甲的质量，我们假设这身盔甲的厚度是1/8英寸，密度与铁相同，约为每立方厘米8克。为了估算出这套盔甲的表面积，我们可以把史塔克的躯干看成是一个圆柱体，把他的头看作一个较小的圆柱体，把他的手臂和腿看成是更小、更长的圆柱体。如果史塔克的身高约为6英尺，他的衣服是50码，他的总表面积就约为26200平方厘米。盔甲所用铁的体积等于表面积乘以1/8英寸或0.32厘米，约为8400立方厘米。想要计算出盔甲的质量，我们用这个体积乘以密度（每立方厘米8克），得到67千克，即148磅，其中不包括所有晶体管的质量。托尼·史塔克经常会把盔甲放在他的公文包里，当然胸前的金属板除外，他必须时刻穿戴着它以免弹片刺入他的心脏。因此，仅仅提着这个沉重的公文包，史塔克就可以练出相当结实的臂部

肌肉，这也是作为钢铁侠的好处之一。

进一步了解钢铁侠！





© 1963 Marvel Comics

图39 《悬疑故事》第55期“关于钢铁侠”这个故事提供了20世纪60年代的钢铁侠示意图，旁边的说明中说，他使用的过程中，给晶体管提供能量的电源将逐渐耗尽

知道了这套制服的重量之后，我们又会问：钢铁侠的喷气靴子是如何让他飞起来的呢？如果这套盔甲的质量接近150磅，史塔克的质量约为180磅，想让钢铁侠悬浮在空中，他靴子的推进器就必须承担330磅（相当于150千克）的质量。这种喷气装置很可能是利用化学反应从靴底猛烈排出反应物，由于每个作用力都会有一个大小相等、方向相反的反作用力，向下的重力就会对应一个向上的推力，后者让钢铁侠悬浮在空中。如果他想加速，他的靴子就必须提供更大的推力，因为$F=ma$。

史塔克经常往返于位于长岛的史塔克工厂和位于曼哈顿中心的复仇者联盟大厦之间，这个距离约为50英里，用时约为10分钟。这意味着史塔克的平均速度是每小时300英里，几乎为声速的一半！（在《钢铁侠》电影中，在与战斗机的对决中，史塔克的速度至少是战斗机的两倍！）这就意味着，为了获得相应的动能（1/2）mv^2，钢铁侠的盔甲至少需要137万千克·米^2/秒^{2}的能量，这还不包括克服空气阻力所消耗的能量。如果钢铁侠要到很远的地方去，他就不会使用喷气靴子，而改用靴子里的电动旱冰鞋。旱冰鞋不仅更省油（不需要消耗能量去克服悬浮在空中的重力作用），而且每当他减速的时候，他还可以利用转动能和交流发电机来给盔甲的蓄电池充电。就这样，托尼·史塔克提前用上了汽车的混合动力技术。

20世纪70年代的钢铁侠变得更环保，他的盔甲被一层薄薄的太阳能电池包裹着，靠阳光来充电。正常情况下，美国每平方米的国土面积上每秒钟所获得的太阳能是200千克·米^2/秒^2。我们刚刚计算出钢铁侠盔甲的表面积是26200平方厘米，这意味着钢铁侠每秒钟获取的太阳能是262千克·米^2/秒^2（在任何给定的时刻，他只有一半的面积会受到太阳照射），而他的喷气靴子所消耗的能量超过100万千克·米^2/秒^2。如果太阳能电池能够把阳光能量的50%转化为史塔克的蓄电池储能（大多数商用太阳能电池的转换效率只有约10%），那么钢铁侠需要近三个小时的时间才能获取足够的太阳能。此外，他还需要给盔甲内部的温度调控器提供能量（以每小时300英里的速度推开前方的空气会让任何穿着金属盔甲的人大汗淋漓），在飞行过程中使用冲击光束也需要消耗能量。在钢铁侠的一日生活里，他消耗能量的速度要比太阳能电池充电的速度快得多。

《钢铁侠》的编剧在这方面非常值得肯定，因为他们考虑到托尼·

史塔克需要给盔甲的蓄电池充电，这意味着他们已经意识到要遵循能量守恒定律。从钢铁侠在《悬疑故事》第39期里第一次亮相开始，以下原则始终是不争的事实：钢铁侠盔甲实现各种功能需要消耗大量的能量，他使出的力量越大，耗费的能量就越多。驱动他的喷气靴子需要电能，让伺服电机正常运转也需要电能，只有这样他才能穿着盔甲行动自如。此外，他胸部的金属片也需要消耗电能，才能保护他的心脏免受弹片的威胁。20世纪60年代，钢铁侠偶尔会在一场恶斗中耗尽能量，踉跄前行，四处寻找电源给盔甲的蓄电池充电。

即使他后来换上了太阳能盔甲，在某些紧急情况下也会耗尽能量。在《钢铁侠》第132期里，钢铁侠与绿巨人殊死搏斗，用尽了盔甲里的最后1尔格（1尔格是1千克·米^2/秒^{2}的1000万分之一）能量。史塔克把他的盔甲中仅剩的能量都用在最后一击上，完成了前所未有的壮举：把绿巨人打败了。但史塔克为此付出的代价也是十分高昂的。由于耗尽了盔甲的电量，史塔克被困在结实的盔甲里，动弹不得。更糟糕的是，他眼睛上和嘴上的保护装置生效了，这本是为了让史塔克免受爆炸的伤害，但一旦盔甲里的空气耗尽，史塔克就会窒息。这给蚁人带来了一连串的任务，他必须从钢铁侠喷气靴子的排气孔钻进去，穿过整个盔甲，避开内部保护装置，将钢铁侠的盔甲面罩打开。

冲击光束所向披靡

在钢铁侠的所有武器里，最有用的就是他的“冲击光束”，这种光束由他的盔甲手套掌心部位的圆盘发射出来。当他在《悬疑故事》第39期首次登场时，他的盔甲手套发射的是“抗磁性”射线，他依靠这种射线成功逃出了敌人的监牢。当看守他的士兵发现小型武器在钢铁侠面前毫无用武之地时，他们决定向他发射火箭弹，投掷手榴弹。从图40中我们可以看到，就在他们准备使用重型武器的时候，史塔克先把磁性涡轮绝缘体中的电荷逆转方向，然后用礼帽晶体管把静电排斥力增大了1000倍。随着他发射出射线，对手的武器纷纷飞了出去，他大叫道：“看哪！抗磁性——真是有如神助。”能帮他的确实只有神仙了，因为根据固体物理学，这是不可能的。

上述场景中只有一点是正确的，那就是关于“礼帽晶体管”的部分。并不存在“磁性涡轮绝缘体”这种东西，它只是个人造短语，而使用“涡

轮”这个修饰语也是为了让这种凭空想象的绝缘体听起来很酷。非金属磁体的确存在，它们虽是电的绝缘体，但也能产生一个很大的磁场。礼帽晶体管也确实存在，它之所以有此名称，是因为其外形像个小圆柱体，有橡皮擦的大小（当时是20世纪60年代早期，很久之后才会出现微型晶体管。在这种边长仅为几毫米的芯片上，可以容纳数百万个微型晶体管），底部是一个布有电极的圆盘，整体看上去有点儿像顶小礼帽。漫画中，托尼·史塔克使用这种装置来放大“磁性涡轮绝缘体”中的电流，这在物理学上是有可能的。但他用这个装置的“抗磁性”挡开了手榴弹和火箭弹，就纯属臆想了。


小型武器是不可能穿透我的钢铁盔甲的！
PHAANG
KAPOW!
KAPOW!
PAT-PANG
大拿子弹筒！室上火箭弹！快点儿！你们这些笨蛋！快点儿！
但是，在这些重型武器派上用场之前……
我会用这个磁性涡轮绝缘体又逆转电荷……
再用一个轧辊就能把挤压力增大1 000倍！
哥！回来！磁力只对金属有效！我们靠人力还是能打败他！
看那！抗磁性——真是有如神灵！
敌方惊慌失措，四处逃窜……

© 1962 Marvel

图40 当钢铁侠在《悬疑故事》第39期里首次亮相时，他用礼帽晶体管和磁性涡轮绝缘体杀出一条路来，逃出了监狱

虽然每个原子中的电子、质子和中子都有一个内部磁场，但磁体会自然地以N极和S极相接的方式排列，由此抵消了多数原子的磁性。要想让钢铁侠手套中的电磁铁发挥作用，就得满足以下几个条件：第一，朝他飞过来的手榴弹出于某种原因已经被磁化了；第二，手榴弹的N极刚好都指向同一个方向；第三，钢铁侠盔甲手套的磁场N极刚好对着手榴弹磁场的N极，而不是相反，否则手榴弹就会加速朝他飞来。然而，托尼·史塔克不可能总指望对手配合自己调整好武器的磁极方向。

事实上，钢铁侠的抗磁性射线在无磁性物体身上反而能取得更好的效果。回想一下第19章中关于万磁王和抗磁性悬浮现象的讨论。对于像铁或钴这样的金属，其内部的原子磁场都朝着同一方向排列，但有很多物质，比如水，却都是抗磁性的。在这种情况下，如果把它们放在外部磁场中，原子磁场就会朝向与外部磁场相反的方向。因此，使某个物体磁化会产生排斥力。钢铁侠的抗磁性射线可以推开物体，但这些物体必须也是抗磁性的，如果是磁性物体，则不起作用。万磁王通过他的超能力制造出巨大的磁场，但钢铁侠只能使用传统的方法——电磁铁（类似于第18章中超级小子所用的那种）。由于钢铁侠不像超级小子那样随身携带发电机，他发射几次抗磁性射线之后，蓄电池的电量就会耗尽，而且比和绿巨人打斗时消耗得还快。此外，这种武器的后坐力相当大。当对目标施加一个很大的作用力时，就会对枪和枪手产生一个大小相等的反作用力。托尼·史塔克把他的冲击光束置于盔甲手套里是很明智的选择，当他发射射线时，通过锁定驱动盔甲移动的伺服电机，他的盔甲就可以作为相当大且坚固的惯性质量承受住这种后坐力。

虽然抗磁性射线在物理上不太可行，但手持脉冲能量武器已经从漫画里的想象变成了研究中的军事装备。当然，这种武器不可能与钢铁侠的抗磁性射线一模一样，理由我们刚才已经讲过了。如果只靠抗磁性排斥力使其他物体偏转运动方向，就需要非常大的能量产生足够大的磁场，这样看来，还是使用常规武器更有效。然而，美国军方正在积极研发脉冲能量武器。这种武器能够在千分之一秒内快速放电，产生巨大的电压，功率（单位时间内的能量变化）也相当高。如果让这种武器指向一个目标，就会在局部区域内迅速积累能量，远快于热量消散的速度。在物理实验室中用超短脉冲激光器几乎瞬间就能熔化固体表面的一小块区域，同样的做法原则上也适用于攻击性武器。这种武器最大的缺点就在于对能源的巨大需求。如果一个人只能靠随身携带微型发电厂来使用

这种脉冲能量武器，那么在任何一场战斗中想要出奇制胜都不太可能。

固体物理学概述

什么是晶体管？这种具有神奇功能（至少对斯坦·李而言如此），帮助钢铁侠成功击退众多强敌的电子装置到底是什么呢？简单来说，晶体管就是一种通过电路调节电流的阀门。这样的答案虽然简单易记，但并没有告诉我们晶体管是如何发挥作用的。所以，我们要解决的问题包括：什么是半导体？这种既不是金属也不是绝缘体的东西到底是什么？众所周知，我们生活在一个“硅时代”，但硅到底有什么特别之处？接下来，我将在解答这些问题的过程中，努力把固体物理学50年的发展史概述一下。

硅是一种原子，像碳、氧或金一样，都是自然界的基本构成元素。硅原子核中有14个带正电荷的质子和14个电中性的中子（通常情况下如此）；为了保持电中性，原子核周围还有14个带负电荷的电子。正如我在第21章和第22章中介绍的，由于物质的波属性，这些电子会停留在“量子力学的轨道”上。对每一种元素而言，其可能的电子轨道都是特定的，这限定了电子的能量范围。

我们可以通过薛定谔方程计算出一个原子内可能的电子轨道，就像一个教室中椅子的数量和摆放方式（请注意，教室这个例子对于解释金属、绝缘体和半导体都非常有用）。椅子只能代表可能的或虚拟的班级，直到学生坐下之后，班级才是真实的。如果只有一个学生走进教室并坐下来，就像在一个可能的量子力学轨道上只有一个电子，我们就把这种“班级”称为氢；如果有两个学生坐在教室里，我们就得到了氦；如果有14个学生，就会组成硅，以此类推。在这个例子中，最先进入教室的学生坐在最前排靠近黑板的座位上，最后进来的学生坐在最后排远离黑板的位置（带正电的原子核就在这里）。最前排的座位代表最低的能量级，对于有6个电子的碳原子来说，最内侧的轨道都被占据了。如果碳原子通过吸收光而得到了能量，一些电子就会跃迁至靠外侧的能量轨道上。

一种固体到底是金属、半导体还是绝缘体，取决于充满电子的最高能级与离它最近的未被占据的能级之间的能量差。在教室这个类比中，

固体可以被视为一个有许多排座位的礼堂，礼堂有楼下和楼上两个座位区域。如果对这个固体施加一个外部电压，在低能级座位[2]上的电子就会获得额外的能量。但是，只在有空余座位可供这些电子跃迁的时候，它们才会移动到更高的能级。任何固体的电学性质都取决于低能级上的电子数，以及楼下座位和楼上座位之间的能量差。

在这个例子中，绝缘体和金属的区别非常明显。在绝缘体中，楼下无一座位空闲；而在金属中，有一半的低能级座位是被填满的。在金属中存在很多空座位可供电子挑选，不管施加的电压大小如何，都能让电子跃迁至更高的能级（相当于承载了电流）。金属是电的良导体，因为只有一半的楼下座位被电子占据。而绝缘体中的所有楼下座位都坐满了，即使施加电压，电子也不能移动，也就无法产生电流。如果提高绝缘体的温度，以热量的形式从外部施加能量，就会使一些电子跃迁至楼上座位。如果温度降低，楼上的电子又会回到楼下的低能级座位上。

如果绝缘体以光的形式吸收了能量，它的电子就能立即跃迁至楼上座位。当电子回到楼下的低能级座位上时，它又会释放出之前吸收的能量，要么发光，要么发热。因此，光照在一个物体上会使其升温——电子吸收了光的能量，然后这个物体又以散热的形式释放出其吸收的能量。如果光的能量不足以让电子从较低能级的楼下座位跃迁至较高能级的楼上座位，光线就不会被吸收。在这种情况下，低能量的光会被固体中的电子忽略，径直穿透固体。像玻璃窗这样的绝缘体之所以是透明的，就是因为在这种材料内部，楼下座位与楼上座位的能量差位于光谱的紫外部分，低能量的可见光只会穿透它。金属则不同，其中只有一半的楼下座位被占据，仍有空座位可以吸收光线。不管光的能量有多小，金属中的电子都会吸收这些能量，并在回到低能级座位的时候把这些能量释放出来。这就是金属发光和反光效果好的原因。它们总能释放出等于吸收量的能量，它们能吸收的能量也没有最低限制。

半导体是一种能量差较小（与可见光的能量相比）的绝缘体。对于这样的能量差，在室温下会有一定数量的电子具备足够的能量跃迁至楼上座位。如果电子跃迁至楼上座位，这种材料就具备了两种导电方式。每一个跃迁至高能级的电子都会留下一个空座位，被视为“正电子”或者“空穴”，也可以导电。如果空穴旁边的电子占据了这个位置，就相当于空穴移动了一个位置，所以我们也就认为空穴也可以导电。当然，电子最终会回到它们原来的能级，但不一定是原来的座位。有些半导体受到光照之后，高能级的座位上就会出现足够多的受到激发的电子，低能

级的座位上也会出现足够多的空穴，从而让它们从绝缘体转变为电的良导体。一旦没有了光照，电子和空穴就会重新组合，它们又变成了绝缘体。这种半导体被称为“光电导体”，在受到光照时，其导电性能会发生巨大的变化，因此多被用作光传感器。某些烟雾探测器、电视遥控器和超市的自动门装置，都使用了光电导体。

半导体装置通常都由硅制成，因为它的能量差低于可见光的范围。此外，它是一种广泛存在（大部分沙子的主要化学成分都是二氧化硅）的比较容易提纯和处理的元素。有时，硅的能量差也会影响半导体的性能。在这种情况下，可以改用其他半导体材料，比如锗或砷化镓。钢铁侠以及军方的夜视装备，都是基于半导体的光电性质以及处于电磁波谱红外部分的微小能量差。

由于所有的物体都具有一定的温度，所以它们都会产生电磁辐射。物体中的原子会以特定的频率振动，这个频率反映了原子的平均动能。在月黑风高的夜晚，大多数非生命物质的温度都会降低（因为没有光照），发出的电磁辐射会变少，原子的振动频率也会变低。但人类却能够通过新陈代谢将体温维持在37摄氏度左右，因此，我们会发出大量位于光谱的红外部分的光（相当于一个100瓦灯泡释放的能量）。虽然我们的眼睛对这种光并不敏感，但我们可以用对红外光较敏感的半导体去探测它。夜间，温血动物发出的红外光比周围环境要多得多。

有一些夜视镜，比如《守望者》中的“夜枭二代”配备的那种，使用红外热成像技术来探测红外光，其中的半导体探测器能吸收温度在100华氏度（37.8摄氏度）左右的物体辐射的红外线。然后，半导体探测器中的光电流会被输送到某种具有特殊化学结构的固体材料中，当电子和空穴在光的激发下重新组合的时候，这种材料就会发出可见光。这样一来，我们的眼睛无法探测到的红外线就会被夜视镜转换成可见光，让我们在黑暗中也能看清东西。夜视镜白天也能探测到可见光和红外光。所有物体在相同的温度下都会发出强度相同的光，当一个人周围的物体温度升高（由于吸收了阳光）时，这个人和周围环境发出的红外光之间的对比度就会减弱，夜视镜的效果也就不那么明显了。

隐形女侠的眼睛是什么颜色的？

对半导体的光电效应的理解，也有助于解决长期困扰漫画迷的一个问题：隐形女侠为什么能看见东西呢？神奇四侠乘着火箭踏上了一趟生死未卜的旅程，苏·斯通（现在叫苏珊·理查兹）由此获得了隐身能力。她是如何做到这一点的呢？如果可见光能从她的身体中穿过，她又怎么能看见东西呢？事实上，我们要问的一个更基本的问题是：我们到底是怎么看到东西的？

组成人体细胞的分子可以吸收电磁光谱中的可见光，还有某种分子，比如黑色素，会增加人体对可见光的吸收量，使皮肤变黑。隐形女侠由于接触了宇宙射线而获得了一种超能力，使她能够增加她体内所有分子的“能隙”。如果楼下座位与楼上座位之间的距离变大，并延伸到紫外光谱，可见光就会被她体内的分子忽略，直接穿过她的身体。这种解释不算牵强，毕竟我们每个人都有能让可见光穿透的细胞。事实上，此时此刻你正在利用这些细胞——眼睛里的晶状体——阅读本书。

阳光中含有大量紫外线，它比可见光具有的能量还多。只有在炎炎夏日被阳光灼伤时，我们才会注意到紫外线的存在。在苏·斯通隐形后，她仍然会吸收并反射紫外线。而我们之所以看不到她，是因为我们眼睛中的视杆细胞和视锥细胞不能发生共振从而吸收紫外线。特殊的紫外线眼镜（比如毁灭博士安装在他面具上的那种）可以把从苏身上反射出来的紫外线转换为可见光，它的作用机制与夜视镜很像，只不过夜视镜是把红外线转换成可见光。

这也解释了隐形女侠是怎么看到东西的。在她隐身后，她眼睛里的视杆细胞和视锥细胞会对从其他人身上反射回去的紫外线更敏感，但我们却看不到她。隐形女侠眼中世界的色彩与实际情况不一致，因为她探测到的光的波长变化与彩虹的颜色没有关系。对我们来说，窗户是透明的，因为它们会让可见光通过并吸收紫外线。我们看不到紫外线，也不会注意到紫外线被吸收了。然而，对于隐形女侠来说，窗户又大又黑，而其他物体都是透明的。但没关系，只要稍加练习，她应该就能适应了。

这一机制解释了为什么苏隐身后仍能看到东西，《神奇四侠》第62期的第三册（2002年12月）对此进行了交代。这一期是由马克·韦德编剧，由迈克·维林格绘制的。故事说，在苏隐身的时候，她通过探测周围环境散射的宇宙射线看到东西，但寻常人的视力却看不到这种射线。思路没错，但光错了。来自外太空的宇宙射线并不是可见光子，它们大多数是高速质子，当它们撞击大气中的原子时，会产生大量的电子、伽

马射线光子、μ子（一种与电子有关的基本粒子）和其他基本粒子。通常情况下，我们无须担心受到宇宙射线的辐射，也不要幻想宇宙射线会赋予我们超能力，至少在海平面上如此，因为这里的粒子通量还不到太阳光子通量的10^{-18}。如果苏走在街上要依赖宇宙射线才能看见东西，她就会不断地撞上行人或者其他物体。可能性更大的情况是，她能看到东西的原理与她能隐身的原理是一样的，即她的分子发生了变化，从只能吸收可见光转变为只能吸收紫外光。

什么是晶体管？晶体管为什么很重要？

下面我们接着讨论托尼·史塔克和他的装配了晶体管的盔甲。当史塔克需要增加他的磁性涡轮绝缘体的排斥力时，就会用到礼帽晶体管。晶体管是如何放大微弱的信号，让便携式收音机和冲击光束发挥作用的呢？

虽然半导体作为一种光电器件是很有用的，但如果其功能仅限于此，恐怕就没有人会把这个时代称为硅时代了。半导体之所以在家庭生活中随处可见，是因为只需要添加很少的化学杂质，就能让它的导电性能提升100万倍。不仅如此，你既可以向半导体中添加电子，也可以通过移走电子产生同样可以导电的空穴。当一个拥有多余电子的物体被放置在一个有空穴的半导体旁边时，就形成了一个太阳能电池。如果在上面再添加一层电子，就形成了一个晶体管。

我们知道，添加某些化学物质会改变绝缘体的光学和电学性质，彩色玻璃就是这样制造出来的。普通玻璃的能隙比可见光的能量高，所以它是透明的。但如果在熔化的玻璃中加入少量锰，冷却后的玻璃在光线的照射下就会呈现出紫色。锰会在玻璃的能隙中对光进行共振吸收，这就好比我们在连接楼下与楼上座位的台阶上加放了多把椅子。通常情况下会直接穿过玻璃的可见光，此时会因为玻璃中添加的锰原子而被部分吸收。这样一来，白光穿过玻璃时某些波长的光就会被吸收，使玻璃呈现出某种颜色或者“色斑”。不同的化学物质，比如钴或硒，会让透明的绝缘体呈现出不同的颜色（分别为蓝色和红色）。

同样的原理也适用于半导体，只有添加化学杂质才能让电子很容易地被移除或跃迁至楼上座位，从而在楼下区域留出空穴。从化学杂质中

得到电子的半导体被称为N型半导体，因为电子带负电荷；而将电子从较低能级的座位移除出去的半导体被称为P型半导体，因为空穴是带正电的。添加了化学杂质的半导体的特殊之处，不在于它们的导电率会发生显著变化（如果我们需要导电材料，直接用金属就可以了），而在于当我们把N型半导体放在P型半导体旁边时所发生的反应。两种半导体交界处多余的电子和空穴会迅速重新组合，但同样带有电荷的化学杂质却没有发生变化。N型半导体中带正电的杂质和P型半导体中带负电的杂质会产生电场，就像空间中的正电荷和负电荷会产生电场一样。这个电场会指向某一个方向。如果让一个电流通过N型半导体和P型半导体的交界处，电流顺着电场方向的流动就会非常容易，而逆着电场方向的流动则非常困难。这种简单的装置如果用在机器内部就是“二极管”，如果用在机器表面吸收光线就成了“太阳能电池”。当PN结吸收光的时候，感光的电子和空穴将会产生电流，即使没有连接电源。内部电场会驱使电荷运动，就像给设备接通了外部电源一样。因此，感光的电子和空穴，再加上带电的杂质所产生的内部电场，两者的结合就能让太阳能电池产生电流。无须在磁场中移动线圈就能产生电流的发电方式很少见，这是其中之一，这种设备运行的时候也不需要消耗化石燃料。

晶体管与二极管的电流方向一致，可以使内部电场发生变化。因此，晶体管可被视为一种特殊类型的阀门，输入信号决定了阀门打开的幅度，以及流经设备的电流大小。回想一下第17章中水流的例子，消防水管的一端连接着城市供水系统，当打开连接着水管与水龙头的阀门时，水就会从水管中流过。如果阀门开得很小，水流也会非常小；随着阀门开得越来越大，水管中的水流也会不断增大。通常情况下，我们会通过控制阀门来调节水流的大小，现在我们假设有一个阀门连接着一根给花园浇水用的水管，水管中的水流比较小，阀门打开的幅度取决于从花园水管流向阀门的水量。如果把花园水管中的水流当成“输入信号”，从消防水管流出的水流就是这个信号的放大版本。

这样一来，无须改变编码中任何与时间有关的信号，一个较小的电压就可以被放大。如果钢铁侠想让磁性涡轮绝缘体的电流放大1000倍，或者增大伺服电机的电流以驱动盔甲展开攻击，他就可以用晶体管把小的电流放大。尽管托尼·史塔克会告诉你晶体管无法提供动力，但是它们确实能够将很小的信号放大很多倍。要做到这一点，必须有充足的电量储备，比如外部电池。就像水流的例子一样，只有当消防水管与城市供水系统连接时，阀门才能使花园水管中的细小水流变大。因此，晶体管不是在提供动力，而是在使用动力，但它们放大微弱信号所消耗的动

力比真空管要小得多。因此，钢铁侠在每一场激烈的战斗后都需要赶紧充电。史塔克常常担心他的晶体管电量不足，但我认为他实际上指的是晶体管电池。这种口误是可以原谅的，我敢肯定，如果我跟钛人大战了几个回合，我也会说错话的。

在晶体管出现之前，要想放大微弱的输入电流，就要靠加热的导线和栅极来引导电流的走向。电流流经导线发出白光，金属发射出电子，于一定距离外施加于板极的正电压会让这些自由电子加速，并将它们吸引过去。在导线和集电极之间有一个栅极（也就是一个滤网），它的作用就像阀门。如果栅极收到了输入信号，它就会调节收集到的电流，像开关水空头一样开关阀门。与空气分子的碰撞会打散电子束，使其远离集电极。为了避免发生这种情况，导线和栅极都被封闭在一个接近真空的玻璃管里。这些所谓的“真空管”很大，加热导线和集电极需要消耗大量的能量，而且非常容易发生破损。靠真空管提供动力的钢铁侠很难立于不败之地，因为他的第一次也是唯一一次冒险之旅一直充斥着玻璃被打碎的声音。而半导体晶体管是一种小型低功耗设备，可以瞬间放大电流，且结构紧凑，坚固耐用。尽管如此，1947年发明的晶体管还是花了好多年时间才替代了大多数电子设备中的真空管。

晶体管的发明不是偶然的，必须仔细搭建出高纯度材料和低缺陷密度的半导体结构，才能观察到电流放大的过程。在新泽西默里山的贝尔实验室，约翰·巴丁、沃尔特·布里顿和威廉·施洛克利通过艰苦的工作和创新性的实验技术，制造出世界上第一个晶体管，他们因这项成果获得了1956年的诺贝尔物理学奖。就在巴丁得知自己获得人生中的第二个诺贝尔奖（他在1972年提出了超导理论）那天，他的由晶体管控制的车库门开关装置发生了故障，这充分表明继续深入研究固体物理学的必要性。

随着制造技术和质量控制方法的改进，制造出更新更小的晶体管成为可能，这个特殊阀门的另一个重要应用也由此实现。向晶体管输入一个小的电流，就会产生一个小的输出电流，稍稍增大输入电流，输出电流也会放大。晶体管的输出电流可能是“低电流”，也可能是“高电流”，我们将低电流定义为“0”，将高电流定义为“1”。对晶体管的输入电流进行微调就能输出0或者1的电流。通过巧妙地配置数百万的晶体管，再加上数学上的布尔逻辑（在晶体管出现的90多年前和薛定谔方程建立的70多年前，数学家乔治·布尔就提出了这个理论），就可以得到微型计算机的基本组成部分。

电脑是如何用“0”和“1”来表示较大的数字并进行二进制数学运算的，需要用一本书的篇幅才能说明白。但我要强调的是，所有微型计算机和集成电路的核心元件都是晶体管。商业和娱乐电子产品在我们的社会中起着越来越重要的作用，从手机到笔记本电脑，再到DVD播放机，这些电子产品中的“芯片”都是由大量晶体管巧妙排列和连接而成的。如果没有晶体管，21世纪的计算机和无线技术就不可能出现；如果没有量子力学和电磁学先驱们的成就，晶体管就不可能被发明出来。

薛定谔并不打算发明CD播放器，也没想过用晶体管取代真空管。但如果少了他和其他人对于微观物质特性的研究，我们今天所享受的现代生活方式就是痴人说梦。如果没有少数物理学家对自然世界行为的深入研究，我们今天的生活将彻底不同。除了少数特例，这些科学家做研究的目标不是制造出商业设备和实用工具，而是为了满足自己的好奇心。正如亨利·皮姆博士在《惊异故事》第27期中所说，好奇心指引着他们“去研究能激发他们想象力的东西”。

[1]钢铁侠最开始的制服包含一个圆柱形头盔，他因此被称为“铁头王”。尽管他的头盔后来呈流线型，而且相当时尚，但“铁头王”这个称呼在40年中却一直伴随着他。

[2]最低能级会最先充满电子。严格地说，每个电子对都有自己的固定座位（因为在它们的内部磁场中，电子会匹配成对，N极与S极相对），未配对的电子则决定了该固体的化学性质和电学性质，这里我们讨论的就是容纳这些电子的礼堂。

第25章 制服的诱惑

在关于物理学原理的讨论中，我们在自然法则之外加上了所谓的“不合常理的奇迹”，来解释超级英雄们五花八门的超能力，比如神速力或将身体缩小到一个原子大小的能力等。现在，我们必须最后一次暂且放下自己的质疑，因为如果不这样，就没有哪个超级英雄能放心地使用自己的超能力了。我接下来要说的是超级英雄们的神奇制服！

我们来看看漫威漫画公司的复仇者联盟和DC漫画公司的美国正义联盟，每个战队都集结了一群超级英雄。复仇者联盟的成员会随时间而变化，其核心成员包括美国队长、鹰眼（相当于漫威漫画中的绿箭侠）、巨化人、黄蜂侠、钢铁侠和雷神。同样地，美国正义联盟的成员也是不固定的，核心成员包括超人、蝙蝠侠、闪电侠、绿灯侠、绿箭侠（相当于DC漫画中的鹰眼）、海王、原子侠和神奇女侠。在复仇者联盟对抗征服者康、邪恶大师或者奥创以拯救世界之前，或在美国正义联盟对战征服者斯塔罗、绝望魔或亚魔卓等反派之前，所有的超级英雄先要穿上制服。穿着破破烂烂或松松垮垮的衣服，是不可能成为为正义而战的超级英雄的。毕竟，对于“衣衫不整”这种情况，漫画规则管理局肯定会出面干预的。

幸运的是，关于这种能让超级英雄施展神奇能力的制服的构成，在漫威最早的超级英雄团队——神奇四侠开始行侠仗义时就做出了解释。在神奇四侠中，霹雳火的制服在熊熊烈焰中完好无损，隐形女侠的制服会随着她的隐身而变透明，神奇先生的连体衣可以像橡胶一样随意拉伸，像岩石一样强壮的橙色石头人穿着一条蓝色短裤。

1961年11月，当神奇四侠在漫画中初次登场时，他们穿的都是普通人的衣服，因为他们需要保持低调。他们4个人溜进一个军事基地，偷偷开走里德（神奇先生）设计的飞船，在太空激战中击败了苏联。这次行动也使他们受到宇宙射线的辐射，获得了超能力。漫威漫画公司非常低调地推出了神奇四侠漫画的头几期。那时候，它主要依靠其竞争对手——国家期刊出版公司（超人、蝙蝠侠和美国正义联盟的出版商）在报刊亭铺货，而且漫威漫画公司当时出版的主要是以美国西部、青少年、巨型怪物为主题的漫画。为了不让国家期刊出版公司察觉到漫威正在悄

悄扩大超级英雄的版图，在最初的两期漫画中，神奇四侠都是穿着日常的衣服与鼹鼠人、斯库鲁尔星人作战的。而到了第3期，他们穿上了蓝色连体衣，这成为他们的制服。《超人总动员》里的时装设计师衣夫人可能会对神奇四侠的“乞丐装”不屑一顾，但这样的制服能随着超级英雄的变身而变化，而且完好无损，这是怎么做到的呢？正如《神奇四侠》第7期中所说，这种制服是由里德的一个神奇发明——“不稳定分子”构成的。毫无疑问，里德向复仇者联盟的成员分享了这种神奇衣料的制作方法。

现在，任何一个上过高中化学实验课的人都知道，不稳定分子确实存在。它们可能会解体或爆炸，因为它们不够稳定！但是，真正的衣服能否根据穿着者的需要改变其热力学性质和结构呢？答案是肯定的。形状记忆材料的专业名称叫热敏材料，这种材料能“记住”最初的设置，在发生弯曲或变形之后仍能恢复原来的形状。随着温度、压力、电场（比如电影《蝙蝠侠：侠影之迷》里哥谭市骑士的披风）的改变，这些材料会发生相变，并被广泛应用于我们熟悉的（收缩胶膜）和不太熟悉的（能够自收紧的外科结）领域。与熔化或沸腾之类的相变不同的是，这些材料可以在不同的晶体结构之间转换。

在使用形状记忆材料制作服装之前，我们应该问一个更基本的问题：物体的形状是由什么决定的？任何固体的性质都受到两个因素的支配：化学结构和原子排布。

我们先看一下碳原子，它可谓元素周期表中收放自如的“神奇先生”或“伸缩人”。原子之间形成的化学键数量通常是固定的，但碳原子不同，其化学键的数目和类型都有很大的弹性。正如我们在第21章中讨论的，原子的电子物质波交叠时会产生“泛音”。与两个独立原子的能量之和相比，它们结合后的总能量会降低，因为固体或者分子中的原子之间形成了化学键。结合后的原子处于较低能量态，只有从外部施加能量，比如热或光，才能把它们分开，这种能量被称为“束缚能”。为了实现从液态到气态的相变，从外面施加的热被称为“气化热”；而从固态到液态的相变，则需要施加“熔化热”。

当碳原子间形成4个化学键时，其能量降低得最多，这可以通过不同的方式来实现。在多聚体（比如蛋白质或DNA）中，一个碳原子可以与长碳链中的其他碳原子形成两个很强的化学键。它也可以在同一层面上与其他碳原子形成三个牢固的化学键，组成一个六边形，就像我们在第23章的图38中看到的那样。然后，这个碳原子还会试着与上一层或者

下一层的碳原子形成第4个化学键。由于它只能与上层或者下层的碳原子形成牢固的化学键，而不是与上下层的原子同时形成化学键，因此每一层内的连接都很牢固，但层与层之间则并非如此。一层层的碳原子堆叠起来，就像千层酥饼一样。我们把这种形式的碳称为石墨，石墨很软，层与层之间很容易分离，因此非常适合用来制作铅笔芯。你用铅笔写字的时候，实际上正在一层层地分离碳晶体。

此外，位于金字塔中心的碳原子可以与4个角上的其他原子形成4个牢固的化学键。如果位于金字塔中心的碳原子与氢原子结合在一起，得到的气体就是甲烷；如果其他4个原子都是碳原子，得到的固体就称为钻石。石墨和钻石都是由碳原子组成的，但是石墨不透明、能导电和易变形的性质是碳原子层层堆叠的结果，若碳原子重新排列成四面体结构，就成了透明、不导电、坚硬的钻石。

在第15章中，我们介绍了物质的相，根据温度与压力的不同，物质有固相、液相和气相三种状态。温度决定了每个原子的平均能量，以及原子是否有足够的动能转变为气相（以此为例）。通过挤压材料，即增加压力，我们增大了原子气化的难度，若想产生相变就需要更高的温度。能量和熵之间的平衡，决定了特定的物质在什么样的温度和压力条件下会发生相变。

在强压和高温条件下，石墨可以转变为钻石，超人准备送订婚戒指给露易丝·莱恩时就是这么做的。而想让形状记忆材料从一种形态变为另一种形态，则不需要这么费劲。对形状记忆材料而言，相变就意味着材料中原子排布方式（即晶体结构）的变化。材料中原子的数量没有发生变化，但原子的排布方式发生了改变，要想变回之前的结构，就需要施加更多的能量。

我们熟悉的液晶材料就具备这样的性质，在从一种晶体结构到另一种晶体结构的相变过程中，其原子排布方式和光学性质也会发生变化。液晶实际上是一种长碳链分子化合物。分子间的静电力使它们能够沿着一个方向排列，或者自发形成分层。维系这种结构的力量非常微弱，以至于它能像液体一样流动。通过施加一个外部电场，可以把液晶从一种有序的结构转变成另一种有序的结构。液晶反射光的能力会随着分子的排布方式的不同而发生显著的变化。也就是说，在某个阶段，液晶会反射照在它上面的大部分光线（所以看起来很明亮），而在另一个阶段，它会吸收大部分光线（所以看起来很暗）。平板电视或者计算机显示器上的每一个液晶像素单元背后都是薄膜晶体管，它们会产生变化的电场

来改变像素单元的光学性质，像素单元光学性质的变化又产生了动态的图像。

形状记忆材料并不总是长链分子结构，也不一定是由碳原子组成的。液晶会由于电场和温度的变化而发生相变，形状记忆材料则会在压力的作用下从一种晶体结构转变为另一种晶体结构。弗莱克桑（Flexon）和镍钛诺（Nitinol）这两种镍钛合金产品都具有高弹性和记忆能力，因此它们可以用来制作眼镜框等。镍钛诺是在1961年被偶然发现的（神奇四侠漫画也于同一年诞生），当时，海军军械实验室的一个研究小组组长在一次管理会议上将一根弯曲的合金丝交给科学家们检查。其中一个研究人员决定用烟斗打火机加热这根弯曲的合金丝（如果说我从漫画里学到了一件事，那就是所有科学家都抽烟斗，至少在白银时代是这样）。大家惊讶地看到，弯曲的合金丝经过加热恢复原状，镍钛诺［“Nitinol”里“nol”是海军军械实验室（Naval Ordinance Lab）的首字母缩写，“Ni”和“ti”则代表“镍”和“钛”］由此诞生。把合金丝掰弯改变了它的晶体结构，烟斗打火机的热能则让它回到低能态（更稳定）的晶体结构，恢复原状。改变合金中镍和钛的比例可以改变相变发生的临界温度。镍钛诺合金丝也可以被用于正畸：先根据病患下巴的形状弯折并固定好合金丝；当金属丝升到体温时，它会努力恢复原状，从而给牙齿施加一个稳定的压力，让牙齿变得更整齐。

形状记忆聚合物的出现时间比形状记忆金属更早。一个常见的例子是收缩胶膜，它在被加热后会发生结构上的变化。将长链分子交联固化的活性基团会因外部条件（如电场或温度）的变化而熔化，使分子结构降至较低能级。2002年，安德烈亚斯·兰德林和罗伯特·兰格在《科学》杂志上宣布，他们发现了能用于外科手术的可生物降解的热塑性形状记忆聚合物。由这种材料制成的线在打了松散的结之后，会在被加热到104华氏度（40摄氏度）时自动收紧，有利于减小内窥镜手术的切口。形状记忆合金可用于制作支架、导管和探头，在人体内各个狭窄的通道里穿行，其灵活程度就像伸缩人一样。

神奇四侠和复仇者联盟成员的功能性制服只存在于四色漫画中，而形状记忆材料已经被用于制作真实的衣物。某些织物会随着温度的降低而膨胀，若把它们用作冬季夹克的内衬，就可以自动增加空气间隙，改善保温效果。还有一些材料在较高的温度下气孔会增多，即时排出身体的热量和蒸汽。目前有的聚合物织物能够拉伸到正常长度的两倍，加热后即可恢复原状。这些材料解开了一个困扰我们已久的谜题：绿巨人的

裤子为什么会那么结实？

绿巨人浩克是复仇者联盟的元老级成员，他在与团队并肩作战的短暂时光中总是穿着紫色的短裤，他在与美国陆军、憎恶、大头目对抗的时候也穿着一条紫色的裤子。核物理学家罗伯特·布鲁斯·班纳在被伽马射线击中之后获得了超能力，变身为8英尺高、2000磅重的绿巨人。身形的巨大变化导致他的衬衫变成了碎布条，他的脚撑破了鞋子和袜子，裤腿也残破不全，只有裤腰完好无损。所以，绿巨人的那条紫色的李维斯牛仔裤很有可能是用神奇先生发明的不稳定分子制成的，也可能是形状记忆材料。

在《神奇四侠》漫画大获成功之后，漫威在1962年首次推出了绿巨人漫画。不幸的是，虽然绿巨人可能很强大，但他的漫画销量却很惨淡，6期之后就停止出版了。但绿巨人没有就此销声匿迹，一年半之后他在《惊异故事》第60期里再次登场。

在漫威的漫画世界里发挥作用的可能是不稳定分子，但在DC的漫画世界中，又是什么让美国正义联盟的制服保持原状的呢？关于DC的超级英雄制服的耐用性，存在着各种各样的解释，这些解释听上去都有点儿道理。在白银时代，超人的制服与包裹着婴儿卡尔—艾尔的襁褓是同一种材质；在氪星毁灭前，他的父母把他用这种布料包裹好，用飞船送到了地球上。这种材料之所以很结实，是因为它是一种外星物质。后来又出现这样一种说法：超人周身环绕着一层薄薄的光晕，能让他刀枪不入，也能让他的制服无论在面临毁灭性的力量还是处于太阳中心时都完好无损。同样地，这种保护性光晕也能让闪电侠在极速奔跑的时候，保持制服完好无损。

但当蝙蝠侠在哥谭市打击犯罪的时候，他的制服却有可能破损。孤独的蜘蛛侠显然也不在“不稳定分子用户清单”里（至少在20世纪60年代刚登场时是这样），他时常要面对衣服破损的问题（既没有蝙蝠侠的万贯家财，也没有全职管家，这对于跟年迈的梅婶一起住在纽约皇后区的彼得·帕克来说无疑是一个不小的负担）。

原子侠有一个独特的方法，能让他的制服很好地配合他的身量变化。原子侠正常情况下有6英尺高、180磅重，他能够缩小到高度和重量几乎可以忽略不计的程度，就是因为他巧妙地利用了一种白矮星的残余物质制成他穿着的红蓝相间的制服。原子侠拥有的这种微缩超能力就内嵌在他的制服里，因此，他的超级英雄制服和超能力都只能用不合常理

的奇迹来解释。事实上，原子侠根本不用担心换衣服的问题，因为他的制服只在他缩小的时候才会出现。在他恢复正常身高后，他的制服还是那么小，但他平时穿着的便服会随着他的身体一起变大。因此，当原子侠变回普通人后，他会故意恶搞自己，使劲儿拽自己的内裤，这在众多超级英雄中可谓独树一帜！

我已经介绍完了与超级英雄制服相关的材料科学，再补充两个核心规则：第一，别穿斗篷！第二，装饰！接下来，我们来探讨一下更知名的武器装备中的物理学问题。

星钻的厄运

蝙蝠侠于1939年在《侦探漫画》第27期中首次登场，两年之后，又一位富家公子穿上了超级英雄制服，他也没有超能力，仅凭自己的智慧和各种高科技装备打击犯罪。很显然，绿箭侠是在复制蝙蝠侠的成功模式。大富翁布鲁斯·韦恩会把自己装扮得像一只巨大的蝙蝠，和他的助手罗宾一起开着蝙蝠车从蝙蝠洞驶向哥谭市，用藏在腰带里的高科技装备打败小蟊贼或大恶棍。另一位大富翁奥利佛·奎恩穿着改良版的罗宾汉制服，和他的搭档快手一起开着箭车从箭洞驶向星城，用箭囊里功能各异的箭打败小蟊贼或大恶棍。绿箭侠的高科技装备包括回旋箭、炸弹箭、手铐箭、拳击手套箭、撒网箭、乙炔喷灯箭，还有水下冒险必备的水下呼吸箭。你在水下需要背上一个氧气筒，我是能够理解的，但背上一支箭到底有什么用，我实在想不明白。

绿箭侠与海王的首次登场都是在同一期《多趣漫画》中，其编剧是莫特·韦辛格，漫画师是乔治·帕普。在黄金时代和白银时代中间的过渡期里，绿箭侠和海王的故事一期接一期地出版。在20世纪60年代出版的《勇敢与无畏》第28期里，海王从一开始就是美国正义联盟的成员；而绿箭侠加入联盟是在一年后，在《美国正义联盟》第4期“星钻的厄运”中，他拯救了神奇女侠、海王、闪电侠、绿灯侠和火星猎人，随后成为联盟的一员。如图41所示，美国正义联盟的成员们被困在了一个巨大的钻石监狱里，绿箭侠向这座透明的牢笼射出一支钻石箭，击中了这座钻石监狱唯一的应力集中点，救出了美国正义联盟的多位成员。从绿箭侠与美国正义联盟的第一次冒险中，我们可以了解一些真正的材料科学知识，比如晶体缺陷、弓的弹性应变能，以及弓箭的历史。

我们先来分析一下困住美国正义联盟成员的钻石监狱。钻石很难被打碎，不是因为它的密度非常大，而是因为连接晶体中碳原子的共价键非常牢固。所以，材料的强度主要取决于将原子结合在一起的化学键的强度。最强有力的化学键被称为“共价键”，从量子力学的角度看，这种结构中的单个原子会与其相邻原子共享外层电子。要想打破这种化学键，就必须移除连接原子的化学键中的电子。碳原子与相邻原子的相对位置决定了化学键的强度，当碳原子全都位于一个平面上时，电子的物质波函数就会发生重叠，由此形成的化学键比钻石中的化学键还要牢固。也就是说，当你用铅笔写字时，在纸上被剥离下来的碳平面中的化学键会比钻石晶体中的化学键更牢固。在钻石中的某些地方，由于应力集中或者有杂质的缘故，化学键很容易断裂，这就成为钻石的瑕疵之处。钻石瑕疵处的共价键最易被打破，对打磨钻石的珠宝商和使用钻石箭的绿箭侠来说都是这样。

弓的制造过程也涉及大量的材料科学知识，因为一把好弓的关键就在于它的材料弹性好且不易折断。从本质上说，弓是一种弹簧，弓储存的弹性势能会转化为箭的动能。回顾一下我们在第12章中讨论的内容以及能量守恒定律，在物理学中，功是指物体在力的作用下沿力的方向移动的距离。向后拉弓弦不会改变弦的长度，射手所施加的力只会让弓的形状发生变化。理想的弓能够储存较多的弹性势能，也就是说，它要轻便、有力、有弹性。在材料物理学中，如果一个物体被压缩或拉伸之后还能恢复原状，我们就说这个物体具有“弹性”。如果一个物体在力的作用下发生了永久性变形，我们就说这个物体具有“塑性”。



© 1961 National Periodical Publications Inc. (DC)

图41 在《美国正义联盟》第4期（1961年5月）里，绿箭侠正准备对以共价键连接的固体进行断裂应力测试

对于绿箭侠来说，这种弹性与塑性的转换所需的力越大，他就可以使出越大的力去拉弓，而且无须担心会把弓拉折。弓储存的弹性势能越大，能够转移到箭上的动能也越大。箭离开弦的速度越快，它在空中飞行的距离就越远。只要手握一把好弓，即使我们站在较远的地方，也能命中靶心。

有人说，中世纪的英国长弓手是世界上最出色的弓箭手。在1415年的阿让库尔战役中，尽管拥有几乎是以十对一的人数优势，5万名法国士兵还是被区区6000名英国士兵击败。在这6000名英国士兵中约有4800人是长弓手，而法国军队中几乎没有弓箭手，这充分显示出先进技术在战争中的优势。英国士兵无疑是胜利的一方，他们用紫杉木制成的长弓击败了敌人。在所有能用来制作弓的木材中，紫杉木的比强度是最佳的。在紫杉树的横截面中，外圈是较软的边材，具有很好的弹性，中间是较硬的心材。用这两个区域交界处的木材制成的弓，内层的心材在弓弯曲时可以承受压力，而外层的边材能使弓快速恢复原状。当然，木材中的疤或者缺陷就像晶体中的瑕疵，往往是容易发生断裂的地方。因此，一棵紫杉树很难制作出多把优质长弓。这种木材因其上好的弹性应变能而价格不菲，造成的结果就是，17世纪的整个英国以及欧洲都在大规模砍伐紫杉树。近年来，欧洲和美国都开始大量种植紫杉树，这一次是因为它的治疗功效。合成与制备业的最新研究成果表明，太平洋紫杉树的树皮是抗癌药物泰素（学名紫杉醇）的主要来源。于是，紫杉树再一次成为无价之宝。

现代材料科学使弓箭技术有了很大的改进。弓的设计一直在创新，20世纪60年代，霍利斯·艾伦发明了复合弓。他在弓的两端加上滑轮，增强了弓箭手向后拉弓弦时的力，从而增加了弓储存的势能。弓的材质自16世纪以来也在不断改进，碳纤维增强基复合材料既有石墨中碳碳键的结合强度，又有塑料的低堆积密度，这使得紫杉木黯然失色。将石墨丝编织成纤维，与环氧树脂结合，就能够形成碳纤维增强基复合材料。这种复合材料不仅能用于制作弓箭，还被广泛用于制造其他运动器材、高性能赛车、直升机桨叶甚至桥梁支撑结构中。

唯一比碳纤维复合材料更坚固、更轻的是碳纤维原丝，被称为碳纳米管。这种材料是由一层卷起来的石墨形成的中空圆柱体，直径只有三个原子大小，厚度只有一个原子大小。由于单层石墨中碳原子之间的共

价键是最牢固的，所以如果在合成过程中没有任何瑕疵，碳纳米管的比强度就是钢的200倍，是蜘蛛丝的20倍。如果制出肉眼可见的碳纤维丝，一根直径为一毫米的碳纳米管就可以承受近14000磅的质量，一根比这句话末尾的句号还细的纤维能承受两辆运动型多用途车的质量。碳纳米管到底有多强韧，我们在托尼·史塔克对绿巨人进行的身体检查中可以找到线索。在对绿巨人进行的压力测试中，史塔克工业公司的研究人员惊讶地发现，绿巨人坚不可摧的原因在于他的皮肤里有碳纳米管！

我们可以把普通的金属箭头或燧石箭头替换成硕大的钻石箭头，就像绿箭侠在《美国正义联盟》第4期里用的那个。我们也可以在箭头上加装一个小型警报器，以便制造出一种冲击声波。我们还可以在箭头上再加装一个监控器，以便了解箭头何时处于最高点，以及何时会弹射出一个网。绿箭侠还有一些很奇特的箭头，但这些箭头并不合理，比如木乃伊箭头（它会用布把目标牢牢裹住）和手铐箭头（从空气动力学上讲这是最不合理的一种箭头）。但“箭头装备”的概念要早于绿箭侠漫画，而且早了1000多年！火焰箭和“希腊火药”在维护拜占庭帝国的统治方面发挥了重要作用。虽然关于其确切的化学成分仍存在争论，但我们知道在箭头上沾上石油和沥青（硫黄）的混合物就成了燃烧弹，点燃后很难熄灭，即使在水中也能继续燃烧。和这些致命的箭头装备比起来，拳击手套箭实在是平淡无奇。

子弹和手镯

在第22章我说过，你从本书中学到的量子力学知识加上你对超级英雄漫画的了解，将带给你很好的异性缘。事实上，美国正义联盟的一位元老级成员的创造者威廉·莫尔顿·马斯顿，就像托尼·史塔克和欧文·薛定谔一样，也是个花花公子，他的私生活绝对不可能得到漫画规则管理局的认证。

1921年，马斯顿已经拥有了一个文学学士学位、一个法学学士学位，以及一个心理学博士学位，而当时只有约3.3%的美国人口拥有大学及以上学历。1917年，马斯顿发表了一篇论文，指出了人的收缩压与说谎之间的关系，他也因此自称“测谎仪之父”。马斯顿先是在美利坚大学和塔夫茨大学执教，1929年，来到好莱坞的环球工作室担任公共服务主管。虽然他曾在多所大学任教，却从未获得终身教职。1929年以后，他

就不再撰写学术论著了，而逐渐转型成为社会心理学家。一开始是在好莱坞发展，后来撰写了一系列书籍，有些是技术性的，大多数则是关于流行心理学的。再后来，他成为《家庭圈》杂志的心理学顾问。

1940年的一期《家庭圈》杂志上刊登了奥利芙·理查德撰写的一篇采访报道《不要嘲笑漫画》。马斯顿在采访中为漫画进行了辩护，他认为漫画是一种教育手段，而不是一种损害青少年心智的廉价娱乐消遣。正如莱斯·丹尼尔斯的《神奇女侠：完整的历史》（*Wonder Woman: The Complete History*）一书所说，这篇文章引起了M. C. 盖恩斯和谢尔登·迈耶的注意，他们因此邀请马斯顿加入DC漫画公司和全美漫画公司编辑顾问委员会。后来，马斯顿以查尔斯·莫尔顿为笔名，创造了一个新的漫画角色，这充分表明他坚信女性在道德上和心理上都具有明显的优势。在1941年12月~1942年1月的《全明星漫画》第8期中，神奇女侠登场了，她凭借亚马逊族的神力、防御手镯和金色的真言套索（个人便携式测谎仪）成为捍卫正义的战士。

因为神奇女侠的超能力来自一种神奇的魔力（而不是通过黄色太阳的光线，或者被受到辐射的蜘蛛咬伤之类的方法获得），所以她的丰功伟绩中并没有多少物理学知识，但有一个特例。在她的第一次冒险之旅中，她参加了一场亚马逊族的竞赛，获胜者要负责把美国飞行员史蒂夫·特雷弗护送回国，他的飞机坠毁在与世隔绝的天堂岛上。竞赛中最难的一关就是子弹与手镯之战：两位女战士面对面，朝对方开枪，能用手镯成功挡开子弹的一方获胜。这种手镯由一种特殊的金属——亚马逊石（Amazonium）制成，旨在提醒亚马逊人不要忘记那段被人奴役的历史。在这场“眼力与速度的终极考验”（1942年的《神奇女侠》第1期）中，神奇女侠用她的手镯“挡开了迎面而来的子弹”。好吧，我们假设神奇女侠确实拥有墨丘利的反应速度，快到能抬手挡开飞行的子弹，但如果手镯能承受住子弹的攻击，那它到底是由什么构成的呢？

我们必须先确定手镯能够承受的最大的力是多少。这就需要计算出当神奇女侠抬手挡开子弹的时候，子弹施加给手镯的力。我们会再次用到第3章中的公式，当时我们用它计算为了拉住坠落的格温·斯黛西，蜘蛛侠的蛛丝要承受多大的力。这个公式是：力乘以时间等于动能的变化量。要想挡开一颗质量为20克、发射速度为1000英尺/秒、撞击时间为1毫秒（千分之一秒）的子弹，需要2700磅力。由于子弹的面积很小，这就相当于每平方英寸7万磅力，是大气压力的4600倍还多。什么金属能承受这么大的力而不发生塑性变形呢？答案是几乎所有金属都可以。典

型的高强度合金钢可以轻松承受每平方英寸7.5万磅力~100万磅力的压力。神奇女侠的手镯大约有0.5厘米厚，足以挡开一颗迎面飞来的子弹。由此可见，亚马逊石似乎并不比冷轧钢更特别。

接下来要提出的一个基本问题是：如果金属如此牢固，为什么我们可以很容易地把它们拉成长长的金属丝或者加工成珠宝首饰呢？为什么由松散地结合在一起的原子构成的固体很容易被加工处理，而不会在轻微的扰动下解体呢？答案就在静电学中。

在上一章中，我们将固体中的电子能量态比作礼堂里的座位，楼上的空座位代表的是高能量的激发态。对于金属而言，电子只占据了一半的楼下座位，而且楼下和楼上座位之间并没有能量屏障，所以能够产生感应电流。金属中的“座位”实际上就是物质波，可以延伸到整个实体之外。金属之所以是电和热的良导体，是因为只需要施加很少的能量，就能让这些电子发生跃迁。在以共价键连接的固体（比如钻石）中，每个座位都代表原子间牢固且定向的化学键。

如果金属原子之间不存在直接的化学键，那是什么让金属固体免于分崩离析呢？答案是电。每个金属原子最初都是电中性的，其原子核中有许多带正电荷的质子，围绕着它的是带相同数量负电荷的电子。如果从每个原子中移除一个自由电子，原子就会带正电。如果你尝试挤压金属，就会让原子彼此挨得更近，带正电荷的原子（即离子）就会互相排斥，抵御外部压力。金属中的原子之间缺少定向且牢固的化学键，因此容易变形，可被拉成又长又细的金属丝或者被压成薄片。与大多数以共价键结合的固体相比，把金属原子聚集在一处的力并不是特别强，所以我们可以轻松地拉直一枚回形针，完全不需要超能力！但鉴于大多数金属都具有塑性，它们又比我们预想的要坚固。

显然，某种金属的强度是由一系列化学和材料科学原理决定的，例如漫威漫画中最坚固的金属艾德曼合金，X战警成员之一金刚狼的骨骼和爪子就是用这种金属打造的。这种神奇的金属之所以很坚固，不是因为它的密度很大，而是因为它是一种以共价键结合的零瑕疵固体。把一个以共价键结合的原子从相邻原子旁移走，这比把寻常金属中的自由电子与离子结合在一起需要的能量更多。艾德曼合金具有金属的电学性质，拥有与钻石差不多牢固的共价键，也没有任何缺陷或瑕疵，所以它“坚不可摧”。

缺陷会削弱以共价键结合的固体的坚固程度，但也可以让某些金属

变得更坚固。[1]有一种方法可以提高金属强度，叫作“加工硬化”，让金属发生塑性变形，导致金属在原子层面上出现缺陷。由于金属中没有定向的化学键，因此在其受力弯曲或者被拉成丝的时候，移动一层层的原子就比较容易。缺陷会阻碍原子的运动，过多的缺陷会造成原子层面上的“交通堵塞”，这会抑制金属的进一步变形。这种强度的增加是以牺牲塑性和韧性为代价的。冷轧钢的抗拉强度与钛合金相当，但两者与以共价键结合的碳纳米管相比，韧性要差一些。

说到这里，我必须澄清一个普遍存在的误解，是关于美国队长所用盾牌的化学成分的。金刚狼的爪子是由艾德曼合金制成的，而美国队长盾牌的成分则是由钢和振金（也叫吸育钢）制成的独一无二的合金。钢保证了盾牌有足够的硬度，可以抵挡反派的攻击。振金是一种外星物质，它随着一颗陨石来到地球，这颗陨石坠落在由超级英雄黑豹统治的非洲国家瓦坎达。振金能够吸收所有的声音，将声波中的能量转换为其他形式，是一个完美的减振器，这对于盾牌而言是一个最重要的特质。声波表示压力或密度的变化，在固体中，声音是通过原子振动传播的。振金可能是将吸收的声波转换成光子跃迁（这就解释了在美国队长使用盾牌时，为什么我们偶尔会看到闪光），从而实现了能量守恒。

美国队长盾牌的原材料是在实验室中偶然得到的。当时，钢和振金意外地熔合成一种新合金，但其合成条件没有被记录下来，此后也没再发生过。事实上，在尝试制造这种材料的过程中，人们意外得到了艾德曼合金。有时候，美国队长的盾牌会被错误地描述为由振金和艾德曼合金制成，但这显然不可能。当复仇者联盟成员发现了被冰冻的美国队长时（1964年3月第4期），还发现了他的盾牌。在第二次世界大战期间，美国队长就是靠着这块盾牌完成了许多英雄壮举。当他与复仇者联盟成员并肩作战时，用的也是这块盾牌。在《复仇者联盟》第66期里，当材料科学家迈伦·马克莱恩博士发明艾德曼合金时，美国队长用的还是这块盾牌！美国队长的盾牌有时似乎完全无视物理学规律，但它不能让美国队长穿越回过去。

这块盾牌中确实含有振金的成分，这已经被史蒂芬·科尔伯特的实验所证实。在他的电视脱口秀《科尔伯特报告》[2]中，他诵读了自由守卫者的遗嘱，根据这份遗嘱，科尔伯特成为美国队长盾牌的继承者。[3]他用指节敲击盾牌，盾牌发出“锵锵”的声音。科尔伯特告诉观众们，这就是“坚不可摧的瓦坎达振金的声音”。由此他解开了物理学中的一个未解之谜：当你敲击一种能吸收所有声波的金属时，会听到什么样的声

音！

我们接着讨论《神奇女侠》，事实上，这部作品的创作者也过着一种双重生活。马斯顿和他的妻子还有奥利芙·理查德生活在一起，这在20世纪30年代是很少见的。1940年，正是奥利芙·理查德在《家庭圈》上发表的一篇采访文章促使马斯顿开启了他的漫画创作生涯。这种三人共同生活的模式从20世纪20年代一直持续到1947年马斯顿离世。马斯顿颠沛流离的学术生涯或许在很大程度上归咎于这种不寻常的家庭生活。家庭的经济收入时常是由女性提供的，这一事实加强了马斯顿的女权主义信念。毫无疑问，在大萧条时期还能和两个女人生活在一起，这无疑证明了兼通科学和漫画知识能给一个人带来不可抗拒的异性吸引力！

奥利芙和伊丽莎白·霍洛韦·马斯顿，谁才是马斯顿塑造神奇女侠角色的灵感源泉，这一点尚无定论，但神奇女侠的配饰与奥利芙之间的渊源却有着明确的书面证据。从莱斯·丹尼尔斯2001年对这位漫画人物所做的研究中我们发现，这位亚马逊公主在漫画中初次亮相后不到一年，《家庭圈》就刊登了一篇关于马斯顿的采访文章，他说，神奇女侠手镯的灵感正是来自奥利芙·理查德的手镯！

尺寸重要吗？

在《复仇者联盟》第1期中，漫威的超级英雄们联合起来对付洛基——北欧神话中的诡计之神，蚁人的作用尤其重要。在《复仇者联盟》第2期中，皮姆不得不以另一个超级英雄——巨化人的形象示人。与此同时，在《惊异故事》第48期里，蚁人遇上了一个大反派——豪猪。豪猪本来的身份是亚历克斯·金特里，这位工程师用技术手段制造出一套表面布满尖刺的衣服，其中藏有许多进攻性和防御性武器，如催泪弹、眩晕弹、氨气（大概是为了脱身用的）、流体火（我猜可能是气体火焰喷射器）、传感地雷、液体胶合剂等，他靠着这些武器走上了犯罪的道路。而我要说的是，作为一名物理学家，我与很多工程师共事过，却从没见过谁会穿得像一头大豪猪。金特里抓住了蚁人，还把后者放进一个半满的浴缸里。由于蚁人无法爬上光滑的浴缸壁，他只能不断地踩水挣扎。

在《惊异故事》第49期里，也许编剧觉得让蚁人死在浴缸里的情节

实在太雷人，就让皮姆发现了放大药水，变成了巨化人。后来，皮姆又变回微缩版的犯罪斗士黄衫侠。但是，在他英雄生涯的多数时间里，皮姆的主要身份还是巨化人或歌利亚（也是拥有超能力的英雄，只不过代号和制服不同）。

如果漫画作品的功能之一是实现小读者们的愿望，那么创作者们必须认识到，多数孩子并不觉得只有十几毫米高或者穿得像只豪猪一样是很酷的事。但如果漫画人物能够长到12英尺高，这倒是一件吸引眼球的事。然而，事实证明，变成巨化人会带来一系列身体上的严峻考验。比如，在《终极战队》第3期（现代版的复仇者联盟，里面有一个新的巨化人角色）里，更大（异常放大）的瞳孔会让更多的光线进入眼睛。因此，在变成巨化人之后，必须一直戴着特殊的护目镜，以免视神经超负荷工作。

对于一个人能长到多高，存在一个基本的生理限制。当然，我们可以假设一个人的身高远超平均水平，这跟微缩能力一样，都属于“不合常理的奇迹”。人类身高的生理限制来自材料的强度（特别是骨头）和重力。之所以跟重力有关，是因为如果你的密度保持不变，你的质量就会和你的体积一起等比例增加。密度等于质量除以体积，所以你长得越高（体积越大），在密度保持不变的前提下，质量就越大。如果你长成了巨人，质量却保持不变，你就成不了大人物。

当里德·理查兹在《神奇四侠》第271期里遇到可怕的外星侵略者戈姆时，他面临的刚好是这样的情况。这一期讲述了理查兹和他的三个同伴受到宇宙射线辐射之前的故事。戈姆是一个身高120英尺的怪异绿色生物，来自克拉罗星球。这个故事是编剧兼漫画师约翰·伯恩向来自外太空的侵略者致敬的作品，外星生物入侵在20世纪50年代后期一直是漫威漫画的主题，直到《神奇四侠》的出版拯救了濒临破产的漫威漫画公司，以及斯坦·李和杰克·科比的钱包。这些漫画作品（《惊异故事》《奇异故事》《神秘之旅》《悬疑故事》）中的外星生物都至少像房子一样大，英文名字里都有两个相邻的字母相同，比如不可战胜的精神宇宙人（Orrgo）、布鲁图（Bruttu）、戈姆（Goom）的儿子古格姆（Googam），还有非凡龙（Fin Fang Foom）。戈姆征服世界的撒手锏是，每当他受到任何形式的“广播能量”的攻击时，他的身量就会变大。理查兹发现了这个外星入侵者留下的长10英尺、深数英寸的脚印，他意识到阻止戈姆的唯一方法就是使用更大的广播能量。如果一个生物的脚印有10英尺长，假设它的质量与体积等比例增加，那么这个脚印也应该

有几英尺深。理查兹发现戈姆的质量是恒定的，而不是密度不变，于是理查兹给戈姆输入了非常多的广播能量，让戈姆长得比地球还大，密度比太空还小。所以，我们必须牢记这个故事的警示意义。现在，我们假设皮姆在变成巨化人的过程中，成功地保持了密度不变，所以他的体重与体积实现了等比例增长。

为了用数学方法说明巨化人的情况，我们可以把皮姆视为一个巨大的盒子。当然，把他比作一个大的圆柱体更合适，但出于简化问题的目的，我暂时把他比作一个盒子。那么，他的体积就是长、宽和高的乘积。如果盒子长10英尺、宽10英尺、高10英尺，它的体积就是10英尺×10英尺×10英尺=1000立方英尺。我们再假设巨化人借助皮姆粒子长到原来的两倍那么大，即长度、宽度和高度都为20英尺，体积就是20英尺×20英尺×20英尺=8000立方英尺。所以，他的体积增加至原来的8倍。

如果巨化人在变大的过程中保持密度不变，他的质量和体积就必须一起等比例增长，而不只是他的高度！如果他的高度加倍（宽度和厚度也一样），他的质量就会变成原来的8倍，只有这样才能保持密度不变。随着皮姆变得越来越大、越来越重，会出现什么情况呢？问题就在于，他的体重的增长速度会超过他的骨骼的负荷能力，以至于他长到一定高度时，有可能刚一站起来腿就骨折了。一个物体的强度，或者说它对于拉力或推力的承受能力，取决于它的宽度，而不是长度。用专业术语来表达就是，物体的抗拉强度取决于它的横截面积的大小。

想象一根可承重20磅的钓鱼线，也就是说，用这条钓鱼线可以钓起质量为20磅的鱼。如果我们钓到了一条更重的鱼，钓鱼线就很有可能被拉断。若要钓起这条鱼，那么改变钓鱼线的长度不会有任何帮助。为了增加钓鱼线的强度，我们应该增加它的直径，而不是长度。[4]钓鱼线越粗，它受到的拉力分布的区域就越大，而维持钓鱼线不会断开的化学键受到的力就越小。如果一根钓鱼线或类似的东西断开，化学键就会断裂。用于支撑给定力的横截面积越大，特定分子受到的压力就越小，发生灾难性事故的可能性也越小。正如我们刚才讨论的，物体断裂通常是因为分子的缺陷而放大了局部受力，相较排列方向一致和没有瑕疵的原子，这样的材料更容易损坏。

材料的强度取决于其横截面积，这也限制了神奇四侠中神奇先生身体的伸展长度。《神奇四侠年刊》第1期提到，神奇先生的身体最长只能伸展到500码左右。一块横截面积为8平方英寸（2英寸×4英寸）的木板，长度为3英尺，在两边各垫一个锯木架的话，木板会被支撑起来，

与地面平行。如果把另一块具有相同横截面积但6英尺长的木板两端垫起来，木板的中间部分会略微凹陷。160英尺长的木板的中间部分则会明显凹陷下去，挨着地面，即使不考虑地球的曲率也是这样。里德在《神奇四侠年刊》第1期中指出：“我的身体伸展得越长，我的肌肉就变得越弱，我的力气也变得越小。”里德对于质量与体积之间关系的深刻理解，帮助地球摆脱了戈姆的魔爪，他本人也是对抗拉强度的立方平方法则的最佳诠释。

随着皮姆变成巨化人，他的体积的增长速度会大于横截面积的增长速度。随着巨化人越长越高，他的骨骼也会与他的身体等比例增长。他的股骨或椎骨的强度会以其膨胀系数的平方的倍数增长。但是，巨化人长得越高，他的骨骼所要承受的重量也越大，在密度不变的情况下，他的体重会以其膨胀系数的立方的倍数增长。皮姆博士的正常身高是6英尺，体重是185磅，他的股骨可以支撑1.8万磅力的重量，一块椎骨则可以支撑800磅力的重量——大自然会让某些关键结构的承重能力有很大的富余空间。当他的身高为60英尺时，由于巨化人的膨胀系数是10，所以他的体积是原来的10×10×10=1000倍，而他的骨骼的横截面积为原来的10×10=100倍。身高60英尺的皮姆的体重是185000磅，他的椎骨能支撑80000磅力的重量，他的股骨可以支撑180万磅力的重量。因此，如果他长到60英尺高，那么他的骨骼将无法承受住他的体重。

巨化人长得过高会导致坏蛋，特别是有超能力的坏蛋对他构成实质性威胁，于是在20世纪60年代，斯坦·李提出身量的增长会对皮姆造成不利影响。当他的身高大约是12英尺的时候，他是最强有力的；但他长到40英尺或50英尺，即像房子一样高时，他却会像小猫一样虚弱。几年后，新陈代谢方面的限制被物理学方面的限制（根据立方平方法则）取代。人们已经意识到，就像《终极战队》第2期所说，即使与生长血清相关的代谢问题都解决了，重力作用和物理学原理仍会对人类能够达到的身高做出严格的限制。

即使对于非立方体的物体来说，体积的增长速度也快于表面积的增长速度。球体体积的数学公式是用一个常数（4π/3）乘以球体半径的立方，即（4π/3）r^3；而其表面积为4π乘以半径的平方，即4πr^2。（体积单位是长度单位的立方，如立方英尺；而面积单位是长度单位的平方，比如地毯的面积一般都用平方码来度量。）因此，当蝙蝠侠和罗宾缓缓浸入一大桶酸性液体时，液体中浮上来的气泡为蝙蝠侠提供了关于立方平方法则这个物理学原理的教科书般的解释。

如果你曾经认为，啤酒里的气泡在接近酒杯顶部时会上升得更快，那么很显然，酒精并没有影响你的判断力。会冒气泡的酒里含有过饱和二氧化碳（汽水里的气泡也是这么来的），这意味着液体中二氧化碳的压力要大于大气压力。当碳酸饮料的最上层冒泡时，会发出爆裂或者“嘶嘶”的声音，这是由于多余的气体在压力的作用下迅速从容器中逸出。此时液体中仍然有二氧化碳，它们存在于靠近玻璃杯瑕疵处的气泡里。由于二氧化碳比周围的液体轻，所以气泡会上升到液体表面。托起气泡的浮力与气泡的体积直接相关，气泡的体积又取决于气泡半径的立方。阻碍气泡上升的阻力则与它的表面积直接相关（表面积越大，气泡在上升过程中需要推开的液体就越多），气泡的表面积又取决于气泡半径的平方。当气泡在饮料中移动时，它会不断将分散在液体中的二氧化碳分子吸收进来，从而变得越来越大。因此，会有一个净浮力托着这个气泡向上运动，有力就有加速度（牛顿第二定律对碳酸饮料也适用），因此气泡会上升得越来越快。

如果我有一个无限高的玻璃杯，杯子里气泡的上升速度能达到光速吗？答案是不可能。在第4章中我们了解到，阻力不仅取决于物体的表面积，还取决于物体的速度（与缓慢运动的物体相比，快速移动的物体想要推开液体会更费力）。随着气泡上升得越来越快，阻力也会越来越大，最终与向上的浮力达到平衡。一旦失去了净浮力，气泡就会以稳定且均匀的速度移动（根据牛顿第一定律），这就是终极速度（或者最终速度）。

在超级英雄与邪恶敌人的陪伴下，我们的物理世界之旅已接近尾声，也许此时你想亲身实践一番，来一杯会冒气泡的酒，验证从本书中学到的知识，这当然是出于你对科学的兴趣！

[1]不仅仅是金属！如果你捏住一张标准的8.5英寸×11英寸的纸的短边，因重力作用它会向下弯曲。把这张纸揉成一团后展平，再捏住同一边，这张纸就会因新增的褶皱而变得硬挺，也不易因重力作用而弯曲。

[2]见2007年3月12日的电视脱口秀《科尔伯特报告》。——译者注

[3]幸运的是，关于美国队长已死的报道显得有些草率。

[4]苹果树正是利用这一原理传播种子。当果实成熟并达到足够大的质量时，它受到的重力作用超过了将它连接在树上的梗的抗拉强度。当梗断开时，苹果就会掉在地上，被动物吃掉，最后苹果的种子就被动物带到了其他地方。

第四部分 例外的变异

第26章 超级英雄的失误

在本书的开头，我们利用牛顿运动定律讨论了超人如何纵身一跃跳上高楼；在接近结尾的部分，我们又探讨了钢铁侠的晶体管盔甲和超级英雄制服中的材料科学。用一本书的篇幅，我介绍了大学物理课的基本内容（美国），从物理学导论中的入门知识（比如牛顿运动定律，能量守恒定律）到复杂的材料科学（量子力学和固体物理学）。但如果我让你们觉得超级英雄漫画中的一切都与物理学原理相吻合，那就是我的错了。因此，我接下来想总结一下超级英雄漫画中几个典型的不符合物理学原理的例子，即我们所谓的“不合常理的奇迹”。

镭射眼的第二种超能力

在X战警团队成立之初，查尔斯·泽维尔教授招募到的第一个成员就是年轻的斯科特·萨默斯，他的代号是“镭射眼”。斯科特的超能力也是他的诅咒，即他眼睛中射出的拥有至纯力量的光束。这种光束能击穿水泥墙，挡开两吨重的巨石。它只对两种东西无效：斯科特的皮肤（这算一件好事，否则光束会把他的眼皮击穿），红宝石石英晶体（斯科特必须一直戴着由这种特殊材料制成的太阳镜或者护目镜）。护目镜旁边的按钮或者手套掌心部位的按钮都可以将眼镜抬起。当斯科特戴上护目镜的时候，他的眼中会射出一束红色的明亮光线，镭射眼由此得名。戴上红宝石护目镜之后，斯科特便可以清晰地看到周围的一切（只不过它们都是红色的）。护目镜还能吸收他射出光束的破坏性力量。

地理学家把二氧化硅晶体称为石英。如果二氧化硅分子的排列是无序的，像倒入一个容器的弹珠，我们就称这种物质为“玻璃”；如果分子以严谨的顺序排布，我们就称这种物质为“石英”。要想把很多弹珠有序

地排列起来，有很多种方式，因此石英的晶体结构也有很多种。如果加入少量的铁和钛，晶体就会呈现出淡淡的粉红色（类似于我们在第24章中介绍过的染色玻璃），我们称之为“蔷薇石英”；如果石英中含有红宝石微粒，就会形成棕黄色的纹理，我们称这种晶体为“红宝石石英”。

如果你的眼睛也能射出冲击光束，那么你会觉得又怪异又难受。你只能时时刻刻都戴着一副红宝石石英眼镜，还没法儿表示异议，不论在现实世界中这有多么不可行。然而，不管基克洛普斯[1]的光束到底是什么原理，在X战警漫画中，当斯科特使用他的超能力时，始终忽略了很重要的一点。那就是，根据我们前面讨论过的物理学原理，斯科特的头会因冲击光束的后坐力而向后仰，但我们并未在漫画和电影中看见这一幕。

牛顿第三定律告诉我们，力总是成对出现的；也就是说，每一个作用力都伴随着一个大小相等、方向相反的反作用力。如果没有可施力的东西，你就算有浑身的力气也无处可使。火箭也是基于这个原理，它以极高的速度排出热气，后坐力则会将火箭推向与排气相反的方向。同样地，能让两吨重的巨石悬浮在空中（据此我们可以推断出冲击光束的力至少为4000磅力）的冲击光束，也会对镭射眼的头部产生4000磅力的后坐力。根据牛顿第二定律（力等于质量乘以加速度），他的身体（假设其质量为80千克）会迅速获得一个加速度，而且是重力加速度的20多倍。那么，在他使用这种超能力的时候，他的头会从起始位置以每小时几百英里的速度向后移动。因此，我们可以得出这样的结论：镭射眼有两种超能力——他的眼睛能射出冲击光束，他的颈部肌肉异常强健。

把那栋楼放下！

我们在本书的开头说过，在漫画的黄金时代早期，超人之所以具有超能力，是因为他的母星（氪星）上的重力加速度远大于地球的重力加速度。他在地球上轻轻一跃就能跳上高楼，基于这个标准，我们在第1章中推断出氪星上的重力加速度至少是地球上的15倍。因此，超人的钢铁之躯并非由钢铁制成，而是能承受更大重力作用的肌肉和骨骼组成。假设要拿起一个装有1加仑牛奶的容器，其质量接近9磅。如果你想体验一下地球重力的1/15是什么感觉，那么你可以让容器里只留下比1/16加仑多一点儿的牛奶。跟拿起装有1加仑牛奶的容器相比，只装着1/16加

仑牛奶的容器，拿起来要容易得多。同理，在《动作漫画》第1期里，超人能把约3000磅的汽车举过头顶。举起3000磅的质量对于超人而言，就相当于我们举起200磅的物体。有些费劲儿，但不是不可能。

我们前面也说过，随着超人的人气爆棚，他从孩子们心目中的英雄变成价值数百万美元的明星。超人面临的威胁越来越严峻，他的敌人越来越强大，而他自己的实力也提高至更加荒谬的程度。不久之后，超人举起了坦克、卡车、火车头、轮船、大型喷气式飞机，还有高层办公楼。同样地，漫威漫画中的绿巨人浩克也拥有令人难以置信的力量。这通常被归因于他的肾上腺素水平（但也不总是这样），因此，情绪压力会导致他变身，使他从手无缚鸡之力的布鲁斯·班纳变成身高8英尺、孔武有力的绿巨人。正因为他的力量与肾上腺素水平有关，所以他越生气，就变得越强壮。当他生气到一定程度时，他便能举起一座城堡，然后扔出去很远；他甚至能举起一座山，在迷你剧《秘密战争》中他就举起了即将压在他和众多漫威超级英雄身上的巍峨高山。当里德·理查兹改装钢铁侠的盔甲，试图利用霹雳火的新星火焰和惊奇队长的电磁能量在山中炸出一条逃跑的通道时，里德故意惹恼了绿巨人浩克，因为里德知道他们能否死里逃生主要依靠绿巨人的力量。

最终，超人变得无比强壮。如图42所示，在《世界最佳拍档》第86期里，他举着两栋高耸的办公楼——一只手一个——就像托着两张比萨饼，还能在天上飞！我们仔细地观察这幅图，就可以找到他能把这些建筑从哥谭市搬到大都会露天展览会的一个原因：这两栋建筑与城市水利或者电力系统没有任何连接。超人展示出的力量是惊人的，但它并不是这个场景中最奇怪的一点。更奇怪的是超人的一句话：“你想要的这两栋哥谭市的大楼，我已经借来了，而且我得到了许可。”如果你想搬走城市里的两栋办公楼，应该向谁提出申请呢？我觉得不管哪栋大楼的管理员，应该都无权同意把楼借给超人，特别是当超人告诉他们他会一只手举着一栋楼的时候！当超人在《动作漫画》第1期中首次现身时，他把一辆车举过了头顶，周围的人被吓得四散逃跑。而到了20世纪50年代末，当超人从人们头顶上飞过，手举着办公大楼去参加慈善活动时，人们却在大声欢呼。要知道，超人一旦失手，后果将不堪设想！



© 1957 National Periodical Publications Inc. (DC)

图42 《世界最佳拍档》第86期里的一幕，超人展现出了比他在《动作漫画》第1期中首次亮相时更强大的力量，那时候他举起一辆汽车，把旁边的人吓得四散奔逃。到了后来，超人举着两栋高楼飞过时，剧场里却没有人感到特别惊慌

即使你相信真有人强壮到能徒手举起大楼，不管他是另一个星球的陌生来客还是意外受到伽马射线辐射的核物理学家，但其中仍然有一点违背了物理学原理。那就是，从设计学的角度来说，大楼、轮船和大型喷气式飞机是不可能被举起来的。它们要么保持静止不动，比如办公楼；要么靠几个点支撑，比如机身下面的三个轮子；要么靠水提供均匀的支撑力，比如轮船。以办公楼为例，在举起它的过程中，如果稍微偏离垂直方向，就会产生不平衡的扭矩，导致建筑物向水平方向倾倒。

像高楼或城堡这样的建筑物的体积都很大，所以从建筑物边缘到其质量中心的距离也很长（在第8章中我们称其为“力臂”）。这些建筑物相当重，所以让建筑物发生偏转的力也很大。建筑物的体积越大，从它的边缘到超人或绿巨人的施力点的力臂就越长，让它发生偏转的扭矩也越大。图42中超人举起的两栋大楼的扭矩都非常大，远远超出钢筋混凝土（为了增强其坚固程度，在混凝土中加入了钢筋）的承受范围。事实上，如果你举起一栋建筑想要飞去某个地方，那么你会在身后留下大量的建筑垃圾。超人到达哥谭市的慈善活动现场时，手里只会举着残垣断壁，而不是两栋完整的办公楼。所以，超人要取得的不是借走这两栋楼的许可，而是大楼所有者的谅解，因为他让这两栋楼变成了废墟。

后来的一些漫画编剧意识到，不管超级英雄的力量有多大，想徒手举起一栋建筑，同时让它不因重力作用而损坏，这是根本不可能的。在《神奇四侠》第249期里，有一个很像超人的反派人物，他的代号是角斗士，他托着巴克斯特大厦（神奇四侠的总部）的底部把它举了起来并来回摇晃，大厦却完好无损。里德·理查兹——漫威世界中最聪明的人——立刻意识到，角斗士一定拥有一种与触碰有关的未知的超能力，在漫画里，这种能力被定义为能让角斗士接触到的物体浮起来。当然，这种触碰超能力根本不存在，所以它可以被归为为数不多的“不合常理的奇迹”。为了推动故事情节的发展，这种虚构还是有必要的。

如果我们把巨化人与红杉树做个比较（这不仅仅是因为他的性格有时有点儿刻板），我们会注意到树越高，树干越粗。为了给上面的树冠提供支撑力，树干必须很粗。在美国《独立宣言》颁布的同一时期，两位数学家——欧拉和拉格朗日——证明了小于一定高度的圆柱体是稳定的，而超过一定高度（具体高度视圆柱体的材料而定）后圆柱体就会变

得不稳定，只要稍微偏离垂直方向，就会产生一个很大的扭矩，导致圆柱体倾倒。原则上，巨化人可以长得像红杉树一样高，但他还得能灵活移动（假设他没有超过由立方平方法则所限定的高度）。当他追赶坏人或者与之搏斗时，巨化人的上身一定会向前倾，超出腿的位置，恐怕你还没说完“斯坦·李”这三个字，他早已经倒在地上了。

超胆侠最初的敌人高跷人就难逃这样的下场。高跷人拥有一套机械盔甲，腿部装备了液压装置，如果完全伸展开，他就会达到几层楼那么高。毫不奇怪，超胆侠用他的多功能折叠棍绊倒了高跷人，这一期的漫画故事就此收场。

另一个与质量中心有关的不解之谜是，蜘蛛侠的死对头章鱼博士为什么能够走路。科学家奥托·奥克塔维厄斯在自己腰间的束带上连接了4个机械手臂，他用这些机械手臂来处理放射性同位素。一次不可避免的辐射性爆炸事故导致他腰间的束带、机械手臂和身体融为一体，于是，章鱼博士诞生了。这些手臂非常重，但我们经常看到他靠两条腿直立在地上，身后的4条手臂不断在舞动！事实上，这会产生一个很大的扭矩，导致章鱼博士仰面跌倒在地；或者如果这4条手臂向前面挥舞，他会脸朝下摔倒在地。只要章鱼博士的手臂没有牢牢抓住地面，蜘蛛侠就只需要朝着章鱼博士扔一个苹果，就能把他打倒在地。如果严格遵从物理学原理，就会是这种速战速决、平淡无奇的故事结局，这也是超级英雄漫画不太需要物理学家参与其中的原因之一。细心的观众会注意到，在电影《蜘蛛侠2》里，章鱼博士的4条机械手臂一直处于比较平衡的状态，或者其中几只手臂会撑在地上，以此增加他身体的稳定性。毕竟，如果这样的设计不合理，他们就无法在电影中表现出来！

怎样能拉动月亮？

还有一种不可思议的强大力量出现在正义联盟（后来他们把团队名称中的“美国”两个字去掉了，但这一系列的漫画名称保持不变）2001年的一次冒险之旅的尾声。在《美国正义联盟》第58期里，超人、神奇女侠和绿灯侠为了击败一群火星叛徒，把月球拉进了地球的大气层。也许我应该先解释一下，为什么他们觉得这是个好办法。

1955年，《侦探漫画》第225期将火星人引入了DC漫画世界，起因

是一个物理学教授想发明一台星际通信装置，却意外制造出传送光束。荣恩·荣兹（火星猎人）因此被带到地球上，他最终成为打击犯罪的超级英雄，也是20世纪60年代美国正义联盟的创始成员之一。荣恩·荣兹拥有一系列可与超人相媲美的超能力，比如飞行、力量超群、刀枪不入、火星呼吸、超级听力、火星视线，以及一些超人梦寐以求的超能力，比如心灵感应、隐身和变换外形。超人的克星是氪石，这导致他施展超能力时总不能一帆风顺；而更强大的火星猎人则有更寻常的阿喀琉斯之踵，所以他才不厌其烦地与其他超级英雄结成同盟。这期漫画故事交代说，荣恩和其他火星人一样，都害怕火。这样一来，你无须寻找火星石头，只要一盒火柴就可以让火星猎人束手无策。

在漫画里，荣恩·荣兹一开始误以为他是火星人中唯一的幸存者；后来，地球遭到了一群邪恶火星人的攻击，他们拥有和荣恩一样的超能力。正义联盟把邪恶的火星人引到月球上，那里没有大气层，这群火星人觉得再也不用害怕火会威胁到他们。然而，荣恩·荣兹用他的心灵感应能力分散了这些坏蛋的注意力，然后超人、神奇女侠和绿灯侠用一根长长的缆绳把月亮拖进了地球的对流层。与此同时，超级英雄们用他们的神奇力量避免了月球和地球之间的引力所造成的地质灾害。这样一来，月球也有了大气层，为了不被火烧成灰，邪恶的火星人只能乖乖投降，并被放逐到另一个维度的空间（幻影区）里。即便你把这一切都看作不合常理的奇迹，这个故事中仍然存在着严重的错误。

牛顿第二定律（$F=ma$）告诉我们，如果有一个力作用于一个物体，不管这个力多大，都会产生相应的加速度。20世纪90年代末，DC漫画中的超人已经能举起80亿磅力的重量了。我们假设，由于事关重大，神奇女侠和绿灯侠在拉动月球的时候使出了跟超人同样大的力量。所以，这三个超级英雄能拉动的总重量是240亿磅力。由于超级英雄们消除了引力的影响，所以当月球靠近地球时，不会受到来自地球引力的任何影响（计算起来也比较简便）。已知月球的质量约为7×10^{22}千克，根据牛顿第二定律，在超级英雄的拉力作用下，月球确实会加速移动。但这个加速度非常小，为5×10^{-12}英尺/秒^2（而地球表面的重力加速度为32英尺/秒^2），要想让月球移动到地球附近需要很长时间。从月球运行轨道到地球大气层的距离约为240000英里，按照上述加速度，至少要花735年的时间！我们只能得出这样一个结论：荣恩·荣兹的拖延手法实在太巧妙了，等到邪恶的火星人发现真相的时候，已经过去了7个多世纪！

有了天使的翅膀，你就能飞吗？

1963年，X战警团队中增加了一位新成员——沃伦·沃辛顿三世（代号“天使”），他的飞行超能力源自他后背上那双巨大的羽翼。这是团队中的其他成员都不具备的能力，除了能造出冰滑梯的冰人外，天使是唯一一个不用走路或坐公交车去迎战邪恶兄弟会[2]的团队成员。其他长着翅膀的超级英雄或恶棍，像DC漫画里的鹰侠或者蜘蛛侠的死对头秃鹫，都是用“反重力”设备克服重力作用的，比如鹰侠的N金属。鹰侠或者鹰女把长在背上的翅膀当作飞行转向装置，秃鹫也是一样，只不过他的翅膀是从手臂上延伸出来的。与他们不同的是，天使靠他的翅膀悬浮在空中。如果后背上长出了翅膀，应该就可以飞翔，这听起来有点儿道理，但真是这样吗？

鸟类和飞机通过牛顿第三定律（每个作用力都有一个与其大小相等、方向相反的反作用力）来摆脱重力的束缚。人们常常错误地认为，飞机飞行靠的是快速移动所引起的压力变化（伯努利效应）。在第4章中，闪电侠拽着强壮的博拉兹极速奔跑时，就产生了压力差。闪电侠在快速移动的过程中必然会将前方的空气推开，他的身后就会形成一个低密度区。与我们在第13章讨论的熵的原理相同，当周围的空气流动过来填补这个区域时，它会推开那里的所有物体，比如高速行驶的汽车或火车后面飞舞的垃圾。但是，如果机翼上方和下方的风速差异是由机翼外形造成的，飞机就没办法向上飞，因为伯努利效应往往会把飞机推向地面。

无论在何种情况下，牛顿第三定律都是靠得住的。它告诉我们，力总是成对出现的。为了给飞机机翼施加一个大于或等于飞机重量的向上的力，机翼必须给空气施加一个大小相等的向下的力。机翼下方向下运动的气流会产生向上的力，托着飞机飞入无边无际的蔚蓝天空。当超人跳起来的时候，他会用力蹬地，产生一个大小相等、方向相反的反作用力，让他一跃而起。同样，鸟类扇动翅膀，会将一部分空气向下推。翅膀对空气施加的向下的力，与空气对翅膀施加的向上的力是一对作用力与反作用力。翼展越大，空气置换量就越大，向上的力也越大。因此，海王子纳摩不可能靠他脚踝上的那对小小的翅膀飞起来。这对翅膀实在太小，没办法产生足够的力，托着纳摩飞起来。

如果沃伦·沃辛顿三世的体重是150磅（相当于68千克），那么他的

翅膀至少要对空气施加一个150磅力的向下的力，空气对翅膀施加的反作用力才能让他双脚离地。当然，如果他想加速，他的翅膀就必须对空气施加一个大于150磅力的向下的力，这样向上的净力（向上的力减去向下的力）才能产生一个向上的加速度。如果他的翅膀受到的向上的力是200磅力，而向下的重力是150磅力，沃伦就会受到50磅力的向上的净力作用。力等于质量乘以加速度，因此这50磅力的向上的净力会产生11英尺/秒^{2}的向上的加速度。有了这个加速度，天使的上升速度从0增加至60英里/小时所需的时间约为8秒钟多一点儿，在这里我们忽略了他必须克服的相当大的空气阻力。一旦他停止拍打翅膀，他受到的唯一的力就是把他拉回地面的重力。当然，他飞起来之后就可以在空中滑翔，但他必须对空气持续施加向下的力，才能真正地飞行，而不只是滑翔。

对于他的翅膀来说，200磅力是一个相当大的力，但一个人想举起自己体重的133%也不是不可能。加利福尼亚秃鹫和信天翁的体重分别约为30磅和20磅，但它们仍然能够飞行。然而，沃伦·沃辛顿三世的身体构造和鸟类是不同的。鸟类的翅膀不是从后背上长出来的，而是由它们的手臂演化成的。此外，鸟类还有两个特别之处：第一，它们长有龙骨突，即胸部中间扁平的骨头上的突起，它能为身体的其他部分提供一个支点，比如胸大肌和喙上肌。第二，鸟类拥有两片非常发达的胸部肌肉用于挥动翅膀，也就是刚刚提到的胸大肌和喙上肌。鸟类之所以有如此发达的胸部肌肉，是因为它们主要靠这些肌肉来为飞行提供力量。我们在第8章和第25章中讲过，骨骼或肌肉的力量会随着其横截面积的增加而增加。因此，天使要想凭借他的翅膀飞离地面的话，他就需要有极其发达的胸肌。沃伦的翼展为16英尺，体重为150磅，因此他的体重和翼展的比率为每英尺9磅，而加利福尼亚秃鹫的这一比率为每英尺3磅。沃伦的手臂无法为他的翅膀提供力量，所以他只能依靠胸部和背部的肌肉，这让他成为一个肌肉发达却没什么实际威力的超级英雄。

沃伦也可以拥有其他适合飞行的身体结构，但这需要更多的不合常理的奇迹。为了减轻体重，鸟类的骨骼非常轻巧，多孔而坚固。鸟类的呼吸系统也很有效率，只需要深呼吸两次，它们肺里的每一个空气分子就都能被置换出去。相比之下，我们每呼吸一次只能置换肺里10%的空气分子。鸟类为了在空中飞行，它们的胸肌一直在高强度地工作，这迫使它们必须快速完成换气。所以，沃伦的呼吸也得达到这样的效率才行。总之，除非他拥有大块发达的胸肌（这更适用于20世纪90年代的女性超级英雄），否则他的翅膀的观赏价值将远大于实用价值。

幻视来了！

20世纪60年代中期，罗伊·托马斯成为漫威漫画公司的《复仇者联盟》系列漫画的编剧，他常常以白银时代的手法重新塑造黄金时代的人物，这与DC漫画公司在白银时代的做法如出一辙。托马斯和漫画师约翰·布谢马联手塑造了一个广受欢迎的角色——幻视。20世纪40年代的幻视是一位拥有超能力、身穿制服的超级英雄，而在《复仇者联盟》第57期全新登场的幻视则是一个机器人，由另一个机器人奥创制造。奥创是复仇者联盟的最危险的对手之一，他创造幻视的目的是让他潜入联盟内部，使联盟土崩瓦解。但后来，幻视改写了自己的既定程序，挽救了复仇者联盟成员的生命，并成为团队中的一位重要成员。

除了拥有激光视线、飞行能力和计算机思维之外，幻视还可以自主控制身体密度。他能让自己的身体或者身体的任意部分坚硬得像钻石一样，或者隐身穿过固体。X战警成员幻影猫穿墙而过靠的是她的量子隧穿的超能力，但幻视想进入一个房间时，还是会选择从门进去。

物体的密度指的是单位体积的质量，所以密度的变化是由质量的变化或者体积的变化引起的，体积是由原子之间的平均距离决定的。固体中的原子通常排列得很紧密，我们可以认为原子是互相接触的（它们必须挨得很近才能形成化学键，而固体中的原子能够聚拢在一起靠的就是化学键）。

即使幻视能自主控制他的身体密度，同时保持身体结构的完整，他也不可能穿墙而过。气体（比如你房间里的空气）是相当稀薄的，原子的平均间距大约是原子大小的10倍。然而，空气的密度比墙壁小并不意味着空气可以穿墙而过。这是件好事，否则机舱中的空气就会从机身漏出去，这会让空中之旅异常憋闷。因此，我们可以断定，制造出可以自主改变密度的幻视，是奥创犯下的第二个错误（他犯的第一个错误是，盲目地相信这样一个具有崇高精神的机器人会背叛伟大的复仇者联盟）。

原子侠能沿着电话线跑吗？

本书中有很多章都讲到了DC漫画的超级英雄原子侠，他能够自主改变体积和质量的能力为各种各样的物理现象提供了很好的例证。当然有时候，缩小的体量会导致他陷入极其荒谬的境地，比如无论他造访哪一个拥有文明、城市和先进技术的世界，这些不同的世界全都存在于一个小小的原子内部。1立方厘米的固体中约有10^{24}个原子，而原子侠总能找到他想找的那个微观世界，这实在令人不可思议，除非元素周期表中每一个元素都具备相同的常规特征。1989年，在第二个原子侠漫画系列《原子侠的威力》第12期中，有一段对话默认了原子侠的超能力根本不现实。在这个故事中，为了逃出一个大反派设置的死亡陷阱，原子侠把自己和一名同伴的体量都缩小到亚原子大小，以便从地板原子间的空隙钻出去。在这个过程中他们停下来，坐在电子上，讨论之前遇到的难题。原子侠的同伴突然注意到他们比氧气分子还小，就惊奇地问原子侠：“我们是怎么呼吸的呢？”原子侠诚实地回答道：“我也不知道。”

超人会飞，闪电侠跑得飞快，鹰侠有翅膀和反重力腰带，暴风女可以乘风飞行，但对于体量非常小的超级英雄来说，他们是如何四处游走的呢？蚁人把会飞的木蚁当作自己的私人出租车，黄蜂侠变小后背上会长出翅膀，原子侠则靠贝尔电话公司。在《展示橱》第34期里，白银时代的原子侠首次登场，他使用了一种独特的交通方式。在这个故事中，他需要对付一个不入流的骗子——卡尔·巴拉德，巴拉德住在离原子侠的城市很远的地方。这个故事的大概情节是：原子侠在电话簿里找到巴拉德的电话号码，一边拨打电话，一边在听筒旁边放了一个发出“嘀嗒”声的节拍器。原子侠把身体变小后跳进了话筒上的洞眼里，在下一幅图中，我们看到他从卡尔·巴拉德电话的听筒里飞了出来。

这期漫画的最后几页“解释”了这个过程。[3]通过拨打巴拉德的电话，原子侠制造出从他的电话传递到电话公司的脉冲信号，然后信号又被传递到巴拉德的电话。当巴拉德接起电话时，一个电路回路就形成了，信号——在这个故事里是节拍器的嘀嗒声——成功地从原子侠的电话传输至巴拉德的电话。就这样，原子侠跳进话筒，并缩小到一个电子大小，乘着脉冲信号到达巴拉德那里。

这段文字的作者是DC漫画公司的编辑尤利乌斯·史瓦茨，尤利乌斯正确地描述了电话是如何把声音转换成脉冲信号的。当声波撞击膜片时，膜片会发生振动，使碳粒的接触程度发生变化。流经碳粒的电流对于碳粒的接触程度的变化非常敏感。当你对着话筒说话时，碳粒的接触程度会发生变化，电话线中的脉冲信号也会发生相应的变化。在电话的

另一端，脉冲信号使碳粒发生相同的变化，这种振动会传递到电话听筒的膜片上。膜片的振动会在空气中产生压力波，被接听者的耳朵捕捉到。所有这些，尤利乌斯·史瓦茨都说对了。他唯一的错误就是认为原子侠可以搭脉冲信号的便车在电话线中前行。

当你说话的时候，复杂的声波可以传递相关信息。声波会被一个膜片（比如耳膜）探测到，并使它振动，膜片振动的振幅、波长、相位与声波一一对应。携带信息的是声波，而不是你口中呼出的空气。当你说话时，由你的嘴巴向外的区域呈现低密度和高密度空气交替出现的特点（你可以把密度的变化看作压力的变化，在恒温条件下这两者近似相等）。并不是你呼出的空气传播到了听者那里，否则你就不用因为隔壁邻居的吵闹声而烦恼了。

同样地，电话线中的脉冲信号是通过电荷密度波传输的，而不是通过电荷在电话线中的移动。实际情况是，电子密度高于正常水平的区域是不稳定的（因为带负电荷的电子会互相排斥），并且会扩展到相邻区域，这会使得下一个区域中的电子密度增加，以此类推。脉冲信号的传输速度是由将电子推开的静电排斥力决定的。如果我使一个电子发生振动，那么一定距离外的第二个电子要过多久才会对第一个电子的振动做出反应？事实证明，这个时间极短，因为电荷间发生相互作用的速度是光速的1/3左右。根据距离的不同，第一个电荷的运动与第二个电荷对前者的运动做出反应之间会有一个非常微小的时间差。光速非常快，因此在12英尺的距离内，这个时间差将小于十亿分之一秒。如果原子侠乘着携带脉冲信号的电子通过电话线，他就必须以光速不断地从一个电子跳到下一个电子上，才能到达电话的另一端。

事实上，电话线中的信号是以光速传输的，这对我们而言是个好消息，因为电子受外部电场的作用沿电话线移动的平均速度还不到1毫米/秒，约为光速的一万亿分之一。与其等着电子传输信息，还不如直接走到你想找的那个人家里，面对面把话告诉他。

每个物理学家都有的超能力

在成为原子侠之前，身为普通人的雷·帕尔默也是一位英雄，因为他是常春藤大学的物理学教授。正如我在第13章介绍的，帕尔默在深夜

发现了一块奇怪的陨石，这块陨石使他的研究取得了突破，他从此成为身着制服的超级英雄。如图43所示，帕尔默发现这块陨石其实是由白矮星物质组成的，这种物质能让他变小，还能自主控制他的质量。雷竭尽全力把这块直径约为12英寸的陨石搬到自己车上，此时他内心的想法是：“太重了，我搬不动！我不知道白矮星撞上另一个星球的概率，但这确实是有可能的，撞击产生的碎片就落到了这里！”（顺便说一下，如图43所示，20世纪60年代中期，物理学教授通常会开着凯迪拉克牌敞篷车。）


白矮星的密度很高，因为它是由简并物质组成的，这些物质的电子被剥离后，空间被极大地压缩了！
我不知道白矮星撞上另一个星球的概率，但这确实是有可能的，撞击产生的碎片就落到了这里！
深点儿挖，我发现的这个碎片肯定是白矮星的一部分……
太重了，我搬不动！

图43 物理学教授雷·帕尔默发现了白矮星的残骸，这正是他的微缩装置上缺少的东西，最终他成了超级英雄原子侠（《展示橱》第34期）

帕尔默的推理是正确的。如果一定大小的低质量恒星消耗了它的大部分燃料，聚变反应释放出来的能量将不足以抵消恒星中心的引力，这种巨大的引力就会导致恒星发生严重坍缩，直到它的密度变成每立方厘米3000千克，我们将这种残余物称为“白矮星”。白矮星中心的引力如此之大，以至于只有大爆炸才能产生足够的能量，使一小部分白矮星物质摆脱引力的束缚。

正如帕尔默竭力搬动陨石时想的那样，这块陨石是由简并物质构成的。我们认为电子是简并态，因为它们都处于能量最低的量子态，而不像普通恒星的电子有许多不同的量子态，一些电子处于更高的能量级。白矮星的核心由碳原子核和氧原子核组成，外面被海量的电子紧紧地包围。白矮星的核心很难被进一步压缩，因为所有电子都处于可能范围内的最低能量级。帕尔默所表达的正是这个意思，当靠近自己的车时他暗自想道，白矮星是由“简并物质组成的，这些物质的电子被剥离后，空间被极大地压缩了”。电子仍然存在，但不与任何特定的原子、离子相连。

简并态就是白矮星的密度如此大的原因，关于这一点，帕尔默无疑是正确的。帕尔默搬动的这块陨石的半径为6英寸，假设它是球形的，它的体积就是（4π/3）×半径^3=（4π/3）×（6英寸）^{3}=905英寸^3，约等于15000厘米^3。为了计算出这块陨石的质量，我们用白矮星的密度（300万克/厘米^3）乘以它的体积（15000厘米^3），得到4500万千克。我们用这个质量乘以重力加速度，就会得到图43中的陨石重量为1亿磅力。难怪帕尔默这位常春藤大学的物理学教授会如此气喘吁吁地搬这块陨石，因为这块小小的石头几乎重50000吨！

但从理论上讲，这不算个大错误。图43的场景没有什么问题，因为我们的物理学教授就——是——那——么——强——壮！下次当你在沙滩上想朝着别人脸上踢沙子时，千万别忘了这一点。你永远不会知道，那个看似只有98磅重的弱不禁风的小子竟然是一个物理学系的高才生。

[1]基克洛普斯是希腊神话中西西里岛上的独眼巨人。——译者注

[2]在我看来，现在几乎没有哪个组织会自豪地将“邪恶”这个词用在自己的团队名称中。

[3]20世纪50年代末60年代初，为了把漫画划归期刊类，从而按第二等邮件收取邮费，漫画通常包括至少两页的零散内容，从而使漫画书更符合期刊的基本定义。

后记

漫画作品和物理学很合拍，这并不奇怪，毕竟我们从科学中得到的乐趣和从超级英雄漫画中得到的乐趣并没有什么不同。原因在于，科学家或漫画迷都要把一系列的规则应用于新鲜、有趣的问题。这些规则可能是麦克斯韦方程组，也可能是薛定谔方程，而新鲜、有趣的问题则可能是研发出用来代替真空管的半导体。或者，这些规则可能是超级英雄高速奔跑，他的身体周围的光晕可以保护他免受空气阻力和电磁感应的负面影响，而新鲜、有趣的问题则是，他要抓住那个拿着冰冻射线枪的恶棍，找回银行失窃的现金，且不能伤及无辜。在这两种情况下，关键之处就在于找到一种以新的方式应用已知规则的方法（如果既有的解决方案还能用，就直接拿来用），还要确保这种方法在现有规则下是切实可行的。如果我们想设计一种晶体管设备，其正常运行的前提条件是电子一分为二，或者在没有正电荷的情况下电子相互吸引，那么这种构想就是不切实际的，因为根据我们的观察，负电荷不具备这种特性。同样地，如果闪电侠在漫画里用从眼睛里射出的热视线击败冰冻队长，也会让人觉得很奇怪，因为闪电侠没有这种超能力。

基础科学的研究目标是阐明自然界的基本规律，最高成就则是发现一种新的规律或原理，或者证明某个既有规则存在反例，因为我们常常会在发现旧规则不再适用时，发现新的知识或规则。同样，有时候，某些存在时间较长的漫画人物会突然获得前所未有的超能力，比如在《神奇四侠》第22期里，神奇四侠中的苏·斯通发现宇宙射线赋予了她隐身能力，她还可以制造出“隐形力场”[1]。有了这个新的超能力之后，苏·斯通和她的队友之间的关系发生了根本性改变，后来她又获得了制造防御力场和攻击力场的能力。

这种情况无论在漫画里还是在现实世界中都相当罕见。然而，在物理学领域，新鲜、有趣的问题是无穷无尽的，正如漫画里引人入胜的故事总是源源不断、层出不穷。科学和漫画具有两个相同的核心特点：理解游戏的基本规则，具备丰富的想象力。

科学家在选择研究课题的时候通常不会参考漫画书（如果研究计划里充斥着超级英雄，资助机构恐怕会频频摇头），但是在最优秀的科学

研究和最精彩的漫画故事中，像“如果……会怎样”或“将会发生什么……”这样的怀疑精神都是必不可少的。当然，漫画和科幻小说有些时候也能预测到未来的科学发现。

而有时，科学则需要费些时间才能赶上漫画的脚步。举个例子，《闪电侠》漫画中的反派魔术师阿伯拉·卡达波拉自始至终都让闪电侠头痛不已。他穿着舞台表演的晚礼服，戴着礼帽，对闪电侠施展“魔法”，比如把闪电侠变成人形木偶。然而，故事告诉我们，阿伯拉·卡达波拉是一位来自遥远未来的科学家，他在20世纪使用的“魔法”实际上是64世纪的科学技术。[2]《闪电侠》漫画的创作者显然认为，我们今天的科学技术放在很久以前就是“魔法”。你可以想象一下，如果你穿越到1000年前，拿出几种现在常见的家用电器（假设你还随身带着电源），你将看到那时的人们做出什么样的反应。

在白银时代的漫画故事中，对于64世纪的科学技术是如何把人变成人形木偶的，创作者故意闪烁其词。直到20世纪90年代末才给出了解释，卡达波拉告诉我们，他运用纳米技术从分子层面重构了闪电侠，这再次表明一个邪恶的科学家会造成什么样的麻烦。当然，纳米级大小的机器人不能把人变成木偶，但只要不违背既有的物理学原理，几千年后会发生什么，又有谁能说得清呢？

公平地讲，推理小说对于未来的预测有时候在一些技术细节方面确实是正确的，但也漏掉了其他许多推动社会变革的革命。我们以1965年的电视剧《迷失太空》（*Lost in Space*）为例。这部广受欢迎的电视剧讲述的是鲁滨逊一家的星际之旅，和他们一起的还有一个智能机器人和一个邪恶而软弱的偷渡客——扎卡里·史密斯博士。该剧于1965年9月15日首次播出，故事发生在遥远的未来，也就是1997年10月。正如1997年《纽约时报》上的一篇文章（主要报道了这部剧的重播消息）所说，《迷失太空》的制作人和编剧以为30年后我们就会拥有宇宙飞船和机器人，这显然是不对的，但他们对于20世纪90年代末的生活方式的预测却错得更加离谱。

在宇宙飞船准备起飞的阶段，往往会出现这样一个场景：在地面指挥中心，一群穿着白色短袖衬衫的工程师坐在计算机显示器前，每个工程师的手肘旁都有一个小小的金属盘，这在今天的美国国家航空航天局根本不可能看到。1965年的那些科幻作家万万没想到，30年后，地面指挥中心是完全无烟的环境，不可能有烟灰缸。所以，与预测未来的社会习惯相比，预测未来的科技创新实在是小菜一碟。[3]

要说对自然界的研究证明了什么的话，那就是我们越聪明，就会越强大（跟绿巨人可不一样）。既然你已经读完了本书，你也许会觉得自己变强大了，就算身体方面没什么变化，至少头脑应该不同了，这种强大才是真正的强大。智慧给人类带来了竞争优势，使我们成为地球上的优势物种。我们无法像美洲豹一样风驰电掣，也无法像鹰一样在天空翱翔；我们不如熊强壮，也不如蟑螂的生命力顽强。我们的智慧就是我们的超能力，如果你愿意好好利用它的话。正如量子力学先驱玻尔所说：“知识本身就是文明的基础。”

漫画中的冒险之旅与科学研究秉持同样的乐观精神，二者都认为，我们能够战胜自然界中的种种挑战，让这个世界变得更美好。我们应该如何利用这些科学知识，是用来缓解饥荒、治疗疾病，还是用来制造智能机器人，都取决于我们自己。要想知道如何正确恰当地运用知识，我们可以在漫画故事中找到答案。在《惊奇幻想》第15期中，蜘蛛侠初次登场，这个故事的结尾说：“能力越大，责任越大。”时至今日，这个道理仍然正确。但责任到底是什么呢？在《超人》第156期“超人的告别”里，我们或许可以找到答案。超人认为自己即将死于X型病毒感染（还好这不是真的），他用热视线在月球上刻下了一段留给地球人的遗言，希望在他死后有人会发现这段话：“善待他人，每个人都可以成为超人！”

加油吧，读者们！

[1]事实上，这个能力有点儿多余。因为漫画中的所有力场几乎都是看不见、摸不着的，只有一个例外。绿灯侠的戒指只要遇到黄色的东西就会失效，而在《绿灯侠》第24期中，大反派鲨鱼王能制造出“黄色隐形力场”。所以，我要把之前说过的话再说一遍：我爱白银时代的漫画书！

[2]社会终于发展到田园牧歌式阶段，但卡达波拉对这样的生活却感到厌倦，于是他回到我们所在的年代，到处搞破坏。这种想要摆脱乌托邦生活的渴望也让漫威漫画中的征服者康来到了我们的时代，他的目的则是征服世界。看来人类的本性——至少对某些人来说——就是与有序、完善的社会作对。

[3]有时候这些变化发生在很久以后。





扫此二维码，加我微信好友

扫此二维码，添加微信公众号

还有什么想要读的书？

加小编私人微信wordgai或搜索订阅号微信“互联网分享社区”

按照订阅号书单提示下载

致谢

由于明尼苏达大学天文系教授特里·琼斯（Terry Jones）在一次学生的口头测试中的无心之举，让我萌生了开设超级英雄物理学课程的念头。在物理专业研究生的课程中，学生需要面对的一个常规的学术性难题就是物理学常识检测，教师会直接向学生发问，学生只能通过粉笔和黑板演算，然后作答。特里问了一个问题：“《星球大战》第四集‘新希望’中死星的能量要达到多大，才能炸毁奥德兰星？”这让我想到其他爆炸的行星，并有了开设一门超级英雄物理学课程的想法。

说到启发思维，我要感谢我在大学和研究生时期的多位物理老师和导师。我要特别感谢史蒂夫·科特斯拉斯、约翰·雅各布森、罗伯特·阿尔法诺、纳基斯·扎尔、彼得·迪、蒂莫西·博耶、弗雷德里克·W.史密斯、肯尼思·鲁宾、悉尼·R.内格尔、罗伯特·A.斯特里特和赫尔穆特·弗里切。他们既教授我物理学知识，也教会我如何成为一名物理学家。

对于这些年来给我带来无尽乐趣的漫画书的创作者们，我也要表达我的谢意。要感谢的人太多，我要特别感谢我年少时看的那些漫画书的创作者们：加德纳·福克斯、约翰·布鲁姆、卡迈恩·因凡蒂诺、吉尔·凯恩、吉恩·科兰、约翰·罗米塔、罗伯特·卡尼格尔、斯蒂夫·迪特科，以及三大巨头尤利乌斯·史瓦茨、斯坦·李和杰克·科比。在他们的故事里，超级英雄用自己的智慧和超能力力挽狂澜，这让我很早就意识到智慧的重要性。当然，能量指环也很有用。

感谢劳伦斯·克劳斯教授愿意为本书写推荐序。借此机会，我还要感谢克雷格·舒特（白银时代先生），我堂而皇之地从他的《婴儿潮时代漫画》中取材，并用在后记中。

我非常感谢我的母亲，她让我爱上了阅读，为我树立了终身学习和批判性思考的榜样。我的孩子——托马斯、劳拉和戴维，他们自愿成为我的测试对象，对本书中的很多内容提出了建议，他们的反馈让我受益匪浅。我要感谢劳拉·亚当斯和艾伦·戈德曼为图38提供的扫描隧道显微镜图像。我要感谢朋友、家人和梦港图书漫画公司（Dreamhaven Books and Comics）的员工对我的支持和建议。

如果没有2001~2003年我的新生研讨课上的学生们以及2003年专家夜校中的学生们的贡献，我不可能完成本书。他们以精辟的评论、机智的想法和对超级英雄物理学的独特见解，大大地充实了我的课堂教学。特别是埃里克·卡伦、克里斯延·巴比里、马特·比亚利克、德鲁·戈贝尔和克里斯托弗·布鲁蒙德所提出的问题，直接变成了本书中的部分话题。

写一本超级英雄物理学的书还有一个额外的好处，那就是它为研究老问题提供了一个新的视角。然而，在对这些有趣的问题（比如以神速力奔跑或者任意改变隧穿概率）进行严肃讨论的过程中，也存在一个问题，那就是无法把实验作为分析验证的手段。明尼苏达大学物理与天文学院的同事仔细考虑了这一问题，尽可能减轻了这一不利因素的影响。我非常感激E.丹·德雷伯格教授，他慷慨地付出很多时间，阅读了我的全部书稿，发现了一些错误，以及一些过于简略的论述。此外，本杰明·巴伊马尔、查尔斯·E.坎贝尔、米歇尔·詹森、拉塞尔·霍比、马尔科·佩洛索和约翰·布罗德赫斯特等教授也审查了本书中的某些章节，本书在他们的帮助下有了大幅提升。此外，我从马克·韦德、杰勒德·琼斯和库尔特·布谢克那里也得到了很多有益的意见和建议。马库斯·珀斯尔仔细阅读了本书的英文版平装本，并提出了相关建议。如果书中还有任何错误或者语焉不详之处，就都是我的责任，姑且让我把这些错误当成故意藏在书里的“复活节彩蛋”，留待细心的读者去发现。

最后，我还要感谢以下人士，没有他们的帮助，我的书一定会逊色不少。首先是我的经纪人杰伊·曼德尔，他提出可以从超级英雄的角度来写一本教授物理学知识的书，他在最开始对创造思路提供了关键性的指导，并帮助设定了整本书的基调。我很荣幸，哥谭出版社的布伦丹·卡希尔成为本书英文版的编辑。他对全书架构的技术性建议极大地改进了书稿，让我这个新手避免了不少“新手会犯的错误”。布伦丹对本书的设想有效地补充了我自己的观点，同样重要的是，他对超级英雄漫画书非常了解，提出了很多我没有想到的例子。此外，英文文字编辑拉谢尔·纳什纳对于提高本书的可读性起到了重要作用。珍妮·艾伦检查了书里用到的所有数字，作为朋友能做到这样，我非常感谢。威廉·莫里斯公司的塔利·罗森布拉特（前期）和莉莎·捷那坦波（后期）以及哥谭出版社的帕特里克·马利肯，对时不时冒出来的技术性问题总能妥善解决。

我的妻子泰蕾兹一直在鼓励我。从一开始，她对我的支持就远远超乎了我的预期。她读过我的所有书稿，如果缺少了她的建议和意见，本

书将无法完成。总之，我是一个幸运的人。

附录一 重要公式

牛顿的三大运动定律

正如艾萨克·牛顿阐明的那样，动力学的基本原理是：第一，如果没有外力的作用，静止的物体将保持静止，做匀速直线运动的物体将保持这种运动；第二，如果有外力作用于一个物体，那么物体的运动状态（速度或方向）变化将与外力成正比，即$F=ma$；第三，力总是成对出现的，也就是每个作用力都有一个与其大小相等、方向相反的反作用力。

加速度的定义

加速度指的是速度的变化率，既包括它的大小，也包括它的方向。加速度的单位是（距离/时间）/时间或距离/时间^2。

重量=mg

当外力是行星引力时，根据牛顿第二定律（$F=ma$）即可得到这个公式。其中力就是重量，重力加速度由字母“g”表示。

$v^2=2gh$

这个公式描述的是在重力作用下，运动的物体经过的距离为h时的速度为v。速度v可能会随着物体的上升而不断变慢，也可能随着物体的下落而不断加快。

$$引力=G\times（质量1\times质量2）/距离^2$$

这个公式也是由艾萨克·牛顿提出的，表示任意两个物体之间的引力。这个力与物体质量的乘积成正比，与物体之间距离的平方成反比。

$$g=GM/R^2$$

根据牛顿万有引力定律，任何宏观物体（比如行星或月球）的重力加速度都可以表示为常数G（$G=6.67\times10^{-11}\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}\cdot\mathrm{sec}^2$）乘以物体的质量$M$，再除以物体半径的平方。这个公式只适用于球对称的物体。

$$g_K/g_E=\rho_K R_K/\rho_E R_E$$

行星的质量可以表示为它的密度ρ与体积（$4\pi R^3/3$）的乘积，因此重力加速度$g=GM/R^2$也可以表示为（$4\pi/3$）$G\rho R$。当我们计算两个行星的重力加速度之比时，就可以消去其中的常数G和$4\pi/3$。

$$力\times时间=质量\times速度的变化量$$

这个公式是以另一种方式表达牛顿第二定律，即加速度等于速度的变化量除以外力作用的时间。质量与物体速度的乘积就是动能。

压力=大气压力+（密度×重力加速度×深度）

水下的压力会随深度的增加而增加。水面处的压力就等于大气压力，物体下潜得越深，压力就越大。

向心加速度$a=v^2/R$

以速度*v*沿着圆弧（半径为*R*）轨迹运动的物体，其加速度的方向在不断变化。加速度的大小是v^2/R，只在指向圆弧中心的外力$F=mv^2/R$作用于物体时，物体的运动状态才会发生变化。

功=力×位移

物理学中的功是能量的另一种表达方式。当物体在外力的作用下发生位移时，物体的动能就会发生变化。这个公式说明，当你仅把重物托在头顶上时，你没有做功。因为尽管你提供了外力，但是物体并没有发生位移。这与“功”这个词平常的含义不太一样，但从物理学角度讲是正确的。你把物体举过头顶时，它的势能增加了，如果你继续保持这个姿势不动，物体的能量就不会再发生变化了。

动能=（1/2）mv^2；势能=mgh

这两个公式分别表示动能和势能。注意，势能的公式与将物体举到高度*h*时所做功的公式相同。

热力学第一定律

该定律本质上是对能量守恒定律的重述，表明了系统内部能量的变化来自作用于系统的功或者系统所做的功，抑或流入或流出系统的能量。

热力学第二定律

热量会从较热的物体传向较冷的物体，在把热量转化为功（力与位移的乘积）的过程中，必然有一些损失。也就是说，我们不可能把热量百分之百地转化为功。这与所涉及系统的熵有关，熵衡量的是系统构成方式的可能性。

热力学第三定律

当处于平衡状态的系统温度（温度衡量的是系统组成部分的平均能量）降低时，熵也会减小。如果系统只有一种可能的构成方式，它的熵就是零，这种状态只在每一个组成部分的能量均为零的时候才会实现。也就是说在绝对零度的条件下，熵才会为零，但在现实世界中这是不可能的。

库仑定律

这是两个带电物体之间的静电力的数学公式，说明力与两个物体的电荷的乘积成正比，与它们距离的平方成反比。从数学角度看，这个公式与牛顿万有引力公式一样。然而，万有引力始终是一种吸引力，而两个带电物体之间则存在不同的情况。当它们的电荷相反时（一正一负），物体之间的力是吸引力；当它们的电荷相同时（均为正或负），

则为排斥力。

欧姆定律V=IR

这个公式计算的是在电阻为*R*的导体中，电流*I*（单位时间内经过某一点的电荷数）与电压*V*的关系。虽然这个公式适用于大多数金属，但并不是所有的电子设备都满足这种简单的线性关系。

能量公式E=hf

这个公式说明，对于任何频率为*f*的原子系统，其能量只能以*E=hf*为量级。其中*h*为普朗克常数，它是自然界的基本常数。当一个系统通过发射或吸收光来减少或增加能量时，必须借助量子化的能量包，这种能量包被称为“光子”。

德布罗意关系式Pλ=h

任何动量为*P*的物质的运动都与物质波的波长有关，动量和物质波波长的乘积是普朗克常数*h*。

薛定谔方程

这是量子运动的基本波动方程。已知作用于物体的势场，我们就可以求解方程，得出描述其行为特征的波函数Ψ。对波函数求二次方，就可以得到在特定的时空中发现量子的概率密度；有了概率密度，就可以计算出任何可测量的值（位置、动量等）的平均值或期望值。

附录二 推荐书目

导论 科学是如何拯救超级英雄的

关于漫画的早期历史有许多优秀的论著。除了我在正文中提到的著作，我还要推荐以下几部：杰勒德·琼斯（Gerard Jones）所著的《明日之躯：极客、黑帮与漫画书的诞生》（*Men of Tomorrow: Geeks, Gangsters, and the Birth of the Comic Book*, Basic Books, 2004），罗宁·罗（Ronin Ro）所著的《惊异故事：杰克·科比、斯坦·李与全美漫画革命》（*Tales to Astonish: Jack Kirby, Stan Lee, and the American Comic Book Revolution*, Bloomsbury, 2004），马克·伊万尼尔（Mark Evanier）所著的《科比：漫画之王》（*Kirby, King of Comics*, Abrams, 2008），戴维·哈伊杜（David Hajdu）所著的《10美分的瘟疫：漫画大恐慌及其对美国的改变》（*The Ten Cent Plague: The Great Comic-Book Scare and How It Changed America*, Farrar, Straus and Giroux, 2008），罗恩·戈拉特（Ron Goulart）所著的《伟大的美国漫画》（*Great American Comic Books*, Publications International, 2001）。吉姆·斯特兰科（Jim Steranko）在他所著的两卷本《斯特兰科漫画史》（*The Steranko History of Comics*, Supergraphics, 1970, 1972）中，对低俗小说中的英雄发展到漫画中的超级英雄这段历史进行了详尽而有趣的阐释。莱斯·丹尼尔斯（Les Daniels）撰写了关于漫画人物的大量著作，他的以下作品都非常值得一看：《DC漫画：60年来世界最受欢迎的漫画英雄》（*DC Comics: Sixty Years of the World's Favorite Comic Book Heroes*, Bulfinch Press, 1995），《超人大历史》（*Superman*: *The Complete History*, Chronicle Books, 1998），《蝙蝠侠大历史》（*Batman: The Complete History*, Chronicle Books, 2004），《神奇女侠大历史》（*Wonder Woman: The Complete History*, Chronicle Books, 2001），《漫威：50年来世界上最伟大的漫画奇迹》（*Marvel*: *Five Fabulous Decades of the World's Greatest Comics*）。此外，还有丹尼尔·赫尔曼（Daniel Herman）所著的《白银时代：第二代漫画师》（*Silver Age: The Second Generation of Comic Book Artists*, Hermes Press, 2004）。布拉德福德·赖

特（Bradford W. Wright）在《漫画国度》（约翰霍普金斯大学出版社，2001）中对美国流行文化中的漫画人物进行了历史性分析。

克雷格·舒特（Craig Shutt）所著的《婴儿潮时代的漫画：20世纪60年代狂野、古怪而精彩的漫画书》（*Baby Boomer Comics: The Wild, Wacky, Wonderful Comic Books of the 1960s*, Krause Publications, 2003）虽然不能算作漫画历史书，但其对白银时代漫画的起起伏伏做了很有趣的总结。

还有一些作者探讨了超级英雄漫画背后的科学知识，如果有的读者觉得自己喜欢的漫画人物在本书中被探讨得不够充分，那么可以看看下面这些书：林科·雅克（Linc Yaco）与卡伦·哈伯（Karen Haber）合著的《X战警中的科学》（*The Science of the X-Men*, iBooks, 2000），马克·沃尔弗顿（Mark Wolverton）所著的《超人中的科学》（*The Science of Superman*, iBooks, 2002），洛伊丝·格莱什（Lois Gresh）和罗伯特·温伯格（Robert Weinberg）合著的《超级英雄的科学》（*The Science of Superheroes*, Wiley, 2002）和《大反派的科学》（*The Science of Supervillains*, 2004）。还有一些著作也探讨了流行文化背后的科学知识，包括劳伦斯·克劳斯（Lawrence Krauss）所著的《星际迷航中的物理学》（*The Physics of Star Trek*, Basic Books, 1995），珍妮·卡维洛斯（Jeanne Cavelos）所著的《星球大战中的科学》（*The Science of Star Wars*, St. Martin's Press, 1998）和《X档案中的科学》（*The Science of the X-Files*, Berkley, 1998），罗杰·海菲尔德所著的《圣诞节中的物理学》（*The Physics of Christmas* by Roger Highfield, Little, Brown & Company, 1998）和《哈利·波特故事中的科学》（*The Science of Harry Potter*, Viking, 2002），以及珍妮弗·奥莱特（Jennifer Ouellette）所著的《吸血鬼猎人巴菲中的物理学》（*The Physics of the Buffyverse* by Jennifer Ouellette, Penguin, 2006）。

如果读者有兴趣探索物理学中的哲学体系和本质，那么可以参考理查德·费曼（Richard Feynman）的《物理定律的特征》（*The Character of Physical Law*, Random House, 1994）和《发现的乐趣：理查德·P.费曼短篇精选》（*The Pleasure of Finding Things Out: The Best Short Works of Richard P. Feynman*, Perseus Publishing, 2000），以及米尔顿·A.罗斯曼（Milton A. Rothman）的《发现自然法则：物理学实验基础》（*Discovering the Natural Laws: The Experimental Basis of Physics*, Dover, 1989）和《费米方法：汉斯·克里斯蒂安·冯贝耶尔科学论文集》（*The*

Fermi Solution: Essays on Science by Hans Christian von Baeyer, Dover, 2001）。

第一部分 力学

本书中的很多话题都是物理学的入门知识，如果读者们愿意吃点儿苦头，想看一下传统的物理学教材（或者想证明我没玩什么把戏），就可以看看保罗·G.休伊特（Paul G. Hewitt）的《观念物理》（*Conceptual Physics*, Prentice Hall, 2002）。它是一本高中物理学教科书，所以其中的数学知识不会超出代数的范畴。我还要向你们强烈推荐理查德·费曼的物理学讲座摘录《六件小事》（*Six Easy Pieces*, Perseus Books, 1994），其中涵盖了所有的基础物理学问题。

关于牛顿，有好几部不错的传记。如果读者想进一步了解这位天才，可以看看理查德·韦斯特福尔（Richard Westfall）撰写的《艾萨克·牛顿的一生》（*The Life of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1994），或者戴维·伯林斯基（David Berlinski）撰写的《牛顿的礼物》（*Newton's Gift*, Touchstone, 2000），或者詹姆斯·格雷克（James Gleick）撰写的《艾萨克·牛顿》（*Isaac Newton*, Pantheon Books, 2003）。

在第11章中我们对狭义相对论的讨论非常简略，这大概要归因于洛伦兹收缩。对这个话题感兴趣的人可以先去看看L. D.兰道（L.D. Landau）和G. B.罗默（G. B. Romer）合著的《相对论是什么》（*What Is Relativity*, translated by N. Kemmer, Dover, 2003），全书只有65页（包括图！），而且没有公式，却清晰地解释了爱因斯坦的相对论。其他进一步探讨这个问题的著作包括赫尔曼·邦迪（Hermann Bondi）的《相对论与常识》（*Relativity and Common Sense*, Dover, 1962），罗伯特·卡茨（Robert Katz）的《狭义相对论导论》（*An Introduction to the Special Theory of Relativity*, D.Van Nostrand Co., 1964），詹姆斯·H.史密斯（James H. Smith）的《狭义相对论导论》（*Introduction to Special Relativity*, W. A. Benjamin, 1965），以及米尔顿·A.罗斯曼（Milton A. Rothman）的《发现自然法则：物理学实验基础》（Dover, 1989）。需要注意的是，在讨论相对论及相关物理学概念的过程中都会用到数学知识。

第二部分 能量

在埃里克·P. 维德迈尔（Eric P. Widmaier）的著作《生命的材料》（*The Stuff of Life*, W. H. Freeman & Company, 2002）中，对于能量的产生与转换（特别是分子层面上的）进行了非常精妙的介绍，适合非专业人士阅读。同类书还有戴维·S.古德塞尔（David S. Goodsell）的《生命机械》（*The Machinery of Life*, Springer Verlag, 1992），菲利普·鲍尔（Philip Ball）的《隐形世界的故事》（*Stories of the Invisible*, Oxford University Press, 2001）。关于这个神秘的问题，以下两本书提供了有用的背景信息：瓦克拉夫·斯米尔（Vaclav Smil）所著的《能量：图解生物圈与文明》（*Energies: An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization*, MIT Press, 1998），以及罗杰·A.新利西斯（Roger A. Hinrichs）与默林·克莱因贝奇（Merlin Kleinbach）合著的《能量的用途与环境》（*Energy: Its Use and the Environment*, Brooks Cole, 2001）第三版。最后一本是教科书，其中几乎没有用到数学知识，它详细介绍了能量转化过程中涉及的环境问题。

关于热力学的有趣历史可以阅读以下几本优秀的著作：吉诺·塞格雷（Gino Segre）的《解读温度》（*A Matter of Degrees*, Viking, 2002），H. C.范内斯（H. C. Van Ness）的《了解热力学》（*Understanding Thermodynamics*, Dover Publications, 1969），汉斯·克里斯蒂安·冯·拜尔（Hans Christian von Baeyer）的《温度的扩散与时间的流逝：热的历史》（*Warmth Disperses and Time Passes: The History of Heat*, Modern Library, 1998）。马克·W.齐曼斯基（Mark W. Zemansky）所著的《很低和很高的温度》（*Temperatures Very Low and Very High*, Dover Books, 1964），介绍了测量温度的简便易行的方法。P. W.阿特金斯（P. W. Atkins）所著的《周期王国》（*The Periodic Kingdom*, Basic Books, 1995）和D.泰伯（D. Tabor）所著的《气体、液体和固体》（*Gases, Liquids and Solids*, Cambridge University Press, 1979）则讨论了相变问题。

关于电和磁的历史，以下几本书值得推荐：戴维·达尼斯（David Bodanis）的《电力宇宙：关于电力惊人的真实故事》（*Electric Universe: The Shocking True Story of Electricity*, Crown, 2005），巴兹尔·马洪（Basil Mahon）的《改变一切的人：杰姆斯·克拉克·麦斯威尔的一生》（*The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk*

Maxwell, John Wiley & Sons, 2003），詹姆斯·汉密尔顿（James Hamilton）的《发现之旅：迈克尔·法拉第，科学革命的巨人》（*A Life of Discovery: Michael Faraday, Giant of the Scientific Revolution*, Random House, 2002）。

第三部分 现代物理学

关于量子物理学，有一系列面向非专业人士的优秀论著。我强烈推荐以下两本：乔治·伽莫夫（George Gamow）所著的《震撼物理界的三十年：量子理论的故事》（*Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, Dover Press, 1985），伽莫夫和R. 斯坦纳德（R. Stannard）合著的《汤普金斯先生的新世界》（The New World of Mr. Tompkins, Cambridge University Press, 1999）。

关于弦论的前沿研究，以下几本书做了非常精湛、清晰的讨论：布赖恩·格林（Brian Greene）的《优雅的宇宙》（*The Elegant Universe*, W. W. Norton, 1999）和《宇宙的结构》（*The Fabric of the Cosmos*, Alfred A. Knopf, 2003），斯蒂芬·W.霍金（Stephen W.Hawking）、基普·S.索恩（Kip S. Thorne）、伊戈尔·诺维科夫（Igor Novikov）、蒂莫西·费里斯（Timothy Ferris）、阿兰·莱特曼（Alan Lightman）合著的《时空的未来》（*The Future of Spacetime*, W. W.Norton and Company, 2002），劳伦斯·克劳斯（Lawrence Krauss）所著的《第五元素：宇宙中缺失的质量奥秘何在》（*Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Universe*, Basic Books, 2000），丽莎·蓝道尔（Lisa Randall）所著的《扭曲的通道》（*Warped Passages*, ECCO, 2005）。

固体物理学革命已经改变了所有人的生活，有两本可读性很强的著作对此进行了记载，分别是迈克尔·赖尔登（Michael Riordan）的《晶体之火：信息时代的诞生》（*Crystal Fire: Birth of the Information Age*, Norton, 1997）和T. R. 里德（T. R. Reid）所著的《芯片：两个美国人如何发明并引发了一场革命》（*The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution, Simon & Schuster*, 1985）。

关于与立方平方法则相关的材料的强度，约翰·泰勒·邦纳（John Tyler Bonner）所著的简短易读的《为什么说尺寸很重要：从细菌到蓝

鲸》（*Why Size Matters: From Bacteria to Blue Whales*, Princeton University Press, 2006）值得一读。

总结

为了对我们讨论的问题进行深入的检视，读者可以看以下几本面向非专业人士的有趣的书，这些书都是通过问答形式讨论物理学问题，它们是吉尔·沃克（Jearl Walker）的《物理学的飞行马戏团》（*The Flying Circus of Physics*, Wiley, 1977），以及克里斯托弗·P.查考斯基（Christopher P. Jargodzski）和富兰克林·波特（Franklin Potter）合著的《为物理而狂：脑筋急转弯、悖论和好奇心》（*Mad About Physics: Braintwisters, Paradoxes, and Curiosities*, John Wiley& Sons, 2000）。那些不再害怕数学的人，可以看看克利福德·斯沃茨（Clifford Swartz）所著的《信封背面的物理学》（*Back-of-theEnvelope Physics*, Johns Hopkins University Press, 2003）。如果你急于把学到的物理学知识应用于实践，那么你可以看看理查德·M.考夫（Richard M. Koff）的《这是怎么工作的？》（*How Does It Work*?, Signet, 1961），也可以看看赛·泰莫尼（Cy Tymony）的《日常用品的非日常用法》（*Sneaky Uses for Everyday Things*, Andrews McMeel Publishing, 2003）。

最后，我还要给大家推荐一些漫画书。DC和漫威都有完整的重印产品线，其中包括从黄金时代到现在的所有漫画，通常比初版的纸质要好，价格也算公道。DC的《档案》系列（*The Archives*）和《漫威的杰作》（*Marvel Masterworks*）都是聚焦于一个人物或团队的精装书，集结了黄金时代和白银时代的所有漫画。此外，漫威还有一个平装本的重印产品线，即《必需品》（*Essentials*）；DC漫画则有《展示橱作品集》（*Showcase Presents*）系列，涵盖了白银时代或更晚时候的约20期刊物，集中于一个人物或主题，用较便宜的纸印刷，只有黑白两色，每本的价格不到一美元。无论你是想找到以前最喜欢的漫画书，还是对其他漫画书有兴趣，你都可以在你最喜欢的书店或者附近的漫画书店里找到重印的杂志。

如果你想全面地了解超级英雄，那么有一些漫画书是你必读的。首当其冲的是阿兰·摩尔和戴夫·吉本斯合著的《守望者》（*Watchmen*, DC Comics, 1986, 1987），这部作品被电影导演特瑞·吉列姆（Terry

Gilliam）誉为“漫画中的《战争与和平》”。基于一些法律原因，这个故事里的人物原型都源自查尔顿漫画旗下的白银时代的超级英雄（比如问者、蓝甲虫、原子队长等），你不需要深入了解这些人物也可以享受故事的乐趣。第二部必读的漫画是弗兰克·米勒的《黑暗骑士归来》（*The Dark Knight Returns*, DC Comics, 1997），设想了蝙蝠侠未来可能的命运。这部作品让蝙蝠侠故事摆脱了停更和被遗忘的命运，找回了蝙蝠侠角色本身阴暗、冷酷、坚毅的本性，为不同版本的蝙蝠侠电影奠定了基调。还有一些漫画作品的主题也是关于超级英雄未来命运的，比如马克·韦德（Mark Waid）和亚历克斯·罗斯（Alex Ross）合著的迷你系列《天国降临》（*Kingdom Come*, DC Comics, 1998），剖析了DC漫画的超级英雄、恶棍和普通平民之间的相互影响。由库尔特·比斯克（Kurt Busiek）和亚历克斯·罗斯（Alex Ross）创作的《非凡之人》（*Marvels*, Marvel Comics, 2004）则以《号角日报》的一个平凡摄影师的视角，讨论了漫威漫画公司的超级英雄对社会的影响。关于时间旅行这个题材，《逆转未来》系列（*Days of Future Past*, Marvel Comics, 2004）无疑是一部佳作，其中包含了大热的《X战警》电影中的很多人物。在这个故事里，幻影猫穿越回过去，阻止了一场有可能导致人类走向黑暗和反乌托邦未来的政治暗杀活动。最后，如果你想换换口味，那么你可以读读达尔温·库克（Darwyn Cooke）的《DC：新的疆域》第一册和第二册（*DC: The New Frontier*, DC Comics, 2004, 2005），它完美地重构了白银时代刚刚到来时超级英雄们首次登场的情景。

图片说明

The copyrighted DC Comics and Marvel illustrations in this book are reproduced for commentary, critical,scientific and scholarly purposes. The copyright dates adjacent to the illustrations are the dates printed in the comics in which the illustrations were first published.

The copyrights and trademarks in Superman, Flash,Weather Wizard, Aquaman, Rulers of Appellax, the Atom, Superboy, Golden Age Flash, Ray Palmer, Victor Danning, John Carr, Green Arrow, Green Lantern, Wonder Woman, Martian Manhunter, and related logos and indicia are owned by DC Comics Inc.

The copyrights and trademarks in Spider-Man, Gwen Stacy, Green Goblin, Ant-Man, Wasp, Porcupine, Iceman,Storm, Electro, Magneto, Sub-Mariner, Angel, Kitty Pryde, Whirlwind, White Queen, Sebastian Shaw, Iron Man, and related logos and indicia are owned by Marvel Entertainment Group Inc.

魔鬼物理学.3，超级英雄故事里的物理学
[美]詹姆斯·卡卡里奥斯　著
徐立子　译

电子书编辑：张畅
版权经理：王文嘉

出 品：中信联合云科技有限公司 www.yuntrust.cn
版 本：电子书
版 次：2018年3月第1版
字 数：286千字

纸书书号：978-7-5086-8548-9
出版发行：中信出版集团股份有限公司 CITIC Publishing Group

版权所有 · 侵权必究
投稿邮箱：tougao@citicpub.com

中信出版社官网：http://www.citicpub.com/;
官方微博：http://weibo.com/citicpub;
更多好书，尽在中信书院
中信书院：App下载地址https://book.yunpub.cn/（中信官方数字阅读平台）
微信号：中信书院