

# 第一篇

## 寻找薛定谔的猫



# 引 言

如果要写给外行人看的有关相对论的书和文章排起来的话，那很有可能要从地球连接到月亮上去。“每个人都知道”爱因斯坦的相对论是 20 世纪科学的最大成就，那所有的人都错了。但是，如果将所有写给外行人看的详细的量子理论方面的书和文章拿出来的话，那也仅能摆满我的桌子。这并不是说量子理论在学术界之外名声较小。实际上，在近二十几年的时间里，量子力学已经相当普及，用以解释诸如远程搬运、弄弯匙子等一些现象，并且为许多科幻小说提供了丰富的思路。普遍认为，量子力学是一个谜，就如同超自然和超感一样，已成为一门不可思议、神秘莫测、无人理解、无人能够实际运用的科学分支。

本书的写作目的是在更基本、更重要的科学研究领域里对这种观点进行反击。本书的产生出自于 1982 年夏天凑在一起的几个原因：首先，我刚刚完成了一本有关相对论的书《空间扭曲》，觉得应该做些工作，来解释 20 世纪其他科学分支中的秘密；其次，在科学界以外存在的一些对量子理论的误解越来越使我感到恼怒。弗里特夫·卡普拉的《物理学之“道”》引起了许多效仿者，这些人既不懂道，也不懂物理，而只是认识到将西方科学和东方哲学联系在一起可以弄到很多钱。最后是 1982 年 8 月从巴黎传来消息说，一个小组成功地进行了一次关键性的实验，这个实验使得那些尚持怀疑态度的人确认了量子力学世界观的准确

性。

不要在这里寻找“东方神秘主义”、勺子变弯和超感。要在本书中找出量子力学的真正故事，这与一些小说中的做法大相径庭。科学正是这样，它不需要穿上从别处得来的哲学外衣，因为它自身就充满光明、神秘和惊奇。本书提出的一个问题是“什么是真实的？”答案会使你大吃一惊，你可能不敢相信。但你会发现现代科学是如何看待这个世界的。

## 序 言

# 没有什么什么是真实的

我们题目中的猫是个神奇的动物，而薛定谔却是个真实的人。埃尔温·薛定谔是一位德国科学家\*。他在 20 世纪 20 年代中期创立了现在被称为量子力学的科学分支中的一个方程。这个分支几乎不能算是个正确的描述，但是量子力学却为所有现代科学提供了基础。这个方程描述很小的物体，一般说来是原子大小或者比原子更小的物体。这为微观世界提供了唯一一种理解。没有这些方程，物理学家将无法建设核电站（或制造原子弹），制造激光器，或者解释太阳为什么是炽热的。没有量子力学，化学家们将仍然停留在黑暗年代，也不会有分子生物学，不会有对 DNA 的理解，不会有遗传工程——不会有任何科学。

量子理论代表着科学的最大进展，比相对论具有更大意义更直接更实用。而且能产生许多奇特的预言。量子力学世界是那

另有说为是奥地利人，译者注。

么神奇，实际上连阿尔伯特·爱因斯坦也发现其难以理解，而拒绝接受由薛定谔及其同事创立的理论结果。爱因斯坦及许多其他科学家发现将量子力学方程视为一种数学上的简单表述更为合适，认为它仅是对原子及亚原子粒子行为的一个合理的描述。但其本身隐藏了更深的真理，这些真理更接近于日常的真实性的。因为量子力学给出的是：没有什么是真实的，我们不去观察它们时，则什么也不能说。薛定谔那奇怪的猫用来区别量子世界，以及日常生活中所见到的世界。

在量子力学世界中，日常所见的熟悉的物理定律不再成立。取而代之的是，事件发生由几率决定。例如具有辐射性的原子可能衰变放出电子，也可能不。可以这样设计一个实验：具有辐射能力的物质具有 **50%** 的机会在某一特定时间内发生衰变。如果其衰变，就会被探测器记录下来。薛定谔也像爱因斯坦那样，被量子力学结果弄得心神不安，尝试着用一個假想的实验来检验理论隐含的晦涩之外。设想在一个封闭的房子中或匣子里，有一只活猫及一瓶毒药。当衰变发生时，药瓶被打破，猫将被毒死。在现实世界中，猫有 **50%** 的机会被毒死。

不用看匣子，我们就会乐观地说，猫可能死了也可能还活着。但是我们遇到量子力学的奇异之处了。这理论说，这两种机会取决于辐射物质，因而对猫来说除非被观察到否则就没有真实性。原子可能衰变，也可能不；猫可能死，也可能活，除非我们向匣子中看，发生了什么。坚持量子力学直接解释的理论学者认为存在一个中间态，猫既不死也不活，直到进行观察看看发生了什么。除非进行观测，否则一切都不是真实的。

这个观点对爱因斯坦和其他科学家来说无非是麻醉剂。当引述世界由一大堆量子层次上的随机选择决定的理论时，他说道：“上帝不会掷骰子。”他不承认薛定谔的猫的非真实态之说，说一

定有一内在的机制组成了事物的真实本性。他花了数年时间企图设计一个实验来检验这种内在真实性是否确在起作用，但他没有完成这种设计就去逝了。也许他没有活着看到他的思路所引发的结果会更好一些。

在 1982 年夏天，在法国南巴黎大学，由阿兰·阿斯派克特领导的研究小组完成了意将探测量子非真实世界的内在真实性的系列实验。内在真实性——基本机制——被取名为“隐变量”，实验对象是从源中朝相反方向飞出的两个质子或粒子（在第十章中对其有完整的描述）。但基本上可以认为是对真实性的检验。两个从同一源中飞来的质子可以被两个检测器检测到，可测量它的极化性质。根据量子理论，这种性质是不存在的，除非实施了测量。根据隐变量观点，每个质子从它产生就有“真实的”极性。由于它们同时发射，所以它们的极性是相互关联在一起的。但是实际测量到的在与真实性的两种观点不一致。

这些关键的实验结果是没有含糊的。没有发现由隐变量理论所预言的那种关联，却发现了由量子理论所预言的那种关联。而且正如量子理论所预言的那样，对一个质子的测量对另一质子具有瞬间效应的影响。一些作用关联在一起，纠缠不清，虽然它们以光速飞离。相对论告诉我们没有信号能超过光速传播。实验证明世界没有内在的真实性。日常所谓的“真实性”在描述组成世界的基本粒子行为时不是一个好的方法，而且这些粒子同时联成不可分离的整体，每一个都能觉察到别的粒子发生的事。

探索薛定谔的猫就是寻找量子的真实性。简单总结说，好像这种寻求是没有什么结果的，因为不存在日常词汇中的真实性。但这不能算完，寻找薛定谔的猫可引导我们对瞬间的真实性及一般量子力学有一新的理解。路是漫长的，但它却是始于那些科学家们。如果他们发现了自己苦苦寻找的、我们现在所获得的答案

的话，他们会比爱因斯坦更加惊恐。艾萨克·牛顿，在三个世纪前研究光的本质时，不会想到他那时就已经踏上了寻求薛定谔之猫的征程。



# 第 一 部 分

## 量 子 理 论

“谁不惊异于量子理论，谁就没有理解它。”

尼尔斯·玻尔  
1885—1962



# 第 一 章

## 光

艾萨克·牛顿创立了物理学，实际上他创立了一切依赖于物理的科学。当然牛顿的工作也是在其他人基础上的，但正是由于他在三百年前发现的运动三大定律及引力理论，才使科学走向通往空间飞行、激光、原子能、基因工程、化学及其它一切的里程。在二百年的时间里，牛顿理论（现在称为“经典”物理）高高在上，处于统治地位；在二十世纪革新中，对物理的见识已远远超过了牛顿时代。可是若没有那二百年的科学发展，就不会有这种深刻的理论。本书不是科学史，它更关注新物理——量子物理，而不是经典思想。但就是在三百年前的牛顿的工作中已有将要发生变革的迹象——不是出于其对行星运动及其轨道或是著名的三大定律，而是出于对光本质的研究。

牛顿关于光的想法多出于对固定形状物体及行星轨道的行为的看法。他认识到，我们日常对物体行为的经验可能是一种误导，一个物体或粒子在不受别的东西的影响时一定与在地球表面的粒子不同。这里，我们日常经验告诉我们，除非你去推一个物

体，它会呆在那儿不动，如果一旦你不推它，它就很快停止运动。那么，为什么像行星及月亮等物体却不停在它们的轨道上呢？有什么东西在推动它们吗？没有。这是因为行星处于它本来的状态，与外界没有联系，而地球上的物体总是相互关联着。如果我想将钢笔拉过桌面，我的推力与桌面同笔之间的摩擦力对抗着，正是这种力才在我不推动时让笔停下来的。如果没有摩擦，笔就会一直运动下去。这就是牛顿第一定律：除非有外力作用于其上，一个物体总保持静止或以恒定的速度运动。牛顿第二定律告诉我们外力（这里指推力）对物体的效果。力改变了物体的运动速度，速度的改变称为加速度；你将力除以物体的质量，就得到此力作用于物体产生的加速度。通常，第二定律描绘为与此稍稍不同的形式：力等于质量乘以加速度。牛顿第三定律告诉我们物体是怎样反作用于推动它的物体的：对于每一个作用存在大小相等方向相反的反作用。我用球拍去打一个网球时，球拍推向网球的力刚好等于网球推向球拍的力，但方向刚好相反。在桌子上的钢笔，受重力向下压，其压力刚好等于桌面弹向它的力；火箭的燃气室中，爆炸过程产生的气体向后冲去的力则好产生大小相等但方向相反的推动火箭的力。

这些定律连同牛顿的引力定律，解释了行星绕太阳及月亮绕地球的运动。适当地计入摩擦力，也就可以解释地球上物体的行为。这些就构成了力学的基础。但这仍有隐含的哲学上的迷惑。根据牛顿定律，一个粒子的行为可根据其它粒子对它的作用力及它本身受到的作用力确定。那么如果能够知道这个宇宙所有粒子的速度与位置，就能够精确地预言每个粒子的未来行为，从而预言这个宇宙的未来。这是否意味着这个宇宙就像钟表一样，被造物主上紧了发条放在那儿，沿着一条完全可以预言的途径运动呢？牛顿的经典力学提供了这种确定性宇宙观有足够多的支持，

这两种图象给人的自由意志没有留下多少机会。是否我们真的就是沿着预设好的行迹度过我们的一生而别无选择呢？多数科学家都同意让哲学家们去争论这个问题。而他们却全力转向二十世纪新物理学的中心。

## ◆ 是波还是粒子？

牛顿的粒子物理论是这么的成功，难怪当初解释光行为时，他也按照粒子论方法处理。无论如何，观察到的光是走直线的，且光从镜面反射时如一个球碰在一个硬墙上一样。牛顿制造了第一台反射式望远镜，解释了白光是由彩虹光合成的，在光学中作了那么多工作，可他总是基于光是由一种称为微粒的小粒子流组成的假说。光线在穿过光疏质和光密质边界时，正如光从空气到水或玻璃中变弯（这就是为何搅酒棍在酒杯或桶中看来是弯的），只要假设微粒在光密质中走得快一点就能解释光折射现象。即使在牛顿时代，仍有与之完全不同的解释。

荷兰物理学家克里斯汀·惠更斯生于 1629 年，虽比牛顿大 13 岁，也算是同时代的人他得出一个观点：光并非粒子流，而是一种波。就像水波在海面或湖面上传播一样，光通过一种不可见的“透明的以太”传播。就像在湖塘里扔一颗石子引起的波传播那样，光在以太中传播是从光源出发到各个方向的波理论在解释反射和折射时能同粒子说一样合理。虽然说在光密质的物质中的光波速度加快，在当时的十七世纪没有办法测量光速，因此这方面的差别不足以区分这两种理论的优劣。可是，有一个关键的方面，在这点上可得到可以观测到的不同预测。当光通过一个尖锐的边界时，它形成一个明显的边界影子。这极像粒子流的行

为，因为它沿直线运动。而波动要转弯或散射，以某种方式绕进暗影里（想象一下，水塘中的涟漪是能够绕过石头的）。三百年前，这种现象很明显对粒子论有利，而波动理论虽未被忘记却也给抛弃了。然而到了十九世纪，两种观点的状况则完全反过来了。

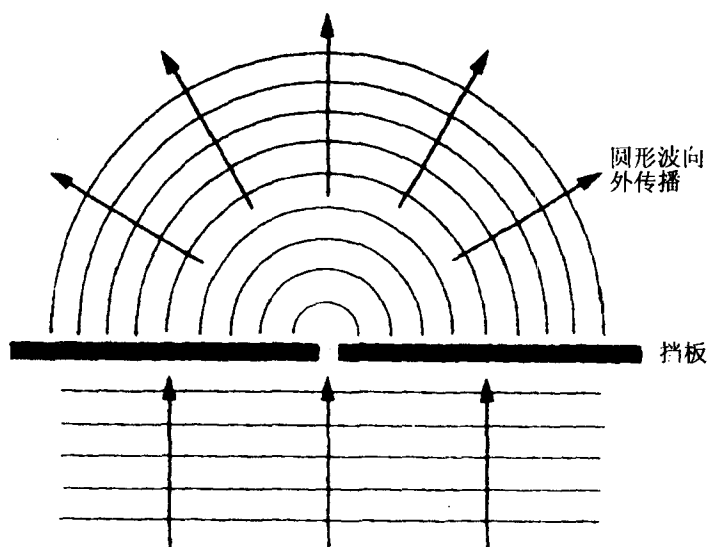


图 1.1 水波的衍射

平行水波通过挡板上的小孔后，在小孔之后形成圆形波，不会形成“阴影”

在十八世纪，很少人能认真地看待光的波动说。在这极少数人中，当时数学的带头人，曾对几何，微积分和三角几何做出主要贡献的瑞士数学家雷纳德·欧拉不仅认真地对待光的波动说，而且还写文章支持这种学说。说起欧拉，现代数学与物理全由算术项和方程描述，数学描述所依赖的技巧大部分是由欧拉创立

的。在此过程中，他创立了至今仍被使用的符号缩写，如  $\pi$  表示圆周率； $i$  表示  $-1$  的平方根（我们还会与  $\pi$  一起遇到它）；被数学工作者使用的积分运算符号。很奇怪的是，在《大英百科全书》的欧拉条目中没有提到他的波动观点。这个观点在他同时代中没有一个人“著名物理学家”支持。在欧拉同时代人中，赞同这个观点的唯一名人是本杰明·富兰克林；直到十九世纪初英国人托马斯·扬完成他的关键实验之前，物理学家对待这个观点，都不屑一顾。不久法国人奥古斯汀·菲涅尔又重做了这些实验。

## ◆ 波动理论的胜利

扬根据通过水塘表面水波的运动知识，设计实验检验了是否光也同样地传播。我们都知道水波是什么样的，虽然为了精确分析起见考虑的是小波而非大波。波的明显特征是在波传过时抬高水位然后又压低水位；波峰高出平静的水面的高度为它的波幅，对理想的波来说，波传过时，水面被压下的幅度也与之相同。一系列波纹，就像在水塘中扔下一颗石子激起的涟漪那样，一个接一个具有相等的问题，此间距叫做波长，可表示为从一个波峰到另一个波峰的距离。当石子落入水塘时，激起的波纹环绕着源点，从中心向外一圈圈地传播；可是海中的波浪或在湖中由风拂起的水波由系列平行直线一条接一条地向前传播。这两种方式下，一秒钟内通过一个固定点——比如说石头的波峰数是个不变的数目，称为波的频率。频率表示一秒钟通过的波纹数，因此每一个波峰向前运动的速度都是波长乘以频率。

判定实验的出发点是平行波纹，正如在到达海岸线之前波纹一样。你可以想象在水塘中扔一块石子而在远处观察它激发出来

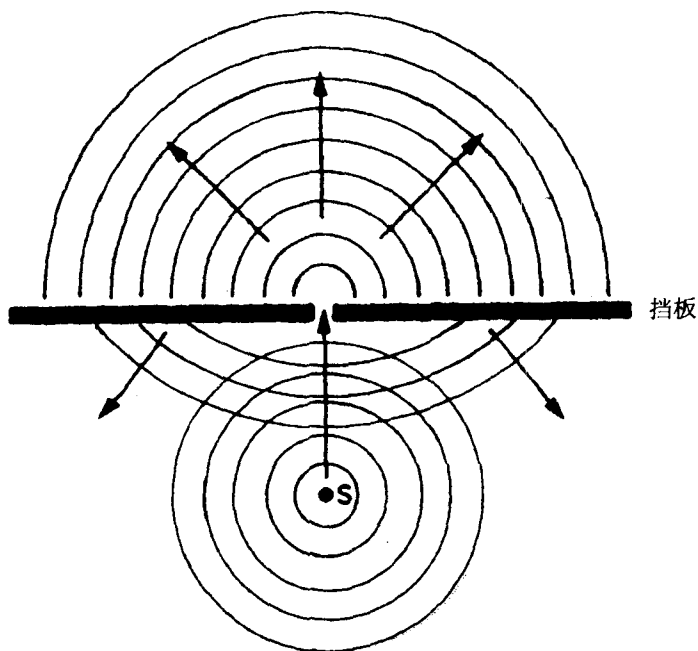


图 1.2 小孔后产生新波源

就像在水塘中扔进一块石头能激起圆形波一样，圆形涟漪在通过挡板窄缝时也产生圆形波。

的波纹。发出的小波的圆周越来越大，在离源点足够远的地方，波纹就像是平行的直线一样。因为很难察觉到围绕扰动点的大圆的曲率来。这就很容易考察当波遇到它传播路径上的障碍物时会出现什么情况。如果障碍物很小，由于散射，波会绕过它在它后面重新充满，留下很小的“影子”；但是如果障碍物比波的波长大得多时，它们在障碍物后面仅仅弯进去一点点，留下一大块未扰动的水面。如果光是波的话，仍然可以具有棱角鲜明的影子，



只要光的波长比这个物体的大小小得多的就行。

现在将这个想法倒过来。想像很好的一系列线波在水槽中传播，遇到的不是一个障碍物而是一个面向它的一道墙，只不过墙的中间开了一个小孔。如果小孔开得比波长大得多，波只传过对着小孔的区域，就像水波通过码头的一堵墙一样。可是如果墙上的小孔很小，那么这个小孔可作为环状波的一个新波源，就如那里扔下了一块石子那样。在远离墙的地方，圆形波（精确地说是半圆形的）传过水面，没有什么是平静的水面。

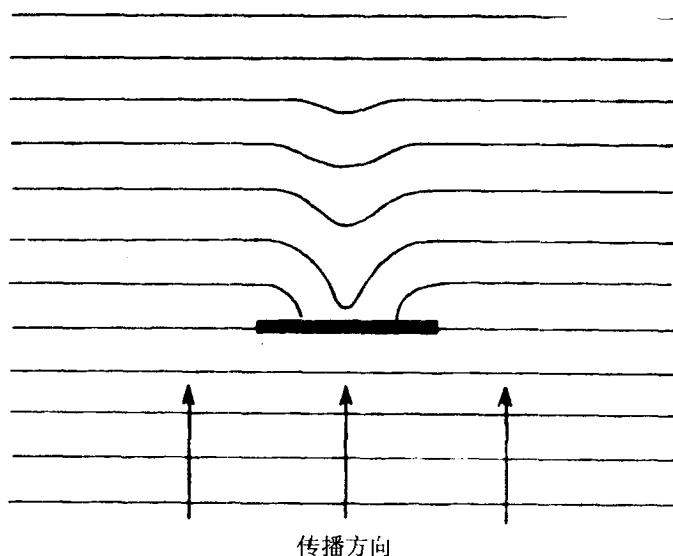


图 1.3 小物体后不会形成阴影

只要障碍物比波的波长不是大很多，它们可充满障碍物后的阴影，这是波能够绕过边角的一个结论

好，现在我们可以谈到杨的实验了。设想像前述那样，平行水波传过水槽遇到一个阻板，在这个阻板上有两个孔。每个孔都可作为一个新半圆波源产生向板面传播的波，由于两列波都源于板另一侧的同一列平行波，它们精确同步或者说同相位。现在我们在水面上有两套水波在传播，结果会形成较为复杂的波纹图斑。在两列波都高起来的地方，我们得到增强的波峰；在一个波高起另一个波形成波谷的地方，它们相互抵消能够保持水平面不被扰动。这种效应分别称为相增相干或相消相干。由这种效应很容易看到，只要在水塘中同时扔下两块石子就可以了。如果光是波动的话，那么等效的实验就可以形成波纹的干涉条纹，这正是杨发现的。

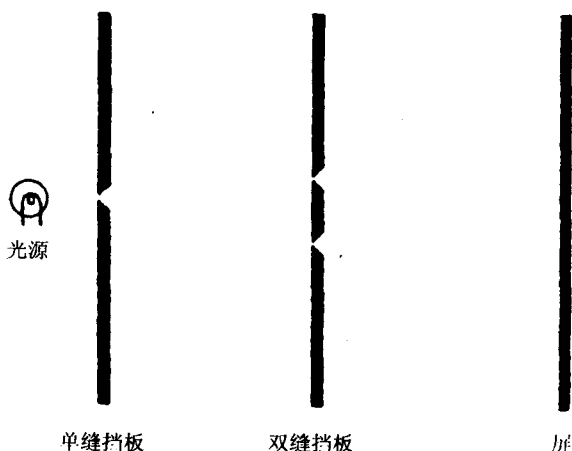


图 1.4 双孔干涉

光能够通过衍射绕过边角，这可用单缝产生圆形波再通过双缝产生干涉图象验证。

杨将一束光照到具有两个狭缝的阻挡屏上，在屏的后面，光从两个小孔传播出来相互干涉。如果光同水波一样也是波的话，那么由于相增干涉和相消干涉，在阻挡屏之后会形成明暗交错的区域。当杨将一个白屏放在窄缝之后，刚好看到他所寻找的——明暗相间的条纹。

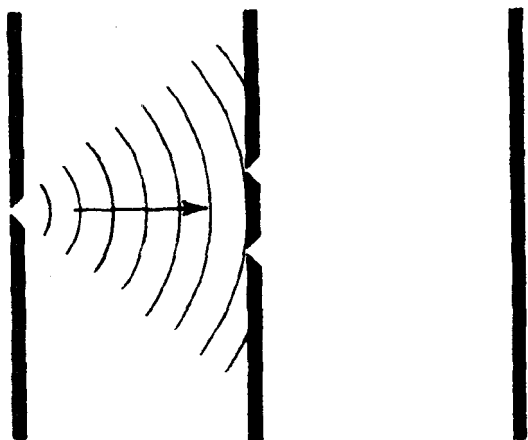


图 1.5 光的双缝干涉

如水波通过小孔那样，光波通过第一个狭缝后产生圆形扩散，“相继”进入另一个。

可是杨的实验并未引起科学界的兴趣，特别在英国，创立任何被认为是与牛顿观点相背的理论几乎被认定为异教徒的行为，当然是不爱国的。牛顿逝世于 1727 年。在 1705 年，也就是离杨宣布他的发现不到一百年之前，牛顿是第一个因科学工作而被封为骑士的。在英国破除这个偶象还为时过早，因此也许在拿破仑战争时期正合适，于是法国人奥古斯汀·菲涅尔拾起他的“叛国”

思想，最终确立了光的波动学说。菲涅尔的工作虽比杨晚几年，但比杨的工作更完全，实际上，他赋予了光行为的波动性的各个方面性质。除此之外，他还解释了对我们来说非常熟悉的日常现象——光照射到油膜上产生非常美丽的反射色彩。这个过程同样出于光的干涉。一部分光直接由油膜的上层反射回来，另一部分光透过油膜，从底层反射出来。因此，存在两束不同的反射光，它们之间相互干涉。由于每种颜色的光具有各不相同的波长，白光是由彩虹般的有颜色光叠加而成的，因此，从油膜上反射出来的白光能产生颜色光的相增干涉或相消干涉，依赖于眼睛相对于油膜的位置。

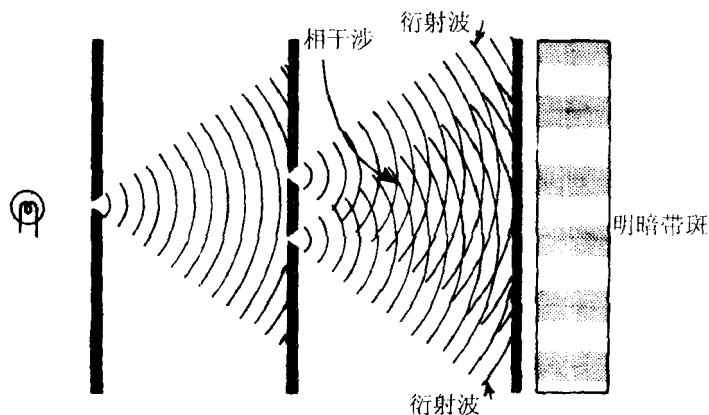


图 1.6 光的行为象波

圆形波双缝的每一个相互干涉，在视屏上产生明暗相间的斑纹。清晰地证实了，就此实验来说，光的行为象波。

里昂·傅科是一位因钟摆而出名的法国物理学家，在十九世纪中叶提出了与牛顿粒子说完全相反的断言：光在水中或空气中传播的速度要慢一些，这也是一些著名科学家所希望的。那时

候，人人“知道光是能在以太中传播的波，不管它是怎么进行的，可是要能够弄清楚在光流中是什么“波”在传播就更好了。在 1886 年到 1870 年间，苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦确立了存在电磁互变的波理论时，光的理论就算是完善了。麦克斯韦断言存在电磁辐射，具有像水波那样峰谷变化的磁和电的强度。刚好在一百年前的 1887 年，德国物理学家亨利希·赫兹成功地发射并接收了作为电波的电磁辐射，这种电波与光相同只不过具有更长的波长。经历牛顿和伽利略年代，由科学思想革命带来了反复，光的波动说是完备了。到十九世纪末期，仅有天才或傻子才会想到光是粒子。这个人叫阿尔伯·爱因斯坦；但是在我们理解他何以迈出这勇敢的一步时，需要有一些十九世纪物理学思路的背景知识。



## 第 二 章

# 原 子

谈到科学史，流行的说法是原子的观点可以追溯到古希腊那个创生科学的年代，接下来又会赞扬古代那么早就认识到物质的本质。但是这种说法有些夸大其词。确实，死于公元前 370 年的德漠克利特曾提出过如果这个世界是由不同种类的不可交换的原子组成，而每个种类具有各自形状和大小及固定的运动的话，解释这个复杂的世界就容易多了。他写道：“世界上除原子和真空外就是思想。”后来萨摩斯的伊比鸠鲁和罗马的鲁克里提亚斯·卡拉斯引用了这个观点。但不是从那个时代理论家中的先驱者才开始解释自然的，亚里斯多德提出宇宙中的任何东西产生了四种元素，火、土、空气和水，这种观点更普及和持久。原子论在公元时代就被忘光了，而亚里斯多德的四元论却维持了两千年的时间。

虽然英国人罗伯特·波意尔在十七世纪将原子观点用在其化学的研究中，而且牛顿在其物理和光学研究中一直不忘原子观

点，但是，只在十九世纪的后半叶，法国化学家安东尼·拉瓦热在研究物质何以能够燃烧时，原子概念才算真正地成为科学的一部分。拉瓦热判断出许多真元素，它们不能分解为其它的化学物质。他意识到燃烧过程不过是空气中的氧与其它元素的简单的化合过程。在十九世纪初，约翰·道尔顿小心地将原子规则引入化学。他宣称物质是由原子组成的，它们本身是不可分的；同一种元素的所有原子是相同的，但不同元素具有不同的原子（不同的尺寸和形状）；原子不能产生也不能消失，只会在化学反应中重新组合；由两种或多种元素组成的化合物是由分子组成的，每一个都是由几种元素组成的具有固定原子数目的化合物。这样原子的概念才真正产生，二百年后成为写在我们的教科书中的那种形式。

## ◆ 十九世纪的原子

即使如此，到了十九世纪，原子的概念才慢慢地被化学家们接受。约瑟夫·盖·吕萨克实验上确定了两种气体物质化合时，一种气体的体积总和与另一气体的总体积形成一个简单的比例。如果生成物也为气体，第三种气体同前两种气体也形成一个简单比例关系。这与每一化合物分子都是由一种气体原子和其它原子组成的观点相吻合。在 1811 年，意大利的阿梅德奥·阿伏伽德罗利用这个观点导出了他的著名假设，无论气体分子的化学成分如何，在固定温度和压力下，同样体积的气体具有相同数目的分子。后来的实验确证了阿伏伽德罗假设的正确性；可以证实在一个大气压下；0℃ 温度下 1 升气体大约具有 27000 百亿亿（ $27 \times 10^{21}$ ）



个分子。但直到 1850 年，阿伏伽德罗的同乡，斯坦尼斯劳·堪尼沙罗改进了这个说法，才使一些化学家正经对待它。然而直到 1859 年，仍有许多化学家不肯接受道尔顿和阿伏伽德罗的观点。但是那时候，这些已被物理学发展的事迹代替了，那时，气体的行为已被苏格兰的詹姆斯·克拉克·麦克斯韦及奥地利人路德维格·玻尔兹曼用原子的概念作了细致的解释。

在 1860 年到 1870 年间，这些先驱发展出气体是由许多原子和分子组成的观点（阿伏伽德罗的假设可给出它们到底是多少）。这些分子或原子可以想象为小硬球，它们之间相互碰撞，并且与盛它们的容器相碰撞。这直接牵扯到热是一种形式的运动的观点，当给气体加热时，分子运动加快，增加了对器壁的压力，如果器壁不是固定的，则它会发生膨胀。这种新想法的关键所在是气体的行为可以利用力学原理来解释——牛顿力学——在很大数目分子上统计意义上的，在任何时间中一个分子可以向任何方向运动，但许多分子碰撞容器的总效应就形成了对器壁的稳定的压力。这导致了描述气体过程的一套数字，现在称为统计力学。但仍没有直接的证据证实原子的存在；当时许多领头的物理学家强烈反对原子假设，即使在 1890 年，玻尔兹曼感到他自己（也许是误会）一个人支撑着科学评论的大浪。在 1898 年，他发表了他的详细计算，希望“当气体理论重生时，也不会有太多的重新发现了。”；1906 年，在病痛和压抑的双重折磨下，想到许多领头科学家对气体分子运动的强烈反对的不快，他自杀了。没有想到，几个月前，一个名叫爱因斯坦的无名物理工作者已发表文章，确立了无可非议的原子的真实性证明。

## ◆ 爱因斯坦的原子

这篇文章正是 1905 年爱因斯坦发表在同一期 *Annalen der Physik* 上的三篇文章之一。这三篇文章，任何一篇都可以确立他在那个时代科学上的地位。一篇是介绍狭义相对论的，内容大都在本书的范围之外；另一是关于光与电子相互作用的，后来被认为是关于现在我们称之为量子力学的一流科研工作，因此爱因斯坦获得了 1921 年的诺贝尔奖。第三篇文章是关于自从 1827 年就迷惑科学家的现象的理论解释。这个解释确立了任何理论文章都无法做到的证实了原子的真实性。

爱因斯坦后来说当时他的主要目的是“发现了具有有限大小尺寸原子存在的事实”。这个目的也许标志着现在他的工作的重要性。爱因斯坦发表这些文章期间，他正在波恩的一个专利事务所作一名专利检查员，当他结束正常的教育时，他非凡的物理贡献还不足以使他争取到学术位置，专利局的工作正适合他。他的逻辑头脑可以帮他 from 糠糟中提取出新创造，他熟练的工作技巧给他省下了大量的时间，可以考虑物理问题，即使是工作时间也不例外。他的一些想法是关于 80 年前的英国植物学家托马斯·布朗的观点。布朗发现当用显微镜观察浮在水面上的花粉时，看到花粉颗粒似乎在作不规则弹跳运动，这种不规则的运动现在称为布朗运动。爱因斯坦证明这种运动虽然是随机的，却遵循一定的统计规律，如果花粉受到如玻尔兹曼和麦克斯韦所描述的那种在气体或液体中运动但看不见的微观粒子的不断冲击的话，其运动恰好就是这种形式。现在看看这篇文章带来多么不可思议的冲击吧。你和我都已习惯了原

子观点，可以马上看出花粉被看不见的粒子所冲击，这些粒子一定是运动的分子或原子。但在爱因斯坦指出这点之前，那些受人尊敬的科学家们仍有余地去怀疑原子的真实性；到这篇文章出现以后，他们就无法怀疑了。就像苹果落地这事实一样，解释起来很简单，可是如果真的就这么显而易见，为什么 80 年前没有这种解释呢？

有讽刺意味的是，这篇论文是在德国发表（发表在 *Annalen der Physik* 上）的。确实也应该在德国发表，因为正是主要由于德语国科学家如恩斯特·马赫及威廉·奥斯瓦尔德对分子运动论的反对才使玻尔兹曼感到自己做的一切是在荒野中呐喊。实际上，到二十世纪初已有很多事实能够说明原子的真实性，虽然严格说来这些现象都是间接证据；英国和法国的科学家们比其德国的同行更拥护原子论，是由于 1897 年英国人 J.J. 汤姆逊发现了电子的缘故，现在我们知道它是原子的组成成分之一。

## ◆ 电 子

在十九世纪末期，对真空管中灯丝通过电流发电时产生辐射的本质有很长时间的争论。这种被称为阴极射线的东西可能就是一种形式的辐射，它产生于以太的振荡，但不同于光及刚刚发现的电磁波，这也许是一种小的粒子流。多数德国科学家拥护以太波的说法；而多数英国和法国科学家认为阴极射线是一种粒子流。1895 年威尔海姆·伦琴偶然发现了 X 射线（1901 年伦琴因此获首次的诺贝尔奖），这使情况变得复杂起来，一时转移了不少的注意力。虽然这个发现非常重要，但它来得太快了，还没有原子物理的理论框架来解释 X 射线到底是什么。随着我们故事的

进展，在适当的地方，我们还会遇到它。

卡文迪许实验室是 1870 年麦克斯韦建立的剑桥的科学研究中心，麦克斯韦是卡文迪许实验室的第一个物理教授。汤姆逊就在这个实验室工作。汤姆逊设计了一个巧妙的实验，用电和磁的作用使一个带电粒子保持平衡。\*这种粒子的运动路径既可以用电场也可以用磁场使之弯曲，汤姆逊却可以发明合适的装置使这两种效应相互抵消，使得阴极射线从带负电的金属（阴极）发出后沿直线运动打在探测屏上。这种技巧只能用在带电粒子上；因此汤姆逊宣称阴极射线实际上是带负电的粒子\*\*（现在称作电子）。他可以通过电力和磁力的平衡计算出电子电荷与电子质量之比（ $e/m$ ）。无论什么金属作阴极，结果总是一样，他于是得出结论：电子是原子的一部分，虽然不同元素由不同的原子组成，但所有原子包含的电子总是一样的。

这可不像 X 射线，是偶然的发现；这是通过仔细的设计和精巧的实验得到的。麦克斯韦创立了卡文迪许实验室，可是，只是在汤姆逊的带领下，才成为领先的物理实验中心的。（也许是世界上最先进的实验室）这种发现导致了二十世纪对物理的新理解。除他获奖外，在 1914 年之前，在卡文迪许实验室他手下的 7 个科学家也都获得了诺贝尔奖。至今卡文迪许实验室仍是世界物理的中心。

发明这个词在此处用得恰如其分。 J.J. 汤姆逊出奇地笨，只好设计出很好的实验而由别人去做；他的儿子乔治据说说过这样的话：J.J.（他常如此称呼父亲）聪明得足以准确地分析出仪器的毛病，可就是自己不会操作它（见 *The Questioner*, barbara lovett Cline 13 页

你见到的在其上显示电视图象的东西实际就是这种管子，称为阴极射线管；阴极射线就是电子，正如汤姆逊所做的那样，通过改变磁场，使电子流在视屏上面照出颜色

## ◆ 离 子

由真空管中带负电的金属电极发出的阴极射线原来就是带负电的电子。而原子是电中性的，从逻辑上便直接可以得出原子中一定还存在与电子相反的带正电的东西，原子就成了有负电荷的碎片掺杂于其中的结构。Wurzburg 大学的威廉·韦恩在 1898 年首次研究了这种带正电的射线，指出组成这种射线的粒子比电子重得多，因此，我们可以将其看作缺少了一些电子的原子。按着阴极射线方面工作，汤姆逊接受挑战，用一系列极其困难的实验研究了这种带正电射线，此工作一直持续到本世纪 20 年代。我们现在将这种粒子称为电离的原子或者简称为“离子”；但在汤姆逊时代却被称为阳极射线。在实验中阴极射线管中保留有一部分空气，电子在这些气体中运动与气体的原子碰撞，将原子中的其它电子打出来，留下了带正电的离子。对待这些离子可以像汤姆逊对待电子那样实施电、磁场操作。到 1913 年汤姆逊研究组已对氢、氧和其它气体的正离子进行了电磁偏转测量。汤姆逊在实验中使用过一种氦气，电子流通过稀薄氦气的真空管时发出一种明亮的光。汤姆逊的实验仪器正是现代氦管的原型。可是他的发现远比一种新型广告信号重要得多。

所有电子都具有相同的荷质比 ( $e/m$ )，但是在实验中却发现三种不同的氦离子，它们都具有与电子相等的电荷量（只不过是  $+e$ ，而不是电子的  $-e$ ），但他们具有的质量却各不相同。这是首次发现化学元素包含具有不同质量的但是却具有相同化学性质的原子。这种在化学元素上的变异现在称为“同位素”，但是寻找这个现象的解释却是费了很长一段时间。现在汤姆逊已有

足够的信息建立对原子内部样子的初步解释了。原子不再像几位古希腊哲学家所认为的那样是一种看不见的终极粒子，而是带正电荷粒子与带负电荷粒子的混和物，电子可以被打出来。

汤姆逊把原子想像为有点像西瓜似的東西，一个分布着正电荷的球，电子像西瓜子那样散于其中，每个电子带着它自己的一点负电荷。虽然结果发现他是错误的，但他毕竟给科学家们一个目标，这个目标导致对原子结构更为精细的理解。要知道是怎样做的，首先让我们在科学史上后退一步，然后再前进两步。

## ◆ X 射线

揭开原子结构的秘密的关键在于 1896 年发现的一种辐射。正如几个月之前 X 射线的发现那样，这也是个幸运地发现。但是这种幸运的巧事注定会出现在那个时期的某个实验室中。

像 1890 年的许多物理学家那样，威廉·伦琴也在做阴极射线的实验。恰好当这束射线——电子撞到一些物质上，这种碰撞产生了第二次辐射。这种辐射是不可见的，仅能在照相底片上或胶卷上探测出来，或者在一种叫做荧光屏的仪器上看到，它撞向屏幕可以形成一个光点。恰好在靠阴极射线实验装置的桌子上有一个荧光屏，他很快就注意到在进行阴极射线管放电操作时，屏幕就会变亮。这导致了他发现了这种二次辐射，他称之为“X”，因为通常 X 代表数学方程中的未知量。很快证实了“X”射线行为像波（我们现在知道它是一种形式的电磁辐射，与光相似，但波长更短），在德国实验室中的这种发现使德国科学家相信阴极射线必须是一种波。

1895 年 12 月份发现 X 射线消息的宣布在科学界引起了很大

的轰动，其他一些研究学者试图寻求产生 X 射线或产生类似 X 射线的辐射的新方法。第一个成功的当属在巴黎工作的亨利·贝克勒尔。X 射线最奇特的特征是它是不受影响地穿过许多不透明的物质，如穿过黑纸在其包裹的底片上形成影子。贝克勒尔对磷光感兴趣，这种物质能发射出它原先吸收的光。荧光屏受到像 X 射线那样的辐射的激发时才发光；而磷光物质具有保存入射的辐射的能力，在暗处发光，慢慢变暗，能持续数小时之久。自然要寻求一下磷光与 X 辐射的关系了。但是贝克勒尔的发现恰如 X 射线的发现那样出人意料。

## ◆ 放 射 性

1896年2月，贝克勒尔将照相底片用双层黑纸包好，纸上覆有铀二酸硫酸钾。他将底片在日光下曝晒几个小时。光底片曝光显影后，给出覆盖于其上的化学物质的轮廓。贝克勒尔认为，由于日光在外层的铀盐中产生了 X 射线，这与磷光的原理相同。两天后，他用同样的办法准备了一块底片来重复一下先前的实验，可是那天天空布满乌云，他只好将样品锁在抽屉里。在3月1日，不管怎样，贝克勒尔还是将其冲洗了。可又发现了铀盐的轮廓。不管是什么，与两块底片相作用的不是太阳光和磷光，而是以前不知道的辐射。后来发现这种辐射是从铀中不受影响的情况下自发地产生的。这种能产生自发辐射的特性我们称为放射性。

在贝克勒尔发现的提示下，其他科学家开始研究放射性，玛丽·居里和皮埃尔·居里很快成为这支新科学的专家，由于对放射性的研究以及发现新的放射性元素，她们双双获得1903年的诺

贝尔奖；1911年玛利娅因在化学上对放射性物质进一步的研究获得第二次诺贝尔奖。（玛利娅和皮埃尔的女儿伊伦也因放射性方面的研究工作获得了1930年的诺贝尔奖）。早在1900年，关于放射性的实验发现已远远地走在理论工作的前面，一系列实验方面的进展后来才被纳入理论的框架。这段时间里，崛起一位研究放射性的名人，他就是恩纳斯特·卢瑟福。

卢瑟福是新西兰人，1890年与汤姆逊同在卡文迪许实验室工作。1898年指定为蒙特利的麦吉尔大学的物理学教授，在那里他同弗雷德里克·索迪在1902年指出放射性包含在从一种放射性元素到另一种元素的转变过程中。也正是，瑟福在这种放射性中发现了两种不同的放射性衰变。他名之为 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线，我们现在还沿用这个名字。当第三种放射被发现时，自然就名为 $\gamma$ 射线。 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线都是快速运动的粒子；很快便证实了 $\beta$ 射线就是电子，与阴极射线完全相同；同样， $\gamma$ 射线被证实是一种电磁波，与X射线类似，只不过波长更短。后来发现 $\alpha$ 射线是与另外两种射线完全不同粒子，它的质量约为氢原子质量的4倍，电荷是电子电荷量的2倍，而且是正的。

## ◆ 原子的内部

在还无人确切知道 $\alpha$ 粒子是什么，以及一种原子变为另一种原子的过程中为什么以这么高的速度发射出来的时候，像卢瑟福之类的研究工作者就开始使用它们了。这类由原子反应产生的高能粒子可以用作研究原子结构时使用的探测粒子，作为科学研究中奇妙的反方法一例， $\alpha$ 粒子用来打原子，恰好 $\alpha$ 粒子又是由原子中放出的。1907年卢瑟福从蒙特利搬到英国的曼彻斯特大学



并成为那里的一位物理学教授；1908年他获得了诺贝尔化学奖以表彰其在放射性方面的工作。这个奖他觉得好笑。虽然诺贝尔奖金委员会将关于元素的研究归为化学，卢瑟福一直将自己视为物理学家，没有多少时间去研究化学，他视化学为更低一些的学科。（随着量子物理给予分子和原子更新的理解，化学成为物理学的一个分支，这个物理学家的幽默变得更真实）。1909年，在卢瑟福手下工作的汉斯·吉格和恩内斯特·马斯顿做了一个实验，在实验中，将 $\alpha$ 射线束射向一片薄的金属箔，那时还不能进行粒子的人工加速，只好使用来自于自然的 $\alpha$ 辐射。射向金属箔片的 $\alpha$ 粒子的出射方向由闪烁显示屏显示，当有一个粒子打向荧光屏时，在屏上就会出现一个亮点。一些粒子直接穿过金属箔，另外一些发生偏折，奇怪的是，竟有一些反折回来。这是为什么呢？

卢瑟福找到了答案。每个 $\alpha$ 粒子大约比电子重7000倍（实际上 $\alpha$ 粒子等于去掉两个电子的氦原子），并以接近光速的速度运动。如果与一个电子碰撞，它会把电子撞一边而自己不受影响。偏折一定是金属箔原子中带正电的东西造成的（电荷之间的相互作用正如磁极那样同性相斥），可是如果汤姆逊的西瓜模型是对的话，那么就不会有 $\alpha$ 粒子被反折回来。如果正电荷充满整个原子球的话，那么所有的 $\alpha$ 粒子肯定都能直接冲过去，因为实验表明大部分粒子可以直接穿过金属箔。如果西瓜模型能让一个粒子穿过去，它也应该能让所有粒子穿过。可是如果原子的正电荷集中在很小的体积中，此体积比整个原子的体积小得多，那么，只有偶尔与原子中心的小聚集体头对头碰撞才发生反折，而大部分 $\alpha$ 粒子会直接穿过原子正电部分以外的虚空间。只有这样设计，才能做到一部分粒子碰到原子后而反折，一部分稍稍偏折，另一部分直接穿过不受影响。

由此，在1911年，卢瑟福提出了一个原子的新模型，这成

了原子结构的现代理解的基础。他说必须存在一个原子的中心部分，他称之为原子核。原子核包含原子的所有正电荷，这个电荷正好与围绕其分布的电子云的负电荷相等，因此原子核加上电子合起来能保证原子的电中性。后来的实验表明原子核的大小仅为原子尺寸的十万分之一，原子核的典型尺寸为  $10^{-13}\text{cm}$ ，而包含电子云的原子尺寸为  $10^{-8}\text{cm}$ 。这样可以帮助你直观地了解这些尺寸特征，设想一个针尖约为毫米尺寸，放在圣保罗大教堂的中心，周围的微尘分布在 100 米的范围内。针尖代表原子核，而尘埃代表电子。原子中就有这么大的空间，而所有看来是固体的东西是由这样的空间组成的，由电子粘结起来。请记住：卢瑟福提出他的新原子模型时，他已获得了诺贝尔奖（此模型建立是他设计的实验）。可是他的行业几乎也就结束了，因为 1919 年他宣布了人工元素的嬗变，同年接任 J.J. 汤姆逊成为卡文迪许实验室的主任。他先是骑士（1914 年），接着在 1931 年成了纳尔逊·卢瑟福男爵。尽管如此，将其诺贝尔奖的工作算在内，毫无疑问他对科学最大的贡献是原子模型。此模型改变了物理学，导致这样一个明显的问题——既然电荷的吸引力大于其排斥力，为什么带负电荷的电子不会落入带正电的原子核中去呢？答案包含在原子与光的相互作用中，这就标志着量子理论的初步认识的年代就要到来。

## 第 三 章

# 光 与 原 子

卢瑟福模型引发的问题基于这样一个事实：运动的电荷在加速过程中要产生电磁形式的辐射，——如光、电磁波或类似的东西。如果电子呆在原子的核外面，它终会落入原子核，那么，原子是不稳定的，在原子坍塌的同时会产生一阵能量辐射。很明显要抵消这种坍塌的办法是让电子绕原子核转动，如在太阳系中行星绕太阳转动一样。转动时包含着连续的加速，转动中粒子速度的大小可能不变，可是运动的方向却在一直改变着，速度大小和方向合在一起才构成了速度这个量。由于电子的速度不断地变化，应该辐射能量，由于不断地失去能量，电子应该沿着螺旋线方向落进原子核。即使引进轨道运动，理论家们依然无法阻止卢瑟福原子的坍塌。

改进这个模型时，理论家们从电子轨道图象出发企图寻找到一种让电子保持在轨道上而不是螺旋落入原子核的办法。这是个自然的出发点，这与太阳系的分析符合得很好。但是错了，正如我们看到的那样，这与电子呆在离原子核一段距离的空间一点的

结果一样。这两种看法存在的问题是相同的，——怎样阻止电子落入。可是这个观点产生的物理学图象与行星绕太阳转动完全不同，这完全是件好事。无论是否使用电子轨道，理论家在解释电子何以不落入原子核的手段都是累赘且误导性的。多数人包括中学生及大众仍保留着这样一幅图象：原子有点像太阳系，中间是很小的原子核，电子快速地绕其运动。可是，现在正是应该放开脑筋摒弃这幅图象以进入奇特的量子力学世界的时候了。简单想象一下，电子与原子的核同在一个空间中，正负电荷的吸引却不会导致原子的坍塌并辐射出能量。

在理论家开始解决这个问题的时候，在 20 世纪的 20 年代，实验上发现了一些奇特的现象，这能帮他们改进已有的原子模型。这些现象是关于物质（原子）与辐射（光）的相互作用的研究。

在二十世纪初，对自然界最好的科学认识需要两方面的哲学。物体描述为粒子或原子，而电磁辐射包括光只能由波理论描述。所以光与物质的相互作用的研究似乎是将这些方面的机会最好地联合在一起的。可是，正是试图解释辐射与物质相互作用时，曾经在各方面都相当成功的经典理论才败下阵来。

观察物质与辐射怎样作用的最简单的方法（从字面上讲）是看一个热的物体。一个热的物体能辐射电磁波，物体愈热，辐射的能量愈大，辐射的电磁波的波长愈短（频率愈高）。因此，一个红热的拔火棍比白热的拔火棍要凉一些，凉得不能辐射可见光的拔火棍仍能让人感到温暖，这是因为它能辐射出低频的红外线。电磁辐射必定与小电荷的运动有关，这即使在 19 世纪末也很清楚。电子刚被发现，很容易看出原子中的带电部分（现在我们知道是电子）前后振荡将产生电磁波，这与我们在小水塘里将手指前后晃动产生小水波的情形差不多。困难在于两门最好的经

典理论——统计力学和电磁理论结合在一起预言的辐射形式，这与实际观测到的从热物体中发出的辐射有点不一样。

## ◆ 黑体线索

为了得出理论预言，像理论物理学家常做的那样，使用假想的理想试验——一个能够完全吸收并能完全辐射的物体。这种物体通常称为“黑体”，因为它能吸收照在它上面的所有辐射。然而这不是一个合适的名字，因为实际上黑体在将热能转换为电磁辐射时也是最有效的——一个“黑体”很可能是红热的或是白热的，从某种方面说太阳表面的作用就像黑体一样。可是在实验室中制作黑体却不像理论家们想象的那样那么容易。理想黑体是这样制作的：拿一个空心球或两端封闭的管子，在其一侧开一个小孔。任何辐射（如光）从小孔中进入后会陷在里边，左壁上不断反折直至被完全吸收；不大可能正好从小孔中反折出来，因此这个小孔效果上是一个黑体。这给辐射又起了一个名字，德国名字为洞辐射。

我们更感兴趣的是黑体被加热时的行为。正如前述的拔火棍，黑体被加热时光是有点温热，接着变红热，后来则是白热，这依赖于它的温度。辐射的谱（即每种波长的辐射量）可以通过测量从烧热的容器上的小孔中发出的辐射在实验室中观测到。观测表明它仅依赖于黑体的温度。很短的波长（高频成份）的辐射很少，很少波长的辐射也很少。多数辐射都集中于中间频率的一带。当黑体更热时，谱的尖峰会向更短的波长移动（从红外到红，到兰，到紫，到紫外）。可是总有个最短波长限。在这里，19世纪黑体辐射的观测与理论发生了冲突。

听起来有点不可思议，可最好的经典理论预言表明充满辐射的小孔将在短波处总有无限多的能量——这与黑体辐射的谱在趋向于零波长时会回落到零这点完全不同，实验上黑体辐射在短波处测量不到辐射。计算来自于看似非常自然的假定：对小孔中的电磁波可以像对待弦上，小提琴弦上的波一样，可以有任何的波长和频率。由于有许多波长（许多模式的振荡）要考虑，为了预言小孔中辐射的整体行为，必须将统计力学从粒子世界中搬到波世界中。这样就导致了辐射的能量正比于频率这样一个结论。频率正比于波长的倒数，很短的波长对应很高的频率。因此黑体辐射能形成很大的高频能量，在紫外及更高频，频率愈高能量愈大。这个预言上的困难被称为“紫外灾难”。这表明，肯定是推出这种预言的假设某些地方错了。

但这并不全是失败。在黑体辐射的低频一端，观测结果与基于经典理论给出的预言符合完好，被称为瑞利—琼斯定律。经典理论至少一半是对的。问题在于为何高频振荡的能量不是很大，而是实际上随辐射频率的增加而降为零。

在 19 世纪的最后的十年内，这个难题吸引着许多物理学家。其中之一是马克思·普朗克，他是属于古典型的德国科学家。投入而辛勤地工作的普朗克本质上是一个保守的科学家而不是革命派。他对热力学特感兴趣，当时最大的愿望是通过热力学定律解决“紫外灾难”的问题。到 19 世纪末，已经知道描述黑体辐射谱的两个公式。早一些的瑞利—琼斯定律在长波段有效，威廉·维恩推导出一个公式适合于短波的实验观测，也可以预言在某一特定温度下黑体辐射曲线出现尖点的波长。不同于瑞利于 1900 年使用的方法及后来琼斯的方法，普朗克从观察电子振子能够辐射和吸收的电磁波的最小能量入手。这个方法给出的曲线完全地解决了“紫外灾难”。从 1895 年到 1900 年，普朗克坚持在这个

问题上工作，发表了数篇联系热力学与电动力学的关键性文章，——可是仍然不能解决黑体辐射这个难题。1900年他有所突破，不是冷静，沉稳和逻辑的科学洞察，而是将碰运气及幸运地对一个数学公式的误解掺杂在一起的奋力一搏。

当然，现在无人绝对清楚普朗克向量子力学迈开革命的一步时脑子里是怎么样的。但是 Yale 大学的马丁·克莱茵却详细地研究过他的工作。克莱茵是个历史学家，专长于量子理论建立那段时间的物理历史。克莱茵的工作再现了量子力学诞生时普朗克和爱因斯坦的贡献，权威地解释了我们想要知道的那段历史，将发现置于历史课本中。第一步是 1900 年的夏季末，这时的工作一点也不归为运气，而是归为训练有术的数学物理学家的洞察力。普朗克想到这两种关于黑体辐射谱的不完备描述可以用一个简单的数学公式合在一起以描述整个曲线的形状。实际上他应用了一点数学技巧，得以填平了维恩定律和瑞利-琼斯公式之间的鸿沟。这是个巨大的成功，普朗克的方程与黑体辐射的观测符合完好。但是，它不像由之产生的半公式那样，它本身没有物理基础。维恩和瑞利还有普朗克在前 4 年的时间中试图从物理假设出发推出黑体辐射曲线。现在普朗克从中得到正确的曲线，可无人知道曲线所属的物理假定是什么。实际上它们一点也不“敏感”。

## ◆ 不受欢迎的革命

1900 年十月，普朗克在柏林物理学会上宣布了他的公式。接下来的两个月内，他全心全意寻求这种定律的物理基础，尝试了各种不同的物理假设，看哪一种能和这种数学方程相符。后来，他讲道这是他一生中最努力的一段时期。许多尝试失败了，

直到最后只余下一个，虽不让他喜欢，却别无选择。

我说过普朗克是个守旧的物理学家，的确如此。在他早期的工作中，他不愿接受分子假设，他特别害怕熵这种物理性质的统计解释，这种解释是玻尔兹曼引入热力学的。熵是物理学中的关键概念，与时间流失的基本感知有关。虽然牛顿定律及力学中的简单定律是可以时间反演的，我们知道真实世界并非如此。设想将一块石头扔到地上，当它与地球撞击时，运动的能量转化为热。可是我们将同样一块石头放在地上并将其加热同样热量，它不会跳到空中去。为什么呢？在下落的石头这种情况下，整齐运动（所有的原子和分子都落向同一方向）换化为无序运动（所有原子与分子相互之间随机地交换能量）。自然的定律要求无序运动是增加的。无序是由熵标定的。如果你能够将热能的无序运动规则化，使用此能量可以将石头中的分子运动规则化，那么，就可以让石头整块地跳向空中。

可以吗？玻尔兹曼引入另一种说法。他说这种特别的情形是可以发生的，但机会极小。同样地，作为空气分子随机运动的结果，可能出现房间中所有空气分子突然集中在角落的情况（不止一个角，因为分子是在三维空间中运动的）；可是这种机会仍是极小的，在实际中是可以忽略的。普朗克持久又坚定地反对热力学第二定律的这种统计解释，与公众和玻尔兹曼抗争。对他来说，第二定律是绝对的；熵必须增加，不能让几率进入解释。这就不能理解，在 19 世纪末，在普朗克穷尽了这么多种解释后，仍不情愿将玻尔兹曼的统计解释加入他的黑体辐射的谱计算之中，而加入后的确可以。可笑的是，由于他不熟悉玻尔兹曼方程，普朗克用错了，却得到了正确的答案。直到爱因斯坦采用了这种方法，普朗克工作的真正物理意义才得以明确。

应该强调的是，普朗克确立了玻尔兹曼熵增加的统计解释是



真实世界的最好描述，这已是科学中一大进步了。随着普朗克的工作进一步，他虽不怀疑熵是增加的，但认为确实有很大可能的不确定性。这个理论在宇宙学中大有深意。宇宙学研究的是巨大时间或空间尺度上的事，我们研究的区域越大，其内某个地方更易发生看似不可能的事。也可能（虽然可能性很小）整个宇宙大体上是有序的，这仅代表某种热力学统计涨落，在很大的区域，熵是以很大的速率减小的。普朗克的错误，揭示了宇宙更基本的本质。

玻尔兹曼的热力学统计方法包括数学上将能量切成许多份，将每个份看作是可以以几率方程单独处理的小块。在计算之前将能量分成许多份，到后来必须加在一起（求积分）给出总能量，在这种情况下对应黑体辐射的能量。这个过程做到一半的时候，普朗克意识到自己已经得到想要的数学公式了。在将能量碎块合在一起之前，在数学上已经展示出黑体的能量方程了。这是很突出的，在经典物理教科书中是完全不会给出的。

任何一个优秀的物理学家从玻尔兹曼方程来创建黑体辐射公式必须进行整体积分。正如爱因斯坦后来指出的那样，将能量碎块加在一起将导致“紫外灾难”——实际上爱因斯坦指出任何经典方程都将不可避免地导致这种灾难。只是因为普朗克知道他要找的答案他才能够阻止这一切似乎是完善正确的方程的经典解。作为这一方法的后遗症，留下了等量碎片概念等他去解释。他将电磁能量明显地分为等份解释为原子中的电子振子只能够发射或吸收特定大小的整块的能量，他称此能量块为量子。特定能量不能有无限种分法，只能将振子能量分为有限多的碎块，辐射碎块的能量（ $E$ ）必须与频率有关（用希腊字母  $\nu$  表示），提出下面新公式：

$$E = h\nu$$

此处  $h$  是个新常数，现在称为普朗克常数。

## ◆ $h$ 是什么？

不难看出“紫外灾难”是怎样解决的。对于很高的频率，辐射的一个能量量子很大，根据统计力学方程，仅有很少的振子具有这么高的能量，因此，只有很少的高能量子被辐射出来。对于极低的频率（对应长波长），辐射的低能量子很多，但每份量子具有的能量很小，将它们全部都加起来也不太多。只有在中间的频率范围中，才会存在大量的具有中等大小的能量块，它们总和形成了黑体辐射谱曲线上一个峰。

但是，普朗克发表在 1900 年 12 月的结果虽提出了更多回答不了的问题，也未激励起物理界的热情。普朗克关于量子理论的早期的文章没有明确的模型。（也许这正反映了他不得不在他所喜爱的热力字中引入这个理想时的疑惑）。在很长时间中许多（差不多是大多数）知道这个工作的物理学家仍将其视为数学技巧，本身具有很少或不具有物理意义，只是一种消除“紫外灾难”的办法。普朗克自己肯定是有疑虑的。在 1931 年写给罗伯特·威廉·伍德的信中，他回顾 1900 年的工作时写道：“我认为这是一种无可奈何的事……无论付什么代价，不管多高，都必须给出的一种理论解释。”\*。他仍认为自己碰上了一种有意义的东西，据海森堡说，普朗克的儿子在柏林郊区的格朗纽沃德作长时

• 为密哈罗和雷钦伯格所引用

间的散步时，讲到他父亲当时是怎样评价自己的工作时说道：这种发现可能与牛顿齐名。

19世纪的物理学家正沉浸在原子辐射的新发现中，普朗克解释黑体辐射曲线的“数学新技巧”与这些发现相比并不是至关重要的。的确，认可普朗克的工作比起认可居里和卢瑟福的工作所花时间漫长得多，直到1918年普朗克才因此项工作获得了诺贝尔奖。（这部分是因为对一种新理论突破的认可需花更多的时间；新发现一种新粒子或一种X射线马上就会有所轰动，一种新理论在得到全面的公认之前必需经过时间的考验及实验的验证。）普朗克的新常数  $h$  有点特别。它是一个很小的常数  $6.55 \times 10^{-27}$  尔格 / 秒，这也难怪，因为如果它再大一点的话，很明显在物理学家对黑体辐射理论产生疑问之前就会被发现。奇怪还在于  $h$  的测量单位，能量（尔格）乘以时间（秒）。这种单位称为“作用量”，并不具有非寻常的经典力学特性，并没有“作用量守恒”与质量守恒及能量守恒相比拟。但是作用量具有一个特别有趣的性质，其它物理量中只有熵与它相似。一个常作用量是一个绝对恒常量，它对于时空中的所有观察者都是相同的大小。它是个4维常数，仅在爱因斯坦发现相对论之后它的意义才明确地显示出来。

因为爱因斯坦是进入量子力学舞台的第二个演员，也许值得离开主题去谈谈他的相对论。狭义相对论将3维空间和一维时间放在一起看作连续的时空。以不同速度在时空中运动的观察者观察测量经过的棍子，会得到不同的长度。可是棍子可以认为是存在于4维时空的，当它在时间中“通过”时会在4维时空中形成

一个超矩形，这个超矩形的高是棍子的长度，宽是渡越过的时间。此矩形面积的测量单位是长度乘以时间，这个面积对所有观察者来说都是相同的，虽然他们测量到的长度和时间是不一致的。同样地，作用量（能量  $\times$  时间）是能量 4 维等效量，作用量对所有观察者都是相同的，虽然他们测量到的能量和时间是不相同的。在狭义相对论中，有一个作用量守恒定律，它与能量守恒定律一样地重要。普朗克常数看来很怪，只是因为它发现于狭义相对论之前。

这也许是强调了物理学的神奇本性。1905 年爱因斯坦发表的科学三大贡献中，其中之一的狭义相对论好像与布朗运动和光电效应有些特别。可是它们均组成了理论物理的框架，虽然爱因斯坦是以其广义相对论出名的，可爱因斯坦最伟大的科学贡献是其在量子理论上的工作，它始于普朗克的工作通过光电效应的研究才产生的。

普朗克 1900 年的工作的革命性在于它展示了经典物理的一个极限。这个极限到底是什么并不重要。有些现象仅仅靠牛顿工作构造的经典想法不能解释，仅这个事实足以将物理学推向新世纪。可是普朗克工作的最初形式比现代解释具有更多的局限性。很多冒险故事中，英雄在最后关头在悬崖峭壁边上奇迹般地脱险了，归为一句老话：“只一……，就得救了。”许多通俗读物在描述量子力学诞生故事时读来正像是在科学上一跳就脱离了危机。“在十九世纪末，经典物理走入了死胡同。由于普朗克发明了量子，物理学终于得救了。”情形远非如此，普朗克只是提到原子中的电振子可能是量子化的。他的意思是说：这些振子仅能辐射出具有特定大小的能量，是因为它们内部的某种东西阻止它们吸收或发出中间能量的辐射。

在伦敦银行的自动取款机就是这样干的。当我们提款时，只要是 5 英镑的整数倍，任何数目的钱都可以从这台机器中取出。自动提款机不能给我们这中间数目的钱（也不能给 5 英镑以下的数目的钱），但这并非说中间数目如 8.47 英镑的钱不存在。因此普朗克本人并未提出辐射是量子化的，而且他似乎很担心量子理论的深层含意。在以后的几年里，在量子理论发展中，普朗克对它的创立做出了很多贡献，但是他一直花很大的力气试图发展出一套将这一新观念与经典物理相调和的理论。他并没有改变想法，不认为从经典物理得出的黑体辐射方程是大大地向前走了一步。他是根据热力学和电动力学合在一起导出的方程，二者均属经典理论。普朗克一心一意努力寻求量子观点与经典物理之间的调和理论。实际上表示他已从习惯的经典观点作了深远意义的转移。他的经典思想背景是那么深入，难怪量子力学的进一步的发展只能是新一代物理学家创造的。这些新物理学家并未有固定模式，又不执着于旧的观点，在原子辐射的新发现的激励下，在旧的和新的问题中寻求新的答案。

## ◆ 爱因斯坦、光和量子

到 1900 年 3 月爱因斯坦 21 岁，1902 年夏在瑞士专利局中开始了他有名的工作。在最初的几年里他主要致力于热力学与统计力学方面的研究。他首次发表的文章就如同包括普朗克在内的前辈科学家那样按传统方式处理同样的问题。但是，就在他第一篇文章中，在公开引用普朗克黑体辐射谱的想法时（发表于 1904 年），他就另辟天地，发展出他自己的解决科学问题的新方式。

马丁·克莱茵叙述道，爱因斯坦是第一个严肃对待普朗克公式的物理含义的人，他不把它当作数学技巧看待。<sup>\*</sup>

爱因斯坦 1904 年的论文中的另一个突破性的一点与普朗克的工作有关，是对十九世纪末菲利普·雷纳德和 J.J. 汤姆逊各自独立发现的光电效应的研究。雷纳德 1862 年生于现在称之为捷克斯洛伐克的那部分匈牙利地区，1905 年因其对阴极射线方面的工作获得了诺贝尔奖。在他进行的实验中，特别的是他在 1899 年发现在真空管中当光照向金属表面时，能产生阴极射线（电子）。光的能量以某种方式使电子从金属中跳出来。

雷纳德使用的是单色光，也就是说所有的光波均具有同样的频率。他想找出光强度对出射电子的影响，发现了一个惊人的结果。使用强一些的光（实际上他是将光移近金属，效果相同），即在每平方厘米金属表面上照射更多的能量，如果电子能得到更多的能量，那么，它应该更快地被击出金属表面，以更大的速度飞行。但是雷纳德发现，只要光的波长保持不变，所有出射的电子飞出的速度都是相同的。将光移近金属表面能产生更多的出射电子，但每个电子的速度仍保持与同样颜色的弱光时的速度相同。另一方面，使用更高频率的光（比如说用紫光替代兰光或红光做实验）照射时，电子确实走得更快些。

只要你准备好愿意放弃固有的经典物理的观点将普朗克方程看作是具有物理意义的，就很容易解释这一点。只要看看在雷纳

<sup>\*</sup> 亨利·沃尔夫编著的《分配中的奇怪性质》一书中克莱茵所写的部分。在同一卷中，麻省理工学院的托马斯·库因在论及普朗克“发表黑体辐射谱分布公式时不接受能量是分立的观点”，以及爱因斯坦是第一个赏识“黑体辐射具有量子的基本原則”时走得更远。库恩说“是爱因斯坦而不是普朗克第一个对普朗克振子进行了量子化。”这个论题已经不在学术范围之内了；但是毫无疑问爱因斯坦对量子理论的发展所做的贡献是非常关键的。

德光电效方面的工作及普朗克引入黑体辐射量子化以后的五年时间中，无人迈出这似乎简单的一步，就能知道这一步是何等地重要。实际上，所有爱因斯坦做的就是将方程  $E = h\nu$  用到电磁辐射上来替代原子中的小振子。他说光不是连续的波（可一百年来科学家们都认为是），而是以确定形式的波包或量子存在。具有特定频率  $\nu$  的光（意味着具有特定的颜色）存在于具有同样能量  $E$  的波包中。光子每次撞击电子时，它将同样大小的能量传给电子，因此，所有电子都具有同样的速度。光更强些仅意味着有更多具有同样能量的光子，（如今我们称之为光子），但是改变光的颜色也就改变了它的频率，因此，也就改变了每个光子所带的能量。

这就是 1921 年爱因斯坦获得诺贝尔奖的工作。又一次证明了理论上的突破必须等待对事物较全面的认知。光子观点未得到立即认可，虽然总体说来，雷纳德的实验是和光子理论一致的，直到十年后，该理论预言的速度与光波长之间的精确关系被实验证实以后才得以认可。此实验是由美国实验物理学家罗伯特·密立根做的，而且在此过程中还发展出一个精确测定普朗克常数的方法。就是因为这个工作及其电子电荷的精确测定，1923 年密立根相继获得诺贝尔物理学奖。

爱因斯坦在那几年之中特别忙。一篇文章使他获得了诺贝尔奖；另一篇又总体上证实了原子的真实性；第三篇产生了使他最为出名的理论——相对论。在同一年，几乎是无意地又忙于完成关于分子尺寸大小的工作，他将那篇文章提交 Zurich 大学作为博士论文。在 1906 年 1 月他获得了博士学位。虽然当时物理学博士学位并没有像现在这样对于科研生涯那么关键，1905 年那三篇巨作出自于当时只能将自己名字签为“Mr”的爱因斯坦之手还是很特别的。

在接下来的几年里，爱因斯坦继续从事于将普朗克的量子论用于其它物理领域的工作。他发现量子观点可以解决热容理论中长期未能解决的问题（热容是让固定质量的物质温度上升特定的振动方式，这些振动实际上量子化的）。这方面的工作不太华丽动人，在看待爱因斯坦的工作时经常忽视它们，可是物质的量子论比爱因斯坦的辐射量子论更快地获得了认可，可以说说服许多旧式物理学家正确地看待量子观点。爱因斯坦在直到 1911 年的这段时间中完善了他的量子辐射理论，确认光的量子结构是普朗克方程不可避免的含意。它指向一个真实的科学世界——要更深入地理解光必须包含波和粒子这个自从 17 世纪以来一直对抗的理论。到 1911 年，他的思路转向别处。他确信量子是真实的，他自己的观念都是这么定位的。他的兴趣是引力问题，到 1916 年这 5 年中他创立了他所有工作中最伟大的工作——广义相对论。直到 1923 年，才毫无疑意地确立了光的量子本性，这又引起波和粒子的争论，这种争论改变了量子理论，促使了现代理论——量子力学的产生。更多想法都集中在这一点上了。在爱因斯坦从这个课题转开的十年中，第一朵量子之花开了。这来自于卢瑟福模型的启迪，也主要来自于丹麦科学家尼尔斯·玻尔的贡献，他曾在曼彻斯特跟着卢瑟福工作。在玻尔形成他的原子模型之后，再也没有人疑惑量子理论作为描述微观世界的价值了。



## 第 四 章

# 玻尔的原子

到 1912 年，一些关于原子的问题已有条件凑在一起了。爱因斯坦确立了量子论的广泛使用性，在他还未得到广泛接受时就引入了光子的概念。爱因斯坦说能量确实是以有限大小的包存在的。可将自动取款机的比喻推广。——自动提款机仅能处理 5 英镑整数倍的货币单位是因为这是最小的货币流通单位，不是机器程序的设定。卢瑟福创立了原子的新图象，一个小的原子核处在中心，外边围着一群电子，这种观点也未得到广泛的支持。根据经典电动力学的理论，卢瑟福的原子是不稳定的。问题的答案是原子中的电子行为应该使用量子规则来描述。这又是年青科学探索者们以新的思路来解决的问题——量子理论创生的继续故事。

尼尔斯·玻尔是丹麦物理学家，在 1911 年夏完成了他的博士学位论文，在当年的 9 月到剑桥的卡文迪许实验室跟着 J.J. 汤姆逊工作。他是个很年青的工作者，有点害羞，英语说得不是很好；他发现在剑桥不易找到自己合适的位置，可是当他访问曼彻斯特时遇到了卢瑟福，他发现卢瑟福平易近人，对玻尔及其工作感兴

趣。因此 1912 年 4 月，玻尔搬到曼彻斯特，开始在卢瑟福的小组里工作，主要集中研究原子的结构问题。6 个月后他返回哥本哈根，至到 1916 年仍与曼彻斯特的卢瑟福小组保持联系。

## ◆ 电子的跃迁

玻尔具有一种特别的天赋，这正是在此后 10 年到 15 年中研究原子物理所需要的。他并不关心解释完整理论的所有细节，但是他更愿意将不同想法拼在一起形成一个至少是与观察到的真实原子相一致的理想“模型”。一旦他对要做的工作有个粗略想法，他就能将它们拼补起来形成一个更完善的图象。因此，他将原子视为小的太阳系，电子照着经典力学及电磁学规律作圆周运动。他还说电子不会发出辐射旋转着坍入而离开其圆周轨道。因为电子只允许放出整块的能量——一整块的量子，而不是像经典理论所说的连续的辐射。电子的“稳定”轨道对应于某个特定大小的能量，每一个都是基本量子的整数倍，没有能量处于其间的轨道，因为这样的轨道的能量将是分数倍的。拿太阳系作比方有点合适，这就像是说地球绕太阳的轨道是稳定的，火星的轨道也是稳定的，但在其间的轨道却不。

玻尔做的不应该是对的。整个轨道的想法依赖于经典物理；固定能量的电子态（后来称为能级）却来源于量子理论。将一点经典理论与一点量子理论拼在一起给出的原子模型并不能给出原子构成的深入认识，但它确实足够玻尔依其模型作出成就。后来发现这模型从哪个方面看都是不对的，但是它提供了向真正的原子的量子理论的一种过渡。不幸的是，由于它将量子与经典结合得简单优美，以及原子作为小太阳系的图象直观明了，此模型不

仅在刊物上，而且在中学乃至大学的教科书中都受到喜爱。如果你在中学学一些原子知识，我敢肯定你会学习玻尔的原子模型，不管在课堂上是否这样叫的。我要告诉你，你要忘记一切你所听到的，而且准备好被说服这不全是真理。你应该想办法忘记电子是绕原子核运动的“小行星”的想法，这也是玻尔最初的看法，它确实是误人的。一个电子就是简单地在核外，具有特定的能量及其它性质。我们会看到它运动，但是非常奇怪的运动。

1913 年，玻尔早期工作取得了胜利，那就是它成功地解释了最简单的原子——氢原子的光谱。光谱学可追溯到 19 世纪早期，那时威廉·沃拉斯顿发现了来自太阳的光谱中有一些黑线。但是直到玻尔的工作产生后光谱学才成为探索原子结构的工具。如同玻尔将经典与量子混在一起取得成就，爱因斯坦光量子也能解释光谱，可是在这之前，先让我们后退一步去看看光谱是如何工作的。在这类工作中，除了将光看作电磁波外不要有别的想法。\*

据牛顿创立的学说，白光是由所有彩虹上的彩色光合在一起的，它们构成了光谱。每一种颜色对应特定的波长的光。用棱镜将白光分成颜色光，我们就能将光谱展开以使不同频率的波落在屏或感光胶片的不同位置。短波的兰、紫光在光谱的这一头，长波长的红光则在光谱的另一头，在这两头的外面，光谱可以扩展到我们眼睛看不到的波长范围。对太阳光作这样的展开时，会发现光谱中特定位置处标着明显的黑线，它们对应着精确的频率位置。在还不知道这些黑线是怎么形成的时候，19 世纪的研究者们，如约瑟夫·弗朗霍夫，罗伯特·本生（其名用以命名标准实验室灯即本生灯），以及哥斯塔夫·基尔霍夫就在实验上证实了每种元素都形成各自的一套谱线。一种元素（如钠）在本生灯的火苗

- 完整的最后理论告诉我们光即是粒子又是波，但我们还没有到那里呢！

中加热时，会发出特定颜色的光（对应这种情况的是黄光），它来自于强的光辐射，在光谱中呈一条或多条明线。当白光通过包含这种元素的流体或气体时，（即使以一种化合物的形式存在时）在光谱中呈现出一条或几条吸引暗线，像来自太阳的光线一样，光谱暗线的特定频率标志着特定的元素。

这解释了太阳光谱中出现暗线的道理。它们肯定是太阳气层中的较冷的气团物质，在光线从很热的太阳表面发出后经过它们时吸收掉了特定频率的光。这套技术提供了化学家们鉴别化合物中存在的元素一种有用的方法。例如将普通的盐放入火中，火焰呈现出特有的钠黄光（这种颜色在钠灯的路灯中特别熟悉）。在实验室中，用小金属丝沾取待测的物质，然后放在本生灯上就能看到特别的光谱。每一种元素给出自己的特征谱线图，即使在光强及火焰温度有所变化时，谱线图是不变的。谱线的规律清楚地表明元素的原子仅发射和吸引特定频率的光，绝不越雷池一步。通过与火焰实验比较，光谱学家解释了太阳谱线中的大多数暗线。它们得以解释是因为地球上存在并知道这些元素。著名的倒过程是，英国天文学家诺曼·劳克耶（他创立了科学杂志《自然》）发现太阳光谱中一些谱线无法用已知元素作解释，说这一定是由一种原来不知道的元素组成的，他称之为氦。后来以另外方式在地球上找到了氦，发现其谱线恰好能补充太阳谱线中的几条暗线。

借助于光谱，天文学家可以探测到远处星体及银河系中它们是由什么东西构成的。而原子物理学家则可以用同一工具探索原子的内部结构。

氢原子光谱极其简单。现在我们知道，这是由于氢是最简单的元素的原因，氢原子包含一个带正电的质子及与之相关的一个带负电的电子。提供氢原子“指纹”标志的谱线称为巴尔末线，这个名字来自于约翰·巴尔末。他是一位瑞士的中学教师，在

1885 年得出了描述氢原子谱线的一个公式，这年正巧是尼尔斯·玻尔出生的时候。巴尔末公式标志着氢原子的这条或那条谱线。从氢原子第一条谱线起，即光谱中的红光部分，巴尔末公式给出的另一条氢谱线是绿色的。从绿色谱线开始，将公式用上可得到下一条谱线在紫色区，以此类推。\*巴尔末在推导他的公式时仅知道在可见光区的四条谱线，可是其它的谱线也被发现并被拟合出来了；当更多的氢原子谱线在紫外和红外被识别出来后，它们也符合这种简单的数字关系。很明显巴尔末公式说明了氢原子结构中有一些有意义的东西，可又是什么呢？

巴尔末公式在物理学家中已成为公认的常识，到玻尔开始他的工作时，也成了物理大学生的教课内容。可是这仅是复杂的光谱数据的一部分，而玻尔又不是光谱学家。当他开始解答氢原子结构之迷时，没有马上想到巴尔末的谱线序列很明显是解开这个迷的钥匙。可是当一个专长光谱学的同事给他指出巴尔末公式是那么的简单时（不管其它原子的是多么复杂），他马上看到了它的价值。此时，早在 1913 年，玻尔已经肯定答案存在于将普朗克常数  $h$  引入描述原子的公式中。卢瑟福原子仅包含两种基本数，电子的电荷  $e$  及粒子的质量  $m$ 。无论怎么拼凑，你都不能得到一个具有从质量和电荷组合在一起的长度量单位的量，因此，卢瑟福的模型不具有自然长度单位。但是一个作用量如  $h$  加入后就可以构造出以长度为量纲的数，大体上说它应反映出原子的尺寸来。表达式  $h^2/m e^2$  具有尺寸单位，大小约为  $20 \times 10^{-8}$  厘米，它应符合散射实验及其它方面的研究。对玻尔来说，很明显  $h$  属于原子理论。巴尔末的级数给出了它的所在。

\* 简单地讲氢原子光谱中前四个谱线可由分数  $9/5$ ,  $16/12$ ,  $25/21$ ,  $36/32$  乘以一个常数得到 ( $36.456 \times 10^{-5}$ )。在这个公式中每个分数的分子由平方数序列给出 ( $3^2$ ,  $4^2$ ,  $5^2$ ,  $6^2 \dots$ ) 分母是平方数之差即  $3^2 - 2^2$ ,  $4^2 - 2^2$  等等

原子怎么会形成很清晰的谱线呢？通过吸收或发射精确频率  $\nu$  的能量。能量以普朗克常数与频率关联着 ( $E = h\nu$ )，如果原子中的电子发射出量子能量  $h\nu$ ，那么电子的能量变化必须精确地等于  $E$ 。玻尔说绕原子核作“轨道”转动的电子会呆在“轨道”上是因为它们不能连续地辐射能量，但是可以允许发射（或吸收）整个的量子能量。——单个光子，电子从一能级（旧图象的轨道）跳到另一能级。这似乎是简单的想法，实际上标志着经典思路的另一突破。这好像是火星从它的轨道上突然消失而又在地球轨道上突然出现，同时辐射到空间中一个能量脉冲（在这种情况下可能是引力辐射）。你马上看到在解释这种行为时，太阳系原子模型是多少的差劲，而将原子中的电子简单地视为在不同态对应不同能级又是多么的好。

从能到另一态的跃迁可是双向的，可上也可以下能级台阶。如果一个原子吸收光，则光子  $h\nu$  被用于将电子移向高能级（台阶上更上层的阶）；如果电子落回到原来的态，原子会辐射出同样的能量  $h\nu$ 。巴尔末公式中神奇的常数  $36.456 \times 10^{-5}$ ，可以由普朗克常数自然地表示出来。也就是说，玻尔可以氢原子中的单电子允许的能级，测量到的谱线的频率，现在可解释为不同的能级间的能量差。\*

\* 在处理电子或原子时，日常能量单位显得太大了，不太方便。合适的单位是电子伏特（**eV**），它代表一个电子通过 1 伏特的电势时所需的能量。此单位是 1912 年引进的，换算到寻常的单位  $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$  焦耳，每瓦特是每秒 1 焦耳。日常灯泡以 100 瓦特的速率消耗能量，如果愿意，你可表示为  $6 \frac{1}{4} \times 10^{12}$  电子伏特 / 秒。讲到我们的电灯每秒辐射  $6 \frac{1}{4} \text{TeV}$  的能量听起来一定是难忘的，但这和 100 瓦特是相同的。在电子转移时产生谱线对应能级变化为几个电子伏特——将电子打出氢原子需 13.6eV 的能量。放射过程中粒子产生的能量为几百万个电子伏特，或表达为 **MeV**。

## ◆ 氢原子的解释

与卢瑟福讨论和他的工作以后，玻尔在 1913 年间发表了数篇原子理论的文章。此理论对氢来说是完好的，看来似乎可以能够发展到也可解释更复杂原子的谱。九月份玻尔参加了英国科学进步协会主办的第 83 届年会，在会上，他讲了他的工作，与会的有许多最有名的原子物理学家。他的报告总体上是被接受了，詹姆斯·简爵士称它为天才的、创意的和肯定的理论。J.J. 汤姆逊同一些学者们不相信。多亏这次会议，使既使未被说服的科学家们至少也知道了玻尔和他关于原子的工作。

普朗克被迫将量子理论用于光理论后 13 年，玻尔将量子引入了原子理论。可是又过了 13 年，真正的量子理论才得以登场。那时，量子理论步履艰难，退一步进两步，有时是退两步进一步才能走到正路上来。玻尔的原子是个大杂烩，他将量子理论观点与经典物理混在一起使用而使模型成立。其它原子中此理论允许存在比实际观察到的更多的谱线，须引进独断的规则以标定原子中不同能级之间的某些跃迁是要“禁止的”。原子的一个新特性——量子数必须要选定以适合于实验结果。没有基础物理保证为什么量子数是必须的，以及为何某些跃迁是要“禁止的”。在玻尔引入最初的原子模型时，欧洲被第一次世界大战搅乱了。

如同其它生活形式一样，1914 年，科学不会再同以前一样了。战争阻止了研究者们从一国到另一国迁移的自由。从第一次世界大战开始，一些国家的科学家们发现，他们难于再同世界上其他同事们交流了。战争也给物理学曾在 20 世纪初一度辉煌的科学研究中心带来了直接的影响。在交战国，年青人离开了实验

室，加入了战争，只留下像卢瑟福等一样的老教授尽力做好工作；许多 1913 年后选择了玻尔的思想并要坚持下去的年青一代都死于战争。中立国的科学家也受到了影响，尽管一些人以某种形式在其他人的灾难中得到了好处。玻尔本人被指定为曼彻斯特物理的读者；在丹麦城市哥廷根，皮特·德拜对晶体结构进行了重要的实验，使用  $\alpha$  射线作为探测物。确实，荷兰和丹麦在当时成了科学的沙漠绿洲。玻尔在 1916 年返回丹麦，成为哥本哈根理论物理学教授，接着在 1920 年创建了以他名字命名的研究所。来自于像阿诺德·索末菲\*之类德国研究者的消息可以传到中立国的丹麦，接着由玻尔再到英国的卢瑟福。研究仍有进展，但情况不再一样。

战后，有许多年德国和奥地利国科学家不被邀请参加国际会议；俄国卷入革命的洪潮；科学失去了年青的一代，也失去了国际性。将玻尔的原子从半途（确定地说，已被勤奋的研究者们改善为虽摇摇欲坠却很具说服力的理论）推向量子力学的辉煌重任落在全新的一代人身上来了。这代人的姓名在近代物理中很响亮——维纳尔·海森堡，保尔·狄拉克，沃夫冈·泡利，帕斯考·约当等等。他们属于第一代量子力学人物，生长在普朗克的贡献之后（泡利生于 1900 年，海森堡 1901 年，狄拉克和约当 1902），二十世纪二十年代才进入科学的研究领域。他们没有需要克服的僵化的经典物理的训练，不像显著的科学家（如玻尔）需要在原子理论中保留经典的味道。从普朗克发现黑体辐射方程到量子力学的繁荣经历了 26 年，这也许正合适而不属于巧合，正好是将一代物理家培养为科学研究者的时间。这代入除了普朗克常数外，还有另外两种遗产。首先是玻尔的原子，他明确地指出任何

- 他与人合作改进了玻尔的原子模型，因此，该模型有时称为玻尔-索末菲原子



让人满意的原子过程必须将量子观点与之结合在一起；其次是与其它规律不同的，这来自于当时最伟大的科学家，他从未被经典物理绊住过脚。在 1916 年，正值战争最激烈的时候，爱因斯坦在德国工作，他在原子理论中引进了几率的概念。他之所以这样做纯属权宜之举，在原子理论这个大杂烩中又增加了一条，目的是为了**使玻尔原子与观察到的真实原子相符**。但是这权宜之举却比玻尔原子存在的时间更长，成为了真的量子理论的基柱，尽管，很好笑，爱因斯坦本人在著名的论断“上帝不会掷骰子”中放弃了它。

## ◆ 机会因素：上帝的骰子

早在 1900 年，当卢瑟福及其同事弗里德里克·索蒂研究放射的本性时，他们就已发现了原子的一个奇怪的基本性质：在熟知的原子核放射性衰变中，单个原子存在着基本的随机性（现在我们知道衰变是原子核的破碎发射出一部分核的碎片），这种随机性又不受外界影响。加热或冷却原子，将其放于真空中或水桶中，放射性衰变过程都不会受到影响。好像是你无法精确预料一个放射性物质的一个特定原子何时会衰变放出  $\alpha$  或  $\beta$  粒子，或是  $\gamma$  射线来，可是，对于同种元素的很大数目的原子，在特定的一段时间中有特定的比例会发生衰变。特别是，对于每一种放射性元素，存在一个特定时间，这叫做半衰期，在简单衰变中，这段时间内刚好有一半的原子进行了衰变。比如说镭具有 1600 年的半衰期；一种放射性同位素的碳称为碳 - 14 具有 6000 年的半衰期，由此可用来作考古年代测定；放射性钾的半衰期为 1300 百万年。

在不知什么原因使得很多原子中的一个发生破碎而相邻的却不会发生的时候，卢瑟福和索蒂就使用了他们的发现作为放射性衰变的统计基础了。这个理论使用了如保险公司一样的保险精算原理。保险公司知道有些人死得早，他们的后人从保险公司拿到比保险费多得多的补偿；另一些人活得久，则足以有保险费去补偿前者。在不知道客户在什么时间死的情况下，统计表就可以使会计摆平这个帐。同样地，统计表也可以使物理学家算出这个帐，只要他们处理的原子数目足够多。

这种行为的另一个特征是放射性物质样本不会很快失去放射性。从百万个原子开始，在一定时间内衰变减半，到下一半衰期——同样的一段时间，余下的放射性又会减半，这样一直下去。样品中余下的放射性原子越来越少，越来越接近于 0，但每一步趋向零都要花相同的时间。

在当时，像卢瑟福和索迪之类的物理学家认为最终会有人发现原子衰变的原因，因而可以解释这个过程的统计本性。当爱因斯坦把统计技术用于玻尔原子以解释原子光谱的细节时，他也期望后来的发现会取消这个“统计表”。可是，他们全错了。

原子的能级或原子中的电子态可以认为是一系列的台阶。每个台阶间隔代表的能量是不相同的。——上面的台阶比低层的台阶密得多。玻尔证明最简单的氢原子的能级可以表示为台阶，每个相邻台阶间距正比于  $\frac{1}{n^2}$ ，此处  $n$  是从底部数的台阶序号。从台阶 1 到台阶 2 转变电子需要吸收刚好  $h\nu$  的能量；如果电子落回到第一个台阶（原子的基态），那么它会放出同样的能量。没有办法让基态电子吸收更少的能量，因为第一到第二台阶之间没有中间的台阶供电子歇脚；处于第二能态的电子也不能放出比这个能量量子更少的能量，因为除基态外，中间别无能级可供电子落

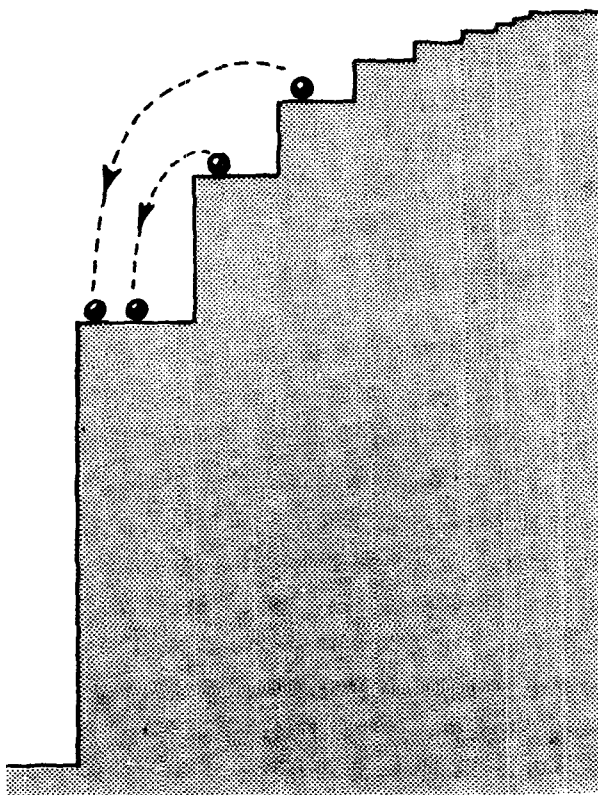


图 4.1 能级的跃迁

像氢原子那样的单个原子播级可比作有不同高度的台阶，放在不同台阶的小球代表电子处于原子的不同能级，小球从一个台阶移到另一台阶会释放精确数目的能量，对应氢原子光谱中的巴尔末谱线系，台阶之间没有可供电子“落脚”的地方。

脚。由于存在许多电子可以居住的台阶，因为电子可以从这个台

阶跃到另一个台阶，因此，每一个元素的光谱中都有许多条谱线。每一条谱线都对应着台阶间的一个跃迁——在不同能级之间的跃迁。例如，所有落回到第一能级的电子转变产生了巴尔末谱系；所有跃回第二能级的转变产生了另一谱系，以此类推<sup>\*</sup>。在热的气体原子中，原子之间总存在碰撞，电子被激发到高能级然后落回，发射出相应的亮谱线。当光穿过冷的气体时，处于基态的电子能够激发到高能态，同时吸收相应的光线，在其吸收谱中产生暗线。

如果玻尔原子模型有些意义的话，这种热原子怎样辐射能量应于普朗克定律相关联。洞辐射的黑体怎样辐射能量应于普朗克定律相关联。洞辐射的黑体谱线可简单地解释为原子中的电子从一能级跃迁到另一能级对辐射能量的综合效应。

1916年爱因斯坦已经完成了广义相对论，他又一次将注意力投向量子理论（与其主要工作相比，这可算是消遣）。可能是受到玻尔原子模型成功的鼓励，亦或是他自己的光量子说理论最终站稳了脚根。一个美国物理学家安德烈·密立根在爱因斯坦1905年对光电效应作出解释时曾强烈地反对他。他花了两年时间设计极高明的实验，初始目的是为了证明爱因斯坦的解释是错的，但是到后来，在1914年却直接从实验上验证了爱因斯坦将光解释为光量子的理论。在此过程中，他发明了一个精确测定  $h$  的实验。最后，最有讽刺味的是，他因此及电子电荷的测定而获得了1923年的诺贝尔奖。

爱因斯坦想到，原子从激发态——电子处于高能态到低能态的辐射，同原子的放射性衰变极其相似。他使用了玻尔兹曼发明的（处理原子的统计行为）统计方法来处理单个的能级，得出了

• 实际上氢光谱巴尔末系对应的是到第二能级的跃迁

特定原子处于具有某个特定量子数  $n$  的几率，并且使用几率辐射“统计表”推导出处于第  $n$  态的原子衰变为比它小的能级（更低的量子数）的几率。完全从量子观点出发，清楚简单地推导出了黑体辐射的普朗克公式。接下来，玻尔采用了爱因斯坦的统计观点，扩展了他的原子模型，可以将谱线中某些谱线比其它谱线更亮解释为某些能态之间的跃迁几率更大，也就是说，比其它的更易发生。但他不能解释为什么是这样的，当时也没有人顾得上问这个问题。

正如当时研究辐射的人一样，爱因斯坦认为统计表不是一个最终办法，后来的研究一定能够确定一个特定的转变为何是那个时候发生的，而不是别的时刻。在发现放射性衰变及原子能级转变时并没有“内在的原因”。它更真切地显示出这种改变完全出于机会，依赖于基本统计，这已开始引发一个基本哲学问题了。

在经典力学中，每件事物的发生总有其原因。你可以追踪一件事发生的原因，原因的原因，直到宇宙大爆炸（如果你是个宇宙学家），或到宗教教义中的造物时刻，如果你赞同这个模型的话。但是在量子世界中，只要你观察一下放射性衰变及原子的转变，你就会发现这种直接的因果性消失了。电子不可能出于某个原因在某个时刻从一个能态转移到另一个。从统计意义上来说，低能级是原子愿意呆住的，因此这好像（这种可能性是可以量化的）电子早晚要转移，但是无法知道什么时刻发生转移。没有外面的东西推动电子，也没有内部定时机构去标定跃迁的时刻。它发生了，没有原因是在这时刻而不在那时刻。。

不能停留在严格的因果上，许多 19 世纪的科学家会被此观点给吓住，我想本书的读者是否也有此感觉。但这只是进冰山的第一步，只是量子世界奇特的真实性的一点线索，虽然它至今仍未受到赏识。仍值得注意的是，它来自于 1916 年，来自于爱因斯坦。

## ◆ 原子展望

详细叙述到 1926 年对玻尔原子模型的改进的细节真是太冗长了，要展示为了向真理迈进走的回头路更是啰嗦。但是由于玻尔原子在教科书及公众读物中如此根深蒂固，值得一提。玻尔原子的最后形式牵扯到我们日常所习惯的现象。那个不可见的弹球一样的古老原子原来不仅可分，而且其中几乎全是空的，另外还有行为古怪的奇怪粒子。玻尔提供了一个将这些怪东西描述为日常所见现象的一个框架；虽说在某种程度上摈弃这些日常观点再全力进入量子力学的世界也许更好，可多数人愿意停下来先看看玻尔原子模型。在经典到量子的征途中，让我们停下来喘口气儿，休息一会儿，然后再进入那个未知领域。但是，我们不要将时间和精力浪费在错误和半真理之中。而是使用 80 年代的观点回顾玻尔原子的现代描述，包括实际上在后来才得以解决的一些问题。

原子是很小的。阿伏伽德罗常数是一克氢气中所含的原子数目。然而氢气不是我们日常生活中所见的那种东西，因此，为了得到原子是多么小的概念让我们转而去想象一块碳、宝石等等。因为每个碳原子是氢原子的几倍重，和一克氢所含相同原子数目的碳是几克。1 盎司比 3 克多一点，因此换算起来几克碳是 4 盎司，约为 1 磅的四分之一。这是我们熟悉的尺寸和重量——一块黄油，1/4 磅的一包糖。就这么多碳就含有阿伏伽德罗常数 ( $6 \times 10^{23}$ ) 个原子。我们怎么理解这个数呢？大数一般被称为是“天文数字”，确实许多天文数字是很大的，因此，让我在天文学中比较一个大数。

宇宙的年龄，天文学家认为大约是 15 个十亿年，也就是  $15 \times 10^9$  年。很明显  $10^{23}$  比这个  $10^9$  还是大得多，让我们将时间单位换成我们所熟悉的单位，秒。每年有 365 天，每天 24 小时，每小时 3600 秒，总之每年约为 32 百万秒，大约为  $3 \times 10^7$ ，按乘法  $10^9$  与  $10^7$  相乘得到  $10^{16}$ ，因此，按秒算宇宙的年龄是  $5 \times 10^{17}$ 。

这离  $6 \times 10^{23}$  还很远，差十的六个量级。看起来有 10 的 23 次方可以拼着玩似乎很不错，但它意味着什么？我们将  $6 \times 10^{23}$  除以  $5 \times 10^{17}$  取其指数部分，我们得到约大于  $10^6$ ，即 1 百万的数。设想有一个超自然生命从宇宙大爆炸开始就观察我们宇宙的演化，这个生命具有 1/4 磅的碳和一把小得足够夹得起一个原子的摄子。从我们宇宙开始大爆炸的时刻起，每秒钟，这个生命移去这块碳中的一个原子，直至现在。有  $5 \times 10^{17}$  个原子丢掉了，还余下多大比例呢？经过所有这些之后，不断地工作了 15 个十亿年，这个超自然生命仅移去了这块碳的一百万分之一；余下的仍是扔掉的一百万倍。

现在，你也许对原子有多么的小有了一个概念了。奇怪不在于玻尔原子模型是一个粗略及稍好的近似，或者日常所见的物理规律已不再适用于原子。奇迹在于我们能够理解原子中发生的一切，也就是我们能够找到一种方法以填平经典的牛顿物理学到原子的量子物理这个鸿沟。

只要能够构造出这么小的物理世界的一个物理图象，就能知道一个原子会是什么样的。就像卢瑟福展示的那样，一个小原子核居中，周围被电子的云团所包围着，恰似嗡嗡叫的蜜蜂。起初，认为原子核只由质子组成，每一个带有如电子电荷一样多的正电荷，因此，质子数目与电子的数目相等，使每个原子呈现电中性；后来发现原子核中还包含着另一种基本粒子，它与质子相同，只是不带电。除最简单的氢原子外，其它原子的原子核中既

有质子也有中子。当然由于原子电中性，原子中包含的质子数与电子数一样多。原子核中的质子数决定了原子属于什么元素；电子之中的电子数（与质子数相同）决定了原子及元素的化学性质。因为一些原子相互之间具有相同的电子数或质子数，但可能具有不同数目的中子；一种化学元素可能来源于各自不同的原子，这种原子称为同位素。此名字是索蒂在 1913 年命名的，源于希腊词义“同一处”，因为发现原子的质量不同，但属于元素周期表的同一位置。在 1921 年索蒂因对同位素的研究获得诺贝尔奖。

最简单元素的最简单同位素是氢的常见形式，原子中仅有一个质子和一个电子。在氘中每个原子由一个质子、一个中子和一个电子构成，但化学性质与通常的氢相同。由于一个中子和一个质子的质量相同，约为电子质量的 2000 倍，核中的质子加中子的总数目差不多决定了原子的质量。通常以  $A$  记之，称为质量数。核子中的质子数决定了原子的化学性质，称为原子数，以  $Z$  记之。原子质量的测量单位顾名思义为原子单位，定义为有 6 个质子 6 个中子的碳同位素质量的  $1/12$ 。此同位素称为碳 - 12 或记为  $^{12}\text{C}$ ；另外的同位素是  $^{13}\text{C}$  和  $^{14}\text{C}$ ，它们核中分别有 7 个和 8 个中子。

核的质量越大（含有更多的质子数），同位素就越多。例如锡的原子核中有 50 个质子，具有 10 个稳定的同位素；质量数从  $A = 112$ （62 个中子）到  $A = 124$ （74 个中子）。一般稳定核中至少有与质子相同个数的中子数（除简单的氢外）；核中的中子可以帮助把具有排斥作用的质子粘在一块。放射性是指非稳定核转化为稳定核的转化方式，在此过程中能发放辐射。 $\beta$  辐射是中子转变为质子时发放电子的过程； $\alpha$  粒子是非稳定核根据本身的要求通过发射 2 个质子和 2 个中子来调节其内部结构的过程；很重



的非稳核通过现在称为核裂变或原子裂变的过程裂变成两个或两个以上的更轻及更稳定的核，同时伴随  $\alpha$  或  $\beta$  辐射。所有这些过程均发生在比无法想象的原子尺寸更小得无法想象的体积之内。原子的典型尺寸是  $10^{-10}$  米的大小；核都是  $10^{-15}$  米为半径的，比原子小  $10^5$  倍。由于体积与半径的立方成正比，我们还需将指数乘以 3 才能得到原子体积是原子核体积的  $10^{15}$  倍。

## ◆ 化学解释

电子云构成原子的外围，这意味着原子通过电子云相互作用。大体上原子无法觉知到埋在电子云中心的是什么——另一个原子“看”及“感受”到的是电子云本身，原子间的电子云的相互作用才对应着化学性质。正是玻尔原子模型较为全面地解释了电子云的特征，才使得化学纳入科学的范围。化学家们常常感到许多元素尽管质量不同但其化学性质却很相似。当化学元素依其质子灵敏程度排成表时，这种相似性呈规则的重复，例如一种情形下发生在其 8 个原子数之后。这就构成了一个表，表中相似化学性质的元素都排在一起，就构成了元素周期表。

1922 年 6 月，玻尔访问了德国的哥廷根大学，作了量子理论及原子结构的系列报告。当时，在马克思·玻恩的领导下，哥廷根几乎是第三个发现量子力学的中心。马克思·玻恩在 1921 年在那里任理论物理学教授。他生于 1882 年，是布英斯劳大学解剖学教授的儿子，早在 1900 年普朗克思想刚刚出现之时，他就成了一名出色的好学生。他刚开始学的是数学，在完成其博士论文后转而从事物理学研究工作（曾在卡文迪许实验室工作过一段时间）。正如我们将看到的那样，他早期打下了理想的训练基础。

作为相对论专家，玻恩的工作总有很浓厚的数学味，这与玻尔的工作形成了鲜明的对比。玻尔的工作是补丁似的，形成于其不同寻常的洞察力与物理知觉，玻尔总是将数学的细节让给别人。这两种天才对原子的新认识都至关重要。

玻尔 1922 年 6 月份的演讲是战后德国物理学复苏的大事，也是量子理论史上的一件大事。来自德国各地的科学家们出席了会议，称为“玻尔节”（具有不太微妙的双关含义）。在这些报告中，通过仔细准备，玻尔首次成功地在理论上解释了元素的周期性，此理论直到现在还基本没变。玻尔的观点是将电子如何加到原子核中。无论原子数是几，第一个电子将占据对应氢原子基态的能级。接下来的一个电子将进入同一能态，给出了氢原子的电子云外形，它具有两个电子。但是玻尔说在原子的这层能级上已经不再有空位置了，下一个加入的电子将进入不同的能级。因此，核中有三个质子外面有 3 个电子的原子具有两个挤得离核较近的电子及另外一个电子；在化学性质上应与具有一个电子的原子类似。 $Z=3$  对应锂元素，它确实表现出与氢原子相似的化学性质。下一个与氢原子化学性质相类似的原子是钠  $Z=11$ ，排在锂后的 8 位。因此，玻尔说在两内层电子之外，必须有一套能级能提供 8 个可占据的位置，当这些位置被占据后，第十一个电子只得去填充受原子核约束不太紧的另外的能级，因此，又表现出与只有一个电子的原子核相同的外貌来。

这些能态被称为“壳层”，玻尔是这样成功地解释了元素周期表的，当  $Z$  增加时，电子相继填充在“壳层”中。你可将壳层想象为洋葱，一层套在另一层的外面；与化学性质有关的是原子最外层电子的数目，在原子与另外原子相互作用时，内层电子仅起次要的作用。

按照电子的“壳层”说法，并结合光谱学的结果，玻尔将元

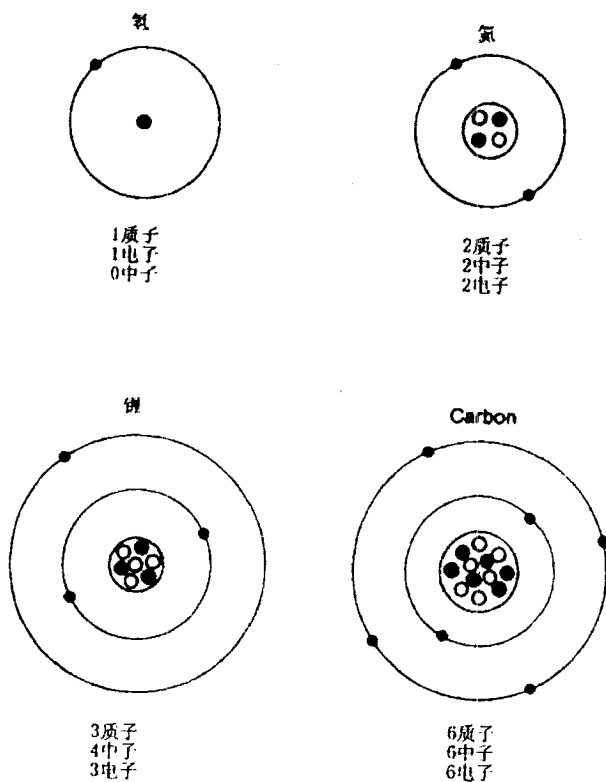


图 4.2 原子外电子排布的壳层结构

一些简单元素的原子可以表示为原子核外电子在阶梯能级中排布的壳层结构，量子规则只允许 2 个电子处在最低能级，锂具有 3 个电子，因此只能将另一个电子排布在次级的能级上，第二层只有 8 个电子的位置，碳刚好半满，这就是为何它具有那么有趣的化学性质的原因，因此是构成生命的基础元素。

素周期表中元素的关系解释为原子结构的原因。他没想过为何一个壳层中有 8 个电子就是满的（“闲的”），但他却让听众都毫无疑问地相信他发现了基本真理。如后来海森堡所说，玻尔“并没有给出任何数学证据...，他只是知道这多少是一种联系。”\* 爱因斯坦 1949 年在他的自传中将玻尔工作成绩归为量子理论，“这些不严谨又自相矛盾的基础却足以使像玻尔这样具有奇特天赋与技巧的人发现谱线，原子的电子壳层的主要规律及有意义的化学现象，对我来说，这像个奇迹，——至今我仍以为是个奇迹”\*\*

化学牵扯到原子如何作用以构成分子。为何碳与氢的结合是四个氢原子一个碳原子而构成甲烷？为什么氢原子是以分子形式存在的？每两个原子组成一个氢分子而氦原子却不构成分子？等等。在壳层模型中答案来得出乎意料地简单。每个氢原子有一个电子，而每个氦原子却有两个电子。如果有两个电子，“最内壳层”就是满的，而填满壳层的原子更稳定（由于一种未知的原因）——原子更“愿意”填满壳层。当两个氢原子结合形成分子时，他们共用两个电子，就像两个原子都觉得填满了壳层一般。而氦原子本身已具有满的壳层，对这种设计不感兴趣不愿参与任何化学反应。

碳原子核内有 6 个质子，核外有 6 个电子。两个电子占据内壳层，余下 4 个电子排在外壳层中，因此外壳层是半满的。4 个氢原子每一个都与碳的一个外层电子共享，以供自己电子壳层填充之需。每个氢原子最后都形成两个电子的准闭壳层，而每个碳原子也具有 8 个电子填充的第二个准闭壳层结构。

玻尔说，原子合成时，原子离得很近以形成外面的闭壳层。

\* 引自于密哈罗和雷钦伯格著作 1 卷 357 页

\*\* OP.Cit.359 页

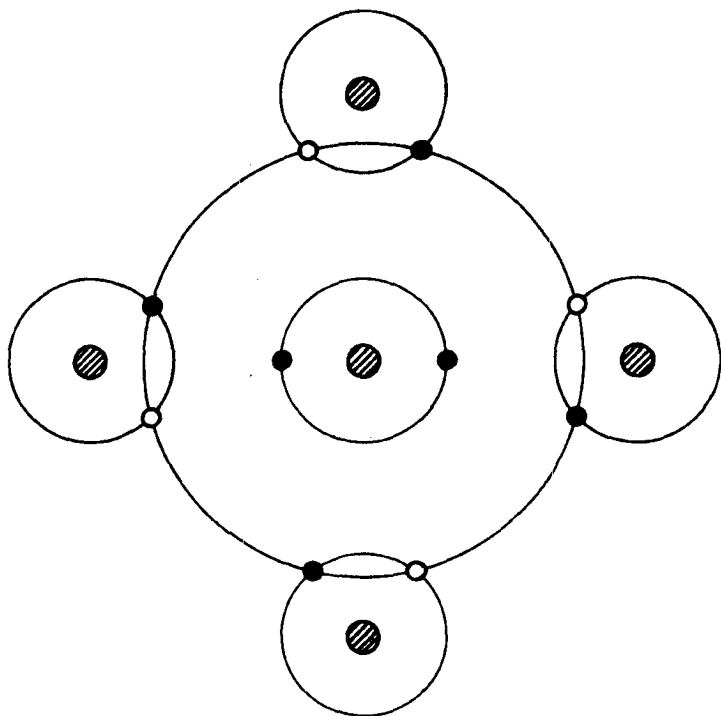


图 4.3 共价键

当一个碳原子与 4 个氢原子结合时，电子是共用的，每个氢原子好像具有满的内层结构而每个碳原子在它的第二壳层中也似乎有 8 个电子，这是很稳定的组合。

有时，像氢分子最好认为一对电子被两个原子共用；别的情况更合适的图象是外壳层具有多余电子的原子（如钠原子），将电子送给外层有 7 个电子和一个空位置的原子（如氯原子）。每个原子都皆大欢喜——钠，通过丢失一个电子，余下一个更深层的全

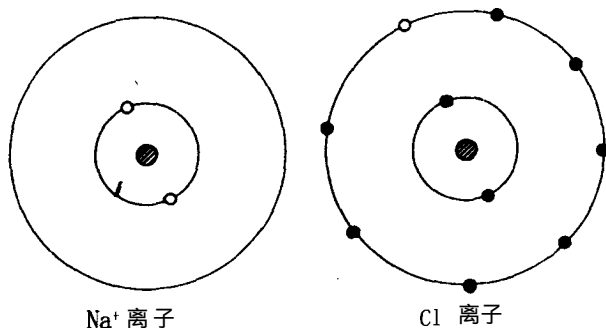


图 4.4 离子键

钠原子通过丢弃一个电子形成较稳定的量子构形，因此带正电，氯原子通过接受一个电子形成 8 个电子的外层满壳层的电子结构，因此带负电，带电离子通过静电作用形成分子或像普通食盐 ( $\text{NaCl}$ ) 之类的晶体。

满的“露在外面”的壳层；氯原子，由于获得了一个电子，将其最外层填满。可总的结果是钠原子通过丢失一个负电荷的电子成为一个带正电的离子，而氯原子获得一个电子成为阴离子，由于正负电荷的相互吸引，形成电中性的氯化钠分子，此即食盐。

所有的化学反应均可作如是解释，以达到外层闭壳层为原则，原子之间共用电子或传递电子。与外层电子有关的能级跃迁形成了一种元素的谱线指纹，与深层壳层有关的能量转换（因这一能量要高一些，是谱线中的  $\text{X}$  射线成分）对所有的元素都是相同的，这确实也被证实了。如最好的理论一样，玻尔的模型被其成功的预言所证实。

将元素排成周期表后，在 1922 年发表的表中存在一些间断，对应未被发现的元素，其原子序数分别为 43, 61, 72, 75, 85, 或 87。玻尔的理论模型预言了这些“丢失”的元素的细致性质，比如说 72 号元素应与锌有相似的性质，这一预言与基于另一原

子模型所作的预言是相反的。当铪元素发现时，发现其谱性质恰如玻尔所预言的那样。

这是旧量子理论的最高成就。三年之后，这些就被扫得荡然无存，虽然就物质的化学性质而言，你不用比这种想象多多少就可以解释：原子核外有很小的粒子——电子，它们绕核转动，更倾向于充满壳层（或排空，总之不愿处于中间态），当然我夸大了化学的简单性。解释 1920 年晚至 1930 年代早期发展的复杂分子需要“更多”的东西，需用到量子力学发展成果。多数工作是一个叫林奈·泡令的人做的，现在熟悉的维生素 C 的和平支持者。他获得了诺贝尔奖，因为他的工作被用为“为其在化学键的自然本质及在揭示复杂物质结构方面的应用”。那些由物理化学家泡令发明的借助于量子理论来阐述的“复杂物质”的方法，打开了生命分子研究方法的大门。赫拉斯·贾生在其逸事性书《造物第八天》中阐述了量子化学用于分子生物学的关键意义；更细致的故事已超出本书范围。如果你对气体的物理感兴趣，你仅需将其看作硬的不可打碎的弹球就可以了。19 世纪的物理可用到日常生活中；1923 年的物理可解决大部分化学问题；30 年代的物理将我们带入至今不知所以的终极真理探索过程中。与量子革命相比，这 50 年来物理学还没有什么特别大的突破，这段时间内，其它的科学已被一大批天才的认识所及。早在 80 年代，巴黎的艾斯派克特实验成功标志着这种情形的消失，实验上直接证明了即使是量子力学中最奇特的方面仍是这个真实世界的文字描述。现在正是寻求量子真实性的世界到底如何神奇的时候了。





## 第 二 部 分

## 量 子 力 学



## 第 五 章

# 光子和电子

在物理学中处理微观系统的理论称为量子力学。这个理论的提出是普朗克和玻尔的杰作，它与经典力学不同。直到人们接受了爱因斯坦光量子的思想，以及认识到必须同时使用粒子和波这两个概念来描述之后，我们今天所知道的量子理论才开始形成。爱因斯坦是在 1905 年的一篇论述光电效应的文章之中，引入光子这个概念的，然而这一思想直到 1923 年才被人们普遍接受。爱因斯坦本人是非常谨慎的，他深知他这项工作的革命性内涵。在 1911 年的首次索尔菲研讨会上，他告诉与会者：“我坚持认为这只是个临时性的概念，看起来它与波动理论的实验结果不可调和。”\*

• 索尔菲研讨会是由比利时化学家恩纳斯特·索尔菲发起、赞助的一系列科学论坛。这位化学家因为提出了碳酸钠的制备方法而负盛名。他对抽象科学特别感兴趣，所以他为这些聚会提供经费。在这些会议上，一流科学家们可以见面并交流他们的观点。

尽管密立根在 1915 年就证明了爱因斯坦关于光电效应的方程是正确的，但是在他看来接受光的粒子性仍是毫无道理的。回首看一下他从 40 年代以来的工作，密立根在检验这个方程时曾评论道：“在 1915 年尽管是毫无道理，但我还是不得不宣布这个理论得到了毫不含糊的验证……这看起来违背了我们所知道的，关于光的干涉的一切知识。”当时他以更有说服力的方式表述了自己的观点。在报告关于爱因斯坦光电效应方程的精确实验验证时，他继续说道：“虽然爱因斯坦利用这个半微粒理论推出了光电效应方程，但在目前看来这个理论是站不住脚的。”这是 1915 年的记载。在 1918 年，卢瑟福评论道，在 13 年前爱因斯坦用光量子假设来解释的能量和频率之间的关联看起来“没有物理意义”。这并不是因为卢瑟福不知道爱因斯坦的建议，而是因为他不能被说服。既然用来检验光的波动理论的实验都表明光是由波构成的，那么光怎么能是由粒子构成的呢？”\*

## ◆ 光的粒子性

到 1909 年，爱因斯坦不再是一个专利局职员，他在苏黎世获得了他的第一个学术职位——副教授。在这前后，爱因斯坦向前迈出了虽然小但是有意义的一步——第一次使用“具有能量  $h\nu$  的点状量子”。象电子之类的粒子在经典力学中用“质点”来描述。这里除了辐射频率  $\nu$  给定粒子的能量外，与波的描述差距甚远。爱因斯坦在 1909 年说道：“根据我的观点，理论物理发展的下一步将给我们提供一种关于光的理论，这种理论可以看作是

本段中的引文出自 A·派斯，《难以琢磨上帝》。

波动理论和辐射理论的融合体。”

这个评论在当时几乎没有引起什么注意，但它却撞击了现代量子理论的核心。在 20 世纪 20 年代，玻尔将这个崭新的物理学基础称为“互补性原理”。这个原理指出，（在这种情形下）光的波动理论和粒子性理论不是相互排斥的，而是相互补充的；为了提供一个完整的描述，这两个概念都是必要的。这清楚地表明光“粒子”的能量需要根据其频率或波长来测定。

然而爱因斯坦在发表这个评论后不久，就不再深入地思考量子理论，而是去发展他的广义相对论。当他在 1916 年回到这些支离破碎的量子理论时，又从另外的逻辑角度发展了光量子的图象。这一点我们已经看到，他的统计思想有助于人们整理玻尔的原子图象，并且使普朗克的黑体辐射描述更加完善。物质吸收或放出辐射的方式也解释了动量如何从辐射传递给物质，这方面的计算是假设辐射的每一个量子单位  $h\nu$  携带  $h\nu/c$  的动量。这项工作使人们回想起 1905 年的一系列关于布朗运动的文章。就像花粉颗粒受到气体或液体分子的冲击，而它们的运动便证实了原子的存在一样，原子本身也受到黑体辐射“粒子”的冲击。原子和分子的这种“布朗运动”不能直接观察到，但这种冲击导致了统计效应的出现。这种效应可以根据气体的压力特性进行测量。在爱因斯坦所解释的黑体辐射中，粒子输运动量就是统计效应。

然而，关于光“粒子”动量的同样描述可以用一种非常简单的方式从具体的相对性推导出来。在相对论中，一个粒子的能量  $E$ 、动量  $P$  和静止质量  $m$  满足一个简单的方程：

$$E^2 = m^2 C^4 + P^2 C^2$$

因为光子没有静止质量，这个方程立即化简为

$$E^2 = P^2 C^2$$

或简单地写为  $P = E/C$ 。这个关系竟花费了爱因斯坦这么长的时

间，确实有些令人吃惊。随后爱因斯坦便转入考虑其它的问题例如广义相对性了。一旦找到了联系，统计描述和相对论之间的一致性就使得理论描述更加完美了。（从另一种观点来看，既然由统计理论可以得出  $P = E/C$ ，那么再根据相对论方程就可得出光子的静止质量为零）。

就是这项工作使爱因斯坦本人相信了光量子是真实存在的。然而直到 1926 年，才有加利福尼亚的吉尔伯特·莱维斯根据伯克利的建议提出“光子”的概念。在 1927 年以“电子和光子”为主题的第五次索尔菲研讨会开过之后，光子才成为科学语言中的一员。尽管早在 1917 年爱因斯坦就相信我们现在所称的光子的存在，然而看来现在才是引入这一概念的最佳时机。这比美国物理学有康普顿获得关于光子的无可争议的、直接的实验证据要早六年。

从 1913 年起，康普顿就在从事 X 射线方面的工作。他在美国的几家大学工作过，也在英国的卡文迪许工作过。通过 20 年代初期的一系列实验，他得到了如下结论：在某些方面只有将 X 射线看作粒子——光子，X 射线和电子相互作用的问题才能获得解释。关键的实验涉及到 X 射线被电子散射的方式，或者用粒子的语言来描述就是，当光子和电子相互碰撞时它们相互作用的方式。当一个 X 射线光子与一个电子相碰撞时，电子获得能量和动量，并且以一定的角度离开。光子本身失去能量和动量，并以另一角度离开。这个过程可以通过粒子物理的简单定律来计算。这个碰撞就像一个运动着的台球碰到一个静止的球，动量也以同样的方式进行传递。然而在光子的情形，能量的丧失意味着辐射频率的改变，改变量  $h\nu$  正等于传递给电子的能量。为了完整地解释这些实验结果，必须同时使用粒子和波这两种描述。当康普顿做实验时，光子与电子和相互作用过程与这个描述完全-

致：散射角和波长的改变、电子的回弹都与将 射线视为具有能量 的粒子的思想符合得非常之好。这个过程现在被称为康普顿效应。康普顿于 年因这项工作 而荣获诺贝尔奖。

年后，光子可以像粒子一样传递能量和动量的概念建立起来了。（尽管玻尔曾一度努力寻求康普顿效应的另一种解释。他当时并没有立即意识到在一个关于光的理论中应该包括粒子和波这两种描述。在他的原子模型里面，他认为粒子理论和波动理论是相对立的。）但是关于光的波动特性的所有证据都保留了下来。这正如爱因斯坦在 年所说的：“现在有两种关于光的理论，两者都必不可少……但其间没有任何逻辑关系。”

这两种理论之间的联系在紧接着的、令人兴奋的几年中构成了量子力学发展的基础，在不同的前沿同时取得了进展。然而新思想和新发现出现的次序与建立新物理学所需要的次序并不完全一致。为了讲一个相关的故事，我们不得不以这样一种方式去说明，这个说明比当时科学本身的发展更有次序。尽管在某些概念被人们所理解之前，量子力学的理论已经开始发展，但是进行说明的方式之一就是在描述量子力学本身之前，先铺设相关概念的基础。即使是到了量子力学已经开始成型的时候，波粒二象性的完整函义还没有为人们所理解，但是只要从逻辑上来描述量子理论，那么发现光的二象性之后的下一步就必定是发现物质的二象性。

理论家德摆 6 二 象 性 的

, 9是9 0 TTD (T,Q) T(T) T 21605. 5120D. 5(549)9T9j8 0 1T0D. 5(449)9T9j8 0 1T0D. 5(529)9T9j8 0

## ◆ 波粒二象性

这个发现起源于一个法国贵族人——德布洛意的建议。这个建议听起来是如此简单，然而它却触及了问题的核心。德布洛意在沉思一个问题：“如果光波也具有类似粒子的行为，那么电子的行为为什么不能与波类似呢？”如果他就此止步，那么他当然就不会作为量子理论奠基人之一而被世人所牢记，更不会在**1929**年获得诺贝尔奖。作为一种毫无根据的推测，这种思想并说明不了太多。因为早在康普顿的工作很久以前，就出现过关于**X**射线的类似的推测。至少是早在**1912**年，伟大的物理学家布格（另一位诺贝尔奖获得者）在谈及**X**射线物理学当时的状态时说道：“在我看来，问题不在于要从**X**射线的两种理论中作出选择，而是要去发现……一种包含这两者的理论。”\* 德布洛意的伟大成就在于提出了波粒二象性的思想，从数学上描述了物质波应该具有哪些行为，并对如何才能观察到物质波提出了建议。他有一个很大的便利条件：作为理论物理界一位相对资浅的成员，他有一位兄长般的同事，名叫摩利斯，他是一位德高望重的实验学家，也就是他将德布洛意引向这个发现。德布洛意后来说，在谈话中摩利斯曾向他强调过“粒子和波这两个方面的不可否认性和重要性。”这个思想出现的时机已经成熟。在这个时候，一种概念上的简单直觉就能够改变理论物理学的现状。德布洛意生活在这样的一个时代，他是幸运的。当然在这一直觉的飞跃方

\* 该引言出自德布洛意和布拉格的书信，参见马克思·詹摩的《量子力学概念的发展》一书。



面，他做出了最大的贡献。

德布洛意生于 1892 年。按照家庭传统，他本应该在城市服务行业中谋求一个职业。但是当他在 1910 年进入巴黎大学时，他心中产生了对科学，特别是对量子力学的浓厚兴趣。他的哥哥（比他大 17 岁）在 1908 年就获得了博士学位。他是 1911 年第一届索尔菲研讨会的科学秘书之一，他向德布洛意传递过一些信息。然而两年以后也就是在 1913 年，德布洛意的物理学生涯便被义务兵服役所打断。服役本应该是短期的，但由于第一次世界大战的爆发而延长到 1919 年。战后，德布洛意找回原来的头绪，回到量子理论的研究，后来终于发现了波粒二象性理论。在 1923 年取得了突破，他在法语杂志《Comptes Rendus》上发表了三篇关于光量子性质的文章，并且用英文写了一个工作概述。这个概述发表在 1924 年 2 月的《哲学杂志》上。这些短文并没有给人们留下很深的印象，但德布洛意立即着手理顺他的思想，使其成为完整的形式，并以此申请博士学位。他的答辩于 1924 年 11 月在索邦神学院（巴黎大学的前身）举行。他的论文发表在 1925 年初的《物理年报》上。他的工作就是以那种形式清晰化，并且成为 20 世纪 20 年代物理学的重大进展之一。

爱因斯坦曾经推导出了两个描述光量子的方程：

$$E = h\nu; \quad P = h\nu/C。$$

在论文中，德布洛意从这两个方程出发展开讨论。在这两个方程中，描述粒子特性的项（能量和动量）出现在左边；描述波动特性的项（频率）出现在右边。他指出，用来检测光是波还是粒子的所有实验之所以失败，必定是因为这两种特性无法摆脱地纠缠在一起——即使是想测定动量这一粒子特性，你也必须知道频率这一波的特性。然而这个二象性不仅适用于光子。当时认为除了以令人惊奇的方式占据原子中不同的能级之外，电子是比较好

的、行为规则的粒子。但是德布洛意认识到这些仅仅存在于整数“轨道”中的电子看起来也具有某些波的特性。他在论文中写道：“在物理学中涉及到整数的唯一现象就是干涉和通常的振动模式。这个事实使我产生这样一个想法：不能简单地将电子视为粒子，还应该赋予它们周期性。”

“通常的振动模式”就是通常情况下琴弦的振动或者是管乐器中的声波。例如一根张紧的弦可能以如下方式振动：弦的两端被固定，而中部来回摆动。若按住弦的中点，则弦的两段将以同样的方式振动。整根弦中点处于静止——振动的这个高阶“模式”，它也相应于没有被按住的整根弦的一个音调较高的谐振。第一种模式的波长是第二种的两倍。假设弦的长度是波长的整数（1, 2, 3, 4等等）倍，与振动弦相匹配的更高阶振动模式相应于更高的音调。只有某些频率的波与确定的弦相匹配。

在原子中，电子所处的状态只能与某些量子能级 1, 2, 3, 4……相对应。这里的情形非常相似，不过在这里不是沿直线张紧的弦，而是原子中的一条“轨道”，可以认为这是把一根弦弯成了一个圆环。如果其周长是波长的整数倍，那么一个持续振动的波可以沿弦顺利地传播。如果波长与弦的长度之间不完全匹配，那么这波将是不稳定的，当它与自己相干扰而要逐渐耗散掉。蛇头必须始终咬住蛇尾，否则就会分散掉，这里的弦也是类似。原子中能级的量子化是否可作如下解释：一个能级相应一个以特定频率振动的电子波。事实上，象原子的所有物理图象一样，基于玻尔原子的很多类似想象，都与实际情况相差甚远，但它们对人们更好地理解量子世界却起到了帮助的作用。

## ◆ 电 子 波

德布洛意认为波是伴随着粒子的。他指出，像光子这样的粒子事实上是处于与它相伴随的波所引导的运动方向上。这是一个关于光的行为的完整的数学描述。这个描述在波和粒子的实验证据中得到了体现。德布洛意论文的审查者喜欢这个数学描述，但并不相信像电子这样的粒子会有相伴随的波。他们看不出这个提法有什么物理意义。他们仅仅把它看作一个数学游戏。但德布洛意并不同意。当一个审查者提问能否设计一个实验来检验物质波时，他说在晶格对电子的衍射中可能会观察到。这个实验就像光的衍射。不过在这里不是通过仅仅两条狭缝，而是通过一个狭缝的列阵。晶体中规则分布的原子之间的缝隙提供了能够衍射高频电子波（其波长与光相比，甚至与 X 射线相比都是较短的）的足够窄的狭缝列阵。

德布洛意知道应该寻找什么样的波长。因为联立爱因斯坦关于光粒子的两个方程就可获得非常简单的关系式  $P = h\nu/C$ 。这个式子我们已经遇到过。既然波长与频率通过  $\lambda = c/\nu$  相关联，这就意味着  $p\lambda = h$ ，也就是说动量乘以波长等于普朗克常数。波长越小，相应粒子的动量就越大。因为电子质量较小，相应的动量较小，所以它成为最像波的粒子。就像是在光波或海面上波的情形一样，只有当波通过一个较其波长小得多的孔时衍射效应才能出现。对于电子波，这就意味着一个非常之小的孔，其大小相当于晶体中原子之间的缝隙。

德布洛意并不知道早在 1914 年人们用电子束去探索晶格结构时已经观察到电子衍射现象，而这个现象可以最好地说明电子

的波动效应。在 1922 年到 1923 年期间，当德布洛意在整理他的思想时，两个美国物理学家——克林顿·戴维逊和他的同事查尔斯·昆斯曼——事实上已在研究电子被晶体所散射这一奇特的行为。德布洛意完全不知道这些情况，曾一度企图说服实验学家们去做一个实验来验证电子波假设。同时，德布洛意的论文导师保尔·朗之万已经给爱因斯坦送去一份副本。爱因斯坦并没有怎么吃惊。他认为这不仅仅是一个数学游戏或类似物，他意识到物质波必定真实存在。然后他依次将消息传给哥廷根（实验物理系所在地）的马克斯·玻恩和詹姆斯·弗朗克。弗朗克评论说戴维逊的实验已经证实了预期效应的存在。\*

象其他物理学家一样，戴维逊和昆斯曼曾认为散射效应是被电子所轰击的原子结构导致的，而不是电子自身的规律。玻尔的一个名叫沃尔特·艾尔撒瑟的学生在 1925 年发表了一篇短文，用电子波来解释这些实验结果。然而实验学家们并没有在意一个理论物理学家对他们的数据所进行的重新解释，特别是因为沃尔特·艾尔撒瑟不过是一个 21 岁的不出名的学生而已。到 1925 年，尽管已经存在实验证据，但物质波的概念仍旧是模糊的。直到薛定谔提出了原子结构的新理论时（这个理论包含德布洛意的思想，但又远远超出这个思想）实验学家们才感觉到迫切需要通过衍射实验来检测电子波假设。实验结果证明德布洛意的思想是完全正确的——电子就像波一样被晶格所衍射，这事发生在 1927 年。这个发现是在 1927 年分别被两个小组独立完成的。一个小组是美国的戴维逊和一名新的合作者李斯特·吉摩；另一个小组是英国的乔治·汤姆逊和研究生亚利山大·雷德。这两个小组分别使用了不同的技术。由于没有接受艾尔撒瑟的计算结果，戴维逊

\* 见詹摩，*op.cit.*

失去了独自荣耀的机会。由于他们各自在 1927 年的独立研究成果，戴维逊和汤姆逊分享了 1937 年的诺贝尔物理学奖。这在历史上是一个比较好的结局，即使是戴维逊也一定会感到心慰。到这里量子理论的基本特性已被清晰地归纳了出来。

1906 年，约瑟夫·约翰·汤姆逊因为证明了电子是粒子而获诺贝尔奖；1937 年他又目睹了自己的儿子因为证明了电子是波而获诺贝尔奖。父子两个都是对的，两人都有充分的理由享受这种奖赏。电子既是粒子又是波。从 1928 年以后，德布洛意波粒二象性的实验证据接踵而至。其它粒子（包括质子和中子），也先后被发现具有波的特性，例如衍射。在 20 世纪 70 年代后期，以及 80 年代期间，汤尼·克莱因和他的同事们在墨尔本大学重复了一系列“美丽的”经典实验。这些实验曾经在十九世纪确立了光的波动理论。不过这时他们所使用的不是光束，而是中子束。

## ◆ 与过去决裂

人们认识到不仅只有光子和电子，事实上所有的“粒子”和所有的“波”都是波和粒子的混合体。偏巧在我们的日常生活中粒子性成分在这个混合体中占了绝对优势。比如说一个滚动的球或一间房子就是这样。依据关系式  $p\lambda = h$ ；波的那一方面依然存在，尽管从总体上来说是很不足道的。在微观世界中，粒子和波这两个方面同等重要。其中的事物具有特殊的规律，这种规律用我们日常生活中的经验是无法理解的。不仅仅是玻尔的原子图象——电子的“轨道”上运动——是错的，所有的图象都是错的。原子中的规律在我们的常识中没有物理上的对应物。原子的行为只像原子，而不像其它。

阿瑟·爱丁顿先生在 1929 年出版的《物理世界的本质》一书中精辟地概述了当时的情况。他说：“没有熟悉的概念适用于电子。”我们对原子的最好描述浓缩为“未知的事物正在从事未知的事情”。他解释道这“不像是一个特别有启发性的理论。我已经在别处读过类似的东西：

这个怪玩艺儿在摇摆中旋转，寻找着平衡”

问题是尽管我们并不知道原子中的电子在干什么，但我们却知道电子的数目是重要的。只要增加几个，就会变得毫无意义。“氧原子周围有八个这种怪玩艺儿在那里旋转并寻找平衡，而氮原子周围有七个……如果跑掉一个，那么氧原子的外层结构就恰好与氮相同。”

这并不是一个滑稽的评论。正如爱丁顿在五十年前提出的，假如数目没有改变，那么物理学的所有基础将变成“毫无意义的”。如果在我们的头脑中打破原子和硬球、电子和小粒子的联系的话，那么我们并不会损失什么有意义的东西和令人信服的好处。电子的一个特性——自旋——的混乱状态清楚地说明了这一点。电子的自旋与小孩玩的旋转陀螺的行为，或者与地球的绕太阳旋转时绕自身轴旋转的行为毫无相似之处。

原子光谱学的疑难问题之一涉及到谱线的分裂：“本应该”是一条的，然而却分裂成紧靠在一起的多条。这个现象是简单的玻尔原子模型所不能解释的。因为每条谱线都相应于一个能态到另一个能态的转变，所以谱线的数目揭示出原子中的能级数——量子阶梯有多少台阶，以及台阶有多高。通过对谱线的研究，20 世纪 20 年代初的物理学家们对原子的多层结构提出了几种可能的解释。事实证明沃尔夫冈·泡利的解释是最合理的，它给予电

子四个独立的量子数。这是在 1924 年，当时物理学家们仍然认为电子是粒子，他们企图利用我们日常生活中熟悉的概念来解释量子特性。玻尔的模型中已经包含了三个量子数：电子的角动量（它绕轨道运动的速度）、轨道的形状以及它的方位。第四个量子数伴随着电子的某些其他特性——一个只有两种变化的特性。这个特性可以用来说明观察到的谱线分裂现象。

人们并没有花费多长时间就理解了泡利关于第四个量子数的思想。这个量子数描述电子的自旋。可以认为自旋要么朝上要么朝下，它提供了一个很好的双值量子数。第一个提出这个思想的是一个年青的物理学家，名叫拉尔夫·克朗尼克。当时他刚刚在哥伦比亚大学获得博士学位，\* 正在欧洲访问。他提出电子具有一个内禀的自旋，其大小等于自然单位（ $h/2\pi$ ）的一半。\*\* 电子自旋要么平行，要么反平行于原子的磁场。让他吃惊的是，泡利强烈地反对这个思想。这主要是因为它与相对论框架下电子是粒子的思想不一致。就像根据经典电磁理论电子绕核旋转“应该”是不稳定的一样，根据相对论一个作自旋运动的电子也“应该”是不稳定的。泡利的思想可能本应该再开放些，但结果是克朗尼克放弃了这个思想，他永远没有将它发表。然而就在不到一年之后，莱顿理论物理研究所的乔治·乌伦贝克和萨穆尔·戈德斯密特又提出了同样的思想。他们将这个建议发表在 1925 年下半年的德文杂志《Die Naturwissenschaften》上，以后发表在 1926 年早期的《自然》上。

电子自旋理论很快得到了提炼，并充分地用来解释令人头痛

\* 事实上，在 1920 年阿瑟·康普顿已经推测出电子可能反向自旋。但是这个思想是在不同的背景下发表的，克朗尼克并不知道。

\*\* 这里出现  $2\pi$  是因为一个完整的圆  $360^\circ$  具有  $2\pi$  弧度。基本单位  $h/2\pi$  在今后通常记作  $\hbar$ 。

的谱线分裂问题。到 1926 年 3 月泡利也信服了。但是自旋是什么？如果你想用通常的语言来解释，那么这个概念就会像量子力学中的许多概念一样不告而别。例如在一种“解释”中，你可能被准确地告知电子自旋并不像小孩玩的陀螺，因为电子要转动两次才能回到出发点。下面又来了，一个电子波如何才能“旋转”呢？当 1932 年玻尔宣布电子自旋不能用经典实验例如电子束在磁场中的衍射来测量时，没有人比泡利更感愉快。只出现在量子相互作用中例如导致谱线的分裂，是自旋的一个特性，它没有经典意义。在 1920 年，如果泡利与其同事首先讨论的是电子的“gyre”，而不是它的“自旋”（spin），那么对原子结构的理解就容易得多。

哎呀！我们现在被自旋困住了。在量子物理中经典术语的废除不可能成功。从这里开始，如果你在一个不熟悉的背景中发现熟悉的词语，那么就尽量将其变成毫无意义的东西，然后再看一下是否可以减少一份担心。没有人“真正”理解原子中发生了什么，但是泡利的四个量子数却确实解释了一些非常关键的特性。

## ◆ 泡利和不相容原理

沃尔夫冈·泡利是发现量子理论的杰出科学家群体中最杰出的一位。他于 1890 年出生于维也纳，1918 年进入慕尼黑大学，然而他却博得了早熟的数学家的声誉。他的一篇关于广义相对论的文章于 1919 年 1 月发表，并立即引起了爱因斯坦的兴趣。他从大学的课堂上、从理论物理研究所、以及从他自己的阅读中如饥似渴地吸收物理学知识。他在相对论方面的声誉是如此之高，以至于在 1920 年他受命为一部权威性的数学百科全书写一篇关



于相对论的重要评述。这种权威性的文章由一个年仅 20 岁的学生执笔，这使得泡利的名字在科学圈子里成为家喻户晓。他的工作受到马克斯·玻恩等的高度评价。1921 年他参加到哥廷根马克斯·玻恩的小组，成为其助手。从哥廷根开始，他迅速地高升，首先到了汉堡，随后去了丹麦的玻尔研究所。但是玻恩并没有因为失去他而沮丧。新助手维尔纳·海森堡也是一位天才，他在量子理论的发展中起到了举足轻重的作用。<sup>\*</sup>

其实在第四个量子数被命名为“自旋”之前，在 1925 年泡利已经能够使用这四个量子数去解决玻尔原子的一个巨大的难题。在氢原子中，唯一的一个电子自然处于可能的最低能态，处在量子阶梯的底部。如果被激发例如被碰撞，它可能跳到梯子的更高一层，然后返回基态，同时发生一个量子辐射。如果系统中有多电子，那么对于这种多电子原子来说，电子并不都是处于基态，而是沿着梯子的台阶向上分布。玻尔说电子处于核周围的“壳层”中，具有最小能量的“新”电子进入壳层直到填满为止，然后再填到下一壳层，依此类推。他用这种方法建立了元素周期表，并且解释了很多化学中的秘密。但是他并没有解释一个壳层如何才算是填满了或者说为什么填满了——为什么第一壳层只能容纳二个电子，但是第二个壳层却能容纳 8 个，如此等等。

玻尔的每一壳层相应于一套量子数。在 1925 年泡利除了认识到电子的第四个量子数之外，还认识到每一满层的电子数目恰好相应于这一壳层不同量子数的套数。他系统阐述了现在大家所熟知的泡利不相容原理：没有两个电子具有同一套量子数。借此

<sup>\*</sup> 例如参见《玻恩-爱因斯坦书信》。在 1921 年 2 月 12 日的一封信中，玻恩说：“泡利为百科全书写的论文显然是完成了，这篇文稿的份量据说是 2.5 千克，这应该是它的天才份量的某种象征。这个小伙子不仅聪明而且勤奋。”这个聪明的小伙子在 1921 年获得博士学位，随后不久便作为玻恩的助手短期轮班。

他解释了质量越来越大的原子中电子填充壳层的方式。

不相容原理和电子自旋的发现确实是超前的。直到 20 世纪 20 年代后期新的物理学自身形成之后，它们才完全与新物理学相匹配。由于 1925 年至 1926 年间物理学近乎匆忙地进展，不相容原理的重要性有时也被看得过高。然而事实上，它是一个基本的、意义深远的相对性概念。它在物理学各分支学科中具有广泛的应用。事实证明，泡利不相容原理适用于所有具有半整数自旋的粒子，例如自旋为  $\hbar/2$ 、 $3/2\hbar$ 、 $5/2\hbar$  的粒子等等。那些根本没有自旋的粒子（例如光子），或者具有整数自旋（ $\hbar$ 、 $2\hbar$ 、 $3\hbar$  等等）的粒子具有完全不同的行为方式，符合不同的规则。具有半整数自旋的粒子所符合的规则是由费米和狄拉克于 1925 年和 1926 年得出的，称为费米-狄拉克统计。这种粒子随后便称为“费米子”。具有整数自旋的粒子满足的规律由玻色和爱因斯坦给出，因而称为玻色-爱因斯坦统计，这种粒子随后便称为“玻色子”。

在 1924 ~ 1925 年期间，玻色-爱因斯坦统计、德布洛意波、康普顿效应和电子自旋一起取得了令人兴奋的发展。它们标志着爱因斯坦对量子理论的最后的杰出贡献（事实上，是他的最后一项科学杰作）。这些发展也代表了与经典思想的彻底决裂。

萨廷德拉·玻色于 1894 年生于加尔各答。1924 年在新达卡大学学习物理学。他学习了普朗克、爱因斯坦、玻尔和索米菲的工作，知道了普朗克定律的仍不完善的基础。他开始着手用一种新的方法推导黑体辐射定律。就像现在人们认为的一样，他从光以光子形式传播的假设出发，得到了一个符合一种特殊统计的、无质量粒子的定律。他给爱因斯坦寄去一份英文副本，征求爱因斯坦的同意，希望能在《*Zeitschrift für Physik*》上发表。爱因斯坦是如此地为这项工作所打动，以至于他亲自将它翻译成德文，并呈

上一份强烈的推荐信，确保玻色的论文在 1924 年 8 月得到了发表。玻色抛弃了经典理论的所有概念，从光量子——无质量的相对性粒子——和统计方法出发推导出了普朗克定律，从而最终使量子理论从它的经典祖先那里解放了出来。现在辐射被看作量子气体，统计中只涉及粒子数，不涉及频率。

爱因斯坦将这种统计方法作了推广，他认为气体或液体中的原子满足同样的规律。事实证明这种统计方法不适用于室温下的理想气体，但是它却能精确地说明超流氦的稀有特性。超流氦是一种冷却到接近绝对零度—— $-273^{\circ}\text{C}$ ——的液体。随着 1926 年费米-狄拉克统计的出台，物理学家们花费了不少的时间去寻找哪些规则适用于哪些系统，以及去理解半整数自旋的意义。

我们现在已经不关心其中的细微差别了，然而容易理解费米子和玻色子之间的区别是非常重要的。一些年前，我去看喜剧演员斯巴克·密立根上演的一场戏。开幕之前，这位伟人亲自出现在舞台上，用不祥的眼光看了一下舞台边上的少数空位，这些座位是剧场中最贵的一部分。他说：“现在已没有人再买这些座位了，你们可以往这边移，在这里我可以看见你们。”观众们接受了他的建议，每个人都往前移，舞台边上的座位全满了，少数空位留在了后面。我们的行动就像很好的费米子，每人占据一个座位（一个量子态），从最想要的“基态”开始占据座位，从舞台边开始往外。

我最近参加的一个布鲁意·斯普林斯丁音乐会，情况与这相反。在那里每个座位都是满的，但是在前排座位和舞台之间留有一条窄小的通道。当舞台灯光打开，乐队演奏出“**Born to Run**”的第一声和弦，全场的观众离开他们的座位，一浪推一浪地向前拥去，舞台前挤满了人。所有的“粒子”不可分辨地挤进同一个“能态”——这是玻色子和费米子的区别。费米子满足不相容原

理，玻色子不满足。

我们所熟悉的“材料”粒子——电子、质子和中子——都是费米子。没有不相容原理，构成我们物理世界的各种化学元素和所有的特性都将不复存在。玻色子例如光子更加是神出鬼没的粒子，黑体定律是光子想进入同一能态的直接结果。在合适的条件下，氦原子能够模拟玻色子的特性，成为超流液体，这是因为每个 $^4\text{He}$ 原子包含两个质子和两个中子，它们的半整数自旋组合在一起恰好为零。在粒子间发生相互作用的过程中，费米子是守恒的——世界上的电子总数不会增加；然而玻色子，正如打开过电灯的人都知道的那样，可以被大量地制造出来。

## ◆ 下一步去何方

尽管在 20 世纪 80 年代，量子理论看起来是非常有条理的，然而直到 1925 年的时候它还非常凌乱。在前进过程中没有高速公路，很多物理学家都是在密林中各自辟出了一条小道。上层研究人员非常清楚这一切，他们公开表示了他们的关心。有一个例外，当第一次世界大战后新一代物理学家进入研究领域后，物理学一下取得了突破性进展。这可能是新一代容易接受新的思想的缘故。1924 年马克斯·玻恩评论到，在修正经典定律使其能解释原子特性方面“在这时刻只有少数不清晰的迹象。”在 1925 年出版的一本原子理论方面的教科书中，他许诺他将在第二卷中完成这项工作，然而他认为这第二卷“几年之内还不能写。”•

早在 1923 年，海森堡企图计算氢原子的结构但遭到了失败，

• 本节中的引言出自密哈罗和雷钦伯格 第一卷的跋。

他对泡利评论道：“好悲惨！”泡利在当年七月份给索米菲的一封信中重复了这句话。他说：“具有不只一个电子的原子……的理论，是如此的悲惨。”1925年5月份，泡利在给克朗尼克的信中说：“现在的物理学又一次陷入了泥潭。”到1925年玻尔本人对其原子模型的很多问题也出现了类似的悲观情绪。这之后，到了1926年6月，威廉·维恩的黑体定律已经成为普朗克在黑暗中跃进的跳板。他就“整数和半整数量子不连续性的泥潭和经典理论的任意使用”给薛定谔写信。所有在量子理论中做出过巨大贡献的人都意识到了这些问题。到1925年除了一人之外其他伟人都都健在。（昂利·彭加勒、洛仑兹、普朗克、约瑟夫·约翰·汤姆逊、玻尔、爱因斯坦和玻恩仍还健康，但泡利、海森堡、狄拉克和其他人已经开始不行了。）到了1925年，爱因斯坦和玻尔这两位大权威的科学观点已经表现出显著的不同。首先，玻尔是光量子的最强有力的反对者之一；随后爱因斯坦开始关心量子理论中概念的交往，这时玻尔成为这个问题的优胜者。统计方法（具有讽刺性的是，这种方法由爱因斯坦引入）成为量子理论的基石，但是早在1920年爱因斯坦写信给玻尔，“那件关于因果关系的事也给我带来很多麻烦……我必须承认……我缺乏认错勇气。”爱因斯坦和玻尔之间就这个问题的对话持续了35年，直到爱因斯坦逝世。<sup>\*</sup>

马克斯·詹摩在1925年年初对当时的情形作了如下描述：“一个可悲的假设、原理、定理和计算方法的大杂烩”。<sup>\*\*</sup>量子物理中的每个问题都必须首先使用经典物理来“解决”，然后再明

<sup>\*</sup> 爱因斯坦在给玻恩的信中也表示了这些疑虑。这些书信后来以《玻恩·爱因斯坦书信》出版，这里引自麦克米伦编辑的版本第23页。

<sup>\*\*</sup> 《量子力学概念的发展》第196页。

智地插入一些量子数。量子数的插入与其说是根据冷冰冰的原因，倒不如说是根据一些鼓舞人心的猜测。量子理论既不独立，在逻辑上也不一致，只是作为经典物理的一个寄生虫，没有根基的奇花存在。难怪玻尔认为在他能写《原子物理》第二卷（也就是最后一卷）之前至少需要几年的时间。然而，看起来与量子理论整个的奇怪故事保持一致，在 1925 年早期几个月的混乱日子之内，呈现在惊讶不已的科学共同体面前的不是一个，而是两个完整的、独立的、符合逻辑的、根基牢固的量子理论。

## 第 六 章

# 矩 阵 和 波

维尔纳·海森堡于 1901 年 12 月 5 日出生于乌兹伯格。1920 年他进入慕尼黑大学，在阿诺德·索米菲门下学习物理学。阿诺德·索米菲是当时与玻尔原子模型的发展密切相关的领头科学家之一。海森堡直接投入了量子理论的研究工作，接受的任务是寻找能解释谱线分裂的量子数。他在两个礼拜之内就找到了答案——整个谱线图样能够根据半整数量子数来解释。这个年青的、没有任何成见的学生找到了问题的最简单的答案。但是他的同事们以及他的导师索米菲却忧心忡忡。对索米菲来说，在玻尔模型当中整数量子数是已经建立起来的教条。这个年青学生的推测很快被宣布无效。专家们当中存在的担心是，如果将半整数引入方程，那将意味着给四分之一整数，然后是八分之一、十六分之一整数打开大门，从而将玻尔量子理论的基础毁掉。然而他们错了。

就在几个月之内，更年长、更资深的物理学家阿尔弗雷德·兰德提出了同样的思想并发表了。后来的事实证明半整数量子数

在整个量子理论中是非常重要的；在描述称为自旋的电子特性方面起着非常关键的作用。具有整数或零自旋的物质例如光子，满足玻色-爱因斯坦统计，而那些具有半整数（ $1/2$  或  $1/3$  等等）自旋的物质满足费米-狄拉克统计。电子的半整数自旋与原子结构和元素周期表直接相关。还有一个特点就是，量子数的改变量只能是整数，只能从  $1/2$  跳到  $3/2$ ，或者从  $5/2$  跳到  $9/2$ 。这就像从 1 跳到 2 或者从 7 跳到 12 一样合理。所以海森堡失去了享受提出量子理论新思想这一殊荣的机会。这件事情就像当初年青人在老前辈们者中发展最初的量子理论时一样。在 20 世纪 20 年代，年青人的思想又一次被“下定”是正确的思想所束缚。当然在随后几年的工作当中，海森堡为失去的一个小小的科学上的“第一”而得到了补偿。

海森堡在哥廷根（他曾在这里出席了著名的“玻尔节”）玻恩手下工作了一个学期之后回到了慕尼黑，并在 1923 年完成了他的博士论文，当时他还不满 22 岁。就在那时，海森堡的一个挚友、索米菲的一个以前的同样早熟的学生沃尔夫冈·泡利刚刚在哥廷根作为玻恩的助手轮完了班。在 1924 年，海森堡接任了这个职位。就是这项工作使他有机会能与哥本哈根的玻尔在一起工作几个月的时间。截止 1925 年，这位早熟的数学物理学家已经比其他人武装了更多的知识，从而使他发现了符合逻辑的量子理论。所有物理学家都认为最终会找到这样一个理论，但谁也没想到会这么快就找到。

海森堡的重大突破建立在从哥廷根小组汲取的一个思想的基础上。人们现在说不清是谁最先提出这一思想的了。这个思想就是一个物理学理论只应该与实验上确实能够观察到的事物相联系。这个思想听起来是老调重弹，然而实际上却是具有深刻的洞察力。例如在“观察”原子中电子的实验中，我们并没有观察到



绕核旋转的小硬球的轨道。而是来自谱线的证据告诉了我们当电子从一个能态跳到另一个能态时发生了什么。（这里的能态用玻尔的话来说就是轨道）。电子和原子的所有可以观察到的特性都涉及到两个态。与我们在日常生活中观察到的物质的运动方式相类似，轨道的概念与观察紧紧地联系在了一起。海森堡摒弃了日常生活中的类似物，依赖于数学去描述发生在原子或电子的两个状态之间的观察。（描述的不是原子或电子的单个状态。）

## ◆ 黑利格兰德的突破

报道中经常说到海森堡患上了严重的花粉热，来到黑利格兰德的一个多岩石的孤岛上疗养。就在这里，他忍着病痛，利用这段时间着手解释已知的一些量子行为。海森堡并没有精神涣散，他的病好了，他又能集中精力研究这些问题了。在他的自传体著作《物理学和物理学之外》中，他描述到他的感情就像量子数一样有了着落，也描述了一天早上三点钟他如何地“不能再怀疑数学的一致性以及量子力学和我的计算结果之间的相关性。我深深地感到有些恐慌。我感觉到通过原子的表面现象，我正在注视着它的奇美的本质。这些数学结构的规律已经如此丰富地展现在我的面前，而我现在不可不去探索这一宝库，一想到这些我就感到有些眼花缭乱。”

回到哥廷根之后，海森堡花了三个礼拜的时间将他的工作理成一篇论文，并使其在形式上符合发表的要求。他给老朋友泡利寄去一个副本，问他是否认为这项工作有意义。泡利是热心的，然而海森堡竭尽了全力，仍不能确保他的工作适合发表。他把这篇文章放到了一边，和玻恩一起去处理一些他认为合理的问题。

在 1925 年他离开玻恩，到莱德和剑桥去作了一系列报告。具有讽刺意味的是，他并没有给听众介绍他的新工作，这些听众不得不等待通过其它途径获得信息。

玻恩很满意地将海森堡的文章交给了《Zeitschrift für Physik》，几乎就在同时他意识到了海森堡这个意外发现的实质性内容。这涉及一个原子两个态的数学不能用通常的数来处理，而只能用数的列阵来处理。海森堡将这类列阵视为表格。最好的类比就是棋盘（指国际象棋的）。棋盘上有 64 个方格。在这种情况下，你可以用从 1 到 64 的一个数来标志每一个方格。然而棋手们喜欢用 a, b, c, d, e, f, g 和 h 来标志棋盘中的“列”，而用 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 来标志“行”。现在，棋盘上的每一个方格可以用惟一的一对标志符来确定： $a1$  为车的领地； $g2$  为武士小卒的基地，如此等等。海森堡的表格像一张棋盘一样涉及数的二维列阵。因为他正在做涉及两个态及其相互作用的计算。那些计算涉及到两个这样的数集或列阵的相乘。海森堡已经不辞劳苦地给出了进行这些计算的正确的数学技巧。然而他得到的是一个非常古怪的结果。这个结果是这么难以理解，以至于他没有将其发表。当两个列阵相乘时，得到的结果依赖于作乘法的次序。

这确实很奇怪。就像  $2 \times 3$  不等于  $3 \times 2$ ，或者以代数式的形式  $a \times b \neq b \times a$ 。玻恩为这个奇怪的性质而日夜焦虑，他确信其背后肯定隐藏着某种基本的东西。忽然，他看到了曙光。海森堡花费了这么多的心血构造出来的数学列阵或数的表格原已被数学家们所熟知。关于这种数存在一套完整的计算方法，这种数称为做矩阵。玻恩在 20 世纪早期，当他在 Breslau 还是一个学生时曾经学习过。因为矩阵有个基本特性。这个特性使学生们第一次学到它时就像留下深刻的印象——在将两个矩阵相乘时，所得到的结果依赖于将他们相乘的次序。用数学语言来说，矩阵不对易。

难怪玻恩在二十多年以后还能记起这个模糊的数学分支。

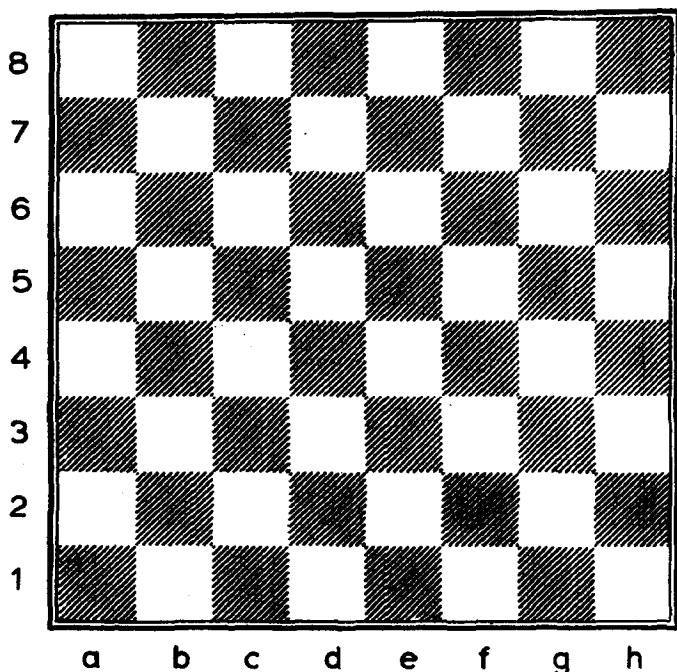


图 6.1 量子态表示如棋盘表示相似

国际象棋棋盘的每一块小方格，可以用一个字母数码对，比如  $b4$  或  $f7$  来标志，量子力学的每个态也是用一个数字对来确定的。

正数代表白方，负数代表黑方。我们可以用诸如“小卒到皇后四”或者用代数式  $e2 \rightarrow e4$  这两种方式来描述整个棋盘上状态的改变。可以用连接一对状态（初态和终态）的类似的思想来描述量子相变。在任何情形下，我们都不知道从一个状态到另一个状态的相变是如何发生的。马的运动和车对王的保护足以说明这

一点。在与棋类所作的类比中，我们可以天真地认为棋盘上的最小变化  $e_2 \rightarrow e_3$  相应于一个能量子  $h\nu$  的输入，而  $e_3 \rightarrow e_2$  的改变相应于一个能量子的释放。虽然这个类比是不确切的，但是可以使人们看到可以用不同形式的思想来描述同样的事件。海森堡、狄拉克和薛定谔发现了可以用不同形式的数字来描述同样量子事件。

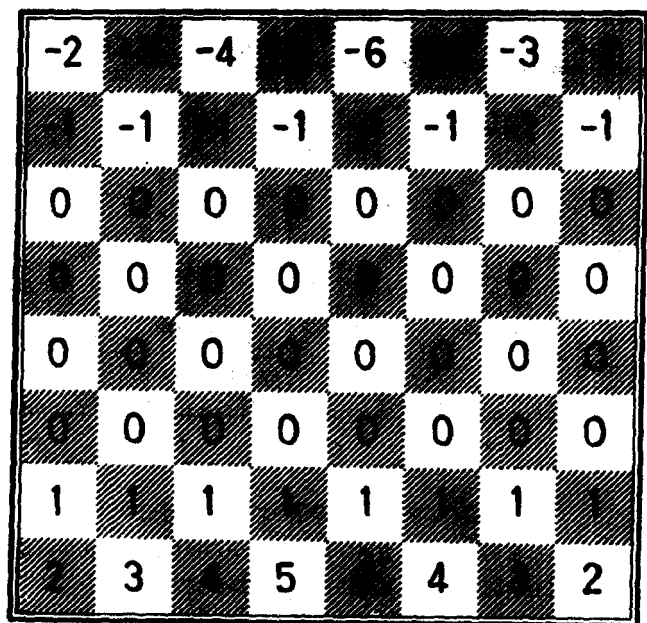


图 6.2 棋盘的表示方法

棋盘上每一方格的态由占据该方格的棋子来确定，在这种标志法中，1代表卒，2代表车……等等。

## ◆ 量子数学

1925年夏，玻恩和帕斯卡·约当开始发展现在大家熟知的矩阵力学。海森堡于9月份回到哥本哈根，通过书信的形式参与他们的合作，一起写一篇关于量子力学的完整的学术论文。这篇文章比海森堡的原始论文清晰、明了得多。这三位作者强调了量子力学变量不对易的重要性。在与约当合写的文章中，玻恩已经发现了关系式  $pq - qp = \hbar i$ ，其中  $p$  和  $q$  是代表量子力学变量的矩阵，它们代表量子世界中的动量和坐标。普朗克常数和  $-1$  的平方根  $i$  一起出现在这个新的方程中。在这篇著名的“三人文章”中，哥廷根小组把这个关系式强调为“量子力学基本关系”。然而这个关系在物理上意味着什么？物理学家们现在对普朗克常数已经非常熟悉了，并且也知道一些涉及  $i$  的方程（如果他们意识到的话，这将是一个潜在的线索，因为这种方程一般与振动或波有关）。就像在1900年老前辈们初看到普朗克引入的  $h$  一样，在1925年，绝大多数数学家和物理学家都不熟悉矩阵。对于那些能够处理这些数学的人类说，这些结果是惊人的。牛顿力学和方程被一些类似的矩阵方程所取代。海森堡说：“发现牛顿力学的很多老的结果诸如能量守恒定律等都可以在新的框架下推导出来，真是奇怪。”\* 换句话说，矩阵力学本身就包含牛顿力学，就像爱因斯坦相对论方程包含牛顿方程，并把它作为特例一样。不幸的是，几乎没有人能够理解这些数学，绝大多数物理学家也没有马上就意识到海森堡和哥廷根小组取得了一项多么有意义

• 《物理学和哲学》第41页。

的突破。然而有一个人例外，这个人在英国剑桥。

保罗·狄拉克出生于 1902 年 8 月 8 日，他比海森堡小几个月。通常认为他是唯一一位可以和牛顿相提并论的英国理论物理学家。他发展了现在大学所熟悉的量子力学的最完整的形式。然而直到 1921 年从布里斯托尔大学毕业并获得一个工学学位之后，他才回到理论物理上来。他在工程界找不到职位，但却获得了在剑桥学习数学的奖学金。由于缺少钱，他并没能全部上完他的课。他留在布里斯托尔和父母生活在一起，他用两年的时间学完了三年的数学课程。要感谢他的工学学位，他于 1923 年在应用数学方面完成了一个学士学位。现在，他终于可以回到剑桥，在科学和工业研究系基金的支持下从事研究。就是在他到了剑桥之后，他才第一次学到了量子理论。

1925 年 7 月份在剑桥，狄拉克作为一个不出名的和没有经验的研究生听了海森堡的讲课。尽管那对海森堡并没有公开谈论他的新工作，但他却向狄拉克的导师拉尔夫·福勒提起过。在 8 月中旬，在 *Zeitschrift* 出版之前，他送给福勒一份这篇文章校样的副本。福勒将这篇文章给了狄拉克。从而狄拉克比哥廷根以外的人（海森堡的朋友泡利除外）更早的拥有了学习这个新理论的机会。在第一篇文章里面，尽管他指出了量子力学变量——矩阵——的不可对易性，然而海森堡并没有发展这个思想，而是在围绕这个问题说空话。当狄拉克认真钻研这些方程时，他很快就领会到  $\mathbf{a} \times \mathbf{b} \neq \mathbf{b} \times \mathbf{a}$  这一简单事实的重要性。不像海森堡，狄拉克早就懂得这种类型的数学量的规律。在几个礼拜之内，他就能利用威廉·哈密顿在一个世纪以前发展的数学分支来重新推导海森堡的方程。最具有科学讽刺意味的是，哈密顿方程在 19 世纪得到发展主要是帮助计算象太阳系这样的系统中的物体的运动轨道（太阳系中拥有几颗相互作用的行星），（在量子理论中已经废除

了电子轨道的概念，)然而事实却证明这些方程在新的量子理论中是非常有用的。

所以，狄拉克和哥廷根小组独立发现的量子力学方程与经典力学方程具有相同的数学结构。经典力学作为一个特例包含在量子力学里面，相应于大量子数或普朗克常数等于零的情况。沿着自己的方向，狄拉克为动力学发展了另一种数学表述。这种表述使用了一种特殊形式的代数，叫做量子代数。这种表述还涉及量子变量或“ $q$ 数”的加法和乘法。这些 $q$ 数都是些怪物，因为在狄拉克发展的这套数学里面不能够说两个数 $a$ 和 $b$ 哪一个更大，在这个代数里面没有一个数比另一个数大或小的概念。然而，这个数学系统的规则与原子过程行为的观察结果符合得很好。事实上准确地说，量子代数本身包括矩阵力学，但是除此之外还有很多。

福勒马上就意识到狄拉克工作的重要性。在他的怂恿下，这篇文章于1925年12月发表在《皇家学会会议录》中。这篇文章除了其它内容之外，作为这一新理论的一个主要内容包括了几年前曾经困扰海森堡的半整数量子数。海森堡得到了狄拉克文章手稿的一个副本。他慷慨地赞扬道：“我已经怀着极大的兴趣阅读了你的关于量子力学的异常优美的文章。毫无疑问你的结果是对的……（这篇文章）比我们在这里所想的更好、更精练。”\* 在1926年上半年，狄拉克完成了四篇权威性的文章，装订成一本论文集的形式并以此获得博士学位。与此同时，泡利用矩阵方法正确地预测了氢原子的巴尔米序列。截止1925年，大家已经非常清楚地看到，很多谱线分裂成双线的现象事实上可以用一个称之为电子自旋的新特性来很好地解释。这些碎片结合结合在一起

• 引自密哈罗和雷钦伯格，第4卷第159页。

复合得很好，矩阵力学不同倡导者所用的数学工具很显然正是同一现实的不同方面。 \*

棋的游戏可以再一次帮助我们把问题讲清楚。可以用各种不同的方式来描述棋的游戏并印在纸上。一种方法就是印一张象征性的棋盘，在这张棋盘上标明了所有棋子的位置。但是如果我们要记录整个游戏过程的话，那将浪费相当多的篇幅。另一种方法就是记录被移动了的棋子：“国王的卒到国王的卒四”。这一移动还可以用最简单的代数语法描述为“ $d_2 \rightarrow d_4$ ”。这三种不同的描述提供了一个现实事件的同样的信息：卒从一个“态”到另一个“态”的变化。（就像在量子世界当中，我们对小卒从一个态到另一个态是如何改变的一无所知。如果你考虑马的运动将会更清楚。）量子力学的不同表述与此类似。狄拉克的量子代数在数学意义上是最优雅、最美的；玻恩和他的合作者尾随海森堡而发展起来的矩阵方法有些笨手笨脚，但却一点也不失效。” \*\*

当狄拉克努力使他的量子力学包含特殊的相对性时，他获得了最引人注目的早期结果。非常愉快地接受了光是粒子（光子）的思想后，狄拉克发现在他的方程里面，如果把时间也视为一个  $q$  数，他就能够“预测”出当原子发射一个光子时它必定出现一

● 在量子力学的狄拉克版本中，哈密顿方程中的一个关键表示被量子力学表达式  $(ab - ba) / i\hbar$  所代替，这正是玻恩、海森堡和约当称之为“量子力学基本关系”的另一种表示形式。三篇文章在狄拉克的第一篇关于量子力学的文章之前写完，但是在狄拉克的文章之后发表。

●● 富有个性、坦诚、谦虚的狄拉克已经描绘出，一旦人们知道了正确的量子方程仅仅是将经典方程写成哈密顿的形式，那么取得进展将是非常容易的。处理量子理论中的任何一个小的困惑，所需要做的仅仅是建立起等价的经典方程，并将它们变成哈密顿形式，问题就解决了。“这是一个游戏，一个人们可以玩的非常有趣的游戏。只要你解决了一个小问题，你就可以写一篇小的文章。在那些日子里，任何二流的物理学家都可以容易地做出一流工作。从那时起再也没有过如此辉煌的时代。现在就连一流的物理学家也难以做出二流工作了。”（《物理学的方向》第 7 页）



个反冲，就像光以粒子的形式携带着动量一样。他又继续发展了康普顿效应的量子力学解释。狄拉克的计算分为两个部分，首先数值处理涉及到  $q$  数，其次对方程的解释利用了物理上可能观察到的现象。这个过程与“作计算”的过程看起来精确相符。这个过程给我们提供了一个观察到的事件——一个电子相变，但是不幸的是这个思想在 1926 年之后并没有继续坚持下去。1926 年物理学家们发现另一个数学工具——波动力学能够解决长期悬而未决的量子理论问题，从而放弃了量子代数。矩阵力学和量子代数的出发点是电子作为一个粒子从一个量子态到另一个量子态发生相变的图象。德布洛意认为电子和其它粒子都可以看作波。这个建议又将起到什么样的作用呢？

## ◆ 薛定谔理论

当矩阵力学和量子代数在科学舞台上相对默默无闻地初次登场时，在量子理论领域还有大量的其它活动出现。看来欧洲科学界思想骚动、热血沸腾的时代到来了，在不同的地方同时迸发出不同的思想，其先后未必符合现代逻辑的次序。很多思想是几乎同时被不同的人所发现，然而证明电子波动性的权威性实验尚未完成。完全独立于海森堡及其同事的工作，基于波动思想的另一个量子数学理论出现了。

这个思想是德布洛意提出的，但爱因斯坦在其中起了很大作用。德布洛意的这项工作要不是引起了爱因斯坦的注意的话，那很可能在很多年之内含糊不清，而仅仅被看作是一个没有物理意义、但很有趣的数学技巧。是爱因斯坦将这个思想告诉玻恩，

从而推动了验证电子波动性的实验工作的开展。薛定谔就是从爱因斯坦在 1925 年 2 月份发表的一篇论文里面读到了对德布洛意工作的评述：“我相信这不仅仅是一个类比。”在那些日子里，物理学家们对爱因斯坦的每句话都非常留意，这位伟人的点头足以促使薛定谔开始探索德布洛意工作的表面价值。

在对量子理论工作做出贡献的物理学家当中，薛定谔是位奇才，他生于 1887 年。当他完成对科学的最大贡献时年仅 39 岁，能在这个年龄对原始科学工作做出这么大的贡献是非常引人注目的。他早在 1910 年就获得博士学位，从 1921 年开始就成为苏黎世的物理学教授、科学工作的栋梁、革命性新思想的一个不明显的源泉。然而就像我们将要明白的，在 20 世纪 20 年代中期他对量子理论的贡献比我们对一位老一辈的物理学家所抱的期望值还要大很多。当时哥廷根小组使量子理论越来越抽象，切断了它与我们熟悉的物理思想之间的联系，狄拉克更是如此。薛定谔努力恢复容易理解的物理概念，根据波来描述量子物理，而波是物理世界中非常熟悉的概念。他与这些模糊不清的新思想以及电子从一个态到另一个态的瞬时跳跃顽强抗争，直到生命的最后一刻。他为物理学解释问题提供了一个无价的实用工具。然而在概念术语中，他的波动力学后退了一步，退回到 19 世纪的思想。

德布洛意已经指出，根据他的思想，在原子核周围轨道中的电子波必定赋予每条轨道一个关于波长的整数，所以在此之间的轨道是被“禁止的”。薛定谔使用波动数学去计算在这种情况下允许的能级，最初的结果令他感到失望，因为他的结果不符合已知的原子谱线图样。事实上，他的技巧并没有什么错误，他最初这一失败的唯一原因就在于没有考虑电子的自旋。这也没有什么令人吃惊的，因为在 1925 年那个时间电子自旋的概念还没有出

现。所以他们就这项工作搁在一边放了几个月，所以就失去了成为第一个使用完整的、符合逻辑的、自洽的量子数学处理问题的人的机会。当有人让他对德布洛意的工作给出一个综合解释时，他才又回到这个思想。就在那时他发现如果从他的计算中舍去相对论效应，那么其结果将与相对论效应不显著的情形下原子观测实验很好地符合。就像狄拉克后来证明的，电子自旋是一个重要的相对论特性（与我们在日常生活中遇到的与旋转物体相关的自旋有着本质的区别）。于是薛定谔对于量子理论的巨大贡献于 1926 年以一系列文章的形式，紧接着海森堡、玻恩、约当和狄拉克的文章发表。

薛定谔量子方程和描述现实世界中真正的波例如洋面上的水波、空气中噪音的声波等的方程属于同一类。物理世界非常欢迎它们，因为它们看起来是那样舒适和熟悉。这两种解决问题的方法是不同的。海森堡故意抛弃了原子的图象而处理那些能被实验测量的量。然而他的理论核心为电子是粒子。薛定谔从一个清晰的物理图象——原子是一个“真正的”整体——出发。其理论核心为电子是波。两种方法建立了能够描述量子世界中可测量事物行为的方程组。

初看起来，有些令人惊讶。然而远在薛定谔之前，美国人卡尔·艾卡，然后是狄拉克就从数学上证明了这些不同的方程组事实上相互等价，是同一个数学问题的不同观点。薛定谔方程组既包括不对易关系，又包括关键的系数  $\hbar/i$ 。实际上它们以同样的方式出现在矩阵力学和量子代数当中，处理问题的不同方法事实上在数学上相互等价这一发现使物理学家们信心大增。看起来似乎是这样，不管你喜欢使用哪种数学形式，当你处理量子理论的基本问题时，你都肯定会得到相同的“答案”。从数学上来说，

在这个问题上，狄拉克的方法是最完整的，因为他的量子代数包括矩阵力学和波动力学，并将它们作为特例。然而，20世纪20年代的物理学家们很自然地选择使用最熟悉的方程形式——薛定谔波动方程。这个方程可以用日常的术语来理解，并且这些方程与日常的物理问题——光学、流体动力学等等的方程比较相近。然而薛定谔理论的巨大成功可能使人们对量子世界的基本理解推迟了几十年。

## ◆ 一次退步

根据事后的看法，狄拉克没有发明波动力学有些令人吃惊。因为已经证明哈密顿发展的方程在量子力学中非常有用。在19世纪当人们企图融合光的波动论和粒子论时就有了这些方程的萌芽。威廉·哈密顿1805年生于都柏林，很多人认为他是那个时代中最伟大的数学家。他的最大成就（尽管在当时并没有被认识到）在于在一个数学框架下实现了光学和动力学定律的统一化，可以用一方程组来描述波和粒子的运动这两个方面。这项工作发表于19世纪20年代后期和30年代早期，这两个方面都被其他人采用了。在19世纪后半叶对研究人员来说力学和光学都是有用的，但是很少有人注意到相耦合的力学-光学系统才是哈密顿真正关心的。哈密顿的工作清楚地表明，就像光“线”不得不被光波的概念所代替一样，在力学中粒子轨道不得不被运动的波所代替。然而这个思想对19世纪的物理学家来讲是如此地格格不入，以至于没有人——即使是哈密顿本人也不——能清楚地表述它。这个思想被拒绝并不是因为不合理和荒谬，而是因为它太奇

怪以至于没有人能理解它。这是十九世纪任何一位物理学家都不会得出的结论。直到事实证明用经典力学描述原子过程是远远不够的时候，这个思想才建立了起来。然而值得记住的是他也发明了一种数学形式，在其中  $a \times b \neq b \times a$ 。将哈密顿描述为一位被人忘却的量子力学创始人并没有什么夸张。如果那时他能健在的话，他将很快就看出矩阵力学和波动力学之间的联系。狄拉克本来可以这样做，但他却忽视了这个联系。这一点并不令人奇怪。他毕竟是一个刚刚进入研究领域的学生，一个人在几个礼拜之内能干的事是很有限的。然而，更重要的可能是他正在跟随海森堡处理抽象思想，企图使量子力学从电子绕原子核旋转这一通常的观念之中解放出来，而没有考虑去寻找一个好的、直观的原子图象。人们没有立即意识到波动力学本身并没有提供这样一个合适的图象，尽管薛定谔期望这样。

薛定谔认为通过将波引入量子理论，他已经排除了从一个态到另一个态的量子跳跃。他设想电子从一个能态到另一个能态的“转变”有点象琴弦从一个调到另一个调的振动的改变（一个谐振到另一个谐振的改变）。他认为在他的方程中的波就是德布罗意所倡导的物质波<sup>90</sup>。然而当其他研究人员企图找出方程中隐含的物理意义时，这些将经典物理推到中心地位的希望便烟消云散了。例如玻尔就被波的概念所困扰，一个波或者一套相互作用的波如何才能使盖革计数器计数，就像它记录下一个粒子那样？在原子中“波动着”的究竟是什么？更关键的是黑体辐射定律如何根据薛定谔的波来解释？所以玻尔于 1926 年拜访了薛定谔，他在哥本哈根呆了一段时间，在那里他处理了这些问题，得到了一些薛定谔并不太满意的答案。

首先，仔细研究表明，波本身就像狄拉克的  $q$  数一样抽象。

数学上已经证明它们不可能像池塘中的水波一样是实在的波。但是它们却代表一个抽象数学空间——相空间——中的一种形式复杂的振动。更遭糟的是，一个粒子（例如一个电子）本身就需要三个维度。一个电子可以用三维相空间中的一个波动方程来描述，这样要描述两个电子就需要一个六维的相空间；描述三个电子需要九维的相空间，依此类推。对于黑体辐射，即使是将一切都转换成波动力学语言，也仍然需要离散的量子、量子跳跃。薛定谔对此感到非常讨厌。他的评述（在翻译时稍有些变化）经常被人引用：“如果我早知道不能排除这个该死的量子跳跃，我决不会让自己介入这个问题。”就像海森堡在他的著作《物理学和哲学》中指出的：“波动图象与粒子图象之间的二元论佯谬还没有解决；它们隐藏在数学方案中。”

毫无疑问，原子核周围环绕着真正的物质波这一引人注目的图象是错误的。这个图象曾经促使薛定谔发现了现在以他的名字命名的波动方程。在认识原子世界方面，波动力学并不能以矩阵力学提供更多的指导。然而与矩阵力学不同的是，波动力学给出了一些人们熟悉的、看上去舒适的“幻觉”。这个舒适的幻觉至今还被人们所坚持。这个幻觉使人们不喜欢这个事实：原子世界与我们的日常世界是完全不同的。几代学生——他们自己现在已经成长为教授——如果当初他们被迫钻研狄拉克方法的抽象规律，而不是仅仅企图用日常生活中的图象去解释原子的行为方式，那么他们对量子理论的理解肯定深刻得多。这就是为什么在我看来，尽管量子力学就像菜谱一样对很多有趣的问题非常实用，并且在这方面取得了巨大的进展（记得狄拉克曾评论说二流物理学家做一流工作的事），然而我们今天与五十多年以前，即20世纪20年代对量子物理基本问题的理解相比，并没有多少长

进。作为一个实用的工具，薛定谔方程的巨大成功已经阻碍了人们对这个工具如何和为什么有效作深入的思考。

## ◆ 量子烹调术

量子烹调术的基本思想——20 年代以来的实用量子物理——依赖于 20 年代后期玻尔和玻恩发展的思想。玻尔给我们提供了在量子世界中使波粒二象性相协调的哲学思想；玻恩给我们提供了量子方法需要遵循的基本规则。

玻尔说粒子物理和波动物理这两种理论图象是同样有效的，是对同一个现实的互补性描述。这两种描述中的任一种其自身都是不完整的，但是有些情况粒子概念更有效，有些情况波动概念更有效，一个基本的实物例如电子，既不是粒子也不是波，但是在有些情况下它的行为像波，在有些情况下它的行为像粒子。但是在任何情况下，你都不可能发现有一个实验能来证实电子同时既像粒子又像波。波动性和粒子性是电子复合特性中的两个互补的方面。这一思想称为互补律。

玻恩发现了薛定谔波的另一种解释方法。在薛定谔方程中，重要的东西是一个波函数，它与日常生活中大家熟悉的池塘中的波纹相对应，通常用希腊字母  $\Psi$  来表示，工作在 Göttingen 的实验物理学家身边——这些实验学家们几乎每天都在做证实电子是粒子的实验——尽管像当时绝大多数物理学家一样，发现波动方程在解决很多问题时是最方便的，但是玻恩怎么也接受不了相应于“真正”电子波的这个波函数。所以他企图寻找一种波函数和粒子相伴随的方式。他汲取的这个思想在关于光的性质的争论之

前已经出现，但是现在他才接受这个思想并将其进一步提炼。玻恩说，粒子是真的；但是在某种意义上它们被波所引导，在空间中任一点波的强度（更精确的说， $\Psi^2$  的值）度量的是在那一个确定点发现粒子的几率。我们永远无法确切知道一个粒子例如一个电子在什么地方，但是当我们设计一个实验去确定电子的位置时，波函数使我们能够知道在某个确定点找到它的几率。这个思想的最奇怪之处就在于它意味着一个电子可能会处在任何地方，只不过它在某处出现的几率最大，在其它某个地方出现的几率最小。然而就像统计规律所说的，房子里面所有的空气都聚集在一个角落里也是可能的。所以玻恩对  $\Psi$  的解释从本来就不确定的量子世界中又排除了某些确定性。

玻尔和玻恩的思想与 1926 年后期海森堡的发现——不确定性是量子力学方程所固有的——很好地联系在了一起。 $\hat{p}\hat{q} \neq \hat{q}\hat{p}$  这一数学表示也说明我们永远不能确定  $\hat{p}$  和  $\hat{q}$  到底是什么。例如说，如果我将  $\hat{p}$  称为电子的动量，而用  $\hat{q}$  标志它的位置，我们可以设想去很精确地测量  $\hat{p}$  或者  $\hat{q}$ 。因为数学家使用希腊字母  $\Delta$  去标记小的变化量，所以在我们的测量中分别将误差记为  $\Delta\hat{p}$  或者  $\Delta\hat{q}$ 。海森堡告诉我们，如果你去尝试的话，你就会发现在这种情形下你永远不能非常精确地同时测量电子的位置和动量，因为  $\Delta\hat{p} \times \Delta\hat{q}$  必须永远大于  $\hbar$ 。 $\hbar$  为普朗克常数  $h$  除以  $2\pi$ 。我们对物体的位置知道得越精确，那么其动量——它正去向何方——就知道得越不确切。如果我们非常精确地知道它的动量，那么对于它在什么地方我们就知道得不确切。不确定关系具有深远的含义，这将在本书的第三部分中讨论。然而理解的关键是，在测量电子特性的实验中它并不代表故障。在原则上不能同时精确测量某些成对的特性，包括位置和动量，这是量子力学中最重要的规



则之一。在量子水平上没有绝对的真理。’

海森堡不确定关系测量的是电子或其它实体的互补性描述中相重叠的数量。位置是粒子的重要特性——粒子能够精确定位。然而波没有精确的位置，但它们具有动量。你对波的特性知道得越多，对粒子的特性知道得就越少，反过来也一样。用来检验粒子的实验只能用来检验粒子，用来检验波的实验只能用来检验波。没有实验能够同时表明电子既像波又像粒子。

玻尔强调指出，实验对于理解量子世界是非常重要的。我们只能通过做实验来探索量子世界在效果上，每个实验向量子世界询问一个问题。我们所问的问题带有浓厚的日常生活经验的色彩，所以我们寻找的是诸如“动量”和“波”这类特性，并且根据这些特性来解释所获得的“答案”。尽管我们知道经典物理对原子过程的描述是无效的，但是这些实验置根于经典物理。另外，玻尔指出，因为我们为了观察原子过程而不得不对它们产生干扰，所以询问当我们没有观察它们的时候，原子正在做什么是没有意义的。正如玻恩所解释的，我们能够知道的只有一个特定实验能够得出一个特定结果的几率。

不确定性、互补性、几率、观察者对系统的扰动、这些思想汇集起来构成量子力学的“哥本哈根解释”，尽管在哥本哈根（或者其它地方）没有人提出用这么多的词来给“哥本哈根解释”下一个权威性定义，并且波函数统计解释中的一个关键要素实际上来源于哥廷根的马克斯·玻恩。哥本哈根解释，如果不是给予

• 在日常生活中，同样的不确定关系也是适用的。但是因为  $\bar{p}$  和  $\bar{q}$  的值与  $\hbar$  相比，是如此之大，以至于相关的不确定量仅仅占等价宏观特性的微小份额。普朗克常数  $\hbar$  大约为  $6.6 \times 10^{-27}$ ， $\pi$  比 3 略大。所以换算过来， $\hbar$  仅仅为  $10^{-27}$ 。当小球在桌面上滚动的时候，通过跟踪，我们对小球位置和动量的测量可以达到我们想要的任意精度。通常，只有当方程中的数差不多等于或小于普朗克常数时，量子效应才成为重要的。

所有的人所需要的一切的话，那么也是给予很多人很多有用的东西。哥本哈根解释自身在量子力学怪玩艺这一不可靠的世界中存在不可靠性。在 1927 年 9 月份意大利托摩的大会上，玻尔首先公开提出这个概念。这标志着自恰量子理论的完成。任何胜任的物理学家都可以用这种形式的量子理论去解释涉及原子和分子的问题，而没有太多的必要去考虑这些基本原理，只需按照书上的方法得出结果。

在随后的几十年内，很多基本的贡献由狄拉克和泡利等人完成。这些新量子理论的前驱者们终于受到了诺贝尔委员会的赞赏，尽管奖金的分配按照委员会自己的奇怪逻辑来进行。海森堡于 1932 年获得诺贝尔奖，但是他为这个奖赏没有同时发给他的同事玻恩和约当而感到不安。玻恩为此痛苦了好多年，他经常评论说在他告诉海森堡之前，海森堡甚至不知道什么是矩阵。在 1953 年，玻恩在给爱因斯坦的信中说：“在那些日子里，他实际上不知道什么是矩阵。是他收获了我们所有工作的所得，例如诺贝尔奖。”\* 薛定谔和狄拉克分享了 1933 年的物理学奖，但是泡利直到 1945 年才因为不相容原理的发现而获诺贝尔奖，玻恩最后在 1954 年因为对量子力学的几率解释而获诺贝尔奖。\*\*

然而所有这一切——20 世纪 30 年代的新发现、奖金的授

• 《玻恩·爱因斯坦书信》第 203 页。

•• 这之后，照他自己的说法（公正地说，也是其他人的说法），在《玻恩·爱因斯坦书信》中，他回忆道（第 229 页）：“1932 年没能与海森堡一起获诺贝尔奖这件事在当时对我伤害很大，尽管收到了海森堡的一封友好的信。”由于对波动方程的统计解释而获诺贝尔奖。他解释说 he 获奖时间推后的原因是爱因斯坦、薛定谔、普朗克和德布洛意对这个思想的反对。这当然并不是说诺贝尔委员会应该轻易地驳回这个反对。他参考了“哥本哈根学派，我的几乎所有思想又起源于这个学派。”这意味着哥本哈根解释含有统计的思想。这些不仅仅是一位老人的顽固的评论，而是具有实质性的基础。在量子力学业内的每一个人都为玻恩的贡献终于被人们所认可而高兴。在这一点上没有人能超过海森堡。他后来对密哈罗评论说：“当玻恩获得诺贝尔奖时我如释重负。”（密哈罗和雷钦伯格，第 4 卷第 281 页）。

予，以及第二次世界大战后几十年内量子理论的新应用——都不应该隐瞒如下事实：目前，取得基本进展的年代已经结束了。我们或许正处在另一个这种年代的边缘，将通过抛弃哥本哈根解释和看起来舒适的、类似熟悉的薛定谔波动方程而取得新进展。然而在我们察看那些戏剧性几率之前，首先说清楚在 20 世纪 20 年代结束之前这个理论已经取得了哪些进展也是合理的。



## 第 七 章

# 用量子进行烹调

为了使用量子菜谱中的方法，物理学家需要知道几件简单的事情。没有模型能说清楚原子或基本粒子到底像什么，没有什么东西能告诉我们在没有进行观察的时候正在发生着什么。但是波动力学方程（在这方面最流行、使用最多的方法）可以在统计的意义上进行预测。如果我们对量子系统进行一次观察，通过测量得到答案 **A**，那么量子方程将告诉我们过一会儿再作同样观察的话，得到答案 **B** 或（**C**、**D** 等）的几率。量子理论并没有说原子是什么样子的，或者当我们没有进行观察的时候它们正在做什么。不幸的是，今天使用波动方程的多数人并没有理解这一点，而对于几率的地位只是在口头上强调。学生们的状态正如泰德·巴斯丁所描绘的：“在 20 世纪后期形成的思想非常流行……一般的物理学家从来没有真正问过自己对量子基本问题到底相信什么，而只是能够用这个理论来解决具体问题” 他们学会了将波

• 《量子理论及其它》第 1 页。

视为真实的，他们当中很少有人能够通过一门量子理论的课程，而没有在思维中脱开原子图案。人们是在没有真正理解几率解释的情况下而使用它。在没有搞清这些方法为什么如此有效的情况下就能使用量子理论，这正说明了薛定谔和狄拉克发展的方程以及玻恩提供的解释是多么的有力！

第一个量子厨师是狄拉克。正因为他是哥廷根之外第一个理解和进一步发展新的矩阵力学的人，所以他能够处理薛定谔波动力学，并且在更安全的基础上将其进一步发展。在推广这些方程使其符合相对论要求的过程中，增加时间作为第四个维数。在1928年狄拉克发现不得不引入代表电子自旋的一项。没想到这一项为困扰理论学家十来年的谱线分裂现象提供了解释。这些方程也得到了另外一个意想不到的结果，为现代粒子物理的发展打开了大门。

## ◆ 反物质

根据爱因斯坦方程，质量为  $m$  为动量为  $p$  的粒子的能量为  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ 。

当动量为零时，就简化为著名的关系式  $E = mc^2$ 。但事情并不这么简单。因为这一更熟悉的方程是通过对整个方程取平方根得到的，从数学上来讲， $E$  既可以是正的，也可以是负的，就像  $2 \times 2 = 4$ ， $(-2) \times (-2) = 4$  一样。严格地说，应该是  $E = \pm mc^2$ 。当方程中出现这种“负根”时，我们一般都把它看作没有意义而舍去。很“显然”我们只对正根结果感兴趣。作为一个天才的狄拉克，却没有采取这种很显然的作法，而是为其中的含义而深感困惑。在相对论量子力学中计算能级时，有两套结果，一

套全是正的，相应于  $mc^2$ ；另一套全是负的，相应于  $-mc^2$ 。据理论分析，电子应该落入最低的未占满能级。最高的负能级也要比最低的正能级低，所以负能级到底意味着什么，为什么不是所有的电子都落入其中而消失？

狄拉克的答案基于电子是费米子这一事实。一个可能的状态只能容纳一个电子。（每个能级有两种状态，每种状态具有一个自旋。）他解释道，电子没有落入这些能级是因为这些能级是全满的。所谓的“真空”实际上是负能电子海。他并没有就此止步。如果给一个电子赋予新量，那么它将跳上能级的梯子。所以，如果我们对负能海中的电子赋予足够的能量，它理应跳到真实世界中成为看得见的普通电子。从能级  $-mc^2$  到能级  $+mc^2$  显然需要输入一个  $2mc^2$  的能量。对于一个电子的质量来说，这大约是  $1\text{MeV}$ 。在原子过程或者粒子相互碰撞的过程中这个能量是容易提供的。当负能电子跳到真实世界中以后，它各方面的特性将与正常电子一样。同时在负能海中，将由于失去了带负电的电子而留下一个空穴。狄拉克说，这个空穴的行为类似于一个带正电的粒子（就像负负得正一样，在负能海中缺少了负电粒子就应该显示出正电性）。当他最初想到这个思想的时候，由于对称性，他认为这个带正电的粒子应该具有与电子相同的质量。然而在发表这个思想时，他指出正电粒子可能是质子。在二十世纪二十年代后期所知道的唯一一种其它粒子就是质子。正如他在《物理学的方向》一书中所描绘的，这是完全错误的。他本应该有勇气预言在实验上将会发现一种未知粒子，这种粒子与电子质量相同，但电性相反。

对于如何看待狄拉克的工作，最初没有人能够有确切的把握。尽管电子的正对应物是质子这一思想被抛弃了，但是直到美国物理学家卡尔·安德森在 1932 年的宇宙射线开拓性观测中发现

了正电粒子的轨迹之后，人们才开始认真地看待这个思想。宇宙射线是从外层空间到达地球的高能粒子。在第一次世界大战之前，奥地利的维克托·赫斯已经发现了宇宙射线。所以他和安德森分享了 1936 年的诺贝尔奖。安德森的实验涉及跟踪带电粒子，当粒子经过云室时会留下尾迹，就像飞机的雾化尾迹一样。他发现一些粒子的轨迹在磁场中发生偏转的量与电子相同，但方向相反。它们只能是与电子具有相同质量但电性为正的粒子，它们被命名为“正电子”。在狄拉克获得诺贝尔奖之后三年即 1936 年，安德森因为这个发现也获得了诺贝尔奖。这个发现改变了物理学家对粒子世界的观点。很长时期以来，他们一直猜想在原子中存在着中性粒子即中子，这已被 1932 年詹姆斯·查德威克的发现所证实（他于 1935 年因为这个发现而获诺贝尔奖）。原子核由带正电的质子和电中性的中子所构成，同时被带负电的电子所环绕。这一思想使物理学家们感到很满意。但在这个图象中并没有正电子的位置，同时粒子可以产生于能量的观点彻底改变了基本粒子的概念。

原则上，任何粒子都可以通过狄拉克过程产生出来。这个过程总是伴随着它的反物质——负能海中的“空穴”——的产生。尽管今天的物理学家们希望出现更丰富的粒子产生图象，但基本规则还是一样。非常关键的一条规则就是当一个粒子遇到它的反粒子时，就“落入空穴”，释放出  $2mc^2$  的能量，然后消失。与其说是象一股烟，不如说是象一阵  $\gamma$  射线。在 1932 年之前，许多物理学家就在云室中观察到粒子轨迹，其中许多肯定是由于正电子而导致的。但是在安德森的工作之前，这种轨迹被解释成为电子进入原子核的运动所造成的，而不是解释成向外运动的正电子所造成的。物理学家们对新粒子的思想怀有偏见。现在的情况反过来了。狄拉克说：“无论是在理论上还是在实验上，只要有最



轻微的证据，人们就非常希望能预言一种新的粒子。”（《物理学的方向》第 18 页）。结果是在粒子“动物园”中不再像 20 世纪 20 年代所知道的那样只有两种基本粒子，而是有 200 多种。所有这些基本粒子都可以在粒子加速器中通过提供足够高的能量产生出来，并且其中的绝大多数都是高度不稳定的，非常迅速地“衰变”为其它粒子束或辐射。在那个“动物园”中，50 年代中期发现的反质子和反中子差点给丢掉了，尽管它们充分证实了早期的狄拉克思想。

所有的书都在讲述粒子动物园，许多物理学家已经从事了粒子分析这一专业。然而在我看来，虽然发现的粒子种类非常丰富，但一些非常基本的问题还没有解决。现在的情况非常象量子理论之前的光谱学。当光谱学家们能够测量，并且能够对不同的谱线间关系进行分类时，他们对观察到的这些关系背后的原因却一无所知。真正基本的东西应该能够提供粒子产生的基本规则，这是在 20 世纪 50 年代爱因斯坦对他的传记作家亚伯拉罕·派斯表述的观点。“很显然，他（爱因斯坦——译注）认为考虑这些事情的时间还没有成熟，这些粒子最终将作为主场论方程的解而出现。”\* 30 年过去了，看来爱因斯坦是对的。描述粒子动物园的一种可能的理论草案将在跋中给出。这里，需要指出的是 20 世纪 40 年代以来粒子物理的爆炸式发展置根于狄拉克对量子理论的发展，即量子菜谱中的第一种方法。

• 《难以琢磨上帝》第 8 页。

## ◆ 原子核的内部

用量子力学解释原子的行为取得巨大胜利之后，物理学家们很自然地将他们的注意力转移到了核物理。尽管已取得了许多实际的成功（包括在三哩岛上的反应堆和氢弹），但是我们对原子核行为的理解，还没有像原子的行为那样清楚。原子核的半径比原子小 100,000 倍，而体积正比于半径的立方，所以原子比原子核大一千万亿（ $10^{15}$ ）倍。像核的质量和电荷之类的量能够进行测量，这些测量导致了同位素的概念。同位素之间具有相同数目的质子，因而具有相同数目的电子（以及相同的化学性质），但中子数不同，所以质量不同。

挤在核中的质子带有正电，它们之间必然相互排斥，所以必定存在着更强的“胶水”把它们粘合在一起。这种胶水是一种只在原子核大小的短程内有效的力，称为强核力（也存在弱核力，它比电力要弱，但在某些核反应中非常重要）。看起来中子在原子核的稳定性方面也起一定的作用，因为只有数一下稳定核中的质子数和中子数，物理学家们就可以提出一个类似于电子绕核旋转的壳层图象。在自然存在的原子核中所发现的最大质子数是 92，是在铀中发现的。尽管物理学家们已成功地生产出具有 106 个质子的核，然而它们是不稳定的（钚的某些同位素除外，其原子序数为 94），将裂变成其它的核。现在已知的稳定核总共约有 260 种。甚至今天，我们对那些核的认识，较之玻尔模型对原子的描述还要差得多，但是对核中的某些结构，我们已获得了一些清晰的信号。

那些核子（中子与质子）数为 2、8、20、28、50、82 和 126

的核特别稳定。相应的元素在自然界的含量与核子数略有不同的元素相比要丰富得多，所以这些数有时被称为“魔数”。但是质子决定原子核的结构，对每种元素只有有限的中子数不同的同位素——可能的中子数通常比质子数略大，元素越重中子数超过质子数越多。那些质子数和中子数都是魔数的核特别地稳定，在这个基础上理论学家们预言具有 114 个质子和 184 个中子的超重元素应该是稳定的。但是这些大质量的核在自然界中从来没有发现过，在粒子加速器中通过往自然存在的质量最大的核上挤压中子的方式也从来没能合成成功过。

最稳定是核是铁 - 56，略轻一点的核倾向于获得中子成为铁，略重一点的核倾向于失去中子变成最稳定的形式。在星体内部，最轻的核为氢和氦。在将轻核变成重核的一系列核反应中，可沿着生成铁的方式将氢和氦聚变成碳和氧，同时释放出能量。当一些星迅速地发展成为超新星时，大量的引力能输入这个核过程。这些能量将推动聚合反应，生成像铀和钚之类比铁重的重元素。当重元素返回最稳定的组合时，通过释放  $\alpha$  粒子、电子、正电子或个别中子的方式释放能量，这主要是超新星迅速爆发过程中储存的能量。 $\alpha$  粒子是氦原子的核，包括两个质子和两个中子。通过释放这样的粒子，原子核的质量减少四个单位，原子序数减小 2。这个过程符合量子力学规则和海森堡发现的不确定关系。

核子被很强的核力吸拢在核内，但是如果一个  $\alpha$  粒子刚好位于核外，那么它将受到很强的电场排斥力。这两个力的联合效应构成物理学家们所称的“势阱”。想象一个火山的断面图，两边是平缓的斜坡，中间是火山口。放置在火山口边缘之外的小球将沿斜坡滚下山去；而放置在火山口边缘之内的小球将落入火山的中心。核内的核子有些类似——它们位于原子中心势阱的内部。

如果它们能够刚刚越过“边缘”——即使是一点点——它们也会在电场力的推动下“滚下去”。潜在的困难的是，根据经典力学，核子或核子群例如  $\alpha$  粒子并不具有足够的能量去爬出势阱或者越过边缘——如果它们能够的话，那么它最初一定不在势阱里面。然而量子力学对这个问题具有不同的看法。尽管势阱提供了一个势垒，但它不是不可逾越的。存在有限的、较小的几率使  $\alpha$  粒子出现在核的外面，而不是内部。根据不确定关系，海森堡关系式之一涉及能量和时间。它指出在确定的时间间隔  $\Delta t$  之内，任何粒子的能量只能在一个  $\Delta E$  范围之内是确定的，以至于  $\Delta E \times \Delta t$  要大于  $\hbar$ 。对于一个很短的时间，粒子可以从不确定关系“借”能量，从而在将能量归还之前拥有足够的能量越过势垒。当它回到“合适的”能态时，它刚刚位于势垒的外边而不是里边，于是迅速离去。

或者你可以根据位置不确定性来看这个问题。一个“属于”势阱里面的粒子也可能出现在势垒外面。因为在量子力学中它的位置仅仅是模糊地确定的。粒子的能量越大，它就越容易跑掉，但它没有必要象在经典力学中要求的那样——需要具有爬出势阱的足够的能量。这个过程就像是粒子穿过了势垒，这纯粹是一个量子效应。<sup>\*</sup> 这是放射性衰变的基础。但是为了解释核裂变，我们不得不改用其它的核模型。

不考虑壳层中的个别核子在那时的行为，而将核看作是一个

<sup>\*</sup> 当核子聚合在一起时这个过程正好反起来。当两个轻核被星体内部的压力压在一起时，只有当它们克服来自外部的势垒后才能熔合。在那种情况下每个核子所拥有的能量依赖于星体中心处的温度。在 20 世纪 20 年代天文物理学家们迷惑地发现太阳内部的计算温度低于它应具有的温度——根据经典力学，太阳中心的核子不具有克服势垒并且聚合在一起所需要的足够能量。而答案是，在一个略低的能量值一些核子发生了隧穿。这与量子力学的规则相符。另外量子理论能够解释太阳为什么会发光，而经典理论则不能。

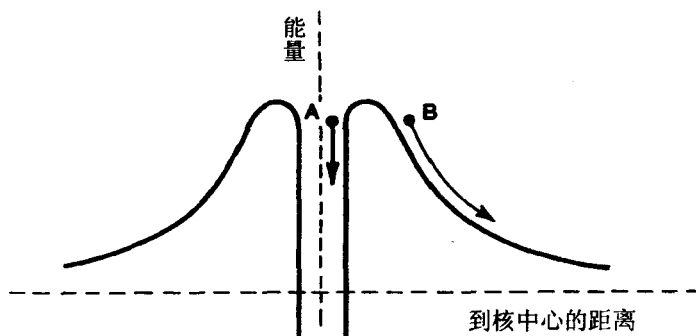


图 7.1 原子核心的势阱

位于 A 的粒子只能呆在阱内，除非它获得足够的能量“跃过顶端”而到达 B，一旦到达 B 它将直接“下山”而去，量子不确定性偶尔使粒子能通过“隧道”由 A 到达 B（或由 B 到达 A），而无需它自己拥有足够的能量去“爬坡”。

液滴。就像一滴水，在改变其形状时会颤动。核子的一些集体效应可以解释为由于核形状的改变所导致的。一个大的核，当将它的形状从球形改变到哑铃形或者变回去时，作时进时出的颤动。如果给这样一个核赋予能量，那么其振荡将非常剧烈，以至于将核分裂成两个：劈裂成两个小一点的核和一些微小的液滴—— $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子和中子。对于有些核，这种劈裂能够由一个快速运动的中子和核内碰撞来触发。如果以这种方式进行的每次核裂变都能产生足够的中子，以确保在它的邻域至少有两个核子也发生裂变，那么将发生一个链式反应。 $^{235}\text{U}$  含有 92 个质子和 143 个中子，它总是裂变成两个不同的核以及三个散射的中子，这两个核的原子序数的范围从 34 到 58，其和等于 92。每次裂变大约释放 200 MeV 的能量。假设铀堆足够大，以至于中子都逃不出去，那么一次裂变可以带动更多的裂变，这就是原子弹爆炸的过

程。通过使用吸收中子的材料进行调节，使过程放慢，这样我们就获得一个受控核裂变反应器。它可以给水加热使变成蒸汽来发电。再次说明，我们的能量是星体发生爆炸时储存的能量，来自很久以前遥远的地方。

然而在聚变过程中，我们可以在地球上模拟太阳这类星体产生能量的过程。到目前为止，我们仅能复制聚变梯子的第一步，即从氢到氦。我们还不能控制这个反应，只能让它在氢弹聚变过程中失去控制。与使一个大核产生裂变不一样，你必须设法使原子核克服正电荷间的静电排斥力而紧紧地靠在一起，直到强核力（作用力程非常短）超过静电力而把它们压在一起一旦你使少数核子以这种方式聚合，在这过程中产生的热量将倾向于聚变点的其它核子吹开，从而立即终止整个过程。★将来可能会利用核聚变产生的无限能量。这一希望的实现有赖于要找到一种方法，可以使足够多的核子在一个地方聚集足够长的时间，以抽取出一定的能量。首先找到一个过程——它所释放的能量比我们用于将核聚集在一起所需要的能量要多——是非常重要的。这在氢弹中是容易满足的。主要过程是，你首先用铀把你想要聚合的核包围起来，然后触发铀使其发生裂变爆炸。来自周围的爆炸的向内的压力将足以使足够的氢核相接触，从而启动第二次、也是更壮观的聚变爆炸。但是对于民用发电站来说，还需要一些更巧妙的东西。现在正在探索的技术包括使用强的具有特定形状的磁场，这个磁场的

★从聚变获取能量的方法之一是融合氢的两种同位素：其一是氘，它含有一个质子和一个中子；另一种是氚，它具有一个质子和两个中子。结果得到氦核（2个质子和2个中子）和一个自由中子，以及 **17.6MeV** 的能量。星体的作用过程更加复杂。这些过程涉及到氢核和存在于星体中的少量的碳核之间的核反应。这种反应的效果是将四个质子聚合到一个氦核里面，同时释放出两个电子和 **26.7MeV** 的能量。其中的碳将进入循环参与下一轮反应。这个涉及到氘和氚的过程，在地球上的聚变实验室中正在研究。

作用就像容纳带电的核的瓶子，以及使用激光束脉冲实实在在地将核压在一起。当然，激光器是根据量子菜谱中的另一种方法制造出来的。

## ◆ 激光器和受激辐射微波放大器

虽然大厨狄拉克在负责发现使用量子烹调术制作粒子的方法，但是对核过程的理解还没有对玻尔原子模型的理解那么完整。所以当发现玻尔模型还有其用武之地时，也没有必要太吃惊。近代科学中最奇怪和最令人兴奋的发展就是激光器的出现。对此，任何一个曾听说过玻尔模型的、胜任的、量子厨师都可以理解，并不需要伟大的天才去解释。（在这种情形，天才来自于它们的制造技术，那是另一个问题。）所以，首先要向海森堡、玻恩、约当、狄拉克以及薛定谔表示谦意，我们要姑且离开量子力学的微妙问题，回到电子绕核旋转的、简洁的原子模型。还记得当原子获得一个能量量子时，电子将跳上一个不同的轨道。根据这个图象当这种激发态原子被搁置一边时，电子迟早要落回基态，辐射出一个具有有限小波长的光子。这个过程叫做自发辐射，是吸收的对应过程。

当爱因斯坦在 1916 年探索这个过程时，他将量子理论建立在统计规则之上，但后来发现这是不相容的。他意识到存在另外一种可能性。一个激发态原子受到一个过路光子触发后可能会释放出额外的能量，从而返回基态。这个过程叫做受激辐射。只有当过路光子与这个原子将要辐射的光子具有相同的波长时，这个过程才会发生。与链式裂变反应中的中子串很类似。我们可以想象，当一个具有合适波长的光子经过一系列激发态原子时，一个

激发态原子受触发而辐射出一个同样的光子。原始的光子和新辐射出的光子将进一步触发另外两个原子使其辐射，然后这四个光子再触发四个原子，依此类推。结果是一连串的辐射，所有的频率都精确相等。而且，因为辐射是由触发引起的，所有波的步调皆精确一致。所有的波峰都一齐向“上”，所有的波谷都一齐向“下”，产生出非常纯的所谓相干辐射束。因为在这种辐射中任何峰和谷都不能相互抵消，所以原子释放出的所有能量都存在于束中，并且能够聚集到光束所照射材料的一块很小的面积上。

当一群原子或分子受热激发，并且已经填满一个能带中的各能级时，如果将它们搁置在一边，那么它们将以不相干的、混乱的方式辐射不同波长的能量，携带的有效能量比原子或分子释放出的能量要小得多。然而可以采取去填满一个很窄的能带中的能级，然后触发使这个能带中的激发态原子回到基态。这一系列触发，输入的是具有合适频率的较弱的辐射，而输出的是具有相同频率的强得多的、放大的辐射束。这个技术最初在 20 世纪 40 年代后期得到发展。这一发展由美国的一个小组和前苏联的一个小组独立完成。他们使用的辐射位于收音机用的波段，波长从 1 厘米到 30 厘米，称为微波波段。这项工作的先驱者于 1954 年获诺贝尔奖。因为这个波段的辐射称为微波辐射，并且这个过程涉及到 1917 年爱因斯坦提出的受激辐射的微波放大，所以先驱者们为这个过程杜撰出了受激辐射微波放大这一名称，英文缩写为 **MASER**。

十年之前人们还没有找到一个合适的方法使得这个机制适用于光学频率，然而到了 1957 年已有两个人几乎是同时产生了同样的想法。一个（看起来他是第一个）是哥伦比亚大学的一位研究生高登·格尔德，另一个是受激辐射微波放大的先驱者之一查尔斯·汤斯。汤斯于 1964 年获诺贝尔奖。关于谁在什么时间发现



了什么的争论已经成为专利权法律研究的对象。因为激光器——光激励器（来自“光放大……”）现在是一个大生意，很赚钱的。幸运的是我们没有卷入那个问题。今天，有几种不同种类的激光器，其中最简单的是光学泵固体激光器。

在这种设计中，要准备一根抛光的、平底的材料（例如红宝石）棒，材料棒被明亮的光源所包围。这光源是一根能迅速闪烁的气体放电管，它能产生具有足够能量的光脉冲，以激发棒的原子。整个设备置于较冷处，以确保棒内原子的热激发所造成的干扰达到最低。来自光源的明亮的闪烁用于将原子激励到激发态。当激光器受到触发时，一个纯的红宝石光脉冲，携带着几千瓦的能量，从棒的平底射出。

其它种类的激光器包括液体激光器、荧光染料激光器、气体激光器等等。所有激光器的基本性能都是一样的——输入非相干能量，以形成携带着很多能量的纯脉冲的相干光。很多激光器例如气体激光器，提供一个连续的、纯的光束，它是用于测量的主要的“准直器”，它在摇摆音乐会和广告中具有广泛的用途。其它激光器产生短暂的、能量很高的脉冲，可用于在硬的物体上钻孔（有朝一日它或许还有军事用途）。激光作为切割工具，在服装工业、显微外科医学方面用途也非常广泛。激光束能够比无线电波更有效地携带信息，因为每秒钟传递的信息是随着辐射频率的增加而增加。在超级市场上很多产品上的条形码是用激光扫描器来读的。在 20 世纪 80 年代早期在市场上出现的音像光盘都是用激光束扫描的。真正的三维摄影或者全息照相都可以在激光的帮助下完成，如此等等。

我们可以将受激辐射微波放大器用于放大微弱信号（例如来自通讯卫星的信号）、雷达和其它方面。实际上激光的用途是说不完的。这些应用并不全都是起源于完整的量子理论，而是源于

最初的量子物理。当你购买一包玉米片在超市出口处用激光进行扫描时，或者当你在电视上观看通过卫星传递过来的正在举行的音乐会时，或者听高保真压缩盘上乐队的最新录音时，或者在赞美全息照相图象的魔力时，都应该感谢阿尔伯特·爱因斯坦和奈尔斯·玻尔，是他们在 60 年前提出了受激辐射的原理。

## ◆ 功能强大的显微术

量子力学对我们日常生活最普遍的影响无疑是在固态物理领域，“固态”这一名称并不罗曼蒂克。当你听到这个词时，可能并没有把它与量子理论联系起来。然而就是物理学的这个分支给我们提供了晶体管收音机、索尼随身听、数字式钟表、袖珍计算器、微机、可编程的洗衣机等等。对固体物理无知，并不是因为它是一个深奥的科学分支，而是因为它非常普通以至于人们认为是理所当然了。如果不是很好地掌握了量子烹调术，那么上述设备我们将一样都得不到。

上段提到的所有设备都依赖于半导体的特性。半导体是固体，它具有介于导体和绝缘体之间的特性。不追求细节的话，绝缘体是那些不导电的物质，它们不导电是因为它们的原子中的电子被紧紧地束缚在核上，符合量子力学规则。在导体例如金属中，恰好每个原子都具有一些松散的束缚在核上的电子，它们位于原子势阱顶部附近的能态中。当固体中的原子聚集在一起时，相邻原子势阱的顶部交叠在一起，在能级中的电子就可以自由地从一个原子核附近跑到另一个原子核附近，而不再束缚在某一个原子核上，从而能够在金属中携带电流。

导体的特性最终依赖于费米-狄拉克统计，它禁止那些松散

地束缚着的电子落入原子势阱的深处。在那里的能态已被紧束缚着的电子占满了。如果你想压缩一块金属，它将抵制这个压力，金属是坚硬的。金属坚硬能够抵制压力的原因就是费米子符合泡利不相容原理，电子不能被紧紧地压在一起。

可以使用量子力学波动方程来计算固体中的电子的能级。那些紧紧地束缚在核上的电子位于价带中。那些可以在核间自由运动的电子位于导带中。在绝缘体中，所有的电子都在价带中；在导体中，价带是满的，一些电子位于导带中。<sup>\*</sup> 在半导体中，价带是满的，在价带和导带之间具有较窄的能隙，典型的能隙大约为  $1\text{eV}$ ，所以电子容易跳到导带上去，并在材料中传送电流。然而不象在导体的情形，这个获得能量的电子在价带后面留下一个缝隙。与狄拉克所解释的电子和正电子产生了能量的方式完全相同，缺少了带负电电子的价带，就电性而言就像一个正电荷。所以在天然半导体中，少数电子位于导带中，少数带正电的空穴位于价带中，它们都可以传送电流。你可以认为电子依次落入导带中的空穴，在其后再留下空穴，下面的电子再跳进这些空穴，依此类推。或者你可以将空穴视为真正的、朝相反方向运动的正电粒子。就电流而言，效果是一样的。

天然半导体是非常有趣的，并不是因为它为电子-正电子对的产生提供了一个很好的类比。半导体的电特性很难控制，就是这些控制使得半导体对于我们的日常生活是如此的重要。这些控制通过人工半导体来实现。其中一种是自由电子占主导地位，另一种是“空穴”占主导地位。

这种处理方法容易理解，然而在实际操作中却并不这么容

• 实际上还有另外一种导体，其中价带本身并不满，所以电子可以在价带中动。

易。例如在锗晶体中，每个原子的外层有四个电子（这是暂时使用量子烹调术，对于这项工作玻尔模型足矣），这四个电子为相邻原子所共享以产生化学带，从而将晶体收拢在一起。如果在锗中“注入”少量的砷原子，锗原子在晶格结构中仍占主导地位，砷原子不得不挤进它最容易呆的地方。用化学术语来说，在砷原子和锗原子之间主要的不同在于砷原子外层有五个电子。砷原子挤进锗晶格中的最好方式是扔掉一个电子，占满四个化学键，将自己假扮成一个锗原子。由砷原子提供的多余的电子就在半导体导带之中游动，它们没有对应的空穴。这种半导体称为 N 型半导体。

另一种方法就是在锗晶格中注入镓原子。镓原子只有三个成键电子。从效果上看就像在每个镓原子的价带中产生一个空穴，价带中的电子通过跳入空穴而运动，就像正电荷在运动一样。这种晶体称为 P 型半导体。当我们将两种半导体放在一起时，就会产生一种有趣的现象。多余的正电荷位于势垒的一侧，负电荷位于另一侧，电势之间的不同企图推动电子在一个方向上的运动，而阻止它在相反方向上的运动。这样的一个半导体连接对，称为二极管，它只允许电流沿一个方向流动。更难理解的是，电子跳过能隙从 N 区进入 P 区的空穴，同时发出闪光。根据这种发光机制设计的二极管叫做发光二极管，或 LED，用于一些袖珍计算器和手表及其它显示器件的数字显示。有一种二极管的工作恰好相反，当它吸收光的时候，将电子从原来的空穴中抽出，送入相邻的导带，这种二极管称为光敏二极管。这个机制保证了只有当光照射到半导体上时才有电流流过。这就是自动开门设施的基础。当你在光束前走过时，门就自动打开。然而，除了二极管之外还有很多半导体器件。

当三片半导体合在一起构成三明治形式（PNP 型或 NPN 型）

时，就得到一具晶体三极管。（三极管中的每一片与一个电线相连接，所以可以看到在你的收音机中的三极管就像一个三脚架，有三条腿从容纳半导体本身的金属或塑料“罐头”壳伸出。）只要适量地注入材料，就有可能建立起这样一种机制，当一个很小的电流流过一个 NP 结时，就导致一个大得多的电流流过三极管的另一个结——三极管的作用就是一个放大器。任何一个电子爱好者都知道，二极管和放大器（三极管）这两种元件在音响系统设计中是非常关键的。但是现在三极管已经过时了，在收音机里面你已经找不到三条腿的“罐头”了，除非它是一个“老古董”。

直到五十年代，在文娱活动中我们还依赖笨重的无线电收音机。这个设备，尽管取名为无线电收音机，然而却塞满了导线和发热的真空管，而现在这些工作已由半导体来完成。在五十年代后期，半导体革命开始了，这些体积又大又发热的电子管被半导体所取代，而各种线被印刷电路板所代替，半导体元件就焊接在上面。由此再进一小步就到了集成电路。在集成电路中所有的电路和半导体放大器、二极管等等都做在一片半导体上，经过简单连接就可构成收音机、录音机等等的核心部件。同时在计算机工业领域正在进行一场类似的革命。

你古老的无线电一样，第一台计算机也是很大很笨重的。其中布满了电子管以及几英里长的电线。即使是在 20 年前，那时第一次固态革命，功能相当于现代微机的计算机仍需要一间房子的空间来容纳它的“脑部”，还要更多的空间来安装附属的空调设备。这场固态革命使得原来这么巨大的计算机才有的计算能力现在只需一台价值几百美元的桌面计算机就已经具有，祖辈们原来使用的桌面无线电现在已换成烟盒大小的收音机，以及由三极管换成了集成电路。

生物脑和电子计算机都是开关系统。你的大脑包含大约一千

亿个神经元形成的开关，神经元由神经细胞构成。计算机拥有的是由二极管和三极管构成的开关。在 20 世纪 50 年代，具有与人脑同样多的开关的计算机将有曼哈顿岛那么大。现在，通过将微型芯片连接在一起，将同样多的开关压在人脑这么大的体积内也是可能的，尽管这种计算机的连线也还是一个问题，这种计算机还没有制造出来。只要比较一下芯片和三极管的大小就可以看出这种计算机可能会成为现实。

现在的标准微型芯片中使用的半导体是硅，其基本成分与普通的沙子一样。只要适当地激励一下，就会有电流流过，不激励就不会有电流。将直径 10 厘米的长的硅晶体切成剃须刀片那么厚的许多薄片，然后裁成几百个小的矩形芯片，每一片比火柴头还要小，在每一芯片上一层又一层地压了很多精美的希腊糕点：非常好的电路、等效的三极管、二极管、集成电路等等。从效果上说，一块芯片就是一个整个的计算机；现代微机的其余工作就是使信息出入芯片。它们非常便宜（一旦付了电路设计费和用于复制芯片的设备费），以至于可以几百几百地生产。经过检验发现不能用的只需把它扔掉就是了。要制作一块芯片，从设计开始，可能要花费 100 万美元；但如果要生产足够的、同样的芯片，那么每片只需花几分钱。

所以在日常生活中有不少东西都位于量子大门口。量子菜谱一章中所描绘的方法就给我们提供了数字式手表、家用计算机、可以将宇宙飞船引入轨道的电脑（或者有时候不让它飞，只要操作员想这样的话）、便携式电视机、个人音响系统、强有力的可以震聋你耳朵的高保真音响系统和助听器。真正的袖珍计算机（只有钱包那么大）不会再遥远了；真正的智能机器还是遥远一些，但也不是没有可能实现。那些控制火星着陆器的计算机、在外部太阳系中控制航空探索的计算机和那些控制连拱廊游戏的芯

片是最近的表兄弟。它们都置根于量子基本规则所要求的电子的奇异行为。固态物理除了在显微方面的广泛应用之外，在其它方面也具有美好的应用前景。

## ◆ 超导体

像半导体一样，超导体的命名也具有逻辑意义。超导体是指当电流流过时没有任何明显的电阻出现的材料。这与我们曾经追求的永恒运动非常类似。它并不是可有可无，而是你在物理学中所追求的并且为之付出代价的少有的例子之一。它可以通过电子配对一起运动来解释。尽管每个电子都具有半整数自旋，都符合费米-狄拉克统计和泡利不相容原理，而一个电子对在某些情况下的行为就像一个具有整数自旋的粒子。用量子力学的话来说，这样一个粒子的行为不受不相容原理的束缚，它与光子一样遵守玻色-爱因斯坦统计。

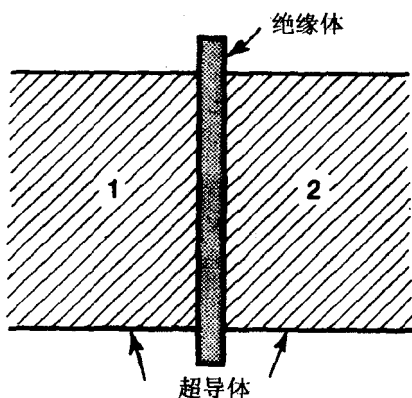


图 7.2 约瑟夫森结的隧道效应

将两块超导体同一小层绝缘体结在一起就形成了约瑟夫森结，在结处会发生奇异的事情。在合适的环境下，电子可由隧道效应通过此结。

荷兰物理学家卡墨林·欧奈斯于 1911 年发现超导电现象。他

发现当绝对温度低于  $4.2$  度（大约  $-269^{\circ}\text{C}$ ）时，汞的电阻变为零。欧奈斯于 1913 年因为低温工作而获诺贝尔奖。但并不是因为它发现了超导，而是因为它在制备液态氦方面的成就。直到 1957 年约翰·巴丁、利昂·库珀、罗伯特·施赖弗提出一个著名的理论之后超导现象才获得解释。这三个人因此而获 1972 年的诺贝尔奖。<sup>\*</sup> 这个解释依赖于晶格中电子对和原子的相互作用。当一个电子与晶格相互作用时，会影响到对另一个电子和晶格的相互作用。所以尽管它们的自然倾向是相互排斥的，但是电子对构成一个松散的伙伴关系，足以说明由费米-狄拉克统计到玻色-爱因斯坦统计的改变。并不是所有的材料都能成为超导体，晶体中原子的热运动都有可能破坏电子对，这就是为什么只有在极低温度（ $1^{\circ}\text{K}$  至  $10^{\circ}\text{K}$ ）下才能出现超导的原因。在某个临界温度下（一种材料有一个临界温度，不同材料有不同的临界温度），一些材料可以变成超导体，一种材料可以变成另一种性质的材料。在那个温度以上，电子对破裂，从而又恢复到普通电子的特性。

在室温下是良导体的材料并不是最好的超导体，这一事实证实了上述理论的正确性。在通常的良导体中电子可以自由移动，是因为它们与晶格原子的相互作用并不频繁。然而没有电子和原子间的相互作用，电子之间就无法耦合，因此，在低温下就不可能成为超导体。

不幸的是，产生超导体首先需要极低的温度。超导体的潜在应用价值是可以想象的——在电缆中传送而不损耗能量就是最好的例子。超导体也具有其它特性。普通金属导体能被磁场穿透，

<sup>\*</sup> 巴丁于 1948 年就因为他和威廉·肖可莱、沃尔特·布拉赖的一个发明而享有盛誉。这个发明使他们荣获 1956 年的诺贝尔奖。这个发明就是三极管。巴丁是第一个两次获诺贝尔奖的人。



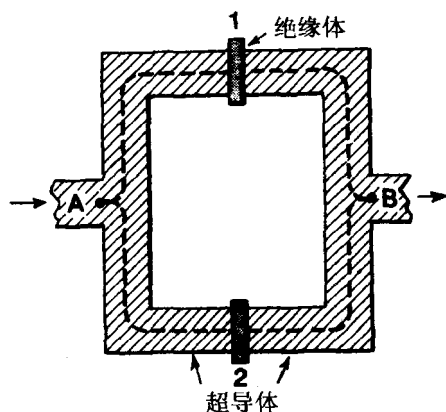


图 7.3 干涉效应

两个约瑟夫森结可以组合成一个新的器件，它与光的双缝实验中所用的系统类似。

应用这个设备，可能观察到电子之间的干涉，这是这些“粒子”波动性的证据之一。

但是在超导体中电流在其表面流动，从而排斥磁场。一个好的屏幕最怕来自磁场的干扰，但是为了抵制干扰而将其温度降至几度 K 也是不现实的。当用一块绝缘体将两块超导体隔离开来时，你可能认为不会有电流流动；然而别忘了电子与那些可以通过隧穿跑出核的粒子满足同样的量子规则。如果绝缘体足够薄的话，电子对通过这个缝隙的可能性就比较大，然而也不会产生常识性的结果。这种结（称为约瑟夫森结），在绝缘体两侧的电势不同时不会有电流产生；如果绝缘体两侧的电势相等的话反而会有电流产生。将两块音叉形的超导体对合地压在一起，象三明治一样在中间隔一层绝缘体，就构成双约瑟夫森结。这种器件能够用于模拟电子“双缝”实验中的量子力学行为。这些行为是量子世界中许多性质的基石，我们将在下一章中对其作详细介绍。

在低温下，不仅电子可以连接在一起构成违背物理学一般规律的赝玻色子，氢原子也具有类似的行为，它是称为超流体的液氦特性的基础。你将杯中的咖啡搅动一下，然后把它放在一边，液体的旋转就会逐渐变慢，最后停了下来，这是因为液体内部具有一种类似摩擦的力或粘滞力。如果将温度降至 2.17K 再做同样

的实验，就会发现液体的旋转永远不会停下来；把它放在其它的容器时，液体可能会沿着碗的边缘向上爬并且流出来；不是难以通过很细的管子，而是管子越细超流液氦越容易通过。所有这些奇怪的现象都可以用玻色-爱因斯坦统计来解释。尽管这些特性要求如此之低的温度，以至于难以找到实际的应用，但是低温原子的行为象超导体中的电子一样，可以使人们有机会看到量子过程。将少量超流氦置于直径 2 毫米左右的微小吊桶中，旋转吊桶，最初液氦处于静止状态。随着旋转速度的增加，当角动量达到一个临界值时，所有的氦发展成为一种自向流，从一个量子态变化到另一个量子态。量子规则不允许其中出现中间态——相当于一个中间角动量，氦原子整体的质量比量子世界中的粒子的质量要大得多，但是可以看到它们的行为满足量子规则。随后我们将会看到，超导体也可以应用到人体的标度，而不仅仅是原子标度等。但是量子理论不仅局限于物理世界或物理学，现在所有的化学都可以用基本粒子规则来解释。化学是一门分子科学，而不仅是个别原子和亚原子单元的科学。这些分子包括对我们来说是重要的分子——活的分子，包括生命分子 DNA。我们现在对生命本身的理解置根于量子理论。

## ◆ 生命本身

对生命化学的理论与对量子理解在科学上的重要性的理解非常不同。在量子发展过程中的一些主要特征与生命分子 DNA 的双螺旋结构的发现具有一些直接的人为联系。X 射线在晶体上的衍射规律是由布拉格和他的父亲威廉发现的。在第一次世界大战之前的几年中他们正在卡文迪许实验室工作，1915 年他们因为

这项工作而共享了诺贝尔奖。当时布拉格还非常年轻，还是法国的一位正在服役的军官。15年后他又参加了50周年的纪念庆典活动。老布拉格已经在物理学界享有一定的声誉，他的主要贡献在于对 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线的研究。在20世纪最初的几年里他证明了 $\gamma$ 射线和 $x$ 射线的某些行为与粒子类似。然而作为解开晶体结构之谜的金钥匙的布拉格 $x$ 射线的衍射定律依赖于 $x$ 射线的波动特性。 $x$ 射线与晶格中的原子发生碰撞，然后离开。结果干涉图样依赖于晶体中原子之间的距离和 $x$ 射线的波长，这工具已被熟练地运用于确定复杂晶体结构中个别原子的位置。

对布拉格定律的主要贡献是由劳伦斯·布拉格于1912年完成的。在20世纪30年代后期他正在剑桥卡文迪许实验室任物理学教授（继承了卢瑟福退休后留下来的职位），在其它方面的工作之余，他仍然热衷于 $x$ 射线方面的工作。就在这十年期间崭新的生物物理学开始得到发展。J·D·伯纳尔用 $x$ 射线衍射方法确定了生物分子的结构和成分。这一开创性工作导致了后来对复杂的蛋白质分子的详细研究。蛋白质分子承担了很多生命方面的功能。在1962年马克斯·佩鲁茨和约翰·肯德鲁由于在确定血红蛋白和肌红蛋白结构方面的贡献而获诺贝尔化学奖。血红蛋白在血液中输送氧，而肌红蛋白是一种肌肉蛋白。他们这项研究工作起始于第二次世界大战之前的剑桥。

与分子生物学的起源永远联系在一起的几个名字是“年青的土耳其人”弗朗西斯·克里克和詹姆斯·沃森。他们在20世纪50年代早期发展了DNA的双螺旋结构模型，于1962年与莫里斯·威尔金斯一起共同分享了诺贝尔“生理学或医学”奖。诺贝尔委员会在同一年中分别在“化学”和“生理学”名义下奖励在生物物理学领域中不同的开创者，这一灵活性是令人钦佩的，然而不幸的是这种严格的规则反对对那些已故人员进行奖赏，这使得威

尔金斯的同事罗莎琳德·弗朗克林不能与克里克—沃森—威尔金斯分享奖赏。前者在结晶学方面做了大量的工作，这些工作对于揭示 DNA 结构起了关键性的作用，然而他于 1958 年去世，年仅 37 岁。而弗朗克林在流行说法中的地位区有如沃森的书《双螺旋》中的满腔热情的男女平等主义者。在那个时代在剑桥他是一个充满色彩的人，他被广泛地接受，但并未得到其同事的公平的、准确的认识，甚至他本人也没有对自己形成一个公平的认识。

导致沃森和克里克发现 DNA 结构的工作是在卡文迪许完成的，当时卡文迪许实验室仍由布拉格领导。沃森是一个年青的美国人，他来到欧洲做博士后研究工作，在他的书中，他描绘了在卡文迪许谋求职位的时候是如何遇见布拉格的。布拉格六十岁刚出头，留着白色的胡须，给沃森留下的印象是“科学历史上的碎片”，现在他的大部分时光是在伦敦俱乐部中度过的。沃森被接收了，他对布拉格在研究中投入的积极的兴趣感到惊讶。在解决 DNA 问题的过程中，布拉格经常提供一些非常宝贵的指导，尽管这些指导并不总是受欢迎。弗朗西斯·克里克，尽管比沃森年长，当时他还是一个学生，正在攻读博士学位。他的科学生涯，象同代的很多人一样，曾被第二次世界大战所打断，虽然这对他并没有带来不好的影响。他最初是攻读物理学的，直是到了 20 世纪 40 年代末期他才转向生物学。他的这一决定主要是受了薛定谔在 1944 年出版的一本小书的激发而做出的。这本标题为《生命是什么》的书是一部经典著作（仍然在印，很值得一读），它阐述了生命的基本分子可以根据物理定律来理解。一个需要用那些术语来解释的重要分子是基因，它携带了生物体如何构成和如何动作的信息。当薛定谔在写《生命是什么》这本书时，他认

为基因和它的生物分子一样，由蛋白质构成。然而大约就在那个时候，人们发现遗传信息实际上由一种叫做脱氧核糖核酸的分子所携带，这种分子是在活细胞的核中发现的。<sup>\*</sup> 这就是 DNA，克里克和沃森通过对威尔金斯和弗朗克林的 X 射线数据的分析确定了 DNA 的结构。

我已经在另一本书里面详细描述了 DNA 的结构和它在生命过程中的地位。<sup>\*\*</sup> DNA 的主要特征是由两条相互缠绕在一起的带构成，是一种双螺旋结构。称为基的不同的化学成分在 DNA 脊柱上排列的顺序，携带了活细胞用于构造各种蛋白质的信息，例如在血液中携带氧的或使肌肉进行动作的蛋白质分子。一股 DNA 能够部分地解开，显露出的基作为构造其它分子的模板；或者它能够彻底的解开，沿着股的中心用相应的原料使每一个基配对，从而构成一个镜像股从而形成一个双螺旋结构。两个过程都将活体细胞的化学溶液作为原材料，两个过程对生命都是重要的。人类现在已能够沿着 DNA 将编码信息进行拼凑，改变生命蓝本中的编码信息——至少在某些相对简单的活体组织中已经能够做到。

这是遗传工程的基础。基因材料 DNA 片断可以通过联合使用化学技术和生物技术来生成。对于象细菌这样的微生物来说，可以从其周围的化学溶液中提取 DNA，并向其中注入它们自己的基因编码。如果将如何制造人类胰岛素的编码信息给予一种细菌，那么这种细菌的“生物工厂”就能够精确地生产出糖尿病患者所要求的材料，从而使它们能以正常的方式生活。生理上的很

<sup>\*</sup> 术语“核”的原始用意是指原子的中心部分，这是对已经存在的生物学术语的故意仿谈。

<sup>\*\*</sup> 与杰里米·彻发斯合著《猴子的迷惑》。

多缺陷会导致一系列问题例如糖尿病。通过改变基因材料来去掉这些缺陷这一梦想的实现虽然还比较久远，但这在理论上是完全行得通的。然而，更近一点的一个措施就是对其它动物和植物实施基因工程技术，从而培育出能够满足人们的吃和其它需要的优秀品种。

这方面的细节内容同样可以在其它地方找到。<sup>\*</sup>重要的是我们已经听说了基因工程，已经读到了它的神奇特性以及对将来带来的危险。基因工程以我们对活分子的理解为基础，而对活分子的理解又依赖于我们今天对量子力学的理解。虽然很少有人体会到这一点，但事实确实是这样。没有量子力学，我们就不能解释X射线衍射数据，更不用说其它的事。为了理解基因如何构造和重构，我们就必须理解原子按某种固定的方式进行组合、相互之间必须满足确定的距离、必须以一定的化学键相连接的机制和原因。这个理解是量子力学对化学和分子生物学的贡献。

如果不是威尔士大学的一名成员的话，我也不会对这一点解释的这么详细。在1983年3月份《新科学家》的一篇评述当中，我曾提到“没有量子力学就没有基因工程，就没有固态计算机，就没有核电站（或原子弹）。”一个权威学术机构的一名记者曾对这个评述进行过抱怨，他是亲眼看着基因工程作为一门新科学从其它学科中脱颖而出的。他抱怨说本不应该让格利宾说出这种荒谬绝伦的话。不管多么微妙，在量子力学和基因之间存在什么样的联系呢？现在我希望将这个联系讲清楚。一方面，克里克转变为一个生物物理学家是受了薛定谔的直接影响；DNA双螺旋结构的发现是劳纪斯·布拉格的正规研究方向取得的成果；在更深

• 例如：在杰里米·彻法斯的《人造生命》中。

的意义上，布拉格、薛定谔以及更年青一代的物理学家如例如肯德鲁、佩鲁茨、威尔金斯和弗朗克林对生物问题感兴趣的原因是这些问题仅仅是另一种物理问题，一种处理复杂分子中大量原子的物理。（薛定谔曾指出这一点）。

我不是从《新科学家》中所做的评述后退，而是在加强这个评述。如果你让一个天才的、阅读广泛的、但非科学界的人来概述科学家对我们当今生活的最重要的贡献，那么他肯定会给你开出一张清单。上面包括计算机技术（自动化、失业、娱乐、机器人）、核设施（原子弹、巡航导弹、核电站、三英里岛）、基因工程（新药、无性生物、人造疾病的恐怖、粮食紧张程度的缓解）、激光（全息照相术、死光、微型手术、通讯）。大多数比较聪明又阅读广泛的人可能都听说过相对论。这个理论与人们日常生活毫不相干。他们当中很少有人会意识到其中的每一项内容都置根于量子力学——一门他们可能从来没有听说过、更不用说理解的学科。

他们的人数并不少。使用量子力学方法已经取得了很多进展，人们只知道量子力学的规则很有效，但却并不真正理解它们为什么有效。尽管在过去的六十年中量子力学已经取得了巨大的成就，但是不是每个人都理解了量子力学为什么有效还值得怀疑。在本书的其余部分中，将集中讨论一些更深层次的、经常被掩盖着的问题，同时讨论一些可能性和佯谬。





## 第 三 部 分

### 题 外 话

“ 争论一个问题而没能解决它  
比 解决了一个问题而没有争论它要好！”

约瑟夫·朱伯特

1754—1824



## 第八章

# 机会和不确定性

今天，已经把海森堡的不确定原理当作了量子理论的核心特性。但是这一点并没有马上就被其同事们所接受，而是花了近十年的时间才获得了今天这样的显赫地位。然而，从 20 世纪 30 年代以来，它的地位可能已被吹捧得有点过高。

这个概念起始于 1926 年 9 月薛定谔访问哥本哈根期间，在那里他对玻尔发表了著名的关于“该死的量子跳跃”的评论。海森堡意识到，玻尔和薛定谔之间有时看起来持有不同的观点，其原因之一就是概念上的冲突。那些诸如“位置”、“速度”（或者后来的“自旋”，，）之类的概念，在微观物理世界中具有与其在日常生活中不同的涵义。那么它们的意义是什么呢？这两种世界之间又有什么联系呢？海森堡回到了量子力学的基本方程

$$pq - qp = \hbar/i$$

并且从这个方程出发，证明了位置的不确定量  $\Delta q$  与动量的不确定量  $\Delta p$  之积必定大于  $\hbar$ 。同样的不确定关系适用于任意一对共轭变量、乘起来具有作用单位例如  $\hbar$  的变量。作用单位是能量  $\times$

时间。另一对最重要的共轭变量为能量 ( $E$ ) 和时间 ( $t$ )。海森堡指出，日常生活中的经典概念在微观世界中仍然存在，只不过它们要在不确定关于所揭示的严格意义上才适用。我们对粒子的位置知道得越精确，那么对其动量知道得就越不精确，反之亦然。

## ◆ 不确定性的意义

这些令人吃惊的结果发表在 1927 年的《Zeitschrift für Physik》上。一些熟悉量子力学基本方程的理论物理学家例如狄拉克、玻尔立即就意识到了它的价值。然而很多实验学家却认为海森堡的主张是对他们实验技巧的挑战。他们认为海森堡是在说他们的实验精度不够高，以至于不能同时精确地测定位置和动量，他们希望通过自己的实验来证明海森堡是错误的。然而他们是徒劳的，因为这并不是海森堡所说的。

今天还会产生这样的错误概念。部分原因在于人们传授不确定思想的方式。海森堡自己使用的方式是通过观察电子来证明他的观点。我们只有通过看才能认识事物。这就涉及到物体发射光子并进入我们的眼睛这样一个过程。一个光子对房子这样的物体的扰动并不大，所以房子并不会因为我们的观察而受到影响。然而，对于一个电子来说，情况就大不一样了。因为电子是如此之小，要观察它，我们必须使用短波长的电磁场，并借助于某种实验装置。这种  $\gamma$  射线的能量是很高的，一个  $\gamma$  射线的光子离开电子，然后被我们的实验设备所检测到，这个过程将戏剧性地改变电子的位置和动量。如果是原子中的一个电子的话，那么用  $\gamma$  射线进行观察时，就有可能将它从原子中打出来。

所有这些都是千真万确的，它们给出了不可能同时精确测定电子的位置和动量这一普通思想。不确定性原理告诉我们，根据量子力学基本方程，像电子这样的东西不会同时具有精确的动量和精确的位置。

这个原理具有很深的内涵。就像海森堡在《Zeitschrift》那篇文章的结尾时所说的：“作为一个原理，我们目前不知道它的详细情况。”这就是量子理论和经典力学的确定性思想相分离的地方。根据牛顿的理论，如果我们能知道宇宙中所有粒子的位置和动量的话，我们就能预言未来的所有过程。对于一个现代物理学家来说，这种进行完美预言的思想是毫无意义的。因为我们甚至不能同时精确地知道一个粒子的位置和动量。量子力学基本方程的不同形式——波动力学、海森堡——玻恩——约当矩阵、狄拉克的  $q$  数——都给出同样的结论。其中狄拉克方法小心地避开了与日常生活的比较，所以看起来是最合适的。事实上，在海森堡之前，狄拉克与不确定关系就已经非常接近了。在 1926 年 12 月《皇家学会进展》上的一篇文章当中，他指出，在量子力学当中不能回答涉及到  $q$  和  $p$  的数值的任何问题，尽管人们能够回答只涉及到  $q$  或只涉及到  $p$  的具体数值的问题。

任何一个事件都是由一些其它的具体事件所导致的，这就导致了预测未来的受挫和迷惑。直到 20 世纪 30 年代，哲学家们才理解了这些思想的涵义。同时，尽管已经由量子力学基本方程出发推导出了不确定关系，但是一些有影响的专家仍然由不确定关系出发来传授量子力学。在这种潮流当中，泡利可能是最有影响力的人物。他在一篇详细论文当中，是从不确定关系出发来介绍量子力学的，他还鼓励他的同事赫尔曼·威尔按这种方式来写一本名为《群论和量子力学》的书。这本书首先于 1928 年以德文出版，后来于 1931 年被马休译为英文出版。这本书和泡利的文

章一起，确定了这一代标准教科书的基调，学习这些教科书的学生们后来成为教授后，又以这种方式向他们的学生传授量子力学。结果是，时至今日，许多大学生学习量子力学还是从不确定关系开始。<sup>\*</sup>

这是历史中的一个奇点。必竟，从量子理论基本方程出发可以导出不确定关系，但从不确定关系出发，却导不出量子理论基本方程。更严重的是，不是从方程出发，而仅仅是从使用  $\gamma$  射线来观察电子这样的例子出发来引入不确定关系，很容易使人们产生这样的想法：不确定关系不是自然规律中的一个基本原理，而完全是由实验条件的限制所导致的。你必须先学完一件事，然后回过头来学习另一件事，然后再回过头去理解最初学习的那件事。科学并不总是符合逻辑的，也并不总是老师。结果是一代又一代的学生为不确定关系所迷惑，从而产生错误的概念。不能正确地理解这些概念，是因为你按照科学本身的发展顺序来学习这门理论。然而，如果我们并不急于了解科学的复杂性，而只是想体会一下量子世界的奇怪现象，那么从探索一个惊人的例子中的奇怪特性出发就变得非常有意义了。在本书的其余章节中，你将遇到众多奇怪现象，而不确定关系将仅仅成为其中一例。

<sup>\*</sup> 这并不是一件令人高兴的事。按这种方式学习量子理论，就会把  $p$  和  $q$  之间的不确定关系看作量子力学中最重要的关系。大家都知道这样一句话：“记住  $p$  和  $q$  间的不确定关系。”这句话所起的作用就像是在告诫孩子们要从字母开始学起，告诫学打字的人要从熟悉键盘开始，告诫人们要从字母的细节开始欣赏小提琴演奏那样。不过现在是将这句话作为量子理论中的警句。据我所知，以这种方式学习量子力学仅仅是个巧合。

## ◆ 哥本哈根解释

不确定原理的一个重要方面是它在时间的正方向和负方向上表达着不同的意义。关于这一点并不是总能够引起足够的注意。在物理学当中，一般很少关心时间流的方向。然而在我们所生活的这个世界中却确实应该存在一个时间箭头，从而标明过去和未来。这就使人们对物理学的基本原理产生了迷惑。不确定关系告诉我们，因此不能同时知道位置和动量，从而未来也就是不可预测的——未来具有内孕的不可预言性。然而根据量子力学的规则，人们可以用实验去推算过去，精确地推算出电子在过去某一时刻的位置和动量。未来具有内孕的不确定性——我们不能准确地知道自己将走向何方；但过去是确定的——我们精确地知道我们是从哪里来的。用海森堡的话说就是：“原则上我们知道过去的一切细节。”这个特性与我们对时间的日常生活经验非常一致：从可知的过去走向不确定的未来。这是量子世界中最基本的一个特性。它可以联想到整个宇宙中的时间之箭问题。这个令人更加迷惑的涵义将在以后再来讨论。

当不确定关系的令人迷惑的涵义开始慢慢地被哲学家们所理解时，玻尔也在他曾一度为之深思的概念方面看到了曙光。在量子世界中波动图象和粒子图象都是必要的（事实上，我们既不能说量子是波，又不能说它是粒子），这一互补的思想建立了用来描述不确定关系的数学公式，它表明不能同时精确地知道位置和动量，在相互排斥的意义上它们是互补的。从 1925 年 7 月到 1927 年 9 月，玻尔在量子理论方面几乎没有发表任何文章，后来在意大利的科摩进行了一次演讲，这次演讲的听众非常多。在

这次演讲中他引入了互补的思想，这个思想后来被人们称为“哥本哈根解释”。他指出，尽管在经典物理当中，不管我们是否正在进行观察，我们认为由相互作用的粒子所构成的系统例如钟表机构都具有某种功能。而在量子物理当中，观察者和系统之间存在相互作用，这种相互作用强到不能认为系统是独立存在的。要精确地测定位置，我们就必须使得粒子的动量更加不确定，反之亦然。如果选择一个实验来测量波动特性，我们就排除了粒子特性。没有实验能够同时揭示出粒子性和波动性，等等。在经典物理当中，我们能够在时空坐标系当中精确地描述粒子的位置，并以同样的精度预言它们的行为；在量子物理当中，即使是在一个“经典”理论的意义之上，我们也不能。

这些思想的发展以及理解它们的意义花了很长的时间。今天，根据实验观察结果就可以很容易地解释和理解哥本哈根解释的主要特性。首先，我们已经接受了这样一种概念：观察这一活动本身会改变观察对象。在更实际的意义之上，观察者本身也是实验的一部分——没有时钟能够运转而不管我们是否在观察他们。其次，我们所知道的都是实验结果，我们在观察一个原子时，看到一个电子处于能态 **A**，过一会儿再看发现一个电子处于能态 **B**。我们便猜测是这个电子由 **A** 跳到 **B**，这可能是因为看到了电子的两种状态。事实上，我们甚至不能保证它是同一个电子，我们更不知道当我们没有进行观察的时候，电子正在干什么，我们从实验或者从量子理论的方程中所得到的只能是我们观察到系统处于状态 **A**，以及下一次观察到系统处于状态 **B** 的几率。我们对没有进行观察时所发生的一切一无所知。如果系统真的从状态 **A** 跳跃到状态 **B** 的话，那么我们对其中的过程一无所知。困扰薛定谔的这个“该死的量子跳跃”完全是我们对同一实验所得到的两种结果的一种解释，而且是一种错误的解释，系统



有时处于 A 态，有时处于 B 态。在两者之间的问题，或者说它们是如何从一个状态到达另一个状态，是没有任何意义的。

这才是量子世界的真正的基本特性。有趣的是：当我们进行观察的时候，我们所获得的结果是有限的。而当我们没有观察的时候系统正在做什么，我们却是一无所知的。想到这些，真是动人心弦。

在 20 世纪 30 年代，爱丁顿在他的书《物理学的哲学》中给出了一些最好的例子来说明这个问题。他强调指出，我们所感知到的，我们从实验中学到的，带有明显的感情色彩。他不是简单的叙述，而是举了一个例子来说明这个问题。他说，假设一个艺术家告诉你人头的形状是“隐藏”在一块大理石的后面，你会说这是荒谬的。然而，这位艺术家仅仅使用一把锤子和一个凿子在大理石上进行了一些修理，隐藏着的人头就露出来了。这就是卢瑟福“发现”原子核的方式。爱丁顿指出，“这个发现并没有超越出我们对核的波动描述。”因为没有人曾经看到过原子核。我们所看到的只是一个实验结果，是我们用核的概念来解释所观察到的现象。在狄拉克预言可能存在正电子之前没有人发现过它。今天物理学家们已经宣布，他们已经知道了元素周期表中不存在的大量的基本粒子。在 20 世纪 30 年代，物理学家们又对一种新粒子——中微子——的预言产生了好奇心。他们用这种粒子来解释在放射性衰变中微妙的自旋作用。爱丁顿说：“我并没有被中微子理论所打动，我不相信中微子。”但“我不敢说实验学家没有足够的天才来构造中微子。”

从那时起，已经发现了三种不同的中微子，（以及其相应的反中微子），并且还预言了中微子的其它形式。能仅仅从表面上来看待爱丁顿的怀疑吗？在实验工作者用合适的凿子揭示出它们的形式之前，原子核、正电子和中微子难道真的不存在吗？这些

怀疑直接动摇了我们判断的根基，更不用说我们的概念。在量子世界中很容易提出这样的问题。如果我们按照量子烹调术书上所说的正确地进行操作的话，那么就能完成这样一个实验。这个实验可以得到一系列结果，对这些结果的解释暗示了一种粒子的存在。几乎每次做同样的实验，都会得出同样的一些结果。存在于脑海中的这些基于粒子的解释，比一个去不掉的幻觉强不了多少。当我们没有进行观察的时候，粒子正在做什么，基本方程提供不了任何信息。在卢瑟福之前，没有人观察到原子核；在狄拉克之前，甚至没有人想到正电子的存在。如果我们不能说出没有观察的时候粒子正在做什么，也不能说出没有观察时粒子究竟是否存在，那么就有理由宣布，在 20 世纪之前原子核和正电子并不存在，因为在那之前没有人看到过它们。在量子世界当中，你所见到的只是你所得到的，一切都是假的。你最有希望得到的是一套相互一致的幻觉。不幸的是，就连那些希望都被一些简单实验所否定了。还记得用来证明光的波动性的双孔实验吧？！它们怎么能够用光子来解释呢？

## ◆ 双孔实验

在过去的 20 年中，最好、最著名的一位量子力学老师应该是加利福尼亚技术研究所的理查德·费曼。他在 20 世纪 60 年代出版了三卷《费曼物理学讲义》。与其它书相比，他提供了一套标准的研究教科书。他参加过一系列受欢迎的专题演讲，例如在 1965 年他在 BBC 电视节目中作了一系列讲座。这些专题演讲以《物理定律的特征》出版。费曼生于 1918 年，作为理论物理学家，他的天才在 20 世纪 40 年代达到了顶峰。当时他正在着手建

立电磁理论的量子方程，这个理论被称为量子电动力学。他在1965年获诺贝尔奖。费曼在量子理论发展史中处于特殊的地位。作为第一代物理学家的代表，他的成长过程伴随着量子力学所有基本原理、基本规则的建立。然而海森堡和狄拉克忙于改变当时的状况。当时的状况是新思想并不是按照正确的顺序出现的，概念之间的逻辑关系（例如自旋的情形）并不明显。对于费曼这一代物理学家来讲，虽然存在一系列小的迷惑，但可以看出它们之间的逻辑顺序。如果不能一眼看出的话，那么经过努力思考之后肯定可以看出。这种机会在量子理论发展史中还是第一次出现。所以在这种时刻，不论泡利和他的同事们对不确定关系能否作为传授量子理论的出发点想得多还是少都是非常有意义的。是费曼和近几十年来的那些老师们看到了这些概念之间的逻辑关系，而不是他们归纳了过去几代人从不同点出发的思想。在介绍量子力学的《讲义》的第一页，费曼指出量子理论的基本成分是双孔实验。为什么？因为这个“现象，绝对不可能用经典的方式去解释，它位于量子力学的核心位置。实际上，它包含着所有量子力学的唯一神秘之处，……基本奇异现象。”

就像在本世纪三分之一的时期内，一些伟大的物理学家所做的那样，在本书的前面各章节中，我一直在努力使用日常生活的经验来解释量子思想。现在从最神秘的地方开始，尽量排除日常生活经验的干扰，而用量子力学来解释真正的世界。在量子世界和我们的日常生活经验之间没有类似之处，量子世界的行为是我们一点也不熟悉的。没有人知道量子世界的行为是什么样子的，我们只知道量子世界有其自己的规律。这里只有两点你可以依赖：第一，“粒子”（电子）和“波”（光子）以同样的方式运动——游戏规则是一致的；第二，正如费曼指出的，仅有一个神秘的地方。如果你能够理解双孔实验，那么你就胜利了一半，因为

“事实证明，量子力学中的任何其它情况都可以这样解释：‘你记得双孔实验的情况吗？它们都是一样的。’”\*

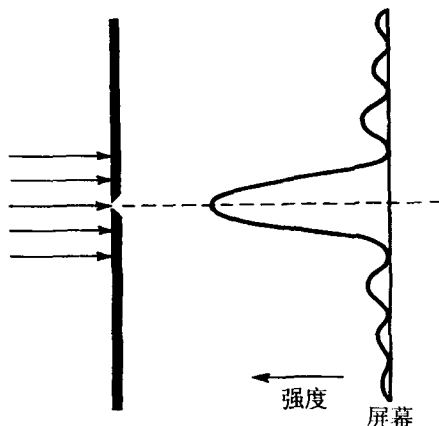


图 8.1 电子的衍射

电子束在通过单缝时会形成线条分布，在线条上最易找到“粒子”。

实验是这样进行的。假设在一张屏（例如一堵墙）上有两个小孔。可以像著名的杨氏实验中那样做成长、窄的双缝，不过圆形的小孔也同样有效。这堵墙的另一侧是另一堵墙，上面装有某种探测器。如果我们用光做实验，那么检测器便可以是白色的屏，在上面我们可以观察到亮斑和暗斑；也可以是照相底片，拍下来之后我们便可以在空闲时再来研究它。如果我们用电子作实验，屏上就应该布置一个电子探测器的列阵，我们也可以想象屏上有一个装有轮子的探测器，它可以自由移动以探测到达屏上一些特定点的电子的数目。只要我们能以某种方式记录屏上的结

果，其中的细节就是不重要的。在具有小孔的墙的另一侧，有一个光子源、电子源或其它。它可以是一盏灯，也可以是电视机中那样的电子枪，其细节也是不重要的。当光子或电子通过两个小孔飞向屏幕的时候，我们设置在屏上的检测器将获得什么样的结果呢？

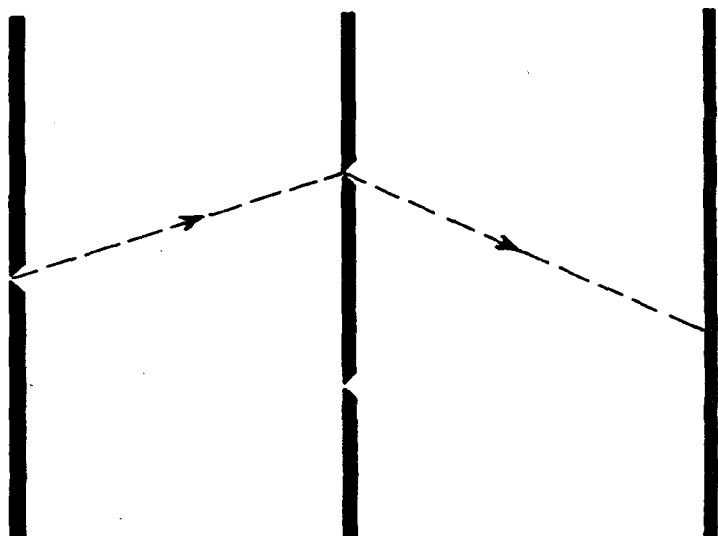


图 8.2 单缝与双缝

一个电子或光子在通过一对双缝中的一个小缝时，“照理说”应该像它通过只有一个缝时的情形一样。

首先，从光子和电子的量子世界走开。先看一下在日常生活会发生什么样的结果。在一个水槽中我们可以做各种实验，通过水槽中的实验很容易观察到波通过小孔后是如何衍射的。振源设备是某种摇把，它可以上下运动以产生规则的波。这些波通过

两个小孔进行传播，沿着检测器形成一个峰和谷的规则图样，这是来自两个小孔的波相互叠加的结果。如果我们堵住其中的一个孔，那么屏上的波的高度将以简单的、规则的方式进行变化。最强的波位于离孔最近的地方，它所经过的距离最短，在其两侧波的振幅都要减小。如果我们再将这个孔堵住而将原先堵住的孔放开，那么我们会观察到同样的结果。波的强度，即波所携带的能量正比于高度或幅度的平方  $H^2$ ，对于每一个独立的小孔来说，它们给出相似的结果。然而如果将两个小孔同时打开，那么情况就复杂得多。事实上，只是在两孔中央所对的屏上出现一个强度非常大的峰，而在峰的两侧强度是非常低的。这里两套波的痕迹被抹平了。当我们沿着屏移动时，发现强度大小是交替出现的。从数学上来说，当两个孔同时打开时的强度不是两个单独的强度之和（平方和），而是两个幅度和的平方。如果分别用  $H$  和  $J$  来标志两波的幅度，那么强度  $I$  不是等于  $H^2 + J^2$ ，而是

$$I = (H + J)^2$$

即  $I = H^2 + J^2 + 2HJ$  多出来的一项是两波相互叠加的贡献，同时为  $H$  和  $J$  可正可负留出了余地，它准确地解释了叠加图样中的峰和谷。

如果我们用日常生活中的大粒子来做同样的实验，（费曼设想了一个怪诞的实验。在这个实验中，用一把机械枪通过墙上的小孔射击，在检测器旁边挂一斗沙子来收集子弹。）那么我们将观察不到任何“相互作用项”。当我们射出大量的子弹后，在不同的沙斗里会发现不同数量的子弹。如果只打开一个孔，那么在屏上子弹的图样将与只打开一个小孔时水波强度的变化相同。但是当两个小孔同时打开时，在不同的接收器中发现的子弹的图样将等于两个孔单独打开时效果的总和——多数子弹都集中在两个孔后面的区域中，在两侧集密度光滑减小，没有相互作用所导致

的峰和谷。在这种情形，将每颗子弹看作一个能量单位，那么强度分布由下式给出：

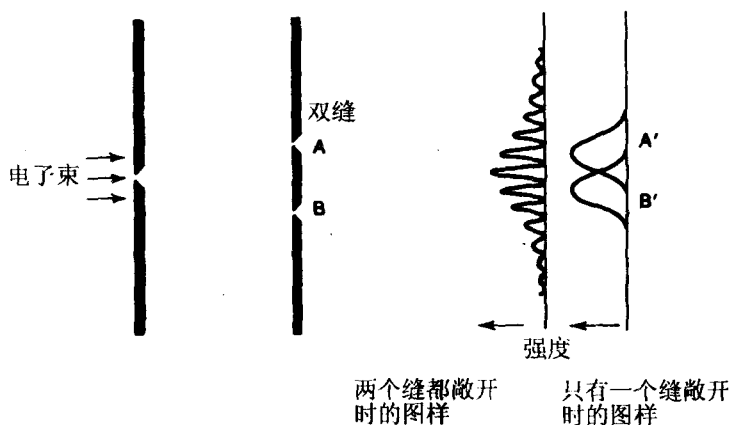


图 8.3 单缝与双缝的不同

对电子或光子说，实验发现当两个缝都开时与只开一个缝然后叠加形成的图象不同。

$$I = I_1 + I_2。$$

式中  $I_1$  相应于  $H^2$ ， $I_2$  相应于  $J^2$ ，没有相互作用项。

你知道下一步将做什么吗？现在假设用光和电子来做同样的实验。用光来做双孔实验，并且重复许多次，产生了与波类似的衍射图样。因为这里存在一个在足够小的尺度上进行操作的问题，所以没有用同样的方式来做电子实验，而是用晶格原子对电子束的散射来做等价的实验。为了叙述的方便，我将继续这个双孔理想实验。将那些在真实的电子实验中得出的确凿结果翻译成双孔理想实验的语言。就像光一样，电子也给出衍射图样。

这说明什么呢？难道这不就是我们已经接受了的波粒二象性

吗？我们接受它是为了构造量子力学，但是我们对其涵义却理解得并不深刻。这样做的时间已经到了。薛定谔波动方程中的函数与电子（或者它描述的任何粒子）是相关的。如果  $\varphi$  是波，那么发现它衍射以及产生相互作用图样并没有什么奇怪的。证明  $\varphi$  按波的幅度来运动，并且  $\varphi^2$  充当波的强度是很简单的。电子双孔实验的衍射图样是  $\varphi^2$  的图样。如果束中有很多电子，它有个简单的解释——它代表在某处找到电子的几率。成千上万的电子通过双孔，能够根据  $\varphi$  波的解释在统计意义上预言这些电子将到达何处，这是玻恩对量子力学的伟大贡献。但是对每个电子来说，发生了什么呢？

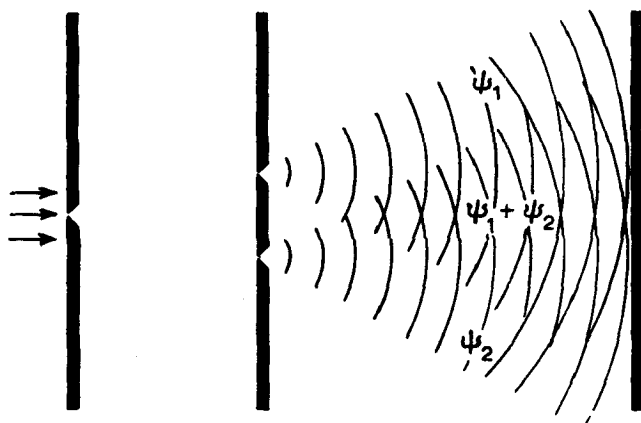


图 8.4 “几率波”的干涉

“几率波”决定了每个“粒子”到哪里去，几率波的干涉与水波的干涉相似。

我们容易理解波（例如水波）可以通过屏上的双孔，波是向外传播的。但是电子看起来仍是粒子，即使它伴随有波的特性。相信每个具体的电子必定通过两孔之一是很自然的。在实验中我



们可以等价地依次堵住其中一孔。当我们这样做时，在屏上我们就获得了单孔实验的通常图样。然而当我们同时打开两个小孔时，我们所得到的并不是像子弹那样的两种图样的简单相加。相反，我们得到的是波相互叠加的图样。如果我们减慢电子枪的速度，以至于一次只有一个电子通过全程，我们仍会得到同样的图样。只有当一个电子通过一个小孔到达我们的检测器之后，再释放第二个电子，如此等等。我们猜测，如果我们耐心地等待足够长的时间，让所有的电子都通过的话，那么在检测屏上得到的就是波的衍射图样。事实上，对于电子或光子来说，如果我们在一千个不同的实验室中做一千个全同的实验，在每次实验中只让一个粒子通过，然后将一千种不同结果相加，我们仍然将会得到衍射的整体分布图样，就像我们在同一个实验中同时使用一千个电子一样。单个电子或者单个光子，在前进过程中到底通过墙上的哪一个小孔，遵守统计规律。只有当这个电子和光子“知道”另一个孔是否打开时，这种统计规律才是有效的。这就是量子世界的最神秘之处。

我们可以尝试着欺骗——当电子通过装置的一瞬间迅速地关闭或打开一个小孔。这并不起作用——屏上的图样总是与电子通过的一瞬间两个小孔的状态（打开或关闭）相对应。我们可以尝试着偷看，“看”电子到底通过哪一个小孔。当等价的实验完成之后，结果更令人迷惑。假设有一个装置，它可以记录下电子通过哪一个小孔，并让它自由地到达检测屏。这时电子的行为就像一个一般的、自尊的正常粒子。我们看到的总是一个电子通过这个或那个小孔，而不会是一个电子同时通过两个小孔。现在检测屏上的图样就和子弹的图样完全一样，没有相互作用的迹象。电子不仅仅知道两个孔是否都是打开的，而且还知道我们是否在观察它们，它们据此相应地调整自己的行为。关于观察者和实验相

相互作用的问题，再也找不到更合适的例子了。当我们努力观察传播出去的电子波时，它坍塌为一个确定的粒子。然而当我们不观

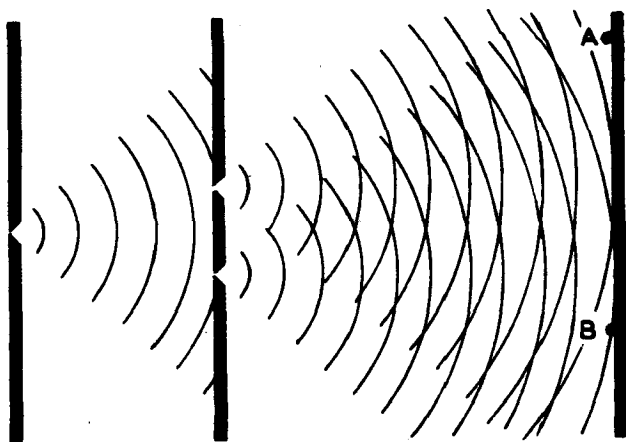


图 8.5 电子出现在 A 点或 B 点的波的行为规则

当我们观察 A 点或 B 点时，要么看到一个电子，要么看不到，我们不能说出当电子通过装置时的“真实”行为。

察的时候，它将保持其敞开的选择性。根据玻恩的几率解释，我们的测量使电子在其一系列可能性中选择一种形式。它通过一个小孔的可能性是确定的，它通过另一个小孔的可能性同样大。可能性之间的相互作用导致我们检测屏上的衍射图样。然而，当我们检测一个电子的时候，它只能在一个地方，这就改变了它将来行为的几率图样，现在它通过哪一个孔就是确定的。但是除非有人观测，自然界本身并不知道电子正在通过哪一个孔。

## ◆ 坍塌的波

我们所看到的只是我们所得到的。只有在实验背景下实验观察才是有效的，而不能用观察结果去说明我们没有观察时候的细节。你可能会说双孔实验指出我们正在处理的是波；同样地，仅仅通过察看检测屏上的花样，你就可以推断出装置上有两个孔，而不是一个。完整的情况是装置、电子和观察者都是整个实验的一部分。在没有观察的情况下我们不能说出电子是通过哪一个孔。（如果观察的话，将是不同的实验）。一个电子离开电子枪到达检测屏，看起来它拥有的是整个实验设备的信息，包括观察者在内。就像费曼在 1965 年对他的 BBC 电视观众所解释的那样，如果你有一台装置能够说出电子将通过哪一个孔，那么可以说电子要么通过这个小孔，要么通过另一个孔。如果你没有一台装置能确定电子通过的是哪一个孔，那么你就不能说电子要么通过这个孔，要么通过另一个孔。他宣布：“在没有观察的时候去断言电子要么通过这个孔，要么通过另一个孔是错误的。”术语“稀奇古怪”已经成为一个使用得如此不当的词，以至于我对引入它都有些犹豫。然而找不到更合适的词来描述量子世界。这确实是稀奇古怪，在某种意义上部分和整体是相联系的。这并不是仅仅意味着实验设施的总和。这个词看起来尽可能地保留了它的选择性、可能性。在量子世界的哥本哈根解释中最重要的事情就是对系统进行观察这一活动使系统从其选择性中选取一个，成为现实。

在最简单的双孔实验中，可能性之间的相互作用可以解释为电子离开电子枪超出视野之后就立即消失了，从而被一系列带电

子所取代。这些鬼电子通过不同的路径到达检测屏。这些鬼电子之间相互作用，当我们察看检测屏时，就会发现相互作用的迹象，即使我们一次只释放一个“真正的”电子也是这样，然而，这些鬼电子只能描述在我们没有进行观察时所发生的情况。当我们进行观察时，这些鬼电子就只剩下一个，其余的全部消失，剩余的这一个因而转化为一个真正的电子。根据薛定谔波动方程，每一个“鬼电子”相应于一个波，或者说一个波包。玻恩用这个波来测量几率。将一个鬼电子从一个潜在的电子列阵中具体化出来的观察都是等价的。根据波动力学，除了描述真正电子的那个波包之外的所有几率波全部消失，这称为“波函数的坍塌”。尽管有些荒诞，但它却是哥本哈根解释的核心，是量子烹调术的基础。然而值得怀疑的是，很多物理学家、电子工程师，还有其他人，他们很满意地使用着量子烹调术。他们发现这些规则在激光器和计算机设计、基因材料的研究方面是如此地可靠。这些规则只是依赖于如下一个假设：神秘的鬼粒子之间时刻都存在着相互作用，在观察过程中随着波函数的坍塌，凝聚为一个真正的粒子。更严重的是，只要我们一停止对电子的观察，不管我们正在观察什么，这个电子就立即劈裂成一个鬼粒子列阵，其中的每一个都沿着它们自己的几率路径通过量子世界。只要我们不进行观察，一切都是假的。只要我们一停止观察，它就不再是真的。

那些对量子烹调术非常满意的人可能是由于他们对其中的数学方程非常熟悉。费曼非常简洁地解释了量子的基本方法。在量子力学中，一个“事件”是一套初始条件和终止条件，不多也不少。一个电子从装置的一侧离开电子枪，到达小孔另一侧的一个特殊的检测器上，这就是一个事件。这个事件的几率由一个数的平方给定，这个数就是薛定谔波函数  $\varphi$ 。如果事件发生的方式不止一种（在实验过程中两个小孔都打开），那么任一个可能事件

的几率（电子到达任一选定检测器上的几率）由  $\varphi$  的平方给定，并且存在相互作用。但是当我们做一次观察，看一下哪一种可能性实际发生（去看电子实际通过哪一个小孔）时，几率分布就仅仅是  $\varphi$  的平方的和，相互作用项消失了——波函数坍塌了。

对所有的物理学家来说，其中的物理不可能是熟悉的，然而其中的数学却是清晰、简洁、熟悉的。只要你不问其中含义就没有问题。然而如果问世界为什么应该是这个样子的，即使是费曼也不得不回答：“我们不知道。”如果追根求底地询问过程的物理图象，你会发现所有的物理图象都融解于一个鬼的世界。在这个世界中，只有当我们进行观察的时候，粒子才看起来成为真实的。在这个世界中，即使是动量和位置这样的特性也仅仅是观察的一个人工制品。难怪一些著名的物理学家包括爱因斯坦在内，都花了几十年的时间来寻找量子力学的解释方法。他们的努力都失败了，这将在下一章中简单介绍。每一个企图否决量子力学哥本哈根解释的新的失败，都加固了几率的鬼世界图象的根基，都为超越量子力学铺好了路，都发展了 *holistic* 宇宙的一个新的图象。这个新图象的基础就是互补性概念的最终表述。然而在我们能看到它的涵义之前只能抓住最后的一颗子弹。

## ◆ 互补性原理

广义相对论和量子力学通常被认为是 20 世纪理论物理学的两大成就。今天，物理学家们所梦寐以求的就是将这两个理论融合为一个大统一理论。他们的努力使人们对自然规律的认识更加深刻，这一点在下面将要看到。然而他们的努力似乎忽视了这样一个事实：在严格意义上这两种世界国家可能是不一致的。

早在 1927 年，在第一次对哥本哈根解释进行评注时，玻尔就强调了这两种理论之间的巨大差别：（广义相对论）是利用纯的时空协调和绝对的因果关系来描述世界；而在量子图象中，观察者和系统相互作用，并且是系统的一个部分。时空协调代表位置；因果关系依赖于对事情如何发展，特别是其动量如何变化的准确了解。经典理论假设人们能同时知道这两者；量子力学告诉我们，时空协调的精度是以动量的不确定性、进而是以因果关系的不确定性而为代价的。广义相对论是一种经典理论。在这个意义上，不能与量子力学相并列，看作是对世界的基本描述。当我们发现这两种理论相冲突时，我们必须将量子理论作为对我们所生活的这个世界的最好描述。

然而，我们所生活的这个世界究竟是什么呢？玻尔指出，只有一个“世界”的思想可能是个错误导向。他对双孔实验提供了另一种解释。当然，即使是在那个简单的实验中，电子或光子能够用来通过两个小孔之一的路径也有很多。为简单起见，我们假设只有两种可能，粒子通过 A 孔或者通过 B 孔。玻尔指出，我们可以认为每种可能代表一个不同的世界。在一个世界中，粒子通过 A 孔；在另一个世界中，粒子通过 B 孔。然而我们所生活的现实世界并不是这两种简单世界中的一种。我们的世界是这两个可能的世界的混合体。这两个可能的世界分别相应于粒子的两种路线，并且这两个世界之间存在着相互作用。当我们来察看粒子通过哪一个小孔时，就只剩下一个世界，因为我们已经排除了另一种可能性。在那种情形下两种世界之间没有相互作用。玻尔指出，根据量子方程，不仅仅是鬼电子，而是鬼现实。鬼世界仅仅存在于我们没有进行观察的时候。这个精心设计出来的简单例子不仅适用于由双孔实验连接起来的两个世界，而且适用于整个宇宙中每一个量子系统进行跃迁所对应的无数种鬼现实。它适用

于每一种可能的粒子所对应的每一个可能的波函数，适用于狄拉克  $q$  数的每一个允许值。位于 **A** 孔处的电子知道 **B** 孔是否是打开的。与这个迷惑相联系，位于 **A** 孔处的电子实际上知道整个宇宙的量子态。这就不难理解如下事实：一些懂得其深刻涵义的专家对哥本哈根解释进行了猛烈的攻击；而其他一些专家，也受到其涵义的困惑，发现其解释是生硬的；还有数量不多的一般人，他们并没有刻意去理解其深刻涵义。这后两种人，一直在满意地使用着量子烹调术和坍塌的波函数来改变着我们生活的这个世界。





## 第 九 章

# 佯谬和可能性

对哥本哈根解释的每一次攻击都加固了它的地位。当爱因斯坦的强有力的思想家们在努力寻找这个理论的毛病时，这个理论的捍卫者们却能够驳倒所有攻击者的论点。质问越多，理论变得越强大。从实用的意义上来说，哥本哈根解释肯定是对的，量子规则的任何更好的解释都必须包括哥本哈根解释，并把它作为一个实用性非常强的观点。这个观点使得实验工作者能够猜测出他们的实验结果，至少在统计的意义上是这样，使工程师们能够设计激光器系统、计算机等等。没有必要再回顾那些曾招致持不同意见者的驳斥的哥本哈根解释的基础性工作，这个工作已由别人完成了。然而，最需引起注意的、最重要的一点可能已在海森堡的书《物理学和哲学》中讲到了。这本书出版于 1958 年。海森堡强调指出，所有的不同意见都“被迫牺牲量子理论中非常重要的对称性（例如波和粒子之间的对称性或者位置和速度的对称性）。我们有很充分的理由假设这些对称性……是自然界的一个

天才的特性，那么哥本哈根解释就是必然的，已完成的每一个实验都支持这个观点。”（见第七章“原子核的内部”）。

在第十一章中将介绍哥本哈根解释的一个进展（不是一个反驳或不同意见）。这个进展仍然包含重要的对称性，是量子世界的一个畅销的图象。因为这个新的图象是在 1958 年由美国的一位博士研究生提出的，难怪海森堡在他那年出版的书中没有提及这个进展。然而在我们继续讨论这些问题之前，追踪一下理论和实验之间的联系是必要的。截止 1982 年，哥本哈根解释无疑已经成为量子世界的一个非常实用的观点。这个故事起始于爱因斯坦，50 多年之后，终止于巴黎的物理学实验室。这是科学史上的一件大事。

## ◆ 匣子里的钟表

玻尔和爱因斯坦之间关于量子理论解释的大争论开始于 1927 年第 15 次索尔菲聚会，一直持续到 1955 年爱因斯坦逝世。爱因斯坦也与玻恩通信讨论过这个问题。从《玻恩——爱因斯坦书信》中可以发现一点争论的火焰。其争论的焦点集中在关于哥本哈根解释预测性的一系列理想实验上——这不是在实验室中完成的真正实验，而是“思想实验”。过程是这样的：爱因斯坦设法想出一个实验，这个实验在理论上可以同时测量两个互补的量，位置和粒子质量，或者在精确的时间测量精确的能量，等等。玻尔和玻恩，将努力证明爱因斯坦的思想实验并不能按要求的方式实现。“匣子里的钟表”这个实验将有助于说明他们之间

争论的情况。

爱因斯坦说，存在一只匣子，在其一侧壁上有一个孔。这个孔被一个可以打开的关闭的挡板所遮盖。挡板的开、关受匣子里的钟表所控制。除了钟表和开关机制外，匣子里充满辐射。这套装置使得钟表在某一精确的、预先设定的时刻将挡板打开，让一个光子在其重新关上之前跑出去。现在称一下匣子的重量，等光子跑出去之后，再称一下。因为质量和能量是联系在一起的，所以两次的重量差可以告诉我们跑出去的光子的能量。从原则上讲，我们可以精确地知道光子的能量，以及它通过小孔的精确的时间，从而驳斥了不确定关系。

在这些争论中，玻尔总是仔细察看测量进行的实际细节，从而获胜。因为在重力场当中，需要测量匣子的重量，所以需要一根弹簧把匣子吊起来。正如爱因斯坦在广义相对论中所指出的那样，钟表的运行速率依赖于它在重力场中的位置。但是当光子跑出去之后钟表运动了，一是因为它的重量减轻了，从而弹簧收缩了；二是因为光子逃出去而导致的反冲。由于其位置可以改变，从而它在重力场的位置就存在一个不确定性，所以钟表的运行速率就存在一个不确定性，即使你是通过往匣子中增添一个小的重物以使弹簧回到它的初始位置，而测量这个额外的重量来确定逃跑的光子的能量，你也不能将不确定性降低至海森堡关系所允许的极限以下。在这种情况下， $\Delta E \Delta t > h$ 。通过综合考虑，玻尔是特意用爱因斯坦的相对论方程来反驳爱因斯坦自己的观点。

这次争论的细节以及涉及到爱因斯坦——玻尔争论的其它思想实验可以在亚伯拉罕·派斯的《难以捉摸的上帝》中找到。派斯强调指出，玻尔主张对虚构的实验作完整的、详细的描述，但

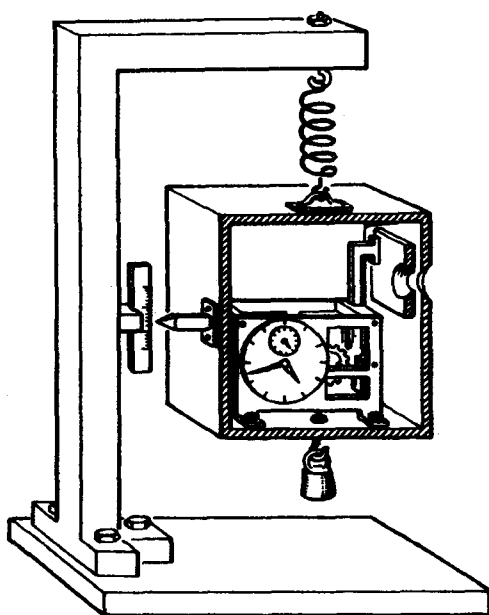


图 9.1 “匣子里钟表”实验

实验所需的条件（重量，弹簧等）总是使得不可能同时排除能量和时间上的不确定性。

没有什么东西是空想出来的。在这种情形下，固定平衡框架的螺栓、用来测量质量所以必须允许匣子移动的弹簧、必须添上去的小的重量，等等，所有的实验结果不得不用经典语言即日常语言来描述，测量的工具也必须具体化。我们可以将匣子牢牢地固定在那个位置，以至于在其位置方面不再存在不确定性，然而那将

不能测量质量的改变。出现量子不确定性这一困境的原因是：我们在努力用日常语言来表述量子思想，这就是玻尔强调实验中的难题和螺栓的原因。

## ◆ EPR 佯谬

爱因斯坦接受了玻尔关于这个或其它思想实验的批评。等到 20 世纪 30 年代早期，他已转向对量子规则的一种新的思想实验。这种新方法背后的基本思想就是使用一个粒子的实验信息去推断另一个粒子的特性，例如位置和动量。这一轮争论在爱因斯坦的有生之年却没能解决，不过它现在已经成功地接受了这个检验。这个检验不是通过一个改进的思想实验，而是通过实验室中的一个真正的实验来实现的。又一次，玻尔胜了，爱因斯坦败了。

在 20 世纪 30 年代早期，爱因斯坦的个人生活陷入了混乱之中。由于害怕发生在纳粹地区的迫害而不得不离开德国。到 1935 年他在普林斯顿安顿了下来。在 1936 年 12 月，他的第二任妻子，艾萨由于长期的疾病而去世。在所有这些困境之余，他还继续为量子理论的解释而困惑。他担心玻尔的辩论，然而在他的内心深处他并没有被说服：这个具有内禀不确定性、又缺乏严格因果关系的哥本哈根解释怎么能够成为现实世界最终、最有效的描述呢？在《量子力学的哲学》一书中，J. 马克斯·詹摩已经非常详尽地描述了各种纠缠的细节和在那个时候爱因斯坦关于这个问题的思想转变。在 1934 到 1935 年期间，几条思路聚集到了一

起。当时在普林斯顿的爱因斯坦正在和鲍里斯·玻多尔斯基以及内森·罗森一起写一篇文章。这篇文章中提出了著名的“EPR”佯谬。尽管它描述的实际上并不是一个真正的佯谬。\*

爱因斯坦及其合作者的论点是哥本哈根解释是不完备的——在时钟机构的背后真是存在着某些规律，它们使宇宙向前运转，仅仅通过统计变化在量子水平上给出不确定性和不可预测性的表面现象。根据这个观点，存在一个客观的世界、一个粒子的世界，在这个世界中粒子同时具有精确的动量和位置，即使你没有观察到它们，也是如此。

爱因斯坦、玻多尔斯基和罗森说：假设有两个粒子，它们之间存在相互作用，它们分离后没有和其它任何东西相互作用，直到实验工作者决定去研究其中的某一个。每个粒子都具有自己确定的动量，每一个都位于空间中的某个位置。即使是在量子理论的规则之内，在它们相互靠近的时候，我们也可以精确地测量两个粒子的总动量和它们之间的距离。过一段较长的时间，当我们决定去测量一个粒子的动量时，自然会知道另一个粒子的动量应该是多少，因为其总量应该保持不变。测定了它的动量之后，我们现在可以精确地测量同一粒子的精确位置。这个测量会影响这个粒子的动量，但是（可以想到）不会影响位于远处的对中的另一个粒子的动量。如果知道它的动量和粒子的原始间隔，那么通过测量位置，我们就能够推算出另一个粒子目前的位置，所以我们已经同时推算出了远处粒子的位置和动量，而违背了不确定原理。或者说，我们在这里对一个粒子进行测量，结果影响了它在

\* 见爱因斯坦、玻多尔斯基、罗森，“物理世界的量子力学描述是完备的吗？”，《物理评论》第 47 卷，第 777—780 页，1935 年。这篇文章被收录在 1970 年 S·托尔敏、哈勃和罗主编的预印本汇编《物理世界》中。

别处的伙伴，这违背了因果律。这是空间中的一个即时“通讯”，称为“类空作用”。

EPR 文章断言，如果你接受了哥本哈根解释，那么它“使得第二个系统的位置和动量依赖于对第一个系统的测量过程。其实这个测量过程对第二个系统没有任何影响。客观的世界没有理由允许这种依赖性。”\* 这就是这个小组以及它的大多数同事与所有的哥本哈根学派所以产生分歧的地方。没有人不同意这个论断的逻辑性，但是他们确实不同意对世界所做的“合理”的定义。玻尔和他的同事应该生活在这样一个世界当中，即第二个粒子的位置和动量没有什么客观的意义，不管你对第一个粒子做了些什么。必须在客观世界和量子世界之间做出一个选择，这是毫无疑问的。有少数人坚持认为，如果要在这两种世界之间做选择的话，将倾向于选择客观世界，而拒绝哥本哈根解释。爱因斯坦就是这少数人中的一个。

但是爱因斯坦是个诚实的人，他时刻准备着接受合理的实验证据。如果他能够活到后来的实验证据出现的话，他肯定会被说服，并承认 EPR 效应是错误的。在我们对宇宙所做的基本描述当中客观世界是没有任何位置的，类空作用、反因果律却确实存在这样一个位置。对这个问题的实验验证非常重要，需要用完整的一章来描述。然而出于完备性的考虑，我们首先应该看一下量子规则内禀的其它一些出现佯谬的可能性——沿时间负方向运动的粒子，最后再看一下薛定谔那个著名的半死的猫。

\* 被派斯引用，第 456 页。

## ◆ 时间旅行

物理学家们经常在纸上或黑板上用一种简单的方式来代表粒子在空间和时间中的运动。这种思想是在纸上按从下往上的方向来代表时间流，用曲线代表粒子的运动。在这种方法中，三个空间维度被压缩成为一个，但是这样产生的图样对那些处理过图形的人是非常熟悉的。其中“Y”轴相应于时间，“X”轴相应于空间。在相对论中，这些时空相图首先作为现代物理学的一个有用的工具而出现。这种相图可以用几何方式来表示爱因斯坦方程中的许多奇异性，这种方式有时更加容易操作，更加容易理解。这种相图于 20 世纪 40 年代由理查德·费曼引入粒子物理学中，在这种背景下通常称为“费曼相图”。在粒子的量子世界中，可以用动量和能量的描述来代替这种空间和时间表示法。这在处理粒子之间的碰撞时更为方便。但是在这里我将坚持使用简单的时空表示法。

在费曼图中，电子的轨迹用一条线来表示。位于一点不动的电子用一条竖直向上的直线来表示，相应于仅仅时间在流动；随着时间缓慢改变其位置的电子用一条与竖直方向成一小的倾角并沿其向上的直线来表示；快速运动的电子用一条沿较大倾角向上的直线来表示。在空间中的运动可以沿向左或向右两种方向之一。如果电子与另一粒子发生碰撞反射，那么表示电子运动的线就可能是锯齿形的。然而，在日常生活的世界中，或者在相对论的简单时空相图中，我们并不期望出现世界线反转指向纸的下方的情形，因为这相应于沿时间负方向的运动。



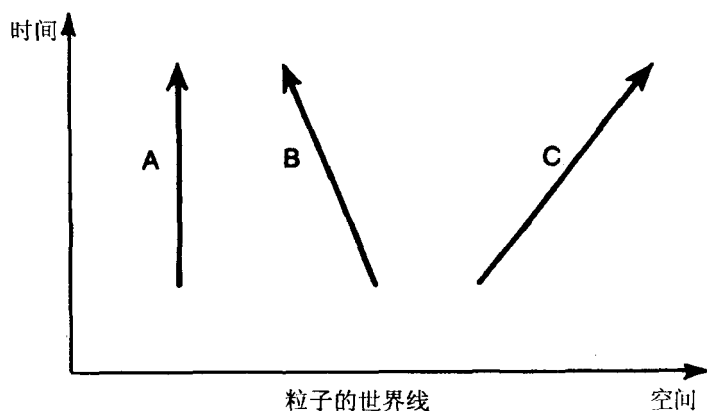


图 9.2 可以用“世界线”来表示粒子随时间在空间中的运动

仍然用电子作为例子，我们可以用简单的费曼图来表示这样一个过程：一个电子在空间和时间中运动，与一个光子碰撞后，改变其运动方向，然后释放出一个光子，沿另一个方向进行反冲。在粒子行为的这种描述中光子是非常重要的，因为它携带着电子力。因为同性电荷相互排斥，所以当两个电子相互靠近时，它们相互排斥而又离开。在这种情形的费曼图中，可以看到两条世界线相汇聚，然后一个电子释放出一个光子（电子反冲离去），并被另一个电子所吸收（这个电子被推向另一个方向）。\*。光子

是电场的携带者。然而它们不仅如此。狄拉克证明一个能量足够

\* 当然这是一个大大简化的图象。我们应该想到电子对相互作用时交换许多光子。同样，在下文中我谈到“一个光子”产生多个正电子 / 电子对时，应该想到在实际过程中我们处理的并不只是一个光子，而可能是一对  $\gamma$  光子的碰撞，甚至是更复杂的情况。

高的光子能够在真空中激发出一个电子和一个正电子，将其能量转化为两者的质量。正电子（负能电子“空穴”）的寿命很短，因为很快就会遇到另一个电子而湮灭，同时释放出其能量。为简单起见，我们用一个光子来表示释放出的能量。

这整个的相互作用过程可以用费曼图非常简单地表示出来。一个在空间和时间中运动的光子能够产生一个电子/正电子对；电子继续运动；正电子遇到另一个电子而消失，并产生另一个光子。然而在 1949 年费曼戏剧性地发现，在费曼图中，正电子沿时间正方向运动的时空描述精确地等价于电子在同样路径上沿时间负方向运动的时空描述。另外，因为光子是其自身的反粒子，所以光子沿时间正向和负向运动的描述没有什么不同。出于实用性的目的，我们可以将相图中光子径迹上的箭头去掉，并且将正电子轨迹上的箭头倒转来描述电子。现在同一个费曼图告诉我们两个不同的过程。一个电子在空间和时间中运动，遇到一个光子，吸收了它并且沿时间负方向被散射，直到它释放出一个光子而受到反冲从而又沿时间正方向运动。不用三个粒子——两个电子和一个正电子——在作复杂的运动，而只用一个粒子——一个在空间和时间中作锯齿形运动的电子——在其运动过程中，在这里和那里与光子发生碰撞，就可以描述这个过程。

根据相图的几何性质可以看出，在以上两种情形之间存在着一种明显的相似性：一种情形是一个电子吸收一个低能光子后，轻微地改变其路径，然后释放一个光子，再次改变其方向；另一种情形是这个电子与光子相互作用而受到剧烈地散射，以至于其寿命中的一部分是沿时间负方向运动的。在这两种情形，相图都是由一条锯齿线构成，即三条直线段加上两个拐角。其中的不同仅仅在于第二种情形的拐角要比第一种情形的更尖锐。约翰·惠勒首先发现这两种锯齿图形代表同一种事件；费曼从数学上严格

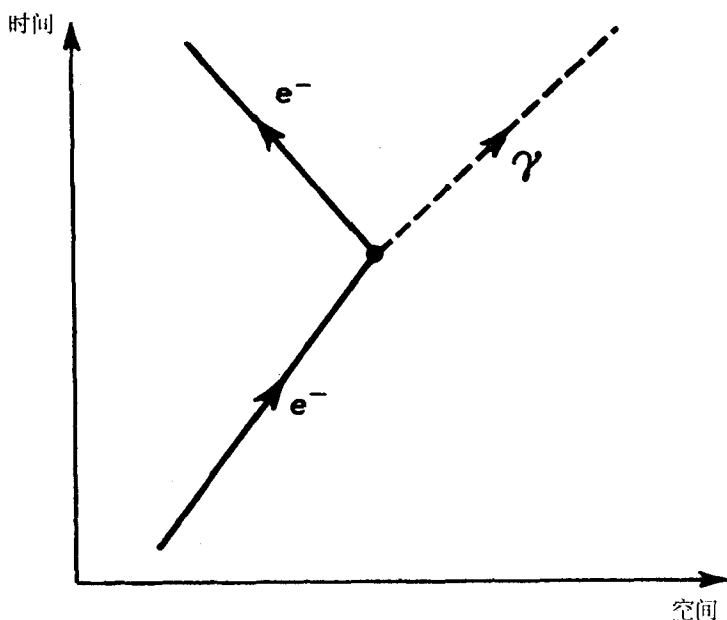


图 9.3 运动的电子释放一个光子 ( $\gamma$  射线) 后以一个角度反冲运动

证明了这两种事件的等同性。

在这里，实际需要接受的东西比初看起来要接受的多得多。所以让我们放慢速度，一点一点地说明。

首先，我在以前的评论中曾提到过光子是其自身的反粒子，所以我们可以将光子轨迹上的箭头去掉。一个光子沿时间正向运动与一个反光子沿时间负向运动是等价的，但是反光子就是光子，所以一个光子沿时间正向运动与沿时间负向运动是相同的。你感到奇怪吗？确实是奇怪。与其它事情不同，这意味着当我们看到处于激发态的一个原子释放出能量落入基态时，我们也可以

说电磁场沿时间负方向到达这个原子并导致了这个转变。这想起来有些小花招，因为我们现在谈论的不是一个光子沿直线在空间中的传播，而是一个波包在原子周围的所有方向上的传播，是一个正在膨胀着的电磁能的球壳，在传播过程中变形和被散射。将这个图象倒过来产生这样一个宇宙：一个中心位于选定原子上的完整的球形波包，产生于一系列散射过程，这些散射过程集中收敛到那个特定原子上。

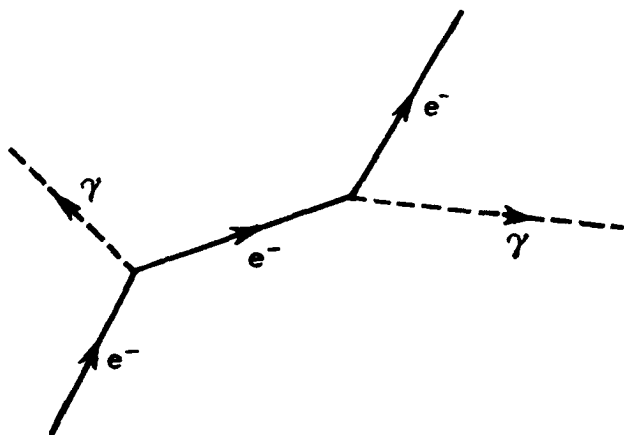


图 9.4 有两次与光子相互作用的电子运动

我不想沿着这样一条思路讲得太深，因为它会使我们偏离量子理论而进入宇宙学。但是它对于我们对时间的理解和对为什么我们看到的时间只沿一个方向流动的理解，确实具有很深的意义。非常简单，现在一个原子发出的辐射将被另一个原子所吸收。这仅仅是可能的，因为绝大多数其它原子都处于基态，这意味着宇宙的将来是冷的。我们所看到的时间流的非对称性，是宇宙的更冷和更热两个时代之间的非对称性。如果宇宙正在膨胀的

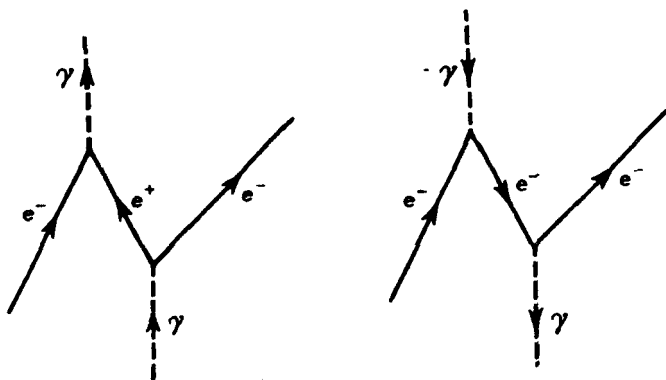


图 9.5 等价的图

在左图中，一个  $\gamma$  光子产生一个电子 / 正电子对，正电子又遇到另一个电子而湮灭并产生另一个光子；

在右图中，一个电子两次与光子相互作用在时空中作锯齿运动，就像在图 9.4 中那样；

这个过程是电子寿命的一部分，在数学上这两个图是等价的。

话，容易组建一个冷的未来以完成必要的吸收，因为膨胀本身产生一个变冷的效应，我们确实生活在一个膨胀的宇宙当中。所以正如我们所看到的，时间的特性最终与宇宙膨胀的特性发生了联系。\*

\* 在 1977 年牛津大学出版社的《Jayant Narliker》的《世界的结构》这本书第六章中，用清楚的、非数学的语言对这些思想进行了详细的阐述。保罗·戴维斯在《现代宇宙的空间和时间》（剑桥大学出版社，1977 年）中，对这些思想进行了更详细的描述。在 J·N·艾斯拉《宇宙的最终命运》（剑桥大学出版社，1983 年）中，可以找到一些数学上的证明。

## ◆ 爱因斯坦的时间

一个光子它是如何“看待”时间之箭的呢？相对论告诉我们，运动的时钟要变慢。当它们逐渐接近光速的时候，时钟变得越来越慢，最后停了下来。确实，在以光速运动时，时间是静止的，时钟的运动是停止的。一个光子自然是以光速传播，这意味着对于一个光子来说时间是没有意义的。从一颗遥远的星球发射出来的光子在到达地球的过程中，用地球上的时钟来测量，它用的时间是数千年。然而对于这个光子本身来说，根本没有花任何时间。根据我们的观点，宇宙背景辐射中的一个光子，从产生宇宙的大爆炸开始，已在空中飞行了 150 亿年，然而对于光子本身来说，大爆炸时刻和我们现在是同一时刻。费曼图中光子径迹上没有箭头，不仅仅是因为光子是其自身的反粒子，而且是因为对光子来说时间的运动是没有什么意义的——这就是它是自己的反粒子的原因。

那些企图将东方哲学和现代物理等同起来的神秘主义者和普及者们看起来忽视了这一点——宇宙中的万物，过去、现在和将来都通过一张电磁辐射网与其它万物相联系，这张电磁辐射网能同时看到万物。由于光子可以产生和被破坏，所以这张网是不完备的。但是现实情况是，时空中的一条光子路径可能连接了我的眼睛和北极星。在光子看来，从星体到我的眼睛，时间并没有流动，这只是我自己的知觉而已。另外一个同样有效的观点是将路径看作一个永久的特性。围绕着这些特性，宇宙在变。在宇宙的那些变化当中，发生的事情之一就是我的眼睛和北极星在路径的

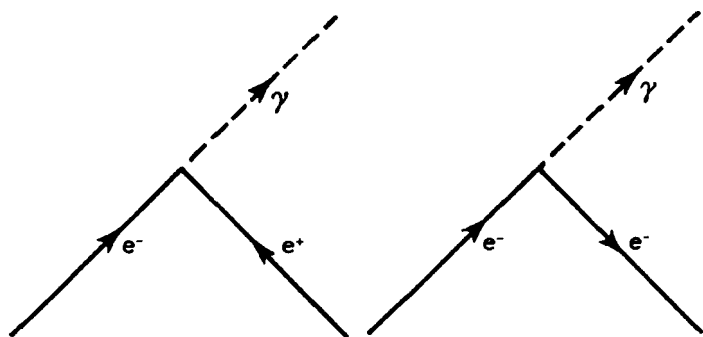


图 9.6 通常一个粒子 / 反粒子对的湮灭可以描述为一次剧烈的散射，散射非常强烈可使得粒子沿负时间方向运动

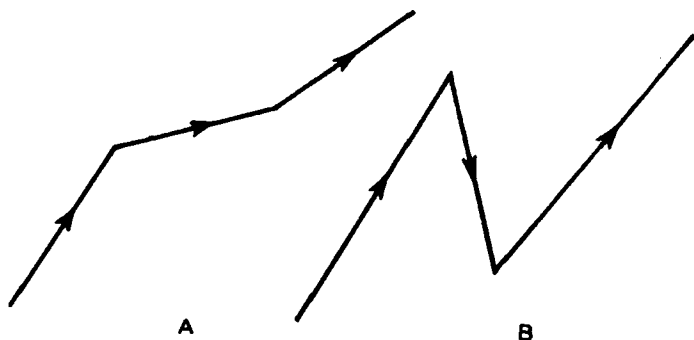


图 9.7 理查德·费曼证明了具有两次转折的时空相同，在数字上是等价的

两端。

费曼图之中其它粒子的路径是怎样的呢？它们的“真面目”如何？对于它们，我们能作同样的解释。假设存在一张费曼图，

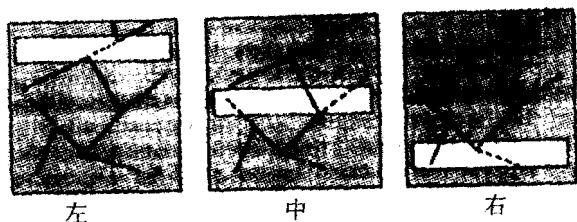


图 9.8 如果所有粒子的径迹都以某种方式固定在某一时空上，那么我们将看到运动和相互作用的幻觉，就像我们的知觉随着时间从现在向将来移一样。难道粒子的运动仅仅是由我们时间流动的幻觉造成的吗？

包含了所有的空间和时间，上面画出了所有粒子的径迹。假设图中存在一条狭缝，在这条狭缝中只允许有限的时间流过。将这条狭缝平稳地移向纸的上方，通过这个狭缝，我们看到一个连续变化的全景图：相互作用粒子的运动、粒子对的产生和湮灭，以及更复杂的事件。尽管我们所做的一切，就是扫描固定在时空中的事情。是我们的知觉在动，而不是现实在变。因为我们被锁定在一个平稳运动的狭缝当中，我们看到的是一个正电子沿时间正方向的运动，而不是一个电子沿时间负方向的运动，但是两者解释同样的现实。约翰·惠勒已经走得更远。他指出，我们可以想象宇宙中的所有电子都被相互作用联系着，从而构成了时空中非常复杂的锯齿形路径，这些路径向前和向后。这就是导致费曼的决定性工作的原始灵感的部分内容。这一工作是这样一幅图象：“唯一的一个电子在时间编织机上前后穿梭、前后穿梭、前后穿梭，编织出丰富的花毯。这张花毯上可能包含了世界上所有的电



子和正电子。”\* 在这样一种图象中，宇宙中各处的每一个电子都仅仅是真正电子的世界线的一个不同的片断。

那个思想在我们的宇宙当中并不奏效。为了使它奏效，你将期望发现如下情形：世界线逆片断的数目、正电子的数目与正片断的数目、电子的数目是相同的。在这个简单水平上，现实固定的思想即我们的观点是唯一改变的东西，这一思想可能也并不成立。它如何与不确定原理相符合呢？\*\* 与日常生活经验相比，如果将这些思想合在一起，那么我们会获得对时间特性的更好的理解。日常世界中的时间流是一个统计效应，这主要是由于宇宙的膨胀，从而由一个较热的状态向一个较冷的状态演化。但即使是在那个水平上，相对性方程也允许时间旅行，这个概念可以通过时空相图很容易地加以理解。\*\*\*

在空间中的运动方向可以是任意的，并且可以返回。在日常世界中时间的运动只能朝着一个特定的方向，这些看起来都在一个特定的水平上发生。很难想象出四维的空间——时间图象，其中任两个方向相互成直角，但是我们可以撇开一个方向，想一下它应用到三维中的一维时，这个严格的规则意味着什么。这就好像我们只能向上或向下运动，向前或者向后运动。但是向旁边的运动受到限制：只能向左，也就是说向右的运动是被禁止的。如果我们在孩子们的游戏当中引入这样一条中心规则，然后告诉一

\* 出自本耐斯·霍夫曼的《星子的奇怪故事》（派里肯主编，1963年）第217页。这段引文是以惠勒自己的解释为基础的。

•• 与我在这个简单的探索中所表明的相比，费曼确实走得更远。他发展了一套处理世界线包括几率的方法，从而产生了量子力学的一个新的版本。不久以后弗里曼·戴逊就证明这个版本的结果与理论的原始版本精确地等价，但它与后者相比，正被证明是一个更强有力的数学工具。

\*\*\* 在我的书《空间扭曲》中，更加详细地阐述了相对论对于我们理解宇宙和时间旅行的意义。

个孩子，找一条路到右边（“时间的反方向”）去领奖品，那么这个小孩用不了多久就会找到一条路，从而走出圈套。非常简单，只需要转过去面对另一条路，将左换成右，通过向左运动而到达奖品处。同样地，假设你是躺在地板上，奖品就在头的上方。在你重新站起来作为旁观者之前，你可以向上去抓奖品，然后回到原始位置。\* 相对论所允许的时间旅行技巧是非常相似的。它涉及到空间——时间结构的变形，以至于在空间——时间的局部区域，时间轴指向一个方向，这个方向等价于空间——时间未变形区域中三个空间方向中的一个；其它任一个空间方向处于时间的地位。通过用空间来换时间，这样一个设备将产生一个真正的时间旅行，一开始在那里，后来又回来了。

美国教学家弗兰克·蒂普勒已经通过计算证明了这种技巧在理论上是可行的。时空可能会由于很强的引力场而变形。蒂普勒的假想时间机器是一个非常大的圆筒，容纳的物质相当于将我们的太阳挤压到一个半径为 10 千米、长 100 千米的体积之中，密度与原子核相当，每毫秒旋转两次，围绕着它将空间——时间织构拉开。圆筒表面的转速为光速的一半。这是连最疯狂的发明家都不可能在其后院中建立起来的东西，问题是我们所知道的物理定律却允许这样的东西存在。宇宙中甚至存在这样的物体，它具有太阳的质量、原子核的密度，每 1.5 毫秒自旋一次，仅是蒂普勒的时间的  $1/3$ 。这就是 1982 年发现的所谓“毫秒脉冲量”。这个物体非常不可能是圆柱体的——这种快速的旋转肯定将其展平为薄煎饼形。即使如此，在其邻域时空肯定会发生某些非常奇特

\* 我分别在几个孩子和成年人中尝试过。大约有一半的孩子发现了技巧，然而成年人中却没有几个能够发现。那些没有发现技巧的人埋怨说这是欺编。事实上，根据爱因斯坦方程，自然本身无非就是这种欺编。

的变形。“真正的”时间旅行并不是完全不可能的，只是非常困难，可能性非常小而已。这些变形可能使时空成为一个非常大的劈形，其边缘非常之薄。这使得在量子水平上时间旅行的正常状态是可以接受的。无论是量子理论还是相对论，都允许某种时间旅行。两种理论都能接受任何东西，不管它们看起来是如何的不可思议，对此，都必须认真地加以考虑。事实上，时间旅行是粒子世界奇怪性质中的一个组成部分。在粒子世界中，只要速度足够快，你甚至可以做到“无中生有”。

## ◆ 无中生有

在 1935 年，大阪大学 28 岁的物理学讲师汤川秀澍对如下现象提出了一个解释：尽管原子核中正电荷之间的电场力将倾向于使原子核拆散，但是实际上原子核中的中子和质子仍能够聚集在一起。显然，必定存在另外一种更强的力，它能克服相应情况下的电场力。电场力是由光子来携带的。汤川秀澍指出，这个强的核力也必定由某种粒子所携带。他将这种粒子称为“介子”，通过将量子规则应用到核中来计算其质量（其质量介于电子和质子之间，故称为“介子”）。像光子一样，介子是玻色子，但其自旋为一个单位，而不是零。与光子不同的是，其寿命非常短，这就是在核外只有在特定条件下才能够看到它们的原因。随后，发现了一系列介子。不太像汤川秀澍所预测的，但足以证明与通过交换光子来传递电场力相类似，核粒子通过交换介子来传递强核力的思想是有效的。汤川秀澍于 1949 年获得了诺贝尔奖。

以上实了核力、电场力都可以认为是粒子间的相互作用，这一思想是当今世界物理观点的基石。现在认为，所有的力都是相

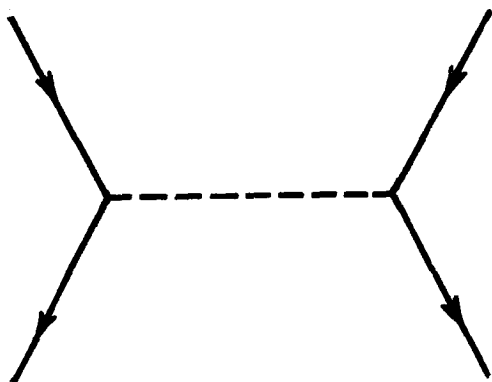


图 9.9 在费曼图中，两个粒子通过第三个粒子进行相互作用，这可能是两个电子通过交换光子产生相互排斥作用

相互作用。但是这些携带相互作用的粒子是从何而来的呢？根据不确定性原理，它们没有来源，是无中生有。

不确定原理适用于时间和能量的互补特性，以及位置和动量的互补特性。在粒子水平上，一个事件所涉及的能量方面的不确定性越小，那么关于这个事件的时间方向的不确定性就越大，反之亦然。一个电子不是孤立存在的，因为在足够短的时间内，它可以从不确定关系中借用能量，并用它去产生一个光子。其中隐含的问题是，一旦一个光子被产生，它几乎立即被这个电子所吸收，以至于大世界观察不到这个瞬时的能量不守恒。光子存在的时间非常短，少于  $10^{-15}$  秒，但是它们一直在电子周围不断地跳进和跳出，这就好像是在每个电子周围都存在着一个“真正”的光子云。只需从外部借一点点能量，或者一个很小的推动力，它就可以逃逸出来，并成为真正的光子。当原子中的一个电子从激

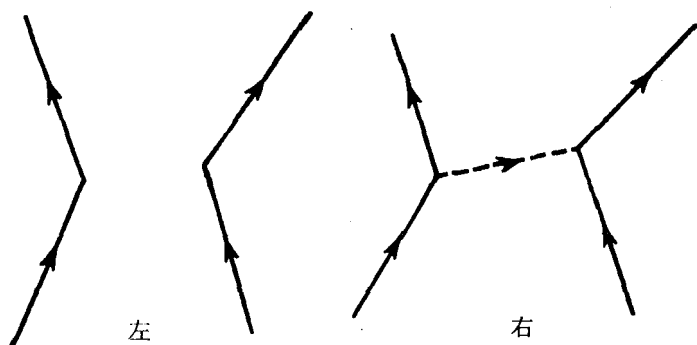


图 9.10 “超距作用”（左）的旧思想被力是由粒子来传递的思想所代替

发态落入一个更低的状态时，将其多余的能量传递给一个光子，使其自由地飞出去。捕获下一个自由光子的电子吸收能量。同样的过程使核子胶合在一起。

粗略地讲，质量和能量是可相互转化的，力“程”与起胶合作用的粒子的质量成反比；如果涉及的粒子不只一个，那么力“程”与最轻的粒子的质量成反比。因为光子的质量为零，所以从理论上讲电磁力的力程是无穷远，尽管在距离带电粒子无穷远的地方，电磁力变得无穷小。强核力的力程表明，汤川秀澍假设的这种介子具有非常小的力程，它的质量肯定介于电子质量的 200 倍到 3……倍之间。当粒子运动时，介子是大量的。1946 年在宇宙射线中发现了这种涉及到非常强的核力的特殊介子，称它们为  $\pi$  介子。中性  $\pi$  介子的质量是电子质量的 264 倍，带正电和负电的  $\pi$  介子的质量都是电子质量的 273 倍。换句话说，它们的质量大约是质子质量的七分之一。然而核中的两个质子通过不断地相互交换  $\pi$  介子而聚集在一起。 $\pi$  介子的质量与质子的质量相

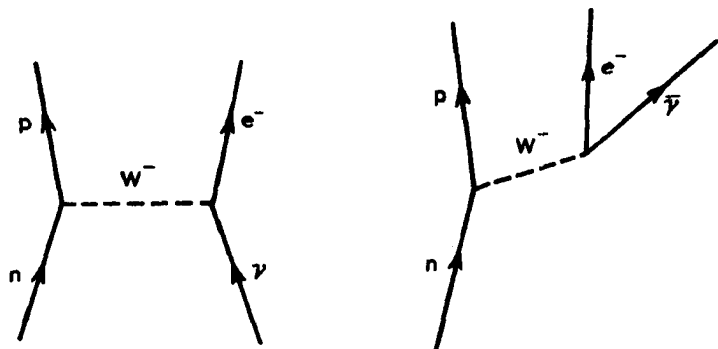


图 9.11 一个粒子作用的两种方式

仅仅将一个入射的中微子改变成一个出射的反中微子，这是中子转变为质子、电子和中微子的  $\beta$  衰变过程

比是个很好的分数。在这个过程中，质子自身的质量并不减小。因为质子可以利用不确定原理，所以这也是有可能的。一个  $\pi$  介子产生、运行到另一个质子，然后消失，所有这些都发生在不确定性原理所允许的、宇宙正在眨眼而“没有看”的瞬间。只有当质子和中子即核子靠得非常近的时候，或者用一句不太合适的日常用语来说，只有当它们相互“接触”的时候，它们之间才可能交换介子。否则，真正的  $\pi$  介子就不能够通过不确定原理所允许的时间缝隙。所以这个模型很清晰地解释了为什么这么强的核相互作用对核外的核子没有影响，但却对核内的核子具有非常强的作用。\*

所以质子活动范围的中心更是质子本身。（电子活动范围的

\* 实际上，汤川秀澍是用另一种方法来进行计算的。因为它知道强核力的力程，所以他可以对核子间相互作用时间的不确定性加以限制。这反过来使他大体上知道了传递相互作用的粒子的能量或质量。

中心也是电子本身。) 在空间 ( 和时间 ) 中运行时，一个自由的质子不断地发射和吸收真正的光子和介子。看待这个现象还有另外一种方法。假设一个质子仅仅发射一个  $\pi$  介子，然后又吸收它，很简单，但可以换个方式来看这个问题：最初只有一个质子，然后有了一个质子和一个  $\pi$  介子，最后又只有一个质子。因为质子是不可区分的粒子，所以我们完全可以说最初的质子消失了。释放出其能量，再加上从不确定性原理借来的一点能量，产生了一个  $\pi$  介子和一个新的质子。很快，这两个粒子相碰撞而消失，并产生第三个质子，从而使宇宙中的能量恢复守恒。然而，为什么就此止步呢？

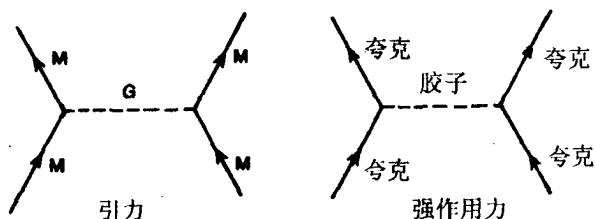


图 9.12 所有的基本力都可表示为粒子间的相互作用

在这些例子中，两个大粒子通过交换引力子而相互作用，两个夸克通过交换胶子而相互作用。

那么，原始的质子为什么不能释放出其能量，再加上一点，从而产生一个中子和一个带正电的  $\pi$  介子呢？是的。那么为什么一个质子不能与一个中子交换这个带正电的  $\pi$  介子，从而成为一个中子，而中子变成成为质子呢？这也是可能的。这就好像是中子“转变成”质子和带负电的  $\pi$  介子的逆过程一样，是可能的。

既然没有理由就此止步，那么现在的情况开始变得复杂化了。类似地，在恢复正常的很短时间内，一个  $\pi$  介子可以转变为

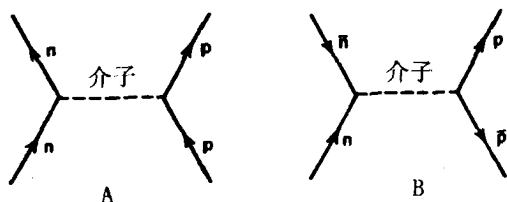


图 9.13 力的概念和粒子的概念是不可区分的

像通常一样，这些图中的时间方向是任意给定的：在情形 A 中，一个中微子和一个质子均沿纸面向上，它们通过交换介子相互作用；在情形 B 中，一个中子和一个反中子沿纸面从左向右运动，它们相遇并湮灭，产生一个介子，随后介子又衰变成质子 / 反质子对；这种“相互作用”表明力的概念和粒子的概念是不可区分的。

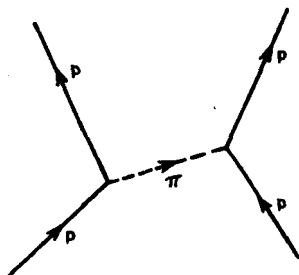


图 9.14 两个质子通过交换  $\pi$  介子而相互排斥

一个中子和一个反质子，这个过程甚至可以发生在真正的  $\pi$  介子上。这个  $\pi$  介子自身是质子和中子费曼图的一个部分。一个安静地运行中的质子，可以炸成为相互作用着的真正粒子嗡嗡响的网络，随后衰减回复到其自身。所有的粒子都可以视为参与“宇宙



舞蹈的”其它粒子的团体。事情还没有结束。到目前为止，我们还没有做到“无中生有”，尽管我们已经“以少生多”。现在，让我们继续讨论下去。

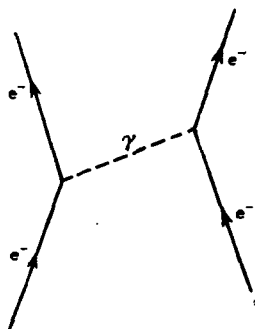


图 9.15 两个电子通过交换光子而相互作用

如果说在足够短的时间之内，粒子的可用能量具有内禀的不确定性，那么我们就可以说：在极短的时间之内，粒子的存在与否也具有内禀的不确定性。假设遵守一定的规则，例如电荷守恒和粒子、反粒子数之间的平衡，那么就没有理由阻止整车的粒子“无中生有”地出现，随后又相互复合而消失。这一切均发生在大宇宙意识到这个偏差之间。如果能够消失得足够快的话，那么一个电子和一个正电子可能会“无中生有”地产生；这个规则同样适用于一个质子和一个反质子。严格地讲，只有在质子的帮助下电子才能完成这种花招。在介子的帮助下，质子提供所需要的“散射”。一个并不存在的光子产生一个正电子/电子对，然后它们湮灭并产生最初产生它们的光子——记着，光子并不知道将来与过去的不同。同样地，可以认为一个电子在时间的漩涡中追赶着自己的尾巴。首先它出现了，从真空当中跳了出来，就像兔子从魔帽中蹦了出来一样。它会沿时间正方向运行一段很短的距离。一旦它发现自己的错误，知道自己的不现实性，就会转而朝其来的地方运动，沿时间负方向回到其出发点。在那里，它又改

变了方向，所以这个循环可以在光子相互作用的帮助下继续下去。光子相互作用是一个高能散射事件，发生在每一次循环的“终点”。

根据最新的描述粒子行为的理论，即使在没有“真正的”粒子存在的情况下，真空也是一个假想粒子的沸腾的集体。这不仅仅是在拼凑方程。不允许这些真空涨落效应的存在，我们就不能得出有关粒子散射问题的正确答案。这就是这个理论正确性的强有力的证据——直接基于不确定关系。虚拟粒子、真空涨落和其余的量子理论，它们与波粒二象性、不确定原理、超距作用一样是真实的。在这样一个世界中，将薛定谔的猫称之为“佯谬”，这看起来是不公平的。

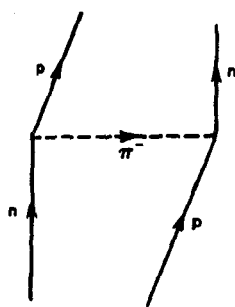


图 9.16

在一个带电的  $\pi$  介子的帮助下，一个中子通过与一个质子相互作用而变成了质子，同时质子变成了中子

## ◆ 薛定谔的猫

著名的猫佯谬最初发表于 1935 年（《Natur wissenschaften》第 23 卷 812 页），与 EPR 文章是在同一年。爱因斯坦将薛定谔的意见看作是证明“对世界的波动描述是不完备的”的“最佳途径”。\* 猫佯谬和 EPR 观点在今天的量子理论中还经常讨论着。然而，与 EPR 论断所不同的是，猫佯谬还没有解决到使大家都满意的程度。

• 作为例子，参见薛定谔的《关于波动力学的信》第 16—18 封。

然而，这个思想实验背后的概念是很简单的。薛定谔提议，我们可以设想，在一个匣子中存在一个辐射源、一个用来记录辐射粒子的检测器（可能是一个盖草计数器）、一瓶毒药例如氰化物和一只活猫。匣子中的装置使得检测器的打开时间仅足以使辐射材料中的一个原子有百分之五十的机会发生衰变，同时检测器将记录下这个粒子。如果检测器确实记录下一个这样的事件，那么玻璃瓶将破碎，因而猫将死去；否则，猫将活着。在我们打开匣子进行察看之前，是没有办法知道实验结果的。辐射衰变的发生完全是偶然的，除了在统计的意义之外是不可预测的。根据严格的哥本哈根解释，就像在双孔实验中电子通过两孔的几率相同一样，这两种可能性的重叠将产生一个态的“迭加”。所以在这种情形下，辐射衰变与否具有相等的几率，从而产生一个态的迭加。这整个实验，猫和所有的一切，都受这样一个规则所支配：只有当我们观察这个实验的时候，迭加才是“真的”，只有在观察的一瞬间，波函数才坍塌为其中一个态。在我们向里面观察之前，辐射样品既是衰变的，又是不衰变的；毒药瓶既不被打破，又被打破；猫既是死的，又是活的；既不是活的，也不是死的。

想象一个基本粒子，例如电子既不在这里又不在那里，而是以一定几率在空间分布着的，这是可以理解的。然而难以想象的是一个非常熟悉的事物，像猫处于这种形式的假死状态。薛定谔构想这个例子是为了说明在严格的哥本哈根解释中存在着瑕疵，因为很显然这只猫不可能同时既是活的，又是死的。但是，这种

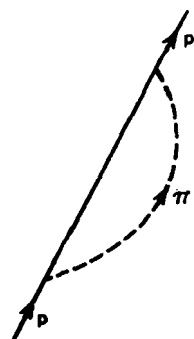


图 9.17

一个质子也能产生一个“虚” $\pi$ 介子，不过它能迅速地吸收

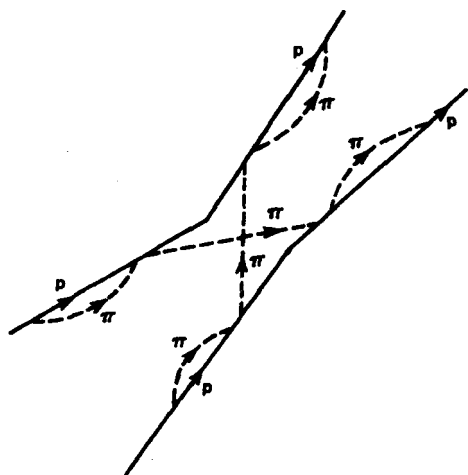


图 9.18 两个质子之间通过交换  $\pi$  介子相互排斥（此图比图 9.14 更加复杂）

情形相比如下的“事实”——一个电子不可能同时既是粒子又是波——更加“明显”吗？常识已经作为量子世界的向导接受了检验，这也是所希望的。对于量子世界，不要相信我们的常识，而要相信我们直接看到的或者用实验设备准确检测到的，对于这一点我们是有把握的。如果不进行观察，我们就不知道匣子中发生了什么。

关于匣子猫的讨论已经持续了五十年。一派认为这是不成问题的，因为猫完全可以确定它自己是活的还是死的。猫的意识足以使波函数坍塌。在那种情形下，你从何谈起呢？一只蚂蚁或一个细菌能知道所发生的一切吗？换个角度来考虑，既然这仅仅是个思想实验，那么我们就可以假想用一个人来代替匣子中的猫（这个人有时称为维格纳的朋友。尤金·维格纳是一位物理学家。

他曾经深刻地思考了匣子中的猫这一实验的有关变形。也巧，他是狄拉克的内弟）。匣子中的人显然是一个胜任的观察者，他具有量子力学的能力，足以使波函数坍塌。当我们打开匣子时，假如我们有幸看到他还活着，那么我们有把握他不会向我们报告任何神秘的实验，而仅仅会告诉我们：辐射源在给定的时间内没有辐射任何粒子。然而对于匣子外面的我们来说，对于匣子中的情况所能做的唯一正确的描述——就是它处于多个态的迭加态，除非我们进行观察。

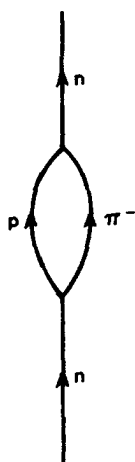


图 9.19

一个中子可以转变为一个质子和一个  $\pi$  介子，  
二者可以很快地复合还原。

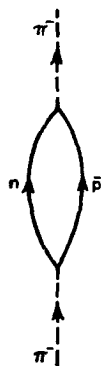


图 9.20

很短时间内，一个  $\pi$  介子可以产生一对虚中子 / 反质子

可以依此类推下去。假设我们对这个充满阴谋的世界提前宣布这

个实验。（但要避免新闻界的介入，关起门来做这个实验。）那么当我们打开匣子迎接我们的朋友，或者拉出里面的尸体时，外面的报告者并不知道正在发生什么事情。对于他们来讲，我们的实验室所在的整个大楼都处于一些状态的迭加当中。如此等等，在一个无限的复归当中变化。

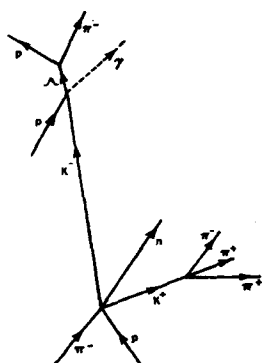


图 9.21 几个粒子之间真实相互作用的费曼图  
这幅图是由气泡室照片所揭示的，在 F·卡普拉的《物理学之“道”》中作了描述

如果我们用一台计算机来代替维格纳的朋友，这台计算机可以记录下辐射衰变与否的信息，那么，一台计算机能使波函数（至少在匣子里面）发生坍塌吗？为什么不能。然而根据另一种观点，与实验结果有关的不是人的意识，或者活着的生物的意识，而是这样一个事实：事件的结果在量子水平上进行了记录，或者对宏观世界造成了影响。辐射原子可能处在多个态的迭加当中，但是只要盖革计数器已经“看到了”衰变结果，那么这个原子就被迫进入这个或那个状态，或衰变或者不衰变。

因此，与 EPR 思想实验不同，匣子中的猫这一实验确实具有佯谬的意义。在不接受“死——活”猫这样一个“现实”的情况下，是不可能与严格的哥本哈根解释达成一致的。因为原因和结果的无限复归，这个佯谬曾经使维格纳和约翰·惠勒考虑过这种可能性：高级生物的观察导致了整个宇宙的“真实”存在。量

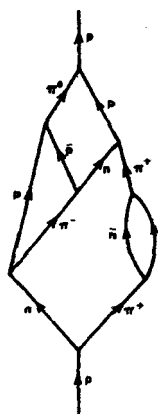


图 9.22 参与虚相互作用网络的单个质子  
参见福特·布萊斯德爾的《基本粒子世界》，紐約，  
1965年；這種相互作用時刻都在進行着，看起來任何  
粒子都不像初看起來那樣孤獨。

子理论内禀的所有几率性所导致的最重要的佯谬，是薛定谔的猫的直系后代。它开始于惠勒所称的“衰变选择实验。”

## ◆ 供人分享的宇宙

在许多不同的文章当中，惠勒对量子理论的涵义作了大量的解释。他在这一问题上的思考长达四十多年。在庆祝爱因斯坦百年诞辰的学术研讨会论文集《均衡当中的一些奇怪现象》（哈里·沃尔福主编）中可能收录了他对“供人分享的宇宙”这一概念的最清晰的探索。在那篇文章（本卷的第 22 章）当中，他叙述了一件轶事：在一次晚宴上，他正在与一伙人玩二十个问题的老游戏。当轮到他的时候，他被从房子里请了出去，以便让其他的客人能够决定采用什么样的话题。他被关在外面的时间“令人难以置信”地长，这说明其合作者们正在选择一个非常难的词，或者正在捣鬼。当他回来的时候，从客人们依次所作的回答中，他发现最初对诸如“它是动物吗？”、“它是绿色的吗？”这类问题的回

答是很迅速的。但是随着游戏的进行，回答问题所用的时间越来越长。所有的同事大概已经同意了这个话题，并且需要作的回答仅仅是“是”或“不是”。这真是一个奇怪的过程。被问的人为了作一个简单的回答，为什么要费这么多的脑筋呢？最后，只剩下一个问题了。问题是“它是一片云吗？”，惠勒回答“是”，于是引起了同伴们的哄堂大笑。他被搞得莫名其妙。

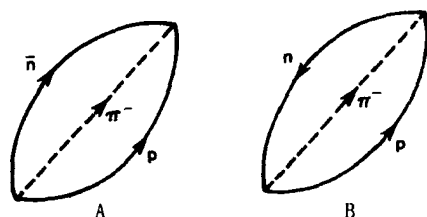


图 9.23 质子、反中子和  $\pi$  介子可以通过真空涨落产生，但只存在于湮灭之前的非常短暂的瞬间（图 A）；这个相互作用可以用时间环来表示，一个质子和一个中子沿着  $\phi$  介子所连接的时间环的边界相互追逐（图 B）；这两种描述法同样有效

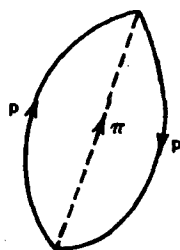


图 9.24 一个质子可以沿着  $\pi$  介子所连接的时间环的边界追逐自己

已经有一个计划，那就是不约定即将猜测的对象。但是每一个被询问的人，都必须牢记心中真实的对象，并提供可以信赖的答案，并且这个答案必须与前面所有的回答相一致。这样随着游



戏的进行，对提问者和被提问者来说，都变得越来越难。

这与量子理论有什么关系呢？我们都有这么一个概念：当我们不进行观察的时候，真实世界也是存在的。同样，惠勒认为对于他正在确证的问题有一个真实的答案。但实际上没有。只有对它的问题的回答才是真实的。同样地，对于量子世界，我们唯一知道的就是实验的结果。在某种意义上，“云”是在提问过程中产生的，在同样的意义上，电子是在实验测量的过程中产生的。这个故事强调了量子理论的基本规律：只有记录下来的现象，而没有基本的现象。记录过程可能会对我们日常生活中的概念耍出了一些奇怪的花招。

为了证实这一点，惠勒想出了另一个思想实验：它是双孔实验的一个变形。在这个游戏中，双孔被一个透镜相连接，以使通过系统的光会发生会聚，标准检测屏被另一个透镜所代替，它的作用是使来自每一个小孔的光子发生发散。通过一个小孔的一个光子通过第二个屏，并且被第二个透镜折射到左边的检测器上；通过另一个小孔的一个光子到达右边的检测器上。使用这样一个实验装置，我们知道每一个光子通过哪一个小孔，其确切程度就像我们观察每一个小孔，看光子是否通过一样。就像在那种情形，如果我们一次只允许一个光子通过这个装置，那么我们会毫不含糊地知道光子所走的路径。因为没有态的迭加，所以没有干涉发生。

现在再次修正我们的装置。用一张照相雕刻薄膜将第二个透镜遮盖起来。这张薄膜成条形，就像一个威尼斯百页窗。这些长条可以关闭以构成一张完整的屏，以防止光子通过透镜和被折射。也可以将长条打开，以让光子像以前那样通过。现在，当长条关闭时，到达检测屏的光子孤立行为就像在经典双孔实验中那样。我们没有办法说出每个光子通过哪一个小孔，就像一个光子

同时通过两个狭缝时的情形一样，我们会得到一个干涉图样。现在花招来了，使用这个设备，只有当光子已经通过这两个孔以后，我们才有必要决定是打开还是关闭这些长条。我们可以等到光子通过这两个狭缝，然后再来决定是否做这样的实验：在其中，光子只通过一个小孔或同时通过两个小孔。在这个衰变选择实验当中，我们现在所做的事情将对我们对过去的描述产生不可挽回的影响。至少对一个光子来说，历史取决于我们如何去测量。



图 9.25 惠勒的衰变选择双缝实验（见正文）

哲学家们长期以来一直在深思这样一个事实：除了按照现在所记载的这种方式以外，历史是没有意义的——过去并不存在。惠勒的衰变选择实验将这个抽象的概念变得有血有肉，成为一个具体的、实用的术语。“只有在提问——回答的游戏结束之后，

对于‘房子中有什么’这样一个问题，我们才能回答；同样，只能在完成记录之后，‘对于光子正在做什么’这样一个问题才能做出回答。”（《一些奇怪现象》第 358 页）。

这个概念可以推广至多远呢？那些正在制造计算机和操纵基因材料的幸福的量子厨师们，将告诉你这完全是哲学上的猜测，在日常生活中、在宏观世界中是没有意义的。然而宏观世界中的万物却是由满足量子规则的粒子所组成的。我们称之为真实的任何东西都是由不能视为真实的东西所构成。“除了可以说通过某种方式被发现，以及它们必须建立在成千上万的这种观察者参与的活动的统计意义上之外，我们还有什么选择呢？”

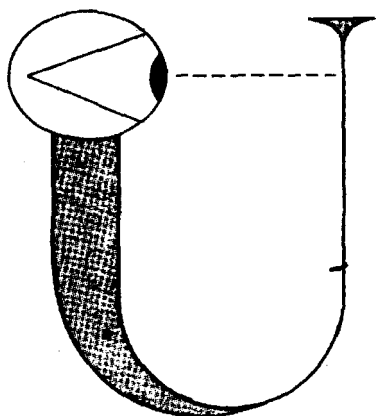


图 9.26 整个宇宙可以视为一个衰变选择实验  
其中观察者的存在将实质性的现实传递给万物

惠勒历来敢于凭借直觉做出重大飞跃（还记得他提出的单电子在空间和时间中进行编织的图象）。他进一步将整个宇宙考虑为一个供人分享的、自激发的循环。从大爆炸开始，宇宙便开始膨胀和冷却；几十亿年之后诞生了可以对宇宙进行观察的人类。

“ 观察者参与的活动（借助于衰变选择实验装置），反过来将实质性的“现实”赋予宇宙，不仅是现在，而且可以追溯到开始。”通过观察宇宙背景辐射的光子、大爆炸的回波，我们可能正在创造大爆炸和宇宙。如果惠勒是正确的，费曼将比他所说的双孔实验“包含着唯一的奥秘”时更加接近真理。

跟随着惠勒，我们已经走进了形而上学的范畴。我们可以想到，许多读者会认为，既然所有这一切都依赖于假想的思想实验，那么，你就可以做你所喜欢的任何游戏。你选择对现实的哪一种描述并不重要，我们需要的是来自真实实验的一些具体的证据。根据这些证据，从很多形而上学的选择当中选择出最好的解释。早在 20 世纪 80 年代，阿斯派克特实验提供了一个具体的证据——这个证据表明：量子理论的古怪特性不仅是实际存在的，而且是可以观测到的。

## 第 十 章

# 检 验 布 丁

量子世界佯谬现实的直接实验证据来自于 EPR 思想实验的现代版本。现代实验并不涉及粒子位置和动量的测量，而是涉及自旋和极化的测量。自旋和极化是光的一个特性，在某种意义上它类似于粒子材料的自旋。伦敦伯克贝克学院的大卫·玻姆于 1952 年在一种新式的 EPR 思想实验中引入测量自旋的思想。但是 20 世纪 60 年代，才有人认真地加以考虑，要真正做一个实验来检验这种条件下量子理论的预言。概念上的突破来自于 1964 年的一篇文章，其作者为工作在日内瓦附近欧洲研究中心的一位物理学家，他名叫约翰·贝尔。<sup>\*</sup> 为了理解这个实验，我们需要先从这篇重要的文章退回一小步，以对“自旋”和“极化”有一个清晰的图象。

J·S·贝尔，《物理》第一卷，195 页，1964 年。

## ◆ 自旋伴谬

幸运的是，在这些实验当中，粒子例如电子自旋的许多特性都可以忽略掉。忽略掉这些特性对如下事实并不产生影响：粒子在将同一个面显示给我们以前需要“转两次”。重要的是粒子的自旋在空间中定义了一个方向：向上或向下，这类似于地球的自转定义了南北轴线的方向。与一个均匀磁场相比，电子只能按两种可能状态之一进行排列，平行或反平行于磁场。根据任意约定，只能“向上”或“向下”。玻姆对 EPR 论点的变形起始于一对质子，这对质子同处于一个称为单纯态的位形当中。这对质子的总动量总是为零，然而我们可以想象这个分子劈裂成沿相反方向分开的两个组分粒子。这两个质子中的任一个可以有一个角动量或自旋，但是其自旋必须等量异号，以保证总自旋为零，就像它们在一起的时候一样。<sup>\*</sup>

这是一个量子理论和经典理论都能得出的简单论断。如果你知道“对”中一个粒子的自旋，你将知道另一个粒子的自旋，因为总自旋为零。但是你如何测量一个粒子的自旋呢？在经典世界当中，测最是简单的。因为我们正在处理三维世界中的粒子，所以我们不得不测量自旋的三个分量。这三个分量加在一起给出总自旋（使用矢量算术的规则，我在这里不讲）。但在量子世界中，情况就很不相同。首先，你在测量自旋的一个分量时，你就改变

<sup>\*</sup> 在这个例子当中，我正在重复伯纳德·艾斯帕格内特对贝尔实验的清楚而详细的描述。艾斯帕格内特的论文题目为“量子理论和现实”，参见《科学美国人预印本》第 3066 号。所不同的是艾斯帕格内特的论文非常详细，而我在这里描述得非常简单。

了其它的分量。自旋矢量具有互补的特性，不能同时测量其两个或三个分量，就像不能同时测量位置和动量一样。诸如电子和质子之类的粒子，其自旋本身是量子化的。你在任意方向上测量自旋，你都只能得到向上或向下的两种答案之一，即记为“ $+1$ ”或“ $-1$ ”。我们将一个方向定义为  $z$  轴，测量  $z$  轴方向的自旋，你可以会得到“ $+1$ ”的答案（在实验中有一半的机会得到这个结果）。现在测量另一个方向（不妨设为  $y$  轴）的自旋。不管你得到什么答案，再回去重新测量  $z$  轴方向的自旋。重复进行多次，看一下你得到的所有答案。结果是，尽管你在测量  $y$  轴方向自旋之前，已经测量了  $z$  轴方向的自旋，并且已经知道它是“向上”的，但是在测量  $y$  轴方向自旋之后，再重复  $z$  轴方向的测量时，你只有一半的机会测得其“向上”。对互补性自旋矢量的测量，已经恢复了你以前测量的状态的量子不确定性。\*

那么，当两个粒子相互隔离，我们测量其中之一的自旋时，会得到什么样的结果呢？分开来考虑，可以认为，每一个粒子的自旋分量都存在着随机涨落，这个涨落将干扰对任一粒子的总自旋进行测量。但是合起来考虑时，这两个粒子的自旋必定是精确地等量，并且是异号的。所以，一个粒子自旋的随机涨落必定与远处另一个粒子自旋的随机涨落相匹配：平衡、相等、异号。就像原始的 EPR 论点那样，粒子之间通过超距离相互作用相联接。爱因斯坦将这个幽灵般的非局域性视为荒诞的。这个非局域性标志着量子理论当中的一个缺点。约翰·贝尔说明了如何建立一个

\* 你可能会认为这个不确定量应该是  $\hbar$ 。确实如此。正如狄拉克所指出的，自旋的基本单位为  $\frac{1}{2}\hbar$ ，这就是我们所称的“一个自旋单位”的含义。在“ $+1$ ”和“ $-1$ ”单位之间的不同就是“ $+\frac{1}{2}\hbar$ ”和“ $-\frac{1}{2}\hbar$ ”之间的不同，即  $\hbar$ 。但在这里所讨论的实验中，唯一关心的就是自旋的方向。

实验，来测量这个幽灵般的非局域性，从而证明量子理论的正确性。

## ◆ 极化方面的迷惑

到目前为止，用来做这个检验的所有实验所涉及的都是材料粒子的自旋，而是光子的极化。但是它们的原理是相同的。极化是光子的一个特性。它在伴随一个光子或一束光子的空间中定义了一个方向，就像自旋在伴随材料粒子的空间中定义了一个方向一样。偏振片太阳镜的工作原理是这样的：将某一确定极化之外的所有光子全部挡住，从而使戴眼镜的人看到的景象变暗。可以假想太阳镜是由一系列狭条来构成，就像威尼斯窗帘那样。而光子就像携带着长矛一样。如果光子所携带着的长矛斜着穿过狭缝，那么这些光子都可以通过狭缝，并为我们的眼睛所看见；如果光子所携带的长矛与狭缝相垂直，那么这些光子都不能通过狭缝，从而被阻挡住。通常的光包含了所有方向的极化——光子所携带的长矛朝向各个不同的方向。还有一种极化叫做圆极化，极化方向随光子的前进而改变，它就像行进队伍中走在前面的军鼓乐队女指挥手中的指挥棒一样。这种极化有两种类型，右手极化或左手极化。它在检验世界量子描述的精确性方面也是有用的。在平面极化光当中，所有光子的长矛都朝向同一个角度。在合适的条件下，这可以通过偏转来产生，或者通过使光通过偏振片之类的物质来产生，偏振片只允许特定极化的光子通过。平面极化光再一次证明量子不确定性是在起作用的。

就像在量子水平上粒子的自旋一样，光子在某一方向上的极化具有“是或否”的特性。它可以在某一确定方向例如竖直方向



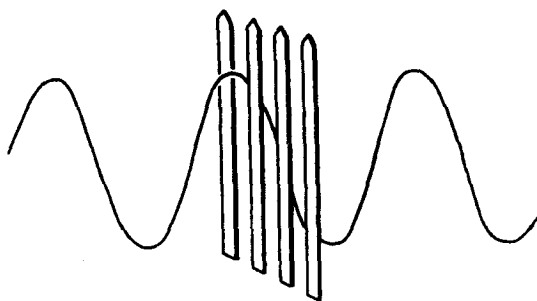


图 10.1 竖直极化波通过 “木桩栅栏”

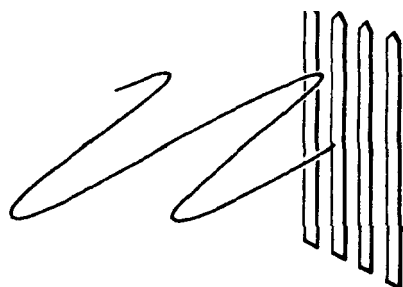


图 10.2 水平极化波被挡住了

极化，也可以不是这样。所有那些通过了威尼斯窗帘的光子将被另一个垂直放置的威尼斯窗帘所阻挡。如果将第一个极化器比作狭条成水平方向的威尼斯窗帘的话，那么第二个就可以比作竖直方向的木桩栅栏。当两组极化材料以这种方式“交叉”放置时，肯定没有光子能够通过。但是如果使第二块极化片的狭条与第一块极化片的狭条成  $45^\circ$  角，又会怎么样呢？到达第二个极化器的所有光子都与狭条成  $45^\circ$  角，按照经典图象是不应该有光子通过

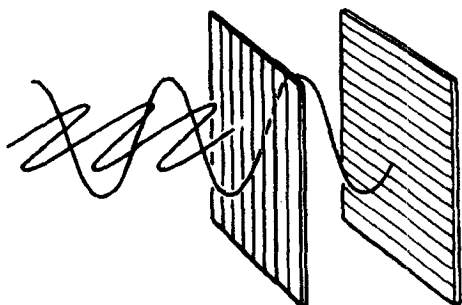


图 10.3 交错极化挡住所有的波

的。然而量子图象却不同。根据量子观点，每个光子有 **50%** 的机会通过这个未校准的极化器，恰好有一半的光子可以通过。现在，真正奇怪的事情来了。那些通过的光子在效果上被扭转了。它们的极化方向与最初的极化器成 **45°** 角，如果再放置另一个极化器，使其极化方向与第一个成直角，那么会发生什么现象呢？因为直角等于 **90°**，所以扭转后的极化方向与这个极化器也成 **45°** 角。因此，像上面那样，有一半的光子能够通过。

如果将两块极化片垂直放置，那么将没有光子能够通过。但是如果你在两块极化片之间放置第三块极化片，并且与最初的两块都成 **45°** 角，则最后通过的光子数将是通过第一块极化片的光子数的四分之一。这就好像是，我们将两套栅栏合在一起就可以百分之百地将走散的动物挡在外面以保护我们的财产。出于警戒起见，我们决定在这两道栅栏之间建立第三道栅栏，以加强安全防护。令我们感到吃惊的是，我们现在发现一些被两道栅栏就可以阻挡在外的动物现在却毫无困难地走了进来，就好像这第三道栅栏并不存在一样。我们通过改变实验来改变量子观察的本性。从效果上看，我们正在通过使用不同角度的极化片来测量极化矢

量的不同分量。每一次新的测量都破坏了我们从以前的测量当中所获取信息的有效性。

这立即引入了一种新型的 **EPR** 方案。我们处理的不是材料粒子，而是光子，但是基本实验与以前一样。现在让我们设想一些原子过程，这些过程能够产生两个按相反方向运动的光子。许多实际过程都可以实现这项功能，并且在这种过程当中，两个光子的极化之间总是存在着关联。它们必须以相同的方式极化，或者在某种意义下以相反的方式极化。出于简单起见，在我们的思想实验当中，我们假设这两个极化必须是相同的。当这两个光子

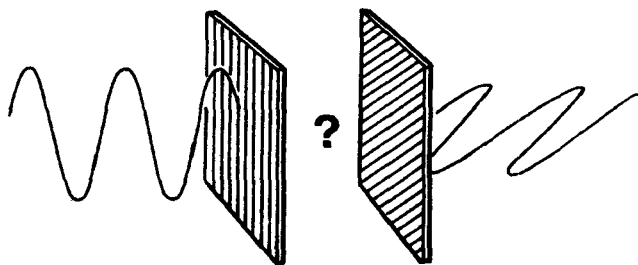


图 10.4 将两块极化片以  $45^\circ$  夹角放置，通过的波是通过第一块极化片的一半

离开其诞生地点很长时间以后，我们决定测量其中一个的极化。极化器放置方向的选择是完全任意的。但是一旦选定后，光子通过它的几率就成为确定的。随后我们便知道在那个选定的方向上，光子的极化是“向上”还是“向下”，我们还知道在远处的另一个光子也以同样的方式极化。但是，另一个光子是如何知道这一切的呢？它怎么能够意识到要调整自己，以使自己也能通过第一个光子所能通过的检测；而对于第一个光子不能通过的检测，它也不能通过吗？通过测量第一个光子的极化，我们就使波

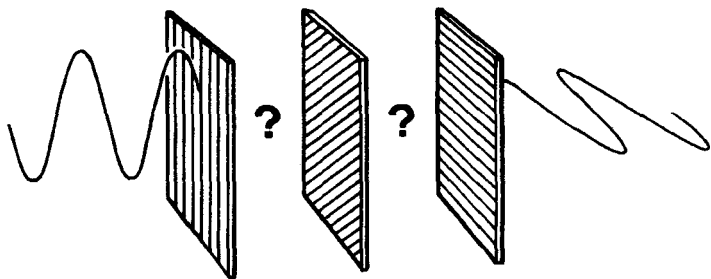


图 10.5 按这种方式放置三块极化片，最后通过的波函数是通过第一块前波函数的四分之一；而在将中间一块极化片取走时，波没能通过

函数坍塌了，不仅对于第一个光子是这样，对于远处的另一个光子来说，波函数也同时坍塌。

然而，相对于量子理论所有的奇异性来说，这仅仅是 20 世纪 30 年代由爱因斯坦及其同事引起科学家们注意的一个问题。除了这个长达半个多世纪之久的关于一个思想实验之含义的讨论以外，还需要一个真正的实验。在贝尔的实验中，给出了一种测量这种幽灵般的超距相互作用的方法。

## ◆ 贝尔实验

南巴黎大学的伯纳德·艾斯帕格内特是一位理论家，他像戴维·玻姆一样，在 EPR 系列实验方面动了不少的脑筋。在前面提到的他那篇发表在《科学美国人》上的文章当中，以及在密哈罗主编的《物理学家关于自然的概念》当中，他已经提出了解决这

个迷惑的贝尔方法。艾斯帕格内特说，我们对现实的日常观念基于三个基本假设：首先，真实的事物是客观存在的，它并不依赖于我们是否对其进行观察；其次，从一致的观察和实验结果中得出一般的结论是合理的；第三，任何效应的传播速度都不能超过光速，他称这个性质为“局域性”。这三个基本假设合在一起构成了当今世界“局域现实”观点的基础。

贝尔实验起始于世界的局域现实观点。在质子自旋实验中，尽管实验者不可能同时知道同一个粒子自旋的三个分量，但是他可以测量其中任何一个。如果将三个分量分别称为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，那么每当他测得一个质子  $X$  方向的自旋为“ $+1$ ”时，他发现“对”中另一个粒子  $X$  方向的自旋必为“ $-1$ ”，如此等等。但是他可以同时测量一个质子的  $X$  自旋，以及“对”中另一个粒子的  $Y$ （或  $Z$ ，但不能同时）方向的自旋，这样就应该可以同时获得一个质子的  $X$ 、 $Y$  自旋的信息。

即使是在原则上，这也并不容易实现。它涉及到同时随机地测量许多对质子的自旋，而要放弃那些恰好是“对”中两个粒子同一个自旋矢量的测量。但还是可以做的。在原则上，这使得实验者获得这样的结果：一对质子的一对自旋可以记为  $XY$ 、 $XZ$  和  $YZ$ 。在 1964 年的那篇经典文章当中，贝尔证明：如果这样一个实验可以实施的话，那么根据世界的局域现实观点， $X$  和  $Y$  方向都具有正自旋（ $X^+Y^+$ ）的对数必定少于  $X$  和  $Z$  方向都具有正自旋的对数加上  $Y$  和  $Z$  方向都具有正自旋的对数（ $X^+Z^+ + Y^+Z^+$ ）。这个计算直接基于如下一个明显的事实：如果一次测量表明一个质子具有自旋  $X^+$  和  $Y^-$ ，那么其总自旋态必定为  $X^+Y^-Z^+$ ，或者为  $X^+Y^-Z^-$ 。其余部分基于集合论的一个简单数学定理。但是在量子力学当中的数学规则是不同的。如果计算过程正

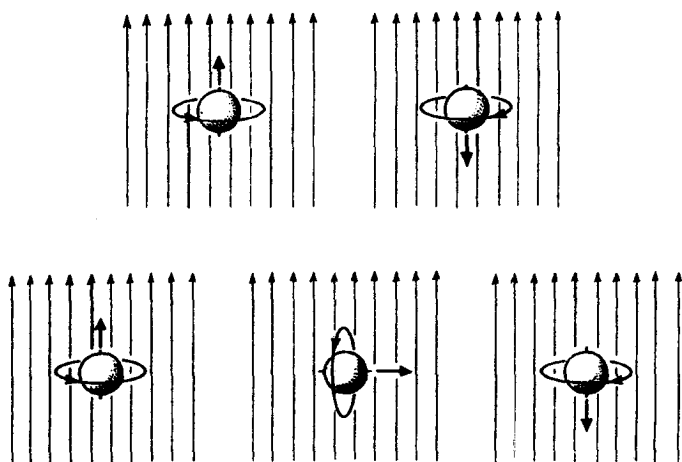


图 10.6 具有半整数自旋的粒子只有按平行或反平行于磁场的方向排列；而具有整数自旋的粒子也可以按与磁场横交的方向排列

确的话，那么它们将给出相反的预测：与  $X^+Z^+$  和  $Y^+Z^+$  的总对数相比， $X^+Y^+$  的对数是多，而不是少。

因为这个计算的最初描述是从世界的局域现实观点出发的，所以其传统的表达方式为：“贝尔不等式”是第一不等式。如果实验结果否定了贝尔不等式，那么就说明世界的局域现实观点是错误的，从而量子理论又一次通过了检验。

## ◆ 证 据

这个实验对于材料粒子自旋的测量应该同样有效，但实施起来非常困难；而对于光子极化的测量也应该同样有效，虽然实施起来也有困难，但相对容易一些。因为光子的静止质量为零，它以光速运动，对于时间没有区别，所以一些物理学家对于涉及到光子的实验感到很不愉快。对于一个光子而言的局域性概念并没有真正搞清楚。所以，尽管到目前为止，关于贝尔不等式的绝大多数实验都涉及到光子极化的测量，但至关重要的是，到目前为止唯一真正实施过的质子自旋的测量，其结果是否定贝尔不等式的，从而支持了世界的量子观点。

这个实验是法国萨克利核研究中心的一个小组于 1976 年报导的，但这并不是对贝尔不等式的第一次检验。这个实验的过程与原始的思想实验非常接近，它涉及到向一个包含很多氢原子的靶上射击低能质子。当一个质子撞击一个氢原子核（另一个质子）时，这两个粒子通过单纯态相互作用，它们的自旋分量可以测量。进行这个测量的困难是巨大的。与思想实验的理想状态不同，探测器仅仅记录下了部分质子。既使是在进行测量时，也并不是能够毫不含糊地记录下自旋分量。然而，法国的这个实验结果清楚地表明，世界的局域现实观点是错误的。

对贝尔不等式的第一次检验是由加利福尼亚大学的伯克利来完成的。他使用的是光子，实验结果发表于 1972 年。到 1975 年为止，这种检验已经进行了六次，其中四次的结果否定了贝尔不等式。不管对光子局域性的含义还有些什么怀疑，这些都是对量

子力学有力的激动人心的证据，特别是因为这些实验是使用两种完全不同的技术来完成的。在用光子所做的最早实验中，质子来源于铝原子或者汞原子，这些原子可以通过使用激光激发到所选定的能态。\* 从激发态回到基态的路线涉及到一个电子的两次转变：从一个高激发态到一个低激发态，然后再到基态，每次转变产生一个光子。对于在这些实验中所选定的转变而言，产生的两个光子具有相关的极化。通过使用放置在极化筛子后面的光子计数器，可以对“串”中的光子进行分析。

在 20 世纪 70 年代中期，实验物理学家们第一次用另一种方法进行了这种实验。在这些实验当中，使用的是电子和正电子湮灭时产生的光子。同样，两个光子的极化是相关的，得到的也是同样的证据。当你努力去测量那些极化时，你会发现得到的结果是否定贝尔不等式的。

所以，在对贝尔不等式所进行的最初七次检验中，有五次的结果有利于量子力学。在他那篇发表在《科学美国人》上的文章当中，艾斯派格内特强调指出，量子理论的这些证据比初看起来更加有力。因为实验本身的规律和在具体实施过程中存在的困难，所以“在实验设计中存在的大量的系统误差可能会破坏真正

\* 即使是在这里，我们仍然感觉到了那个曾经困扰玻尔这么久的的问题。唯一真实的事情就是：我们的实验结果，测量方式影响测量结果。在 20 世纪 80 年代，激光束成了物理学家日常使用的一个工具，它的任务就是将原子输送到激发态。我们能够使用这个工具，仅仅是因为我们了解激发态，并且有量子烹调术在手。但是我们整个实验的目的就在于检验量子理论的精确程度，而这个理论就是写作量子烹调术的基础。我并没有因此而说实验工作者是错误的。我们可以设想，在测量之前用其它方式使原子处于激发态，实验的其它版本确实也给出相同的结果。但是，就像前几代物理学家们的日常观念受到他们所使用的弹性平衡和测量规则的影响一样，现代物理学家们的观念更多地是受到了量子规则的影响。哲学家们可能会提出这样的问题：如果我们使用量子过程来进行这种实验，那么，贝尔的实验结果究竟意味着什么？我很高兴地坚持玻尔的观点：我们所看到的只是我们所得到的；一切都是假的。



相关的证据。……另一方面，很难想象一个实验误差能够在五个独立的实验中产生一个错误的相关。而且，实验结果不仅仅是违背了贝尔不等式，而且是精确地按照量子力学预言的那种方式去违背。”

从 20 世纪 70 年代中期以来，已经又做了很多次实验，这些实验的设计方案中排除了残留着的循环漏洞。实验装置的散件需要放置得足够远，以至于检测器之间那些可能会产生乱真的相关的“信号”，其传播速度不得不大于光速。那样做了之后，贝尔不等式还是违背的。发生相关的原因可能是，即使是在刚刚诞生的时候，光子也已经“知道”建立了哪种实验装置来捕获它们。如果提前建立好了实验装置，并且已经建立了一个整体波函数来影响正在诞生的光子，那么并不需要比光速快，那种结果也能发生。到目前为止，在有关贝尔不等式的重要实验中，当光子飞行时，实验的结构会发生改变；这正如在约翰惠勒思想的实验中，当光子飞行时双孔实验可能会改变一样。就是在 1982 年的这个实验中，南巴黎大学的阿兰·艾斯派克特工作小组，关闭了局域现实理论中最后一个大的漏洞。

艾斯派克特和他的同事已经使用一个多级过程产生的光子检验了这个不等式，发现结果违背这个不等式。他们在改进的实验中使用一个开关来改变正在通过的光束的方向，光束可以调整到两个极化筛子当中任一个的方向。每个极化筛子测量一个不同的极化方向，每个筛子后面都有自己的光子检测器。通过开关的光束方向可以被一个自动设备通过产生一个伪随机信号而非常快地改变，每 10 纳秒（ $10 \times 10^{-9}$  秒）改变一次。因为对于一个光子来说，从产生它的原子到检测器的飞行时间为 20 纳秒，所以有关实验设备的信息不可能从设备的一个部分传到另一个部分，从而不可能对测量结果产生任何影响，除非信息的传播速度大于光速。

## ◆ 这到底意味着什么？

实验很接近于完美无缺。即使光束的开关不是完美无缺的，它也确实是独立地改变两个光束中的任一个。现在仍然存在的唯一一个真正的漏洞是产生出来的绝大多数光子根本没有接受到检验，因为检测器本身的效率并不高。仍然存在着这种可能：只有那些违背贝尔不等式的光子被检测到了，而其它光子，只要我们去检测它们的话，会发现它们满足这个不等式。但是人们并没有设计实验来检验这个很小的可能性，看来确实可以做出那个论断。在 1982 年圣诞节之前，艾斯派克特小组宣布了实验结果<sup>\*</sup>之后，人们便不再怀疑贝尔实验肯定了量子理论的预测。事实上，如果用现代技术来做这个实验，那么结果违背贝尔不等式的程度比以前的任何实验结果都高，与量子理论的预期结果将符合得非常之好。正如艾斯帕格内特所说的：“最近完成的实验本来会迫使爱因斯坦在一个他一直认为非常重要的节点上改变他对自然的概念。……，我们可以有把握地说，不可分隔性现在已经成为物理学中最一般的概念。”<sup>\*\*</sup>

这决不意味着信息的传递速度可能会超过光速。因为在这样一个过程当中，没有办法联系起因事件和结果事件，所以不能以这种方式来输运任何有用的信息。这是那些拥有一个一般起因的事件的一个重要特性。这类事件有：正电子 / 电子的湮灭；电子回到基态；“光子对”从单纯态的分离。你可以设想两个检测器

• 《物理评论快报》第 49 卷，1804 页。

•• + 密哈罗主编，《物理学家的自然概念》，第 734 页。

相距很远，从中心源发出的光子分别飞向两个检测器。你可以设想存在某种敏锐的办法来改变一束光子的极化，那么位于第二个检测器旁边的观察者会发现另一束光子极化的改变。但是改变的是什么样的一种信号呢？光束中粒子的原始极化或自旋是随机量子过程的结果，它本身不携带任何信息。观察者所看到的是一个随机图样，它与没有第一个极化器并且熟练操作情况下的不同。因为在随机图样中不包含信息，所以它一点用也没有。信息包含在这两个随机图样的差别之中，但是由于第一个图样实际上并不存在，所以没有办法从中抽取信息。

但是没有必要太失望，艾斯派克特实验及其前身确实获得了与我们的常识非常不同的世界观。它告诉我们，在某种意义上，曾经发生过相互作用的粒子将始终保持为同一系统的部件，它们共同对进一步的相互作用作出响应。实际上，我们看到的、摸到的、感觉到的一切事物都是由相互作用着的粒子集合来构成的。而这些粒子与其它粒子之间的相互作用可以追溯到爆炸时期，通过大爆炸宇宙才得以形成。我身体的原子是由这样一些粒子来构成的：其中一些曾经与宇宙中的流星靠得很近，而这颗流星现在是一颗遥远的星体的一部分；另一些粒子曾经构成过某个遥远的、未被发现的行星上的某个生物的身体。事实上，构成我身体的这些粒子与构成你身体的那些粒子曾经靠得很近并且发生过相互作用。我们是同一个系统的两个部分，就像在艾斯派克特实验中从中心源飞出的两个光子一样。

艾斯帕格内特和戴维·玻姆这样的理论家们指出，我们必须承认，任何事物都与其它事物联系着。适用于宇宙的唯一一个 **holistic** 的方法可能会解释人类意识之类的现象。

物理学家和哲学家们正在朝着关于意识和宇宙的这样一个新图象进行探索，然而现在就要求他们对这个图象的可能形状提出

一个令人满意的轮廓还为时过早。对很多可能性所作的推测性讨论在这里就不讲了。但是我们从自己的背景中举出一个例子，这个例子置根于物理学和天文学坚实的传统。物理学中一个非常大的困惑就是惯性，它抵制的不是物质的运动，而是物质运动状态的改变。在自由空间当中，一个物体保持匀速直线运动，直到它被某个外力推动为止——这是牛顿最伟大的发现之一。推动一个物体所需的力依赖于它所包含物质的多少。这个物体如何才能以“知道”自己是在做匀速直线运动呢？即凭借什么来测量其速度呢？从牛顿时代起，哲学家们就已经知道测量惯性所用的标准是一套被称为“定量”的参考体制，尽管我们现在使用的是另外一种体制。在空间中旋转的地球，一个长傅克摆，就像在科学博物馆中看到的宇航员或者原子一样，他们都“知道”物质在宇宙中的平均分布。

没有人知道这个效应为什么会起作用或是如何起作用的，它曾经导致了一些奇特的、但没有结果的推测。如果在空旷的宇宙当中只有一个粒子的话，那么它将没有惯性，因为那将不存在对其运动的测量或者对运动的阻碍作用。但是如果在另一个空旷的宇宙中仅仅存在两个粒子的话，它们中的任一个所具有的惯性与它们在我们的宇宙中所具有的惯性一样吗？如果我们有某种魔力，可以移走宇宙中一半的物质的话，那么余下的物质是否具有相同的惯性呢？还是惯性减小为原来的一半呢？（或者变为原来的两倍？）这个问题在三百年前是个什么样的疑团，现在还是什么样子的；但是世界局域观实观点的被否定可能会带给我们一个线索。如果在大爆炸过程中曾经相互作用过的所有物质都保持着它们之间的相互作用，那么它们当中的每个粒子，不管它们是在我们所能看到的哪个星系里面，它们都“知道”其它所有粒子的存在。惯性不仅仅是宇宙学家们和相对论理论家们所争论的问

题，而且也确实是量子力学范畴中的一个迷惑。

它看起来是个佯谬吗？理查德·费曼在他的演讲中简明地概括了上述情况：“‘佯谬’仅仅是现实和你心目中现实应该是什么样子之间的冲突。”这个概述看起来毫无意义，就像关于针头上能够跳动的角度的个数一样，对吗？早在 1983 年，就在艾斯派克特小组的结果发表后几个星期，英国萨塞克斯大学的科学家们就宣布了他们的实验结果。他们的结果不仅仅在量子水平上提供了物质之间联系的独立的证据，而且提供了新一代计算机的适用范围——就像半导体收音机以及当今改进的固体技术一样，它本身就是一个进步的标志设备。

## ◆ 确认和应用

以特里·克拉克为首的萨塞克斯小组已经用另外一种方法对量子现实性进行了测量。他们努力创建的并不是那种在通常的量子粒子尺度、原子或更小尺度上进行操作的实验，而是那种更加接近于测量设备大小的“量子粒子”。他们的技术依赖于超导体的性质，他们使用了一个超导材料构成的环，环的直径在半厘米左右，在环上的某点处发生收缩，以使得环的截面积小到百万分之一平方厘米。这个“弱连接”的发明人就是曾经发明约瑟夫森结的那个布赖恩·约瑟夫森。这个“弱连接”使得这个超导材料环起到一个底端打开的圆筒的作用，就像一个器官管道或者两个底都已去掉的罐头盒。描述环中超导电子行为的薛定谔波就像器官管道中的标准声波一样，它们可以通过使用一个变化的电磁场来“调谐”，电磁场的频率在收音机的频率波段。从效果上看，在整个环中的电波描述的是一个量子粒子。通过一个灵敏的收音

机频率检测器，这个小组能够观察到环中电波的量子相变效应。从全实用的目的来看，它就像一个半厘米见方的量子粒子。它与前面提到的一小桶超流氦的例子有些相似，但更富有戏剧性。

这个实验提供了对单个量子相变的直接测量，同时它对非局域性也提供了更清晰的证据。因为超导体中电子的行为类似玻色子，所以导致量子相变的薛定谔波在整个环中传播。这个玻色子使得相变同时发生。在实验中观察不到如下现象：环的一边首先发生一个转变，当以光速传播的信号具有足够的时间在环中传播，并影响其它“粒子”时，另一边仅仅是赶上去。在一些方面，这个实验甚至比贝尔不等式的阿斯派克特检验更加有力。这个检验基于下述观点：尽管在数学上是很清楚的，但对于外行人来讲并不容易理解，而理解如下单个“粒子”的概念就要容易得多：这个“粒子”半个厘米见方，其行为就像单个量子粒子。它对来自外界的任何刺激作出即时的响应。

特里·克拉克和他的同事已经在做下一个逻辑上的发展。他们希望能够创建出一个大的“宏原子”，它可能以一个 6 米长的圆柱形式存在。如果这个设备能够按预期的方式来对外界刺激作出响应的话，那么就确实存在着传播速度大于光速的可能性。安置在圆柱一端的检测器，测量其量子态时，将立即改变圆柱另一端触发的量子态。这对于传统的信号发送还没有多少用处。我们不可能建造一个从这里连接到月球的“宏原子”，并用它来排除那个发生在月球探索者和地面控制站之间的令人讨厌的滞后问题。但是它将具有直接的实际应用。

在最高级的现代计算机当中，在性能方面一个主要的限制参数就是电子从一个部分到另一个部分的电路中运行的速度。相关的时间延迟小到纳秒量级，但非常有意义。萨塞克斯实验证明长距离间即时通讯的前景是非常渺茫的，但是建造一些计算机，使

得其中所有的部分同时响应来改变一个部分的状态，却是完全可能的。就是这个前景鼓舞了克拉克，使他作出了如下的评述：“当这些规则转移到电路硬件当中时，已经令人惊异的 20 世纪电子学看起来就成为信号灯。”\*

所以，不仅仅是哥本哈根解释在通过实验为实用目的全力辩护，与经典方法取得的进展相比，量子力学所带来的进展看起来还没有充分表现出来。但是哥本哈根解释在理性上还不是令人满意的。当我们对亚原子系统进行测量时，那些使波函数发生坍塌的、幽灵般的量子世界将发生什么情况呢？当我们进行测量的时候，这个重叠的现实怎么能够简单地消失，而与我们实际测量的那个结果恰好一致呢？最好的回答就是：这个两者挑一的现实并没有消失，薛定谔的猫实际上既是活的，同时又是死的，但分别处于两个或更多个不同的世界中。哥本哈根解释及其实际含义完全包含在一个更完整的现实观点——多世界解释中。

\* 参见 1983 年 1 月 6 日的《观察者》。当我正在准备打印这一篇时，从贝尔实验室传来了取得相似进展的消息。在那里，研究人员正在使用约瑟夫森结技术来发展一种新的、快的计算机电路“开关”。这些开关仅仅使用“传统的”约瑟夫森结，已能使得运行速度比标准计算机电路要快。在不久的将来，这个发展很可能继续起到表率作用，并获得实际的应用。但是别搞糊涂了——克拉克的发展更加遥远，在这个世纪结束之前都可能得不到应用，但是是一个潜在的、大的飞跃。





## 第十一章

# 多个世界

在本书中，到目前为止，我一直在努力，以使自己不偏袒某一个方面，而是在尽量提供有关量子的各个方面的故事，让故事自身去说明问题。现在，站出来阐明自己观点的时间到了。在这最后一章中，我不再以不偏袒而自居，而是给出我认为是最满意、最令人高兴的量子力学解释。这并不是一个大众化的观点，许多物理学家根本就不愿意去想这类事情，他们当中的大多数对于哥本哈根解释关于波函数坍塌的说法非常满意。但这是一个令人尊敬的少数派的观点。它有一个优点，那就是它包含哥本哈根解释。它也具有一个令人感到不舒服的特性，这个特性使得这个改进的解释不能够迅速得以推广。这个特性就是它表明还存在许多其它的世界。它们可能有无穷多个。它们以某种方式存在，从时间的这头到那头，位于我们现实的旁边，与我们自己的宇宙平行，但永不分开。

## ◆ 谁来观察观察者？

量子力学的多世界解释起源于 20 世纪 50 年代普林斯顿大学一位研究生休·埃弗雷特的工作。哥本哈根解释要求在观察者存在的情况下，波函数魔术般地发生坍塌。休·埃弗雷特为这种奇特的方式所迷惑。他与许多人讨论了量子力学的其它解释方法。这些人中包括约翰·惠勒，他鼓励埃弗雷特去发展他的解释，并将其作为他的博士论文。这种观点起始于一个非常简单的问题。设想我在一个封闭的屋子里做一个实验，然后出来告诉你结果，你再将这个结果告诉在纽约的朋友，他再向其他人去报告，如此等等。在这个过程中，波函数发生了一系列的坍塌，在这一方面这个问题达到了逻辑的顶峰。在每一步，波函数都变得更复杂，都包含了“现实世界”的更多信息。但在每一种状态，这两种解释都同样有效。在有关实验结果的消息到来之前，都将现实迭加。我们可以想象消息以这种方式在整个宇宙中进行传播，直到整个宇宙处于一个波函数相迭加的状态，可供选择的现实只能坍塌到进行观察时所看到的那个世界。然而，谁来观察宇宙呢？

根据定义，宇宙是自制的。它包含所有事物，所以并不存在外部观察者来注意宇宙的存在，从而使相互作用着的、可供选择的、复杂的现实网络发生坍塌。将惠勒的意识——我们自己——作为重要的观察者，通过逆因果关系追溯到大爆炸是走出困境的方式之一，但是这涉及到一个循环论证，它与我们设法去排除的迷惑一样令人困惑。我甚至更倾向于唯我论者的论断。这个论断说，在宇宙中只有一个观察者，那就是我自己，我的观察就是使现实从量子可能性的网络中固化出来的所有重要因素。但是极端

的唯我论主义，对于那些终生写书让别人来读的人来说是一个令人非常不满意的哲学。埃弗雷特的多世界解释是另一个令人更满意、更完整的概率。

埃弗雷特的解释是，整个宇宙迭加的波函数、相互作用以产生在量子水平上可测量的干涉的选择性现实并不坍塌。它们中的每一个都是同样真实的，在“超空间”（和超时间）内自己那一部分中存在。当我们在量子水平上作一次测量时所发生的事情就是观察过程迫使我们从这些选择项当中选出一个，这一个就成为我们看到的“真实”世界。观察活动切断了将各种可供选择的现实联接在一起的纽带，并允许它们在超空间中以各自独立的方式运动。每一个可供选择的现实都包含它自己的观察者，他已经做了同样的观察，但获得了不同的量子“答案”，于是他就认为他是他将波函数坍塌成一个独立的量子选择对象。

## ◆ 薛定谔的猫

当我们说到整个宇宙波函数的坍塌时，很难领会这意味着什么，但是如果我们来看一下更熟悉的例子，那么我们就容易看到为什么埃弗雷特方法代表了一个进步。我们在薛定谔佯谬所说的匣子中寻找隐藏着的真实的猫，最后的结果是，这个匣子恰恰提供了我所需要的例子，这个例子将演示量子力学多世界解释的威力。令人吃惊的是，其中的细节导致的不是一只真实的猫，而是两只。

量子力学方程告诉我们，在薛定谔的著名思想实验中，匣子里面有两种版本的波函数——“活猫”和“死猫”，两者是同样

真实的。传统的哥本哈根解释从一个不同的角度来看得这些概率。它说，从效果上看，这两个波函数都同样的不真实。当我们往匣子里面观看时，它们当中只有一个固化为现实。埃弗雷特的解释接受了整个量子方程的表面价值，并且指出两只猫都是真实的。有一只活猫，有一只死猫，但它们位于不同的世界中。问题并不在于匣子中的辐射性原子是否衰变，而在于它既衰变又不衰变。面临一个决定，整个世界——宇宙——分裂成它自己的两个版本。这两个版本在其余各个方面都是全同的。唯一的区别在于在其中一个版本中，原子衰变了，猫死了；而在另外一个版本中，原子没有衰变，猫还活着。这听起来就像科幻小说，然而它比科幻小说所探讨的要深得多，它是基于无懈可击的数学方程，基于量子力学朴实的、自恰的、符合逻辑的结果。

## ◆ 超越科幻小说

埃弗雷特在 1957 年所做工作的重要性在于它吸收了这个看起来令人无法容忍的思想，并使用已经建立的量子理论规则将它安置在安全的数学基础之上。推测宇宙的特性是一回事，将那些推测发展成为一个完整的、自恰的现实理论却完全是另一回事。事实上，埃弗雷特并不是第一个按这种方式进行推测的人，尽管看起来他已经产生了关于多个现实和平行世界的完整的思想，并且这些思想独立于任何早期的建议。绝大多数早期的推测——1957 年以来还有更多——事实上已经出现在科幻小说之中。我能够追溯到最早的版本是杰克·威廉森的《时间军团》，它最初于

1938 年作为一个杂志系列出版。 \*

很多科幻小说中的故事都安置在“平行的”现实中，在那里南方赢得了美国国内战争，或者西班牙无敌舰队成功地征服了英格兰，如此等等。一些故事描述的是一些探险：一个英雄通过时间从一个可供选择的现实到另一个可供选择的现实去旅行；少量故事使用合适而夸张的语言来描述这种可供选择的世界如何才能与我们自己的世界劈裂开来。威廉森的原始故事讲述的是两个可供选择的世界，在采取某一个关键行动之前，其中的任何一个都不能成为具体的现实。这个行动发生在过去某一个关键的时刻两个世界的路线交叉的地方（在这个故事当中，也有“传统的”时间旅行，并且这行动像论断一样是循环的）。就像传统的哥本哈根解释所描述的那样，这个思想已经与波函数的坍塌发生了共鸣。在 20 世纪 30 年代威廉森所熟悉的新思想可以从下面的段落中清楚地看出来。其中解释了当时的情形：

用几率波去替换具体的粒子，物体的世界线不再是固定的，它们曾经有过简单的路径。在亚原子非决定论的边缘，大地测量学具有无限多的可能分支。

威廉森的世界是一个鬼现实的世界，在其中有英雄在采取一些行动。当做出一个关键的决定，一个鬼被选出来而成为具体的现实时，另一个鬼就坍塌并消失。埃弗雷特的世界是很多具体的现实，其中所有的世界都是同样真实的，在其中就连英雄都不能从一个现实进入其相邻的现实。但是，埃弗雷特的版本是科学事

\* 在我早些时候的一本书《时间扭曲》中，讲述的都是平行世界，然而在那里只插入了最少量、最必要的量子理论。

实，而不是科幻小说。

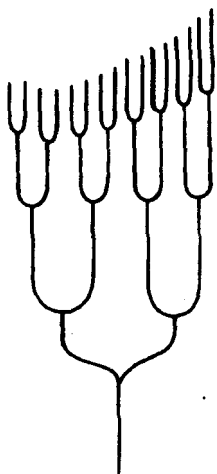


图 11.1 “平行世界”是指可供选择的现实并排着安置在“时空”中

注 这是一个错误的图象。

让我们回到量子物理的基本实验——双孔实验。即使是在传统的哥本哈根解释框架之内，尽管几乎没有量子烹调术可以实现，但是当只有一个粒子通过设备时，实验屏幕上产生的干涉图样解释为两个可供选择的现实的干涉。在一个现实中，粒子通过 A 孔；在另一个现实中，粒子通过 B 孔。当我们观察这两个孔时，我们发现粒子仅仅通过其中的一个，并且没有干涉出现。但是粒子是如何来选择通过哪一个小孔呢？根据哥本哈根解释，它根据量子几率随机地进行选择——上帝确实和宇宙掷骰子。根据多世界解释，它并不选择。当在量子水平上面临一个选择时，不仅仅粒子本身，而且整个宇宙劈裂成两个版本。在一个宇宙中，

粒子通过 A 孔；在另一个宇宙中，粒子通过 B 孔。在每一个宇宙中存在一个观察者，他看到粒子仅仅通过一个小孔，并且在以后这两个宇宙永远是彻底分离的，它们之间没有相互作用——这就是在实验屏幕上没有干涉出现的原因。

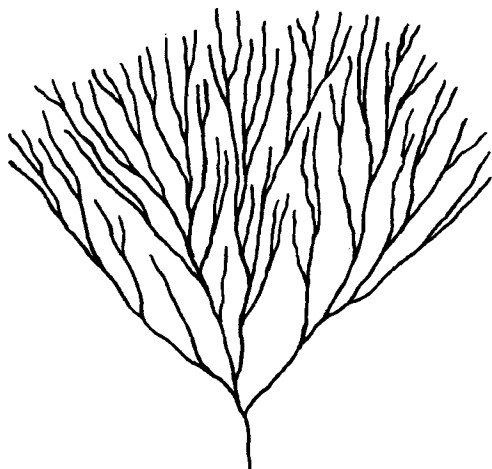


图 11.2 一个更好一点的图象

在其中，宇宙不断地劈裂，就像一颗分叉的树，  
但这仍是一个错误的图象。

将这个图象与所有时间发生在宇宙每一个区域的量子事件相乘，你就会部分地理解为什么传统的物理学家在这个思想面前畏缩不前。然而，正如埃弗雷特在 25 年前所建立的，它是一个符合逻辑的、自恰的量子现实描述，它与任何实验或任何观察到的证据都不冲突。

尽管在数学上是无懈可击的，但是在 1957 年，当埃弗雷特对量子力学的新解释落入科学知识的池子中时，几乎没有引起任

何涟漪。在《现代物理评论》中出现了这项工作<sup>\*</sup>的一个版本。紧接着刊登的是惠勒的文章，这篇文章使人们认识到了埃弗雷特工作的重要性。<sup>\*\*</sup>然而直到几十年以后，北卡罗来纳大学的布赖斯·杜威特接受这些思想之前，这些思想鲜为人知。

人们并不清楚的是，这些思想为什么应该花费这么长的时间才为人们所接受。直到 20 世纪 70 年代，它才以年幼的方式获得成功。撇开繁杂的数学，埃弗雷特在《现代物理评论》上那篇文章当中仔细解释道：“因为没有实验证据，所以宇宙劈裂成多个世界是不可能的。”但这一论断是站不住脚的。迭加态的各个分离元素都满足波动方程，而对其它元素的现实性漠不关心，一个分支对另一个分支不存在影响，这表明任何观察者都对劈裂过程一无所知。争论其它方面就好像是在争论地球不可能位于太阳周围的轨道上。因为，如果它存在的话，我们将会感觉到它的运动。埃弗雷特说：“在这两种情形下，理论本身都表明我们的经验就反映了事实的真相。”

## ◆ 超越爱因斯坦了吗？

在多世界解释情形之中，理论在概念上是简单的、符合因果关系的，给出了与经验相一致的预言。惠勒尽他的最大努力确保人们注意到了如下的新思想：

难以搞清“相对态”公式在多大程度上中断了与经

\* 第 29 卷第 454 页。  
\* \* + 第 29 卷第 463 页。



典概念的联系。在历史上，人们在这一步所遇到的最初的不愉快只有为数不多的几次：当牛顿如此反常地将万物间的引力描述为超距离作用时；当麦克斯韦用象场论那样不自然的方式来描述象超距作用那样自然的东西时；当爱因斯坦否决了任何坐标系统的特权时，……除了“所有规则坐标系统都是完全等价的”这一广义相对性原理之外，从物理学的其余部分不能引证出任何可比的东西。<sup>\*</sup>

惠勒总结说：“撇开埃弗雷特的概念不谈，手头就没有理想的自恰系统能够用来解释将一个像广义相对性地球这样的封闭系统量子化将意味着什么。”事实上，这是非常强烈的措词。但是埃弗雷特的解释存在一个很大的缺点，那就是它企图取代哥本哈根解释已经在物理学中建立的地位。在估价可能的实验结果或观察结果方面，量子力学的多世界解释版本所给出的预言与哥本哈根观点完全一致。这既是一个优点，又是一个缺点。既然在这些实际操作中从来没有发现需要哥本哈根解释，那么在任何可以接受检验的地方任何新的解释都必须给出与哥本哈根解释一致的“答案”，所以埃弗雷特解释通过了它的第一次检验。但是它仅仅是通过如下方式改进哥本哈根解释：它从双缝实验中、或者从爱因斯坦、玻多尔斯基和罗森发明的那类实验中排除了看起来相互矛盾的特性。从有关量子烹调的所有观点中，很难以看出这两种解释的不同，自然的倾向便是坚持所熟悉的一个。然而，对于所有已经研究过 EPR 思想实验，以及现在的各种形式的贝尔不等式的人来说，埃弗雷特解释却具有更大的吸引力。在埃弗雷特解

<sup>\*</sup> Op.cit. ,第 464 页。

释当中，并不是我们选择哪一个自旋分量来测量这一过程迫使远处另外一个粒子的自旋魔术般地呈现出互补的状态，而是通过选择测量的自旋分量来选择我们所生活在其中的现实的某一个分支。在超空间的那个分支当中，另一个粒子的自旋总是与我们测量的这一个互补。是“选择”而不是“机会”决定了在我们的实验中测量的是哪一个量子世界，所以决定了我们居住的是哪一个量子世界。事实上一个实验所有可能的结果都发生了，每一种可能的结果都由它自己的一套观察者来观察。这就难怪我们所观察到的仅是一种可能的实验结果。

## ◆ 回顾一下

量子力学的多世界解释曾一度处于被物理学界故意忽视的状况，直到 20 世纪 60 年代后期杜威特接受了这个思想，他亲自写了一些材料来介绍这些概念，并且鼓励它的学生尼尔·格雷厄姆去推广埃弗雷特的工作来作为他自己的博士论文。就像杜威特在 1970 年《今日物理》的一篇文章<sup>\*</sup>当中所介绍的，当应用于“薛定谔的猫”这一佯谬时，埃弗雷特解释便立即引起了极大的兴趣。我们没有必要再去为那只既是活的、又是死的，既不是活的、又不是死的猫而忧虑。相反地，我们知道，在我们的世界当中，这只匣子里装着一只猫，它要么是活的，要么是死的；在相邻的另一个世界中，有一个观察者，他有一只同样的匣子，里面装着一只同样的猫，它要么是死的，要么是活的。但如果宇宙“不断地劈裂成大量的分支”，那么“发生在每一颗星、每一个星

<sup>\*</sup> 第 23 卷第 9 期（1970 年 9 月）第 30 页。

系、宇宙中每一个遥远角落的量子相变，正在把地球上我们的局域世界劈裂成它自己的无数的复制品。”

杜威特回顾了他第一次遇到这些概念时吃惊的状况：“自己的 $10^{100}$ 个有轻微缺陷的复制品正在进一步劈裂成更多的复制品。”但是他被自己的工作、被埃弗雷特的论文和格雷厄姆对这个现象的重新研究说服了。他甚至考虑了劈裂实际上能够继续进行到什么程度。在一个有限的宇宙中——有充足的理由相信，如果广义相对性是对现实的一个好的描述的话，那么宇宙就是有限的\*——在量子树上就必定只有有限数目的“分支”，超空间不可能有足够的空间来容纳更加稀奇古怪的可能性、杜威特所称的“自行其是的世界”的好的结构、行为发生奇怪变形的现实。在任意情形，尽管严格的哥本哈根解释指出，任何可能的事情都确实在现实的某个版本、超空间的某个地方发生，这与平时所说的“任何可以想象的事情都可以发生”并不是一回事。我们可以想象出不可能的事情，真实的世界不能容纳它们。在一个其它方面与我们自己的世界完全一样的世界中，即使猪长了翅膀（在其它方面与我们的猪相同），它们也不可能会飞；无论英雄们的威力有多么大，他们都不可能通过时间上的裂缝滑向一边去拜访另一个可供选择的现实，尽管科幻小说作家们在这种行动的结果方面

• + 广义相对性是一个描述封闭系统的理论，爱因斯坦最初把宇宙设想为一个封闭的有限系统。尽管人们谈论敞开的、无限的宇宙，然而严格地说，这种描述并不能为相对论所覆盖。让我们的宇宙封闭的方法就是假设它包含足够多的物质，以至于其间的引力使得时空围绕着自己发生弯曲，就像黑洞周围时空的弯曲一样。它需要的物质比我们在能够见得到的星系中所包含的物质要多，但是宇宙动力学的绝大多数观察表明，事实上它处于一个非常接近封闭的状态——或“恰好是封闭的”，或“恰好是打开的。”这种情形下，没有观察结果否定“宇宙是封闭有限的”这一基本的相对性含义，有充足的理由去寻找黑物质，这些黑物质使宇宙中的物质由于引力而聚集在一起。关于这些思想的一些基础知识可以在惠勒投给《均衡中的一些奇异现象》的稿件中找到。

作了探索；如此等等。

杜威特的结论与惠勒早期的结论一样富有戏剧性：

埃弗雷特、惠勒和格雷厄姆的观点确实是令人印象深刻的，然而它是一个完全因果性的观点。如果爱因斯坦健在的话，他可能已经接受了这个观点……它比1925年由海森堡开始的绝大多数解释都要好。

可能仅仅在这一点上，提及惠勒本人最近表示他对所有这一切感到怀疑是公平的。在纪念爱因斯坦百年诞辰的研讨会上，在回答一个人的提问时，他说到了多世界理论，“我承认，最后我已经不情愿地被迫放弃对那个观点的支持——虽然在开始时我是支持它的——因为我担心它携带了太多的形而上学的包袱。”<sup>\*</sup>这不应该看作是对埃弗雷特解释的拆台，事实上，爱因斯坦当时改变了他对量子力学统计基础的思想并没有拆那个解释的台。这也并不意味着惠勒在1957年所说的话不再正确。。它仍然是正确的。在1983年，撇开埃弗雷特理论，手头就没有理想的自恰系统可以用来解释将宇宙量子化意味着什么。然而，惠勒思想的改变确实说明了对许多人来说，接受多世界理论是多么困难。从个人角度来说，我认为它所需要携带的形而上学的包袱比起哥本哈根解释关于薛定谔的猫、或者比起“相空间”的维数应该等于宇宙中粒子数的三倍所需要携带的包袱要少得多。这些概念并不比其它概念更奇怪。其它概念看起来熟悉，这仅仅是因为它们被如此广泛地讨论。多世界解释，它为看待我们所生活的宇宙为什么应该是这个样子的提供了崭新的洞察。这个理论远没有过时，而

\* 《均衡中的一些奇异现象》哈里·伍尔夫主编，第385~386页。

仍值得认真地加以研究。

## ◆ 超越埃弗雷特

今天的宇宙学家们非常幸福地谈记着宇宙从大爆炸中刚刚诞生时发生的事情，他们计算了宇宙年龄大约在  $10^{-35}$  秒左右时发生的反应。这些反应涉及到粒子和辐射的大漩涡、粒子对的产生和湮灭。关于这些反应如何发生的假设来自于各种理论的混合，以及对在巨型加速器（例如在日内瓦 CERN 运行的那一台）中粒子相互作用方式的观察。根据那些计算，从我们在地球上所做的微不足道的实验中所得出的物理规律，可以用一种符合逻辑的、自恰的方式来解释宇宙是如何从一个密度几乎是无穷大的状态演化到我们今天所看到的状态。这些理论甚至在预言物质和反物质的平衡、物质和辐射之间的平衡方面作了尝试。<sup>\*</sup> 每一个对科学略感兴趣的人都已经听说了关于宇宙起源的大爆炸理论。理论家们津津乐道地玩弄着那些用以描述 150 亿年前那一瞬间所发生的事情的数字。但在今天，又有谁会停下来去思考这些思想究竟意味着什么呢？企图理解这些思想的含义确实是动人心弦的。谁会对  $10^{-35}$  秒真正感兴趣呢？更不用说去理解当宇宙年龄为  $10^{-35}$  秒时宇宙的本性！事实上，那些处理这种稀奇古怪的极端本性的科学家应该可以比较容易地调整他们的思想，以适应平行世界的概念。

事实上，那些从科幻小说中借用的听起来很巧妙的表述，是

• 在我的书《空间扭曲》中讨论了所有这些思想。

很不合适的。选择性现实的本来图象是作为一个从主茎展成扇形的选择性分支，在超空间中一个靠着一个地向前延伸，就像一个复杂铁路枢纽的分支路线一样，就像一些具有几百万条平行航道的超高速公路一样。科幻小说家们想象出了通过时间并排着向前延伸的所有世界，我们附近的邻居与我们自己的世界几乎完全一样。但是，当我们随着时间走入旁路越多时，它们之间的不同就变得越来越清楚。这个图象使人们很自然地推测出：在超高速公路上改变航道滑入隔壁世界的可能性。不幸的是，数学并不喜欢这个洁净的图象。

三维空间在我们的日常生活中是如此之重要，但是数学家们在处理维数更高的空间方面并没有困难。我们的整个世界，作为埃弗雷特多世界现实的一个分支，在数学上用四维空间来描述，其中三维代表空间，一维代表时间，它们之间相互正交。描述相互正交、维数更高、与我们的四个维度垂直的空间的数学是通常的数学游戏。这就是选择性现实实际存在的地方，它并不与我们自己的世界平行，而是与之垂直。相互垂直的世界分支通过超空间离开旁路。这个图象很难以形象化，<sup>\*</sup>但它确实使人们容易看到为什么滑入旁路进入另一个可供选择的现实是不可能的。

\* 如果你在相信这个图象方面有困难，那么你可能会开始感觉到原来的完好的薛定谔方程更加舒适和熟悉。远不是这样。量子力学的波动解释确实起源于物理学其它领域的一些简单熟悉的波动方程。对单个粒子来说，正确的量子力学描述确实涉及到三维空间中的一个波，当然这里指的并不是我们日常生活的空间，而是“相空间”。不幸的是，对于描述中所涉及的每个粒子的波来说，你需要三个不同的维度。为了描述两个相互作用着的粒子，你需要六个维度；为了描述一个三粒子系统，你需要九个维度，如此等等。整个宇宙的波函数，其维数等于宇宙中粒子数的三倍。那些因为携带了太多不必要的包袱而轻易放弃了埃弗雷特解释的物理学家们忘记了这样一个事实：他们每天使用的波动方程被认为是宇宙的一个好的描述，是以在思想中引起一个同样的含糊其词的包袱为代价的，这个包袱就是额外的维数。

如果你朝着一个与我们的世界成直角的旁路出发，那么你将产生一个你自己的新世界。事实上，关于多世界理论，这就是每一次当宇宙面临一个量子选择时所发生的事情。作为匣子中猫的实验结果或者作为双缝实验的结果，进入通过宇宙劈裂而产生的可供选择的现实之一的唯一方式，就是在我们的四维现实中沿时间后退，到达实验的时间，然后再沿着另一个可供选择的分支随时间向前。这个可供选择的分支与我们自己的四维世界成直角。

这或许是不可能的。根据常识，这种真正的时间旅行肯定是不可能的，因为这涉及到一些佯谬，例如你可以沿时间后退，在怀你自己的父亲之前将你爷爷杀死。另一方面，在量子水平上，看起来粒子在所有的“时间”内都在参与时间旅行。夫兰克·提普勒已经证明广义相对性方程允许时间旅行。有一种可能会产生一种天才的旅行，随着时间向前和向后，而不会出现佯谬，这种形式的时间旅行依赖于可供选择的宇宙的现实。戴维·杰拉德在一本娱乐性科幻小说《折叠自己的人》中探索了这些可能性。这本书是值得读的，它引导人们了解世界现实的复杂性和敏感性。问题是，举一个经典的例子，如果你能沿着时间后退并杀死你爷爷的话，那么你正在产生的或正在进入的（依赖于你的观点）可供选择的世界分支就与你起始的那个世界成直角。在那个“新的”现实当中，你的父亲和你自己都没有出生。因为你仍然是在“原来的”现实中出生，通过时间往回旅行，进入一个可供选择的分支。再回去做一次你曾经做过的恶作剧，那么你所做的仅仅是重新进入现实的原始分支，或者至少是一个非常类似的分支。

但是，即使是杰拉德也没有解释在垂直现实当中作为主要特性的那些稀奇古怪的事情。据我所知，对埃弗雷特解释中所用的

数学有一种有独到见解的物理解释——当然是科幻小说作家还没有接受的时间旅行的一种新形式。我特将此奉献给他们。• 需要强调的是，在这个图象中，可供选择的现实并没有与我们的现实并排而列，在那里他们可以很容易地滑入和滑出。现实的每一个分支都与其它分支相互垂直。可能存在一个世界，在那里人们给予巴拿马的名字是皮埃尔，而不是拿破仑，然而在那里其它方面主要的历史进展与我们这一现实的分支相同。可能存在一个世界，在其中那个特指的拿破仑从来没有存在过。这两个世界相对于我们自己的世界来说，是同样遥远和不可接近。如果不是在我们自己的世界当中沿时间往返旅行至合适的分叉点，然后在与我们自己的现实成直角（许多直角中的一个）的现实中沿时间向前延伸的话，那么两个世界均不能到达。

可以将这个概念加以推广，以排除科幻小说作家和读者所喜爱、而哲学家所争论的任何时间旅行佯谬的佯谬本性。各种可能的事情都在现实的某一个分支中发生了。进入那些可能现实的关键不是沿时间向弯路运行，而是后退，然后再向前进入另一个分支。已经写成的科幻小说可能使用了多世界解释，尽管我不能肯定那个作者乔治·本福德是有意识这么做的。在他的书《时间扭曲》中，世界的命运基本上是按照从 20 世纪 90 年代送回 60 年代的信息而改变的。这个故事构思巧妙，即使是没有科幻小说的主题，它也是可控制的、站得住脚的。然而我在这儿想说的一点就是，世界是根据人们争取的行动而改变的，而人们接收到的信息又来自未来，所以给人们提供信息的那个未来对于接收信息的人们来说并不再存在。信息是从什么地方来的呢？你可能会设置

• 当这本书正在印刷过程中时，我以“垂直世界”为标题为《比喻》写了一个小故事。



一种关于老的哥本哈根解释的情形，鬼世界送回影响波函数坍塌方式的鬼信息，但是你将难以使这个论点站得住脚。另一方面，在多世界解释中很容易将信息形象化，在一个现实中沿时间后退至一个分叉点，在那里人们接收到信息，然后沿时间向前进入他们自己的现实——现实的一个不同的分支。两个可供选择的现实同时存在，但是那个影响未来的关键决定一旦做出，这两个现实之间的联系就中断了。<sup>\*</sup> 《时间扭曲》也是一本好的读物，实际上它包含着一个思想实验，其每一个细节和 EPR 实验或薛定谔的猫一样令人迷惑，并且与量子力学的争论相关。埃弗雷德自己可能并没有意识到这一点，但是多世界现实恰好就是允许时间旅行的那种现实。也是那种能够解释为什么我们会在这儿争论这些问题的现实。

## ◆ 我们的特殊地位

根据我对多世界理论的解释，就我们对世界的理解而言，将来是不确定的，而过去则是确定的。通过观察这一行动，我们已经从多个现实中选出了一个“真正的”历史。一旦有人在我们的世界中看到一颗树，那么它就呆在那儿，即使是没有人在观察它。这表明所有道路都可以退回到大爆炸。在量子高速公路上的每一个枢纽，都有很多新的现实产生，但是通向我们的路却是清晰的、毫不含糊的。然而有许多路径通向未来，“我们”的某一个

<sup>\*</sup> 这里还有另外一个问题值得强调。即使时间旅行在理论上是可行的，那也存在一些不可克服的实际困难使我们不能通过时间发送实体物质。如果我们在现实的费曼解释中能够找到一种方式，使用沿时间向后运动的粒子的话，那么通过时间发送信息将是一个相对简单的事情。

版本将沿它们中的每一个向前发展，我们自己的每一个版本都认为自己是唯一的一条路径上，将会看到唯一的一个过去，但我们并不知道未来，因为它们有如此之多。我们甚至会收到来自未来的信息，或者像在《时间扭曲》中所描述的那样通过机械方式来获得，或者通过做梦或超意识来获得，如果你希望想象这种可能性的话。但是那些信息可能并不会给我们带来很多好处。因为未来世界是多样化的，所以任何这种信息都会引起混乱和矛盾。如果我们根据这种信息去采取行动，我们更可能使我们自己发生偏斜而进入现实的一个分支，这并不是传递信息来的那个分支，所以这些信息变成“真实情况”是非常不可能的。那些认为量子力学为实现超感官知觉、传心术等提供了钥匙的人仅仅是在自欺欺人。

将宇宙的图象看作一张铺开的费曼图，在其中瞬时的“现在”以匀速运动，这个图象是过于简化了。真实的图象是一个多维的费曼图，所有可能的世界，“现在”铺开后通过所有的世界，到达每一个分支和弯路。在这个框架之内留下有待回答的最大问题就是我们对现实的认识为什么应该是这样的——那些起源于大爆炸并通向我们的量子路径，为什么恰恰刚好导致了宇宙中生命的发现？

问题的答案就在于我们经常所说的《人择原理》。这个原理说，我们宇宙中存在的条件，除了一些微小的变化外，恰恰是那种允许像我们这样的生命在其中演化的条件。所以像我们这样的高级生命将宇宙看成我们周围所见到的这个样子是不可避免

\*在我的《空间扭曲》这本书中已经简要地讨论了《人择原理》，在保罗·戴维斯的《偶然的宇宙》中可以找到更详细的介绍。我自己的《创世纪》详细地解释了宇宙的起源——大爆炸。

的\*。如果宇宙不是现在这个样子，我们将不能在这儿观察它。我们可以想象，从大爆炸开始，宇宙通过许多条量子路径向前发展。在其中一些世界中，由于在宇宙开始膨胀点附近量子选择的不同，星星、行人从未形成，正如我们所知道的，生命并不存在。举一个具体的例子，在我们的宇宙当中，看起来物质粒子占优势，很少有或者没有反物质。关于这一点没有什么基本的理由——这可能仅仅是大爆炸的火球相过程中所发生的反应中的一个偶然事件。这就恰恰像宇宙可能应该是空的，或者主要由我们所称的反物质来构成，而很少有或者没有物质存在一样。正如我们所知，在空的宇宙中，应该没有生命存在。在反物质宇宙当中，应该具有与我们非常相象的生命存在，它是一种真正的镜像世界。迷惑在于适合于生命的理想世界为什么出现于大爆炸。

《人择原理》说或许存在许多可能的世界，我们是这个宇宙不可避免的产物。然而其它世界在什么地方呢？难道它们也像哥本哈根解释中相互作用着的世界一样是鬼吗？我们知道，时间和空间开始于大爆炸。难道它们相应于大爆炸之前整个宇宙中不同的生命圈吗？或者它们正是埃弗雷德的多个世界，它们全都存在，并且与我们的世界相垂直，是这样吗？在我看来，这是到目前为止所具有的最好的解释；“为什么宇宙是这个样子的”这个基本迷惑的解决将充分地补偿埃弗雷德解释所携带的负担。大多数可供选择的量子现实不适合于生命，是空的。适合于生命的条件是特殊的，所以当生命体回过头去追溯产生他们的量子路径时，他们将看到特殊的事件，他们在量子道路上看到的分支不是建立在统计的基础之上的，而是那些导致生命出现的路径。多数与我们自己的世界相似但具有不同历史的世界——在其中英国仍然统治着它在北美的殖民地；或者北美人对欧洲实行殖民统治——合在一起仅仅构成巨大现实的一个小小的角落。不是机会而

是选择从一系列量子可能性中挑选出了适合于生命的特殊条件。所有的世界都是同样真实的，但是只有合适的世界中才存在观察者。

用于检验贝尔不等式的阿斯派克特小组实验的成功，这在已经提出的各种可能的量子力学解释中排除了两种。我们要么不得不接受哥本哈根解释，连同它那鬼现实和半死的猫；要么不得不接受埃弗雷特的多世界解释。当然，可以想到这两个超级科学市场上的“最好的家伙”都不是正确的；这两种选择都是错的。关于量子力学的现实，可能还有另一种解释，它能解决哥本哈根解释和埃弗雷特解释已经解决的所有问题，包括贝尔检验，以及一些我们目前还不能理解的东西；同样地，还可能包括广义相对性超越，并可能插入特殊的相对性。但是如果你认为这是一个轻松的选择，一条容易走出困境的路，那么记着任何这种“新的”解释都必须能够解释自从普朗克在黑暗中取得突破以来的所有成就；在解释万物方面，它必须与目前这两种理论一样好，或者更好。的确，守株待兔似的等待某人会对我们的问题提出一个好的答案不是科学态度。在没有更好的答案的情况下，我们就不得不正视目前能得到的最好的答案。在 20 世纪 80 年代来写这本书，也就是在 20 世纪的科学巨匠们为量子真实性问题而苦苦思索了半个多世纪以后，我们仍然不得不承认在目前情况下，科学对于世界的构成方式只能给出两种不同的解释。没有哪一个看起来更好些。简单地说，要么没有什么是真实的，要么一切都是真实的。

这个问题或许永远没有答案，因为缺少时间旅行，所以不可能设计出一个实验来验证这两种解释。但有一点是清楚的，最伟大的量子哲学家之一马克思·詹摩在说“在科学史上，多世界解

释无疑是目前所提出的最大胆、最野心勃勃的理论”<sup>\*</sup>时，并没有夸大其词。从字面上讲，它能解释一切，包括猫的生与死。作为一个顽固的乐天派，我仍然对量子力学的解释感兴趣。一切都是可能的。在量子的多世界中，我们通过参与而选择出自己的道路。在我们生活的这个世界上，你看到的就是你所得到的。没有隐变量，上帝不会掷骰子，一切都是真实的。一个关于尼尔斯·玻尔的轶事被人广为传颂。这个轶事讲的是：在 20 世纪 20 年代，并声称他能解决一个量子理论的基本问题时，他答道：“你的理论确实很美妙，但是还没有美妙到真实的程度。”<sup>\*\*</sup>依我看，埃弗雷特的理论确实已经美妙到真实的程度，在寻找薛定谔的猫方面，这个理论可以给出一个合适的答案。

\* 《量子力学的哲学》第 517 页。

\*\* + 可参见罗伯特·威尔逊的《相邻的世界》第 156 页。



## 后 记

# 未完的工作

除了选用哥本哈根解释还是多世界解释这个半哲学问题以外，我现在所讲的量子故事看起来是非常精简了。虽然并非完全对，但本书的叙述是对这个故事的最好安排。量子故事并未到此结束，现在，理论家们还在继续寻找着一些问题的答案。而这可能会导致像玻尔在对原子能级作量子化时所取得的那样一些最基本的进步。由这项尚未完成的工作而整理成的书是凌乱和不尽人意的。人们的一些观点，例如“什么是重要的”，以及“什么是可以安全的忽略的”，这些完全可以随着当时的报道而改变。但是为了让你感觉到一点将来会怎么发展，在本后记中我记入了一些未完的量子故事，以及将来会如何发展的一些迹象。

最清楚不过的是，量子理论的一个分支已经取得了最辉煌的成绩，这个分支通常被誉为皇冠上的明珠。对于这个分支，与我们所见到的这些相比，我们尚有更多的工作需要做。这个分支就是量子电动力学，简记为 QED。这个理论用量子的术语来解释电磁相互作用。量子电动力学在 20 世纪 40 年代得到了蓬勃发展。它是如此的成功，以至于它已经成为解释原子核内强相互作用的一个理论模型。由于这个理论涉及了一种称为夸克的粒子间

的相互作用，而这些夸克具有一些特性，理论家们为了区别这些特性，竟荒诞地使用了颜色的名字来定义它们，因而这，个理论又被称为量子色动力学，简记为 QCD。但是，量子电动力学本身也有很大的缺点。它虽然能管用，但仅仅是在杜撰一些数学，使其与我们的观察相符合。

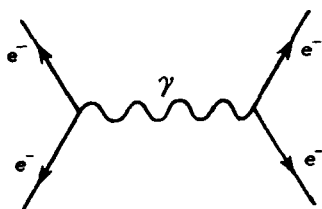


图 E.1 粒子相互作用的经典费曼图

这个问题涉及到在量子理论中处理电子的方式，它不再是经典理论中的裸粒子，而是被一团虚粒子云包围着。这个虚粒子必定影响电子的质量。我们可以给出相应于“电子 + 云团”的量子方程，但是无论从数学上如何解释，这些方程总是给出一些无限大的结果。从量子烹调术的基石——薛定谔方程出发，正确的数学处理总是给出无穷大的质量，无穷大的能量和无穷大的电荷。没有合理的数学方法能将这些无穷大排除，但我们可以自欺欺人地把这些无穷大的项扔掉，我们可以通过实验测量的办法直接获得电子的质量，并且我们知道这是在理论处理中“电子 + 云团”应该给出的质量。所以理论家们就从方程中将这些无穷大的项扔掉，相当于用一个无穷大的量去除另一个无穷大的量。从数学上来说，用无穷大去除无穷大，可以得到你想要的任何值，所以说其答案就是他们想要的答案，也就是电子的测量质量。这个技巧称为重正化。

为了获得重正化如何进行的一个图象，我们设想一个体重为



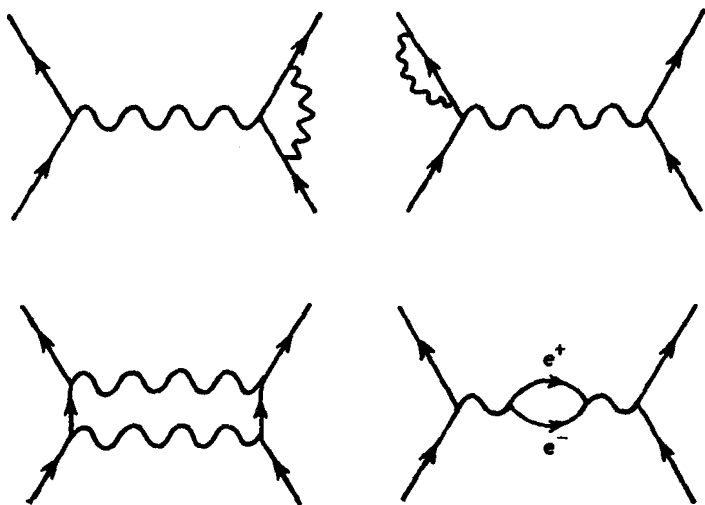


图 E.2 由于存在虚粒子（存在闭环的图）会产生电动力学的量子修正由此这会产生无穷大，必须通过繁琐的让人不能满意的重整化过程才能消除。

150 磅的人到了月球上。月球表面的引力仅为地球表面引力的六分之一。在地球上将弹簧称标定好，将他带到月球上，再称这个旅行者的体重时发现他仅仅 25 磅，尽管这个旅行者的质量并没有任何损失。在这种情况下，也许会有人想到可以称的标度作一“重正化”，在控制称的标度的地方调节一下，使其显示 150 磅。使用这个技巧之所以见效是因为我们知道旅行者在地球上的实际重量，而我们又想保持在地球上的称重记录不变。如果在月球上得到的重量是无穷大，那么要回到真实的重量就必须做无穷大的校正，这就是理论家们在量子电动力学中所采取的做法。不幸的是，虽然 150 被 6 分给出精确的答案 25，可是 25 乘以无穷再除

以无穷就不能毫无含糊地给出答案 25，而是可以给出任何答案。

即使如此，这个技巧仍然是强有力的。通过排除无穷大，理论家们可以拿薛定谔方程的解去做想要的任何事情，能用来描述电磁场与原子的相互作用谱的多数奇妙效应。结果是非常之好，因此，多数理论家将量子电动力学视为一种好的理论，并不去担心它的无穷大问题。这正如在量子烹调术当中并不需要担心哥本哈根解释和测不准原理一样。但是，虽然管用，它毕竟只是一个技巧。一个大人物仍对此深感不快。在 1975 年新西兰所作的报告中，狄拉克作了如下的评论：

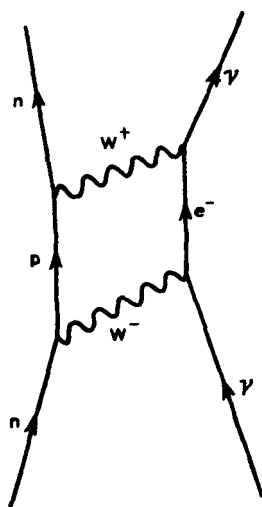


图 E.3 与交换一个玻色子不同，中子和中微子之间交换两个 W 玻色子足以引起计算结果中出现无穷大

我必须指出我对这种情况很不满意，因为在这种所谓的“好理论”中确实存在着忽略无穷的问题，并且这种取

舍是没有规则的。这并不是合理的数学。在合理的数学中忽略一项是因为它是小量，而不是因为它无穷大你不想要它！

在发表了“这个薛定谔方程无解”的观点之后，狄拉克在结束他的演讲之前强调指出，必须对现有理论作一比较大的调整以确保其在数学上的合理性。“简单的修改是没有用的，……我觉得需要作的修改有点像从玻尔理论到量子力学的修改那样。”到哪里去找这样的新理论呢？如果有这个问题的答案，我也会获诺贝尔奖了。我可以向你展示目前出现的一些有趣的进展，这些新进展最终将符合狄拉克关于什么是好理论的探索性研究。

## ◆ 时空的扭曲

也许对于宇宙本质的更好的理解存在于量子理论当中，那些到目前为止仍然被大大忽略的物理世界之中。量子力学告诉我们许多关于物质粒子的知识，但它对真实却几乎不能说什么。正如爱丁顿在 50 年前在《物理世界的本质》中所描述的：我们的固体物质大部分是由虚空构成的，形成这种图象的革命远比相对论革命更为基本。即使是像我的书桌或这本书这样的固体物质，其大部分也是由虚空来构成的。物质之于空间的比例比一粒沙子于阿尔伯特大厦的比例还要小得多。看来量子理论告诉我们的是：关于这个被忽略的  $99.9999\cdots\%$  的宇宙的知识。这个宇宙中充满了骚动，是个赝粒子的大漩涡。不幸的是，在量子电动力学中，那个给出无穷大解的量子方程也告诉我们，真空的能量密度是无限大的。即使是真空，“重正化”也是需要的。当将标准量子方

程与广义相对论结合起来以期给出真实性的更好描述时，情况更糟——无穷大仍然存在，但现在已不可能再将其“重正化”了。很显然是我们选错了目标。那么，什么是正确的目标呢？

牛津大学的罗杰·彭罗斯，为了取得进展而回到基本点。他以完全不同的方式来看待和描绘真空和粒子的几何蓝图。在这种几何学当中粒子被视为扭曲的时空，以及扭在一起的一些时空片断。显然，这个理论可以形象地称为“扭曲子理论”。不幸的是，不仅对于多数人来说数学跟不上，而且这个理论自身尚远未完善。但是这些概念是重要的。彭罗斯企图使用一种理论来解释一个固体物质（如这本书）中的微小粒子和广阔的虚空。这也许并不是一个正确的理论，但是对于大多数人忽视的地方，确实突出了标准理论失败的原因。

另有个想象小到量子量级的时空变形的方法。将引力常数、普朗克常数及光速（物理学三个基本常数）合在一起，可以构造出唯一一个具有长度单位的量，可以认为它就是量子长度，表示可以描述的有意义的最小空间范围。这个量确实很小，约为  $10^{-35}$  米，称为普朗克长度。同样地也可以将基本常数按另一种方式组合起来拼凑出唯一的一个时间基本单位：普朗克时间，约为  $10^{-43}$  秒 \* \*（如果你确实要知道，那么普朗克长度由  $Gh/C^3$  的平方根给出，而普朗克时间是  $Gh/C^5$  的平方根。）\* 谈论比它小的时间是毫无意义的，同样谈论比普朗克长度更小的空间也毫无意义。

在原子尺度乃至基本粒子尺度上，空间几何上的量子涨落都是完全可以忽略不计的，但是正是在小到这样一个基本空间尺度水平上才可以认为出现了量子涨落的泡沫。约翰·惠勒提出这个观点，将世界看作有着永不停息的表面的大海。对海上的飞行员来说看似平静的大海，却被一些在风浪中摇摆不定的生命占据

着。在量子水平上，时空有较为复杂的拓扑结构，有“蛀洞”及“桥”连系着不同的时空区域；或者换一种说法，虚空是在普朗克长度尺度上密集地排列着的黑洞组成的。

这些全是模糊不清、不尽人意且疑惑重重的观点。到现在还没有基本答案，但是明白我们对“虚空”的理解是混乱模糊和不尽人意的并没有什么坏处。将一切物质粒子视为无非是虚空扭曲的片断会拓宽我们的思路。设想如果我们“理解的理论坏掉了，那么我们的理论进展只会产生于我们至今尚未理解的东西。将我们的眼光盯住未来几年量子几何学的进展是很有益处的。然而在1983年，科学新闻上出现的大字标题是以旧的方式看待这个问题的两个观点。

## ◆ 对称性破缺

对称性是物理学中的一个基本概念。例如物理学中的基本方程是时间对称的，时间朝正向和反向发展都行。另外的对称性可理解为几何对称。一个旋转的球可在镜中反射出来，从球的顶部看下去，球是逆时针旋转的，在此情况下镜子中的像却是顺时针旋转的。真实的球及镜中的影像都以物理定律所允许的方式运动，这种意义下就称为对称。（当然如果时间反演，镜中的影子也会像真实的球那样运动。如果同时作空间反射及时间反演又回到没做操作的那样）将空间反射（称为宇称变换，因为它使左右交换）、时间反演，以及电荷取反分在一起形成了物理学很强大的内在性原则，那 **PCT** 理论，它是说物理定律应该在这三种操作下保持不变。**PCT** 理论是以假设为基础的，一个粒子放射出粒子与这个粒子吸收反粒子是一样的。

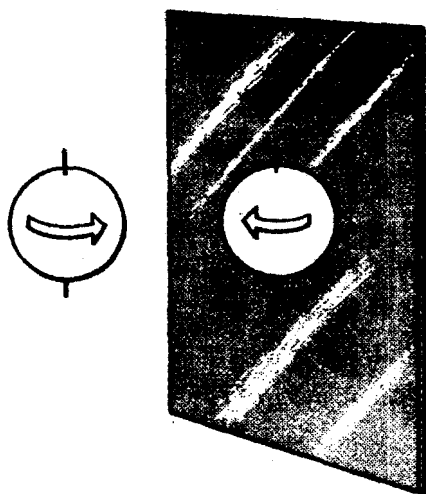


图 E.4 反射对称

在镜子里的球的转动与真实世界中的球的转动经过时间反演后是一样的。

可是其它的对称性用日常语言就难以说清楚了，需要有较完善的数字语言才能够描述。这些对称性对于理解粒子物理的前沿与最新进展至关重要。但是可以这样想象一个物理例子：一个平衡在楼梯台阶上的小球，如果我们将它从一个台阶移到另一台阶上，那么我们就改变了它在重力场中的势能。我们怎样移动小球并不重要，我们可以让它绕地球转动一周用火箭将其送至火星，然后再将它弄回来，然后放在新台阶上。决定重力势能改变的唯一因素就是两台阶的高度，即开始及结束时的位置。这也不依赖于我们从何处开始测量重力势能，我们可以从地下室开始给出每一层楼梯台阶的正势能，也可以从两个台阶中较低的那个开始，

这种情况下，对应的位置势能为 0，\* 两个台阶之间的势能之差还是一样的。这种新对称性，由于我们在测量中重新标定了“基线”，称为“规范”对称性。

同样使用于电磁力。麦克斯韦的电磁学是规范不变的，因此 QED（量子电动力学）是一种规范理论，QCD 也一样，它的模型来自于 QED，在量子水平上处理物质场时有些复杂，但所有这一切都可以由规范对称性理论给出满意的描述。但这是 QED 的一个关键性质，也是唯一的规范对称性质，因为光子的质量为 0 如果光子有一点质量，那就不行。结果表明，作为重整化理论，我们一直与无穷大打交道。当物理学家们尝试用描述电磁场时很成功的规范理论为模型构造类似的弱核作用的理论时，这一点就成了问题。弱核理论对应于放射性衰变并从核中放射出  $\beta$  粒子的过程。正如电磁相互作用是由光子传递一样，弱相互作用也一定要由它自己的玻色子作媒介来传递。可是这种情况却有点复杂，因为为了在弱相互作用过程中传递电荷，弱玻色子（弱场中的“光子”）必须带有电荷。因此实际上应当至少有两种这样的粒子，记为  $W^+$  和  $W^-$ 。因为弱作用并不总是包含电荷的传递，理论学家不得不引入第三类介子——电中性的  $Z$  玻色子来完备弱光子集合。开始时，存在这种粒子的要求愁坏了物理学家们，因为并无实验证据证实它们的存在。

与弱相互作用有关的正确的数学对称性及两个  $W$  粒子\*\*，电中性的  $Z$  介子首次是由哈佛大学的希儿顿·格拉肖在 1960 年提出的，发表于 1961 年。他的理论并不完善，但是却提供了关于电

\* 此例来自于保尔·戴维斯的书《自然中的力》，剑桥大学出版社，1979

\*\*  $W^+$  和  $W^-$  也被认定为粒子和反粒子，如电子  $e^-$  和正电子  $e^+$ ，在不至于弄混的情况下，它们统用一个名字表示为  $W$ ，称为矢量介子。

磁相互作用和弱作用可以纳入同一种理论的可能性的看法。关键的问题是，这个理论需要引入  $W$  粒子。与光子不同，这种粒子带有电荷而且还有质量，这一点不仅使重整理论难于应用，而且也破坏了与电磁相互作用的类比，在电磁作用中光子是没有质量的。它们必须具有质量，因为弱相互作用是短程作用——如果它们不具有质量，那么作用范围将是无穷的。质量本身倒不是什么大不了的问题，问题在于粒子存在的自旋。所有无质量的粒子如光子，量子规则仅允许其带有要么平行要么反平行于其运动方向的自旋。一个有质量的粒子，如  $W$  介子，可以具有垂直于其运动方向分量的自旋，这多出来的自旋态就可能引起问题。如果  $W$  粒子是没有质量的，弱电作用可以合并成一种可重整化的理论来解释二者。正是对称性“破缺”才产生了问题的。

数字对称性是如何破坏的？最好的例子来自于磁学，我们可以将一个由磁性材料做成的棒看作数目极多对应每个原子内部小磁子组成的。当加热时，这些小磁子可以沿各个方向转动，即随机地改变各自的方向，因此磁棒不存在总体磁场——不存在磁性的非对称。但是当将磁棒的温度降为特定温度（称为居里温度）以下时，会突然出现所有磁子都按指的同一方向，磁棒变为有磁性的了。在高温下，对应零磁性的状态是最可能的状态，在低温下，最低能态是所有的磁子都平行排列（它们指向哪个方向并不重要）。对称性破坏了，变化发生了，因为高温时原子的热运动可以克服磁力，而在低温下磁力却比原子的热扰动强。

在 1960 年的后期，伦敦帝国学院的阿杜斯·萨拉姆与哈佛大学的史蒂文·温伯格独立地提出了弱相互作用的模型，此模型来自于 60 年代早期格拉肖提出的，晚些时间又由萨拉姆独立地创建的数学对称性。在新理论中，对称性破缺需要一种新的场——黑格斯场与粒子联系起来，这类粒子也称为黑格斯粒子。电磁及



弱相互作用合在一起与一种对称性规范场联系起来称为弱电作用，此场具有无质量的玻色子。后来到 1971 年由荷兰物理学家格瑞德·胡夫特的工作证明它是一种可以重整化的理论，这时人们才正视这个理论。Z 粒子发现于 1973 年，这使弱电理论确立下来。弱电作用仅仅在非常高的能量密度如宇宙大爆炸时才能“起作用”，在低能下它自发破缺产生带质量的 W 粒子及 Z 粒子，电磁作用与弱相互作用分道扬镳。

新理论的重要性可由这样的事实来肯定。当还没有直接的实验验证其正确性的时候，在 1979 年格拉肖、萨拉姆及温伯格共同获得了诺贝尔奖。早在 1983 年，在日内瓦的欧洲原子能中心（CERN）小组宣布实验上发现了在高能过程（由高能质子与反质子束碰撞产生）中产生的粒子质量约为 80GeV 和 90GeV，这可由 W 和 Z 粒子作出最好的解释。这些与理论预言吻合完好。格拉肖 - 萨拉姆 - 温伯格理论是“好”理论，因为它给出了可被验证的预言，不像格拉肖早期的工作，那是不能验证的。此时，理论家们是闲不住的。如果两种作用可以合在一起，为什么不能找到一个统一场来包容所有基本相互作用呢？与以往任何时期相比，此时爱因斯坦的梦想更急于成真，不是以一种对称形式，而是以超对称和超引力形式。

## ◆ 超 引 力

除了重整化的问题外，规范场论的另一个毛病是它们不唯一。单个规范理论包含以重整化修改以适合真实的物理，有无穷多种可能的规范理论，选择以描述物理的相互作用的那个必须在同样特别的基础上作修改以适应真实界的观测结果。更糟的是，

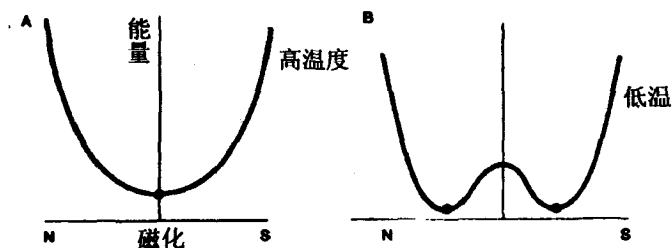


图 E.5 当磁棒冷却时，产生了对称性破缺

规范理论没有给出应该存在有多少种基本粒子——多少强子或轻子（与电子属于同一家族）或规范玻色子或是别的什么粒子。物理学家们喜欢发现唯一的理论来解释物理世界，这种理论需要特定数目种类及特定种类的粒子。向这种理论前进的一大步来源于1974年发现的超对称。

想法来自于卡尔斯卢大学的朱利斯·外斯及加州大学伯克利分校的布鲁诺·朱敏诺。在理想对称的世界中物理理论会是怎样的呢？每一个费米子都应有对应的同一质量的玻色子。他们从这个设想出发。我们在自然中实际上看不到这种对称性，这可被解释为对称性破缺。就如同电磁相互作用与弱相互作用的情况一样。当你用数学推导下去时，你当然会发现一种方法描述这个对称性。这种超对称在宇宙大爆炸时期存在着，随着宇宙大爆炸过程，发生了对称性破缺，通常的物理粒子获得了较小的质量，而超对称粒子带着较大的质量。超对称粒子仅仅存在于极短的时间中，接着就破碎成一大群较小质量的粒子；如果现在想要制造超粒子，我们需要制造出像宇宙大爆炸一样的条件。这种能量是很高的，难怪连 CERN 的质子-反质子对撞机也不行。

这些理论总是“如果如果”。但是它具有一个较大的优越性。

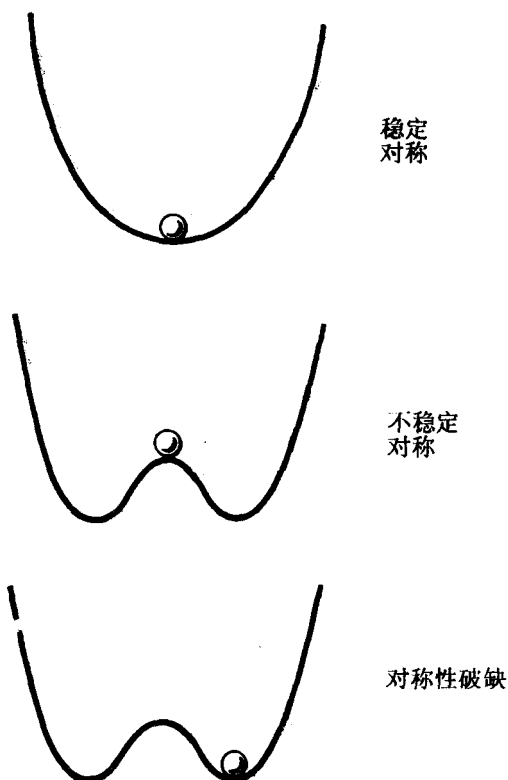


图 E.6 图 E.5 中的对称性破缺可理解为在谷中的小球  
只有一个谷时，小球是稳定的对称态；出现两个谷时，对称  
点就不是稳定的了，小球迟早要落在左边的谷中或右边的谷中，  
产生了对称性破缺。

虽然有许多不同的超引力场理论，各不相同，但是对称性限制要求这些理论的每一个版本都允许只有确定数目的不同粒子。一些

理论要求包含几百个不同的基本粒子，这是有些出乎意料的，但是其它的理论则可以要求有很少，没有哪个理论会预言可能存在无穷数目的“基本粒子”。更好的是，这些粒子依其超对称群整齐地排列。最简单的理论，只有一个零自旋的玻色子及相应的一个自旋为  $1/2$  的粒子；再复杂一点的具有两个自旋为  $1$  的玻色子，一个自旋为  $1/2$  的费米子，另一个为自旋  $3/2$  的费米子，等等。可是还有好消息呢！在超对称中，你不需要担心重整化。大多数理论中，无穷大自动消除了，而不是特意去掉的，你只要按着正确的数学规则处理就行了，余下的是合理的有穷数的运算。

超对称看起来很不错，但这并非最终答案。它还少一些东西，物理学家们还弄不清它们是什么。不同的理论可以很好地适合真实世界的不同特征，但还没有一个超对称理论能够解释所有真实的世界。尽管如此，有一个特别的超对称理论应予以特别的重视。这个理论被称为  $N=8$  超引力。

超引力基于这样一个假设，存在一种被称作引力子的粒子，由它携带着引力场。同它在一起的还有  $8$  个粒（因此  $N=8$ ）子被称为引力场量子， $56$  个“真实”的粒子（如电子夸克之类）， $98$  个参与传递相互作用的粒子（如光子， $W$  子，及胶子）。粒子的数目够怕人的，但是它们均可由理论精确地确定。物理学家遇到的困难在于探测理论所预言的引力学。从来也没有探测到这些引力子，这也许有两个刚好相反的原因。也许引力子太难捕捉，像鬼影似的，具有很小的质量，从不与其它物质发生作用。或者也许太重了，我们目前的粒子机器还没有足够的能量制造或观察它们。

问题是严重的，但是像超引力这样的理论至少是自洽的，有限的，不需要重整化。这好像有点感觉物理学家走对路了。可是，如果粒子加速器不足以验证这些理论，它们怎么能够被证实

呢？这就是为何天文学这个研究全宇宙的科学目前一片兴旺的原因。正如纽约科学学会执行主席亨兹·派吉尔在 1983 年所讲的：“我们已进入后加速器物理学时代，整个宇宙的历史将成为基础物理的检验所”<sup>\*</sup>天文学家也依同样的热情接待粒子物理学。

## ◆ 宇宙是真空涨落的产物吗？

也许天文学真的就是粒子物理的一个分支。有一个观点发展了十年时间，走过从被认为是完全疯了到格外受人尊重的历程。按照这个观点，宇宙生于大爆炸的一个火球，随时间扩展然后又缩回到火球中去消失。此即所谓真空涨落，不过是在较大的尺度上说的。如果宇宙刚好在不定的膨胀及最终的坍塌中在引力的边界达到平衡，那么引力的负能量将刚好被充满于其间的物质质量的正能量所抵消。封闭的宇宙的总能量为 0，不仅能够存在所有粒子相互离开这个整齐的过程，由于来自于真空的零能量涨落，就连我们所看到的我们本身这样的奇妙的种类都不难造出来。

我特别欣赏这个观点，因为在 1970 年我做一部分工作将其改造成现代的形式。原有的思路可以追溯到路德维格·玻尔兹曼那个时代。这位 19 世纪的物理学家是现代热力学及统计力学的创始人之一。玻尔兹曼想到宇宙是应该处于热力学平衡的，可表现出来的却不是这样。于是想到现在的表现可能是平衡态的暂时偏离，只要平均在较长时间内保持平衡态，这种涨落在统计上是允许的。这样的涨落机会在可见的宇宙尺度上是很小的，可是如果宇宙在无穷长时间中存在一种稳态，那么实际上这肯定最终

<sup>\*</sup> 引自《科学》1983 年 7 月 29 日第 220 卷 491 页

是会出现的。因为偏离平衡将能允许生命产生，无怪乎从宇宙平衡态很稀少的机会里我们能够存在。

玻尔兹曼的这个观点从来未受过赏识，但其略为改变一些的说法却不断地出现。在 1971 年，此想法引起我的兴趣，我把它写给 *Nature*（《自然》），宇宙有一种可能是生于火中，先膨胀然后塌为无。两年后，纽约市立大学的爱德华·泰恩向 *Nature* 提交了一篇文章，将此观点发展为大爆炸出于真空涨落，但在信中引用我的匿名文章作为其思考的起点。因此，我对此宇宙模型有特别的兴趣。当然泰恩在将宇宙是真空涨落想法引入现代思想中应该得到完全的荣誉。别人没有想到，而他却指出如果宇宙具有零净能量的话，它允许存在的时间将有

$$\Delta E \Delta t = h$$

实际上是很长的。“我并没有宣称承载我们的这样的宇宙会经常出现，我仅仅说其期望的频率不是零。”他说，“可是那种情况下逻辑又可指出，观察者又总可以发现他们存在于能够产生生命的宇宙中，这种宇宙是很大的。”

这个观点埋没了十年，无人问津。但是近来人们开始认真地对待此观点的新说法。尽管泰恩开始希望的宇宙很大，可是计算表明任何从真空涨落中产生的“量子宇宙”实际上是很小的，仅是很小的空间中很短的现象。但是宇宙学家发现了一种方法可将此小宇宙作巨烈的膨胀使之在隙间便可以长成我们居住的大小。“膨胀”是 80 年代中期宇宙学家们随便造的一个词。膨胀解释了如何一个小的真空涨落会长成我们存在的这样大小的宇宙的。

## ◆ 膨胀和当今宇宙

宇宙学家对可能存在于宇宙中的任何新粒子都感兴趣，因为他们总在寻求能让这个宇宙封闭所要求的“看不见的质量”。质量约为  $1000\text{ev}$  的引力子特别有用——它们不仅可以帮助封闭这个宇宙，而且，根据描述产生于大爆炸的这个宇宙的方程，存在这种粒子就能形成银河系这么大小的一大块物质。质量约在  $10\text{ev}$  的中微子将能够帮助像银河系这么大尺度的大块物质长大，等等。可是在过去的两年中，宇宙学家对基本粒子更有兴趣，因为对称性破缺本身可能造成时空的突变而成为膨胀的动力。

这个想法首先产生于麻省技术学院的阿兰·高斯。他走回到这样一幅图象中，热而密的宇宙相中所有的物理作用（除引力外，因为理论还不包含超对称）统一为一种对称作用。随着宇宙变冷，出现了对称性破缺，自然中的基本力——电磁相互作用，强相互作用和弱相互作用分道扬镳。很明显，对称性破缺之前后两种状态是很不相同的。从一种态到另一种态是一种相变，正如水冷却时变成冰，加热时变成气一样。与常见的相变不同，根据理论，在早期宇宙中对称性破缺产生了极大的排斥力，在不到一秒钟的时间内就可使每一部分都炸开来。

我们谈论的是宇宙形成的早期，大约在  $10^{-35}$  秒之前，那时的温度为  $10^{28}\text{K}$ 。由对称性破缺产生的膨胀是指数性的，通过  $10^{-35}$  秒就能将空间体积扩大一倍。在不到一秒的时间内，这种不断向前的膨胀将质子尺寸大小的空间胀成我们今天所观测到的宇宙大小。接着在时空膨胀区中，我们认识的时空通过进一步的相变从小泡中生长出来。

高斯的最早的膨胀宇宙理论不想解释开始的小泡来自于何处。将这个原因与泰恩描述的那种真空涨落等同起来是很具有吸引力的。

这幅生动的宇宙观解决了许多天文学家的疑惑，我们的时空小泡似乎以一种维持着的开放和封闭边界上的速率膨胀的，这并非巧合。膨胀宇宙格调要求只有这种平衡才能够持续，这是因为小泡的质/能密度与膨胀力的关系。更让人大吃一惊的是，这种格调将我们托付给宇宙中无关紧要的规则，将我们能看到的東西都纳入了一个小泡，这个小泡比整个扩展的整体还要大。

我们生活在一个激动人心的时代，很明显处在将宇宙作出有意义的理解将要突破的界面上，正处于狄拉克预言的，一种从像玻尔的原子到量子力学过渡的时候。我发现将寻求薛定谔的猫结束于大爆炸，宇宙学、超引力及膨胀的宇宙很有意思，因为我前一本书《空间扭曲》中讲述了引力和广义相对论的故事，也在此处结束。这两种情况都不是预先计划的；两种情况下，超引力似乎是个自然的统一的开始，但是没有一个整齐的结尾，我们也希望永远不要有。正如李查德·费曼所讲“一种使科学停滞不前的办法是对你已知道的东西做实验。”物理就是要探索未知，而且

我们缺的是想象，一种尽情地想象。我们不得不寻求一种世界的新观点，以使之与我们所知的一切是融洽的，但是在预言中一定有一些不同，否则就没有什么意义了。在这些不同的预言中必须与自然相一致。如果你能找到这个世界的另一种观点，它与我们所观察的一切相一致，而在其它地方不一致，你一定是取得了新的发现。这几乎是不可能的，但也说不准……



如果物理的事业已经完成，我们所居住的世界将不会那么有趣了。这就是为什么我喜欢给你留下这不固定的结尾，逗人兴趣的暗示，以及要谈的新故事的期望。这些新的故事每个都像薛定谔的猫一样地动人。



## 参考文献

这里的书是我在寻求薛定谔的猫的过程中看过的。我不愿将其作为艰深的量子理论书目，这个领域的专家们无疑会看到一些他们感兴趣的课题在这里是没有的。然而，从这一本参考书到另外一本，你肯定能找到任何写过的量子理论的重要内容，而且是从下面的节选开始并带着你一步步地走的。除了实际的内容外，我还在节尾列入了科幻小说的部分题目，它们不仅具有娱乐性，而且对量子理论方面，尤其对平行世界的理解有所裨益。

### ◆ 量子理论

A.d' Abro, *The Rise of the New Physics*, volume two, Dover, New York, 1951 (original edition 1939)

《新物理学的兴起》第二卷，为非专家写的，较深入地介绍了早期量子理论的处理方法。第一卷包括历史和数学背景，第二卷全部是量子理论。对现代读者来说旧式的讲解不太好理解，但是完全的处理方法（两卷共计 982 页），如果你很愿意致力于其中的教学，理解本书值得一看。

Kenneth Atkins, *Physics - Once over - Lightly*, Wiley, New York, 1972

《轻松浏览物理学》

本书是为非科学专业写的一学期用的物理教材，对随意学一点的读者来说有趣且清晰，值得一读。它是非科学领域的最好的物理导游，带着读者从简单的开始游历相对论、量子力学、原子核和粒子物理。虽然对哲学含义和量子真实性仅仅是有些触及，本书讲的量子技巧足以用来计算一些简单的方程。强力推荐。

**Ted Bastin (editor) , *Quantum Theory and Beyond* , Camleridge University Press, New York , 1971**

《量子理论及其背后》

本书材料基于 1968 年在剑桥举办的关于量子理论的范式变迁发生的可能性的讨论会中的文章。大部分是严肃和哲学味很浓的话，比此处列举的其它书目都要重。

**Max Born , *The Restless Universe* ,Dover, New York , 1951**

《永不停息的宇宙》

由量子理论领导人之一的关于新物理的最赋时代性的讲解。本书不是量子力学的发展历史书，而是物理“普及”书，包括第一次向外行人介绍玻恩后来获得诺贝尔奖的统计解释。在半个世纪以前，也因用卡通插图来阐明动力学过程而有名。

**Max Born , *The Born – Einstein Letters* , Macmillan, London 1971**

《玻恩—爱因斯坦书信集》

两位伟人的书信集，由玻恩作了注释。包括量子理论的一些有趣的间接说明，以及爱因斯坦不愿接受哥本哈根的解释的情况。

**Loanis de Broglie , *Matter and Light* , Norton, New York**

《物质和光》(译自 1937 年法语版；也有多弗出的平装书)  
主要兴趣在于历史；这是出自于新物理创立参与者之手的几乎是与新物理同时代的讲述。

**Louis de Broglie, *The Revolution in Physics*, Greenwood Press, New York, 1969**

《物理学的革命》

另一本由旧法语书翻译得不太好的英语版书，其主要兴趣在于历史。

**Fritjof Capra, *The Tao of Physics*, Bantam, New York, 1980**

《物理学之“道”》

第一次把现代粒子物理与东方哲学、神秘主义和宗教联系在一起，由此引发了一大批这样的书。卡普拉是一个物理学家，编写出关于基本量子观点的动人故事，但它并不是历史书。

**Jeremy Cherfas, *Man Made Life*, Blackwell, Oxford, 1982**

《人造生命》

对基因工程及其潜力与限制的开门见山的介绍。

**Barbara Lovett Cline, *The Questioner*, Crowell New York, 1965**

《提问者》

以传记体方式写成的量子力学故事——有关于卢瑟福、普朗克、爱因斯坦、玻尔、泡利和海森堡的章节。材料读来愉快，诸多轶事，不过物理的成分较少。

**Francis Crick, *Life Itself*, Simon & Schuster, New York, 1982**

《生命本身》

生命分子本质的浅显介绍，有一个观点是地球上的生命能自由地走向宇宙。

Paul Davies, *The Accidental Universe*, Camtridge University Press, New York, 1982

《出于偶然的宇宙》

清楚但是数学化地解释多宇宙的“巧合”才使我们存在，包括简短地提及埃弗雷特的量子解释与人择原理的关系。他的另一本书《其它世界》（*Other Worlds*, Dent, London, 1980）是关于讲解人择原理的非数学“通俗”读物。

Bryce DeWitt and Neill Graham, editors, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973

《多个世界的量子力学解释》

确立多个世界理论基础的关键性论文的再版集。书内包括埃弗雷特的博士论文，从《现代物理学评论》（*Reviews of Modern Physics*）上摘下来的埃弗雷特和惠勒 1957 年的文章，德维特和格拉哈姆后来对该理论推广和扩展的尝试，还包含了其他人的工作。这是个整齐的一卷的集子，总结了那小题大作的问题到底是什么。

Paul Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, New York, 1982

《量子力学原理》

即使到现在还在作正而八经的限定性教材。这本书修订了多次，包括一节量子电动力学的内容，其引言章节给出了不确定原

理，叠加原理，以及你在别处都找不到的量子力学内容的透彻的讨论。即使你不是个正经要学的学生，也值得将它借出来读完第一章；如果你确实想学，狄拉克解释薛定谔和海森堡工作的数学方法比现在关于此课题的任何书本资料都更具逻辑性和可读性。

**Paul Dirac, *Directions in Physics*, Wiley, New York London, 1978**  
《物理学的方向》

这是 1978 年在澳大利亚和新西兰作的演讲集。作为 1920 年发展出量子力学的人物中的最后一位幸存者的观点，这本书极其珍贵，能从抄本中直接获得狄拉克的清晰更富有情趣的讲演，这更加增强了本书的份量。本书包含了对一些如易变的引力和单磁极子观点的讨论，显示了现在物理的不完善性。

**Sir Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World*, Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1935**

《物理世界的本质》

本书是爱丁顿 1927 年作的系列演讲，本书写于量子理论正在迅速发展的时候，给出了量子理论给一位 20 年代的伟大的物理学家的冲击的认识。作为一位领先的科学家，爱丁顿也是第一位最好的科学普及者。

**Sir Arthur Eddington, *Science and the Unseen World* Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1979**

《科学与看不到的世界》

同一领域的更多演讲材料。

**Sir Arthur Eddington, *New Pathways in Science* Camleridge Univer-**

sity Press , 1935

《科学新途径》

本书收集了 1934 年在康尼尔大学的演讲。阐述了《物理世界的本质》问世以来的科学进展情况。

Sir Arthur Eddington , *The Philosophy of Physical Science* , University of Michigan Press, Ann Arbor, 1958

《物理科学的哲学》

也是 30 年代晚期的更多演讲集，正如题目所指有更多的哲学研究。

Leonard Eisenbud, *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics* , Van Nostrand Reinhold , New York , 1971

《量子力学的概念基础》

本书使用最少的数学强调了量子理论的物理学意义，这里的“最少”仍指不少。是一本很好的量子力学基础指导书，不是接着讲原子结构等概念，而是对量子世界的难题给出了物理学及哲学上考察。

Richard Feynman, *The Character of Physical Law* , MIT Press , Cambridge , 1967

《物理规律的特点》

1964 年在康尼尔大学作的系列电视演讲，在 1965 年又在 BBC2 上广播。该文浅显易读，包括自然的量子力学观等好章节。

Richard Feynman, Robert Leighton and Matthew Sands , *The Feynman Lectures on Physics* , Volume III, Addison - Wesley, Reading,



Massachusetts , 1981

《费曼物理学讲义》第三卷，

正经学习量子力学学生的最易入门的教材。最好的是对著名的双缝实验的讲述，还包括对超导的有趣的讨论。

George Gamow, *The Atoms and Its Nucleus* , Prentice - Hall , New Jersey , 1961

《原子和原子核》

这是关于量子 and 波理论的浅显读物，由讲故事能手高手高莫，他刚好就是故事中的人——高莫曾跟着玻尔工作了一段时间。讲法有些古旧，但是很有趣，对几个大人物的描述值得研究。

Maurice Goldsmith, Alan Mackay, and James Woud huysen , editors , *Einstein : The First hundred Years* , Pergamon , Elmstord, New York , 1980

《爱因斯坦：第一个世纪》

是凑和在一起的书，其中包含 C.P. 斯诺写的关于爱因斯坦的精彩文章。

John Gribbin and Jeremy Cherfas , *The Monkey Puzzle* , Bodley Head , London, and Pantheon , New York, 1982

《猴子之迷》

关于人的演化的书，但包含了对 DNA 工作的深奥的和非专业性的解释。

Niels Heathcote, *Nobel Prize Winners in Physics 1901 - 1950*, Hen-

ry Schuman, Inc. , 1953

《1901 - 1950 年物理诺贝尔奖获得者》

是简要的传记书，粗略地总结并描述了每位获奖者的获奖工作。这卷全含了 20 世纪上半叶物理量子理论的工作。只有两个重要人物不含在内——马克思·玻恩，他直到 1950 年才获奖，恩内斯特·卢瑟福，他获得的是化学奖。本书值得深入研究。

Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy* , Harper & Row , 1959  
《物理和哲学》

在 1955 年到 1956 年在圣·安德斯大学所作的系列演讲。包括量子理论的简短历史，以及来自一个量子力学创立人对哥本哈根解释的讨论。完全是非数学的。

Werner Heisenberg, *The Physicist's Conception of Nature* , Greenwood Press, Westport, Connecticut, 1970

《自然的物理学家看法》

另一部半哲学性的书，值得注意的是，请不要与贾格帝斯·密哈罗的同一名称的书相混了。

Werner Heisenberg, *Physics and Beyond* , Harper & Row, New York and Allen & Unwin, London, 1971

《物理学及其背后》

子标题是“科学中生命记忆”，轶事性的自传体，科学成分少，主要是关于海森堡本人的。

Banesh Hoffmann, *The Strange Story of the Quantum* , Peter Smith Magnolia, Massachusetts 1963

### 《量子力学中的奇异故事》

以 40 年代的眼光看待相对较新的量子理论的有趣观点。作者执着于让每个人都能看懂有时掉进过去普遍化的陷阱中，迷失了自己谈论的话题主线，但在其出现的 40 余年中仍不失为好的读物。写于 1959 年的后记值得一读，它清晰地解释了在 20 年时间里量子理论的发展，包括费曼图和随机性的丧失。

Ernesnt Ikenberry, *Quantum Mechanics* , Oxford University Press , London , 1962

### 《量子力学》

是为数学家和物理学家写的书，并不是给外行人的指导书。重点在于“怎样”运用量子力学解决问题，也讲了一些方程的含意。

Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* , Mc Graw – Hill, New York , 1966

较深入的研究，虽然没有能够摆脱掉数学，但是，即使你跳过大多数的数学内容不看，仍可以得到很多有意的认识。

Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* , Wiley , New York & London, 1974

### 《量子力学的哲学》

本书在于解释量子力学及其含意。有时，对哥本哈根解释的由来讲得过多过细，但仍比量子算法走得远些。

Pascual Jordan , *Physics of the 20th Century* , Philosophical Library , New York , 1944

正如以上提到的德布罗意的书，本书出自于一位 20 世纪物理的带头人之手，主要兴趣在于历史。

Horace Judson , *The Eighth Day of Creation* , Simon & Schuster, 1982

《创世第八天》

这是一部大型的，有点不堪其重的书，写的是关于 20 世纪后半叶分子生物学革命性的发展。就其对分子生物学故事和科学家工作方法的见解，本书值得一读，尤其在谈到量子革命方面的事时，贾森很明白，他强调说正是由于林奈·泡令将量子力学原理应用于处理复杂的化学分子，才会有现在被称为分子生物学的这门学科，遗憾的是他错误地认为海森堡、玻恩、狄拉克的矩阵量子力学产生于薛定谔的波动量子力学之后。但是人无完人。

Jagdish Mehra ( editor ) , *The Physicist' s Conception of Nature* Kluwer, Boston , 1973

《物理学家关于自然的概念》

1972 年庆祝保尔·狄拉克 70 周年诞辰在 Trieste 举行的学术会议论文集。供稿人全是大人物的，读起来有点像是在读量子力学的《世界名人录》。全书 839 页，用科学的语言，指出了 20 世纪物理学的方向。这部史诗似的书是最好的这方面的指导书。

Jagdish Mehra and Helmut Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* , Springer - Verlag, New York , 1982

《量子理论的历史发展》

限定使用的量子力学历史专著。目前出了 4 卷，写到 1926 年，其余 5 卷计划将历史写到至今。虽然这部史诗般的巨著未摆

脱数学，但许多方程都有丰富的解释。

Abraham Pais , *Subtle Is the Lord*... , Oxford University Press, London & New York , 1982

《难以捉摸的上帝》

有关爱因斯坦生活与工作的限定性专著。

Heinz Pagels, *The Cosmic Code* , Simon & Schuster, New York, 1982

《宇宙密码》

很有胆量，试图在一本书中就解释清楚相对论、量子理论及现代粒子物理。这本书是粒子物理学家写的，书的中心内容是详细地介绍粒子。书中对量子理论是一带而过的，仅作为理解粒子物理世界所必需的背景知识，没有历史展望。如果你想知道粒子的产生过程，本书是很好的读物。将本书与卡普拉及朱可夫的书对比着看也很有意思。

Jay M. Pasachoff and Marc L. kutner, *Invitation to Physics* , W.W. Norton, New York & London , 1981

表面上看此书是非科学专业的课本，但是此书提供了以很少的数学统观全物理的方法，可以放心地推荐给任何一个对现代科学有兴趣的人。

Max Planck, *The Philosophy of Physics* , W.W. Norton, New York, 1963

本书仅对历史感兴趣。作者开始对自己做的不欣赏，但是由此创建了辐射的量子理论。本书中可洞察出对此人的想法。

Erwin Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics* , Chelsea Publishing Company, New York , 1978

《波动力学文集》

波动力学就基于这些论文。书中包括薛定谔对矩阵力学与动力学的等效性的分析和证明。关于矩阵力学的原理基本文献是范·德·沃尔顿收集的。

Erwin Schrödinger, *What is life ?* Camtridge University Press, New York , 1967

《生命是什么》

写得很优美，对阐明生命分子的人来说影响最大的是历史趣味。虽然现在知道生命分子是 DNA，基因并非如薛定谔在书所说的蛋白质构成的，本书仍值得一读。如果本书不能让你相信量子理论是基因工程至关重要的基础的话，那么等于白读。

Erwin Schrödinger, *Science , Theory and Man* , Dover Publications/ Allen and Unwin. London , 1957

《科学 理论和人》

包括薛定谔获诺贝尔奖时的致词，本书清楚，随和。对任何对量子力学发展感兴趣的人，本书是基本读物。

Erwin Schrödinger, *Letters on Wave Mechanics* , Philosophical Litrary , New York , 1967

是薛定谔与爱因斯坦，普朗克和劳伦兹的来回书信集。目的在于揭示这些伟人的思想。那个著名的猫佯谬的信也在其中。

**John Slater, *Modern Physics*, Mc Graw – Hill, New York, 1955**

**《现代物理》**

使用了最少的数学，但是却是写给正经的研究者用的，虽然古旧，仍是大学量子理论最好的入门书。

**J. Gordon Stipe, *The Development of Physical Theories*, MC Graw – Hill, New York, 1967**

大学一年级的基本入门书，包含了对量子力学和原子物理的很好介绍。是教科书，不是写给外行人看的指导书。

**B. L. Van der Waerden ( editor), *Sources of Quantum Mechanics*, Peter Smith, Magnolia, Massachusetts, 1967**

基础论文集，全都是英文的，包含直到矩阵力学的创立的所有论文（海森堡，玻恩，约当，狄拉克），但不包含关于薛定谔的波动力学的论文（这些论文另集为一书，见薛定谔的目录）。书中文字简明，但仍深入地介绍了关于每篇论文的工作。

**James D. Watson, *The Double Helix*, Atheneum, New York, 1968**

**《双螺旋》**

书写得很有味，生动地阐述了 DNA 结构的发现。不是“有些难读”或“全都难读”，而是读来趣味盎然。真是值得一读。

**Harry Woolf (Editor), *Some Strangeness in the Proportion*, Addison – Wesley, Reading, Massachusetts, 1980**

**《分配中的奇异性》**

本书是为纪念爱因斯坦诞辰一百周年在普林斯顿高级研究所中举办的学术会议上的会议论文集。作者列出来就像是理论物理

学界的《世界名人录》，包含有关于爱因斯坦贡献的深入探讨。虽然书中大部分都没有数学内容，但一些问题却写得很深入，不是一般人可以随意读读的。

**Gary Zukav , *The Dancing Wu Li Masters* , Bantam , New York , 1980**

#### 《物理大师的舞蹈》

本书是故意与卡普拉所著《物理学之“道”》作对的，从一个非物理学家的观点讲述了同样一个故事。建议所有的科学家都去读一读它，看看非科学界是怎么看待新物理的。没有学过科学的人应注意朱可夫有时过激，书中的科学并非 100% 精确，而且正如卡普拉一样，他对观点的发展仅是一扫而过。但是仍值得一读。

## ◆ 科幻小说

**Gregory Benford , *Timescape* , Pocket Books , New York , 1981**

#### 《时间隧道》

在科幻中给出物理研究者一幅最好的肖像；另外对可以在多世界现实中进行的时间渡超有很精彩的科幻描述。

**Philip Dick , *The Man in the High Castle* , Corgi Press , Boston 1979**

#### 《高高城堡中的人们》

写出了个与现实平行的那个世界中的故事。故事写到美国在二战中战败了。使用科学很少，却写得很好，但是有些周折，



有点出格了。

**Randall Garrett , *Too many Magicians* , Ace Books, New York 1981**  
《这么多的魔术》

这是一类“如果...将全”的故事，将故事置于一个平行的现实中，在那里理查德·里昂哈特活得足够长以保证英国皇位不会传于其弟。有些科学味，但更属于侦探故事，有意思。

**David Gerrold , *The Man Who Folded Himself*, Amereon, Ltd.,  
Mattituck, New York 1973**  
《卷曲人》

描述了在多个现实世界中时间向前和向后进行时造成的混乱结果，有趣味和娱乐性。在他玩的把戏中可将“科学”扔在一边不管，但意思却与本书第十一章讲的观点相近。

**Keith Roberts, *Pavane* , Hart - Davies, London , 1968**  
《孔雀舞》

故事可能发生在平行宇宙中，也许不是。但在哪种情况下此书都不失为一本可读物。

**Jack Williamson , *The Legion of Time* , Spheese, London 1977**  
《时间的传说》

首次是作为系列故事发表在杂志上。只要看下面一点，就知道在那个时代科幻传统上就算得上是合格的冒险故事。当我循着故事往下读时，无论是在科幻小说中，还是在真的东西中，我第一次认识到平行世界的概念。后来成为量子力学多世界的解释。当然还有旧的“如果...将”故事能够将故事置于另一现实中，但在量子力学才建立一年的时间中，威廉逊就使用相当科学的语言

设置他的背景。休·埃弗雷特在 19 年后在他的博士论文中，虽然每步都置于安全的数学推导之下，仍难于前行。“在亚原子层次上，产生无穷多种可能的分支”。科学幻想小说真的预言科学理论的进展非常稀少，即使它预言了，就值得一看。

Robert Anton Wilson, *The Schrödinger's Cat trilogy* (The Universe Next Door, The Trick Top Hat, The Homing Pigeons) All published by Pocket Books, New York, 1982

### 《薛定谔的猫三部曲》

几乎无法描述这种有趣的，相互无关联的精彩三部曲。其中有三种量子主题（每部一种），作者小心翼翼地将有点相同的动作及有点相同的人物安排在每一种量子主题中。《薛定谔的猫三部曲》之于量子力学有点像劳伦斯·杜雷尔的《亚历山大里亚的四重奏》之于相对论一样，只不过华生更有趣些。有味，但是如果你得到这个味，你就能尝到你自己的量子力学的真味道了。

科幻小说作家总是“发现”量子理论，每过几个月，就有一个对几率刚刚了解的人写出一个新故事。近来的例子是格里格·贝尔的《薛定谔瘟疫》发表在 1982 年 3 月 29 日的《比喻》上；路德·拉克尔的《薛定谔的猫》发表在 1981 年 3 月 30 日的《比喻》杂志上。还有其它的小说，我只提这两个是因为他们都用了薛定谔的猫作道具来吸引那些不懂得量子力学的人的注意力，也让我腾出时间修改和发现以完成此书，同时也给了我书名。

我应感谢这两位作者及斯坦·史密特——《比喻》的主编。

## 第二篇

### 薛定谔的小猫



# 前 言

10年前，当我在写量子理论发展史时，从来没有想到将来有一天我会重新回到量子神秘性这一主题上来，并写出另一本书。在写《寻找薛定谔的猫》一书的过程中，我就着手说明量子物理学的亚原子世界是多么奇怪和神秘。一些稀奇古怪的实验结果导致了一些与常识不符的理论，这些理论又被进一步的实验所证实。无懈可击的逻辑迫使物理学家严肃认真地对待这些稀奇古怪的思想。20世纪80年代中期的基本观点为：尽管量子理论是非常奇怪的，但它却非常实用。这个理论使得我们得以清楚地理解激光、计算机芯片、DNA分子，等等。而“经典”物理学那些老的思想却不能解释这些现象。在《寻找薛定谔的猫》一书中，我所强调的并不是量子理论的不可思议，而是它的实用性。事实上，用费曼的话说：“没有人理解量子理论”。这一事实使得我在前一本书的结尾不太谦虚地这样写道：“我很高兴地留给你们一些不充实的结局、一些可望而不可及的暗示、还有很多工作要做的这样一个前景。”

但是当我很满意地将这些不充实的结局写出来时，许多物理学家并不满足于已有的成绩。他们为一个理论的不能理解而苦恼，尽管它很实用。自从1984年我对当时的情况作了一次概述以来，物理学家们已经做出了很大的努力，试图解决量子的神秘性。沿着这条思路，他们已经使得一些神秘性看起来更加神秘，并且已经发现了量子世界的一些新的奇怪的方面。他们已经发展了量子神秘性的解释。对于一个局外的观察者来说，这些解释是

一些越来越难以相信的、绝望的辩护。但是在经过了 60 多年的尝试以后，在过去的几年当中，他们也提出了关于量子神秘性的一个解释，这个解释是对过程的一个天才的洞察——不仅对于专家，对于任何对真实性的本质感兴趣的人来说这都是一个天才的理解。

这个新的理解不仅依赖于量子理论的合理解释，而且依赖于在爱因斯坦的相对论框架下对光的行为的解释。在本书中，我将这两种理论的发展放在一起，并说明描述宇宙运作的最好解释、所有量子神秘性的彻底解决，这些都需要同时使用量子论和相对论的思想。

在这里，我没有过多地讲解量子理论发展的历史背景。以前我已经讲过了。我从这样一个起点出发：量子理论已经取得了巨大的成功。在解释如何解决那些迷惑之前，先讨论一些新的疑问，以及看待古老疑问的一些新的途径。在这里你将会找到理解量子理论到底是什么所需要的一切知识，不管你是否曾经读过关于这个主题的文章（更不用说我自己的书）。你将读到这样一些看起来是自相矛盾的现象：例如光子（光的粒子）可以在同一时刻位于两个位置，原子能够同时通过两条路径，对于一个以光速运动的粒子来说时间是静止的，等等。同时你还会发现一个严肃的建议：量子理论可能提供一种途径来实现星际传物。

为了给后面的叙述铺平道路，我将或多或少地从《寻找薛定谔的猫》所留下的问题，即那只著名的猫以及约翰·贝尔的证明开始展开讨论。约翰·贝尔证明：如果一些量子组织曾经是单一系统的一个部分，那么它们之间将保持着联系，它们之间通过某种方式相互知晓，即使它们之间相距很远。爱因斯坦将这种现象称为“幽灵般的超距作用”。这种现象也常被称为“非局域性”。对你来说，这些概念可能是新的，也可能是你所熟悉的。薛定谔

的猫在同一时刻即活又死这一佯谬已经成为过去十年中的一个口头禅。但是等一下，即使你认为你已经知道那是怎么回事了，也要准备重新考虑一下。你将看到，我这里拥有更多的和更好的佯谬。这些佯谬的背后都有不容置疑的实验验证。这对你来说还是有魅力的。但是所有这些都将归结为同一件事。例如，在一个双孔实验中，电子如何才能够同时经过两条路径？在同一时刻它是如何能够知道整个实验系统的结构的？

我们需要解决的问题——量子世界的所有奇异性都可以通过考察那只原始猫的两个孪生后代——我作品中的小猫的历险过程来获得最清楚的理解。我们将不得不重新考虑光的本质问题。这个问题在量子论和相对论中都是一个关键问题。这样我便带给你一些新的思想。这些思想能够解释真实性的本质和解决所有的量子之谜。从 20 世纪 20 年代中期量子论诞生以来，这是第一次有可能有点信心地说量子论到底意味着什么。如果这些还不算是写作本书的充分理由的话，我就不知道本书的用意之所在了！

约翰·格利宾

1994 年 4 月





# 序 言

## 问 题

量子理论神秘的核心包含在双缝实验之中，这话并不是我说的，而是当时最伟大的物理学家理查德·费曼在他关于量子力学\*的著名的《物理学讲义》第一章第一页中这么说的。通过把量子物理与艾萨克·牛顿及其后的科学家们的经典思想做对比，费曼说这种现象“是不可能、是绝对不可能用任何经典方法来解释的。”它“是量子力学的核心所在。实际上，它包含的正是量子理论的神秘。”

在另一本名为《物理定律的特性》的书中，他写到：“可以证明量子力学中任何其它情形总可以用下列表述得到解释，‘还记得双缝实验吗？这是同样的情形’”。因而，与费曼一样，我从双缝实验开始，从一开始就揭示处于全盛时期的核心神秘。这个实验似乎很寻常，但却是一个从来不能够被轻视的。你对双缝实验了解得越多，就发觉它越神秘。

\* 在本书中，“量子理论”、“量子物理”和“量子力学”这三个名词是可以互换的；文中提到的参考书将在参考书目中给予详尽的解释。

如果你在中学物理实验中遇到过这个实验，它可能似乎一点儿也不神秘。那是因为没有入费心思（或胆敢）向你解释它的神秘；相反，几乎可以肯定，所有讲授给你的是通过一块板上的双狭缝并在屏幕上形成明暗条纹的光的特性，这只不过是光以波的形式运动这一事实的极好证据。

就其本身而言，这是正确的。但是这绝不是整个的事实。

## ◆ 光的奇异性

当你向水中投下一块石子，在静止的池塘表面所看到的情形就是有关波的经典例子。水波形成一系列的波纹，从石子落水处以一个又一个圆环的形式向外扩张。如果这样的波在到达其上有比波纹的波长小得多的两个小孔的障碍物时，在障碍物的另一侧波就以两个小孔为中心、以半圆环的形式向外扩张。它们所形成的图案就像当你同时向静止的池塘中扔下两块石头时所得到的波纹图案的一半。

每个人都知道这是什么样的图案。向池塘中扔下两块石头，你不会看到两组互相穿过的图形波纹，而是一个更复杂的波纹图案，这是由两个圆形波纹互相干涉所形成的。在某些地方，两组波纹相互叠加形成更大的波纹，而在另一些地方，两个波纹互相抵消，在水中剩下极小或不再存在波的运动。

当光通过一个板上的两个小孔，在板另一侧的一个屏幕上形成一个图案时，所发生的正是相同情形。为更清楚地显示这个效应，最好使用一束单色光，这相应于一个单一波长。从两个小孔处传出的两组光波就像池塘中的波纹一样。当光到达屏幕时，它形成一个明暗条纹的图案（干涉条纹），相应于波互相加强（相

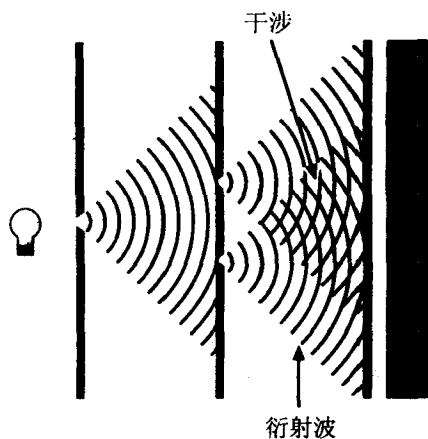


图 1 光的干涉

来自第一个小孔的均匀光在第二个遮挡屏的每一个小孔处产生向外传播的子波；子波互相干涉会在观察屏上产生清晰的亮与暗条纹——光以波的形式传播的证据

强干涉)的地方和波相互抵消(相消干涉)的地方。这是简单直接的中学科学知识，不仅仅了解到光是一个波的事实，而且通过测量干涉条纹之间的间隔，可以很容易地计算出光的波长。

但是，即使在这一层面上，仍有一些微妙之处。你在屏幕上所得到的图案，不是当你让光束依次穿过每一个小孔，并叠加在屏幕上时得到的光斑强弱变化的图案。这是干涉如何起作用的一个关键特征。仅让一个小孔开启，在那个孔后面的屏幕上你会得到一个光斑；仅让另一个小孔开启，会得到第二个光斑。叠加两个光斑会得到一个更大的光斑。但是，干涉意味着当光同时通过两个小孔时，屏幕上的图案比这要复杂得多——不只是因为事实证明，图案中最亮的部分是在当两个小孔单独开启时所得到的

两个亮斑之间的中心处，而这里正是你可能预计是暗影的地方。

到目前为止一切顺利。光确实是波。然而不幸的是对于这个简单的情形，也存在着证据表明光是由（被称为光子的）粒子组成的。根据我们日常生活的经验，粒子通过墙上双孔的方式是非常不同于波通过墙上双孔方式的。

假设双孔确实是一堵墙上的小孔，并假设你站在墙的一侧，在那里有一大堆石块，你向墙的方向扔石块，一次一块，但不要计较扔的方向是否精确。某些石块将穿过一个小孔，另一些穿过另一个小孔，在墙的后面形成两堆石块。所形成的图案（两堆石块）将与一半时间堵住一个小孔，另一半时间堵住另一个小孔所形成的图案完全一致。在墙的正后面，你肯定不会在两个孔之间得到一堆石块。一次一个粒子穿过双孔不会产生干涉。

当然，如果许多粒子同时穿过双孔，那么容易看出它们有可能相互干涉，互相拥挤在另一侧形成另一种不同的图案。毕竟，我们习惯于水本身是由粒子——水分子——组成的这一概念，可这并不妨碍池塘中的水波形成规则的波纹。设想从灯发出的一群光子像波一样以同样的方式通过双孔是完全可能的。但是当我们把目光投向一次仅一个光子穿过双孔会发生的情形时，神秘变得更加深邃。

需要着重强调的是，20世纪80年代中期在巴黎的一个小组已经进行了这个实验。事实上，他们已经观察到单个光子通过双孔，光子之间互相干涉。在我写作《寻找薛定谔的猫》之时，说明这些情况下光的这种性质非常明显，但是，严格地说，它们并不直接。现在我们知道，当单个光子通过实验时，除了一些可疑的阴影之外，会发生什么。

当然，所有我们实际看到的是光通过双孔之后在屏幕上所形成的图案。设想光源变得足够微弱，以致于一个时刻只有单一光

子通过实验（实际上，这是物理学家现在所能够做到的，尽管这个技术需要极高的技巧和非常精密的仪器）。现在再设想在双孔另一侧的屏幕是一个感光板，每一个光子的到达都被记录为一个白点。当单个光子通过实验时，在任何情况下，你都会正好看到你所预料到的情形——单一一个光子离开光源，并在感光板上形成一个单一的白点。但是，随着几百个，而后几千个，成百万个光子通过实验，你会看到一个奇异的景象，即感光板上的单个白点聚集起来，正好是典型的波干涉条纹的明条纹，其间为暗条纹。

尽管每一个光子开始时作为一个粒子，到达时作为一个粒子，但它似乎同时穿过了双孔，与自己相干涉，并且计算出自己应在感光片的什么位置出现，为整个的干涉条纹做出自己微小的贡献。这一行为包含着两个神秘之处：第一，单个光子如何同时穿过两个孔？第二，即使它做了这么个把戏，它又是如何“知道”在整个的干涉图案中自己应该在什么位置呢？为什么每一个光子不沿着同一条路径在另一侧的相同一点上终止呢？

尽管所有这一切都是神秘的，但你可能会争辩光有些奇异。的确是这样。光（严格地讲，应该叫电磁辐射）总是以相同的速度——即光的速度（用  $c$  标记）——传播。不论你如何运动，不论光源如何运动，当你测量光的速度时，你总是得到相同的答案。当我讨论相对论时，我们会看到这有深刻的含义；它肯定不像日常生活中任何其它事物的行为。另外，光子无质量，这是另一个奇异且非常识性的性质。或许光子通过双孔的荒诞行为是由于光子无质量并且以光速传播的缘故；或者，这或许是增加到其奇异性质上的另外一个荒诞性质。正如拉尔夫·贝尔雷所表述，“光以波的形式传播，但以粒子的形式离开和到达”。\* 或许这正

\* 贝尔雷着，《从牛顿到爱因斯坦》第 170 页。

是光的那些特殊的性质之一吧？

不幸的是，情况并非如此。你可以用电子做同样的实验——尽管电子不完全全地是我们日常生活中习惯单独处理的那类粒子，但是它不仅具有质量而且带有电荷，在不同条件下以不同的速度运动。然而电子也以波的形式传播，而以粒子的形式离开和到达。这点很难自圆其说。

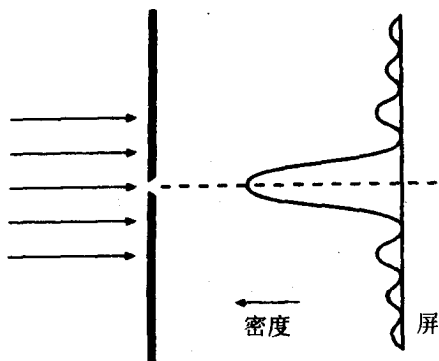


图2 电子强度分布

通过单个小孔的电子束在与小孔正对的位置上呈现出最大的分布；

这是一束粒子束应该表现的方式

## ◆ 电子干涉

电子是粒子世界的典型部分。它首先由工作于剑桥的卡文迪什实验室的 J.J. 汤姆逊于 1897 年确认为粒子。汤姆逊证实电子是从原子逃逸或轰击出的部分——第一次证实原子不是不可分

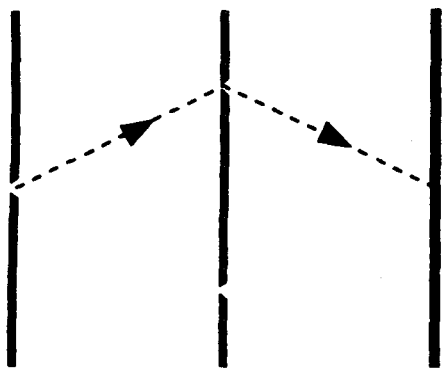


图 3 普遍常识下粒子的路径

如果普遍常识起到任何引导作用的话，通过一对小孔之一的一个电子或一个光子应该与它通过一个单个小孔表现得一样；

按照常识，第二个小孔的存在不应该起任何作用

的。每一个电子具有精确相同的质量（比  $9 \times 10^{-31}$  千克稍重，这意味着“小数点后 30 个零再加一个 9 千克”）。每一个电子具有相同的电荷（ $1.6 \times 10^{-19}$  库仑）。它们可以通过电场和磁场来操纵。根据被推动或拉动的方式不同，电子可以加速运动或减速运动。在许多方式上，电子表现为一个小的且带电的弹丸。

然而，直至 20 世纪 20 年代末，即发现电子 30 年之后，才清楚电子也表现得像波。1927 年证实这一点的人之一是乔治·汤姆逊，即 J.J. 汤姆逊的儿子。远在 80 年代中期之前电子这种双重性质——即所谓的波粒二象性——的证据已很好地建立起来了。但是直到 1987 年日本的一个研究小组才实际上利用电子进行了双缝实验。

在这个日期之前，教科书（包括费曼的书）以及普及读物

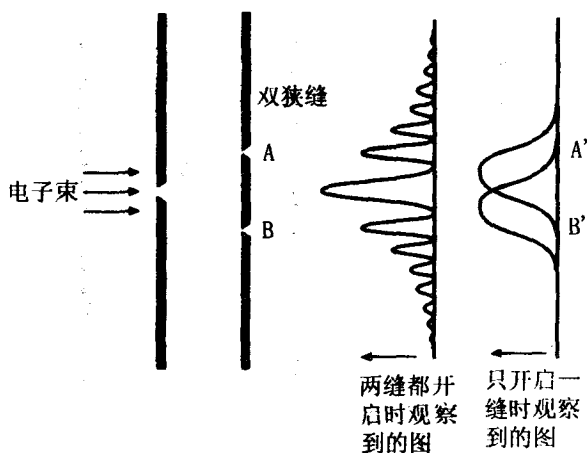


图 4 实际观察到的电子强度分布

电子和光子表现的行为好像它们知道另一个小孔的存在似的；当两个小孔都开启时，我们所看到的图案不同于当每个小孔分别开启时所得图案的叠加图案；

这意味着电子确实是波吗？

（包括我的书）已经描述了这样的实验，并确信尽管这些仅是“设想实验”，但是根据有关电子的所有事实，我们有可能说当电子遇到一堵墙上的两个小孔时它们的表现行为会是怎么回事，然而，在电子被确认为粒子的 90 年和电子被确认为波的 60 年之后，一个由 Hitachi 研究实验室和东京 Gakushuin 大学的研究小组才实际上做出了电子的双缝行为。

在他们实验中的“双缝”是由一个称为电子双棱镜的仪器形成的，电子到达另一侧的屏幕实质上是一个电视屏，在电视屏上每一个电子的到达处产生了一个停留在屏上的亮点。因而相继电子的到达逐渐在屏上形成了一个图案。



实验结果正好与关于光子的等效实验完全相同。电子源是一个电子显微镜的尖端——一个标准和非常熟悉的装置部分。电子以粒子的形式从电子“枪”的末端发射出来；它们以粒子的形式到达另一侧的电视屏上，每一个电子产生一个亮点，但是，在电视屏上所形成的图案却是干涉条纹，这表明电子以波的形式穿过了双孔。

你仍可能期望能对电子的这种奇怪性质进行诡辩。毕竟，用手不能捉住单个电子。没有人曾见到过一个电子，所看到的仅是电子撞到合适的敏感的屏上时所产生的亮点，从日常的经验中我们知道，当我们掷石块穿过小孔时这些奇特的干涉效应不会发生。日常生活中的石块、棒球以及其它任何东西都不表现出这种奇怪的波粒二象性。

物理学家对此也有一个答案。正如你想证实的，肉眼能够看得见的足够大粒子穿过双缝时也表现得像波一样，它们确实就有这种性质。

现在讨论的粒子是原子。必须承认，用你自己的眼睛你仍没有看见原子，也没有用你的手掌捉住一个原子。但是在磁场中俘获的单个原子现在可以被拍照。这个（例如，由汉斯·冯·贝耶在《操纵原子》中所描述的）成就是非常奇妙的，因为原子的概念仅在 20 世纪初才完全被接受。的确，阿尔伯特·爱因斯坦由于建立了原子的真实性（除了其它事情之外）而获得了理学博士。尽管原子比电子大许多，但是从日常的标准来看它仍是非常小的。例如，一个碳原子还不足  $2 \times 10^{-26}$  千克，这是电子质量的两千二百万倍。一个原子的尺寸约为一毫米的一千万分之一，这意味着必须需要一千万个原子并排起来才能够跨过一张邮票边上的一个锯齿。尽管如此，现在单个原子也可以拍照了，它的图象可按“实际时间”在电视屏幕上显示出来。

仅在 20 世纪 90 年代初才用原子第一次进行了双缝实验。德国的康斯坦斯大学的一个研究小组利用氦原子通过了金属箔上一微米（一米的百万分之一）宽的狭缝，在箔的另一侧为探测器。在这次实验中，干涉条纹的建立不能够直接在电视屏上显示出来，但是对到达探测“屏”上不同部分的氦原子数目的测量表现出非熟悉的图案。原子也是以波的形式传播而以粒子的形式到达的。

20 世纪 90 年代初期，另外其它几个小组也宣布得到了类似的结果。麻省理工学院的一个小组使用了一束钠原子。在所有这些实验中，结果是相同的。穿过双缝实验的单个原子同时在两条路径上传播，并与自己干涉。这似乎表明，一个原子可以同时两个位置（两个小孔）上。

（现在）在有关这个题目的最新方法中，科罗拉多的美国国家标准和技术研究所和德克萨斯大学的研究人员于 1993 年报道说他们彻底地验证了这个实验。他们不是让原子通过双缝，而是用磁场俘获了一对原子，并利用这对原子作为“小孔”，使光产生反射并测量产生的干涉条纹。从原子上反射的光波与从双缝实验中小孔处扩散的光波按同样方式扩散。当然，这种新实验很奏效，因为原子作为粒子，可由磁场俘获并使光产生反射。至此，还没有比这种涉及原子——粒子大得可以拍照——和干涉的实验组合更精巧的波粒二象性的例子。

由于这些奇怪的效应没有用石块、棒球，以及其它任何能够操作、触摸，和用我们的眼睛能够看到的東西表现出来，因此必然存在某个量子世界规则不再适合的尺度。在介于原子和人类的某个尺度上量子规则失效，而经典规则奏效。这个尺度在哪里和为什么转变出现，这就是本文将要讨论的主题。答案正是在我们现实性概念的核心处。

现在必须反复强调的是所有这些实验已经做过了。结果对物理学家来说并不惊讶。自 1930 年以来任何合格的物理学家都能够利用量子理论预言实验的结果会是怎么样的。实验结果可能是不同的——即量子理论可能是错误的。但并不是这样。在非常深的水平上，在量子神秘的核心处，80 年代末和 90 年代初所进行的关键实验所得到的“答案”与量子物理是完全一致的。那么，量子物理将如何解释这个独特的行为呢？

## ◆ 标准观点

量子世界中事物发展规律的标准解释称为哥本哈根解释，因为其主要部分是由工作于哥本哈根的丹麦物理学家尼尔斯·玻尔发展的。其他人，包括著名的德国物理学家维尔纳·海森堡和马克斯·玻恩也对成为哥本哈根解释的思想体系做出了主要贡献，但是玻尔始终是最主要的提议者。这个思想体系实质上到 1930 年就完成了，比一个人的寿命短得多。自那以后，它成为涉及量子世界的所有实际工作的基础，并作为激发大学中物理学家的讲授故事。但是这个体系基于某些相当奇异的概念。

这个理论体系的关键概念是所谓的“波函数坍陷”。为寻求解释诸如一个光子或一个电子的一个整体如何以“波的形式传播而以粒子的形式到达”，玻尔及其同事描述为正是观察波的作用使波“坍陷”并使其成为一个粒子。我们可以在电子双缝实验中看到这个效应——电子通过双缝时作为一个波，然而在探测屏上“坍陷”成为一个点。

但是这只是故事的一部分。一个孤立电子波如何与自己相干涉呢？它怎样选择坍陷于屏幕上哪一点？根据哥本哈根解释，这

是因为实际穿过实验的是一个几率波，而不是一个物质波。描述量子波如何运动的方程——由奥地利物理学家欧文·薛定谔推导的波动方程——不是描述像池塘中的水波的一个物质波，而实质上描述的是在一个特定的位置上发现光子（或电子、或其它粒子）的几率。

基于这个图象（这主要来源于玻恩的工作），实际上，没有被观察到的一个电子不是以一个粒子的形式存在的。在这里可能发现一个电子有一特定的几率，在另一处存在着另一个几率，原则上，在宇宙中的任一处电子都能够出现。在某些位置上存在很大的几率——即双缝实验中亮条纹处，而另一些地方极不可能出现电子——即暗条纹处。但是，实际上电子仍有可能出现在火星上，或隔壁电视屏幕上，而不是出现在干涉条纹上，尽管其发生的几率极小。

然而，一旦观察电子，情况便发生变化，被函数会（可能在火星上，如果有人正看那里，或更可能在干涉条纹上）坍塌；此时电子是百分之百地在那里。但是一旦停止观察，几率波便开始从那个位置上向外扩散。随着几率波在宇宙中扩散，在你上一次观察的同一位置上发现电子的几率变小，而在另外某处发现一个电子的几率增加。

尽管这听起来很奇怪，但是实际上这是一个很有用的概念，因为在所有实际应用中，例如制造电视机和计算机芯片，我们在处理无穷数量的电子。如果它们所有都严格遵守几率和统计规则，这意味着电子的主要部分行为是可以预言的。如果我们知道**30%**的电子将沿着一条路线穿过计算机电路，而**70%**的电子沿另一条路线，那么，我们就无须担心单个电子沿着哪条路线穿过。同样，一个赌场主知道从长远观点考虑概率规则会使他赢利，虽然偶然的的游戏者在一次轮盘赌中可能赢得一个大利。但是

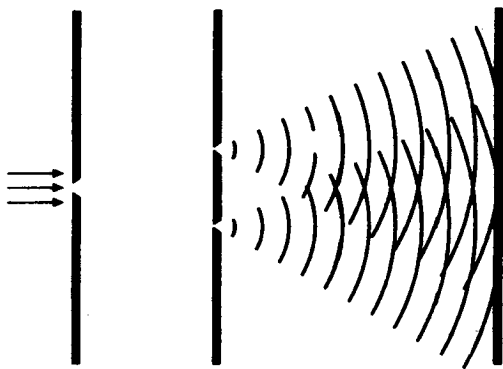


图 5 几率波的干涉

图 4 中提出的让人迷惑的标准解释是“几率波”穿过了双孔，并决定粒子束中每一个粒子终止在哪里；几率波的干涉与水波的干涉方式相同

阿尔伯特·爱因斯坦非常讨厌这种观点，他做出这样的著名评论“我不相信上帝与宇宙玩骰子。”当我们认真考虑涉及单个电子或单个光子的实验时其含义是很清楚的。

再次考察双缝实验可更清楚地看到这一方面。这个采用单个电子实验还没有做，但是稍复杂的实验已经证实电子的表现行为方式，且毋庸置疑的是如果用这种方式进行实验结果正是如此。

首先，请记住如果一个小孔关闭，（由光或电子）产生的干涉图案会有什么变化。这时干涉条纹消失。显然，如果仅开启一个小孔，电子必须穿过这个小孔（仅这单个小孔）而到达探测屏幕。但是如果你仅仅认为电子是粒子，这本身就很奇怪。穿过一个小孔的电子如何“知道”另外一个小孔是否开启呢？穿过具有两个小孔中一个小孔的简单粒子既不会知道也不会关心另外一个小孔是否开启。但是即使实验装置使每一个电子离开“电子枪”

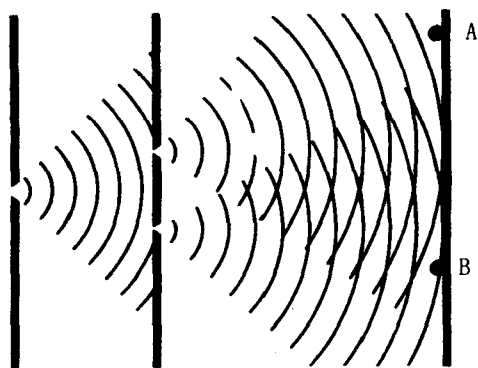


图 6 几率波和粒子

当要寻找粒子时，我们发现了粒子（在本例中为 **A** 和 **B** 点）；几率波决定粒子在哪里出现，但我们从来看不到波；我们实际上不知道是什么穿过了双孔；这个奇怪的特性给出了一个电子（或一个光子）以“波的形式传播而以粒子的形式到达”的通词

之时关闭（或开启）第二个小孔，然后在电子到达第一个小孔之前开启（或关闭）第二个小孔，那么电子会“选择”合适的路径到达靶屏幕，并产生正确的总体干涉图案。你可以建立实验装置使其任意开启和关闭第二个小孔。每一个电子在一个小孔上选择的路径取决于此时另一个小孔是否开启。

这似乎表明电子不仅仅知道其邻近区域，而是更大的世界。它们不仅仅知道在一个小孔处的条件，而是整个的实验。这种非局域性是量子力学的基础，使爱因斯坦深深地困惑。它是爱因斯坦所指的“超距离鬼作用”的原因，尽管在做出这个说法时他正在考虑非局域性的另一个更奇怪的表现。这我将稍后再讨论。

然而，到目前为止，所有的证据都是来自在尝试不同组合的

关闭小孔时观察探测屏幕上所形成的图案。我们为什么不观察一下小孔本身正在发生着什么事情呢？设想在实验中沿两个小孔各设置一个探测仪，并且一次只发射一个电子。此时，你就可以观察电子是否就像波一样一次同时穿过了两个小孔，或只穿过了其中一个小孔（或者，是否真的半个电子穿过了每个小孔）。你也可以注意探测屏幕，以便观察在许多电子通过了实验之后的屏幕上建立的图案。在这种情况下你会发现每一个电子总是作为一个粒子，通过一个小孔或另一个小孔。它的行为就像一个小弹丸。奇妙的是干涉图案消失。取而代之的是屏幕上的图案变为小弹丸独立穿过每一个小孔情况下所产生的图案（或由石块穿过墙上两个小孔情况下所产生的图案），观察电子波的作用是使电子波坍塌，在它穿过小孔的关键时刻其表现行为就像一个粒子。然而，不要设想我们逃避了非局域的困惑。实际上，我们只要观察两个小孔之一便会改变图案。如果我们这样做，我们看到的仅是弹丸般的电子穿过，并且看到适合于屏幕上粒子的图案。通过第二个小孔的电子似乎有一点“知道”我们在观察另一个小孔，因而也表现得像粒子一样。

哥本哈根解释的几率方面仍然起作用。假设实验是非常对称地建立的，你会发现刚好一半的电子通过了每一条可能的路径。50%的电子通过了一个小孔，50%的电子通过了另一个小孔。没有任何方法事先预言单个电子将通过哪个小孔，因而在探测屏幕上会到达哪一点。就像掷一枚硬币并得到头像的结果，一排中的几个电子很偶然地可能通过同一个小孔。但是当一百万个电子通过了正在观察的两个小孔之后，在探测屏上会有五十万个电子出现在一小团，五十万个电子出现在另一小团。即使当你正在观察电子并且知道它们的行为就像粒子时，几率波仍然起作用。

玻尔论述涉及到的不只是单个电子的行为，或者甚至一百万

个电子的行为。而是整个实验装置，这包括电子、两个小孔、探测屏以及观察者。不可能说电子“是”一个波或“是”一个粒子。所有我们所能说的是如果实验是按确定方式建立的，且做出确定的测量，你就会看到确定的结果。如果建立的实验装置用于测量波，你会得到干涉条纹；如果建立的装置用来监测通过小孔的粒子，你会看到通过了小孔的粒子。甚至你可以等到在电子离开“电子枪”之后但在决定是否打开在两个小孔处的探测器之前观看粒子；在每一种情况下，最终的结果（屏幕上的干涉条纹）取决于整个实验装置。这种量子世界的整体观点引导我们进入非常深而且富有哲理的水中。

## ◆ 深 水

哥本哈根解释已经摇摇晃晃地存在了 50 多年。从 30 年代到 80 年代，绝大多数物理学家都同意这种解释。如果说它是可以用来预测实验结果的一个实用工具的话，这些物理学家们并没有关心哥本哈根解释的深层次哲学问题——事实上，有很多人现在也没有关心。但是在近些年中，人们对量子论究竟意味着什么的解释产生了越来越多的不满意。人们正在花费越来越多的精力来寻找一个替代的解释。

主要的问题与波函数的坍塌有关系。玻尔告诉我们，必须考虑整个实验，波函数坍塌的方式取决于所有的实验设备。但是这种纯粹的、自给的实验根本就不存在。量子论的这个解释是在告诉我们，这些东西，例如电子，仅仅在它们被观察的意义上才是真实的。在某种意义上，测量设备比光子、电子以及其它所有的东西都更加真实。这不是我对哥本哈根解释的理解，这是玻尔和



海森伯格以及他们的同事们所清楚地宣布过的。例如，海森伯格曾说：“实际上，哥本哈根解释将事物和过程作为物理解释的基础。而这些事物和过程又是用经典概念来描述的。”\* 换句话说，在经典世界中，用来构成万物的那些原子在某种程度上不如原子构成的事物更真实。即使是在 30 年代，许多人就认为这是不可思议的，在已经获得了原子照片的今天，这种观点更是难以接受。

根据哥本哈根解释，对于双孔实验来说，必须有人参与观察以使系统处于一个确定的状态。海因茨·帕格尔斯在当时（1981 年）正是纽约科学院院长。他当然知道量子理论是怎么一回事。他说：“对于空间中的某一点例如双孔中的一个，电子的客观存在是没有意义的，这不依赖于实际的观测。只有当我们去观测它的时候，电子才作为一个实体而存在。”\*\* 但是实验者不仅仅是实验的一部分，他同时也是外部世界的一部分。人和其它事物一样由电子构成。在实验者的体内，是什么原因导致了波函数的坍塌，从而使电子呈现为局域化的实体呢？可以推测，这是与观察者外部的世界相互作用的结果。在这种意义上，又是什么使得观察者外部的世界成为“真实的”呢？是在越来越大的尺度上的与更多的东西（和观察者）更多的相互作用。从字面上来看哥本哈根解释，它告诉你一个电子的波函数在检测器的一点上发生坍塌是因为整个宇宙在观察着它。这就足够奇怪了。一些宇宙学家（包括史蒂芬·霍金）担心这个解释表明在宇宙之外还存在着什么东西在观察着整个宇宙以使它的整个波函数发生坍塌。\*\*\* 同时，

\* 尼克·赫伯特在鲍尔·戴维斯主编的《新物理学》（剑桥，剑桥大学出版社，1989 年）第 143 页引用过。

\* \* 帕格尔斯《宇宙密码》第 144 页。

\*\*\* 例如可以参阅霍金的书《时间简史》或我自己的书《寻找大爆炸》。

约翰·惠勒指出，是有意识的观察者，以我们自己的形式，使波函数发生了坍塌，使得宇宙得以存在。根据这个图象，宇宙中的万物之所以存在，就是因为我们在观察它们。我将更加仔细地审视这些绝望的修补和辩护。然而这种论断从一位德高望重的科学家口中说出，便足以说明我们正处于一个什么样的深水当中了。

另一个问题涉及到量子体系的粒子性与波动性的关系。玻尔说这两种特性是互补的，正如硬币的正面跟背面是互补的。如果你将一枚硬币平放在桌上，那么结果肯定是要么正面朝上，要么背面朝上，但绝对不会是两个面同时朝上。在哥本哈根解释当中，一个整体例如一个电子，它既不是波，也不是粒子，而是其它的某样东西。这种东西不能用我们的日常语言来描述。但是它展现给我们的要么是粒子的一面，要么是波的一面，这取决于我们采取什么样的方式去测量它，就好像是我们如何放置量子硬币一样。事实上，这个系统可能还具有其它的特性。我们还没有聪明到足以测量这种特性，对这种特性一无所知。

这个互补性，或波粒二象性，与海森伯格发现的著名的不确定性原理有关。这个原理的最简单形式是说我们不可能同时精确地测定一个量子实体的位置和动量。动量测量的是一个物体往何处去，有多快。在很多方面，这是波的一个特性——波必定朝某个方向传播，否则它便不是波。位置是一个确定的粒子的特性——波的本质是向外传播，而粒子有一个确定的位置。我们可以测量粒子的位置，或者我们可以测量一个粒子的运动方向。任何一种情形，我们都可以测量到满意的精度。如果要精确地测量位置，将在动量的精度方面牺牲一个可确定的量；反之亦然。

这并不是像在某些教科书中所错误地暗示的那样——仅仅是测量过程中的实际困难所致。这并不仅仅是因为在测量电子的过程中（可能是使光子碰到它并返回），我们可能“踢”了它一下，

从而改变了它的动量。量子实体不具有精确的动量和精确的位置。在一定极限下，电子并不知道它自己位于何处或正在奔向何方。略微夸大一点就是，如果它精确地知道自己位于何处，那么它将对正在奔向何方一无所知。如果它精确地知道自己正在奔向何方，那么它将对所处的位置一无所知。尽管在通常情况下，一个量子实体近似地知道自己位于何处和奔向何方。这里一个重要的词为“近似”。尽管用日常生活中的常识很难理解，但是量子体系不能够将自己钉扎在一个确定的位置上，在奔向何方方面它总存在某些不确定性。

这是非常重要的。例如在核聚变反应中，量子不确定性允许原子核相互接触、相加重叠和连接在一起。而根据经典物理的思想，原子核之间不可能充分靠近。某些核反应正在使星体保持高温。没有量子不确定性，太阳就不会这样发光。\*

这些思想非常难以处理，但是我不会向你讲解这思想的发展史，也不会向你展示这些思想的证据——事实上量子世界正是这样运作的。许多其它的书，包括我自己的，现在都可以用来补足那些细节。在本书中我更加关心的是哥本哈根解释在何处失效，以及什么解释可以代替它。尽管在量子水平上，不确定性确实是鲜活的事实，但它在日常生活中却并不出现。其原因正如波粒二象性在日常生活当中并不出现一样。在量子先驱马克斯·普朗克之后，描述这些现象的方框中都包含着一个普朗克常数。与日常生活当中的质量和动量相比，普朗克常数非常之小。它的值仅仅为  $6.55 \times 10^{-27}$  尔格·秒。（不要担心单位的问题，重要的是质量要用一个相应的单位——克来度量。）只有当物体的质量小到跟电子差不多（电子的质量为  $9 \times 10^{-31}$  千克，或者使用与尔格·秒

\* 参阅我的书《由于光而致盲》。

可直接比较的单位，电子的质量为  $9 \times 10^{-28}$  克）时，量子效应才变得显著。当处理质量比原子质量大很多的对象时，除了任何比原子大的物体本身都是由原子来构成的这一事实之外，其量子效应是如此之小，以至于它们的影响可以忽略不计。

到了这里，有必要停下来喘口气，体会一下量子世界距离我们的日常经验究竟有多远。 $10^{-27}$ 意味着十亿分之一的十亿分之一。如果一个物体的尺寸为  $10^{-27}$  厘米，那么在一厘米的空间内就可以依次旋转十亿十亿十亿个这样的物体。如果我们将十亿十亿十亿个一厘米长的特殊例如糖块挨个依次摆放在一起，那么这些物体将覆盖多长的距离呢？答案是  $10^{-27}$  厘米。这有多长呢？好，在天文学中标准的长度单位为光在一年内走过的距离（一光年），为  $10^{18}$  厘米。所以  $10^{27}$  个糖块肩并肩地摆放，它们所覆盖的距离为十亿（ $10^9$ ）光年。在宇宙当中已知的最远的物体——一些类星体，大约有一百亿光年那么远。所以  $10^{27}$  个糖块将覆盖与最远的类星体之间距离的十分之一。作一个类比，量子世界运作的尺度与糖块相比小得程度远比糖块与整个可见宇宙相比还要小。用另一种方式来描述，人的大小差不多位于量子世界和整个宇宙的大小的中间。在这种对数标度下，我们宣布能够理解在两种极限情况下到底是什么样子的。

我们并不期望像砖块、房屋、人这样的物体表现出波粒二象性，因为这些物体与普朗克常数相比是如此之小。物理学家们期望量子物体呈现波粒二象性，尽管为本哈根解释的一个主要特点就是你不能同时看到这两个方面。对此，玻尔非常直率，他宣布在原则上不可能同时观察一个实体例如光子或电子的波的特性和粒子特性。对于玻尔和哥本哈根解释来说，非常不幸。实验家们现在正在挑战这个宣言，这些我们在后面将要看到。

关键问题是哥本哈根解释提供了一系列菜谱——涉及到不确

定性、波函数的坍塌、概率、观察者的地位以及实验的整体论。物理学家们可以用它们来预期实验结果。在这种意义上它是实用的。但是它并不能解释任何事情。这个认识并不新颖。爱因斯坦曾经花费了他生命中的十年时间与玻尔展开友好的论战。他努力说明哥本哈根解释的悖论性。关于量子悖论的一个著名的例子是由薛定谔发展起来的。他曾经用这个例子来试图说明他的学生，使他的学生认识这一整套思想是如何的荒唐，是应该弃掉的。当然，我这里参考的还是那个著名的盒子中猫的思想实验。正因为这个实验为大家所熟悉（到 1995 年这只猫已经有 60 岁了），所以它仍然值得拿来作为一个例子，用以说明任何修正后的量子理论——任何真正能够解释事物的理论——都必须解释的问题。

## ◆ 盒子中的猫

哥本哈根解释中最为奇怪的事情之一就是有意愿的观察者在决定微观世界中发生了什么时的地位，这个问题在盒子中猫的实验中表现得最为清楚。这种情形的最简单例子就是假想一个盒子中只包含有一个电子。如果没有人往盒子里面看，那么根据哥本哈根解释，在盒子中的任何一处找到电子的机会是均等的——伴随着电子的几率波均匀地分布在盒子中。现在假设仍然没有人观察盒子，一块隔板自动落在盒子中间，将原来的盒子分隔成相等的两半。常识告诉我们，电子必定位于盒子的这边或那边。但是哥本哈根解释告诉我们，几率波仍然均匀分布在两个半盒子中。这意味着在盒子的任何一边找到电子的几率是相等的。只有当有人往盒子中看，并注意到电子位于盒子的一边时，波函数才发生坍塌，电子才变成“真实的”。同时盒子另一半中的几率波消失。

如果你将盒子重新关闭起来，停止对电子的观察，这对几率波马上传播开去填满电子所在的那半个盒子，而不会传播回盒子的另一半中去。\*

物理学家鲍尔·戴维斯简明地概述了这种情况：“在观察之前，有两个模糊不清的电子“幽灵”分别位于两个隔离室之中，等待一个观察者使得其中的一个变成“真实的”电子，同时导致另一个彻底地消失。”\*\* 在这里“同时”一词也是非常重要的。它给出了非局域性在起作用的另一个例子。但是，在我进一步讨论它的含义之前，我想解释一下，即薛定谔是如何演示下述论断——观察者使得位于盒子的这一半或另一半的电子成为真实的——荒谬性的。

薛定谔的迷惑最初于 1935 年以印刷品的形式出现。这个迷惑需要建立一个量子环境，其中有两种结果出现的几率是均等的。当进行这个实验时，它在原始的例子中使用了放射性衰减技术，因为放射源也符合几率规则。依据位于分隔后的盒子中的电子的问题，我们很容易想象这个实验。薛定谔本人也参考了在一个钢做的隔离室中进行的实验。这个实验用量子力学的术语来描述，那就是盒子中猫的问题（盒子中还有其它东西）。我希望在更一般的意义上解释术语“隔离室”。它能给猫提供一个空间，使猫在其中自由自在地生活。但这些丝毫不影响薛定谔论断中的要点。设想一下我刚才描述的整个系统——一个分隔成两半的盒子、一个电子和一块自动滑移的挡板——放置在一间没有窗户的、封闭的屋子里面的一张桌子上。挡板已经自动滑移，将盒子

\* 至少不是等几率的。将有非常小的几率使电子位于盒子的另一半，或在整个盒子的外面。但是在本实验中那种几率可以忽略不计。

\* \* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》，第 22 页。

等分成两半。电子在任何一边出现的几率相等。在盒子外面有一个电子检测器，这个检测器连接到一个设备上。如果检测器检测到一个电子的话，这个设备将向屋子内释放毒气。在屋子的一个角落里有一只猫，在安静地享受它自己的生活。薛定谔将这个设备描述为“恶魔设备”，不过请记住，这仅仅是一个思想实验，并没有一只真正的猫曾遭受过我正要描述的侮辱。

薛定谔让我们想象一下，如果恰好是装有电子的盒子的那一边自行打开，允许电子跑出来，那将会发生什么事情？现在仍然没有人去观察在这间锁住的屋子里面到底发生了什么。根据哥本哈根解释，仍有 50% 的几率让电子位于仍然封闭着的盒子的那一边。但是现在也有 50% 的几率让电子跑到屋子里面。既然这是一个思想实验，我们就可以设想检测器非常敏感，以至于它可以精确地检测到跑到屋子中任何一个角落的电子。如果电子已经从盒子中跑了出来，那就应该被机器检测到，从而就将触发设备释放毒气，将猫杀死。

即使没有人去观察，你也可能会想象出事情的结果：要么电子从盒子中跑了出来，要么没有跑出来。如果电子已经从盒子中跑了出来，那么，当它被检测器“注意”到时，其波函数将会发生坍塌，从而猫就倒霉了。但是玻尔说：常识告诉我们的是这个观点错了。

量子理论的标准解释告诉我们，因为电子检测器自身也是由量子世界的微观单元（原子、分子等等）构成的，在这个水平上与电子发生相互作用，检测器也要遵从量子规则，包括几率规则。根据这个图象，只有当有人打开门往屋子里面看时，整个系统的波函数才会发生坍塌。（这个人最好带上防毒面具，‘如果他还想保证自己处于清醒状态的话。’）在那个时刻，也只有在那个时刻，电子才“决定”自己是在盒子里面还是外面，检测器才

“决定”自己是否检测到了电子，猫才“决定”自己是死是活。哥本哈根解释将在有人往屋子里面看之前的状态称为“叠加态”——或者用薛定谔的话说：“活猫和死猫混合在一起，或者是以相等的份儿掺和在一起。”\*

你可以想象屋子里面有一只猫，在同一刻它既是死的又是活的，或者它既不是死的，又不是活的，暂停在地狱的边缘，随你怎么看。但是根据哥本哈根解释，你却不能想象为在有人观察之前，屋子里面有一只死猫，或者仅仅是一只活猫。

这个论断的所有用意就在于突出哥本哈根解释的悖论性，所以如果你能够在其中找到漏洞也不足以为怪。一个明显的迷惑就是你如何定义一个“有意识的”观察者。猫自身是否足以知道它自己是否已经吸入了毒气，已经死了呢？难道猫对于屋子中所发生事情的反应与一个作为观察者的人往屋子里面看有什么不同吗？你将在什么地方划分界线呢？从人的标度往下看，一直到量子世界。请问，一只蚂蚁可以使波函数发生坍塌吗？一个细菌呢？

换一个角度来看这个迷惑，即从量子世界往上看。因为电子设备是由量子实体例如原子和分子等构成的，所以我们有充足的理由说检测器不能使波函数发生坍塌。但是人（或猫）也是由原子和分子来构成的。如果检测器不能使波函数发生坍塌，那么为什么我们能呢？在这种意义上，生命对于有意识的观察者来说是必要的吗？当一个非常复杂的计算机往屋子里面看时能使波函数发生坍塌吗？

离开原始的电子，再往前走一步，如果一个人进入屋子去看猫是否被毒死了，这时这个人便是屋子里面惟一的一个人，那么这时的情况又会怎么样呢？严格的哥本哈根解释说，叠加态（薛

\* 惠勒和楚雷克，《量子理论和测量》，第 157 页。



定谔的模模糊糊)包围着这个观察者。直到屋子外面的其他人来观看实验结果(或者打电话进来询问情况怎么样)时为止。在有人观察之前,不仅是猫,作为观察者的人也是处于地狱的边缘。那么又是谁来观察屋子之外的这个人,从而使其波函数发生坍塌呢?难道这整个的过程可以这么一直倒退着进行下去吗?

关键的问题是:在量子概率性和我们所认为的真实性之间的分界线在何处?一个系统在成为“真实的”、能够使波函数发生坍塌之前应该包含多少个分子?为了使系统完成这个功能,这些分子必须如何排布?

这就是那种目前还在使哲学家和量子力学家蒙受压力的迷惑。他们都想知道量子力学是实用的;同时他们都想知道它为什么是实用的,都想为没有人观察时封闭屋子里所发生的事情构造一个可理解的图象。盒子中的猫这个简单实验带来这样大的迷惑,但量子迷惑不止这些。在我讲的量子力学的意义之前,我想借助于薛定谔的猫的儿女来揭示更深层次的神秘性。

## ◆ 真实性的另一面

没有人真正想把一只猫按这种方式锁起来,然后看一下到底会发生什么情况,但这却表明了物理学的发展是多么具有戏剧性。就在薛定谔设计出他的盒子中猫的迷惑之前,爱因斯坦已经构想出另一个思想实验,这个思想实验在 80 年代已经变成了现实。然而,爱因斯坦却没能活到这个思想实验变成现实。盒子中的猫这类迷惑设计出来仅仅是为了突出量子理论的悖论性。当爱因斯坦的思想的实验最终被真正实现的时候,量子理论已经取得了辉煌的成就。

并非是爱因斯坦独自一人提出的这个奇特想法。这个思想是

在 30 年代早期他来到普林斯顿后不久，与玻利斯·波多斯基和內森·罗森共同发展的。这个迷惑于 1935 年以他们三个人的名义发表。就在同一年，薛定谔发表了他的盒子中猫的佯谬。爱因斯坦等的这个思想被称为“EPR 佯谬”，因为它揭示了量子真实性的非逻辑性（不符合常识）。

美国物理学家戴维·鲍姆于 1951 年定居英国。他对这个迷惑进行了提炼与加工，但在那个时候这仍然是一个纯粹的思想实验。然后，到了 60 年代中期，工作在日内瓦 CERN 的爱尔兰物理学家约翰·贝尔发现了一种根据实验来表述这种迷惑的方式。其实实验基础为在原则上，光子可以自动地由原子朝两个方向成对地发射。那时，即使是贝尔本人也没有认为这个实验是切实可行的。但是在接着的大约 20 年之后，几个研究人员接受了这一挑战，测量贝尔所描述的关系。这些实验中最全面的和最富结论性的部分是由工作在巴黎奥森的艾斯派克特与其同事在 80 年代早期完成的。他们不容置疑地证明：是常识（和爱因斯坦）错了，非局域性确实在支配着量子世界。艾斯派克特检验的是我将来在这里描述的 EPR 佯谬的贝尔版本。

在艾斯派克特实验中测量的是光的极化。极化是指光的每个光子都携带着一个箭头，这个箭头朝上、朝下、朝旁边或两者之间的某个方向。极化光具有很多奇怪的特性，其中的一部分放在第三章当中讲述，我在这里所强调的是有可能测量光子极化的不同方面，并且这些特性根据量子规则而相关。将实际情况略做简化一下，一个光子必定朝上，而另一个光子指向另一边就有可能是真的。但是在规则当中并没有说明哪一个光子指向哪一个方向。当两个光子从原子发射出去以后，就像薛定谔的猫一样，在有人测量它们的极化之前它们以叠加态的形式存在。只有在有人测量它们的极化的时候，那个光子的波函数才坍塌成一种可能的

状态——可能指向上方。同时另一个光子的波函数坍塌为其它状态——在这种情形，指向另一边。没有人在观察另一个光子。在进行测量的时候这两个光子可能相聚非常遥远（在原则上在世界的两极）。然而，当一个波函数发生坍塌时，另一个也同时坍塌。这就是爱因斯坦所称的“幽灵般的超距作用”。就好像是这两个实体（在这里是两个光子）永远地纠缠在一起，所以当其中一个受到刺激时，另一个同时发生颤动，不管它们相距多远。

爱因斯坦特别讨厌这一点，因为他的相对论就是建立在这样一个基础上：光总是以同样的速度传播。任何东西的传播速度都不能由低于光速提高到高于光速。根据相对论，没有任何东西能穿过空间同时连接两个粒子。我们将会看到，相对论的含义甚至超出了爱因斯坦的认识。但是就在那个时候，特别是对爱因斯坦来说，相对论不允许这种超距作用的存在。

但是，怎么才能从实验上获得支持（或反对）这种幽灵般的超距作用的证据呢？测量两个光子是没有用的。你总能够得到正确的答案（在这个实验当中，一个朝上，一个朝一边），但你决不会看到“这种瞬间连接的过程”。通过这些测量，你能够说的是，正如常识告诉我们的：每个光子的特性在它离开原子的时刻已经被决定了。这种超距作用——非局域性——与三个相连接的测量（在艾斯派克特的实验中是三个极化的角度）有关，但实际上只测量了其中的两个，每个光子一个。

因为极化是大家不熟悉的一种特性。按颜色来考虑可能会有所帮助。艾斯派克特小组曾被警告说，他们通过这种方式测量的并不真正是颜色。假设原子发射的不是成对的光子，而是成对的带颜色的粒子，就像小的台球一样。每个小球的颜色比如说可以是红的、黄的，或者是蓝的，但在成对的小球中，其颜色肯定是不一样的。

还是回到用量子的语言来描述，当一个原子沿相反方向射出两个小球时，哥本哈根解释告诉我们，任何一个小球都没有确定的颜色，而是处在三种可能状态的叠加态。当实验者看其中一个小球时，它的波函数发生坍塌，它便具有了确定的颜色。同时，另一个小球的波函数发生坍塌，它呈现的颜色是剩余的两种之一——但是从我们的单个测量中，却无法知道是哪一种。

现在，我们有可能测量出一个小球的颜色是蓝的。这个问题的答案给了我们一个信息——另一个小球的波函数坍塌了的，关于另一个小球状态的信息。但决不是关于另一个小球的状态的完整信息。假设我们测量的结果是蓝色，那么另一种小球的颜色就必定为“红”或者“黄”。我们测量的惟一的另外一种可能就是它的颜色“不是蓝”。在这种情形，既然我们没有确定小球的颜色是红还是黄，那么另一个小球可以呈现的颜色就是这三种可能之一。但是出于下面的原因，它更可能是蓝，而不是红或黄。

如果第一个小球是蓝色的，那么第二个小球必定要么是“红色的”，要么是“黄色的”。因此，第二个小球是红色或黄色的几率都是 **50%**。然而，如果第一个小球的颜色“不是蓝色的”，那么它自身的状态就有两种不同的可能性。首先，它可能是红的。如果是这样，那么第二个小球要么是蓝色的，要么是黄色的。其次，第一个小球可能是黄色的。如果是这样，那么第二个小球要么是蓝色的，要么是红色的。因此，对于第二个小球来说，现在有四中可能。其中有两种都是蓝色，一种为红色，一种为黄色。即第二个小球为蓝色的可能性为 **50%**，而为红色或黄色的可能性各为 **25%**。当然，它必定是三种颜色之一。它们一旦被观察，那么有把握，几率便立即上升为 **100%**。

对第一个小球状态的测量，改变了当我们测量第二个小球时

发现一种特定颜色的优势。为了看到这个优势是如何随着对第一个小球的测量方式的改变而改变，你不得不对许多小球做许多次测量。就像是为了看到硬币的正面和背面出现的几率相等，你必须抛掷许多次一样。但是关键问题是，贝尔证明如果非局域性在起作用，那么就应该出现统计图样与每个小球在离开原子时就“选择”自己的颜色，并在以后的时间保持不变时应该出现的图样不一致。

根据这个术语，在实验中沿着下面这样一条线对两个光子同时询问一对问题：“一个光子是否是蓝色的，另一个光子是否是黄色的？”我们也可以这样问：“一个光子是否是蓝色的，另一个光子是否是红色的？”对许多对粒子将这种测量重复许多次，你就会得到一系列答案。这些答案确定了一对粒子的颜色分别是“蓝色和不是红色”的频率有多高，一对粒子的颜色分别为“不是蓝色和不是黄色”的频率有多高，一对粒子的颜色分别为“蓝色和不是黄色”的频率有多高，如此等等。贝尔证明，对于这样的问题，你如果对许多对粒子询问许多次，那么，你所得到的答案就会呈现出一个统计图样。通过这个统计图样，我们就可以看到与“不是蓝色和不是红色”这种组合以及所有其它可能的各种组合相比较，“蓝色和不是黄色”这种组合出现的频率是高还是低。我所强调的是，在你看它们之前，量子物体不决定自己呈现出哪种颜色，而日常生活中的粒子在离开原子的那个时刻就选择了自己的颜色，并且在以后的时间里一直保持不变。量子世界的统计图样与日常生活中的统计图样不一致。

贝尔证明，如果常识是对的，那么，如果某一套测量——一个图案，我们称其为图样 **A**——出现的频率，总比另一套测量——第二个图样，我们称其为图样 **B**——出现的频率高，那么

通常的逻辑告诉我们，图样 A 比图样 B 更为一般。但是艾斯派克特的实验（以及许多其它的同类实验）证明这个不等式被违反了。图样 A 出现的次数少于图样 B 出现的次数。

尽管使用数学语言来表达，但是这个论断是基于常识中的逻辑的。例如，常识中的逻辑告诉你全世界十几岁的总人数必定小于十几岁的女人的人数加上所有年龄的男人的数目。用术语来描绘就是，艾斯派克特的实验结果发现全世界十几岁的人的总数比十几岁的女人数与所有年龄的男人的数目之和还要多。贝尔不等式的违反意味着非局域性在起作用，这样量子理论就被证明了，尽管我们仍然不知道这到底意味着什么。

贝尔本人将量子理论称为“仅仅是一个临时性的尝试。”\* 他一直希望物理学家们能够提出一个理论，这个理论甚至能够根据真实的世界来解释这些奇怪的性质，而真实世界在我们没有对它进行观测时它也是存在的。但是在这个意义上，艾斯派克特的实验结果正好与我们的期望相反（根据量子理论以前取得的成功，这并不与他的期望相反）。后来，他对物理学家尼克·荷伯特说，他“非常高兴地看到在一个粗糙和模糊的领域中，有一些东西是硬的和清晰的”，即使有些事情已经跑到了常识和他自己成见的对立面。\*\*

将艾斯派克特的实验翻译成简单一点的例子，那就是如果一个原子沿不同的方向发射两个粒子，那么量子规则要求其中一个是红的，另一个是黄的，但是规则中并没有指明哪一个是哪一种颜色。这两个粒子都处于叠加态，直到有意识的观察者注意到其

• 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》第 51 页。

•• 给荷伯特的信，荷伯特在《量子真实性》第 212 页引用过。

中一个的颜色是什么为止。就在那个时刻，那个粒子的波函数发生坍塌，另一个粒子的波函数坍塌成另一种颜色。值得再一次强调的是，这不仅仅是疯狂的理论家的一些狂妄的梦想，也不仅仅是精心设计出来的思想实验。这个非局域行为已经在一个光子实验中得到了验证。将这个实验轻微地重新设计一下，使其涉及一个电子和一对小猫。我们可以更新薛定谔的著名的思想实验，使其能够考虑艾斯派克特的违反贝尔不等式的测量，来彻底地看一下非局域性和超距作用到底意味着什么。

## ◆ 薛定谔猫的儿女

现在已到了关键时刻。这里有一个全盛时期的基本问题。

想象一下，薛定谔的猫有两个孪生儿女——两只小猫。它们分别生活在两个空间小盒子里面。盒子内装备有自动设备可以照料它们，并提供大量的食物。这两个空间小盒子通过一根很窄的管道相联接，这根管道分别联接到两个小盒子的一个角落。在管道的中间有一个小盒子。在小盒子的中部有一块自动滑移的挡板。小盒子当中只有一个电子。这两个空间小盒子中分别装有一台通用的恶魔设备。如果有电子从管道跑到小盒子中来，恶魔设备将把相应的猫杀死。装有电子的盒子位于管道的中部，它将管道彻底堵住，什么东西都不能从一个小盒子通过管道进入另一个小盒子。盒子的两边也都是滑动的挡板。

请记住，只要没有人进行观察，几率波便均匀地充满整个盒子。当盒子中的挡板将盒子等分为两半时，电子在挡板一边的几率为 50%，电子在挡板另一边的几率也是 50%。当盒子的两边

移走之后，几率波将传播出去，分别进入两个空间小盒子。如果连接两个小盒子的管道现在被自动分隔开，分隔线恰好位于分隔盒子的挡板的中间。这样，我们便有了两个互不连通的小盒子，每个小盒子中包含一只猫，这只猫被自动设备照料着；一台恶魔设备，如果检测到一个电子，那么就把猫杀死；还有 50% 的电子几率波。现在，电子几率波、恶魔设备和猫都处于叠加态。

因为这仅仅是个思想实验，我可以给假想的空间小盒子装备物理规律所允许的、最好的推进器。当然推进的速度不能超过光速而违反爱因斯坦的相对论。我们也假设这两只小猫是强健的、长寿的（在恶魔设备允许的情况下）。现在，两个小盒子分离，自动火箭点火，将两个飞行器沿相反的方向在空间飞行。它们旅行了几年。最终，其中的一个到达了一个遥远的星球，那里有一个有意识的观察者。到那时，另一个小盒子已被一个超级效率的火箭推动着到达一光年之外的地方。

看一下小盒子里面发生的事情肯定会感到惊奇，那个有智力的观察者打开小门，瞅了一眼。就在那个时刻，小盒子中所有事物的波函数发生坍塌。这个坍塌“决定”了原来那个电子是否进入所研究的那个小盒子。如果进入，猫就死了——一旦进门观察，电子就从盒子中释放出来，猫就死了。在同一时刻，这个观测者看到一只死猫，另一只猫就从其叠加态中释放出来，“成为”活的。当然，情况也可能会反过来。这个观测者打开盒子发现一只活猫。在那种情形，这个人的观察就决定了另一只猫的命运。并不是在同一时刻每一只猫既是死的又是活的。而好像是，在空中飞行的这几年中，一只猫是死的，一只猫是活的。只不过完全不清楚哪只猫在哪个盒子里面。又好像是每个盒子中都装有两个鬼，这两个鬼分别代表历史的两个版本。在进行观察的一瞬间，



一个成为真的，另一个便消失了。

就哥本哈根解释而言，选择哪一种解释很大程度上取决于你。在这个问题上没有官方“解释”。哥本哈根解释指出的是，如果你对几千对猫都做几千次同样的实验，那么就会发现，在外星球上的猫当中一半是死的，一半是活的，而与其对应的那些猫总是处于相对立的状态。标准的哥本哈根解释甚至没有说明推理的过程以及非局域的超距作用问题。当波函数发生坍塌时，立即有一个信号从一个小盒子出发，到达另一个小盒子。从某种观点看，这里面涉及到一个时间旅行的问题。

你可能会这样认为，“观察”这一行动发出的信号不仅仅在空间传播，而且沿着时间反方向传播，回到电子被释放的那一个时刻，决定电子进入哪一个小盒子。事实上，这个观点并不比信号立即穿过空间的思想更难以消化。因为根据爱因斯坦的相对论，如果一个信号的传播速度超过了光速，那么，它也就是在沿着时间的反方向传播。（当然，这正是这种‘超亮’信号被误认为不可能的原因。）

接受信号沿时间反方向传播的可能性看起来是偏激的，但这将有一些优点。如果它可以加入到一个关于量子世界的可理解的解释的话，就可以摆脱掉薛定谔的猫及其儿女的命运所确定的幽灵般的叠加态。贝尔本人曾经说过，如果让他选择，他更倾向于维护客观真实的思想，并放弃信号的传播速度不能超过光速这一思想。<sup>\*</sup> 但为了理解为什么这既是一个极端的选项，又（可能）是一个可守得住的选择，我们需要对光的本性有更多的了解。这些性质对于物理学家理解相对论和量子理论都是至关重要的。

<sup>\*</sup> 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》第 50 页。

如果你是那种读神秘小说时先读最后一页的人，如果你认为你已经知道了相对论和量子物理的标准解释，那么现在无论如何你都要看一下这是里的跋\*。如果你已经看过了，就下决心回过头来读一下本书的其余部分。因为像所有的好神秘小说家一样，我已经在其中藏了很多娱人的把戏。这些把戏可以不时地给你娱乐感受。其中一些把戏，就像好魔术师的把戏一样，涉及到镜子。它们都反映了光自身的神秘本性。

\* 此处应指后记

# 第 一 章

## 旧 光 学

在科学中，什么东西是古旧的，这取决于你的看法。那些描述宇宙及其如何运作的理论和数学模型，凡是与量子力学不相符的一般归为“经典”理论。照这个标准来说，艾萨克·牛顿正如阿基米德一样，一点不差全是“经典”科学家。实际上，照此定义，爱因斯坦的两个相对论也属于“经典”理论。可是，20世纪物理建立在量子理论和相对论这两大支柱之上。这两支科学都始现于20世纪初，都改变了科学家对这个世界的看法。因此，从另一个观点来看，科学经典史止于1900年。正是在这种意义之上，在描述光学研究时，我用了这种说法，是指从古希腊人对光的认识到19世纪麦克斯韦证明光是一种形式的电磁辐射为止的这段时间。

早期的哲学家们认为光产生于眼睛，大体上像灯塔的光束或盲人的探路手杖那样伸展出来，“感觉”出世界的模样。生于公元前5世纪的恩培多克勒曾经提出每种东西是由四种元素（土、

气、火、水）组成的观点，描述了阿佛洛狄忒\* 如何从四种元素中造出眼并由爱而合成的。她在宇宙之火中点燃了眼睛之火，使眼睛可以像灯笼一样照进世界，从而可以看到东西。\*\*

恩培多克勒认识到光不仅仅是这些，他认为晚上的黑暗是由于地球挡住了太阳的光。生活在公元前三世纪的伊壁鸠鲁持有类似的观点。他的观点由罗马人卢克雷丘进行了总结，他于公元前55年在《关于宇宙的本性》一书中说：“太阳的光和热是由非常小的原子构成的，当它们被推下来时，立刻就沿被推的方向穿过了空气中的间隙，”从现在的眼光来看，这是一个相当精确的描述，但它并不代表当时大多数人的想法。视觉与眼睛中发出的某种东西相关，这一观念维持了很长时间。生活在公元前428年到公元前347年的柏拉图，他描述了外部的光和内部之光的结合。生活在公元前330年到公元前260年的欧几里德，则对包括“视觉”工作的速度在内的问题感到担心。他指出，如果你闭上眼睛，然后睁开，你立刻就能看到最遥远的星星，而你的视觉要先到达星星处，再返回来。

虽然我们觉得这些想法很奇怪，但直到公元后的第一个千年末，这些观点并未受到严重的挑战。当然，原因之一是西罗马帝国灭亡后，欧洲文明崩溃，进入了黑暗时代。罗马人从未对科学表现出太大的兴趣，在凯撒时代，亚历山大的大图书馆不慎毁于大火，很多希腊人的教诲都化成了青烟，从那时起，学术便从未恢复过来。罗马帝国灭亡时，更多的书被毁坏或丢失了，在随后的一千多年里，欧洲残存的这种科学只剩下对古代的景仰，以及设法保存古人残存的片断教诲。

\* 古希腊性爱与美貌女神，译者注。

\*\* 见凯瑟琳·夫雷曼，“aneilla”。

第一个在某些学术领域超出古希腊人的科学家是一位阿拉伯学者，他生活在公元 965 年到 1038 年间，正处于伟大的伊斯兰文明顶峰。我们对古代世界及其学术思想的认识大部分来自于阿拉伯人留下的文献，这些文献首先被从希腊文或其它语言译为阿拉伯文，并在以后的年代里从阿拉伯文译成欧洲的文字。很多情况下，阿拉伯世界获得的材料来自于东罗马帝国——拜占廷帝国；拜占廷在罗马帝国灭亡后继续存在了约一千年，直至 1453 年。拜占廷和阿拉伯世界的关系至少是比较激烈的，但它也包括文化思想交流。

阿拉伯人继承了古人的思想并做了进一步的发展（包括我们现在使用的阿拉伯数字）。他们为欧洲留下了丰厚的遗产，这些遗产对重新点燃科学探索之火起到了主要的作用。对光的研究即是一例。

## ◆ 第一个现代科学家

阿布·阿里·本哈桑·伊布·哈旦是中世纪最伟大的科学家，他的很多成就在伽里略、开普勒、牛顿时代前的 500 年里无人超越。他在欧洲被称之为海桑。他写了很多书（我们现在称其为科学论文），涉及了科学和数学的很多方面；但他最伟大的成就是关于光学的七本书，作于公元 1000 年前后。这些工作在 12 世纪末被译为拉丁文（直到牛顿时代后的很长时间，它一直是欧洲受过教育的人所使用的语言）；但直到 1572 年才在欧洲出版（拉丁文），书名是“光学分类词典”。这本书被广泛研究，并对欧洲 17 世纪发起科学革命的思想家产生了深远的影响。

海桑认为视觉并非是由眼睛发出光来探测周围世界而产生

的，而只是光从外部进入眼睛的结果，他用几个逻辑论据来支持这一观点，第一个即所谓的“后视图像”。如果你盯着亮光看半分钟，然后闭上眼睛，你还能看到亮光轮廓，一般与原来的颜色不同（补色）\*。这种“后视图像在你睁开眼后依然存在，即“眼前的斑点”。经过推理，海桑认为这只能是外部某种东西作用于眼睛的结果，并产生了一个很强的效果，以至于闭上眼睛时这一效果依然存在，因为这时光既不能进来也不能出去。

此外还有一些例子，海桑视为光从外部进入眼睛的效应。但是他对光学发展最有影响的思想在于他对“黑暗的房子”中成像方式的理论，我们现在称之为“暗房”（或“暗室”）。这种现象古人自然早已知道，但对此的明确描述却是最早见于海桑的文章。要观察这一现象，可以在阳光明媚的天气里，呆在一间黑暗的房屋里，在窗户上蒙一块厚布。在厚布上开一个大约像圆珠笔滚珠大小的小孔，让光从这个小孔进入房间。这时在正对窗户的墙上就会投影出外面世界色彩斑斓的影像，但它是倒立的。

这种现象十分惊人和有趣，时至今日的电视时代，在一些城市（包括苏格兰的爱丁堡）建立了现代版的“黑暗的房子”来招揽游客。同样的现象也出现在针孔相机中，这里的“房子”可能是鞋盒或其它大小相当的东西，在一头有一个小孔，在小孔对面盒壁被剪开，贴一张透射纸做屏幕。让这个屏幕和你的头处于黑暗中（例如拉起衣服把头包起来），而把小孔向外放在有光的地方，你就会在这个小屏幕上看到外面世界的倒影，“黑暗的房子”最终发展成了光学相机。但它是怎么工作的呢？

正如海桑所认识到的，最重要的一点在于光是沿直线传播的。假设在远处正对着“黑暗的房子”的窗户有一棵树，从树顶

\* 但千万不要直接观察太阳，即使一小会儿也会对眼睛产生永久伤害。

发出的光线经过小孔会向下走，打到对面墙上接近于地面的一点。而从树跟发出的光线会向上走，穿过小孔打到接近房顶的一点。从树的其它点发出的光线经小孔会打到墙上相应的点上。这样便出现了一幅倒立的树的图像（以及花园中其他的景物）。

海桑认为光由一束微小的粒子组成，在太阳上产生，照亮地球，它沿直线传播并在碰到物体时弹回去。光从太阳出发碰到花园里的树上弹起来，通过窗帘上的小孔，碰到“黑暗房子”的后墙上并最终进入你的眼睛。这样你就在“黑暗的房子”中看到了图像。他还想到了光不能以无限的速度传播，虽然它的传播速度必然很快——考虑这样的现象，把一根直棍的一端放入水中，它看起来像是弯的，他认识到这种折射现象是由于光在水中和空气中传播速度不同引起的。他还研究了透镜和曲面镜，发现透镜的曲率使它能通过折射而把光全聚起来。

但 11 世纪时的欧洲并没有做好准备。第一个接过海桑传下来的接力棒的人是开普勒，他生活在 1571 ~ 1630 年，主要成就就是发现了行星绕太阳运动的定律，早在 17 世纪，基于海桑在“光学分类词典”中的论述，开普勒用小孔相机同样的原理解释了人眼。光从瞳孔射入，并在眼睛后部的视网膜上成像，显示出外界的图像。这一解释留下了一个令人困惑的问题，视网膜上的图像是倒立的——雷尼·笛卡尔从一头死牛身上取出一只眼睛，把后壁刮成透明的，然后观察视网膜上的图像，发现图像的确是倒立的——而为什么我们看到的世界都是正立的呢？我们现在知道，这是由于人的大脑可以自动将倒立的图像正过来，这就好像电视屏幕上的图像可以通过电学手法正过来，即使电视机本身是倒立的。

在那个时代（笛卡尔生活在 1596 ~ 1650 年间），人们对光的兴趣大增。伽里略·伽里雷生于 1564 年（威廉·莎士比亚生于这

一年），死于 1642 年（艾萨克·牛顿生于这一年）。1608 年他听说荷兰眼镜师发明了望远镜，他自己很快也做了出来，并把它对准天空，创立了现代天文学。在望远镜后显微镜也很快发明了出来，使科学家们能够同时向内探索微观世界，向外探索宇宙。通过望远镜，伽里略于 1610 年发现了木星四颗最大的卫星。到 1676 年，对这些卫星运动的研究使测量光速第一次成为可能。

测量方法由丹麦天文学家德·勒默提出，需要测量的是这些卫星被木星自己遮住的时间。这个时间似乎与地球及木星是否位于太阳同侧有关。勒默将这种时间上的差异归结为木星位于太阳另一侧时，光从卫星上到达地球所需的额外时间。按现在的数值，光以 30 万千米每秒的速度从太阳出发穿过地球轨道半径的距离到达地球需要八分多钟。因此，在观察木星某颗卫星“月食”时，最大的时间延迟为上述时间的两倍，即超过一刻钟。

## ◆ 从伍尔西索普到剑桥再到伍尔西索普

牛顿差一点儿就没能成为科学家，至少不会成为一个受过大学教育的科学家和皇家学会的会员。他于 1642 年的圣诞日生于林肯郡格兰瑟姆附近的伍尔西索普。他是一个早产儿，非常小，体弱多病，人们认为他可能活不下来，他的确差点儿没活过一星期。他的父亲，也叫艾萨克，在牛顿出生前就死了，但这被证明对牛顿的未来似乎是有好处的。牛顿出生后三年，母亲再嫁，住到了邻村北威特姆，艾萨克和他的外祖父母生活在一起。在艾萨克以前，牛顿家没有人受过教育，如果他父亲，一个连自己名字都不会写的小自耕农还活着的话，他也极不可能例外。但他母亲的家庭，艾斯库家，比牛顿家的社会地位要高一些。牛顿的祖父



詹姆斯·艾斯库是一位绅士，牛顿的母亲汉娜有一个叫威廉的兄弟，是剑桥三一学院的毕业生，他是一个神职人员，并在附近有一个教区。

牛顿童年十分孤独，他继父从不带他去自己家，但牛顿进入了本地学校，接受了启蒙教育，见识了另外一种生活方式，较之于做农民，艾萨克·牛顿的儿子要高尚的多。当他继父 1653 年死后，小艾萨克的母亲回到伍尔西索普，牛顿也回到母亲身边。团聚的快乐是有限的，毕竟他现在有一个弟弟和两个妹妹来分享母亲的感情，只过了两年，当他 12 岁时，牛顿被送到格兰瑟姆的中学，他寄宿在一位叫克拉克的药剂师的房子里。

孤独和与母亲不断的分离，加上他根本没有见过父亲，这些必然对牛顿不幸的人格是有影响的，牛顿神秘秘，坏脾气，疑神疑鬼，并且经常卷入优先权和抄袭指控等学术争吵。虽然牛顿在学校的成绩很好，很聪明（也很怪），但他仍要克服一个困难才能坚定的走上通向神秘科学殿堂的路。17 岁时，母亲把他接回家，让他学习着照顾农场，希望将来替她照顾农场。牛顿在这项工作上毫无指望，正当汉娜对培养儿子成为农夫感到绝望的时候，她兄弟威廉劝他让牛顿回到学校，准备上大学。格兰瑟姆学校的校长也劝她这样做，并同意让牛顿回来后住到自己家里并减少学费。1660 年，汉娜让步了，同意艾萨克回格兰瑟姆继续学习，也就是在这一年，查理二世在长达 11 年的议会制时代后重新登上王位。一年后的六月里，牛顿向剑桥进发，现在他已经不会再回头了。

在 17 世纪 60 年代，剑桥的官方课程仍然是基于古希腊哲学家，特别是亚里士多德的思想。牛顿对规定的课程看来颇为勤奋，于 1665 年获得学位。但他也阅读了当代思想家，如开普勒、伽里略和笛卡尔等人的著作，用 16 世纪中期的新科学来教导自

己。1665年伦敦爆发瘟疫，剑桥大学也关闭了，牛顿回到了林肯郡的家乡，在那里呆了两年，发展了自己对世界如何运作的见解。正是在这两年中，他发明了微积分，发展了自己的引力理论，以及光与颜色的理论。但是所有这些在很长的时间里都没有公布，对牛顿来说为了自己满意而解决问题就足够了，每次同事们知道他的某项成果后，都要费很大的力气才能说服他将其发表，让人们都能看到他的成果。

到17世纪60年代，关于光有两个相互争议的理论。其中之一，受法国物理学家皮埃尔·伽森地（1592~1655）的支持，认为光是一束粒子，以无法想象的高速运动。另一个由笛卡尔提出，认为光并非什么从一处运动到另一处的物理实体，宇宙中充满了某种物质（称为“空间充满物”），这种物质对眼睛产生压力。这种压力或“运动的趋势”是产生视觉的原因。像太阳这样的明亮物体，其作用是向外推。这种推力是即时传送的，能使观察明亮物体的眼睛感受到光。

两种观点都有问题，如果光是一束微粒，那么当两个人面对面站在一起，互相对视对方眼睛时会发生什么呢？如果视觉是由“空间充满物”对眼睛的压力导致的，那么正如牛顿在他的笔记中所指出的，一个在夜间奔跑的人能够看到东西，因为他的运动会使“空间充满物”挤压他的眼睛。

牛顿倾向于光是由粒子（或微粒）构成的观点。这必然与他用自己的动力学定律能够成功解释粒子运动有关。他认为无论是行星绕太阳的运动、炮弹的运动，还是光中粒子的运动，根本规律都是一致的。从某种意义上讲，他正试图建立一种物理学的统一理论，超前了时代300年。但是，在1661年牛顿去剑桥时，笛卡尔的理论开始显得更有前途。

在原始形式中，笛卡尔设想有一种稳定的压力作用在眼睛

上。将这一假设稍微复杂化一点，新理论涉及从明亮物体发出的一种脉冲压力，这种脉冲压力会导致波——它并不像池塘中振荡的水波，而像用手拍击池塘水面所产生的压力在水中传播时的那种波。像我们现在所知道的那样，声音就是以这种压力波的形式传播。在 17 世纪 60 年代早期，至少有两个人开始沿这个方向前进，走向一个全面成熟的波动理论，一个是英国的罗伯特·胡克，另一个是荷兰的克雷斯蒂安·惠更斯。胡克将在后文中出现，惠更斯作为那个时代仅次于牛顿的大科学家，在这里需要更多的笔墨。当然这里并非指成就，毕竟，牛顿至今仍被认为是所有科学家中最伟大的。

## ◆ 在牛顿的阴影里

惠更斯 1629 年生于海牙，他的家庭生活与牛顿大不相同，他父亲是一个外交官兼诗人，来自于一个有为奥林奇皇室提供外交服务传统的世家。笛卡尔在年轻时曾效力于奥林奇王子的军队，并于 1628 ~ 1649 年生活在荷兰，那时他是惠更斯家的常客，这对克雷斯蒂安的职业选择可能起到了一定作用。惠更斯接受了数学和法律方面的教育，并被推荐继承家族传统的外交工作。但在 1649 年结束正规教育后，他回到家里，并在随后的 16 年中作为一名贵族科学家，靠父亲的一份津贴维持生活。

由于出身于贵族背景的家庭，而这个家庭能够也愿意迁就他的兴致，所以他很容易地成了一个业余科学家，进行科学研究。但他对科学的所有领域都产生了兴趣，并在某些方面作出了突出的贡献。他的成功和声望远超出了爱好者的程度，当 1666 年，法国皇家科学院成立时，他被邀请以七位创立者之一的身份到那

1681

1689

1695

节吹毛求疵的细心为他带来了好处，这是他对 17  
的

1581

17 50 年代才由惠更斯找到

1657

1674 年惠更斯又发明了实用的手表，由弹簧

1655

1679

1690

群粒子的某种撞击运动，它们互相推撞，从源头的位置向外扩展出一种扰动，形成一种球状的压力波。他的理论给出了一个突出的预言：为了解释折射，光在一种更稠密介质（如玻璃或水中）传播速度要比在不太稠密的介质中（如空气）小。

然而，惠更斯的不幸在于，他的名声被笼罩在牛顿的阴影中了。牛顿在“自然哲学”领域取得了惊人的成功，他的运动定律和引力理论于 1687 年发表在其著名的“原理”一书中。虽然他的全套光学理论由于某种原因（见下文）直至 1704 年才发表，但他对光的某些观点已于 15 年前发表。由于牛顿被公认为是最伟大的科学天才，依靠这一声望，他对光的观点同他的运动定律和引力论一样在整个 18 世纪被看作是真理。牛顿认为光是粒子形式的，这是他对光的观点的一个基本方面，所以很明显惠更斯是错的。但即使天才也会犯错误，而且粒子说也绝非牛顿光学理论最重要的一方面。他关于颜色的理论首先引起了当时科学界的注意——同惠更斯一样，牛顿的理论也与天文学有联系。

## ◆ 牛顿的世界观

牛顿颜色理论的重要性不仅在于他是对的，而且在于他得到结论的方法。在牛顿之前，哲学家主要是通过思辨来发展自己的世界观。例如笛卡尔虽然考虑了光传播的可能方式，但他并没有做实验来验证他的观点。当然，牛顿也并非第一个实验家，伽里略便在他对球从斜面上滚下来的运动方式的研究和单摆的工作中开创了实验的先河。但牛顿首先明确表述了科学方法的基础，即思想（假定）、观测和实验相结合的方法。现代科学正是建立在这一基础之上。

牛顿的颜色理论，产生于他不得不离开剑桥回家休假的这段时间里所做的一系列实验。到 1665 年，一束阳光经过一个三角透镜后会变成一条像彩虹一样的光谱的现象已被普遍认识。对这一现象的标准解释基于亚里士多德的观点，即白光代表纯净的，没有杂质的形式，经过玻璃则导致这种形式发生混乱。当光进入棱镜时，它会发生弯曲，然后沿一条直线到达三角形的另一边，在那里它再次弯曲后进入空气。同时光会发生扩散，从一个白色的光点变成一条彩色的线，沿三角形顶点向下，上面的光折曲最小，在玻璃中经过较短的距离出射成为红光。在下面三角形的边要宽一些，光进入棱镜时要折曲的多一些，在玻璃中经过较长的距离到达另一边进入空气而变成紫色。在两者之间存在着彩虹中所有的颜色——红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫。在一个黑暗房子里，让光通过窗帘上的一个小孔射进来，把一个棱镜挡在光束前面，对着窗户的墙上就会出现彩色的光谱。

亚里士多德认为，在玻璃中传播距离最短的白光变化最小，成为红光，而传播距离稍长则变化稍大，是黄色，然后以此类推直到紫色。

实际上牛顿用自制的棱镜和透镜对这些观点进行了验证，通过改变透镜的形状，力图减小颜色的变化。他第一个区分了光谱中不同颜色的光，并命名了七种颜色（他有意选择了七种颜色，因为七是一个带有某种神秘意义的素数，如果你发现在彩虹中在蓝色和紫色之间难以区分单独的靛色，你绝对不属于少数了。）

但是牛顿这次进行的最重要的一个实验只不过是第一个棱镜后面放了第二个棱镜，只不过放的方式不同，第一个棱镜尖朝上放，将一束光谱展开成彩色的光谱，第二个棱镜尖朝下放，将展开的彩色光谱变回了一束白光。虽然光经过了更厚的玻璃，但它并没有变得更混乱，而是回到了原来的纯净状态。

牛顿认为，这说明白光一点也不“纯净”，而是由彩虹中所有颜色的光混合成的，不同颜色的光在折射时弯曲程度不同，但是在原来的白光中包含所有颜色的光。这是一个革命性的观点，因为它不仅推翻了亚里士多德哲学的一项基础，而且还是建立在可信的实验基础之上。但牛顿并不急于向世界宣布他的发现，他在 1665 年所获得的对光本性的认识使他致力于一种新型望远镜的研究。

用大透镜做成的望远镜（折射望远镜）存在一个问题，因为透镜同样会把白光分解成有色的光谱。这样所观察的物体的图像上会产生彩色条纹，使图像模糊不清，使我们在观察星星时非常不便，这种现象称之为“色散”。牛顿发现要做出一个没有色散的透镜系统很困难（但并非不可能，如所谓的消色差透镜系统，是利用两片或多片折射性质不同的玻璃来制作望远镜，它不会产生色散），因此，牛顿设计并制作了用曲面镜而不是大透镜的望远镜——反射望远镜。

牛顿的反射器想法很简单，用望远镜后部的一片大曲面镜把光反射到一个斜度 45 角放置的平面镜上，使光改变方向穿过镜壁上的一个小孔射出来，观察者可以通过这个小孔来观察，而不必担心头部会挡住星光。这个想法十分卓越，因为它非常简单，但用现有的材料制做一面精确的镜子是一项实验工作，作为一个专业的工匠，牛顿自己动手完成了镜子。最后他做成了一台长约 20 厘米（6 英寸）的仪器，这台仪器产生的图像比用四倍长的反射器产生的图像大九倍，而且没有色散。

这时，瘟疫已经渐渐过去，大学重新开学，牛顿回到了剑桥。他在 1667 年当选为三一学院的高级成员。同年，英国和荷兰爆发了战争，荷兰舰队在泰晤士成功地袭击了英国人，剑桥听到了枪炮声，大家都知道是怎么回事；牛顿断言荷兰取得了胜

利（事实果然如此），这给他的同事留下了深刻的印象。他的理由是，枪炮声越来越大，这说明战场越来越近，英军正在撤退。

到 1669 年，由于他在数学上的工作，牛顿的声望渐渐超出了剑桥的范围。同年，第一位数学卢卡锡教授，艾萨克·巴罗（于 1663 年任职）退休，实际上是为了牛顿。巴罗虽然是一位有成就的数学家，但他却有另外的雄心。他很快成了国王的第一牧师，然后是三一学院院长。他对亨利·卢卡斯——是他设立的卢卡锡教职——的遗嘱执行人有足够的影 响，使得他的继任者也是一个三一学院人，并作为一个知名的数学家开始留下足迹。

这项任命保证了牛顿在剑桥的地位，但同时要求他作定期演讲。他第一期演讲的题目并不是数学而是光学和颜色理论，其中特别提到了透镜的色散问题。同时他自豪地向剑桥及周围的同事展示了他的新望远镜。实际上，现存的牛顿最早的信（写给一个不知名者）写于 1669 年，主要内容就是描述望远镜。

1671 年底，皇家学会（1662 年正式建立，实际上已于 1645 年非正式成立）得知了这项非凡仪器的消息。学会秘书，亨利·奥登堡要求看一下这台望远镜，巴罗代替牛顿把它交给了在伦敦的学会。1672 年 1 月奥登堡给牛顿写了一封虚伪可厌的信，表达了学会对他这项发明的赞美，并告诉他，关于望远镜的消息已经通知了当时在巴黎的惠更斯。作为新式望远镜的发明者，牛顿逐渐开始享誉欧洲大陆。由于这项发明，他于 1672 年 1 月 11 日当选为皇家学会会员，并于数周后发表了他的第一篇物理学论文，形式上是给奥登堡的一封信，信中牛顿阐述了他的颜色理论。这篇论文于 1672 年 2 月 19 日发表在学会的“哲学会刊”上，并导致了牛顿第一次著名的学术争论。

罗伯特·胡克，生于 1635 年，死于 1703 年，当时是皇家学会的实验主任。他在科学上已经久负盛望，并对光和颜色有自己



的观点（他自己的光波动论发表于 1665 年，但没有惠更斯完善），他总希望自己的任何工作都能抢到优先权。他对牛顿的工作表现出一种屈就的态度，他首先否定了光是由微粒构成的概念，并认为牛顿的颜色理论与粒子假设无关，并不值得如此夸赞，胡克用语尖刻，暗指牛顿理论中原始的东西是错的，而对的的东西不是原始的。

争论的结果有两个。第一，它使牛顿从学术界逃了出来，把自己关在剑桥，很长时间里拒绝发表更多的东西（他把自己完善的光学理论留在手中，直到胡克死后，确信不会发生问题时才全部发表）。第二是牛顿的那句名言——“如果我看得更远，那是因为我站在巨人的肩上。”，尖刻的讽了胡克矮小的个子，同时暗指胡克才智不佳。\*

另一项批评则使牛顿提出了对自己工作方法的认识——什么是科学的方法。法国天主教耶稣会教士让·加斯东·帕拉第斯从巴黎给牛顿写了一封信，质疑了牛顿理论中几点牛顿认为恰当的方法。牛顿并没有把帕拉第斯当成傻瓜对待，而是回信详述了自己的观点，他写道：

“哲学最好和最安全的方法似乎应该是，首先努力探索事物的性质，然后用实验来验证这些性质，然后逐渐提出假设来解释这些性质。假设只能被用来解释事物的性质，而不是决定它们，它只是实验的奴仆。”\*\*

这就是科学之全部。无论你的理论多么完美，如果它与实验不符，那它就不是正确的。例如，牛顿的光的理论（可能应称之

\* 巨人一条与牛顿引力论无关，而是出自 1675 年他写给胡克的一封信，距他的《原理》一书发表有 12 年。关于牛顿与胡克争论的详情，参见格雷宾的《寻找时间的边缘》第一章。

\*\* 引自维斯弗《永不停息》，242 页。

为“假设”，当胡克用这个词来定性牛顿的思想时，牛顿很不高兴），它将折射归因于光从一种媒体进入另一种媒体时的速度变化，但与惠更斯的理论不同，微粒说要求光在稠密的媒体中运动得更快。这就有了一种很明确的方法来区分这两种思想；如果牛顿在有生之年能看到实验显示光在稠密的媒体中运动的更慢时，他肯定会接受光是以波的形式传播的观点。

牛顿不仅建立了考查世界的科学方法，他（和惠更斯等同时代的人一起）还提出了第一个客观世界的模型。。它表明宇宙遵守确定的规律（或定律），不同的现象，大到行星绕太阳的运动，小至光束的弯曲，都可以用这些规律来解释，而不必借助于神不可靠的一时兴致。

17世纪的巨匠留给我们的图景常被十分准确的称为“时钟宇宙”，遵从永世不变的定律。但这里的时钟并不是现在的钟或手表的样子，一秒一秒的走过，实际上我们应该想象一下17世纪教堂里的那种大钟，按照惠更斯的设计，由一个巨大的钟摆驱动，包括很多联在一起的大小齿轮，不仅驱动了时间嘀嗒的流逝，同时还驱动了一个复杂的系统，能让舞台上的圣人像跳舞样子，能撞击铃铛，在特定的时间产生特定的运动。17世纪的科学认为，与此类似的钟表系统支撑着行星绕太阳的运转以及其它自然现象。

在牛顿留给我们的思想遗产中，第一点是宇宙中任何事物的行为都是可以预测的，正如教堂的大钟在舞台上人像的运动是可以预测的；第二点是用人脑可以理解的简单定律就可以理解宇宙是如何运作的。因此，尽管对光本性的进一步理解似乎表明牛顿的微粒说是错的，但与取得的成就相比，这似乎显得无关紧要，当然这仍然是很重要的一步。

## ◆ 杨的观点

在牛顿的时代，光以波动方式传播的直接证据已经存在了，但证据很脆弱，也没有多少人知道，而且解释也不完善。这种证据出自于意大利物理学家弗朗西斯科·格雷马蒂（1618 ~ 1663）的工作，像牛顿一样，他研究了一束光穿过一个小孔进入黑暗房间的行为。他发现当这束光穿过第二个小孔射到屏幕上时，屏幕上的光点要比小孔大一些，并有彩色的条纹。即当光经过第二个小孔时稍微扩散了一点儿，并且不同的颜色扩散程度不同。

他还发现，如果用小物体挡在光束前，它产生的阴影会有彩色的边缘。这些彩边位于小物体产生的阴影里面。即光扩散到了阴影里面，而且与穿过小孔时一样，不同的光扩散程度不同。两种效应都很小，但通过仔细的观察和测量都可以明确探测到。格雷马蒂给这种现象取名为衍射，即除反射和折射外，第三种光发生弯曲的现象。但格雷马蒂的工作直到 1665 年他死后两年才发表，到牛顿思想控制了科学界的想象力时，他已经没有机会为波动说辩护了。胡克也发现光并非沿绝对直线运动，然而如同我们在上文看到的，到牛顿发表了他完善的光学理论时，他也无法为波动说辩护了。

虽然牛顿思想在 18 世纪统治了科学界，但光的波动说并非没有支持者。最有名的支持者是瑞士数学家莱昂那多·欧拉，他 1707 年生于巴塞尔，到 1727 年牛顿去世时，他差几个月就二十岁了。欧拉是有史以来最伟大的数学家之一，他的兴趣包括纯数学以及在潮汐、流体、天体运动等方面的数学应用。即使最伟大的科学家也会犯愚蠢的错误，17 世纪 30 年代他在圣彼得堡担任

数学教授时，由于在做天体工作时观察太阳使右眼失明。30年后，他回到圣彼得堡担任科学院院长时（这时正值凯瑟琳女皇时代），他的另一只眼睛由于白内障而失明；但直到1783年去世，他一直呆在那里，履行自己的职责和义务，在他生命的最后15年里，他仍是一个活跃的数学家，用脑子进行所有的计算，并把他的发现口述给助手。他76岁时去世的当天还花了一些时间来计算当时新近发明的热气球的运动规律。

欧拉的光的理论发表于1746年，他当时在弗里德里希大帝的科学院里工作，正处在两次俄国之行的中间。他指出光以粒子形式传播的思想的所有困难（包括解释衍射），并对光的振动和声波的振动进行了详细类比。从那时起，光在其中振动的媒体的名称从“空间充满物”变成了“以太”。在17世纪60年代的一封信中，欧拉写道：“光对应的是以太，正如声音对应的是空气”，并把太阳比喻为一个“发出光的铃”。\*然而世界并不相信波动论。重要的是只有新的实验证据才能使波动论取代粒子论。运用科学研究的牛顿法则，其直接结果是牛顿的微粒说被推翻。

英国物理学家托马斯·杨走出了第一步，他生于1773年，欧拉去世时10岁。这个年龄似乎不算什么，但杨是一个非凡的天才儿童，他在生命中头10年里学到的东西比很多人一生学的东西都多。他两岁就能阅读英语，并阅读溺爱的祖父给他的书，在六岁时他转向拉丁语及其它语言，在16岁前，他已经能理解拉丁语、希腊语、法语、意大利语、希伯来语、阿拉伯语、波斯语、土耳其语等12种语言。正如上面所列的语言所显示的，从年轻时杨便对考古学和古代历史感兴趣，实际上他对什么都感兴趣。1792年他19岁时开始学习医学，他分别在伦敦、受丁堡和

\* 引自查琼克，《抓住光》，99页。

哥廷根学习，并于 1796 年在德国的大学里获得硕士学位。他在学医的第一年便成功解释了眼睛聚焦的机制，即通过肌肉改变眼睛中“透镜”的形状。由于这一工作，他在 21 岁时便当选皇家学会会员，当时他还是一个学生。

获得学位后，杨先是在德国旅行，然后又到剑桥工作了两年，进行了多种科学研究，并因他的广泛兴趣而获得了“现象杨”的外号。1800 年他回到伦敦，开始行医，并最终成为圣乔治医院的一名外科医生，他在这个职位上一直从 1811 年工作到 1829 年去世，但医学仍然只是他广泛兴趣之一。

杨把散光解释为眼角膜曲率不规则，他第一个认识到视觉中的色彩是由三种颜色（红、绿、蓝）作用于眼睛中不同的感光细胞而产生的，他在物理学上也做出了重大贡献（包括第一个对分子大小的估算），并担任皇家学会的外事秘书（这显然与他的语言能力有关）。从 1815 年起，他回到了早年对古代历史的兴趣，发表了关于埃及学的论文，并帮助破译了罗塞塔巨石的秘密，这块石头是 1799 年在尼罗河口发现的（杨可能是破译巨石秘密的第一线希望，但他当时没有获得足够的信任，这是因为他在这方面的工作是作为 1819 年大英百科全书的附录匿名发表的）。但归根到底，杨最大的贡献是他对光的干涉现象的研究。他关于干涉现象的第一组实验是 1797 ~ 1799 年在剑桥完成的；他回到伦敦后继续了这一实验，到 19 世纪初，杨向英国的一个非正统科学组织提交了一份实验的详细明确的报告，支持光的波动学说。杨进行（实际上发明）了基本的干涉实验，在这份报告的序言中，他描述了用两个针孔和两条窄缝所做的实验。从某种意义上讲，他用波动说很好地解释了牛顿自己做的一些光的实验。他认识到不同颜色的光对应不同的波长，而光在折射或衍射时弯曲的程度由波长决定。利用这一理论及牛顿的数据，他算出红光的波长是

$6.5 \times 10^{-7}$ 米，紫光的波长为  $4.4 \times 10^{-7}$ 米。这两个数字与现在公认的数字一致，这同时可以说明杨是一个非常出色的理论家，而牛顿是一个十分精确的实验家，这些数字也说明为什么经过这么长时间才证明光的波动性——这些波长太小，大多只有半个微米，而衍射效应的大小与波长差不多，光经过物体边缘时发生的弯曲只有几个微米。但不论大小如何，只有波动才能解释光在双缝实验中的行为。

在 1807 年，牛顿去世后的 80 年，杨这样描述双缝实验：

“图案的中部总是亮的，在两边亮条纹所在的位置上，光从一个小孔到达这点必定比从另一个小孔到达这一点要多走一、二、三或更多倍的确定起伏距离（波长），而相间的暗条纹对应于相差半个、一个半、两个半或更多的确定起伏距离。”\*

这一描述完全正确，十年后杨提出光是横波（波的传播方向与振动方向垂直），而非纵波（波的传播方向与振动方向一致，代表例子是声音的波动）。

我们可能认为这应该足以证明光的波动本性了。但即使杨也无法说服他那一时代的科学界，使人们相信牛顿的说法是错误的。在当时，认为牛顿会有什么错，似乎显得有些不爱国，甚至有点不光彩，这种感情广泛传播；而且对杨的很多同事来说，用叠加在一起的两束光会产生黑暗是不可理解的。我们已经习惯了用波的观点来看待双缝实验，所以认为这是常识。但在 19 世纪早期，常识是把两束光加在一起总会使亮度增加；而用两束光制

\* 引自拜厄雷恩，《从牛顿到爱因斯坦》，95 页。

造黑暗的想法，按一位与杨同时代的人的说法，是“在人类进行假设的历史中，我们能记得的最不可理解的叠加。”\* 作为非英国人最终推翻微粒说的是一无所知（这并不奇怪，要知道在 1799 ~ 1815 年间除短暂的时间外，英国一直在与法国交战）。

奥古斯丁·菲涅耳，1788 年生于诺曼底的布洛列。1809 年他成为一名工程师，为政府在各地的筑路计划工作。由于他对光学的兴趣只是业余爱好，所以他并不是科学家圈子里的人，尽管即使在战时，科学家们也可能获知杨的工作结果，但菲涅耳并不知道。当拿破仑被打败并流放到埃尔巴时，菲涅耳成了一名“保皇派”，因此，当 1815 年拿破仑从埃尔巴回来进行百日复兴时，菲涅耳要么是辞职抗议，也可能是被解职（历史记录并不清楚），总之，当时他被关在诺曼底的家里，在这段时间里，他把自己初步形成的思想发展成为一个成熟的理论。当拿破仑被最终推翻后，他回到了工程师的岗位了，光学又一次成了业余爱好。\*\* 但他在业余时间和那段强制的空闲时间里所做的工作足以使粒子论寿终正寝。

## ◆ 菲涅耳、泊松及亮斑

虽然菲涅耳在 1815 年时并不知道杨的工作不值得大惊小怪，但奇怪的是他连惠更斯或欧拉的工作也不知道。但无论如何，事实似乎如此，他的波动理论全部是自己的工作，是从衍射最简单

\* 亨利·布鲁翰姆爵士，引自查琼克，《抓住光》，110 页。

\*\* 这项工作的一部分有实用价值，1820 年菲涅耳发明了一种透镜，由一组集中的环组成，这种透镜（以他的名字命名）被用来会聚灯塔发出的光或用于其他方面。

的解释发展起来的。无可争辩的证据来源于一个从某种意义上说比双孔实验更简单的实验，却是更令人惊奇的实验。

实际上只用单缝（或单孔）就可以看到由衍射和干涉产生的条纹状图案，而且用不着什么专门的科学仪器。把你的手放在眼前，夹紧手指，从中间两个指头的缝里观察一束亮光，慢慢夹紧指头，使它们间的缝越来越窄，在这条缝完全消失之前，你会在指头中间的缝里看到明暗相间的图案。在缝隙的中央你会看到一条或两条黑线，如果仔细观察的话可以看到好几条。

物理学家用一条窄缝同样可以做到这一点，并将通过窄缝的光投影在屏幕上。要解释这一现象很简单，但要经过一些计算，你可以认为这是由于光在单缝的每一边附近都发生弯曲，沿不同的路线传播到你的眼睛里或屏幕上，每一条包含不同数目的波长，从而产生干涉。对于光的波动本性，菲涅耳提供的关键证据是将单缝实验反过来做，在光束中放一个小物体，并观察阴影中产生的干涉效应，这种干涉是由于光在小物体边缘处发生弯曲而引起的。这有点儿像水波绕过一块岩石，影响岩石后面的水，只不过尺度小得多。

1817年，拿破仑时代的战争终于结束了，由于受杨工作的启发（可能仍不知道菲涅耳的工作），法国科学院决心一劳永逸的解决光的本性问题。他们设立了一项奖金，奖给能够提出最好的研究衍射现象的实验并为实验提供满意解释的人。虽然这一奖项并不限于法国人，而是对任何人都公开的，但它只吸引了两位竞争者。其中之一是一个狂想者，历史并没有留下这个名字，更不要说他所提出实验的具体细节了。另一个是菲涅耳，他写了一篇长达 135 页的论文。当然，他获奖了，但当 1817 年三月评奖委员会宣布他们的决定时，并非没有人反对。反对者包括数学家西蒙·泊松、物理学家让·波耶特和天文学家皮埃尔·拉普



拉斯，他们都强烈支持牛顿的理论。

菲涅耳并非一个平庸的数学家，他用牛顿和莱布尼兹发展起来的微积分来描述不同情况下衍射的行为。但有时这些公式太复杂了，菲涅耳也无法把它求解出来，也就无法描述特定情况下光衍射行为的细节了。然而泊松作为一个坚定的牛顿论者，是一个狂热的数学家。他生活在 1781 到 1842 年间，对概率论、微积分、电磁理论及其它方面作出了主要贡献。他拿起菲涅耳的一个例子，解出了方程，并向同事展示了这一结果，结果似乎用反证法彻底否定了波动理论。

如果说阴影边缘处的彩色条纹可能是由光衍射而产生的，这种概念至少与波动方式的常识相吻合。但菲涅耳的理论加上泊松的计算预言，在图形物体所产生的阴影正中央有一个亮斑。荒唐！泊松这样描述他的计算结果：

“让一束平行光照在一个不透明的圆盘上，假设周围是完全透明的，则圆盘投影出一块阴影，但阴影的正中央是亮的。而且在这个圆盘后面，垂直于圆盘并通过其中心的这条线上到处都是亮的，从圆盘背面的那一点开始，光的强度从零开始不断增大，到圆盘后面等于圆盘直径的地方，光的强度是没有圆盘存在时光强度的 80%，随后光的强度缓慢增大，逐渐达到没有圆盘时的强度。”\*

但是，作为优秀的牛顿论者，评委们不想以逻辑和常识推理来否定菲涅耳的理论。按当时已经成为标准的牛顿方法论，要用实验来验证这一结论，为此评委主席弗朗西斯·阿拉贡安排了一次实验。结果发现在阴影中心确实有一个小亮点（今天我们称之为泊松亮斑），对小球和小圆盘都有这种现象。菲涅耳是对的，

\* 引自拜厄雷恩，《从牛顿到爱因斯坦》，102 页。

而牛顿是错的。据此，阿拉贡 **1819 年 3 月**在会议上向科学院委员会做了报告：

“我们的委员之一，泊松先生，从作者（菲涅耳）报告的一个积分中推出一个非凡的结果，当光接近于垂直的照射在一个不透明圆形屏幕上时，阴影的中央与没有屏幕时同样明亮。在验证的实验中，观察证实了这一结果。”\* 这是问题的根本所在。理论只有经过实验证实才是有效的。实验结果所告诉我们的是正确的，任何优秀的理论者应与其一致。无论实验结果多么古怪，如同在序言中提到的电子的两重性，我们都不能在理论中回避它。

当然，获奖使菲涅耳获得了声誉。他和阿拉贡一起研究了横波理论的某些问题，解释了长期以来关于光偏振问题的困惑，在论证光是横波的路上走出了有意义的一步。他还提出了测量光在水中速度的方法；实验于 **1850 年**进行，结果表明，波动论是对的，光在水中的传播速度远小于在空气中的速度，但当时光的波动论已经得到广泛承认了。菲涅耳 **1823 年**被选入法国科学院，并在 **1827 年**成为皇家学会会员，并在同年死于肺结核，距牛顿去世整一百年。菲涅耳死时仅 **39 岁**，而杨则于 **1829 年 56 岁**生日前一个月去世。两年后，最终解释光波动原理的人在苏格兰爱丁堡出世了。但詹姆斯·克拉克·麦克斯韦对光本性的解释是建立在电磁相互作用理论的基础之上，这一理论在 **19 世纪 20 年代**已经发展起来了，那时杨和菲涅耳还都在世。

\* 引自拜厄雷恩：《从牛顿到爱因斯坦》，**103 页**；黑体是作者自加的。

## ◆ 装订商的学徒

迈克尔·法拉第，生于 1791 年，靠不懈的努力，自己的能力和一点儿运气，克服了出身低微，并且没有受过正式教育的困难成为 19 世纪最伟大的实验物理学家。他是萨里郡纽因顿一个铁匠四个儿子中的第三个，这个地方当时属于法国，后来被伦敦吞并，成为南沃克镇的一部分。他们家后来搬到了伦敦北部，13 岁时法拉第成了一个为书商和装订商跑腿的小伙计。他受过基本教育，能够阅读，但他根本不懂数学。由于整天和书在一起，他开始贪婪地阅读这些书。他的雇主是一位法国移民，在大革命时代穿越海峡到了英国，他鼓励法拉第，并雇佣他当装订学徒。在随后的七年里，法拉第学徒学得很好，同时他还锻炼了动手能力，这对他以后的科学家生涯是非常有用的，他还大量阅读书籍，当时他就对大英百科全书中关于电的文章十分感兴趣。

1810 年 19 岁时，法拉第加入了市哲学学会，定期参加科学报告会，学习基本的物理和化学知识，并在听课时做了详细的笔记。他将这些笔记装订成书的样子，这些书成了他科学生涯的通行证。

法拉第的雇主雷实先生，常向店里的顾客展示法拉第的笔记。法拉第对科学的热心给一位顾客留下了深刻印象，他安排这个学徒去听哈姆弗雷·戴维爵士在皇家学院的演讲。戴维是位一流的演说家，也是当时英国最有名的科学家。他发明了用氮氧化物（“笑气”）来制做麻醉药物的方法及其它一些产品。他最大的实用发明是一种煤矿中使用的灯，这种灯可以减少点燃煤层中常冒出的天然气的危险，后来“戴维”灯成为煤田里的标准灯具。

法拉第本来就对科学着迷，而戴维的演讲进一步激发了他的热情。他马上就要学徒期满了（1812年），他决定放弃当一名装订商的职业而以科学为职业。他整理好戴维演讲的记录并把它装订成书后，开始四处寻找科学工作的职位，但根本找不到，所有可能的雇主都认为这个失业的装订商不会成为一名科学家。即使与他取得联系的人，也都首先说明工作不是固定的。一次戴维由于实验室的一次爆炸而短期失明，法拉第伺候了他几天，并随后把自己所做的戴维本人演讲的笔记送给戴维，请求一个固定职位。虽然戴维很满意，但仍没有办法，因为皇家学院压根就没有什么工作。

这时幸运之神敲门了。戴维的助手由于打架而被解雇，法拉第得到了这份工作，并在1813年3月1日开始在皇家学院工作，当时他21岁。从很多方面讲，戴维并不是一个很好的雇主，他自私、妒忌、不重视别人的工作而且容易激动。当过戴维助手的还包括在前三年里做戴维在欧洲长途旅行时的男仆。虽然这项工作十分枯燥，而且经济报酬很少，但法拉第开始接触一些伟大的科学家，并观察其中一位的工作。他从1816年起开始发表科学论文。并在1823年第一个液化了一些气体（包括氯气），1824年，他当选为皇家学会会员（虽然当时的学会会长戴维反对），在1825年他从石油中分离出了苯，同年被任命为皇家学院的实验室主任。一年后，他开始在周五晚上做定期演讲。实际上他的成就和声望已经开始超过戴维了，戴维为此非常不高兴。但戴维在1829年，很年轻时就死了。从那时起，直到1865年退休，法拉第和皇家学院几乎就是同义词，退休后他住在阿尔伯特王子1858年提供给他的一所房子里。他1867年去世，距77岁生日一个月，他保持了一个独一无二的记录，不仅拒绝了一个贵族头衔，还（两次！）拒绝了皇家学会会长的职务。他说：“我总觉

得，对有知识的人的努力给予奖赏有点贬低的味道，而社会、学院以至国王和皇帝参与并不能消除这种贬低”。

在他漫长的学术生涯中，法拉第虽然也取得了其它方面的成就，但他对科学最大的贡献在于对电和磁本性的洞察。这不仅为理解光的本性铺平了道路，还为物理学提供了一个全新的图像，即力和场，这一图象在现在仍是我们理解宇宙的核心。

## ◆ 法拉第的场

法拉第对电和磁的第一项研究早在 1821 年就开始了。在此之前哥本哈根的汉期·奥斯特曾报道了一个奇怪的发现，通了电的金属线会使附近小指南针上的磁铁偏转。很显然，金属线中的电流引起磁性。安培（他的名字命名了电流的单位）发现当两根平行的金属线中的电流同向时，它们互相吸引，而通过反向的电流时，它们互相排斥。然后弗朗西斯·阿拉贡发现一个快速转动的铜盘会使放在盘上方的磁针偏转。

《哲学杂志》的编辑请法拉第考查一下这些神秘现象，并给读者解释一下。法拉第做了实验，并产生了在通电流的金属线周围有圆形“磁力线”包围的思想。他设计并建造了这样的系统，一个吊起来的通电金属线在固定磁铁周围做圆周运动，一个吊起来的磁铁在一个固定的通电金属线周围作圆周运动。这就是电动机和发电机的工作原理。法拉第推论，如果电流能产生磁场，那么磁场也应该能产生电流。

他于 1831 年证明，当把一个条形磁铁从一个线圈中拔出或插入时，就会出现“电磁感应”，这是一个最直接的例子。只要磁铁运动，线圈中就有电流。法拉第证明了不仅变化的电会产生

磁性，而变化的磁性也会产生电。这里“变化”一词是极为重要的，第二种效应之所以比第一种效应发现的晚，就是因为法拉第一开始认为固定的磁场会使附近的金属线中感生出电流。”\*

现在，他可以解释阿拉贡铜盘中的神秘现象了，运动的铜盘在磁铁作用下产生了感生电流，而这个电流又反过来产生磁的作用，从而使磁铁偏转，这是反馈现象的一个早期例子。把这个装置稍加变化，让铜盘在固定的大磁铁两极之间转动，并从铜盘的中心和边缘上分别引出两条导线，这样法拉第于 1831 年 10 月造出了第一台发电机。

法拉第一直在努力思考如何解释这些现象。虽然他仍然不是一个数学家，但他有非凡的图形化思维能力。他提出了一个革命性的想法，电力、磁力，甚至引力都可以用“力线”来描述，它向空间扩展并互相作用，不需要以太或空间充满物中小粒子的互相挤压来传递相互作用。他认为不应该把原子视为什么无法穿透的固体颗粒，而应把它视为力会聚的中心，既不比这多，也不比这少。

力线的概念对我们每一个做过或看过下面的课堂实验的人都不陌生，在一张纸下面放一块磁铁，并向纸上撒铁屑，就可以看到撒下的铁屑确实排列成线状，从磁铁的一极到另一极。但在维多利亚时代的英国，这的确是一个非凡的思想，尤其是当把它应用到所有当时已知的自然力上时。经过长期艰苦的思考，法拉第在皇家学院的两次报告上，提出了自己力线的概念，第一次是 1844 年，第二次是 1846 年。很明显，第二次是临时上阵，那天

\* 从这里可以看出法拉第的思想成为现代科学不可分割的一部分，在以上论述中我们无法避免使用“场”这个词，虽然这个词是后来引入的。今天每个人都都知道“场”，这是常识，正如对那人说，以太是常识。

本来是查尔斯·维特森作报告，但由于怯场，他在最后一刻溜了。法拉第没有办法，只好把这段时间补起来，在总结了他希望维特森讲的东西后，他即席讲了自己力线的思想。

在一个经典的思想实验中，法拉第想象了一个单独位于空间中的太阳，如果在一种魔力的作用下，地球突然被放到了恰当的位置上，这时会发生什么事情呢？法拉第认为即使在把地球放在那里之前，太阳的影响也会以引力线的形式达到这个位置，而地球对太阳引力场的反应是对“地球所在位置处”所存在的力线的反应，而不是对遥远的太阳的反应。对地球而言，力线（场）才是真实的存在。同样，磁和电的力线也都从宇宙空间穿过，这就是我们现在称之为场的东西，它是实实在在的，而物质本身——原子只不过是场会聚的地方。

在他 1846 年的演讲中，法拉第走的更远。他认为光可以解释为电力线的振动。毕竟当时人们已经普遍认识到光是一种波，即振动。法拉第缺乏把自己的思想升华为完善的光理论所需的数学才能，但对下一步应该干什么，他有一个明确的物理图象。正如他在 1846 年演讲发表后几年所说的：“我大胆地认为，辐射是力线的一种高级振动，而正是这种力线把粒子以及物质的质量联系在一起，这一观点努力地排除了以太而保留了振动。”\*

光中所发生的振动有多么高级呢？几年后，另一位 19 世纪物理学家约翰·廷德尔在一本令人兴奋的书中形象的说明了这个问题。他指出，光速十分大，每秒进入你眼睛的光“线”长达三十万千米，而光的波长（如红光）非常小，在这么长的一束红光中大约有 200 兆个波动，所有这些波动都在一秒钟内与你的眼睛

\* 出自迈克尔·法拉第，《电学实验研究》，第二卷，451 页。

相互作用而产生视觉信号。<sup>\*</sup>

法拉第对光的本性的个人直觉于 20 年后被麦克斯韦证实。法拉第去世之前三年，即 1864 年，麦克斯韦发表了最终描述电场和磁场的四个方程。

## ◆ 颜色的魔术

麦克斯韦的背景与法拉第差别很大。他是牛顿和爱因斯坦之间最伟大的理论物理学家，他出身于 18 世纪苏格兰一个显赫的世家，Penianik 的克拉克家。在 18 世纪，克拉克家和另一个有钱的家族——米德尔拜的麦克斯韦家有两次通婚；吉姆斯的父亲，约翰·克拉克在继承了米德尔拜的庄园时，接受了麦克斯韦的姓氏，这个庄园位于苏格兰西南部的加洛韦，在达尔比蒂附近，是一个 1500 英亩的农场。约翰·克拉克·麦克斯韦是一位律师，但他对科学也有浓厚的兴趣，是爱丁堡皇家学会的会员。因此，吉姆斯不仅有一个安全舒适的家庭环境，并且很早就进入了科学界。

麦克斯韦 1831 年生于爱丁堡，在他出生前，为了让他母亲在怀孕期间得到最好的医疗保证，她父母也一直住在那里。但他生命的头十年是在加洛韦的格仑莱尔屋度过的。当他还是孩子时，他的母亲教他读书，并负责他的早期教育，但他母亲 48 岁时死于癌症，小麦克斯韦当时只有八岁。达尔比蒂当时仍十分闭塞，到 1846 年铁路通到小镇之前，到格拉斯哥要一整天的时间，而在 1837 年格拉斯哥——爱丁堡铁路开通之前，从格拉斯哥到

<sup>\*</sup> Tundall, 《关于光》，63 页；我使用了现代的数字。



爱丁堡需要两天。麦克斯韦也没有亲密的同龄伙伴，而在母亲去世后的两年，他由一位家庭教师负责监管。这位家庭教师满脑子古旧的教育思想，只强调学习拉丁文的重要性。随后麦克斯韦被送到爱丁堡专科学校学习，在城里时住在一位姨母家里，只在放假时才回到格仑莱尔的家里。

这个加洛韦男孩给学校同学留下的第一印象并非是未来的天才。他满口乡下口音，衣着也与城里孩子不同，他的鞋子是由他父亲亲自设计并制作的，缺乏常识而且过分显示技巧。麦克斯韦第一天从学校回到姨母家时，衣服被扯破了，身上青一块、紫一块，并有了一个新外号“蠢货”。这个外号在学校里一直伴随着他，虽然这个外号更多是指他的怪异而不是真正愚蠢。

虽然开始并不理想，但麦克斯韦在学校里过的很好。几年后，他设计了一种用缠绕的绳子画卵形线（而非一些传记作者所说的椭圆）的方法，从而显示了他的数学才能。由于他父亲与爱丁堡科学界的联系，他的这项发现被发表了，成为麦克斯韦的第一篇科学论文，那年他刚十四岁。说实话，这并不是什么了不起的发现，但在少年时代，麦克斯韦便与爱丁堡科学界有了接触。

到 1847 年他 16 岁时（苏格兰当时进大学的通常年龄），进入了爱丁堡大学，在完成了四年学业的前三年后，他去了剑桥，并在 1854 年从数学专业毕业。1856 年，他成了共伯丁·马歇尔学院的自然哲学教授，但当 1860 年学院与国王学院合并成立艾伯丁大学时，两名自然哲学教授将不得不退下一个来。尽管当时麦克斯韦已同马歇尔学院院长的女儿结婚，但由于年轻，麦克斯韦还是丢掉了工作。他到伦敦的国王学院呆了五年，1865 年他父亲去世时，麦克斯韦回到了苏格兰家乡。随后的六年，作为一个农场主和业余科学家，他一直住在家乡，并在这段时间里把自己关于电和磁的工作写成了书。1874 年，经人劝说，他又回到

剑桥成为剑桥大学的第一个实验物理教授和卡迪文许实验室的第一任主任，他对日后卡迪文许实验室成为世界上最优秀的科学中心起到了一些作用。他于 1877 年去世，死时年龄与他母亲去世时的年龄一样，而且是死于同一种病——癌症。

麦克斯韦的兴趣包括了 19 世纪物理学的很多领域，如气体动力学、热力学、土星光环的性质及稳定性、精确估算分子的大小，以及其它方面。但他的创造性工作是关于光和颜色本性的研究。他的第一项惊人发现似乎更像魔术，而不像科学。他说明了如何从黑白图像制作彩色照片；这一方法直到今天仍被应用，其中包括用空间探测器从土星或太阳系深处发回彩色照片。当这些探测器发回土星光环的照片时，它用麦克斯韦发明的彩色照相术，获得了由麦克斯韦解释的环状体系的照片，而信号再用无线电波传回地球，这种无线电波是电磁波的一种，电磁波的性质又是由麦克斯韦解释的（他预测了无线电波）。这一切真像是魔术。

麦克斯韦的彩色照相术基于杨的思想，而色觉与眼睛里的三种感光细胞有关，每一种只对三原色之一，红、黄、蓝敏感（用杨的理论可以解释色盲，色盲就是由于这三种感光细胞的一种或几种出现了问题），麦克斯韦从 1849 年就开始研究不同颜色之间的作用方式了，那时他还是爱丁堡大学的学生，在吉姆士·福布斯的实验室工作，福布斯是学校的自然哲学教授，他在麦克斯韦进入大学前便认识他了。当年麦克斯韦的父亲曾给他看过那篇卵形线的文章，也正是他使这篇文章得已在“爱丁堡皇家学会进展”上发表。福布斯和麦克斯韦在研究中使用的是转动的有色圆盘，一个圆盘被分成很多块，每一块涂上不同的颜色，然后让圆盘转起来，看这些颜色混合后会出现什么现象。

由于严重的疾病，福布斯放弃了实验，而麦克斯韦很快也离开了爱丁堡；但 1854 年，从剑桥毕业后，他又开始了这方面的

实验。他说明了如何用三种原色来合成其它颜色。并发明了一种他称为“颜色盒”的东西，利用它从阳光中分离出三种原色，然后按不同的比率混合，产生其它颜色。

这项工作的真正成功是在 1861 年，当时他在皇家学院投影出了第一张彩色照片，给观众（包括法拉第）留下印象。这张图片是所有的彩色照片和彩色电视机中所使用的方法的始祖。麦克斯韦拿了三张苏格兰呢带子的照片，三张照片分别是加上红、绿、蓝三种滤光镜后所得到的。每一个滤光器都将光变成了特定的颜色。这样每一个底片上都包含了一种特定颜色的光的信息，其中包括光的强度和物体的形状。但每张照片都是黑白的，同一个带子的三张不同的黑白照片，每张上面光的强度和物体形状都有不同的侧重，但都不含有色彩的迹象。

然后，三个底片上的图象被同时投影到一个屏幕上，在仔细调整这些投影图后，使它们完全重合，并对每一个投影图都加上和前面同样的滤光器。这些投影图分别是蓝色、绿色和红色的，由此说明混合后的图像上只有这三种光。而重合后的图像中包含了苏格兰呢带子的所有颜色，这证明在人对颜色的理解中只运用了这三种颜色。

在遥远空间探测器上发生着本质上相同的事情，经过三个滤光器拍摄三张照片，然后通过无线电波将每张照片中的数据（光的强弱和图案形状）传回地球，并在计算机中重新合成。彩色电视用的是同样的原理，电视屏幕上覆盖着三个一组的像素点，三个小点分别可以产生出三原色中某一种颜色的光点。通过给屏幕上每一个像素点提供正确的光强度和颜色分配的信息，从而显示出彩色的图像。

虽然麦克斯韦在皇家学院的演示是成功的，在场的人对他们所看到的都没有产生怀疑，但这里面要更多的感谢一种魔力。很

多年后，摄影家发现，麦克斯韦在演示中所用底片上的化学物质对红光没有反应，但为什么他当时获得了正确的结果呢？这个谜直到 20 世纪 60 年代才被美国柯达实验室的研究人员揭开。原来麦克斯韦所用的苏格兰呢带子同时反射紫外光（人眼看不到），而巧合的是他所用的红色滤光片刚好能够使紫外光通过。在麦克斯韦的实验中，加红色滤光片的底片上产生的图样实际是紫外光造成的，感谢这种双重的巧合，它所产生的图样与红光在对红色敏感的底片上产生的图案是一样的。

麦克斯韦用过的那些原始底片仍被保存在剑桥，1961 年，用这些底片再现了当年皇家学院的证明，这已经是一百年之后的事了。虽然人们已经知道图像的“红”色部分是侥幸获得的，但它仍然再现了苏格兰呢带子的彩色图像。至少在这件事上，麦克斯韦显示了他的魔力，这不仅在于用黑白照片和红、蓝、绿三种光制做出了彩色的图像，还在于他从部分错误的原因中得出了正确的结论。当然，在他对科学的最大贡献中，他当然是从正确的原理得到了正确的结论，但这一结论却使下一代科学家大伤脑筋。

## ◆ 惊人的麦克斯韦方程组

麦克斯韦 1854 年刚从剑桥大学毕业后就开始了电和磁的研究。在此之前，威廉·汤普生（1829 ~ 1907 年，于 1892 年成为开尔文勋爵）找到了固定体中的热流动与空间中电力模式之间的一种对应关系。这引起了麦克斯韦极大的兴趣，开始寻找这一类的其他对应，并在一系列信件中与汤普生反复交换想法。在 19 世纪 50 年代中期，他第一次发表了电和磁方面的工作，发展了法拉第的力线和不可压流体的“流线”之间的对应。

虽然描述电的方程与描述诸如固体中的热传导或流体中的流动的方程相类似，但麦克斯韦认为，这一事实并不意味着电和以上这些事物是类似的。这种类似只是数学上的，“关系上的类似而非事物本身的类似”。\* 虽然同一类型的方程也描述了热的运动 and 水的流动，但这并不意味着电“是”水，正如水不“是”热一样。

在随后的 10 年里，麦克斯韦扩展了电和水流之间的类比。他发展了一套现在看起来有些不切实际的物理图像：在实体物体之间充满了一种流体（以太），在这种流体中会产生一种漩涡状的转动，电力和磁力通过这种漩涡相互作用。从某种意义上讲这是从法拉第场观象的一次退步。在场的观念中不需要以太，力本身——也就是场才是本质。但麦克斯韦导出的方程要比他这些年所发展的物理图像重要的多。正如水和热的问题中显示的，同样的数学方程可以描述不同的物理系统；而无论物理图像如何，麦克斯韦的方程组确实能描述电荷和磁体之间力的相互作用——只要涡旋媒体的性质恰当的选择。

想象力的下一个飞跃是考虑当这种涡旋媒体被挤压或拉伸（如果它是弹性的）时会发生什么呢？很明显，会有波在这种媒体中传播，而波的传播速度则取决于媒体本身的性质。1862 年麦克斯韦发现，如果这样选取媒体的性质，使它能够正确的描述电磁力，则在这种媒体中，波将以光速传播，麦克斯韦对自己的这一发现感到十分兴奋，在同年发表的文章中，这一心情可从下面的文字中看出来，文中斜体是麦克斯韦自己加的：“我们几乎不可避免的得到以下结论，是同一种媒体导致了电磁现象和光在

\* 引自埃沃里特，《詹姆斯·克拉克·麦克斯韦》，88 页。

其中的波动。”\*

为了简化电磁现象和光行为的数学描述，还有很多事情要做。麦克斯韦发现，他可以完全放弃涡旋波理论的概念，而代之以“一种电磁场的动力学理论”来解释所有已知的电磁现象，以上引号中就是 1864 年那篇文章的题目。这一理论将所有对电和磁的讨论归结为四个方程，我们现在称其为麦克斯韦方程组。如果你想知道两个一定大小、一定间距的电荷之间的相互作用，你可以解出麦克斯韦方程组来得到结果。如果你想知道磁铁的特定运动会产生多强的电流，你也可以从麦克斯韦方程组中找到答案。任何与电和磁有关的问题（除了一些量子效应，这将于下一章讨论）都可以用麦克斯韦方程组解决，他代表了从牛顿时代以来最大的科学进步。而方程组中包含了一个数，是一个常数，记为  $c$ ，对应于电磁波运动的速度。

$c$  的数值可以通过测量静止的或在金属线中运动的电荷的电磁性质而定出来。它实际上完全是通过对电和磁的研究而得到的。正如麦克斯韦所说的“在实验中光的惟一作用是使我们能看见仪器”，但从实验中所得到的恰好是光速：

“这一速度同光速如此接近，所以我们完全有理由认为光（包括热辐射，及其它可能存在的辐射）是一种电磁扰动，这种扰动按照电磁定律以波的形式在电磁场中传播。”\*\*

\* 《关于物理的力线》，引自埃沃里特的《吉布斯·克拉克·麦克斯韦》，99 页。  
所有对麦克斯韦 1864 年论文的引用都出自拜厄雷恩的《从牛顿到爱因斯坦》，122 页。

麦克斯韦预见到除了光以外还有其它形式的电磁波——热辐射，即我们现在所说的红外辐射，以及“其它辐射”，即我们现在所知道的“无线电波”。存在其它形式电磁辐射的预言在 19 世纪 80 年代被证实。当时赫恩里希·赫兹用垂直电线中交替变化的电流产生了长波辐射，并测定了它的速度。它们确实以光速传播，正如麦克斯韦所预言的那样，而且与光一样，在适当的实验装置中会出现折射、反射和衍射。在麦克斯韦方程组的现代解释中，以太和漩涡都被舍弃了，代替为法拉第力线的实在性，即电磁场。当然这只不过是现代的主流观念而已；对电子而言，什么是“实在”，我们的想法并不比麦克斯韦、法拉第或任何什么人更好一些。场理论的好处在于它的简单性，以及它给出了数学描述形式的一个清晰的图像。但模型只不过是想象力的一种补充，帮助我们直观的计算或描述物理过程。“真实”在于数学方程本身，无论它描述的是电磁波、热流动或是水的流动。只要方程能正确的告诉我们当系统以某种方式被扰动时，它会产生什么样的变化，则其中力是如何相互作用的无关紧要。

但绝大多数人仍然需要模型和类比来想象所发生的事情。要想在头脑中想象光的运动，最简单的办法是想象一根绳子上的波动。记住，运动的磁场会产生电场，而运动的电场会产生磁场。想象两个同步传播的波，看起来就像在绳子一端振动时，在绳子上所产生的波动。假设电的波动是在竖直方向上，沿绳子上下运动，则磁的运动是侧着的，沿左右运动，与电的振方向垂直，则在绳子上的任意一点，当波动经过时，电场的强度不断变化，而变化的电场产生了变化的磁场。所以在绳子上的一点，磁场也在不停的变化，而变化的磁场又产生变化的电场。对一束光而言，就是在光源所发出的能量驱动下，这两个变化的场，每一个都能引发另一个，从而同步前进。

当然，这种清晰的图像在 1864 年时还远远没有建立起来。直到 1878 年，在为《大不列颠百科全书》写的文章中，麦克斯韦仍坚持以太的概念：“不论在以太的构成问题上我们会遇到什么样的困难，但毫无疑问的，在行星间或星际的空间中必定充满了某种物质。”\*

麦克斯韦的理论在他去世前已经受到了广泛的支持，但是直到一个年代后，通过对无线电波的研究才使它成为光的理论。敲响以太丧钟的实验在同一年代进行（部分是受到了 1878 年《大不列颠百科全书》中那篇文章的激励）。这一实验的意义直到 20 世纪初期才被认识到。向世界解释常数  $c$  的真正意义，并认识到以上实验的深远影响的人在 1879 年 11 月麦克斯韦死时还不到八个月，他的名字是阿尔伯特·爱因斯坦，他的登场是现代物理学的一个重大信号。

\* 参见查琼克，《抓住光》，146 页。



## 第 二 章

# 现 代

艾萨克·牛顿知道运动的相对性，19 世纪的物理学家也知道运动的相对性。月亮在它的轨道上相对于地球运动，地球相对于太阳运动。如果你驾驶着汽车以每小时 50 千米的速度沿着一条直线的道路行驶并超过我，而我骑着自行车以每小时 15 千米的速度沿着同样的方向行驶，那么你相对于我是以每小时 35 千米的速度行驶。当麦克斯韦方程给出光速的精确值时，物理学家很自然地设计这意味着光相对于以太的速度，而以太是认为传递光的物质。由于地球以近似的圆形轨道绕着太阳运动，因而地球不能够总是以恒定的速度相对于以太运动。某些时候它朝着一个方向运动，六个月后，它处在轨道的另一侧，以相反的方向运动。结合牛顿的运动相对性思想和光作为电磁波在以太中传播的思想很自然地导致下述结论：光相对于地球的运动速度在一年中不同的时间里是不同的。

某些天文学家在研究在一年的不同时间里来自恒星和行星的光的过程中曾试图探测这个差别，但没有成功。但是也存在着以

地球为基础的实验来测量这个效应。如果一束光沿着与地球的运动方向相同的方向传播，光应该超过地球，因此，相对于我们的测量仪器，光是以略微慢的速度传播。但是，如果光沿着与地球的运动方向相垂直的方向穿过地球，那么测量的光速应该与由麦克斯韦方程所确定的速度  $c$  一致。

当然，地球运动的影响比起光的速度是很小的。光以每秒 300000 千米（以整数计）的速度传播，而地球的轨道运动速度仅仅每秒 30 千米以下（以整数计），即仅为光速的 0.01%。麦克斯韦在《大不列颠百科全书》关于以太的一篇文章中指出怎样利用光本身的测量来测量地球相对于以太的运动速度。原则上，有可能把一束光分成两束，再把两束光的每一束送到一对反射镜中，在那里光作来回反射。其中一束光以与地球运动方向相同的方向传播，而另一束光在其一对反射镜中以垂直于地球轨道运动方向的方向传播。然后把两束光重叠起来并使其干涉，就像杨氏双缝干涉实验中的光那样，这两束光相对于地球应该有略微不同的速度。因此，只要实验上认真的调试它们应具有相同的传播路程，二者不再同步，从而产生干涉条纹。干涉条纹的间距将精确地表明地球相对于以太的运动速度。但是，麦克斯韦最后总结道，这个效应是如此的小以致于不可能探测到它。然而，这个挑战几乎随后即由一位年轻的美国研究者所接受。

## ◆ 以太之死

阿尔伯特·迈克耳逊实际上是 1852 年出生于德国；但在他还是个孩子的时候就全家移居美国。他于 1873 年从安纳波利斯的美国海军科学院毕业，在被科学院任命为教师位置之前在海上呆

了两年。作为物理和化学教师，他的任务之一便是向科学院的海军军官学员演示光速是怎样测量的。由于对当时的实验结果不满意，他便着手改进这个实验。为此，他提出了一个更精确的实验。他在实验中所提出的技巧意味着他已处于很好地接受麦克斯韦在《大不列颠百科全书》的文章中所提出的挑战的位置。他利用干涉的办法测量地球通过以太的运动，这导致了他用毕生的时间发展更好的干涉，他并利用它做更进一步精确的测量。

迈克耳逊用的测量光速的方法是基于从旋转镜上反射的光束。这个技术是由法国人吉思·傅科开创的。他生活于 1819 年至 1868 年。他发明了陀螺仪，利用他著名的摆演示了地球的自转。他的光速测量涉及光束从一个快速旋转的平面镜上反射，然后反射的光束被第二个镜子反射后再转向第一个平面镜。当光束从第一个镜子到达第二个镜子，再从第二个镜子到达第一个镜子，这时第一个镜子移动了一点位置。由于镜子的旋转，光束反射的角度反映了在两个镜子之间的来回路程上光速传播所需要的时间。

傅科利用这个技术于 1850 年第一次演示了光在水中传播速度小于在空气中的速度，这证明了光以波的形式传播。在 1862 年，他大大改善了这个技术，并测量了光速为每秒 298000 千米，这比现在最精确的数值仅差 1%。

迈克耳逊通过增加更多的镜子和延长光束传播的距离对这个技术作了进一步的改进。他使用一个旋转的八面棱镜（以及后来超过八个面的棱镜）反射光束。当一个棱镜以已知的速度旋转时，八个面中每一个面以已知精确的时间间隔短暂地处于使光束反射的位置上。通过改变棱镜速度便可得到适当的反射，使棱镜一个面反射的光束处于向外传播的路程上，而棱镜的另一面处于光束向回传播的位置上。通过这个办法，迈克耳逊测得了光在其路程上所花的时间。

在 1926 年当迈克耳逊 73 岁时，他做了最后一次这样的实验，光传播的路程是加州两座山顶之间的 70 千米长的来回距离。这一次迈克耳逊得到的光速是每秒  $299796 \pm 4$  千米。在实验误差范围内，这个值与现在所接受的值，每秒 299792.5 千米很吻合。当问他为什么以这么高龄还费心去精确测量光速  $c$  时，他回答道“因为好玩。”\* 迈克耳逊逝世于 1931 年，终年 79 岁，那时他还开心地要对光速作更精确地测量。

在 19 世纪 80 年代初，迈克耳逊和他的同事爱德华·莫雷根据光谱红端纯光的波长也测量了在巴黎的标准米的长度。他们走在了他们的时代之前，因为在 1960 年，本质上是同样的技术被官方采纳为依据光的特性来定义米的长度。由于他在这方面的开创性工作，他的光速测量以及他在构造精密光学仪器方面的技能，迈克耳逊成了第一个获得诺贝尔奖的美国人，他于 1907 年获得诺贝尔物理奖。然后，他的名字更是由于他与莫雷于 19 世纪 80 年代后五年所做的实验而被今天所记住。

1880 年，迈克耳逊离开了安纳波利斯，据说是做短暂的学术访问，前往欧洲，于柏林、海德堡和巴黎工作。当然他阅读了麦克斯韦在《大不列颠百科全书》上关于以太的文章，并且于 1881 年当他在柏林赫尔曼·玻尔兹曼实验室工作时，第一个试图做地球相对于以太运动的测量。他使用麦克斯韦所建议的技术和他自己设计的、由亚历山大·格雷厄姆·贝尔提供的资金建立的干涉仪。但是他没有发现所预期的效果。然而，当时无人太在意，因为人们认为地球可能拖动以太运动。因而在地球表面上所做的测量不可能探测到任何“以太漂移”。

迈克耳逊没有再回到安纳波利斯工作，而是辞去了海军部的

\* 引自 Weber 著，《科学先驱者》第 33 页。

工作，于 1882 年去了在俄亥俄州克利夫兰的凯斯应用科学学校作物理学教授。在那里他首先做的事情之一是测量了光速，测得的数值是每秒 186320 英里（即每秒 299845 千米）。这是当时所做的最精确的测量，这个纪录保持了 10 年，直到迈克耳逊自己对其做了改进。

1885 年，德国物理学家亨德里克·洛伦兹指出当地球穿过以太时，以太拖动效应不起作用，并且天文学测量与光相对于以太以固定速度传播的思想是自相矛盾的。这促使了迈克耳逊与爱德华·莫雷合作。莫雷当时已成为西部瑞泽伍大学（与凯斯合并）的化学教授。

与迈克耳逊一样，莫雷（1838 ~ 1923 年）把毕生献给精确测量的事业，这包括空气中氧含量、氧原子的重量等。把他的技术与迈克耳逊结合，他俩建立了一个改进的干涉仪实验，并试图重新测量地球穿过以太的运动。1887 年，他们证实了迈克耳逊原来的实验结果，其精确度达到除了仪器不够灵敏而探测不到它之外没有任何余地希望能够发生什么事。根本不存在任何地球相对于以太运动的证据，或换一种说法，不管光相对于地球以何种方式运动其速度是完全一致的。

这是怎么回事呢？

## ◆ 走向狭义相对论

经考虑后，我们也可以说没有以太存在的证据。因为当你琢磨时，你会发现维多利亚时代所相信的那种以太必须具有非常奇特的性质组合。一方面，为了使光以如此快的速度穿过它，它必须相对坚硬。物质越硬通过物质的振动传播速度越快，例如声音

在钢棒中的传播速度大于在空气中的速度。但是，在空气中声速仅为每秒 344 米，而甚至在钢中声速也不过是每秒 5000 米。设想一下一种物质如此坚硬，以至于振动以每秒 300000 千米的速度穿过它，你会对以太的一个关键性质有所感觉吗？

另一方面，以太必须非常稀薄。毕竟，地球在以太中运动时似乎不受阻碍——地球在其轨道上的运动没有被以太的拖曳而变慢。另外，为了传输光，以太被认为无处不在，即使在空气本身的原子和分子之间也应存在。每次你迈步时你都会穿过以太，你的肺也在吸进以太，除了把光从一个地方传播到另一个地方之外，对你不会产生任何影响。

即使没有迈克耳逊和莫雷的工作，或许不久 19 世纪的科学家也会决定以太的概念应该完全放弃。由法拉第提出的另一个可选择的建议，即电场和磁场能够穿过真空，在几十年之后甚至在麦克斯韦方程表明变化的电场和磁场能够以电磁波的形式联合地传播之后仍没有被完全地接受。但是这个时刻即将到来。

物理学家对世界的看法如何产生显著的改变的首要迹象，是要求解释继迈克耳逊和莫雷于 1887 年所报道的确定性实验结果之后光的特性。于 1851 年出生于都柏林的爱尔兰物理学家乔治·斐兹杰惹当时已在科学界有一定的声望，他曾准确地预言了振荡的电流能够产生我们现在所熟知的无线电波，这给亨里奇·赫兹指明了研究方向。于 1889 年他提出了一个对迈克耳逊 - 莫雷实验结果的解释。不管光相对于地球以什么方式运动，实验上没有测量到光速任何变化的原因是由于整个实验装置（和地球本身）在运动的方向上收缩。基于这个图像，问题得到了解决——光相对于地球的速度“确实”依赖于地球穿过以太的运动，但是实验仪器收缩的大小正好满足光速仍然是  $c$  的错觉。

这不是一个完全离奇的想法。物理学家们已经知道——的确

麦克斯韦已经指出——两个运动电荷之间的作用力依赖于它们的运动方式。一个较强的力能够把物体拉得更紧，而斐兹杰惹正在指出的是如果分子和原子在运动，那么使它们结合在一起的力变强（眼下，隐含的假设仍是相对于以太的运动），因而把它们拉得更紧并使由它们组成的任何东西收缩。

同样的想法也由亨德里克·洛伦兹于 19 世纪 90 年代独立地提出。我总觉得有一点不公平的是，现在称为洛伦兹 - 斐兹杰惹收缩，而不是斐兹杰惹 - 洛伦兹收缩。生活于 1853 年至 1928 年并于 1902 年由于在电磁学方面的贡献获得诺贝尔物理学奖的洛伦兹的确把这个想法比斐兹杰惹向前推进了一些，并于 1904 年（即斐兹杰惹逝世后第三年）建立了一组被称为洛伦兹变换的方程。这组方程描述了不仅物体的长度而且它的其它性质相对于不同运动速度的观察者是如何“变换的”。

实际上，洛伦兹所提出的变换方程在教学上描述了由不同的观察者所看到的电磁场行为，这组变换方程把观察者的相对运动并入到麦克斯韦方程中。一年以后，阿尔伯特·爱因斯坦指出这组同样的变换方程也适合于力学系统，给出了不仅运动物体的长度而且它的时间、速度，甚至质量对不同运动速度的观察者看来都是不同的。然而，奇怪的是，尽管爱因斯坦利用了洛伦兹的电磁方面的工作作为起点，当他在建立他的相对论理论时他却没有受迈克耳逊——莫雷实验所表明的光速是不变的证据影响。在他逝世的前一年，即 1954 年，当问及这个问题时，爱因斯坦说实验“不是一个重要的影响。我甚至不记得在我写这个题目的第一篇论文时（1905 年）我是否知道它”<sup>\*</sup> 那么，是什么促使他沿着使物理学在 20 世纪头十年引起重大革命的路线思考呢？

<sup>\*</sup> 引自 Weber 著《科学先驱者》第 33 页。

## ◆ 爱因斯坦的洞察

1905年，爱因斯坦26岁。他已于1900年在苏黎世工学院毕业，并从1902年起一直在位于波恩的瑞士专利局做技术专家的工作，负责评估新发明的技术优点（或其它方面）。那时，他想以科学为生涯的抱负似乎被他没有完全认真地接受苏黎世工学院所提供的传统教育所破灭。尽管在最后的结业考试中，他成绩优异。但是他有着懒惰的名声，还得罪了几位有可能给他找到一个位置的教授。然而，在专利局的工作是轻松的，这使他有时间建立他的物理思想——使他有足够的时间发表了几篇科学论文，并且于引起狭义相对论突破的那些年里完成了博士论文。

爱因斯坦的生活经历及随后的一系列成就需要（并且已经有了\*）几本书来介绍。这里我想集中介绍狭义相对论，它告诉我们光的本质。爱因斯坦的杰出天赋是他对什么是一个问题的关键的物理洞察力。尽管他的数学比大多数人都高明，但是数学从来不是他的强项，而他对物理却有着极强的感受力。引导他走向狭义相对论的洞察力是基于他对麦克斯韦方程的实质内容的超强的物理直觉。他为一个问题而苦思冥想，如果能够骑在一束光上，并以光的速度运动，那么将会发生什么样的情况呢？

麦克斯韦方程的核心是变化的电场产生波的（变化的）磁场部分，变化的磁场产生波的（变化的）电场部分。但是如果你以与波相同的速度运动，那么从你的角度来观察，波将根本不“波动”。它是静止的，就像大海里的一个波结成冰的情况。麦克斯

\* 我与迈克尔·怀特合著的有关爱因斯坦工作的书列在了参考书目中。



韦方程相当清楚地告诉我们（当然，实验也表明）一个静止的磁场不能够产生一个电场，同样一个静止的电场也不能够产生磁场。这就根本不存在波动，甚至是一个冻结的波也不可能。

再一次，我们把问题回到了运动的相对性。尽管牛顿在涉及人在地球上运动、鸟儿在天空中飞翔，或是航船在大海中航行等诸多问题的时候，意识到了运动的相对性；他也想到必然有一个最终的参照系，即一个静止的通用基准，相对于它所有的运动就能够被测量。以太的概念正适合这种想法，所有的运动都可能用以太做基准来测量。牛顿还相信存在一个绝对的时间基准，即一种上帝的时钟，它为所有的人以相同的速率永不停息地向前走。但是，这些似乎合情合理的想法，它们却不能与麦克斯韦方程相符合。

爱因斯坦看出根本没有必要去祈求一个优先的参照系。没有必要在宇宙中存在一个静止的标准，相对于它来测量速度。相反，他说所有的运动都是相对的，这意味着没有人有资格说他是静止的，并且相对于他自己来测量所有的运动。严格地说，这种运动的相对性仅适合于相对于另一个观察者作匀速运动的观察者，也就是说，以恒定的速度作直线运动。在一个加速参照系中的任何人可以说他由于自己感觉到的力的作用而运动。例如，当一个快速的电梯启动和停止时，你的重量似乎在变化；当一辆高速行驶的汽车在转弯时，你被抛向车厢的一侧。正是这个限制给出了理论的名称是“狭义的”。爱因斯坦的广义相对论把这个思想扩充到包含加速运动、沿着弯曲路径的运动，以及重力的情况。幸运的是，对于本书所做的讨论我们不需要广义相对论。

就构成一束光的电磁波而言，它们不知道或者说不关心波源正在运动的速度；一旦它们从波源发出且传播，它们就以由麦克斯韦方程所确定的速度  $c$  在空间传播着。

如果所有的作匀速运动的观察者（用物理术语表达为所有惯性的观察者）有资格说他们是静止的，所有的运动是相对于他们而测量的，那么，就应推断出他们必然会发现物理定律是相同的。如果我在以相对于地球来说四分之三光速进行运动的宇宙飞船中做一个实验，那么，我找到的“答案”一定与你在你的以相对于地球二分之一光速运动的宇宙飞船中所得到的“答案”相同。如果我们得到不同的答案，那么，我们将知道我们中哪一个“确实”在运动，而哪一个是不动的。

因而你必须怎样修正牛顿对现实的描绘，才能够保证所有的惯性观察者得到他们所做的实验的相同答案呢？爱因斯坦通过考虑一个从光源发出的电磁辐射脉冲对不同运动速度的观察者而言会呈现什么情形而找到了答案。在光源的参照系中，光以一个球壳的形状向空间发射。因此对所有的惯性观察者来说，它一定看上去像一个球壳的形状，否则他们就可以知道他们在运动。对所有观察者而言，光看上去以球壳的形状传播的惟一方法是，如果观察者的尺度由于他们相对于光源的运动而缩短，缩短的比例正好是由洛伦兹变换计算得到的洛伦兹 - 斐兹杰惹收缩。然而还应该特别提出的是，速度本身不能按照常识性的牛顿力学思想所适用的方法来叠加。

牛顿力学的普通常识可表述为，例如，如果你看到一艘宇宙飞船以四分之三光速（ $0.75c$ ）飞过，而另一艘向相反的方向也以  $0.75c$  的速度飞行，那么，一艘飞船相对于另一艘的速度必然是  $1.5c$ 。但根据洛伦兹变换，在一艘飞船中的观察者会测得另一艘飞船的速度为  $0.96c$ 。此外，如果一艘飞船中的乘客发出一道闪光，那么两艘飞船中的乘客都会测得那个光脉冲的电磁波的速度为  $c$ ，而不是  $1.75c$ 。实际上，利用洛伦兹变换，没有任何方法能使两个小于  $c$  的速度加起来等于  $c$ ，更不用说大于  $c$  了。

此外，这意味着如果你以小于  $c$  的速度开始运动，并变得越来越快（即一直增加速度），你永远不能够让速度达到  $c$ 。你能够总是比某个选定的参照系运动得越来越快——从  $0.9c$  到  $0.99c$ ，从  $0.99c$  到  $0.999c$ ，等等——但你永远无法达到光速  $c$ （并且当你测量光本身的速度时，相对你自己来说，你得到的答案总是  $c$ ）。

把这一条慢慢地重新写一遍是非常有价值的，因为它是量子神秘最佳解决办法的基本特征之一：

狭义相对论告诉我们，沿着一束光以与光传播速度相同的速度运动是不可能的；相对于某个选定的惯性系，原则上你能够使你的速度尽可能地接近光速，但到达不了光速——但是不论你多么地接近光速，当你测量光束本身的速度时，你总是得到  $c$ 。

关于狭义相对论有许多有趣的含义和影响，这里由于篇幅的限制，我不再作仔细的探讨。正是这个理论告诉我们，例如，质量和能量是通过这个著名的方程  $E = mc^2$  关联起来的；正是这个理论把空间和时间结合成一个整体，即“时空”。但与现在的讨论有关的一件事情是这个理论告诉我们，对一个运动的时钟而言，时间会走得变慢。并不存在上帝给定的适用于所有观察者的绝对时间。

这个时间膨胀效应是由同样的称为洛伦兹 - 斐兹杰惹收缩的洛伦兹变换方程支配的。要想获得一个有关它是如何产生的情况，其方法是根据时空的概念，而不是单独的空间或时间分开来考虑。苏黎世工学院曾是爱因斯坦的老师的赫尔曼·闵可夫斯基于 1908 年提出了这个概念。他说，准确地讲，时间应被看成是第四维，应该把“向前和向后”的时间与“向前和向后”的空间、“向上和向下”的空间以及“向左和向右”的空间建立在相同的基础上。一个关键的差别是时间是以与空间坐标相反的符号进入相关的方程——按惯例，空间是以“+”符号，而时间以

“ $\gamma$ ”符号进入方程，尽管以其它的方式方程照样有效。由此我们得到，当运动使长度收缩时，它使得时间的间隔膨胀。这两种效应是互相匹配的，因而一个运动的物体收缩引起的量的变化正好被时间膨胀引起的量的变化所抵销。

相对论学者把物体描述成具有一种四维的长度，他们称其为广度；无论物体怎样运动，广度总是保持不变。然而，依据于物体如何运动（或观察者相对于物体如何运动），广度可以分解成不同的长度和时间。

在光线底下拿一支铅笔，观察它在地上所形成的影子，你就会观察到与三维空间类似的情况。取决于你如何旋转铅笔的方向，它的影子可以从什么都没有变化到铅笔的实际长度之间的任何长度，尽管铅笔的实际长度一直保持不变。在三维空间中作匀速运动，在数学上等效于在四维时空中物体变换取向，影子长度的变化等效于物体承受的长度收缩变化量，而时间膨胀以相反方向变化，即随着影子的收缩而变长。我们周围的三维世界在本质上是四维时空的一个影子。

这些效应只有当所涉及的速度与光速可以比拟的时候才能呈现出来。最重要的一点是，它们确实呈现出来了，而且准确地按照爱因斯坦的理论所预言的方式呈现出来了。狭义相对论已被大量的实验所证实，而且成功地通过了每一个实验的鉴定。在这里我仅给出一个时间膨胀起作用的经典例证。

地球周围的大气始终受到来自空间的粒子的轰击，这称为宇宙射线。当这些粒子与外层大气的原子相互作用时，经常产生另一种类的粒子簇射，称为  $\mu$  子。这些  $\mu$  子具有很短的寿命。在它们“衰变”成其它类的粒子之前，作为  $\mu$  子它们仅存在几个微秒。尽管它们以接近光速的速度运动，根据日常生活中常识的时间概念，它们并没有足够的时间能够穿过大气层而进入地球表

面。然而，粒子物理学家发现，大多数这些  $\mu$  子确实能够到达地面。对此作出的解释是由于  $\mu$  子相对于地球以相当快的速度运动，对它们来说时间变得很慢。更准确地，狭义相对论指出  $\mu$  子的寿命延长了 9 倍——根据我们的时钟，它们的寿命比它们静止时的寿命长 9 倍。

但是，请记住狭义相对论还指出， $\mu$  子有资格把它们自己看成是静止的。在它们自己的参照系中，在到达地面之前，它们肯定仍然是衰变的吗？根本不是这样！如果  $\mu$  子被看成是静止的，这确实是允许成立的，那么我们必须把地球看成是以接近光速的速度通过  $\mu$  子！从  $\mu$  子的角度来看，这当然引起地球按照由洛伦兹变换计算得到的量收缩。因为涉及的速度是相同的，而且在那些方程中时间和空间是对称的，所以收缩的量应与时间膨胀的量相同，即 9 倍。但是因为方程中时间项前面是负号，因而地球大气层的厚度缩为原来的  $1/9$ 。从  $\mu$  子的观点来看，它们必须要穿过的路程仅为我们所测得的地球大气层厚度的  $1/9$ ，因此，它们有足够的时间在衰变成其它粒子以前，完成这个短暂的行程。

狭义相对论并不仅仅是一个异想天开似的假设，而是经过了牛顿实验验证的理论——它“解释了事情的性质”并“提供了能够用来（成功地）证明那些解释的实验”。

那么，当我们把这个时间膨胀推到极限时，会发生什么情况呢？回到原来爱因斯坦关于光所提出的问题上，对一束光（如果你愿意，或一个光子）来说，或一个骑在一束光上的人来说，宇宙“看来”又会是什么样呢？对于一个光子来说时间又是如何流逝的呢？

首先回答第二个问题——这不是一个问题。洛伦兹变换告诉我们对于一个以光速运动的物体来说，时间是静止的。当然，从一个光子的角度来看，任何其它的东西都以光的速度通过它。在

这些极端条件下，洛伦兹 - 斐兹杰惹收缩把所有物体之间的距离减小为零。你可以说对一个电磁波而言时间是不存在的，因此在其路径上的一切（宇宙中任何地方）无不是同时的；也可以说对一个电磁波而言距离是不存在的，因而它即时地“接触到”宇宙中的任何事物。

这是一个相当重要的思想。但我从未见到它被给予应有的重视。从一个光子的观点来看，它不需要任何时间就能穿过从太阳到地球之间的十亿五千万千米（或穿过整个宇宙），这是由于对一个光子来说这个距离间隔是不存在的这个简单的原因。物理学家似乎忽视了这种事物的非凡状态，因为他们认为任何实在的物体都不能够加速到光的速度，因此，没有任何人类（或机械）的观察者能够体验这种奇怪的现象。或许他们只不过是对方程所表述的意思弄得不知所措，以致于没有完全考虑这个含义。尽管如此，我所希望说服你的仍是，从一个光子的角度来看，空间和时间这种奇异的性质能够有助于解决所有量子物理中种种极不寻常的神秘。但是，在我开始向你介绍狭义相对论和量子理论如何相互结合起来，提供了对电磁现象一个最新的描述之前，我们有必要简单地看一下狭义相对论的另一个含义。爱因斯坦的方程告诉我们，通过叠加两个（或多个）小于  $c$  的速度，永远也无法得到一个大于光速的速度。但是，方程并没有说不可能以超过光速的速度运动。

## ◆ 超光速与随时间后退

正如我在前言中所暗示的那样，狭义相对论没有说某种东西在原则上是不可能做超光速运动的。它真正指的是不可能超越光

速“障碍”。如果一个粒子比光运动慢，那么，它必须获得无穷大的能量才能够加速到光的速度。但是，爱因斯坦方程在其描述运动的形式上具有漂亮的对称性，光速恰在中间。方程还指出，如果一个以超光速运动的粒子确实存在，那么，它将总是超光速地运动。在光障碍的另一侧，必须需要无穷大的能量才能把粒子的速度降到光的速度。

由于方程允许超光速粒子的存在，因此，它们被命名为“超快子”(tachyon)，这个名称来自希腊语中意思为“快速的”一词（少数物理学家略带些虚情假意地说普通的、比光速慢的粒子也应有一个名字。由于它们比超快子“慢”，因而被命名为慢子）。如果超快子确实存在，那么它们生活在一个非常奇异的世界里，在那里我们已知的物理定律都以其“镜像”的形式存在。方程相对于光速的对称性意味着这个临界的速度，在某种意义上来说，似乎把粒子放在它的两侧。它就像一个无穷长且无穷高的山脊；在山脊的一侧，如果你听任粒子们自行其事，那么，它们沿着斜坡滚向较慢的速度；但在斜坡的另一侧，除非给粒子施加能量，否则它们就会向下滚向更快的速度。由于从我们这一侧来看，随着你向光束的接近，时间走得越来越慢，在光速的时候时间达到静止，因而在山脊的另一侧当你发现时间慢慢地向后走，并且随着超快子沿着山脊下降，它的速度变得越来越快——即随着超快子的继续偏离光速——时间向后走得也越来越快时，你不应该感到惊讶。

随着一个超快子能量的失去，它会在空间和（向后的）时间上走得越来越快。因而，在一个粒子相互作用中（或许当一束宇宙射线与地球的大气相互作用时）产生的任意超快子的命运是在一个极短的瞬间内辐射掉所有的能量，并加速到一个相当惊人的速度，极其迅速地跑到宇宙的另一边。

像这样的实体真实存在的可能性几乎是微乎其微的。但是，即使有最微小的可能性来发现像这样激动人心的东西，也是值得我们花一点精力的。这就像买彩票，一张彩票只有赢得大奖的一个极小的可能性，但你会认为为了大奖的结果，这仍然是值得的。因此，一些物理学家确实已经在宇宙线簇射中寻找超快子的痕迹（这确实代表了一个小小的“赌注”，事实上，这是由于探测器已经建成，并且正在用于更常规的工作中）。按照逻辑，一个超快子的“标记”是刚好在来自空间的一个粒子撞击地球大气层的顶部产生一束象  $\mu$  子的粒子簇线之前，在地球表面上一个宇宙线探测器所记录的一个事件。在这个事件中所产生的任何超快子将沿着它的轨迹随时间向后地传向探测器。

不幸的是，对科幻小说爱好者（对物理学家们来说，如果他们能捕到一个超快子，他们肯定能获得诺贝尔奖）来说，从这些实验中得不出任何好的证据表明超快子确实存在。超快子概念的重要性仍然是非常明白的，因为它表示了相对论方程是如何不排斥随时间向后传播的实体的可能性。没有人提出实际粒子——超快子——是在聪明的观察者打开宇宙飞船的门，并注意到一只猫是活的还是死的的时候产生的，然后这些粒子随时间向后运动，使“原来的”电子波函数坍陷（除去其它任何事情之外，产生粒子，甚至是超快子，也需要以  $mc^2$  形式的能量）。但是，如果物理定律允许任何类型的随时间向后的交流，我们肯定也倾向于把我们的思想扩充到考虑在飞船中生活的猫在这个方向上会发生什么情况，以及考虑超距离作用的可能性。

正如我在《寻找时间的边缘》一书中清楚地说明的那样，实际上物理定律（包括广义相对论中的那些定律，不仅仅是狭义相对论）中没有任何定律禁止时间行进。它可能是相当困难，也相当难以理解的，即与我们的常识相违背。但是，它没有被物理定



律所禁止；我们对常识的概念已经被由相对论和量子理论所描述过的概念所打碎，而这两个理论都是由牛顿能够赞同的实验所支持的。

我在这里不再对这一点作太详尽的阐述。把它好好地收藏在你的头脑中。这样在本书的最后，有关一些我必须谈的事情，对你来说就不会是来的那么突然。现在，让我们回到光本身，特别是回到电磁学与量子物理学的联系上。

## ◆ 进入光子世界

直到 19 世纪末，光是一种波的概念已经牢固地建立起来了，以致于提出光的似乎像粒子的行为就几乎成了左道邪说。然而结果表明，这正是解释光的行为所必须提出的思想。直到 20 世纪 20 年代，物理学家才（在他们已经让步的范围内）让步于光子的概念和波粒二象性。

第一步是由德国老派物理学家马克斯·普朗克迈出的。他出生于 1858 年，到 1892 年已成为柏林的理论物理研究所的物理学教授。在 19 世纪 90 年代后半期，普朗克做了很大的努力去解释电磁辐射，包括光从热物体辐射的行为。与当时其他的物理学家一样，他面临一个巨大的难题。按照波行为的经典定律（当应用于吉它弦的振动或一个池塘表面的波纹时，这些定律与实际情况符合得相当好），带电粒子极易在高频端（相应于短波长）辐射能量。在一个热物体内部（例如一个电灯泡丝）带电粒子（电子）的振动速度取决于它们的温度。因此，根据经典的理论，任何热物体应该在波谱的短波部分（例如紫外线，X 射线等等）辐射极强，而在长波长（可见光、红外线以及无线电波段）辐射很

弱。但是你的电灯泡肯定没有辐射出大量的 X 射线，要不然你也不会活着阅读这些文字。事实上，任何热的物体在其取决于温度的特征波长为中心的波段内辐射最强。太阳是黄色的，是因为它具有大约 6000 的温度，而黄色是这个温度下辐射最强的颜色，一个红热的火钳其温度比太阳低，因而它在较长的波长段，即光谱的红色段，辐射最强。温度与辐射的特征波长之间的关系称为黑体辐射定律。而特征辐射称为黑体辐射（“黑体”是因为同样的法则运用于辐射被一个黑色表面吸收的规律；方程再一次地呈现出对称性）。

经过大量的工作，包括数次闯进黑暗的死胡同，普朗克于 1900 年从困境中想出了一个办法。他意识到，如果热的物体不可能辐射它要辐射的任何数量的电磁能量，那么，黑体辐射的性质就能够得到解释。电磁能量是以有限大小的小份形式辐射的（或吸收的，这取决于你以什么样的形式写方程），他称一小份为量子。波的每一小份能量取决于它的频率（能量实际上等于频率乘上现在称为普朗克常数的那个确定的常量）。它解释了黑体辐射的性质，详细解释如下文：

虽然电子在一个热体中振动的速度取决于温度，但是它们并不都是以完全相同的速度运动。大部分电子以大约某个平均的速度振动。但某些具有稍多一些的能量，因而振动较快；而另一些具有少一些的能量，因而振动较慢。总存在一个围绕平均值的能量分布，就像一个班的学生中总存在一个围绕平均高度的身高分布一样。对于很高的频率，成为一个量子所需要的能量相应变大，并且一个热体中极少数量的带电粒子（振荡电子）将获得足够多的能量而成为一个量子。因此，只有

极少数的短波长量子辐射。在另一个极端，对于低能量的量子而言，存在着很多电子能够做出相应的辐射，但所涉及的能量是如此地微弱，以致于所有长波长的量子加起来也没有很大的能量。但是，在中间处，即在对应于热体温度的频率的一个范围内，存在着大量振荡电子能够成为量子，每一个量子的能量加起来，给出了一个可观的辐射。

1900 年 12 月，普朗克这个发现的公布被世人看作是量子革命的开始。但是，普朗克本人否认光仅能够以量子的形式存在，就像光的小粒子一样。他认为重要的一点是做电磁能量辐射（或吸收）的带电粒子的一些性质在起作用，尽管光本身（以及其它形式的电磁辐射）以经典的波的形式存在。但是，带电粒子的性质阻止它们做除了确定的量以外的辐射或吸收。

尽管当普朗克的计算应用于描述从热物体到电磁辐射均给出了正确的答案，许多人（包括普朗克本人）仍为如何利用这些计算来解释事情的本质而烦恼。直至 1918 年，普朗克才因为这个工作获得了诺贝尔奖（具有讽刺意味的是，虽然他活到 1947 年，但他从来也没有屈服于这个新理论）。这对阿尔伯特·爱因斯坦的理论工作（在 1921 年，他因为这项工作获得了诺贝尔奖）和罗伯特·密立根的实验（他于 1923 年获得诺贝尔奖）起了很大的作用。

在 20 世纪初，只有爱因斯坦有勇气承认普朗克量子的物理现实性。在他 1905 年发表的一篇论文中，爱因斯坦解释了由于光粒子（量子）对金属中电子的作用，电子被光从金属中激发出去的行为（即光电效应），每一个光量子携带一个确定量的能量，这个量仅仅取决于它的频率（颜色）。因此对一特定颜色的纯色

光从金属中激发出去的所有电子携带的能量均相等。在 1899 年实验物理学家们一直在为这个发现而感到困惑，现在终于有了一个解释。爱因斯坦非常了解他的这一发现的重要性。起初，几乎无人认真地对待这个想法，甚至在 1911 年一次名为《第一届解释会议》的科学会议上，爱因斯坦告诉他的同行们“我认为这个思想是暂时的，因为它似乎与已经为实验所证实的波动理论的结论不相符。”\* 问题在于甚至连爱因斯坦也仍在用或者……或者……的关系来考虑这个问题。或者光是一个波，或者它是一个粒子。是波的证据必然会排斥掉粒子的可能性；而是粒子的证据也必然排斥是波的可能性。二者不可能都是对的，是这样吗？

密立根生于 1868 年，逝世于 1953 年。当《第一届解释会议》召开时，他正工作于芝加哥大学。他同意这个观点；他认为光可能是由粒子组成的这个提议是无稽之谈，因此，他着手对光电效应进行一系列精确设计的实验，以证明爱因斯坦是错误的。到了 1915 年，实验结果已经证明，事实与他原来的想法相对立。但是，他优异的判断力，使他不得不承认所有的证据表明爱因斯坦是对的，光量子确实是存在。按照这个方法，他第一次测得了普朗克常数的精确测量值；他也以相当高的精度测量了电子的电荷。仍然没有人理解光量子物理现实性的重要性，但是实验的证据不能够被否定，因此，诺贝尔奖的疾风随后与这个由普朗克开始的工作联系上了。1923 年，当密立根获得诺贝尔奖的时候，光量子的概念已经被牢固地建立起来了，但是，直到 1926 年才由在加州伯克利的物理学家吉尔伯特·刘维思给出了“光子”的名称（来自希腊文的光 **photos** 一词）。这个名称紧跟着描述光粒子性质并导致量子力学产生一个新方法的发现之后。

\* 参见 Gribbin 著《寻找薛定谔的猫》第 81 页。

## ◆ 教爱因斯坦数光子的人

当时正工作于东孟加拉湾的达卡大学的印度物理学家萨提恩德拉·纳什·玻色向物理学家们表明一加一未必等于二，这为量子力学和光与物质的理论铺平了道路。1994年是萨提恩德拉·玻色一生的三个周年纪念日。他恰巧生于100年之前的1894年1月1日，在加尔各答出生。在他80岁时，即1974年2月4日逝世。在本世纪20年代初期，他的最伟大的成就是提出了当时构成辐射的量子理论的思想，以及对光量子给出把所有东西连成一个相关整体的数学描述。

在19世纪末，当普朗克把量子化的概念引入到辐射与物质之间相互作用的讨论中时，他为了解释黑体辐射的行为，已经使用了这个概念。尽管阿尔伯特·爱因斯坦于1905年提出光本身必然是量子化的（并且密立根的实验证实了爱因斯坦是正确的），甚至在20年代初期许多物理学家——或许是大多数物理学家——“实际上不相信”光是以粒子的形式存在的。因此，仅在玻色把光的量子理论建立在一个可靠的数学基础上之后的1926年，光粒子才被冠以“光子”的名称，这并不是一种巧合。

普朗克通过把电磁能量（在数学上）分成小份的方法，解决了黑体问题。但是，在这里我特别强调的是，他没有指出这些小份的辐射具有任何物理意义，而是认为热物体内部所发生的情况使热物体只允许以一定大小份额的形式辐射能量。这很像水从水龙头中慢慢滴到一个贮水的池子中的情形。在水龙头后面的管道中，是连续的无固定形状的水，在池子中是一池子无定形的水；但是滴水的水龙头的物理性质只是意味着水只能以一定大小的水

滴形式从水龙头中流出。

就像水从滴水的龙头中流出一样，在普朗克的黑体辐射描述中仅是辐射的发射（或吸收）的机理，涉及一定大小的小份能量。甚至从普朗克本人那里也认为，不存在光或其它形式的电磁辐射，确实仅以小份，或者说是量子的形式存在的说法。在 1931 年写给 R·V·伍德的一封信中，普朗克回忆道“（量子化）纯粹是一个形式上的假设，除了不论任何代价我必须得出一个确定结果之外，我确实没有对它给予太多的考虑。”\* 在本世纪 20 年代早期，几乎每一个人都知道“光量子”能够解释其它理论无法解释的光与物质相互作用的特性，但是几乎没有任何人相信它不仅仅是一个数学上的技巧；他们仍然认为，光“实质上”是一个由麦克斯韦方程描述的波。

但是，有一个例外。在印度，物理学家们把光量子看得很重要。具有开创精神的天体物理学家麦格纳德·撒哈在 1919 年发表在《天体物理学报》上的一篇论文中，利用光量子描述了辐射压力，随后又与玻色合作翻译了一篇爱因斯坦的论文。它是爱因斯坦关于广义相对论的论文的最早英译本之一。这所引起的讨论使玻色意识到需要对普朗克黑体辐射“定律”作一个合适的推导。在这个推导中，必须没有普朗克把量子离散的中质要素与连续波的经典框架连接起来所引起的必然的结果不一致性。他发现只要光粒子满足于与我们已习惯的统计不同的另一种统计，这一点即可做到。

玻色工作的奇特之处在于它一点儿不包含利用波（或者更确切地说，电磁场）来描述电磁辐射。他通过把光子处理或像气体

\* 引自 Dipanker Home 《新科学家》 1994 年 1 月 8 日。

粒子一样充满整个空腔，并且满足与日常世界中使用的统计类型不同的另一种统计规律，得到了普朗克方程。

为了获得对这件事情的了解，一个简单的办法是考虑一对具有同样面值的新硬币。如果你掷两个硬币，你将见到三种不同的结果。两枚都是头像，或都是背面，或者每面各一枚。乍一看，你可能会猜测每一种结果都有相同的可能性——即，例如三分之一的可能性是头像和背面各一枚的组合。但仔细一想，你会发现事实并非如此。

假定你把两枚硬币中的一枚做上某种标记，使得两枚钱币可以区分开（或使用两枚不同面额的硬币），现在很容易看出尽管只有一种方法得到头像—头像的组合，一种方法得到背面—背面的组合，但有两种方法得到头像—背面的组合（想象一下这是“头像—背面”和“背面—头像”）。只要一枚硬币是背面的，另一枚都可以是头像。因此，计算掷两枚硬币的可能结果的正确方法应该是四种可能结果。即头像—头像、背面—背面、头像—背面和背面—头像。任何一种结果的可能性是四分之一，而不是三分之一。由于有两种方法可以得到一枚头像和一枚背面，因此，这种情况的可能性是二分之一，即百分之五十（四分之一加四分之一）。重要的一点是，如果钱币是不可区分的，那么头像—背面这种组合不能够与背面—头像的组合区分开来。

但是，如果粒子确实可以相互区分（这不是因为你把硬币做了标记，而是因为它们自身的禀性），那么，统计结果是不同的。就有掷币实验的四种结果，每一种均有相同的可能性。不必过多地担心细节；重要的是从这个简单的例子中，你可以看出如果粒子是不可以区分的与粒子是可以区分的所呈现的统计结果确是不同的。换句话说，当描述大量粒子在一起时的行为你所必须使用

的统计取决于你要处理的粒子的种类。

玻色发现通过把光子处理成必须按一定方式来计算的粒子，便可推导出普朗克公式。光子是相互无法分辨的（尽管这不是整个的情节，但我不打算在这里对其各种情况作深入的探讨），并且在光子的世界中，光子呈现的统计规律影响着能量在它们之间分配的方式——即在不同的能量状态之间光子的分布。

光子的行为还有其它有趣的性质。它们不是守恒的。例如，每当你按动一下开关打开灯的时候，你就制造了许多的光子。与此同时，它们也从太阳和恒星上以很大的数量奔涌出来。光子始终在被你房间的墙壁、你的眼睛、地球的表面等处吸收。但是，这两个过程并不平衡，而宇宙中光子的数量也始终是变化的。

这一点非常不同于我们习惯中想象的那类粒子，电子的行为。除非在特殊的情况下，电子和它的“反粒子”对，一个正电子，一起产生（或消失），电子是不会产生或消灭的。宇宙中整个的电子数目（为这个目的，一个正电子被计作“负一个”电子）保持不变。

这表明另一种不同的统计规律适用于像电子一类的粒子；为了纪念意大利物理学家厄里克·费米和英国物理学家保罗·狄拉克的工作，这种统计被量子物理学家称为“费米 - 狄拉克”统计。满足现在我们称为玻色 - 爱因斯坦统计的粒子，例如光子，统称为“玻色子”，满足费米 - 狄拉克统计的粒子，例如电子，统称为“费米子”。

为什么称为“玻色 - 爱因斯坦统计”，而不是仅仅“玻色统计”呢？1924年，玻色向《哲学杂志》送了一篇叙述他的发现的文章，但没有收到回音。因此，他在同年6月给爱因斯坦邮寄了一份论文复印件。他请求爱因斯坦阅读一下手稿（用英语写



的)，如果他认为有意义，那么，就请他递交给德国的《物理杂志》上发表。玻色的工作给爱因斯坦留下相当深刻的印象，因此，他把文章译成了德语，签名后投给那个杂志。对于杂志社来说，有爱因斯坦签名的任何文章当然是会受到欢迎的，于是这篇文章按期于 1924 年夏天刊登出来了。

这篇文章的意义是令人敬畏的。玻色只简单地把光子看成是满足某种统计规律，且行为像量子气体的粒子，便直接推得了黑体的电磁辐射方程。在玻色黑体定律的推导过程中没有一丁点儿电磁波的痕迹！爱因斯坦本人接受了新的统计规律的思想，并在他的三篇论文中把这个新思想应用到了其它问题上。这是他对量子理论所做的最后的重大贡献。除去别的以外，在应用这个新思想描述不同条件下（在某些情况下，这个统计适用于守恒的实体）气体的性质时，爱因斯坦指出，就像光的行为（习惯上被看成一个波）可以根据粒子来解释一样，进而，在适当的环境中，分子（“粒子”）行为应该表现得像波。

1924 年末，正当他在仔细地推敲这一发现的重大意义时，他收到了刘易斯·德布罗意的指导教师保罗·朗之万寄来的德布罗意的博士论文复印件。德布罗意作了一个似乎令人难以接受的声称，他认为粒子（例如电子）行为能够像波。朗之万无法确定这是一种天才的举动，还是彻头彻底的疯狂。“我认为”爱因斯坦写道，“它所涉及的不仅仅是一个类推。”德布罗意的工作在这个赞成的力量支持下，被广泛地重视起来，并被厄尔文·薛定谔所采纳。他把它发展成为一个对量子世界的完全描述，即波动力学。他后来说到：“波动力学是统计中产生的”，在 1926 年 4 月他给爱因斯坦的一封信中也说到：“如果不是你的关于玻色气体的第二篇论文把我的注意力转向德布罗意思想的重要性上来，整

个事情不会从现在或者是其它任何时候开始（我指的是就我而言）。”\*

然而，玻色本人在后来的几年里没有参加有关量子理论的激动人心的工作。他沿着自己早期的其它兴趣，即广义相对论，跟随爱因斯坦作统一场论的研究（后来的结果证实这是在死胡同里作的不成熟的摸索）。1955 年爱因斯坦逝世后，这个研究失去了推动力，从而玻色的工作也大多被遗忘了。在他生命的最后 20 年里，他把自己奉献给了科学的普及，教育，以及提高公众对科学的理解等事业中。在晚年，他谈论道：“我实际上已不再在科学里。我像一颗彗星，一颗曾经来临却又永不复返的彗星。”但是，正是这颗彗星闪耀的光芒改变了本世纪 20 年代物理学家思考问题的方法，改变了从那时开始的物理学发展的方法。

在光子被命名的 20 多年以后，物理学家终于提出了一个量子化电磁场的满意理论——这个漫长的等待是值得的，因为他们最终提出的这个理论——称为量子电动力学（简称为 QED）——是迄今为止最成功和最精确的科学理论。它描述了电子与电场辐射如何相互作用，它解释了除了万有引力和原子核性质之外物理世界中的任何事情。它为相当精确的实验所证实。

## ◆ 光子与物质的奇异性

这个标题借用了理查德·费曼的巨著《量子电动力学》的副

• 本章及下一章中的引言摘自狄潘卡·霍姆在 1994 年 1 月 8 日出版的《新科学家》里的文章。

标题。费曼出生于 1918 年，逝世于 1988 年。他是他那个时代最伟大的理论物理学家，对科学作出了许多重要的贡献。既写了畅销的教科书，又写了畅销的自传书籍；他是一位德高望众的老师，到他的晚年他是世界上最著名的科学家（和最著名的科学典范）之一。但是在他的众多成就中，最伟大成就莫过于量子电动力学，他称之为“光与物质的奇异理论”。

量子电动力学是非常重要的，因为电子之间以及电子与电磁辐射之间的相互作用决定了我们周围世界的几乎所有事情。这个世界和我们自己都是由原子组成的，而原子是由被电子云包围的紧凑的中心原子核组成的。电子是原子的可见的“一个侧面”，并且原子和分子的相互作用实际上是电子云之间的相互作用。电子相互作用的方式是通过交换光子。一个电子发射一个光子，以某种方式“后退”，或一个电子吸收一个光子，获得一个“冲力”。当原子相互作用时所发生的任何情形用这些关系都可以解释。

化学中的所有情况都可以用量子物理，特别是量子电动力学来解释；生物的生命取决于原蛋白质和 DNA 等复杂分子的行为，这些也是化学问题，并最终也取决于电子的量子性质。电子以电子云的形式聚积在一个原子的原子核周围的方式，取决于电子的负电荷与原子核中质子的正电荷的相互作用，因而它也由量子电动力学支配着。像涉及原子核自身变化的放射性衰变之类的情况不能够根据量子电动力学来解释，而需要另一个理论。但是，甚至我们对原子核内部发生情况的最新理解，也是基于有意地建立在量子电动力学的成功之上的理论，尽管它不如量子电动力学那样成功，但在它自己的标准上，也是相当成功的。

存在着一些不同的方式来解释量子电动力学是怎样处理问题的，但我喜欢费曼的解释方式。他是依据粒子，即光子和电子，

以及几率波来处理的。几率告诉你在哪里你最有可能找到粒子，但是当你确实找到了它们（像在电子通过双缝干涉的实验中）你就确实会发现它们是粒子的形式。费曼说，在处理光与物质相互作用时，只有三种因素起作用。第一，光子从一个地方到另一个地方的几率。第二，电子从一个地方到另一个地方的几率。第三，电子吸收或发射一个光子的几率。如果你能够计算涉及所有电子和光子的所有事件的几率，那么，你就解决了当电子与光子相互作用时会发生什么样的问题。

对于复杂系统，这将涉及大量的计算，尽管单个的计算可能相当简单。因此，精确的计算只能对涉及几个电子交换几个光子的相对简单的系统进行。尽管如此，这些精确的例子有助于建立适用于比较复杂的情形的较为普遍的近似（这些近似可以仍然相对精确）。

计算中混乱的部分是当我随便地提及“一个光子（或一个电子）从一个地方到另一个地方的几率”时，在你的脑子里猜测的图像几乎肯定地是一个粒子沿着从 **A** 到 **B** 的一条光滑路径运动。但这错了！费曼对量子电动力学发展的关键贡献之一是，他意识到我们必须考虑从 **A** 到 **B** 的所有可能路径。从双缝实验中，我们已经看到半个光子通过实验时似乎知道两个孔，这就好像它沿着两条路径通过实验。但费曼走得更远。他说，一个粒子在从一个地方到达另一个地方的过程中，他考虑到每一条可能的路径。不仅仅只是直线路径，或光滑的弯曲路径，而且是你能够想象的最复杂最崎岖的“路径”。

这个观点一开始好像荒谬可笑；但是费曼提出这个想法的方表明这（几乎）是普通直觉的。在双缝实验中，在狭缝后面的屏幕上任一个特定点处得到一个光点的几率必须是叠加相应于通

过每一个狭缝光的几率来得到。只要我们去考虑光子的粒子性方面，这点就可作常识理解。但是假设在遮挡屏上我们做的不是两个狭缝而是四个狭缝，那么，我们必须叠加四个几率。如果是八个狭缝，我们必须叠加八个几率，等等。如果遮挡屏上开有一百万个狭缝，在原则上，我们通过计算穿过实验的一百万条不同路径的几率后再把它们叠加起来（把它们“积分”起来），仍然能够计算出远处屏幕上任何部分的光的亮度。然后，在遮挡屏上开有比遮挡处更多的狭缝。但是为什么就此而止呢？我们可以设想把遮挡屏分成越来越多的狭缝，直至最后没有遮挡处剩下——即“狭缝”互相重叠起来。费曼意识到，在没有遮挡屏剩下时，我们必须叠加从光源至远处屏幕上那一点每一条可能路径的几率，如果根本不存在遮挡屏，这意味着积分穿过实验的每一条设想的路径的几率。更复杂路径的几率是非常小的，且它们通常在计算中互相抵消。正如费曼通过描述光如何从一个镜子反射时所解释的那样，它们的影响确实存在。

我们在中学时都学过的一个原理是，当光从一个镜面上反射时，它与镜面所形成的入射角与它的出射角大小相等。你可以很容易地检验这一点。即以一个角度看一面镜子，观察是哪一个物体经反射进入你的视线中，这里是在中学或大学中学过的另一个原理的一个例子，即光线是沿着传播时间最短的路线传播。允许光线被反射且不是直接从光源到你的眼睛的事实，这个等角度的反射确实是光线从光源到你眼睛之间最短的总距离，因而是光线到达你眼睛需要时间最短的路径。如果告诉你在光到达你眼睛的路程中，光从物体实际上传向镜面的每部分，且反射是以各种各样不同的角度来自镜面的每一处，然后组合起来构成你所见到的图像，你会对这一切感到惊奇吧。那好，准备好让自己大吃

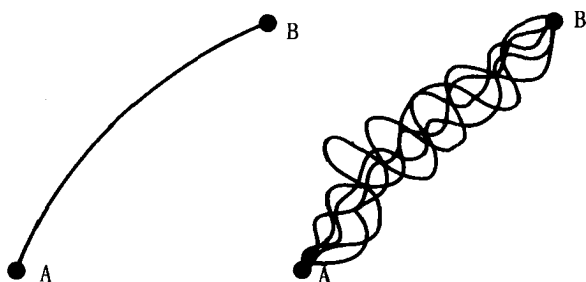


图 7 经典路径与费曼的路径积分

经典物理——艾萨克·牛顿物理——描述一个粒子沿着惟一的一条路径从 A 到达 B；里查德·费曼的量子力学解释叙述我们必须计算从 A 到 B 所有可能路径的交叉点，然后再把它们叠加起来——不是仅仅图中所画出的几条路径，而是实际上每一条可能的路径；这种“历史求和”（求“路径积分”）方法是理解在双缝实验中一个电子如何同时穿过两个孔并与自身干涉的一种方法

一惊吧——根据量子定律，事情正是这样发生的。

在极端情况下，设想光从物体的垂直角度传向镜面，反弹后以较小的角度传进你的眼睛；或者，设想光以掠角射向你面前的镜面，然后以垂直的角度反弹，因而你能够看到它。甚至，设想光离你而去以相反的方向行进至镜子的遥远的边缘，然后以锐角弹回你的眼睛。所有这些情况以及所有其它可能的情况确确实实正在我们身旁发生。我们没有注意到这点的原因是因为接近最短路径的那些路径不仅是更可能的，而且互相加强，使得最短路径以压倒之势的可能性发生。原因是仅仅接近“经典”路径的几率叠加起来而且互相加强。正如费曼所表述的“时间最短的地方也

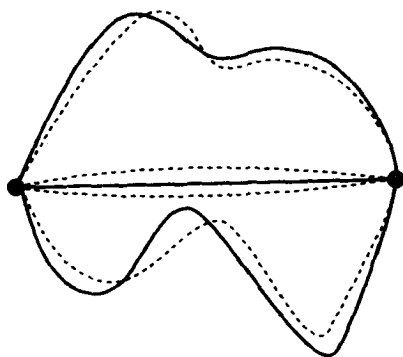


图 8 光传播的理解

费曼的量子力学方法也适用于光；光线实际上不是仅仅沿着直线传播，而是沿着从光源到观察者之间的每一条可能的路径传播的；正好发生的情形是当你把所有“历史”叠加起来时，除了接近一条直线的那些路径外，它们都互相抵销

是附近路径的时间几乎相同的地方，” \* 并且这是几率叠加的地方。在镜面的边缘处，光子为了能到达你的眼睛，以特殊的角度反弹，因此“附近”光子从光源到镜面，再从镜面到你的眼睛所需的时间有较大的差别。由几率计算的方法，这意味着附近路径的几率几乎相互抵消。因此，从常识上来看，仅你本能知道的镜子部分在做反射的时候是实际起作用的。

但是，请稍安勿躁。这并不是故事的结束。有一个简单的实验能够证明反射的光子确实来自镜子的边缘，尽管它们互相抵消。设想除了边缘一小部分以外，整个镜子用一块黑布盖住，因

\* 摘自费曼著《量子电动力学》，第 45 页。

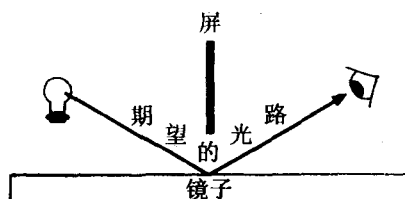


图 9 经典物理学的镜面反射  
经典物理学认为镜面以直线形式反射光线，  
因此入射角总是等于反射角

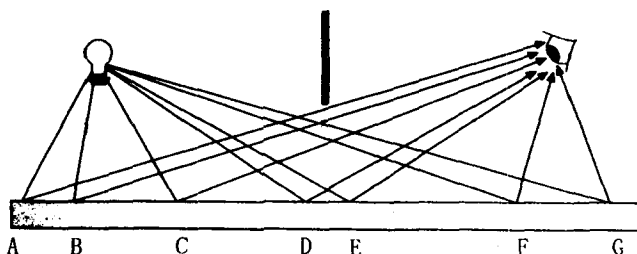


图 10 费曼的解释

费曼发现尽管直线路径在“历史求和”过程中是占优势的，但是所有直线路径都是重要的；光以各种奇异的角度从镜面所有地方反射；但是这一次除了接近经典路径的路径，从镜面临近地带的路径互相抵消了

此，它不能反射光线。现在，如果光线传播向黑布，并以相等的角度反射后到达你的眼睛，那么在光线能到达的地方寻找一个图像是没有用的，因为光被黑布所吸收。你将根本看不到任何图像。然而，有一个技巧能够利用镜子的边缘产生一个图像，即以



“ 错的 ” 角度做反射。

尽管镜子边缘的临近部分的几率波互相抵消，但你仍能找到几率相加的镜子条带。问题仅仅是它们被几率表现完全不同的镜子条带所分隔开来。总的来说，几率被抵消了，但存在着被相反几率条带分开的加强几率条。所有我们必须做的是在几率为“ 错 ” 的地方仔细旋转某些黑布条，剩下一半可见的镜子，但所有的几率互相加强。

需要做加强作用的镜子条带间隔取决于所涉及的光的波长（由于我们依据光子描述光线，这是一个精彩的波粒二象性的例子），因此，如果你想看到一个清晰的图像，最好用单颜色的光（单色光）做这个实验。如果你这样做了，实验是会有效果的。为了得到一个反射图像，你把一面镜子放在错误的地方，我保证你得不到图像。当你用正确的方法盖住镜子的一半（而常识告诉我们这样做看到反射的可能性更小），你便确实地得到了一个反射。

这样一个反射系统称为衍射光栅（因为反射效应也可以根据光波的衍射来解释），并且你可能多次见过这样的衍射效应。具有反射条带的一个“ 光栅 ” 在一个固定距离处能以略微不同的角度反射不同颜色的光，把白光分解开，形成彩虹状的光谱，与当年牛顿用一个棱镜把太阳光分开构成不同颜色的光谱相同。这也就是当你在太阳底下拿着一张光盘形成彩虹图案的原理。按正确的角度（常识认为应当的角度）拿着一张光盘，在它闪耀的镜面，你会看到对灯泡的一般的反射；但当你倾斜一下光盘，你不会见到常识中的反射，见到的依然是由光子在 CD 光盘镜表面上的平行沟槽处的奇异角度反弹所形成的彩虹图案。的确，甚至当你也看到“ 正常 ” 的图像时，通常你也能看到来自 CD 盘“ 错 ” 的部分反射出光的彩色条带。在你自己家里的卧室中你能够见到

量子电动力学在起作用。

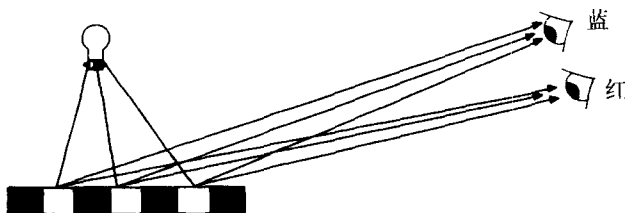


图 11 光栅的分光效果

如果你用黑布盖住镜子的平行条带，实际上你能够见到光以各种奇异的角度反射；这意味着消除了“抵消”的光路径；通过盖住镜子的一半，你却能够得到更多的反射！不同颜色的光从这样一个衍射光栅上以略微不同的角度反射，产生彩虹效应；这个技巧仅对非常窄的镜子和黑布条运用，但是如果你在太阳底下以一个角度拿着一张光盘，你能看到这种效应

在这个例子中，我仍然只谈到光以直线传播，在镜子上以不同的角度反射。而实际上，这一理论的完整表达则考虑到光线从一个地方到另一个地方每一条可能的路径，这包括奇异摇摆的路径。因为计算涉及叠加（积分）所有可能的路径，量子理论的这种方法常被称为“路径积分”（对“历史求和”）。幸运的是，几率叠加的结果似乎总是与直线传播的情况一致。但是，完全的抵消仅发生在偏离“经典”，直线的地方。费曼说：“光实际上不是以直线传播的，它把附近的路径“嗅到”它的周围，它利用一细芯的临近空间。”\*

以类似的描述方法，几率叠加解释了光学中的一切，包括透

\* 见费曼著《量子电动力学》第 54 页。

镜工作原理、光线从空气进入水中时光线的折射，以及光速变慢、双缝实验以及泊松斑，等等。而量子电动力学的成功可以从它准确地描述了光子与电子相互作用规律中更好地表现出来。

## ◆ 量子电动力学的胜利

最简单的相互作用是当一个电子从一个地方到另一个地方的运动过程中，辐射或吸收一个光子，由此在第三个地方终止。光子本身可能在另一条路径上被另一个电子辐射或吸收。或者，它可能是一个光子具有一小块条形磁铁所具有的磁矩。早在 1929 年，量子力学的前驱者之一，保罗·狄拉克提出了一个光子与电子相互作用规律的描述方法。这个方法全面考虑了狭义相对论的要求，但对量子理论的要求没有做相当完整的考虑。在这个描述中，狄拉克实际上计算了一个电子与一个光子的相互作用的几率，并利用这些几率得到一个数，这个数是一个电子与一个磁场相互作用的度量（所涉及的性质称为电子的磁矩）。狄拉克发现这个数的值是 1，（以一定的单位制）。但是实验表明数的大小实际上为 1.00116。

两者差别很小，但却表明这个理论是不完善的。1948 年，工作于哈佛大学的朱利安·施文格发现了一个改进狄拉克计算的方法。很巧的是施文格与费曼于同一年（1918 年）出生于同一座城市（纽约）。施文格意识到当一个电子从一个地方到另一个地方的行进中，没有什么能阻止它辐射自己的一个光子，然后再重新吸收这个光子。这使几率计算变得复杂化，但结果是它使计算得到的电子磁矩略微变大。虽然这还不能与实验测得的值完全

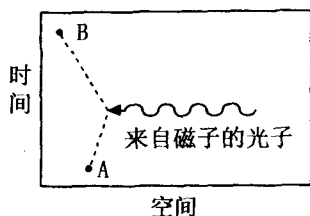


图 12 计算电子磁矩的费曼图

保罗·狄拉克最初的电子磁矩的计算是基于  
涉及一个光子的一个简单相互作用

一致，但这表明，这是朝着正确的方向迈进的一步。

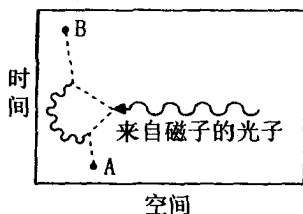


图 13 计算的过程

对电子磁矩更准确的计算，这需要考虑电子辐射一个光子并再吸收它的可能性；

计算的进一步改进需在环中增加越来越多的光子

一旦物理学家们意识到事情是怎么回事，对电子磁矩作更进一步的精确计算就变得很自然，但这涉及到大量艰苦的计算。首先，要考虑一个孤立电子与来自于磁场的光子的相互作用，实际上必须计算出电子先辐射出两个光子，再吸收掉这两个光子的几

率。你必须考虑这种情况下产生的每一种可能的方式，再把它们的几率进行叠加。这样情况就变得相当复杂，以致于需要两年的时间才能计算出所有的几率，还要把它们叠加起来，其结果是理论与实验之间符合得更好了。

到了 80 年代中期，计算已经扩展到包括三个“额外”光子的效应。每一种复杂化的前提都比前一种有更小的可能性，并对计算做更小的修正（每一个复杂化都比前一种需要更加艰苦的计算）。在这个水平上，电子磁矩的理论计算值是 1.00115965246，仅在最后两位数字上有大约 20 的不确定。在同一年代里，实验物理学家改进了他们对磁矩的测量，测得的结果为 1.00115965221，仅在最后一位数字上有大约 4 的不确定。这些数字的精确度相当于把从洛杉矶到纽约的 3000 多英里（大约 5000 多千米）的路程测到一根头发丝宽度的精度。这两个数字之间理论和实验的符合是对量子电动力学精确度的度量——根据实验验证所做预言的标准，它是迄今为止最准确也是最精确的理论。你或许认为它是荒唐的，或许你并不喜欢它。但是你不能否认它是起作用的——世界确实是按照这种方式运行的。用费曼的话说“自然界中几乎所有大量的明显的变化都归因于这三种基本作用的单调的重复变化”：一个光子从一个地方到另一个地方的运动，一个电子从一个地方到另一个地方的运动，以及一个电子与一个光子的相互作用。

尽管这个理论被实验证实得相当好，但它仍包含一些非常奇怪的特性——甚至比我已经透露得还要奇怪。例如，当两个电子通过交换一个光子相互作用时，这正是描述这个过程的一个正确

的方法。从日常观点上来看，这似乎是一个电子辐射一个光子，一小会儿后（或稍长一些时间后）另一个电子吸收这个光子。我们同样可以说是第二个电子在“将来的时候”辐射一个光子，它随时间向后传播，被另一个电子“在过去”吸收。这不是一个很难领会的想法，特别是自从我们了解了对一个光子来说时间是无意义的这个思想以后。这同样适用于电子本身。

如果一个光子具有足够的能量，它就能够把自己转变成一对像电子似的粒子（为达到此目的，光子的能量  $E$  必须大于两个电子的质量  $mc^2$ ）。其中一个粒子是普通的电子；另一个也像电子，具有正电荷而不是负电荷的称为正电子。如前所述，描述这个过程的方程是对称的。当一个电子与一个正电子相遇时，它们逆向这个过程变化，互相湮灭，形成一个能量大的光子。在一个实验中多次观察到的标准情景中，一个从一个地方传播到另一个地方的高能光子能以这种方式转变成一个电子——正电子对。两个粒子沿相反的方向离开，很快正电子遇到另一个电子，迅速湮灭，产生了另一个高能光子。

费曼意识到全部的相互作用可以根据仅仅一个电子的情况来解释。这个电子在它从一个地方到达另一个地方的路径中与一个高能的光子相互作用。这个相互作用发射一个随时间向后传播的电子，直至它与另一个高能的光子相互作用，这使它再“转回来”并随时间向前传播。在每一次相互作用中，似乎涉及三个实体，即一个正电子、一个电子和一个光子。同样，在一条光线在镜子上反弹中似乎也涉及三个实体，即两条呈适当角度并在镜子上某一点相遇的光线以及镜子本身。正如仅有一条光线在空间上反弹回来，因而也仅有一个电子在时间上反弹回来。光子可以作为电子的“时间反射镜”。

在电子随时间向后传播的时间内，在我们看来这好像是一个正电子随时间向前传播（通过随时间向后发射“减去一个负电荷”就像一个传统的二倍的负电荷，并完全等效于增加随时间向前传播的正电荷）。正如电子磁矩计算进行到如此复杂的水平，你甚至也必须考虑像在与电子有关的“额外”光子中这些情况发生的相互作用。

这几乎是我必须告诉你的关于量子电动力学的全部，你可能认为它已经足够复杂了。我要强调的是这些奇怪的含义并不是凭空想出吓唬人的可有可无的额外的东西。这些是在物理学中所具有的最佳理论的一个基本特性，一个使三个人于 1965 年获得诺贝尔奖（费曼、施文格和日本物理学家——朝永振一郎）且是科学皇冠上的明珠的特征。在不摆脱量子电动力学本身的情况下，你无法摆脱像光子、甚至随时间向后传播的电子等奇怪的东西。

说到这些，我也要做个交待。量子电动力学也存在着一个问题。它不是一个非常完善的理论。这个问题基本上涉及一个电子从一个地方到另一个地方的过程中它自身会发生什么。一个单独的电子也能辐射和重新吸收光子，这些暂时的光子也能分解成电子——正电子对，然后互相湮灭产生重新吸收的光子。甚至这些暂时的电子和正电子也能进一步辐射光子，假使它们重新吸收它们，然后继续这个过程。根据量子电动力学，在每一个电子周围存在着这种一层叠一层的复杂的相互作用。问题是所有这些可能的自相互作用引起的无休止地增加几率，因此原子的电荷或质量等简单性质的计算在我们面前爆裂开来。答案以无穷尽的形式存在，这显然是无意义的。

费曼·施文格和朝永振一郎发现了摆脱这种无穷尽的方法。这个技巧称为重整化，实际上它涉及把一个方程的两边用无穷大

相除，得到你想要的答案——你在中学里肯定学过这是不允许的事情。这个技巧就像它做的那样有效。因为从实验中我们确实已经知道我们想要的电子性质的答案。物理学家接受了重整化方法，他们别无选择——这样才能够得出正确的答案，而没有任何其它的理论能够像重整化方法那样做到这一点。因而这三位研究人员向世人表明他们怎样做重整化而获得了诺贝尔奖。但在他辞世的前几年，费曼说“不得不求助于这种阻止我们证明量子电动力学理论是数学上自恰论的戏法……[重整化]是我称之为疯癫的过程。”\*

量子电动力学现在的形式肯定不是它最终的表述，这里仍然存在一些工作有待于下一代理论物理学家们的努力。然而，任何对量子电动力学的改进必须解释——甚至更精确地解释——量子电动力学现在所解释的一切事情，否则它就实际上算不上是改进。这意味着我们仍离不开路径积分，仍离不开在空间运动中“嗅出”附近路径的粒子，也仍离不开能够（完全与物理定律一致地）描述为随时间向后运动的粒子。这给我带来费曼所做的另一个重要的，但极少被报道的发现，一个可能是揭示量子世界神秘的关键的发现。

## ◆ 未来日子的光

实际上，这是费曼对物理学所做出的许多显著的且富有创造性的贡献中的第一个贡献；这个工作做于 1940 年，当时他是在

\* 摘自费曼所著《量子电动力学》，第 128 页。



约翰·惠勒指导下的普林斯顿大学的一个学生。那时困惑量子物理的无穷尽已经是一个非常著名的问题（重整化技术八年以后才被发现），费曼考虑是否可以通过禁戒电子与其本身的相互作用来摆脱它们，很不幸，这个技术并未奏效。

当电子被加速度时，即被推动时，它抵抗推动。其抵抗力大于一个未带电的粒子被推动时所产生的抵抗力。在一根导线中，流动的电流中的电子如果被加速并辐射能量（以无线电波的形式），但它们辐射的能量不及在导线中推动它们所需的能量大。这是电流在导线中作稳定流动时的普通导线电阻之上的一种额外形式的阻力（称为辐射阻尼，因为它与产生辐射的加速度有关），辐射阻尼仅因电子与某种东西相互作用时才出现；由于电子似乎不能与真空相互作用，因此，在 30 年代它是根据电子自身的相互作用来解释，这或多或少的如我已经概述过的形式。

费曼具有一个聪明的想法。没有人曾真正看到过孤立的电子，因为宇宙中存在着无穷多数量的各种各样的粒子（的确，如果有人在那里真正“见到过”它，电子确实不是孤立的！）。他设想宇宙中除了一个电子之外完全是空的，他猜测它是否真的能作电磁辐射。他向惠勒提议在辐射本身能够存在之前，或许你必须至少需要两个电子，一个作辐射，另一个吸收辐射。在一个只含有两个电子的宇宙中，第一个电子能够来回地振动，因而辐射光子，而第二个电子吸收这些光子，由此引起它作振动，产生更多的光子，并传向第一个电子，把它向后推，因而提出了对其原来振动的阻力。

按这简单的形式，这个想法并不起作用。其基本的问题是存在一个时间延迟——在第一个电子“察觉”其振动的任何阻力之前光子必须从第一个电子传向第二个电子，然后再返回。但是，

如我们已经看到的那样，当光子交换时，时间方向没有进入讨论中，回到故事的开头，我们知道，对于光子来说，量子电动力学（1949年还没有发明）不区分随时间向前还是随时间向后。这是合乎逻辑的，因为量子电动力学是一个完全考虑了狭义相对论的相对论理论，而相对论表述，对一个光子而言时间是不存在的。如果一个光子作交换，需要零时间，在光子的“时钟”上不论是 $+0$ 还是 $-0$ 实际都是没有关系的。两个粒子的成功证实了自然界本身不能够区分一个光子随时间向前运动（按我们的观点）和一个光子随时间向后运动。自然界“所知道的”是一个光子作了交换。

虽然量子电动力学至1940年还没有被提出，但惠勒和费曼知道就时间而言，麦克斯韦方程本身是完全对称的。当你求解描述电磁波传播规律的方程时，你总是得到两组解，一组对应于电磁波随时间向前传播，另一组对应于随时间向后传播。借助于事后的分析，这再一次说明如果光本身以零时间传播，这是有意义的；但是直至费曼提出电子如何辐射能量的新思想之前，所有的人只是简单地忽略了麦克斯韦方程的第二组解，因为“很显然”你不能够实际上具有随时间向后传播的电磁波。

当然，这只是费曼和惠勒用来保全他们的想法。在本章的剩余部分让我们按照光的波动描述来讨论问题。从一个电子，或一个无线电天线传播向外的波称为“延迟”波，因为它们是在它们被发射之后到达另外某处。随时间向后传播的波称为“超前”波，因为它们是在它们在某处被发射之前到达另外某处。你可以想象延迟波像波纹从一个无线电天线，朝着所有的方向向外均匀地扩散，这就像在一个池塘里的水波从石头掉入池塘向外均匀地扩展一样。而超前波，从我们的观点来看，就像波纹从所有的

方向均匀地聚向天线，这好像水波从池塘的边缘开始均匀地聚向池塘中心处。这个类比不成立，因为当超前波到达池塘的中心处时，超前波的总能量无处释放；而来自浩瀚宇宙传向电子的超前波正好提供了我们称为辐射阻尼的拖动力，传来的波动是被吸收并使电子向相反方向运动。但超前波怎样知道在哪儿发现电子呢？因为电子本身告诉了它们在哪里去寻找。

按照现在称为“惠勒－费曼吸收理论”的改进说法（指导教师在其与学生的合作工作中有办法把他的名字放在前面），当一个电子振荡时它既向未来发射一个延迟波，也向过去发射一个超前波。在宇宙中（在空间和时间里）一旦这个波遇到另外一个电子（严格地说，一旦它遇到任何带电粒子），它便使另外的电子振荡。这个振荡意味着另外的电子也既向将来也向过去作辐射。结果是由于一单个电子的振荡，整个宇宙中充满了重叠的相互作用电磁波海。大部分波相互抵消了，这就像在量子力学的反射描述中大部分几率抵消一样。但来自过去和将来的某些波回到原来的电子中，提供了用来解释加速电子所表现出的辐射阻尼。

1941年初，惠勒告诉费曼为在普林斯顿物理系对这一理论作报告作准备。这将是这位年轻的科学家第一次对这样一些听众作正式报告，普林斯顿就是普林斯顿，那一年就是1941年，这些观众，尽管都是“校内”物理学家，但包括阿尔伯特·爱因斯坦、沃尔夫冈·保利（量子力学的开创者之一，在1919年，当他年仅19岁并且还是一名学生时，就写了一本关于狭义和广义相对论的专著，这被看作是明晰的典范），以及其他仅当与这些非凡的天才相比才稍稍逊色的优秀科学家。报告后，保利温和地反对，他认为这种描述实际上是一种数学上的同义重复命题，并询

问爱因斯坦是否同意。爱因斯坦答道：“不，这个理论似乎可能……”。

说费曼从来没有后退过是夸张。但没有哪个学生对他的第一次研究结果不表示出令人印象深刻的赞同。这就是为什么爱因斯坦会如此受打动的的原因。

在学过路径积分之后，你不应当为此感到惊讶，即在计算过程中大部分复杂的相互作用电磁波网抵消了，仅剩下对原来电子一个相当直接的“反作用”。除了通过这个反作用之外，没有一个超前波以任何其它方式可探测到的形式存在；所有我们可以“见到的”是熟悉的延迟波。

这个理论的最美妙之处是就原来的电子而言，反作用是即时的。其中某些来自传向将来的波，并由此产生传向过去并在合适的时间到达原来电子的波；某些来自传向过去，并由此产生传向未来的波。因为根据座落在电子旁边的一个时钟（或其它任何的钟）随时间向前运行所花的时间与随时间向后运行所花的时间是相同的。因此，在每一种情况下，波所传播的距离是没有关系的。电子——加速反作用即出现。尽管惠勒 - 费曼理论不能够做费曼起初想要做的事情，即清除量子理论中的无穷，但它能够解释辐射阻尼。这是科学中经常的路线，一个问题可能激发出一项研究，但研究可能以解决了一个完全不同的问题而告终（或提出了原来未被怀疑的问题）。

故事中还有一个更曲折的内容，而在半个世纪前，这似乎是这个理论的一个致命的弱点。这个理论仅当从一个电子辐射出去的每一小点电磁能量以这种方式在时间上“反射”时才成立。如

\* 引自 Gleick《天才》第 115 页。

果某些辐射逃逸到真空中，并且从来未遇到过另外一个带电粒子，方程将不平衡。我们习惯认为我们的宇宙是无边限的，即“开放的”。在时间上把所有的辐射，向回反射至辐射源相当于在一个没有盖子的盒子中捕获所有的辐射。惠勒 - 费曼理论仅当宇宙像一个能量不能逃逸的封闭盒子（或黑洞内部）时才能给出正确的结果。你相信吗？在本世纪 80 年代和 90 年代天文学家给出了确凿无疑的证据表明，宇宙确实是“封闭”的。其原因与惠勒 - 费曼理论毫无关系。

今天，不存在吸收理论与宇宙论之间的冲突。某些理论学家甚至提出二者之间的密切联系，即宇宙现在正在膨胀，我们觉察到传向未来的延迟波，而觉察不到聚向所有带电粒子的超前波。惠勒 - 费曼的思想是对辐射阻尼为什么产生，以及光子如何在带电粒子之间进行交换所给出的最好解释，而从中学和大学所教授的物理方法中永远无法知道这些。奇特的是，这意味着在一定的意义上古人是对的——你眼睛辐射光子，并作为与光源辐射的光子进行交换的一部分；但是就像涉及光子的各种奇异的角度从镜子上反弹的路径，由于几率互相抵消了，这些光子没有在日常世界中呈现出来。我们所回到的重要一点是光子从光源到达我们的眼睛（或其它任何地方）的古老概念是不完全的；对光子而言，时间是无意的，我可以说的全部是光子在光源和我们眼睛（或诸如此类）之间进行了交换。

你认为这奇怪吗？在本章中我所描述的一切不仅是正确的，而且作为一个标准的物理特性是很好建立起来的。几年以后，狭义相对论将迎来它的一百周年诞辰；就连量子电动力学也将迎来它的 50 周岁生日。这是一门具有坚实基础的科学，一门根基扎实且理解彻底的（至少，根据怎样做计算）的科学，一门一次又一次

一次被实验验证的科学。然而如果我们真正想寻找到一种量子物理解释，以便给我们有一种世界究竟是如何运行——现实本身到底是什么——的感觉，我们必须还要解释许多更奇怪的事情。一些是刚刚经受了实验验证的老思想，一些是尚须进行实验验证的新想法。所有这些都是很奇怪的，但它们都是正确的。

## 第 三 章

# 奇异而真实

作为通常量子世界中最奇异性质的体现，而在光的行为中表现尤为突出的，是光的偏振现象。乍一看来，偏振似乎是一种波动属性，并且可以用经典的麦克斯韦电磁场理论来解释。你不妨重新回忆那条一端系于树上的绳子，用手捏住绳的另一端上下摇曳，绳子就会上下波动，于是你就得到了“垂直偏振”的波动，如果左右晃动绳子，它就会来回起伏不定，这可以理解成“水平偏振”的波动。

但一个由两种相互垂直波动成分（电磁分量和磁场分量）构成的系统的偏振性质就很难照上述直观实验来理解，特别是当我们考虑单个单个的光子时，这种用起伏不定的绳子所作的类比就不成立了。事实上每个光子都随身携带着一个从优取向。如果你的头脑中确没有更好的图像的话，你可以想象每一个光子上都附有一个指针或一个箭头，对垂直偏振光来说指针的方向是垂直的，而对水平偏振光而言其光子上指针的方向是水平的，甚至也

可以指向垂直和水平之间的任何一个方向（相应的光子的偏振方向就位于垂直和水平方位之间）。

为什么从太阳或电灯泡中发出的寻常光没有发生极化呢？你可以这样想象：对于从光源发出的无数个光子而言，附在其上的指针的方向呈随机分布。而没有从优方向，因此，作为无数个光子集合的寻常光就没有显出极化特征。但是如果让光通过某种只允许特定方向偏振的光子穿过的材料，这束光就会被极化。我们可以把上面绳子的比喻稍微搅拌一下（为什么不呢，是大自然本身把各种事物混杂在一起），让你手中摇动的绳子穿过高高的大栅栏的一条缝，如果你垂直地摇晃绳子，你仍然能够将垂直起伏的波沿着绳子发送到另一端的大树前，但是你发出的任何水平方向的波动，在它们穿过栅栏的时候都会受到阻挡，因为绳子如果不去打击栅栏就不能水平地来回晃动。

自然界中存在着各种偏振材料，例如广为人知的方解石晶体，你可以把光在高度有序的晶体原子间的传播和绳子通过栅栏的情况相类比。人工合成的偏振材料，如太阳镜，在我们的日常生活中非常普遍。太阳镜之所以能有效地遮挡部分光线，其原理就在于：由于太阳镜只允许一种偏振光通过，因此，就把所有其它偏振的光子全部拦住，这样透过太阳镜的光的强度就降低了，其次，由于被平面镜反射的光趋向于水平偏振，因此，如果太阳镜被设计成只让垂直偏振的光透过（确实如此），那么，它就会切断耀眼的水平反射的光，这就是为什么夜间行车需戴太阳镜的原因（它会切断对面驶来的车辆上车灯发出的经过路面反射的令人眩晕的光）。



## ◆ 观察不可能的光

如果一副太阳镜片在正常使用的情况下只允许垂直偏振的光通过，那么，当你摘下眼镜并把它转动  $90^\circ$ ，使得镜片竖立起来，此时镜片就只能让水平偏振的光透过了，事实上这种情况与绳子穿过栅栏时的情况类似，即水平偏振光不能透过垂直偏振片。因此，很显然，如果你有两副太阳镜，戴上一副后再把另一副转动  $90^\circ$ ，平行地放置在第一副眼镜的前面，那么透过这两副眼镜，你什么都不会看见，光子又一次表现出与直觉一致的行为。试着做一做并看一看（或者说试着做一做，你就会什么都看不见）。这就是一对正交偏振片的例子。

这种完全照常理所获得的对光的性质的理解并不会让你高兴太久，在现实生活中，如果你把两个镜片并列地放在同一条轴线上，并且不让光透过，那么试问当你把第三个镜片插在它们中间时会发生何种情况，常理告诉你光同样也不会透过，错了，现在就请你拿起第三个太阳镜片，放置在前两个之间并使其偏振方向与前两个各成  $45^\circ$  角，没有第三个镜片的时候光确实不会透过前两个相互垂直的偏振片，但是当放入第三个镜片后，就会有些许光从整个镜片系统中透过，尽管不如只放置一个镜片时透过的光多（实际上只是其四分之一），但是，确证无疑的事实是光不会穿过两个镜片，而能穿过三个镜片，原因何在？

首先，你可从两个偏振夹角为  $45^\circ$  而不是垂直放置的镜片入手来看一看，当光射到它们上面的时候会发生些什么呢？暂且忘掉太阳镜，设想我们在设置完备的光学实验室，各种精密仪器能

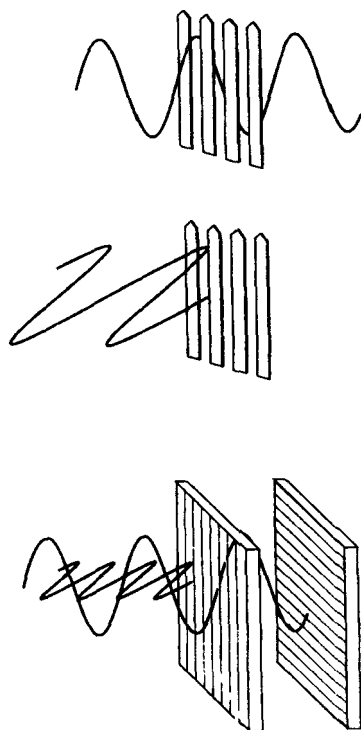


图 14 波的偏振

如果光是一种波动，就能很容易理解为什么垂直偏振光可以透过一片偏振材料，在这里用木栅栏表示（上图）；

显然，水平偏振光将不能透过木栅栏（中图）；

并且两片正交放置的偏振材料将阻挡垂直偏振光和水平偏振光（下图）

使我们准确测量到光的偏振方向和光强。首先让光穿过垂直偏振片，那么，当透过的光再碰到  $45^\circ$  角放置的偏振片时会发生何种情况呢？

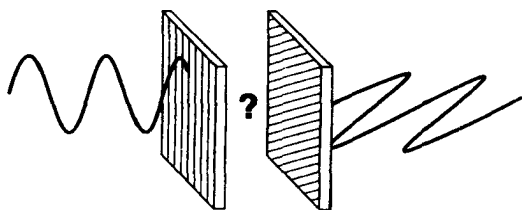


图 15 不可能的传播

奇怪的是，如果第二个偏振片和第一个的夹角是  $45^\circ$ ，它就不会挡住垂直偏振光，恰有一半的光透过，但是偏振方向也变为  $45^\circ$

与前述木栅栏的情况相比较，你也许会期望没有光会透过第二个偏振片，然而事实上，有一半垂直偏振会透过，并且透射光其偏振方向变成了  $45^\circ$ ，与第二个偏振片的偏振方向一致，因此，当这束强度减弱的光到达第三个水平偏振片后，两者夹角又是  $45^\circ$  角，又会有一半的光透过，透过后的光变成了水平偏振。这样我们就看到一束垂直偏振光透过两个适当放置的偏振片后，其强度就会减小为原来强度的四分之一，并且偏振变为水平方向。

我们甚至可以用一束极其微弱以致于可以把它作为单个单个的光子看待的光来进行实验。正如双缝实验，在某个时间发射一个光子使其通过装置。在你做此实验时，就会发现，如果有一个如你期望的垂直偏振的光子（也就是说，一个已经穿过垂直偏振片的光子）射到  $45^\circ$  偏振片上，那么，它穿过该偏振片或被阻挡的概率各为  $50\%$ ，也就是说，如果在  $100$  个垂直偏振的光子射到该偏振片上，会有  $50$  个光子透过，另外  $50$  个被阻挡，如果此时测量透过光子的偏振，就会发现它们的偏振都变成了  $45^\circ$  角， $50$  个光子继续行走，最后射到第三个水平偏振片上，此时其中的

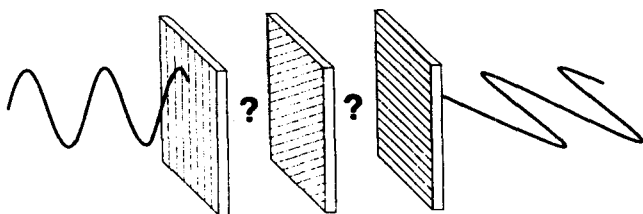


图 16 可能的传播

令人依然惊奇的是：三个顺序转过  $45^\circ$  角的偏振片允许四分之一的入射光透过，并且透过后的光的偏振变成了水平方向——而当你取掉中间的那个偏振片后就不会有光透过

25 个光子将被阻挡，而另外的 25 个则会透过，其偏振也随之变成水平方向。

当然，也可以用两个其它偏振夹角的偏振片来做这项实验。如果两个偏振片都垂直放置，那么所有垂直偏振的光子就会通过实验装置；如果两个偏振片正交放置，那么将不会有任何光子通过；如果缓慢地转动偏振片使它们的偏振夹角在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  之间变化，那么透过整个装置的光子百分数也会在 100% 和 0% 之间变化。看起来每个垂直极化了的光子实际上在每个不同的取向都有一个定义好的偏振概率分布，它水平偏振的机会是零，而呈  $45^\circ$  角偏振的概率为 0.5，某些偏振取向（例如  $30^\circ$ ）的概率小于 0.5，而某些偏振取向（例如  $60^\circ$ ）的概率则大于 0.5。光子实际处在某个不能够决定的态，即“叠加态”中，除非对它的偏振做出测量。当光子射到偏振片上时，它就会自行“决定”该采取何种偏振，并且遵循严格的概率规则透过偏振片或被其阻挡。正如泡利·大卫对它所作的以下描述：

应当强调，量子力学的不确定性并不是简单意味着我们不知道光子的实际偏振方向，不确定性的真正含义是：具有确定偏振的光的概念是不存在的，不确定性牢牢蕴含在作为实体存在的光子的本质中，而不是因为我们对它了解的太少而导致的不确定性\*。

那里还有更多的论述。

与通常的太阳镜相比，方解石晶体有一个重要的特点：一束光照射到晶面时，并不是简单地变成了另一束偏振光，而是被晶体劈裂为两束偏振方向互相垂直的光，并沿着不同的方向从晶体的另一侧射出，其中垂直偏振光遵循一条路径穿过晶体，而水平偏振光束则沿着另一条路径射出。如果入射光的偏振取向位于垂直和水平中间（这意味着入射光能够完全透过一个  $45^\circ$  角偏振片），则入射光就会被晶体劈裂为两束强度相同的光，两束出射光的偏振方向分别为垂直和水平方向，并且平行地传播。

当然，在单个光子射入晶体时，它不得不做出沿哪条路径行走的决定，并立即付诸实施，相应地其偏振也将变成垂直或水平，这一点已被实验证实。

如果你正用一束光进行该实验，你可以把另一片方解石晶体放置在两束劈裂光行进的光路中，使得两束光在晶体中重新汇合为一束，并且偏振取向变成  $45^\circ$ ——根据它们的晶体结构和其光效应，我们称这两片晶体具有相反功能。

但是，当单个光子穿行于晶体的时候会发生何种情况呢？

\* 大卫，《另类世界》。

“很显然”，在它到达第一片晶体时，它仍然不得不决定是沿垂直偏振的路径走，还是沿水平偏振的路径走。

这种观点通过对实验的精确设定得以加强，假设我们通过在两片晶体之间放入一片黑色滤材来阻挡经由一条路径穿出的光线，而让另一条光线畅行无阻。为确定起见，不妨假设从第一片晶体中射出的水平偏振光被阻挡，这在目前的实验中已经做到了，现在只剩下一半的光穿过，第二片晶体的另一侧，它们都已变成了垂直偏振取向，同样，如果我们关掉垂直偏振光线的通道，而只让水平偏振光通过第二片晶体，其结果也不难分析。遵循常理的判断又一次取得了胜利。

如果我们移走挡板，并让光子一个个通过实验装置，结果会怎样呢？常理告诉我们它们都将穿过晶体，并且取水平偏振和垂直偏振的概率相同，一旦光子作出决定选择何种偏振，则很难期望它在透过第二片晶体时其偏振方向重新变回到  $45^\circ$  角，不是吗？错了，它会，当光线变得如此之弱以致于只有一个个的光子穿行在实验装置中时，光束会表现得如同每个光子劈裂成两个一样，即光子在整个装置中将同时穿行在两条路径中，当通过装置后又合二为一恢复到原来的偏振状态。每一个射到第一片晶体上的光子都会以这种方式穿过晶体，并在装置的另一侧恢复原貌。光子的几率波正在晶体的一侧寻索通向另一侧的每一条可能路径，在其做出决定该如何表现的时候就已经把整个实验装置都考虑进去了，如同它们打在平面镜上在做出该如何反射回来的决定前就把镜面的每一个角落都探查了一样。看起来穿行在每条路径中的光子都已经注意到了另一条通道的开关状态，并相应矫正它们的行为。所有的这些讨论作为标准量子理论的一部分，在几十年前就广为人知了。但是，实验物理学家在 90 年代进行了更为

精致的实验，证实了单个光子确实同时体现出波动性质和粒子行为。

## ◆ 深入探索光子行为

量子力学的标准诠释，即哥本哈根诠释的要点主要体现在尼尔斯·玻尔提出的互补性思想。互补性思想认为：任何一个量子实体，如光子，都具有二重性质，即波粒二象性，任何实验都不能同时揭示出它既作为波又作为粒子的行为。玻尔说：“你可以设计实验来测出光的波动性质，当你这样做时，你确实会测出它的波动属性；或者你也可以设计实验来测出光的粒子行为，而当你这样做的时候，你会明白无误地得到粒子。但是你永远也不会看到同时扮演着波和粒子角色的光子”。

然而，玻尔错了，1992年，日本的研究人员采用印度科学家提出的方案进行了测量实验，在此实验中，他们同时测出了单个光子的波动属性和粒子行为。

目前还不清楚这个实验会对现今量子世界的理解带来多大的冲击，但是毫无疑问的是，这对哥本哈根学派来说是一个坏消息。我认为这并不可怕，在我看来，哥本哈根学派对量子实体本质的阐释远非理想。然而，作为量子世界晦莫难测的一个例子，这个实验确实值得我们稍加细考。

在探索光子的整个历程中，最奇特的事情莫过于物理学家在证实光子的波动性之前，不得不首先找到光子。直到80年代他们才真正找到光子。如我前面所述，阿尔伯特·爱因斯坦为了解释光电效应于1905年引入了现在称为光子的思想，并为此获得

诺贝尔奖，但是从 50 年代开始，以戴维·玻姆的研究为发轫（关于玻姆，我们以后还会更多地提到他），一些物理学家意识到不引入光子的概念而仅仅把光作为变化的电磁场来看待，这同样也可以解释光电效应。电磁场射到金属的表面并与表面的原子发生相互作用，这些原子只能吸收确定数量的能量，这样就可以解释光电效应了。普朗克本人听到这一消息后非常高兴，并措辞严厉地说爱因斯坦不应该获得诺贝尔奖（至少不应因为他的光电效应理论而获奖）。然而时至今日，这一切都云消雾散了，而且足可以作为科学史的一件奇特的珍闻，因为正是部分地在这些思想的驱动下，实验物理学家才确凿无疑地证实了光子的存在。

制备单个光子决不是我们所想象的那样，只是简单地利用调光器减弱光线，直到它能在一段时间内只发射一个光子，这部分地是因为光的辐射是由大量不同状态的原子造成的，而每个原子在涉及到发射光子时对其能量究竟改变多少（跃迁）都有一些选择。光的能量必须有一个来源，它源于原子内部的电子在从高能级向低能级跳跃的过程中所损失的能量。在大多数情况下，这种在一定能量范围内发生的大量跃迁过程就发出了光，这就带来了跃迁几率的平均，类似于费曼路径的积分中的大量路径的平均。这种平均就意味着一束极其微弱的光脉冲携带的能量可能要比一个光量子能量还要小，因为它代表了对许多量子态的平均（类似于死-活猫态的叠加），而绝大部分态是空态，并没有任何光子！这些奇妙的低能光脉冲表现出波的行为，并且通过适当的实验装置能够发生干涉现象。

为了产生一个真正意义上的光子，就必须只能触发一个原子在两个确定的能级之间发生一次跃迁，并随之发射一份能量脉冲，这样才不会出现叠加态，使得光子处于一个单纯量子态。科



学家利用钙原子与激光的相互作用，制备出激发态钙原子，从而实现了制备单光子的条件，如果你把原子内的电子能级想象成一阶的楼梯，每个电子正端坐在每个台阶上，你同样也可以想象把其中的一个电子向上移动两个台阶后会发生什么情况，这个可怜的电子会瑟瑟发抖地在那儿呆上一会儿，然后“磅”的一声跃下来，首先它会跃到下一个阶梯（能级），然后（经过  $4.7 \times 10^{-9}$  秒的短暂停留）会再次下跌，回到最初的位置，每一次下跌都会以光子的形式释放一份能量。

为了俘获第二次下跌发射的光子，设置一个探测器来监视激发态钙原子，该探测器对第二次跃迁发射的光子作出响应，并且在一段时间内打开一个“门”让光子通过，“门”被打开的时间与原子呆在中间激发态的时间一致，这样才能保证第二次跃迁时发射的光子有足够的时间穿过“门”进入到探测器中。

法国物理学家阿兰·艾斯派克特（Alain Aspect）和菲利普·格兰吉尔（Philippe Grangier）率先于 80 年代完成了这类实验。他们利用此方法俘获了光子，并把它们发送到一种称为半透镜的镜子上，半透镜的作用在于只允许半数光子透过，而另外半数则沿着与入射方向垂直的角度反射。这和利用方解石把一束光劈裂两束的方法有些类似，但是这里透射和反射光都没有被半透镜所极化。很容易看到，一束波是如何被半透镜分成两束的，如果一束由寻常光源发出的光首先被半透镜劈裂为两束，再重新汇合起来，就会发生干涉效应，这样就验证了光的波动性质（甚至一束强度极其微弱以致其能量不是一个光量子能量的光，也可以通过这种方法表现出波动性质，早已有实验证实了这一点）。但是，如果一个粒子射到半透镜上，它要么透射过去，要么沿直角反射出去，而不会二者情况兼有。

在透射和反射光路中各置一个探测器，并且实验采用由激发态钙原子产生的单光子，研究发现情况确实如上面所述，单光子永远遵循其中的一条路径，从来没有两个探测器同时响应的情况发生，这就意味着每条光路中都有一半的光。

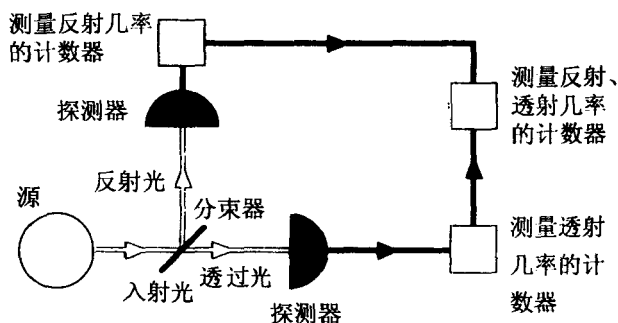


图 17 单个光子关联实验

一个单光子能分成两半吗？如果光确实以粒子的形式存在，那么每个射到半透镜上的光子要么被反射，要么被折射；根据量子理论，探测器能够完整地记录下反关联信息

然而故事并没有结束，正如玻尔预料，当艾斯派克特和格朗吉尔寻找光子的粒子性质时，他们确实发现了粒子。那么，如果他们想寻找光子的波动性质时会发生什么事情呢？尽管他们“知道”钙原子正在发射一个个的光子。

为了做到这一点，他们把探测器从光路上取下，而代之以两个反射镜，使得被劈裂的两束光重新汇合到一起，实验装置就变得与双缝实验非常类似。此时他们看到：越来越多的光子穿过实验装置，并最终出现了特征干涉图样，这正是波的体现。

这样，巴黎的研究小组利用同样的光源，确认了光子的粒子或波动性质，看起来与玻尔的相容互补性思想符合得非常完美。但是结果刚刚发表，印度的三个科学家又提出了能同时展示光子的波动性质和粒子行为的实验构想。在他们的实验构想中，最关键的一步是用两个三棱镜构成一个半透镜来取代艾斯派克特实验中的半透镜片。

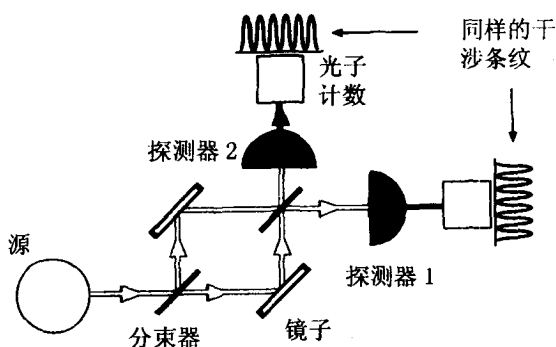


图 18 单光子干涉

当光子进入第二个分束器时（相对进入），形成完全相同的干涉条纹，说明“单个光子”也表现为波行为

三棱镜是一种简单的光学仪器，其柱顶是两个等腰直角三角形，侧面由两个直侧面和一个斜面组成。当光垂直射入直侧面时，柱体内的光线和斜侧面的夹角是  $45^\circ$ ，因此，光就会沿着与入射方向垂直的方向发生全反射，如果把两个三棱柱的斜侧面紧紧地靠在一起，中间不留一丝缝隙，它们就构成了一个正方体，垂直入射的光会垂直射出而不会发生任何反射，如果两个斜侧面

之间有一个很小的间隙，那么，入射光就会部分被反射，而部分会“隧穿”通过间隙，并沿直线穿过另一个三棱柱。

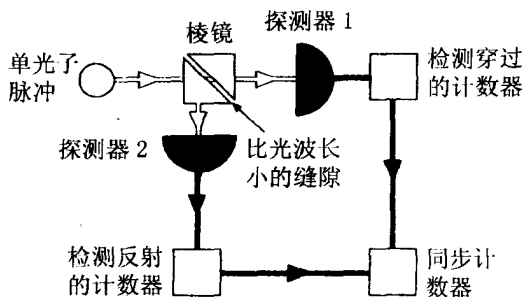


图 19 改进的实验

在改进的实验方案中，用两个其间有一个很小缝隙的三棱柱来取代原来的半透镜；光只能通过隧穿才能越过缝隙，这是波动性的体现，但是同时计数器也记录到不同的事件，这又证实了光子的粒子性；因此单个光子就同时表现出波动和粒子性质

这个实验设计策略的要点是两个三棱柱间的缝隙长度要足够小，比入射光的波长还要小。从物理上讲，此时一部分光就能穿过缝隙继续直行，缝隙越小，隧穿过去的光就越多，如果精确地设定入射光的波长和缝隙大小，那么，就会有一半的光会被斜侧面反射，而另一半就会透射过去。请记住，只有波动才能以这种方式隧穿，而粒子却不会发生隧穿，这正是该实验的要点。

来自 Aqmkita Hamamqtsn 光学所的两位日本物理学家， Yutaka Mizobuohi 和 Yoshiynki obtake 已经利用纯粹的单光子做了上述改进后的实验。他们的实验装置非常精致并富有创意，缝隙被控制在

几十个纳米以内，大约是入射光波长的十分之一。两个探测器仍旧放置在反射和透射光路中，单个的光子不能劈裂为两半，因此，每个入射光子的反射和透射概率各为 50%，如果两个探测器在不同的时刻（称为反同时）作出响应，就说明光以粒子的形式出现在实验中。

实验中任何直线行走的光子要想保证入射方向和出射方向在同一条直线上就必须通过隧穿，换句话说，光子必须表现出波动性质才能发生隧穿。在此实验中，研究者们确实发现每条通道中都有半数的光子，这说明光在缝隙处确实表现出波的性质，发生隧穿。研究者同时还发现，两个探测器极好地遵循了不同时刻作出响应的原则，证实了每个光子在缝隙处没有劈裂为两半，从而表现出粒子特性。`这样实验就同时观察到光子既作为粒子又作为波动的特征，与玻尔的互补性思想相矛盾。“ 尽管远离牛顿时代已 300 多年”，Home 说：“ 我们不得不承认仍旧无法回答‘ 光是什么 ’这一古老的问题”，他还愉快地提到爱因斯坦在 1951 年写给老朋友 Michelangelo Besso 的一封信：“ 光的本性之思考已在我心中萦绕了 50 年，然而并没有使我接近答案半步，现在，似乎每个人都认为他能回答光是什么，然而他们错了”。来自新西兰的物理学家也构想了一个能同时表现出单光子的波动性质和粒子属性的实验。

## ◆ 两边都看

当然，光子实际上不会同时出现在两地，作为量子非局域性的一个例子，它只是看起来身处两地而已，这种超距作用始终折

磨着爱因斯坦。

新西兰物理学家提出的实验构想中使用了三个而不是一个半透镜，首先入射光被一个半透镜劈裂为两束，劈裂后的两束光再分别折射到另外两个半透镜中，再一次劈裂后就变成了四束光。这样对于每个光子而言，就有四条可能的路径被选择。在每条光路中放置一个灵敏探测器来记录射入的光子。

如果入射光是一束电磁波，则不难预料和理解所发生的一切：波将被第一个半透镜分成强度减半的两束，而每束波又将被第二个半透镜劈裂成强度减半的两束，最终，实验中会出现四束强度各为入射光强的四分之一的波，它们相位匹配地运动着。

目前为止，一切正常，但是请记住，实验并没有开始，我们所做的一切只是建立了一个光束参照系统，他们通过与单光子发生干涉效应来监视光子。这个实验装置的设计是新西兰奥克兰大学的丹尼尔·沃勒斯（**Daniel Wallis**）及其同事提出的，他们建议把单光子以垂直于参考光束的角度射入第一个半透镜，光子会以相同的概率被反射或透射到另外的两个半透镜上。

现在事情变得意味深长起来，如果实验中没有光子的射入，你也许会认为设置在另一侧的四个探测器将不会记录任何光子，但是你错了。正如一个电子能够发射一个光子又能快速地吸收回去，真空也能自发产生一个光子然后又被其快速吞没，这是量子不确定性的一个体现，光子出现在某一空间体积内的概率为零意味着绝对确定性，与量子定律相悖，因此，任何空间体积内的光子出现概率都不为零。一切事物看来都受量子定律的约束，实际上这些量子真空涨落正是量子世界的一个典型体现。

因此，即使没有光子射入到实验装置，探测器也会偶尔作出响应，甚至更为偶然的事件也会发生：其中的两个探测器会同时

响应，这是因为每个探测器都记录了一个“虚”光子。如果一个实光子被引入进实验装置，它只能沿着整个迷宫的一条路径运动并到达探测器，探测器相应地作出响应。因此，当一个一个的光子进入实验装置后，探测器的响应次数也会相应增加，也有偶尔两个探测器同时响应的时候，这是真空涨落对另一探测器的影响所造成的。

事情并没有如此简单，量子理论认为，实光子态和真空涨落产生的虚光子态纠缠在一起，直接的物理效果就是干涉。正如双缝实验所演示，干涉意味着两个成分有时相长叠加，有时相消叠加。在新西兰科学家提出的上述实验设想中，两个探测器同时探测到光子的重复事件应该起伏不定，取决于入射光子的状态。他们期望利用这个具有四探测器的装置，通过引入入射光子来测量实光子和虚光子的干涉效应。

这表明在经典波和经典粒子的图象失效的地方量子效应承担起责任。注意到射入其中一个探测器的光子同时改变了另一个来自真空涨落的虚光子出现在第二个探测器前的概率，这个事实容易给人以错觉，那就是当两个探测器同时作出响应的时候会让人错以为单个实光子同时到达了两个地方。实际的情况是：当最初的光子在一个地方被探测时，这一事件会影响其它地方正在发生的事情。

可以想像，实际的实验会带来富有兴趣的结果，任何与量子理论的预测不同的结果将是令人惊奇的，另一方面，如果实验结果确如所料，沃勒斯（Wallis）认为，它将为量子真空涨落的存在性提供佐证。尽管真空不空的话题并不新鲜，但还是值得我们拉近焦距，仔细端详。

## ◆ 无中生有

不仅仅光子可以从真空涨落中产生，量子定律折衷了能量不确定度和时间不确定度，只需等待相对来说足够长的时间（仅仅是“相对”，这里处理的是 1 秒钟内的情况）真空就可以获得一份能量，用来产生一个质量很小的粒子（例如光子，尽管其静止质量为零，但它有确定的能量），如果想要产生更重一些的粒子，真空只需等待更短的时间（因此，从真空涨落诞生的电子——正电子对瞬间湮灭，并把能量交还给真空）。量子真空的真实图像是一个蒸腾着各种忽生忽灭的粒子的大旋涡。

一些天体物理学家给出了最极端的例子，他们认为，整个宇宙也许就是一个量子涨落，初看起来，这并不容易理解，因为宇宙迄今已有 150 亿年的演化史，大量的物质粒子涵概于其中，在保证质量能量为正的前提下，负引力场能量的假设就会导致宇宙的真空涨落。量子引力理论告诉我们，如果对应着宇宙质量的一个极小的能量泡突然出现在量子尺度内，它的质量能量与引力能量可以完全达到平衡，这就是说，整个量子宇宙的能量为零，因此其寿命很长，宇宙诞生的最后一个过程就是膨胀，这个过程在远比 1 秒钟要短的时间内把只有亚原子般大小的宇宙变得像蓝球一样大，经过最初膨胀阶段的宇宙在以后漫长的岁月里继续演化，扩张，就像我们现在看到的这个样子。

我们暂且不去考虑宇宙的真空涨落，这里我想告诉你一个有关探测真空涨落现象的实验，利用了铯原子与真空涨落相互作用这一事实。



对真空的正确描述不是“空空如也”，而是应把它看成一个由诸多电磁场态组成的叠加态（你也可以把其它场添加进去，但是为简单起见，让我们只考虑电磁场）。这些电磁场态可以看作是一根拨动着的吉它琴弦发出的各种音符，并且（和一个原子内的不同电子能级类似），它们构成了能量阶梯，而每阶台级的高度就对应着单光子能量。当一个原子发射一个光子的时候，同时发生的另一件事就是真空场也相应获得一份对应频率的能量来与原子中电子损失的能量相匹配，这样真空场就会在能量阶梯上向上移动一级，从而产生了一个瞬态虚光子，接着真空场又重新跃回原来的状态，虚光子随之消失。这就是原子与真空场相互作用的图像——类似于一根轻微颤动的吉它弦兀自发出的随机音符。

但是，真空场在金属导体表面处的涨落必须修正，这是由于在导体的表面处，真空场的电场分量为零，这样真空场在靠近金属表面的地方损失了一些能量。因此，对于一个在导体表面附近运动的原子来说，其两侧的真空场能量是不同的，此能量使得原子与导体表面存在一个吸引力，它将把原子拉向导体。

这个真空涨落效应的思想应回溯到 40 年代，但是直到 1993 年才由耶鲁大学的艾德·亨兹（Ed Hinds）及其同事测出。另一个有关的问题是著名的卡西米尔效应：当把两块金属板靠得足够近时，由于板间真空场的修正产生的吸引力会将它们拉在一起。尽管卡西米尔效应已各次被研究者用各种导体板测出，但是来自耶鲁大学的实验更为精致和灵敏。

在这个实验中，研究者用两块很小的表面镀金的玻璃板作为实验中的导体板，它们被楔成一个“V”字形，“V”，字形的最上端的宽度仍为几百万分之一米，铯原子被引入到“V”形槽的不同高度处，每一个高度所对应的板间距离都可用单色光干涉条纹

法准确地测出来，误差不超过几十亿分之一米，因此，研究者可以准确测出原子与板间距离，并由此计算出你用在原子上的真空力，当原子出现在“V”形槽的另一侧时，可利用通过使原子反弹回去的激光监控，实验结果完全与量子理论一致，而并不满足利用经典理论给出的结果。真空量子涨落效应就是通过这个实验呈现出来的。

耶鲁的研究者把出自于实验员的简单思想与实验中高度精致的设计紧紧地结合在一起，这让我由衷欣赏。从真空涨落思想的诞生到实验佐证前后经历了 40 多年，如此漫长的等待是值得的，近年来各种理论思想源源不断地涌现出来，或许需要更长的时间才能验证它们，然而一旦取得实验上的突破，那种人类共存的喜悦将是最为激动人心的。例如，你相信远距传物吗？嗯，我想是的，正如电影《星际历程》中的那句话“斯科特，请把我赶紧发射走吧”。然而量子理论认为远距传物是可能的。

## ◆ “赶紧发送我，斯科特”

还记得由阿兰·艾斯派克特及其同事付诸实现的 EPR 假想实验吗？艾斯派克特小组利用两个偏振方向相反的单光子（尽管没有人知道偏振是什么）证实了下列事实：当把这两个光子沿着相反的方向发射出去的时候，它们将始终处于纠缠态。如果观察者对其中一个光子的偏振做了测量，另外一个马上坍塌到相反的偏振态，这种纠缠和超距作用正是：纽约约克郡高地 IBM 研究中心的查尔斯·贝内特（Charles Bennet）提出的量子远距传物技术的核心，贝内特于 1993 年首先在久负盛名的《物理评论快报》上

阐述了这一似乎有些天方夜谭的问题。IBM 小组的主要贡献就是利用量子理论证明了这点，是一个出人意料的结果。

在遵循经典规则的日常生活中，复制一件东西并把它发送到各个地方是很普通的一件事，与远距传物最明显的类比是传真机，后者优于前者的一个方面是不会对原始文件产生任何破坏。如果单就信息量而言，编辑出版的报纸或书籍成千上万，每本都包含完全相同的内容。然而在量子层次上的复制并非如此简单。

首先是一个细节性问题，不确定原理使得观察者不可能对每个原子的细节都了如指掌，例如一张纸，或每一页印刷品上的油墨的每个分子的具体位置，因此，通过传真机发送的复制件只能作为原件的近似。另外，在量子层次上对客体进行观察就会相应改变它的量子状态——根据量子理论，测量即意味着量子态的改变，因此，即使你真的获得一切用以克隆原来量子系统的信息，该系统已被测量破坏。

经典信息可以被复制，但其传送速度不能大于光速。量子信息是不能被拷贝的，物理学家这样嘲弄道：“有谁会相信单量子态可以被克隆呢？”但是有时候，正如 EPR 实验所显示的那样，量子信息似乎瞬时地在两地之间传送，贝内特及其同事同时考虑了系统的量子 and 经典性质，提出了远距传送装置的构想。

他们这样描述了其构想：假设艾丽丝和鲍勃想远距传送一件物品，对于发送人来讲需传送的物品只是一个单粒子——比如处于某个量子态的电子。实验开始了，两个人各拎着一个里面装有 EPR 光子的盒子上路了，这两个光子未被测量，构成纠缠态。许多年以后，艾丽丝想给鲍勃发送另一个粒子，她不得不做的事就是让这个“新”粒子和盒子中处于纠缠态的粒子发生相互作用，并且测出相互作用后的结果，结果是改变了纠缠态粒子的原

来的状态并且建立了新的状态，同时也立即改变了鲍勃盒子中粒子的纠缠态并建立起新态。

然而鲍勃此时并不知道艾丽丝干了些什么，于是艾丽丝不得不通过电话，或通过鲍勃常看的报纸向他发送一条消息，告诉他测量结果，由于这条消息只包含经典信息，因此，艾丽丝可以随心所欲地通过各种通讯方式与鲍勃联系，最终鲍勃获悉了艾丽丝的测量结果，他现在可以观测自己盒子里的纠缠态粒子了，其目的就是想了解艾丽丝盒子中新粒子与纠缠态粒子的相互作用信息，再利用艾丽丝提供的信息把原来鲍勃盒子中的纠缠态粒子的影响从现在的测量中扣除掉，所得的就是发送粒子的完全信息了，而且由于艾丽丝在你测量时完全破坏了发送粒子的最初状态，因此，实际上鲍勃所获得的发送粒子的信息是独一无二的，并且他完全有权利认为，这种通过经典消息和超距作用传送给他的粒子信息具有其本来面目。

贝内特强调：这并没有违背任何物理定律，并且远距传物的速度要小于光速，这是因为，鲍勃为解开纠缠他的粒子，首先，必须等待艾丽丝通过公共通讯方式给他发来经典消息，如果过早地观察他的粒子，就会带来量子态的改变，从而失去了以正确方式解开纠缠粒子的机会。”艾丽丝的测量迫使另外的一个 EPR 粒子状态改变，从测量中获得的经典消息使得其他人对过去所发生的事情生成一幅巨细无遗的复制本”，但是“这一切并不能同时发生”。\* 极富智慧的实验物理学家很有可能在未来的 40 年内以这种远距传物的方式把电子从实验室的一个角落发送到另一个角落，甚至从世界一隅发送到另一角。也许它将是一个极其精致的

\* 摘自《科学新闻》（Science news, 10 April 1993）。

实验技巧，甚至没有任何实际的价值。但是也许会有其它相关的关于量子世界的探索具有潜在的应用于社会的价值。贝内特的无止境想像力并不局限于远距传物，他的另一个出自 IBM 本身研究兴趣的成就是，提出了利用量子力学来产生不会泄露的密码的思想。

## ◆ 量子保密术

毫无疑问，量子编码与远距传物之间有着非常紧密的联系，被远距传送的粒子中蕴含着信息，从原理上来说，也可以认为是消息。一个随身携带纠缠态的间谍能够利用它把另一个粒子传送给他的上司，这个间谍所要做的一切就是简单地向他的上级部门报告关于相互作用的新粒子（“消息”）和纠缠态粒子的测量结果，任何人都可以在中途截获这份简单报告，但是如果缺少纠缠态粒子，它将毫无用处。

事实上，关于利用量子通道来传递消息的探索早在远距传物的研究发轫之前已经开展起来，在 80 年代就广为人知，曾经出现过各种各样的方案，但是他们都依赖于随机数编码系统。

这种编码方法在谍报故事中经常出现，两个通过密码联系的人都随身携带着一本电话簿大小的随机数表，负责发送消息的人首先把消息转化为数字符（也许就是简单地用 1 代表 A，2 代表 B 等等），然后打开密码本，选择一页随机数表，把代表消息的每个数字符合在相应的随机表中的每个随机数的下面。两者相加，就变成了经过编码的消息，发送人把它连同使用的随机表的页号一同传递到另一个人，这个人再把这组新的随机数和密码本

中相同页码的那页随机数表中的随机数相减，就恢复了原来的信息，这种编码方法称为弗拉姆密码，是以首先在第一次世界大战中发明该方法的美国密码专家吉尔伯特·弗拉姆的名字命名的。有时候也称这种编码为“一次性密码本”方法，为安全起见每一页随机数表只使用一次，就被撕下来，如果一页随机数表不断被用来编码时，很容易让第三方识破密码。

这种密码即便被截获，一般情况下也不会被破译，除非截获人手里也有一份相同的密码本。其隐患在于，当谍报部分漫不经心处理编码的时候，有可能让第三方对密码本的情况有所了解，更糟的是，第三方已经获得一本完全相同的密码本，在不知不觉中就把密码破译了。

量子物理提供了消除隐患的方法，首先经过编码的消息没有必要是保密的，正如艾丽丝向鲍勃发送的经典消息一样，如果不了解来自一个量子通道的信息，这些消息毫无用处。企图破译者必须清楚这些量子密码——这是一串随机数，是如何在艾丽丝和鲍勃之间传送的，而后是不可能泄露的。为了使问题尽可能简化，这些数字可以用二进制数码来表示，即由 **0** 和 **1** 构成。因此，密码可以由一系列的开 / 关信号构成。

贝内特及其同事已经证明偏振光可以胜任这种量子编码，其技术简述如下：艾丽丝向鲍勃发送一束与两个确定的取向相比其光子的偏振随机分布在垂直和  $45^\circ$  角两个方位的光，随后鲍勃对这束入射光子的偏振作了测量，每一次测量过程中，鲍勃随机地将探测器设置在两个确定取向上，无论偏振沿哪个取向设置，鲍勃总会得到光子偏振垂直（表示二进制 **1**）或水平（二进制 **0**）的测量结果。然后，他就把每一次测量过程中探测器的取向的消息告诉艾丽丝，此后艾丽丝再告诉鲍勃有哪些取向与光子发射时

的偏振方向是一致的（他们可以通过公用电话交流这些消息），最后他们剔除掉那些设置不对的测量，由此就得到了一串二进制数码，也就是他们的安全密码。听起来这是个繁琐的过程，但是在现实生活中，任何人都可以通过计算机控制来轻松地实现上述编码过程。

这项技术的巨大魅力就在于：截获密码的惟一方法就是“窃听”这个量子通讯通道并在光子穿过的时候予以测量，然而我们已经知道，测量光子意味着改变其偏振方向！当这些经过测量的光子发送给鲍勃的时候，它们仍然是随机分布的。鲍勃和艾丽丝能够利用标准技术检测出这一影响。

这一切听起来令人难以置信；但贝内特及其同事确实建立了一台利用上述方式工作的装置，必须承认，在该装置的原型中，编码信息只是发送到 30 厘米远的地方，这仅是因为他们的装置建立在实验桌上的缘故，从原理上来讲，极化后的光可以通过光纤不受干扰地传到千里之外，别忘了（John Logie Baird）建立的第一台电视信号发射器仅能将信号传到几千米外的地方。

量子编码者们已经开始了旨在以更好的方法传送密码的工作。牛津大学的亚瑟·埃柯特（Artur Ekert）（曾经与贝内特亲密共事过）已经展示了如何从改进的 EPR 实验中获得所需随机数串的方法：两束未被测量的纠缠态 EPR 光子沿着相反的方向分别射向艾丽丝和鲍勃，事先确定好一系列偏振取向，并且两人都有一套其取向沿确定好的偏振取向呈随机分布的探测器，最后，每个人都可以利用这些探测器测出入射光子的偏振，并通过公用电话告知对方作了哪些测量，但不说出测量结果，最终他们剔除掉那些没有给出同一取向的测量，这样艾丽丝和鲍勃就从测量结果中建立起他们的安全密码了，这里他们的极化探测器取同一个取

向——由于每对 EPR 光子的偏振相反，因此鲍勃总是获得二进制数 1，而爱丽丝总是获得二进制数 0，反过来也对。任何通过截获光子并测量其偏振以窃听这种量子通讯的企图都会对光子的偏振形成扰动，从而被人发觉。

从这些例子可以看出，光子本身所固有的量子属性，正在实用化——尽管还没有出现商业化的量子编码器或远距传物装置，但已经出现了桌面大小的产品原型，因此，光子的实际存在性和波粒二象性已是不容置疑的了，然而，与这些实验物理学家雄心勃勃想要让这些奇异的量子性质渗透到日常生活或工程中一样，另外一些实验则把探针深入到光子的“内部”，试图对其粒子性的简单图象作出质疑。现在看来，由于量子不确定性，光子的内部同样也可以想象成沸腾着大量粒子的大漩涡，一个光子的能量毕竟要比真空能量大，如果真空完全充满了大量虚粒子，为何光子就不会有虚粒子呢？

## ◆ 深入光子内部

我先前描述光子的方式是仅仅把它们作为一个个实体，这些实体只有通过电磁力效应才能与其它粒子发生相互作用。既然光子是从电磁场理论中“诞生”的，那么，它为何不能从其它理论中“诞生”呢？除了主力（对亚原子粒子来说属于弱力）和电磁力，还有两种力在亚原子层次上发挥作用，与核辐射、核衰变有关的弱核力，把质子和中子拉在一起构成原子核的强核力。实际上质子和中子本身是由称为夸克的更基本的粒子组成的，夸克之间存在着强相互作用力。这些微观物质的分布层次看起来非常整



齐，赏心悦目。然而在一些涉及到高能光子和质子相互作用的实验中，有迹象表明光子除了与质子自由度及电荷自由度发生相互作用外，还受到弱相互作用力的影响，它似乎与质子中的夸克也发生了相互作用。

这些激励人心的现象昭示出光子的另一层含义的迹象促发汉堡德赛（Desy）实验室的物理学家于 90 年代早期进行了一系列探索光子本性的高能物理实验，实验结果显示：光子犹如一个由夸克、电子和其它粒子构成的乱糟糟的复合体。完全可以照搬真空的量子理论用以解释这种现象；由于光子能量的不确定性使得它可以在极短的时间内变成夸克 - 反夸克对（或者其它什么的）。这和真空的零点涨落会产生并消灭电子 - 正电子的原理是一致的，如果光子以夸克 - 反夸克的形式去撞击质子，那么光子“内”的夸克就会与质子内的夸克发生强相互作用，这种强相互作用效应能够通过标准技术测量出来。

这些新发现的意义仍处于探索阶段，必定会吸引实验物理学家在未来的几年为之艰苦地忙碌。然而新发现的本质特点是清楚的，既然我们已历尽艰难地把光和波粒二象性联系起来，我们现在不得不据此认为：它本身也能转化成物质，然后在大约  $10^{-43}$  秒内又转化成光。

尽管这种行为匪夷所思，但它确实在光和物质、波和粒子之间建立起令人称道的对称性。我们已在双缝实验中看到，原子会“同时沿两条路径”穿过两个狭缝，并且表现出如光波那样的干涉特征。因此，我们当然可以拓宽我们的思路，允许光“波”不仅表现出某种特殊粒子（光子）的行为，也可以在一定条件下体现出如同复合原子的粒子特性。

物质粒子（包括原子）究竟表现出何种行为呢？我们已经认

识到，从某种意义上来讲，如果不对它们的位置或其它性质作任何测量——即没有谁在注视它们，那么，这些物质粒子对我们来讲就是不存在的。量子客体以叠加态的形式存在，来自外界的某种东西会导致这个几率波函数坍缩。如果我们在整个时间演化历程中一直注视这个粒子，那么，会发生何种情况呢？这纯粹是一个由公元前五世纪的希腊哲学家芝诺（**Zeno**）提出的著名悖论的现代翻版。一个被观察着的原子永远也不会改变它的量子态，即使你选择了处于不稳定的高激发原子作为观察对象，如果你始终观察它，这个原子将永远颤颤抖抖地呆在激发态，直到撤去观察的时候，才会跳到稳定的低能态。70年代后期，对量子世界的哲学思考使得下述看法开始流行：未被观测的量子客体不会作为一个“粒子”存在。该思想的一个直接推论就是：一个被观测着的量子壶永远都不会沸腾。90年代初，实验证实了这一点。

## ◆ 观察量子

藉助于一系列悖论，芝诺宣称，关于时间和运动之本质的通常观念是错误的。他举了一个例子，对一支射向狂逃的鹿的箭来说，在任一时刻它必须处于弓弦和鹿之间某个确定的位置，如果它处于一个确定的位置，它就不能称为运动，而如果箭不是运动的，它就永远不能射到鹿的身上。

如果我们仅仅考虑箭和鹿的问题，毫无疑问芝诺的结论是错误的，当然芝诺本人也清楚，然而一个藉助于悖论得以呈现的问题是：错在何处？这一困惑可以借助于数学上微分学概念来解决。从另一个物质层次上来看，量子论告诉我们，任何时刻都不

可能同时确定箭的位置和速度（其实量子论还告诉我们，精确的时刻也是不存在的，因为时间本身也是不确定的），它混淆了辩论的视线，使得芝诺的箭能够继续前行。然而我们可以把芝诺的辩解等效地照搬到一个由数千铍离子组成的量子“壶”上去。

一个离子简单地就是剥离了一个或多个电子的原子，这使得离子总体带有正电荷，因此，有可能利用磁场来俘获离子并把它放置在一个电子陷阱——壶中。美国国家标准技术研究所的科学家发现了一种能让量子壶里的铍离子沸腾的方法，在沸腾的时候去观察壶——沸腾马上停止了。

实验开始时，所有的铍离子都被放置于同一个量子能态，研究者称它为能态 1，用一束特定频率的电磁波严格照射离子 256 毫秒，就能把离子全部激发到高能态上（称为能态 2），或者等效地说成量子壶沸腾了。但是铍离子是怎样又是何时从一个量子态向另一个量子态发生跃迁的呢？请记住，只有当你观察它们的时候，这些离子才决定呆在哪个态。

量子论告诉我们，跃迁不是一件一蹴而就的事情，实验中之所以选择 256 毫秒作为电磁波照射离子的时间，就是与此有关，经过这个特征时间后，每个铍离子都有 100% 的概率跃迁到能态 2 上，每个量子系统都有其特征时间（一个与此类似的概念是辐射原子的半衰期）。在现在的例子中，经过 128 秒的跃迁的半衰期的照射后，每个铍离子呆在能态 1 上与跃迁到能态 2 上的概率相同，也就是说它处于一个叠加态中，经过 256 毫秒后，铍离子由原来呆在能态 1 上 100% 的概率变到呆在能态 2 上 100% 的概率，而在其间任何一个时刻，离子则以相应的概率处在两态之叠加态中，然而当它被观测的时候，它总是趋于能态 1 或能态 2 中，我们永远不会“看”到混合态。

如果在经历了 128 毫秒的照射后我们想观测这些铍离子，量子理论告诉我们它们将被强迫呆在两个态中的某一个，正如我们打开盒子观察薛定谔的猫时，这只猫必须“决定”呆在死态还是呆在活态。也就是说半数铍离子会呆在能态 1 上，而半数铍离子会跃迁到能态 2 上，然而与薛定谔猫实验不同，理论预言已完全被实验证实，正如牛顿所期望的那样。

美国国家标准技术研究所的研究小组发展了一种相当完美的技术来观测离子的状态，他们把一束快闪激光照射在量子壶上，选择合适的激光频率，使得处于能态 2 的离子不受激光的任何影响，但是处于能态 1 上的离子将会被激发到更高的能态 3 上，这些离子在极短的时间内（远远小于 1 毫秒）跌回到能态 1 上，同时发射出特征光子，可用计数器来探测，而特征光子的数目就告诉了研究者当快闪激光照射的时候究竟有多少离子呆在能态 1 上。当然，如果经过 128 毫秒后再用快闪激光观察处于能态 1 上的离子数，虽然会发现有一半的离子呆在能态 1 上，但是如果在 256 毫秒内研究者等间隔地观察 4 次，最后发现呆在能态 1 上的离子数占总数的三分之二。如果观察 64 次（每隔 4 毫秒观察一次），则几乎所有的离子仍然呆在能态 1 上，尽管电磁波不辞劳苦地给这些离子加热，而这只被观测的“壶”仍旧不会沸腾。

经验在于，4 毫秒后单个离子跃迁到能态 2 上的概率为 0.01%，尽管离子波函数已经扩展，但是它仍然集中在能态 1 的波函数附近，因此，利用快闪激光的测量我们可以看到 99.99% 的离子仍呆在能态 1 上。但是离子还有更多的事要做，观测事件强迫它们选择一个量子态，这样离子又完全回到能态 1 上，量子几率波重新开始扩张，在 4 毫秒后，快闪激光的照射使它们重新坍塌到能态 1 上。正是通过快闪激光的不断测量，使得离子波函

数永远没有机会扩展。最终离子依然呆在能级 1 中。

在这个实验中，离子在没有观测的 4 毫秒间隙内仍有一个向能态 2 跃迁的微小概率，一万个离子中才会有一个跃迁到能态 2。实验结果与量子理论完全相符，这说明如果我们能在整个时间演化进程中观察离子，那么，离子将永远不会改变其状态。如果世界确如量子论所启示：我思故我在。则反过来也可以说：世界只有未被施予观测才会发生变化。

这使人想起一个古老的哲学问题：如果一棵树没有被人看到，那么它是存在的吗？造物者有一种传统的回答：即使人类没有看到，仁慈的上帝也会注视它的。前述实验给我们这些好事者带来的一个新的启示是：上帝必须不停地挤眼弄眉才能使这棵树生长、变化。

因此，通过持久地观察它后，我们就能“看”到被冻结在一个固定的量子态中的离子。我们同样也能够“看”到决定电子行为的几率波，来自加利福尼亚州圣乔治市的 IBM 研究中心的科学家首先观察到这一点。

## ◆ 奇妙的电子回路

德国图宾根大学（Tübingen）的夫兰兹·海塞尔巴克（Franz Hasselbach）及其同事利用一台改进的电子干涉仪装置发展了一套直接观测电子波函数信息的精致方案，该装置于 30 年代中期诞生在图宾根大学。

电子干涉仪是双缝实验的翻版。一束电子向着一根带负电的金属丝发射，金属丝上的负电荷与电子电荷发生相互排斥作用，

装置设计得足够对称，使电子束中的每个电子从金属丝两侧行走的概率各为 50%，另外装置中还有一根精心放置的带正电的金属丝，它与分束射来的电子发生吸引作用，使得这些电子重新汇合到一条路径上，最终探测器记录下射到屏板上的这些电子，正是双缝实验的翻版。

当电子逐个穿过干涉仪后，它们在另一侧的屏板上建立起干涉条纹，好像每个电子在穿过第一根金属丝时被劈裂为两半，然后在通过第二根金属丝的时候这两个光电子重新汇合为一个，并且发生干涉效应（我相信现在你并不为此感到惊奇，除非我告诉你电子不会这样表现）。到此为止，这只是一个比双缝干涉实验更为精致的翻版而已。然而 1992 年图宾根研究小组改进了电子干涉仪装置。

他们给电子干涉仪加装了一个由两块分开的金属板组成的维氏过滤器（实际上就是一个电容器），并让磁场垂直穿过两块金属板中的间隙，任何带电粒子在穿过过滤器时会同时受到电场力和磁场力的作用，调整好电场力和磁场力的大小，使得以某一速度运动的电子在穿过过滤器时受到的电场力和磁场力平衡，从而不会发生偏折，而以其它速度穿过过滤器的电子的运动方向则稍微偏折。这样，研究者们通过在两根金属丝之间放置一个维氏过滤器就破坏了原来装置的对称性，使得一束电子在运动过程中感受到拖曳作用，而另一束电子则不会，这样一束电子波穿过干涉仪的时间要比另一束短，这种步调不一致而带来的相位失配会引起屏板上的干涉图样相应变化，实验结果与量子理论完全一致，即使在电子逐个发射的时候也不例外。这个实验尽管看到了电子的波动行为，但人们不禁还是要提出一个问题：能否直接“看”到电子波函数本身呢？答案是肯定的，1993 年 IBM 的研究者们

在量子光栅上第一次进行了电子禁闭实验。

**IBM** 小组的实验不仅突出显示了量子波的实际存在性，也具有极其重要的潜在应用前景，因为他们的实验涉及到操纵单个原子并把它们排在一层表面，这就是纳米技术，利用纳米技术还有望制造出高效、高性能、超小型的计算机，利用纳米技术可以制备出独具特性的介观材料。科学家认为，这些介观材料将会给社会带来又一次工业革命。**IBM** 小组使用扫描隧道显微镜在平滑的铜表面上沉积了 48 个铁原子，并排成了一个整齐的圆环，其直径仅为 14 个纳米，这就是他们的量子光栅。对位于圆环上铁原子内部的电子来说，这些原子是一堵堵不可穿透的墙。根据量子论，限制于环中的电子波将受到圆环不断反射，形成驻波，你可以把驻波想象成冻结在时间空间里的起伏不定的斑图，就像一根无休止发出同一个音符的吉它弦。

量子论告诉我们，至少量子光栅内每一点的电子密度是可以测量的，这可以利用扫描隧道显微镜本身做到。通过测量，电子密度可以转化成计算机图象，我们就可以直接看到电子的密度斑图，它看起来就像一枚石子丢入水池所溅起的阵阵波纹，而这正是我们熟悉的驻波啊！

从这个实验我们清楚地看到了电子的波动。我在序言中也提及到，即使质量更大的原子，在双缝实验中也表现出波动性质，然而需要指出的是：华盛顿大学的汉斯·杜麦特（**Hans Dehmelt**）利用磁“盒”装置（类似“量子壶”）开创了俘获单个电子和单个原子的研究领域，并为此获得 1989 年度诺贝尔物理学奖。当然，实验并不能直接观察俘获电子，但是杜麦特（**Dehmelt**）及其同事在 80 年代不仅把单个钡原子俘获在一个修正的潘宁势阱中，而且还利用钡原子自己发射的蓝光拍下了它的形貌照片。从

照片上看，一个微小的蓝点静静地躺在巨大的黑色背景当中。如果你承认观看照片与亲眼目睹的效果别无二致的话（实际上我们对遥远星系的认识大部分来自于照片），那么，我们就可以认为你已经目睹单个原子的尊容了。

然而哲学家和量子爱好者仍旧会对当原子不被照相时它是否存在的问题争论不休。我已经给你提供了足够多的量子世界的奇异真理，现在到了该解决究竟什么是量子实在性这一问题的时候了。各种各样的量子实在性阐释流行世间，在外人看来其中大多数于事无补，使人沮丧。一个重要的问题是：我们试图阐释什么？为了给出一个清晰明了的图象，我将最后用两个关于光的奇异行为的例子来说明。

## ◆ 什么时候是光子？

量子物理的发展史中最微妙的一个特征是想象实验（之所以称之为想象实验，因为最初没有谁相信这些实验会付诸实现）最终都被真正的实验所证实，揭示出量子世界奇异的、充满青春朝气的生命力。始作俑者自然是 EPR 实验，首先由约翰·贝尔（John Bell）从概念上提出并最终由阿兰·阿斯派克特（Alain Aspect）小组解决。在这个例子中从想象实验的提出到最终实验的实现整整用了半个世纪，但对于另外的想象实验，现实实验的进程要快些。

约翰·惠勒，理查德·费曼的博士论文导师，在德州大学奥斯汀分校工作期间，于 70 年代末提出了一个非常精致的想像实验，我曾在《寻找薛定谔的猫》一书中提到这个“延迟选择”想像实



验，但是没想到在这本书出版后的两年内这个想像的延迟选择实验出现在现实的实验中。我也曾提及到延迟选择想象实验有一个宇宙翻版，它涉及到从遥远的类星体上发射的光。在 80 年代中期，没有人相信延迟选择实验会在现实中诞生，但是到了 90 年代，情况大为改变，因为测量想像实验中涉及到的类星体发射的光波确实有望在近期内解决。

延迟选择想象实验的基本特点与双缝实验不同，我们已经知道，对于逐个发射到双缝实验的光子，它们将在另一侧的屏板上形成干涉图样，看起来像是光子发生了自干涉，我们也已经知道，如果我们想要建立监控系统来测量光子正在通过哪条缝，我们总会看到单个光子只穿过其中一条缝，在这种情况下，我们在远处的屏板上看不到干涉条纹，即光子在狭缝处的行为被测量破坏掉。

惠勒指出，从原理上来讲，可以在狭缝与屏板之间的某个位置处设置探测器来观察电子在狭缝与屏板之间的路径中的行为。我们可以看到，当光子穿过狭缝还没有到达屏板的时候，它们到底表现出波动性质还是粒子行为。量子理论告诉我们对任何一条光路中的光子的探测就会导致整个系统的波函数坍缩，因此，就不会有干涉条纹出现，但如果关掉探测器，并且在光子通过的时候不作任何观察，那么，就会恢复干涉图样。在光子穿过双缝后其在狭缝处的行为就已经确定了，不仅如此，惠勒还指出，我们实际上并不需要对打开还是关闭探测器作出决定，除非光子此时已通过了双缝，这就是延迟选择实验的由来。

如同薛定谔猫的故事一样，延迟选择想象实验凸现出量子力学的荒唐所在，但与薛定谔猫不同的是，延迟选择实验于 80 年代中期分别被马里兰大学和姆内克（Munich）大学的两个研究小

组独立地实现，他们实际上对想象实验做了改进，一束激光被半透镜劈裂为两束，其中一束通过一个称为相位偏移器的设备，这样两束光就不合拍了，因此，当两束光再次汇合成一束时，就会形成干涉条纹（这与图宾根实验中把电子分成两束，再对其中一束进行相移的方法是一致的）。一种称为泡克耳斯盒的探测器设置在每条劈裂光束的光路中来监测光子的路径，另外在两束光汇合的地方再放置一个探测器再来观察屏板上是否正在发生干涉。泡克耳斯盒可以在  $9 \times 10^{-9}$  秒内完成开关操作，从半透镜到探测器的光程是 4.3 米，需要  $14.5 \times 10^{-9}$  秒才能走完，因此，在光子穿过半透镜的时候可以把泡克耳斯盒打开或关上（这种开关操作作用计算机随机控制）。两个研究小组都获得了与量子理论完全一致的结果：当探测器打开的时候，光表现为粒子行为，每个光子在每一时刻只能通过一条路径，而且不会发生干涉效应（当然，在 4.3 米的光路上有大量光子，每个光子在到达探测器之前就做出应该如何表现的决定了）。如果关闭探测器，即使一束单光子射到半透镜上也会表现出波动性质，此时光看起来同时在两条路径上运动，并且确实无疑地发生干涉。可是，即使在我们还未对如何观测它们做出决定之前，光子在通过半透射时的行为就已经被将来“我们该如何去观测它”这一想法所改变。

这是一个震撼人心的把想象实验付诸现实的例子。但是对目前的例子而言，光子只是在几十亿分之一秒的跨度内对探测器开关状态的准确预测能力不会让你对这种未卜先知的奇异性太困惑，这也是惠勒在 80 年代早期提出把想象实验建立在宇宙中的来由。

惠勒指出，利用引力聚焦现象可以实现双缝实验的宇宙方案。最初，人们对设在地球上的望远镜能否观测到引力聚焦现象

并无信心，后来引力聚焦的研究却取得了一些进展。宏观宇宙中正在发生着的事情是：千百万年前由类星体发射出的光在星际中穿游传播，并受到星系干扰（1光年就是光在一年内走过的路程，请记住，太阳光只需不到500秒的时间就传到1.5亿千米之遥的地球上）。如果星系和类星体之间的方位合适，那么，类星体发出的光就会被星系引力弯曲，因此，类星体发出的光子在星系附近就有两条可能路径，其直接效果就是：从地球上看去，类星体有两个像，分居在星系的两侧。

从原理上来讲，有可能把构成两个像的光汇合在一起使之发生干涉，并形成干涉图样，这将证明光的波动性质。另一方面，利用泡克耳斯盒来观测每个像的光系行为也是可能的，在此情况下，量子理论预测，对两个像的光子观测后再把它们投射到屏板上，就不会出现干涉条纹。果真如此的话，那就“证明”光表现出粒子行为，每个光子在通过星系时只能走一条路径。

要把这一想象实验付诸现实还存在种种困难，尽管我们可以从类星体的两个像中获取光子，但由于引起光线偏折的星系的体积如此之大，两束光的信息是含混不清的。任何光源都有其特征相干时间，在这段时间内发出的光是步调一致的，在更长的一段时间内，光波的相位就变得杂乱无章。对于在星系附近的两束光来说，其光程差大约是几个星期，远远大于其特征相干时间，因此，光的相位信息随机无规，不能用来形成干涉条纹。

时至1993年，天文学家为另一种引力聚焦现象的发现欣喜不已，研究者发现：当银河系中一颗由暗物质构成的致密星从星系中的一颗星体前面越过的时候，类星体的两个像就会闪烁不定，这就说明类星体的像是由不同的引力焦距而成的。致密星体通常如木星般大小，因此，由它引起的引力聚焦造成的光程差非

常小，这就使得观测类星体光的干涉效应成为可能，因此，只需付出微乎其微的努力，就可以把泡克耳斯盒引入实验，并造成干涉图样的消失。

这种新的引力聚焦现象对检验量子理论提供了远大前景，由于被我们的望远镜所俘获并被送到探测器的光子实际上是由 10 亿年前从一个距我们  $10^{22}$  千米远的类星体发出的。光子可以“选择”两条路径到达地球，它们可以走其中一条，也可以走另一条，或者被神秘地劈裂成两束，同时走在两条路径中，但是问题是：是在 10 亿年前由  $10^{22}$  千米外的类星体上发出的这些光子却依赖于 90 年代或 21 世纪初的天文学家地是否打开附在望远镜上的泡克耳斯盒的决定。

上述论述给人的一个错误图像，惠勒说：“是关于光子在天文学家观察它以前就具有某种物理形式的假设。它既是波，又是粒子，在星系附近既可以同时沿两条路线穿行，又可以仅仅遵循某一条路线，实际上，量子现象既非波动，又非粒子性，其实质并没有定义，除非在它被测量的时候。从某种意义上讲，英国哲学家比索普·伯克莱（**Bishop Berkely**）两个世纪以前的断言存在即是被感知，是正确的。”

我不清楚惠勒的这段论述能否真的帮你恢复信心，然而无论你如何试图去描述它，上述关于延迟选择实验的宇宙方案中总是存在某种玄妙奇特的东西，整个宇宙似乎已经超前洞悉这小小的人类想要在比如说乞力（**Chile**）山峰上做何实验。惠勒的思想已足够超前，他认为整个宇宙之所以存在是因为有谁在注视它——所有一切，甚至追溯到 150 亿年前的大爆炸都保持未定义状态，除非被观测。这就带来一个沉重的问题：何方神圣具有这等警惕性，注视着大爆炸，使之坍塌为宇宙波函数。这正是下一章要论

述的问题，首先在这儿提供一个看待宇宙波函数坍缩的非正统观念，它是一个想像实验，宣称即使不作任何观测，也会导致系统波函数坍缩。

这个关于量子世界奇异性的极好例子是在 50 年代早期由德国物理学家默里斯·雷尼格（**Mauritias Renninger**）设计提出的，因此称为“雷尼格负结果实验”，它以极易理解的形式来呈现了量子奇异性。

这里，我对这一想像实验作了稍微修正，设想一个源正发射一个量子粒子，发射方向是随机的（通常的辐射核就是如此，因此，这个源一点儿也不特殊）。假设这个源处于一个巨大的空心球中心，并且球体内表面涂了一层物质，只要发射的量子粒子触到球壳内表面的某处，某处就会闪光，当源随机发射一个粒子时，对一个可以接受的量子描述是：量子几率波会沿各个方向向外扩展。当几率波扩展到球壳内表面时，就会在某个地方闪光，量子波随之坍缩到一点。仅当粒子被观测的时候——闪光时，粒子才是实际存在的，而在其向外扩展的过程中，它是不存在的。

迄今，所有讨论是足够简单的，但是现在假设，在源和球壳的中间有一个半球状屏蔽罩，从源的视角来看，它实际上把球壳的一半都挡住了，设这个半球壳内壁也涂上一层闪光材料，使得发射粒子在与它发生撞击时也会闪光，那么，现在当源发射一个粒子的时候会发生何种情况呢？

有可能对这个想像实验的可能结果做一个简单的量子描述，只要利用两个终态就够了，我们现在并不特别关心粒子会在球壳或半球壳的何处发生碰撞，而只关心它会与谁发生碰撞。粒子既可以撞击内部的半球壳使之发光，又可以撞击外部的球壳并使之发光，两个结果发生的概率相同，现在，假设源又被触发产生了

一个粒子，仍按标准的量子理论描述为几率从中心扩散到球壳，各向同性。我们等的时间比其到达内层球壳的时间长，但是比它到达外层球壳所用的时间长短，并且在内球壳上没有看到闪亮。我们知道实验的终态是在外球壳上的闪光——粒子一定是没弄对方向没能撞到内半球壳。粒子从能够以一半对一半的几率撞向内半球壳和外球壳的状态，完全坍缩到 **100%** 的在外球壳上产生闪光的状态。但是这却发生在观察者实际观察到任何东西之前！这纯属交换了观察者关于它将如何的“知识”的结果。它要求观察者有足够的智慧来推断发生了什么，以及如果一个粒子向内半球方向飞时会发生什么（例如，因此，很明显猫不够聪明，能产生波函数的塌缩）。在此情况下，没有观察也能使量子波函数产生像有观察那样有效的塌缩。至少，哥本哈根学派的解释是这样。

这种观察者——不是任意观察者，而是有智慧的观察者的中心法则处于哥本哈根学派解释的中心，很难判断，任何拚命补救都会是这样的：它可作为一种量子操作的“烹调书”，补救只是添加些菜以得到最后的加工物。虽然量子馅饼做出来了，但怎么做出来的还是无法知道。

虽然多半个世纪中大多数物理学家乐于用它做菜而不去管这套量子烹调术，但也产生了对奇妙的量子世界的其它种解释。不幸的是，尽管对另外解释争论激烈，各有各的理，直到现在还没有一个能比哥本哈根解释的缺陷更少。但是，这些出自于无可奈何的解释仍值得一看，为了看看量子理论的解释必须解释多少东西，也是为了在本书后部分向你讲解这不同寻常的理论时给你一个合适的印象。

## 第四章

# 最后的补救

量子理论最为显著的特征之一就是存在着许多种关于这个理论“究竟意味着什么”的不同解释。就其哲学基础而言，这些解释之间大多是相互矛盾的。所有的这些解释都能精确地解释已知的实验现象，并且能正确地预测新的实验结果，它们都满足牛顿关于“一个好理论”的条件。在科学的其它领域并没有类似的事情出现。例如，就 20 世纪物理学的另一重大理论——爱因斯坦的广义相对论而言，我们并没有其它不同的解释。

选择量子理论的解释实际上有点类似于在一个双孔（或多孔）实验中选择光子的路径。光子看起来好像能同时通过实验中的双孔，而在现实世界中这两条路径是相互排斥的。量子理论看起来对许多相互之间相互排斥的解释都是允许的，就像在实验中光子同时通过双孔一样。在某种意义上，所有这些解释都是正确的。有一些物理学家并不试图说明哪一种解释是正确的，而是建议我们应该从各种不同的解释中多少了解一些量子世界，将它们

都考虑进去，将其看成是各种可能的叠加。这些物理学家当中著名的有《宇宙密码》一书的作者——**Heint Pagels**。然而只有极少数的专家持这种观点。事实上你可能会发现有少数物理学家（这些人根本就不愿意去思考这些事情）顽固地坚持一种观念，那就是他们所喜欢的那种解释才是正确的，而所有其它的解释“显然”都是错误的。

这场争论的本质——用这个词来描述这种科学上的混浊不清的状态是不太妥当的——在 20 世纪 80 年代中期被公布于众。当时保罗·戴维斯（泰恩河畔纽卡斯尔大学的物理学教授）和朱利安·布朗（一位 BBC 电台节目制作人）联手开办了一个关于量子理论的 BBC 电台节目。他们采访了八位当时顶尖的量子物理学家，请他们说出自己对量子之谜的观点，以及如何解释这些迷惑。在节目播出之后，全部的采访记录加上一些介绍性的材料被整理成一本书，即《原子中的幽灵》。在那本书当中，那些专家们都严肃地宣称其中某一种解释是正确的，而其它解释都是不可能的。惟一的问题是，在“到底哪一种解释是正确的”这一点上他们却不能达成共识。几乎没有例外，他们都非常自信地、直接了当地赞同某种关于真实性的说法，而否定其它的说法。这本书不仅阐述了不同解释之间的差别，而且阐述了不同解释者自身之间的差别。对比，这本书比我已经见到的其它书都要清晰、实用。本章中，我将不时地引用其中的材料来揭示有哪些不同。

尽管我并不想在此详尽地评述关于量子真实性的各种解释，但是仍要给出这些主要竞争者的主要观点。依我的观点看，就这个世界如何运作这个问题，他们之中没有一个人给出了一种令人满意的解释。尽管如此，但是如同 **Pagels** 一样，我认为对于这个问题他们都提供了有用的见解。正如在下一章我将更加详细说明



的那样，为了实用，一个关于世界的理论模型不一定非要完善无缺。哥本哈根解释这一实例便最强有力地说明了这一点。这一解释有着明显的缺陷，但在半个多世纪当中，它却为量子力学提供了一个实用的基础。

## ◆ 哥本哈根解释的垮台

哥本哈根解释之所以成为关于量子真实性的一种“官方”解释，部分原因是由于历史的偶然因素，部分原因是由于一位本世纪最伟大的数学家的一个愚蠢的错误。历史的偶然因素是指它是第一个比较实用的解释，在某种意义上它提供了一份量子菜谱，使得那些不想深究量子的神秘性和哲学性的量子厨师能够用来烤出他们的量子蛋糕（另外，这个解释是由一个非常有影响力的人——尼尔斯·玻尔提出的，这位伟人很少给出不恰当的论断）。既然从实用的观点来看，哥本哈根解释非常有效，因此，从事量子力学研究的人就很少追究其更深一层的含义了。

即使是到了 20 世纪 80 年代中期，这个“官方”的地位仍然是摇摆不定，这不仅表现在量子烹调的哲学方面。鲁道夫·派尔斯先生，1907 年出生于柏林的一位物理学家，他在定居英国之前曾经与许多量子力学的先驱者在一处工作过。在《原子中的幽灵》一书中，他的论述使得哥本哈根解释的地位得以巩固。他说：“我反对将其称为哥本哈根解释，因为这种叫法让人感觉到量子力学好像有多种解释。只有一种，人们理解量子力学的方法

只有一种。”\* 这是一位老派的物理学家，一位沿着尼尔斯·玻尔、维尔纳·海森堡和马克思·玻恩的传统成长起来的物理学家的观点。

到现在为止，你应该对哥本哈根解释究竟讲了些什么有一些清醒的认识了——互补原理、几率波及波函数坍塌的联合体。在这里我就没有必要再对其细节一一叙述了。不过请记住，这个三脚架的一条腿——玻尔对互补性原理解释已经受到了实验的挑战。这些实验表明，一个单光子在同一个实验中既有波的行为，又有粒子的行为。另外一个很值得注意的是哥本哈根学派关于量子真实性的思想，例如一个电子或一个光子并不具有诸如位置和动量这些性质，除非这些性质被测量到。我们并非不知道这些性质是什么。这个理论告诉我们，除非这些性质被测量到，要不然它们就不存在。

这就是哥本哈根解释的问题的关键所在。波函数在什么时间（什么地点）发生坍塌呢？一个盖格计数器是否能够探测到从一个原子发出的辐射，而使在“薛定谔的盒子中的猫”这一实验中的整个系统的波函数发生坍塌呢？表面上看起来并不是这样，特别是在由彭宁格所设想的光这一类实验中，在这类实验中没有导致波函数坍塌的测量的参与。那么，有意识的参与是否是导致波函数坍塌的一个必不可少的因素呢？

自从哥本哈根解释被提出以后，许多有哲学倾向的物理学家就讨论过现实世界与量子世界之间的分界线在什么地方问题。严格的哥本哈根学者坚持认为，我们所认为的电子的物理特性并不是什么别的东西，它只是一种电子与测量工具之间的关系，而不仅仅是一个电子。在 1993 年 8 月一次对英国科学进步联合会

• 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》，第 71 页。

的谈话中，基尔斯大学的美国物理学家戴维·梅尔曼提出了一个非常贴切的类比来解释这件事情：

心理学家和生物学家常常为智力的本质问题而争论不休。在多大程度上智力是来源于先天的造化，而在多大程度上智力是后天环境的影响和教育的结果。他们发展了一套所谓的“IQ测试”，用来测试人的“智商”。尽管在许多年以前就有很多人相信IQ测试提供了一套能测试智力的办法，但现在普遍认为IQ测试只能测试人们做这种测试的能力罢了。内在的智力可能是决定这种能力的一个因素，但并不是惟一的因素。这个实验（找一些人参与IQ测试）的结果取决于这个实验本身的性质。（举一个简单的例子，如果这个测量是要求书写俄语，而你根本就不懂俄语，那么，你就无法在这个实验中获得高分。）

采用同样的方式，如果我们要测量一个电子的动量，我们实际上要测量的是电子回答动量这个问题的能力。电子可能确实不具备我们在日常生活中所设想的那种动量这一性质，但是它可能会具有某种别的性质，使它能够以某种方式来回答关于动量的这个问题。我们得到一个实验结果——答案，并且把它解释为动量的测量。但它只不过是告诉我们电子回答动量测试的能力而已，而不是它们真实的动量。这正如IQ测试的结果只能告诉我们这个人应付IQ测试的能力，而不是他们真实的智力。

尼克·赫伯特，一位美国物理学家，另有一个类比。玻尔说过，孤立的实物粒子并不存在，它只不过是一些我们只能通过让它与系统发生相互作用（例如测量一个电子的动量）而认识到的某种东西的抽象。赫伯特说，这正像是一道彩虹。· 一道彩虹并

• 赫伯特，《量子真实性》第162页。

不是以一种具体的物质而存在，它对每一个观测者是在不同的地方出现。没有两个人曾经看到过一道相同的彩虹。（实际上，你的两个眼睛分别看到的彩虹也有一些细微的差别。）但是彩虹确实是“真实的”。——它能够被拍摄下来。同样，我们可以认为，除非它被观测，或者拍摄下来，它并不是真实存在的。以同样的方式，按照玻尔的说法，量子实体例如电子是一种表面展示的现象，它在具体的实验安排中，通过与量子实体的相互作用而展现出来。

按照哥本哈根解释的基本观点，“事实”是测量结果的记录——盖革计数器上的咔嗒声或是一次闪光标志着一个电子到达了探测器的屏幕上。然而，即使是测量仪器本身也是由电子和原子及其它的量子实体所构成的。那么，如何才能避免使用与其它量子实体相同的术语来描述它呢？盖革计数器本身原则上也是由一个几率波来描述。在测量之前，它处于一种叠加状态。我们可以设想，探测器本身由于第二个探测器的探测而“成为真实的”。第二个探测器（像薛定谔的猫）在被第三个探测器探测之前也是处于一种叠加的状态。如此下去，以致于是一个无穷重复的过程。正是这种情况使得一些量子解释者断言，一定是有什么特殊的东西进入有智力的观测者的脑内才导致了波函数的坍塌。

## ◆ 我想，因此

这仍然是哥本哈根解释，或者至少是它的一个经久不衰的变种。派尔斯（正如我们所看到的，他是一个保守的哥本哈根学者）认为：“直到这样一个时刻，即当你最后意识到实验已经给

出了一个结果时，你才可以抛弃一种可能性，而保留另一种可能性。”\*

正是这条思路使得约翰·惠勒认为宇宙的存在仅仅是因为我们正在注视着它。从知识的观点来看，在这种解释当中，量子力学描述是明显的，意识的存在是绝对重要的。尽管这种思想也来源于哥本哈根解释，但它并不认为量子世界与经典世界之间的差别与系统大小有关系。这个想法的问题在于，究竟在什么地方划出那条区分量子世界和现实世界的分界线呢？牛津大学的罗杰·彭勒斯在他的书《皇帝新脑》中指出（依我的观点看，这种说法并不具有说服力），引力在某种程度上与这种差别有关系。引力是一种非常微弱的力。对于像电子这样的实体，它完全可以被忽略掉。也许，你可以沿着这条思路想下去，当足够多的物质出现使得重力的作用比较显著时，它就破坏了一个物体的“量子性”，而使它成为日常生活中的“经典”物体。彭勒斯发展了一套更为复杂雄辩的理论，其中包括信息是如何在黑洞中消失又如何通过量子行为在宇宙别的地方得到补偿。但他的整个理论框架是很不令人信服的。稍微合理一些的是大卫·玻姆的建议。他认为热可能会使得量子世界的边界线变得模糊。沿着这样的思路思考，每个原子和每个电子都在不停地做着随机的热运动。一旦它达到了一定的大小，包含了足够多的、相互拥挤在一起的粒子，它们就会破坏整体的量子性。

那些认为我们所看到的一切都是意识的量子解释者则持有完全不同的观点。他们会告诉你，即使是一个大到像月亮这样的物体，里面充满了原子，这些原子由于重力作用而拥挤在一起，并

\* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》，第 73 页。

且在不停地做着与温度相应的随机的热运动，在没有人观察它时它仍然不存在。康奈尔大学的戴维·梅尔曼是沿着这条思路讨论问题的物理学家之一。他们说，当没有人观察它的时候，月亮并不是简单地消失了，而是像在第三章中所描述的在量子壶中的被离子那样。如果没有人在观察月亮，那么其中所有的原子、电子及其它量子成分的量子状态开始变得不确定。几率波非常缓慢地从它们最后被观测到时所处的状态向外扩散，整个月亮开始溶入一种量子幽灵状态。由于月亮是如此之大，这个过程会非常缓慢。它不会是只花几纳秒，而是要花上几百万年（也许是几亿年）的时间，月亮才能最终溶入一种量子不确定状态。在这发生之前，如果有人观测它，则又会使它坍塌回到一个完好的、确定的状态，它的质心精确地位于环绕地球轨道的某个位置。根据这种观点，月亮（或别的任何事物）作为一个实体存在被解释为量子壶观察效应的另外一个简单例子。

约翰·贝尔简洁地总结了一下这些情况，它指出当一个电子打在闪光屏上时会发生什么样的情况。人们把屏幕上的景象拍摄下来，通过观察照片来获得实验结果：

（对于量子世界和现实世界之间的差别取决于物质的大小这一思想而言），这是一种浪漫的选择。它承认存在一种分界线，不管是尖锐还是光滑……但它并不是将它放在大或小的某个位置，而是把它放在“物质”和“意识”之间。当我试图完成一个关于电子枪的理论时，我们首先要考虑一个发光屏，然后是照相底片，然后是感光的化学物质，然后是实验者的眼睛……然后是（为什么不？）实验者的大脑。因为大脑也是由原子、电子

和原子核来构成，……只要我们的智力足够发达以至于能够解决如此复杂的原子系统，我们就应该毫不犹豫地去使用量子力学。但在大脑之外……是意识。难道意识不是一种物质吗？最后我们肯定会得到一种明显不同于玻璃屏幕和胶片之类的东西。\*

那些试图发展这种观点的量子解释者们提议，在某种意义上大脑本身是一种非常特殊的量子系统，它们以一种整体的，或者，是按非线性方式运作，特别适合于波函数的坍塌。当然，正如加州伯克利大学的亨利·斯塔普曾指出的那样，量子过程也包含了思考和意识。人的大脑神经，在化学上通过传递电脉冲信号而运作，同时也将脉冲信号传过神经元的突触（你可以认为是神经元之间的联结点）。从神经元传出的一个脉冲将激发钙离子的释放，钙离子能够通过间隙并激发下一个脉冲活动。在这个过程中，一个典型的钙离子在 20 亿分之一秒的时间内大约传播 500 亿分之一米的距离。斯塔普说：“用不确定原理简单估计一下，可以知道钙离子的波包将扩散到一个比钙离子本身大许多量级的尺度。于是，单个经典轨道的想法不再适用，原则上必须使用量子的概念。”

一旦指出来，人们就会感到非常真实，甚至是显然的。但在定性上，它与贝尔的评论没有什么区别：大脑是由原子构成的，所以它必须满足波动力学的规律。人脑的这些量子性质并不意味着不会有具有意识功能的人造电脑的出现，尽管曾经有人试图讨

\* 贝尔，《量子力学的可说与不可说》，第 191 页。我必须强调指出，这并不是贝尔在阐述自己关于量子实体的观点，而是在总结维格纳和惠勒等人的观点。

•• 斯塔普，《意识、物质和量子力学》，第 152 页。

论这一问题。毕竟，电子计算机是由原子构成的，它遵从量子力学的规律。如果最终能证明，钙离子扩散出去并进入突触的量子不确定区域是形成意识的一个必不可少的条件，那么（在原则上）构造出具有这种行为的人造电脑将是可行的。

到这里已经足够了。尽管有人沿着这些充满神秘色彩的道路，进一步走下去，但并没有这个必要。我已经向你阐明了哥本哈根解释将把你引向何方，我希望我已经使你认识到哥本哈根解释并不是一个完全令人满意的解释。正如我曾说过的那样，它的成功在很大程度上是由于它是第一个比较全面的、实用的解释这一历史的偶然因素，并且它是由一个很有影响力的人提出的。诺贝尔物理学奖得主莫里·盖尔曼早在 1976 年就指出，尼尔斯·玻尔给一整代物理学家洗了一次脑，使他们相信问题已经解决了。”·玻尔之所以能给一代物理学家洗脑，其中一个原因是在那个时代惟一能同玻尔相竞争的解釋都被数学家约翰·冯·诺依曼所做的一个计算给否定掉了。而事实上，诺依曼弄错了。

## ◆ 冯·诺依曼的愚蠢的错误

冯·诺依曼的错误是非常不幸的，因为看起来这个被抛弃了的量子解释比哥本哈根解释更接近我们的日常观念，物理学家（像大多数科学家一样）是相当保守的。他们都倾向于死守旧的观念，除非有无可辩驳的实验证据迫使他们放弃这种观点。按照这种行为模式，在与哥本哈根解释的直接争斗中，好像另外一种



被称为“隐变量”理论的“导引波”的解释将会赢得最终的胜利。一代物理学家已经成长起来，他们认为隐变量理论才是解释量子实体的标准方法。而由尼尔斯·玻尔提出的哥本哈根解释已经成为昨日黄花。要不是玻尔在老年时已不太清醒的话，他应该有更好的工作出现。

隐变量理论认为，一个电子这样的物质作为一个整体可以以一个真实粒子的形式存在。它在任何时刻都具有通常意义上的真实的动量和真实的位置，但我们确不能无限精确去测量它们。根据这种图象，量子世界中粒子的行为由某些其它现象所支配。这些现象通常用一种新的场来描述。这种场以一种我们不能直接观测的方式在变化着。这个新场的隐变量理论在量子水平上支配着粒子的行为。如果物理学家知道了这个隐变量理论是什么，那么他们将能够预测出测量的真实结果，而不仅仅是各种结果的几率。例如，他们将能够计算出薛定谔的猫是活的还是死的，而不需要打开盒子看一下。

标准的、原始的隐变量理论是于 1925 年由路易斯·德布罗意提出的。德布罗意生于 1892 年，死于 1987 年。他开始他的科学生涯的时间比较晚。部分原因是由于他的教育过程被第一次世界大战所打断。他是第一个意识到电子能够用波来描述的人。在 20 世纪 20 年代中期，他曾试图将电子也可以用粒子来描述这一发现与电子可以用波来描述这一事实合在一起。他已经接近为量子解释找到一条富有成果的方法。但非常不幸。尽管他是法国的一位贵族（他的长兄死于 1960 年，同时他继承了法国的公爵和 Prinz 两个爵位。），但是德布罗意并不具备像玻尔那样的强烈个性。在 20 世纪 30 年代，当他的观点受到质疑时，他并没有非常坚定地捍卫自己的观点。这个观点的实质是对于像电子这样的东

西，它是一个“真正的”粒子，但它的行为却被围绕它的所谓导引波所支配，而导引波遵从量子的几率规则。

冯·诺依曼于 1932 年出版了一本关于量子理论的书。这时这个从来就不为哥本哈根学派认同的想法看来碰到了致命的困难。除了一些其它内容之外，这本书里包含了一个几乎是数学上的证明，这个证明说不存在能够正确描述量子世界中的实体行为的隐变量理论。

物理学家们立即就接受了这个结果，因为冯·诺依曼是当时最为顶尖的数学家之一。他于 1903 年生于布达佩斯。（他最初的名字叫 **Jahann**，后来改叫约翰。）在 1928 年他开创了数学的一个分支，即后来被称之为概率论的理论。这个理论能够通过建立数学模型（一套方程组）来确定赌博游戏的最佳战略——如何才能最大可能地赢，或者说如何才能尽量避免输。由于这个理论在战争游戏和经济模型中的应用，它成了数学上的一大分支。他也是第一个提议用一个有意识的观察者去使波函数坍塌，从而从叠加态中选取出一个量子状态。

冯·诺依曼于 1930 年移居美国，1933 年他就成为刚刚建立的普林斯顿高等研究所最年青的一名成员。（创建这个研究所的部分原因是为爱因斯坦提供一个研究基地。）他参加了计算机的早期发展工作（在某些场合，仍然称计算机为冯·诺依曼机）和原子弹和氢弹的研制工作。尽管他在 1957 年就英年早逝，但他对 20 世纪科学的发展产生了巨大的影响。冯·诺依曼绝对不是一个庸材，但天才有时也会失误。

在字面上这个失误涉及到物体相加的方式。在数学上，如果一个操作的结果与顺序无关，我们就说所包含的方程是可对易的。例如， $3+2$  和  $2+3$  是相同的，所以加法是一种可对易的运

算。如果运算结果依赖于具体的操作顺序，那么这种运算就是不可对易的。例如， $3 - 2$  与  $2 - 3$  不同，所以减法是不可对易的。在量子世界里，即使是加法也并不总是具有可对易的性质。通常事件发生的顺序会影响到一系列相互作用的最后结果。还有一点与烹调类似——当你在烤一块蛋糕时，先加半品脱水，再烤 30 分钟，跟先烤 30 分钟，再加半品脱水，你会得到截然不同的结果。

我不想讨论得太细，但在冯·诺依曼关于隐变量理论不能成立的证明中，他使用了如下的事实：那就是，一个量子系统的特性服从一般的对易法规。而且他把这个法则应用到了量子系统的单个组分上去了。这多少有点类似于：如果说一个班上的孩子的平均身高为 1.2 米，那么就认为这个班上每一个孩子的身高都是 1.2 米。这当然是得到这个平均值的一种可能，但它并不是惟一的可能（实际上，可能性也不是最大的）。认为每个孩子的身高都是其平均值的想法是十分愚蠢的。

要发现冯·诺依曼论证中的错误，同只是取平均这个问题比较起来，需要一定的数学洞察力。但是对于一个称职的数学家来说，这仍然应该是十分明显的。这样一位数学家，格雷特·赫尔曼在 1935 年指出了这个错误。但这并没有引起注意。直到 1966 年，约翰·贝尔才向人们展示了这个论证是建立在错误的假定基础之上。在这之前，其他人都继续相信冯·诺依曼的证明。20 年后，贝尔表述了他对自己这一发现的惊讶：

如果你认真地来看冯·诺依曼的理论，它将会在你手中土崩瓦解。它什么也不是。它不仅仅是错误的，而且是十分愚蠢的……当你将其假定翻译成物理的语言时，你会发现它是毫无意义的。你可以引用我的话：

冯·诺依曼的论证不仅是错误的，而且是愚蠢的！\*

1993年，戴维·梅尔曼指出，或许有一整代研究生曾试图去创建隐变量理论，但他们却被冯·诺依曼的这个证明打入深渊。他说，冯·诺依曼的关于“无隐变量理论的证明”是如此的愚蠢，“以至于我们怀疑那些学生或者那些热衷于这个证明的人是否认真地研究过它”。\*\*

有两个原因使我对这一点进行过一些思索。首先，它说明了物理学家在接受一个观点时可能会像其他任何人一样上当受骗。他接受这个思想仅仅是因为“每个人都知道”它是正确的，并且因为它已经写进了一本著名的书里面，而没有再花力气去亲自检查事实本身。其次，由于冯·诺依曼的证明所产生的广泛的影响，在许多流行的和半流行的量子论述中，以及一些教科书里，仍然宣称隐变量理论是不可能的。即使是在1966年贝尔证实这个证明是错误之后仍是如此。不要相信它们。隐变量理论（或解释）是有效的，但要有一个先决条件。关于这一点我马上就要论述到。令人惊奇的是在20世纪50年代，有一个人敢于试图创建一个这样的理论，他没有被迎头打来的冯·诺依曼的证明所击沉。这个人的名字叫戴维·玻姆，在别人的一些帮助下，经过这么多年的努力，他发展了一套关于量子力学的隐变量解释。这个解释能与哥本哈根解释一样有效地工作，但它却给出了一个关于量子真实性的完全不同的观点。

\* 在奥姆尼的《面试》中，1988年5月，第88页。

\*\* 《现代物理评论》，1993年第65卷第803页。

## ◆ 不可分割的整体

在《原子中的幽灵》一书中，玻姆总结了他自己关于真实性的本质的观点。这种观点是同 *Peirls* 的观点针锋相对的。当被问道他是否认为外部世界独立于我的观察而存在时，他回答道：“每一位物理学家实际上都对此深信不疑。”他继续说道：“宇宙作为一个整体并不依赖于我们，……我并不认为意识会对原子产生重要的影响。”\*

与那些量子先驱者们比较起来，玻姆是后一代的理学家中的一员，这一点可能是重要的。他生于 1917 年，在 20 世纪 50 年代早期他才开始系统地建立一个关于量子解释的新的理论。那已经是在哥本哈根解释确定了其中心地位 20 年之后了。还有一点可能也是重要的，那就是，他出生于美国，并且是在一个远离尼尔斯·玻尔的强大影响的文化氛围中成长起来的。

我这里还有一点关于玻姆的轶闻。我曾经发现他第一次接触科学是在他 8 岁时通过阅读科幻小说开始的。然后他发现了天文方面的书籍。在 30 年以后，我几乎是在同样的年龄，以同样的方式开始对科学产生兴趣。在第二次世界大战期间，玻姆作为一个研究生与罗伯特·奥本海默一起在加州工作并且对曼哈顿工程作出了一些贡献。之后，他到了普林斯顿大学。他开始根据自己对哥本哈根解释的理解而写一本介绍哥本哈根解释的书。正是这种介绍标准解释的尝试使他意识到他根本不知道玻尔在说些什

\* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》，第 119 ~ 120 页。

么，而最终导致了他发展出自己关于量子理论的解释。

大约是在他开始发展这些异乎寻常的观点的同时，玻姆的个人生活开始陷入流民状态。他被国会的非美活动委员会传讯，并且被要求为一些他在曼哈顿工程工作时，他在伯克利所认识的一些科学家的政治问题作证。这是在冷战的前期，即在 20 世纪 40 年代末期，当时美国行政当局怀疑有人向苏联泄漏了原子弹的机密，因而变得十分偏执。玻姆从总体上拒绝回答任何关于他的同事的个人生活方面的问题。他很据修正案第五十条据理力争。而这条法案给予公民以这样的权力：这种作证可能危及公民自身时可以不予以作证。

在那时，这件事产生了一点小小的波澜，接着就被遗忘了。当时反共产主义者已经开始行动起来。两年以后玻姆被冠以藐视国会的罪名而遭到指控，并受到法庭审判。虽然他并没有被定罪，但在法庭受审期间，他却遭到了无端的诽谤。在麦卡锡主义开始盛行的时代，他发现在美国不可能找到一个职位。他移居到了欧洲，在伦敦柏克贝克学院安定下来。正是在那里，在以后的 40 年时间里，他的量子解释取得了长足的进展。

从他对非美活动委员会的反应来看，玻姆并没有违违反当局的规定或触犯到党派的界限（具有讽刺意味的是，他们采用那种似是而非的罪名来指控他）。虽然，冯·诺依曼宣称已经证明隐变量理论是不可能的，但这并没有使玻姆停止他对隐变量理论的研究。他并没有发现冯·诺依曼的错误，但是，通过建立一个实用的隐变量理论，他证明必定存在这样一个理论。要么冯·诺依曼是错的；要么玻姆的理论是错误的。玻姆于 1992 年去世。那时这样替代哥本哈根解释的解释最终开始引起一部分物理学家的认真对待。他对能够看到贝尔的发现——这两个理论哪一个是错误

的已经心满意足了。（当然，贝尔发现了冯·诺依曼的 错误，开 不能证明玻姆就是正确的。但它却给玻姆的理论移去了一块重要的 绊脚石。）

玻姆对量子不确定性的解释是，粒子总有一个确定的位置和速度。任何试图测量这些性质的尝试都将会通过改变与粒子相连的导引波而破坏这些信息。触动一下一个地方的导引波（也许通过测量电子的位置），将立即改变每一个地方的导引波的形状。在它的影响下，将对所有的粒子产生影响。

这里包含了两个关键的概念。首先，由于是导引波的形状决定了如何去影响粒子，所以在任何位置导引波有多强（或多弱）并没有什么关系。只要导引波在那儿，改变它的形状就将影响到粒子。其次，对于一个来源于局域位置的扰动，任何地方的导引波都同时有所反应。这个波本身是非局域的。

这就是我在先前所提到的一个先决条件。在 1966 年，贝尔证明如果你接受非局域性，那么，隐变量理论就能有效地解决问题。艾斯派克特实验是非局域性发挥作用的一个特殊例子——测量一个光子的极化状态，立即决定另外一个光子的极化状态，即使这个光子在宇宙的另一端，也是如此。

当然，你可以问，我是否可以采用哥本哈根解释来描述艾斯派克特实验呢？我确实这样做了。如果说贝尔发现的是只有隐变量理论要求我们接受非局域性，那么这将是 一个足够强大的理由使我们抛弃这种量子解释。但是，他发现的并不是这样。他发现的是，对量子真实性的任何解释都必须包含非局域性。

严格来讲，这有点太简化了。贝尔发现，如果他的著名的不等式被违反了，那么这就意味着要抛弃“局域真实性”这个概念。在这个词组当中“局域”意味着不存在比光速还快的联系；

“真实性”是指这个世界独立于我们的意识而存在。艾斯派克特实验（和其它实验）通过证明自然违背贝尔不等式来说明必须从这二者中取一。这个结论比你最初意识到的还要戏剧性，因为事实上贝尔不等式根本不依赖于量子力学。如果贝尔不等式被违背了，那么就必须抛弃局域真实性，即使量子力学是完全错误的，也只如此。艾斯派克特实验的结果表明，不论你用何种科学理论来描述这个宇宙，它都不是“局域的真实。”如果你希望相信存在着一个真实的世界，那么没有非局域性是绝对不行的；如果你希望相信任何通讯的速度都不能大于光速，那么你将不能获得一个独立于观察者的真实世界。

生于 1928 年、死于 1990 年的贝尔比玻恩更远离量子先驱者们的那个伟大时代，他从来就搞不懂人们为什么会轻易地接受哥本哈根解释，并将其奉为圣典。贝尔曾说过：“德布罗意和玻恩的关于粒子和波的观点，在我看来是如此地自然和简单，它以如此清楚和普遍的方式解决了波粒二象性的难题，这些观点居然如此普遍地不受人注意。这对于我来说是十分令人惊奇的。”\* 并且他根本不理睬传播速度比光还快这些思想，即使这意味着时间的倒退。他说，如果有必要回到以太的想法上去（或者，至少到一个更好的参考系中去），那么他宁愿放弃爱因斯坦的狭义相对论，也不愿意放弃真实性的思想：

人们希望能获得一个关于这个世界的现实一些的观点，希望能够谈论这个世界，就像它真的在那里一样，即使没有对其进行观察的时候。我当然相信存在一个

\* 贝尔，《可说和不可说》第 191 页。



世界，在我之前它在那里，在我之后它仍将在那里。我相信你也是这个世界的一部分。我相信，当物理学家们被哲学家们逼到了墙角时，绝大多数物理学家会采纳这种观点。\*

玻姆进一步发展了这样一种思想：任何事物都与其它的事物相联系着，并且随时通过导引波受到所发生的其它事件的影响。玻姆认为，一些看起来相互独立的客体，它们之间好像没有什么联系。但在实际上，它们都同一些潜在的起作用的过程相对应着。一个非常简单的类比可能就是在舞台上的舞蹈者由于灯光的作用而投影在两个方向相反的屏幕上的影子。如果你只能看到这些影子，那就好像它们在以某种神秘的方式在发生相互作用，似乎包含了一种超距离作用。实际上它们都对应着一个潜在的、更深层次的实体。玻姆的思想得到了发展，在后期，他提出，这个世界背后基本的序由一个场来构成的。这个场又是由无穷多的相互叠加的波来构成的。这些波的叠加产生了局域效应，那就是我们觉察到的粒子。

所有这些想法，特别是导引波的思想使人们禁不住联想到理查德·费曼提出的量子力学的“对历史求和”的方法。其中导引波的思想认为，导引波在宇宙中无处不在，并且导引着相应的粒子。不是说“光子”沿着所有可能的路径到达镜子，然后到达我们的眼睛，从而形成一个反射的像。我们可以这样说，“导引波”沿着所有可能的路径传播，然后“告诉”光子应该走哪一条路径。费曼刚好比玻姆年轻一岁，从时间和空间上都远离哥本哈根

\* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》第 50 页。

解释，在哥本哈根解释提出数十年后，他提出了新的观点。然而由于某种原因，直到最近人们才感觉到费曼的思想似乎比玻姆的思想更有声望。（更有声望，并不是真正充分地尊重。即使是现在，仍有许多物理学家认为采用“对历史求和”的方法来解决量子力学问题显得有些怪异，尽管它确实能解决问题。）然而，这两种思想在概念上都与另外一种解释量子真实性本质的奇怪的理论相关联。这种理论不仅涉及到非局域性，或是沿各种可能轨道传播的光子，而且涉及到一个宇宙的无穷列阵，这个宇宙列阵满足各种可能的量子选择的各种可能结果，它们以一种确定的非局域方式完成这些行为。（尽管这些并不总是为这种解释的倡导者所承认。）

## ◆ 宇宙的增生

由于显而易见的原因（如果它们还不显而易见的话，那么它们马上就会变得显而易见），这种解释被称之为“多世界”解释。它早就是我所喜爱的一种解释。部分原因是由于哥本哈根解释从来就没有给我留下什么深刻的印象，而这种解释好像是它最好的替代品；部分原因是它为科幻小说的创作提供了一个极好的机会。但是，关于多世界解释的情况已变得越来越复杂，就像它变得越来越流行一样。并且它最终像变形虫一样分成了三个不同的多宇宙理论。同时，正如我在序言中所阐述的那样，一个更好的解释已经发现，开始吸引那些在过去的 40 年里对已有解释不满意的人。我现在已经不再像过去那样对多世界解释十分热衷了。但它至少仍与哥本哈根解释不相上下，而且仍为科幻小说提供着

十分丰富的背景，所以它仍然不失为一个美妙的解释。

多世界解释的基本观点就是在每一个时刻宇宙都面临着一个选择。整个宇宙分裂成多个它自身的拷贝。有多少个可能的选择就有多少个这样的拷贝。描述这个思想的一个简单方式是借助于具有悠久历史的薛定谔的盒子中的猫。在那个思想实验中，具有两种选择。要么放射性原子发生衰变，猫就死亡；要么它不发生衰变，猫仍然活着。请记住，传统的哥本哈根解释说，除非是一个有智力的观察者打开盒子看一下，要不然这两种选择都不是“真实的”。直到打开盒子这件事发生之前，在盒子里的任何东西都处于一种叠加态之中。于是在测量之前，猫不是死的，也不是活的。多世界解释说，当系统面临选择时，这两种选择立即变成真实的。宇宙分成了两个。在宇宙的一个拷贝里，实验者打开盒子发现了一只活的猫；而在另一个宇宙里，实验者打开盒子发现了一只死的猫。关键的一点是，根据这个解释，在实验者来观测之前，在盒子里的猫是真正的活着或者真正的死了。这里并没有什么神秘的叠加态，也没有在观测的那一时刻波函数的坍塌。每一个观测者都认为他（或她）是在惟一的宇宙里，这儿并没有办法使得两个宇宙中的人相互交流。

多世界解释是在 1957 年由休·埃弗雷特发展的。当时他正是约翰·惠勒指导下的一名学生。在那时，惠勒赞同这个观点。尽管惠勒是导师，而埃弗雷特是学生，但多世界解释有时被称为“埃弗雷特 - 惠勒理论”，而从来没人称其为“惠勒 - 埃弗雷特理论”。从这一事实可以隐约看出惠勒当时对这种解释的热情相对较低（与他“惠勒 - 费曼吸收理论”的热情相比）。几年之后，惠勒对多世界解释的看法就变了。他认为，尽管这种解释能像哥本哈根解释一样精确地预言各种实验结果，但它携带了太多“形

而上学的包袱”，而不能被严肃认真地对待。这个反对是一个感觉的问题。态的叠加及波函数的坍塌这一整套东西也带有他自己的形而上学的包袱，并且有些人（包括我自己）发现，这个包袱比起多世界解释让人更加难以接受。但惠勒的看法也确实有一点道理。

问题在于多世界解释的原始形式要求存在无穷多的宇宙。在每一次劈裂时，每个宇宙都劈裂成无限多的真实的版本。就好像是宇宙中的所有原子和粒子都面临着量子选择的问题，都同时沿着各种可能的路径走向未来。人们对于宇宙劈裂的通常看法为——可能存在一个“平行的世界”，在那里南方赢得了美国国内战争，如此等等。正如我所说的，这为科幻小说的作者们提供了令人兴奋的素材，至少在人类生活方面，这好像是足够合理的。每个人都喜欢对一些历史关节进行推测“如果怎么样”，会发生什么不同的结果。但是，如果我们容许每一个细小的量子选择都以各种可能的方式得以实现，这样是合理的吗？如果不合理，而影响人类历史的重大选择便是宇宙增生的结果，那么我们便又回到那个老问题——如何划出量子世界与现实世界的分界线呢？我们又要为量子选择的函义而迷惑了：是不是在量子选择产生影响之前，需要有一个有智力的观察者来观察到它呢？

尽管存在一些困难，一些宇宙学家还是接受了这个思想，并且使其逐渐清晰化。这个思想在埃弗雷特提出之后的近 30 年时间里一直处于枯萎的状态。这些宇宙学家对这个思想表现出这么高热情的原因是多世界理论最大的一个好处就是它既不需要一个有智力的观察者，也不需要系统之外的一个测量仪器来使波函数发生坍塌，从而创造出实体。我们曾一度为“维格纳的朋友”所迷惑——如果维格纳的朋友打开盒子，察看了猫是死的还是活

的，但他并没有告诉其他人，这样这位朋友也处于叠加态，直到维格纳问了观察到了什么为止。然后维格纳也处于一个叠加态，直到另外一位朋友问他实验的结果为止，如此等等，一直无穷。所以，难道不是叠加态使得宇宙成为真实的吗？

惠勒曾经讨论过，我们的观察（或那些有智力的观察者）现在可以在一定程度上追溯到过去，使宇宙的波函数坍塌，一直进行到最初的大爆炸。（在这一点上，多世界解释就携带了太多形而上学的包袱而不能被认真地对待。）但是既然我们是这个系统的一部分（在这里系统是指整个宇宙），那么这个讨论就是可疑的。要使宇宙作为一个实体而不是作为一个叠加态而存在，哥本哈根解释严格要求一个宇宙之外的观察者来使波函数发生坍塌。所以一些宇宙学家已经转向多世界解释，宁愿相信真正存在着许多个宇宙，每一个都有自己的空间和时间，它的起源都是大爆炸。这样以来，宇宙的数学描述就变得非常复杂，但是沿着这个思路已经取得了一些进展。例如，研究者斯蒂芬·霍金建议，尽管存在无限多种宇宙，在某种意义上这些宇宙肩并肩排列着，然而一般的那种宇宙，最有可能在其中找到我们自己的那种宇宙，就应该看起来与我们真正生活在其中的这个宇宙非常接近。

在 20 世纪 90 年代，多世界解释最强有力的支持者可能是牛津大学的戴维·多伊奇。他将这个解释描绘为“量子理论的最简单的解释”，\* 并且他使用多世界解释的一种形式去从另一个角度解释了双孔实验的过程和结果。

如果你以通常的方式用单一的光子来做这个实验，并且得到了干涉图样，这看起来是很自然地告诉我们，某种东西同时穿过

\* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》，第 84 页。

了实验的双孔，对这个现象有着不同的解释：几率波解释、导引波解释、光子自身神秘地同时存在于两个（或更多个）地方。无论何时去观察，我们发现的都是一个完整的光子，并且仅仅通过一个狭缝。（当然，相干图样便随之消失了。）多伊奇指出相干图象就好像是这样形成的：（假设我们正在观察）鬼光子正在通过另一个狭缝，它与真正的光子发生相干。然后他又说道，其实这个额外的光子一点也不“鬼”，它是一个真实的光子，它是沿着隔壁那个宇宙中的一条量子路径行驶的真实光子。

根据多伊奇的观点，在双孔实验中，当光子面临一次选择——从哪一个孔穿过时，宇宙就劈裂成两个。在一个宇宙中光子沿一条路线前进，在另一个宇宙中光子沿另一条路径前进。等穿过小孔之后，我们再把光子的两条可能的路径合并为一条，于是它们便相干并产生相干图样。根据多伊奇的观点，在这样做的时候，我们又将两个宇宙合在了一起——这是对运行弗雷特原始思想的发展。只有在这种实验中，当光子正在飞行的时候，宇宙才以两种分离版本的形式存在。在双孔实验中即使是一次只发射一个光子，我们也确实是观察到了相干图样。多伊奇将观察到的这个事实作为如下结论的证据：关于宇宙方案的各种可能的量子形式确实在以某种方式“肩并肩”地存在着。根据这种表述，多世界解释看起来有点像费曼的“对历史求和”的方法。但是各种历史的真实性如何呢？

多伊奇说，他已经构想出一个实验，这个实验将能告诉我们其它的宇宙是否真的存在。这个实验现在尚不能完成，但在随后的几十年里是有可能完成的——在人的有生之年肯定可以完成，如果计算机技术继续以目前的速度发展的话。

他的建议是建造一个计算机“大脑”，他可以在量子水平上

直接意识到发生了什么。这个超级大脑的任务是观察量子系统。这个系统恰好具有两个可能的测量结果。这个测量可能是对光子极化的测量。根据在实验中光子的设置方式，它有两种可能的方位。如果多伊奇的多世界理论<sup>\*</sup>的版本是正确的，那么这个超级大脑将劈裂成两个它自身的拷贝，每一个记录一种可能的测量结果。这个超级大脑记录的并不是它所能观察到的一切，而仅仅是记录它正在观察的那个惟一的测量结果。

在两个并列的现实中，这个大脑精确地记下完全相同的事情，这表明它正在观察惟一的现实。然后通过某种相干的方式把这两个现实归并到一起。（可能是通过使光子的极化状态再次向上爬。）多伊奇说：“如果传统的解释是正确的，那么在这个超级大脑慎重考虑期间，应该只有一个宇宙没有消失而保留下来。”就像在进行量子测量的过程中波函数要发生坍塌一样，那样的话将没有干涉现象出现。但如果多世界解释是正确的，那么即使是这个大脑仅仅记录下了一个中间态，干涉现象也应该存在。但是大脑并没有记录下这两种中间的可能性中的一个，它仅仅记录下了一个中间的量子态。如果已经记录下它正在观察的是哪一个中间态（精确地等价于检测光子通过哪一个小孔），那么这个现实就成为确定的，就不能再与它的对应物相溶合并产生相干。”超级大脑所做其它事情的一个重要结果就是它要彻底忘却它所观察到的是哪一种可能性。”\* 实验结果——两个共存的中间态相干涉，但是记忆却存在于“一个”单态当中。所以宇宙必定分成了两个。

尽管它的简单性非常吸引人，但多世界理论的任何一种版本

\* 本段中的引文出自戴维斯和布朗的《原子中的幽灵》，第 99 页和第 100 页。

都还存在着困难。最引人注目的是彻底的非局域性。如果我们做一个双孔实验，并且允许干涉图样出现，那么根据多伊奇的观点，你可能会看到宇宙的劈裂和重新合并完全是局域的，发生在实验室的一个角落里，宇宙的其余部分对它没有什么明显的影响。如果我们察看光子从哪一个小孔通过的话，就会阻止相干图案的出现，这就意味着宇宙已经将其自身劈裂成两个拷贝，每一个给光子提供一条可能的路线。光子通过哪一个小孔可能在整体上对这个宇宙没有什么明显的影响。从原则上讲，这个劈裂立即改变整个宇宙的量子态。

看起来这并没有难倒多伊奇，因为他对时间的理解与我们的日常观念——事物从过去到现在，再到将来格格不入。在《制造真实》这本书中他说，根本不存在时间“流”，并没有孤立的现在时刻，除非是在主观上这么认为。他说，如果时间真正在“流动”的话，那么必定存在着第二种时间以此来测量“现在”从某一个时刻移动到下一个时刻的方式，同时也必定存在着第三种时间以此来测量那个时间，如此等等。（他的这番话是对 20 世纪 30 年代 J.W. 杜尼提出的一个论断的回应。）在过去与将来之间存在着差异，因此，我们会很容易地将一个人从婴儿、少年到成年的照片以正确的顺序排列起来。但这并不足以意味着任何事物实际上都是从过去走向将来。多伊奇认为，在其它时间的快照和其它宇宙的快照之间并没有基本的区别，“过去”和“将来”都是埃弗雷特的多世界中的特殊情况。

这些正在将我们拉入深水区，我不想就此冒险了。因为首先，我并没有被多伊奇对多世界理论的改进所说服，并不认为它就是理解量子真实性的最佳方法，再进一步细讲下去，看来这种思想对于我们对时间的理解也没有多大帮助。



我没有被多伊奇的论断说服的一个原因，就是在这个理论中，实际上发生了什么事情与测量、观察和智力仍有相当密切的关联。在“超级大脑”实验中，如果大脑记录下的仅仅是它正在观察的一个现实，而没有指明是哪一个，那么将会产生相干图案；然而，如果大脑记录下的是它正在观察的那一个现实，将不会产生相干图案。这样，我们便又回到了那个关于光子的迷惑：如果不去观察的话，它将同时经过“两条路径”，而如果去观察的话，它将仅仅沿一条路径前进。符合个人角度来说，我更喜欢埃弗雷特理论的原始版本。在那个理论当中，宇宙不断地劈裂成现实的多个版本，在不同的版本之间不能交流。但是，关于这个基本的主题，仍有一些其它的观点，在我转到其它主题之前应该先提一下。

## ◆ 量子主题的变化

自从我开始写《寻找薛定谔的猫》到现在，多世界理论已经在量子解释方面占领了越来越多的领地。这主要是因为我曾经提到过的那些宇宙学问题。在 20 世纪 90 年代中期，关于这些思想的嗡嗡声主要与两个相关的话题有关。这两个话题都是这个主题的变形，它们是“多意识”和“多历史”解释。

在由多世界解释所张开的可能性当中，某些感兴趣的思想可以通过快速浏览所涉及的研究者而获得一个大概的了解。我已经提到了牛津大学的多伊奇；其他人包括迪特尔·策和埃弗雷特、朱斯（海德堡大学）、克劳斯·凯费尔（苏黎世理论物理研究所）、乔纳森·哈利韦尔（麻省工学院）、沃伊切赫·楚雷克（洛斯阿拉

莫斯国家实验室)、塔努·帕德马纳班(孟买的塔特研究所)、默里·盖尔曼(加州技术研究所)、詹姆斯·哈特利(圣巴巴拉的加利福尼亚大学)、大卫·阿尔伯特(哥伦比亚大学)和巴里·洛(路特格斯大学)。1991年10月份,《当代物理》杂志发表了楚雷克的一篇文章。其中论述了这个工作的一个方面。这篇文章引发了这么多的回信,仅仅是《当代物理》选出来发表的,加上楚雷克的回信,就足足占用了这个杂志的8页。在20世纪90年代,物理学界对这些思想还有相当的兴趣。

楚雷克写的这篇特殊的文章还描述了某些描述量子现实性的方法的另外一个方面——“去相干”现象。这个现象与我们实际所掌握的关于一个量子系统的信息量及完全确定那个量子系统所需要的信息量有关系。

我们拿一个电子作为例子。氢原子的一个电子的状态需要三个数来完全确定。这三个数相应于三个自由度(为简单起见忽略了电子的自旋)。这有点像要确定在房间内漂浮的气球的位置恰恰需要三个数;与相邻两面墙和地面的垂直距离。要确定更复杂的系统便需要更多的数,因为它们含有更多的自由度。一般来说,要确定一个量子态所需要的数的数目等于系统中粒子数目的三倍。

帕德马纳班使用传统的猫的例子将这个问题讲解清楚。\*他指出一个重一千克的猫可能包含大约 $10^{26}$ 个原子。所以即使我们忽略了每个电子的行为,要确定这个猫的量子态所需要的数的数目也将是 $10^{26}$ 的三倍。我们对猫的描述并不仅仅停留在这个水平上。当我们说“有一只猫蹲在屋子的角落里”时,将有许多与这

• 《新科学家》1992年10月10日。

个描述相匹配的量子态。

根据这种思想，忽略很多自由度的效应就是使物体——在这种情形是猫——的行为与经典物体类似，而不是与量子物体类似。我们通过忽略物体的自由度而使其行为经典化。根据这个解释的支持者的观点，即使是在双孔实验中这个规律也是正确的。当我们在观察光子从一个小孔通过时，实际上忽略的另一个小孔的存在，这样就使得系统的行为经典化了；当我们允许光子同时“看”这两个孔时，使用了能够用以描述系统的所有信息，这样系统就表现出量子力学的行为。

当我们开始忽略系统内部的大量自由度时，系统的行为便表现得越来越经典化。这个理论表明，如果我们能设计出一个实验，测出确定一只猫所需要的所有参数，那么我们将会发现猫的行为是量子力学的，就像一个电子一样，它将存在于一个联合态，在其中它既是死的又是活的。<sup>\*</sup>

是我们的无知使系统的行为经典化，物体越大，它包含的量子实体就越多，我们对其就越无知。这很自然地告诉某些研究者：“去相干”理论可以很好地解释为什么整个宇宙的行为就像一个经典系统。

“多历史”理论就从这里开始登场了。曾经在“宇宙是如何到达现在这种状态的”和“将一些稳定原子和一些不稳定放射性原子放在一起将会发生什么现象”这两个问题之间作了一个类

<sup>\*</sup> 帕德马纳班，《新科学家》1992年10月10日。

比。随着时间的流逝，不稳定原子将会衰变，从而转化成长寿命的原子。这样，不管开始时是按什么方式混合的，最终留下的都是一些稳定的原子。量子力学允许我们这样认为：在大爆炸之后，出现了关于宇宙的各种可能的量子态。楚雷克说：“只有那些稳定的状态被留了下来。”从效果上看，哪种形式能够存活下来完全取决于它们与自身的相关程度——那些能够自恰的历史比那些具有内在的不可预测性的历史更加能够存活下来。这些恰好就是那些最接近经典描述的历史。楚雷克将这种规律称为“可预测性筛子”，并且说：“事实证明，那些通过可预测性筛子挑选出来的纯态就像大家熟悉的相干态。”\* 用帕德马纳班的术语来说，这个宇宙具有“多个历史”。我们对其它宇宙的无知导致了宇宙表现出经典的行为。这又是对费曼的“对历史求和”方法的强有力的回应。这个理论的新的要素就是要求我们所感知到的历史应该是自恰的。在我们的记忆和对过去事件的记录之间的关联在楚雷克的解释中是一个中心的概念。在这个图景当中，我们所感知到的不是整个宇宙的波函数，而是宇宙的一支或多支的少数几个特性。这些特性与观察者所给出的对这个世界的描述中的所有事件都是自恰的。尽管存在一些其它的，为一些观察者所不知道的历史，但是观察者们可能会记住一些事情，他们可能会与其他观察者们就宇宙的“这个”历史是什么样子达成共识。

在 1993 年后期，量子物理学家提出了一个可行的实验方案。这个实验能揭示这样一个问题：历史是真的存在呢，还是仅仅是目前这些记忆的一个自恰的集合。这个实验是贝尔不等式的时间对应。一些物理学家已经指出，用来描述在同一时刻发生的分离

\* 《当代物理》 1993 年 4 月。

的事件的贝尔不等式，可以转过去描述发生在同一地点（在同一个量子系统中）的随着时间依次发生的一些事件。洛沙拉莫斯国家实验室的胡安·帕斯，圣菲研究所的冈特·马勒已经证明，这可以使这种思想转变成一个切实可行的实验，以此事确定历史是否真的以我们平时所认为的那种方式存在。

他们提出的这个实验涉及到对一些完全相同的备用系统的受控测量。理想的实验对象是铍离子。铍离子有一套很确定的能级，并且已在相似的实验——在第三章中所提到的“量子芝诺效应”中应用过。不过在这里，伴随着铍离子的那些电子将在四种不同能级之间跳跃。

所需的离子这样来准备：用激光驱动电子，使之在选定的两个能级之间连续的振荡，然后对电子进行激发，使之从这两个能级之一跳到两个更高的能级之上。这个“时间贝尔不等式”预言，最终落在不同能级上的电子数目以某种确定的方式依赖于各种可能的转变被激发的次序。

这是一个切实可行的实验。帕斯和马勒已经告诉我们对于系统状态的测量如何才能揭示系统确实到达了那个状态。常识告诉我们，必定存在一个连续的历史。在其中，电子从初态出发，以确定顺序通过几个中间态，到达末态。就像当时贝尔在建立他的方程时要使之符合常识一样（贝尔不等式的违反证明确实存在着“距离远一些的幽灵般的运动。”），描述这个实验的等价方程的建立也要符合常识。如果实验结果符合“时间贝尔不等式”，那么量子世界就符合我们的常识。如果实验结果不满足时间上的贝尔不等式，那么这将证明根本不存在确定的中间态。这正像帕斯和马勒所指出的，“在实际的测量事件之间（任意地选择初态和末

态来测量），历史不是现实的一个元素。”<sup>\*</sup>

与贝尔检验的空间版本相类似，如果这个不等式被违反了，那么量子事件的初态和末态将通过时间相关联，而没有经过任何中间态（没有随着时间连续演化的轨道）。艾斯派克特实验表明，量子整体的行为就象它们之间的空间不存在，（除非我们对量子世界的所有理解都是错误的。）这个新的实验将表明量子整体的行为说明它们之间的时间不存在。

到现在为止，量子物理学家们期望在做实验的时候，这个不等式将不成立。实际上，这个实验与量子点观测实验是如此的相似。到你读到这本书的时候，这个实验可能已经完成了。我对此深信不疑：实验结果将像量子物理所预言的那样，与常识不符。

实际上，并没有像听起来那么可怕，因为这需要一个纯的量子系统。当一个系统中涉及许许多多粒子时（例如一个人或猫），如果“去相干”的思想是正确的，那么“量子性”将被抹平。所以正像帕斯和马勒所说的：“可以通过增加与环境相互作用的强度来使得不再违背时间不等式”<sup>\*\*</sup>。历史，尽管对一个电子来说并不是真实的，但对于历史学家来说，则可能是真实的。

看起来量子物理总是这样——存在其它解释，一派认为，尽管历史学家（和我们中的其他人）可能会“记住”一个相干的历史，但这并不意味着真的只存在一个的惟一的历史。大卫·阿尔伯特的工作使另一派——“多意识”的思想开始登上舞台。这个思想指出，当一个有智力的人与一个量子系统相互作用时，这个有智力的人的大脑自身便需要有这个量子系统的复杂性所确定的

\* 《物理评论快报》第 71 卷（1993 年），第 3235 页。

\*\* 帕斯和马勒，《物理评论快报》 71 卷（1993 年）第 3235 页。

一个复杂性。就像多伊奇所假设的超级大脑，当它去“看”每一种可能的量子结果时，它就劈裂成许多种状态，但是每一种劈裂的意识仅仅知道一种实验结果。根据阿尔伯特的观点，如果你真的去做“盒子中的猫”这一实验，那么当你打开盒盖时，你将真的能看到两种实验结果，你的大脑将认为这两种结果都是真的。你的意识的这两个方面将不能相互交流它们之间关于实验结果的感觉和信条。

我几乎不能认真地对待这个问题。首先，它将意识和智力的本质问题又拉回到量子辩论中去了。其次，这看起来好像是从量子世界的中心特性——从实验结果的概率本质下面“抽走了地毯”。如果每一种可能性都被我们的一个意识真正感觉到，那么，当我们说一种结果的可能性比另一种结果的可能性大时，这到底又意味着什么呢？如果我们严肃认真地来对待这些思想，那我们将真的滑入最后的补救的境地。我们根本没法看到拿的出手的量子解释。但是，在他们提出这样一个问题——“我们关于现实的任何一个模型是否都应该严肃地对待？”之前，还有一两点应该提一下。

## ◆ 绝望的建议

如果你想寻找异端的话，并不需走得太远，罗杰·彭罗斯就是一个。在《皇帝新脑》这本书中，他问了一个合理的问题：“意识对于测量的进行确实是必要的吗？”他给了自己一个合理的回答：“我认为只有少数量子物理学家会同意这个观点。”（第227页）然后他便进一步去发展他自己关于这个主题的观点了。

他同意这个观点：一个像电子这样的粒子实际上是在空间传播开来的，而不是集中在一点上。彭罗斯说，人们宁愿相信“概率”是在空间传播开来的，也不愿相信电子自身是这样。然而在 252 页上他说，在双孔实验中，“我们必须承认这个粒子实际上同时在两个地方！根据这种观点，这个粒子实际上同时穿过了两个狭缝。”他的结论是，“我相信量子理论的谜底必定在于寻找一个更加完善的理论”，他特别提到了非局域性的迷惑。

在目前所提出的绝大多数其它的合理的量子理论解释中，非局域性是一个怪物。其中一种思想主张放弃对量子过程中所发生的任何事情的描述，例如在双孔实验中光子是如何通过双孔的。它认为量子力学是一种纯粹的统计理论，仅仅描述大量相同测量的结果，即一个系统的结果。这种系统解释说，我们可以问这样的问题：一千个放射性原子在经过一个半衰期之后会出现什么样的情况呢？我们会得到正确的答案：其中的一半衰变了，而另一半没有衰变。但我们不能问：一个孤立的放射性原子在经过一个半衰期之后会出现什么样的情况呢？

在几十年之前，量子物理学家只能处理大量的量子实体，这种方法看起来是合理的。现在，在实验中可以使光子一个一个地发射，而观察到这些光子与其自身的相干。此时这种方法看起来就有些愚蠢了。然而，这种方法却受到伦敦皇家学院的约翰·泰勒的赞同。他说：“其它解释都不能令人满意。”他还特别指出：“我发现多宇宙解释是奇怪的。不，对不起，我是一个嗅觉迟钝的物理学家。既然我们不知道在其它的宇宙里发生了什么，就不要把它们加进来。”\*

\* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》第 109，106 页。



（根据我的观点）解决量子神秘性的一个更令人绝望的尝试是在 20 世纪 30 年代由约翰·冯·诺依曼完成的。这种方法指出，日常的逻辑不能用于量子世界。在乔治·布尔之后，日常的逻辑被称为布尔逻辑。乔治·布尔是一位爱尔兰数学家，他生于 1815 年，去世于 1864 年，是第一个使用符号语言和思想来描述纯逻辑过程的人。在由这些思想发展起来的数学逻辑中，术语“与”和“或”都用数学符号来表示，逻辑运算可以用数学方程写出来。解决量子神秘性的“量子逻辑”方法指出，像“与”和“或”这样的术语在量子世界中的含义与在在日常生活中不同，所以让一个光子选择从哪一个狭缝通过表现出不同的逻辑意义。海因茨·帕格尔斯描述了将一个人的大脑用电线连起来，根据量子逻辑进行操作时，对量子世界的反映是：

当我们告诉他们关于双孔实验的一些事时，他们仅是笑——他们不知道问题之所在。现在，我看到了量子逻辑的麻烦是什么——它比通常的布尔逻辑更严格。你不能使用量子逻辑，这正是你对物理世界的不可思议一无所知的原因。采用量子逻辑，就好像是当你发现了“地球是圆的”的证据时，却硬要发明一种新的逻辑来维护“地球是扁平”的说法。\*

一个更加有吸引力的思想是由约翰·贝尔提出的，他说导引波理论与埃弗雷特理论之间没有什么不同。\*\* 埃弗雷特原始建议

\* 帕格尔斯，《宇宙密码》第 180 页。

\*\* 贝尔，《可说与不可说》第 15 章。

的核心内容是每一个观察者由一个量子“记忆态”来定义，这个观察者能够记住一个更加相干的或更加不相干的“历史”。在贝尔的讨论中，后来提到了产生多个平行宇宙的分支现实思想，贝尔认为这是一个不成功的、不必要的附加成分。他说，埃弗雷特的要点中能够拿的出手的是我们不能够进到过去，而只能进到记忆，这些记忆本身就是宇宙瞬时量子态的一部分。

贝尔说：“宇宙的倍增是没有节制的，不用多大作用就能缩成一个。”他仍然保留着“用波方程来描述的一个潜在的宇宙列阵”的思想。这就像导引波理论，虽然在任何一个时刻都只有一套与波相伴随的变量是“真实的”，但波本身从未产生局域化或“缩减”。贝尔说，要求每一个宇宙都是真实的就好像是希望在充满电磁场的空间中的每一点都找到一个带电粒子。他强调指出，埃弗雷特解释将现实描绘为量子波方程各种可能的解的一个分支，不同的构形之间没有任何匹配，既然没有构形之间的匹配，那么就没有时间“流”，那么“就没有与一个特定的现在相匹配的特定的过去”（多伊奇就持这种观点。）

波函数的基本结构不是树状的。在目前的一个特定分支，过去某一时刻的一个特定分支及将来的某一个特定分支之间没有匹配。而且，这种看法似乎也是合理的：以前各种分支的融合以及由此所导致的相干现象都是量子力学的特性。在这方面，一个精确的图象不具有任何树状特性，而是像费曼所说的“对各种可能的历史求和。”

贝尔这番话并不是支持多世界思想，他仅仅是在尽量把自己

的观点表示清楚。他指出：“埃弗雷特用记忆代替过去的作法是极端的惟我论行为——它用模糊的感觉来代替大脑之外的万事万物……如果对这样一种理论也得严肃认真地对待的话，那么我们将很难再认真地对待其它任何事情。”但即使是贝尔本人，他也很难彻底丢掉这个思想。在他同一本书的后面（第 194 页），他说道：“我差不多可以视其为愚蠢而抛弃。然而……它没准可以为“爱因斯坦——波多斯基——罗森之谜提供一点与众不同的说法，因而还是有必要把它弄得更清楚一些，看一下是否真的如此。”（在同一页上）。如果有人说：“我从来就没有真正理解互补性，我还在为这些自相矛盾的说法而苦恼。”如果有人敢于将冯·诺依曼的“没有隐变量”的论断视为愚蠢的而抛弃掉，那他就快赞同多世界解释了。即使是贝尔本人也承认，尽管导引波理论在概念上很清晰、很简单，但它并没有解决量子世界的一个本质特性——非局域性。而任何一个真正令人满意的理论都应该能解决这个问题。

有两个原因让我回到关于多世界解释这一不同的观点：首先，在这些传统的解释当中它仍然是我所喜爱的一个。如果让我从目前存在的这些解释当中选出一个最好的，我还要选择它；其次，贝尔关于“在现实的多世界版本当中事情是如何进行的”的解释中，清楚地点明了时间在决定我们对量子世界的理解方面的地位。关于时间的处理有点技巧。这个技巧与量子世界的本质有着密切的联系，与协调量子力学的方程和现实世界的方程的问题相联系。

这已经将我们带入解决量子迷惑的一个完全不同的方法中了。从效果上看，这种方法从现实世界的规律出发，企图探索量子世界的某种真理。但是在我介绍这种新方法之前，很有必要花

点时间考察一下量子力学与相对论之间关系。任何一个描述这个宇宙如何运作的真正的好理论（人们所寻求的“大统一理论”）都应该将这两种伟大的理论以某种方式统一起来，但这些并不是我在这里所想讨论的。（在什么地方）这两种理论看起来不相容，至少我想考察一下是在什么地方量子理论看起来与狭义相对论不相容。

## ◆ 相对性的一个方面

是贝尔又一次将这个问题讲清楚了。狭义相对论的主要概念是物理世界和物理规律对所有的观察者都是一样的，不管他们是如何运动的（记住，在狭义相对论中我们处理的是常速运动，而不是加速运动）。这就是所谓的“洛伦兹不变性”。正如我们在第二章当中所看到的，在爱因斯坦推出他的大作之前，洛伦兹并不是惟一个研究这些现象的人。艾斯派克特的实验告诉我们，我们必须放弃局域现实的概念。要么“除此之外”的宇宙并不真正存在，要么有某种超过光速的通讯，爱因斯坦的“幽灵般的超距作用”出现了。贝尔提出，解决这个迷惑的“最便宜”的方式就是回到爱因斯坦之前那种相对论。这种理论是由洛伦兹等人建立的，它假设以太是真正存在的。

根据这些思想，存在着一个预先选好的参考系，由于测量仪器在运动方向上发生变形，因而我们无法测出相对于以太的运动。因为存在着一个预先选定的参考系，所以这种考察事物的方式的值在于，它表明尽管在这个参考系中运动速度可以比光速快，但在另一个参考系中这也就是一个光学幻觉。在这第二个参考

系中，作用效果的传播速度比光速快，沿着时间的反方向传播。如果存在一个预先选定的参考系，那么，在那个参考系中，时钟将以一个选定的速率滴答滴答地运行下去，这样牛顿的绝对空间和绝对时间一下子就全部储存下来了。只有在爱因斯坦的相对论当中，所有洛伦兹坐标系都是等价的，超过光速真正意思是沿着时间的反方向传播。

贝尔发展了这些思想，这些材料构成了《量子力学的可说与不可说》的第九章。他将爱因斯坦以前的预先选定一个参考系的思想同我们不能检验相对这个参考系的运动这一实验事实相联系，弄出了洛伦兹转换方程的这种通常的形式。所以（第 77 页）“在两个作均匀运动的系统当中，不可能通过实验的方法测定哪一个是静止的，哪一个是运动的。”贝尔指出，爱因斯坦的相对论在哲学和形式上都不同于洛伦兹的版本。哲学上的区别在于，既然不能够说这两个系统哪一个是真正静止的，哪一个是真正运动的，那么“真正静止”和“真正运动”便失去了意义。只有相对运动才是重要的。形式上的区别在于爱因斯坦是从——对于相对作匀速均匀运动的观察者而言，物理规律看起来都是一样的——的假设出发，以一种简洁、优雅的方式推导出了洛伦兹转换公式；而不是从实验证据出发，走了一段更长的路才达到同一个目的。就像哥本哈根解释的和多世界解释对量子问题给出同样的“答案”一样，洛伦兹的相对论和爱因斯坦的狭义相对论在所有的实际情况中都给出同样的“答案”。但对于事情是如何进展的他们给出不同解释。

贝尔的提议是革命性的还是反动的，这依赖于你自己的看法。这肯定不是当今物理学界的主流观点。正如他指出的，至存在着一条道路可以走出非局域性的困境而不需要回到爱因斯坦

以前的相对论。他告诉保尔·戴维斯说：“你知道，理解这种情况的一种方式就是认为世界是超确定性的。”\* 换句话说，一切都是预先定好的，包括在实验者选择什么样的测量这类问题。如果自由意志完全是幻觉，这就使我们走出了危机。但是如果严肃认真地对待这样一个理论，……

需要指出，狭义相对论并不是理解世界的最好的方式，对此我们并不感到太吃惊，因为它的名字已经告诉了我们，这不是相对论的最终理论。与广义相对论不同，它是不完备的，它没有考虑加速运动或引力的情况。

现在，我下决心不去涉及广义引对论的细节。但这里我还是要提及两个突出的特点。广义相对论根据时空的曲率来描述引力的。在这个理论当中，并不是来自太阳的某种神秘的超距作用（称为引力）把地球控制在它的轨道上的。太阳是时空的一个凹陷，就好像是将木球放在一张拉紧的橡皮膜上所发生的那样。地球绕太阳的转动，是沿着弯曲时空中阻力最小的方向进行的，就像玻璃石子绕着木球在橡皮膜上形成的凹陷滚动一样。从原则上讲，太阳（或其它任何东西的）引力的影响在宇宙中向远处延伸。当然由太阳而导致的空间弯曲会随着你远离而减小。质量在时空中的晃动，会产生以光速向外传播的波纹就像你在上下晃动木球时，在张紧的橡皮膜上得到的波纹一样，这些波纹会改变引力的作用。这些引力波的存在是爱因斯坦广义相对论的一个预言，这个预言最近已经被对双脉冲量系统的研究所证实。在这个系统当中，两颗密度很大的星在它们相互的轨道上运动，它们以引力辐射的形式耗散掉大量的能量，以至于它们的轨道周期发生

\* 戴维斯和布朗，《原子中的幽灵》，第 47 页。

可观的改变。轨道的改变量与广义相对论的预言符合得很好。这个发现是如此重要，其发现者（罗色尔·休斯和朱·泰勒）在1993年荣获诺贝尔奖。

引力以光速传播，在某种意义上物体的引力影响看起来是非局域的。根据一般的图象，引力场无时不在空间中各处延伸。这可能与几十年常常让科学家们苦恼的另一个问题。

惯性与质量有关。在没有摩擦的空间中，你推一下物体，它将沿着你推的方向运动下去，直至碰到另一次推动为止。使一个物体的运动方向发生改变、加速或减速是需要能量的。这一点是如此的重要，以至于以常速运动的观察者的洛仑兹不变参考系被称之为“惯性系”。然而物体是如何知道它的运动有没有改变呢？

在一个几乎完全的、只含有一个粒子的宇宙当中，运动将是无意义的；将没有可以用来测量运动的参考点。只要宇宙当中存在另一个粒子，那么就存在用来测量运动的参考点了。如果宇宙当中只有一个粒子，就很难看出它具有任何惯性。到底是仅仅增加一个粒子就能“开启”第一个粒子的所有惯性呢？还是随着粒子数的增加惯性逐渐增加呢？没有人知道。但是在宇宙当中，真实物体的实际行为——它们的惯性是对推和拉的响应。——看起来是表明它们正在“测量”它们相对于宇宙中所有物质平均位置的速度。

在奥地利物理学家恩斯特·马赫之后，这种规律被称为“马赫原则”。当爱因斯坦正在发展他的广义相对论时，这个原则对他产生了重要的影响。具有讽刺意味的是，尽管爱因斯坦作了巨大的努力，但广义相对论实际上还是不能解释马赫原则或者说惯性的起源。更具讽刺意味的是，尽管他曾经激发过爱因斯坦对相对论的热情，但他却并不喜欢爱因斯坦的理论。迷惑仍然存在

着。一个物体在被推了一下之后，它是如何立即对推力产生的影响作出鉴定，并做出相应的响应的呢？我们又回到了超距作用的幽灵的现实——不过这次不是在量子理论中，而是在爱因斯坦自己的杰作——广义相对论当中。

狭义相对论不允许超过光速的通讯方式存在。它被看作是一个关于宇宙的不完备的理论。正如贝尔所指出的，狭义相对论和洛仑兹的理论出于完全相同的实用的目的。不过后者允许比光速快的信号存在。另一方面，广义相对论是一个比狭义相对论更令人满意的、全面的理论，看起来它自身就具有非局域性。并且，我敢保证你已经注意到了，如果马赫原则的背后具有某些真理的成分的话，那么不管物理上的以太是否存在，宇宙当中都存在一个预先选定的参考系。

我们知道，宇宙正在膨胀，预先选定的参考系由宇宙当中所有物质的平均分布来确定，在这个参考系当中，膨胀也在各个方向均匀地进行。我们也知道宇宙起始于大爆炸。大爆炸是一个大火球，它使宇宙中充满电磁辐射。这种辐射逐渐冷却，已经成为仅仅只有  $3\text{K}$  ( $-270^{\circ}\text{C}$ ) 以下温度的一些非常微弱的无线电噪音。至今宇宙中还充满着这种辐射——著名的宇宙微波背景辐射。如果一个观察者相对于宇宙前景辐射来说是静止的，那么他相对于宇宙中预先选定的参考系也是静止的。（在某种意义上所有的电磁辐射都可以叫做“光”。）光自身为我们提供了一个预先选定的参考系。

剧情越来越丰富了，后面我还会回到其中某些主题。不过，我首先要介绍一种看待量子力学古老迷惑的一种新方法。



## ◆ 一个与时间有关的实验

时间的本质对于我们对世界的科学理解具有基本的重要性。在量子物理当中，宇宙的“未测量”态处于各种可能状态的叠加当中，从原则上来说，物理学必须同时考虑所有那些可能的状态。在由多伊奇等人所发表的多世界理论的现代版本当中没有宇宙的分支，因为所有的可能性“一直”存在着——存在无限多个宇宙，所有这些宇宙同时向前演化。量子测量的过程不是使宇宙产生劈裂，而是以不同的方式改变可供选择的宇宙，这是因为在不同的宇宙当中实验结果是不相同的——在一个宇宙当中猫是活的，在隔壁那个宇宙当中猫是死的。在实验进行之前，两个宇宙当中都各有一只活猫（事实上，直到实验完成之后这两个宇宙才成为可分辨的。）在这种情况下，拥有“时间之箭”的惟一一种意义便是世界的多种状态比其它状态更复杂。多次不同的量子测量的一个结果——复杂性存在于将来，而简单性存在于过去。

当许多粒子聚集在一起，并且允许它们之间相互作用时，与系统复杂性（描述这一特性的物理学分支称为热力学）相关的特性便产生了，这可能是使时间之箭诞生的地方。举一个经典的例子，当一个玻璃杯掉落在地上时就会被摔碎。在下落当中它所获得的能量转化为热能，使地板的温度轻微地升高。我们从来就没有看到过相反的过程：地板将能量传输给破碎的玻璃杯碎片，将它们重合粘合起来，然后使玻璃杯再回到桌上，同时地板的温度轻微地降低。然而在原子和分子水平上，不管是牛顿的还是量子的动力学方程都是可逆的。

复杂性、时间之箭，以及序如何产生于混沌，这些已经被普里高津很好地描述过。普里高津于 1917 年生于俄国，当他在 12 岁的时候到了比利时。他于 1977 年获诺贝尔化学奖。他曾经花了很长的时间来提出一种关于宇宙如何运作的新解释。普里高津已经发展了非平衡系统的数学模型。他的这项工作与生命的起源和演化直接相关，也可能与在量子测量过程当中发生了什么迷惑具有直接关系。

普里高津的主要观点是，从实验中得到的、基于复杂系统行为的热力学定律是真正的现实，小球碰撞这一具有明显时间对称性的行为仅仅是现实的一个近似。（相互碰撞的小球是描述原子如行运动的一个朴实的模型）。需要唯象地来考虑的是热力学的定律，而不是牛顿（或者薛定谔）的定律。当一个系统可以用牛顿方程精确描述时，这个系统就是“可积的”。单个行星围绕一个星体的轨道是可积的，结果我们就可以计算出这个星体在将来或过去任一时刻的位置，只要目前用来描述轨道的参数和行星的位置给定。但只要在这个系统当中增加一个物体，“三体”问题便产生了，这些运动方程便不再是可积的。

涉及到多体问题时，不仅仅是数学方程变得更难解了，而是不可能精确求解，即使在原则上也是如此。通过很小的时间步长，对三个物体在将来某个时刻的位置作合理的近似计算是可能的。你所需要做的便是假定其中的两个是静止的，计算出在它们引力的共同作用下另外一个是如何运动的。在“让它静止”之前你只能让它运动一点点，然后计算出其余两个物体之一其下一个时刻的位置。然后再以同样的方式计算第三个物体的位置，如此等等。这是一个冗长乏味的过程。即使拥有快速的计算机，也不可能是完全精确的。实际上，这种做法在计算太阳系中行星的

轨道时是十分有效的。这是因为太阳是如此之大（事实上，它比把所有的行星加在一起还要大），以至于在计算中它的影响占了绝对优势。如果其中一个行星的质量与太阳一样大，那么即使是近似计算，也将变得难以进行。当你以不同的顺序进行操作——先让其中的两个静止，计算第三个下一时刻的位置时，你便会得到不同的“答案”。事实上，没有办法精确地预言三个物体的轨道随着时间如何演化。类似的，没有办法精确地计算出它们是如何从过去演化到现在的。（更不用说那些比我们的太阳系还要复杂的系统了。）

当只涉及三个相互作用的物体时，那也是真的。请记住，一只猫包含的粒子数高达  $10^{26}$  个，而不仅仅只有三个。这些漂亮的、关于时间对称的量子理论方程可以应用到相互作用的二个或三个实体，但根据普里高津的观点，“不可积性”是任何实际的复杂系统的一个基本特性。如果某物体是不可积的，那么便不可能沿着时间往回绕去追塑它的过去，即使在原则上也是如此。即使是地板中的原子协调行动，将能量输给破碎的玻璃片，同时其温度降低，破碎的玻璃杯也不可能被重建出来。

在某种意义上，普里高津的方法将人们带回到考虑像原始的哥本哈根解释之类的东西。他说，与物理学相关的事情就是使用实际的、“经典”的设备（盖革计数器等等），而对于设备当中的一些问题，我们只能以近似的方式来理解。这正如阿拉斯泰尔·雷所说的：

根据定义，我们从来没有接触过可逆的、没有被检测过的纯的量子“事件”。经典物理学建立在不容置疑的假设基础上。这个假设的内容是，尽管事件是可逆

的，但人们总是可以说发生了什么事情。即使是爱因斯坦的相对论，也广泛地依赖于信号的发送。信号的发送是明显不可逆的测量型过程。当我们试图去构建一个超越了对可逆领域的各种可能观察的图象时，我们也许不应该感到吃惊，我们的模型涉及到一些明显的自相矛盾，例如波粒二象性和在 EPR 实验中观察到的空间非局域性。\*

这些都是一些迷人的新思想。这些新思想尚远没有被广泛地接受，但它们必定会成为下一个十年当中争论的主题，必定会以某种方式得到发展。需要强调的是有这种可能性，在哥本哈根解释中起作用的是宇宙中不可逆改变的建立。在哥本哈根解释当中，“测量”决定了量子世界跳跃的方式，在我看来，困难就在于这里还没有一个关于非局域性的真正令人满意的解释。在雷提到的那个 EPR 实验中观察到了非局域性。我们将对量子世界感到吃惊，但在普里高津的方法当中没有非局域性的任何迹象。然而在双孔实验和艾斯派克特实验当中揭示的非局域性是量子神秘性的核心。正如诺贝尔奖获得者——剑桥大学物理学家布赖恩·约瑟夫曾经评论道：在现实世界中违背贝尔不等式的实验证据是近期物理学中最重要的发展。\*\* 然而在你描述测量活动时，对光子 A 的测量同时决定了光子 B 的状态，尽管光子 B 可能位于宇宙的另一面。

所以，普里高津的理论并不是最好的。但我确实同意可递

\* 雷《量子物理》，第 109 页。

\*\* 引自戴维斯和布朗的《原子中的幽灵》，第 45 页。全文未引用。

性、一些基本方程的时间对称性对判定描述量子现实的一个理论是好理论来说是最重要的。引用了普里高津的另一个特别合适的评论：“一个基本粒子，与其名字相反，并不是一个“给定”的物体；我们必须创建它。”\*

我们所“知道”的关于量子世界的一切都是基于现实世界中事物的相干和观察。物理学家研究模型，（他们希望）这些模型是对现实的某种近似。然而他们却往往忘记区分模型与现实。当我们在考虑世界运作方式的时候，我们的先人之见和文化背景使得我们考虑问题的方式带上了某种相应的色彩。为了真正理解我们对量子世界到底知道些什么，我们确实应该花点力气去理解“理解”自身到底意味着什么。别担心，我并不想去研究神秘主义、哲学和心理学中的这些模糊不清的东西。是各种量子现实确定了什么是最好的理论，以及为什么是。在评价这些量子现实之前，在最广义的意义上考察一下我们是如何思考问题的，仍然是非常有价值的。

\* 引用《量子物理》第 109 页，全文未引。



## 第 五 章

# 思考思考事情

物理学家的世界是由光子组成的。这在两个层次上是正确的。首先，普通事物是由原子组成的。为了了解我们周围的事物以及我们自己身体的活动情况，我们不需要过分地担心精细的实体。原子几乎是一个空的空间，它是由电磁力一通过交换光子一而聚在一起的。一个典型的带正电荷的原子核直径大约为  $10^{-15}$  米，而原子比这要大十万倍，即大约为  $10^{-10}$  米。如果说原子核直径是 1 厘米，那么从原子核到其周围外层电子的距离整整为一千米。根据量子电动力学理论，原子的外层部分，即其与其它原子相互作用的部分，是纯粹由电磁力或通过交换光子而聚在一起的电荷或电子组成的。

对我来说，我现在正在打印这些文字的计算机是一个实体。而实际上，它是连接几个微小的且分离的量子实体的电磁力网，即一个相互作用的光子结构。但当我说，我“觉得”计算机是一个实体，或我“看到”计算机是一个连续的整体时，这意味着什

么呢？

当我们感觉到任何事物——当我在计算机上敲键盘时我的手指感觉到一个反作用——我们实际所感觉到的是事物内的电子与我们指尖的电子的相互作用。当我们看到事物时，很显然我们是利用光子与我们眼睛的原子（或更准确地说，我们眼睛原子的外层部分的电子）的相互作用而看到它们的。当我们所感觉到的和看到的（或听到的、闻到的、尝到的）信息传到我们大脑时，它们是利用电脉冲沿着神经网络而传输的。如我们所知，这些穿过空隙的神经脉冲称为神经元的突触，它们是通过化学反应而激发的。而化学反应本身是一个涉及原子外层的电子并且由电磁场的量子过程而驱使的过程。我们大脑本身的工作取决于类似的化学过程，即取决于光子的交换。

由于这些限制，人类的感觉是不适合探索原子内部的量子世界。粒子不能够被直接地看到、尝到、闻到，或接触到，而它们的相互作用能够借助于多少有些复杂的仪器而探测到，它们的性质能够通过仪表、图表或计算采集的数据而推断出。甚至当我们说现在我们有可能“看到”电磁场所俘获的单个原子时，实际是指我们能够看到从其所在位置发出的有颜色的光线，根据存在我们称为原子的某种实体来解释，其结构由多次实验和借助这类那类仪器的多次观察而推断出。这种我们称为原子的实体实际上是一个理论模型。我所谈到的构成一个原子的所有事物——一带正电荷的原子核、电子包及起交换作用的光子——是一个能够解释以前的实验观察并有可能预言将来实验现象的自给理论的一部分。对一个原子是什么的理解在过去的几百年里发生了多次变化，今天在不同的情况下采用不同的物理图像（不同的模型）仍然是有用的。



“原子”的名称来源于古希腊的一个最终的、不可分离的物质部分的概念。直到 19 世纪末研究表明原子不是不能够分离的，它的一部分（电子）能够从原子中分离出来。后来，一个模型描述原子是由原子核和电子组成，电子绕中心处的原子核转动，这就像行星绕着太阳转动一样。这个模型能够很好地解释电子怎样从一个轨道“跳到”另一个轨道，伴随着电磁能量的吸收和辐射，并产生与那种原子（元素）相应的特征谱线。再后来，电子为波或概率包的概念变得流行起来（因为这些概念能够解释用其它模型无法解释的原子性质），因而对一个量子物理学家来说，古老的轨道模型必须放弃。但这并不是说原子“实际上是”由电子概率包所包围，而其它的模型是无关的。

当物理学家关心普通意义上的气体的物理性质时，例如气体对容器壁的压力，他们更乐于把气体看成是小的、硬的“弹性球”。当化学家通过燃烧某一样品并分析其产生的谱来确定物质的成份时，他们更乐于采用电子绕原子核转动的“行星模型”。然而尼克·希尔伯特在他的《量子世界》一书中放弃了这个模型。

当我的儿子问我世界是由什么构成的时，我肯定地回答道说到底，物质是由原子构成的。然而，当他问我原子像什么时，我无法回答，尽管我花了我一生的时间来探索这个问题。作为一个原子“专家”，每当我为学生画出一个原子的行星图像时，我觉得我是多么不诚实，因为在他们的祖父年代里，就已经知道这是错误的。

行星模型那时是错误的吗？现在是错误的吗？不！至少比起其它的原子模型这不是错误的。希尔伯特对他自己也太残酷了，

\* 希尔伯特著，《量子现实》第 197 页。

对学生的祖父们太残酷了，对整个物理学家们也太残酷了。就像弹球模型在其限定的范围内是适用的一样，行星模型在其限定的范围内也能给出完全满意的结果。任何原子模型从其不能够表征关于原子的独特物理性质的意义上说都是错误的；然而只要它们能够处理原子世界某些方面时，它们就是对的、是有用的。

关键之处在于我们不仅不知道原子“实际上”是什么，而且我们永远不能够知道原子“实际上”是什么。通过一定的方法探测，我们发现在那些情况下它“像”弹性球。用另外的方法我们发现它“像”太阳系。再问第三组问题，我们得到的答案是它“像”一个带正电荷的原子核被模糊的电子包所包围。所有这些是我们从日常世界到建立一个原子是什么的图象过程中的想象。我们建立一个模型，或一个物理图象；然后我们常常忘记我们做了什么，并混淆物理图象和现实实在。因而当一个特定的模型不能够应用于所有情况时，甚至像尼克·希尔伯特这样受尊敬的物理学家也掉进了称为“错误”的陷阱。

物理学家建立量子世界模型的方法是基于日常经验。我们仅能够说原子和亚原子粒子“像”我们已知的某种东西。对一个从未见过弹性球的人，描述原子像弹性球是徒劳的，或对一个不知道太阳系是如何运行的人，描述电子像行星轨道如何转动也是没有用的。

类比和建立模型只是间接的过程，例如，就像我们试图解释在晶格中原子和原子之间如何相互作用的情形。在这样的晶体中，原子被电磁力约束成几何阵列形式。如果一个原子离开其位置，那么在其周围的电磁力作用下，它被推向或拉回原来位置。一个有用的类比是设想所有的原子通过小弹簧与其临近的原子相连。如果某一原子离开其位置，电磁力就像假想的弹簧，其一端

被伸长，将原子拉回原来的位置；同时弹簧的另一端被压缩，把原子推至原来的位置。我们似乎发现了一个很好的模型，可将电磁力在某些情况下看成一个弹簧。

弹簧是什么呢？日常生活中最常见的弹簧是一根金属丝弯成盘旋状或螺旋状。在螺旋状的情况，照字面上说它是钟表机构的一个元件，是物理学家典型的实际模型，这使类比很吸引人。当我们推弹簧时它向后推；当我们拉弹簧时它向后拉。为什么？因为它是由通过电磁力而聚在一起的原子组成的！在我们推或拉弹簧时我们所感觉到的力是电磁力。所以当我们说在晶体中原子之间的作用力像小弹簧时，我们是在说电磁力就像电磁力。

原子是一个如此熟悉的概念，因此，就像这个例子所表明的那样，在某些时候不容易看到这个建立模型过程起作用。当我们看一下物理学家是如何建立亚原子世界的标准模型时，这个过程变得很清楚。很多情况下，不能简单地从日常世界中找出类比，而是从对日常现实理解的二手材料中寻找类比。在原子核（为简单地描述原子它被看成一个带正电荷的弹性球）中，我们发现在某种意义上粒子“像”电子，力“像”电磁场那样作用。但是，电子和电磁场本身被描述成“像”日常世界中的东西，例如弹球，或池塘中的波等等。现实实在是我们使它成为这样——只靠模型能够解释所观察到的现象，它们就是好模型。但是在人们有能力“发现”电子、质子和夸克之前，是否真的是电子和原子在原子中而夸克在原子核中等待去发现呢？还是在量子水平上，是否更可能是现实实在本质上不可理解的方面正处于困境而为方便被冠以像“质子”和“夸克”之类的名称呢？

## ◆ 构造夸克

这个问题是由爱丁堡大学安德鲁·皮克林在他的巨著《构造夸克》中提出的。在这本书的前言中他说：“这里所采用的观点是：夸克的现实性是粒子物理学家实践的结果，而不是相反的结果。”这就是他给出这本书题目的原因。在这里我借用了他的论点的总结。

大多数物理学家所赞成的标准模型认为世界是由四种基本粒子和四种基本力所构成的。总的图象有点复杂，因为粒子（虽然不是力）似乎有四种，构成三“代”，每一代粒子性质相关而质量不同。但就通常的原子而言，四个“第一代”的粒子足够解释一切。电子本身是这些基本粒子之一，与电子关联的粒子称为电子中微子，它们统称为“轻子”。然而，原子核中的质子和中子不能认为是最基本的粒子，它们是由夸克构成的。夸克是基本粒子。在第一代中（与第一代的轻子对应）它们分成二类，称为“上”和“下”。名称没有什么意义，只是物理学家给它们的编号。这两种夸克也可以称为“爱丽丝”和“鲍勃”。

根据标准模型，一个质子由两个上夸克和一个下夸克来构成，它们由一种基本力结合在一起。而一个中子是由两个下夸克和一个上夸克所构成，以类似的方式结合在一起。因为一个上夸克（除了其它特性）带有一个电子的三分之二的正电荷，而一个下夸克带有一个电子的三分之一的负电荷。质子带有一个单位的正电荷（ $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$ ），而中子不带电荷（ $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$ ），即呈中性。

除了存在着使夸克结合成质子和中子、使质子和中子结合成原子核的强相互作用力，也存在着弱原子核力（按逻辑，称为弱相互作用力），使原子核具有放射性。另外两种基本力是万有引力和电磁力。夸克“像”电子，强和弱力“像”电磁力；通过交换“像”光子的玻色子起作用。在许多情况下这是一个简单和富有吸引力的模型。根据在实验中所给出的预言证明是很有效的。牛顿肯定会赞成它。但是物理学家是怎样构造出这样一个亚原子模型呢？

皮克灵强调的一点是任何理论都不完备。的确，原则上可以设想出任意数量的理论，每一个理论解释特定一组实验事实。物理学家从不好的理论中挑选出好理论的方法之一是用最少的假设解释最多的事实。但是，正像我们在第四章中见到的那样，它仍可能留给你从多种解释中的挑选的机会。按照这种方法某些理论仅仅被看作不如其它理论合理而被抛弃掉。但是任何合理性的提及就意味着一个判断。量子解释的例子再次表明科学判断是多么人为的和沉重的。最为重要的是，纵观科学史，没有任何单一理论能够解释所有的实验事实。很多物理学家声称他们正在寻找一个能够解释一切的理论，或称统一理论；但是如果借鉴一下历史，就会发现他们的研究必将失败。理论和实验总存在着某些方面的差异，这再一次证明，存在一个主观选择以判断哪些差异能够容忍，哪些意味着放弃某一理论。

当然，由于实验本身是难免有错误的，可能会产生与理论的差异。科学家解释某一实验结果（特别是用来探测质子结构的那类实验）的方法在很大程度上取决于他们对实验是如何进行理解，理论的任何不完善可能反映在实验本身的不完善之中（至少我们对实验的理解）。因而科学家需再次判断他们正在测量的是什么。正如皮克灵所指出的那样，像粒子物理这样的学科总存在

着背景“噪音”的问题。另外还存在着其它能够模拟实验学家正在观察的效应，如果可能的话，这必须排除掉。这就像排除掉收音机接收器所接收的背景“噪音”（或“静音”），并使接收器精确调谐到你想要收听的信号。物理学家的确称他们试图要研究的特性为“信号”，就像他们称背景干涉为噪音。要想排除掉任何噪音是不可能的，因而这又出现一个主观判断什么时候实验是足够的好，而剩余噪音可以忽略的问题。

但是，成功孕育着成功。一旦一个理论被证明（或认为是）能够很好地描述事物的规律，它将排挤掉其它理论，这些理论将不再受人注意。光的理论发展即为这样。自牛顿后，粒子学说主宰了一个世纪。但随着杨和菲涅尔，以及随后的麦克斯韦的工作，波动学说排挤掉粒子学说。然而，今天我们看到这两个学说都是对的。夸克理论现在还未像光的波粒二相理论那么复杂。皮克灵说：“通过把夸克等模型解释为实实在在的实体，对夸克模型所做的选择似乎没有问题：如果夸克确实是世界的基本构造单元，那么人们应该去探寻其它可选择的理论吗？”——即使其它可选择的理论也能够解释所有的实验结果。\* 大多数物理学家忘记标准模型只是一个模型，这是很危险的。质子表现行为像含有三个夸克，而不是证明夸克“确实存在”。

威廉·旁德斯通在他的 1988 年出版的《推理的迷宫》一书中写道：

科学家必须谨防非形象化的术语。夸克是假想的实体，说是存在于质子、中子和其它亚原子粒子中。夸克是实际没有的。不仅孤立的夸克从来没有观察到，而且

• 皮克灵著《构造夸克》第 7 页。

（在大多数理论下）一个孤立的夸克是不可能的。如果质子能够分裂，夸克是质子将要分裂的粒子，而质子是不能够分裂的……有人疑惑是否（夸克的假想性质）可能是我们把还没有理解的一个简单现实人为地复杂化了。或许某天某人会发现事情到底怎么样，那时我们将意识到现在的物理是描述这个现实的一个歪曲方法……答案不在天上，而在我们的头脑中。

旁德斯通只部分地评价了这个物理所论及的一切。他没有把——质子、中子及其它亚原子粒子也是通过我们的模型来反映现实的假想实体这个事实联系起来。是的，有可能存在更简单的方法建立模型来解释现在习惯用夸克模型来作解释的物理现象。但是那不是现实“实际上”是什么的方法，而只不过是另外的模型，这就像根据你想要解决的问题，麦克斯韦波动方程和爱因斯坦光子理论都是描述光现象的很好模型，以及原子的弹球模型和行星模型也都是很好的模型一样。

正如我前面所解释的，整个物理学是基于类比和建立模型用来解释用我们自己的感觉不能够探测到的物质世界如何运行的过程。在本世纪 60 年代和 70 年代间建立粒子世界的标准模型过程中所取得的巨大进展是来自于下列两个类比：其一是采用原子核是由质子和中子组成的模型，进而延伸到质子和中子是由夸克所组成的模型；其二是采用电磁力通过交换光子的解释，进而延伸到夸克间的相互作用力是通过交换像光子一样的粒子。由于其与量子电动力学（QED）的类比是如此的准确和精细，这个强（或“色”）相互作用的标准理论被称为量子色动力学（QCD）。这里“色”是因为相互作用所涉及的某种颜色的粒子被冠以颜色的名

称，就像“上”和“下”夸克一样，这里色也是任意的约定，并不表示粒子如我们平常所看到的那样带有颜色。

夸克理论并不是一下子就引起注意的，它开始时并不成熟，并且不是一下子就把反对者扫到一边。在物理学家中它慢慢出现，几乎与他们很好的判断相背立。两位理论物理学家几乎在 60 年代初期同时独立地提出这个想法，但没有一位出来为新理论作宣传。其中一位夸克理论的提出者是美国物理学家默里·盖尔曼（1929 年出生于纽约）。他实际上提出了夸克这名称，这来自于詹姆斯·乔伊斯的 *Finnegans Wake* 中的诗句。他在加州工学院工作，已经是一位很有声望的、世界上最伟大的理论物理学家之一了。他已成功地将物理学家已知的粒子按照其性质进行了分类，并且预言了将要发现的粒子的性质。这很类似于德米特里·门捷列夫在元素周期表中把化学元素加以分类，并预言了 19 世纪将要发现的化学元素的性质的方法。这是另一个类比的重要性的例子，也是科学的传统性。

对排列图案的研究也使盖尔曼意识到质子和中子的许多性质可以依据三个基本粒子（现在我们称之为夸克）不同的组合方式来解释。盖尔曼几乎不情愿地于 1964 年在《物理快报》杂志上发表了这个想法，论文仅两页长。他不情愿发表的一个原因（这也是大部分物理学家几年内不愿意认真地接受夸克的原因）是因为三个粒子应该具有电子电荷的分数倍，而电子电荷在那时被确定是最小的电荷单元。今天没有人担忧夸克具有电子电荷量的三分之二倍或三分之一倍，但是在 1964 年“任何人都知道”这是不可能的。所以盖尔曼几乎以放弃他自己想法的方式总结了他的论文。他建议，实际上，三个粒子能够很好地解释质子和中子的性质只不过是数学技巧而已，是一种处理质子和中子某些性质的



方法，并总结到：\*

如果夸克是有有限质量的物理粒子（想象而不是纯粹数学意义上的实体，因为它们的质量会趋于无穷大），想象一下夸克的行为方式会很有意思的……在很高能量加速器中寻找具有  $-\frac{1}{3}$  或  $+\frac{2}{3}$  电荷的德定夸克，或者寻找具有  $-\frac{2}{3}$  或  $+\frac{4}{3}$  电荷的德定双夸克会有助于让我们确信实际夸克是不存在的。

甚至“发明”夸克的理论家也相信夸克只是虚构，而实际是不存在的！起初听起来并不很奇怪。盖尔曼“发现”夸克的方法是相当数学化的和相当难理解的；他发现方程的某些特征可以通过把质子和中子看成是由三粒子组成的方法来得到解释，但是，他不是从认为这三粒是物理上存在的粒子，而是从数学上的目的开始的。

甚至发明夸克的另一位理论家认为他的创造比较实在，但他发现发展这个思想不是继续他生涯的最好办法。乔治·茨威格 1937 年出生于莫斯科，后移居美国。1959 年在密执根大学获得理学学士学位，然后在加州工学院开始研究工作。他首先作为一位实验物理学家，三年失败后转向理论研究，在里查德·费曼指导下攻读博士学位。如同盖尔曼，他意识到像质子和中子等粒子的性质能够通过把它们看成是由其它三粒子的组合来解释。他把这三粒子称为“骰子点”。但是，或许因为他相对年轻并且刚进入粒子物理领域（因而他不易受传统约束而保守），他更倾向于

\* 《物理快报》，1964 年第 8 卷 214 页。



-

-

-

$10^{-13}$

—

$10^{-13}$

.

60

60

.

•

•

60

1969

•

132

20

.

$\alpha$ —

$\alpha$

60

\*

—

\*

, 407



但是皮克灵下列论述是错误的：

科学家发现这个世界是可以理解的，并造出描述世界的理论；这毫无问题，在给定他们的文化背景下，在他们的历史长河的任何点上，仅稀有的无能能够阻止物理学界的成员给出对现实世界可以理解的描述。然而，只要在复杂的数字技巧上给他们以足够的训练，粒子物理学家使用数学语言来描述现实世界，并不比普通人对他们自己语言的灵活使用感到困难。

换句话说，数学是描述宇宙的最佳语言与英语是写剧本的极佳语言同等重要。正像皮克灵和库恩所说，如果对世界的看法确实是文化的产物，那么，对量子世界有不同的解释就不应该有什么惊讶。在进一步发展这个论点之前，或许其它科学领域中的两个例子能有助于说服你，我们能够用数学描述宇宙，并且我们对用数学来描述现实在很大程度上（或许整体上）是一个选择的问题的解释并不是惊讶的事情。

## ◆ 认识爱因斯坦

数学在描述世界时非常强有力，我自己经常提到的一个例子是：对 19 世纪数学家而言与实际宇宙无关的纯抽象几何概念恰好构成了阿尔伯特·爱因斯坦广义相对论的基石。有趣的是爱因斯坦本人起初并未意识到这点，所以在他看到能够用 19 世纪的数学来建立他的广义相对论模型的曙光之前他不得不强迫自己去研究 19 世纪的数学。

爱因斯坦广义相对论的关键之点是弯曲时空的概念。但是爱因斯坦既不是这个时空几何概念的创造者，也不是第一个设想出空间可以弯曲的人。理解爱因斯坦两个相对论理论（包括狭义相



对论和广义相对论)的一个简单方法是使用几何学语言。正如我们在第二章中所见到的那样,空间和时间是一个四维整体,即时空的一部分。处理匀速运动的狭义相对论理论可以根据一个平坦的四维表面来解释。例如描述像时间膨胀和运动物体缩小等现象的狭义相对论方程在本质上是熟知的毕达哥拉斯法则推广到四维情况下的方程,一个细小的差别是时间使用负的系数。

一旦我们掌握了这点,就不难理解爱因斯坦的广义相对论理论,即万有引力和加速度理论。我们过去所认为的宇宙中物体(例如太阳)引起的力是由于时空结构的变形所造成的。例如太阳在时空几何空间中引起一个下凹型弯曲,地球绕太阳运行的轨道是由于地球在弯曲的时空坐标中沿着最短的路线(即短程线)运动的结果。

当然,要想得到详细的运行轨道需要几个方程,这可以留给数学家去处理。物理惊人地简单明了,这种简单性经常被认作爱因斯坦的“独特性质”代表的例子。

这种简单性没有一个出自爱因斯坦。

首先看一下狭义相对论。爱因斯坦于 1905 年向世界呈现这个理论时,它是一个基于方程的数学理论。那时没有产生多大的冲击力。几年后科学界的大部分人才开始注意它,并对其产生了兴趣。实际上,这事是发生在 1908 年赫尔曼·闵可夫斯基在德国科隆所作的一个报告之后。这个报告于闵可夫斯基逝世后 1909 年发表。正是这个报告第一次根据时空几何学给出了狭义相对论的思想。他的开场白表明这个洞察的重要性:

我要向你们所展示的空间和时间的观点是从实验物理的土壤中生长出来的,在那里有它们的说服力。它们是根本的,因而空间和时间本身注定要暗淡下来,仅二

者的结合才能够保持一个独立的现实。

闵可夫斯基对狭义相对论的简单描述产生了巨大影响。因而爱因斯坦于 1909 年 7 月从日内瓦大学获得了他的第一个荣誉博士学位并不是巧合，同样一年后，他被物理学诺贝尔奖提名也并不是巧合。

在此有一个微妙的讽刺故事。事实上，闵可夫斯基 19 世纪末在苏黎世工学院曾是爱因斯坦的老师。仅仅在狭义相对论提出的几年前，爱因斯坦还被闵可夫斯基说成是一条“懒狗”，“从未为数学动脑筋”。懒狗本人起初也没有对相对论的几何学感兴趣，并且没有抽时间去欣赏它的重要性。由于在苏黎世工学院时他从来不为数学动脑筋，他对 19 世纪重要的数学发展一无所知，因而在他的朋友和同事马塞尔·格罗斯曼激励下，他才开始转到弯曲时空的观念上来。

这不是爱因斯坦第一次从格罗斯曼那里得到帮助。在苏黎世工学院格罗斯曼是爱因斯坦的同龄人。不像爱因斯坦，格罗斯曼是一个很用功的学生，他不仅参加所有讲座，而且记着详细的笔记。这些笔记在爱因斯坦考试前最后拼搏时便排上用场，使得爱因斯坦在 1900 年苏黎世工学院时勉强通过了期末考试。

格罗斯曼知道存在着比优美的欧几里德“平面”几何复杂的几何（甚至多维几何）。而爱因斯坦只有在 1912 年格罗斯曼告诉他时才了解到这个。

欧几里德几何是我们在中学里遇到的那种几何，一个三角形的内角和等于  $180^\circ$ ，两条平行线永远不会相交，等等。杰曼·卡尔·高斯是第一位超越欧几里德，并且知道他正在研究的问题的重要性的人。高斯出生于 1777 年，于 1799 年完成了他的所有伟大的数学发现。由于他不愿费心去发表他的许多想法，非欧几里

德几何被俄国的尼可来·伊万诺维奇·罗巴切夫斯基（他于 1829 年第一个发表了对这种几何的描述）和匈牙利的亚诺西·波罗耶独立发现。

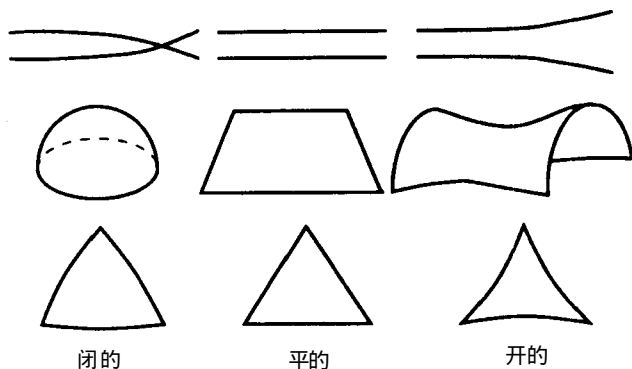


图 20 三种基本几何

空间可以符合三种基本几何之一；尽管空间是三维的，我们可以把它表示成二维的；

空间具有正的曲率，那么宇宙是封闭的；在正弯曲空间中（左图），开始时两条平行（通常意义下的平行）的线可以相交，一个三角形内角和超过  $180^\circ$ ；

空间具有负的曲率，那么宇宙是开放的；在负弯曲空间中（右图），两条平行的线发散，一个三角形内角和小于  $180^\circ$ ；

空间是平的，平行线和三角形满足中学里的几何法则（欧几里德几何）；平坦的空间（中图）是处在正和负弯曲分界线上的特殊情况；我们的宇宙是几乎接近平坦的空间

他们三人实际上想到同一种“新”几何，它适用于我们所熟知的“双曲”面，其形状如一个马鞍或一座山峰。在这样一个曲面上，一个三角形的内角和总是大于或小于  $180^\circ$ ；此时我们可

以画一条线，可以在这条线上标一个点，通过这个点画许多条线，而每一条线都不与第一条线相交，因此它们都与第一条线平行。

然而，全面地提出非欧几里德几何的概念是由高斯的一个学生伯恩哈特·黎曼于 19 世纪 50 年代完成的。他实现了这个题目另一种变形的可能性，即适用于一个球形的封闭表面（包括地球表面）的几何。在球面几何中，三角形的内角和大于  $180^\circ$ ，并且虽然所有的“经度线”以直角穿过赤道，因而它们必须互相平行，但是它们都在极点相交。

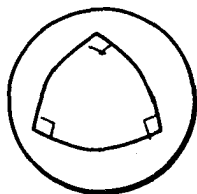


图 21 球面上的三角形

一个球面，例如地球的表面，是一个典型的封闭表面；在一个球表面上，三角形的内角和可以等于  $270^\circ$ ，即三个直角

黎曼于 1854 年 6 月 10 日以《论几何基础中的假设》为题作了一个报告。这个报告直至黎曼去世后，即 1867 年才发表。这个报告涵盖了大量的题目，包括空间曲率意味着什么，以及怎样测量它的可行性定义，第一次描述了球面几何（甚至推测我们所生活的这个空间可能有点弯曲，所以整个宇宙在三维而不是二维坐标中，像一个球的表面一样，是封闭的），而且更为重要的是借助于代数把几何扩展为多维几何。

黎曼 1866 年逝世，由于肺结核病，终年才 39 岁。但是爱因斯坦也不是第二个思考我们的宇宙可能是弯曲的人。按年月顺

序，黎曼的工作与爱因斯坦出生之前的时间间隙正好是英国数学家威廉姆·克利福德（1845 ~ 1879 年）的生活和工作年代。像黎曼一样，克利福德也死于肺结核病。克利福德把黎曼的工作报告译成英语，他在把弯曲空间的想法及非欧几里德几何的详细细节传到说英语的世界中起了很大的作用。他了解到我们生活的三维宇宙就像球的二维表面是封闭的和有限的一样，也可能是封闭的和有限的，但这涉及至少四维的几何。这将意味着，就像地球上的一个旅行者，如果沿着一个方向出发并继续沿着直线前进最终将回到他的出发点一样，在一个封闭的宇宙中的旅行者在空间中沿一个方向出发并继续前进最终将回到他的出发点。

克利福德意识到就弯曲空间而言可能有比包含整个宇宙的这个渐渐弯曲更多的含义。1870 年，他向剑桥哲学学会（当时，他是牛顿旧学院的成员）递交了一篇论文。在论文中他描述了一个地方到另一个地方“弯曲空间变形”的可能性，因而他建议“小部分空间实际上是类似于（地球）表面上（总的来说是平坦的）的小山峰。这就是说，几何学的普通定律在整体空间上不正确。”换句话说，在爱因斯坦出生前七年，克利福德就在考虑空间结构局域变形，尽管他还到不了指出这些变形是如何产生的程度，以及存在这些变形会有什么要的观察结果。而广义相对论理论指出太阳和星球产生时空的下凹而不是仅仅空间上的小山峰。

克利福德只不过是 19 世纪后半叶研究非欧几里德几何的很多研究者之一，尽管他们是他们中的佼佼者，并且具有对实际宇宙而言意味着什么的某些最清晰的洞察。他的这些洞察是相当深刻的，设想一下，如果在爱因斯坦出生前十一年他没有去世，他能走多远。

当爱因斯坦建立狭义相对论时，他轻率地忽略了 19 世纪关于多维几何和弯曲空间这方面的数学成就。狭义相对论最伟大的

成就是它调和了力学和由麦克斯韦电磁理论方程所描述的光的特性（特别是光速不变性的事实），尽管它以放弃牛顿力学并以更好的理论以代之为代价。

由于 20 世纪初，牛顿力学和麦克斯韦方程的冲突是很明显的，所以人们常说狭义相对论是那个时代的产物，如果爱因斯坦在 1905 年没有提出狭义相对论，随后一、二年之内也会有其他人提出。

另一方面，爱因斯坦从狭义相对论，到一个新的非牛顿万有引力理论的广义相对论，被普遍认为是超越那个时代几十年的天才举动。它产生于爱因斯坦本人，因为在那个年代没有任何征兆表明物理学家要面临那个问题。

这可能是正确的；但传统上没有认识到爱因斯坦长达十多年之久的从狭义相对论到广义相对论的道路，这事实上比它能够和应该的道路要曲折和复杂得多。广义相对论是沿着 19 世纪末数学发展的道路自然而产生的，就像狭义相对论沿着 19 世纪末物理学发展的道路自然而产生的一样。

如果爱因斯坦不曾是一条“懒狗”，而是在苏黎世工学院认真参加数学讲座，他很可能于 1905 年提出狭义相对论之后很快提出广义相对论。如果爱因斯坦从来没有出世，完全可能另外某人，或许格罗斯曼本人能够从黎曼和克利福德工作中跳出来，而于 20 世纪 20 年代提出万有引力的几何理论。

若是爱因斯坦懂得 19 世纪的几何那该多好，他会很快完成他的两个相对论理论。那将很显然看出，它们是怎样沿着以前的工作而产生，并且或许不怎么需要爱因斯坦的“独特洞察力”，而只需要他的思想观点适应数学的主流，他甚至可能因为他的广义相对论而获得诺贝尔奖。

这至少是一种说法，它强调了数学的作用。的确，这个说法

是沿着我于 1993 年发表在《新科学家》里的一篇文章而来的。由于那篇文章，我接到在加州圣莫尼卡的 RAND 研究人员布鲁诺·奥根斯汀的电话。奥根斯汀告诉我，以另一种不同的方式叙述这个说法，这有助于使我信服皮克灵关于科学进展规律的观点是正确的。

奥根斯汀告诉我“有些时候，我是威格尼和戴森学派的（“物理科学中数学的不合理有效性”），但是现在我相信你文章所表达的想法能够给出一个强的运行法则。即：实际上每一个数学概念的叙述都在某处有一个物理模型；作为他的研究活动一部分，聪明的物理学家应该被建议有意地和传统地寻找已经发现的数学结构的物理模型。”

换句话说，正如皮克灵所建议的那样，只要给定任何自恰的原始材料，物理学家能够对现实世界给出可以理解的描述。

我必须承认，不是仅仅因为我的文章的明晰和洞察力使奥根斯汀相信情况可能是这样。他已经为涉及著名巴拿赫-塔斯基法则的一个相当含糊的数学分支（他称之为“非标准集合理论”）提供了另外一个例子。这个纯粹的数学工作原来认为与现实世界没有任何关系，现在看来它预言了随后在物理学中发现的情况这个预言情况即为盖尔曼和茨威格的夸克理论。

我将不给出详细细节；因为我对“非标准集合理论”还不甚了解，我不得不相信奥根斯汀说的是对的。实际情况是发表于 1924 年的巴拿赫-塔斯基的工作能够将物体分解成部分，再组合起来构成的物体与原来有些不同。正如奥根斯汀表述的那样，“你可把任意有限大小和任意形状的实体 A 切成几份，不做任何改变，重新组合成实体 B，它也具有任意有限大小和任意形状。”

确实离奇，但是太泛泛以致于没有什么实际价值。所以奥根斯汀对这个特性给了一个特殊的描述——处理实心球。一个具有

单位半径的实心球按如下的方式切成五份，其中两份重新组合成一个单位半径的实心球，另外三份重新组合成第二个单位半径的实心球。这是做这个戏法所需要的最小份数，但是它可以无限地重复，或许你可以猜到下一步是什么。

在《科学与技术思考》的一篇论文中，奥根斯汀给出支配这些数学集合和子集合性质的法则与粒子物理标准模型。——即量子色动力学——描述夸克和“胶子”的法则完全一样。而后者是在巴拿赫-塔斯基法则发表之后半个世纪才建立起来的。建立标准模型的理论物理学家根本就不知道非标准集合理论。读者还记得在这个标准模型中质子和中子是由三个夸克组成的，而把质子和中子连在一起的胶子（等同于量子电动力学中的光子）是由一对夸克组成的。

一个质子轰击一个金属靶能够从靶上产生一群新的质子，而每一个质子与原来的质子相同，这个规律可以准确地用巴拿赫-塔斯基法则来描述；即把一个球切成几份，然后重新组合起来构成一对球。奥根斯汀认为，巴拿赫-塔斯基法则是理论数学“最惊人的结果”，这个观点你也倾向于赞同吧。

叫人感兴趣的是奥根斯汀的类比也给出了预言。就像质子曾经被认为是无结构的弹性球，经过了高能电子探测表明其内部有三个夸克（这也就像卢瑟福探测原子发现原子内部有原子核）一样，实验物理学家最近的计划建议：如果夸克有内部结构，就有可能用更高的能量来探测夸克的内部结构。有趣的是，在奥根斯汀对巴拿赫-塔斯基法则的特殊描述中，五个数学“部分”是一个组合，四部分意味着夸克内部的详细结构，而第五部分是一个点的数学描述。

奥根斯汀并不是惟一对巴拿赫-塔斯基法则隐含着粒子物理感兴趣的人。1982年，罗杰·琼斯在他的《隐喻物理学》一书中



写道：“当  $\mu$  子的行为仅仅同电子一样时， $\mu$  子为什么存在呢……？ $\mu$  子大约比电子重 200 倍……它们（仅）在一个重要的定量可测量即质量上不同。

其它粒子在几个重要的可测量上不同，而电子和  $\mu$  子就像两条线段，它们以相同的方式由基本点构成，仅在长度上不同。电子和  $\mu$  子是具有不同大小的两个球，但它们具有相同的点数……大小本身、测量及点数只不过是表观和隐喻，它们不应因为某些最终不变量而被弄错——它们不应被过度推崇。

在三维测量即体积的情况下，让我们停下来作另一考虑。这就是让人惊讶和自相矛盾的巴拿赫 - 塔斯基法则，即一个任意给定大小的球被分解后再组合成另外一个不同大小的球……一个电子可以经过有限几步变成一个  $\mu$  子。

如果到了当今世界的物质能够用一个数学空间上的某类抽象分布来表示的程度，那么我们是在说这是一个有机的、归一的和混沌意义上的空间。这不是一个没有任何东西的空间，而是一个不同于我们的空间的空间——即另一个隐喻。”

物理学家将采纳这个观点而去建立一个超越夸克——量子色动力学描述现实世界的新的“标准模型”吗？或他们因为这是一个科学的稀奇古怪的次要部分、一个古怪的数学奇品、一个没有任何物理意义的观点而倦怠下来吗？这将拭目以待。奥根斯汀把物理学家对现实世界的描述比喻成神话故事，并且强调只有在能够从可利用的材料中几乎随意地构造模型的观点引起重视之后，物理学家的态度和习惯才能有重大的改变。如果已经发生，这种态度的改变需要很长的时间。但是这很有力地支持了皮克灵关于物理学家提出他们的模型的方法的结论，以及某些其他的物理哲学家已经进一步提出了这种想法，看看这些模型来自哪里，以及物理学家怎样掌握世界。的确，某些物理学家已经沿着皮克灵和

奥根斯汀所指的方向前进，而没有很好地意识到他们正在做的事情的重要性。

## ◆ 描述不可描述的

在已经提及非标准集合理论之后，我想在回到哲学家关于物理学是什么的观点之前给一个有关宇宙论的简单例子。

就像粒子物理学家具有“解释”在极小尺度条件下物理规律的夸克和量子色动力学一样，宇宙论学家也有一个大尺度条件下涉及物质、万有引力和广义相对论的宇宙如何运行的标准模型。宇宙学家的标准模型，即大爆炸理论的最大问题之一，或许最大的问题是在宇宙产生之时存在着一个奇点。天文学家了解到宇宙正在膨胀，因为他们的望远镜表明星系正在互相远离。爱因斯坦的广义相对论预言了这个膨胀，因为理论表明随着时间前进星系之间的空间必须扩张。理论和实验却建议，设想一下在时间上向后移你会发现在很久以前宇宙是什么样；必然存在这样的时刻，宇宙中所有的物质和所有的时空缩成一个点，即奇点。

我们知道，奇点是物理规律崩溃的地方。按照方程，它是一个具有零体积和密度无穷大的点，这是很荒谬的。然而在本世纪60年代斯蒂芬·霍金和罗杰·彭罗斯指出，如果广义相对论能够准确地描述宇宙演化规律（根据所有的证据，包括双脉冲星，确实似乎是这样），那么，在时间之初奇点的存在是无法避免的。今天在我们周围所观察到的这种膨胀与爱因斯坦方程联立证明起初必然存在着这个奇点。

这个令人烦恼的结论是否是因为我们作了错误的类比的结果呢？80年代，霍金回到宇宙起源这个问题上来，并且与其他人

一道试图建立一个结合量子力学和广义相对论思想的模型用来描述宇宙。这个工作使许多宇宙论学家觉得需要对“多个世界”或“多个历史”的思想作某些变形，因为不存在任何方法能够使一个观察者处在宇宙之外，从而把它的波函数从一个叠加态坍陷成一个单一历史。但霍金的方法存在另外一个有趣的特性，即对大爆炸理论给出一个不同看法的一个新类比。

以前我曾说过，在相对论（包括狭义和广义相对论）方程中对时间和空间的处理方式是很不同的。在方程中时间前面有一个负号。但这并不是事情的全部，就像关于直角三角形的毕达哥达斯著名定理（即勾股定理）一样，那些方程是以平方形式处理的。因此，在爱因斯坦方程中，表示空间平移的参数是平方项，即  $x^2$ 、 $y^2$  和  $z^2$ 。而表示时间移动的参数是平方的负数，即  $-t^2$ 。这就是时间不能完全像空间一样来处理，因为在中学就已学过不能对一个负数开平方。我们知道  $x^2$  或  $x$  具有很容易理解的意义，例如 4 的开平方是 2，但  $-t^2$  能告诉我们关于  $t$  的什么呢？例如什么是  $-9$  的开平方呢？

霍金指出宇宙起源时的奇点问题，即时间的“边缘”，能够通过作一个几乎无意义的数学技巧来解决。数学家知道如何做负数的开平方。他们具有一个 200 多年历史的数学标准方法，并且借助于一个简单的技巧能够使它们相乘。他们发明了一个称为  $i$  的“数”，被定义为“ $-1$  的开平方”。因而  $i \times i$  等于  $-1$ 。如果你想知道  $-9$  的开平方是几，你可以说  $-9$  等于  $(-1) \times 9$ ，它的开平方等于  $-1$  的开平方乘以  $9$  的开平方，因而等于  $i \times 3$ 。这样的“虚数”能够像普通数那样运算，例如加、乘、除以及其它运算，它们构成了数学运算的重要一部分。它们给数学家提供了描述不可描述的——负数开平方的世界——的模型。它们的运算法则类比为实数的运算法则。

霍金的大胆举动是指出我们日常时间的概念是错误的，宇宙运行规律的更好模型通过转向使用我们称之为虚时间，即  $it$  的方法来得到。就数学而言，这是一个无意义的变换。它就像一个地图绘制者在向我们提供地球表面情况时转换投影一样重要。例如，传统的墨卡托投影大体上给出各大陆的准确形状，但是扭曲了它们的相对面积；而 70 年代发展起来的彼德投影给出各大陆准确的相对比例，但是歪曲了它们的形状。两种投影（和其它投影）都是在一张平纸上给出地球的整个表面。由于不可能在一张平纸上完整地给出一个球的表面，因而没有一种投影可以说是“正确的”，而其它种是“不正确的。”只是它们不同。

同样，描述在空间和时间域内发生的事件的坐标位置时数学家可以自由地选择坐标系。让我们考虑另外一个地理学的例子。经度是选择相对于穿过伦敦格林威治子午线来测量的，这在历史上是偶然的。航海家也可以选择任何其它的子午线，例如连接地球北极和南极的虚线作为零经度。

霍金转换成“虚时间”不是像上述那么简单，但是它仅涉及数学坐标的选择。他把爱因斯坦方程中时间的参数与其它空间参数建立在完全等同的基础上。如果时间以  $it$  为单位测量，那么，时间测量平方后我们就得到单位  $i^2 \times t^2$ ，即  $(-1) \times t^2$  或  $-t^2$ 。现在我们必须用这个负数乘上出现在爱因斯坦方程中的那个负号，这样就消除了由  $i^2$  而得到的  $(-1)$ ，最后只留下  $t^2$ （记住负负得正）。

这种模型的转换，或选择不同的数学类比，能够使爱因斯坦方程中的时间与空间完全等同，并且可以证明这种朴实的数学变换消除了由方程所产生的奇点。

霍金指出，我们现在要研究膨胀宇宙的方法不是依据时空中由数学的奇点产生并增大的气泡，而是依据画在保持恒定大小的

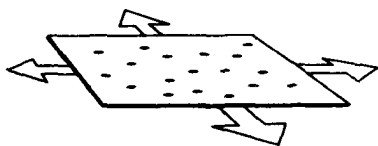


图 22 膨胀的宇宙示意图

膨胀的宇宙可以看成第一块橡胶板在所有方向同时伸展；黑点表示星系，由于星系之间的“空间”在膨胀，星系变得越来越分离——不是因为它们在空间中运动

球表面上的纬度线。在球北极附近所画的小圆圈表示年轻时的宇宙——所有的空间由组成圆圈的线来表示。随着宇宙的膨胀，它可以由从北极到赤道附近的圆圈表示，每一个圆圈比上一个要大，从北极向赤道移动表示时间的“流动”。一旦过了赤道，随着相继纬度圆圈变小，“宇宙”开始缩小，直至在南极消失。

那么在两极处，即时间的开始和终止，会发生什么情形呢？在这些点上球没有边界，尽管我们说时间在北极“开始”。因为时间与空间建立在相同的数学基础上，所以与地球的地理学类比是完善的。在地球的北极，所有的方向却指向“南”，没有“北”的方向——在那里地球没有边缘。在霍金的宇宙模型北极处，所有的时间方向都指向“未来”，而没有对应于“过去”的时间方向——在那里没有时间的边缘。奇点的问题没有出现。

如果你能够在时间上向后旅行而到达大爆炸的时候，你不会消失于奇点中，而是穿过“零时间”的那点（或时刻）并转变方向重新进入未来；这就像在地球北极稍偏南的一个人朝北前进，穿过极点并继续朝相同方向前进，会发现前进的方向指南。依据这个图像，我们可以看出宇宙是一个时空、质量和能量完全自恰的体系，既是从无中膨胀而来也会缩回无中去。

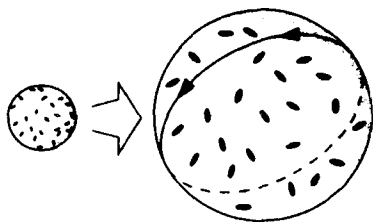


图 23 封闭的宇宙

尽管宇宙非常接近平坦，但可能是封闭的；在此情况下，它可以比喻成一只膨胀的肥皂泡的表面，如上图一样，黑点表示星系；在这种情况下，存在着这种奇怪的可能性，只要沿着直线前进，你可以绕着宇宙转一圈回到你的出发点，这就像绕地球环行一样

所有这些是通过一个简单的坐标变换来达到的，即把时间和空间建立在相同的基础上。不幸的是，用数学术语来表达，关于  $i$  的数传统地称为虚数，这意味着霍金变换的时间坐标是依照称为“虚时间”来做的，这有些像科幻小说中的事，或像爱丽丝漫游记。<sup>\*</sup> 但是，事实上，在数学上这是看待事物受欢迎的方法，这似乎比传统地看待事物的方法在物理上更合理，因为它不含有可怕的奇点。

也存在探索其它可能性的方法。霍金把时间“空间化”；艾亚·普里高津说他的对物理规律的描述方法等效于把空间“时间化”。但是在这里我不想对这个模型给出详细的说明。所有我想做的是指出霍金对奇点问题的解决办法在精神上完全符合奥根斯

<sup>\*</sup> 选择这个术语能带来双重的不幸，因为，事实上，霍金所有的方法把时间当成虚空间；在方程中  $it$  与  $x$ 、 $y$  或  $z$  起同样的作用。

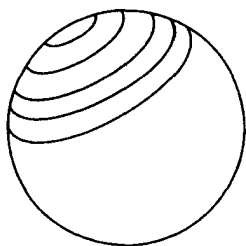


图 24 霍金的时空

根据斯蒂芬·霍金的理论，空间和时间（四维）可以用一个球的表面来表示；在零时间时宇宙开始为“北极”附近的一个极小圆圈；随着时间的延伸宇宙向“赤道”方向转动，并相继增大为大圆圈；然后，随着时间继续向“南极”移动，宇宙开始缩小；但是没有时空的“边缘”，如同在地球的北极没有“世界的边缘”一样；这种表示意为谈论“大爆炸之前”或“宇宙死亡之后”的时间是无意义的

汀关于数学中任何东西都能够翻译成物理上有意义的现实世界模型的观点。物理学是一门技术，就像我们说木材工业是一门技术的意思一样，它从原材料中生产出产品。木工匠用木材做出家具，同样物理学家从数学中建立起描述世界的模型。两个世纪前，当虚数的研究是纯数学的一个活跃的分支时，谁能够猜到某一天它可以用来解释宇宙是怎样产生的呢？

当然，这个应用必须等到物理学家或天文学家建立起一个世界观或模型，用它可以根据虚时间把所面临的问题得到解决。那么，物理学家怎样掌握世界并提出他们对现实世界所给出的描述呢？

## ◆ 了解现实世界

物理学家实际上怎样着手发现（或发明）他们的现实世界模型的呢？最近和最有说服力的答案之一是由南加州大学马丁·克莱格在他的引人入胜的著作《研究物理》中提出的。他察看了一些在 20 世纪后半叶所建立起来的特别的类比和模型，并且指出它们是何等地根基于现代文化（特别是当代这个时期的美国文化），并与前几代物理学家所使用的类比和模型是何等地息息相关——量子色动力学类似于量子电动力学，通过它类似于麦克斯韦方程是最明显的例子。与某些这个工作方法相回应，某些哲学家（自本世纪 30 年代以后著名的卡尔·波普\*）也分析了 20 世纪科学家的工作。但克莱格的背景在物理学，因此，它应引起其他物理学家的兴趣，并且他叙述的故事既是现代的又是特别具有说服力的。

作为一个物理学家，在很多方面克莱格使用物理学术语，但是他把它翻译成日常用语。例如，当物理学家可能根据“自由度”来描述一个系统的性质时，克莱格称这些性质为“把手”，通过它我们可以掌握系统，并且可以得到系统像什么的某些概念。一个简单的例子是充满气体的一个盒子的温度；这是一个自由度，知道了温度就可以告诉我们盒子中气体的某些总的状态。一个单个原子的位置是另一个自由度的例子，但为了知道气体的温度你不需要知道盒子中气体每一个原子的位置。克莱格强调每一件事情都是基于类比；不去试图说明世界“实际”是什么，而

\* 例如，参看波普著，《科学发现的逻辑》。



是描述物理学家怎样（利用自由度提供的把手）去掌握世界并去描述它。世界可能“像”很多东西——波、弹性球，等等——可实际不是那些东西中的任一样。

虽然克莱格使用类比，但比我以前所使用的例子要深入得多。他的富于洞察力的技巧之一是依据一个工厂的车间或一个国家的经济来描述亚原子世界的结构。一个研究过原料怎样进入工厂和产品如何出厂的局外人不能看到产品的实际加工过程，因为它藏在墙的后面。但是一个观察者可以通过比较工厂的输入和输出来推断某些加工过程。墙掩盖了加工过程的详细细节，即墙掩盖了自由度。把工厂减小为一个黑盒子，那么，局外人可以看到一定的输入产生一定的输出。例如，这类比于，围绕一个原子的电子团如何负责其化学特性，而掩盖了原子的内部情况。在化学反应中，起作用的是最外层的电子与另外原子的最外层电子的相互作用，而你不需要知道是什么东西使原子结合在一起。

墙是重要的，因为这样就简化了复杂的情形，并且使人们能够做有意义的物理实验，而不必知道关于系统的所有情形。所以物理学家发明了墙，这种技巧使人相信墙是那种正确的东西。实际上，墙掩盖了尽可能多的自由度，并且研究了改变几个剩余的自由度的效应，即通过系统的剩余“把手”去掌握系统，并且去摇动它的效应。

温度是一个好例子。在许多有关盒子里气体的实验中，物理学家首先做的事情是等到气体的温度达到某个稳定值，即气体处于“热力学平衡态”。然后，当你去研究气体的某些其它性质时，例如研究把气体压缩成盒子的一半大小时气体的压强变化规律（实际上，为进行这个简单的实验，盒子必须与一个具有恒定温度的大物体，即“热源”相连接，以保证当气体被压缩时它的温度不变），你不必担心它的温度。如果压缩气体的同时气体也被

从外部加热，那么要分清所有变化的自由度并且获得气体怎样变化是相当困难的。如果选择了合适的自由度那么情况变得很简捷，反之如果错误地选择了自由度，那么情况将变得相当复杂，以致于无法解决。就像斯蒂文·温伯格所评述的那样“你可以使用任意的自由度来描述一个物理系统；不过如果选错了自由度，那就抱谦了。”

克莱格扩充了工厂的类比，把物理学家关于粒子的概念比喻成工厂里具有技能、活动能力及工资要求等性质的单个工人。工厂的这些性质可以用我们给粒子贴以标记的方法来描述。利用这些标记可以区分粒子的电荷、质量，或它们对相互作用响应的强度。他说：“粒子被指定成局域的和分离的、稳定的和客观的、有名字的和分立的。”在这里需再一次说明，关键点是物理学家不去探索亚原子世界的内部并去发现粒子。他们以弹性球像什么的概念开始，并去询问能够引起粒子响应等等之类的问题（选择自由度）。

在我们试图以朴实的直觉来认识自然界时，可能会问，我们是否为日常的弹性球或墙的概念所误导。我们可能会。但是给人印象的是我们怎样调整我们朴实的直觉，教我们自己去注意日常物体的正确特征，以使用它们为自然界建立模型。

一个好的例子可能是称为自旋的量子性质。当物理学家发现除了质量和电荷以外还需要给电子以另外一个标记时，他们把电子与旋转的弹性球作了类比，因而给出了一个新的标记。这个类比是不准确的，因为如果坚持把电子作为一个自旋的粒子，你会发现它必须转  $720^\circ$ （两圈）而不是  $360^\circ$ 。才能回到它的初始状态。\*

\* 理查德·费曼用一杯茶作模型，给出了一个非常有趣的例子，说明旋转两圈怎样回到初始位置，见《基本粒子和物理定律》第 29 页。

尽管如此，物理学家仍然想象成这个奇怪的特性，即类比于一个弹性球的自旋或地球的自转。

与墙和工人并列的是物理学家世界的第三要素——场。场正好是粒子的对立面，它是展宽的而不是局域的，它是平滑变化的而不是尖立的。场总与粒子连在一起，正如克莱格指出的那样，一个“完整”的粒子是完全自备的，它没有我们可以操作的把手——仅仅因为万有引力场，或电磁场，或其它的场使粒子暴露出来，我们才知道它们在那里。

这仍然不是意味着场像粒子那样是“实实在在的”，或一个电子确实像陀螺那样绕着它的轴旋转。我宁愿说，就像我希望看到的一样，所有的模型都是实实在在的，尽管它们不完善。正如克莱格所说，除了模型之外还有其它现实存在吗？像皮克林那样，克莱格讨论了物理学家学习他们的技巧的方法，以及怎样模仿以前已经证明是成功的技巧做出更大的进步；最有效的技巧之一是假设任何东西都是由更小的部分组成的。他讨论了钟表机构类比的作用，并指出“一个钟表比它的分离部件做的要少的多（或许做的更有趣）”；这是另外一个限定自由度可能是一件好事的例子。但是他没有给出，麦克斯韦是如何经过像钟表系统那样的大小齿轮相互作用的中间步骤来得到他的著名的波动方程的细节。

按照传统，这个步骤认为是可以省略的，就象当病人在没有拐杖的情况下已经学会走路后，拐杖可以放弃一样。而实际上它是起作用的。它或许是乏味的或不吸引人的，但它确实提供了磁力是如何传递的模型。场理论是“很好的”模型，因为它对我们来说是简单的和更直接的；尽管钟表模型对我们来说是丑陋的和粗糙的，但它能够起作用的事实很好地提示了我们：我们最喜欢的类比未必是代表物质世界运行规律的惟一真理。，克莱格强

调，当物理学家说自然界确实是按照一定规律发展时，他们实际上是在说模型是按照那个规律合乎逻辑地起作用的。

在这里我给出另一个多半被放弃但仍切实可行的比喻的例子。当我讨论电子 - 正电子对从纯粹的能量中产生时，我是根据能量转换成质量，即按照质能关系  $E = mc^2$  来做的。但是当狄拉克于 20 年代末首先提出有可能存在我们现在知道的反粒子时，他给出了另外一个模型。我们观察不到这些电子，因为它们无处不在，并且无法区分它们与它们周围的电子。如果一堵墙被刷成均匀颜色（比方说红色），那墙上的每一个点与其它点一样都是红的，并且没有一个点能暴露出来。一个普通（正能量）的电子可以被“注意到”，因为它不同于它临近的东西，这就像在一个红颜色的背景下一个蓝颜色的点很容易被注意到一样。

基于这个图像，当一个能量足够大的光子撞击一个负能量的电子并给予其足够的能量使其激发到一个正能量状态时，电子 - 正电子对便产生了。这时电子便变成了日常世界中的“真实”电子（一个蓝点），并在负能量的电子海中留下一个空穴（红色背景下的一个白点）。这个空穴具有带正电荷的一个电子的一切性质——一个正电子。例如，如果附近有一个正电荷，那所有负能量的电子将移向这个电荷。在那里它们拥挤在一起而不能够移动。挨着空穴的电子通过跳进空穴而向前移动，在其后留下一个空隙，沿着一条线依次类推。这个效应可以认为是空穴从正电荷移开，即被排斥，就像一个带正电荷的粒子那样。在负能量海中，电子的缺少提供了一个与背景的差别，即一个具有可分辨粒子特征的尖峰。空穴的行为恰似一个粒子直至一个正能量的电子掉进空穴后消失，并以电磁辐射的形式释放能量。

像麦克斯韦的齿轮和蜗轮一样，这个粒子 - 反粒子相互作用的模型，现在被看成是在纯粹能量中产生粒子的“正确”图像的

道路上的中间一步。这是一个完全合理、非常自恰的模型，可以用作计算的基础，并能够准确预言实验中所测量的正电子特性。请记住，同样存在另一个令人满意的模型，它把正电子解释为电子沿相反的时间运动。设想宇宙充满了负能量的电子可能令我们不舒服，但这是我们的问题，而不是宇宙的问题。在研究问题时，我们自由地选择自由度，而这些选择决定了我们归因于自然界的性质。类比是物理中所有的情形；只要我们所建立的模型是自恰的，并且预言能够被实验所证实，那我们就可以自由地选择我们所期望的任何类比和自由度。这把我带回在很多量子解释中，哪一个解释（如果有的话）可以看成是“最好的买卖”这个问题上来。

## ◆ 量子世界的整块方法

对我来说，似乎最好的答案是抽签。每一种解释都是一个可行的模型，每一种解释都为我们提供了有用的对世界运行方式的洞察。的确，把每一个量子解释看成是根据自己情况的独立的一个自由度，并利用温伯格的说法，我们随意地选择在任意特定情况下适合我们需要的解释是相当合理的。选错了解释那很抱谦——例如，如果你选择了哥本哈根学派对薛定谔猫的解释。但是如果你选对了解释——在这种情况下为多个世界的解释——那么所有的情形都变得很直接。一个好的物理学家应该在他或她的工具袋中带着每一种解释，当遇到一个特别的量子难题时，他或她应该选用合适的解释来解决手头的难题。

为证明这点，让我们快速地回忆一下几个现成的解释，并看一看它们怎样与 20 世纪下半叶量子物理最重要的进展——贝尔

法则相联系的。任何可以接受的对量子物理的描述都必须与阿斯派可特的实验结果相容——而且它们都是这样。

极好的哥本哈根学派的解释对贝尔法则和阿斯派可特的实验来说是没有任何问题的，因为尼尔斯·波尔和他的同事始终告诉我们，一个实验的结果取决于整个实验装置。在双缝的实验中，如果两个狭缝都是开的，我们得到干涉条纹。如果整个实验装置包含星系两面的光子，那么，我们必须考虑到这两面的光子，即使这涉及“超距离的鬼作用。”同样，如果现实是由测量的作用而产生的，根据这种解释，为了理解阿斯派可特的实验结果，我们必须做的是接受这样的事实：产生的现实不一定只是在测量正在进行的局域附近的现实，也应包含远处的现实，即从测量来的光信号还没有来得及到达处的现实。

与此一致的另外一种解释是世界可能是“确实实在的”，这是由大卫·玻姆和他的追随者提出的。如果是这样，根据玻姆，世界必须是不可分离的整体的一个态。因而，在一处的一动能够非局域地和即时地在远处产生一个响应。利用这两个解释以及与此有关的关于真实粒子具有真实性质（这种性质是受满足统计定律的控制波的影响）的思想，当考虑宇宙其它部分的态时，即时“通讯”影响实验结果，然而又设法不允许在两个人类观察者之间有包含有用信息的超光速信号的传递。

多个世界的解释是采用略微不同的形式，因为对所有可能的实验来说，它允许所有可能的结果是等同的。但是，正如我已经提到的那样，它肯定是非局域的，因为在地球这里一个量子事件的选择结果，即时地引起在远处星系上现实的多次复制（同样，远处星系上的变化即时地引起地球这里的现实分成多次复制）。但是，对自恰地解释量子现实它仍然是有效的。

在讨论对量子理论的解释时，约翰·贝尔写到：

这些可能的世界在多大范围内是虚构的呢？它们就像文学里的小说，在那里它们可以由人的想象随意地发明，在理论物理中发明者从一开始就知道工作是虚构的，例如在处理简化了的世界时，空间仅为一维或二维，而不是三维。经常的情况是直到后来当假设证明是错误的时候才知道使用了虚构。当他们是认真的时，当他们不是探索有意简化了的模型时，理论物理学家不同于小说家之处在于他们认为或许故事可能是正确的。\*

这样的希望是站住脚的。所有的模型都是根据我们选择那些自由度作为对现实的操作有意地简化了的；并且所有超出我们直接感觉范围的关于世界的模型都是虚构的，都是人类的随意发明。你可以自由地选择最吸引你的那一个量子解释，或放弃所有的解释，或你可以根据方便，或那个星期的日期、或一时的兴致购买下所有的包裹并使用一个不同的解释。现实在很大程度上是在你想让它是什么之中。

尽管如此，仍然是几乎每一个人都想知道“答案”。对真实的实际模型的探求驱使理论物理学家（同样激励其他的人们）去研究哲学或去同意某一个特定的宗教，我自己仍然具有这个追求，尽管我思维的逻辑部分告诉我这个寻求是徒劳的，并且所有我所希望发现的是我们这个时代的一个自恰的想象。因此，尽管这样，我仍打算向读者提供一桩我认为是 20 世纪量子世界市场上目前最好的买卖，即一个不仅能够清楚地带到整个非局域化交易的前沿，而且能够提供一组我认为即将转变物理学家思考物质

世界方法的类比和隐喻的诠释。

在《研究物理》一书中，马丁·克莱格提到许多在理解物理学家做什么方面证明是有益的类比。在那里工厂和工人、经济、熟悉的钟表模型，甚至亲属关系系统等都作了讨论。但是，他说“其它主要的类比，例如进化和生物的类比，在大部分物理中似乎起着非常小的作用。”

我相信这是一个现在正在纠正的历史性失误。正如我在《原初》一书中所讨论的那样，通过把像星系、甚至宇宙本身这样的物体比成活的，进化的生物天文学家和宇宙学家正在获得对世界的本质、它的起源以及它的结局等新的洞悉。与活的生物运行方式相关的关键概念也出现在我喜欢的量子小说中，即所谓的相互作用解释。我不主张它只不过是一篇小说；所有的科学模型简单地说是吉卜林风格的“井井有条的”小说，它给我们以我们理解现实世界正如何运行而没有必要给出关于宇宙的任何最终答案的感觉。如果你想要一篇目前你可以信赖的小说，并且在被其它更好的（或简单地说更时髦的）小说替代之前能够持续很长的时间，那么，我向你推荐的便是相互作用解释。现在是我该把我的旗帜钉到旗杆上的时候了，我们应该加入到那些从序言跳过所有章节的读者中来，并且提出一个确实从量子神秘中解除所有神秘的对现实世界的描述。



## 后 记

# 答案 —— 我们时代的想象

为了说服我们自己去理解量子世界的神秘，我必须解释的一个中心问题已包含我在序言中介绍的薛定谔猫的故事里了。还记得实验是按如下方式建立的：两只猫在空间上是分开的，但是每一只都在一个 **50:50** 几率波作用下与一个电子波函数的坍陷联系在一起，变成在两艘宇宙飞船中一艘或另一艘里的一个“真实”粒子。在两个密封包中的一个被打开，并且一个聪明的观察者注意到电子是否在里面的时刻，几率波的坍陷和那只猫的命运——不只是在这个密封包里猫的命运，而且同时在宇宙另一端另一个密封包里另一只猫的命运——便被确定。

至少，这是标准哥本哈根学派对两只猫之间关联的描述，并且不管你喜欢哪种解释，阿斯派克特实验和贝尔不等式表明一旦量子整体纠缠在一个相互作用中，随后它们的行为确实像在爱因斯坦“超距离鬼作用”作用下的一个单一系统的一部分。整体大于部分的总和，并且整体的部分之间通过反馈——即似乎是同时作用的反馈——相关联的。

这里是我们开始与活的系统作富有成效的类比。一个活的系统，例如我们自己的身体，必定大于组成它的部分总和。人类的身体是由几百万个细胞组成的，但是它能够做一大堆适当数量的细胞从来不能做的事情。细胞本身以它自己的方式活着，并且能够做组成它们的元素的一个简单化学混和不能够做的事情。对这两种情况而言，活的细胞及活的身体能够做这些有趣事情的关键原因之一，是存在着从细胞的一边到另一边、从身体的一部分到另一部分传递信息的反馈。进一步而言，在细胞内部这些反馈涉及传递原始材料到正确的地方，并利用它们组成复杂的生命分子的化学信息传递者，在一个粗略的人的水平上，即关于日常动作，例如为产生这句话我的手指在计算机键盘上敲合适键的运动方式，涉及我的大脑始终接收从例如视觉和触觉那里来的信息的反馈，并利用这些信息调整我身体的行为（在这种情况下，即确定我的手指下一步移到哪里）。

这确实是一个反馈，一个双向过程，不仅仅是从大脑来的指令命令手指向哪里移动。整个系统涉及评估手指现在的位置、它们正在运动的速度及方向、检查键上的压力是否正好、然后回来（在这种情况下，非常经常）纠正错误，等等。打字员根据这些反馈始终调整手指的精确运动方式是与你骑自行车时为了使你保持平衡而不摔倒自始至终做自动调整一样。如果你根本不知道这些反馈，并且对身体的不同部分通过一个通讯系统相连接没有任何概念，那么，在我手端这些长的肌肉和骨骼能够通过键盘上拨弄而“产生”出有智慧的信息将似乎是一个奇迹。同样，除非我们祈求某种形式的通讯和反馈，否则从一个原子两个相反而飞出的两个光子的偏振状态，按照阿斯波可特实验所表明的方式关联也似乎令人惊讶，一个很大的差异，也就是我们必须克服的一个障碍，是量子世界中反馈的即时性。根据相对论理论和电磁场

的量子化的观点，这个即时性可通过光本身的性质得到解释。这个观点是至今相对来说未被引起重视的惠勒－费曼电磁辐射模型，此模型也能够对万有引力作用规律给出惊人的洞悉。

## ◆ 充分利用质量

半个多世纪之前，费曼的这个未引起重视的模型指出，电磁辐射的特性，以及其与带电粒子的相互作用规律可以通过认真地看待麦克斯韦方程的两组解来解释。麦克斯韦方程用以描述在空间传播的电磁波，这就像穿到一个池塘表面的水波。第一组解，即“普通意义上的”解，描述波从加速运动的粒子向外传播并且随着时间向前传播，就像水波从石头掉入池塘那一点向外传播。第二组解（至今还被大部分忽略掉）描述波随着时间向后传播并聚向带电粒子，就像水波从池塘的边缘开始并聚向他塘的中心。如我在第二章中所讨论的那样，当对与宇宙中所有带电粒子有相互作用的两组波作适当的许可，大部分的复杂消除了，仅剩下所熟悉的把电磁力从一个带电粒子带向另一个带电粒子的普通意义（或“延迟”）波。由于这些相互作用的结果，每一个单个带电粒子——包括每一个电子——即时地知道其与宇宙中所有其它粒子的相对位置。随时间向后传播的波（或“超前”波）的一个可感觉到的影响是波提供了使每一个带电粒子成为整个电磁网中的一个整体部分的反馈。在地球上的一个实验室里拨弄一下一个电子，原则上在相距二百多万光年远的仙女座上每一个带电粒子立即知道发生了什么，即使在地球上拨弄一下电子所产生的延迟波，需要二百多万年才能够到达仙女座。

甚至惠勒－费曼吸收理论的技特者通常也不按这个方式来叙

述。传统的叙述（如果有关理论的任何东西能说成传统的话）是这样的：我们地球上的电子知道它相对于其它位置上（包括仙女座）的粒子“在什么位置”。正是反馈性质的核心使它按两种方式起作用。如果地球上的电子知道仙女座在哪里，那么可以肯定仙女座知道地球上的电子在哪里。反馈的结果——即地球上的电子必须看成是不可分离的而是充满宇宙的整体电磁网一部分的事实的结果——是由于在遥远星系上所有那些带电粒子的影响电子阻止我们试图去推动它，尽管没有任何带信息的信号能够在星系间以超光速传播。

这个对带电粒子为什么经受辐射阻力的解释与另一个以前提到过的、困惑物理学家很长时间的疑惑非常类似。为什么普通物体阻止其被推动？当物体被推动时，它们如何知道要提供多大的阻力？惯性是从哪里产生的？

伽里略似乎是第一位意识到不是物体的运动而是其加速度揭示了力作用其上的效应。在地球上，阻力（外作用力之一）总是存在的，并且使运动物体变慢（减速），除非你继续推动它。但是在没有阻力的情况下物体将永远地保持直线运动，除非用力拉它或推它。

这成为牛顿力学定律的基石之一。牛顿指出，除非受外力加速，物体在真空中以恒定的速度运动（相对于某个绝对的静止基准）。对于一个具有给定质量的物体，由一个力产生的加速度由力除以质量给出。

这个发现有趣的一面是计算中的质量同与万有引力有关的质量完全一样。这样做不是显而易见的。万有引力质量决定着一个物体施向宇宙中其它物体力的强度；惯性力，顾名思义，决定着一个物体被外部力、不仅仅是万有引力，而是任何外部力拖或拉的响应强度。因而它们是相同的。在一个物体中“物质的量”既

决定着它对外界的影响，也决定着它对外界的响应。<sup>\*</sup> 这已经看来像是一个起作用的反馈，一个连接每一个物体与浩大宇宙的双向过程。但是直至最近人们才有了反馈怎样起作用的清晰概念。

牛顿本人描述了一个巧妙的实验似乎表明，宇宙中确实存在着优先参照系，后来哲学家们说这个实验所表示的正好是所定义的绝对静止基准。在 1686 年《原理》一书中，牛顿描述了把一桶水挂在一根长绳上，缠绕绳子并把上端系紧，然后离开，水所要发生的情形。当然，随着绳子捻动，桶开始转动。起初，桶中的水表面保持水平，但是随着摩擦力逐渐地把桶的旋转传递给水本身，水也开始转动，并且由于“离心力”把水推向桶的边缘，水的表面呈现凹的形状。如果抓住桶使其停止转动，水将继续旋转并有凹表面。逐渐地水的旋转慢下来，并且水的表面变得越来越平，直至停止旋转并完全具有平的表面。

牛顿指出旋转水表面的凹形表明水“知道”它是在旋转。但它在相对什么旋转呢？桶和水的相对运动似乎完全不重要。如果桶和水都是静止的，那么没有相对运动，水是平的；如果桶是旋转的而水是不转的，尽管存在着水和桶的相对运动，水的表面仍然是平的；如果水是旋转的而桶是不转的，存在着二者之间的相对运动，并且水表面是凹的；如果水和桶都是旋转的，水和桶之间没有相对运动，水表面是平的。因此牛顿推断出，水“知道”它相对于绝对的空间是否在旋转。

在 18 世纪，哲学家乔治·伯克利提出了另一个解释。他强调所有的运动必须相对于某可见物体来测量。他指出在著名的水桶

- <sup>\*</sup> 不要被一个物体在月球上的重量比在地球上的轻的事实所迷惑；这不是因为物体本身的变化，而是因为月球表面的万有引力比地球表面上的万有引力要小。在月球上外界力变小，物体的惯性响应对应于那个减小的外界力，因此物体变轻。

实验中，似乎重要的是水是怎样相对于那时所知道的最遥远的物体——固定的恒星——运动。当然，现在我们知道在宇宙中恒星是我们地球相对近的邻居，在银河系之外有几百万其它星系。不过伯克利的解释仍然是成立的。如果水相对于遥远的星系是不旋转的，水桶中水表面将是平的；如果水相对于遥远的星系是旋转的，水的表面将呈凹形。同样，加速度似乎也是相对于遥远的星系，即相对于宇宙中所有物质的平均分布来测量的。因而，当你试图去推动一个物体时，它要估定其相对于宇宙中所有物质的位置并做出相应的响应。它有些像被万有引力固定在那里，这就是为什么万有引力质量和惯性质量是相同的原因。

惯性的确定是由物体对浩大宇宙的响应所产生的，这一想法常被称为马赫原理，它是在 19 世纪为纪念奥地利物理学家厄内斯特·马赫，用他的名字用作一个物理单位，即马赫数——速度相对于声速的大小。关于惯性的本质马赫也作过长时间的和艰苦的思考。

正如我已经提到的那样，马赫的想法——本质上是伯克利想法的延伸——对爱因斯坦影响很大。爱因斯坦强调因为惯性力在本质上是万有引力，因而二者确实完全一致；他曾试图把马赫原理——即整个宇宙对任一万有引力质量的反馈——并入到他的广义相对论之中。沿着这一条线，我们很容易作出一个朴实的论述：在所有遥远的星系（和其它任何东西）中，所有质量通过万有引力作用伸出手抓住地球（和其它地方）上每一样东西，例如，比方说，我书桌上这堆计算机软盘。当我试图移动一张软盘时，对于这个工作，我必须用的力的大小，是宇宙抓紧这张软盘力量大小的测量值。

把所有这些建立在一个可靠的科学基础上是非常困难的。软盘怎样即时地知道它应给出多大的力量阻止我去移动它呢？一个

有趣的可能性（以朴素的图象）是通过拨弄物体或改变其运动而向宇宙中发出某类万有引力波，这个波扰动了宇宙中其它物体，因而有一种回音返回，聚到被干扰的物体上并使其维持状态不变。如果信号——包括万有引力波——只能够以光速传播，那么等到回音返回，并且软盘决定应该怎样对其被推动作出响应时，这似乎需要无穷无尽的时间。

当然，除非有某种方法把时间对称的惠勒 - 费曼吸收理论的原理融于万有引力的描述中，以致于某些与反馈有关的万有引力波随着时间向后传播。由于惠勒 - 费曼电磁辐射理论是在爱因斯坦万有引力理论 30 年之后提出的，并且那时无人重视它，因而由马赫原理提出的这个疑难的解决不得不等了很长时间以后才建立在合适的数学基础上。

自爱因斯坦提出他的广义相对论以来，一直存在着是否它确实以令人满意的方式融于马赫原理中的争论。至少它确实向包含马赫原理的方式上前进了一段，因为在空间中一个任何位置处的物体的性质取决于在那个位置的时空弯曲曲率，而这个曲率取决于宇宙中所有物质的组合万有引力的影响。但是它仍祈求于决定时空弯曲的“信号”以多快的速度从一处传到另一处的问题。由于那些远距离的星系在运动着，它们的影响应该始终变化。这些变化以光的速度传播呢？还是即时的？如果是即时的，它们怎样传播的呢？

争论的一个有趣的方面是如果宇宙中有足够的物质而使时空依自己重力弯回，那么爱因斯坦方程只能够产生像有马赫影响的那类物质。在一个“开放的”宇宙中，即在各个方向无穷的扩展，方程从来不能够使得与有限数量的惯量相平衡。这以前作为一个反对声称广义相对论融入了马赫原理的论断，因为那时人们认为宇宙是“开放的”；正如我们在第二章中看到的那样，情况

已发生了变化，现在似乎有强烈的证据表明宇宙确实是“封闭的”。当然，这是为什么惠勒-费曼吸收理论本身现在被引起普遍重视的原因。

1993年，加州大学的朱书远（音译）发表了一篇说明风现在正吹向什么方向的论文。<sup>\*</sup> 按照对惠勒-费曼理论的一个变形的思路朱书远一直在研究贝尔不等式，所以我写信询问他还在做什么。结果是在其它事情中包括研究在存在万有引力情况下怎样做量子力学；这巧妙地把粒子物理中某些最新的思想与时间对称的惠勒-费曼模型结合起来，用以说明万有引力从哪里产生。在写信的时候（1994年3月）这个工作仅以加州大学“初印本”（编号 UCR-HEP-T117）的形式存在。它描述到，它像这类书籍中的任何一本一样能够向你提供最新的研究一瞥；在这本小册子里包含了如此多的思想，以致于不能让你错过而不提。

## ◆ 把万有引力串起来

首先，让我们做一个小的迂回，解释一下粒子物理故事的最一部分。本世纪90年代，粒子物理学家在探索像电子和夸克等粒子水平上物质内部情况的道路上不再停滞不前。在另外一个把“基本”粒子分开，以便发现其内部存在什么的历史过程的概述中，80年代中期某些粒子物理学家为一个新发现所迷住，即如果像夸克和电子之类的粒子由更小的称为弦的实体所组成，那么，它们的性质就能够得到解释。故名思议，这些“新”的实体不同于其它粒子所熟悉的弹性球模型之处在于它们具有长度，即

<sup>\*</sup> 《物理评论快报》1993年，第71卷，第2847页。



在一维上延伸，照字面上说像一根极短的弦。



图 25 弦的形成

弦有两种形式——闭环或开端

“极短”是一个有物理讲究的词。一个典型的弦仅有  $10^{-25}$  米长，因此，需要  $10^{20}$  根这样的弦一根一根接起来，才能跨过一个质子的直径。不存在直接的实验证实这样的弦是存在的。探测在这样尺度上相互作用的实验需要比地球上建立的任何可设想的粒子加速器所能提供的能量大得多的能量。但是，它们存在的可能性是基于一个有充分证据的粒子相互作用规律的理论；这部分地归结为把原始的量子电动力学和量子色动力学方法包含在一个能描述一切的理论之中。

我曾说过，没有任何理论和模型是描述粒子世界的“真理”，所有的理论和模型在试图提供一个我们能够理解的图像和我们能够利用的预言的模型的方面或多或少是成功的。基于这个标准，弦理论的确是成功的。尽管在粒子加速器的实验中，没有人看到过弦，或甚至是探测到弦，但像电荷这样的性质可以解释为“象”在弦的端点，粒子的相互作用可以根据弦的碰撞和连接、或分开来解释。甚至证明振动弦的封闭环像极小的弹性带，自动地具有需要作为引力子——即传递万有引力的粒子，等效于光子传递电磁力的方式——的性质。整个理论是自恰的、合乎逻辑的，并且（在数学上）同其它任何理论一样，是一个对世界如何

运行的极好解释。其不足之处是还没有方法应用牛顿的最终实验验证。但是这没有阻止理论学家试图用这个理论来解释已经知道的宇宙特性——这正是朱书远已经做过的。

朱书远对万有引力的研究是借助于以惠勒 - 费曼方法为基础的时间对称描述，试图解释在这个水平上的相互作用。这个过程清除了“场”（例如电磁场和万有引力场）作为独立实体的思想。粒子是以时间对称的方式——即以连续反馈的形式交换超前和延迟“信息”——与其它粒子相互作用；我们以前认为的连续场，例如万有引力场，是通过对涉及物质很小部分的所有相互作用取平均而建立的。连续的万有引力场是从对必须比所涉及的粒子尺度大的尺度上取平均的过程中出现的。如果粒子实际是由弦组成的，而弦的尺寸小到需要  $10^{20}$  个弦才能跨过一个质子，这意味着即使在一个质子的尺度上，万有引力似乎是非常光滑的和连续的。正如朱书远说“时空的弯曲只不过是编织在弦构成的世界毯中运动图案的反映。”

这个方法的含义之一是根据牛顿经典轨道粒子运动的描述来源于对粒子性质的统计平均。“在我们对强的颤抖取平均之后……弦在其余粒子轨道的附近作小尺度的颤抖。”这既与费曼的路径积分（对历史求和）方法相呼应，也与伊里亚·普里高津的从热力学发展而来的理解粒子世界的统计方法相呼应。在这里我们不能够详细探讨所有这些细节，因为这需要像这本书一样厚的另一本书。普里高津和朱书远却构造了对现实的描述，在这里首先出现统计，然后经典粒子轨道来源于统计。用朱书远的话说，不管在经典世界还是量子世界中，“力学的基础好像建立在统计之上……人们应当从统计中而不是用其它方法推导出力学”。

与热力学的联系是明显的。热力学中关键的概念是熵，即测量系统与平衡态接近程度的性质。朱书远的描述表明爱因斯坦运

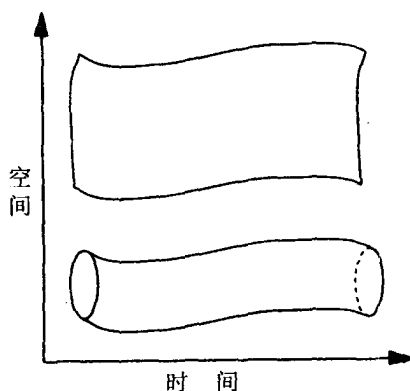


图 26 弦在时空中

当开端的弦穿过时空时，它们扫过“世界毯”；

当封闭环穿过时空时，它们扫过……世界管”

动方程是在最大熵的平衡条件下对粒子轨道的正确描述。但是，正如原始的惠勒 - 费曼理论（和试图把马赫原理并入广义相对论中）那样，必然存在着从今天弦产生的所有辐射全部地吸收到未来中，换句话说，宇宙是封闭的。1993 年，在一封给我的信中，朱书远简单地总结道：“经典力学描述的是平衡条件（因而在经典力学中不存在任何几率的说法）；基于力学描述的是涨落；路径积分是沿着对系统中大量弦求和的形式。”

对沿着近几年关于宇宙争论的任何人来说，都会有一个奖赏。爱因斯坦的宇宙描述——即广义相对论方程——包含一个常数，称为宇宙常数。它困惑了天文学家 70 多年。在爱因斯坦方程中没有任何方法能够预言这个常数的值，并且似乎它可以是任意值。然而关于宇宙在膨胀的观察表明它必须是非常非常接近零

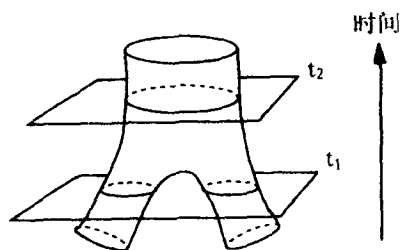


图 27 弦的两个环的运动

弦的两个环在时空中运动并合并，产生一条时空裤

的。即使一个小的宇宙常数也会对看到的宇宙膨胀方式产生很大的影响。然而，朱书远对万有引力的描述与爱因斯坦的描述在比一个弦尺度大得多的距离上是完全一致的，而朱书远的描述中根本不存在宇宙常数。

回到贝尔不等式，问题是实验表明两个分离的粒子之间有即时的关联。朱书远在《物理评论快报》中的论文指出：“两个空间分离粒子的即时关联可以通过第三个粒子建立，这个粒子与其中一个粒子通过超前相互作用关联，而与另一个通过延迟相互作用关联。”

这是他试图利用弦理论把惠勒 - 费曼方法并入到量子力学描述，然后并入到万有引力描述中的动机。他那时没有意识到的是这种方法的哲学基础已经由在西雅图的华盛顿大学的约翰·克雷默在他 80 年代发表的一系列未被人们注意的论文中铺垫起来。克雷默对量子力学的“相互作用解释”正是使用了这种方法；朱书远把类似的思想应用到弦理论和万有引力的成功有力地指出不久的将来这将是一个丰富的物理领域。当我告诉朱书远关于克雷默的工作时，朱书远说：“如果当时我知道在这些讨论中超前相

互作用已经作为一个可能时，那么在把惠勒 - 费曼时间对称电动力学的弦理论普遍化的研究过程中肯定会减轻我的担心”。

好，对于任何想得到一个由贝尔不等式、阿斯派可特实验，以及薛定谔的猫提出的疑惑的惟一“答案”的人，准备把所有这样的担心抛到一边去吧，因为在这里有一个能够提供一个在量子水平上世界如何运行的最好的、通用的图象的解释。

### ◆ 复杂性的简单方面

严格地说，惠勒 - 费曼理论的最初描述是一个经典理论，因为它没有考虑量子过程。尽管如此，至 60 年代研究者们已经发现确实存在着由相互重叠和相互作用波的复杂性引起的两种稳定情形，一种随时间向前传播，另一种随时间向后传播。这样一个系统必须终止于或由延迟辐射时起主导作用（像我们的宇宙），或由超前辐射起主导作用（等价于随时间向后退的宇宙）。在 70 年代初期，少数宇宙学家被为什么在我们的宇宙中应该有一个时间方向的困惑所迷住，提出了确实考虑量子力学的惠勒 - 费曼理论的一个变形。实际上，他们发展了量子电动力学的惠勒 - 费曼理论。伊瑞德·霍利和吉安特·纳里卡使用了路径积分方法，而保罗·戴维斯使用了另外一个称为 S - 矩阵理论的数学方法。数学的详细细节无关紧要，重要的是在每一种情况下他们发现惠勒 - 费曼吸收理论能够变成一个完全量子力学的模型。

宇宙学家对所有这些感兴趣的原因是下述一个建议，仍然只不过是一个建议：为什么我们的宇宙应该被延迟波支配着，因而应该存在着一个确定的时间方向的原因是宇宙本身表现出时间不对称（在过去是大爆炸，而在将来可能最终坍陷成一个大挤压）

的事实相关联。惠勒 - 费曼理论提供了一个这里和现在的粒子能够“知道”宇宙过去和将来状态的方法，这些“力界条件”可能选择了延迟波起支配作用。

但所有这些仍然仅适用于电磁辐射。由约翰·克雷默所做的巨大飞跃在于把这些思想延伸至量子力学波动方程（薛定谔方程本身）及描述几率波（这些几率波像光子一样以光速传播）的方程。他的结果出现在 1986 年发表的那篇详尽的评述文章中\*。这些结果几乎未产生多大的影响，以致于，例如，当朱书远于 1993 年基于弦理论发展他的思想时，他从未听说过去雷默的解释。

为了把吸收理论的思想应用于量子力学，你需要一个像麦克斯韦方程的方程，它能够有两组解，一组等价于流向未来的正能量，另一组描述流向过去的负能量。乍一看，薛定谔著名的波动方程不符合这一要求，因为它仅描述向一个方向的流动，（当然）我们解释为从过去到未来的流动。但正如所有的物理学家在大学里学过的（并很快忘记的）那样，这个方程被广泛使用的形式是不完备的。正如量子先驱者们自己意识到的那样，它没有考虑相对论的要求。在大多数情况下，这无关紧要，这就是为什么学物理的学生，甚至经常使用量子力学的人，都乐于使用方程的这种简单形式。但是适合相对论效应的波动方程的完整形式是与麦克斯韦方程非常相似的。特别，它具有两组解，一组对应于熟悉的薛定谔方程，另一组对应于一种描述负能量流向过去的镜像薛定谔方程。

在根据量子力学计算几率时，这个双重特性表现得最明显。一个量子系统可以用有时称为“态矢量”（实际上为波函数的另

\*“量子力学的相互作用解释”，现代物理评论，1986 年，第 58 卷，第 647 页。

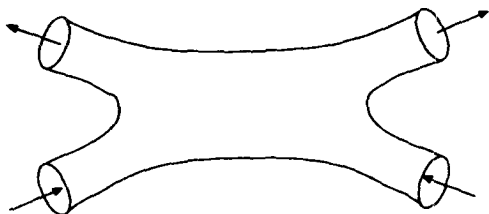


图 28 两个粒子的相互作用

根据弦理论，两个粒子之间的相互作用用世界量的合并与解作解释；这种图可以作得很复杂，涉及多个弦的环，这与计算电子的磁矩时所包含的意思相类似

一种名称)的数学表达式来描述，这个“态矢量”包含有关量子整体态的信息(位置、动量，及系统的其它性质，例如，简单地说可能是一个电子波包)。总的来说，这个“态矢量”包括普通数(实数)和虚数(含有  $i$ ——即  $-1$  的开平方——的数)的组合。由于明显的原因，这样一个组合称为一个复变量，它可写成实部加上(或减去)虚部。比方说，为计算出在一个特定的时间一个特定的位置发现一个电子的可能性，所需要的几率计算取决于计算出对应于这个电子特定状态的态矢量的平方。但计算一个复变量的平方不是简单意味着自己乘以自己，而是必须做出另一个复变量，一个称为复共轭的镜像形式，这通过变化虚部前面的符号：如果它是“+”则变成“-”，反之亦然。然后这两个复数相乘即给出几率。但对于描述随着时间变化系统如何变化的方程，这种变化虚部前面的符号，并找出复共轭的过程等价于变换时间的方向。早在 1926 年，由马克斯·玻恩所提出的基本几率方程本身就包含着与时间本质有关，以及与两种可能类型的薛定谔方程有关的显示形式，其中之一描述超前波，另一类表示延迟

波。在所有这些之后，了解到完全相对论形式的量子力学波动方程的两组确实正好是互相共轭的，对此，不应该感到惊讶。但是，按照传统的时间概念，在大约 70 年的时间里，由于谈论波随时间向后传播是“显然”无意义的，大部分物理学家多半忽略了两组解中的其中一组。

显著的寓意是：自 1926 年以来，每一次当一个物理学家做简单的薛定谔方程的复共轭，并将其与方程结合起来用以计算一个量子的几率时，他或她实际上正在考虑方程的超前波解，以及随时间向后传播的波的影响，但并没有意识到这一点。在克雷默对量子力学解释的数学中，根本不存在什么问题，因为数学——实质上即薛定谔方程——是与在标准的哥本哈根学派的解释中的完全类似。其差别照字面上说只是解释不同。正像在 1986 年发表的论文中（第 660 页）克雷默写到“场实际上只是为描述超距离作用过程的数学方便而已。”这正好是朱书远七年后独立得到的观点。因此，在说服了你（我希望是这样）这个方法是有意义的之后，让我们看一下它怎样把量子世界中的疑惑和佯谬解释过去。

## ◆ 与宇宙握手

克雷默描述一个典型量子“相互作用”的方法是依据在时间和空间中一个粒子与别处的另一个粒子的“握手”。你可以依据一个电子发射的电磁辐射被另一个电子吸收来想象这一点，尽管这个描述适合于由于相互作用以一个状态开始，以另一个状态结束的量子整体态矢量，例如从一个双缝实验的一面的一个源辐射的态矢量和被实验另一面的一个探测器吸收的一个粒子的态矢



量。使用普通语言作任一这样描述的困难之一，是怎样处理在时间上同时向两个方向进行，以及就日常世界中时钟而言即时出现的相互作用。克雷默通过有效地站在时间之外并依据某种类型的瞬时时间使用描述的语义装置做到这点。这只不过是一个语义设置，但它确实有助于直接地获得图象。

他是这样工作的。基于这个图象，当一个电子振动时，通过产生一个场试图辐射能量，而这个场是一个传播向未来的延迟波和传播向过去的超前波的时间对称组合。作为得到一个将要发生什么的图象的第一步，忽略超前波并跟随延迟波。延迟波传向未来，直至它遇到一个能够吸收场所携带能量的电子。吸收的过程涉及使正在做吸收的电子振动，这个振动产生出新的延迟场，它正好抵消了第一个延迟场。所以，在吸收者的未来，净效应是不存在延迟场的。

但吸收者也产生一个负能量的超前波，随时间向后沿着原来延迟波的路径传向发射者。在发射者处，这个超前波被吸收，使得原来的电子以发射第二个传向过去的超前波方式缩回。这个“新”的超前波正好抵消了“原来”的超前波，因而在原来的辐射发生的时刻之前不存在有效的辐射向过去传播。剩下的是一个连接发射者和吸收者的双波，它由携带正能量传向未来的延迟波的一半和携带负能量传向过去（沿着负时间的方向）超前波的一半构成。因为负负得正，这个超前波加到那个原来的延迟波上就好像是一个从发射者到吸收者传播的延迟波。<sup>\*</sup>

按照克雷默的话说：“发射者可以看成是产生一个传向吸收

- <sup>\*</sup> 如果你从称为“吸收者”的电子发射传向过去的辐射开始整个论述同样适用；相互作用解释本身没有指出哪个时间方向是优先的，但建议它与宇宙的边界条件相关联的，这个边界条件决定了时间方向离开了大爆炸。

者的‘给予’波。然后吸收者向发射者返回一个‘确认’波，相互作用通过一个穿过时空的‘握手’而完成。”\*但这仅仅是一个从贖时间观点来看的事件结果。实际上，这个过程是即时的、是迅速发生的。这是因为以光速传播的信号不需要时间就完成了任何旅程。实际上，对光信号来说宇宙中的每一点都是与宇宙中的每另外一点紧挨着的。不管信号是随时间向前传播还是向后传播是没有关系的，因为（在它们自己的坐标系中）它们不需要时间，即  $+0$  与  $-0$  是一样的。

在三维的空间中情况会更复杂，但是结论是完全一致的。考虑一个最极端可能的情况，在一个只仅含有一个电子的宇宙中，电子将根本不能产生辐射（如果马赫原理是正确的，它也不会有质量）。如果在宇宙中仅还有另外一个电子，那么第一个电子能够产生辐射，但它仅沿着第二个“吸收”电子的方向辐射。在实际宇宙中，如果物质在最大的尺度上不是均匀分布的，并且存在着在某些方向上比另一些方向上更小的吸收能力，那么我们会发现发射者（例如无线电天线）将“拒绝”向各个方向做同样强度的辐射。为证明这种可能性，实际上已通过把微波向宇宙不同方向发射的方法做过这种尝试，但是实验表明不存在电子不情愿向一个特定方向辐射的任何迹象。

克雷默努力强调他的解释，并没有给出不同于传统量子力学所能给出的预言，这提供了一个有助于人们清晰地理解在量子世界中事情是怎么进行的概念型的模型、一个在教学中可能有特别用途的，以及在对其它神秘的量子现象建立直观了解的过程中有很大价值的工具。在这方面，你不必觉得相互作用解释存在着与其它解释相比较的缺点，因为，我们已经看到它们中无一不是帮

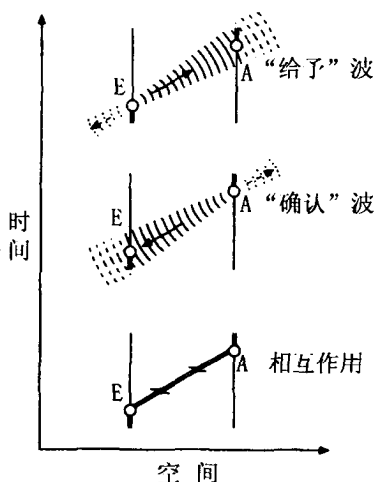


图 29 约翰·克雷默对“相互作用”的解释

从上向下看，一个发射者  $E$  向未来和过去发射一个“给予”波（上图）；这个波被一个吸收者  $A$  接收，它向发射者发射一个随时间向后传播和传向未来的回应“确认”波（中图）；除了发射者和吸收者之间的直接路径之外在宇宙中的任意处给予波和确认波互相抵消；在连接发射者和吸收者的直接路径上两个波互相加强，产生了一个量子相互作用（下图）；为解释所有的量子神秘这个图是你所需要的一切；它是我们时代的想象

助我们理解量子现象的概念型模型，而且它们都给出相同的预言。选择一个解释而不是另一个的惟一有价值的标准是：看它是否有效地帮助我们思考这些神秘的东西，依据这个标准，克雷默的解释必胜无疑。

首先，它不仅提供了比为什么存在着时间方向的提示更多的东西，而且它把所有物理过程建立在了同等的基础上。不必要对观察者（有智慧的或其它的）或对测量仪器指定一个特殊的状

态。这一下子就消除了持续了半个多世纪之久的关于量子力学意义的大部分哲学争论的基础。超越了关于观察者角色的争论，相互作用解释确实解决了那些经典的量子神秘。我将只给出两个例子——克雷默如何处理双缝实验，以及如何对阿斯派可特实验给出有意义的解释。

如果我们准备解释双缝实验的神秘之处，我们也应该做到善尽美解释一下这个神秘之处的最后说法——约翰·惠勒对这个题目的一种变形，即第三章讨论过的“延迟选择”实验。在这个实验的描述中，一个光源发射一系列通过双缝实验的单个光子。在另一边是一个能够记录光子到达位置的探测屏，屏能够折倒，在这种情况下光子继续前进，使它们穿过聚焦在狭缝上的一对望远镜（一个望远镜聚焦一个狭缝）中的一个或另一个。如果屏是倒的，望远镜将观察到穿过狭缝的单个光子（一个光子穿过一个狭缝），此时没有干涉条纹。如果屏是竖起来的，光子似乎穿过两个狭缝，并在屏上产生干涉条纹。屏可以在光子通过狭缝以后再折倒，因此，光子决定采取什么样行为的图案似乎由它们做出决定之后所发生的事件决定。

根据克雷默对这个事件的描述，一个延迟的“给予波”（为讨论的目的由“臆时间”检测）穿过实验中两个狭缝。如果屏是竖起来的，波由探测器吸收，引发出一个超前的“确认波”，向后传播并穿过两个狭缝到达光源。沿着两条可能的路径（实际上，如费曼强调的那样，沿着每一条可能的路径）最后的相互作用形成了，因而出现了干涉条纹。

如果屏是倒的，给予波继续前进到达瞄准狭缝的两个望远镜。由于一个望远镜只瞄准一个狭缝，因此，只有可能由给予波与望远镜本身相互作用产生的任何确认波向后穿过望远镜所瞄准的狭缝到达光源。当然，这个吸收事件必须涉及一个整个光子而

不是一个光子的一部分。。尽管每个望远镜可以向后发射一个确认波穿过各自的狭缝，但是光源必须（随意地）“选择”接收哪一个波，结果是单个光子通过单个狭缝的最后相互作用。演化的光子态矢量“知道”屏是否在竖起来或要倒下去，因为确认波确实随时间向后传播穿过仪器，但是，如同以前，整个相互作用是即时的。

观察者决定要进行哪个实验的问题不再重要。，观察者确定了实验构型和边界条件，相应地相互作用形成。进而，探测事件涉及一个测量（这不同于任何其它的相互作用）的事实不再重要，因此，观察者在这个过程中没有起什么特殊作用。。

你可以自娱自乐，给薛定谔的猫（和维格纳的朋友）找出一个类似的解释。再一次，重要的是最后的相互作用只有一种可能性（死的猫或活的猫）变成现实，并且因为“波函数的坍陷”不一定等到观察者看到盒子的里面，因此，不存在猫一半是活的一半是死的时间。相互作用解释是多么的有力和直接的标志，是我确信你能够为你自己找出详尽的解释，而不需要我把它说出来。

关于贝尔不等式、爱因斯坦——波多尔斯基——罗森佯谬，以及阿斯派可特实验又怎样解释呢？毕竟，它们在 80 年代再一次引起了人们对量子力学意义的兴趣。从吸收理论的观点，对它们的理解是不存在什么困难的。我们设想（仍根据时间想象）将要发射两个光子的处于激发态的原子向各个方向并相应地各个可能的偏振态发射给予波。仅当确认的超前波从一对合适的观察者向原子随时间向后发出后，相互作用完成了，并且光子实际发射了。一旦相互作用完成，光子被发射和被观察，产生了一对探测事件，在那里光子的偏振态是互联的，尽管它们在空间上是远离的。如果确认波不与一个允许的偏振关联相匹配，那么，确认波不能够证实这相同的相互作用，因而它们不能够建立起握手。

从时间的观点，一对光子只有在它们被吸收的安排完成以后才能够被辐射，并且吸收安排本身决定了辐射的光子的偏振状态，尽管在吸收发生之前它们不能够被辐射。事实上，原子辐射的光子状态不符合探测者所允许的那种吸收是不可能的。的确，在吸收模型中原子根本不能够辐射光子，除非已经构成使它们被吸收的状态。

同样，对于飞向星系的两个相反端的两只猫，情况是相同的。确定电子在哪半个盒子中，由此确定哪一只猫是活的？哪一只猫是死的？这种观察随时间向后瞬时地（应该说，即时地）反射到实验的开始，这就决定了在猫被锁在它们的飞船里（没有被观察）的整个过程中猫的状态。

如果在特殊的时间链中存在一个特别的连接，那么它不是结束时间链的连接。它是事件链开始时的连接，那时发射者在从给予波那里接收到各种确认波之后把其中之一的确认波加强，使能够把这个确认波转换成作为一个完成的相互作用的现实。这个即时的相互作用在结束时不存在“什么时候”的问题。

在解决量子物理中所有疑惑方面的巨大成功是以接受似乎与我们的普通感觉相背立的思想为代价的。这个思想即为部分量子波随时间向后传播。乍一看，这是与原因总是在它所引起的事件之前这一普遍直觉完全不一致的。但仔细观察一下，就会发现这种由相互作用解释所要求的时间传播根本不违背日常因果关系的概念，同样所有这些跨跃宇宙的即时握手并不一定消除我们人类最骄傲的品性，即我们自由的愿望。

## ◆ 花时间来研究时间

在日常世界中，很显然结果总是在原因之后。当我在我的脑海里制订出下一句话是什么之后，以便在计算机上轻敲键，不一会儿相关的字母出现在计算机屏幕上。（喂）这可不是单词首先出现在屏幕上，然后我去读它，再去制订我要说什么。当借助于随时间向后传播的超前量子波产生一个即时的握手时，并不需要对日常世界中因果逻辑关系产生什么影响。

克雷默建议存在着两种因果关系，他称之为“强的”和“弱的”因果关系。“弱因果关系原理”适用于日常世界（“宏观”世界），它是我们关于时间普通感觉的概念基础。可表述为：在任意坐标系中，宏观的原因必须总是在其宏观结果之前。宏观信息从不可能以超光速传递，或随时间向后传递。大部分人会赞同这点。克雷默也定义了“强因果关系原理”，可表述为：一个原因必须总在其所有结果之前，因此，即使在微观的尺度上（即量子尺度上）信息也不能够随时间向后传递或超光速传递。这经常被认为是弱因果原理的一个显然的推广；但克雷默指出实际上不存在强因果关系的实验证据。的确，存在着这样的实验证明——贝尔不等式的试验——清晰地表明，不管你赞同哪种量子力学解释，“微观”的因果关系都是不成立的。在吸收理论中，强因果关系总是不成立；但只要吸收总是沿着未来的方向，弱因果关系是不违背的。

你不会感到惊讶相互作用处理时间的方式不同于普通感觉，因为相互作用解释明显地包含相对论效应，并且我们已经看到，当它描述时间时它是多么地非常识性。相反，哥本哈根学派的解

释是以经典的、“牛顿”的方式处理时间的，这正是在试图用哥本哈根学派的解释来解释像阿斯派可特实验这样的实验结果时不一致的中心所在。如果光速是无限的，问题将会消失；这将不存在着涉及贝尔不等式过程的局域性和非局域性描述之间的差别，并且普通的薛定谔方程将是描述事情发展的精确方程——实际上，当光速是无限时，普通薛定谔方程是正确的“相对论”方程。克雷默实际上已经发现了一个在相对论和量子力学之间的相当精巧的联系，并且这正是他的解释的中心所在。

即时的握手怎样影响可能出现的自由意志的呢？乍一看，好像任何东西都是由过去和将来之间这些通讯固定的。发射的每一个光子已经“知道”它将在什么时候在什么地方被吸收；以光速流过双缝实验中狭缝的每一个量子几率波已知“知道”在另一侧什么类型的探测器在等待它。从一个光子的角度来看，我们面临着一个冻结的宇宙图象，在那里时间、空间不再有任何意义，万物的过去、将来如同现在一样。

但是，请记住，这是一个光子的观点，或以光速运动的任何其它东西（例如量子几率波）的观点。对于像人类的宏观物体，时间是足够的实在。在我的坐标系中，我仍有时间决定下一个句子将是什么，是否现在休息一下吃午饭或 20 分钟以后再休息。我做的决定可能产生一个即时量子联系的连结网，因而一个光子，如果它会说话的话，会告诉我，我的这些决定将怎样影响我未来的生活；但是弱因果关系原理使我免于任何这样的从微观世界到宏观世界的信息泄漏。在我的时间坐标中，这些决定是由真正的自由意志作出的，并且不确切知道它们的结果。（在宏观世界中）做出引起微观世界中即时现实的这些决定（人类的决定及像涉及原子衰变的量子“选择”）需要时间。我们的经历更像克雷默的“臆时间”，而不像作为量子相互作用基石的即时握手。



至少这是我怎样看待它。就像文中其它任何东西一样，这仅仅是一个类比、一个想象或一个模型。你可能会发现另一个考虑我们日常时间感觉怎样与即时的量子世界相联系的方法。沿着约翰·贝尔的调皮的建议，你可能倾向于接受根本不存在像自由愿望之类的事情，相互作用解释的成功证明了任何事情都是预先注定的（从人类的观点看），以及我除了写这本书外别无选择，并且你除了读它之外也别无选择。尽管在微观的水平上宇宙的非局域性可能使我们不舒服，可能使我们很难理解日常所说的过去、现在和将来之间的关系，但是请记住，这不是由相互作用解释所给出的特征。它是一个实验事实，在任何对量子现实给出的满意解释中所必须考虑的一个事实。此外，把时空不同部分即时连成一个相关的整体，似乎相当符合在第二章中讨论的连续时空“历史”的相对论的图象。相互作用解释的成功多半根基于它公正地面对这个问题的方法，它从由证明贝尔不等式的实验所揭示的量子世界的即时性向外作为扩充。

我再次强调所有这样的解释是想象，是有助于我们在量子水平上给出事物是怎样发展的形象图象以及作可验证的预言的拐杖。它们（它们中的任一个）不是惟一的“真理”；但是它们是“实在的”，尽管它们之间不互相一致。克雷默的解释是我们时代一个极好的想象；它易于用来构造事物是如何发展的物理图象；对下一代科学家来说，它将会幸运地代替哥本哈根学派的解释作为量子物理的标准考虑方法。

它是向初学者（即对还没有被哥本哈根学派解释所误导的任何人）讲授量子物理的一个极好的方法。正如克雷默所说：

由于哥本哈根学派的解释在讲授量子物理的 50 年中的传统角色，要偏离它可能是特别困难的。

然而对物理过程的新解释的价值不应该被低估。在物理学许

多领域中的经验表明：进步以及新的思想和方法是受清楚地想象物理现象的能力所激发的。

早在 1977 年，在讨论根据原则上涉及整个宇宙的相互作用来理解量子实验结果的困难时，弗莱德·霍利评论到：“终有一天成功会来到，但是，它仅来自于物理学的非局域形式，一种目前还不流行的物理学。”\* 霍利的预见性评论以及克雷默的希望有充满在像朱书远关于万有引力本质的工作中的征兆。这不是量子力学故事的结束，而是量子力学故事中一个新章节的开始。最后我用一个权威性的讽刺来结束这个故事的叙述。

在 20 世纪所有伟大的物理学家当中，那位最清楚最经常表述量子力学的标准形式及量子力学的本质不可理解性的，这就是理查德·费曼。例如在 60 年代中期，他在《物理定律的特性》一书中写到：

曾有一段时间报纸上说只有 12 人理解相对论。我认为没有这样的一段时间。可能有一段时间只有一人懂得相对论，因为在他的论文发表之前他是惟一懂得它的家伙。但是在人们阅读了他的论文之后，许多人以这种或那种形式懂得了相对论，肯定不止 12 人。另一方面，我认为可以完全有把握地说没有人理解量子力学。……如果你有可能做到的话，不要再对自己说：“那么它怎么会那样呢？”因为你会“沿着排水沟”进入一条黑胡同里，从那里还没有人逃出来过。没有人知道它怎么会

\* 霍利著，《宇宙的十个面》（伦敦，荷曼，1977）第 128 页。

是那样。<sup>\*</sup>

当然，具有讽刺意味的是，从黑胡同逃出的办法是来自于费曼在做出上述评述 20 年前所提出的光的理论。当然又过了 30 年它才变得清晰。它可能仅是我们时代的一个想象，但是约翰·克雷默的相互作用解释的伟大之处是它的确允许你询问“那么它怎么会是那样呢？”的问题，并且提出一个不涉及“沿着排水沟”行进的简单和容易理解的答案。关于量子力学的任何解释你还有什么要问的吗？

• 第 129 页；伦敦：BBC 出版，1965 年（基于 1964 年给出的讲稿）；1967 年由麻省工学院出版社重新印刷，以后多次印刷。



## 参 考 书 目

除了我在正文中所给出的特殊参考文献（它们通常是比较专业的书籍和科学论文），下面这些是我发现在建立关于量子现实的意义及物理学做什么的思想时特别有益（在某些情况下，特别有影响）的书籍。在这个参考书目中我也列举了我自己的几本书籍，因为它们展现了在过去的 20 年中我自己的思想是如何发展和变化的。

**David Albert, 《量子力学及其经验》（Cambridge, Mass Harvard University Press, 1992）**

本书论述了量子力学的“多种思想”解释的情况，但它使我完全不信服。如果你对这个思想感兴趣，这里是发现这个论断对你有多大说服力的地方。

**Hans Von Baeyers, 《操纵原子》（London: Viking, 1992）**

本书给你一个原子和分子世界的绝妙体会。它包含了单个原子、DNA 分子，以及微观世界中其它奇观等极其精彩的照片。但是请留意某些错误，其中包括氦原子结构的“解释”。

**Jim Baggott, 《量子理论的意义》（Oxford: Oxford University Press, 1992）**

这是一本由一位物理学家所著的有些专业性的书。作者至 1987 年才惊讶地发现贝尔法则，此前，由于作者不知道量子非

局域性的重要性，当你阅读本书的时候，会为他刚刚发现的所有神秘的朴实天真的感觉所吸引。

**Ralph Baierlein, 《从牛顿到爱因斯坦》 (Cambridge: Cambridge University Press, 1992)**

由于这本书面对的不是科学专家的大学生（因而适合于对这个题目感兴趣的任何人），它介绍了光作为粒子和波的双重性，总结了狭义相对论的理论。它仍然是一本教材，但比大多数教材更易理解。

**J.S.Bell, 《量子力学中可以表述的和不可以表述的》 (Cambridge: Cambridge University Press, 1987)**

这是约翰·贝尔关于量子理论中观念的和哲学的问题的论文全集。某些问题是很容易理解的，但另一些专业性很强。

**Paul Davies, 《其它的世界》 (London, Pelican, 1988; Original edition London: J.M.Dent, 1980)**

这是一本很好地综述了量子概念，但又稍有些过时。本书著于阿斯派克特实验之前。作者给出了“多个世界”理论的极好总述，讨论了使世界按其方式运行的人类“巧合”。

**Paul Davies 和 J.R.Brown 编, 《原子中的幽灵》 (Cambridge: Cambridge University Press, 1986)**

本书给出了“马嘴式”的描述量子理论意义的不同解释。它基于 BBC 电台一个系列节目的采访记录。著名专家以相同证据为基础，争论互不相容的可能性。这对围绕物理学家对量子力学意义理解的困惑给出了一个极好的例子。

David Deutsch 《现实网络》 (London: Viking, 1995)

作者给出了一个从 High Everett 的 “多个世界” 理论发展而来的量子现实的很个人的观点。书中包括了某些关于时间本质的极有兴趣的思想。

J. W. Dunne, 《一个关于时间的实验》第三版 (London: Faber & Faber, 1934)

本书给出了一个关于时间本质略带神秘的讨论, 它清楚地表明: 为了测量日常时间的 “流动” 需要第二个时间层。为测量第二层时间, 需要第三个时间层, 以此类推直至无穷。

C. W. F. Everitt, 《詹姆斯·克拉克·麦克斯韦》 (New York: Scribner's, 1975)

这是一本易懂可读地介绍麦克斯韦生平及其工作的书。

J. Fauvel, R. Flood, M. Shortland 及 R. Wilson 编, 《让牛顿来吧》 (Oxford: Oxford University Press, 1988)

这是一本非常通俗易懂的关于牛顿及其工作的文章集。

Richard Feynman, 《量子电动力学: 光与物质的奇怪理论》 (London: Penguin, 1990)

这是一本于 1985 年出版的书的最近期的一次重印刷, 它基于费曼于 1983 年在洛杉矶对非科学研究者所做的一系列讲稿。这是费曼形象化地解释量子物理的一个极好的例子。

Richard Feynman, 《物理定律的特性》 (London, Penguin, 1992)

这是一本于 1965 年出版的书的最新版，它基于 BBC 电台的一系列广播稿。包括量子理论一章，但是整本书值得一读——是地地道道的费曼“声音”。

**Rhchard Feynman**, 《六个容易部分》 (Reading, Mass: Addison - Wesley, 1995)

本书摘自费曼的著名物理课程的六个引言的讲义（见下），包括量子物理的引言。

**Richard Feynman, Robert Leighton 和 Matthew Sands**, 《费曼的物理讲义》卷 III (Reading, Mass: Addison - Wesley, 1965)

本书是费曼对量子理论的著名讲义。一本大学课本，适用于对这个课题感兴趣的任何人。

**Richard Feynman 和 Steven Weinberg**, 《基本粒子和物理定律》 (Cambridge: Cambridge Vriversity Press, 1987)

本书是八十年代中期，为纪念保罗·狄拉克在剑桥所作的两个报告的手稿。它提供出物理学家是如何思维的极好说明。

**Kathleen Freeman**, 《苏格拉底前的哲学家的助手》 (Cambridge, Mass: Havard Vriversity Press, 1983)

包括第一章中提到的思培多克勒的部分工作。

**James Gleick**, 《天才》 (Lordon: Ltile, Brown, 1992)

本书以二十世纪的物理学为背景，全面地介绍了理查德·费曼的生平和工作。



**John Gribbin, 《寻找薛定谔的猫》 (New York: Bantam and London: Black swan, 1984)**

不要管你从书的哪一部分读起，都会出现了最好的引导非专业人员进入量子理论的故事。（姑且让我这么说）

**John Gribbin, 《寻找大爆炸》 (New York: Bantam, and London: Black Swan, 1986)**

本书在量子物理思想的前提下，给出了宇宙起源的标准模型。

**John Gribbin, 《寻找时间的边缘》 (New York: Harmony, and London: Black Swan, 1992)**

本书讲述了相对论理论的出现过程及其意义。其中包括对时间的理解，以及时间行进的可能性。

**John Gribbin, (起始) (New York: Little, Brown, and London: Viking, 1993)**

有关宇宙起源的最新思想以及宇宙是按符合惠勒 - 费曼吸收理论的方式封闭的证据。

**John and Mary Gribbin, 《时间与空间》 (London: Dorling Kindersley, 1994)**

本书试图以一个易理解的、文字简明、插图丰富的方式提供一个对爱因斯坦相对论理论的简单解释。这可能有助于澄清《寻找薛定谔的小猫》第二章中所表达的某些思想。

**Herman Harkon, Anders Kalqvist 和 Vno Svedin 编, 《隐喻机器**

及工具》（Berlin: Springer – Verlag, 1993）

这是一本由 1990 年 5 月在瑞典阿贝斯库举行的一个围绕机器及其在各方面作为隐喻（包括科学世界观）的研讨会发展而来的论文集。它主要是有关大脑的，但与我在《寻找薛定谔的小猫》第五章中讨论的主题也有关。

Nick Herbert, 《量子现实》（London: Rider, 1985）

一本可读性强但略为过时的书，阐述了量子理论的各种不同解释。

Roger Jones, 《隐喻物理学》（Minneapolis, Minn: Vniversity of Minnesota Press, 1982）

注意物理学家思考世界的方法，书中对有关模型与现实之间关系的平常假设提出质疑。

Martin Krieger, 《研究物理学》（Bloomington, Ind: Indiana Vniversity Press, 1992）

这是一本拓宽思路的书。一本比我所知道的任何讨论都更清楚有力地讨论了在多大范围内物理学不仅是基础，更是一种类比和隐喻（换句话说就是虚构）的系统的论述。本书推理严密，需要仔细地阅读。如果你努力地阅读了它，你就再也不会以同样的角度来看待科学的世界。

Thomas Kuhn, 《科学革命的结构》（Chicago: Vniversity of Chicago Press, 1970）

这是一本关于科学家工作和思考方法的经典之作，以及科学家如何并且为什么经常地改变着他们的看法。

**Jean - Pierre Maccry, 《牛顿 理解宇宙》 (London: Thames & Hudson, 1992)**

这是一本首先出版于 1990 年的法文著作的英译本。它是迄今为止最好的一本关于牛顿及其工作的“快速导读”书。在这本总共 144 页的袖珍型书中，文字浅显易懂，并配有彩色插图。

**Dugald Murdoch, 《尼尔斯·玻尔的物理哲学》 (Cambridge: Cambridge Vriversity Press, 1987)**

这是一本对玻尔的量子理论贡献做学术性评价的书。特别是对我们现在称为哥本哈根学派思想的精确含义的评述。它并不总是通俗易懂的，而是有探求事情本质的地方。

**Heina Fagels, 《宇宙密码》 (London: Michael Joseph, 1982)**

这是一本清楚有趣地介绍量子世界的不可思议之处（特别是哥本哈根学派思想）的书。它写于由阿斯派可特实验结果所引起的对其它思想感兴趣的热潮刚刚涌起之前。由具有交流天赋的著名物理学家所著。

**Roger Penrose, 《皇帝的新想法》 (Oxford: Oxford Vriversity Press, 1989)**

本书为建立一个真正的智能计算机也无法建立的思想，作者带领读者沿着大部分现代物理学，包括量子理论，经过了一段旅程。一些部分是很艰涩的，另一些又是很令人欣喜的，常常引起争议，但这本书很值得一读。

**Andrew Pickering, 《构造夸克》 (Edinburgh: Edinbecrgh Vriver-**

sity Press, 1984)

这是一本介绍了现代粒子物理发展史的引人入胜的书。尽管读来艰涩，但它提供了事情的发展过程和最后的理论。它不是来自于科学家发掘了隐藏的真理，而是从他们的实验和理论中产生了现实真相。仔细阅读将使人受益匪浅。

**William Poundstone, 《推理的迷宫》 (New York: Anchor Books, 1988)**

本书浅显易懂地介绍了物理学家思考世界的方法。

**Ilya Prigogine 和 Isabelle Stengers, 《从混沌中产生规则》 (London: Heiremann, 1984)**

本书很好地介绍了普里高津关于复杂性及时间方向的思想，但某些地方不易读懂。一个更难理解的作品是普里高津自己所著的《从现在到未来》一书。由普里高津和斯忒格斯所著的一本新书将于 1995 年出版。

普里高津的思想在一系列充满引起兴趣的思想的著作中已作了详尽地阐述。但我发现这些著作在某些地方相当难以理解。幸而，与量子世界可能相关的这些思想由 **Alastair Rae** 在他《量子物理：幻觉还是现实？》（见下）一书中做了特别清楚的讨论。因而我推荐这本书做为快速浏览书目。

**Alastair Rae, 《量子物理：幻觉还是现实？》 (Cambridge : Cambridge University Press, 1986)**

这是一本标准的相当传统的非专业人员的读物。它包括对 I · 普里高津工作的讨论，但比普里高津自己的著作更易理解。

**Henry Stapp** 《精神·物质和量子力学》（Berlin: Springer - Verlag, 1993）

书中虽然有些地方不易理解，但这是斯坦普就量子理论及意识问题所做的论文集。由于他的思想在不同时期以略有不同的方法表述出来，因此，有耐心的读者最终能够领略到问题的精髓。如果读者想更深地探究我在第四章所涉及的精神与物质的神秘，这本书是值得花时间一读的。

**John Tyndall**, 《论光》（London: Longman, 1873）

这是一本读来令人愉快的书，是基于作者在美国访问期间所给出的讲稿。这是由一位能意识到天空为什么是蓝色的人向我们开启的维多利亚时代科学世界的一扇引人入胜的窗扉。他在这本书的第 152 页解释了他的思想。

**Rokert Weker**, 《科学先驱者》第二版（Bristol: Adam Hilger, 1988）

本书对第一位诺贝尔奖获得者（1910 年的威廉·伦琴）到 1987 年的亚历山大·缪勒和乔治·培德诺兹之间的每一位诺贝尔物理学奖获得者作出了简略速写。

**Richard Westfall**, 《永不停歇》（Cambridge: Cambridge University Press, 1980）

这是一本牛顿的权威性传记。1993 年由 CUP 出版了这本书的简写本，名为《艾萨克·牛顿的一生》，本书浅显易懂，但阅读原文你会受益更多。

**John Wheeler** 和 **Wojciech Zurek**, 《量子理论和测量》（Prince-

**ton: Princeton University Press , 1983)**

这是一本在研究量子理论意义的历史中极好的经典论文集。爱因斯坦——波多尔斯基——罗森的论文、薛定谔猫的首次出现、玻姆、贝尔以及阿斯派克特都包括在内，还有许多其它的人（但是，缺少克雷默）和少量的评述。它是相当专业的，值得在图书馆里深入研究。

**Arthur Zajonc, 《捕捉光》 (London: Bantam, 1993)**

本书饶有趣味地介绍了光的历史，包括艺术家和诗人，以及科学家对光的感受。